T.C.
MARMARA ÜNİVERSİTESİ
FEN BİLİMLERİ ENSTİTÜSÜ

HİBRİD GÜÇ ÜRETİM SİSTEMİNİN MODELLEMESİ, ANALİZİ VE NEURO-FUZZY KONTROLÖR KULLANILARAK SİSTEM PERFORMANSININ İYİLEŞTİRİLMESİ

Yüksel OĞUZ

(Teknik Öğretmen, MSc.)

DOKTORA TEZİ

ELEKTRİK EĞİTİMİ ANABİLİM DALI

DANIŞMAN

Prof.Dr.K.R.İrfan GÜNEY

II.DANIŞMAN

Yrd.Doç.Dr.Hasan ERDAL

İSTANBUL 2007

T.C.
MARMARA ÜNİVERSİTESİ
FEN BİLİMLERİ ENSTİTÜSÜ

HİBRİD GÜÇ ÜRETİM SİSTEMİNİN MODELLEMESİ, ANALİZİ VE NEURO-FUZZY KONTROLÖR KULLANILARA SİSTEM PERFORMANSININ İYİLEŞTİRİLMESİ

Yüksel OĞUZ

(Teknik Öğretmen, MSc.)

(141201220020323)

DOKTORA TEZİ

ELEKTRİK EĞİTİMİ ANABİLİM DALI

DANIŞMAN

Prof.Dr.K.R.İrfan GÜNEY

II.DANIŞMAN

Yrd.Doç.Dr.Hasan ERDAL

İSTANBUL 2007

TEŞEKKÜR

Bana üniversite ve bilim kapısını açan, akademik düzeyde bir çalışma ortamına sokan, bu tezin hazırlanması sırasında yoğun bir çalışma ortamında benden hiçbir zaman bilgisini ve yardımını esirgemeyen, iyi ve kötü günümde desteğini her zaman yanımda hissettiğim çok değerli ve saygıdeğer danışman hocam Sayın, Prof.Dr. K.R.İrfan GÜNEY'e teşekkürü bir borç bilirim. Kıymetli bilgi ve tecrübeleri ile bu tezin hazırlanması ve kontrol aşamasında bana her zaman ışık tutan, hiçbir zaman değerli zamanını ve bilgisini esirgemeyen değerli danışman hocam Sayın, Yrd.Doç.Dr.Hasan ERDAL'a teşekkür ederim. Tezimin hazırlanması aşamasında çeşitli konularda fikir ve yardımlarını benden esirgemeyen değerli mesai arkadaşım Gökhan KOÇYİĞİT'e teşekkür ederim. Ayrıca, bu tezin her aşamasında bana gösterdiği sabır, ilgi ve verdiği her türlü destek için çok değerli ve sevgili eşim Bilgiser OĞUZ'a teşekkür ederim.

İÇİNDEKİLER

TEŞEKKÜR ..... **I**

İÇİNDEKİLER ..... **II**

ÖZET ..... **VI**

ABSTRACT ..... **VIII**

YENİLİK BEYANI ..... **X**

KISALTMALAR VE SEMBOLLER LİSTESİ ..... **XII**

ŞEKİL LİSTESİ ..... **XVIII**

TABLO LİSTESİ ..... **XXVI**

BÖLÜM I GİRİŞ VE AMAÇ **1**

BÖLÜM II GENEL BİLGİLER VE TEORİK YAKLAŞIMLAR **6**

II.1 KAYNAK BİLGİLERİN İRDELENMESİ **9**

BÖLÜM III HİBRİT GÜÇ ÜRETİM SİSTEMİ BİLEŞENLERİ **15**

III.1 AC DIESEL GENERATÖRLER **16**
III.1.1 Hibrid Güç Üretim Sistemlerinde Diesel Generatör 17
III.2 DC DIESEL GENERATÖR **18**
III.3 FOTOVOLTAİK PANELLER **18**
III.3.1 Fotovoltaik Sistemlerin Dizaynı 19
III.3.2 Hibrid Güç Üretim Sistemlerinde Fotovoltaik Piller 20
III.4 RÜZGAR TÜRBİNİ **20**
III.4.1 Rüzgar Türbinlerinin Genel Çalışma Prensibi 21
III.4.2 Hibrid Güç Üretim Sistemlerinde Rüzgar Türbinleri 22
III.5 MİKRO-HİDROELEKTRİK GÜÇ ÜRETİM SİSTEMİ **22**
III.5.1 Hibrid Güç Üretim Sistemlerinde Mikro-Hidro-Elektrik Sistemler 22
III.6 ENERJİ DEPOLAMA ÜNİTELERİ **23**

III.6.1 Hibrid Güç Üretim Sistemlerinde Enerji Depolama Üniteleri 24
III.7 GÜÇ DÖNÜŞTÜRÜCÜLERİ 24
III.7.1 Eviriciler 25
III.7.2 Doğrultucular 26
III.8 SENKRON KONDANSATÖR 26
III.9 YÜKLER 26
III.9.1 Yük Denetimi 27
III.10 KONTROL SİSTEMLERİ 27

BÖLÜM IV ADAPTİF NEURO-FUZZY KONTROLÖR 29

IV.1 ADAPTİF KONTROLE YAKLAŞIM METOTLARI 31
IV.1.1 Kazanç Programlama 31
IV.1.2 Model Referanslı Adaptif Sistem 32
IV.1.3 Öz Ayarlı Adaptif Kontrol (Self-tuning) 33
IV.2 BULANIK MANTIK 34
IV.2.1 Bulanık Çıkarım Sistemi 35
IV.2.1.1 Mamdani Bulanık Çıkarım Sistemi 37
IV.2.1.2 Sugeno Bulanık Çıkarım Sistemi 38
IV.3 YAPAY SİNİR AĞLARI 39
IV.3.1 Yapay Sinir Ağlarının Yapısı 40
IV.4 ADAPTİF YAPAY SİNİR AĞLI-BULANIK KONTROLÖRÜN DİZAYNI 43
IV.4.1 Mamdani Yapay Sinir-Bulanık Sistem 44
IV.4.2 Takagi-Sugeno Yapay Sinir ağlı -Bulanık Sistem 45
IV.4.3 Adaptif Yapay Sinir Ağlı-Bulanık Çıkarım Sistemi 47
IV.4.3.1 AYSABÇS İçin Hibrid Öğrenme Algoritması 51

BÖLÜM V HİBRİT GÜÇ ÜRETİM SİSTEMİ BİLEŞENLERİNİN MODELLEMESİ VE ANALİZİ 53

V.1 RÜZGAR ENERJİ DÖNÜŞÜM SİSTEMİNİN MODELLEMESİ VE ANALİZİ 53
V.1.1 Rüzgar Enerji Dönüşüm Sistemi Bileşenleri 54
V.1.2 Rüzgar Türbini Modellemesi 55
V.1.3 Sabit ve Değişken Hızlı Rüzgar Türbini Karakteristiği 58
V.1.3.1 Sabit hızlı rüzgar türbinlerinin işletme karakteristiği 58
V.1.3.2 Değişken Hızlı Rüzgar Türbinlerinin İşletme Karakteristiği 59
V.1.4 Kanat Eğimi Açı Kontrolü 61
V.1.5 Kendinden Uyartımlı Asenkron Generatörün Matematiksel Modellemesi ve Analizi 61
V.1.5.1 Kendinden Uyartımlı Asenkron Generatörün Eşdeğer Elektrik Devresi 62
V.1.5.2 Kendinden Uyartım Asenkron Generatörün Matematiksel Modellemesi 66
V.2 GAZ TÜRBİNİ GÜÇ ÜRETİM SİSTEMİ 75
V.2.1 Gaz Türbini Güç Üretim Sisteminin Bileşenleri 77
V.2.2 Gaz Türbininin Modellemesi 78
V.2.2.1 Hız ve İvme Kontrolü 79

V.2.2.2 Yakıt Sistemi 79
V.2.2.3 Kompresör-Türbin Sistemi 81
V.2.2.4 Sıcaklık Kontrolü 81
V.2.3 Senkron Makinanın Matematiksel Modeli 82
V.2.3.1 Senkron Makinanın Stator Sargılarına Ait Büyüklüklerin Rotorla Birlikte Hareket Eden dq0 Eksen Takımına Dönüştürülmesi 89
V.2.3.2 Rotorun dq0 Eksen Takımına Göre Gerilim Denklemleri 94
V.2.3.3 Senkron Makinanın Giriş Gücü ve Elektromagnetik Tork Denklemleri 96
V.2.3.4 Senkron Makinanın Kararlı Çalışma Durumundaki Akım,Gerilim,Güç ve Tork Denklemleri 97
V.2.3.5 Stator Sargısı Geriliminin Kararlı Çalışma Durumundaki Denklemi 98
V.2.3.6 Senkron Generatörün Çıkış Büyüklüklerinin Rotor Eksenine Göre Yeri ve Konumu 99
V.2.3.7 Geçici(Transient) Zaman Sabitleri 100
V.2.3.8 Kararlı Çalışma Durumunda Elektromekanik Güç ve Moment İfadeleri 101
V.2.3.9 Senkron Makinanın Uyartım Devreleri 103
V.2.3.10 Gerilim Algılayıcı ve Yük Devresi 104
V.2.3.11 D.C. Uyartım Sisteminin Matematiksel Modeli ve Transfer Fonksiyonu 105

BÖLÜM VI HİBRİT GÜÇ ÜRETİM SİSTEMİNİN SİMULASYONU VE SİSTEM PERFORMANSININ NEURO-FUZZY KONTROLÖR İLE İYİLEŞTİRİLMESİ 109

VI.1 RÜZGAR GÜÇ ÜRETİM SİSTEMİNİN SİMULASYONU VE KONTROLÜ 111
VI.1.1 Rüzgar Modeli 111
VI.1.2 Rüzgar Türbini ve Mekanik Sistem Modeli 112
VI.1.3 Rüzgar Güç Üretim Sisteminin Güç Elektroniği Ara Yüzeyi ile Birlikte Çalıştırılması 113
VI.1.4 Rüzgar Güç Üretim Sisteminin Matlab/Simulink Programında Modellemesi ve Simülasyonu 115
VI.1.5 Rüzgar Güç Üretim Sisteminin İşletme Durumları ve Simülasyonu 120
VI.1.5.1 Rüzgar Güç Üretim Sisteminin Kontrolsüz İşletme Durumu ve Simülasyon Sonuçları 121
VI.1.5.2 Rüzgar Güç Üretim Sistemi Performansının İyileştirilmesi İçin Klasik PID Kontrolör 137
VI.1.5.3 Rüzgar Güç Üretim Sisteminin Kanat Eğimi Açısının Adaptif Neuro-Fuzzy Kontrolör ile Denetimi 157
VI.2 GAZ GÜÇ ÜRETİM SİSTEMİNİN SİMÜLASYONU VE KONTROLÜ 187
VI.2.1 Gaz güç üretim sistemi türbin hızının klasik PID kontrolör ile denetimi 197
VI.2.2 Gaz Güç Üretim Sistemi Türbin Hızının Adaptif Neuro-Fuzzy Kontrolör ile Denetimi 206
VI.2.3 AC/DC/AC Güç Dönüştürücülü Gaz Güç Üretim Sisteminin Adaptif Neuro-Fuzzy Kontrolör ile Denetimi 223

VI.2.4 Hibrid Rüzgar-Gaz Güç Üretim Sisteminin Simülasyonu ve Kontrolü 228
VI.2.5 AC-DC-AC Güç Dönüştürücülü HRGGÜS'nin Adaptif Neuro-Fuzzy Kontrolör ile Denetimi 244

BÖLÜM VII SONUÇ VE ÖNERİLER.....249

KAYNAKLAR:.....253

EKLER 260

ÖZGEÇMİŞ 268

ÖZET

HİBRİD GÜÇ ÜRETİM SİSTEMİNİN MODELLEMESİ, ANALİZİ VE NEURO-FUZZY KONTROLÖR KULLANILARAK SİSTEM PERFORMANSININ İYİLEŞTİRİLMESİ

Bu çalışmada, şehir merkezinden veya enerji dağıtım şebekelerinden uzak küçük yerleşim birimlerinin elektrik enerji ihtiyacının karşılanması amacı ile hibrit rüzgar-gaz güç üretim sisteminin Matlab/Simulink programı kullanılarak modellemesi gerçekleştirilmiştir. Aynı zamanda hibrit güç üretim sisteminin elektriksel çıkış büyüklüklerinin işletme değerlerini istenilir noktaya getirmek için Adaptif Neuro-Fuzzy Çıkarım Kontrolör'ü (ANFÇK) kullanılmıştır.

Hibrit güç üretim sistemlerinin dünya genelinde uygulamaları ve bu güç üretim üzerine yayımlanmış makaleler, yapılan tez çalışmaları ayrı ayrı incelenmiştir. Yapılan çalışma için gerekli olan teknik bilgiler geniş ölçüde sağlanmıştır. Hibrit güç üretim sistemini oluşturan sistem bileşenleri ana hatları ile ve sistem içersindeki fonksiyonları kısa kısa anlatılmıştır. Diğer taraftan, Adaptif Neuro-Fuzzy kontrolör ayrı bir bölüm olarak geniş ve kapsamlı olarak blok diyagramlar halinde sunulmuştur.

300 kW'lık rüzgar güç üretim sisteminin enerji dağıtım şebekelerinden bağımsız olarak çalıştırılmasına ait sistemin dinamik modellemesi için gerekli olan matematiksel bağıntılar çıkartılmıştır. Rüzgar güç üretim sistemi değişken hızlı rüzgar türbini ve asenkron generatörden oluşmuştur. Değişken hızlı rüzgar türbini ve asenkron generatörün dinamik davranışını tanımlayan blok diyagramları ve matematiksel denklemler yapılan tez çalışmasında ayrı ayrı sunulmuştur. Rüzgar türbini ve asenkron generatörün blok diyagramlarını tanımlayan matematiksel denklemleri, Matlab/Simulink programını ve Power System Toolbox'u kullanarak rüzgar güç üretim sisteminin gerçek işletmelerdeki davranışını gösterecek biçimde simülasyon blok diyagramları oluşturulmuştur. Daha sonra, rüzgar güç üretim sisteminden farklı yük kademelerinde elde edilen çıkış büyüklüklerinin istenilen

performansta olması için klasik PID kontrolör ve ANFÇK ile rüzgar türbini kanat eğim açısı denetimi yapılmıştır.

Bu çalışmada, hibrit güç üretim sisteminin ikinci güç üretim bileşeni ise 400kW'lık gaz güç üretim sistemidir. Gaz güç üretim sistemi, gaz türbin sistemi ve silindirik kutuplu senkron generatörden oluşmuştur. Gaz türbini ile senkron generatörün dinamik davranışını tanımlayan blok diyagramları ve matematik denklemler bu çalışma içersinde ayrı ayrı sunulmuştur. Gaz güç üretim sisteminin dinamik davranışını tanımlayan blok diyagramları ve matematiksel denklemleri kullanarak Matlab/Simulink programında dinamik modellemesi yapılmıştır. Gaz güç üretim sistemini enerji dağıtım şebekelerinden yalıtılmış olarak çalıştırılıp, elektrik çıkış büyüklükleri farklı yük kademeleri için ayrı ayrı elde edilmiştir. Bu elektriksel çıkış büyüklüklerinin istenilen değerde olması için klasik PID kontrolör ile ANFÇK'ü kullanılarak gaz türbini hız kontrolü yapılmıştır.

Yapılan tez çalışmasının son aşamasında, rüzgar güç üretim sistemi ile gaz güç üretim sistemi birbirine paralel bağlanarak birlikte tüketici yüklerinin beslenmesi durumundaki sistemin dinamik modellemesi Matlab/Simulink programında gerçekleştirilmiştir. Bu çalışma durumunda, hibrit güç üretim sisteminin elektriksel çıkış büyüklüklerinin istenilen işletme performansında olması amacıyla ANFÇK'ü ile kontrolü sağlanmıştır.

Hibrit rüzgar-gaz güç üretim sisteminin farklı tüketici yükleri ile yüklenmesi durumunda, ANFÇK'lü sistemin dinamik davranışı elde edilen simülasyon sonuçları ile analizi yapılmıştır. Hibrit güç üretim sistemi için gerçekleştirilen simülasyon çalışması sonuçlarından da görülmüştür ki, ANFÇK ile sistemin çıkış elektriksel büyüklükleri kısa sürede arzu edilen işletme değerine yerleşmiştir.

Anahtar Kelimler: Rüzgar Güç Üretim Sistemi, Gaz Güç Üretim Sistemi, Hibrid Güç Üretim Sistemi, PID Kontrolör, Adaptif Neuro-Fuzzy Kontrolör, Modelleme, Matlab/Simulink

Ocak 2007 **Yüksel OĞUZ**

ABSTRACT

MODELING, ANALYZING AND IMPROVING THE PERFORMANCE OF A HYBRID POWER PRODUCTION SYSTEM USING NEURO-FUZZY CONTROLLER

In this study, with using the Matlab/Simulink program, the modeling of hybrid wind-gas power production system has been realized for purpose of meeting the electric energy needs of small residential units locate far from the city centers or energy distribution networks. Meanwhile, the Adaptive Neuro Fuzzy Controller (ANFC) has been used to bring the operation values of electrical output magnitudes of hybrid power production system to a desirable point.

The world wide applications of hybrid power production systems and articles and thesis written on such power production systems have been examined carefully. The technical data required for the study has been obtained in great extent. The system components forming the hybrid power production system and their functions within the system have been briefly described. On the other hand, the Adaptive Neuro-Fuzzy Controller has been presented with block diagrams in a comprehensive manner in a separate section.

The mathematical relations necessary for dynamic modeling of the system related to independent operation of a 300 kW wind power production system from energy distribution networks have been determined. The wind power production system consists of a variable speed wind tribune and asynchronous generator. The block diagrams and mathematical equations defining the dynamic behavior of the variable speed wind tribune and asynchronous generator are presented separately in the thesis study.

The simulation block diagrams which demonstrate the actual behavior of the wind power production system in real facilities have been formed by using mathematical equations which describe the block diagrams of wind tribune and asynchronous generator, Matlab/Simulink program and Power System Toolbox.

Then, to ensure the output magnitudes obtained in different load rates of the wind power production system to be in desired performance, control of pitch angle of the wind tribune with the conventional PID Controller and ANFC has been realized.

In this study, the second power production component of the hybrid power production system is a 400KW gas power production system. The gas power production system consists of a gas tribune system and a cylindrical pole synchronous generator. The block diagrams and mathematical equations defining the dynamic behavior of the gas tribune and synchronous generator have been presented separately in the study. By using the block diagrams and mathematical equations defining the dynamic behavior of the gas tribune, a dynamic modeling has been realized in the Matlab/Simulink program. By operating the gas power production system in an isolated manner from the energy distribution networks, the electrical output magnitudes have been obtained individually for different load rates. The gas tribune speed control has been realized using the PID Controller and ANFC to ensure that such electrical output magnitudes to be in desired value.

In the final section of the thesis study, by connecting the wind power production system and gas power production system in parallel to each other, the dynamic modeling of the system in situation where the consumer's loads are fed jointly has been realized in the Matlab/Simulink program. Under such operation circumtance, in order to ensure that the electrical output magnitudes of the hybrid power production system to be in desired operation performance, its control with ANFC has been made. The dynamic behavior of the system in case the hybrid wind-gas power production system is loaded with different consumer's loads has been analyzed using the simulation results obtained by using ANFC. As it can be seen from the results of simulation study realized for the hybrid power production system, the output electrical magnitudes of the system have been placed in the desired operation value with ANFC.

Key words: Wind Power Production System, Gas Power Production System, Hybrid Power Production System, PID Controller, adaptive Neuro-Fuzzy Controller, Modeling, Matlab/Simulink

January 2007 **Yüksel OĞUZ**

YENİLİK BEYANI

HİBRİD GÜÇ ÜRETİM SİSTEMİNİN MODELLEMESİ, ANALİZİ VE NEURO-FUZZY KONTROLÖR KULLANILARAK SİSTEM PERFORMANSININ İYİLEŞTİRİLMESİ

Son yıllarda, enerji talebindeki artan yoğunluk nedeniyle üretici ve tüketiciler enerji talebini karşılamada farklı arayışlara girmişlerdir. Enerji gereksinimi karşılanırken aranan özelliklerin başında maliyet ve çevreye verdiği etkiler göz önüne alınmıştır. Yapılan bu tez çalışmasında, şehir merkezinden uzak yerleşim birimlerinde yaşayan insanların rüzgar enerjisinden yararlanarak kendi enerji taleplerinin karşılanması amacıyla hibrit rüzgar-gaz güç üretim sisteminin dinamik modellemesi Matlab/Simulink programında gerçekleştirilmiştir.

Yapılan çalışmada, rüzgar güç üretim sistemi ve gaz güç üretim sistemi tek başına bağımsız olarak ayrı ayrı incelenmiştir. Her bir güç üretim ünitelerinin çıkış elektriksel büyüklükleri olan terminal gerilimi, yükün çekmiş olduğu akım, işletme frekansı, üretim ve tüketim güç eğrileri veya sayısal değerleri kontrolsüz durumdayken analiz edilmiştir. Rüzgar güç üretim sistemi için çıkış elektriksel büyüklükleri açısından ele alınan problem güç sınırlaması ve hız denetimidir. Eğer güç sınırlaması yapılamıyor veya rüzgar türbin hızı denetim altına alınamıyorsa, arzu edilen işletme değerlerinde çıkış büyüklükleri gerçekleştirilememektedir. Bu durumda rüzgar güç üretim sisteminden beslenen tüketiciler büyük oranda zarar görmektedir. Yani kontrolsüz rüzgar güç üretim sisteminde, rüzgar hızına bağlı olarak asenkron generatörde endüklenen gerilim eğrisi tamamen sinüzoidal eğriden uzak, frekans değeri arzu edilen 50Hz'lik işletme frekansı değerinin altında veya üstünde gerçekleşmiştir. Tez çalışmasında, rüzgar güç üretim sistemindeki bu problemi çözebilmek için getirilen yeni çözüm önerisi; değişken hızlı rüzgar türbininin kanat eğim açısının Adaptif Neuro-Fuzzy Çıkarım Kontrolörü ile denetimini sağlamak olmuştur. Adaptif Neuro-Fuzzy kontrolörün diğer kontrolör elemanlarından farkı; farklı yük durumlarında önceden belirlediğimiz işletme

şartlarına göre kanat eğim açısını her değişen yük durumunda kendi kendine ayar ederek rüzgar güç üretim sisteminin kararlı ve verimli çalışması sağlanmıştır.

Gaz güç üretim sistemi tek başına bağımsız olarak çalıştırılmış ve kontrolsüz durumdayken elektriksel işletme büyüklükleri analiz edilmiştir. Yapılan analiz sonucunda, işletme frekansının arzu edilen değerde olmadığı, tüketici yükü arttıkça frekansın sürekli düşüş içersinde olduğu tespit edilmiştir. Gaz güç üretim sisteminde, elektrik güç üretimi senkron generatörle gerçekleştirildiğinden işletme frekansı senkron generatörün rotor hızıyla doğru orantılıdır. Senkron generatörün mekanik enerji girişi gaz türbiniyle sağlandığı için, türbin hızının denetim altına alınması kararlı çalışma durumu için gereklidir. Gaz türbininin ürettiği mekanik güç, yakıt (gaz) akışı kontrol edilerek sağlanılmaktadır. Tez çalışmasında, gaz türbininin hız kontrolü için getirilen yeni çözüm önerisi; Adaptif Neuro-Fuzzy Çıkarım Kontrolör olmuştur. Bu kontrolör, gaz güç üretim sistemi için önceden belirlenen alt ve üst işletme limit değerlerine göre türbin hızını kontrol ederek sürekli çalışma durumunda sistemin çıkış elektriksel büyüklüklerinin arzu edilen biçimde gerçekleşmesini sağlamıştır.

Rüzgar ve gaz güç üretim sistemleri bağımsız olarak ayrı ayrı incelenip belirlenen problemler çözüldükten sonra, iki güç üretim ünitesinin birbirine paralel bağlantısı gerçekleştirilmiştir. Adaptif Neuro-Fuzzy Çıkarım kontrollü hibrit güç üretim sistemi tüketicilerin güç taleplerini karşılarken, yük uçlarındaki gerilimde, akımda, frekansta ve çekilen güç değerlerinde herhangi bir olumsuz problemle karşılaşılmamıştır.

Yapılan tez çalışmasında, Adaptif Neuro-Fuzzy Kontrolör ile hibrit rüzgar-gaz güç üretim sisteminin işletme performansından oldukça başarılı sonuçlar elde edilmiştir. Böylece yapılan çalışma ile Adaptif Neuro-Fuzzy Kontrolör kullanılarak değişik güç üretim ünitelerinin kontrolüne yeni bir çözüm önerisi veya katkı sağlanabileceği görülmüştür. Diğer taraftan bu çalışma, bilimsel içerikli çalışmalara, eğitime, endüstriyel uygulama çalışmalarına, otomatik kontrol uygulamalarına, dinamik modelleme işlemlerine, hibrit güç üretim sistemlerinin tasarımına ve işletilmesine özgün bir kaynak olma özelliğini göstermektedir.

Bu proje M.Ü. Bilimsel Araştırma Projeleri Komisyon Başkanlığı tarafından desteklenmiştir.

Ocak 2007 **Prof.Dr.K.R.İrfan GÜNEY** **Yüksel OĞUZ**

KISALTMALAR VE SEMBOLLER LİSTESİ

ANFIS : Adaptive Neuro-Fuzzy Inference System

AC : Alternatif Akım

DC : Doğru Akım

YSA. : Yapay Sinir Ağları

RGÜS : Rüzgar güç üretim sistemi

GGÜS : Gaz güç üretim sistemi

HRGGÜS : Hibrid rüzgar-gaz güç üretim sistemi

ANFÇK : Adaptif Neuro Fuzzy Çıkarım Kontrolör

PID : Oransal-İntegral-Türevsel kontrolör

K_P : Oransal kontrolör kazanç sabiti

K_D : Türevsel kontrol kazanç sabiti

K_I : İntegral kontrol kazanç sabiti

w_i : Yapay sinir ağlarında bağlantı düğüm bağlantı ağırlığı

g : Aktivasyon fonksiyonu

a_i : Yapay sinir ağlarında çıktı sinyali

T. : Takagi-Sugeno

r_i : Adaptif yapay sinirsel-bulanık çıkarım sisteminin eğitim aşamasında belirlenen parametreler

p_i : Adaptif yapay sinirsel-bulanık çıkarım sisteminin eğitim aşamasında belirlenen parametreler

q_i : Adaptif yapay sinirsel-bulanık çıkarım sisteminin eğitim aşamasında belirlenen parametreler

O_{li} : Adaptif yapay sinirsel-bulanık çıkarım sisteminde l nci tabakay ait i nci düğümün çıkışı

x : Bulanık çıkarım sisteminde birinci düğüm girişi

y : Bulanık çıkarım sisteminde ikinci düğüm girişi

m : Bulanık çıkarım sisteminde üyelik fonksiyonu derecesi

a_i, b_i, c_i : Adaptif yapay sinirsel-bulanık çıkarım sisteminde üyelik fonksiyonu parametreleri

V : Rüzgar hızı (m/sn)

m : Rüzgar hızı ile hareket eden hava kütlesi (kg)

P_{rot} : Rüzgar türbini mekanik gücü (Watt)

r : Hava yoğunluğu (kg/m^3)

A : Rüzgar türbini kanatlarının süpürme alanı (m^2)

V_0 : Rüzgar kanatlarına giren alt akıntı hızı (m/sn)

C_p : Rüzgar türbini güç katsayısı

w : Rüzgar türbin rotoru açısal hızı (rad/sn)

R : Rüzgar türbin rotoru kanat yarıçapı (m)

l : Rüzgar türbini rotor hız oranı

b : Rüzgar türbini kanat eğim açısı (derece)

n_s : İndüksiyon makinalarında döner alan hızı (devir/dk)

f_1 : Şebeke frekansı (Hz)

p : İndüksiyon makinalarında çift kutup sayısı

V_s : Asenkron generatörün stator sargı uçlarına uygulanan faz gerilimi (Volt)

R_1 : Asenkron generatörün bir fazının stator sargısı direnci (Ω)

R_2 : Asenkron generatörün bir fazının rotor sargısı direnci (Ω)

X_1 : Asenkron generatörün bir fazının stator sargısı endüktif reaktansı (Ω)

X_2 : Asenkron generatörün bir fazının rotor sargısı endüktif reaktansı (Ω)

s : Asenkron makinalarda rotor hızı ile döner alan hızı arasındaki farkın döner alan hızına oranı

I_1 : Asenkron generatörün stator akımı (Amper)

I_2 : Asenkron generatörün rotor akımı (Amper)

I_0 : Asenkron generatörün boş çalışma akımı (Amper)

X_c : Asenkron generatörün uyartım kapasitörünün kapasitif reaktansı (Ω)

I_c : Kondansatör akımı (Amper)

C : Uyartım kondansatörünün kapasitesi(μF)

Z : Empedans(Ω)

$[T_{dq0}]$: Park dönüşüm matrisi

$[f_{dq0}]$: d-q eksen takımına dönüştürülmüş gerilim, akım ve akı gibi elektriksel büyüklükler matrisi

$[f_{abc}]$: a,b,c fazına ait akım, gerilim ve akı gibi elektriksel büyüklükler matrisi

N_1 : Asenkron generatörün stator faz sargısının sarım sayısı (sipir)

N_2 : Asenkron generatörün rotor faz sargısının sarım sayısı (sipir)

V_{abc1} : Asenkron generatörün stator faz gerilimleri (Volt)

V_{abc2} : Asenkron generatörün rotor faz sargısı gerilimleri (Volt)

i_{abc1} : Asenkron generatörün stator faz sargısı akımları (Amper)

i_{abc2} : Asenkron generatörün rotor faz sargısı akımları (Amper)

l_{abc1} : Asenkron generatörün stator faz sargısı akıları (Weber)

l_{abc2} : Asenkron generatörün rotor faz sargısı akıları (weber)

w_2 : Asenkron generatörün elektriksel açısal hızı (rad/sn)

V_{q1} : Asenkron generatörün q- ekseni bileşen gerilimi (Volt)

V_{d1} : Asenkron generatörün d-ekseni bileşen gerilimi (Volt)

$V¢_{q2}$: Asenkron generatörün rotor q-ekseni bileşen gerilimin statora indirgenmiş gerilimi (Volt)

$V¢_{d2}$: Asenkron generatörün rotor d-ekseni bileşen gerilimin statora indirgenmiş gerilimi (Volt)

l_{q1} : Asenkron generatörün q-ekseni stator akısı (Weber)

l_{d1} : Asenkron generatörün d-ekseni stator akısı (Weber)

$l¢_{q2}$: Asenkron generatörün statora indirgenmiş rotor q-ekseni akısı (weber)

$l¢_{d2}$: Asenkron generatörün statora indirgenmiş rotor d-ekseni akısı (weber)

L_m : Asenkron generatörün ortak manyetik endüktansı (Henri)

T_e : Asenkron generatörün elektromanyetik momenti (Nm)

T_{motor} : Asenkron makinanın motor çalışma durumundaki elektromanyetik momenti (Nm)

J : Asenkron makinanın rotor ataleti ($kg.m^2$)

T_D : Tahrik momenti (Nm)

K_d : Asenkron generatörün d- ekseni boyunca nüvede kalan artık mıknatısiyet gerilimi (Volt)

K_q : Asenkron generatörün q- ekseni boyunca nüvede kalan artık mıknatısiyet gerilimi (Volt)

K_{cq0} : q –ekseni boyunca kondansatörde var olan gerilim (Volt)

K_{cd0} : d- ekseni boyunca kondansatörde var olan gerilim (Volt)

L_1 : Asenkron generatörde stator sargısının toplam endüktansı (Henri)

L_2 : Asenkron generatörde rotor sargısının toplam endüktansı (Henri)

L_{11} : Asenkron generatörde stator sargısının kaçak endüktansı (Henri)

L_{2l} : Asenkron generatörde rotor sargısının kaçak endüktansı (Henri)

K_i : Gaz türbini kontrol kazancı

T_1 : Gaz türbin kontrolü kazancı zaman sabiti (saniye)

T_2 : Gaz türbin kontrolü kazancı zaman sabiti (saniye)

K_v : Gaz türbini valf konum ayarlayıcısı kazanç sabiti

K_f : Gaz türbini valf konum ayarlayıcısı kazanç sabiti

T_v : Gaz türbini valf konum ayarlayıcısı zaman sabiti (saniye)

T_f : Gaz türbini yakıt sistemi zaman sabiti (saniye)

F_d : Gaz türbini valf konum çıkışı

e_1 : Gaz türbini valf konum ayarlayıcı girişi

W_f : Gaz türbini yakıt talep sinyali

N : İvme kontrolörü ile sınırlandırılmış kontrol hızı

T_{CR} : Gaz türbin sisteminde ateşleme reaksiyonu zaman ile birleşen zaman gecikme sabiti (saniye)

T_{CD} : Gaz türbini sisteminde kompresör deşarj hacmi ile birleşen zaman gecikme sabiti (saniye)

T_{TD} : Türbin içersinden geçerek yanma sisteminden gazın taşınması için geçen zaman gecikmesi sabiti (saniye)

K_{HHV} : Yanma odasında gaz buharının yüksek ısı değerine bağlı katsayı

T_R : Gaz türbin sisteminde referans sıcaklık (°C)

LVS : En düşük değer secici

t : Gaz türbininde entegrasyon oranı

T_3 : Radyasyon koruyucu zaman sabiti (saniye)

T_4 : Termokupl zaman sabiti (saniye)

T_5 : Termokupl zaman sabiti (saniye)

K_4 : Radyasyon koruyucu kazanç sabiti

K_5 : Radyasyon koruyucu kazanç sabiti

$\boldsymbol{F}$: Manyeto motor kuvvet

F : Bir sipirde oluşan manyetik akı (Weber)

$\boldsymbol{i_s}$: Senkron generatörün stator akımı (Amper)

$\boldsymbol{i_r}$: Senkron generatörün rotor akımı (Amper)

L_s : Senkron generatörün stator akı bileşeni (Weber-sarım)

L_r : Senkron generatörün rotor akı bileşeni (Weber-sarım)

$\boldsymbol{L_{ss}}$: Senkron generatörün stator faz sargısının eşdeğer Endüktansı (Henri)

$\boldsymbol{L_{rr}}$: Senkron generatörün rotor faz sargısının eşdeğer endüktansı (Henri)

$\boldsymbol{L_{sr}}$: Senkron generatörün stator-rotor faz sargısı karşıt endüktansı (Henri)

q_d : D-ekseni ile a fazı arasındaki açı (derece)

q_q : Q- ekseni ile a fazı arasındaki açı (derece)

q_r : Senkron generatörün a fazı ile hareketli kısımda bulunan q-ekseni arasındaki açı (derece)

$\boldsymbol{V_f}$: Senkron generatörün uyartım devresi gerilimi (Volt)

$\boldsymbol{V_{kd}}$: Senkron generatörün d-ekseni sönüm sargısı gerilimi (Volt)

$\boldsymbol{V_{kq}}$: Senkron generatörün q-ekseni sönüm sargısı gerilimi (Volt),

$\boldsymbol{r_{kd}}$: Senkron generatörün d-ekseni sönüm sargısı direnci (Ω)

$\boldsymbol{r_{kq}}$: Senkron generatörün q-ekseni sönüm sargısı direnci (Ω)

l_f : Senkron generatörün uyartım sargısı akısı(Weber)

l_{kq} : Senkron generatörün q-ekseni sönüm sargısı akısı (Weber)

l_{kd} : Senkron generatörün d-ekseni sönüm sargısı akısı (Weber)

$\boldsymbol{P_{em}}$: Senkron generatörde üretilen elektromekanik güç (Watt)

$\boldsymbol{V_g}$: Senkron generatörün q-ekseni uyartım gerilimi (Volt)

$\boldsymbol{P_{in}}$: Senkron makinanın motor olarak çalışması durumunda girişi gücü (Watt)

$\boldsymbol{E_f}$: Senkron generatörün kararlı çalışma durumundaki uyartım gerilimi (Volt)

$d\boldsymbol{(t)}$: Yük açısı (elekt.rad)

q_e : Senkron generatörün a faz sargısı ile senkron referans eksen arasındaki açı (derece)

T'_{d0} : Senkron generatörün d-ekseni uyartım sargısı geçici zaman Sabiti (saniye)

T'_{q0} : Senkron generatörün q-ekseni uyartım sargısı geçici zaman sabiti (saniye)

T''_{d0} : Senkron generatörün d-ekseni açık devre geçici zaman sabiti (saniye)

T'_{d} : Senkron generatörün d-ekseni kısa devre zaman sabiti (saniye)

T'_{q} : Senkron generatörün q-ekseni kısa devre zaman sabiti (saniye)

T''_{q} : Senkron generatörün q-ekseni kısa devre alt-zaman sabiti (saniye)

ŞEKİL LİSTESİ

Şekil II.1 1993-2004 yılları arasında dünya genelinde güneş enerjisi üretimi 7
Şekil II.2 1980-2005 yılları arasında dünya genelinde rüzgar enerjisi üretim kapasitesi 8
Şekil III.1 Hibrid güç üretim sisteminin genel blok şeması 16
Şekil IV.1 Adaptif kontrolün blok diyagramı 30
Şekil IV.2 Kazanç programlama kontrolörü 31
Şekil IV.3 Model referanslı adaptif kontrolün genel blok diyagramı 32
Şekil IV.4 Öz ayarlı adaptif kontrolün blok diyagramı 33
Şekil IV.5 Bulanık çıkarım sistemi 36
Şekil IV.6 Mamdani Bulanık Çıkarım Sistemi [30] 37
Şekil IV.7 Sugeno bulanık çıkarım sistemi [51] 38
Şekil IV.8 Bir Nöronun Modeli 41
Şekil IV.9 Çok tabakalı ileri beslemeli YSA'nın genel yapısı 41
Şekil IV.10 Sinirsel-bulanık model 44
Şekil IV.11 Mamdani yapay sinir ağlı -bulanık sistem 45
Şekil IV.12 Takagi Sugeno yapay sinir ağlı-bulanık sistem 46
Şekil IV.13 AYSABÇS yapısı içinde gerçekleştirilen iki bulanık kural ve kurallar üzerinde 49
Şekil IV.14 Eşdeğer AYSABÇS yapısı 49
Şekil V.1 Rüzgar enerji dönüşüm sisteminin yapısı 54
Şekil V.2 Sabit Hızlı ve Değişken Hızlı Rüzgar Türbini Eğimleri 59
Şekil V.3 Kanat Aralığı Açı Kontrolörlü Değişken Hızlı Rüzgar Türbini 60
Şekil V.4 Kanat eğimi Açı Kontrolünün Blok Diyagramı 61
Şekil V.5 Asenkron Makinanın Bir Fazına Ait Eşdeğer Elektrik Devresi 63
Şekil V.6 Kendi Kendini Uyaran Asenkron Generatörün Bir Fazına Ait Eşdeğer Devresi 65
Şekil V.7 Kendi Kendine Uyartımlı Asenkron Generatörün Boşta Çalışma Eğrisi İle Reaktif 65
Şekil V.8 R-L Yüklü Kendinden Uyartımlı Asenkron Generatörün Eşdeğer Devresi 67
Şekil V.9 Generatör ve motor çalışmada ω açısal hızıyla dönen dq0 eksen takımı ile abc eksen 68
Şekil V.10 P Kutuplu, Üç Fazlı, Yıldız Bağlı Simetrik Asenkron Makinanın Stator ve Rotor 70
Şekil V.11 Üç Fazlı Simetrik Asenkron Makinanın *Q* Eşdeğer Devresi 71
Şekil V.12 Üç Fazlı Simetrik Asenkron Makinanın *D* Eşdeğer Devresi 71
Şekil V.13 Sabit Referans Eksene göre Kendinden Uyartımlı Asenkron Generatörün *q* modeli 72
Şekil V.14 Sabit Referans Eksene göre Kendinden Uyartımlı Asenkron Generatörün *d* modeli 73

Şekil V.15 Gaz Türbini Makinasının Basitleştirilmiş Yapısı 76
Şekil V.16 Isı-Güç Bileşimli Mikro Gaz Türbini Güç Üretim Sisteminin Blok Diyagramı 77
Şekil V.17 Mikro Gaz Türbininin Blok Diyagramı 78
Şekil V.18 Mikro Gaz Türbini İçin Hız Kontrolü Blok Diyagramı 79
Şekil V.19 Mikro Gaz Türbin Sistemine Ait Yakıt Sistemi Blok Diyagramı 80
Şekil V.20 Kompresör-Türbin Sisteminin Blok Diyagramı 81
Şekil V.21 Sıcaklık Kontrolü Blok Diyagramı 82
Şekil V.22 Silindirik ve çıkıntılı senkron makinanın rotorları 83
Şekil V.23 Senkron makinanın eşdeğer devre modeli 86
Şekil V.24 Stator akımının meydana getirdiği mmf'in d-q eksenindeki bileşenleri.. 87
Şekil V.25 Generatör ve motor çalışmada ω açısal hızıyla dönen *dq0* eksen takımı ile *abc* eksen takımları arasındaki ilişki 90
Şekil V.26 Senkron makinanın dq0 eşdeğer devresi 95
Şekil V.27 D.C. Uyartım Modeli 103
Şekil V.28 A.C. Uyartım Modeli 104
Şekil V.29 Gerilim algılayıcı ve yük devresi 104
Şekil V.30 Kazanç ayarlayıcı regülatörün transfer fonksiyonu 105
Şekil V.31 D.C. uyartım sisteminin magnetik eğrisi 106
Şekil V.32 D.C. uyartım sisteminin transfer fonksiyonunun blok diyagramı 108
Şekil V.33 Regülatör ve uyartım devresini tanımlayan transfer fonksiyonun blok diyagramı 108

Şekil VI. 1 Rüzgar türbini modelinin blok diyagramı 111
Şekil VI. 2 Rüzgar modelinin blok diyagramı 112
Şekil VI. 3 Rüzgar türbini ve mekanik sistemin dinamik davranış modeli 112
Şekil VI. 4 Değişken Hızlı Rüzgar Türbinli Elektrik Güç Üretim Sistemi 113
Şekil VI. 5 Rüzgar güç üretim sisteminde yer alan güç dönüştürücülerin açık devre modeli 114
Şekil VI. 6 Güç Dönüştürücüsüz Rüzgar Güç Üretim Sisteminin Blok Diyagramı 115
Şekil VI. 7 Matlab/Simulink Programında Güç Dönüştürücüsüz Rüzgar Güç Üretim Sisteminin Simülasyon Blok Diyagramı 116
Şekil VI. 8 MWT-300 kW'lık Rüzgar Türbininin Rüzgar Hızına Bağlı Olarak Çıkış Güç Eğrisi 117
Şekil VI. 9 Rüzgar Güç Üretim Sisteminin Simülasyon Blok Diyagramı 119
Şekil VI. 10 Senkron Kondansatörün Uyartım Devresinin Simülasyon Blok Diyagramı 119
Şekil VI. 11 Rüzgar Türbini Sisteminin Simülasyon Blok Diyagramı 120
Şekil VI. 12 Oranlanmış Hızı 15.5 m/sn ve Türbülans Yoğunluğu %10 olan Rüzgar Hızının Simülasyon Eğrisi 122
Şekil VI. 13 Kontrolsüz rüzgar güç üretim sisteminin 40kW'lık yük ile yüklenmesi durumunda, akım, gerilim ve frekanstaki değişimler 123
Şekil VI. 14 Kontrolsüz rüzgar güç üretim sisteminin 40kW'lık yük ile yüklenmesi durumunda, yükün çekmiş olduğu güç, senkron kondansatörün reaktif gücü ve rüzgar türbin sisteminin gücü 124
Şekil VI. 15 Kontrolsüz rüzgar güç üretim sisteminin 60kW'lık yük ile yüklenmesi durumunda, akım, gerilim ve frekanstaki değişimler 125
Şekil VI. 16 Kontrolsüz rüzgar güç üretim sisteminin 60kW'lık yük ile yüklenmesi durumunda, yükün çekmiş olduğu güç, senkron kondansatörün reaktif gücü ve rüzgar türbin sisteminin gücü 126

Şekil VI. 17 Kontrolsüz rüzgar güç üretim sisteminin 80kW'lık yük ile yüklenmesi durumunda, akım, gerilim ve frekanstaki değişimler..... 127
Şekil VI. 18 Kontrolsüz rüzgar güç üretim sisteminin 80kW'lık yük ile yüklenmesi durumunda, yükün çekmiş olduğu güç, senkron kondansatörün reaktif gücü ve rüzgar türbin sisteminin gücü 128
Şekil VI. 19 Kontrolsüz rüzgar güç üretim sisteminin 100kW'lık yük ile yüklenmesi durumunda, akım, gerilim ve frekanstaki değişimler..... 129
Şekil VI. 20 Kontrolsüz rüzgar güç üretim sisteminin 100kW'lık yük ile yüklenmesi durumunda, yükün çektiği güç, senkron kondansatörün reaktif gücü ve rüzgar türbin sisteminin gücü..... 130
Şekil VI. 21 Kontrolsüz rüzgar güç üretim sisteminin 130kW'lık yük ile yüklenmesi durumunda, akım, gerilim ve frekanstaki değişimler..... 131
Şekil VI. 22 Kontrolsüz rüzgar güç üretim sisteminin 130kW'lık yük ile yüklenmesi durumunda, yükün çektiği güç, senkron kondansatörün reaktif gücü ve rüzgar türbin sisteminin gücü..... 132
Şekil VI. 23 Kontrolsüz rüzgar güç üretim sisteminin 132kW'lık yük ile yüklenmesi durumunda, akım, gerilim ve frekanstaki değişimler..... 133
Şekil VI. 24 Kontrolsüz rüzgar güç üretim sisteminin 132kW'lık yük ile yüklenmesi durumunda, yükün çektiği güç, senkron kondansatörün reaktif gücü ve rüzgar türbin sisteminin gücü..... 134
Şekil VI. 25 Senkron Kondansatörün Tüketici Gücünün 130 kW Olduğu İşletme Durumunda Çektiği Aktif Gücdeki Değişim 136
Şekil VI. 26 Sürekli (Analog) İşaretle Çalışan Klasik PID Kontrollü Bir Sistemin Blok Diyagramı..... 137
Şekil VI. 27 Lineer Kontrol Sisteminin Girişine Birim Basamak Fonksiyonu Uygulanması Durumunda y(t) Çıkış Eğrisinin Değişimi..... 138
Şekil VI. 28 Klasik PD Kontrolörlü Denetlenen Sistemin Kapalı Çevrim Blok Diyagramı..... 139
Şekil VI. 29 Klasik PI Kontrolörlü Denetlenen Sistemin Kapalı Çevrim Blok Diyagramı..... 140
Şekil VI. 30 Rüzgar Türbini Kanat Eğim Açısının Klasik PID Kontrolör ile Denetimi..... 141
Şekil VI. 31 Rüzgar Türbinin Kanat Eğim Açısının Klasik PID Kontrolör ile Denetim Sisteminin Simülasyon Blok Diyagramı 142
Şekil VI. 32 Frekans Kontrolün Simülasyon Blok Diyagramı..... 144
Şekil VI. 33 Klasik PID kontrollü Rüzgar güç üretim sisteminin 40kW'lık yükle yüklenmesi durumunda gerilim, akım, frekans ve generatör mekanik hızındaki değişim eğrileri..... 145
Şekil VI. 34 Klasik PID kontrollü Rüzgar güç üretim sisteminin 40kW'lık yükle yüklenmesi durumunda sistemden üretilen ve çekilen güçlerdeki değişim eğrileri 146
Şekil VI. 35 Klasik PID kontrollü Rüzgar güç üretim sisteminin 60kW'lık yükle yüklenmesi durumunda gerilim, akım, frekans ve generatör mekanik hızındaki değişim eğrileri..... 147
Şekil VI. 36 Klasik PID kontrollü Rüzgar güç üretim sisteminin 60kW'lık yükle yüklenmesi durumunda sistemden üretilen ve çekilen güçlerdeki değişim eğrileri 148
Şekil VI. 37 Klasik PID kontrollü Rüzgar güç üretim sisteminin 80kW'lık yükle yüklenmesi durumunda gerilim, akım, frekans ve generatör mekanik hızındaki değişim eğrileri..... 149

Şekil VI. 38 Klasik PID kontrollü Rüzgar güç üretim sisteminin 80kW'lık yükle yüklenmesi durumunda sistemden üretilen ve çekilen güçlerdeki değişim eğrileri 150
Şekil VI. 39 Klasik PID kontrollü Rüzgar güç üretim sisteminin 100kW'lık yükle yüklenmesi durumunda gerilim, akım, frekans ve generatör mekanik hızındaki değişim eğrileri..... 151
Şekil VI. 40 Klasik PID kontrollü Rüzgar güç üretim sisteminin 100kW'lık yükle yüklenmesi durumunda sistemden üretilen ve çekilen güçlerdeki değişim eğrileri 152
Şekil VI. 41 Klasik PID kontrollü Rüzgar güç üretim sisteminin 120kW'lık yükle yüklenmesi durumunda gerilim, akım, frekans ve generatör mekanik hızındaki değişim eğrileri..... 153
Şekil VI. 42 Klasik PID kontrollü Rüzgar güç üretim sisteminin 120kW'lık yükle yüklenmesi durumunda sistemden üretilen ve çekilen güçlerdeki değişim eğrileri 154
Şekil VI. 43 RGÜS'nin Çıkış Geriliminin 0.1 Saniyelik Zaman Dilimindeki Eğrisi 156
Şekil VI. 44 Rüzgar Türbinin Kanat Eğim Açısının Klasik PID Kontrolör ile Denetim Sisteminin Simülasyon Blok Diyagramı 157
Şekil VI. 45 Değişken Hızlı Rüzgar Türbininin ANFÇK'lü Kanat Eğim Açısısı Denetiminin Basitleştirilmiş Blok Diyagramı..... 158
Şekil VI. 46 RGÜS'nin Kanat Eğim Açı Denetiminin ANFÇK ile Yapılması İçin Kontrolör Giriş ve Çıkış Datalarının ANFIS Editörüne Aktarımının Görüntüsü..... 161
Şekil VI. 47 Kanat Eğim Açısı Denetimi İçin Kullanılan ANFÇK'nun Veri Tabanına Hibrid Öğrenme Algoritmasının Uygulanması Sonucunda Çıkış Sinyalinin Son Durumu 162
Şekil VI. 48 RGÜS için Sugeno Tipi ANFÇK'nün Üç Giriş ve Bir Çıkış Sinyalinden Oluşan Yapısı..... 163
Şekil VI. 49 Kanat Eğimi Açısı Denetimi İçin Dizayn Edilen ANFÇK'nün Yapısı 163
Şekil VI. 50 ANFÇK'nun Giriş Değişkenlerinden Olan Hata[e(t)] Üyelik Fonksiyonu ve Değer Aralığı..... 164
Şekil VI. 51 ANFÇK'nun İkinci Giriş Değişkeni Hatadaki Değişimin[de(t)/Dt] Üyelik Fonksiyonu ve Değer Aralığı 164
Şekil VI. 52 ANFÇK'nun Üçüncü Giriş Değişkeni Ölçülen güç değişiminin [(P_ölçülen(p.u)] Üyelik Fonksiyonu ve Değer Aralığı 165
Şekil VI. 53 ANFÇK'lü Rüzgar güç üretim sisteminin 40kW'lık yükle yüklenmesi durumunda gerilim, akım, frekans ve generatör mekanik hızındaki değişim eğrileri..... 168
Şekil VI. 54 ANFÇK'lü Rüzgar güç üretim sisteminin 40kW'lık yükle yüklenmesi durumunda sistemden üretilen ve çekilen güçlerdeki değişim eğrileri. 169
Şekil VI. 55 ANFÇK'lü Rüzgar güç üretim sisteminin 60kW'lık yükle yüklenmesi durumunda gerilim, akım, frekans ve generatör mekanik hızındaki değişim eğrileri..... 170
Şekil VI. 56 ANFÇK'lü Rüzgar güç üretim sisteminin 60kW'lık yükle yüklenmesi durumunda sistemden üretilen ve çekilen güçlerdeki değişim eğrileri. 171
Şekil VI. 57 ANFÇK'lü Rüzgar güç üretim sisteminin 80kW'lık yükle yüklenmesi durumunda gerilim, akım, frekans ve generatör mekanik hızındaki değişim eğrileri..... 172

Şekil VI. 58 ANFÇK'lü Rüzgar güç üretim sisteminin 80kW'lık yükle yüklenmesi durumunda sistemden üretilen ve çekilen güçlerdeki değişim eğrileri. 173
Şekil VI. 59 ANFÇK'lü Rüzgar güç üretim sisteminin 100kW'lık yükle yüklenmesi durumunda gerilim, akım, frekans ve generatör mekanik hızındaki değişim eğrileri..... 174
Şekil VI. 60 ANFÇK'lü Rüzgar güç üretim sisteminin 100kW'lık yükle yüklenmesi durumunda sistemden üretilen ve çekilen güçlerdeki değişim eğrileri. 175
Şekil VI. 61 ANFÇK'lü Rüzgar güç üretim sisteminin 120kW'lık yükle yüklenmesi durumunda gerilim, akım, frekans ve generatör mekanik hızındaki değişim eğrileri..... 176
Şekil VI. 62 ANFÇK'lü Rüzgar güç üretim sisteminin 120kW'lık yükle yüklenmesi durumunda sistemden üretilen ve çekilen güçlerdeki değişim eğrileri. 177
Şekil VI. 63 AC/DC/AC Güç Dönüştürücülü RGÜS'nin Blok Diyagramı 179
Şekil VI. 64 AC/DC/AC Güç Dönüştürücülü RGÜS'nin Simülasyon Blok Diyagramı..... 180
Şekil VI. 65 AC/DC/AC Güç Dönüştürücüsünün Simülasyon Blok Diyagramı ... 181
Şekil VI. 66 AC/DC/AC Güç Dönüştürücüsünün IGBT Eviricinin Kontrolü için Gerilim Regülatörü ve PWM Generatörün Simülasyon Blok Diyagramı 181
Şekil VI. 67 IGBT Evirici Kontrolü için Gerilim Regülatörünün Blok Diyagramı 182
Şekil VI. 68 LCL Filtresi Aracılığı ile IGBT Eviricisinin (Gerilim Kaynağı Dönüştürücüsü) Tüketiciye Bağlantısının Simülasyon Blok Diyagramı 183
Şekil VI. 69 AC-DC-AC Güç Dönüştürücülü ve ANFÇK'lü RGÜS'nin Terminal Gerilimi, Yük Akımı, Tüketici Gücü ve Sistemin Frekansındaki Değişim Eğrileri..... 185
Şekil VI. 70 Güç Dönüştürücülü Ve ANFÇK'lü RGÜS'nin Terminal Geriliminin 0.1 Saniyelik Zaman Aralığında Daha Açık Görünümü..... 186
Şekil VI. 71 Gaz Güç Üretim Sisteminin Blok Diyagramı 187
Şekil VI. 72 Gaz Güç Üretim Sisteminin Simülasyon Blok Diyagramı..... 188
Şekil VI. 73 GGÜS'nin Gaz Türbini, Uyartım Devresi, Gerilim Regülatörü ve Senkron Generatörü İçeren Simülasyon Blok Diyagramı..... 189
Şekil VI. 74 GGÜS'nin Gaz Türbini ve Uyartım Devresinin Alt Simülasyon Blok Diyagramı..... 189
Şekil VI. 75 Hız Kontrolsüz GGÜS'nin 50 kW'lık Tüketici Yükü ile Yüklendiğindeki Elektriksel Çıkış Büyüklüklerindeki Değişim Eğrileri 191
Şekil VI. 76 Hız Kontrolsüz GGÜS'nin 100 kW'lık Tüketici Yükü ile Yüklendiğindeki Elektriksel Çıkış Büyüklüklerindeki Değişim Eğrileri 192
Şekil VI. 77 Hız Kontrolsüz GGÜS'nin 200 kW'lık Tüketici Yükü ile Yüklendiğindeki Elektriksel Çıkış Büyüklüklerindeki Değişim Eğrileri 193
Şekil VI. 78 Hız Kontrolsüz GGÜS'nin 300 kW'lık Tüketici Yükü ile Yüklendiğindeki Elektriksel Çıkış Büyüklüklerindeki Değişim Eğrileri 194
Şekil VI. 79 Hız Kontrolsüz GGÜS'nin 400 kW'lık Tüketici Yükü ile Yüklendiğindeki Elektriksel Çıkış Büyüklüklerindeki Değişim Eğrileri 195

Şekil VI. 80 Gaz Türbini Hız Denetiminin Klasik PID Kontrolör ile Gerçekleştirilmesi ait Simülasyon Blok Diyagramı 198
Şekil VI. 81 Klasik PID Hız Kontrollü GGÜS'nin 50 kW'lık Tüketici Yükü ile Yüklendiğindeki Elektriksel Çıkış Büyüklüklerindeki Değişim Eğrileri 199
Şekil VI. 82 Klasik PID Hız Kontrollü GGÜS'nin 100 kW'lık Tüketici Yükü ile Yüklendiğindeki Elektriksel Çıkış Büyüklüklerindeki Değişim Eğrileri 200
Şekil VI. 83 Klasik PID Hız Kontrollü GGÜS'nin 200 kW'lık Tüketici Yükü ile Yüklendiğindeki Elektriksel Çıkış Büyüklüklerindeki Değişim Eğrileri 201
Şekil VI. 84 Klasik PID Hız Kontrollü GGÜS'nin 300 kW'lık Tüketici Yükü ile Yüklendiğindeki Elektriksel Çıkış Büyüklüklerindeki Değişim Eğrileri 202
Şekil VI. 85 Klasik PID Hız Kontrollü GGÜS'nin 400 kW'lık Tüketici Yükü ile Yüklendiğindeki Elektriksel Çıkış Büyüklüklerindeki Değişim Eğrileri 203
Şekil VI. 86 Klasik PID Hız Kontrollü GGÜS'nin 500 kW'lık Tüketici Yükü ile Yüklendiğindeki Elektriksel Çıkış Büyüklüklerindeki Değişim Eğrileri 204
Şekil VI. 87 Gaz Türbin Hız Kontrolü için ANFÇK'nün Blok Diyagramı 207
Şekil VI. 88 GGÜS'nin Türbin hız Denetiminin ANFÇK ile Yapılması için Kontrolör Giriş ve Çıkış Datalarının ANFIS Editörüne Aktarımının Görüntüsü 210
Şekil VI. 89 Gaz Türbini Hız Denetimi için Kullanılan ANFÇK'nun veri Tabanına Hibrid Öğrenme Algoritmasının Uygulanması Sonucunda Elde Edilen Çıkış Sinyalinin Son Durumu 211
Şekil VI. 90 RGÜS için Sugeno Tipi ANFÇK'nün Üç Giriş ve Bir Çıkış Sinyalinden Oluşan Yapısı 211
Şekil VI. 91 Gaz Türbin Hız Denetimi için Dizayn Edilen ANFÇK'nün Yapısı ... 212
Şekil VI. 92 ANFÇK'nun Giriş Değişkenlerinden Olan Hata[e(t)] Üyelik Fonksiyonu ve Değer Aralığı 213
Şekil VI. 93 ANFÇK'nun Giriş Değişkenlerinden Olan Hatadaki Değişimin[de(t)] Üyelik Fonksiyonu ve Değer Aralığı 213
Şekil VI. 94 ANFÇK Hız Kontrollü GGÜS'nin 50 kW'lık Tüketici Yükü ile Yüklendiğindeki Elektriksel Çıkış Büyüklüklerindeki Değişim Eğrileri 215
Şekil VI. 95 ANFÇK Hız Kontrollü GGÜS'nin 100 kW'lık Tüketici Yükü ile Yüklendiğindeki Elektriksel Çıkış Büyüklüklerindeki Değişim Eğrileri 216
Şekil VI. 96 ANFÇK Hız Kontrollü GGÜS'nin 150 kW'lık Tüketici Yükü ile Yüklendiğindeki Elektriksel Çıkış Büyüklüklerindeki Değişim Eğrileri 217
Şekil VI. 97 ANFÇK Hız Kontrollü GGÜS'nin 200 kW'lık Tüketici Yükü ile Yüklendiğindeki Elektriksel Çıkış Büyüklüklerindeki Değişim Eğrileri 218
Şekil VI. 98 ANFÇK Hız Kontrollü GGÜS'nin 250 kW'lık Tüketici Yükü ile Yüklendiğindeki Elektriksel Çıkış Büyüklüklerindeki Değişim Eğrileri 219

Şekil VI. 99 ANFÇK Hız Kontrollü GGÜS'nin 300 kW'lık Tüketici Yükü ile Yüklendiğindeki Elektriksel Çıkış Büyüklüklerindeki Değişim Eğrileri 220
Şekil VI. 100 ANFÇK Hız Kontrollü GGÜS'nin 200 kW'lık Tüketici Yükü ile Yüklendiğinde Terminal Gerilimi ve Yük akımındaki Değişim..... 222
Şekil VI. 101 AC/DC/AC Güç Dönüştürücülü Gaz Güç Üretim Sisteminin Blok Diyagramı..... 223
Şekil VI. 102 AC/DC/AC Güç Dönüştürücülü Gaz Güç Üretim Sisteminin Blok Diyagramı..... 224
Şekil VI. 103 AC-DC-AC Güç Dönüştürücülü ve ANFÇK'lü GGÜS'nin Terminal Gerilimi, Yük Akımı, Tüketici Gücü ve Sistemin Frekansındaki Değişim Eğrileri..... 226
Şekil VI. 104 Güç Dönüştürücülü ve ANFÇK'lü GGÜS'nin Terminal Geriliminin 0.08 Saniyelik Zaman Aralığında Daha Açık Görünümü..... 227
Şekil VI. 105 Hibrid Rüzgar-Gaz Güç Üretim Sisteminin Matlab/Simulink Programında Gerçekleştirilmiş Simülasyon Blok Diyagramı..... 230
Şekil VI. 106 ANFÇK'lü HRGGÜS'nin 50kW'lık Tüketici Yükü ile Yüklendiğinde Üretim ve Tüketim Güçlerindeki Değişim Eğrileri..... 232
Şekil VI. 107 ANFÇK'lü HRGGÜS'nin 100kW'lık Tüketici Yükü ile Yüklendiğinde Üretim ve Tüketim Güçlerindeki Değişim Eğrileri..... 233
Şekil VI. 108 ANFÇK'lü HRGGÜS'nin 200kW'lık Tüketici Yükü ile Yüklendiğinde Üretim ve Tüketim Güçlerindeki Değişim Eğrileri..... 234
Şekil VI. 109 ANFÇK'lü HRGGÜS'nin 300kW'lık Tüketici Yükü ile Yüklendiğinde Üretim ve Tüketim Güçlerindeki Değişim Eğrileri..... 235
Şekil VI. 110 ANFÇK'lü HRGGÜS'nin 400kW'lık Tüketici Yükü ile Yüklendiğinde Üretim ve Tüketim Güçlerindeki Değişim Eğrileri..... 236
Şekil VI. 111 ANFÇK'lü HRGGÜS'nin 50kW'lık Tüketici Yükü ile Yüklendiğinde Terminal Gerilimi, Yük Akımı, Frekans ve Anahtarlama Gücündeki Değişim Eğrileri..... 238
Şekil VI. 112 ANFÇK'lü HRGGÜS'nin 100kW'lık Tüketici Yükü ile Yüklendiğinde Terminal Gerilimi, Yük Akımı, Frekans ve Anahtarlama Gücündeki Değişim Eğrileri..... 239
Şekil VI. 113 ANFÇK'lü HRGGÜS'nin 200kW'lık Tüketici Yükü ile Yüklendiğinde Terminal Gerilimi, Yük Akımı, Frekans ve Anahtarlama Gücündeki Değişim Eğrileri..... 240
Şekil VI. 114 ANFÇK'lü HRGGÜS'nin 300kW'lık Tüketici Yükü ile Yüklendiğinde Terminal Gerilimi, Yük Akımı, Frekans ve Anahtarlama Gücündeki Değişim Eğrileri..... 241
Şekil VI. 115 ANFÇK'lü HRGGÜS'nin 400kW'lık Tüketici Yükü ile Yüklendiğinde Terminal Gerilimi, Yük Akımı, Frekans ve Anahtarlama Gücündeki Değişim Eğrileri..... 242
Şekil VI. 116 AC-DC-AC Güç Dönüştürücülü ve ANFÇK'lü Hibrid Rüzgar-Gaz Güç Üretim Sisteminin Simülasyon Blok Diyagramı..... 245
Şekil VI. 117 AC/DC/AC Güç Dönüştürücülü ve ANFÇK'lü HRGGÜS'den 300kW'lık Tüketici Gücü Çekilirken Üretim ve Tüketim Güçlerindeki Değişim Eğrileri..... 246
Şekil VI. 118 AC/DC/AC Güç Dönüştürücülü ve ANFÇK'lü HRGGÜS'den 300kW'lık Tüketici Gücü Çekilirken Terminal Gerilimi, Yük Akımı ve Frekanstaki Değişim Eğrileri..... 247

Şekil VI. 119 AC-DC-AC Güç Dönüştürücülü ve ANFÇK'lü HRGGÜS'den 300kW'lık Tüketici Yükü Beslenirken Terminal Geriliminde Değişim Eğrisi 248
Şekil VI. 120 Güç Dönüştürücüsüz ve ANFÇK'lü HRGGÜS'den 300kW'lık Tüketici Yükü Beslenirken Terminal Geriliminde Değişim Eğrisi 248

TABLO LİSTESİ

Tablo VI. 1 MWT-300 kW'lık Rüzgar Türbinine ait Yıllık Üretilen Rüzgar Enerjisi 118
Tablo VI. 2 Kanat Eğimi Açısının Klasik PID Kontrolü İle Denetimine Ait Kontrolör Parametreleri..... 143
Tablo VI. 3 ANFÇK'nin veri tabanının oluşturulması için kullanılan giriş ve çıkış data değerleri 160
Tablo VI. 4 RGÜS'nin Kanat Eğim Açı Denetimi için Dizayn Edilen ANFÇK'nun Kural Tablosu 165
Tablo VI. 5 Gaz Türbini Hız Kontrolü için Klasik PID Kontrolörün Kazanç Katsayıları 205
Tablo VI. 6 Gaz Türbin Hız Denetimi için ANFÇK'nin veri tabanının oluşturulmasında kullanılan giriş ve çıkış data değerleri 208
Tablo VI. 7 GGÜS'nin Türbin Hız Kontrolü için Dizayn Edilen ANFÇK'nun Kural Tablosu 214

BÖLÜM I

GİRİŞ VE AMAÇ

Yirmi yıl önce ham petrolde yaşanan kriz, gelişmiş ülkeleri alternatif enerji kaynaklarını araştırmaya yöneltmiştir. Gerek güneş ve gerekse de rüzgar enerjisinden elektrik elde edilmesi üzerine yapılan araştırma ve geliştirme çalışmaları her iki teknolojiyi de günümüzde nükleer santraller ile boy ölçüşebilir duruma getirmiştir. Nükleer enerjide araştırma veya geliştirme ağırlıklı olarak atıklarının depolanması konusunda devam ederken, güneş ve rüzgardan elektrik enerjisinin elde edilmesi hızla gelişmekte, gerek çevre sağlığını ve gerek insan sağlığını olumsuz etkilemediğinden dolayı tüm dünyada hızla yayılmaya ve uygulama alanları bulmaya başlamıştır. En büyük avantajı da ekolojik dengeyi herhangi bir şekilde etkilememeleridir. Gerçek bir çevre dostudurlar. Güneş, rüzgar ve akarsu enerji kaynağı olarak yenilenebilir alternatif enerji kaynaklarındandır. Yani, bu kaynakların zaman içerisinde herhangi bir şekilde tükenmeleri ve azalmaları söz konusu değildir. Ancak, kömür, petrol ve doğal gaz gibi kaynaklar tükenmeye mahkum enerji kaynaklarıdır. Her geçen gün bu kaynaklar azalmaktadır. Tüm dünyanın bildiği bir gerçek, en geç yirmi yıl sonra dünyada ham petrol kaynaklarının tükenme noktasına geleceğidir. Aynı şekilde nükleer santrallerin temel enerji kaynağı olan uranyum ve toryum da belirli zaman sonra tükenmeye mahkumdur. Gerek uranyum gerekse de toryum stratejik birer madde olmaları bakımından, savaş veya siyasi menfaatler söz konusu olduğu taktirde bu maddelere ambargo veya sınırlama getirilebilir. Kısaca, nükleer enerji aynı zamanda bir bağımlılıktır. Böyle bir durum güneş, rüzgar ve akarsu için söz konusu olamaz.

Türkiye'nin kullanımda olan temel enerji kaynakları, petrol, linyit, odun, kömür, doğal gaz, jeotermik ve hidroelektrik olarak gözükmektedir. Ülkemiz, ana

maddesi kendi üretimi olmak koşulu ile, toplam enerji ihtiyacının yaklaşık olarak % 48 ini sağlayabilmektedir. Fosil yakıtlar bakımından fakir bir ülke olan Türkiye, kalan ihtiyacını karşılayabilmek için her yıl milyarlarca dolarlık ithalat yapmak zorunda kalmaktadır. Doğrudan üretilmiş elektriği ya da doğal gaz, petrol ve yüksek kalitede kömürü, elektrik üretebilmek için satın almaktadır.

Yurdumuzda, en çok kullanılan yenilenebilir enerji biçimi olarak, hidroelektrik enerji ve küçük ölçekli su ısıtmaya yarayan güneş kolektörleri sayılabilir. Doğrudan güneş ve rüzgardan elektrik enerjisi üretimi küçük ölçektedir.

Dünya genelinde elektrik enerjisinin büyük bir kısmı hidroelektrik, termik (buhar, diesel kömür, v.b.) ve nükleer santrallardan sağlanmaktadır. Dünyanın birçok bölgesinde yenilenebilir enerji kaynaklarından elde edilen elektrik enerjisi miktarı talep edilen gücü karşılayacak büyüklükte değildir. Alternatif enerji kaynaklarını kullanarak elektrik enerjisi üreten sistemler çoğunlukla termik santrallar tarafından desteklenmektedir. Diğer taraftan rüzgar enerjisi, güneş enerjisi, akarsu enerjisi v.b. gibi yenilenebilir enerji kaynaklarından elde edilen elektrik enerjisinin elde edilebilirliliği insan kontrolünün dışındaki faktörlere bağlıdır. Bu nedenle, yenilenebilir enerji sistemleri klasik enerji kaynakları veya elektrik enerjisi depolama üniteleri tarafından desteklenerek elektrik enerjisinin sürekliliği sağlanır.

Son zamanlarda yapılan araştırmalar neticesinde alternatif enerji kaynakları kullanılarak tüketicilerin elektrik enerjisi talepleri yeterli ölçüde karşılanamayacağından dolayı klasik ham enerji kaynakları (doğalgaz, petrol, kömür, v.b.) ve yenilenebilir enerji kaynaklarının (rüzgar, güneş, akarsu enerjisi, biomas, jeotermal, hidrojen, v.b.) birleşiminden ortaya hibrid (hybrid) güç üretim sistemi ortaya çıkmaktadır. Bu şekilde sistem güvenirliliğini artıracağı ve enerjinin sürekliliğini sağlayacağı kanısına varıldığı görülmektedir [1]. Hibrid güç üretim sistemi; en az iki ve daha fazla ham enerji kaynağından enerji üretimini gerçekleştiren sistemlerin ve paralel olarak birbirlerine katkıda bulunan ünitelerdir. Hibrid güç üretim sistemi adı verilen bu enerji üretim ünitelerinden en fazla rüzgar-güneş, rüzgar-diesel, rüzgar-gaz, rüzgar-mikro hidroelektrik generatörleri yaygın olarak kullanılmaktadır [1]. Elektrik dağıtım şebekesinden uzak olan küçük yerleşim birimlerinde elektrik enerjisi ihtiyacının karşılanması durumunda genellikler rüzgar-güneş hibrid güç üretim sistemlerine daha çok gereksinim duyulmaktadır. Orta ölçekli sanayi sitelerinde ve yerleşim birimlerinde elektrik enerjisi ihtiyacı, rüzgar-

mikro hidroelektrik üretim üniteleri ile sağlanırken enerjinin devamını sağlamak amacıylada diesel jeneratörlerden faydalanılmaktadır.

Hibrid güç üretim sistemleri genellikle yenilenebilir enerji kaynakları ile konvansiyonel enerji kaynaklarının birleşiminden meydana geldiği bir önceki paragrafta ayrıntılı bir şekilde ifade edilmiştir. Bu gibi güç üretim ünitelerinde iki önemli nokta öne çıkmaktadır. Bunlardan birincisi; konvansiyonel üretim teknikleri nedeni ile daha yüksek emisyon, ikincisi ise yenilenebilir enerji kaynaklarından enerji yakalama maliyetinin yüksek olmasıdır. Bu dezavantajların yanı sıra diğer bir önemli problem de ilk kurulum maliyetini minimumda, güvenirliliği maksimumda tutacak boyutlandırmanın yapılması gerekliliğidir [1].

Dünya genelinde sayıları oldukça fazla olan küçük kasaba ve köyler, şehir merkezinden uzak bir çok yerleşim birimleri, çiftçiler, küçük ölçekli sanayi işletmeleri ve buna benzer bir çok yerleşim birimi elektrik enerjisi ihtiyacını karşılamak amacıyla kullanılan elektrik güç üretim sistemlerinden yoksun durumdadırlar[2]. Bu nedenle; hibrid güç üretim sistemleri elektrik dağıtım şebekesinden oldukça uzakta bulunan küçük ve orta ölçekli tüketicilerin elektrik enerjisi taleplerine karşılık vermek amacıyla tasarlanmış, dünyada bir çok uygulamaları bulunmaktadır. Hibrid güç üretim sistemi kurulum aşamasında iken, bölgenin sahip olduğu alternatif enerji kaynaklarının kapasitesinin öncelikli olarak belirlenmesi gerekir. Elde edilecek enerji kapasiteleri yıllık, aylık ve günlük olarak belirlenmelidir.

Hibrid güç üretim sistemi, güç elektroniği ara yüzeyi sayesinde şebekeye bağlı veya şebekeden yalıtılmış biçimde işletilmesi için dizayn edilirler. Güç elektroniği ara yüzeyi gerilim, frekans, güç gibi hibrid güç üretim sistemi parametrelerini arzu edilen değerde korumak amacıyla dizayn edilirler.

Hibrid güç üretim sisteminden elde edilen enerjinin kaliteli, güvenli ve sürdürebilir olabilmesi için bugüne kadar yapılan çalışmalarda bazı kontrol yöntemleri incelenmiştir. Daha önceki yapılan çalışmalarda hibrid güç üretim sistemini oluşturan her bir üretim ünitesinden (rüzgar türbini, güneş panelleri ve mikro hidroelektrik) elde edilen gücün veya gerilimin arzu edilen genlikte ve frekansta olması için bazı kontrol metotları (klasik kontrol yöntemler, oransal-integral kontrol, bulanık mantık kontrol yöntemi, v.b.) kullanılmıştır. Hibrid güç üretim sisteminin kontrolünde iki önemli husus vardır. Bunlar;

- Hibrid güç üretim sisteminde istenilen çıkış geriliminin, frekansının, ve güç sistemi kararlılığının sürekliliğini denetim altına almak amacıyla yapılan dinamik kontrol,
- Güç sistemi işletimini daha iyi düzeye çıkarmak amacıyla tüketicilere farklı enerji kaynaklarından akan enerji akışını dengede tutmak için güç sistemi bileşenlerinin en iyi kombinasyon seçimini gerçekleştiren işletme stratejisidir.

Güç üretim sisteminden en iyi performansını elde etmek için aynı anda iki kontrol yöntemi de kullanılabilir. Dinamik kontrol, sistem çıkışını arzu edilen veya kabul edilen sınır değerleri içersinde korumaktır. İşletme stratejisi (dispatch control) ise, işletme maliyeti terimlerinde optimal sistem performansını elde etmek için enerji akışının kontrolünü sağmaktır [3].

Yapılan tez çalışmasında, hibrid güç üretim sisteminden elde edilen gücün kalitesini veya üretim sisteminin performansını en iyi noktaya getirmek amacıyla adaptif yapay sinir ağlı bulanık çıkarım sistemi (ANFIS) tasarlanmıştır. Hibrid güç üretim sisteminde, her bir üretim ünitesinden elde edilen çıkış geriliminin genliği ve frekansı arzu edilen değerler içersinde adaptif yapay sinir ağlı bulanık çıkarım sistemi (ANFIS) yardımıyla korunmaya çalışılacaktır.

Kontrol uygulamalarında, gerçek zaman uygulamalarının son yıllardaki sayısının geniş oranda artmasında, gelişiminde ve dizaynında bulanık kontroller önemli rol oynamıştır. Bununla birlikte bulanık üyelik fonksiyonları, kurallarının sayısı, tipi ve parametrelerinin uygun olarak doğru seçimi sistemden arzu edilen performansa ulaşmada çok önemlidir. Henüz bulanık kontrolörün üyelik fonksiyonun tipi, kurallarının belirlenmesi, kural sayısı ve parametrelerin seçimi uzmanlık alan bilgileri ve deneme yanılma yoluyla belirlenmektedir. Bu durum bulanık kontrolörün kazanç ayarlamasında ve dizaynında göze çarpan zorluklar olarak bilinmektedir.

ANFIS, bulanık çıkarım sistemin parametrelerini saptamak için yapay sinir ağları ve bulanık mantık sistemin bileşiminden meydana gelmiştir. Neuro-Fuzzy yaklaşımı kullanmanın asıl amacı; sinir ağı metotlarının kullanılmasıyla otomatik olarak bulanık sistemi gerçekleştirmektir. ANFIS kontrolör sisteminde, öğrenme ve adaptasyon çalışmalarını kolaylaştırmak için Adaptif sistemin iskeletinde Fuzzy Sugeno modelleri yer alır. ANFIS sisteminin işletilmesi, sistemi eğitmek için kullanılan sinir ağı eğitim algoritması ve dilsel bulanık ifadelerle anlatılır. ANFIS

sayısal ve dilsel dataların birleşimine izin verirler. Aynı zamanda Neuro-Fuzzy sistemler sayısal datalardan bulanık bilgileri elde etme kabiliyetine sahiptirler [4].

Yapılan çalışmada, hibrid rüzgar-gaz güç üretim sistemi ve bileşenleri ayrı ayrı analiz edilerek sistemin parametrelerine göre matematik modellemesi ve simülasyonu gerçekleştirilmiştir. Hibrid güç sisteminden elde edilecek elektrik enerjisi ile küçük elektrik dağıtım şebekesi veya 40 meskenli küçük bir yerleşim biriminin beslemesi yapılmıştır. Dağıtım şebekesi ve küçük yerleşim birimi için gerekli olan güç gereksinimi arzu edilen gerilim ve frekans değerine göre sağlanmaya çalışılacaktır. Hibrid güç üretim sisteminin performansının iyileştirilmesi ve üretilen gücün kalitesini yükseltmek amacıyla ANFIS kontrolör tasarlanmıştır.

Hibrid rüzgar-gaz güç üretim sisteminin dinamik davranışının modellemesi MATLAB/SIMULINK, Power System Toolbox ve Fuzzy Logic Toolbox yazılım programları ortamında gerçekleştirilmiştir. Simülasyon çalışması neticesinde yapılan hibrid güç üretim sisteminin elektriksel çıkış büyüklüklerinin dinamik davranışları eğriler şeklinde elde edilir. Hibrid güç üretim sisteminden elde edilen gerilimin, gücün ve sistem frekansının arzu edilen değerlerde ve kararlılıkta olması için ANFIS kontrolör kullanılır. ANFIS ile elektriksel büyüklükler tölerans sınırlar dahilinde istenilen değerde olması sağlanır.

BÖLÜM II

GENEL BİLGİLER VE TEORİK YAKLAŞIMLAR

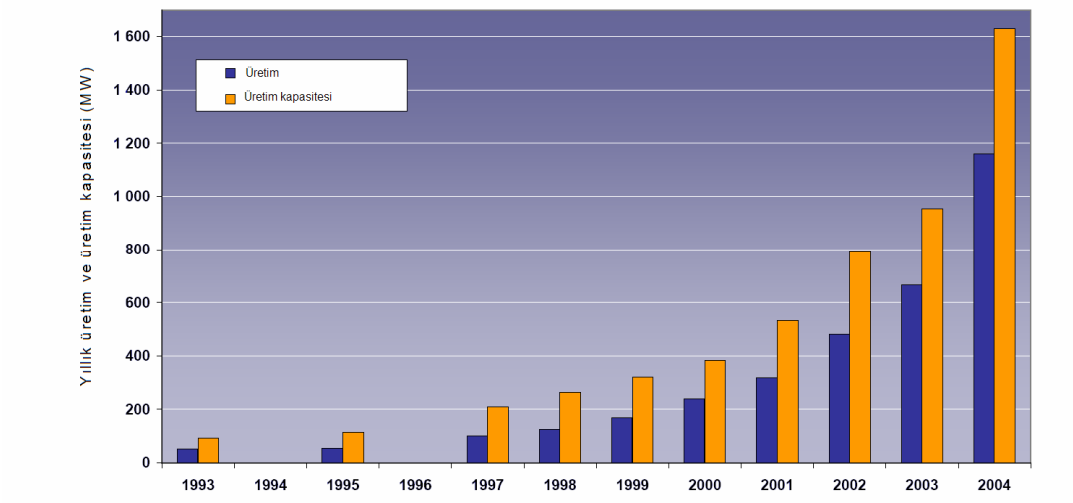
Hibrid güç üretim sistemleri, elektrik enerjisinin üretimi ve tüketimi için tasarlanmıştır. Merkezi elektrik şebekesinden bazı durumlarda bağımsızdırlar ve birden fazla enerji kaynağı ile birleştirilerek işletmeye alınırlar. Hibrid güç üretim sistemleri genellik küçük yüklerin enerji gereksinimlerinin karşılanması amacıyla tasarlanarak enerjimi üretimi gerçekleştirilir. Bazı işletme durumlarında da enerji depolamak amacıyla kullanılırlar.

Hibrid güç üretim sistemleri, uzak yerleşim birimlerinde elektrik enerjisi ihtiyacını sağlamak için kullanılan ve gelişimi henüz çok yeni olan bir güç üretim teknolojidir. Bu güç üretim sistemleri, Alternatif akım enerjisi miktarını yükseltmek için kullanılan ve çok uzun mesafelere elektrik taşırken güç kaybına sebep olan araçların verdiği zararı minimum seviyeye indiren uygulamalardır. Hibrid güç sistemleri genel olarak şu elemanlardan oluşur. Alternatif akım dizel jeneratörleri, elektrik dağıtım şebekesi, AC yükler, DC yükler, eviriciler, çeviriciler, yenilenebilir ham enerji kaynakları (rüzgar türbini ve fotovoltaik paneller) ve batarya gibi ek enerji depolama ünitelerinden oluşmaktadır.

Son yıllarda, elektrik enerjisine olan talep artıkça ve çevreyi koruma gereksinimi daha fazla ortaya atıldıkça rüzgar ve güneş gücü üretimi hızlı bir şekilde artmaktadır. Aynı zamanda, sadece rüzgar-güneş güç üretim sistemleri batarya desteği ile şehir merkezinden çok uzak olan yerleşim birimlerinin enerji talebini herhangi bir yardımcı şebekeye bağlı kalmadan karşılayabilmektedir. Hibrid rüzgar-güneş güç üretim sistemleri yüksek güvenirlikte elektriksel güç sağladığı için, bugünlerde hibrid güç üretim sistemlerinin uygulama ve incelemesi üzerinde daha fazla durulmaktadır.

Son yıllarda hibrid rüzgar-güneş, rüzgar-diesel, rüzgar-gaz veya rüzgar-güneş-hidroelektrik güç üretim sistemleri üzerine yapılan birçok bilimsel ve deneysel çalışmalar hibrid güç sistemlerine çok büyük katkılar sağlamışlardır. Bu yapılan çalışmaların bir çoğu bireysel güç üretim sistemleri yani sadece rüzgar, güneş v.b. gibi güç üretim sistemleri üzerinedir. Dünya genelinde birçok ülkelerde (Hindistan, Meksika, Amerika, Japonya, Avustralya, Suudi Arabistan v.b.) faydalı güneş ve rüzgar enerji kaynaklarının elektrik enerjisi talebinde kullanılabileceğine dair çalışmalar yapılmıştır[5-10].

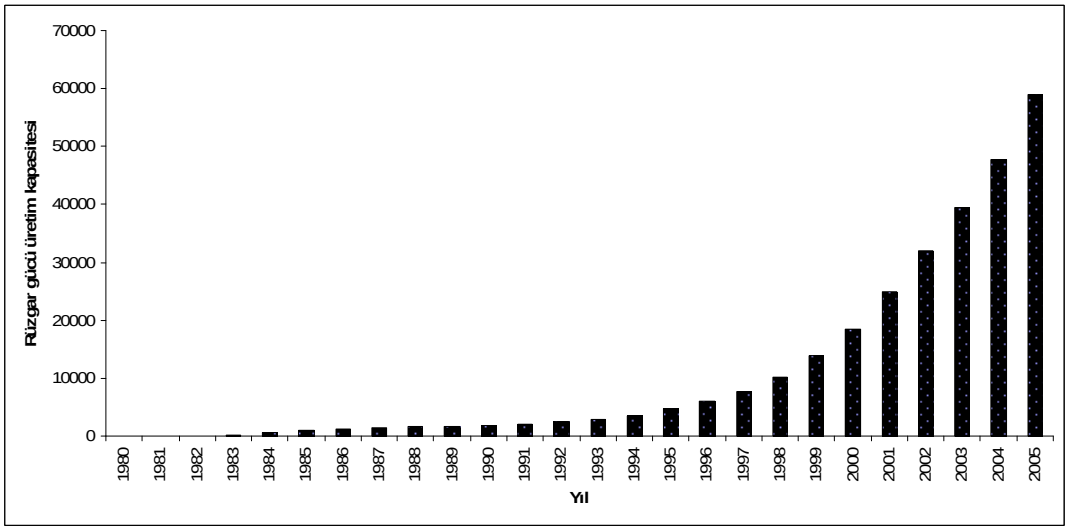
Dünyada iklim değişimleri evrensel ve uzun vadeli bir problemdir. Aynı zamanda, iklim değişimi iklimsel, çevresel, ekonomik, politik, kurumsal ve sosyal baskılar, teknolojik ilerlemeler arasında kompleks etkileşimi içerir. 1831 yılında elektrik enerjisinin bulunuşundan beri, dünyanın hızla artan elektrik enerjisi talebini karşılamak için fosil yakıtlar enerji üretiminde kullanılmıştır ve halende kullanılmaktadır. Bunun yanında, hızla enerji talebinin artmasıyla yakın zamanda fosil veya petrol ürünleri tükenme noktasına gelecektir. Bazı ülkelerde, bu durum daha belirgin bir şekilde ortaya çıkacaktır. Çevresel ve global şartlarda güneş, rüzgar, akarsu, hidrojen v.b. gibi yenilenebilir enerji kaynaklarından güç üretim teknolojileri uygulama alanlarında dikkat çekici bir şekilde hızla gelişmektedirler.



Şekil II.1 1993-2004 yılları arasında dünya genelinde güneş enerjisi üretimi

Şekil II.1'den görüldüğü gibi Uluslararası Enerji Ajansı (IEA) alınan rapora göre dünya genelinde güneş enerjisi üretimi son on yılda yaklaşık 23 kat artmıştır. Gittikçe artan güneş pili veya güneş enerjisi miktarı 2005 yılında yaklaşık 1730 MW

değerine ulaşmıştır [11]. 2005 yılının sonunda bugüne kadar güneş enerjisinden üretilen güç miktarı 6090 MW değerine ulaşmıştır. Güneş enerjisi gücündeki yüzdelik artış oranı 2000 yılından bu yana %33 oranında bir artış göstermiştir.



Şekil II.2 1980-2005 yılları arasında dünya genelinde rüzgar enerjisi üretim kapasitesi

Şekil II.2'de gösterildiği gibi rüzgar enerjide aynı zamanda dünyanın en hızlı gelişen ve büyüyen yenilenebilir enerji kaynağıdır. 2005 yılında yeni rüzgar güç üretim kapasitesi 59,084 MW değerine ulaşmıştır[11]. Avrupa ülkelerinde rüzgar santralı kurulum kapasitesi 40,500 MW düzeyindedir. Kurulu rüzgar santralları Avrupa'nın elektrik ihtiyacının %3 ünü karşılamaktadır. Rüzgar gücünden en fazla faydalanan ülke Almanya'dır. Almanya'nın rüzgar enerjisinden elde ettiği güç miktarı 18,400 MW ve ülke elektrik enerji talebinin %6'sını karşılamaktadır. İkinci sırada rüzgar gücünden en fazla faydalanan ülke ise İspanya'dır. İspanyanın ürettiği elektrik enerjisinin %8 i rüzgar enerjisinden sağlanmakta ve üretilen güç 10,000 MW değerindedir.

Teknoloji ve rüzgar enerjisi uygulamalarındaki gelişmelerin her gecen gücün yenilenmesiyle, rüzgar enerjisinden elde edilen elektriğin maliyeti son yirmi yıla göre %80 den daha fazla oranda düşüş göstermektedir. 1980'li yıllarda rüzgar enerjisinden elde edilen elektriğin maliyeti her bir kWh başına 30 cent (USA) iken, bugünlerde ise 5 cent/kWh dir [12] .

II.1 KAYNAK BİLGİLERİN İRDELENMESİ

Bu bölümde hibrid güç üretim sistemleri üzerine yapılan kaynak taramasının irdelenmesi sunulur. Hibrid güç üretim sistemlerinin modellemesi, analizi ve kontrolü üzerine literatürde yer alan çalışmaların değerlendirmesi yapılmıştır. Hibrid enerji üretim sistemlerin kullanılma düşüncesi 1980 yıllarından sonra ortaya çıkmış ve bu sistemler üzerine yapılan çalışmalar da yine bu yıllarda başlamıştır. İlk zamanlarda yeni olan bu sisteme karşı yabancılık çeken bilim adamları, hibrid enerji üretim sistemlerinin enerji maliyetine olan katkısını ve elde edilen enerjinin güvenilir ve kaliteli olduğunu gördükten sonra, bu sistemler üzerine çalışmalarını artırmış ve bu sistemleri iyileştirmesi amacı ile uygulama çalışmalarına hız vermişlerdir.

Hibrid enerji üretim sistemleri üzerine yapılan araştırmalar sistem güvenirliğini maksimum, maliyetini minimum yapacak boyutlandırma yöntemi geliştirme üzerine çalışmalar yoğunluk kazanmıştır.

Bölgesel hava şartları rüzgar ve güneş enerjisi uygulamalarına, bölgesel coğrafi karakteristiklere, enerji politikalarına ve aynı zamanda rağbet etme gücüne etki eden önemli bir faktördür. Bir çok araştırmacı özellikle fotovoltaik pillerin binalarla entegrasyonu üzerine konsantre olmuşlardır. Simetrik olmayan uygulama çalışmalarında rüzgar güç üretim uygulamaları ve hibrid güneş-rüzgar uygulamaları tercih edilir.

Son on yılda, Hong Kong SAR hükümeti rüzgar ve güneş enerjisi uygulamalarına daha fazla eğilerek yatırım yapmıştır [13]. Aylar süren çalışmalarda Hong Kong'un güneş enerjisi şartları bölgesel güneş terminali ve fotovoltaik pil uygulama çalışmalarını önermiştir. Hong Kong'da binaların fotovoltaik pil ile entegrasyon sistemi güneş enerjisi uygulamalarında bir potansiyel olarak görülmektedir [14].

Uzak yerleşim birimlerinde elektrik enerjisinin maliyetini azaltmak amacıyla Hydro-Quebec tarafından hibrid rüzgar-diesel sistem geliştirilerek dizayn edilmiştir[15]. Dizayn edilen sistemde iki ana blok sunulmuştur. Bunlardan birincisi, diesel türbinle sürülen senkron generatördür. İkincisi ise, rüzgar türbini ile sürülen asenkron generatör sistemidir. İki ana bloğun birleşiminden hibrid güç üretim sistemini meydana getirmiştir. Yükün enerji ihtiyacını karşılamak için her iki (rüzgar-diesel türbin) güç üretim sistemi gereklidir. Rüzgar gücü yük talebinin

üzerinde olduğu zaman, büyük bir olasılıkla diesel türbin kendisinden güç talebi olana kadar devre dışı kalır.

M.F.Gillie ve W.E.Leithead gerçek bir güç sistemi olarak kabul edilen hibrid güç üretim sistemi çalışmasını gerçekleştirmiştir [16]. Bu sistem bir rüzgar türbini ve gaz türbini ile sürülen senkron generatörden oluşmuştur. Bu çalışmada, yazarlar rüzgar türbininin, senkron generatörün, asenkron generatörün dinamik modelini hibrid güç üretim sisteminin çıkışı ifade etmek için elde etmişlerdir. Otomatik gerilim regülatörleri, güç sistem stabilizatörü (power system stabilizer) yardımıyla senkron generatöre ve gaz türbinine etki ederek çıkış gerilimini ve gücünü kontrol altına almışlardır.

Kaynakların irdelenmesi sonucunda, rüzgar türbinini ifade etmek için kullanılan modellerin birçoğu rotor pervanesinin lineer hızı ve rotor güç katsayısı arasındaki lineer olmayan ilişkiye dayanır [17]. Muljadi ve Butterfield, değişken hızlı rüzgar türbini işletmenin avantajlarını ve türbin kanat aralığı kontrollü modeli çalışmalarında sunmuşlardır. Bu yapılan modelde, ortalama rüzgar hızından düşük rüzgar hızına kadar generatör ve güç dönüştürücüsü önceden belirlenen optimum değerde rotor hızını koruyarak maksimum enerji yakalamak için rüzgar türbinini kontrol eder. Yüksek rüzgar hızlarında generatör yük kontrolü veya kanat aralığı kontrolü ile birlikte rüzgar türbini tarafından üretilen hava dinamiği gücünü korumak için rüzgar türbini kontrol edilir. Bununla beraber, yüksek rüzgar hız bölgelerinde generatör yük kontrolü generatör sargısının oranlanmış akım değerini aşması gibi bazı dezavantajların ortaya çıkmasına neden olur.

Hibrid fotovoltaik-rüzgar güç üretim sistemi üç ana bileşenden oluşur. Bunlar; fotovoltaik modül, rüzgar türbinler ve batarya ünitesidir. Bu üç bileşenin işletme performansı hibrid güç sistemi uygulamalarında ve değerlendirmelerinde önemli rol oynamaktadır. Fotovoltaik modüllerin ve rüzgar türbinlerinin pratik modelleri yapılan çalışmalarda başlıca tartışma konuları olmuşlardır.

Bilim adamları ve yazarların bir çoğu fotovoltaik modüllerin akım-gerilim (I-V) karakteristiklerini tanımlamak için elde edilen modellerle fotovoltaik modüllerin karakteristiklerini araştırmışlar [18]. Bununla birlikte, fotovoltaik modüllerin maksimum çıkış gücünü tanımlayan modeller fotovoltaik sistemlerin değerlendirilmesi için daha pratiktir. Fotovoltaik sistemler için iki basitleştirilmiş model vardır. Bunlardan birincisi, Borowy ve Salameh den önerilen modelde, üretici firma tarafından belirtilmiş parametreleri kullanır [19]. Jones ve Underwood ise var

olan modeli fotovoltaik modüller tarafından emilen güneş ışınları ile modül sıcaklığı ve lineer logaritmik ilişkiler arasındaki karşılıklı etkileşime uygular.

R.Glenn Macleod tarafından yapılan çalışmada hibrid rüzgar-diesel güç üretim sisteminde enerji talebinin yoğun olmadığı zamanlarda rüzgar türbini tarafından üretilen güç kontrollü bir şekilde depolanmaktadır. Kontrollü depolama işleminde bulanık kontrol kullanılmış ve hibrid güç üretim sisteminin işletme maliyetinde ciddi oranda azalmalar olduğu görülmüştür [20].

David Arap Cheruiyot Cherus tarafından mobil klinikler için bir hibrid güç üretim sisteminin modellemesi, simülasyonu, performans analizi isminde doktora çalışması yapılmıştır. Hibrid güç sistemi; alternatör, değişken hıza sahip diesel generatör, ambulans aracının üst kısmına montajı yapılmış fotovoltaik üretim ünitesi, batarya sistemi, elektriksel gücü gösteren ölçme elemanları ve kontrol devrelerinden oluşmaktadır. Yapılan çalışmanın ilk etabında sistem dizaynı, analizi ve simülasyon çalışması göz önüne alınmıştır. Hibrid güç üretim sisteminin dizaynı ve simülasyon çalışması Matlab/Simulink programı ile gerçekleştirilmiştir. Sistemin her elemanı için ayrı ayrı dizayn ve simülasyon çalışmaları yapılmıştır. Çalışma sonucunda seyyar ulaşım araçlarının enerji ihtiyaçlarının kontrollü enerji depolama sayesinde güneş panellerinden karşılanacağı ve enerjiye ayrılan ödeneğin daha az olduğu sonucuna varılmıştır [21].

Lu Lin tarafından yapılan çalışmada, hibrid güneş-rüzgar üretim sisteminin uygulama ve karakteristikleri için bir yöntem geliştirilmiştir. Bu çalışmada, yapılan deneysel çalışmalar geliştirilen modelin alan uygulama olasılığını onaylamaya, işletme performansı ve karakteristiklerini incelemeye yardımcı olmuştur. Yeni kavram ve teknolojilerin entegrasyonuyla hibrid güneş-rüzgar güç sistemi optimizasyonu yöntemi enerji maliyet hesaplamalarında yeni kavramlar ve düşük güç kaynağı sağlama olasılığına göre geliştirilmiştir. Hibrid güneş-rüzgar sistem optimizasyon modeli iki durumlu optimal sistem konfigürasyonunu başarıya ulaştırmak ve sistem değerlendirmesini gerçekleştirmeye yardımcı olur. Hibrid güneş-rüzgar güç sistemi optimizasyon modelinin uygulanmasıyla sistem güvenilirliği gereksinmelerine göre teknik ve ekonomik yönden hibrid sistem boyutlandırılır [22].

Rüzgar türbininin mekanik gücünün elektriksel güce dönüşümü bir elektrik generatörü, doğru akım makinesi, senkron makina ve asenkron makina tarafından gerçekleştirilir. 1980 li yıllara kadar yaygın olarak 100 kW ın altındaki küçük güç

kurulum tesislerinde doğru akım makinaları enerji dönüşümünde kullanılmıştır [17]. Günümüzde doğru akım makinaları yüksek bakım maliyetleri ve düşük güvenilirlikleri nedeniyle pek fazla uygulama alanına sahip değildirler. Elektrik generatörlerinin diğer bir türü sabit hız sistemleri için uygun olan senkron generatörlerdir. Rüzgar enerjisinin elektrik enerjisine dönüşümünde kullanılan bir diğer makina sabit mıknatıslı senkron generatörlerdir. Antonios ve arkadaşları sabit mıknatıslı senkron generatöre bağlı değişken hızlı rüzgar türbin modelini yaptıkları çalışmada incelemişlerdir. Bir diğer enerji dönüşümünde kullanılan makina asenkron generatörlerdir. Asenkron generatörün senkron generatörlere göre birçok avantajı vardır. Bunlardan birkaçı; doğru akım alan akımına gerek duymazlar, düşük bakım maliyeti içerir ve diğer makinalara göre düşük maliyetlidirler.

Rajip Datta ve V.T.Ranganathan yaptıkları çalışmada çift beslemeli asenkron generatörün kullanımıyla rüzgar enerjisi dönüşüm sisteminin modelini sunmuşlardır. Çift beslemeli asenkron generatörün stator ve rotorundan birlikte güç üretimi sağlanır. Bununla birlikte, rotor devresi için güç elektroniği ve kontrol maliyetlerinin artmasıyla beraber çıkış gücünde artma meydana gelmektedir. Bu konfigürasyonun bir avantajı reaktif gücü şebeke tarafından sağlanan işletmelerde daha uygun olduğu görülmektedir [23].

J.T.Bialasiewicz ve arkadaşları hibrid rüzgar-diesel güç sistemlerinin dizaynı ve modüler simülasyon çalışmasını gerçekleştirmişlerdir [24]. Yapılan çalışmada hibrid güç üretim sistemin oluşturan elemanların dinamik davranışları ve modüllerin kontrol yüzü ifade edilmiştir. Hibrid güç üretim sistemi bileşenlerinin geçici ve kararlı durumdaki çalışma şartları üzerine simülasyon çalışması yapılmıştır. Simülasyon çalışmasından elde edilen sonuçlar grafiklerle gösterilmiştir.

Alexandre de Lemos Pereira yapmış olduğu projede hibrid güç üretim sistemlerinin modüler denetim kontrolünü gerçekleştirmiştir. Modüler denetim kontrolü hibrid güç üretim sistemlerinin piyasadaki yerini almasına katkıda bulunmak, mühendislik uygulamalarındaki teknik güçlüklerin üstesinden gelmek amacıyla sistem dizaynı yaklaşımının önemli bir parçasını oluşturur. Denetim kontrolü için modüler algoritma Matlab programı içersinde algoritması oluşturulan SuperCon isimli programla geliştirilmiştir. Bu yapılan proje çalışması modüler karakteristikli hibrid güç üretim sistemlerinin zeki ve özerk denetim kontrollerinin gerçekleştirilmesi ve geliştirilmesi için kullanılabilen eksiksiz kontrol sistem dizaynını ortaya koymaktadır [25].

Eduard Muljadi, ve H. Edward McKenna hibrid güç sistemlerinin güç kalitesi üzerine bir araştırma çalışması yapmışlardır. Hibrid güç üretim sistemi iki temel üretim ünitesinden oluşmaktadır. Bunlar rüzgar türbini ve diesel türbin üretim üniteleridir. Hibrid güç üretim sistemlerinin güç kalitesi, rüzgar ve diesel türbinin etkileşimi ve bölgesel yükler çalışmanın ana konularıdır. Bu yapılan çalışmanın ana konusu bütün sistem üzerinde rüzgar güç santralının etkisini göstermektir. Aynı zamanda geçici işletme şartlarında yük değişimlerinin gerilim ve frekans üzerindeki etkileri de tartışılmıştır. Güç salınımları ile ilişkili olarak tanımlanan işletme karakteristikleri ortaya çıkarılmıştır[26]. Güç sistemi üzerinde rüzgar güç salınımlarının etkileri; akımdaki dalgalanmaların neden olduğu hat empedansı üzerinde meydana gelen gerilim düşümü, sabit frekans da indüksiyon motorlarının yol alma anındaki, akımdaki dalgalanmaları, senkron generatör tarafındaki reaktif güç uyumsuzluğu olarak uyartım devresinin cevabının yavaş olması, sistem çalışması ile uyumlu olmayan kapasitör anahtarlamaları ve benzeri gibidir. Bu ifade edilen olumsuz etkilerden dolayı elde edilen güç kalitesinde önemli düşüşlerin ortaya çıktığı görülmektedir.

Gabriele Seeling-Hochmuth'un yapmış olduğu proje çalışmasında, hibrid güç üretim sistemlerinin boyutlandırılması ve işletme kontrolünün optimizasyonu gerçekleştirilmiştir[27]. Bu çalışmada, gerekli olan enerji kaynağının güvenilirliği, her bir kWh başına maliyeti en aza indirmek amacı ile hibrid güç üretim sistemlerinin işletme kontrolü ve boyutlandırılması için yeni bir yaklaşım geliştirilmiştir. Geliştirilen yeni yaklaşım genetik algoritmanın kullanımı ile olmuş ve eğim hesaplamalarına gerek görülmemiştir.

Hibrid güç üretim sistemlerinin boyutlandırması amacı ile ilk çalışma Amerika Birleşik Devletlerinde NREL(National Renewable Energy Laboratory) tarafından desteklenen Manwell and Mc Gowan, tarafından yapılmıştır[28]. HYBRID1 adı verilen bu çalışmada PV üretecin, rüzgar türbinin, dizel jeneratörün, bataryanın, yükün, şarj ve yük regülatörlerinin ve sistemde kullanılabilecek diğer yardımcı elemanların matematiksel modelleri çıkarılmıştır. Rüzgar hızı, güneş ışınımı, sıcaklık ve yükün değişimi birinci aşamada tasarımcının sahip olması gereken değerlerdir. Elde edilen değerlere göre tasarımcının ihtiyaç duyduğu güneş pili alanını ve rüzgar türbini kanat süpürme alanını, batarya kapasitesi ve gerekli dizel jeneratörün boyutu bu program tarafından belirlenir. Bu boyutlara göre sistemin kurulacağı bölgede en az bir yıl boyunca 10 dakika ile 2 saatlik sıklıkta alınmış güneş ışınımı, rüzgar hızı

ölçümleri ve aylık ortalama yük değeri kullanılarak sistemin simülasyonunu yapar. Elde edilen enerjiye göre sistemin güvenirliğini hesaplar. İkinci aşamada maliyet optimizasyonu yapılır, maliyet hesaplaması için tasarımcının sahip olması gereken veriler, güneş pili, rüzgar türbini ve yardımcı elemanların birim maliyetleri, çıkış güçleri, dönüşüm verimleri bilinmelidir. HYBRID 1'in yazılımı DOS ortamında çalışır ve üretilen güneş pili modülleri, rüzgar türbinleri, bataryalar, dizel jeneratörler ve yardımcı elemanlar hakkında kütüphane içermez. Bu bilgilerin her tasarımda tekrar kullanıcı tarafından girilmesi gerekir.

Manwell ve arkadaşları tarafından HYBRID1 modelini temel alan ve NREL tarafından desteklenen bir proje ile University of Massachusetts'te Hybrid2 modeli geliştirilmiştir[29]. HYBRID2'nin farkı Windows ortamında çalışması grafik arabiriminin kullanışlı olmasıdır.

Wael Refaat Anis Ibrahim tarafından yapılan doktora çalışmasında güç sistemlerinde anormal işletme şartlarının önceden kestirimi ve güç kalitesi analizi için Adaptif Neuro-Fuzzy Sistem ve uzmanlık bilgilerini incelemiştir[30]. Anormal işletme şartlarının önceden kestirimi için zeki kontrol sistemleri geliştirilmiştir. Geliştirilen bütün zeki modüllerin performansı adaptif bulanık öğrenme teknikleri yardımıyla üretilip geliştirilmiştir. Neuro-Fuzzy öğrenme adaptif öğrenme kullanımıdır. Bu çalışma, güç sisteminin sürekli işletme şartına göre güç kalitesi yorumuna yeni bir yaklaşım getirmektedir. Güç kalitesi dalga şekillerini ve eğilimlerini öğrenmek için yeni bir öğrenme yaklaşımı tasarlanmıştır. Bu tasarlanan öğrenme tekniği adaptif Neuro-Fuzzy dayalı olarak geliştirilmiştir.

Yang Ying-Gu'nun yapmış olduğu proje çalışmasında, ayarlanabilen Adaptif Neuro-Fuzzy kontrol geliştirilmiştir[31]. Geliştirilen kontrol adaptif Neuro-Fuzzy çıkarım sisteminin öğrenme yapısına dayalıdır. Yine bu çalışmada kapalı ve açık öğrenme durumu tartışılmıştır. Eğitme ve öğrenme Kalman filtresi tahminini temel almıştır.

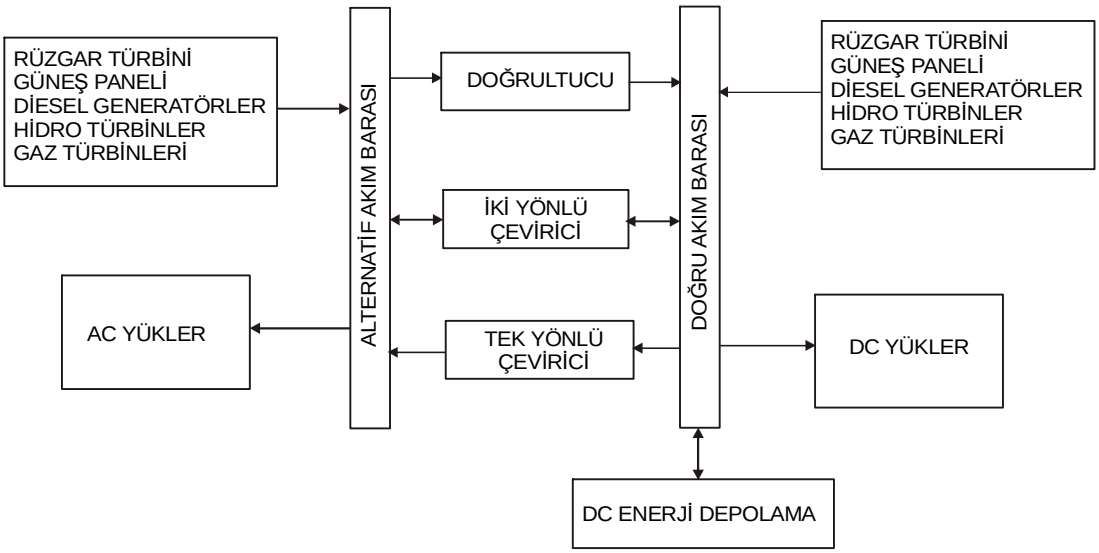
F.A. Alturki ve A. Abdennour, 160 MW güç sistemleri için adaptif Neuro-Fuzzy kontrolörün dizaynı ve basitleştirilmesini simülasyon çalışması ile yaptıkları çalışmada sunmuşlar[32]. Güç sisteminin işletme şartları beş ayrı bölgeye ayrılmış ve bu duruma göre beş optimal kontrol dizayn edilmiştir. Bu kontrolörler gerekli olan verileri üretmek ve Adaptif Neuro-Fuzzy Çıkarım sisteminin parametrelerini ayarlamak için kullanılırlar. Bu yapılan çalışma sonucunda arzu edilen sistemin güvenilirliliği ve dayanıklılığı artmıştır.

BÖLÜM III

HİBRİD GÜÇ ÜRETİM SİSTEMİ BİLEŞENLERİ

Hibrid güç üretim sistemleri elektrik gücünün üretimi ve kullanımı için dizayn edilirler. Hibrid güç üretim sistemleri oldukça geniş, merkezi elektrik şebeklerinden bağımsız ve birden fazla elektrik güç üretim kaynaklarının bileşimidirler. Bu güç sistemlerinin büyüklükleri ve boyutları büyük adalarda tüketilen çok büyük miktarda tüketilen elektrik gücünden (megawatt) tutun da evlerde kullandığımız ev aletlerinin harcadığı küçük güç miktarlarına (1 kW'a) kadar değişiklik göstermektedir. Daha büyük güç üretim üniteleri (nominal işletme kapasitesi 100 kW dan daha büyük) sabit frekansta alternatif akımda işletilirler. Alternatif akım güç üretim santralları; diesel generatörler, elektrik dağıtım sistemleri, yükler, v.b. işletme elemanlarında oluşmaktadır. Bu büyüklükteki hibrid güç üretim üniteleri işletme elemanlarına ilave olarak yenilenebilir rüzgar türbinleri, güneş panelleri, hidroelektrik generatörleri ve enerji depolama ünitelerini içermektedir. Orta büyüklükteki hibrid güç üretim sistemleri (10 kW'ın üzerindeki üretim üniteleri) öncelikli olarak alternatif akımda (AC) işletilmektedirler. Aynı zamanda enerji depolamak amacıyla doğru akım (DC) sistem bileşenlerini de içermektedirler. Hibrid güç üretim sisteminin DC tarafında diesel generatörler, yenilenebilir enerji kaynakları kullanımı ile elektrik enerjisi üreten generatörler ve enerji depolama sistemleri yer almaktadırlar. Küçük güçte ve boyuttaki hibrid güç üretim sistemleri (10 kW altındaki) öncelikli olarak DC sistemlerdir.

Şekil III.1 den görüldüğü gibi genel olarak bir hibrid güç üretim sistemleri, alternatif akım generatörleri, doğru akım generatörleri, AC ve DC dağıtım sistemleri, yükler, yenilenebilir enerji kaynakları (rüzgar türbinler, güneş panelleri, v.b) enerji



Şekil III.1 Hibrid güç üretim sisteminin genel blok şeması

depolama üniteleri, güç dönüştürücüleri, yük denetim mekanizmaları ve denetim amaçlı kullanılan kontrol ünitelerini kapsayabilmektedirler.

III.1 AC DIESEL GENERATÖRLER

Büyük elektrik güç santrallarında kullanılan generatörler diesel makinayla birleştirilmiş senkron generatörlerdir. AC güç üretim sistemlerinde frekans, diesel makinaların hız regülatörleri yardımıyla ayarlanan alt ve üst sınır değerleri içersinde tutulmaya çalışılır. Hız regülatörleri aracılığı ile diesel tahrik makinasının ve senkron generatörün hızını ayarlanan değerde korumak için makinaya giden yakıt akışı kontrol edilir. Elektrik şebekelerinin frekansı doğrudan generatörün hızıyla ilişkilidir. Bu nedenle arzu edilen seviyede tutulmaya çalışılır. Batı yarı kürenin birçok bölgesinde şebeke frekansı 60 Hz iken, dünyanın diğer bölgelerinde şebeke frekansı 50 Hz dir.

Alternatif akım şebekelerinden beslenen yükler, iki tip güç gereksinimine ihtiyaç duyarlar. Bulardan birincisi aktif güç diğeri ise reaktif güçtür. Aktif güç gerçekte tüketilen güçtür. Reaktif güç ise motorlara gerekli olan manyetik alanı sağlamak amacıyla harcanan güçtür. Gerçekte reaktif güç harcanmayan güç olarak ta ifade edilebilir. Bununla birlikte reaktif güçten dolayı çekilen akımın artmasına bağlı olarak güç sistemindeki kayıplarda da çekilen akımın karesi oranında artış görülecektir. Alternatif akım sistemlerinde reaktif güç senkron generatör tarafından

sağlanmaktadır. Reaktif güç generatör devresindeki gerilim regülatörleri ile arzu edilen değere ayarlanabilmektedir.

Klasik AC güç sistemlerinde daima en az bir tane diesel generatör şebekeye bağlıdır. Çünkü, reaktif gücü sağlamak ve frekansı istenilen sınırlar içersinde ayarlamak için gereklidir. Şimdiki elektrik güç sistemlerinde ayarlanması gereken elektriksel büyüklükler diesel generatöre gerek duymadan da arzu edilen değer içersinde tutulabilir.

Elektrik şebekelerine güç gereksinimini sağlayan birden fazla diesel generatör kullanılabilir. Bu generatörler normalde AC baraya bağlanarak buradan da işletme araçları (transformatörler, iletim hatları, v.b.) yardımıyla üretilen güç tüketicilere ulaştırılır. Birden fazla diesel generatörün kullanımı söz konusu olduğu zaman kontrol sistemi güç paylaşımı işlemini yönetir [33].

Diesel generatör işletmenin dezavantajları; yakıta bağlı olması, yakıtın taşıma ve depolama maliyeti, yüksek bakım maliyeti ve çevreye yaydığı duman kirliliği gibi faktörleri içermektedir.

Diesel generatörler dünyada ve şehir merkezinden uzak güç sistemlerinde oldukça yaygın olarak kullanılmaktadır. İşletme amaçlı kullanılan diesel generatörün güçleri oranı 1 kW ile 1 MW değerleri arasında değişiklik göstermektedir. Bu generatörlerin işletme süreleri 25.000 – 30.000 işletme saati kadardır[34]. Diesel generatörün yakıt verimliliği yüksek yük değerlerinde genellikler 2.5kWh/litre – 3.5kWh/litre dir. Yakıt verimliliği düşük yük seviyelerinde belirgin bir şekilde göze çarpmaktadır. Petrol ürünleri ile işletilen generatörlerin boyutları genellikle küçüktürler. Besledikleri güç oranları da aynı oranda küçükse verimleri arzu edilen değerdedirler[34].

III.1.1 Hibrid Güç Üretim Sistemlerinde Diesel Generatör

Yenilenebilir enerji kaynaklarının diesel sistemlerle entegrasyonu gerçekten çok uzaktadır. Yenilenebilir enerji kaynaklarının daha geniş bir şekilde güç sistemlerine katılımı beklenir. Bu nedenle belirli kontrol stratejik bazı problemleri içerirler. Bu problemler:

- Yedek generatör olarak işletilen generatörün işletmeye alma ve çıkarma sayılar çok yüksektir. Bununda sebebi müşteri yüklerinin ve yenilenebilir enerji kaynaklarının değişken olmasıdır.

- Diesel generatörlerin uzun süreli düşük çalışması işletme ömürlerinin azalmasıyla beraber bakım ve yıpranma masraflarının artmasına neden olur. Bu durum diesel generatörün boyutunun yüksek olmasından kaynaklanmaktadır. Yedek bir kaynak olarak dizayn edilen yenilenebilir enerji kaynakları ise bazı işletme saatlerinde yük için gerekli olan gücü karşılamayabilirler.
- Düşük yük değerlerinde diesel generatör için kullanılan yakıtta tüketiminde yukarda ifade edilen nedenlerden dolayı bir artış görülebilir.

Diesel generatörler hibrid güç üretim sisteminde iki önemli nedenden dolayı işletmeye alınırlar. Birincisi; yenilenebilir enerji kaynakları veya batarya grubu yükü karşılayamadığı durumlarda alınır. İkincisi ise, bataryanın şarj durumu arzu edilen değerin altında kalıyorsa diesel generatör işletmeye alınır.

Diesel generatörlerin hibrid güç üretim sistemlerinde devreden çıkartılabilmesi için yenilenebilir enerji kaynaklarından ve bataryadan yük için gerekli olan güç sağlanıyor olması gerekmektedir. Eğer bu gerekli olan güç sağlanıyorsa rahatlıkla diesel generatör işletme dışı bırakılabilir.

III.2 DC DIESEL GENERATÖR

DC diesel generatörler DC yüklerin güç gereksinimini karşılamak amacıyla kullanılır. AC diesel generatörlerden elde edilen güç doğrultucular yardımıyla doğru akım enerjisine dönüşümü yapılır. AC diesel generatörler için bir önceki başlıkta ifade ettiklerimiz DC diesel generatörler içinde geçerlidir.

III.3 FOTOVOLTAİK PANELLER

Fotovoltaik piller güneş ışığını doğrudan doğru akım elektrik enerjisine dönüştürürler. Enerji dönüşümü çok sessiz ve temizdir. Güneş panellerinin bakımı oldukça az ve masrafları düşüktür. Enerji dönüşümü sırasında başka bir enerjiye gerek duymazlar. Bununla beraber yalnızca yeterli güneş ışığı varken fotovoltaik piller doğru akım elektrik enerjisi elde edilir. Yaygın olarak kullanılan fotovoltaik pillerin her birinin çıkış gücü 100 Wp (peak güç) dir. Bazı durumlarda, 300 Wp değerinde güneş panelleri üretilir. 100 Wp ye kadar farklı boyutlarda güneş panelleri

üretilebilir bununla beraber fiyatlandırma da farklılık gösterebilir. Fotovoltaik pillerin boyutuyla fiyatlandırma doğrusal olarak artmaktadır. Fotovoltaik pillerin en büyük dezavantajı maliyetlerin çok yüksek olmasıdır. Ancak gelecek yıllarda maliyetlerin düşmesi beklenilmektedir. Kurulu elektrik şebekelerinden uzak bölgelerde küçük yüklerin güç gereksinmeleri için maliyetle-verimlilik ilişkisi daha çok dikkate alınmaktadır. Güneş panelleri tiplerine bağlı olarak işletme ömürleri 10 ile 20 yıl arasında değişiklik göstermektedir.

Fotovoltaik pil bir yarıiletken devre elemanı olması sebebi ile güneş enerjisini fotovoltaik etki sayesinde DC elektrik enerjisine dönüştürür. Fotovoltaik panel en az birkaç güneş pilinden oluşmaktadır. Bir güneş panelinin güç oranı standart test şartlarında belirlenmektedir. Bunlar; güneş pili birleşme sıcaklık derecesi 25°C, güneş ışığından elde edilen her bir m^2'deki güç $1000W/m^2$ dir. Bir panelin güç oran değeri pil yüzey alanına ve verimliliğine bağlıdır.

Fotovoltaik piller özel akım-gerilim(V-I) ilişkisine sahip olduklarından dolayı akım-gerilim karakteristik eğrisi belirlenir. Güneş panelinin maksimum güç işletme değeri güneş ışınlarının yayılımı ve sıcaklık dereceleri ile elde edilen panel çıkış gücü ile ifade edilir. Fotovoltaik pili üreticileri sıcaklık ve rüzgar hızı gibi değişkenleri belli bir değerde sabit tutarak güneş ışınlarının farklı yayımlım değerlerinde tipik V-I eğrileri elde ederler. Güneş panellerinden, açık devre gerilime yakın akım değerlerinden önce sabit güneş ışınlamasında yaklaşık olarak kısa devre akımına yakın oranda bir akım elde edilir. Güneş ışığı yayılımı artarsa aynı oranda lineer olarak güneş paneli çıkış akımı da artar. Maksimum güç noktasındaki gerilim güneş ışınlama seviyesinden etkilenmemiş olarak aynı seviyede kalır. Güneş panelinin açık devre gerilim çok az değişir[33].

III.3.1 Fotovoltaik Sistemlerin Dizaynı

Enerji kaynaklarının değişken yapısı nedeniyle bir fotovoltaik sistemin en pahalı yönlerinden birisi artan enerji talebini veya ters hava şartları süresince güvenilir güç sağlamak amacıyla sistem özerkliğini oluşturma gerekliliğidir. Fotovoltaik sistem dizaynında maliyeti en yüksek olan iki bileşenden birisi enerji depolama amacıyla kullanılan batarya sistemi, diğeri ise fotovoltaik pil boyutudur. Batarya grubu er geç kullanılacak olan enerjiyi depolarken şarj ve deşarj işlemi sırasında kayıp oranının da minimum değerde olması gerekmektedir.

Birçok güneş panelleri bataryaların şarjı işlemi maksimum güç işletme noktasına uygun değerde dizayn edilirler. Bazı uygulamalarda güneş panelleri doğrudan tüketiciye direkt bağlı olduğundan sürekli maksimum güç işletme noktasında çalıştırılması istenebilir. Bu amaçla optimum güç işletme noktası ayarlaması V-I karakteristik eğrisi üzerinde panel devresinde bulunan empedans ayarlaması ile gerçekleştirilir[35].

III.3.2 Hibrid Güç Üretim Sistemlerinde Fotovoltaik Piller

Geliştirilmiş güç sistemi kullanımı ve işletilmesinde tek güç kaynağı uygulamalarından hibrid güç üretim sistemlerine daha rahat ve kolaylıkla geçilebilir. Verimli ve etkili bir şekilde kullanılan farklı enerji kaynakları kullanıldığı zaman hibrid güç üretim sistemini daha verimli hale getirmek için PV sistemlerin boyutlarında düşüşler görülebilir. Bir hibrid güç üretim sistemi içersinde yer alan PV paneller batarya şarj grubu gibi de kullanılabilmektedir. Aynı zamanda PV panellerden elde edilen elektrik gücü AC bara üzerinden tüketicilere iletilecekse eviriciler yardımıyla DC güç kaynağından AC güce dönüşüm yapılmaktadır.

III.4 RÜZGAR TÜRBİNİ

Rüzgar gücünün ilk kullanımı yaklaşık 5000 yıl önce Nil nehrinde yelkenli gemi götürmek amacıyla kullanılmıştır. Bir çok insan ulaşım ve diğer ihtiyaçları için rüzgar gücünden faydalanmışlardır. Yine insanlar çok yaygın olarak 1700 ve 1800 li yıllarda tahıl öğütmek ve su pompalamak amacıyla da kullanmışlardır. İlk yel değirmeni elektrik enerjisi üretmek için 1890 yılında Amerika Birleşik Devletleri'nin kırsal bir bölgesinde kurulmuştur. Howard Knob Mountain de 1979 yılında, deneysel olarak yaklaşık toplam kapasitesi 2 MW olan elektrik şebekesi-rüzgar türbini tesisi yapılmıştır. Yine 3 MW lık türbin 1988 yılında Orkney Scotland'da Berger Tepesi üzerinde tesis edilmiştir[36].

Günümüzde, temiz bir enerji ve enerji gereksinimini karşılamada ekonomik bir destek sağlayan rüzgar türbinleri çok yaygın olarak dünyanın birçok yerinde kurulup işletilmektedir. Ortalama kurulu rüzgar türbinlerinin gücü 1990 lı yıllara kadar 300 kW değerindeydi. Yeni makinaların kurulumuyla bu güç oranı 1-3 MW'lık güç kapasitesine kadar çıkarılmıştır. Rüzgar türbinlerinin güç kapasitesi 5MW'a kadar geliştirilmiş, dünyanın birkaç bölgesinde test amaçlı işletilmektedir[36]. Geliştirilen

rüzgar türbini dizaynları ve santralları sayesinde 1980 yılında, rüzgar enerjisi üretimi 35 cents/kWh iken 2004 yılında enerji üretimine elverişli bölgelerde üretim maliyeti 3-4 cents/kWh a kadar düşmüştür. Bugün itibariyle dünya genelinde 40.000 MW kurulu rüzgar gücü kapasitesi vardır. 2010 yılında bu oranın 100.000 MW olması tahmin edilmektedir.

Rüzgar türbinleri, büyük güçlü izole edilmiş alternatif akım şebekelerine bağlanarak belli bir güç gereksinimi karşılayan enerji dönüşüm sistemidir. Rüzgar türbinleri havadaki kinetik enerjiyi mekanik enerjiye veya generatörler yardımıyla elektrik enerjisine dönüştürürler. Bu rüzgar türbinlerinin güçleri yaygın olarak 5 kW dan 500 kW a kadardır. 50 kW dan daha yukarı güç değerinde olan rüzgar türbinleri asenkron generatörlerle birlikte kullanılır[33].

III.4.1 Rüzgar Türbinlerinin Genel Çalışma Prensibi

Hava dinamiğinin yardımıyla pervaneler mili döndürmek için rüzgardan enerji yakalarlar. Küçük rüzgar türbinlerinde mil doğrudan elektrik enerjisini üretecek generatörü tahrik ederler. Generatörler ise hareket halindeki mekanik enerjiyi elektrik enerjisine dönüştürürler. İndüksiyon çalışma prensibine göre generatörde gerilim indüklemesi gerçekleşir. Küçük rüzgar türbinleri sabit mıknatıslı alternatörlerle beraber çalıştırılırlar. Daha büyük rüzgar türbinleri ise genellikle ya asenkron generatör yada senkron generatörler birlikte kullanılırlar. Büyük rüzgar türbinlerinin mili generatöre oransal hızı ayarlamak için kazanç kutusu aracılığı ile bağlanırlar.

Şebekeden ayrı rüzgar gücü uygulamalarında, yüksek değişkenli rüzgar hızında belli bir değerdeki güç veya akım için istenilen frekans değerini korumak oldukça zor olmaktadır. Bu nedenle, akım genellikle doğru akıma dönüştürülerek kullanılır.

Rüzgar türbinlerinin bir çoğu iki veya üç pervanelidir(kanatlıdır). İki pervaneli rüzgar türbinleri biraz daha pahalıdır. Üç pervaneli rüzgar türbinlerinde daha az mekanik baskı oluşur. Oluşabilecek problemlere karşı daha hassastırlar.

Rüzgar türbini ile kullanılan generatör çok küçük ise düşük rüzgar hızlarında türbin tepe güç değerine ulaşacak ve rüzgar hızı kesilene kadar devam edecektir. Eğer türbin boyutu çok büyük ise güç türbin hızı kesilene kadar sürekli artış eğiliminde olacaktır. Rüzgar türbininin enerji çıkışı bölgesel rüzgar hızlarının frekans değerlerinin belirlenmesiyle hesaplanabilir. Daha sonra rüzgar türbini güç eğrisinin

kullanarak her bir rüzgar hızında beklenen çıkış gücü aralığı saptanır. Rüzgar türbin yükü ve bundan dolayı hızı gerilim regülatörleri ile elektriksel olarak denetim altına alınır. Çok aşırı rüzgar hızı olması halinde ayarlı ağırlıklarla pervane aralıkları azaltılabilir[35].

III.4.2 Hibrid Güç Üretim Sistemlerinde Rüzgar Türbinleri

Güç kaynağı sadece rüzgar türbininden oluşuyor ise düzensiz rüzgar hızları nedeniyle güvenilir ve kaliteli olmayan güç üretimi söz konusudur. Eğer rüzgar türbinler diğer güç üretim kaynakları ile hibrid sistem içersinde kombine bir şekilde işletilirse üretilen güç geliştirilmiş performans sistemleri yardımıyla daha güvenilir ve kaliteli hale gelir.

III.5 MİKRO-HİDROELEKTRİK GÜÇ ÜRETİM SİSTEMİ

Hidroelektrik güç üretim sistemi, su düşüşünden mil gücü üretmek için tercih edilmektedir. Elde edilen mil gücü yani mekanik enerji yaygın olarak elektrik enerjisi üretmek amacıyla kullanılır. Mikro- hidroelektrik güç üretim sistemleri elektrik enerjisi üretimi dışında özellikle tarım ürünlerinin yetiştirilmesi gibi başka alanlarda faydalı bir biçimde kullanılmaktadır.

Mikro-Hidro güç üretim sistemi fotovoltaik piller veya rüzgar türbinlerinden daha fazla miktarda enerji üretilmesiyle devamlı güç üretimini gerçekleştirebilir. Hidro türbinler generatöre akuple edilmiş bağlantı aracılığı ile bağlanırlar. Generatör kullanarak ta elektrik enerjisine dönüşüm gerçekleştirilir. Mikro-Hidroelektrik güç sistemlerinde AC ve DC generatörler mevcuttur. Regülatör ve kontrol üniteleri AC güç üretim sistemlerinde frekansı ve çıkış gerilimini belirtilen sınırlar dahilinde kontrol etmek amacıyla kullanılırlar[27].

III.5.1 Hibrid Güç Üretim Sistemlerinde Mikro-Hidro-Elektrik Sistemler

Hibrid güç üretim sistemi içersinde rüzgar türbini ile beraber mikro-hidroelektrik güç üretim sistemi birlikte kullanıldığı zaman mikro-hidroelektrik güç sisteminin çıkış gücü artmaktadır. Diğer yenilenebilir enerji kayaklarının çok zayıf

olduğu veya yeterli gelmediği durumlarda mikro-hidroelektrik santralları bu enerji açığını tamamlayabilmelidir. Hibrid güç üretim sistemi rüzgar türbini ve mikro-hidroelektrik oluşuyorsa rüzgar türbinlerinin boyutu mikro-hidro türbinlere oranla daha küçüktür. Bu nedenle toplam sistem yükünü karşılayamazlar. Mikro-hidro sisteminde, uyartım devresi ve hız regülatörleri yardımıyla gerilim ve frekans değeri istenilen performans değerine getirilir. Beslenen yüklerin güç talebi karşılandıktan sonra artan güç olduğu durumlarda şebekeye aktarılmaktadır[37].

III.6 ENERJİ DEPOLAMA ÜNİTELERİ

Enerji depolama üniteleri küçük hibrid güç üretim sistemlerinde daha çok yaygın olarak kullanılmaktadır. Depolama sistemleri çok nadirde olsa geniş AC şebekelerinde ve kısa vadeli güç salınımlarını düzeltmek amacıyla çok yaygın olarak kullanılabilmektedir. Enerji depolama işlemi bataryaların kullanımı sayesinde gerçekleştirilmektedir.

Bataryalar elektro kimyasal devre elemanlarıdır. Kimyasal formda enerjiyi depolar. Talep edilen enerjinin dışında kullanılmayan enerjiyi daha sonra kullanılması için depo etmektedirler. Hibrid güç üretim sistemlerinde kullanılan bataryaların bir çoğu derin kurşun asitlidir. Bu tip bataryalarında birkaç tipi vardır. Bunlar; nikel-kadmiyum, nikel-demir, demir-hava ve sodyum sülfür gibi bataryalardır. Bu bataryaların çoğu deneysel aşamada olduğu gibi pratik uygulamalar için çok güvenilir olmamakla birlikte pahalıdırlar. İfade edilen bataryaların içinde en çok kullanılanı kurşun asitli olanıdır. Batarya maliyetleri sistemin kurulum maliyetinin yanında çok az ihmal edilecek kadar azdır. Fakat bataryanın bakımı, yenisiyle değiştirilmesi, sistem işletim maliyetlerinin önemli bir kısmını oluşturmaktadırlar. Uzun işletme sürelerinde maliyet önceki durumlara göre artmaktadır[38].

Bataryalar bir veya daha fazla seri halde 2 V'luk hücrelerden oluşmaktadır. Levhalardan oluşan her bir hücre elektrolit içersindedir. Levhalar arasında bir kimyasal reaksiyon deşarj olduğu zaman elektrolit bir elektrik enerjisi üretir. Bu kimyasal reaksiyon batarya şarj olana kadar devam eder. Bataryanın depolama kapasitesi verilen gerilim değerinde amper saat ile belirtilir. 100 amper-saat lik bataryadan bir saat için 100 amperlik bir akım elde edilmektedir. Depolama kapasitesinin değeri çalışmasına, ömrüne ve işletme durumuna bağlıdır. Birçok

batarya üreticisi, depolama kapasitesinin değerini verilen bataryanın deşarj zamanı ile tanımlar. Deşarj zamanı da genellikle 20 ile 100 amper-saattir[38]. Bataryanın enerji depolama kapasitesi alternatif enerji sistemlerinin boyutlandırılmasında önemli bir faktördür. Bataryanın boyutu gerekli olan enerji miktarının saptanmasıyla saptanır. Bataryalar seri bağlanarak gerilimleri, paralel bağlanarak kapasiteleri arttırılır. Bataryanın işletme ömrü 20°C ortam sıcaklığında işletildiği sürece 5 ile 10 yıl arasında değişmektedir.

III.6.1 Hibrid Güç Üretim Sistemlerinde Enerji Depolama Üniteleri

Hibrid güç üretim sistemlerinde bataryanın işletilmesi işletme ömrünün optimizasyonu gibi önemli bir unsuru ortaya çıkarır. Çünkü tek kaynaklı güç üretim sistemlerinde batarya kullanımına daha çok gereksinim duyulmaktadır. Örneğin sadece rüzgar güç üretimi söz konusu ise talep edilen yük miktarını her zaman karşılamayabilir. Bu gibi durumlar batarya gruplarından enerji talebi sağlanacağından daha çok işletmede kalırlar. Hibrid güç üretim sistemleri genelde rüzgar, güneş, mikro hidro gibi birden fazla yenilenebilir enerji kaynaklarından oluştuğundan bazı işletme saatlerinde kullanılmayan enerji batarya grupları ile depo edilerek gerekli olduğu durumlarda kullanılmak istenmektedir[39].

III.7 GÜÇ DÖNÜŞTÜRÜCÜLERİ

Hibrid güç üretim sisteminin en önemli işletme elemanlarındandır. Enerji depolama ünitesinden veya DC güç üretim kaynaklarından elde edilen gücü AC şebekelere ve AC yüklere iletilmesini sağlayan devre elemanıdır. Hibrid güç sistemleri için gerekli olan güç dönüştürücülerinin iki tipi vardır. Bunlardan birincisi doğrultucu diğeri ise eviricidir. İşletmelerde genellikle generatörüler AC güç üretirler. Enerji depolama amaçlı kullanılan bataryaların şarj olabilmesi için batarya şarj edicilerin enerjileri AC enerjiden DC enerjisine dönüştürülmeleri gerekmektedir. Bu amaçla kullanılan güç dönüştürücülerine doğrultucu adı verilir. Yani AC gücü DC güce dönüştüren devre elemanlarıdır. DC gücü AC güce dönüştüren elemanlara ise evirici denir.

III.7.1 Eviriciler

Alternatif akım uygulamalarında DC güç üreticileri veya batarya şarj üniteleri kullanıldığı zaman evirici devre elemanlarının kullanılması kaçınılmaz hal almaktadırlar[40]. Eviriciler normalde küçük güç oranları için tek fazlı olarak üretilirler. Üç fazlı eviriciler bir fazlı eviricilere göre maliyetleri yüksektir. Üç fazlı eviriciler daha çok dengesiz yüklere daha kaliteli bir güç sunmak için hizmet vermek amacıyla kullanılmaktadırlar. Yenilenebilir enerji kaynaklı DC baralarda ev aydınlatması amacı ile kullanılmak istenirse küçük ve maliyeti ucuz eviriciler tercih edilmektedir.

Uygulamada kullanılan eviriciler iki tiptir; hat değiştirmeli ve frekansı kendi kendine kontrol eden tipte olanlardır. Hat değiştirmeli eviriciler harici bir AC hatta gereksinim duyarlar. Bu nedenle bu tip eviriciler şebeke frekansını ayarlamayabilirler. Kendi ayarlarını değiştirebilen eviriciler frekansı kendileri kontrol ederler. Bu tip eviricilerde devrede bulunan diğer devre elemanları ile beraber uyumlu çalışamazlar. Bu sebeplerden dolayı anahtarlama biçimli eviriciler tercih edilir[27].

Şebekeden ayrı olan uygulamalarda kullanılan eviriciler, yüksek frekans ayarlama kapasitesine sahip elektronik devre elemanlarından oluşur. Sinüs ve kare dalga şeklinde çıkış veren eviriciler kullanılmaktadır. Sinüs çıkışına sahip eviricilerin sağladığı enerjisinin kalitesi yüksektir. Kara dalga çıkışına sahip eviriciler ise motor ve aydınlatma amaçlı uygulamalarında kullanılmaktadır. Merdiven basamak eğrisi şeklinde sinüs çıkışlı eviriciler ise hassas olmayan elektronik cihazların besleme devrelerinde ve motor uygulamalarında kullanılırlar.

Şebekeye bağlı sistemlerde, hat değiştirmeli evirici çıkış frekansını ayarlamak için şebekeden 50Hz veya 60 Hz lık sinyal kullanılır. Şebekeden alınan örnek sinyal sayesinde eviricinin frekansı sabit tutulur. Kendinden ayarlamalı eviriciler ise frekans ayarlaması için örnek şebeke frekansına gerek duymazlar.

Evirici seçimi yapılırken yükün çekebileceği maksimum güç dikkate alınır. Eviricilerin bir çoğu kısa süreli olarak nominal güçlerinin altı katına kadar çıkış gücü sağlama kabiliyetine sahiptirler. Özellikle endüktif ve kapasitif yüklerin ilk çalıştırılması anında yüksek akım çekmeleri bir çok eviricinin korumaya geçmesine neden olmaktadır. Eviricilerin verimleri düşük güce sahip pratik uygulamalarda verimleri düşüktür. En iyi verim nominal çıkış gücünde veya nominal çıkış gücüne

yakın değerlerde elde edilir. Eviriciler yüksüz işletilmeleri halinde gereksiz yere enerji harcayacaklarından gerekmedikçe yüksüz çalıştırılmazlar[1]. Eviricilerinden verim almak isteniyorsa her yüke göre bir evirici tasarlanmalıdır.

III.7.2 Doğrultucular

Güç üretim sistemleri içersinde yer alan doğrultucular AC gücü DC güce dönüştüren elektronik devre elemanlarıdır. Hibrid güç üretim sistemleri içersinde doğrultucular genellikle AC güç kaynağından alınan gücü DC güce dönüştürerek bataryaların şarj olması amacı ile kullanılır. Bir diğer kullanım gerekçesi rüzgar türbini ve diesel generatörler AC güç çıkışına sahiptirler. Bu elde edilen AC güç doğrultucular ile doğrultularak DC baralara, eviricilere ve DC gerilimle beslenen yüklere uygulanır. Genellikle bütün devre elemanlarında olduğu gibi doğrultucularda tam yükte çalıştırıldıkları zaman verimle en yüksek değerdedirler.

Doğrultucuların yapıları oldukça basit ve maliyetleri ise düşüktür. Diğer bir önemli özelliği de düzenleyici gerilimleri de içermesidir. Bazı generatörler bataryaların şarjı için direkt DC gerilim üretirler.

III.8 SENKRON KONDANSATÖR

Senkron kondansatör AC güç sisteminde şebekenin reaktif güce ihtiyacı olduğu durumlarda reaktif güç sağlama görevini yerine getiren elektro mekanik devre elemanıdır. Senkron kondansatörler hibrid güç üretim sistemlerinde yer alan diesel generatörlerin işletmede olmadığı durumlarda reaktif güç gereksinimini sağlamak amacıyla kullanılırlar. Aynı zamanda asenkron generatörlü rüzgar türbinlerin olduğu sistemleri de içerir. Şebekeye elektriksel olarak bağlı bir senkron makina motor olarak çalıştırılıp makinanın uyartım akımı ayar edilerek reaktif güç gereksinimi sağlanmış olur.

III.9 YÜKLER

Uygulamalarda en çok yaygın olarak kullanılan yükler; 12-24 Volt DC gerilimle çalışan aletler, 220/380 Volt AC gerilimle çalışan aletler veya direkt 380 Volt AC gerilimle çalışan aletlerdir. DC gerilimle çalışan aletler AC gerilimle çalışan aletlere göre biraz daha pahalıdır. AC yüklerin DC kaynak tarafından

beslemesi yapılması gerektiği durumlarda çalışma performansı ve yükün güç oranına uygun eviricilerden yararlanılır. Ama eviriciler güç sistemleri için maliyetli elemanlardır. Eğer evirici kullanımından mümkün olduğu kadar uzak durulursa enerji sisteminin maliyeti belli bir oranda azalır.

Günlük hayatta DC güc ile çalışan elektrikli araç ve cihazların kullanılmasında çoğu zaman DC gerilime ihtiyaç duyulmaktadır. AC güç kaynağından DC aletlerin beslenmesi söz konusu olduğunda AC gücü DC güce dönüştüren doğrultuculardan faydalanılır.

Hibrid güç üretim sistemleri için gerekli olabilecek bir diğer yük de atık yüktür. Normal yalıtılmış şebekelerde bu tür yüklere ihtiyaç duyulmayabilir. Şebekede bir güç fazlalığı olduğu durumlarda şebekedeki gerilim yükselmesini önlemek için atık yük kullanılır. Yük için gerekli olan enerji talebinin az olduğu ve yenilenebilir enerji kaynaklarından elde edilen enerji miktarının fazla olduğu sürece şebekenin kararlı çalışması bozulabilir. Atık yük güç elektroniğine ve anahtarlamalı direnç yapısında bir devre elemanıdır. Bazı işletme durumlarında atık yük olmadan ihtiyaç fazlası aşırı güç giderilemeyebilir [35].

III.9.1 Yük Denetimi

Günlük hayatımızda yer alan güç sistemleri, bir tür yük yönetim birimlerini sistem içersinde bulundururlar. Yük denetim üniteleri yenilenebilir enerji kaynaklarını içeren hibrid güç üretim sistemleri için çok büyük fayda sağlar. Yük denetim birimleri, enerji depolama ünitelerinin yerine geçebilir veya öyle değerlendirilebilir. Bazı uygulamalarda idare edilebilir özellikte yükler tanımlanır. Bu yükler ertelenebilir yükler olarak da isimlendirilebilir. Ertelenebilir yükler, kesin besleme zamanı belli olmakla birlikte herhangi bir zamanda beslemenin sağlanması gereken yüklerdir. Örneğin; günde en azından bir kere yeniden doldurulması gereken bir su deposu tankı için pompalanan su, ertelenebilir yüke örnek gösterilebilir. Tercih edilebilir yükler, boşa gidecek olan fazla gücün kullanımını sağlayan yüklerdir[27].

III.10 KONTROL SİSTEMLERİ

Hibrid güç üretim sistemi uygulamalarında kontrol sistemlerinin kullanılması hemen hemen kaçınılmaz bir durumdur. İstenilen hizmete ve amaca göre değişik kontrol yöntemleri vardır. Hibrid güç sistemlerinde bataryaların aşırı şarj veya düşük

kapasiteli şarj durumlarında istenilmeyen durumların ortaya çıkmasını önlemek için bazı kontrol yöntemleri kullanılmaktadır. Diesel generatörlerin bulunduğu çok büyük güç üretim sistemlerinde güç akışının kontrolü ve diesel generatörlerin bazılarının yük durumuna göre devre dışı bırakılması için kompleks yapıda kontrol metotları kullanılabilmektedir.

Bazı durumlarda kontrol fonksiyonları belirlenen kontrollerle gerçekleştirilir. Buna örnek olarak bir diesel türbinin hız regülatörü, senkron generatörün gerilim regülatörü, rüzgar türbin üzerinde bulunan bataryaların şarj kontrolü gibi işlemler gösterilebilir. Yine hibrid güç üretim sistemini oluşturan yenilenebilir enerji kaynaklarından elde edilen gücün kaliteli olması için her bir üretim ünitesinin frekansı ve geriliminin belirlenen değerler içinde korunması istenir. Bu amaç içinde istenilen amaca hizmet verecek değişik kontrol metotları geliştirilir. Yapılan çalışmada bu amaç için adaptif neuro-fuzzy kontrol sistemi tasarlanmıştır.

Hibrid güç sistemleri için diğer bir kontrol denetleyici olarak ifade edilen ayrılmış kontrolör tarafından gerçekleştirilir. Hibrid güç üretim sisteminde denetleyiciler bütün bileşenlerin hepsini veya bazılarını kontrol edebilir. Denetleyicilerle hibrid güç üretim sistemlerinin işletme durumu, belirlenen işletme koşulları altında sürekli denetim altındadır. Yapılan kontrol eylemleri sistemin işletme amaçlarını kaynak yetersizliği ve belirsizliğine rağmen güvence altına almaktadır. Aynı zamanda sisteme zarar verecek durumları da önleyebilirler [25].

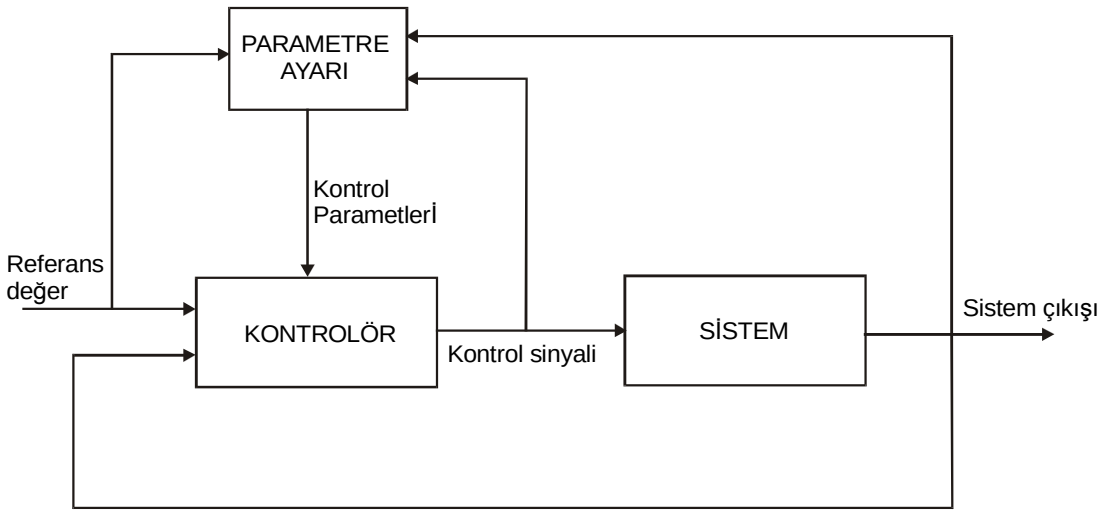
BÖLÜM IV

ADAPTİF NEURO-FUZZY KONTROLÖR

Bugünlerde adaptif kontrol metotları endüstriyel uygulamalarda çok yaygın bir şekilde kullanılmaktadır. Pratik uygulamalardan biriside kontrol sistemlerinin dizaynı ve gerçekleştirilmesidir. Kontrol sistemlerinin dizaynında bir çok teknik, kontrol edilecek sistemin işletme altındaki davranışının ve bileşenlerinin iyi bir şekilde analiz edilmesine bağlıdır. Bununla beraber, uygulama alanlarından verilen bir çok örnekte kontrol edilen sistem çok karmaşık olmamakla birlikte basit yapıya sahip olmasına rağmen anlaşılamamaktadır.

Kontrol teknikleri kontrol edilecek sistemin ileri düzeyde anlaşılması ve amaçlanan işletme düzeyi saptamalarının değerlendirilmesi için gereklidir. Sistem tanımlama ve kontrol işlemini bir araya uyumlu şekilde getirmek sezgi ile öğrenilmesi gereken işlemdir. Sistem tanıma bilgileri sürekli yani sistem modeli önceki tahmini bilgilere dayalı periyodik olarak yenisiyle değiştirilirse kontrol tekniği belki başarıya ulaşabilir[41]. Lineer veya lineer olmayan, sonlu ve sonsuz boyutlu, sürekli ve ayrık dinamik yapıya sahip kontrol edilecek sistemin belirlenmesinde sistem tanımlaması amaçlanır. Sistemin saptanabilmesi için bazı sınırlamalar getirilebilir. Örneğin; sistem boyutunun azaltılması, tek giriş-tek çıkışlı lineer sistemler ve çok değişkenli veya lineer olmayan sistemlerin sınıflandırılması v.b. gibi uygulamalardır. Daha sonra sistem tanımlamasının ilk adımı sistem kararlılığı için gerekli olan parametreler ele alınır. Böylelikle parametrik sistem tanımlanması ve parametrik adaptif kontrol bizi sınırlandırır. Bu gibi sistemlerin uygulamaları bir kaç ana başlık altında ortaya çıkmaktadır. Bunlar; uçaklar için ileri uçuş kontrol sistemleri, işlemsel kontrol, güç sistemleri, dayanıklı işlem veya kontrol ve buna benzer diğer uygulamalar örnek gösterilebilir.

Şekil IV.1'den görüldüğü gibi adaptif kontrol, parametrelerin ayarlanması için bir mekanizma ve ayarlanabilir parametreli özel bir kontrol yöntemidir. Adaptif kontrol nonlineer kontrolün bir türüdür. Parametre ayarlama döngüsü geri besleme döngüsünden daha yavaştır. Adaptif kontrol, sistem performansını geliştirmek amacıyla kontrol ünitesini dizayn etmek için kullanılabilen faydalı özelliklere sahiptir.



Şekil IV.1 Adaptif kontrolün blok diyagramı

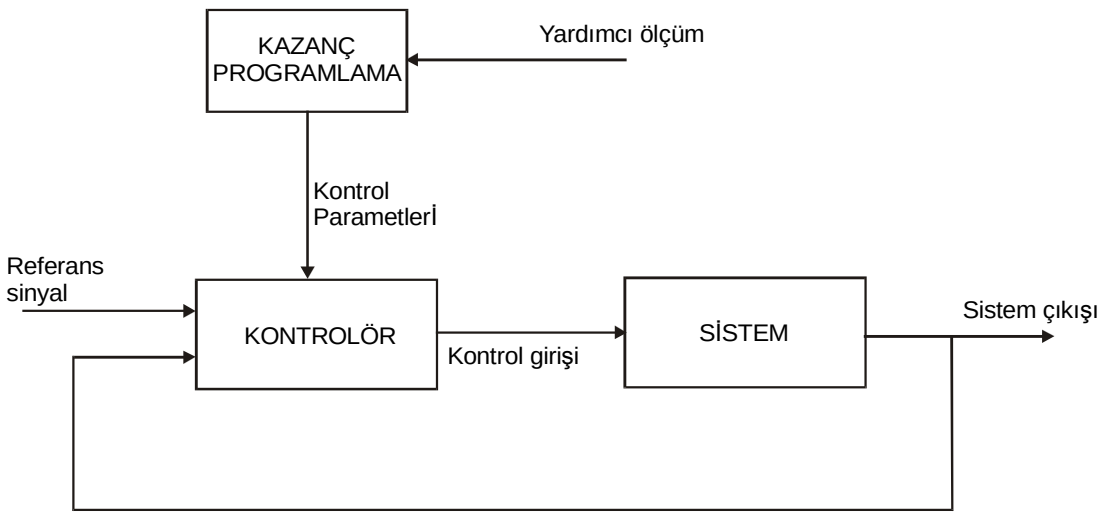
Adaptif kontrol kullanımı için iki önemli faktör söz konusudur. Bunlardan birincisi; işlemsel dinamiklerdeki değişim, diğeri ise sistemi rahatsız edici etkenlerdeki değişimdir. Adaptif kontrol parametreleri, sistem tanımlaması için yeterli veri miktarı olduğu ve sistem işletildiği sürece ayarlanabilir. Örneğin, işlemsel kontrolde basit bir PID (oransal-integral-türev) kontrolör için yapılabilir. Parametre sayısı üç veya dörtten daha fazla ve zamanla değişiyorsa da otomatik ayarlayıcılara gerek duyulur. Son zamanlarda yapılan kontrol uygulamalarında, PID kontrolörün kazanç katsayılarını ayarlamak için yeni ileri düzey adaptif kontrolör teorileri denenmiştir. Bunlardan birisi Jang tarafından sunulan adaptif neuro_fuzzy çıkarım sistemidir[4]. Yapılan bilimsel çalışmalardan ve literatür taraması sonucu elde edilen bilgiler ışığında ANFIS, adaptif kontrol problemlerini çözmek ve istenilen sonucu yakalamak için etkili bir kontrolör yöntemidir.

IV.1 ADAPTİF KONTROLE YAKLAŞIM METOTLARI

Adaptif kontrol sistemleri içersinde genellikle iki döngü bulunmaktadır. Bunlardan birincisi; bilinen kontrolörlü sistemin kapalı geri besleme döngüsüdür. İkincisi ise; sistem girişlerinin kombinasyonuna göre kontrol sinyalini, sistem çıkış cevabını ve kontrol parametrelerini ayarlayan döngüdür. Adaptif kontrole belli yaklaşım metotları aşağıda alt başlıklar halinde ayrı ayrı anlatılmaktadır.

IV.1.1 Kazanç Programlama

Adaptif kontrole en sezgisel yaklaşım kazanç programlamasıdır. 1950'li ve 1960'lı yıllarda uçuş kontrol sistemleri içeriğinde özellikle tanımlanır[41]. Bu yaklaşımda geri besleme için kullanılan sistem çıkışından yardımcı işlem değişkenlerini bulmaktır. Yani işlem dinamiklerindeki değişiklikleri iyi bir şekilde hesaplamaktır. Yardımcı değişkenlerin fonksiyonları olarak kontrolör parametrelerinin değişimiyle sistem parametrelerinin değişimini karşılamak olası bir durumdur. Kazanç programlamaya ait kontrolörün blok diyagramı Şekil IV.2'de görülmektedir.

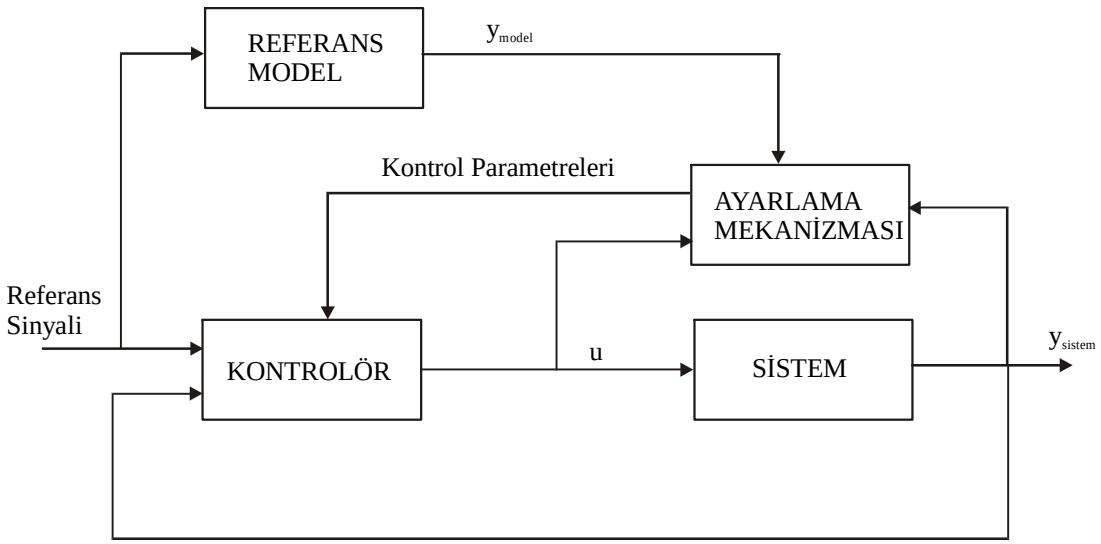


Şekil IV.2 Kazanç programlama kontrolörü

Kazanç programlamanın avantajı sistem dinamiklerindeki değişime cevap olarak parametrelerin yardımcı ölçümlerle hızlıca değiştirilebilir olmasıdır. Birkaç kolayca ölçülebilir değişkenlere oranla çok iyi kazanç parametreleri biçimlendirilmişse sistem dinamiklerinin daha uygun olduğu görülmektedir. Kazanç programlama pratik uygulamalarda çok iyi olmasına rağmen döngü adaptasyon sisteminin dezavantajılarına sahiptir.

IV.1.2 Model Referanslı Adaptif Sistem

Sistem dinamiklerindeki değişimi karşılamak amacıyla önerilen kazanç programlamadan farklı olarak model referanslı adaptif kontrolün iki türü vardır. Bunlardan birincisi; seri yüksek kazançlı model, ikincisi ise paralel modeldir. Seri yüksek kazançlı model ön sezi ile hareket eder ve yapısı basittir. Yalnızca bir parametreyi güncelleyebilir. Bununla beraber bazı problemleri de beraberinde getirir. Paralel model ise; arzu edilen kapalı döngü sistem performansını referans model yardımıyla gerçekleştirir.



Şekil IV.3 Model referanslı adaptif kontrolün genel blok diyagramı

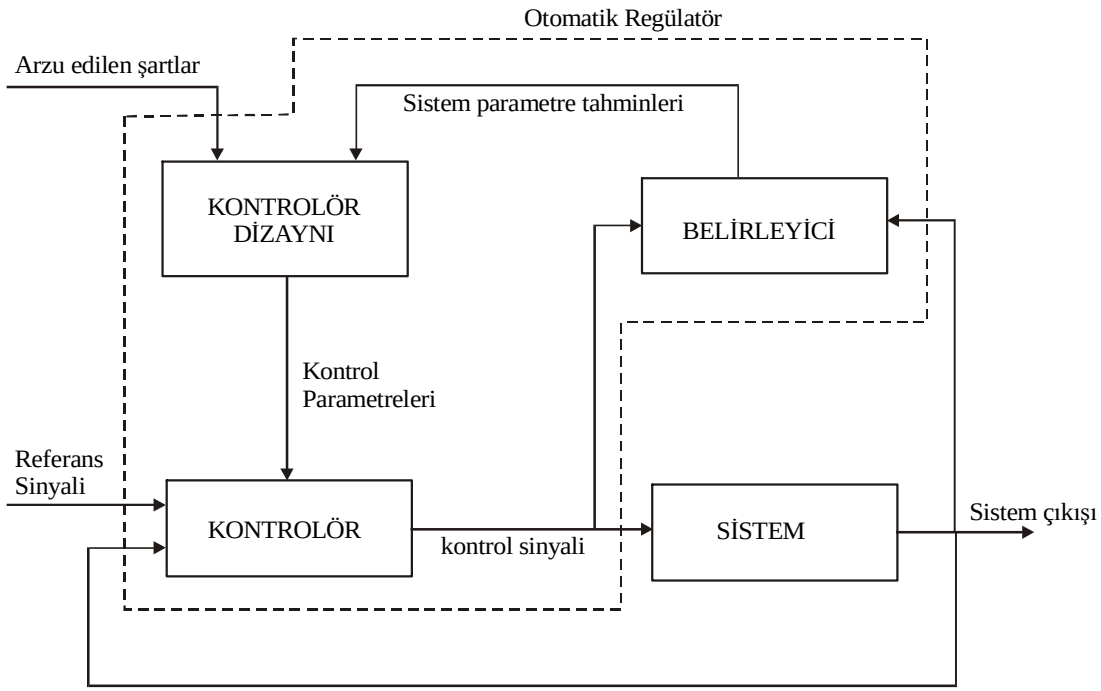
Model referans adaptif kontrolün görevi; sistem cevabındaki değişiklikleri yenisiyle değiştirmek için parametreli kapalı döngü kontrolü sağlamaktır. Bu kontrol yaklaşımında referans model sistem kullanıcısının arzu ettiği cevap karakteristikleri içerir. Şekil IV.3'de görüldüğü gibi sistem çıkışı referans modelden arzu edilen değerlerle karşılaştırılır. Karşılaştırma neticesinde kontrol parametreleri ortaya çıkan

hata değerine bağlı olarak yenisiyle değiştirilir[42]. Örneğin; bir robot kolunun pozisyonunu çok az titreşim yaparak siz kendiniz ayarlayabilirsiniz. Ama gerçekte titreşim olmadan az hata ile yapmak isterseniz model referans adaptif sistemden faydalanabilirsiniz.

IV.1.3 Öz Ayarlı Adaptif Kontrol (Self-tuning)

Kendi kazanç parametrelerini ayarlayan adaptif kontrol tekniğinde, bilinen sistemler için bir kontrol dizaynının birisinden başlamaktır. Bu dizayn metodu kontrolörün yapısı ve kontrol parametreleri ile sistem parametreleri arasındaki ilişkiyle özetlenir. Sistem parametreleri gerçekte bilinmediği için tekrarlamalı parametre saptama algoritmasının kullanımıyla elde edilir. Kontrol parametreleri sistem parametre tahmininden sonra bulunur[43]. Şekil IV.4'de öz ayarlı adaptif kontrolün blok diyagramı görülmektedir.

Belirleyici ve kontrol arasındaki açık bir farkın varsayılması, model referans adaptif kontrolün aksine kontrolör parametreleri Şekil IV.4'deki modelin amacına ulaşması için sürekli güncellenir. Kendi parametrelerini ayarlama kabiliyetine sahip olduğu için kendi kendine ayarlanabilen veya otomatik regülatör olarak isimlendirilir.



Şekil IV.4 Öz ayarlı adaptif kontrolün blok diyagramı

Öz ayarlı adaptif kontrolör dizayn yöntemi seçiminde çok esnektir. Otomatik regülatörlü adaptif sistemlerin analizi, belirleyici parametrelerden kontrol parametrelerine dönüşüm nedeniyle model referans adaptif sistemlerin analizinden daha karmaşıktır. Bazı durumlarda kontrolör parametrelerin direkt tahmin edilmesiyle otomatik regülatör algoritması basitleştirilebilir [44].

IV.2 BULANIK MANTIK

Bulanık mantık üzerinde ilk çalışmalar California Üniversitesinde Lotfi Zadeh ve Berkely tarafından yapılmıştır [45]. Daha sonra bulanık mantığın gelişimi teknolojik uygulamalara anahtar olabilecek yeni modelleri izlemiştir. Avrupa'da, Amerika'da ve Japonya'da bulanık mantık üzerinde birçok çalışma yapılmış ve endüstriyel alanlarda uygulama imkanı bulmuştur. Hatta bugünlerde yüzlercesi gerçekleştirilen bulanık mantık uygulamalarının geleneksel kontrol sistemlerine göre ne kadar üstün olduğu ortaya konulmuştur.

Bulanık mantığın Avrupa'da ilk endüstriyel uygulamaları 1970'den sonra başlamıştır. İngiltere'de Kraliçe Mary Kolejin'de Ebrahim Mamdani'nin bir buhar makinası kontrol etmek amacıyla bulanık mantığı kullanmıştır. Almanya'da Aachen Üniversitesi'nde Hans Zimmermann adındaki bir bilim adamı destekleyici sistemlerin kararı için bulanık mantığı seçmiştir. Bulanık mantığın ilk endüstriyel uygulama alanları çimento ocakları ve su arıtma sistemleridir. Fakat 1970'li yıllarda bulanık mantık endüstri alanında geniş bir kullanım alanı bulamamıştır [46].

Sistemin kesin matematiksel modelinin bilindiği durumlarda klasik kontrol teorisi, güçlü analiz ve iyi çözümler üretebilmektedir. Dolaysıyla klasik kontrol teorisi yetersiz kalmaktadır. Bir sistemin matematiksel modelinin çıkartılması çeşitli güçlükler içermektedir. Bu duruma alternatif bir çözüm olarak bulanık mantık geniş uygulama alanı bulmuştur. Bulanık mantığın temeli insanın herhangi bir işlemi kontrol etmedeki düşünsel ve sezgisel davranışının benzetimine dayanmaktadır. İnsan bir sistemi (işlemi) kontrol ederken kafasında sistemin matematiksel modelini bilmemekte fakat sistemin bulunduğu gerçek durumdan istenilen duruma götürmek için beceri ve deneyimlere dayalı olarak bir kontrol yöntemi izleyerek amaca ulaşmaktadır [47].

Uzmanlık çözüm yöntemlerinde, insan mantığını uygulayabilmek için sistemin matematiksel modeline ihtiyaç duyulur. Bulanık mantık matematiksel model gibi

geliştirilmiş bir kontrol yöntemidir. Aynı zamanda bulanık mantık algoritmik formda değerlendirme işlemlerini ve insan kararını açıklamaya olanak sağlar. Bulanık mantık ile ne yapılabileceğinin de sınırı vardır. İnsan düşüncesini tamamıyla anlama yeteneği, yaratıcılık ve hayal gücü bulanık mantık ile taklit edilmeyebilir. Bununla birlikte, bulanık mantık verilen kural dışı bir durum için bir çözüm üretebilir ve benzer durumlar için aynı çözüm yöntemi saptanabilir. Kurallarla kesin istenilen durumlar için teknik sistemin arzu edilen performansını tanımlayabilirseniz bulanık mantık etkileyici bir şekilde bu tanımlanan bilgiyi bir çözüm yoluna koyar.

Klasik kümeler üzerinde tanımlanmış "ve", “veya”, “değil" gibi mantıksal işlemler bulanık kümeler üzerinde de tanımlanabilir. Bulanık kümeler teorisinde bir elemanın üyelik derecesi doğruluk derecesi olarak değerlendirilir. Klasik mantıksal işlemlerde doğruluk değeri olarak sadece [0,1] değerlerini kullanırken, bulanık mantıkta [0,1] aralığındaki sonsuz değer doğruluk değeri olarak kullanılır. Klasik mantıkta bir şey ya doğru ya da yanlış olabilirken bulanık mantıkta bir şey doğruluk derecesine göre doğru yada yanlış olabilir[48].

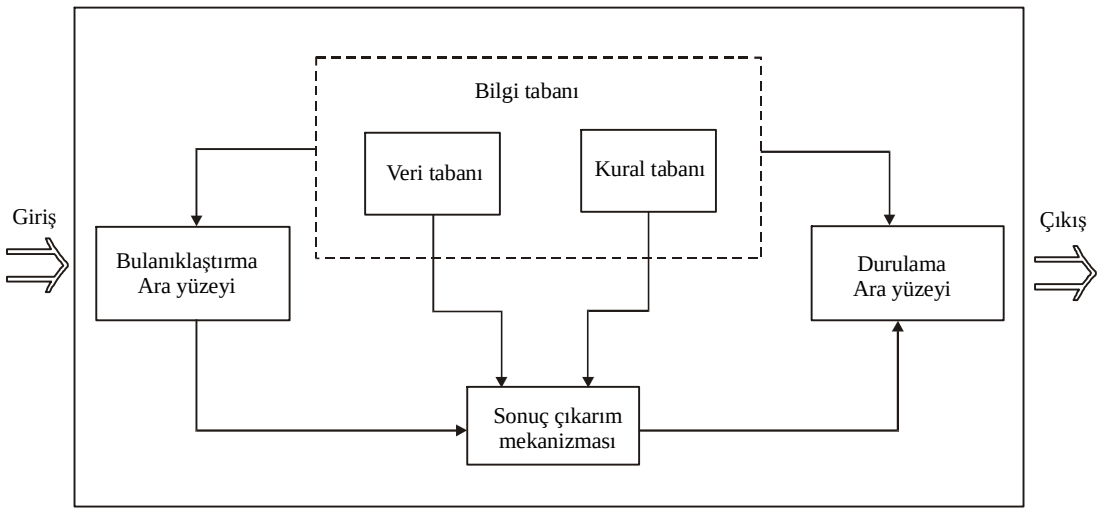
IV.2.1 Bulanık Çıkarım Sistemi

Bulanık çıkarım, bulanık mantığın kullanarak verilen giriş değerlerinden çıkışı biçimlendirme formüle etme işlemidir. Bulanık çıkarım işlemi, üyelik fonksiyonlarını, mantıksal operatörleri ve ***eğer-ise*** kurallarını içermektedir. Bulanık mantık kontrolör elde edilmesinde, genelde Mamdani ve Sugeno tipi olmak üzere iki tip bulanık çıkarım sistemi kullanılmaktadır[49].

Bulanık çıkarım sistemi oluştururken değişik biçimlerde üyelik fonksiyonları seçilebilir. Çok sık kullanılan üyelik fonksiyonları üçgen, yamuk, Gauss eğrisi, sigmoid v.b. biçimindedir. Bulanık çıkarım sistemleri, mevcut verilerden seçilen girdi değişkenlerinden çıktı değişkenlerinin elde edilmesini sağlamak amacıyla bulanık küme ilkelerini kullanan sistemlerdir. Bulanık çıkarım sistemlerinin en büyük avantajı insan deneyimlerinin ve sözel verilerin bulanık modele katılması ile çözüme ulaşılmasıdır. Bulanık çıkarım sistemi, bulanık ***eğer-ise***(If-then) kuralları adı verilen bulanık kurallara dayanan sistemlerdir. Bulanık çıkarım sisteminin temeli, bulanık ***eğer-ise*** kurallarından anlaşılacağı üzere giriş ve sonuç kısımlardan oluşmaktadır. Giriş kısımda sonuca sebep olan giriş değişkenleri ve bunlar arasındaki

mantıksal ilişkiler, sonuç kısımda ise bu giriş değişkenlerine bağlı olarak ortaya çıkan sonuç değişkenleri yer alır.

Şekil IV.5'de bulanık çıkarım sisteminin temel yapısı gösterilmektedir. Bulanık çıkarım sistemi, bulanık küme teorisi, bulanık ***eğer-ise*** kuralları ve bulanık nedene dayalı etkili hesaplama iskeletidir. Aynı zamanda, bulanık çıkarım sistemi bulanık model olarak da isimlendirilir. Şekil IV.5'de gösterilen bulanık çıkarım sisteminin alt sistemlerinin tanımları aşağıda ayrı ayrı yapılmaktadır.



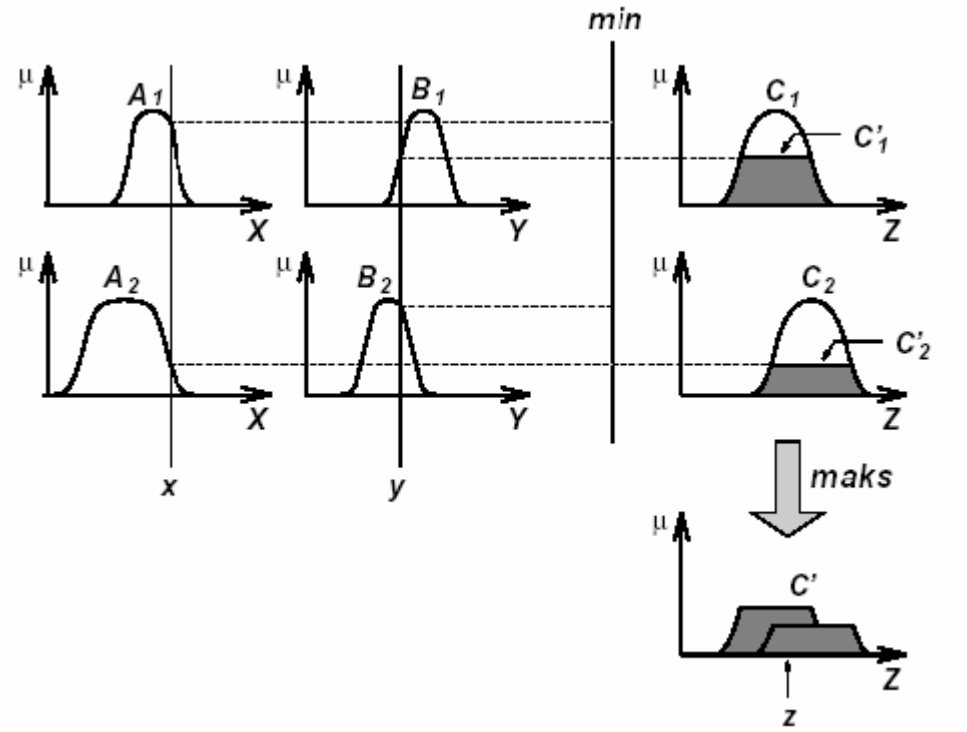
Şekil IV.5 Bulanık çıkarım sistemi

- **Bulanıklaştırma Ara Yüzeyi:** Giriş değerlerinin değer aralığı bulanıklaştırma modülüne uygun bir şekilde üyelik fonksiyonları ile birlikte dilsel değişkenlere dönüştürür. Daha sonra, değer aralıkları bulanık kümeye uygun dilsel terimlerle adlandırılır.
- **Kural Tabanı:** Bulanık *Eğer-İse* kuralları kümesini içerir.
- **Veri Tabanı:** Bulanık kurallarda kullanılan üyelik fonksiyonlarını tanımlar.
- **Durulaştırma Ara Yüzeyi:** Bulanık işlemler sonucu elde edilen bulanık çıkarım sonuçlarını keskin sayısal çıkış değerlerine dönüştürür.
- **Bilgi Tabanı:** Kontrol amaçlarını uygulama alanındaki kontrol stratejisini belirler. Yani incelenecek olayın girdi değişkenlerini ve bunlar hakkında tüm bilgileri içerir.
- **Sonuç Çıkarım Mekanizması:** Kural tabanında giriş ve çıkış bulanık kümeleri arasında kurulmuş olan ilişkilerin hepsini bir arada toplayarak

sistemin bir çıkışlı davranmasını sağlayan işlemler topluluğunu içeren mekanizmadır.

IV.2.1.1 Mamdani Bulanık Çıkarım Sistemi

İki girişli, iki kurallı Mamdani bulanık çıkarım sistemi ile toplam z çıkışının nasıl elde edildiği Şekil IV.6'da gösterilmektedir. Mamdani bulanık çıkarım sisteminde giriş ve çıkış değişkenleri bulanık kümeler ile tanımlanmıştır.



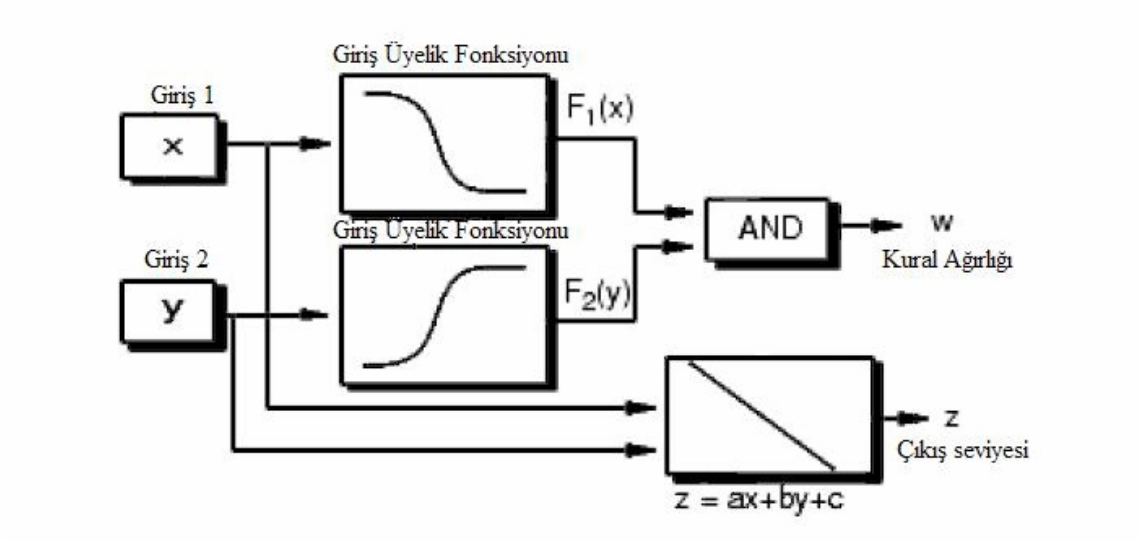
Şekil IV.6 Mamdani Bulanık Çıkarım Sistemi [30]

Mamdani bulanık çıkarım sisteminde, küçük kontrol uygulamalarında maksimum operatör olarak VEYA(OR), minimum operatör olarak da VE(AND) bulanıklaştırıcı operatörler kullanıldığı halde, diğer bulanık operatör türlerine şartlı cümlenin farklı bölümleri arasında ilişki kurmak amacıyla gerek duyulur.

Bulanık kontrol kuralında kullanılan maksimum bulanıklaştırma operatörü VEYA(OR) ise kontrol çıkışı girişin maksimum üyelik derecesine göre ölçeklendirilir. Eğer kontrolde minimum bulanıklaştırma operatörü VE(AND) kullanıldıysa kontrol çıkışı bu sefer girişin minimum üyelik derecesine göre derecelendirilir. Standart MAX-MIN/MAX-PROD metotlarının kullanılmasıyla kural tabanı optimizasyonu keyfi kural ekleme ve silmeden oluşur.

IV.2.1.2 Sugeno Bulanık Çıkarım Sistemi

Sugeno metodu verilen giriş ve çıkış veri kümesinden sistematik bir yolla bulanık kuralları planlama girişimi olarak ifade edilir. Sugeno M., bir çok yönü ile Mamdani bulanık çıkarım sistemine benzeyen Sugeno veya Takagi-Sugeno-Kang bulanık çıkarım sistemini tanımlamıştır[50]. Bulanık çıkarım işleminin ilk iki kısmı, girişlerin bulanıklaştırılması ve bulanık operatörler Mamdani bulanık çıkarım sistemi ile bire bir aynıdır. Mamdani ve Sugeno bulanık çıkarım sistemindeki tek fark, Şekil IV.7'de görüldüğü gibi Sugeno bulanık çıkarım sistemindeki çıkış üyelik fonksiyonlarının lineer ve sabit olmasıdır.



Şekil IV.7 Sugeno bulanık çıkarım sistemi [51]

Şekil IV.7'deki şekilde, Sugeno bulanık çıkarım sistemine dayalı bir kuralın oluşumu gösterilmektedir. ***Eğer*** Giriş-1 ***x*** ve Giriş-2 ***y*** ise Çıkış ***z*** $=ax+by+c$ dir. Sugeno model için çıkış seviyesi z sabit ve $a=b=0$ yani sabittir. Her bir kuralın(***zi***) çıkış seviyesi ***wi*** etkinlik derecesi ile ağırlıklıdır. Sugeno bulanık model birinci dereceden daha yüksek üyelik fonksiyonlarıyla kullanıldığı zaman, sistem performansı çok az olmakla beraber istenilmeyen karmaşık durumlar eklenmektedir.

Sugeno bulanık çıkarım sistemleri adaptif bulanık uygulamalarda daha sıkça kullanılmaktadır. Sistemin giriş değişkenlerine üzerinde her bir kuralın bağımlılığı yüzünden lineer kontrollerin iç denetimcisi olarak Sugeno model kullanımı daha idealdir[51].

IV.3 YAPAY SİNİR AĞLARI

Otomatik kontrol sistemlerinde yapay sinir ağlarının (neural networks) kullanımı, Rumelhart ve arkadaşları tarafından ifade edilen öğrenme kurallarına kadar pek fazla kimsenin ilgisini çekmemiştir. Daha sonra, literatürde önerilen sinir ağları kontrolör dizayn metotlarının sayısı hızlı bir şekilde artmıştır[52].

Sinirsel kontrol(neural control) zeki veya ileri düzey kontrolün genel bir bölümüdür ve yapay zeka kavramına dayanır. Yapay zeka insan düşüncesinin bilgisayar ortamına aktarımıdır. Yapay zeka teknikleri; genellikle uzman sistemler, bulanık mantık, yapay sinir ağları ve genetik algoritma olarak sınıflandırılabilir. Klasik uzman (bilirkişi) sistemleri Boolean algoritmasına dayanır ve kesin hesaplamaları kullanır. Bulanık mantık, tam doğru ile tam yanlış arasında kalan kısmi değerler kavramı yönetiminin genişletilmişidir [53].

Yapay zeka (artificial intelligence) kavramı ile insanın düşünebilme ve öğrenebilme kabiliyetleri en önemli araştırma konuları içersine girmiştir. Son bilim ve teknolojideki gelişmeler yapay zeka kavramına bir hız kazandırmıştır. İnsanın düşünme yapısını anlamak ve bunun benzerini ortaya çıkaracak bilgisayar işlemlerini geliştirmeye çalışmak olarak tanımlanan yapay zeka, aslında programlanmış bilgisayarlara düşünme yeteneği sağlama girişimidir. İnsan gibi düşünen ve davranan sistemlerin geliştirilmesine yönelik olarak 1950'li yıllardan beri süren yapay zeka çalışmaları, bir noktada insanı taklit etmeye yönelik olduğundan mühendislik, nöroloji ve psikoloji gibi alanlara da yayılmıştır. İnsan gibi düşünebilen ve davranabilen sistemlerin geliştirilmesi için yapılan çalışmalarda bugün gelinen nokta, henüz yapay zekanın tam olarak geliştirilememiş olmasıdır. Yapay zekanın mümkün olabilirliği tartışmaları bir yana bırakılırsa bu konudaki çalışmalar bu alanı destekleyen farklı alanlardaki çalışmalarla birlikte devam etmektedir[54].

Yapay sinir ağlarının (Artificial Neural Networks) kullanımı yapay zekanın en etkili yaklaşımıdır. Yapay Sinir Ağları(YSA), basit biyolojik sinir sisteminin çalışma şeklini simüle etmek için tasarlanan programlardır. Simüle edilen sinir hücreleri (nöronlar) içerirler ve bu nöronlar çeşitli şekillerde birbirlerine bağlanarak ağı oluştururlar. Bu ağlar öğrenme, hafızaya alma ve veriler arasındaki ilişkiyi ortaya çıkarma kapasitesine sahiptirler. Yani, YSA'lar, normalde bir insanın düşünme ve

gözlemlemeye yönelik doğal yeteneklerini gerektiren problemlere çözüm üretmektedir.

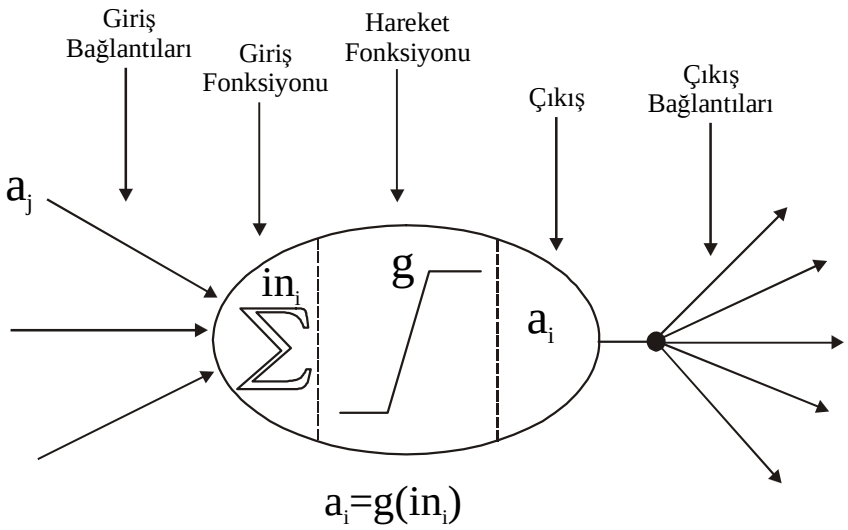
Biyolojik sistemlerde öğrenme, nöronlar arasındaki sinaptik (synaptic) bağlantıların ayarlanması ile olur. Yani, insanlar doğumlarından itibaren bir "yaşayarak öğrenme" süreci içerisine girerler. Bu süreç içinde beyin sürekli bir gelişme göstermektedir. Yaşayıp tecrübe edindikçe sinaptik bağlantılar ayarlanır ve hatta yeni bağlantılar oluşur. Bu sayede öğrenme gerçekleşir. Bu durum YSA için de geçerlidir. Öğrenme, eğitme yoluyla örnekler kullanarak olur; başka bir deyişle, girdi/çıktı verilerinin işlenmesiyle, yani eğitme algoritmasının bu verileri kullanarak bağlantı ağırlıklarını (weights of the synapses) bir yakınsama sağlanana kadar, tekrar ayarlamasıyla olur.

IV.3.1 Yapay Sinir Ağlarının Yapısı

Yapay sinir ağları genel yapı olarak insan beyninden esinlenmektedir. YSA'ların temel elemanları da yapay nöronlardır. Bundan sonra yapay nöron yerine sadece nöron kelimesi kullanılmaktadır. Bu nöronlar, aralarındaki bağlantılar oluşturularak ve tabakalar halinde gruplandırılarak yapay sinir ağları oluşturulmaktadır.

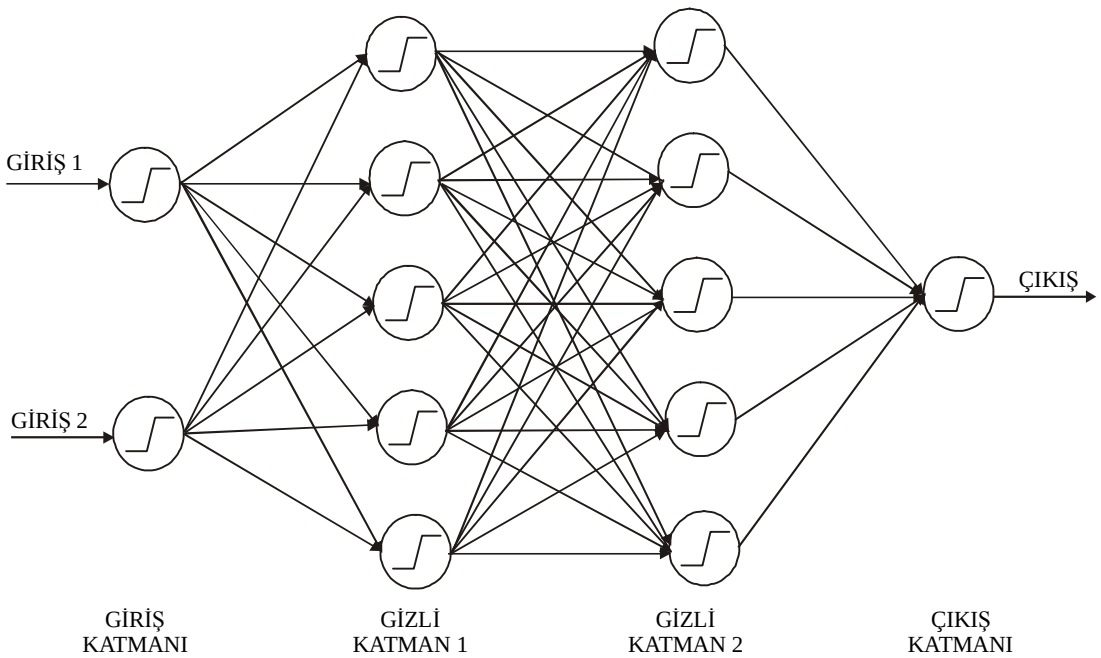
Yapay sinir ağları, ağırlıklandırılmış şekilde birbirlerine bağlanmış bir çok işlem elemanlarından (nöronlar) oluşan matematiksel sistemlerdir. Bir işlem elemanı, aslında transfer fonksiyonu olarak anılan bir denklemdir. Bu işlem elemanı, diğer nöronlardan sinyalleri alır; bunları birleştirir, dönüştürür ve sayısal bir sonuç ortaya çıkartır. Genelde, işlem elemanları kabaca gerçek nöronlara karşılık gelirler ve bir ağ içinde birbirlerine bağlanırlar; bu yapı da sinir ağlarını oluşturmaktadır[54].

YSA'nın ana öğesi olan matematiksel fonksiyon, ağın mimarisi tarafından şekillendirilir. Daha açık bir şekilde ifade etmek gerekirse, fonksiyonun temel yapısını ağırlıkların büyüklüğü ve işlem elemanlarının işlem şekli belirler. YSA'ların davranışları, yani girdi veriyi çıktı veriye nasıl ilişkilendirdikleri, ilk olarak nöronların transfer fonksiyonlarından, nasıl birbirlerine bağlandıklarından ve bu bağlantıların ağırlıklarından etkilenir.



Şekil IV.8 Bir Nöronun Modeli

Şekil IV.8'de girdi değerleri a_j matematiksel sembol ile gösterilmektedir. Bu gösterimde j = 0,1,2,3,.....,n değerlerini almaktadır. Bu girdi değerlerinin her biri bağlantı ağıyla çarpılmaktadır. Bu ağırlıklar ise w_i ile gösterilmektedir. En basit yapıda bu çarpımlar toplanır ve aktivasyon fonksiyonuna(g) iletilerek sonuç üretilir. Bu işlemin sonucu daha sonra bir çıktıya (a_i) dönüştürülür. Bu elektronik uygulama değişik toplama fonksiyonları ve transfer fonksiyonlarını kullanabilir. En çok kullanılan aktivasyon fonksiyonu *Sigmoid* fonksiyonudur.



Şekil IV.9 Çok tabakalı ileri beslemeli YSA'nın genel yapısı

YSA'larda, yapay nöronlar basit bir şekilde kümelendirilmektedirler. Bu kümelendirme tabakalar halinde yapılmaktadır ve daha sonra bu tabakalar bir diğerine ilişkilendirilmektedir. Temel olarak, tüm YSA'lar benzer bir yapıya sahiptirler. Şekil IV.9'da çok katmanlı ileri beslemeli YSA'larının genel yapısı gösterilmektedir. Bu yapıda, bazı nöronlar girdileri almak için bazı nöronlar ise çıktıları iletmek için dış ortam ile bağlantılı haldedirler. Geri kalan tüm nöronlar ise gizli katmanlardadırlar, yani sadece ağ içinde bağlantıları vardır. Giriş ve çıkış katmanları hariç diğer katmanlar gizli katman olarak isimlendirilir. Aynı zamanda bir katmandan bir diğer katmana veri akışı yalnızca bir yönde gerçekleştirilir. Şekil IV.9'da veri akışı giriş katmanından çıkış katmanına doğrudur.

Uygulamaya yönelik olarak ağ yapılandırılması tamamlandıktan sonra eğitilmeye hazır konuma gelmiştir. YSA'nın eğitimi için kullanılan yöntem geri-yayılma tekniğidir(back-propagation). Öncelikli olarak bütün ağ yapısı dahilinde bağlantı ağırlıkları belirlenir. Eğitme durumu için yönlendirmeli ve yönlendirmesiz iki yaklaşımdan söz edilir[30]. Geri yayılma tekniğinde, bir katmanın çıktısının önceki katmana gönderilmesidir. Ağı yönlendirmeli eğitmede arzu edilen veri değerleri için girdi - çıktı ilişkisini sağlayacak mekanizmayı kapsamaktadır. Yönlendirmesiz eğitmede dış müdahale olmadan girdilerin ağ tarafından analiz edilmesi ve bu analiz sonucunda ağ bağlantılarının oluşturulmasıdır.

Yönlendirmeli yapılan ağ eğitiminde girdi ve çıktı verileri kullanılır. Belirlenen başlangıç bağlantı ağırlıklarını kullanarak girdileri ağa uygular ve gerçek çıktı ile arzu edilen çıktıyı karşılaştırarak hata hesaplanır. Elde edilen hatalar sitem içersinde geriye gönderilir ve bu hatalar kullanılarak bağlantı ağırlıkları güncellenir. İstenilen çıktı elde edilen kadar bu işlem tekrarlanır. Ağların eğitilmesi sırasında ağırlıkların ayarlanabilmesi için gerekli adaptif geri beslemeyi sağlayacak değişik eğitme amaçlı algoritmalar kullanılır. Bu algoritmaların içersinden en çok kullanılanı geri yayılmalı (back-propagation) olanıdır.

YSA'ların eğitiminde üç önemli öğe vardır. Bunlar; öğrenme, hata, ve öğrenme oranıdır. Öğrenme, YSA'nın yapısı içinde büyük bir öneme sahiptir. Her işlem elemanın girdilerine ait değişken bağlantı ağırlıklarını ayarlamaktır. Bu öğrenme işlemi adaptasyon işlemi olarak ta isimlendirilir. Hata, öğrenme fonksiyonun ayarlamaları yapabilmesi için hata payının da biliniyor olması gerekmektedir. Hata fonksiyonu da, amaca yönelik olarak o anki çıktı ile arzu edilen çıktı arasındaki farkı yani hatayı hesaplar. Hesaplanan hata önceki katmana

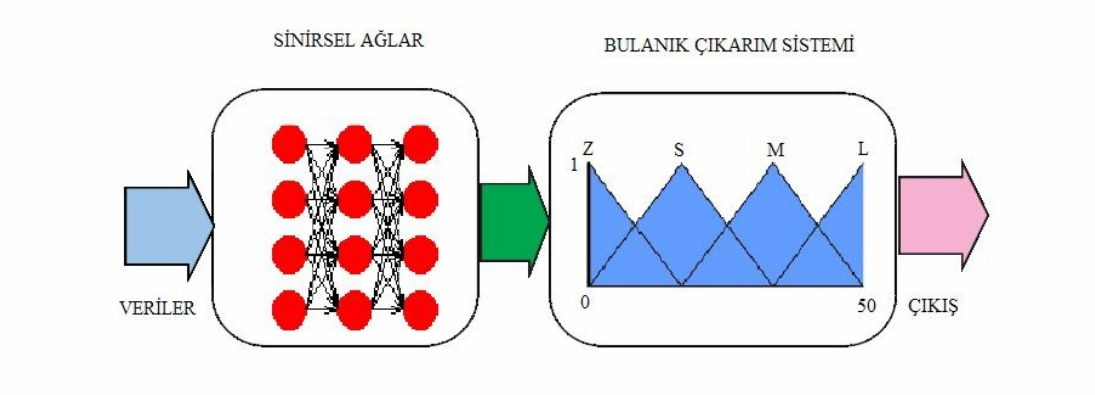
geri yayılır. Öğrenme fonksiyonu tarafından bağlantı ağırlıklarını ayarlamak için gerekli ise kullanabilir. Öğrenme oranı ise, öğrenme sürecinin hızı ve işlevi açısından önemlidir. YSA'da öğrenme gücü ile hızı ters orantılıdır. Bir ağın ne kadar eğitileceği öğrenme oranına bağlıdır. Öğrenme oranının belirlenmesinde ağın yapısı, büyüklüğü, kullandığı öğrenme kuralı, istenilen doğruluk derecesi gibi birçok faktöre bağlıdır. Öğrenme oranını genelde (0,1) gibi bir aralık içersinde belirlenir.

YSA'ları her zaman kesin %100 doğru sonuç vermeyebilir. Bununla birlikte, pratik uygulama alanlarında arzu edilen değere yakın sonuçlar verdiği bilinmektedir. Birçok yazılım programlarının kullanılmasıyla YSA'nın tasarımı ve eğitilmesi gerçekleştirilebilir. Özellikle elektrik güç sistemlerinde YSA'nın tasarımı ve eğitilmesi amacıyla ifade edilen yazılım programları kullanılmaktadır.

IV.4 ADAPTİF YAPAY SİNİR AĞLI-BULANIK KONTROLÖRÜN DİZAYNI

Son yıllarda gerçek zamanlı kontrol zaman uygulamalarının sayısının geniş oranda artmasında, gelişiminde ve dizaynında bulanık mantık önemli rol oynamıştır. Bununla birlikte, bulanık üyelik fonksiyonları, kurallarının sayısı, tipi ve parametrelerinin doğru seçimi, sistemde arzu edilen performansa ulaşmada çok önemlidir. Günümüzde bulanık kontrolörün üyelik fonksiyon tipi, kuralların belirlenmesi, kural sayısı ve parametrelerin seçimi genellikle uzmanlık alan bilgileri ve deneme yanılma yoluyla belirlenmektedir. Bu durum bulanık kontrolörün kazanç ayarlamasında ve dizaynında göze çarpan zorluklar olarak bilinmektedir [32].

Adaptif yapay sinir-bulanık çıkarım sistemleri (Adaptife Neuro-Fuzzy Inference Systems), Şekil IV.10'da görüldüğü gibi yapay sinir ağlar (neural networks) ile bulanık çıkarım sisteminin (fuzzy inference systems) bütünleşmiş biçimidir. Adaptif yapay sinir ağlı-bulanık çıkarım sistemleri (AYSABÇS) yardımcı, uyumlu ve bütünleştirici üç ana unsur üzerinde formüle edilmişlerdir[55]. AYSABÇS'leri bulanık çıkarım sistemine eşdeğer olan fonksiyonel adaptif ağlar ünitesi olarak da ifade edilir.



Şekil IV.10 Sinirsel-bulanık model

AYSABÇS'de, yapay sinir ağları öğrenme mekanizması (neural networks) eğitilmiş datalardan bulanık çıkarım sistemi üyelik fonksiyonlarını, bulanık küme parametrelerini ve bulanık kuralları belirler. Bütünleştirilmiş yapay sinir-bulanık(neuro-fuzzy) sistemler veri yapısını ve bilgiyi paylaşırlar. Yapay sinir-bulanık sistem yaklaşımı kullanmanın asıl amacı; yapay sinir ağları metotlarının kullanılmasıyla otomatik olarak bulanık çıkarım sistemini gerçekleştirmektir. AYSABÇS kontrolör sisteminde, öğrenme ve adaptasyon çalışmalarını kolaylaştırmak için adaptif sistemin iskeletinde Mamdani ve Takagi Sugeno bulanık çıkarım sistemleri yer alır. AYSABÇS kontrolör sisteminin işletilmesi için yapay sinir ağlarının eğitim algoritması ve bulanık çıkarım sisteminin dilsel bulanık ifadeleri kullanılır. Aynı zamanda, AYSABÇS sayısal ve dilsel dataların birleşimine izin verirler[32].

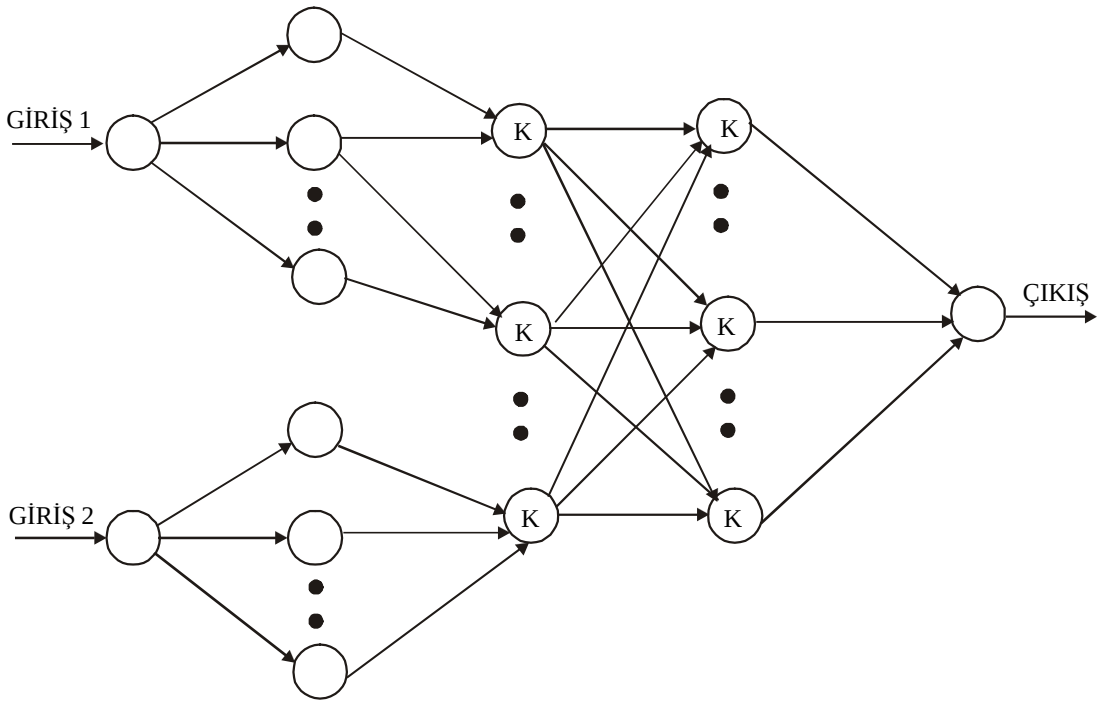
IV.4.1 Mamdani Yapay Sinir-Bulanık Sistem

Mamdani yapay sinir ağlı -bulanık sistem üyelik fonksiyonu parametrelerini öğrenmek için yönlendirmeli (supervised) öğrenme tekniğini kullanır[55]. Mamdani yapay sinir ağlı-bulanık sistemin yapısı Şekil IV.11'de gösterilmektedir. Şekil IV.11'de gösterilen her bir katmanın detayları aşağıda açıklanmaktadır.

Katman 1: Bu katmanda hiç bir hesaplama yapılmamaktadır. Her bir düğüm bir giriş değişkenine uygundur ve yalnızca diğer katmanya giriş değişkenlerini gönderir. Katman 1'deki bağlantı ağırlığı birim ağırlıktır.

Katman 2: Bu katmanda her bir düğüm bir dilsel etikete ve katman 1'deki giriş değişkenlerinin birine uygundur. Diğer bir ifadeyle, çıkış bağlantısı katman 2'de hesaplanan giriş değere ait bulanık kümenin üyelik fonksiyon değerini gösterir.

Giriş değişkeninin her birine ait üyelik fonksiyonun tipini ve ilk başlangıç değerine karar verir.



Şekil IV.11 Mamdani yapay sinir ağlı -bulanık sistem

Katman 3: Bu katmandaki bir düğüm bir kuralın önceki durumunu gösterir. Genellikle bu düğümde bir T norm operatörü kullanılır. Katman 3 düğüm çıkışı uygun bulanık kuralın etki alanını gösterir.

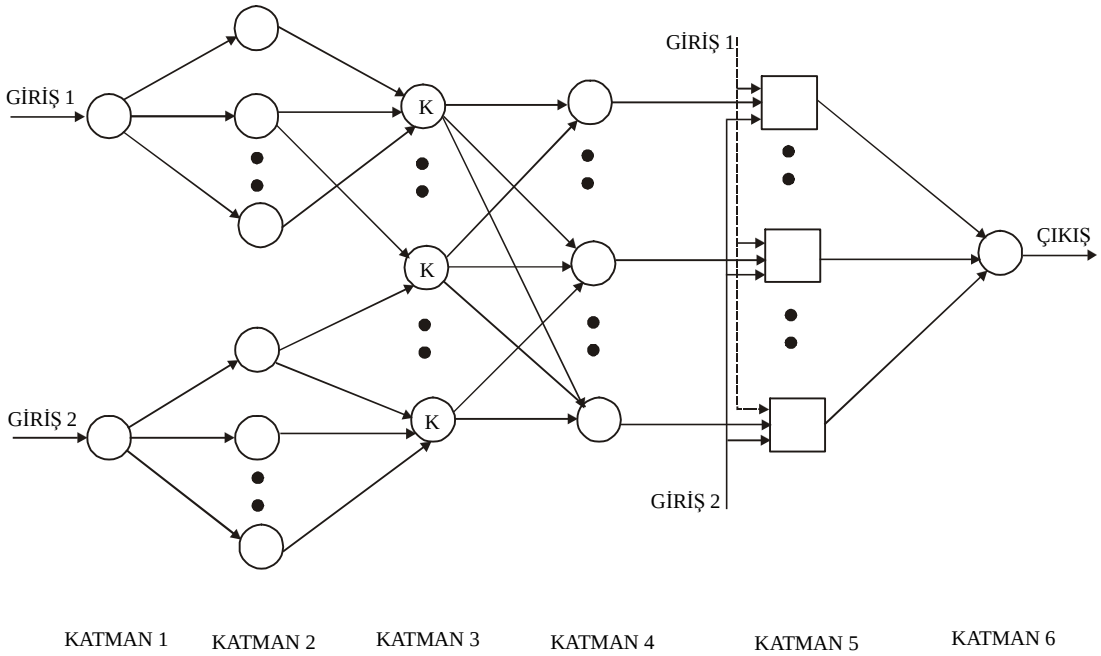
Katman 4: Bu katmannın iki işlevi vardır. Önceki gelen kuralları birleştirir ve çıkış dilsel etiket değerlerine (yüksek, orta, düşük, v.b.) ait dereceleri belirler. Bu katmandaki düğüm sayısı sonuç kural sayısına eşit olabilecektir. Sonuçta, her bir kuralın çıktısını temsil eden bulanık kümelerin birleştirilmesi işlemidir.

Katman 5: Bütün sonuç kurallarının kombinasyonunu ifade eder. Yani tek bir değere dönüştürülmüş toplam bulanık küme sonuçlarının durulaştırılmış halini gösterir.

IV.4.2 Takagi-Sugeno Yapay Sinir ağlı -Bulanık Sistem

Takkagi-Sugeno yapay sinir ağlı-bulanık sistemler kural sonuçlarının lineer kombinasyonlarının katsayısını saptamak için en az eşdeğer tahmini ve üyelik

fonksiyonları öğrenmek için kullanılan bir sistemdir[4]. Takagi Sugeno yapay sinir ağlı-bulanık sistemin yapısı Şekil IV.12'de gösterilmektedir.



Şekil IV.12 Takagi Sugeno yapay sinir ağlı-bulanık sistem

Katman 1, 2, ve 3'ün fonksiyonları Mamdani yapay sinir ağlı-bulanık sistemdekinin aynısıdır. İki yöntem arasındaki fark çıktı üyelik fonksiyonlarındadır. Takagi Sugeno tipi modellemede çıktı üyelik fonksiyonları lineer veya sabittir.

Katman 4: Bu katmandaki her düğüm *i* nci kuralın etki alanının bütün kuralların etki alanına oranını hesaplar.

$$\overline{w}_i = \frac{w_i}{w_1 + w_2}, i = 1,2,....,n \qquad (4.1)$$

Katman 5: Bu katmanya ait her *i* nci düğüm, düğüm fonksiyonu aşağıdaki gibi olan adaptif bir düğümdür.

$$\overline{w}_i f_i = \overline{w}_i (p_i x_i + q_i x_2 + r_i) \qquad (4.2)$$

Katman 6: Bu katmanda tek düğüm yer alır. Toplam çıkışı hesaplamak üzere kendisine gelen bütün sinyalleri toplayan sabit tek bir düğümdür.

$$Toplam = \sum_i \overline{w}_i f_i = \frac{\sum_i w_i f_i}{\sum_i w_i} \qquad (4.3)$$

IV.4.3 Adaptif Yapay Sinir Ağlı-Bulanık Çıkarım Sistemi

Adaptif yapay sinir ağlı-bulanık çıkarım sistemi aynı zamanda literatürde adaptif yapar sinir ağlı-bulanık kontrolör olarakta ifade edilmektedir. AYSABÇS belki de ilk olarak bütünleşmiş hibrid yapay sinir ağlı-bulanık modeldir ve yapısı Şekil IV.12'ye çok benzemektedir.

AYSABÇS; bulanık sistemin parametrelerini saptamak için sinirsel ağlar ve bulanık sistemin bileşiminden meydana gelmiştir. Yapay sinir ağlı-bulanık sistem yaklaşımı kullanmanın asıl amacı; yapay sinir ağ metotlarının kullanılmasıyla otomatik olarak bulanık sistemi gerçekleştirmektir. AYSABÇS kontrolör sisteminde, öğrenme ve adaptasyon çalışmalarını kolaylaştırmak için adaptif sistemin iskeletinde genellikle Sugeno bulanık çıkarım sistemi yer alır[56].

Adaptif neuro-fuzzy modelde, iki temel öğrenme algoritması gereklidir. Bunlardan birincisi; uygun bulanık mantık kuralları bulmak için yapısal öğrenme algoritması, ikincisi ise; sistemden arzu edilen performansa göre üyelik fonksiyonlarını ve diğer parametreleri istenilen biçimde ayarlamak için gerekli olan parametre öğrenme algoritmasıdır[57].

Yapısal ve parametre öğrenme algoritması adaptif yapay sinir ağlı-bulanık sistemde birleştirilebilir. İfade edilen iki öğrenme algoritması sırasıyla gerçekleştirilir. İlk önce yapısal öğrenme algoritması AYSABÇS'nin uygun yapısını bulmak için daha sonra parametre öğrenme algoritması kontrolör sisteminin parametrelerini istenilen değerlere ayarlamak için kullanılır. Bazı durumlarda, bulanık mantık kuralları veya üyelik fonksiyonu parametreleri uzman kişiler tarafından belirlendiği zaman yalnızca parametre öğrenme veya yapısal öğrenme algoritması gerekli olabilir. Bunların dışında sinirsel-bulanık sistemlerin yapısı sabittir[4].

Bulanık mantık kontrolör dizaynında en önemli aşamalardan biride bulanık mantık kuralların belirlenmesidir. Saptanan kısa ve özlü kurallar ağların ilk yapısını oluşturur. Yani öğrenme işlemi hızlı, güvenilir ve yüksek önseziye sahip olabilir. Sistemin sayısal verilerinden bulanık mantık kurallarının meydana gelişi iki işlemden oluşur. Birincisi; sistem giriş ve/veya çıkış değer aralıklarının bulanık bölümlere ayrılmasıdır. İkincisi ise; her bir bulanık bölme için bir bulanık mantık kuralın saptanmasıdır. Sinirsel-bulanık modelde, bulanık kurallar Wang ve Mendel tarafından önerilen modeller gibi bulanık tekniklerinin kullanılmasıyla elde edilebilir.

Arzu edilen giriş ve çıkış çiftlerinden bulanık kurallar kümesi üretilir. Önerilen bulanık teknikleri, sayısal giriş-çıkış eğitim datalarından bulanık kuralları üretmenin en basit yolu olarak belirtilmektedir[58].

Bir bulanık sistemin dizaynında tasarlanan bulanık modeli ve sistem giriş-çıkışı ilişkilerinden oluşan veri tabanına dayalı bulanık kuralları gerekli kılar. Üyelik fonksiyonlarının biçimi sistem parametre grubuna bağlıdır ve parametrelerin değişimi üyelik fonksiyonlarının şeklini değiştirir. Buraya kadar, bulanık modelin ve bilgi tabanının dizaynı giriş ve çıkış değişkenlerinin karakteristiklerini yorumlayan dizayncının görüşlerine dayalı keyfi işlemlerdir. Uzmanlık deneyimlerinin dönüşümü bilgi ve kural tabanına bağlı bulanık çıkarım sistemleri için standart izlenen bir metot yoktur.

Adaptif ağ tipi yapıdaki bir bulanık çıkarım sisteminde, giriş üyelik fonksiyonları ve parametreleri sayesinde girişler tasarlanır daha sonra aynı şekilde çıkış üyelik fonksiyonları ve parametreleri yardımıyla çıkışlar tasarlanmaktadır. Böyle bir yapı bulanık çıkarım sistemini yorumlamak veya açıklamak için adapte edilebilir. Adaptif ağla ilişkili öğrenme kurallarının (back-propagation veya hybrid learning) herhangi birisinin kullanılmasıyla, üyelik fonksiyonu ile birleşmiş parametreler bilinen giriş-çıkış çifti kümesi sayesinde tanımlanan ilişkiler modeline dayalı öğrenme yöntemi sayesinde otomatik olarak değiştirilebilecektir[59]. Bu parametrelerin ayarlanması gradient vektör sayesinde kolaylaştırılır. Ayrıca adaptif ağ yapılı bulanık çıkarım sisteminde parametreleri ayarlamak için optimizasyon teknikleri de kullanılmaktadır. AYSABÇS, bulanık çıkarım sisteminin çıkış hata ölçümünü minimize etmek ve üyelik fonksiyonlarını ayarlamak için etkili bir çıkarım sistemidir.

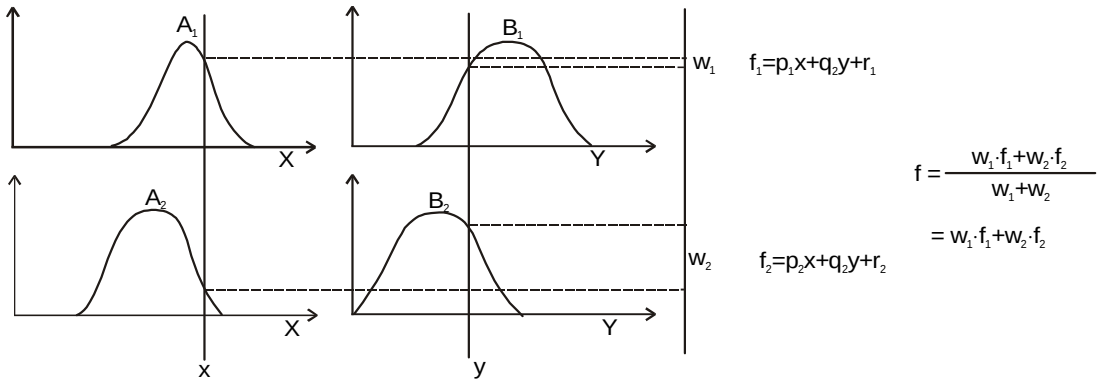
Yapılan çalışmada, otomatik olarak bulanık çıkarım sistemin parametrelerini elde etmek için sinirsel ağlar alanından bilinen eğim-azaltma (gradient-descent) eğitim algoritması kullanılmıştır. Bundan dolayı, bu yaklaşım genellikle sinirsel-bulanık modelleme olarak ifade edilir[60,61]. AYSABÇS yapısını ifade etmek için ilk önce Takagi-Sugeno(TS) modeline dayalı iki bulanık ***eğer-ise*** kuralı aşağıdaki şekilde ifade edilir.

Kural 1: ***Eğer*** $(x = A_1)$ ve $(y = B_1)$ ***İse*** $f_1 = p_1x+q_1y+r_1$

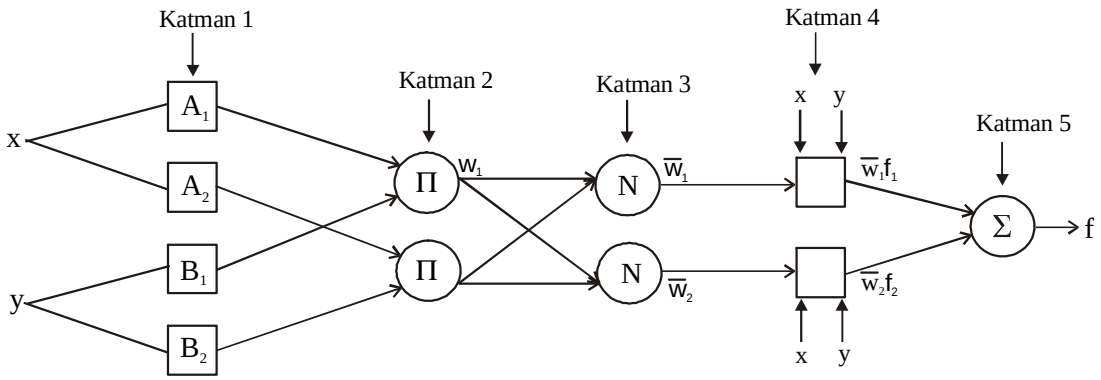
Kural 2: ***Eğer*** $(x\ i=A_2)$ ve $(y = B_2)$ ***İse*** $f_2 = p_2x+q_2y+r_2$

Burada r_i, p_i ve q_i eğitim aşaması süresince belirlenen dizayn parametreleridir.

AYSABÇS yapısı içinde gerçekleştirilen iki bulanık kural ve kurallar üzerinde yapılan çıkarımlar Şekil IV.13'de, iki kurallı bulanık sistemi gerçekleştirmek için dizayn edilen AYSABÇS kontrolör sisteminin genel blok diyagramı da Şekil IV.14'de gösterilmektedir. AYSABÇS kontrolör sistemi, çoklu iterasyon öğrenme prosedürü ve hibrid öğrenme algoritmasını kullanarak beş katmanda Takagi-Sugeno modele dayalı kuralları gerçekleştirir. Aşağıdaki ifadelerde O_{li} ifadesinde, l nci katmanyı ve i ise her bir düğümün çıkışını belirtmektedir.



Şekil IV.13 AYSABÇS yapısı içinde gerçekleştirilen iki bulanık kural ve kurallar üzerinde yapılan çıkarımlar



Şekil IV.14 Eşdeğer AYSABÇS yapısı

Katman 1: Bu katmanda yer alan her bir i düğümü, çıkışı aşağıdaki gibi tanımlanan, adaptif bir düğümdür.

$O_{l,i} = \mu Ai\ (x)$, $i=1,2$, yada $O_{l,i} = \mu Bi\text{-}2\ (y)$, $i=3,4$, için (4.4)

Burada *x* yada *y* düğümün girişini, A_i yada B_{i-2} ise söz konusu düğüme ait bulanık kümeyi ifade etmektedir. Bir başka ifadeyle, bu katmanın çıkışları, kuralların şart yada öncül kısımlarına ait üyelik değerlerini oluştururlar. Burada A_i ve B_i için söz konusu üyelik fonksiyonları, uygun bir biçimde parametrelendirilmiş herhangi bir üyelik fonksiyonu olabilir. Örneğin A_i aşağıda belirtilen genelleştirilmiş çan eğrisi fonksiyonu ile ifade edilebilir.

$$m_A(x) = \frac{1}{1 + \left| \frac{x - c_i}{a_i} \right|^{2bi}} \tag{4.5}$$

burada yer alan a_i, b_i ve c_i üyelik fonksiyonunun parametrelerini ifade eder.

Katman 2: Bu katmandaki her bir düğüm, kendisine gelen sinyallerin çarpımını çıkış olarak üreten, Π ile etiketlenmiş sabit bir düğümdür.

$$O_{2,i} = w_i = \mu_{Ai}(x)\, \mu_{Bi}(y) \quad j = 1,2 \tag{4.6}$$

Her bir düğümün çıkışı, her bir kural için gerçekleme derecesini oluşturur. (4.6) bağıntısında çarpma işlemi yerine bulanık (VE) işlemini gerçekleştiren, başka T-norm işlemleri de düğüm fonksiyonu gibi kullanılabilirler[62].

Katman 3: Bu katmanda yer alan düğümler aynı zamanda sabit düğümlerdir. Şekil IV.14'de bu düğümler *N* ile etiketlendirilmiştir. *i* nci düğüm, *i* nci kuralın ağırlık derecesinin bütün kuralların ağırlık derecelerinin toplamına oranını hesaplar. Diğer bir ifadeyle bütün kuralların belirtilen *i* nci kural için ortalama ağırlık derecesini hesaplar. Bu katmandaki her düğümün çıkışı aşağıda verilen bağıntı ile ifade edilir.

$$O_{3,1} = \overline{w_i} = \frac{w_i}{w_1 + w_2} \quad i = 1,2. \tag{4.7}$$

burada w_i; *i* nci kurala ait ağırlık derecesini ifade eder. Bu katmanda yer alan düğümlerin çıkışları hesaplanışlarına uygun olarak, norm edilmiş gerçekleme dereceleri olarak ta adlandırılırlar.

Katman 4: Bu katmandaki bütün düğümler adaptif düğümlerdir. Bu katmandaki her bir düğümün çıkışı ortalama ağırlık derecesi ve birinci dereceden polinomun (Sugeno model için) çarpımını verir. Katman 4 aşağıda verilen bağıntı ile ifade edilir.

$$O_{4,i} = \overline{w}_i f_i = \overline{w}_i (r_i + p_i x + q_i y) \qquad i = 1, 2 \qquad (4.8)$$

burada r_i, p_i ve q_i dizayn parametrelerini ifade eder. Bu katmannın parametreleri, sonuç yada çıkış parametreleri olarak ifade edilecektir.

Katman 5: Bu katman yalnızca bir düğümden oluşur ve Σ sembolü ile gösterilir. Gelen bütün sinyallerin toplamı olarak bütün çıkışların toplamını hesaplar. Bu tek düğüm aşağıda verilen bağıntı ile ifade edilir.

$$O_{5,i} = \sum_i \overline{w}_i f_i = \frac{\sum_i w_i f_i}{\sum_i w_i} \qquad i = 1,2. \qquad (4.9)$$

Katman 5, sistemin çıkış değişkenlerini ifade eder. Bu katmandaki bir düğüm bir çıkış sinyalini hesaplar. Çıkış sinyallerinin hesaplanmasında ağırlık merkezi (Centre of Gravity) veya alan merkezi (Centre of Area) metodu kullanılır[61].

IV.4.3.1 AYSABÇS İçin Hibrid Öğrenme Algoritması

AYSABÇS'ın genel blok diyagramı tek değildir. Değişik blok diyagramları ile ifade edilebilir. Bazı katmanlar kombine edilerek birleştirilir ve aynı çıkışı üretirler. Şekil IV.14'de ifade edilen AYSABÇS'in blok yapısında, Katman 1 ve Katman 4 olmak üzere iki adaptif katman bulunmaktadır. Katman 1'in giriş üyelik fonksiyonları ile ilişkili üç tane ayarlanabilir parametresi(a_i, b_i ve c_i) vardır. Bu parametreler öncül parametrelerdir. Katman 4'ünde aynı zamanda birinci dereceden polinomla ilişkili üç ayarlanabilir parametresi (r_i, p_i *ve* q_i) mevcuttur.. Bu parametreler sonuç parametresi olarak adlandırılır [32].

AYSABÇS için öğrenme veya eğitme algoritmasının görevi eğitilmiş datayla AYSABÇS çıkışını mukayese edebilmek için bütün ayarlanabilen parametreleri değiştirmektir. a_i, b_i ve c_i üyelik fonksiyonu parametreleri sırasıyla sigma, slope ve çan tipi üyelik fonksiyonunun merkezini tanımlar. Eğitimin her dönemi iki aşama içersine ayrılır. Birinci aşamada sonuç parametreleri Least-squares metoduyla ayarlanır. İkinci aşamada öncül parametreler gradient descent (backpropagation) metoduyla ayarlanır. Bu ifade edilen parametreler sabit ise, AYSABÇS çıkışı aşağıdaki bağıntı ile ifade edilir.

$$
\begin{aligned}
z &= \frac{w_1}{w_2 + w_2} z_1 + \frac{w_2}{w_1 + w_2} z_2 \\
&= \overline{w}_1 (p_1 x + q_1 y + r_1) + \overline{w}_2 (p_2 x + q_1 y + r_2) \\
&= (\overline{w}_1 x) p_1 + (\overline{w}_1 y) q_1 + (\overline{w}_1) r_1 + (\overline{w}_2 x) p_2 + (\overline{w}_2 y) q_2 + (\overline{w}_2) r_2
\end{aligned}
\tag{4.10}
$$

Denklem (4.10) den görülmektedir ki Sugeno bulanık sistemin çıkışı (z) sonuç parametrelerinde (p,q ve r) lineerdir. AYSABÇS çıkışı ayarlanabilir parametrelerin bir linear kombinasyonudur. Bu nedenle, gradient descent ve least squares metotlarının bir kombinasyonu sonuç parametreleri (p,q *ve* r) için optimal değerleri kolaylıkla tanımlayabilir. Bununla birlikte üyelik fonksiyonunun parametreleri sabit değilse ve değişime izin veriyorsa, eğitilecek alan daha genişler ve neticede eğitme algoritmasının yakınsaması yavaşlar. Bu gibi durumlarda, gradient descent ve least-squares bileşimli hibrid öğrenme algoritması daha etkili sonuçlar verir[4].

BÖLÜM V

HİBRİD GÜÇ ÜRETİM SİSTEMİ BİLEŞENLERİNİN MODELLEMESİ VE ANALİZİ

V.1 RÜZGAR ENERJİ DÖNÜŞÜM SİSTEMİNİN MODELLEMESİ VE ANALİZİ

Son günlerde dünya genelinde enerji talebinin artması ve çevreye gösterilen ilginin hassas duruma gelmesi yenilenebilir enerji kaynaklarından daha fazla yararlanma yoluna gidilmesinde önemli faktörlerdir. Bu yenilenebilir enerji kaynakları arasında en çok enerji beklentisi olan rüzgar türbinli enerji dönüşüm sistemlerdir. Rüzgar enerjisi dönüşüm sistemleri rüzgardaki mevcut olan hareket enerjisini pervaneler yardımıyla yakalayarak elektrik enerjisine dönüştürürler.

Rüzgar enerji dönüşüm sistemlerinin fonksiyonel yapısı ayrıntılı olarak denklem takımları ile ifade edilmektedir. İşletmelerde kullanılan iki tip rüzgar türbini bulunmaktadır. Bunlardan birincisi; sabit hızlı rüzgar türbini, diğeri ise; değişken hızlı rüzgar türbinleridir. Bu iki tip rüzgar türbini arasında karşılaştırma yapılarak dinamik davranışlarını ifade eden bağıntılar elde edilir. Rüzgar enerji dönüşüm sisteminin dinamik davranışı ve modellemesini detaylı bir şekilde tanımlayan blok diyagramlar yapılan çalışmada sunulmaktadır.

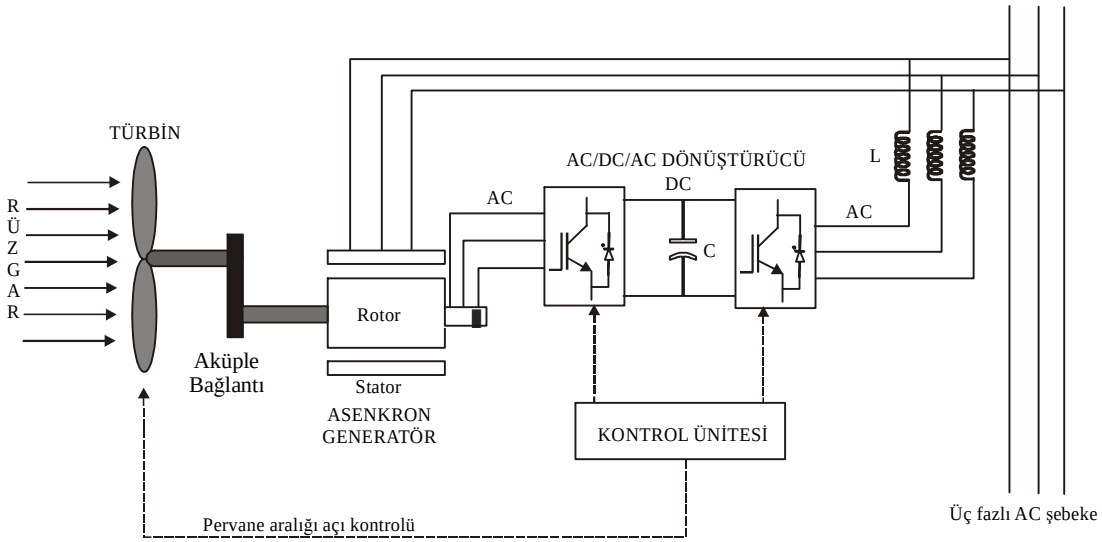
Ticari amaçlı kullanılan rüzgar güç üretim tesislerinde kurulu olan rüzgar türbini boyutu 300 kW'dır[36]. 5 MW ve daha yukarı boyuttaki rüzgar türbini kurulumu için çalışmalar devam etmektedir. Rüzgar mevcut olduğu zaman, enerji kaynağı sonsuz olabilmektedir. Dünyada gelişmiş ülkeler rüzgar enerjisinden

maksimum düzeyde yararlanabilmek için büyük bir çaba harcamaktadırlar. Bununla beraber rüzgar gücünün çevresel olumsuz etkileri yok denecek kadar sınırlıdır.

V.1.1 Rüzgar Enerji Dönüşüm Sistemi Bileşenleri

Rüzgar enerji dönüşüm sistemleri, paralel olarak işletilmekte olan bir veya birden fazla rüzgar türbininden oluşmaktadırlar. Her bir rüzgar türbini aşağıda belirtilen bileşenlerden oluşmaktadır.

- Kule,
- İki veya üç pervaneli (kanatlı) rotor,
- Mekanik kazanç kutulu mil,
- Elektrik enerjisi üretmek için kullanılan generatör,
- Yön ayarlamak için kullanılan mekanizma,
- Kontrol üniteleri ve sensörler.



Şekil V.1 Rüzgar enerji dönüşüm sisteminin yapısı

Şekil V.1'de rüzgar enerji dönüşüm sisteminin yapısı ayrıntılı olarak gösterilmektedir. Rüzgar enerji dönüşüm sistemi hava dinamiği, mekanik ve elektrik mühendisliği alanlarının birleşiminden oluşmuş kompleks bir sistemdir. Modern bir rüzgar türbinin bileşenleri Şekil V.1' de gösterilmektedir. İki veya üç kanatlı rüzgar türbini rüzgardaki kinetik enerjiyi yakalar. Türbin yakaladığı kinetik enerjiyi mekanik enerjiye dönüştürür. Türbinle akuple bağlı olan asenkron generatör bu mekanik enerjiyi elektrik enerjisine dönüştürmektedir. Bir araya getirilmiş bileşenler içersinde yer alan ana bileşen dişli kutusudur. Bu dişli kutusu düşük oranlı rüzgar türbininin hızını daha yüksek oranlı hıza dönüşümünü sağlayarak asenkron generatör

tarafına iletir. Rüzgar türbini tarafından asenkron generatör milinin dönüşü elektrik enerjisi elde edilmesini sağlar. Uygun kontrol ve denetleme mekanizmalarının gerçekleştirilmesiyle çıkış büyüklükleri(gerilim, akım, güç ve frekans) belli sınırlarda tutulmaya çalışılır.

Rüzgar türbini enerji dönüşüm sisteminde elektrik güç üretiminin gerçekleştirilebilmesi için asenkron generatör kullanılır. Yapılan çalışmada asenkron generatörün kararlı ve geçici çalışma durumlarına göre dinamik davranışlarını tanımlayan bağıntıları veya denklemleri kullanarak modellemesi gerçekleştirilmiştir. Hem rüzgar türbininin hem de asenkron generatörün modellemesi MATLAB/Simulink programı kullanılarak elde edilmiştir.

V.1.2 Rüzgar Türbini Modellemesi

Rüzgar enerjisi dönüşüm sistemi rüzgar enerjisini mekanik enerjiye ve elektrik enerjisine dönüşümünü sağlayan kompleks sistemdir. Rüzgar türbinin çıkış gücü veya momenti, rüzgar hızı, türbin şekli ve boyutu gibi faktörlerle tanımlanır. İşletme bölgesinde, bir rüzgar türbininin dinamik modeli rüzgar türbininin davranışını tanımlayan parametreleri içermesi gereklidir. Oluşturulan rüzgar türbini modelinin çalışmasıyla arzu edilen işletme karakteristiklerini elde etmek için rüzgar türbininin performansını kontrol etme imkanı vardır. Rüzgar güç üretiminde farklı karakteristikleri sahip türbinler güç üretiminde önemli rol oynamaktadır.

Rüzgar türbininin girişi ve çıkışları aşağıda maddeler halinde tanımlanmaktadır.

- Bağımsız giriş olarak ifade edilen rüzgar hızıdır. Rüzgar türbinine enerji girişi olarak tanımlanır.
- Türbininin spesifik(özel) büyüklükleri giriş parametresi olarak tanımlanır.
- Türbin hızı, rotor kanat eğimi ve rotor kanadı aralığı açısına ait büyüklükler rüzgar enerji dönüşüm sisteminin iletim parametrelerini oluşturur.
- Rüzgar türbini çıkış büyüklükleri güç ve sürücü momenti olarak tanımlanır.

Rüzgar türbininin giriş ve çıkış değişkenlerinin belirlenmesiyle giriş ve çıkış değişkenleri ilişkilerine bağlı ifadeleri elde etmek kolaylaşmıştır. Elde edilen güç ile rüzgar hızı arasındaki ilişkileri tanımlayan bağıntılar aşağıda elde edilmektedir[36].

V hızıyla hareket eden hava kütlesindeki kinetik enerji aşağıdaki bağıntı ile verilir.

$$Kinetik\ enerji = \frac{1}{2} \cdot m \cdot V^2 \text{ joule} \tag{5.1}$$

Hareket eden hava akışındaki mekanik güç ikinci derecedeki kinetik enerjinin akış oranıdır ve aşağıdaki bağıntı ile ifade edilir.

$$P = \frac{1}{2}(rAV)V^2 = \frac{1}{2} rAV^3 \text{ (Watt)} \tag{5.2}$$

Burada;

P = Rüzgar türbini çıkış mekanik gücü (watt)

r = Hava yoğunluğu (kg/m^3)

A = Rüzgar türbini kanatlarının süpürme alanı(m^2)

V = m/sn olarak rüzgarın hızı

olarak tanımlanmaktadır. Rotor kanatları sayesinde elde edilen gerçek güç üst akıntıya ve alt akıntıya karşı rüzgar gücü arasındaki fark gücüdür. Bu güç aşağıdaki bağıntı ile tanımlanır.

$$P = \frac{1}{2} \cdot (\text{her bir ikinci derece için kütle akış oranı}) \ (V^2\text{-}V_0^2) \tag{5.3}$$

Burada V; rotor kanatlarına giren üst akıntı rüzgar hızı (m/s), V_0; rotor kanatlarına giren alt akıntı rüzgar hızını (m/s) belirtmektedir. Rotor kanatlarının dönüş ekseni etrafındaki havadaki kütle akış oranı hava yoğunluğu, rüzgar türbini süpürme alanı ve ortalama rüzgar hızının çarpımına eşittir.

$$Hava\ kütlesi\ akış\ oranı = r \cdot A \cdot \frac{V + V_0}{2} \tag{5.4}$$

Denklem (5.3) ve (5.4) ‘ün birleşiminden rüzgar türbini tarafından elde edilen mekanik gücü veren bağıntı aşağıdaki gibi elde edilir.

$$P = \frac{1}{2}\left[p \cdot A \cdot \frac{(V + V_0)}{2} \right] \cdot (V^2 - V_0{}^2) \text{ (Watt)} \tag{5.5}$$

Denklem (5.5) yeniden düzenlenerek basitleştirilirse;

$$P = \frac{1}{2} r \cdot A \cdot V^3 \cdot C_p \text{ (Watt)} \tag{5.6}$$

biçiminde ifade edilir. C_p; rüzgar türbini verim katsayısıdır. Aynı zamanda üst akıntıya karşı elde edilen rüzgar gücünün bir kesridir ve aşağıdaki bağıntı ile tanımlanır.

$$C_p = \frac{\left(1 + \frac{V_0}{V}\right) \cdot \left(1 - \left(\frac{V_0}{V}\right)^2\right)}{2} \tag{5.7}$$

Rüzgar türbini verim katsayısı(C_p) iki kanatlı yüksek hızlı türbinler için 0,4 ile 0,5 arasındadır. İki den fazla kanatlı, düşük hızlı rüzgar türbinlerinde verim katsayısı 0,2 ile 0,4 arasında değişmektedir[36].

Denklem (5.6) dan görülmektedir ki, türbin işletme şartları ve elde edilen mekanik güç, rotor kanatlarının verimli alanı, rüzgar hızı ve rotordaki rüzgar akış şartları sayesinde belirlenmektedir. Bu nedenle, rotor kanatlarındaki akış durumlarının değişimi ve verimli alan sayesinde türbin çıkış gücü değiştirilebilir. Rüzgar enerji dönüşüm sistemlerinin kontrolünün temeli de akış durumunun ve verimli alanının denetimine dayanmaktadır.

Rotor hız oranı λ, kanat ucundaki lineer hızın serbest akıntılı rüzgar hızına oranıdır ve aşağıdaki bağıntı ile tanımlanır[63].

$$l = \frac{w \cdot R}{V} \tag{5.8}$$

burada w : rotor açısal hızı(rad/sn), R : rotor kanat yarıçapı(m) ifade etmektedir. Maksimum gücün elde edilmesi rotor hız oranı rüzgar türbini işletme noktası ile ilişkilidir. Maksimum rüzgar türbini verimi özel rotor hız oranlarında(λ) ve kanat

aralık açısı(β) değerlerinde istenilen düzeye çıkar. Bütün zamanlarda optimal seviyede rotor hız oranını(λ) korumak için rotor yüksek rüzgar hızlarında yüksek hızla döndürülmeli, düşük hızlarında ise rotor düşük hızla döndürülmelidir. Rüzgar türbinlerinden verimli elektrik üretimi için yüksek oransal hız türbinleri tercih edilmektedir[64].

Rüzgar türbininin dinamik davranışını modelleyebilmek için rotor hız oranına ve kanat aralık açısına bağlı olarak değişen rüzgar türbini verim katsayı(C_p) denklem (5.6)'da yerine konulup yeniden düzenlenirse,

$$P = \frac{1}{2} r \cdot A \cdot V^3 \cdot C_p(l, b) \text{ (Watt)} \qquad (5.9)$$

şeklinde ifade edilir.

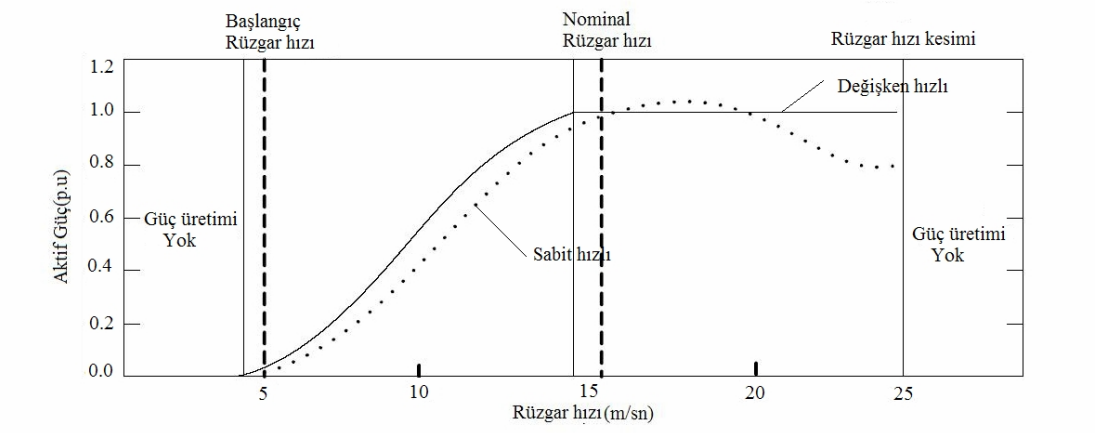
V.1.3 Sabit ve Değişken Hızlı Rüzgar Türbini Karakteristiği

İşletmelerde kullanılan rüzgar enerji dönüşüm sistemlerinin iki türü vardır. Bunlardan birincisi; sabit hızlı rüzgar türbinleri, ikincisi; değişken hızlı rüzgar türbinleridir. Belirtilen iki rüzgar türbin sistemi aşağıda alt başlıklar altında anlatılmaktadır.

V.1.3.1 Sabit hızlı rüzgar türbinlerinin işletme karakteristiği

Rüzgar enerji dönüşüm sistemlerinde bütün işletme stratejileri çeşitli bileşenlerin nasıl kontrol edilebileceğini belirlerler. Kontrol stratejilerinin bir kısmı, rotor momentinin maksimum enerjinin yakalanmasıyla kontrol edilebilir. Yada kanat aralığı açı kontrolü yüksek hızlarda çıkış gününün kontrol edilmesine yardımcı olur. Sabit hızlı rüzgar türbinleri kontrol girişi için bir tercih hakkı veya referans bir büyüklük yoktur. Bu türbinlerde, türbin kanatları optimal rotor hızına yakın değerlerde işletmek için sabit aralıklı olarak dizayn edilirler. Rüzgar arttığında, kanat aralık açısı artış yönünde harekete geçecektir. Bu durumda çıkış gücünü sınırlama ve rotor veriminin azaltılması neticesinde kararlı yani durağan çalışma bölgesine geçiş yapılır. Rüzgar enerji dönüşüm sistemlerinde rüzgar hızı ayarlama kavramlarının değişimi iki farklı biçimde rüzgar türbini işletmesini kapsar. Sabit işletme hızları ya generatör kutup sayısının değişimi ile ya da kazanç oranının değişimi ile sağlanır.

Sabit hızlı rüzgar türbinleri, türbinin oranlanmış rüzgar hızı üzerinde güç üretimini kontrol etmek için kanat aralığı açı regülasyonunu kullanır. Değişken hızlı rüzgar türbinleri ise çıkış gücünün optimizasyonu için generatör moment kontrolünü kullanır. Her iki tip rüzgar türbini, sadece oranlanmış rüzgar hızlarının üzerinde çıkış gücünü kontrol etmek amacıyla kanat aralığı açı kontrolünü kullanırlar. Değişken hızlı rüzgar türbinlerinin sabit hızlı rüzgar türbinlerine göre enerji yakalama oranı yaklaşık %30 daha fazladır[36,65].

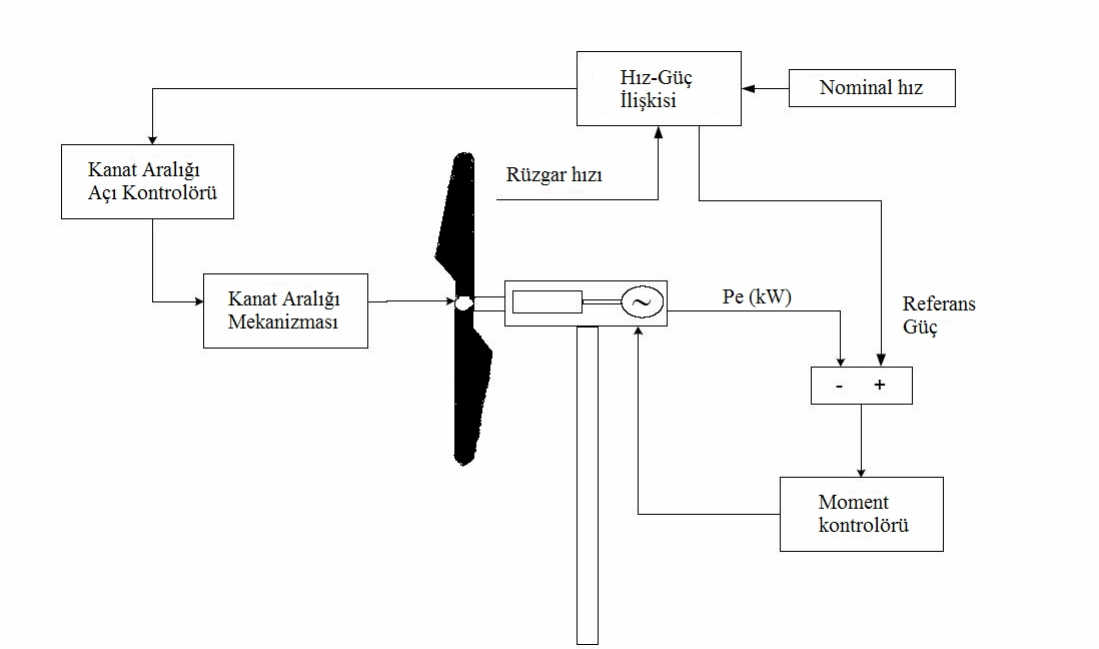


Şekil V.2 Sabit Hızlı ve Değişken Hızlı Rüzgar Türbini Eğimleri

Şekil V.2'de sabit ve değişken hızlı rüzgar türbininin hız-aktif güç karakteristik eğimi gösterilmektedir[66]. Sabit hızlarda, kontrollü rüzgar türbini çıkış gücü oranlanmış limit değerden daha yüksek değerlerde maksimum güç üretir, daha sonra bu durum rüzgar hız kesimine ulaşıldığında güç üretimi azalmaya başlar. Değişken hızlı rüzgar türbinlerinde enerji yakalama kapasitesi daha fazla olmasına rağmen, değişken hızlı türbinin kontrol maliyeti sabit hızlıya göre daha fazladır.

V.1.3.2 Değişken Hızlı Rüzgar Türbinlerinin İşletme Karakteristiği

Değişken hızlı kanat aralığı kontrolörlü rüzgar türbininin genel yapısı Şekil V.3'de gösterilmektedir[67]. Bir çok rüzgar türbinine ait parametreler değişken hızlı rüzgar türbini ile bağlantılıdır. Birkaçı aşağıda maddeler halinde verilmektedir.



Şekil V.3 Kanat Aralığı Açı Kontrolörlü Değişken Hızlı Rüzgar Türbini

- Türbin güç katsayısı eğimi, nominal rotor hızı ve rotor çapı verilen nominal güç için rüzgar türbininin nominal hızını belirler.
- İzin verilebilir miktarda rotor hızı ve oranlanmış güç kanat aralığı açı kontrolörünün parametrelerini saptar.
- Rotor ataleti türbin kesme rüzgar hızını belirler.

Değişken hızlı rüzgar türbinlerinin etkili işletilebilmeleri için iki yöntem vardır. Bunlardan birincisi; hız değişiklikleri, ikincisi ise; kanat aralığı açı değişiklikleridir. Değişken hızlı rüzgar türbinlerinin işletilmesinde diğer kontrol stratejilerde önemli rol oynamaktadır. Bunlar güç optimizasyon stratejisi ve güç sınırlama stratejisidir.

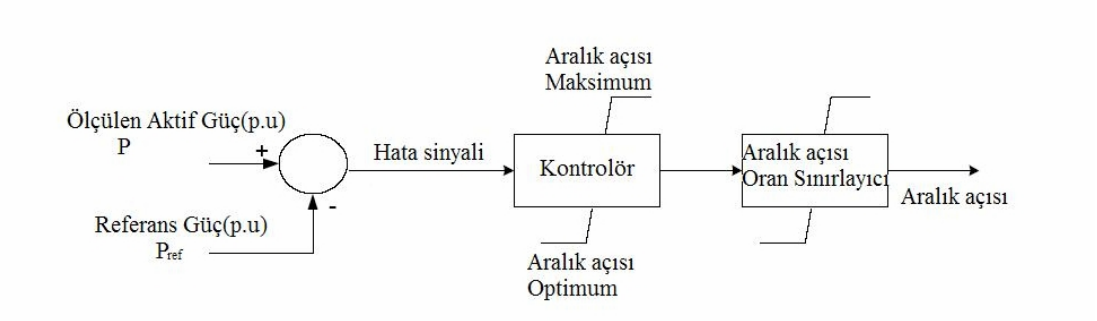
Rüzgar hızı oranlanmış rüzgar hızının altına düştüğü zaman optimum hız oranının korunmasıyla optimum enerji yakalayabilmek için güç *optimizasyon stratejisi* gerçekleştirilir. Bu işlem optimum hız oranına uygun sabit hızın korunmasıyla başarıya ulaşır. Elektriksel yükün kontrol edilmesiyle hız değiştirilirse, generatör nominal değerin üzerindeki rüzgar hızları için aşırı yüklenecektir. Bu durumdan sistemi korumak ve hızı kontrol etmek için generatör moment kontrolörü kullanılır.

Türbinin rüzgar hızı oranlanmış hızın üzerinde ise çıkış gücünü nominal güç değerinde sınırlandırmak için *güç sınırlama stratejisi* kullanılır. kabul edilebilir seviyelerde rüzgar gücü böylelikle azaltılabilmektedir.

V.1.4 Kanat Eğimi Açı Kontrolü

Daha önceki bölümlerde de ifade edildiği gibi kanat eğimi kontrolü (pitch angle) türbin mili üzerinde harcanan momentin kontrol edilmesi suretiyle türbin kanatları etrafındaki rüzgar akışını kontrol eder. Eğer rüzgar hızı, rüzgar türbininin oranlanmış rüzgar hızından daha az ise, eğim açısı optimum değerinde sabittir. Burada dikkat edilmeli ki, eğim açısı sınırlı oranda değiştirilebilir. Bu oran rotor kanatlarının boyutu nedeniyle tamamen düşük olabilir. Kanat aralığı açısının maksimum değişim oranı genellikle ±10° derece/sn arasındadır. Kanat eğimi açı kontrolü sayesinde rotorun yavaş ve nominal değerin üzerindeki hızlarda rüzgar türbininin yapısı bakımından herhangi bir problem oluşmayabilir[68].

Yapılan çalışmada kanat eğimi açı denetimi klasik PID kontrolör ve AYSABÇS kontrolörü ile yapılmıştır. Şekil V.4'de kanat aralığı açı kontrolörünün blok diyagramı gösterilmektedir.



Şekil V.4 Kanat eğimi Açı Kontrolünün Blok Diyagramı

Rüzgar türbini çıkış gücü oranlanmış rüzgar türbini hızından daha düşük olduğu sürece, hata sinyali negatif ve aralık açısı optimum değerde tutulur. Fakat türbin çıkış gücü referans değerin üzerine çıkarsa, hata sinyali pozitif olacak ve aralık açısı sınırlı oranda yeni değerle değişecektir.

V.1.5 Kendinden Uyartımlı Asenkron Generatörün Matematiksel Modellemesi ve Analizi

İndüksiyon(asenkron) makinaları elektrik enerjisini mekanik iş gücüne dönüştürme işlemini gerçekleştirmesinden dolayı endüstri uygulamalarında oldukça geniş bir kullanım alanına sahiptirler. İndüksiyon makinalarının en büyük avantajı ayrı bir DC uyartım gücüne ihtiyaç duymamasıdır. Genelde indüksiyon makinalarının ekonomik, güvenilir, dayanıklı, yapılarının basit ve kolay anlaşılır

olması gibi üstünlüklerini sıralayabiliriz. Çok büyük kapasiteli indüksiyon makinalarında sürtünme ve rüzgar kayıpları daha belirgin bir şekilde ortaya çıkmaktadır. Aynı zamanda senkron makinaların aksine indüksiyon makinaları değişken hızlarda çalıştırılıp işletilebilmektedir. Ekonomik ve güvenilir olması bakımından birçok rüzgar güç dönüşüm sistemlerinde rüzgar türbini ile sürülen indüksiyon makinaları elektrik generatörü olarak kullanılmaktadır. Rüzgar türbininin düşük hızlarda dişli kutusu yardımıyla yüksek rotor hızlarına dönüştürülerek kaliteli elektrik güç üretimi sağlanmalıdır.

İndüksiyon makinaları rotor yapısına dayalı sincap kafesli ve rotoru sargılı olarak iki tipte imal edilirler. Sincap kafesli indüksiyon makinaları rotoru sargılı indüksiyon makinalarına göre daha popüler ve kullanışlıdır. Çünkü, basitleştirilmiş yapısı, maliyetin düşük olması ve dayanıklı olması nedeniyle özellikle rüzgar güç üretim sistemlerinde tercih edilmektedir. Rotoru sargılı indüksiyon makinaları yol alma anında yüksek moment üretebilmelerinden dolayı direk şebekeye bağlı rüzgar güç üretim sistemlerinde tercih edilmektedir.

Yapılan çalışmada rüzgar enerji dönüşüm sisteminde elektrik enerji üretiminde kullanılacak makina asenkron makinadır. Asenkron makina kendinden uyartımlı sincap kafesli yapıdadır. Kendinden uyartımlı asenkron generatörün ayrıntılı analizi yapılarak matematiksel modeli elde edilmektedir. Generatör olarak asenkron makinanın işletilebilmesi için uyartımı sağlayacak reaktif güce ihtiyaç duymaktadır. Gerekli olan reaktif güç, makinanın elektrik devresinde şönt kapasitör kullanılarak sağlanmaktadır.

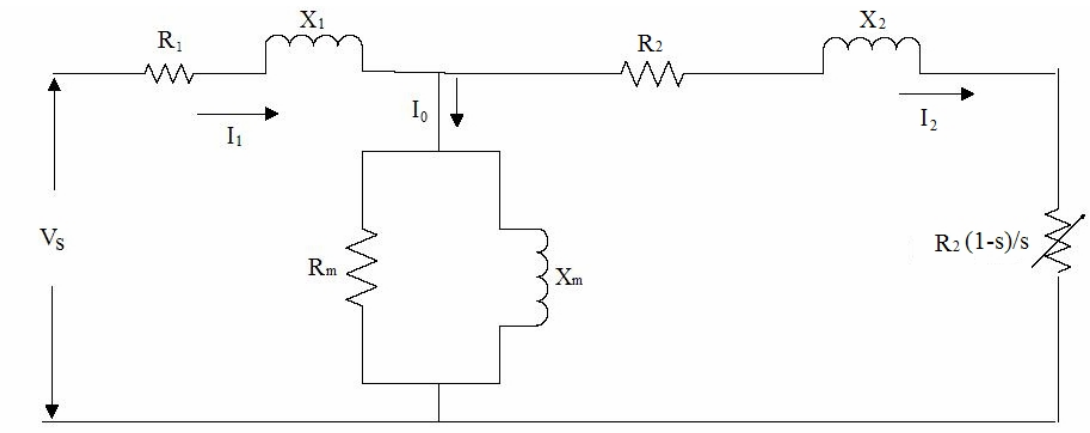
V.1.5.1 Kendinden Uyartımlı Asenkron Generatörün Eşdeğer Elektrik Devresi

Asenkron makina iki ana bileşenden oluşmaktadır. Bunlardan birinci; makinanın duran kısmı stator, ikincisi ise; dönen kısmı rotordur. Stator kısmı ile rotor kısmı arasında 1 mm den küçük olan hava aralığı bulunmaktadır. Asenkron makinanın aktif kısımlarını stator ve rotor saç paketleri ile bunların etrafına açılmış olan oluklara yerleştirilen stator ve rotor sargıları oluşturur. Rotoru sargılı ve kısa devre kafesli tipte üretilen asenkron makinalar bir, iki ve üç fazlı olarak yapılırlar. Endüstri uygulamalarında en fazla üç ve bir fazlı asenkron makinalar kullanılmaktadır.

Çok fazlı(üç fazlı) asenkron makinanın stator sargısına üç fazlı besleme gerilimi uygulandığında sargılardan dengeli bir akım akar. Bu akımın stator sargılarında meydana getirdiği döner alan statora nazaran $n_s=60.f_1/p$ senkron devir sayısı ile döner. Burada f_1, şebeke frekansı ve p çift kutup sayısını gösterir. Meydana gelen rotor sargılarında veya sincap kafesli çubuklarda gerilim indüklenmesine sebep olur ve bunun sonucu olarakta kapalı bir devre oluşturan rotor sargılarında akım akar. Rotoru stator döner alanı yönünde tahrik edip rotor devir sayısını stator devir sayısına yaklaştırmaya çalışan döndürme momenti meydana getirir. Asenkron makinada rotor hızı döner alan hızına eşit olamaz. Aksi taktirde, rotor sargısında gerilim indüklenmez ve rotoru döner alan yönünde tahrik edecek döndürme momenti indüklemesine de imkan olmaz. Bu sebep asenkron makinalarda rotor döner alana nazaran hep belirli bir kayma ile döner alanın gerisinden gelir. Yani motor çalışmada hep senkron hızın altında işletilirler.

Asenkron makinanın rotoru, dışardan bir tahrik motoru yardımıyla döner alan hızı üzerinde tahrik edilecek olursa, rotor hızı ile döner alan hızı arasında fark (kayma) bu sefer negatif olacaktır. Yani rotor döner alan hızından daha hızlı dönecektir. Makinanın rotorunda indüklenen döndürme momenti döner alana ters etki yapacaktır ve asenkron makinanın statorundan şebekeye elektrik enerjisi verilecektir. Asenkron makina generatör olarak işletileceği zaman, rotoru döner alan yönünde senkron hızın üzerinde tahrik edilmesi gerekmektedir. Generatör çalışma durumunda kayma negatif olmaktadır.

Şekil V.5'da asenkron makinanın çalışma teorisini ifade eden bir faza ait eşdeğer devresi gösterilmektedir.



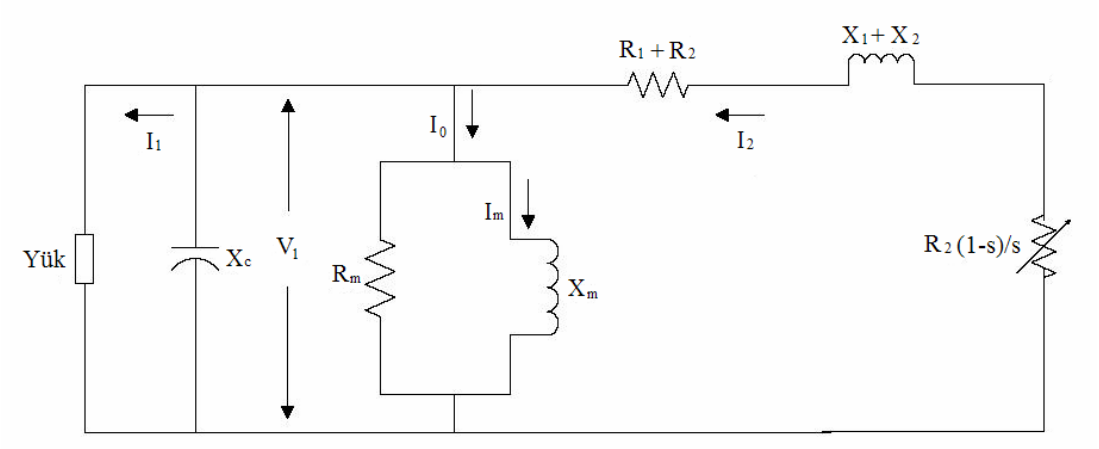
Şekil V.5 Asenkron Makinanın Bir Fazına Ait Eşdeğer Elektrik Devresi

Şekil V.5'da gösterilen indüksiyon makinasının eşdeğer devresinde, *R* statora ve rotora ait etkin direnci, *X* stator ve rotora ait endüktif reaktansı göstermektedir. Alt indislerden *1;* statora ait parametreleri, *2;* rotora parametreleri ve *m;* ise eşdeğer devrenin ortak manyetik bileşenlerini ifade ederler.

Asenkron makinanın çalıştırılabilmesi için AC uyartım akımına ihtiyaç duymaktadır. Asenkron makinaya kendinden ve dışardan uyartmak suretiyle iki şekilde uyartım akımı sağlanır. Uyartım akımı reaktif akım olduğu için, tek başına çalışan yani şebekeden bağımsız işletilen makinalarda uyartım akımı şönt(paralel) kapasitörlerle sağlanmaktadır. Şebeke bağlı işletme durumlarında bu gerekli olan reaktif akım şebekeden tedarik edilmektedir. Asenkron generatörün çıkış gerilimi ve frekansı şebeke frekansına eşit olması için gerekli işlemler yapılmaktadır. Sınırlı oranda reaktif gücü sağlayan şebeke kapasitesi, gerekli olan reaktif gücü kısmi olarak desteklemek için harici kapasitörler kullanılabilmektedir[36].

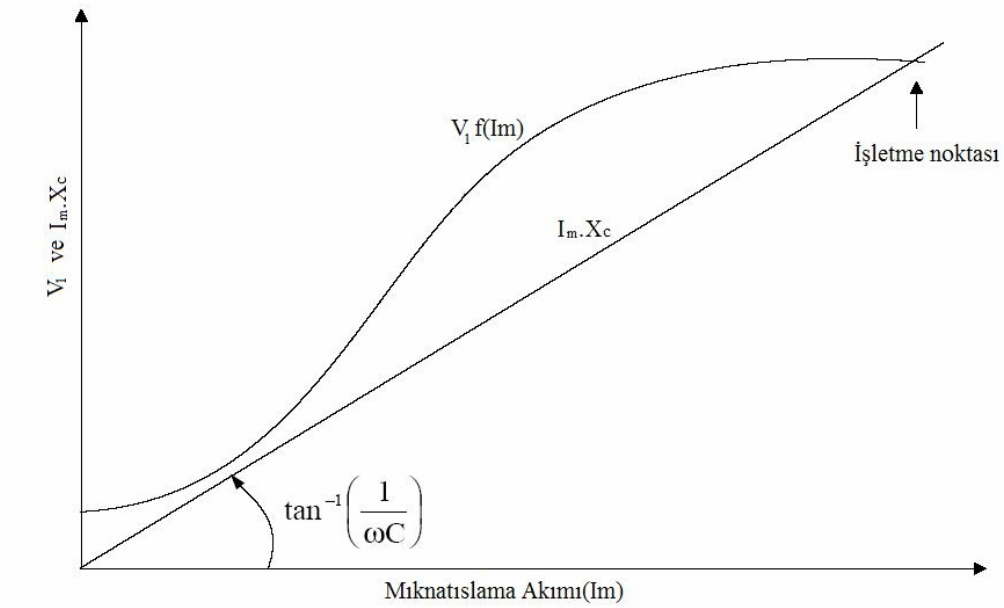
Kendinden uyartımlı asenkron generatör stator sargı uçlarına bağlı uyartım kapasitörleri hariç aynen bir asenkron makina gibidir. Bu generatörler değişken hızlı rüzgar enerji dönüşüm sistemlerinde elektrik enerjisi üretimi amacıyla tercih edilmektedirler.

Genellikle şebekeden reaktif gücün sağlanamadığı işletme durumlarında asenkron generatörler kullanılmaktadır. Asenkron generatör harici bağlanacak kondansatörlerle rotorda yeterli miktarda artık manyetik alan oluşana kadar kendi kendini uyarabilecektir. Kendinden uyartımlı metotta generatör çıkış frekansı ve gerilimine rotor hızı, yük ve kondansatörün kapasite değeri etki etmektedir. Bu işletme durumunda asenkron generatör aynen doğru akım makinalarında olduğu gibi, kendi kendini uyararak tek başına gerilim indükleyebilmektedir. Şekil V.6'de kendi kendini uyaran asenkron generatörün bir fazına ait eşdeğer devresi gösterilmektedir.



Şekil V.6 Kendi Kendini Uyaran Asenkron Generatörün Bir Fazına Ait Eşdeğer Devresi

Kondansatörler asenkron makinanın stator sargı uçlarına bağlandığında, makina bir tahrik makinası tarafından sürülür. Makinanın bağlı olduğu terminal uçlarında bir gerilim indüklemesi oluşacaktır. Stator sargılarında indüklenen elektromotor kuvvet(emk) ve akım kararlı çalışma durumundaki değerlere ulaşana kadar devam edecektir. Bu işletme noktasında gerilim ve akım verilen tepe değerde stabilize olacaktır. Şekil V.7'de asenkron generatörün boşta çalışma karakteristiği ile reaktif direnç doğrusunu gösterilmektedir.



Şekil V.7 Kendi Kendine Uyartımlı Asenkron Generatörün Boşta Çalışma Eğrisi İle Reaktif Direnç Doğrusu

Şekil V.7'den de görüldüğü gibi, asenkron makina boşta çalışırken, kayıpları ihmal edildiğinde, şebekeden I_m mıknatıslama akımı çekmektedir. Dışardan harici olarak bağlanan C kapasitesini ayar ederek Ic akımının büyüklüğünü I_m akımına

eşitlenecek olursa, yani $I_c=2\pi p f_1 C U_1$ ve $I=I_m+I_c=0$ olur ki şebekeye olan ihtiyaç ortadan kalkmış olur. Şekil V.7'de reaktif direnç doğrusunun mıknatıslanma eğrisi ile $(V_1 f(I_m))$ kesişmesi, o noktada saf endüktif olan mıknatıslama akımının kondansatör akımına eşit olması demektir. Kesişme noktasında faz sargısı reaktansının Xc kondansatör kapasitesine eşit olduğu görülmektedir. Yani $X_c=X_m$ olur. Kesişme ancak doymanın olduğu yani mıknatıslama eğrisinin eğik olduğu bölgede gerçekleşir. Yüksüz işletme durumunda, asenkron generatörün kendi kendini uyarabilmesi için kapasitör akımı $I_c=V_1/X_c$, mıknatıslama akımı $I_m=V_1/X_m$ e eşit olmalıdır[67,69].

Şekil V.7'den görüldüğü gibi,eğrinin eğimi $\tan^{-1}(1/\omega C)$'dir. Asenkron generatörün kendi kendine uyarabilmesi için $X_c<Xc_{kr}$ olmalıdır. Burada kendi kendine uyarma sınırına karşılan gelen X_c'nin X_{ckr} den küçük, C'nin C_{kr} den büyük olması gerekir. C_{kr}, sabit devir sayısı, sabit frekans değerinde, kendi kendine uyarma sınırına karşılık gelen kritik kapasite değeridir. Bu durumda kendinden uyartımlı asenkron generatörün çıkış frekansı,

$$f_1 = \frac{1}{2 \cdot p \cdot C_{kr} \cdot X_m} \tag{5.10}$$

biçiminde ifade edilmektedir.

V.1.5.2 Kendinden Uyartım Asenkron Generatörün Matematiksel Modellemesi

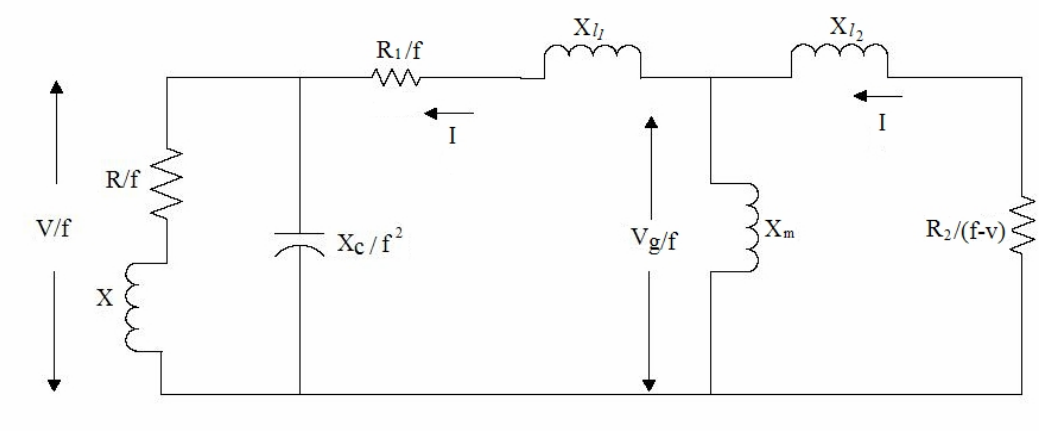
Kendinden uyartımlı asenkron generatörün karakteristik davranışlarını analiz etmek için gerçekleştirilmiş iki devre modeli vardır. Bunlardan birincisi; kararlı durum modeli (steady-state), ikincisi ise; makina teorisine dayalı d-q eksen modelidir[70].

Asenkron generatörün kararlı durum analizi makina dizaynı ve işletme noktaları ile daha çok ilgilidir. Asenkron makina parametrelerinin bilinmesi halinde, verilen çalışma hızı, kapasite ve yük şartlarında işletme performansını belirleme imkanı vardır.

Kendinden uyartımlı asenkron generatörün kararlı durum analizinde yük empedansı ve düğüm admitansı metotları motife edilerek kullanılmaktadır. Aktif ve reaktif gücü koruma prensibini kullanarak eşdeğer devre için düğüm admitans denklemleri yazılır[71]. Düğüm admitans metodu, asenkron generatörün kendi

kendini uyarabilmesi için gerekli olan kondansatörün minimum kapasite değerinin hesaplanmasında etkilidir. Kararlı çalışmada,uyartım kapasitesi minimum değerden maksimum değere yavaş yavaş yükseltilmelidir. Aynı zamanda makina belli bir devir hızı ile tahrik edilmelidir.

Kendinden uyartımlı asenkron generatörün bir fazına ait kararlı-durum eşdeğer devresi Şekil V.8'da gösterilmektedir[67,72].



Şekil V.8 R-L Yüklü Kendinden Uyartımlı Asenkron Generatörün Eşdeğer Devresi

Şekil V.8'de gecen terimler R_1, R_2 ve R sırasıyla stator, rotor ve yük dirençleridir. X_{l1}, X_{l2}, X, X_m sırasıyla stator, rotor kaçak reaktansı, yük ve mıknatıslama reaktansını ifade eder. V; çıkış gerilimini, X_c; uyartım kapasitörünün reaktansını, f; frekansı, v; hızı, V_g; hava boşluğundaki gerilimi belirtmektedir.

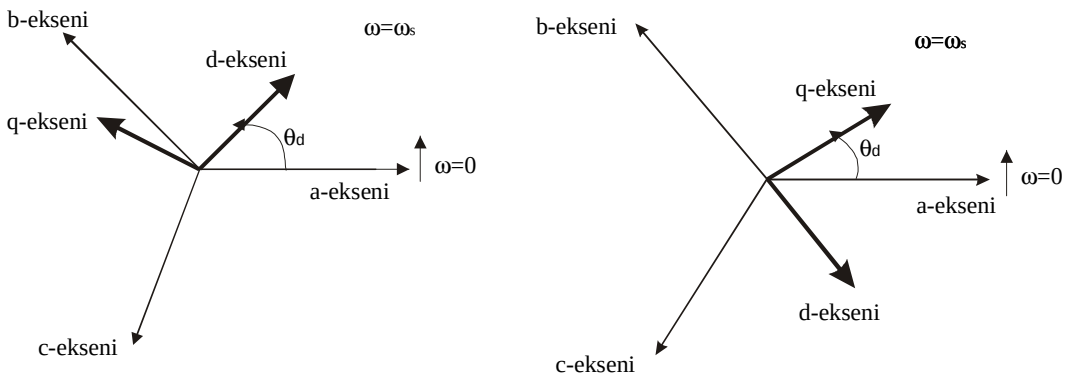
Asenkron makinanın bazı varsayımlar yapılarak kararlı- durum analizi gerçekleştirilmektedir[73]. Eşdeğer devrede manyetik doymadan etkilenen sadece X_m olduğu varsayılır ve diğer devre elemanları sabit kabul edilir. Stator ve rotor kaçak reaktansları yaklaşık birbirine eşit kabul edilirler. Bir diğer varsayımda, asenkron makinadaki nüve kayıpları ihmal edilmektedir. Bu yapılan varsayımlar altında makinayı tanımlayan bağıntılar çıkartılır. Şekil V.8'de verilen asenkron generatörün eşdeğer devresi için aşağıdaki akım ve empedans bağıntıları yazılabilir[74].

$$I \cdot Z = 0 \tag{5.11}$$

$$Z = \left(\left(\frac{R_2}{f - v} \right) + jX_{l2} \| jX_m \right) + \frac{R_1}{f} + jX_{l1} + \left(\frac{-jX_c}{f^2} \left\| \left(\frac{R}{f} + jX \right) \right. \right) \tag{5.12}$$

Kararlı-durum çalışmasında $I \neq 0$ olduğu için, empedansın aktif ve reaktif kısımları ile birlikte $Z=0$ dır. Denklem(5.11) ve (5.12) çözüldüğünde gerilim ve frekans büyüklükleri belirlenmiş olur.

Asenkron makinalarında, gerilim denklemleri duran kısımda bulunan stator *abc* faz sargılarına ilişkin denklemleri, rotorla birlikte hareket eden *dq0* eksen takımına göre uyarlanması gerekmektedir. Dönüşümün temel ilkesi rotor ve stator arasındaki bağıl hareketi ortadan kaldırmak için rotor ve stator büyüklüklerini aynı referans eksen takımına taşımaktır. Bu işlem için simetrik park dönüşümleri kullanılmaktadır[75]. Dönüşüm işlemlerinde zamanla değişen endüktanslar durağan veya herhangi bir açısal hızda referans eksen takımına göre stator ve rotor değişkenleri ihmal edilebilirler. Bütün dönüşümler tesadüfü olarak seçilen referans eksene göre yapılır. Eğer dönüşümü gerçekleştirilen sistem dengeli ise sıfır bileşen parametreleri sıfıra eşit olacaktır. Asenkron makinanın generatör ve motor çalışma durumlarında *dq0* ile *abc* eksen takımları arasındaki ilişki aşağıda Şekil V.9'da gösterilmektedir.



(a) .Generatör çalışma (b). Motor çalışma

Şekil V.9 Generatör ve motor çalışmada w **açısal hızıyla dönen dq0 eksen takımı ile abc eksen takımları arasındaki ilişki**

Asenkron makinaların analizinde üç fazı iki faza dönüştürmek için en iyi dönüşüm metodu olarak kullanılan metot Park dönüşüm metodudur. Park dönüşüm denklemi aşağıdaki gibi ifade edilir[75]. Denklem(5.13) de *f*, gerilimi akım, akı gibi büyüklükleri ifade eder.

$$[f_{dq0}] = [T_{dq0}(q_d)].[f_{abc}] \tag{5.13}$$

Asenkron makinalarda alan sargısının manyetik ekseni ile *d* ekseni aynı hizada bulunmaktadır. Pozitif *q*-ekseni orijinal Park dönüşümünde d-ekseninden 90° ilerde bulunmaktadır. Bazı bilim adamları göre de *q*-ekseni *d*-eksenine göre 90° geride

bulunduğu yapılmış olan bilimsel çalışmalarda ifade edilmektedir. İkinci yaklaşım göz ününe alarak *dq0* Park dönüşüm matrisi aşağıdaki gibi tanımlanır.

$$[T_{dq0}(q_d)] = \frac{2}{3}\begin{bmatrix} \cos q_d & \cos\left(q_d - \frac{2p}{3}\right) & \cos\left(q_d + \frac{2p}{3}\right) \\ \sin q_d & \sin\left(q_d - \frac{2p}{3}\right) & \sin\left(q_d + \frac{2p}{3}\right) \\ \frac{1}{2} & \frac{1}{2} & \frac{1}{2} \end{bmatrix} \tag{5.14}$$

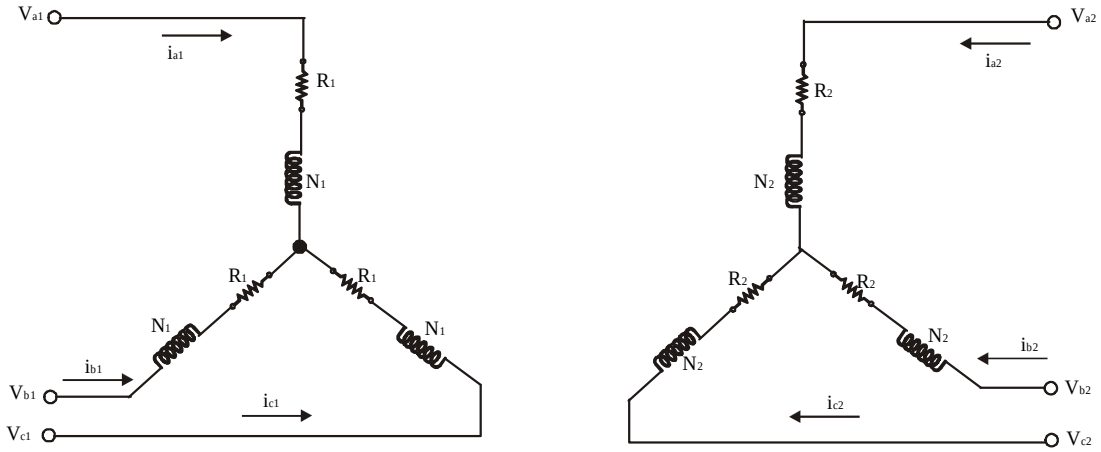
Denklem (5.14)'de elde edilen $[T_{dq0}(q_d)]$ Park dönüşüm matrisinin tersi ise;

$$[T_{qd0}(q_d)]^{-1} = \begin{bmatrix} \cos q_d & \sin q_d & 1 \\ \cos\left(q_d - \frac{2p}{3}\right) & \sin\left(q_d - \frac{2p}{3}\right) & 1 \\ \cos\left(q_d + \frac{2p}{3}\right) & \sin\left(q_d + \frac{2p}{3}\right) & 1 \end{bmatrix} \tag{5.15}$$

biçiminde ifade edilir. Park dönüşümlerinde q_q ve q_d arasındaki ilişki,

$$q_q = q_d + \frac{p}{2} \tag{5.16}$$

Asenkron makinalarda yukarda verilen dönüşüm denklem takımları kullanılarak aralarında 120° faz farkı bulunan f_a,f_b, ve f_c değişkenleri birbirlerine göre dik olan f_d ve f_q bileşenlerine rahatlıkla dönüşümü gerçekleştirilir. Asenkron makinanın *d-q* bileşenli akım, gerilim, akı ve elektrik şarjı gibi büyüklüklerin dalga şekilleri referans eksenin açısal hızına bağlı olarak değişecektir ama toplam gücün dalga şeklinde bir değişme gerçekleşmeyecektir.



Şekil V.10 P Kutuplu, Üç Fazlı, Yıldız Bağlı Simetrik Asenkron Makinanın Stator ve Rotor Sargıları

Şekil V.10'de *p* kutuplu, üç fazlı, yıldız bağlı, stator ve rotor sargıları ile birlikte asenkron makina gösterilmektedir. Asenkron makinanın stator sargıları dengeli sinüzoidal olarak dağıtılmış sargıların sarım sayısı N_1 ve etkin direnci R_1 olup 120°'lik açı farkı ile stator oluklarına yerleştirilmiştir. Rotor sargıları da yine aynı stator sargıları gibi simetrik olarak yerleştirilmiştir. N_2; bir faza ait rotor sarım sayısı, R_2; rotor etkin direncidir.

Asenkron makina değişkenlerindeki gerilim denklemleri aşağıdaki bağıntılarla ifade edilebilir[70].

$$V_{abc1} = r_1 \cdot i_{abc1} + p \cdot l_{abc1} \tag{5.17}$$

$$V_{abc2} = r_2 \cdot i_{abc2} + p \cdot l_{abc2} \tag{5.18}$$

Denklem(5.17) ve (5.18)'daki bağıntılarda gecen V_{abc1}; stator faz gerilimlerini, V_{abc2}; rotor faz gerilimlerini, i_{abc1}; stator faz akımlarını, i_{abc2}; rotor faz akımlarını, l_{abc1} ve l_{abc2}; stator ve rotor akı bağlantılarını ve $p=d/dt$ yi ifade etmektedir. *abc-dq0* dönüşüm denklem takımlarının kullanarak gerilimler için aşağıdaki bağıntıları yazabiliriz[75].

$$V_{qd01} = r_1 \cdot i_{qd01} + w l_{qd01} + p l qd01 \tag{5.19}$$

$$V'_{qd02} = r'_2 \cdot i'_{qd02} + (w - w_2) l'_{dq2} + p l'_{qd02} \tag{5.20}$$

Denklem(5.19) ve (5.20) de yer alan *w*; elektriksel açısal hız, w_2; rotorun elektriksel açısal hızıdır. Akı ve akım bağıntıları arasındaki ilişkilerin kullanılmasıyla *d-q* eksenine göre gerilim ve akı bağıntılarını aşağıdaki gibi ifade edebiliriz.

$$V_{q1} = r_1 i_{q1} + w l_{d1} + p l_{q1} \tag{5.21}$$

$$V_{d1} = r_1 i_{d1} - w l_{q1} + p l_{d1} \tag{5.22}$$

$$V'_{q2} = r'_2 i'_{q2} + (w - w_2) l'_{d2} + p l'_{q2} \tag{5.23}$$

$$V'_{d2} = r'_2 i'_{d2} - (w - w_2) l'_{q2} + p l'_{d2} \tag{5.24}$$

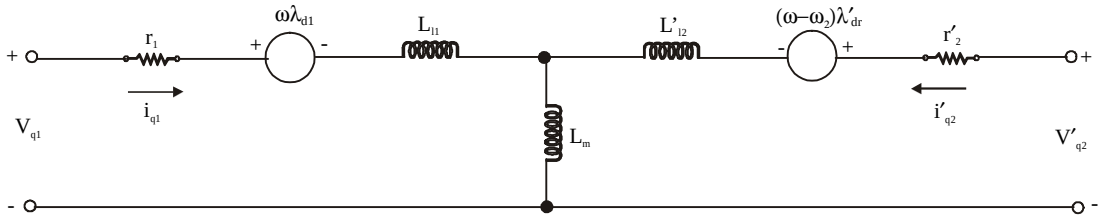
$$l_{q1} = L_{l1} i_{q1} + L_m (i_{q1} + i'_{q2}) \tag{5.25}$$

$$l_{d1} = L_{l1} i_{d1} + L_m (i_{d1} + i'_{d2}) \tag{5.26}$$

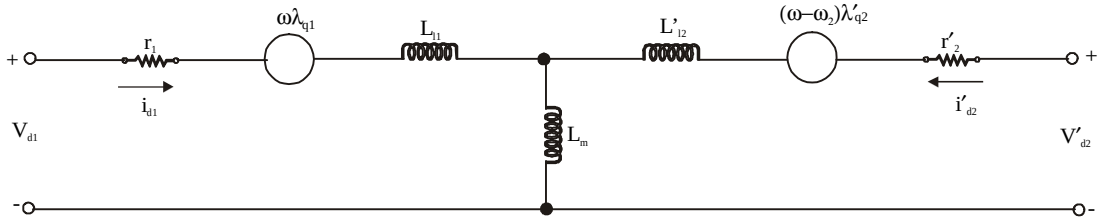
$$l'_{q2} = L'_{l2} i'_{q2} + L_m (i_{q1} + i'_{q2}) \tag{5.27}$$

$$l'_{d2} = L'_{l2} i'_{d2} + L_m (i_{d1} + i'_{d2}) \tag{5.28}$$

Yukarda ki denklem takımlarında yer alan L_m, manyetik endüktansı ifade eder. Denklem(5.21) dan denklem(5.28) ya kadar olan gerilim akı bağıntı denklemlerinden yararlanarak asenkron makinanın eşdeğer *d* ve *q* devresi Şekil V.11 ve Şekil V.12'de elde edilmiştir.



Şekil V.11 Üç Fazlı Simetrik Asenkron Makinanın *Q* Eşdeğer Devresi



Şekil V.12 Üç Fazlı Simetrik Asenkron Makinanın *D* Eşdeğer Devresi

Asenkron makinanın momentini tanımlayan denklemler, motor ve generatör çalışma durumlarına göre ayrı ayrı aşağıda ifade edilmektedir[70]. Motor çalışma için moment bağıntısının işareti pozitif, generatör çalışma için ise moment bağıntısının işareti negatiftir.

Asenkron makinanın motor çalışma durumunda moment ifadesi,

$$T_e = \left(\frac{3}{2}\right)\left(\frac{P}{2}\right) L_m (i_{q1} i'_{d2} - i_{d1} i'_{q2}) \tag{5.29}$$

Asenkron makinanın generatör çalışma durumunda moment ifadesi,

$$T_e = -\left(\frac{3}{2}\right)\left(\frac{P}{2}\right)L_m(i_{q1}i'_{d2} - i_{d1}i'_{q2}) \tag{5.30}$$

biçimindedir. Asenkron makinanın momenti ve hızı aşağıdaki verilen bağıntılarla ilişkilidir. Motor işletme halinde,

$$T_{motor} = J\left(\frac{2}{P}\right)pw + T_D \tag{5.31}$$

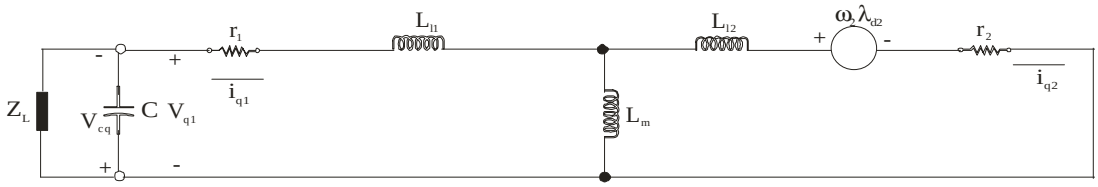
Generatör işletme halinde ise,

$$T_D = J\left(\frac{2}{P}\right)pw + T_{generatör} \tag{5.32}$$

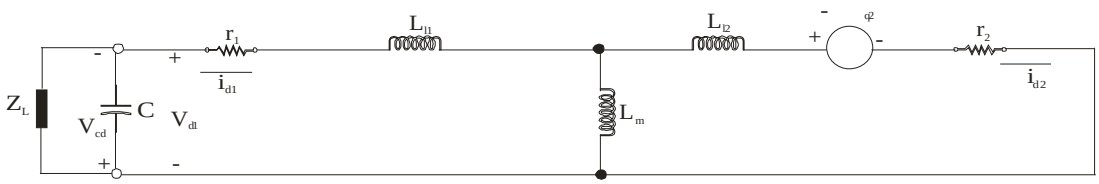
biçiminde yeniden ifade edilir. Yukarda ki denklemlerde gecen *P*: asenkron makinanın kutup sayısını, *J*: rotor ataletini(kg·m^2), T_D: tahrik momentini (Nm) ifade etmektedir.

Asenkron makinaların dinamik davranışı herhangi bir referans eksende tanımlanabilmektedir. Asenkron makinaların kararlı ve geçici durum analizlerinin incelenmesinde genellikle üç referans eksen kullanılmaktadır. İndüksiyon makinalarının davranışı tanımlayan denklemler sabit referans eksen durumuna göre elde edileceği zaman $w=0$, rotor referans eksen durumuna göre elde edileceği zaman $w=w_2$, senkron referans eksen durumuna göre elde edileceği zamanda $w=w_1$ olmaktadır.

Sabit referans eksende asenkron makinanın d-q modeli ω = 0 değeri yerine konularak Şekil V.11 ve Şekil V.12'de elde edilmiştir. Dengeli işletme durumlarında indüksiyon makinalarının davranışını analiz etmek için sabit yani durağan eksen takımına göre bağıntılar elde edilmektedir.



Şekil V.13 Sabit Referans Eksene göre Kendinden Uyartımlı Asenkron Generatörün *q* modeli



Şekil V.14 Sabit Referans Eksene göre Kendinden Uyartımlı Asenkron Generatörün *d* modeli

Yüklü işletme durumunda kendinden uyartımlı asenkron generatörün sabit eksen takımına göre ***d-q*** modelleri ayrı ayrı Şekil V.13 ve Şekil V.14'de gösterilmektedir. Mıknatıslama akımını sağlamak amacıyla kondansatör stator sargı uçlarının bağlı bulunduğu terminale bağlanmıştır. Devre elemanlarının bütün değerleri statora göre indirgenmiş değerlerdir[x]. Yüksüz işletme durumu için Şekil V.13 ve Şekil V.14 göre gerilim denklemleri aşağıda matris formunda elde edilmiştir[76].

$$\begin{bmatrix}0\\0\\0\\0\end{bmatrix}=\begin{bmatrix}r_1+pL_1+1/pC & 0 & pL_m & 0\\ 0 & r_1+pL_1+1/pC & 0 & pL_m\\ pL_m & -w_2L_m & r_2+pL_m & -w_2L_2\\ w_2L_m & pL_m & w_2L_2 & r_2+pL_2\end{bmatrix}\cdot\begin{bmatrix}i_{q1}\\ i_{d1}\\ i_{q2}\\ i_{d2}\end{bmatrix}+\begin{bmatrix}V_{cq0}\\ V_{cd0}\\ K_q\\ K_d\end{bmatrix} \quad (5.33)$$

Denklem(5.33) de yer alan K_d ve K_q sabitleri, *d* ve *q* ekseni boyunca nüvede kalan artık manyetik akıdan dolayı indüklenen gerilimleri belirtir. V_{cq0} ve V_{cd0} terimleri ise, kondansatörlerdeki ilk başlangıçta var olan gerilimi ifade etmektedir. Stator ve rotorda toplam endüktanslar aşağıda verilen bağıntılı ile tanımlanmaktadır.

$$L_1 = L_{l1} + L_m \;\; ve \;\; L_2 = L_{l2} + L_m \quad (5.34)$$

Denklem(5.21)'dan denklem(5.28) ya kadar olan bağıntıların kullanarak sabit referans eksen tanımında yeniden aşağıdaki bağıntıları yazabiliriz. Denklem(5.21)'i kullanarak denklem(5.35) ü aşağıdaki gibi elde ederiz

$$V_{q1} = -V_{cq} = r_1 i_{q1} + 0 \cdot l_{d1} + p\, l_{q1} \quad (5.35)$$

Denklem(5.35)'de denklem(5.25)'ün yerine yazılırsa,

$$0 = V_{cq} + r_1 i_{q1} + L_1 p i_{q1} + L_m p i_{q2} \quad (5.36)$$

biçiminde elde edilir. Denklem(5.23) ifadesinde denklem(5.27) ve (5.28) ifadelerinin yarine konularak pi_{q2} yeniden çözüm yapıldığında,

$$pi_{q2} = \frac{1}{L_{l2}}\left(V_{q2} - r_2 i_{q2} + w_2 L_2 i_{d2} + w_2 L_m i_{d1} - L_m p i_{q1}\right) \tag{5.37}$$

eşitliği elde edilmiş olur. Denklem(5.36)'de denklem(5.37)'in yerine konulmasıyla pi_{q1} için çözüm yapılırsa aşağıdaki bağıntı elde edilir.

$$pi_{q1} = \frac{1}{L}\left(-r_2 L_2 i_{q1} - L_m^2 w_2 i_{d1} + L_m r_2 i_{q2} - L_m w_2 L_2 i_{d2} + L_m K_q - L_2 V_{cq}\right) \tag{5.38}$$

Denklem(5.38)'de yer alan $L=L_1L_2-L^2_m$ şeklinde ifade edilir.

Kendinden uyartımlı asenkron generatörde gerilim denklemlerine benzer şekilde generatörden elde edilen akım denklemleri de matris formunda yazılabilir[76].

$$pI = AI + B \tag{5.39}$$

Yukarda yazılan A ve B'nin açılımları aşağıda matris formunda verilir.

$$A = \frac{1}{L}\begin{bmatrix} -L_2 r_1 & -L_m^2 w_2 & L_m r_2 & -L_m w_2 L_2 \\ L_m^2 w_2 & -L_1 r_1 & L_m w_2 L_2 & L_m r_2 \\ L_m r_1 & L_1 w_2 L_m & -L_1 r_1 & L_1 w_2 L_2 \\ -L_1 w_2 L_m & L_m r_1 & -L_1 w_2 L_2 & -L_1 r_2 \end{bmatrix}, B = \frac{1}{L}\begin{bmatrix} L_m K_q - L_2 V_{cq} \\ L_m K_d - L_2 V_{cd} \\ L_m V_{cq} - L_1 K_q \\ L_m V_{cd} - L_1 K_d \end{bmatrix} \tag{5.40}$$

Akım ve kondansatör gerilimleri ifade eden denklemler aşağıda verilmektedir.

$$I = \begin{bmatrix} i_{q1} \\ i_{d1} \\ i_{q2} \\ i_{d2} \end{bmatrix} \tag{5.41}$$

$$V_{cq} = \frac{1}{C}\int i_{q1} dt + V_{cq}\Big|_{t=0} \tag{5.42}$$

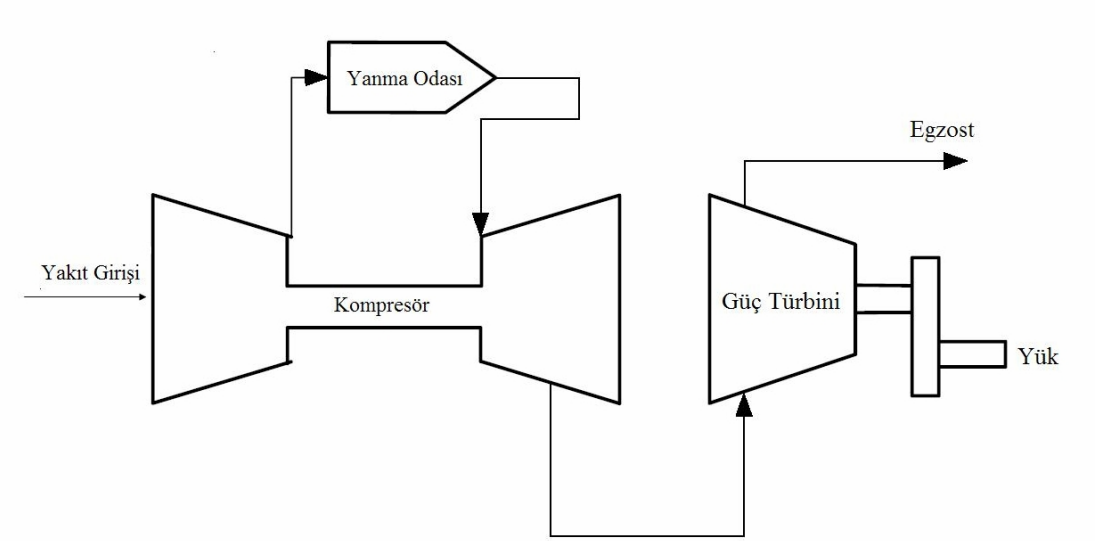
$$V_{cd} = \frac{1}{C}\int i_{d1} dt + V_{cd}\Big|_{t=0} \tag{5.43}$$

Asenkron generatör devresinde, *R, L* ve *C* nin bir kombinasyonu uyartım kondansatörüne paralel olarak ilave edilebilir. Uyartım kondansatörüne paralel olarak *R* direnci bağlanmışsa, denklem (5.33)'de yer alan *1/pC* yerine *R/(1+RpC)* olur. Asenkron generatörde gerilim kararlı ve arzu edilen değere geldiğinde yük stator sargı uçlarına bağlanır veya enerjiyi vermek için gerekli olan anahtar kapatılır[77].

V.2 GAZ TÜRBİNİ GÜÇ ÜRETİM SİSTEMİ

Genellikle hibrid güç üretim sistemleri yenilenebilir enerji kaynaklarından oluşmaktadır. Bununla birlikte tüketicilerin ihtiyacı olan enerjinin sürekliliğinin de sağlanması işletme açısından büyük önem arz etmektedir. Hibrid güç üretim sistemini oluşturan yenilenebilir enerji kaynaklarından (rüzgar, güneş, v.b. gibi) elde edilen elektrik enerjisi her zaman talep gücü karşılayamamaktadır. Bu gibi işletme durumlarında diesel, gaz ve buhar türbinleri yardımıyla üretilen elektrik enerjisinden faydalanılır. O nedenle bir çok hibrid güç üretim sistemi fırın gazı veya doğalgazla desteklenen güç üretim sistemlerini içermektedir.

Şekil V.15'da görüldüğü gibi gaz türbinleri hava sıkıştırma bölümü, yanıcı maddeler ve yükü süren güç türbininden oluşmaktadır. Tesis maliyeti düşük olduğundan üretilen enerjinin birim maliyeti de düşüktür. Sürekli çalışma durumu için uygun olmadığından, genellik gücün fazla talep edildiği durumlarda kullanılmaktadır. Diğer diesel ve buhar santralları kadar karmaşık yapıları olmamaları, küçük boyutta olmaları kısa sürede yol almaları ve soğutma suyu probleminin çok az olması gibi avantajlarından dolayı tercih edilmektedirler. Gaz türbinlerinde enerji taşıyıcı sıcak gazdır. Kompresör yardımıyla hava alınır ve yanma hücresine basılır. Yanma hücresinde yakıtın yakılmasıyla ısınan gaz, enerjisini türbine verir. Daha sonra güç türbini yardımıyla elektrik enerjisi üretmek için işletmede olan generatörü tahrik eder[78].



Şekil V.15 Gaz Türbini Makinasının Basitleştirilmiş Yapısı

Gaz türbini üretim sisteminin dinamik modellemesi ve simülasyon çalışması için matematiksel ifadelerle davranışı tanımlanacaktır. Gaz türbinleri elektrik şebekesine bağlı olarak işletilebildikleri gibi şebekeden yalıtılmış olarak da çalıştırılabilmektedirler. Genellikle hibrid güç üretim sistemleri elektrik şebekelerinden bağımsız olarak çalışmaktadırlar. Gaz türbin güç üretim sisteminde elektrik enerjisi üretmek için kullanılacak olan makina silindirik kutuplu senkron generatördür. Senkron generatör gaz türbiniyle tahrik edilmektedir. Yapılan çalışmada, gaz türbini ve senkron generatörün ayrı ayrı bileşenlerinin matematiksel modelleri elde edilerek MATLAB/Simulink programında kullanılacak olan simülasyon blok diyagramları oluşturulacaktır.

Hibrid güç üretim sistemlerinde veya küçük ölçekli işletmelerde kullanılan gaz türbinleri mikro türbin olarak da isimlendirilmektedir. Mikro gaz türbinlerin güçleri 30 ile 400 kW arasında değişirken, klasik gaz türbinlerinin gücü 500 kW'dan 300 MW seviyesine kadar değişmektedir[79].

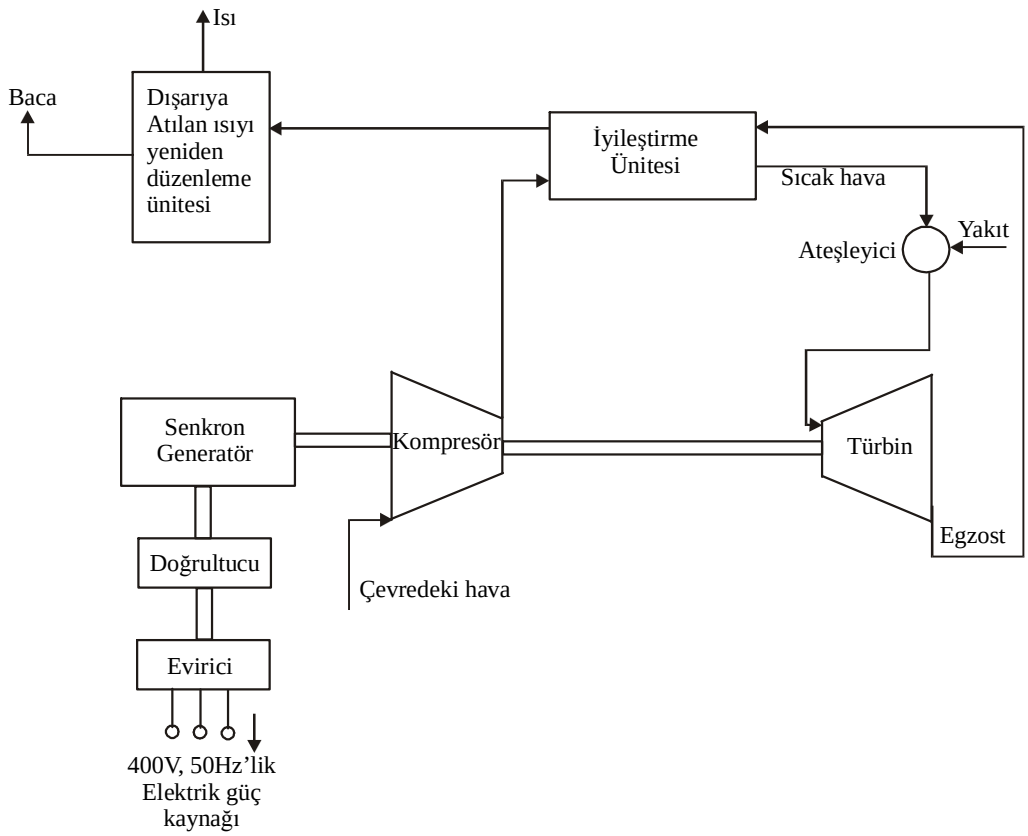
Mikro gaz türbinleri düşük ve yüksek basınç seviyelerinde değişik sıvı yakıtları yakma kapasitesine sahiptirler. Genellikle mikro türbinler benzer boyuttaki diğer türbinlerle kıyaslandığında verimleri daha düşüktür. Mikro gaz türbinlerinin verimleri %33-%37 arasında değişmektedir[80].

Güç üretim tesislerinde kullanılmakta olan mikro gaz türbinleri tek milli ve iki milli olmak üzere iki tipte üretimi yapılmaktadır. Tek milli gaz türbini sistemlerinde, tek genleştirme türbini kompresör ve generatörü birlikte hareket

ettirmektedir. Bu tip türbinler yüksek hızlarda işletilebildiği gibi, yüksek frekans değerlerinde de elektrik gücü üretmektedirler. İki milli modelde, bir mil kompresörü tahrik etmekte, dişli mekanizma aracılığı ile AC generatöre bağlı olan diğer mil aynı zamanda güç türbinini de tahrik etmektedir[81]. Tek milli gaz türbinlerinin yüksek frekanslı AC gerilim ürettiği için, mikro gaz türbini güç üretim sistemi ile yük arasında bir güç elektroniği ara yüzeyi bulunmalıdır.

V.2.1 Gaz Türbini Güç Üretim Sisteminin Bileşenleri

Mikro gaz türbini güç üretim sisteminin temel bileşenleri; kompresör, türbin, iyileştirme ünitesi, yüksek hızlı generatör, güç elektroniği ara yüzeyi ve dışarıya atılan ısıyı yeniden düzenleme ünitesidir. Şekil V.16'de, ısı-güç bileşimli mikro gaz türbini güç üretim sisteminden elektrik enerji elde edilmesine kadar geçen aşamanın blok diyagramı gösterilmektedir[82].



Şekil V.16 Isı-Güç Bileşimli Mikro Gaz Türbini Güç Üretim Sisteminin Blok Diyagramı

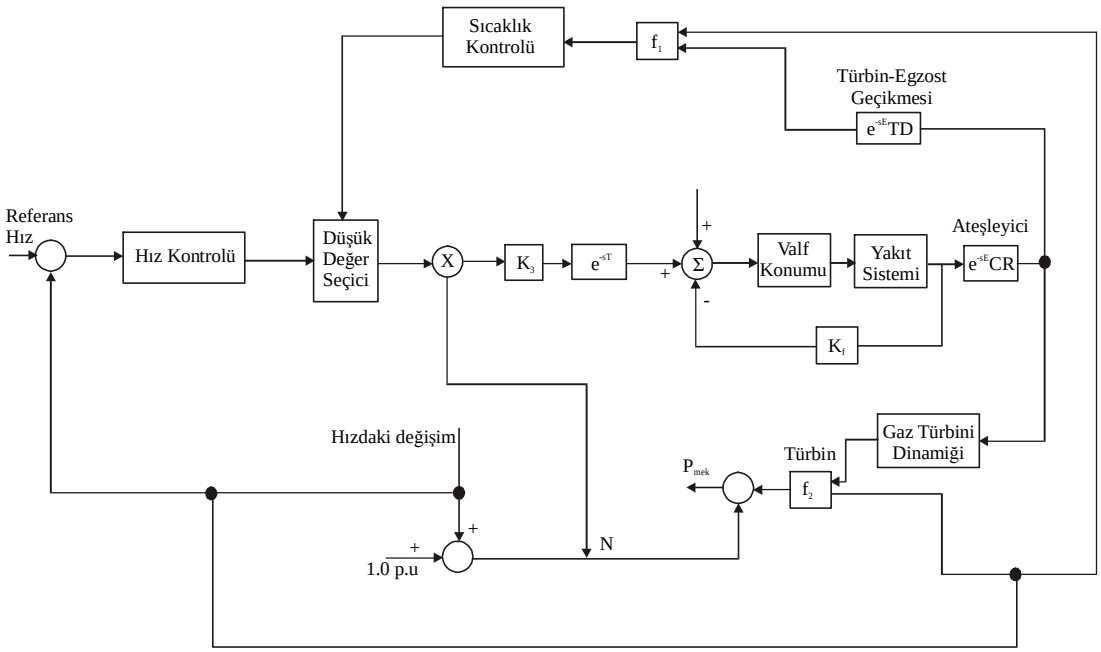
Mikro gaz türbinleri, Brayton çevrimi olarak bilinen termodinamik çevrimine dayalı olarak çalıştırılırlar. Bu çevrimde, giren hava kompresörlerde sıkıştırılır. Sıkıştırılan hava ateşleyici de yakıtla karıştırılarak yakılır. Tutuşan gaz türbin bölümünde genleşir. Gazın genleşmesiyle üretilen mekanik güç aynı mil üzerinde

bulunan kompresörü ve generatörü sürer yani tahrik eder. Generatörün tahrik edilmesiyle, elde edilen AC yüksek frekansı tüketicilerin kullanabileceği frekans seviyesi(50 Hz) e düşürmek için önce yüksek frekans değerine sahip AC gerilimin DC gerilime dönüşümü gerçekleştirilir. Bir sonraki aşamada DC gerilim, eviricilerle istenilen frekans değerindeki gerilim değerine çevrilir. AC-DC'e ve DC-AC'e dönüşümlerde harmonik etkisi azaltmak için filtre devreleri kullanılmaktadır.

Mikro gaz türbini güç üretim sistemlerinde kullanılan generatörler yüksek hıza sahip(3000 d/dk) generatörlerdir. Tek milli gaz türbinlerinde kullanılan generatör, sabit mıknatıslı senkron generatördür. 30 kW'lık generatör için frekansı 1600 Hz'dir[82].

V.2.2 Gaz Türbininin Modellemesi

Gaz türbinlerinin matematik ve dinamik modellemesi üzerine yapılmış bir çok çalışma bulunmaktadır. Yapılan çalışmalarda genellikle istenen veya planlanan iş ne ise gaz türbini de hedeflenen amaca göre dizayn edilmiştir. Yapılan çalışmada elde edilen gaz türbini sisteminin modellemesi; iki milli gaz türbini, silindirik kutuplu senkron generatör, hız kontrol ünitesi, sıcaklık kontrol ünitesi ve yakıt sistemini içermektedir. Gaz türbininin genel blok diyagramı Şekil V.17'de gösterilmektedir.

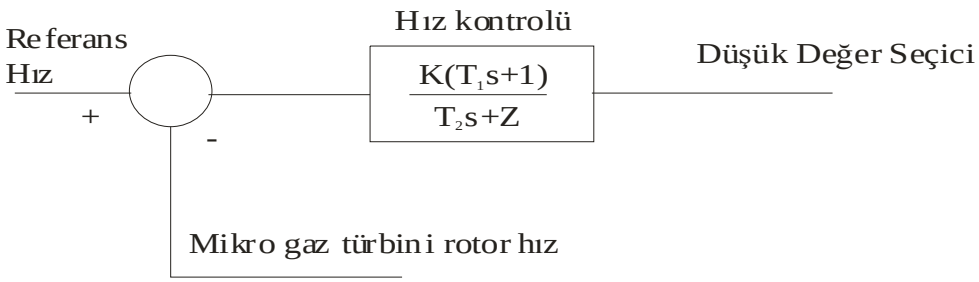


Şekil V.17 Mikro Gaz Türbininin Blok Diyagramı

Şekil V.17'de gösterilen gaz türbininin blok diyagramından da görüldüğü gibi hız, sıcaklık ve hız ivmesi kontrolü bulunmaktadır. Bu kontrol fonksiyon bloklarının çıkışları düşük değer giriş kapısının girişini oluşturmaktadır. Bu girişlerden en düşüğünün değerine göre en az yakıt miktarı belirlenir[83, 84].

V.2.2.1 Hız ve İvme Kontrolü

Hız kontrol ünitesi, referans (p.u) hız ile mikro gaz türbin sisteminin rotor hızı arasındaki hata hızına bağlı olarak çalışır. İşletme şartları altında mikro gaz türbininin kontrolü öncelikli işlemler arasındadır. Hız kontrolü genellikle ileri-geri transfer fonksiyonu ile modellemesi yapılmakta veya değişik kontrolör elemanları kullanılarakta gerçekleştirilir[85]. Bu yapılan çalışmada hız kontrolü PID(oransal-integral-türev) kontrolörü ve AYSABÇS kontrolörü ile yapılmaktadır.



Şekil V.18 Mikro Gaz Türbini İçin Hız Kontrolü Blok Diyagramı

Şekil V.18'da mikro gaz türbin rotorunun hız kontrolü için ileri-geri fonksiyondan oluşmuş kontrol ünitesinin blok diyagramı görülmektedir. Şekil V.18'daki *K*; kontrolör kazancını, T_1 ve T_2 zaman sabitlerini ifade etmektedir. Z ise; regülatörü ifade eden zaman sabitidir. Ortalama hızdaki düşüş regülatörü aynı zamanda oransal bir hız kontrolörüdür ve çıkışı hız hatasıyla orantılıdır. Eş zamanlı hız kontrolörü aynı zamanda oransal-pozitif-reset kontrolörüdür. Eş zamanlı hız kontrolörünün çıkışındaki değişim oranı hız hatasıyla orantılıdır.

Genellikle, ilk çalıştırma esnasında türbin rotorunun önceki işletme hızındaki rotor ivme oranına ulaşana kadar ivme kontrolörü kullanılır. Gaz türbin sisteminin işletme hızı nominal hıza yakınsa ivme kontrolörü kullanılmayabilir[83].

V.2.2.2 Yakıt Sistemi

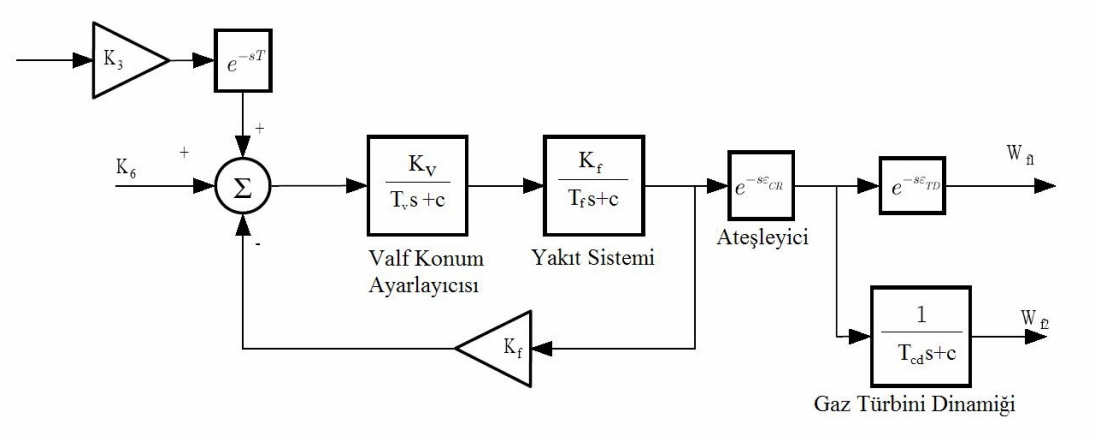
Yakıt sistemi, yakıt valfı ile yakıt işletmesinden oluşmaktadır. Yakıt işletme sisteminin ataleti ve valf konum ayarlayıcısının sonucunda yakıt sisteminden yakıt akışı aşağıdaki denklemle tanımlanır[85].

$$e_1 = \frac{K_V}{T_V s + c} F_d \tag{5.44}$$

Yakıt sistemi işletme transfer fonksiyonu;

$$Wf = \frac{K_f}{T_f s + c} e_1 \tag{5.45}$$

biçiminde yazılır. Denklem(5.44) ve (5.45)'da yer alan K_v veya K_f ; valf konum ayarlayıcısının kazancını, T_v ve Tf; valf konum ayarlayıcısının ve yakıt sistem işletmesinin zaman sabitleridir. c; sabit bir sayıyı, F_d ve e_1; valf konum ayarlayıcısının giriş ve çıkışlarını ve Wf; yakıt talep sinyalini belirtir. Düşük değer seçici bloğunun çıkışı(V_{ce}), gerekli olan en az yakıt miktarını ifade etmektedir. Yakıt sistemine diğer giriş ise ivme kontrolörü ile sınırlandırılmış türbin hızıdır(N). Kararlı işletme durumunda türbinin mekanik gücü(p.u), düşük değer seçici bloğunun çıkışına uygundur. Yakıt akış kontrolü düşük değer seçicinin (LVS)(Low value Select) bir fonksiyonu olarak ifade edilmektedir.

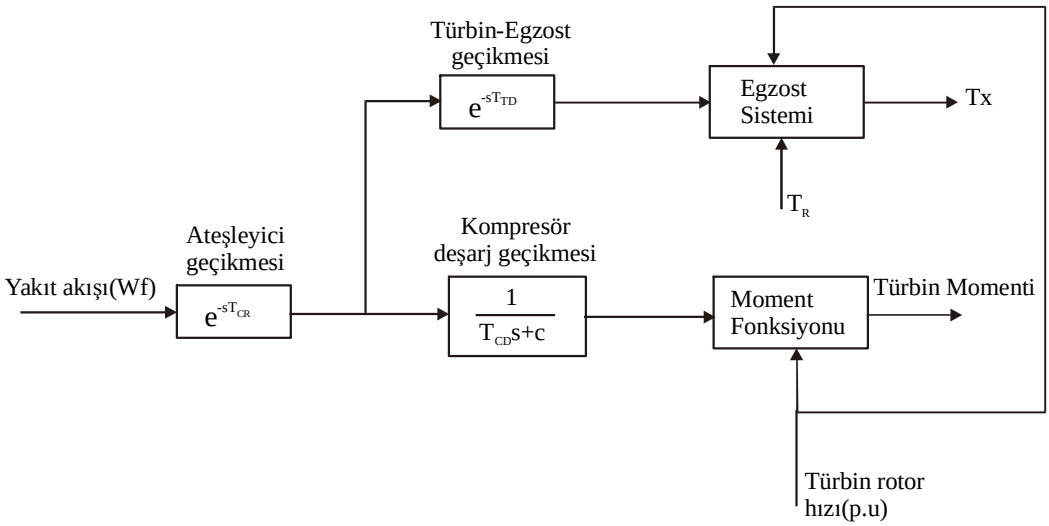


Şekil V.19 Mikro Gaz Türbin Sistemine Ait Yakıt Sistemi Blok Diyagramı

Şekil V.19'de mikro gaz türbin sistemi için yakıt sistemi ve kontrolünün blok diyagramı görülmektedir. V_{ce}'nin değeri K_3 kazancı ile ölçeklendirilir. $K_3=1-K_6$ değerine eşittir. Yanma odasında yanma işleminin sürekliliğini güvenceye almak için V_{ce}'nin değeri yakıt akışının minimum değeriyle geciktirilir veya kaydırılır. Sistem yüksüz iken yakıt akışı miktarı minimum değerdedir.

V.2.2.3 Kompresör-Türbin Sistemi

Gaz türbini güç üretim sisteminde, kompresör-türbin bloğu sistemin en önemli bileşenidir. Şekil V.20'de kompresör-türbin sistemin blok diyagramı gösterilmektedir.



Şekil V.20 Kompresör-Türbin Sisteminin Blok Diyagramı

Şekil V.20'de gösterilen blok diyagramında, T_{CR}; ateşleme reaksiyon zamanı ile birleşen küçük taşıma gecikmesi, T_{CD}; kompresör deşarj hacmi ile birleşen zaman gecikmesi, T_{TD}; türbin içersinden geçerek yanma sisteminden gazın taşınması için geçen gecikme zamanı belirtir. Türbin momenti ve egzost sıcaklık karakteristikleri, türbin hızı ve yakıt akışına göre lineerdir ve aşağıda verilen denklemlerle tanımlanır[86].

$$Moment = K_{HHV} \cdot (W_{f2} - 0.23) + 0.5(1 - N)\ (Nm) \tag{5.46}$$

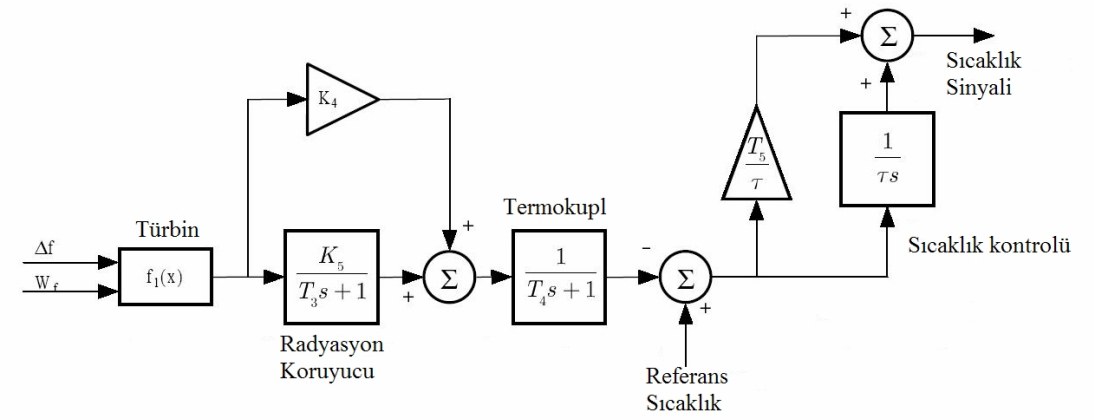
$$Egzost_Sıcaklığı(T_X) = T_R - 7000(1 - W_{f1}) + 550(1 - N)\ (°F) \tag{5.47}$$

K_{HHV}; yanma odasında gaz buharının yüksek ısı değerine bağlı katsayıyı, T_R; referans sıcaklığı ve W_f; yakıt talep sinyalini ifade eder.

V.2.2.4 Sıcaklık Kontrolü

Gaz türbini güç üretim sisteminde, önceden belirlenmiş ateşleme sıcaklığında gaz türbini çıkış gücünün istenilen değerde sınırlandırılması için çevre sıcaklığından bağımsız olarak sıcaklık kontrolü yapılması gerekmektedir. Egzost sıcaklık derecesinde ve istenilen türbin momentine göre yakıt yanma odasında yakılmaktadır. Egzost sıcaklığı, radyasyon koruyucu bileşimli termokupl cihazı ile ölçülür.

Termokupldan alınan çıkış sinyali referans sinyal ile karşılaştırılır. Referans sinyal ile karşılaştırılan sinyal pozitif ise sıcaklık kontrolü maksimum değerdedir. Termokupl çıkışı referans sinyal değerinden büyük ise çıkış negatiftir. Bu durumda sıcaklık kontrolü arzu edilen değere ulaşana kadar düşmeye başlar. Termokuplun çıkış sinyali hız kontrolörün çıkış sinyalinden daha düşük olması gerekir. Bir önceki değer türbin çıkış gücünü sınırlandırmak için LVS yardımıyla geçer ve türbin, sıcaklık kontrol ünitesi ile birlikte çalıştırılır. Sıcaklık kontrolörünün girişi egzost sıcaklığı, çıkışı ise sıcaklık kontrol sinyalidir[83].



Şekil V.21 Sıcaklık Kontrolü Blok Diyagramı

Şekil V.21'de mikro gaz türbini güç üretim sistemin içersinde yer alan sıcaklık kontrolünün blok diyagramı görülmektedir. Şekil V.21'de, *t*; integrasyon oranını, T_3; radyasyon koruyucu zaman sabitini, T_4; termokupl zaman sabitini, K_4 ve K_5; radyasyon koruyucu kazanç sabitlerini, T_5; termokupl zaman sabitini ifade etmektedir.

V.2.3 Senkron Makinanın Matematiksel Modeli

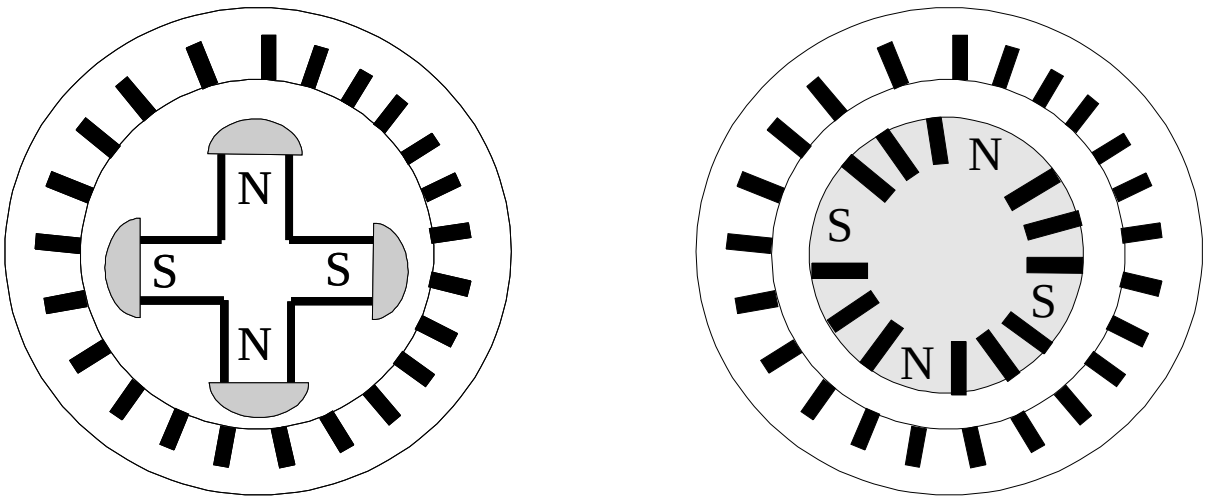
Senkron makinalar dünyanın her yerinde kullanılan ve hayatımızın vazgeçilmez bir enerjisi olan elektrik enerjisini üretmek amacıyla kullanılır. Senkron makinalar hem motor olarak hem de generatör olarak çalıştırılırlar. Genelde senkron makinalar elektrik enerjisini üretmek amacıyla generatör olarak çalıştırılır. İndüksiyon motorları; elektrik enerjisini mekanik enerjiye dönüştüren makinalar, senkron generatör de prensipte mekanik enerjiyi elektrik enerjisine dönüştüren makinalardır. Senkron makinaların elektrik ve elektromekanik davranışı, üç fazlı senkron makinayı betimleyen denklemlerden tahmin edilebilir.

Senkron makinanın rotoru, alan sargıları ve sönüm sargıları ile donatılmıştır. Genellikle bütün rotor sargılarının farklı elektriksel karakteristikleri vardır. Çıkıntılı kutuplu senkron makinanın rotoru simetrik değildir. Çıkıntılı kutuplu rotorun asimetrik olması nedeniyle rotor değişkenleri için değişkenlerin değişikliği bir avantaj sağlamaz. Fakat değişkenlerin değişikliği stator değişkenleri için fayda sağlar[75].

Senkron makinalar genellikle senkron hızda çalışırlar. Endüstriyel alanda en yaygın olarak üç fazlı senkron makinalar kullanılır. Üç fazlı senkron makinaların maliyeti indüksiyon makinaların maliyetinden yüksek olmasına karşın, daha yüksek güç oranlarında senkron makinaların verimi oldukça yüksektir.

Senkron makinanın statorunda, ince tabakalar halinde ferro-magnetik malzemenin üst üste konulup preslenmesi sonucunda stator(endüvi) sargılarının yerleştirileceği oluklar açılır. Bu açılan oluklara 120°lik faz farkı bulunan üç fazlı stator sargıları yerleştirilir ve stator sargıları kutup çiftleri üzerine eşit olarak dağıtılır.

Senkron makinanın rotoru silindirik ve çıkıntılı kutuplu olmak üzere iki ayrı şekilde yapılır. Çıkıntılı kutuplu senkron makinalar genellikle büyük kutup sayısında ve küçük senkron hızlar için imal edilirler. Generatör olarak çalışmada senkron makine genellikle bir su türbini ile döndürülürler. Bu nedenle su barajları ile elektrik üretiminde çıkık kutuplu senkron generatörler kullanılır.



Çıkıntılı kutuplu rotor Silindirik kutuplu rotor

Şekil V.22 Silindirik ve çıkıntılı senkron makinanın rotorları

Şekil V.22'de silindirik ve çıkıntılı kutuplu senkron makinanın rotoru görülmektedir. Rotoru silindirik yapıya sahip senkron makinaların yüksek devir hızı gerektiren uygulamalarda kullanılmaya daha elverişlidir. Çünkü kabul edilebilir yüksek devir hızı sınırları içersinde merkezkaç kuvvetten etkilenen makinanın mekanik kısımlarını korumak için makinanın rotor çapı mümkün olduğu kadar küçük olmalıdır. Yine aynı zamanda rotor uzunluğu da çapı ile orantılı olacak şekilde uzun olması gerekir. İki veya dört kutuplu rotoru silindirik yapıya sahip senkron makinalar buhar türbinlerinin yüksek çalışma hızlarına etkili bir şekilde cevap vermek amacıyla buhar türbinlerinde buhar generatörü olarak kullanılır. Uzun silindirik yapıya sahip rotorlar krom-nikel-molibden çeliğin katı karışımlarından elde edilmiştir. Senkron makinaların ana kutbunun her iki tarafında mevcut olan ana alan sargıları yerleştirildiği oluklarda yukarıda ifade edilen malzemelerin katı karışımlarından elde edilmiştir.

Senkron makinaların ana alan sargılarına rotor mili üzerine yerleştirilen bir çift bilezik aracılığı ile bu sargılara doğru gerilim uygulanır. Alan sargılarının değişik bir besleme şekli olarak senkron makinaların aynı rotor mili üzerinde bulunan küçük bir alternatörün doğrultulmuş çıkış gerilimi ile de beslemesi yapılabilir. Yine bir değişik besleme modeli de fırçasız uyarma olarak adlandırılan bilezik ve fırçalara gerek duymadan senkron makinalara yol vermektir.

Senkron makinaların akım, gerilim, ve diğer büyüklüklerin vektöriyel gösterilişinde d ekseni boyuna bileşen, q ekseni ise d ekseninden 90° ileride çizilen enine bileşen olarak adlandırılır. Senkron makinanın yüksüz çalışma durumunda ana alan mmk'ti d ekseni boyunca mevcuttur. Yani yüksüz çalışmada endüvi sargılarından akım geçmediği için ana alanın meydana getirdiği mmk'e bozucu bir etki meydana gelmesi söz konusu değildir.

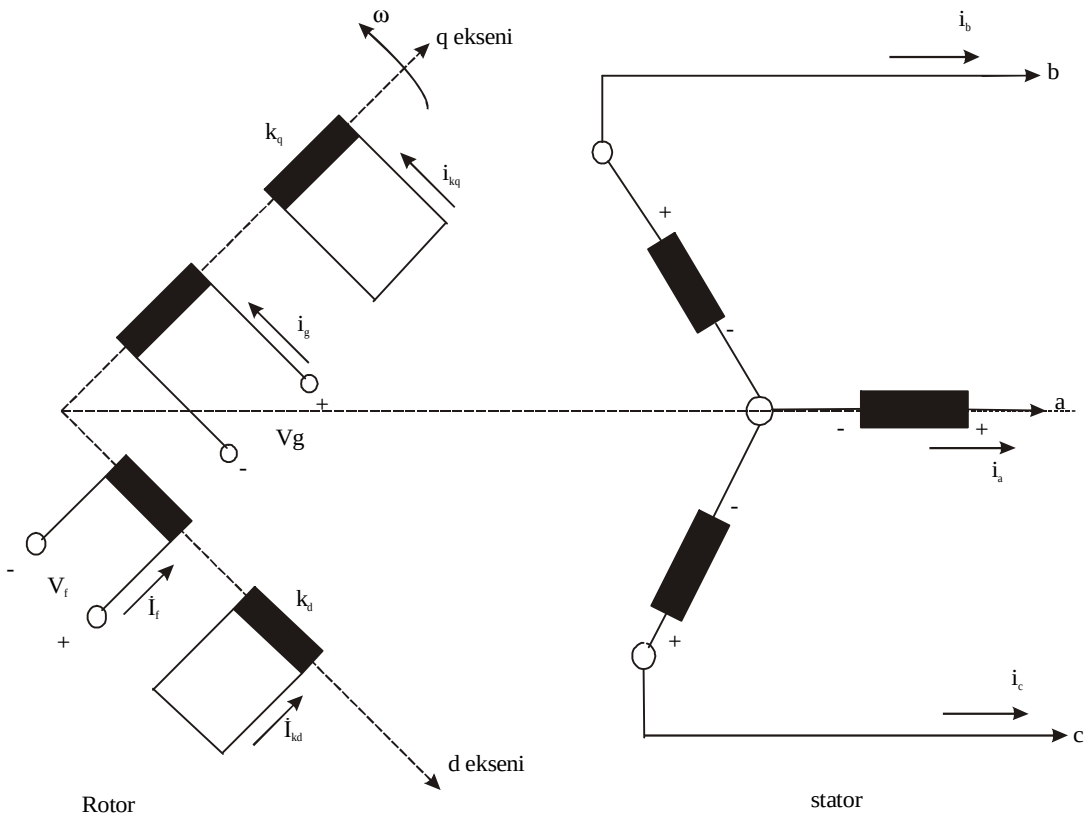
Bu bölümde çıkıntılı kutuplu ideal iki kutuplu senkron makinanın matematiksel modeli çıkartılmıştır. Senkron makinanın matematiksel denklemleri teorik temel kavramlara dayandırılmıştır. Alan sargılarından gecen akımların ürettiği manyetik alanlar hava aralığında sinüzoidal olarak dağıldığı varsayılır. Sinüzoidal alan dağılımı varsayılarak uzay harmonikleri göz önüne alınmaz. Ama bu uzay harmonikleri makinanın dinamik davranışı üzerine etkisi olabilir.

Üç fazlı senkron makinalar güç üretiminde yaygın bir şekilde kullanıldığından bu makinaların parametrelerinin saptanması ve modellemesi üzerine literatürde oldukça fazla yayın bulunmaktadır. Senkron makinanın çok ayrıntılı modellemesi

makinanın manyetik devreleri göz önünde bulundurularak oluşturulur. Genelde senkron makinanın devre modellemesin de çift kuplajlı devre modelini kullanmak hem daha kolay hem de basittir. Yaygın olarak bu devre modeli benimsenmiştir. Senkron makinanın simülasyonunu yapmak için yalnızca devre modeli gerekmez aynı zamanda model için gerekli olan parametrelerinde bilinmesi gerekir. Hazırlanan devre modelinden beklenen nokta, bizim hedeflediğimiz sonuçlara ulaşmaktır. Hassas devre modellemesi daha çok veri elde etmek için kullanılır. Ayrıntılı devre modellemelerini programlamak için daha çok uğraşa ve simülasyon süresine ihtiyaç duyulur.

Senkron makinanın rotorunda alan sargısının yanı sıra sönüm sargıları da bulunur. Çıkıntılı kutuplu senkron makinalarda genelde iki tane sönüm sargısı kullanılır. Bu sargılardan birisi d ekseni üzerinde diğeri ise q ekseni üzerindedir. Bugüne kadar yapılan bütün simülasyon çalışmalarında, alan sargısının yanı sıra bir veya iki tane sönüm sargılı eşdeğer ideal makina temeline dayanan devre modellemesi yeterli olmaktadır[75].

Senkron makinanın eşdeğer devre modelinde kullanılan sönüm sargıları fiziksel olarak amortisör sargılarını göstermek için veya rotor kutuplarının demir kısımlarında eddy akımlarının etkilerini göstermek için kullanılır. Senkron makinanın devre modeli Şekil V.23'de gösterilmektedir.



Şekil V.23 Senkron makinanın eşdeğer devre modeli

Şekil V.23'de gösterilen senkron makinanın eşdeğer devre modelinin denklemlerini elde edilmeden önce rotorun pozisyonuna göre endüktans büyüklüklerinin değişimi gözden geçirilir. *d* ve *q* eksenleri boyunca manyetik devrenin iletkenliği aynı değildir. Rotor sargılarının manyeto motor kuvveti *d* veya *q* ekseni boyunca daima aynı yönde yönlendirilmiş olmasına karşın, *d* ve *q* ekseni ile ilişkili stator sargılarının manyeto motor kuvvet bileşkesinin yönü güç faktörüne bağlı olarak değişecektir. Statorun *a* fazından akan akımın manyetik etkisi göz önüne alınır. Şekil V.24'de gösterildiği gibi akı bileşenleri elde edilmek istenirse a fazının mmk'tinin *d* ve *q* eksenleri boyunca bileşenleri sırasıyla $f_d = P_d.F_a.\ \mathrm{Sin}\theta_r$ ve $f_q = P_q.\ F_a.\ Cosq_r$ bulunur. A faz sargısına göre tekrar çözülmüş bu akı bileşenlerinin bağıntıları yazılacak olursa;

$$l_{aa} = N_s(\Phi_d \sin q_r + \Phi_q.\cos q_r)\ \ Wb.\ sarım$$

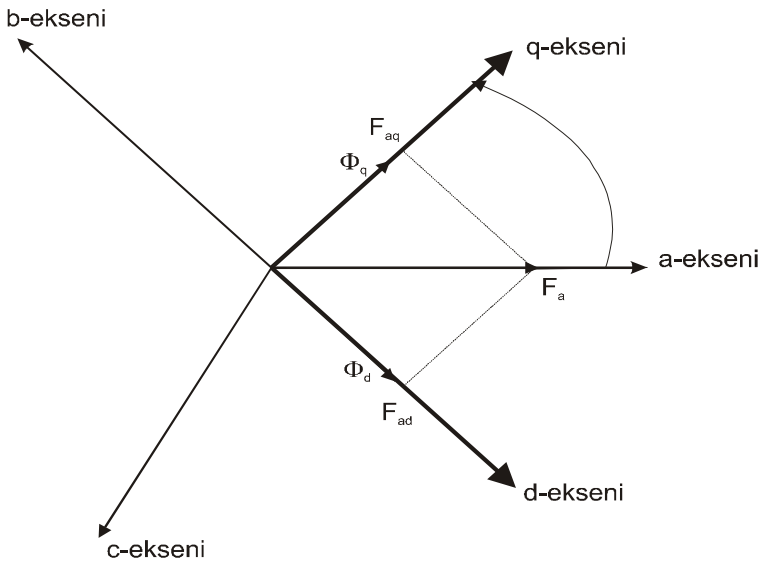
$$l_{aa} = N_s.F_a(P_d.\sin^2 q_r + P_q.\cos^2 q_r)$$

$$l_{aa} = N_s.F_a(\frac{P_d + P_q}{2} - \frac{P_d - Pq}{2}\cos 2q_r) \qquad (5.48)$$

yukarıda elde edilen l_{aa} ifadesi $A - B\,cos2q_r$ biçiminde elde edilir. Üç fazlı senkron makinanın faz sargıları arasında *120°* lik elektriksel açı farkı olduğuna göre akı bileşenlerinin f_d ve f_q bağıntıları aşağıdaki gibi yazılabilir [70].

$$l_{ba} = N_s.F_a\left\{P_d \sin q_r \sin\left(q_r - \frac{2p}{3}\right) + P_q \cos q_r \cos\left(q_r - \frac{2p}{3}\right)\right\}\ Wb.sarım$$

$$l_{ba} = N_s.F_a\left\{-\frac{P_d + P_q}{4} - \frac{P_d - P_q}{2}\cos 2\left(q_r - \frac{p}{3}\right)\right\} \qquad (5.49)$$



Şekil V.24 Stator akımının meydana getirdiği mmf'in d-q eksenindeki bileşenleri

Denklem (5.49)'deki yöndeş akı bağıntısı $\lambda_{ba;} \; -(A/2) - B\cos 2\left(q_r - \frac{p}{3}\right)$ biçiminde basit forma dönüştürülür. Rotor açısı ile *a* fazına ait akı bağıntısı arasındaki fonksiyonel ilişkiye dayanarak statorun a faz sargısının self endüktansını da,

$$L_{aa} = L_0 - L_{ms}\cos 2q_r \qquad (5.50)$$

biçiminde yazılır[20]. Yine aynı şekilde b ve c faz sargılarının self endüktansını a faz sargısının self endüktansına benzer şekilde ifade edilir. Fakat faz sargıları arasında $(q_r - \frac{2p}{3})$ ve $(q_r - \frac{4p}{3})$ 120°'lik elektriksel açı farkı olacak şekilde bu sargılara ait endüktansları denklemleri elde edilir.

Denklem (5.49) de *a* ve *b* fazı arasındaki yöndeş akı bağıntısını elde ettiğimiz gibi aynı şekilde statorun a ve b fazı arasındaki yöndeş akı bağıntısı veren denklemi de aşağıdaki gibi elde edilir.

$$L_{ab} = L_{ba} = -\frac{L_0}{2} - L_{ms}\cos 2\left(q_r - \frac{p}{3}\right) H \tag{5.51}$$

L_{bc} ve L_{ca} yöndeş endüktansları da denklem (5.51) deki gibi benzer şekilde elde edebilir. Stator ve rotor sargısının gerilim denklemleri

$$\begin{bmatrix} v_s \\ v_r \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} r_s & 0 \\ 0 & r_r \end{bmatrix} \cdot \begin{bmatrix} i_s \\ i_r \end{bmatrix} + \frac{d}{dt} \cdot \begin{bmatrix} \Lambda_s \\ \Lambda_r \end{bmatrix} \text{ V} \tag{5.52}$$

biçiminde düzenlenebilir. Bu denklem takımında yer alan büyüklüklerin açılımları aşağıda ifade edilmiştir.

$$v_s = \left[v_a, v_b, v_c\right]^t \tag{5.53}$$

$$v_r = \left[v_f, v_{kd}, v_g, v_{kq}\right]^t \tag{5.54}$$

$$i_s = \left[i_a, i_b, i_c\right]^t \tag{5.55}$$

$$i_r = \left[i_f, i_{kd}, i_g, i_{kq}\right]^t \tag{5.56}$$

$$r_s = \left[r_a, r_b, r_c\right] \tag{5.57}$$

$$r_r = \left[r_f, r_{kd}, r_g, r_{kq}\right] \tag{5.58}$$

$$\Lambda_s = \left[l_a, l_b, l_c\right]^t \tag{5.59}$$

$$\Lambda_r = \left[l_f, l_{kd}, l_g, l_{kq}\right]^t \tag{5.60}$$

Stator ve rotor sargılarının akı bileşenlerinin denklemlerini aşağıdaki gibi düzenlenebilir.

$$\Lambda_s = L_{ss} i_s + L_{sr} i_r \ \ Wb.\text{sarım} \tag{5.61}$$

$$\Lambda_r = \left[L_{sr}\right]^t i_s + L_{rr} i_r \tag{5.62}$$

Denklem(5.61), (5.62)'de L_{ss}, L_{rr}, L_{sr} endüktanslarını matris formu biçiminde düzenlenirse;

$$L_{ss}=\begin{bmatrix} L_{ls}+L_0-L_{ms}\cos 2q_r & -\frac{1}{2}L_0-L_{ms}\cos 2(r-\frac{p}{3}) & -\frac{1}{2}L_0-L_{ms}\cos 2(q_r+\frac{p}{3} \\ -\frac{1}{2}L_0-L_{ms}\cos 2(q_r-\frac{p}{3}) & L_{ls}+L_0-L_{ms}\cos 2(q_r-\frac{2p}{3}) & -\frac{1}{2}L_0-L_{ms}\cos 2(q_r-p) \\ -\frac{1}{2}L_0-L_{ms}\cos 2(q_r+\frac{p}{3}) & -\frac{1}{2}L_0-L_{ms}\cos 2(q_r+p) & L_{ls}+L_0-L_{ms}\cos 2(q_r+\frac{2p}{3}) \end{bmatrix} \quad (5.63)$$

$$L_{rr}=\begin{bmatrix} L_{lf}+L_{mf} & L_{fkd} & 0 & 0 \\ L_{kdf} & L_{lkd}+L_{mkd} & 0 & 0 \\ 0 & 0 & L_{\lg}+L_{mg} & L_{gkq} \\ 0 & 0 & L_{kqg} & L_{lkq}+L_{mkq} \end{bmatrix} \quad (5.64)$$

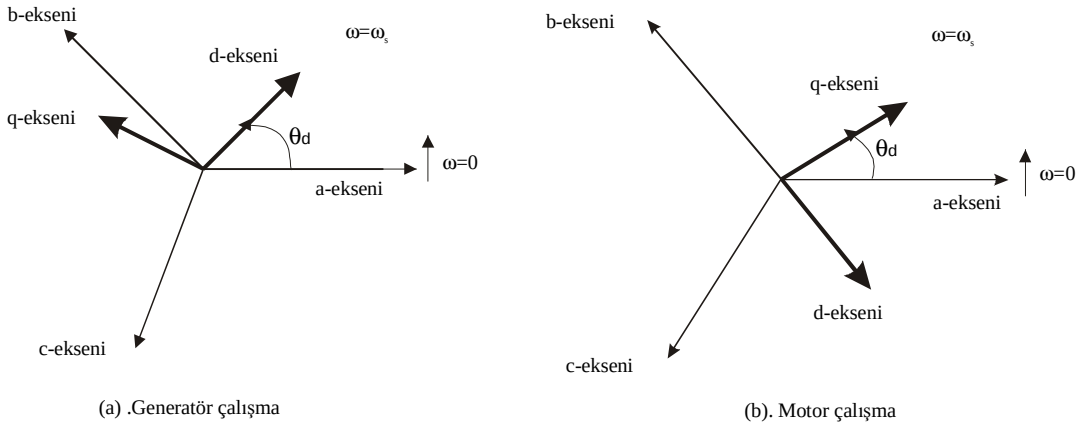
$$L_{sr}=\begin{bmatrix} L_{sf}\sin q_r & L_{skd}\sin q_r & L_{sq}\cos q_r & L_{skq}\cos q_r \\ L_{sf}\sin(q_r-\frac{2p}{3}) & L_{skd}\sin(q_r-\frac{2p}{3}) & L_{sg}\cos(q_r-\frac{2p}{3}) & L_{skq}\cos(q_r-\frac{2p}{3}) \\ L_{sf}\sin(q_r+\frac{2p}{3}) & L_{skd}\sin(q_r+\frac{2p}{3}) & L_{sg}\cos(q_r+\frac{2p}{3}) & L_{skq}\cos(q_r+\frac{2p}{3}) \end{bmatrix} \quad (5.65)$$

denklemleri elde edilir[75]. Bu denklemlerden de açıkça görülmektedir ki L_{ss} ve L_{sr} endüktansları rotor açısının bir fonksiyonu olarak ifade edilmektedir. Yani rotorun hız oranına bağlı olarak bu L_{ss} ve L_{sr} elemanlarının büyüklük değerleri değişmektedir. Her bir faza ait olan büyüklüklerin çözümü için denklem (5.52) takımı kullanıldığında zamana bağlı katsayıların hesaplanması oldukça güçtür. Akı bileşenlerinden faz akımlarını elde etmek için zamana bağlı olarak değişen endüktans matrislerinin tersini her bir zaman periyodu için hesaplamak gerekir. Her bir zaman periyodu için tersi alınan endüktans matrislerinin hesaplanması zaman kaybına neden olacağı gibi sayısal sürekli problemler üretebilir.

V.2.3.1 Senkron Makinanın Stator Sargılarına Ait Büyüklüklerin Rotorla Birlikte Hareket Eden dq0 Eksen Takımına Dönüştürülmesi

Gerilim denklemleri duran kısımda bulunan stator (*a,b,c*) faz sargılarına ilişkin denklemleri, rotorla birlikte hareket eden *dq0* eksen takımına göre uyarlamak gerekmektedir. Dönüşümün temel ilkesi rotor ve stator arasındaki bağıl hareketi ortadan kaldırmak için rotor ve stator büyüklüklerini aynı referans eksen takımına taşımaktır. Bu işlem için simetrik park dönüşümleri kullanılmaktadır. Generatör ve

motor çalışma durumlarında *dq0* ile *abc* eksen takımları arasındaki ilişki aşağıda Şekil V.25'de gösterilmektedir.



Şekil V.25 Generatör ve motor çalışmada w **açısal hızıyla dönen *dq0* eksen takımı ile *abc* eksen takımları arasındaki ilişki**

Senkron makinaların analizinde üç fazı iki faza dönüştürmek için en iyi dönüşüm metodu olarak kullanılan metot Park dönüşüm metodudur. Park dönüşüm denklemi aşağıdaki gibi ifade edilir[75].

$$[f_{dq0}] = [T_{dq0}(q_d)].[f_{abc}] \tag{5.66}$$

Senkron makinalarda alan sargısının magnetik ekseni ile *d* ekseni aynı hizada bulunmaktadır. Pozitif *q*-ekseni orijinal Park dönüşümünde *d*-ekseninden 90° ilerde bulunmaktadır. Bazı bilim adamaları da *q*-ekseni *d*-eksenine göre 90° geride bulunmaktadır. İkinci yaklaşım göz ününe alarak *dq0* Park dönüşüm matrisi aşağıdaki gibi tanımlanır[70].

$$[T_{dq0}(q_d)] = \frac{2}{3}\begin{bmatrix} \cos q_d & \cos\left(q_d - \frac{2p}{3}\right) & \cos\left(q_d + \frac{2p}{3}\right) \\ \sin q_d & \sin\left(q_d - \frac{2p}{3}\right) & \sin\left(q_d + \frac{2p}{3}\right) \\ \frac{1}{2} & \frac{1}{2} & \frac{1}{2} \end{bmatrix} \tag{5.67}$$

Generatör çalışma durumu halinde Şekil V.25'de görüldüğü gibi q_d açısı *d*-ekseni ile a ekseni arasındaki açı olup genellikle *abc* eksenini *d_q* iki eksen takımına

dönüştürmede *q*-ekseni *d*-ekseninden 90° ileride gösterilir. Denklem (5.67)'de elde edilen $[T_{dq0}(q_d)]$ Park dönüşüm matrisinin tersi ise;

$$[T_{qd0}(q_d)]^{-1} = \begin{bmatrix} \cos q_d & \sin q_d & 1 \\ \cos\left(q_d - \frac{2p}{3}\right) & \sin\left(q_d - \frac{2p}{3}\right) & 1 \\ \cos\left(q_d + \frac{2p}{3}\right) & \sin\left(q_d + \frac{2p}{3}\right) & 1 \end{bmatrix} \tag{5.68}$$

biçiminde ifade edilir. Park dönüşümlerinde q_q ve q_d arasındaki ilişki,

$$q_q = q_d + \frac{p}{2} \tag{5.69}$$

şeklinde tanımlanır. Senkron makinada, rotor sargısının eksenleri *d* ve *q* eksenleridir. *qd0* eksen takımına dönüşüm, stator sargı büyüklüklerine uygulanır. Sabit kısımda bulunan statorun *a*-ekseni ile hareketli kısımda bulunan *q*-ekseni arasındaki açı q_r rotorun hızına bağlı olarak değişiklik gösterecektir. Stator sargısının büyüklükleri de bu açının aldığı değere göre değişecektir. Dönüşüm açısı q_r olduğundan Park dönüşüm matrisini de buna göre yazmak gerekmektedir. Yukarıda ifade edilen bilgiler ışığında $[T_{dq0}(q_r)]$ matrisi :

$$[T_{dq0}(q_r)] = \frac{2}{3}\begin{bmatrix} \cos q_r & \cos\left(q_r - \frac{2p}{3}\right) & \cos\left(q_r + \frac{2p}{3}\right) \\ \sin q_r & \sin\left(q_r - \frac{2p}{3}\right) & \sin\left(q_r + \frac{2p}{3}\right) \\ \frac{1}{2} & \frac{1}{2} & \frac{1}{2} \end{bmatrix} \tag{5.70}$$

biçiminde yazılır. Denklem(5.70)'de elde edilen $[T_{dq0}(q_r)]$ matrisinin tersi aşağıda belirtilen denklem (5.71) ile elde edilir.

$$[T_{qd0}(q_r)]^{-1} = \begin{bmatrix} \cos q_r & \sin q_r & 1 \\ \cos\left(q_r - \frac{2p}{3}\right) & \sin\left(q_r - \frac{2p}{3}\right) & 1 \\ \cos\left(q_r + \frac{2p}{3}\right) & \sin\left(q_r + \frac{2p}{3}\right) & 1 \end{bmatrix} \tag{5.71}$$

Senkron makinanın stator devresine ait akı, gerilim, akım büyüklüklerinin *dq0* bileşenlerine dönüşümü, Park dönüşüm matrisi kullanarak aşağıda elde edilen denklem takımları yardımıyla ifade edilebilir.

$$v_{qd0} = T_{qd0}(q_r)v_s \tag{5.72}$$

$$i_{qd0} = T_{qd0}(q_r)i_s \tag{5.73}$$

$$\Lambda_{qd0} = T_{qd0}(q_r)\Lambda_s \tag{5.74}$$

Yukarıda ifade edilen gerilim,akım ve akı bileşenlerinin *dq0* bileşenlerinin matris formuna dönüştürmek için aşağıda gösterildiği gibi düzenlemek gerekir.

$$v_{qd0} = \left[v_q, v_d, v_0\right]^t \tag{5.75}$$

$$i_{qd0} = \left[i_q, i_d, i_0\right]^t \tag{5.76}$$

$$\Lambda_{qd0} = \left[l_q, l_d, l_0\right]^t \tag{5.77}$$

$[T_{dq0}(q_r)]$ Park dönüşüm matrisi yalnızca senkron makinanın denklem (5.61)'de verilen stator gerilim denklemlerine uygulandığında, stator gerilim denklemleri

$$v_{qd0} = T_{qd0} r_s T^{-1}{}_{qd0}.i_{qd0} + T_{qd0}\frac{d}{dt}T^{-1}{}_{qd0}.\Lambda_{qd0} \tag{5.78}$$

denklem (5.87) deki gibi ifade edilir. Bu elde edilen denklem takımında yer alan stator devresinin r_s direnci; ideal bir senkron makinada $r_a = r_b = r_c = r_s$ eşittir. Yukarda ki denklem (5.78)'de stator sargının direncinden dolayı meydana gelen gerilim düşümünü daha kısa bir şekilde

$$T_{qd0}.r_s.T_{qd0}{}^{-1}.i_{qd0} = r_s i_{dq0} \tag{5.79}$$

ifade edilebilir. Denklem (5.78)'in sağ tarafındaki ikinci terim aşağıdaki gibi açılabilir.

$$T_{qd0}\frac{d}{dt}T_{qd0}^{-1}\Lambda_{qd0} = T_{qd0}.\left[\left(\frac{d}{dt}T_{qd0}^{-1}\right)\Lambda_{qd0} + T_{qd0}^{-1}\frac{d}{dt}\Lambda_{qd0}\right] \tag{5.80}$$

Denklem (5.74)'deki dönüşüm matrisinde yerine konulduğunda ve sadeleştirme yapıldığında

$$\frac{d}{dt}T_{qd0}^{-1}\Lambda_{qd0} = w_r\begin{bmatrix} -\sin q_r & \cos q_r & 0 \\ -\sin\left(q_r - \frac{2p}{3}\right) & \cos\left(q_r - \frac{2p}{3}\right) & 0 \\ -\sin\left(q_r + \frac{2p}{3}\right) & \cos\left(q_r + \frac{2p}{3}\right) & 0 \end{bmatrix}.\Lambda_{qd0} \tag{5.81}$$

$$T_{qd0}\left[\frac{d}{dt}T_{qd0}^{-1}\right].\Lambda_{qd0} = w_r.\begin{bmatrix} 0 & 1 & 0 \\ -1 & 0 & 0 \\ 0 & 0 & 0 \end{bmatrix}.\Lambda_{qd0} \tag{5.82}$$

Denklem (5.91)'deki $w_r = \frac{dq_r}{dt}$ rad/sn elektriksel açısal hızı gösterir. Denklem (5.80)'deki son terimde sadeleştirildiğinde

$$T_{qd0}T_{qd0}^{-1}\frac{d}{dt}\Lambda_{qd0} = \frac{d}{dt}\Lambda_{qd0} \tag{5.83}$$

denklem (5.83) elde edilir. Denklem (5.79)'e geri dönüp yukarıda bulunan (5.82) ve (5.83) denklemlerini yerine koyup yeniden düzenleme yapılacak olursa ideal bir senkron makinanın rotorun *dq* eksenine göre stator gerilim denklemleri aşağıdaki gibi yeniden ifade edilebilir.

$$v_{qd0} = r_s i_{qd0} + w\begin{bmatrix} 0 & 1 & 0 \\ -1 & 0 & 0 \\ 0 & 0 & 0 \end{bmatrix}.\Lambda_{dq0} + \frac{d}{dt}\Lambda_{qd0} \tag{5.84}$$

V.2.3.2 Rotorun dq0 Eksen Takımına Göre Gerilim Denklemleri

Aşağıda verilen denklem takımları; stator devresine göre rotora ait bütün büyüklükleri ve rotorun *d_q* referans ekseninde senkron makinanın gerilim denklemlerini içerir.

$$v_q = r_s i_q + \frac{d\,l_q}{dt} + l_d \frac{dq_r}{dt} \tag{5.85}$$

$$v_d = r_s i_d + \frac{d\,l_d}{dt} - l_q \frac{dq_r}{dt} \tag{5.86}$$

$$v_0 = r_s i_0 + \frac{d\,l_0}{dt} \tag{5.87}$$

$$v'_f = r'_f i'_f + \frac{d\,l'_f}{dt} \tag{5.88}$$

$$v_{kd}' = r_{kd}' i_{kd}' + \frac{d\,l'_{kd}}{dt} \tag{5.89}$$

$$v_g' = r_g' i_g' + \frac{d\,l'_g}{dt} \tag{5.90}$$

$$v_{kq}' = r_{kq}' i'_{kq} + \frac{d\,l'_{kq}}{dt} \tag{5.91}$$

Akı bağıntıları ise aşağıdaki gibi ifade edilir.

$$l_q = L_q i_q + L_{mq} i'_g + L_{mq} i'_{kq} \tag{5.92}$$

$$l_d = L_d i_d + L_{md} i'_f + L_{md} i'_{kd} \tag{5.93}$$

$$l_0 = L_{ls} i_0 \tag{5.94}$$

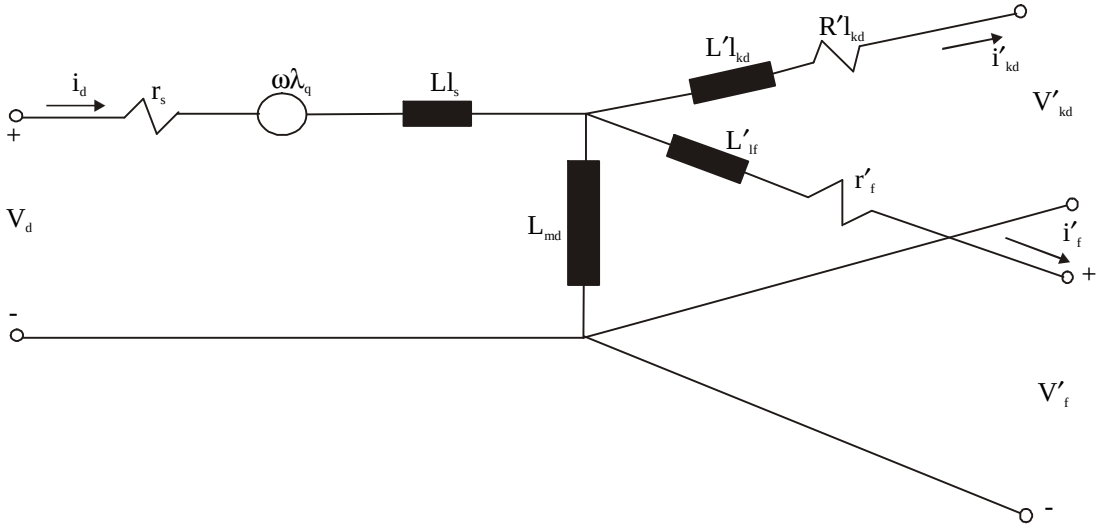
$$l'_f = L_{md} i_d + L_{md} i'_{kd} + L'_{ff} i'_f \tag{5.95}$$

$$l'_{kd} = L_{md} i_d + L_{md} i'_f + L'_{kdkd} i_{kd}' \tag{5.96}$$

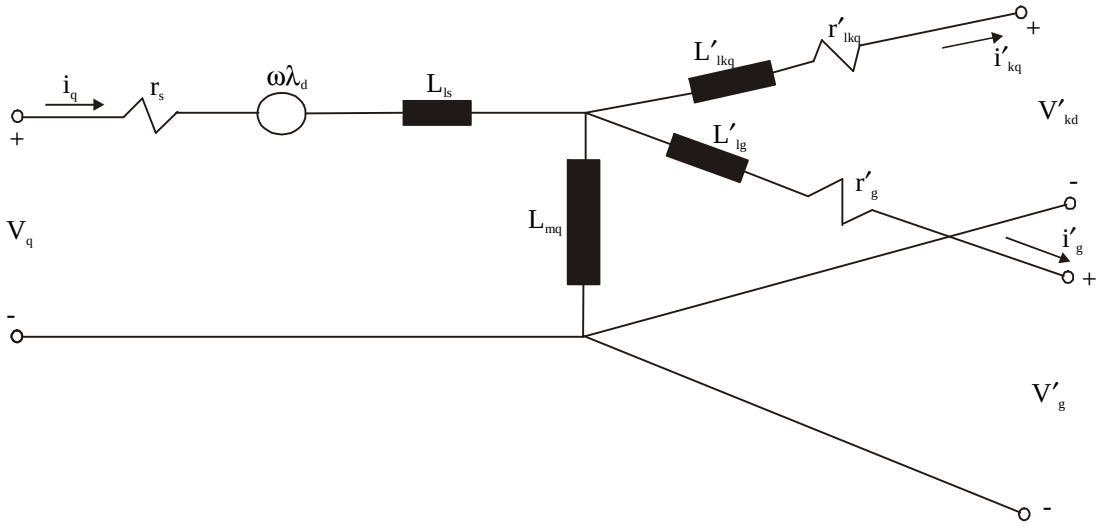
$$l'_g = L_{mq} i_q + L'_{gg} i'_g + L_{mq} i'_{kq} \tag{5.97}$$

$$l'_{kq} = L_{mq} i_q + L_{mq} i'_g + L'_{kqkq} i'_{kq} \tag{5.98}$$

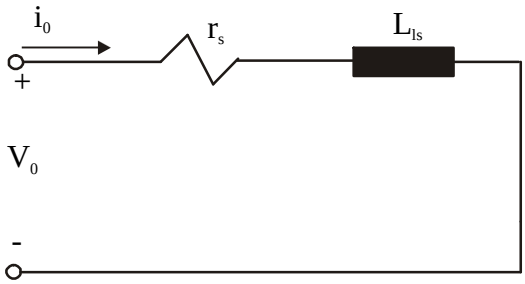
Şekil V.26 (a),(b) ve (c) de gösterilen gerilim ve akı bağıntılarına dayalı olarak ifade edilen senkron makinanın eşdeğer devresinin elemanları yukarda ki denklemlerde kullanılmıştır. Eşdeğer sargı denklemleri ve eşdeğer devre diyagramı ideal senkron makine için elde edilmiştir.



(a) D_ekseni



(b) Q_ekseni



(c) 0_ekseni

Şekil V.26 Senkron makinanın dq0 eşdeğer devresi

V.2.3.3 Senkron Makinanın Giriş Gücü ve Elektromagnetik Tork Denklemleri

Döndürücü makine tarafından üretilen elektromagnetik tork ifadesi giriş gücü bileşenlerinin kullanılmasıyla elde edilebilir. Senkron makinanın giriş gücü aşağıda verilen denklemle ifade edilebilir.

$$P_{in} = v_a i_a + v_b i_b + v_c i_c + v_f i_f + v_g i_g \tag{5.99}$$

Stator faz sargısına ait büyüklükler rotorun dq0 eksen takımına göre dönüşümü yapıldığında yukarıdaki denklem takımı tekrar düzenlenirse,

$$P_{in} = \frac{3}{2}(v_q i_q + v_d i_d) + 3v_0 i_0 + v_f i_f + v_g i_g \tag{5.100}$$

$$\begin{aligned} P_{in} = {} & \frac{3}{2}\left(r_s(i_q{}^2 + i_d{}^2) + i_q \frac{d l_q}{dt} + i_d \frac{d l_d}{dt} + w_r(l_d i_q - l_q i_d) \right) \\ & + 3i_0{}^2 r_0 + 3i_0 \frac{d l_0}{dt} + i_f{}^2 r_f + i_f \frac{d l_f}{dt} + i_g{}^2 r_g + i_g \frac{d l_g}{dt} \end{aligned} \tag{5.101}$$

denklem (5.101) elde edilir[21]. Denklem (5.101)'deki omik kayıpları ve manyetik enerjideki değişim oranlarını ihmal edilirse üretilen elektromekanik gücü tanımlayan denklemi aşağıdaki gibi düzenlenir.

$$P_{em} = \frac{3}{2} w_r (l_d i_q - l_q i_d) \tag{5.102}$$

P kutuplu makine için, $w_r = (P/2) w_{rm}$, w_{rm}, rotorun mekanik açısal hızını gösterir. Bu nedenle P kutuplu makine için mekanik gücü ifade eden denklem (5.110) tekrar yazılırsa;

$$P_{em} = \frac{3}{2}\frac{P}{2} w_{rm} (l_d i_q - l_q i_d) \tag{5.103}$$

elde edilir. Elektromekanik güç rotorun mekanik hızına bölündüğünde, P kutuplu senkron makina tarafından üretilen elektromekanik tork için,

$$T_{em} = \frac{3}{2}\frac{P}{2} (l_d i_q - l_q i_d) \tag{5.104}$$

denklemi elde edilir.

V.2.3.4 Senkron Makinanın Kararlı Çalışma Durumundaki Akım,Gerilim,Güç ve Tork Denklemleri

Senkron makinanın dinamik davranışını daha iyi anlamak için kararlı çalışma durumunda bize yardımcı olacak fazör diyagramları ve denklemleri gözden geçirilir. Simülasyon çalışmalarında, amaçlanan kararlı durum değerlerini belirlemek ve simülasyonu ilk başlangıç değerlerine ayarlamak için kararlı durum denklemleri kullanabilir. Daha da önemlisi kararlı durum davranışının doğruluğu simülasyon çalışmalarının doğruluğunu kontrol etmek için vazgeçilmez bir unsurdur. Sabit alan uyartımın da senkron hızla (w_e) dönen rotorla ayarlanmış kararlı durum şartları kabul edilir[87]. Kararlı çalışma durumunda stator faz gerilimi denklemleri aşağıdaki gibi tanımlanır.

$$v_a = V_m \cos(w_e t) \tag{5.105}$$

$$v_b = V_m \cos\left(w_e t - \frac{2p}{3} \right) \tag{5.106}$$

$$v_c = V_m \cos\left(w_e t - \frac{4p}{3} \right) \tag{5.107}$$

Yukarıdaki faz gerilimlerinin uzay vektörleri ve fazör ifadeleri q_e ekseni çerçevesine göre yazılmıştır. Başlangıç açısını $q_e=0$ kabul edilir. Senkron makinanın kararlı çalışma durumundaki stator faz sargısına ait akım denklemleri de aşağıdaki gibi ifade edilebilir.

$$i_a = I_m \cos(w_e t + f) \tag{5.108}$$

$$i_b = I_m \cos\left(w_e t + f - \frac{2p}{3} \right) \tag{5.109}$$

$$i_c = I_m \cos\left(w_e t + f - \frac{4p}{3} \right) \tag{5.110}$$

elde edilen akım ve gerilim ifadelerinden terminal güç faktörü açısı f'nin değeri ileri terminal güç faktörü şartlarında pozitif, geri terminal güç faktörü şartlarında ise negatiftir. Kararlı durumda rotorda senkron hızda döndüğü için bilinir ki q_e ile q_r arasındaki açının kararlı çalışma durumunda zamanla değişmeyen bir değere sahip

olacağı bilinir. q_r eksenini yerleştirmek için ilk olarak faz gerilimini ve akımlarını senkron referans eksenine dönüştürülmüş değerleri yazılır. Buna göre akım ve gerilim denklemleri aşağıdaki gibi ifade edilir.

$$v_q^{\,e} - jv_p^{\,e} = V_m + j0 = V_m e^{j0} = \sqrt{2}\cdot \overline{V}_a \tag{5.111}$$

$$i_q^{\,e} - ji_p^{\,e} = I_m \cos f + jI_m \sin f = I_m e^{jf} = \sqrt{2}\cdot \overline{I}_a \tag{5.112}$$

Dikkat edilirse, kararlı çalışma durumunda statorun *d-q* ekseni gerilim ve akım bileşenleri senkron referans eksen çerçevesi dahilinde sabittir. Akım ve gerilimlerin sıfır bileşenlerinin değeri dengeli durumda sıfırdır.

V.2.3.5 Stator Sargısı Geriliminin Kararlı Çalışma Durumundaki Denklemi

Yalnızca uyartılan alan sargısı hariç yani $v_f \neq 0$, diğer rotorda bulanan sönüm sargıları için dışardan harici giriş yapılmaz. Buda bize bu sargı gerilimlerinin $v_{kd}^{\,'} = v_g^{\,'} = v_{kq}^{\,'} = 0$ olduğunu ifade eder. Kararlı çalışma durumunda rotor hızı senkron hıza eşittir, yani $w_r(t) = dq_r(t)/dt = w_e$ dir. Rotor ile senkron hız farkı sıfır olduğundan rotor sargılarında kayma hızına bağlı olarak bir gerilimin indüklenmesi olayından söz etmemiz mümkün değildir. Bu nedenle $i_f^{\,'} = v^{'}_f / r^{'}_f$ ve diğer akımları $i^{'}_g$, $i^{'}_{kd}$ ve i'_{kq} sıfırdır. Stator ve rotor akımları sabit olduğundan λ_q ve λ_d akı bileşenleri sabit olacak. Böylece kararlı durumda, stator sargısının d-q eksenindeki gerilim denklemleri rotorun d-q referans eksenine göre,

$$v_q = r_s i_q + w_e L_d i_d + E_f \tag{5.113}$$

$$v_d = r_s i_d - w_e L_q i_q \tag{5.114}$$

biçiminde ifade edilir. Burada gecen E_f ; stator tarafına göre kararlı çalışma durumunda uyartım geriliminin boyuna bileşenini belirtir ve aşağıdaki denklemle ifade edilir[70].

$$E_f \cong w_e L_{md} \left(\frac{v_f^{\,'}}{r_f^{\,'}} \right) \tag{5.115}$$

V.2.3.6 Senkron Generatörün Çıkış Büyüklüklerinin Rotor Eksenine Göre Yeri ve Konumu

Rotorun q_r ekseni ile senkron referans ekseni arasındaki açıyı δ(t) yük açısı olarak aşağıda verilen denklem ile tanımlanır.

$$d(t) = q_r(t) - q_e(t) \ \ elekt.rad. \tag{5.116}$$

$$d(t) = \int \{w_r(t) - w_e(t)\}\, dt + q_r(0) - q_e(0) \tag{5.117}$$

Burada q_r; rotorun q_r ekseni ile statorun a faz sargısı arasındaki açı, q_e ise statorun a faz sargısı ile senkron referans eksen arasındaki açıdır. Senkron generatörün senkron hızla çalışması durumunda $w_r(t) = w_e$ rotor hızı senkron hıza eşittir. Bu durumda yük açısı d sabittir. Denklem (5.113) ve (5.114)'da stator sargısının d-q bileşenli gerilim denklemleri kompleks biçime dönüştürüldüğün de,

$$(v_q - jv_d) = (r_s + jw_e L_q)(i_q - ji_d) + w_e(L_d - L_q)i_d + E_f \tag{5.118}$$

şeklinde elde edilir. Elde edilen denklemin son iki terimi real değer olup rotorun q_r ekseninde yer alır. Bu real değerlerin dışında kalan terimler stator sargısının d-q bileşenli gerilim değerinden çıkartılırsa E_q rotorun q ekseninde indüklenen E_q gerilimi elde edilir. Bu açıklanan ifade denkleme dökülürse,

$$E_q = (v_q - v_d) - (r_s + jw_e L_q)(i_q - i_d) = E.e^{j0} \tag{5.119}$$

Alan sargısı gerilimini tekrar boyuna ve enine bileşen senkron reaktansları kullanarak yeniden yazıldığında,

$$E_f = E_q - i_d(x_d - x_q) \tag{5.120}$$

biçiminde elde edilir. Senkron generatör çalışma durumu için i_d akımı yön değiştireceğinden $i_d = -i_d$ olur. Alan gerilimi generatör çalışma durumu için tekrar yazılırsa,

$$E_f = E_q + i_d(x_d - x_q) \tag{5.121}$$

şeklinde elde edilir. Denklem (5.111) ve (5.112)'de senkron referans eksende verilen statorun *d-q* eksenindeki akım ve gerilim bileşen değerleri yük açısının değişimine bağlı olarak rotorun *d-q* eksen takımına dönüşümü yapılabilir.

$$v_q - jv_d = (v^e{}_q - jv^e{}_d)e^{-jd} = V_m e^{-jd} \tag{5.122}$$

$$i_q - ji_d = (i^e{}_q - ji^e{}_d)e^{-jd} = I_m e^{j(f-d)} \tag{5.123}$$

Aynı şekilde denklem (5.119)' de dönen rotor eksenine dönüştürüldüğünde;

$$\left|E_q\right|e^{j0} = (v^e{}_q - jv^e{}_d)e^{-jd} - (r_s + jw_e L_q)(i^e{}_q - ji^e{}_d)e^{-jd} \tag{5.124}$$

elde edilir. Bu elde edilen denklemin her iki yanını e^{jd} ile çarparak E_q yeniden düzenlediğinde,

$$\left|E_q\right|e^{jd} = V_m - (r_s + jw_e L_q)(I_m \cos f + jI_m \sin f) \tag{5.125}$$

şeklinde elde edilir. Aynı denklem generatör çalışma durumu için düzenlenirse,

$$\left|E_q\right|e^{jd} = V_m + (r_s + jw_e L_q)\cdot(I_m \cos f + jI_m \sin f) \tag{5.126}$$

biçiminde elde edilir[70]. Bu elde edilen (5.126) denkleminin imajener kısmı reel kısma oranlandığında δ yük açısını aşağıdaki gibi hesaplanmış olur.

$$\tan d = \frac{r_s I_m \sin f + w_e L_q I_m \cos f}{V_m + r_s I_m \cos f + w_e L_q I_m \sin f} \tag{5.127}$$

V.2.3.7 Geçici(Transient) Zaman Sabitleri

Senkron generatörün stator devresi açık iken, yüksek direnç değerine sahip sönüm sargısının direncinin etkileri dikkate alınmaz. Uyartım sargısı geçici zaman sabiti veya boyuna eksen açık devre zaman sabiti T'_{do} ile gösterilir ve aşağıdaki denklemle tanımlanır[75].

$$T'_{do} = \frac{L'_{ff}}{r'_f} \text{ sn.} \tag{5.128}$$

Enine eksen açık devre zaman sabiti T'_{qo} ile gösterilir ve aşağıdaki denklemle tanımlanır.

$$T'_{qo} = \frac{L'_{gg}}{r'_g} \text{ sn.} \tag{5.129}$$

T''_{do}: Boyuna eksen açık devre geçici(sub-transient) zaman sabiti,

T'_d : Boyuna eksen kısa devre zaman sabiti,

T''_d : Boyuna eksen kısa devre alt-zaman sabiti(sub-transient),

T'_q : Enine eksen kısa devre zaman sabiti,

T''_q: Enine eksen kısa deve alt-zaman(sub-transient) sabiti olarak ifade ederiz.

V.2.3.8 Kararlı Çalışma Durumunda Elektromekanik Güç ve Moment İfadeleri

Stator sargılarının toplam üç fazındaki kompleks görünür gücü

$$S = 3(\vec{V}_q - j\vec{V}_d)(\vec{I}_q - \vec{I}_d)^* \tag{5.130}$$

yukarda verilen denklemle ifade edilir. Elektromekanik güç; statorda kayıpsız aktif güçten elde edilen ve makine tarafından üretilen güçtür. Giriş gücünden bakır kayıpları çıkartılırsa elektromekanik güç için aşağıdaki denklemi elde edilir[20].

$$P_{em} = \left[3(w_e L_d \vec{I}_d + \vec{E}_f + jw_e L_q \vec{I}_q)(\vec{I}_d + j\vec{I}_q) \right] \tag{5.131}$$

$$P_{em} = 3\left\{ E_f I_q + w_e (L_d - L_q) I_d I_q \right\} \tag{5.132}$$

Senkron makine tarafından üretilen elektromekanik torkun denklemi elektromekanik gücün gerçek rotor hızına bölünmesiyle elde edilmektedir.

$$T_{em} = \frac{P_{em}}{w_{sm}} = \left(\frac{P}{2w_e} \right) P_{em} \ N.m \tag{5.133}$$

$$T_{em} = 3\left(\frac{P}{2w_e} \right) \left\{ E_f I_q + w_e (L_d - L_q) I_d I_q \right\} N.m \tag{5.134}$$

Yukarda momenti ifade eden ikinci denklemde birinci bileşen $E_f I_q$; alan uyartımı ile senkron makinada üretilen moment bileşenini gösterir. İkinci bileşen $w_e(L_q - L_d)I_d I_q$ relüktans moment bileşeni olarak ifade edilir.

Terminal gerilimi şartlarında moment (T_{em}) ve elektromekanik gücü(P_{em}) tanımlayan denklemler, denklem (5.131) ve (5.133) ifadelerindeki stator akımı bileşeni yerine denklem (5.113) ve (5.114) ün kullanılmasıyla yeniden düzenlenir. Stator geriliminin boyuna ve enine bileşenlerinin açık yazılımı sırasıyla $\vec{V}_q = V_a \cos d$ ve $\vec{V}_d = V_a \sin d$ dir. Büyük güçlü makinalar için resistansdaki gerilim düşümü ihmal edilebilir. Buna göre elektromekanik güç için,

$$P_{em} = -3\left\{\frac{E_f V_a}{X_d}\sin d + \frac{V_a{}^2 (X_d - X_q)}{2X_d X_q}\sin 2d\right\} \tag{5.135}$$

ifadesi elde olunur[88]. Elde edilen mekanik güç ifadesi generatör çalışma durumu içindir. Aynı şekilde elektromekanik moment içinde,

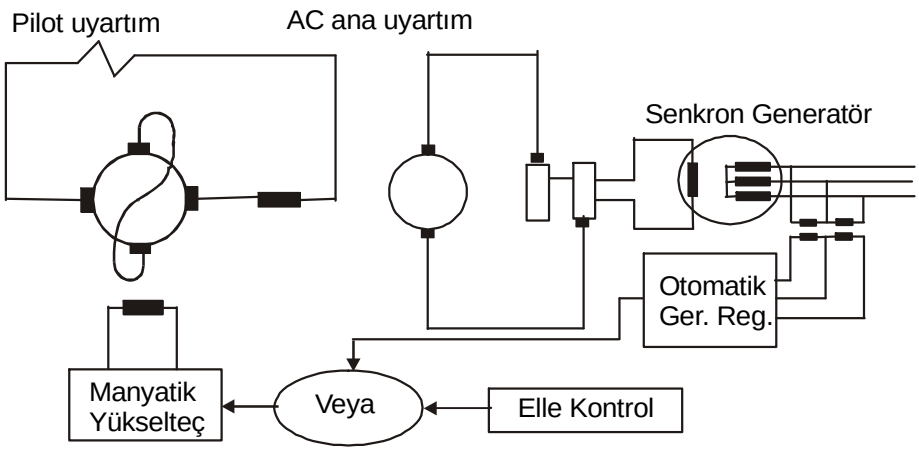
$$T_{em} = -3\left(\frac{P}{2w_e}\right)\left\{\frac{E_f V_a}{X_d}\sin d + \frac{V^2{}_a (X_d - X_q)}{2X_d X_q}\sin 2d\right\} N.m \tag{5.136}$$

denklemi elde edilir. Burada V_a stator faz geriliminin etkin değeridir ve değeri $V_m / \sqrt{2}$ olarak ifade edilmektedir. $X_d = w_e L_d$ ifadesi senkron reaktansın boyuna bileşenini, $X_q = w_e L_q$ ifadesi de senkron reaktansın enine bileşenini ifade etmektedir. P_{em} ve T_{em} değerleri motor çalışma için pozitif değer almakta iken generatör çalışma durumunda negatif değer almaktadır. Yük açısı δ, motor çalışma durumu için negatif, generatör çalışma durumu içinde pozitif değer almaktadır.

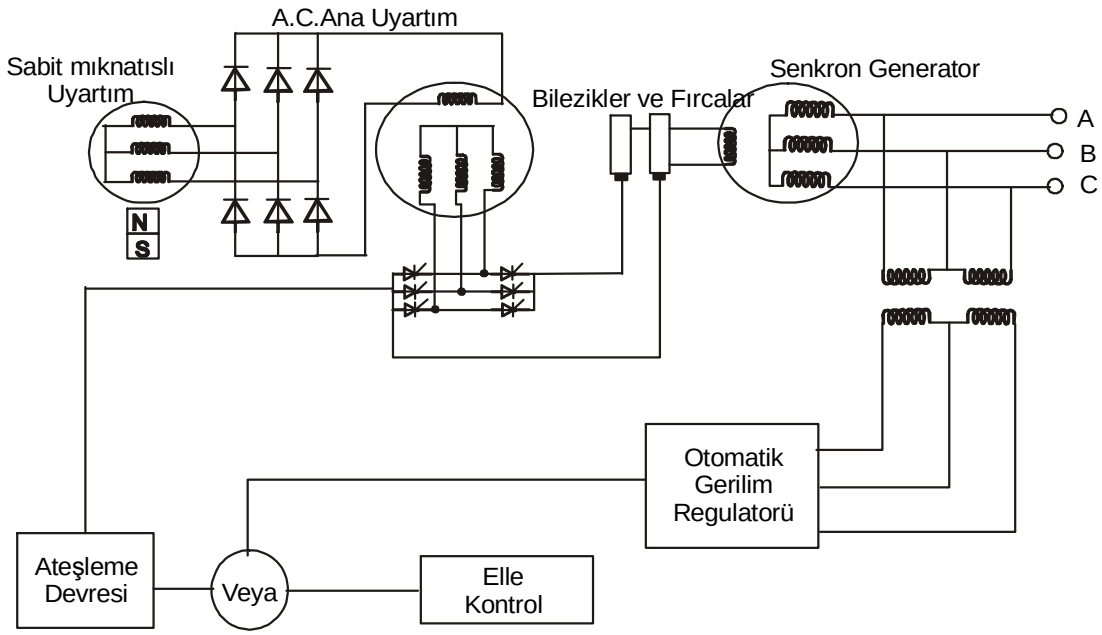
V.2.3.9 Senkron Makinanın Uyartım Devreleri

Uyartım gücü kaynağına göre uyartım sistemleri aralarında sınıflandırılabilir. D.C (doğru akım) tipi uyartım sistemleri, değişen A.C(alternatif akım) tipi ve kararlı A.C tipi uyartım sistemleri olarak sınıflandırılabilir[87]. Genellikle d.c. tipi uyartım sistemlerinin çoğunda uyartım gücü senkron generatörün rotoru gibi aynı özellikte bulunan dönen kısma yerleştirilmiş alan sargıları bulunan d.c. generatörden elde edilir. D.C. generatör ana uyartıcı olarak hareket eder. D.C. uyartım sistemi Şekil V.27'de gösterilmektedir.

Genelde çoğu uyartım sistemleri a.c. uyartım sistemleridir. Senkron generatöre d.c. uyartımı sağlamak için ana uyartıcı olarak bir eksen etrafında dönen a.c. alternatörün çıkışı a.c. tipi uyartıcı olarak kullanılır. Bu a.c. tipi uyartım sistemi Şekil V.28'de görülmektedir. Senkron generatörün rotoru gibi aynı mil üzerinde a.c. alternatörün alan sargıları mevcuttur. A.C. alternatörün statoru ve doğrultucusu sabit hareket etmeyen kısımdadır. Şekilde de görüldüğü gibi tristör kontrollü köprü doğrultucunun D.C.. çıkış gerilimi tristör köprüsü üzerinde ayarlanabilen faz gecikmesiyle kontrol edilir. Doğrultulmuş köprü doğrultucunun çıkış gerilimi mil üzerinde dönen bilezikler vasıtasıyla senkron generatörün ana alan sargılarına uygulanır. Fırçasız a.c. uyartım sistemi kullanılarak mil üzerinde dönen bilezikler, a.c. alternatörün alan sargılarının ve endüvinin pozisyonunu değiştirmekle eliminize edilebilir.



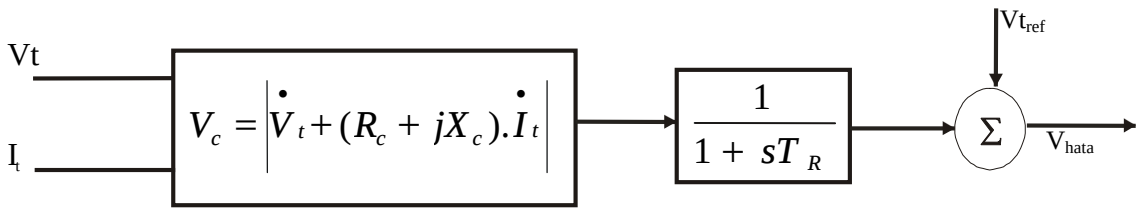
Şekil V.27 D.C. Uyartım Modeli



Şekil V.28 A.C. Uyartım Modeli

V.2.3.10 Gerilim Algılayıcı ve Yük Devresi

Uyartım sinyalindeki hata sinyali; genellikle arzu edilen veya referans alınan değer ile kontrol edilen çıkış değeri arasındaki fark olarak ifade edilir. Şekil V.29'da görüldüğü gibi gerilim algılayıcı ve düzeltici kazanç üniteli tek zaman sabitli devre görülmektedir. Yüke karşılık gelen *Rc+jXc* empedansının kullanımıyla yük akımının neden olduğu bir gerilim düşümü meydana gelir. Şekil V.29'daki devre gerilim genliğini ifadesine uygun olarak tasarlanmıştır.

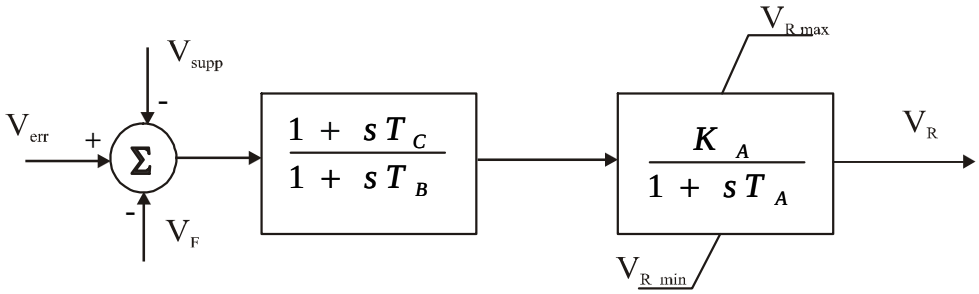


Şekil V.29 Gerilim algılayıcı ve yük devresi

V.2.3.10.1 Gerilim Ayarlayıcı Regülatör

Tipik bir regülatör, sınırlayıcı bir hata ayarlayıcısından oluşur. Şekil V.30 'da görülen regülatörün transfer fonksiyonu bloğuyla istenilen frekans karakteristiklerine kolayca yaklaşılabilir. Geçici kazancın derecesini düşürerek kararlı bir kazanca dönüştürmek amacıyla kompansatörler kullanılır.

Şekil V.30'da gösterilen regülatörün transfer fonksiyonunda girişleri sistemi dengede tutan geri besleme sinyali(V_F), sistemi dengede tutmak amacıyla destekleyici gerilim sinyali V_{supp} ve hata sinyali V_{err} oluşturur.



Şekil V.30 Kazanç ayarlayıcı regülatörün transfer fonksiyonu

V.2.3.11 D.C. Uyartım Sisteminin Matematiksel Modeli ve Transfer Fonksiyonu

Senkron generatörün alan sargılarını uyartmadan önce regülatörün çıkış sinyali uyartıcı ile yükün durumuna göre yükseltilmelidir. Bir D.C. uyartıcının modeli alan sargısını, doğrusal olmayan uyartıcının magnetik alanını ve endüviyi içerir. Endüvi sargısının genelde alan sargısına kıyasla daha az sipir sayısına sahiptir. Bu nedenle endüvi sargısının endüktansı ve direnci bazen hesaplamalarda ihmal edilir. Uyartım sisteminin bilgisayarda modellenen transfer fonksiyonu kullanıldığında çıkış sinyalleri zamana göre değişim içersindedir. Alan sargısının gerilim denklemi, armatürün(endüvi) uç gerilimi ve alan akımının eğimi aşağıdaki denklemlerle elde edilebilir.

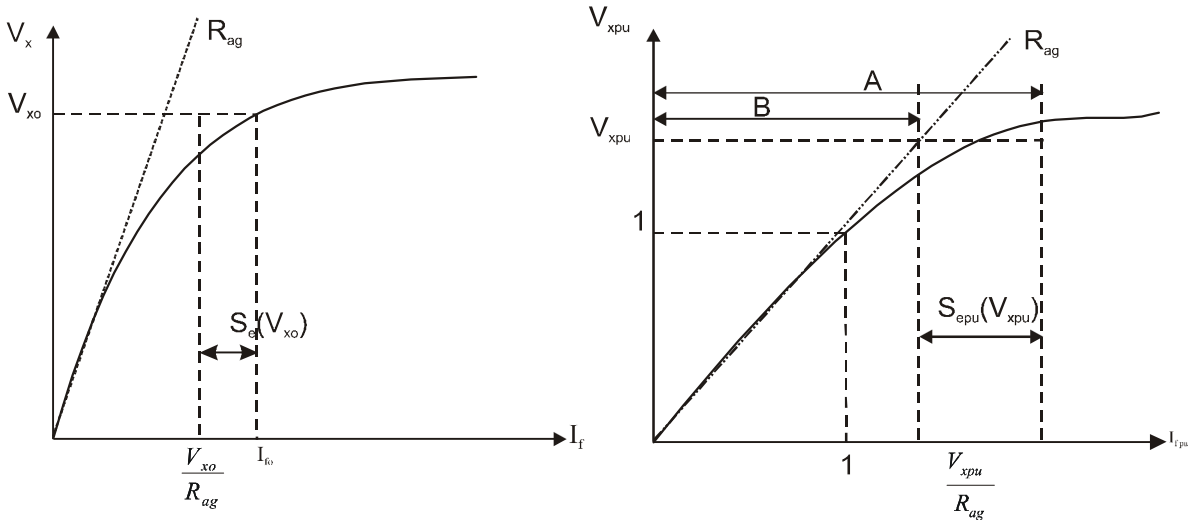
$$v_f = i_f r_f + \frac{d l_f(i_f)}{dt} \tag{5.137}$$

$$v_x = f(i_f, i_x) \tag{5.138}$$

f ve *x* alt indisleri uyartıcının alan ve armatür sargılarını niteler. Uyartıcının çıkış gerilimi alan ve armatür akımının nonlineer (doğrusal olmayan) bir fonksiyonu olarak edilebilir. Verilen i_x akımı çıkış gerilimi (v_x) terimlerinde alan akımı olarak ifade edilebilir. S_e uyartım doyma fonksiyonu olarak tanımlanır. Doyma fonksiyonunun tipik iki değeri; endüvi geriliminin maksimum değerinde diğeri ise endüvi geriliminin %75'inde olmak üzere iki şekilde ifade edilebilir. Bu iki aralıkta verilen değere dayanarak normal işletme şartları altında uyartım doyma eğrisi üstel bir fonksiyon olarak elde edilir[70].

$$S_e = A_{ex} \exp^{B_{ex} vx} \tag{5.139}$$

Yukarda ki denklemde A_{ex}; uyartım akımını, B_{ex} ise çıkış geriliminin(v_x) kritik direnç değerine oranını ifade eder.



a) Gerçek değerlere göre b) Birim değerlere göre

Şekil V.31 D.C. uyartım sisteminin magnetik eğrisi

Şekil V.31'da arzu edilen i_x alan akımının kararlı durumuna uygun sabit rezistanslarla yüklenen D.C. uyartımın manyetik eğrisi görülmektedir. Şekil V.31'deki R_{ag} hava boşluğundaki doyma karakteristiğinin manyetik eğimini belirtmektedir. Bu manyetik eğriden görülmektedir ki çalışma noktası değiştikçe S_e uyartım doyma fonksiyonun değeri de değişmektedir. Uyartım doyma fonksiyonunu kullanarak alan akımını aşağıdaki gibi ifade edilebilir.

$$i_f = \frac{v_x}{R_{ag}} + S_e v_x \tag{5.140}$$

Denklem (5.140)'deki alan gerilimi denkleminde i_f akımının yerine denklem (4.137)'daki alan akımını veren ifade yerine konulduğunda,

$$v_f = \left\{ \frac{r_f}{R_{ag}} + S_e(i_f) r_f \right\} v_x + \frac{d\, l_f(v_x)}{dt} \tag{5.141}$$

$$v_f = \frac{r_f}{R_{ag}} \left\{ 1 + R_{ag} S_e(i_f) \right\} v_x + \frac{d\, l_f(v_x)}{dv_x} \frac{dv_x}{dt} \tag{5.142}$$

yeniden denklem (5.142) elde edilir [70]. Birim değerlerinin(per-unit) kullanımıyla alan akımı ve gerilimi denklemlerini yeniden düzenlediğinde aşağıdaki denklemler elde edilir.

$$i_{fpu} = v_{xpu} + R_{ag} S_e(i_f) v_{xpu} \tag{5.143}$$

$$\begin{aligned} v_{fpu} &= \frac{r_f}{R_{ag}} \left\{ 1 + R_{ag} S_e(i_f) \right\} v_{xpu} + \frac{d\, l_f(v_x)}{dv_x} \frac{dv_{xpu}}{dt} \\ &= \frac{r_f}{R_{ag}} \left\{ 1 + S_{epu}(v_{xpu}) \right\} v_{xpu} + t_E \frac{dv_{xpu}}{dt} \\ &= \left\{ K_E + \frac{r_f}{R_{ag}} S_{epu}(v_{xpu}) \right\} v_{xpu} + t_E \frac{dv_{xpu}}{dt} \end{aligned} \tag{5.144}$$

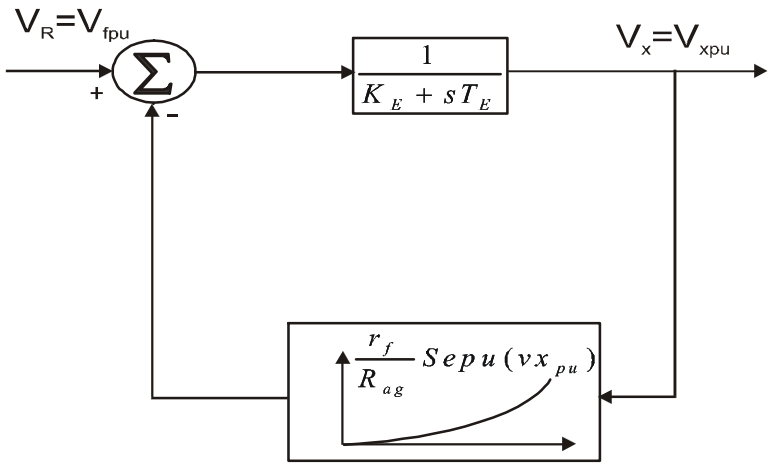
Yukarıda elde edilen denklemlerde gecen K_E, t_E ve S_{epu} ifadeleri de aşağıdaki denklem takımları ile ifade edilir.

$$S_{epu} = \frac{i_{fpu} - v_{xpu} / R_{ag}}{v_{xpu} / R_{ag}} = \frac{A - B}{B} \tag{5.145}$$

$$t_E = \frac{d\, l_f(v_{xpu})}{dv_{xpu}} \tag{5.146}$$

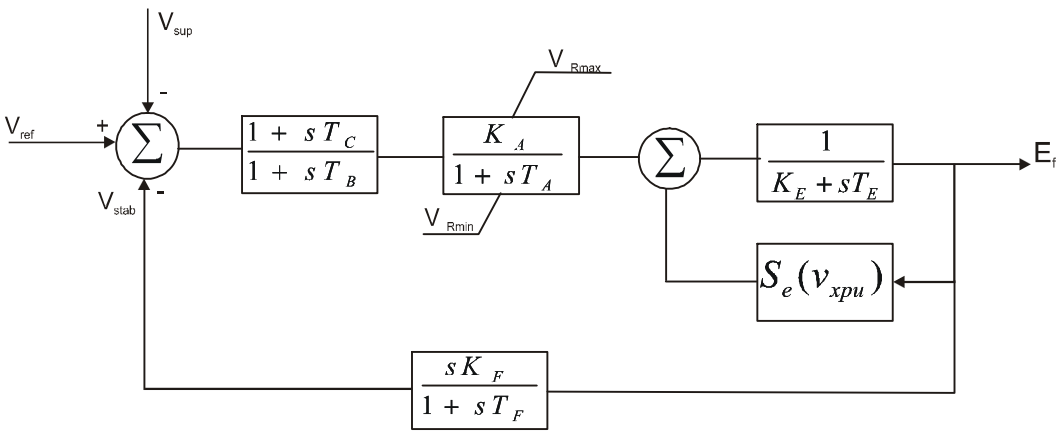
$$K_E = \frac{r_f}{R_{ag}} \tag{5.147}$$

Şekil V.32'de d.c. uyartım sisteminin denklem (5.144)'de iki farklı şekilde ifade edilen alan gerilimine göre v_x ve v_f arasındaki farkı belirten transfer fonksiyonun çizilmiş blok diyagramı gösterilmektedir.



Şekil V.32 D.C. uyartım sisteminin transfer fonksiyonunun blok diyagramı

Regülatör–uyartım döngüsünün açık döngü frekans cevabında ideal ve istenilen değerlere ulaşmak için sistemi belli bir değerde tutmak gerekmektedir. Bu istenilen durumun gerçekleşebilmesi için de sistemin kararlı çalışması gerekir. Arzu edilen çalışma şekline ulaşabilmek için sistemi istenilen çalışma noktasında kararlı kılan elemanlar(stabilizör) kullanılır. Sistemin çalışması esnasında aşırı geçiş periyotlarında uyartım sisteminin kazancı azalabilir. Şekil V.33'de T_B ve T_C zaman sabitli ileri-geri devresinin kullanımıyla arzu edilen kazanç değerine ulaşılır.



Şekil V.33 Regülatör ve uyartım devresini tanımlayan transfer fonksiyonun blok diyagramı

BÖLÜM VI

HİBRİD GÜÇ ÜRETİM SİSTEMİNİN SİMULASYONU VE SİSTEM PERFORMANSININ NEURO-FUZZY KONTROLÖR İLE İYİLEŞTİRİLMESİ

Elektrik enerji üretiminin birim maliyeti (kWh/YTL) küçük dağıtım şebekelerinde veya besleme merkezinden uzak yerleşim birimlerinde daha yüksektir. Ana dağıtım merkezine yaklaştıkça kullanılan enerjinin birim maliyeti düşmektedir. Genellikle küçük dağıtım şebekelerinde elektrik enerjisi üretimi diesel yakıtlar kullanılarak gerçekleştirilmektedir. Bu işletme durumu ana dağıtım şebekeleri ile mukayese edildiği zaman diesel yakıtlar kullanılarak üretilen elektrik enerjisinin birim maliyeti daha yüksektir. Enerji fiyatının yüksek olmasının nedeni, ham enerji kaynaklarının (diesel yakıtlar, doğalgaz, v.b.) ulaşım maliyeti, enerji nakil hatlarının maliyeti ve kullanılan işletme araçlarının maliyeti gibi faktörler etkili olmaktadır. Şehir merkezinden veya enerji dağıtım şebekelerinden uzak olan yerlerin enerji talebinin karşılanmasına alternatif çözüm yöntemi olarak alternatif yenilebilir enerji kaynakları önerilmektedir. Alternatif enerji kaynaklarının en büyük dezavantajı üretilen elektrik enerjisinin düzensiz ve sürekliliğinin sağlanamamasıdır. Bu sebeple genellikle enerjinin sürekliliğini sağlamak amacıyla termik güç üretim santralları ile birlikte işletilmeleri tercih edilmektedir.

Dünya genelinde klasik rüzgar türbinlerinin kullanım potansiyeli oldukça geniştir. Şehir merkezinden uzak yerleşim birimlerinde enerjinin birim maliyeti yukarda ifade edilen sebeplerden dolayı yüksek olduğu için bu bölgeler kendi elektrik enerjisini alternatif yenilebilir enerji kaynaklarını kullanarak üretmeye çalışırlar. Alternatif enerji kaynaklarından en fazla kullanılanların başında rüzgar enerjisi gelmektedir ve bunu diğer alternatif enerji kaynakları (güneş, biomas,

hidrojen enerjisi, mikro ve mini hidroelektrik güç üretim sistemleri, v.b.) takip etmektedir.

Rüzgar-gaz güç üretim sisteminin birlikte işletilmesiyle kullanılan gaz miktarında düşme görülür aynı zamanda elde edilen elektrik enerjisinin maliyeti düşmektedir. Rüzgar enerjisinden elde edilen güç tüketicilerin talep gücünü karşıladığı sürece gaz güç üretim sisteminin çevreye verdiği olumsuz etkiler minimize edilir. Bunun yanında gaz üretim sistemi daha az bakıma ihtiyaç duyar ve işletme ömrü daha uzun olur.

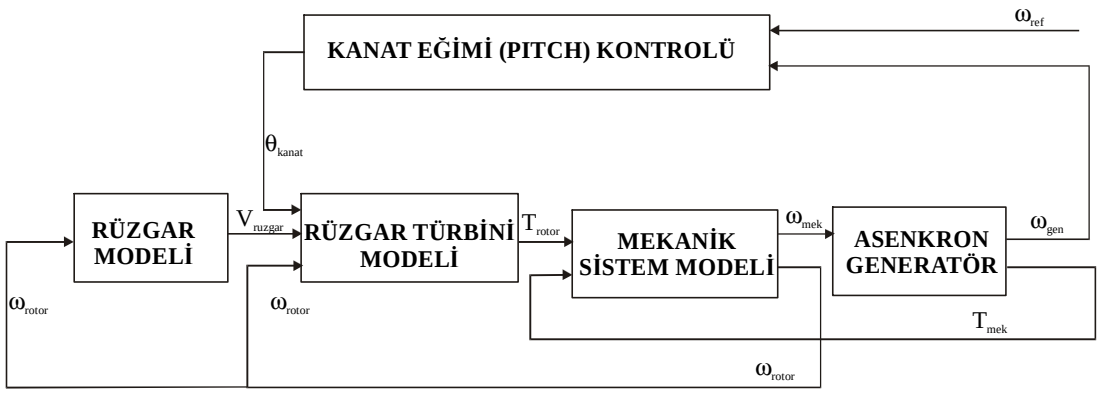
Yapılan çalışmada, rüzgar güç üretim sistemi talep edilen gücü karşılayamadığı durumlarda gaz güç üretim sistemi devreye alınarak talep güç karşılanmaktadır. Bu nedenle rüzgar güç üretim sistemini tek başına kullanamıyoruz. Kurulan hibrid güç üretim sistemi içersinde enerjinin sürekliliğini sağlamak için genellikle termik güç üretim üniteleri bulunmaktadır. Hibrid güç üretim sistemleri, yükün maksimum olduğu saatlerde enerji dağıtım şebekeleri ile birlikte çalıştırılması tercih edilmektedir.

Hibrid güç üretim sistemi, iki veya daha güç üretim kaynakları arasındaki enterkonnekte bağlantının gerçekleştirilmesiyle oluşan sistemlerdir. Yapılan çalışmada, hibrid rüzgar-gaz güç üretim sisteminde, güvenirlilik, verimlilik, ve ekonomik işletme koşullarında hedeflenen amaçlara ulaşmak amacıyla rüzgar güç üretim sistemi gaz üretim sistemi ile tek AC dağıtım barasında birleştirilmiştir. Hibrid rüzgar-gaz güç üretim sistemi asenkron ve senkron generatör, yük, anahtarlamalı (dump) yük, güç elektroniği devre elemanları, kanat aralığı açı kontrolü (pitch kontrol), frekans kontrol ve gaz türbini hız kontrolü gibi ana bileşenleri içerir. Hibrid güç üretim sisteminden elde edilen gerilimin, frekansın ve gücün arzu edilen değerlerde olması için adaptif neuro-fuzzy kontrolör Matlab ortamında sisteme uygun olarak dizayn edilmiştir.

Hibrid güç üretim sistemini oluşturan elemanların Matlab/Simulink, Matlab programı içerinde yer alan Power System Toolbox ve Fuzzy Logic Toolbox yazılımları kullanılarak dinamik modellemesi gerçekleştirilmiştir. Hibrid rüzgar-gaz güç üretim sisteminin farklı işletme yüklerinde çalıştırılmasında sistemin kontrolsüz ve kontrollü dinamik davranışları simülasyon çalışmalarında görülmektedir. Hibrid güç üretim sisteminin çalışma performansını arzu edilen noktaya çekebilmek için klasik PID (oransal-integral-türev) kontrolör ve adaptif neuro-fuzzy kontrolör kullanılmıştır.

VI.1 RÜZGAR GÜÇ ÜRETİM SİSTEMİNİN SİMULASYONU VE KONTROLÜ

Rüzgar türbini sisteminin modeli; rüzgar, rüzgar türbini, mekanik sistem, indüksiyon generatör ve kontrol blok modellerinden oluşmaktadır. Şekil VI. 1'de rüzgar türbini güç üretim sisteminin basitleştirilmiş blok diyagramı gösterilmektedir.



Şekil VI. 1 Rüzgar türbini modelinin blok diyagramı

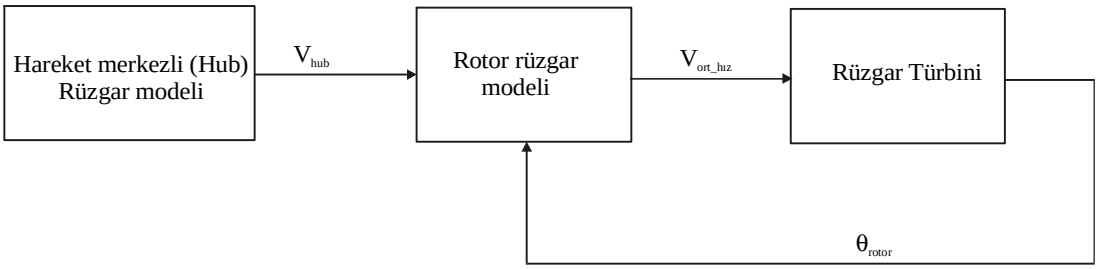
Rüzgar güç üretim sisteminin dinamik olarak davranışını gözlemleyebilmek için Şekil VI. 1'de yer alan her bir bileşenin dinamik modellemesi Matlab/Simulink ortamında gerçekleştirilmiştir. Rüzgar güç üretim sisteminden elde edilen gerilim, akım, güç, moment ve frekans gibi elektriksel büyüklüklerin simülasyon sonuçları elde edilerek gerekli kontrol işlemleri yapılmaktadır.

VI.1.1 Rüzgar Modeli

Yapılan çalışmada kullanılan rüzgar modeli, Kaimal hayaline dayalı RISO ulusal laboratuarında (National Laboratory) geliştirilmiş modeldir. Rüzgar hızı, türbülansın ve kule yüksekliği göz önünde bulundurularak rotor üzerindeki rüzgar hızının ortalama değeri olarak hesaplanır[89]. Rüzgar modelinde ana bileşen gürültü generatörüdür. Bu nedenle, bütün simülasyon ortamlarında kullanılan rüzgar modeli bloklarından aynı rüzgar zaman serileri elde etmek için geniş araştırmalar yapılmaktadır. Son olarak G.Marsaglia tarafından geliştirilen Ziggurat algoritmasına dayalı gürültü generatörü gerçekleştirilmiştir[90]. Matlab/Simulink ortamında beyaz gürültü generatörü mevcut bulunmaktadır.

Şekil VI. 2'de görüldüğü gibi rüzgar modelinin yapısı iki temel bileşenden oluşur: hub (hareket merkezli) rüzgar modeli ve rotor rüzgar modelidir. Hub rüzgar modeli, her bir rüzgar türbini için hareket pozisyonunda sabit rüzgar hızını modeller.

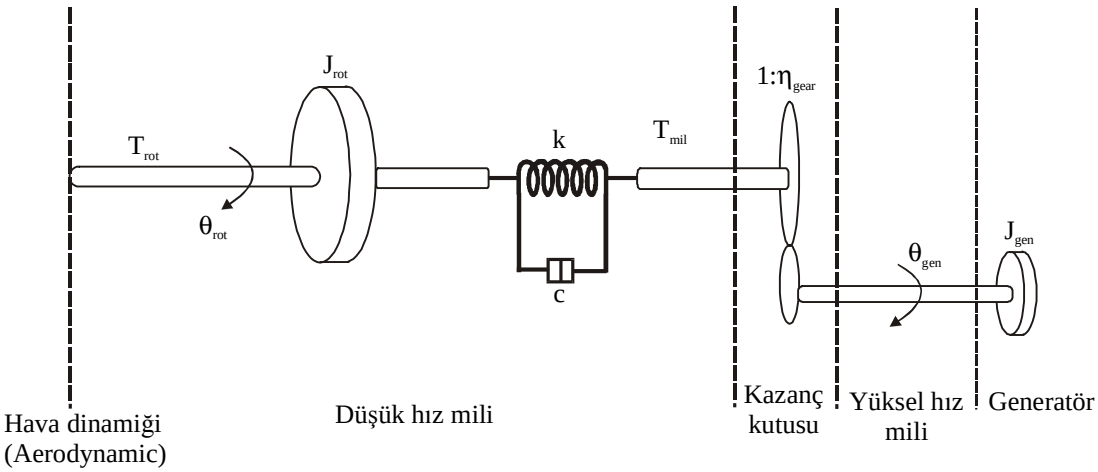
Rüzgar rotor modeli, tek parça rotor üzerindeki sabit rotor hızının ortalamasını, oransal türbülansı ve kule gölge modelini içerir.



Şekil VI. 2 Rüzgar modelinin blok diyagramı

VI.1.2 Rüzgar Türbini ve Mekanik Sistem Modeli

Hava dinamiği veya rüzgar türbin modeli, hava dinamiği güç verimliliği katsayısına *Cp(q,l)* veya tork katsayısına *Cq(q,l)* dayalı olarak gerçekleştirilir. Burada *q;* kanat eğim açısı, *l*; hız oranı olarak ifade edilir. Rüzgar türbini modeli (hava dinamiği modeli) çıkış momenti rüzgar hızına göre belirlemektedir.



Şekil VI. 3 Rüzgar türbini ve mekanik sistemin dinamik davranış modeli

$$T_{rot} = \frac{P_{rot}}{w_{rot}} = \frac{1}{2 \cdot w_{rot}} r \cdot p \cdot R^2 \cdot v^3 \cdot C_p(q, l) \tag{6.1}$$

$$T_{rot} = \frac{1}{2} r \cdot p \cdot R^3 \cdot v^2 \cdot C_q(q, l) \tag{6.2}$$

Şekil VI. 3'de rüzgar türbini ve mekanik sistemin dinamik davranışının modeli gösterilmektedir. Rüzgar türbininin çıkış gücü kanat eğim açısı ve türbin rotor hız oranına bağlı olarak üretilen moment sistemin kararlı çalışabilmesi için belli bir

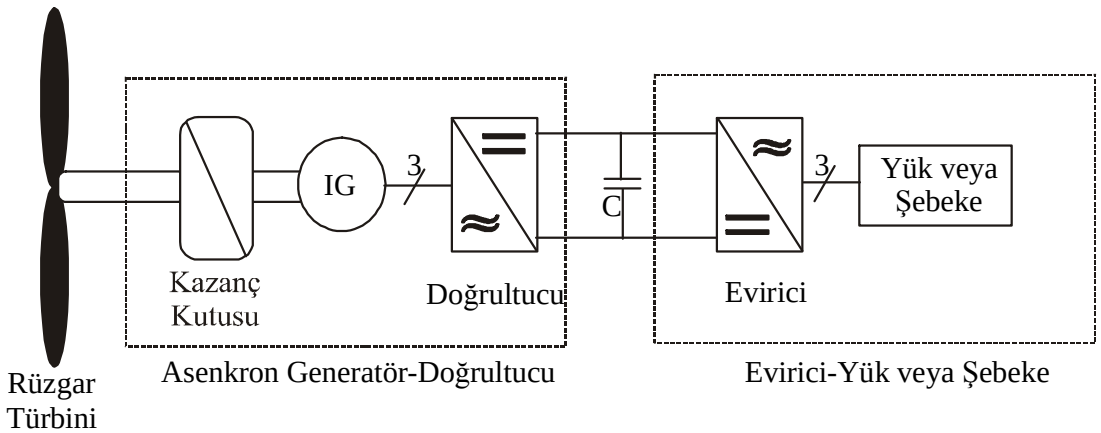
kazanç katsayısı (dişli sayısı) ile çarpılarak mil momentinin istenilen değerde olması sağlanır. Rüzgar türbini mili asenkron generatörün mili birbirine akuple bağlı olduğundan dolayı istenilen işletme hızında generatörün çalışması gerçekleştirilir.

VI.1.3 Rüzgar Güç Üretim Sisteminin Güç Elektroniği Ara Yüzeyi ile Birlikte Çalıştırılması

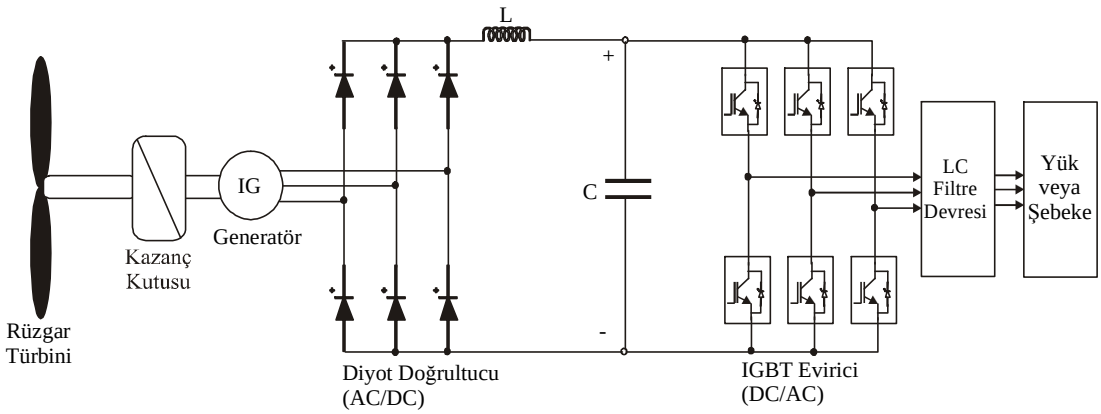
Rüzgar türbini güç üretim sistemi uygulamalarında, sabit hızlı rüzgar türbinlerini kapsayan elektrik enerjisi üretim üniteleri doğrudan şebekeye bağlanabilirler. Reaktif güç gereksinimini azaltmak için generatör stator sargı uçlarına paralel kondansatörler bağlanmaktadır.

Değişken hızlı rüzgar türbinlerini içeren enerji üretim sistemlerinde birçok olası çözüm yöntemleri vardır. Son yıllarda, elektrik enerji dönüşüm sistemlerinde kullanılan yarı iletken devre elemanlarında çok hızlı ilerlemeler kaydedilmiştir. Yarı iletken devre elemanlarındaki gelişmelerin sonucunda oranlanmış güç değerlerinde artış ve sistem maliyetinde düşüş gözlenmiştir. Bunun dışında, çok hızlı gelişen yarı iletken devre elemanlarını içeren sistemlerin bilgisayar destekli kontrolünde ileri düzey kontrol algoritmalarının kullanımı daha rahattır.

Değişken hızlı rüzgar türbinlerini içeren elektrik üretim sisteminde üç temel bileşenden söz edilir. Bunlar; rüzgar türbini, generatör ve güç dönüştürücüleridir. Şekil VI. 4'de gösterildiği gibi güç dönüştürücüleri generatör-doğrultucu ve evirici-şebeke veya yük olmak üzere iki alt bölümden oluşmaktadır. Bu AC/DC ve DC/AC dönüştürücülerde farklı güç elektroniği elemanları kullanılabilmektedir.



Şekil VI. 4 Değişken Hızlı Rüzgar Türbinli Elektrik Güç Üretim Sistemi



Şekil VI. 5 Rüzgar güç üretim sisteminde yer alan güç dönüştürücülerin açık devre modeli

Yukarda Şekil VI. 4'de verilen güç dönüştürücülerin (AC/DC ve DC/AC) açık devre modeli Şekil VI. 5'de gösterilmektedir.

Değişken hızlı rüzgar türbinlerinde çok yaygın olarak kullanılan iki generatör tipi vardır. bunlardan birincisi senkron generatör, ikincisi ise asenkron generatördür. Yaptığımız çalışmada kullanılan generatör tipi ise asenkron generatördür. Senkron generatör de kullanılan sabit mıknatıslı ve alan uyartım sargı modeli olmak üzere iki farklı uyartım devresi vardır. Senkron generatörlerin işletilmesinde en fazla kullanılan uyartım modeli alan sargılı uyartım modelidir. Çünkü, çıkış gerilimini kontrol etmenin avantajını kullanarak rahatlıkla üretilen reaktif gücü kontrol edilebilmektedir. Bunun yanında, son yıllarda sabit mıknatıslı senkron generatörün maliyetinin düşmesiyle birlikte elektrik güç üretiminde kullanılan diğer generatör tiplerine alternatif olarak tercih edilebilmektedir. Çünkü, sabit mıknatıslı senkron generatör kullanıldığı zaman makinanın kayıpları daha azdır. Dezavantajı ise, gerilim seviyesi sadece hızla orantılı olmasıdır.

Rüzgar türbini güç üretim sistemlerinde çok yaygın olarak kullanılan diğer generatör tipi ise asenkron generatörlerdir. Asenkron generatörlerin elektrik güç üretebilmesi için reaktif güce gereksinim duymaktadır. Asenkron generatörlerin güç üretimi ve eşdeğer devre modeli VI. Bölümde çok ayrıntılı bir şekilde anlatılmaktadır. Asenkron generatörü içeren rüzgar güç üretim sistemlerinde seçilen kapasite değeri uygun değilse üretilen güç hıza bağlı olarak değişkenlik gösterecektir. Buna bağlı olarakta sistemin verimi, elde edilen gerilimin, frekansın ve gücün büyüklüklerinde sürekli değişmeler değişiklikler görülecektir.

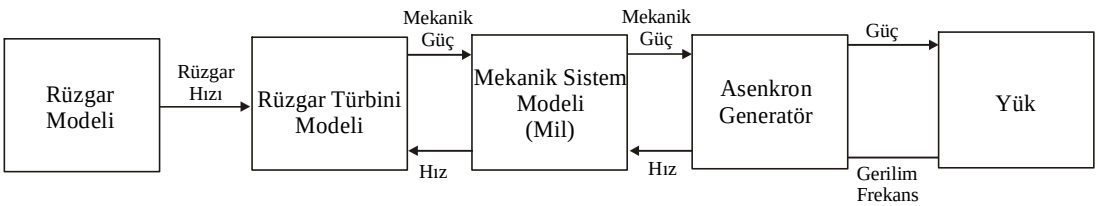
Yapılan çalışmada, rüzgar güç üretim sisteminin eviricisi yük tarafına bağlıdır. Evirici IGBT yarı iletken elemanlardan oluşmaktadır. Diğer adı ile IGBT (insulated

gate bipolar transistors) eviricidir. Gerilim kaynağı dönüştürücüsü (Voltage Source Convertor) olarak kullanılabilir. VSC'nin işletilebilmesi için minimum DC bağlantı gerilimine gereksinim duymaktadır. VSC'nin gerilim kademelerini artırabilmek için adım adım gerilim kademesi artan DC/DC dönüştürücüler tanımlanabilmektedir. VSC hem doğrultucu hem de evirici olarakta çalıştırılabilmektedir.

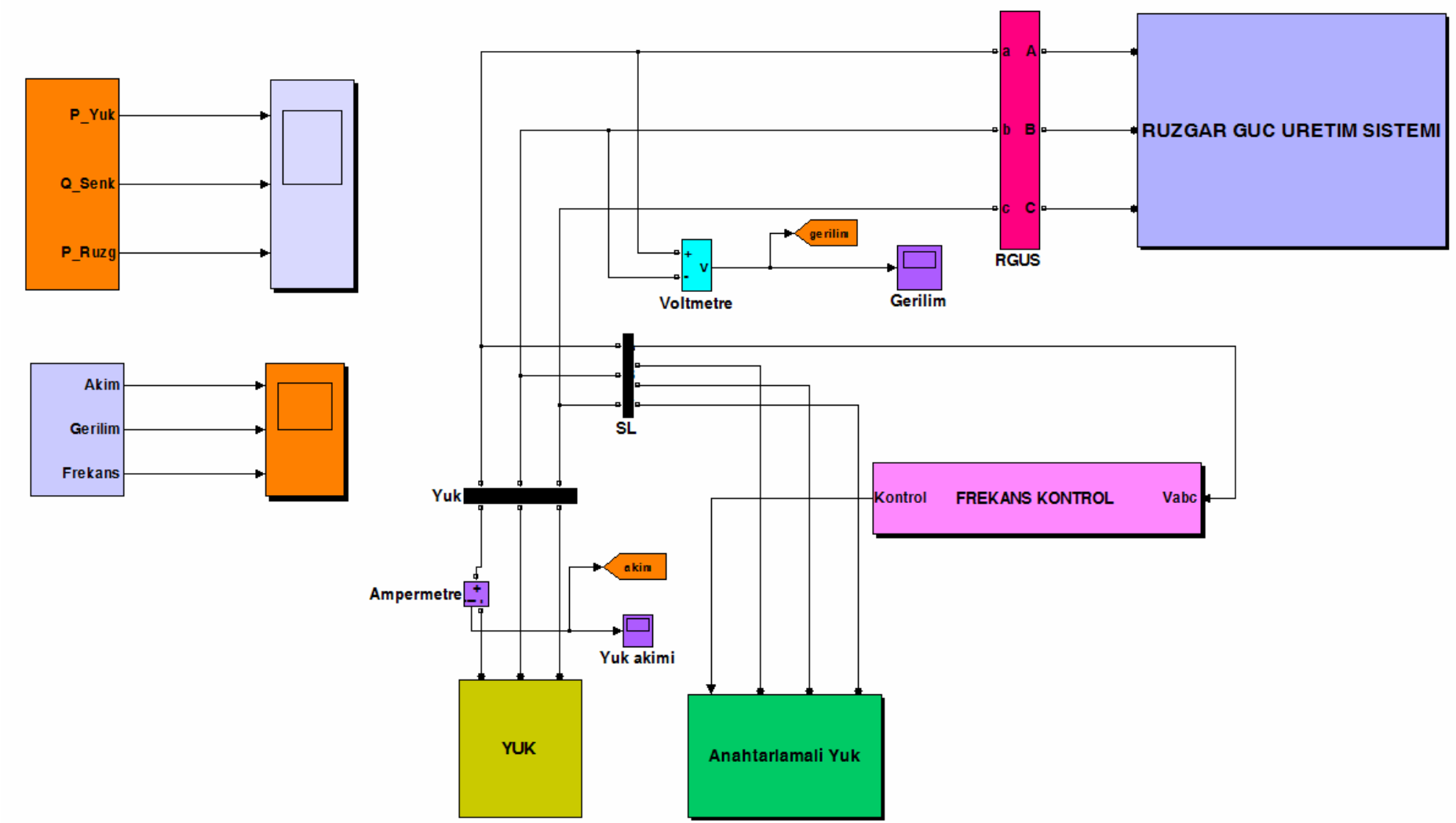
Evirici şebeke veya yük içersine harmonik akımlarını çekecek ve yük empedansı nedeniyle harmonik gerilimleri oluşacaktır. Neticede, gerilim harmonikleri dönüştürücüler (doğrultucular ve eviriciler) kullanıldığı zaman en düzensiz haldedirler. Akım ve gerilim harmonikleri nedeniyle elde edilen gücün kalitesi en kötü değerdedir. Gelişmiş veya değişik kontrol yöntemleri ve filtreleme devreleri kullanılarak reaktif güç kontrol altına alınabilmektedir.

VI.1.4 Rüzgar Güç Üretim Sisteminin Matlab/Simulink Programında Modellemesi ve Simülasyonu

Rüzgar güç üretim sisteminin çok ayrıntılı analizi ve sistemin dinamik davranışını tanımlayan denklem ve bağıntılar V.Bölümde ayrıntılı olarak anlatılmıştır. Bu bölümde de, rüzgar güç üretim sisteminden elektrik enerjisi elde edilene kadar gecen aşamalar bloklarla yukarda ifade edilmiştir. Rüzgar güç üretim sisteminin reel zamandaki davranışını elde edebilmek amacıyla gerçekleştirilen çalışmada Matlab/Simulink, Matlab içersinde yer alan Power System Toolbox ve Fuzzy Logic Toolbox programları kullanılmıştır. Matlab/Simulink programında, güç dönüştürücüsü kullanmadan oluşturulan rüzgar güç üretim sisteminin simülasyon blok diyagramını vermeden önce sistemin blok diyagramı Şekil VI. 6'da verilmektedir.



Şekil VI. 6 Güç Dönüştürücüsüz Rüzgar Güç Üretim Sisteminin Blok Diyagramı

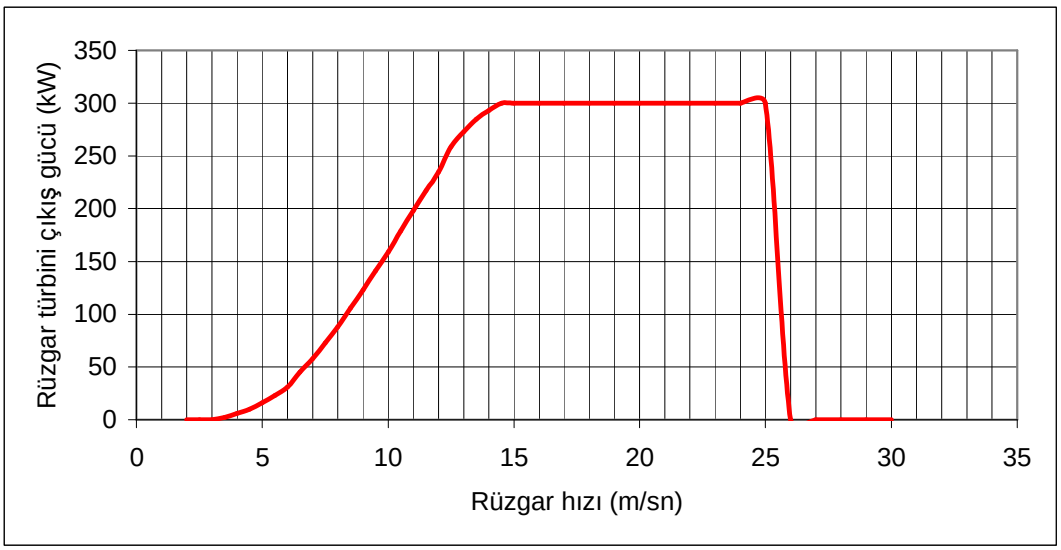


Şekil VI. 7 Matlab/Simulink Programında Güç Dönüştürücüsüz Rüzgar Güç Üretim Sisteminin Simülasyon Blok Diyagramı

Şekil VI. 6'da verilen rüzgar güç üretim sisteminin blok diyagramında, rüzgar hız modelinin çıkışı rüzgarın kinetik enerjisi veya hızı olarak tanımlanır. Rüzgar hızı, rüzgar türbin modeli tarafından mekanik güç veya momente dönüştürülür. Elde edilen mekanik güç veya moment mekanik sistemin (tahrik sisteminin) birinci girişidir. Mekanik sistemin diğer ikinci girişi ise, asenkron generatörün oransal hızıdır. Mekanik sistemin çıkışı, rüzgar türbini rotor hızı ve generatörün mekanik gücüdür. Asenkron generatör modelinin girişleri; rüzgar türbininden elde edilen mekanik enerji, şebeke veya yük uçlarındaki gerilim ve frekans büyüklükleridir. Asenkron generatörün çıkışları ise şebeke veya yük için gerekli olan aktif ve reaktif güç değerleridir. Elektrik şebekelerinden yalıtılmış olarak çalışan rüzgar güç üretim sistemlerinde asenkron generatörün gerilimi ve frekansı da çıkış büyüklükleri olarak ifade edilebilmektedir.

Yukarda Şekil VI. 7'de, rüzgar güç üretim sisteminin (güç dönüştürücüsüz) Matlab/Simulink programında gerçekleştirilen simülasyon blok diyagramı görülmektedir. Rüzgar güç üretim sistemi; sincap kafesli asenkron generatör, senkron kondansatör, değişken hızlı rüzgar türbini, yük, frekans kontrol ünitesi, anahtarlamalı yük (dump load), ampermetre ve voltmetre gibi temel bileşenlerden oluşmaktadır.

Yapılan çalışmada, Mitsubishi ağır sanayi endüstrisi tarafından üretilen MWT-300 kW'lık rüzgar türbini dataları kullanılmıştır. Bu rüzgar türbinine ait rüzgar hızı (m/sn) ve üretilen çıkış gücünün eğrisi aşağıda Şekil VI.8'de gösterilmektedir[91]. Tablo VI. 1'de ise MWT-300kW'lık rüzgar türbininin yıllık ürettiği enerjiye ait veriler verilmektedir.

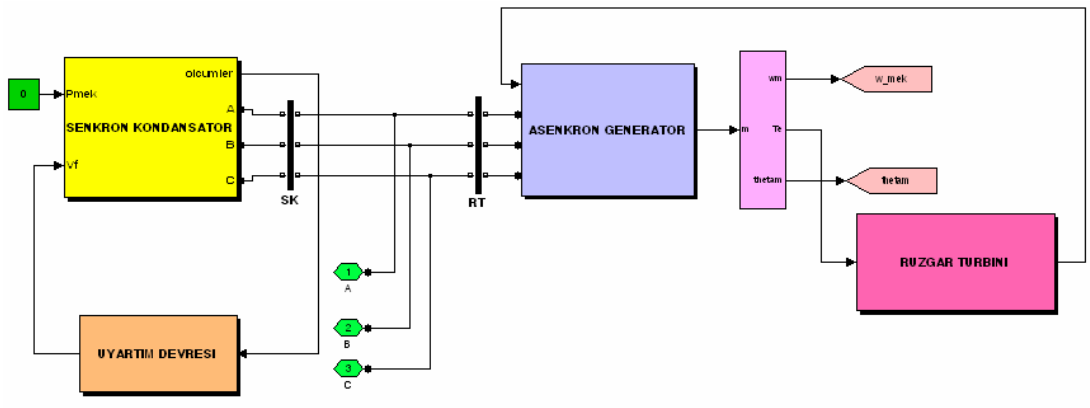


Şekil VI. 8 MWT-300 kW'lık Rüzgar Türbininin Rüzgar Hızına Bağlı Olarak Çıkış Güç Eğrisi

Tablo VI. 1 MWT-300 kW'lık Rüzgar Türbinine ait Yıllık Üretilen Rüzgar Enerjisi

Yıllık Ortalama Rüzgar Hızı (m/s)	Yıllık Üretilen Rüzgar Enerjisi (MWh)
2.0	7.0
3.0	51.5
4.0	153.6
5.0	312.0
6.0	509.8
7.0	724.1
8.0	934.3
9.0	1,125.5
10.0	1,287.7
11.0	1,415.4
12.0	1507.1

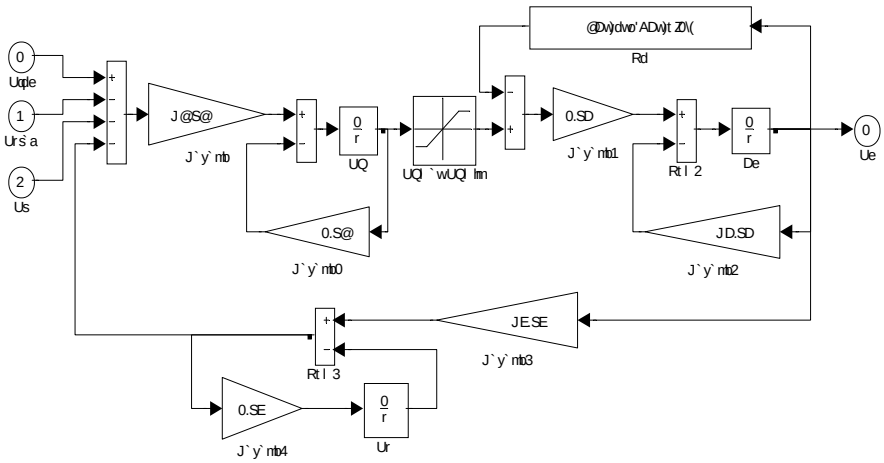
Yukarda Şekil VI. 7'de verilen rüzgar güç üretim sisteminin (güç dönüştürücüsüz) ayrıntılı bloğunun modeli aşağıda Şekil VI. 9'da gösterilmektedir. Bu verilen rüzgar güç üretim sisteminde, herhangi bir kontrolör elemanı olmadan sistemin frekansında, çıkış geriliminde ve çekilen güç eğrilerindeki değişimler simülasyon çalışması ile ayrı ayrı elde edilmiştir. Tüketicilerin farklı güç talepleri 50 kW, 60kW, 70 kW, 80 kW, 90 kW, 100 kW ve 120 kW'lık şeklinde ifade edilmiştir. Bu yükleme durumlarındaki rüzgar güç üretim sisteminin elektriksel büyüklüklerinde değişimlere göre kontrolör elemanı devreye alınmaktadır. Hangi elektrik enerjisi üretim sistemi olursa olsun, sistemden elde edilen gerilimin genliği (büyüklüğü) izin verilen sınırlar dahilinde olmalıdır. Diğer bir önemli büyüklükte sistemin frekansının Türkiye işletme şartlarında 50 Hz olduğu bilinmektedir. Elektrik enerjisi üretim santrallarındaki sistem frekansı 50 Hz değerinde korunmaya çalışılmaktadır. Neticede, elde edilen gücün kaliteli olabilmesi için gerilim ve frekansın büyüklük değerleri arzu edilen değer aralığında tutulmaya çalışılmaktadır. Bir diğer önemli ayrıntı ile istenilmeyen harmonik akım ve gerilimleri alınan önlemlerde minimum düzeye çekilerek elde edilen gücün kalitesi istenilen noktaya getirilebilmektedir..



Şekil VI. 9 Rüzgar Güç Üretim Sisteminin Simülasyon Blok Diyagramı

Rüzgar güç üretim sistemi asenkron generatör, senkron kondansatör ve rüzgar türbini ve ölçü aletlerinden oluştuğu Şekil VI. 9'da görülmektedir. Senkron kondansatör, bildiğimiz senkron makinanın aynısıdır. Kondansatör olarak işletilmesi durumunda mekanik enerji girişi sıfırdır. Yani dışardan tahrik makinası ile uyarılmasına gerek yoktur. DC uyartım devresi ayar edilerek reaktif güç üretimi sağlanır. Rüzgar güç üretim sistemi içersinde senkron kondansatör kullanmamızın amacı; asenkron generatörün rüzgar türbini ile birlikte çalıştırılabilmesi için gerekli olan manyetik akımı veya reaktif gücü elde etmek içindir. Aynı zamanda, rüzgarın etkisini yeniden hissedebilmek amacıyla asenkron generatör tarafından üretilen aktif güç ile senkron kondansatör beslemesi gerçekleştirilir. Senkron makina hakkında detaylı analiz ve bağıntılar Bölüm V'de verilmektedir.

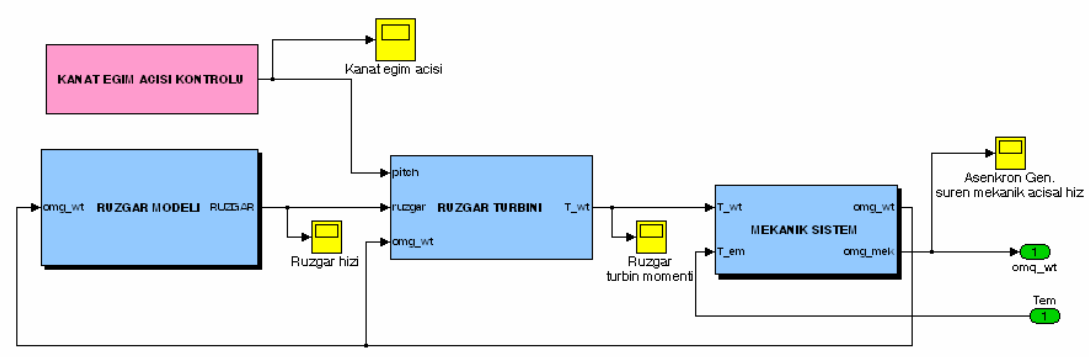
Senkron makinanın uyartım devresinin matematiksel bağıntıları ve blok diyagramları Bölüm V'de ayrıntılı olarak anlatılmıştır.



Şekil VI. 10 Senkron Kondansatörün Uyartım Devresinin Simülasyon Blok Diyagramı

Şekil VI. 10'da senkron kondansatörün uyartım devresinin simülasyon blok diyagramı gösterilmektedir. Senkron kondansatörün ürettiği reaktif güç ayarı uyartım devresi içersinde yer alan kazanç parametrelerini ayar ederek gerçekleştirilir.

Şekil VI. 9'da gösterilen rüzgar türbini bloğunun alt modeli veya açık simülasyon diyagramı aşağıda Şekil VI. 11'de gösterilmektedir.



Şekil VI. 11 Rüzgar Türbini Sisteminin Simülasyon Blok Diyagramı

VI.1.5 Rüzgar Güç Üretim Sisteminin İşletme Durumları ve Simülasyonu

Rüzgar türbin sisteminden elde edilen çıkış gücü, rüzgar hızındaki değişimlere göre gün boyunca değişiklik gösterir. Çok büyük güçlü şebekelerde rüzgar çıkış gücündeki değişim ve salınımlar frekans ve gerilimin kontrol edilmesiyle en aza indirilmekte veya yok edilmektedir. Küçük ve büyük şebekelerden yalıtılmış rüzgar güç üretim sistemlerinde, üretim ve tüketim arasındaki güç dengesi önceden belirlenmiş güç limitleri dahilinde gerilim ve frekansın arzu edilen değerlerde korunmasının sürekliliği sağlanmalıdır. İstenilen gücün arzu edilen değerde ve kalitede olması için frekans ve gerilim değerleri izin verilen alt ve üst limitler arasında olmalıdır. Rüzgar güç üretim sistemi tarafından üretilen güç her zaman tüketiciler arasındaki güç dengesini sağlayamaz. Bu gibi işletme durumlarında gaz güç üretim sisteminin çıkış gücü ile tüketiciler arasındaki güç dengesi sağlanır. Eğer tüketim gücü rüzgar güç üretim sisteminden daha az ise, yedek yük gruplarının veya anahtarlamalı yük (dumpload) devre elemanlarının işletmeye alınmasıyla rüzgar gücü regüle edilerek gerilimin ve frekansın istenilen genlikte olması gerçekleştirilir. Yapılan çalışmada frekansı kontrol etmek için anahtarlamalı (dumpload) yük kullanılmıştır.

VI.1.5.1 Rüzgar Güç Üretim Sisteminin Kontrolsüz İşletme Durumu ve Simülasyon Sonuçları

Rüzgar güç üretim sistemlerinin kontrolü iki kontrolü içerir. Bunlar;

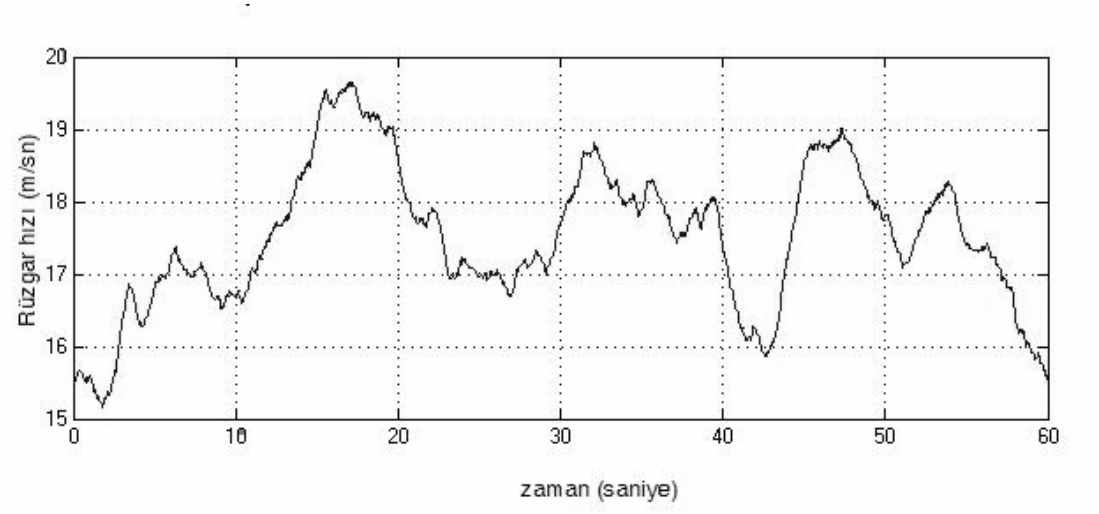
- Hız kontrolü
- Güç sınırlaması kontrolü

Hız kontrolörü güç optimizasyon stratejisinde ana kontrolör olarak ta ifade edilmektedir. Eğer rüzgar hızı oranlanmış rüzgar hızından daha az ise eğim açısı optimal değerinde korunmaya çalışılır. Bu durumda generatör hızı (ω_{gen}), rüzgar maksimum çıkış gücünü yakalayabilmesi için rüzgar türbin hızı kontrolör yardımıyla ile ayarlanır.

Güç sınırlaması kontrolünde, nominal (oranlanmış) güce üretilen gücü eşitlemek için eğim açısı kontrolörü yapılır. Güç sınırlama kontrol döngüsünde, oranlanmış güç değeri ile ölçülen güç değeri arasındaki hata değeri kontrolör elemanına gönderilir. Kontrolör, gerekli olan referans eğim açısını üretir. Bu referans eğim açısı gerçek referans eğim açısı ile karşılaştırılır. Sonuçta, güç sınırlama kontrolörünün çıkışı rüzgar türbini kanatlarının eğim açısı belirlenmiş olmaktadır.

Rüzgar türbin kontrolünde hız kontrolörü ve güç sınırlaması kontrolörü gerçekleştirilirken rüzgar hız ölçümüne gerek duyulmamaktadır. Yalnızca generatörün hızı ve aktif gücü gerekmektedir.

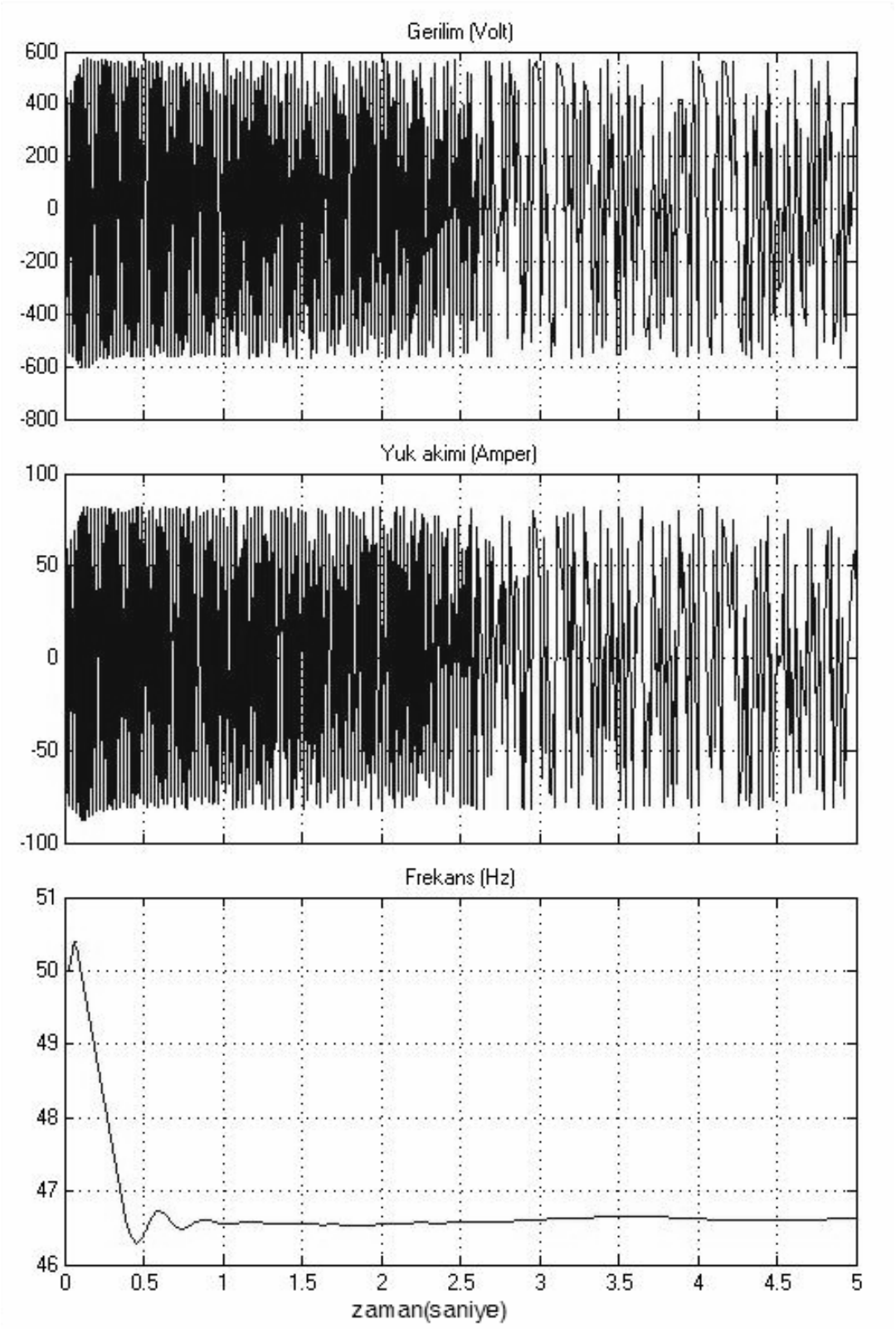
Yapılan rüzgar güç üretim sistemi çalışmasında, sistemde herhangi bir kontrolör elemanı yok iken yani kontrolsüz durumdaki sistemin davranışı simülasyon çalışmasından elde edilmiştir. Rüzgar türbin kontrolü için hız kontrolü veya güç sınırlaması kontrolü kullanılmadığında, sistemin üretim gücü, yükün çektiği güç, senkron kondansatör gücü, çekilen akım, sistemin frekansı ve gerilimine ait simülasyon eğrileri farklı yük değerlerinde alınmıştır. Kontrolsüz rüzgar türbininin çalıştırılarak asenkron generatör tarafından üretilen elektriksel güç ile şehir merkezinden uzak yerleşim birimlerinde oturan insanların elektrik ihtiyacının karşılanması hedeflenmiştir. Küçük yerleşim merkezlerinde elektrik enerjisine daha çok aydınlatma ve elektrikle çalışan ev aletlerinin çalıştırılması için gerek duyulmaktadır.



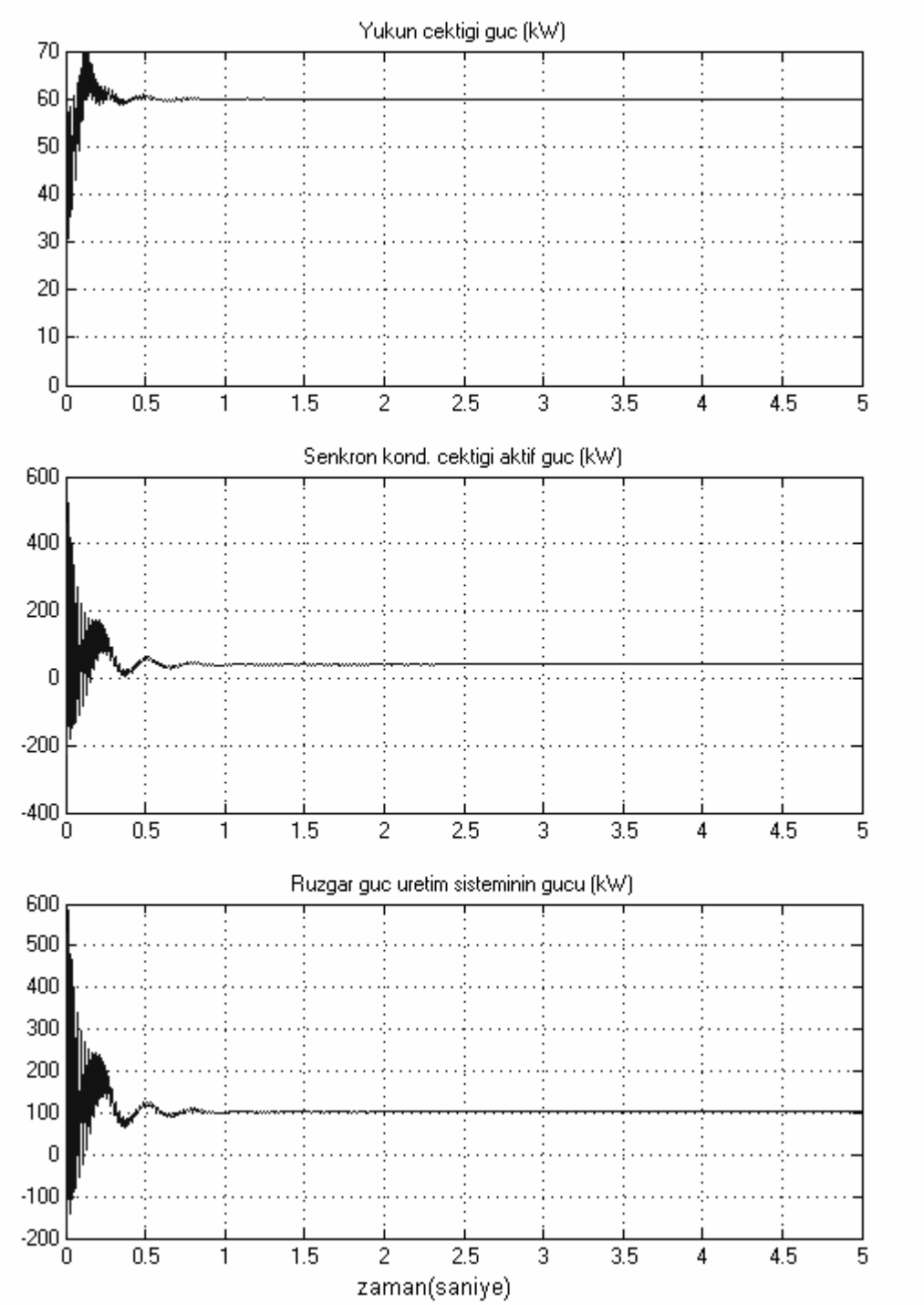
Şekil VI. 12 Oranlanmış Hızı 15.5 m/sn ve Türbülans Yoğunluğu %10 olan Rüzgar Hızının Simülasyon Eğrisi

Rüzgar güç üretim sisteminde kullanılan değişken hızlı rüzgar türbin kanatlarına çarpan rüzgar hızının zamana bağlı olarak simülasyon eğrisi Şekil VI. 12'de gösterilmektedir. Rüzgar güç üretim sisteminin Matlab/SIMULINK simülasyon çalışmasında kullanılan MWT-300 kW'lık üç rotor kanatlı değişken hızlı rüzgar türbini, asenkron generatör ve senkron kondansatör parametreleri Ek.A'da verilmektedir.

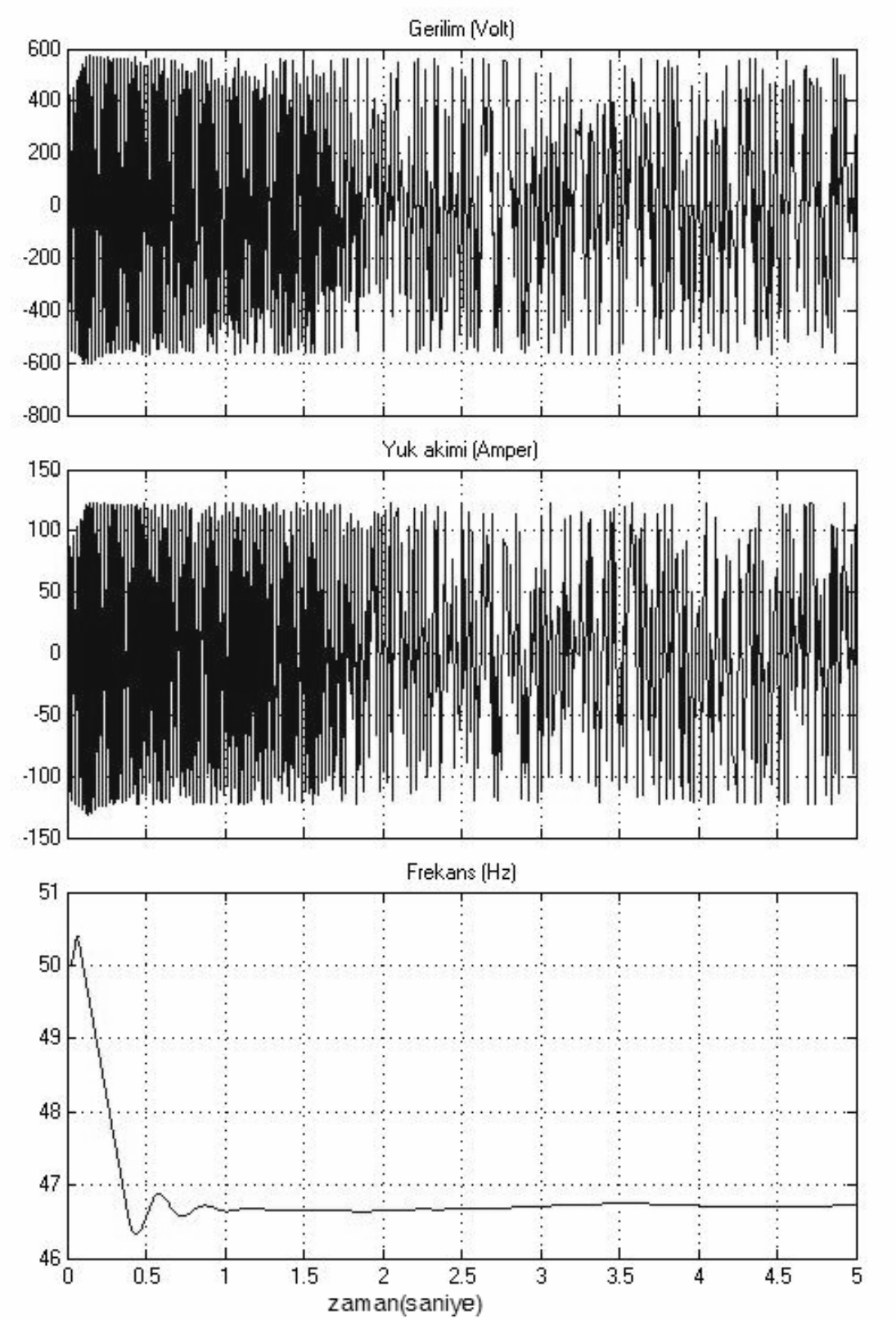
Rüzgar güç üretim sisteminin kontrolsüz işletilmesi durumunda, değişik yük kademelerindeki sistemin çıkış büyüklüklerindeki (güç, akım gerilim ve frekans) değişimleri yapılan simülasyon çalışması sonuçlarından elde edilen eğriler aşağıda ayrı ayrı verilmektedir. Yine rüzgar türbininin ürettiği güç türbin hızı ile orantılı olduğundan üzerine alacağı maksimum çıkış yük değeri ve en düşük hızdaki üretim gücünü yine yapılan çalışmalar neticesinde elde edilen verilerle belirlenir. Genellikle rüzgar türbinleri kontrolsüz olarak çalıştırılmamaktadır. Kontrolör işlemi daha kolay olan klasik PID kontrolör ile türbin rotorunun hız kontrolü (pitch control) veya güç sınırlaması kontrolü yapılır. İfade edilen iki kontrol işlemine genellikle eğim açısı kontrolü olarak da ifade edilebilir. Eğim açısı kontrolünde kullanılan giriş parametreleri ya generatör hızı yada generatörden alınan güç ve oranlanmış güç değerleridir.



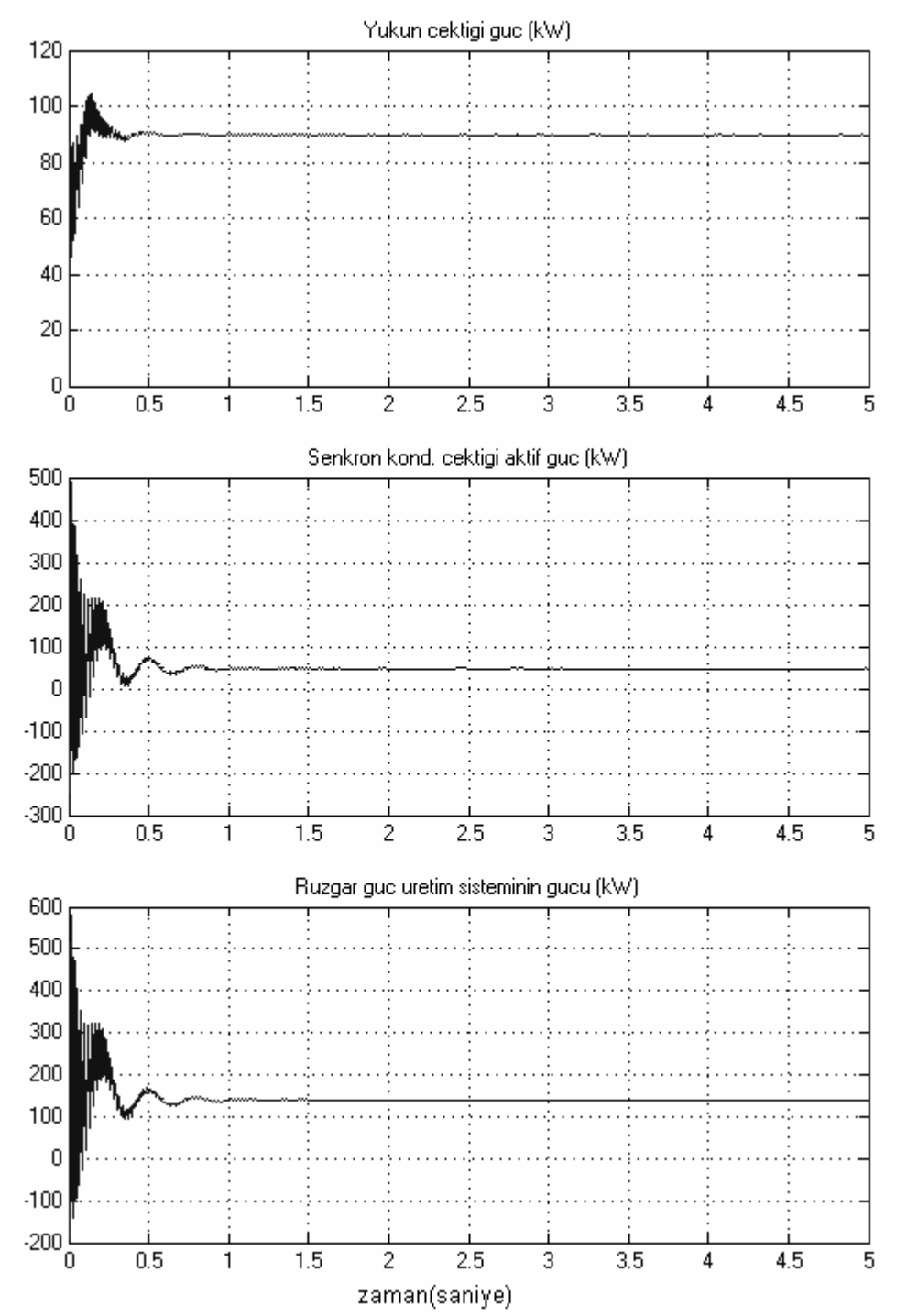
Şekil VI. 13 Kontrolsüz rüzgar güç üretim sisteminin 40kW'lık yük ile yüklenmesi durumunda, akım, gerilim ve frekanstaki değişimler



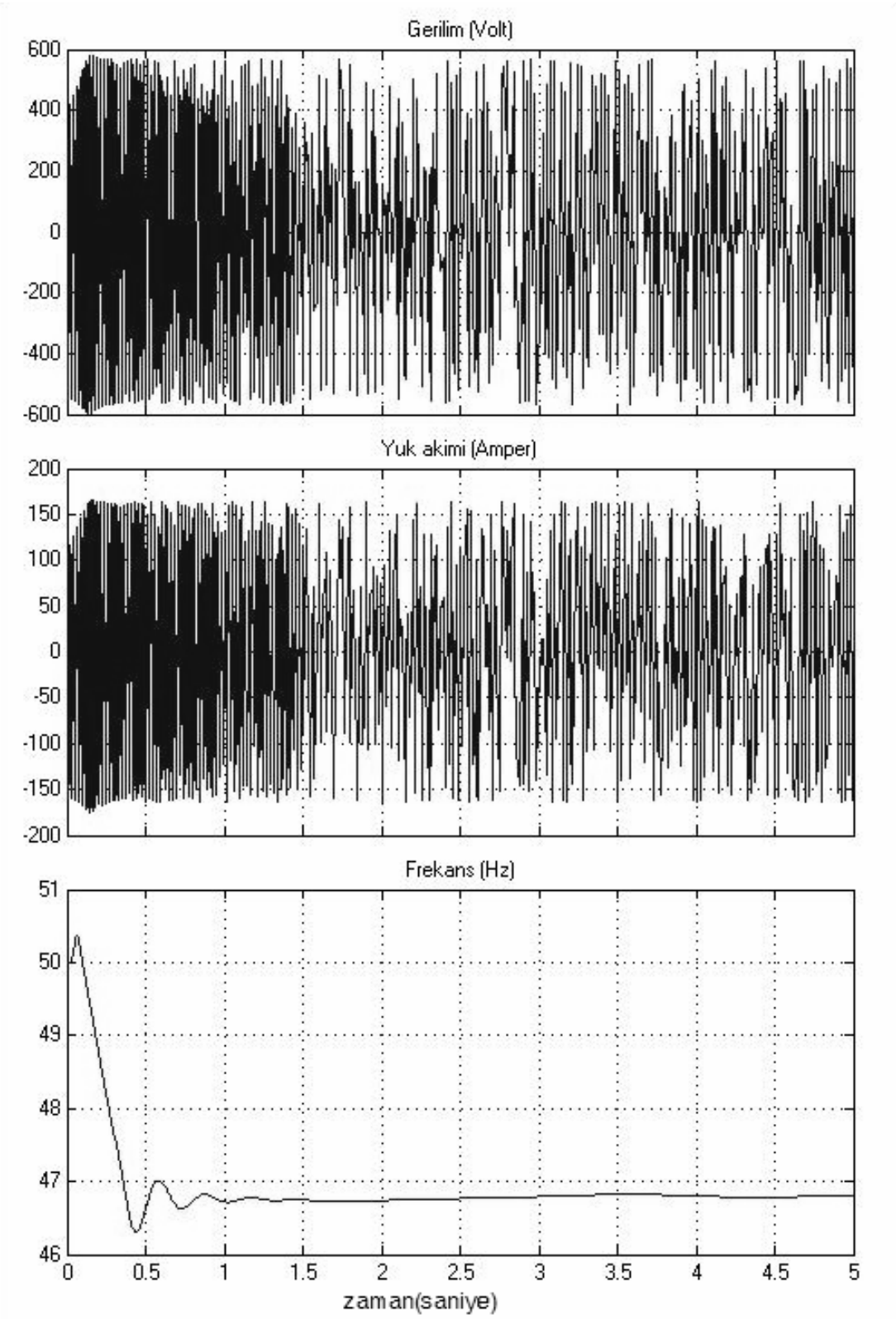
Şekil VI. 14 Kontrolsüz rüzgar güç üretim sisteminin 40kW'lık yük ile yüklenmesi durumunda, yükün çekmiş olduğu güç, senkron kondansatörün reaktif gücü ve rüzgar türbin sisteminin gücü



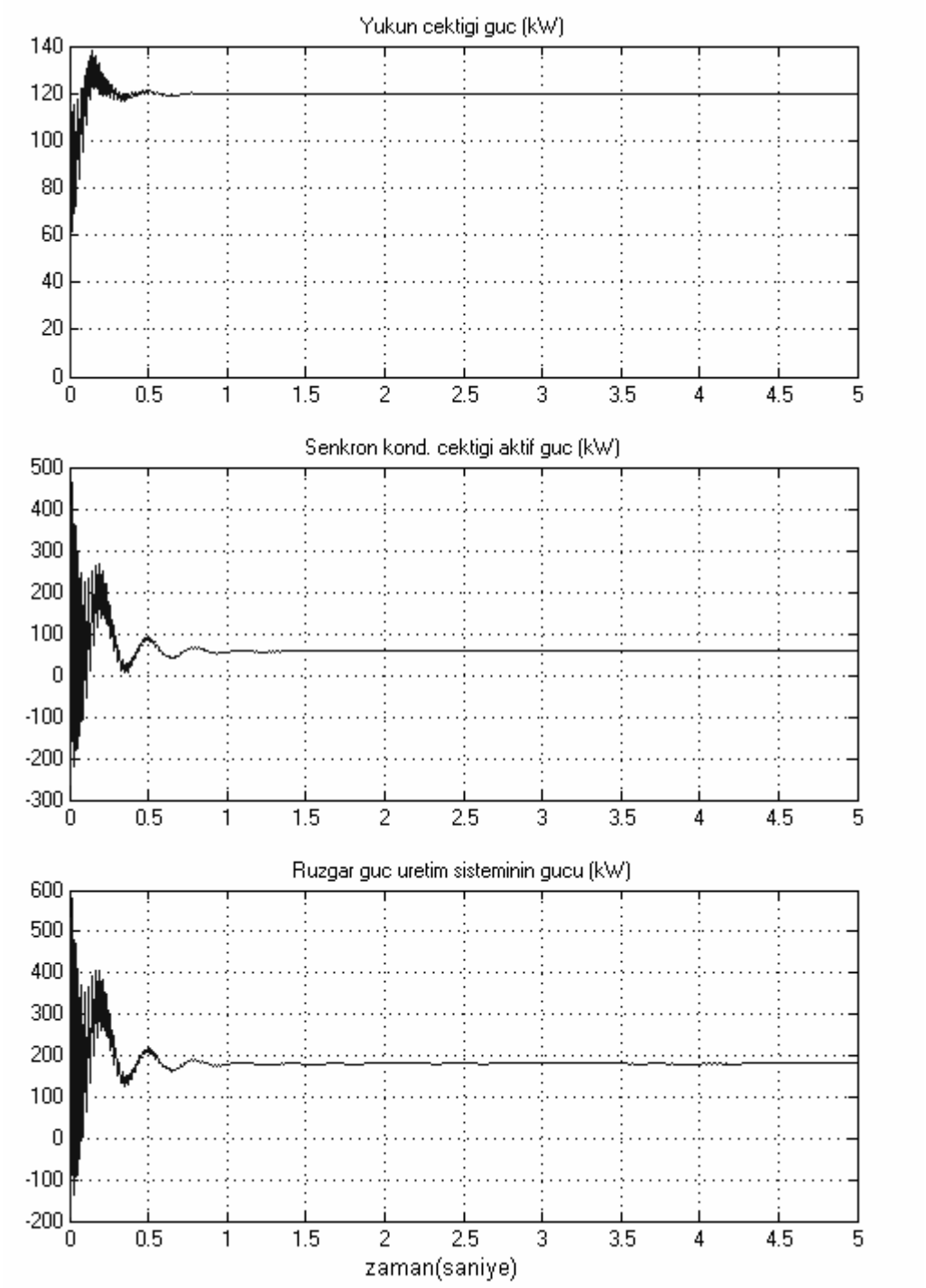
Şekil VI. 15 Kontrolsüz rüzgar güç üretim sisteminin 60kW'lık yük ile yüklenmesi durumunda, akım, gerilim ve frekanstaki değişimler



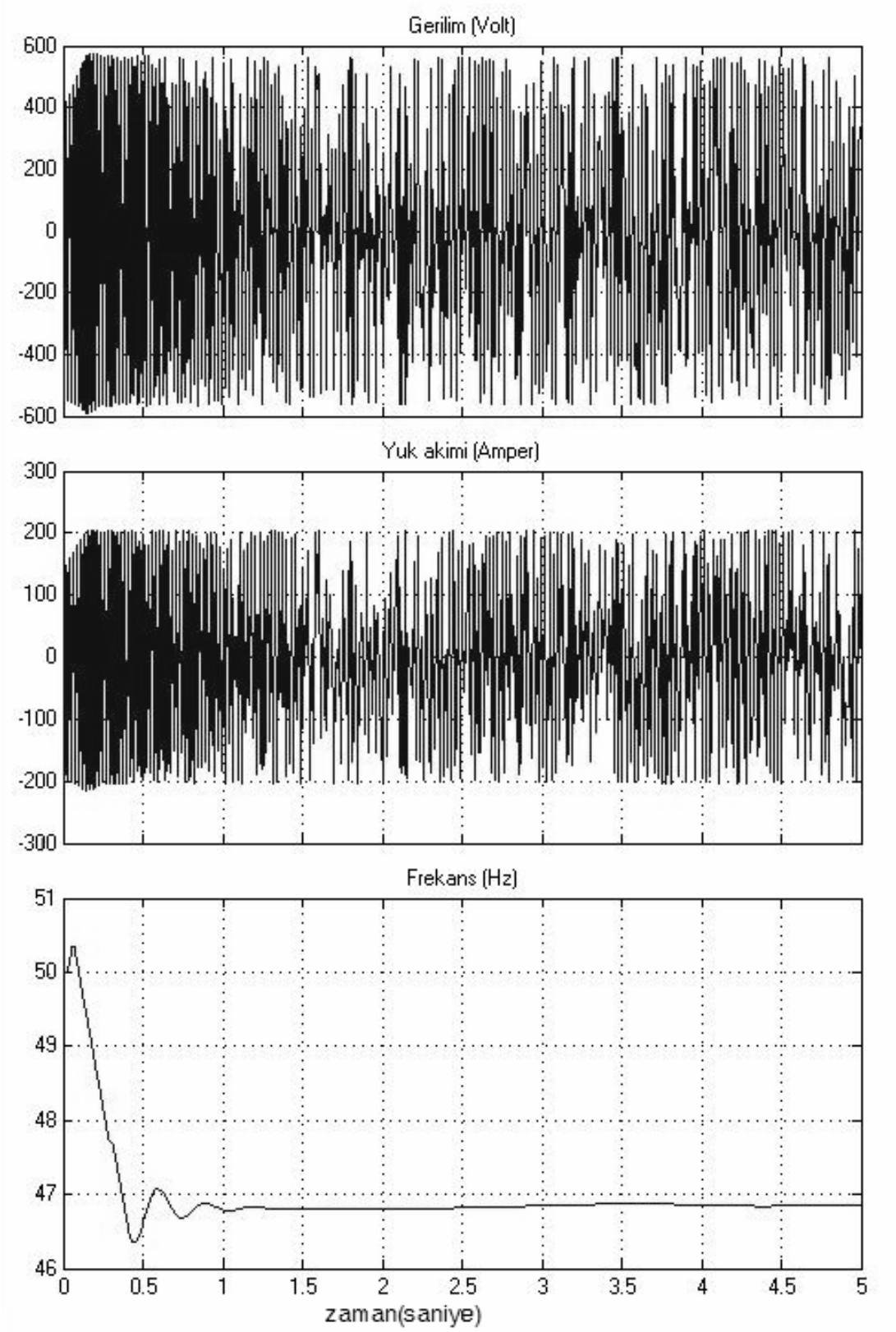
Şekil VI. 16 Kontrolsüz rüzgar güç üretim sisteminin 60kW'lık yük ile yüklenmesi durumunda, yükün çekmiş olduğu güç, senkron kondansatörün reaktif gücü ve rüzgar türbin sisteminin gücü



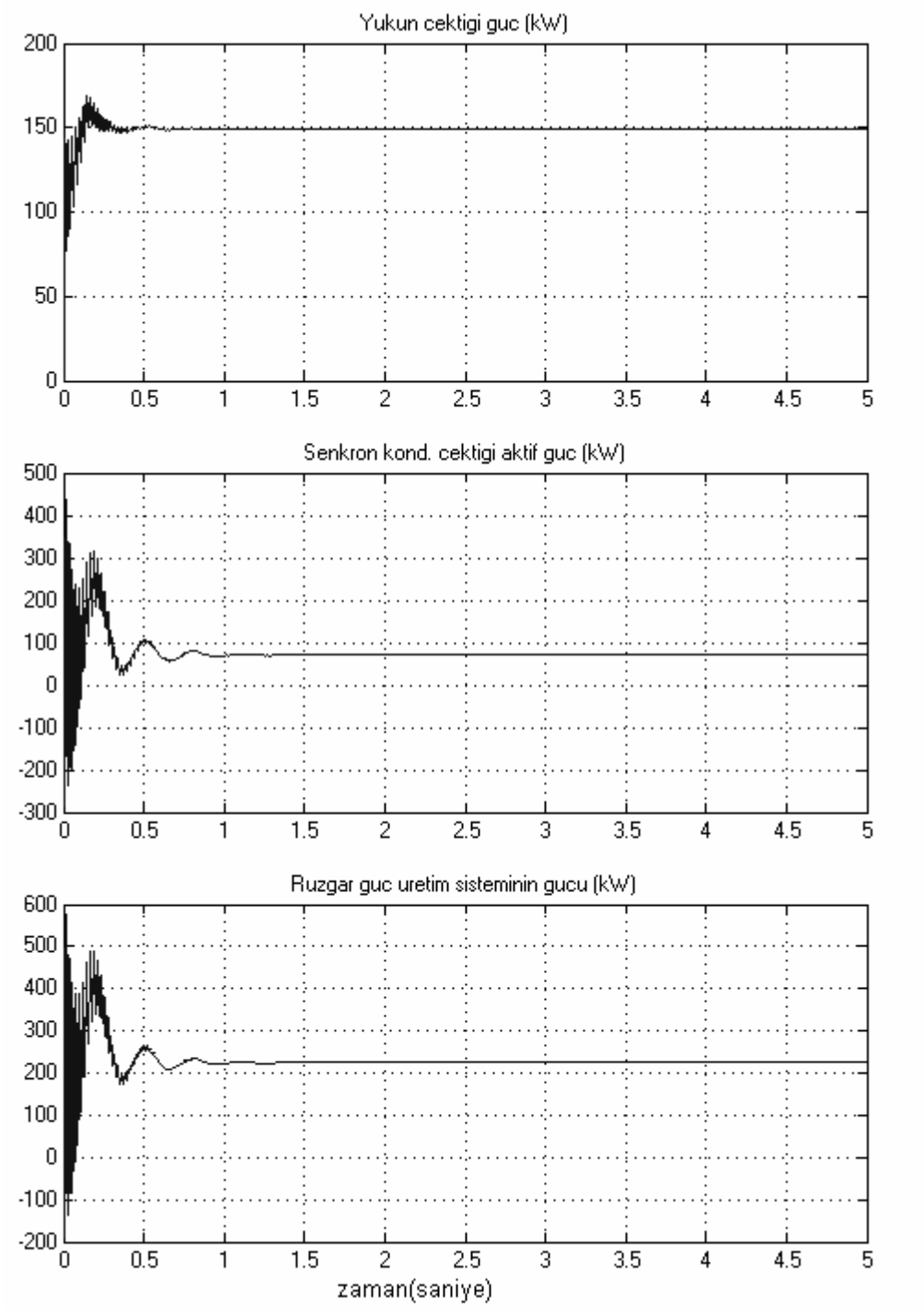
Şekil VI. 17 Kontrolsüz rüzgar güç üretim sisteminin 80kW'lık yük ile yüklenmesi durumunda, akım, gerilim ve frekanstaki değişimler



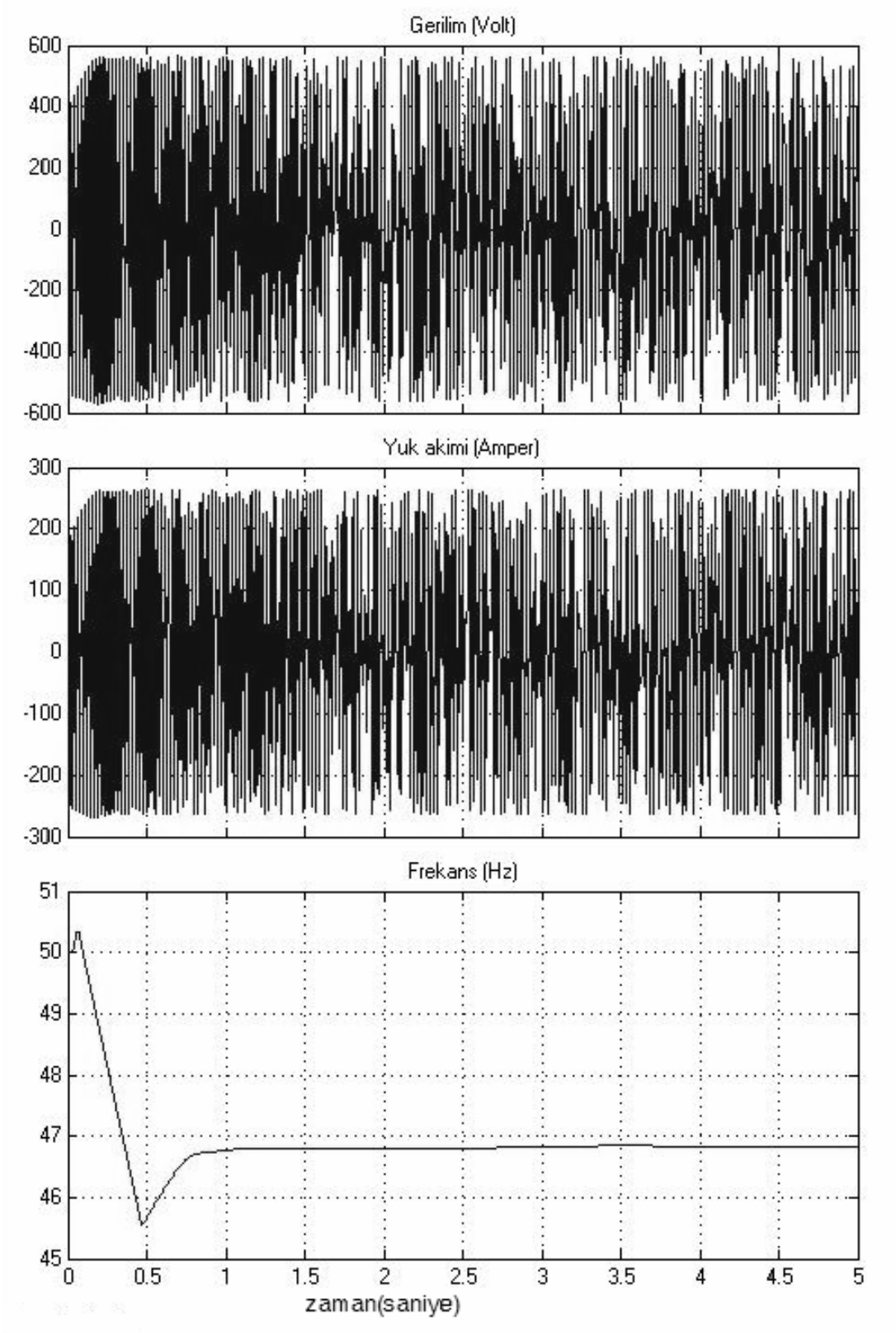
Şekil VI. 18 Kontrolsüz rüzgar güç üretim sisteminin 80kW'lık yük ile yüklenmesi durumunda, yükün çekmiş olduğu güç, senkron kondansatörün reaktif gücü ve rüzgar türbin sisteminin gücü



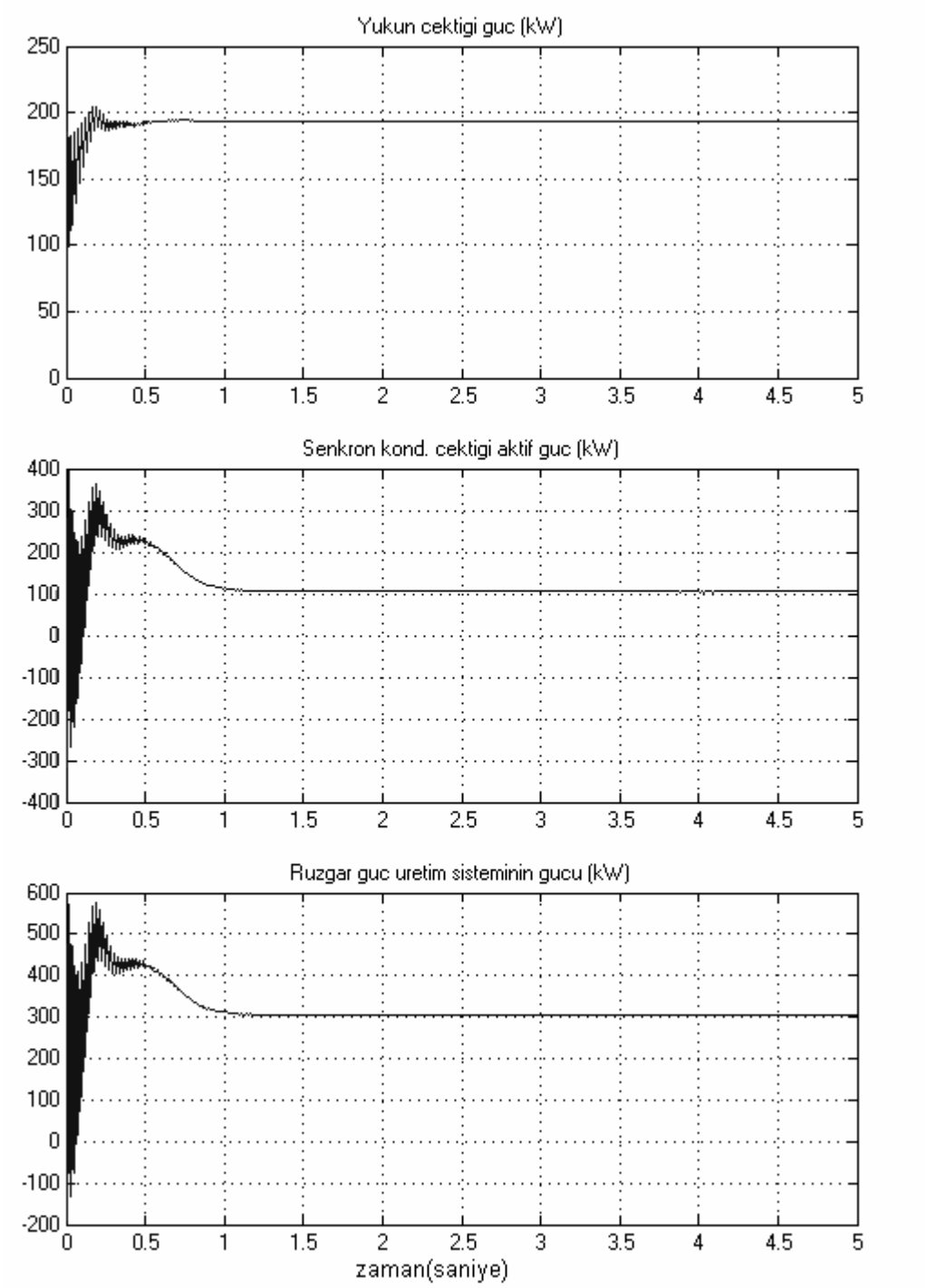
Şekil VI. 19 Kontrolsüz rüzgar güç üretim sisteminin 100kW'lık yük ile yüklenmesi durumunda, akım, gerilim ve frekanstaki değişimler



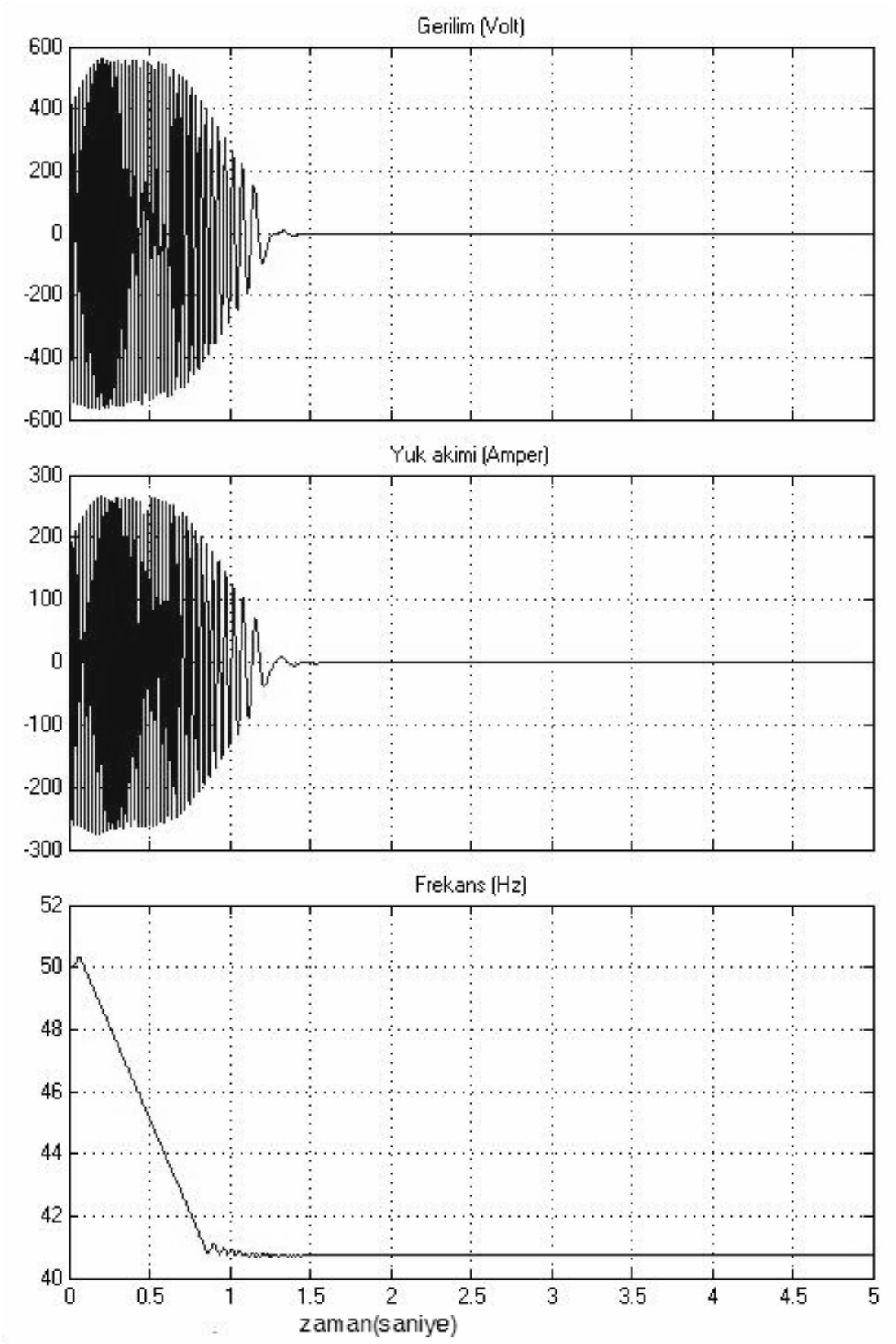
Şekil VI. 20 Kontrolsüz rüzgar güç üretim sisteminin 100kW'lık yük ile yüklenmesi durumunda, yükün çektiği güç, senkron kondansatörün reaktif gücü ve rüzgar türbin sisteminin gücü



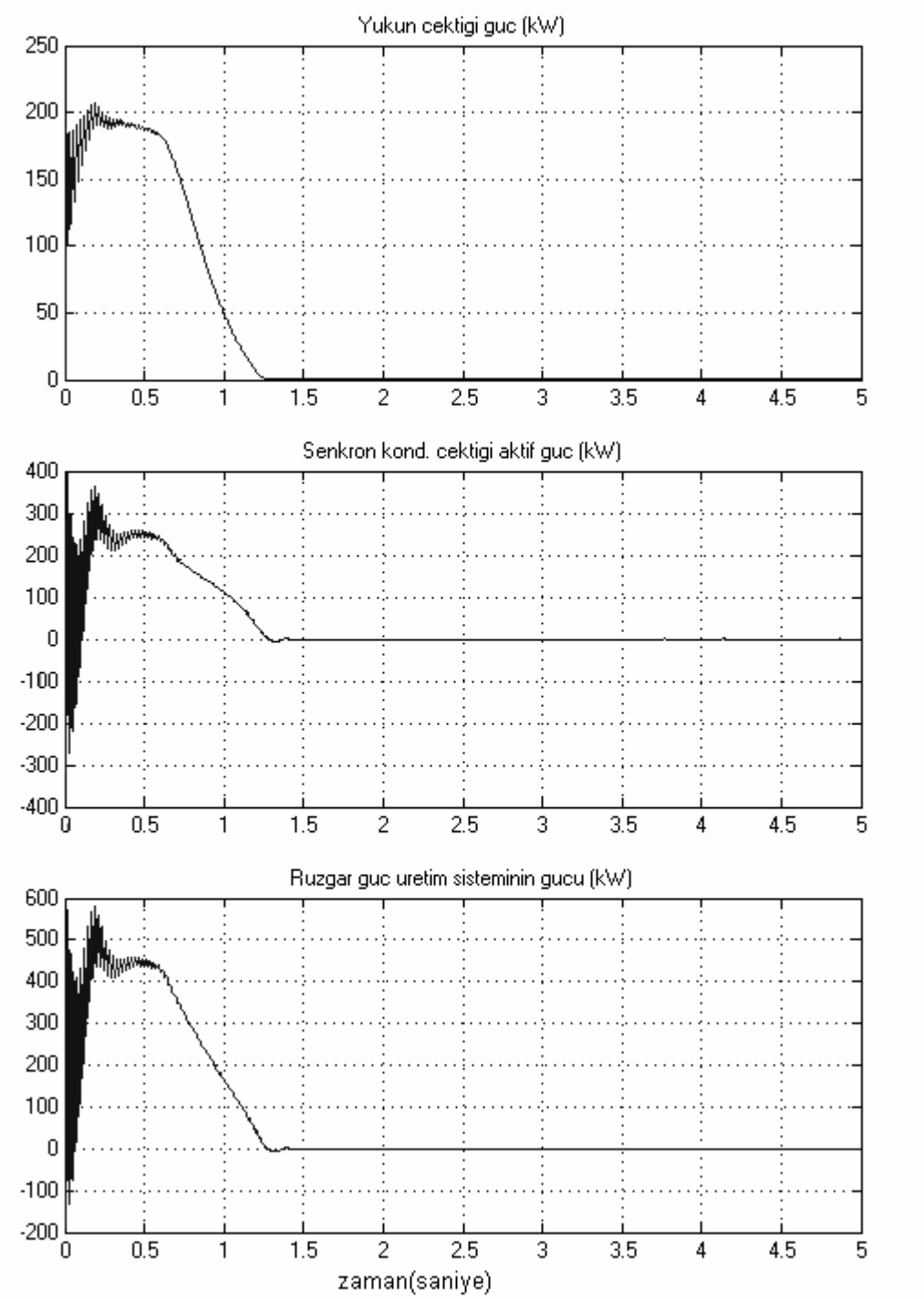
Şekil VI. 21 Kontrolsüz rüzgar güç üretim sisteminin 130kW'lık yük ile yüklenmesi durumunda, akım, gerilim ve frekanstaki değişimler



Şekil VI. 22 Kontrolsüz rüzgar güç üretim sisteminin 130kW'lık yük ile yüklenmesi durumunda, yükün çektiği güç, senkron kondansatörün reaktif gücü ve rüzgar türbin sisteminin gücü



Şekil VI. 23 Kontrolsüz rüzgar güç üretim sisteminin 132kW'lık yük ile yüklenmesi durumunda, akım, gerilim ve frekanstaki değişimler



Şekil VI. 24 Kontrolsüz rüzgar güç üretim sisteminin 132kW'lık yük ile yüklenmesi durumunda, yükün çektiği güç, senkron kondansatörün reaktif gücü ve rüzgar türbin sisteminin gücü

Şehir merkezinden veya elektrik dağıtım şebekelerinden yalıtılmış olarak işletmeye alınan rüzgar güç üretim sisteminden üretilen elektrik enerjisi ile küçük yerleşim birimlerindeki alıcıların elektrik enerjisinin karşılanması hedeflenmiştir. Bu işletme durumunda, sistemin kontrolsüz çalışma durumundaki davranışını

gözlemlemek amacıyla farklı tüketici yüklerinin beslenmesi sağlanmıştır. Bu farklı tüketici yüklerinin beslenmesi durumunda dağıtım şebekelerinden bağımsız rüzgar güç üretim sisteminin elektriksel büyüklüklerin zamana bağlı olarak değişimi simülasyon çalışmalarından elde edilmiştir.

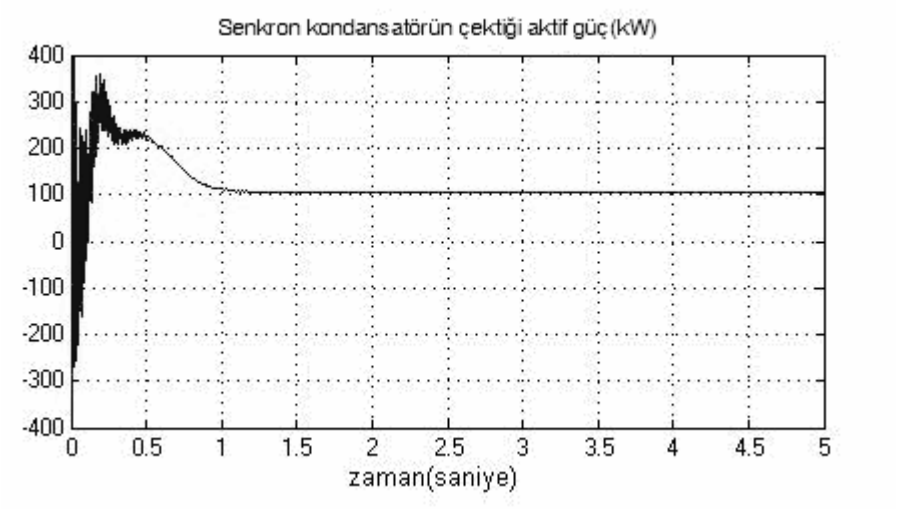
Tüketici yükünün yük değeri 40kW'dan 130kW'değerine kadar değişimleri durumunda rüzgar üretim sisteminin davranışı gözlemlenmiştir. Çalışmada kullanılan rüzgar türbininin oranlanmış gücü 300kW dır. Genelde rüzgar türbinlerinin işletmede üreteceği ortalama güç değerleri dikkate alınarak yükleme yapılmaktadır. Simülasyon çalışmasında kullanılan rüzgar türbininin üretici firma tarafından verilen yıllık ortalama elektrik enerjisi değerleri oranlanmış rüzgar hızına göre yukarda Tablo VI. 1'de verilmektedir.

40kW, 60kW, 80kW, 100kW ve 130kW lık tüketici yükleri rüzgar güç üretim sistemi tarafından beslenirken yük uçlarındaki gerilim, yük akımı ve sistem frekansındaki değişiklikler zamana bağlı olarak Şekil VI. 13, Şekil VI. 15, Şekil VI. 17, Şekil VI. 19 ve Şekil VI. 21'de gösterilmiştir. Yine aynı şekilde tüketici gücü, asenkron generatörün reaktif gücünü karşılayan senkron kondansatörün gücü ve rüzgar güç üretim sisteminin üretim gücü zamana bağlı olarak sırasıyla, Şekil VI. 16, Şekil VI. 18, Şekil VI. 20 ve Şekil VI. 22 gösterilmiştir. Rüzgar güç üretim sistemine ait simülasyon eğrilerini incelediğimizde, değişken hızlı rüzgar türbini oranlanmış 15.5 m/sn'lik rüzgar hızı çalışmaktadır. Elde edilen simülasyon sonuçlarına baktığımızda sistemin kararlı çalıştığı ve kaliteli elektrik enerjisi ürettiği söylenemez. Çünkü sistemde herhangi kontrolör elemanı yok iken elde edilen gerilim, akım ve frekans arzu edilen değerlerde ve biçimde değildir.

Rüzgar hızına bağlı olarak elde edilen gerilim eğrisi sinüzoidal eğriden oldukça uzak bir görüntü sergilemektedir. Buna bağlı olarak akım eğrisi de aynı şekildedir. Sistemin frekansın nominal işletme değeri 50 Hz olması gerekirken yaklaşık 46.5 Hz ile 47 Hz arasında değişmektedir. Güç eğrilerini incelediğimizde, ilk 0.5 sn çok kararsız ve değişken bir durum izlemektedir. Bu işletme durumu, gerilimin bu zaman aralığında istenilen genlik değerine ulaşması için gecen süredir. Güç değerleri sistemden ölçülen gerilim ve akımın çarpımına eşit oldukları için güçteki dalgalanmaları akım ve gerilim eğlerinde olduğu gibi açık bir şekilde gözlemliyemeyiz. Güç üretim ve dağıtım sistemlerinde genellikle gerilim ve frekans kontrolü yapılarak bu iki temel büyük büyüklük arzu edilen değerlerde tutulmaya çalışılır. Üç fazlı işletmelerde elde edilen gerilim eğrisi mümkün olduğu kadar sinüs

eğrisine yaklaştırılmaya çalışılır. Bu amaçla birçok klasik ve ileri düzey kontrolör devre elemanları geliştirilmiş ve tasarlanmıştır. Sonuçta, rüzgar güç üretim sisteminden kaliteli bir enerji elde etmek istiyorsak gerilimi ve frekansı arzu ettiğimiz değere getirmek için kontrolör devre elamanlarına ihtiyaç duyulmakta olduğu simülasyon çalışmasıyla da görülmüştür.

Rüzgar hızının artmasıyla rüzgar türbini güç sınırlaması moduna girer. Rüzgar hızındaki daha fazla artış durumunda rüzgar türbininin gücü ortalama değerde sınırlanır. Aşırı yük olduğu durumlarda kanatların eğim açısı yeni duruma göre ayarlanabilir. Kullanılan rüzgar türbininin oranlanmış üretim gücü 300 kW'dır. Şekil VI. 25'de, tüketici gücü 130kW iken, senkron kondansatörün çektiği aktif güç değişim eğrisi görülmektedir.



Şekil VI. 25 Senkron Kondansatörün Tüketici Gücünün 130 kW Olduğu İşletme Durumunda Çektiği Aktif Gücdeki Değişim

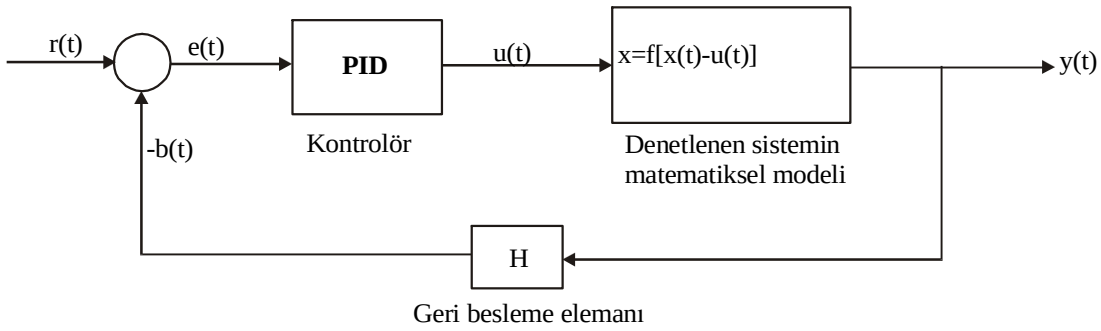
Yukarda verilen şekillerde, değişik yüklenme durumlarına göre elektriksel büyüklüklerdeki değişimler gösterilmiştir. Bu simülasyon eğrilerinde güç, akım ve gerilim değerleri maksimum değerlerdir. Bilindiği gibi elektriksel büyüklüğün maksimum değeri √2 ile çarpılmaktadır. Örneğin; gerilim için $V_{\max} = \sqrt{2} \cdot V_{etkin}$ dir.

Şekil VI. 22'deki yükün çekmiş olduğu güç değeri ile senkron kondansatörün çektiği aktif güç değerinin toplamı rüzgar türbininin üretim gücüne eşit olmaktadır. Bu tüketici gücünün üzerinde sistem yüklenirse çökme veya sönüm noktasına girdiği Şekil VI. 23 ve

Şekil VI. 24'de görülmektedir. Toplam rüzgar türbininden çekilen güçlerin toplamı rüzgar türbininin nominal gücüne eşit olmalı veya aşmamalıdır.

VI.1.5.2 Rüzgar Güç Üretim Sistemi Performansının İyileştirilmesi İçin Klasik PID Kontrolör

Analog işaretle çalışan geleneksel denetim sistemlerinin analiz ve sentezinde sistemin matematiksel modelinin kurulması esastır. Bu denetim sistemlerinin matematiksel modelleri, zaman domeninde sistem parametreleri zamanla değişmiyor ve doğrusal ise normal diferansiyel denklemlerle yada durum denklemleri ile ifade edilir. Doğrusal zamanla değişmeyen bu kontrol sistemleri, *s* domeninde Laplace dönüşümü ve transfer fonksiyonları yardımı ile modellenir. Sürekli denetim işaretleri ile çalışan denetim sistemlerinin analiz ve sentezi bu modellerle yapılmaktadır. Şekil VI. 26'de sürekli işaretle çalışan ve klasik PID kontrolörü kullanılan temel bir denetim sisteminin blok diyagramı gösterilmektedir[92].



Şekil VI. 26 Sürekli (Analog) İşaretle Çalışan Klasik PID Kontrollü Bir Sistemin Blok Diyagramı

Şekil VI. 26 incelendiğinde, *r(t);* sistemin referans büyüklüğünü, *b(t);* geri besleme sinyalinden gelen elemanın büyüklüğünü, *e(t);* referans büyüklük ile geri besleme sinyali arasındaki farkı ifade eden hata sinyalini, *u(t);* kontrolör çıkışından alınan denetleme sinyalini, *x=f[x(t), u(t)];* verilen denetlenen sistemin matematiksel modelini, *H;* geri besleme sinyalini ve *y(t);* çıkış sinyalinin büyüklüğünü göstermektedir. Blok diyagramı verilen ve sürekli işaretle çalışan kontrolör sisteminin zaman domeninde matematiksel ifadesi;

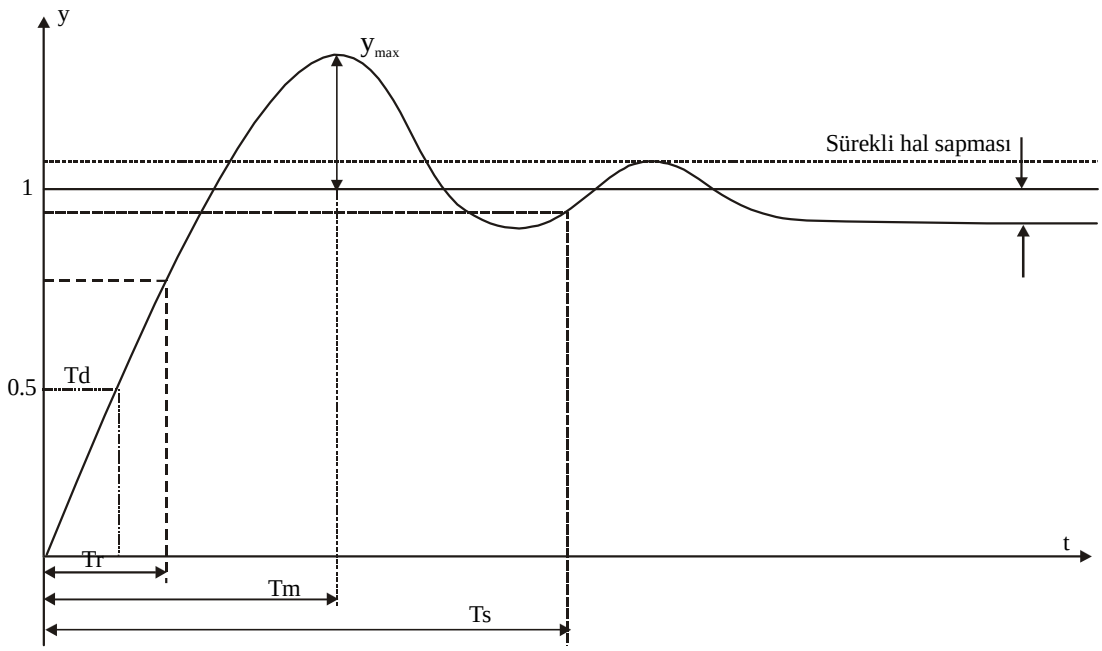
$$e(t) = r(t) - b(t) \tag{6.3}$$

$$u(t) = K_p e(t) + K_I \int_0^t e(t)dt + K_D \frac{de(t)}{dt} \tag{6.4}$$

$$b(t) = H \cdot y(t) \tag{6.5}$$

olmaktadır. Klasik PID kontrolör elamanına ait verilen bağıntılarda, K_P; oransal kazancı, K_I; integral(tümlevsel) kazancı, K_D; türevsel kazancı göstermektedir.

Kontrol sistemin zaman domeninde davranışını tanımlama bakımından, sistemin girişine birim basamak fonksiyonu uygulanır. Basama fonksiyonun üretimi kolaydır ve sisteme uygulanması problem oluşturmaz. Bundan başka basamak fonksiyonu, bütün frekansları içeren bir işarettir. Genel olarak bir kontrol sisteminin birim basamak fonksiyonuna ilişkin sistemin çıkışı aşağıda Şekil VI. 27 görülmektedir.



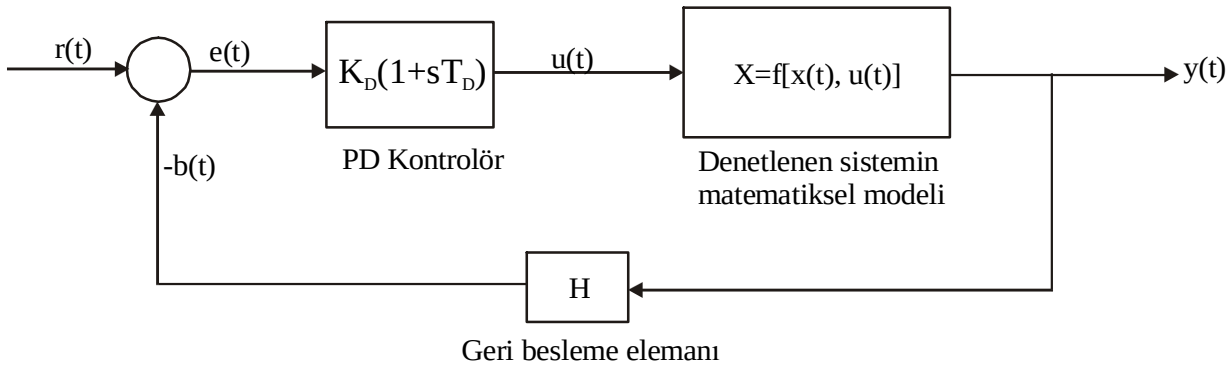
Şekil VI. 27 Lineer Kontrol Sisteminin Girişine Birim Basamak Fonksiyonu Uygulanması Durumunda y(t) Çıkış Eğrisinin Değişimi

Şekil VI. 27'deki verilen sistemin cevabına ilişkin önemli bazı bilgiler aşağıda verilmiştir.

- Aşım zamanı (Tm): Birim basamak girişe ait çıkışın ilk maksimum değerine ulaştığı ana kadar gecen süredir.
- Gecikme zamanı (Td) : Birim basamak girişe ait çıkışın son değerinin %50 sine ulaşıncaya kadar gecen süredir.
- Yerleşme zamanı (Ts) : Birim basamak fonksiyonuna ait çıkışın son değerinin belli bir yüzdesine gelmesi ve belirli değer içinde kalması için gecen zamandır.
- Yükselme zamanı (Tr) : Birim basamak fonksiyonuna ait çıkışın son değerinin %10 undan %90'nuna yükselmesi için gecen zamandır.

VI.1.5.2.1 PD (Proportional –Derivate:Oransal-Türevsel) Kontrolör

Yalnız başına P kontrolör kullanılarak kontrol sisteminin çıkışından istenilen y(t) yi zaman domeninde istenilen bir değere getirmeye yeterli değildir. Çünkü, sistemde sadece bir serbestlik derecesi vardır ve o da kazançtır. Kazancın değeri, orantılı kontrolde büyütülürse, sistemin yükselme zamanı küçülür. Sistem daha hızlanırsa, sistemin aşım değeri de büyür. Büyük kazanç değerlerinde ise kararlılıkta bozulabilir. Orantılı kontrolün yanına türev kontrolü (D) ekleyerek orantı ve türev kontrolü sistemin aşım değerini sınırlayabileceği gibi kararlılığı da garanti altına alabilir. Şekil VI. 28'de klasik PD kontrolörlü bir sisteminin kapalı çevrim blok diyagramı görülmektedir.



Şekil VI. 28 Klasik PD Kontrolörlü Denetlenen Sistemin Kapalı Çevrim Blok Diyagramı

Türev elemanın çıkışından elde olunan etkiyen kontrol işareti, kontrol işaretinin türevidir. O halde türev alan elemanın kullanılmasıyla gereken kontrol işaretinin değişim hızı belirlenmekte ve etkiyen işaret olarak sisteme uygulanmaktadır.

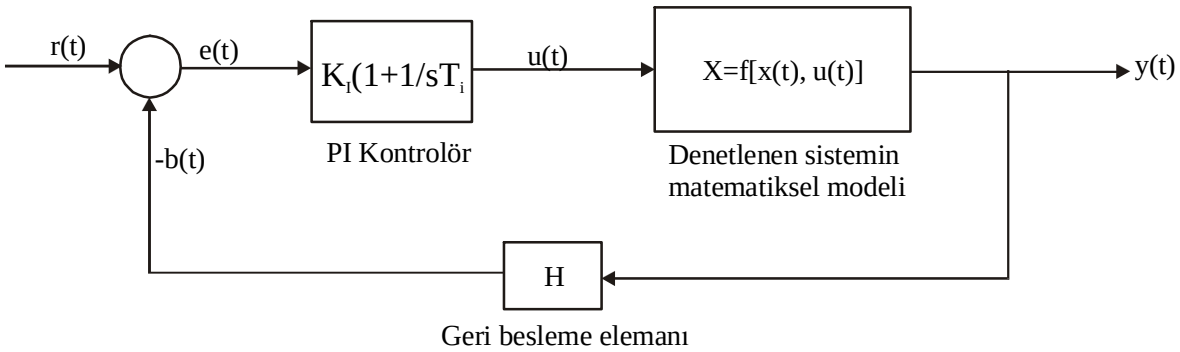
Sistemin birim basamak fonksiyonuna ilişkin çıkışın aşım değeri büyük ise y(t) ve e(t) eğrilerinin değişim hızı büyük olur. Bunun sonucunda etkiyen işaretin büyük olması sağlanmış olur. Etkiyen işaret e(t) büyük olunca, kontrol sistemi aşımın büyük olacağını önceden sezinler ve gerekli kontrol işaretini üretir.

Türev alan kontrol elemanı ancak zamana göre değişen e(t) değeri üzerine etkir. Eğer e(t) sabit ise, türev elemanının bu işaret üzerinde işlem yapma olanağı yoktur. Çünkü bu elemanın çıkışı sıfır olur. Türev elemanı yalnız başına kullanılmaz; orantı elamanı ile birlikte kullanılır.

VI.1.5.2.2 PI (Proportional-Integral=Oransal-Tümlevsel) Kontrolör

PI kontrolünün uygulanması ile şu sonuçlar elde edilmektedir.

- Sistemin derecesi bir derece yükselmektedir. Örneğin sistem ikinci dereceden ise üçüncü dereceden olmaktadır. Ayrıca sisteme bir sıfır eklenmektedir.
- Orantı ve integral kontrol, sistemi kararsız çalışma durumuna getirebilmektedir. Buna karşın kararlı hal hatasını sıfır yapmaktadır.



Şekil VI. 29 Klasik PI Kontrolörlü Denetlenen Sistemin Kapalı Çevrim Blok Diyagramı

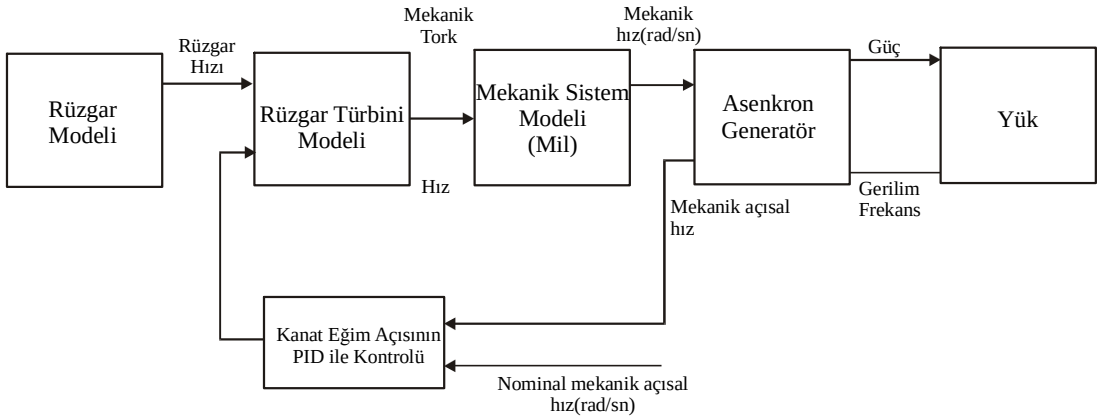
Orantı ve integral elemanın kullanılmasıyla elde olunan etkiyen u(t) işareti girişe uygulanan e(t)'nin integrali sonucu elde edilmektedir. Bu yapılan işlemin matematiksel denklemi ise,

$$u(t) = \left[K_I \left(e + \frac{1}{T_I} \int_0^t e dt \right) \right] \tag{6.6}$$

biçiminde ifade edilir. Kararlı bir sistemde t=∞ da sürekli halde e(∞)→0 olduğundan küçükte olsa bunun integrali alındığında integral ve orantı kontrol elemanının çıkışında bir işlenmiş kontrol işareti vardır ve dinamik olarak bu u(t) işareti , hatayı sıfır yapacak yönde etkir. PI ve PD kontrolünün birinci dereceden bir transfer fonksiyonuna sahip sisteme uygulandığında, PI kontrolör birim basamak girişine ilişkin çıkışının hatası sürekli halde sıfır olur. Buna karşılık orantı ve türev kontrolör elemanı kullanıldığında kontrol sistemlerinde sürekli hal hatası sıfır olmayabilir.

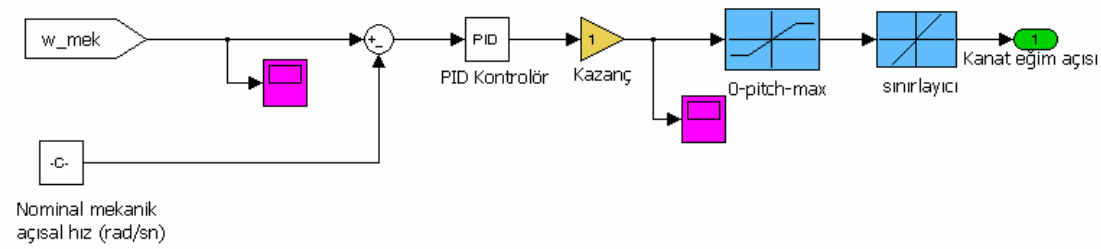
VI.1.5.2.3 Rüzgar Güç Üretim Sisteminin Kanat Eğimi Açısının Klasik PID Kontrolör ile Denetimi

Rüzgar güç üretim sistemlerinde yukarda ki bölümlerde de değinildiği gibi hız kontrolü ve güç sınırlama kontrolü olarak iki bölümde ifade edilmiştir. Her iki kontrol işlemi, rüzgar türbini kanat eğim açısı (pitch angle) kontrolü ile gerçekleştirilmektedir. Bu çalışmada, asenkron generatörün gerçek rotor hızı değerine dayalı olarak türbin kanat eğim açısını kontrol edilmesi amaçlanmıştır. Kanat eğim açısının kontrolü ile aynı zamanda güç sınırlaması kontrolü de gerçekleştirilmektedir. Şekil VI. 30'da, kanat eğim açısının klasik PID kontrolör ile denetimini içeren rüzgar güç üretim sisteminin blok diyagramı görülmektedir.



Şekil VI. 30 Rüzgar Türbini Kanat Eğim Açısının Klasik PID Kontrolör ile Denetimi

Rüzgar türbininin kanat eğim açısının kontrol edilmesiyle aynı zamanda asenkron generatörün mekanik açısal hızı oranlanmış değerde korunmaya çalışılmaktadır. Yine bu eğim açısı kontrolüne bağlı olarak sistemin frekansı da denetim altına alınmaktadır. Rüzgar türbin kanatlarının eğim açısını denetim altına alarak hız kontrolü sağlamakla birlikte sistemin frekansı ve rüzgar güç üretim sisteminin çıkış terminal gerilimini belirlenmiş işletme değerlerinde tutulmaktadır. Aşağıda Şekil VI. 31'de, Matlab/SIMULINK programında modellemesi ve simülasyonu gerçekleştirilen rüzgar güç üretim sisteminin generatörün hızına bağlı olarak türbin kanat eğimi açısının kontrol edilmesine ilişkin simülasyon blok diyagramı gösterilmektedir.



Şekil VI. 31 Rüzgar Türbinin Kanat Eğim Açısının Klasik PID Kontrolör ile Denetim Sisteminin Simülasyon Blok Diyagramı

Rüzgar türbini kanat eğim açısının kontrol blok diyagramı ile bağlantısı olan blok diyagramı Şekil VI. 11'de gösterilmiştir. Hız kontrolörü yüksek rüzgar hızlarında aktif olmaktadır. Rüzgar hızının daha yüksek olduğu durumlarda, üretilen gücün arttırılmasıyla uzun süreli kontrol edilememektedir. Türbin rotor hızının çok yüksek değerlerde olması sistemin mekanik bileşenleri zarar vermektedir. Yüksek değerlerdeki rotor hızının önüne geçmek için kanat eğim açısı, rotorun hava dinamiği verimliliğini sınırlandırmak için ayarlanır. Optimal kanat eğim açısı, nominal rüzgar hızında yaklaşık olarak sıfıra eşittir. Eğim açısı, nominal rüzgar hızının üzerindeki hızlarda rüzgar hızı ile birlikte artmaktadır. Kanat eğim açısının değişim oranı rüzgar türbinlerinin rotor kanatlarının boyutuyla ilişkilidir. Kanat açısının maksimum değişim oranı türbin kanat boyutlarına göre 3° ile 10° arasında ve minimum değişim oranı da -2° ile -90° arasında değişmektedir.

Rüzgar türbini rotor hızının nominal değerinin çok az üzerindeki değerlerde türbinin yapısında herhangi bir problem oluşturmaz. Rüzgar hızının değişken olması nedeniyle sistem hiç bir zaman kararlı değildir. Kararlı durum hatasını sıfıra yaklaştırmak için oransal kontrolle (P) birlikte integral (I) kontrol kullanılır. Yapılan çalışmada, eğim açısı kontrolünde asenkron generatörün oranlanmış hızı ile ölçülen rotor hızı arasında fark hata sinyali olarak belirlenir.

$$\Delta w = w_{gen_ölç} - w_{gen_ref} \tag{6.7}$$

$$u(t) = K_p \Delta w(t) + K_I \int_0^t \Delta w(t)dt + K_D \frac{d\Delta w(t)}{dt}$$

Elde edilen hata sinyali klasik PID kontrolöre gönderilir. Kontrolörün çıkışı, kanat eğim açısı sınırlayıcı bloklardan geçtikten sonra rüzgar türbini kanatlarının eğim açısı belirlenerek rüzgar türbin girişine uygulanır. Kanat eğim açısının klasik

PID kontrolör ile denetiminde, arzu edilen sonuca elde etmek için kontrol katsayıları deneme yoluyla elde edilmiştir. Rüzgar güç üretim sisteminin değişik tüketici yükleri ile yüklenmesi durumunda, klasik PID kontrolörün kazanç katsayıları da değişiklik gösterebilmektedir. Tüketici yük değerlerine göre PID kontrolörün kazanç katsayıları aşağıda Tablo VI. 2'de verilmektedir.

Tablo VI. 2 Kanat Eğimi Açısının Klasik PID Kontrolü İle Denetimine Ait Kontrolör Parametreleri

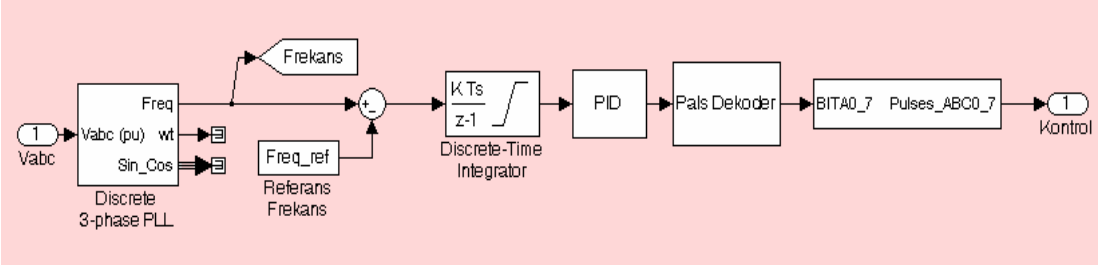
Tüketici yükü (kW)	K_P(oransal)	K_I (integral)	K_D(türevsel)
40	50	2	2.5
50	50	2	2.5
60	50	2	2.5
70	70	3	4
80	90	6	8.5
90	105	9	11.5
100	130	12	18
120	150	20	50

Asenkron generatörün rotor hızına dayalı olarak yapılan kanat eğimi açısının klasik PID ile kontrolünde, eğim açısı 2.5° ile -11.25° arasında değişmektedir.

VI.1.5.2.4 Rüzgar Güç Üretim Sisteminin Frekans Kontrolü

Rüzgar güç üretim sisteminde (RGÜS) elde edilen gerilim frekansı da, ayrı bir frekans kontrolör tarafından kontrol edilmektedir. Neticede, frekans değeri rotor hızına bağlı olarak değiştiği için bu kontrolör kullanılmadığı durumda da frekansta aşırı bir dalgalanma görülmüyor. Çünkü, rüzgar türbini kanat eğim açısı PID kontrolör tarafından denetim altında olduğundan sistem frekansı da kontrol altına alınmış olmaktadır. Yinede frekansı ikinci bir kontrolör kullanarak kararlı durumda korumak amacıyla frekans kontrolü çalışmada kullanılmıştır.

Frekans kontrolörün girişi yük uçlarındaki gerilimin frekansı ile ifade edilir. RGÜS'de çıkış terminal geriliminin frekansını ölçmek için Power System Toolbox içinde yer alan üç fazlı faz kilitlemeli çevrim (PLL) kullanılmıştır. Sistemin frekans hatasını elde etmek için, ölçülen frekans değeri referans frekans değeri ile karşılaştırılarak frekans hatası elde edilir. Elde edilen hata sinyali fazı elde etmek için ayrık zamanlı integral elemanına uygulanarak bütünleştirilir. Daha sonra PD kontrolör hata fazının türevini alır.



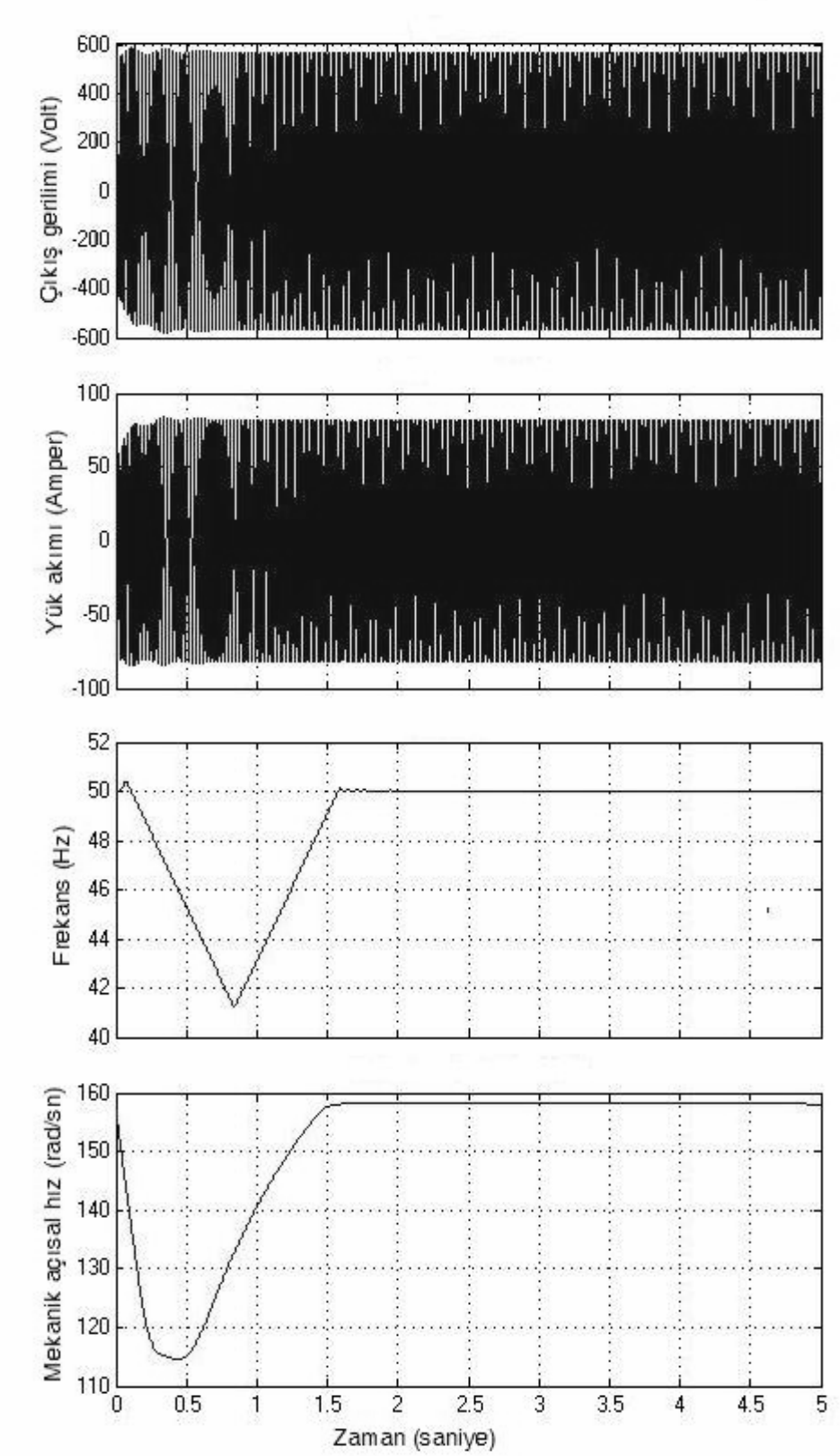
Şekil VI. 32 Frekans Kontrolün Simülasyon Blok Diyagramı

Şekil VI. 32'den görüldüğü gibi, PD kontrolörden elde edilen sinyal 8 bitlik sinyale dönüştürülür. Yük durumuna göre, anahtarlamalı yüklere (dump load) sinyaller gelmektedir. Frekans kontrol ünitesinin çıkışı; arzu edilen anahtarlamalı yük gücünü belirtir. Anahtarlamalı yük; 8 tane üç fazlı direncin GTO(Gate-Turn-Off) anahtarları ile paralel bağlanmasından oluşmaktadır. Anahtarlamalı yük 8 bitlik ikili(binary) sayı sistemine göre çalışmaktadır. Her bir faz 8 anahtarla kontrol edilir. Sonuçta 2^8 = 256 farklı anahtarlama olasılığı vardır. Her bir anahtarlama olasılığı neticesinde yük dirençleri farklı değerlerdedir.

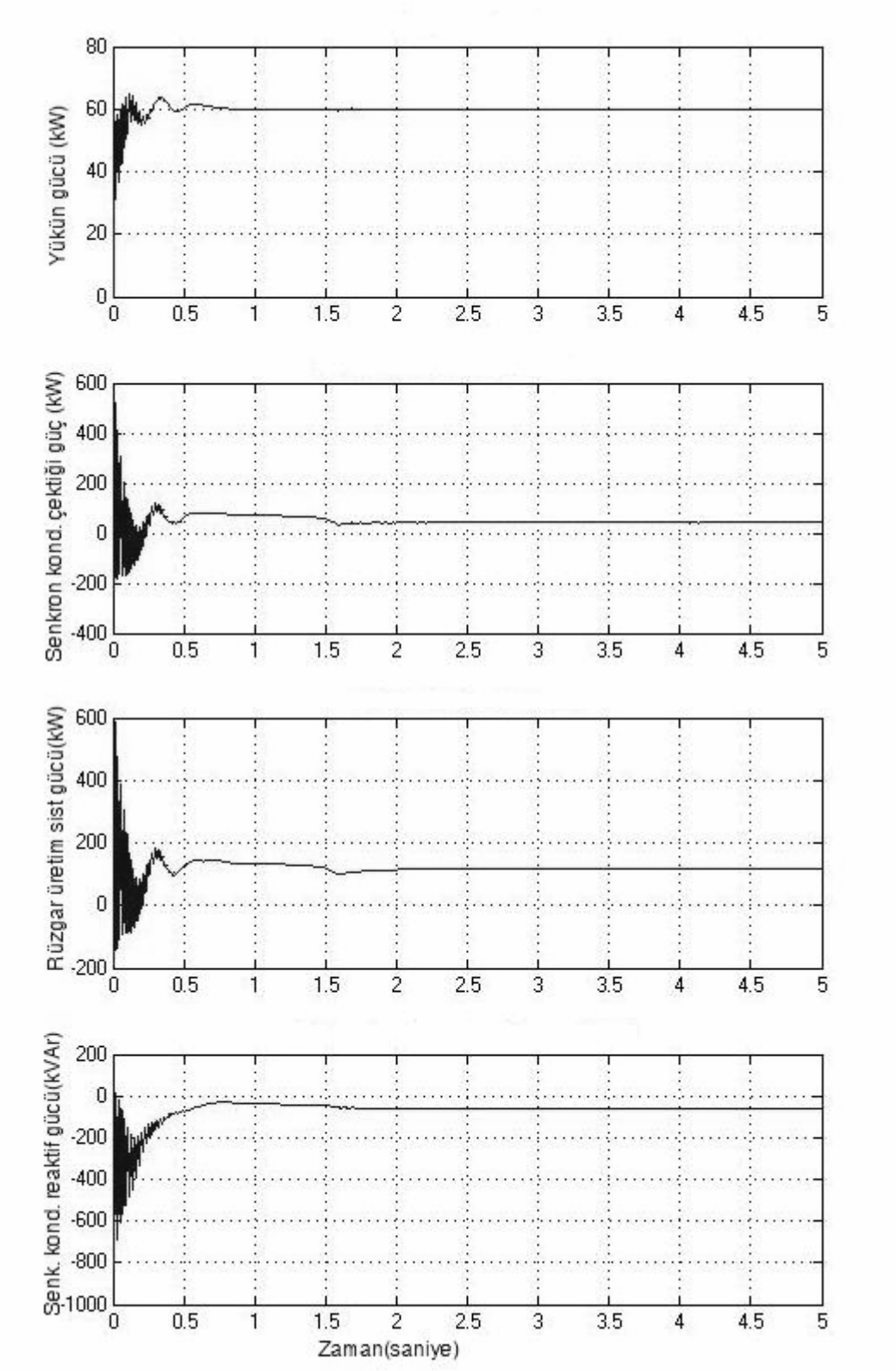
Frekans kontrolün çalışma prensibi; üretilen harici yük kumanda sinyalleri pals dekodere gider. Pals dekoder bir giriş sinyali, sekiz bitlik çıkış sinyali ve 256 farklı olasılığa sahiptir. Sekiz bitlik sinyal örnekleme sinyal bloğuna gider ve bu blok 3-faz pals sinyalleri üretir. Üretilen pals kontrol sinyaline göre harici dirençler anahtarlama (GTO) ile devreye girip çıkarak sistemin frekansı arzu edilen (50 Hz'de) değerde korunur. Anahtarlamalı yükler; şebekeden veya enerji dağıtım sistemlerinden yalıtılmış olarak güç üretim sistemlerinin gerilim ve frekans kontrolünde yaygın olarak kullanılmaktadır.

RGÜS'nin performansının iyileştirilmesi amacıyla kullanılan klasik PID kontrolör denetimli durumdaki simülasyon sonuçları aşağıda şekillerle gösterilmiştir. Bu kontrol işlemindeki amaç, sistem frekansının ve gerilimin arzu edilen değerde olması ve çekilen güçlerde tüketicilerin zarar görmemesi salınımları en aza indirmek sürekli durum hatalarını ise sıfıra çekmektir.

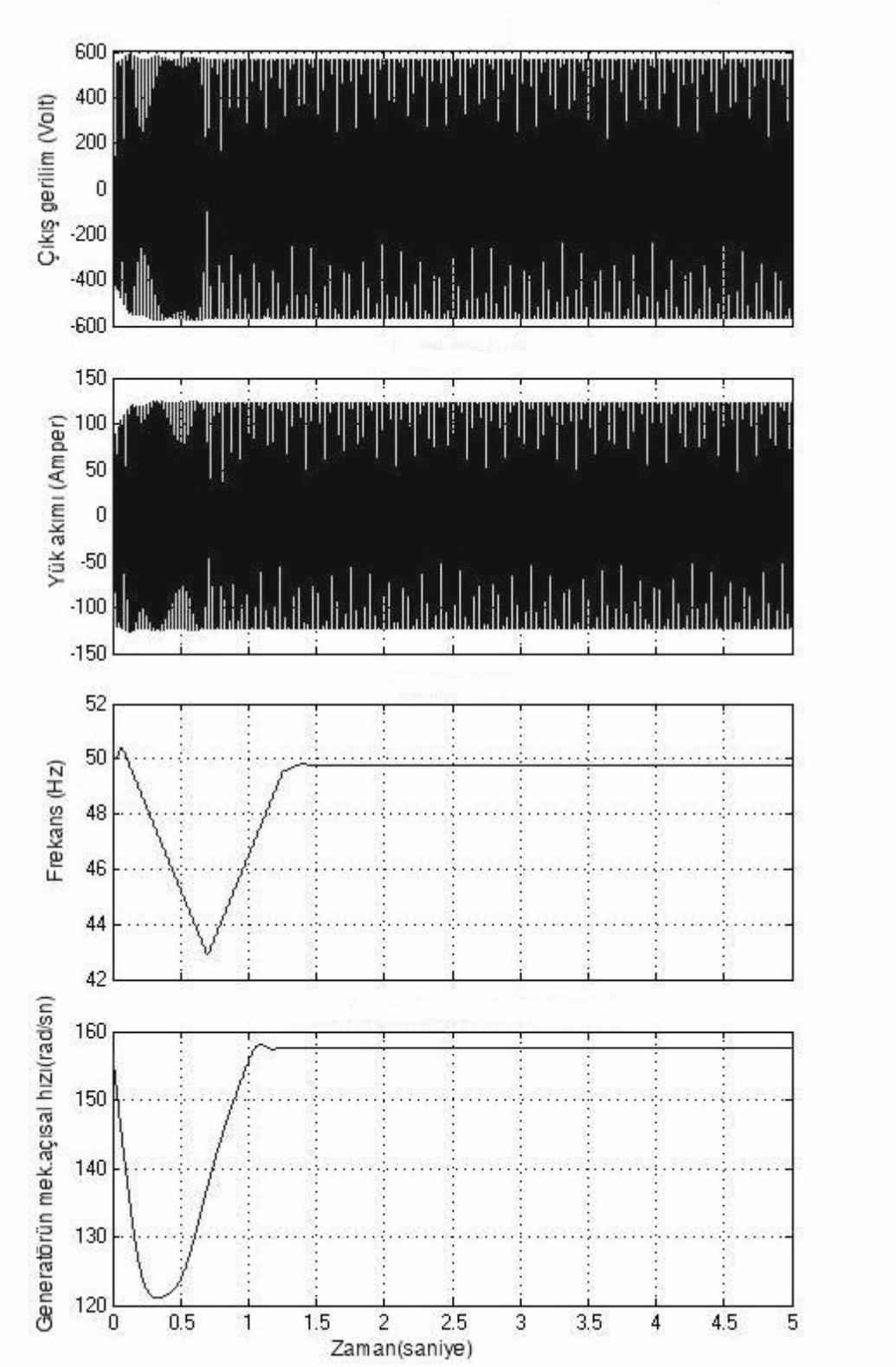
Yapılan çalışmada, şehir merkezinden uzak yerleşim birimlerindeki tüketicilerin yükleri 40kW, 60kW, 80kW, 100kW ve 120kW değerleri arasında değiştiği kabul edilmiştir. Değişken hızlı rüzgar türbininin kanat eğimi açısı denetiminin PID kontrolör ile yapılması durumunda, rüzgar güç üretim sisteminin belirtilen elektriksel büyüklerindeki değişimleri aşağıda ayrı ayrı simülasyon sonuçları ile gösterilmektedir.



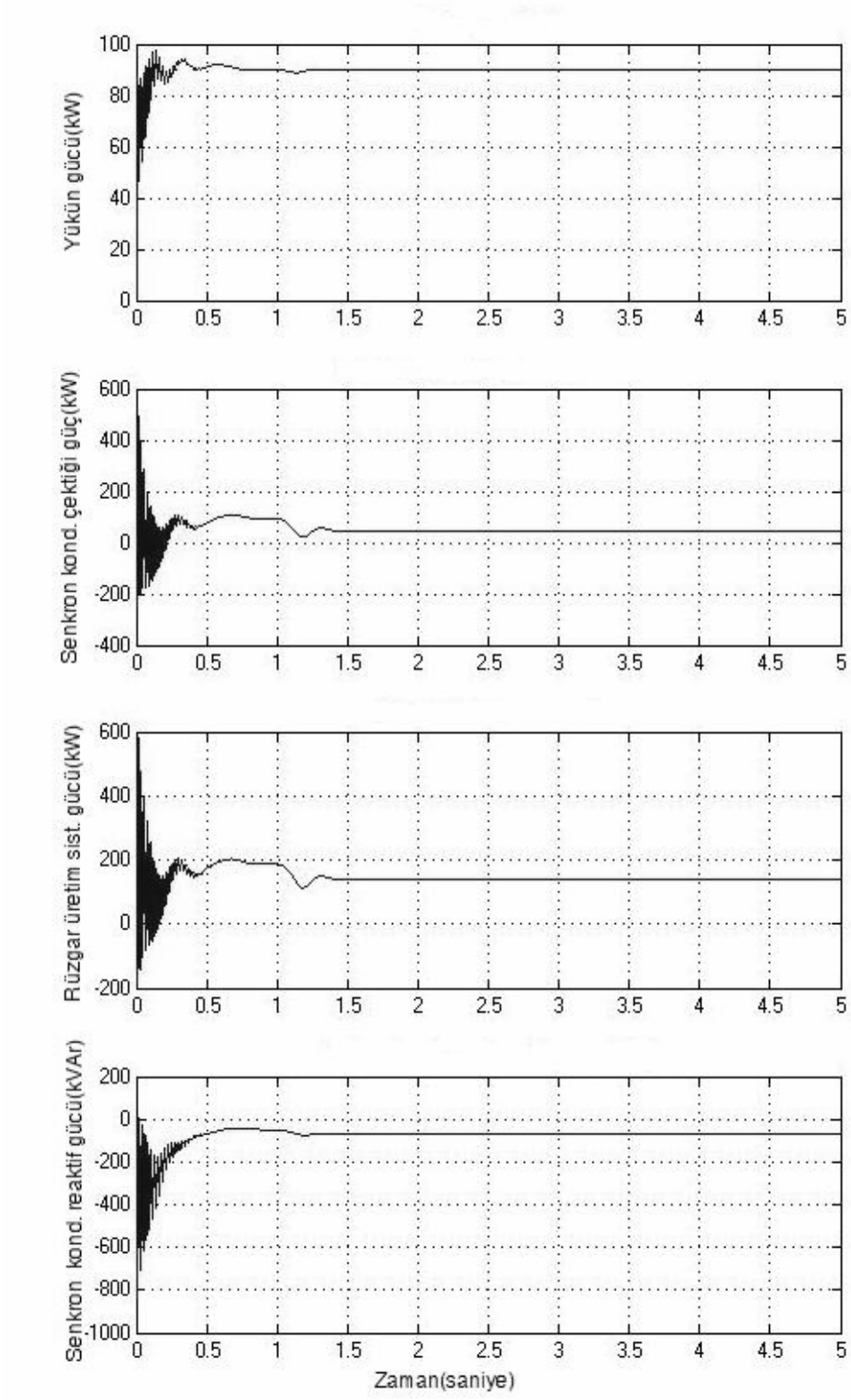
Şekil VI. 33 Klasik PID kontrollü Rüzgar güç üretim sisteminin 40kW'lık yükle yüklenmesi durumunda gerilim, akım, frekans ve generatör mekanik hızındaki değişim eğrileri



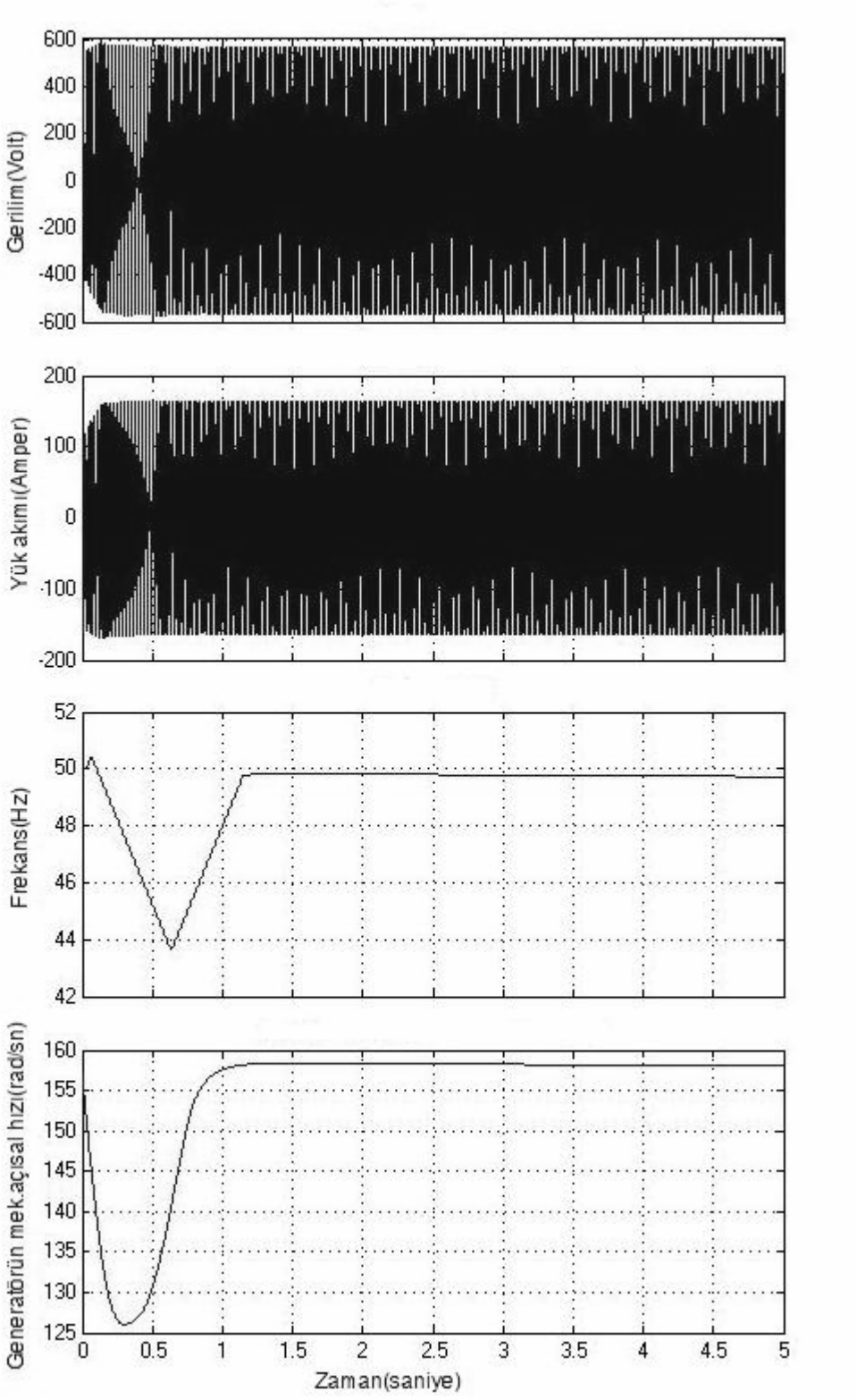
Şekil VI. 34 Klasik PID kontrollü Rüzgar güç üretim sisteminin 40kW'lık yükle yüklenmesi durumunda sistemden üretilen ve çekilen güçlerdeki değişim eğrileri



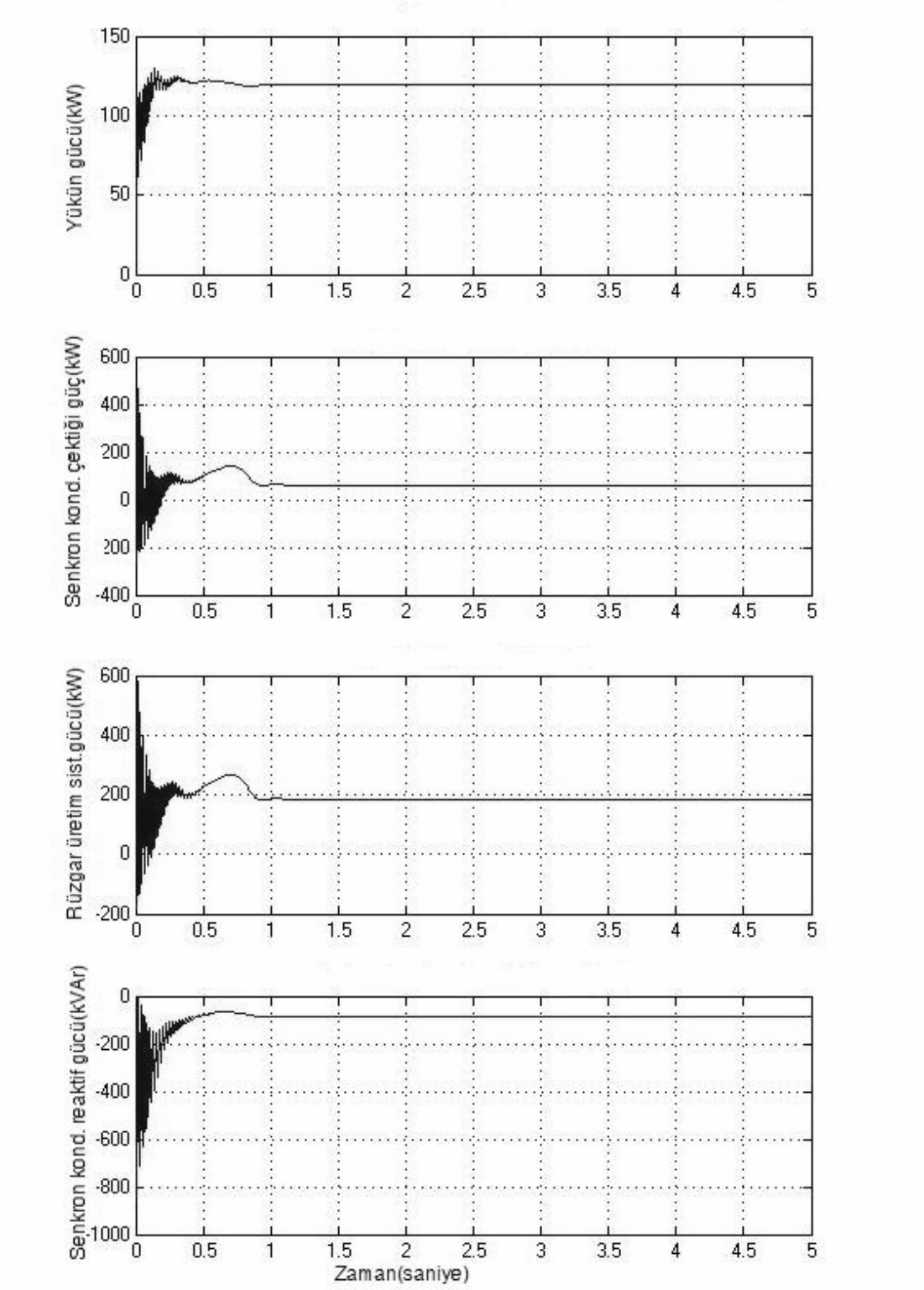
Şekil VI. 35 Klasik PID kontrollü Rüzgar güç üretim sisteminin 60kW'lık yükle yüklenmesi durumunda gerilim, akım, frekans ve generatör mekanik hızındaki değişim eğrileri



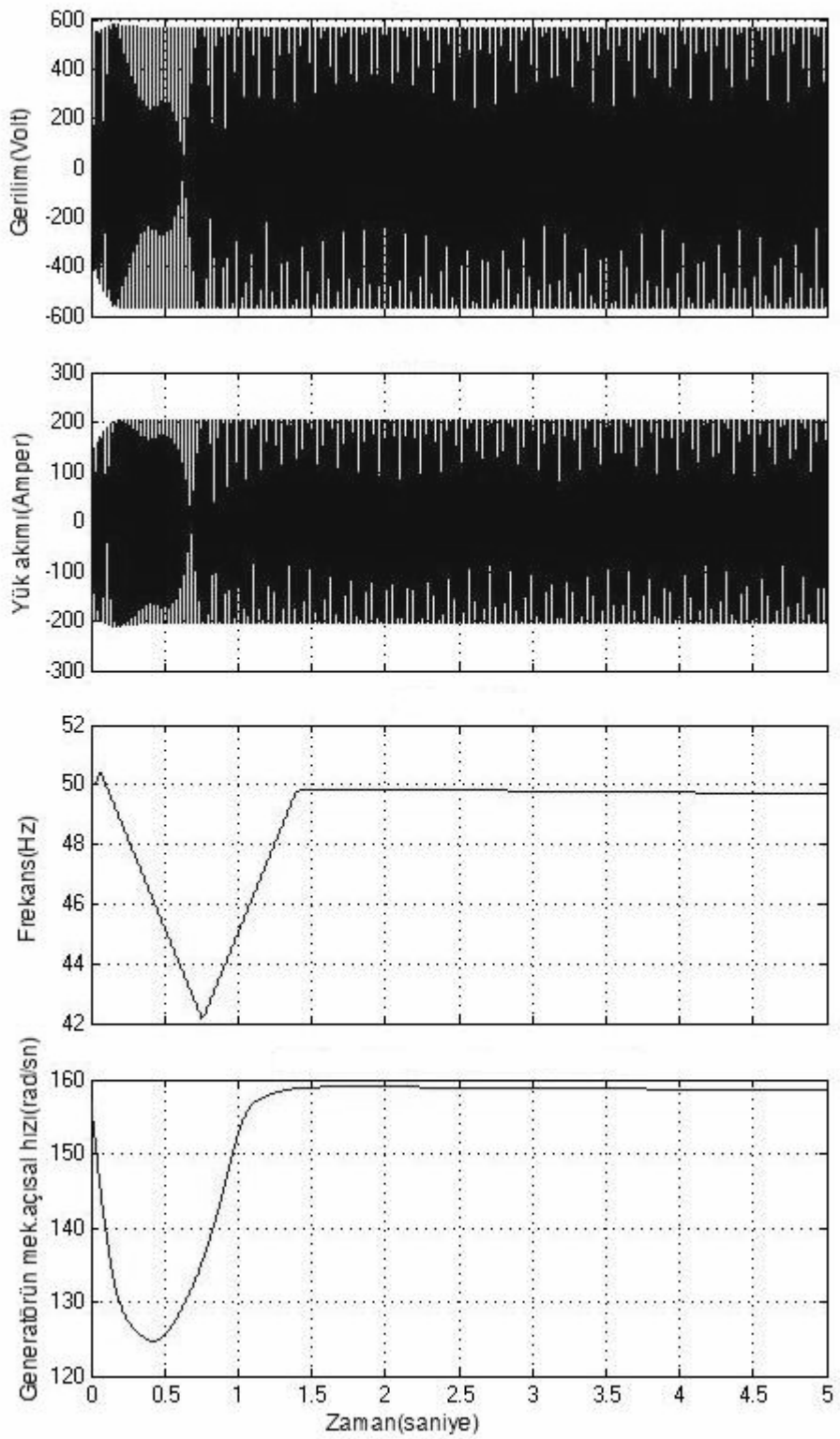
Şekil VI. 36 Klasik PID kontrollü Rüzgar güç üretim sisteminin 60kW'lık yükle yüklenmesi durumunda sistemden üretilen ve çekilen güçlerdeki değişim eğrileri



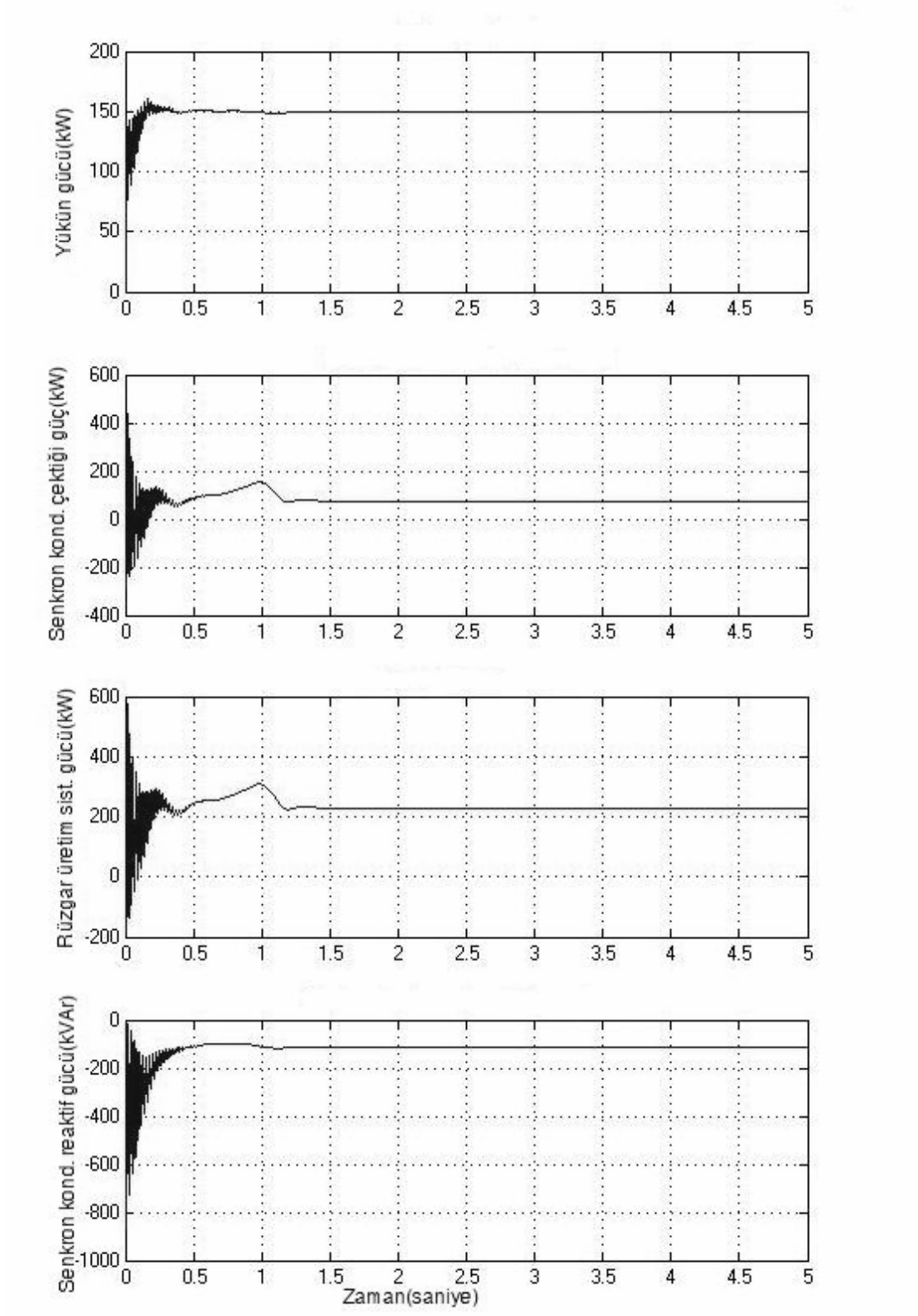
Şekil VI. 37 Klasik PID kontrollü Rüzgar güç üretim sisteminin 80kW'lık yükle yüklenmesi durumunda gerilim, akım, frekans ve generatör mekanik hızındaki değişim eğrileri



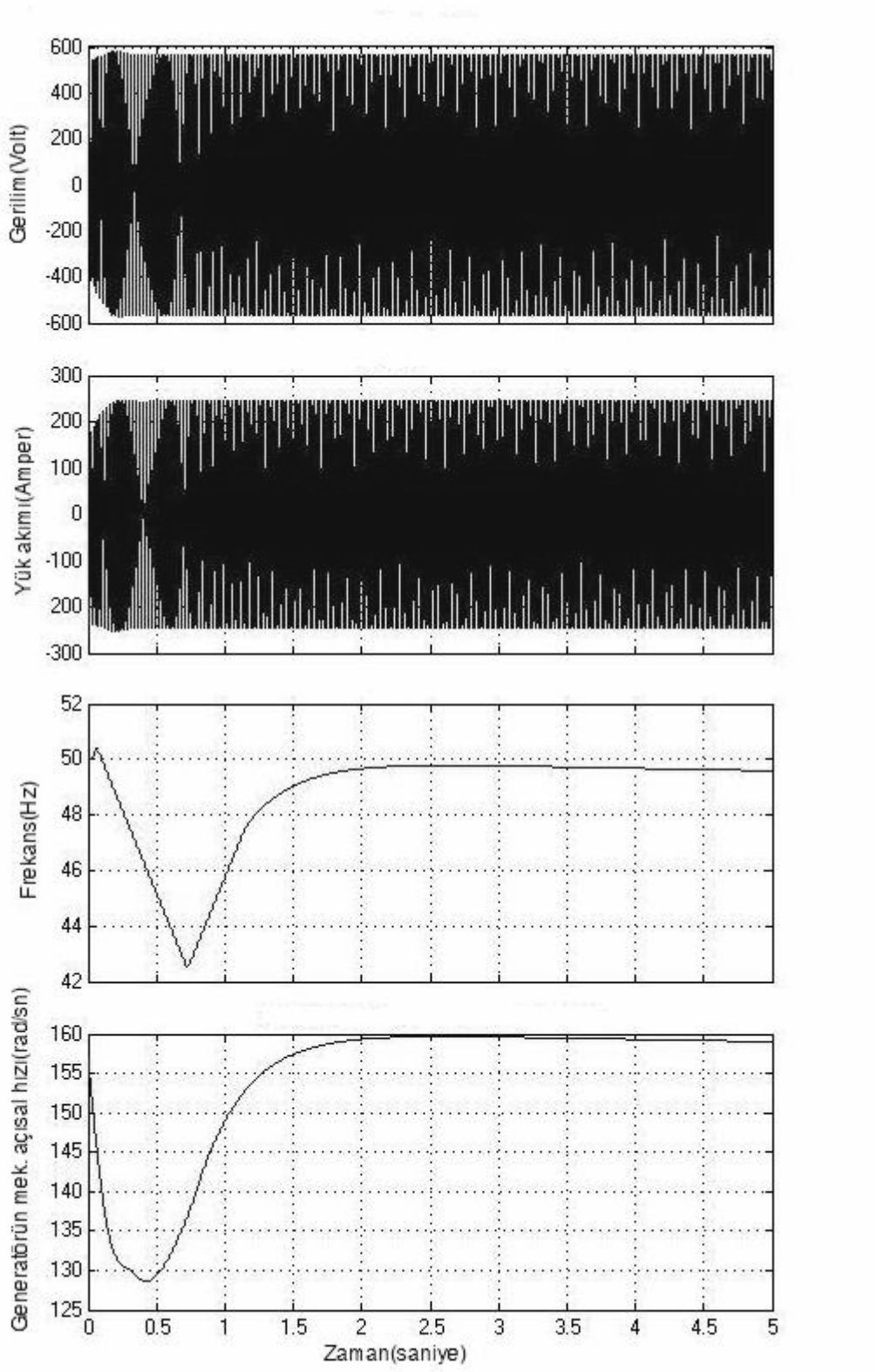
Şekil VI. 38 Klasik PID kontrollü Rüzgar güç üretim sisteminin 80kW'lık yükle yüklenmesi durumunda sistemden üretilen ve çekilen güçlerdeki değişim eğrileri



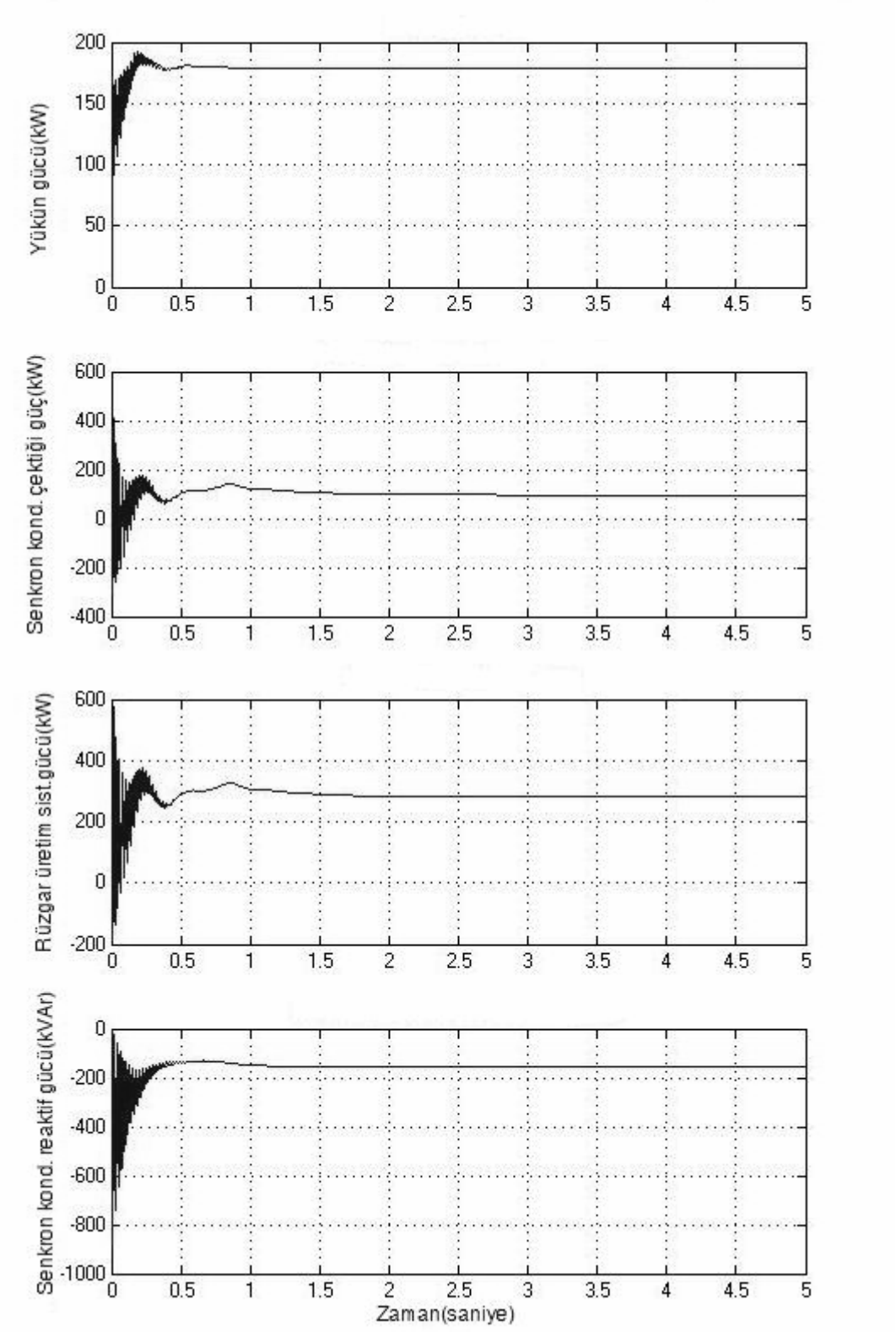
Şekil VI. 39 Klasik PID kontrollü Rüzgar güç üretim sisteminin 100kW'lık yükle yüklenmesi durumunda gerilim, akım, frekans ve generatör mekanik hızındaki değişim eğrileri



Şekil VI. 40 Klasik PID kontrollü Rüzgar güç üretim sisteminin 100kW'lık yükle yüklenmesi durumunda sistemden üretilen ve çekilen güçlerdeki değişim eğrileri



Şekil VI. 41 Klasik PID kontrollü Rüzgar güç üretim sisteminin 120kW'lık yükle yüklenmesi durumunda gerilim, akım, frekans ve generatör mekanik hızındaki değişim eğrileri



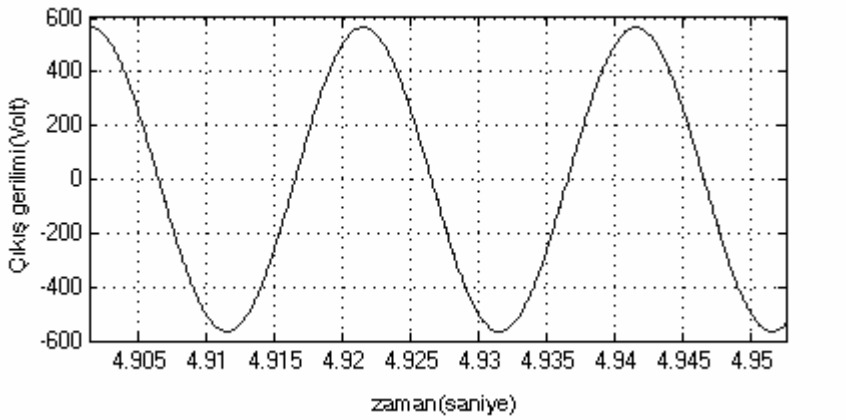
Şekil VI. 42 Klasik PID kontrollü Rüzgar güç üretim sisteminin 120kW'lık yükle yüklenmesi durumunda sistemden üretilen ve çekilen güçlerdeki değişim eğrileri

Rüzgar güç üretim sistemi tarafından 40kW, 60kW, 80kW, 100kW ve 120kW'lık tüketici yükleri beslenirken yük uçlarındaki gerilim, yük akımı, yük uçlarındaki gerilimin frekansı ve asenkron generatörün mekanik açısal hızındaki değişiklikler zamana bağlı olarak değişimi Şekil VI. 33, Şekil VI. 35, Şekil VI. 37, Şekil VI. 39 ve Şekil VI. 41'de gösterilmektedir. RGÜS'den yükün çektiği güç, RGÜS'ün üretim gücü, senkron kondansatörün harcadığı aktif güç ve senkron kondansatörün asenkron generatörün reaktif güç ihtiyacını karşılamak amacıyla ürettiği güçteki zamana bağlı olarak değişimler Şekil VI. 34, Şekil VI. 36, Şekil VI. 38, Şekil VI. 40 ve Şekil VI. 42'de sırasıyla verilmektedir. Elde edilen simülasyon sonuçlarını inceliğimiz zaman, bir önceki kontrolsüz durumdaki RGÜS'den alınan verilerle klasik PID kontrollü durumu karşılaştırdığımızda fark açık bir şekilde görülmektedir. Kontrolsüz durumdaki RGÜS'in çıkış geriliminin ve akımındaki sinüzoidal eğriden uzak görüntüsü yerine arzu edilen bicimde düzgün ve sinüzoidal eğri şeklini dönüşmüştür.

Farklı ham enerji kaynaklarına sahip bütün enerji üretim santrallarından elde edilen gerilim eğrisinin mümkün olduğu ölçüde sinüs eğrisine yaklaştırılmaya çalıştırılır. Aynı şekilde gerilimin frekansının işletme frekans değerinde olması arzu edilmektedir. Türkiye için kabul edilen işletme frekansı 50Hz olduğuna göre, yapılan çalışmada işletme frekansı 50Hz olarak kabul edilmiştir. RGÜS'nin çıkış geriliminin değeri ve sinüzoidal eğri biçiminde olması yine frekansın izin verilen sınırlar dahilinde gerçekleşmesi ile, RGÜS'den çekilen gücün kalitesini arzu ettiğimiz noktaya yaklaştırmış oluruz. Bunun dışında, sistemin kayıp gücünü ve elde edilen çıkış gerilimindeki harmonikleri de hiçbir zaman yok sayamayız. İfade ettiğimiz kayıp güç ve harmonik etkilerinin sisteme olan etkisini azaltmak için çeşitli geliştirilmiş önlemler mevcuttur. Harmonik etkisini azaltmak için aktif ve pasif filtreleme devreleri, kayıp gücü azaltmak için ise, seri ve paralel kompansatör devreleri v.b. gibi önlemler alınmaktadır.

Klasik PID kontrolör ile gerçekleştirilen değişken hızlı rüzgar türbininin kanat eğimi açısının denetiminde kontrolör girişinde rüzgar türbininin hızı veya rüzgar hızı Şekil VI. 31'de görüldüğü gibi yoktur. Asenkron generatörün rotor(mil) hızına bağlı olarak rüzgar türbini kanat eğim açısı ayarlaması gerçekleştirilir. Çünkü rüzgar türbin sisteminden elde edilen güç kanat eğim açısına(θ) ve rüzgar türbininin oranlanmış hız oranına(λ) bağlı olarak değişiklik göstermektedir. Yapılan çalışmada, MWT-300kW'lık değişken hızlı rüzgar türbininin oranlanmış hızı 15.5m/sn değerinde iken,

tüketici yük oranlarının değişmesi durumunda çıkış gerilimi ve frekansını izin verilen değerlerde korunmaya klasik PID kontrolör denetimi altında çalışılmıştır. Simülasyon çalışmasında, elde edilen gerilimin değeri maksimum(peak) değerdir. Asenkron generatörün nominal gerilim değeri 400 Volttur. Bu gerilimin maksimum değeri U_{max}= *U*x*Ö2* = 400x*Ö2=565 volt* olarak simülasyon çalışmasından elde edilmiştir. İndüklenen gerilim değeri maksimum değerinde olunca çekilen akımda buna bağlı olarak maksimum değerindedir. Sonuçta, RGÜS'den çekilen ve giren reaktif güç değerleri de maksimum değerdedirler. Yukarda verilen çıkış gerilimi eğrileri 5sn'lük simülasyon eğrisi şeklinde verildiğinden eğriler sıkıştırılmış olarak üst üste gelmiştir. Elde edilen gerilim eğrisinin sinüs eğrisi biçiminde olduğunu göstermek amacıyla gerilim eğrisi yeniden Şekil VI. 43'de gösterilmektedir.

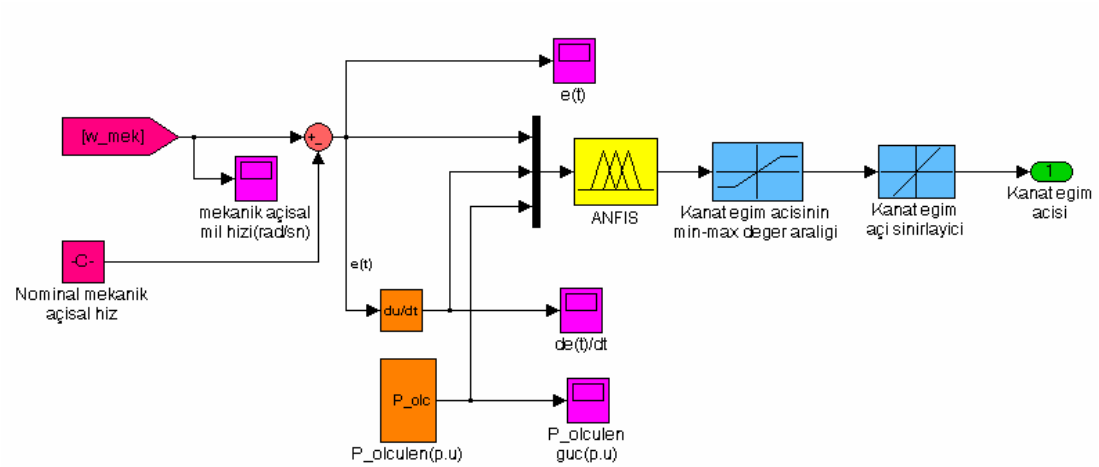


Şekil VI. 43 RGÜS'nin Çıkış Geriliminin 0.1 Saniyelik Zaman Dilimindeki Eğrisi

Klasik PID kontrolör ile her bir yük değeri için istenilen bicimde sonuçlar alınmıştır. Yani sistemin 40kW, 60kW, 80kW, 100kW ve 120kW'lık yük durumlarında bütün elektriksel büyüklükleri 1 ile 2 saniye arasında kararlı çalışma durumuna istenilen değerlerde gelmektedir. Güç üretim sistemlerinde, sürekli hal hatasının belirtilen kısa sürede sıfıra yakın olması işletmenin en iyi çalışma performansına sahip olduğunu söyleyebiliriz. Çalışmada kullanılan klasik PID kontrolörün, her değişen yük kademesinde gerilimi 565 Volt'ta ve frekansı 50Hz civarında tutmak için kazanç katsayıları (K_P, K_I ve K_D) yeniden ayarlanmıştır. Kazanç katsayıları ayarlama işlemi deneme yoluyla gerçekleştirilmiştir. Klasik PID kontrolör tek işletme noktası için düşünüldüğünde çok iyi bir kontrol diyebiliriz. Ancak değişik yük durumlarında veya işletme durumlarında klasik PID kontrolörün kazanç parametrelerini yeniden ayarlamak zor olduğundan kazanç katsayılarını otomatik olarak ayarlayan ileri düzey kontroller geliştirilmiştir.

VI.1.5.3 Rüzgar Güç Üretim Sisteminin Kanat Eğimi Açısının Adaptif Neuro-Fuzzy Kontrolör ile Denetimi

Rüzgar güç üretim sisteminin işletme performansını geliştirmek, istenilen kalitede ve değerde güç elde etmek için adaptif neuro-fuzzy çıkarım sistemine dayalı kontrolör dizayn edilmiştir. Adaptif neuro-fuzzy çıkarım sistemi Bölüm IV'de ayrıntılı bir şekilde anlatılmıştır. Rüzgar güç üretim sisteminin klasik PID kontrolörü ile denetiminde belirtildiği gibi, değişken hızlı rüzgar türbininin kanat eğim açısının adaptif neuro-fuzzy çıkarım kontrolörü(ANFÇK) ile denetimi yapılarak hem asenkron generatörün hız ayarı hemde güç sınırlaması kontrolü yapılabilmektedir. RGÜS'nin çıkış geriliminin frekansı da asenkron generatörün hızıyla doğru orantılı olduğundan aynı zamanda frekans ayarlaması da yapılmaktadır.



Şekil VI. 44 Rüzgar Türbinin Kanat Eğim Açısının Klasik PID Kontrolör ile Denetim Sisteminin Simülasyon Blok Diyagramı

RGÜS'nin kanat eğim açı denetiminin ANFÇK ile gerçekleştirilmesine ait simülasyon blok diyagramı Şekil VI. 44'de gösterilmektedir. Asenkron generatörün mekanik açısal hızı ile nominal mekanik açısal hız arasındaki fark hata sinyalini vermektedir. Çalışmada kullanılan sincap kafesli asenkron generatör 4 kutuplu olduğuna göre nominal mekanik açısal hızı;

$$w_{mek_nominal} = \frac{2 \cdot p \cdot n_s}{60} = \frac{2 \cdot p \cdot 1500}{60} = 157.0796 \text{ rad/sn}$$

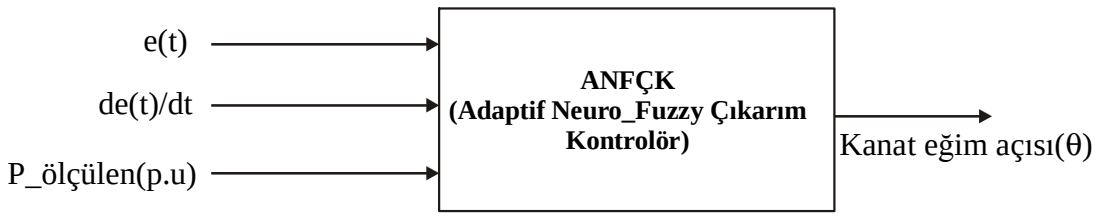
olarak hesaplanır. n_s; asenkron generatörün senkron hızı veya döner alan hızı olarak ifade edilir. ANFÇK'ne gelen üç giriş sinyallerinden birincisi; hata sinyali *e(t)*,

ikincisi; hata sinyalinin zamana göre değişimi *de(t)/dt* aşağıda verilen bağıntılarla ifade edilmiştir.

$$e(t) = w_{mek} - w_{mek_nominal} \tag{6.8}$$

$$\frac{de(t)}{dt} = \frac{w_{mek} - w_{mek_nominal}}{dt} \tag{6.9}$$

ANFÇK'nün üçüncü giriş sinyali ise; RGÜS'nin çıkış uçlarından beslenen yükün uç gerilim ve yük akımı değerlerine göre çekilen gücün birim değer(per-unit) olarak hesaplanmış $P_{_ölçülen}$(p.u) değeridir. Şekil VI. 45'de değişken hızlı rüzgar türbininin ANFÇK'lü kanat eğim açısı denetiminin basitleştirilmiş blok diyagramı gösterilmektedir. Kontrolör elemanının çıkış sinyali ise kanat eğim açısının maksimum düzeyde belirlenmiş değeridir. Bu belirlenen maksimum düzeydeki değer, kanat eğim açısının min-max aralığını sınırlayan devre elamanı ve kanat eğim açı sınırlayıcıdan geçerek rüzgar türbin sisteminin girişine uygulanır. Neticede, sistemin istenilen kararlılıkta çalışabilmesi için kanat eğim açı değeri son şeklini alarak türbin sistemi girişine uygulanmaktadır.



Şekil VI. 45 Değişken Hızlı Rüzgar Türbininin ANFÇK'lü Kanat Eğim Açısısı Denetiminin Basitleştirilmiş Blok Diyagramı

ANFÇK ile değişken hızlı rüzgar türbininin kararlı çalışabilmesi için öncelikle sistemi çok iyi tanımamız veya analiz etmemiz gerekmektedir. Eğer sistemi iyi analiz edememişsek yapacağımız kontrol işleminden hiç zaman başarı elde etmemiz mümkün görülmemektedir. Bu yapılan çalışmada, rüzgar türbin sisteminin kanat eğim açısını ayar ederek sistemin frekansı, çıkış terminallerinden elde edilen gerilimin ve tüketicilerin çektiği gücün sürekli ve istenilen değerde kararlık içinde olması hedeflenmiştir. Yukarda ki bölümlerde de ifade edildiği gibi kanat eğim açı denetimini yaparak RGÜS'nin hız kontrolü ve güç sınırlaması gerçekleştirilmiş olmaktadır. Öncelikli amacımız bu çalışmada, hız kontrolünü gerçekleştirerek sistemin frekansını ve gerilimini arzu edilen noktaya getirmek

olmuştur. Hız kontrolünü gerçekleştirmekle birlikte güç sınırlaması da aynı zamanda yapılmıştır.

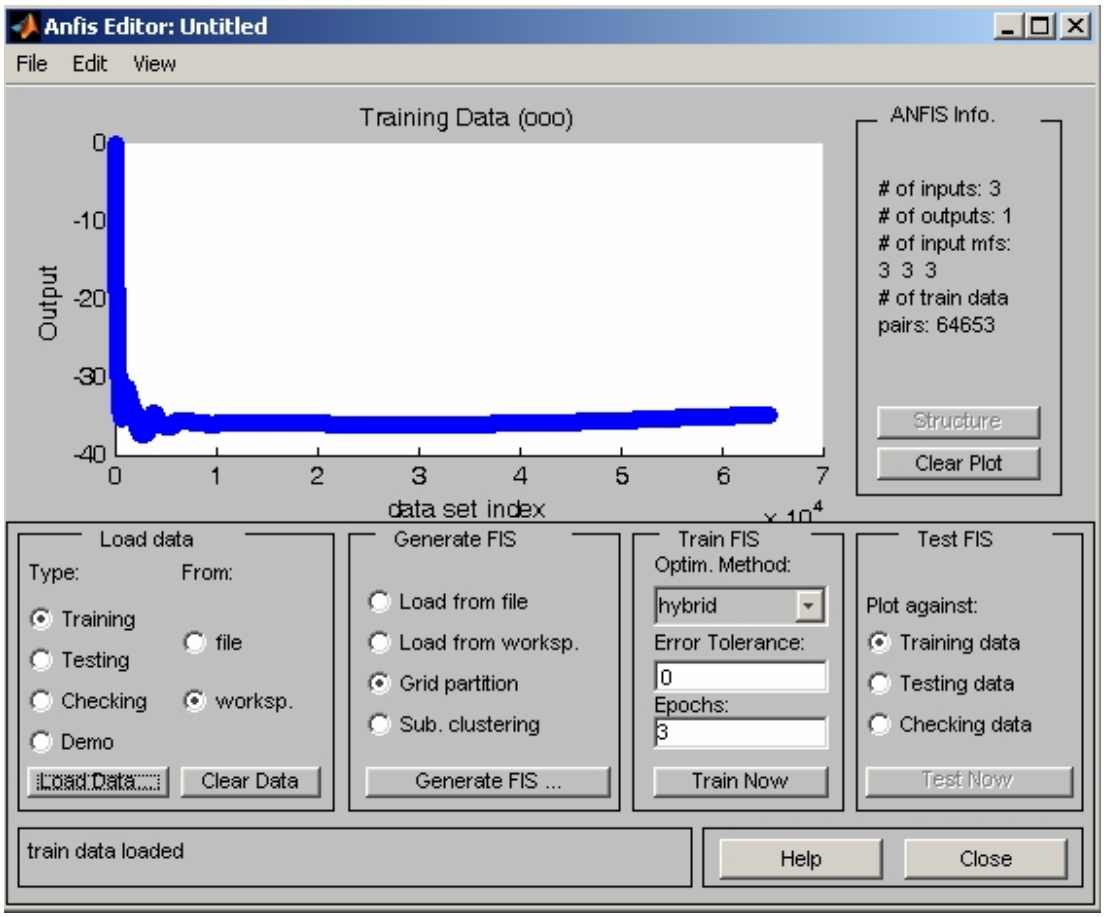
RGÜS'nin frekansı, gerilimi ve tüketicilerin çektiği güç kalitesi istenilen özellikte iken kanat eğim açı değerleri farklı yük kademlerinde ayrı ayrı belirlenmiştir. Belirlenen bu değerler ANFÇK'ün çıkış büyüklüğünü oluşturmuştur. RGÜS'nin yedi farklı 40kW, 50KW, 60kW, 70kW, 80kW, 100kW ve 130kW değerlerindeki tüketici yüklerinin talep ettiği enerjiyi karşılarken sistem frekansının ve geriliminin belirlenmiş oranlarda korunması sağlanmıştır. Genellikle elektrik işletmelerinde izin verilen maksimum gerilim düşümü değeri ±%5 değerindedir. Şebekelerde frekans değer aralığındaki durum içinde, maksimum değişim aralığı ±%1 olarak ifade edilmektedir. Matlab programı aynı anda 65536 adet veriyi işlediği için 4 farklı yük kademesi için ANFÇK veri tabanı oluşturulabiliyor. Çünkü yukarda belirttiğimiz yedi farklı yük kademesini aynı ANFÇK tabanına koymak istediğimizde Matlab programında herhangi bir işlemi gerçekleştiremiyoruz. Kalan üç farklı yük kademesi içinde ayrı bir ANFÇK veri tabanı oluşturulmuştur.

RGÜS'nin kontrolsüz durumundaki hata sinyali ***(e(t))***, hata sinyalindeki değişim sinyali ***de(t)/dt*** ve ölçülen güç ***P_ölçülen*** sinyal verileri ayrı ayrı kayıt edilmiştir. Daha sonra bu kayıt edilen veriler, MATLAB programında yer alan Fuzzy Logiç Toolbox içersinde ***anfisedit*** yazılımının kullanımıyla işlenmiştir. Bu veriler Bölüm IV'de anlatılan hibrid öğrenme algoritması kullanılarak eğitimden geçirilerek önceden tespit ettiğimiz çıkış büyüklüğü ile üst üste gelmesi gerekmektedir. Eğer belirlediğimiz çıkış sinyali ile ***anfisedit*** yazılımında yapılan eğitim neticesinde elde edinilen sinyaller birebir uymuyorsa sistemin kararlı çalışmasından söz edemeyiz.

Aşağıda Tablo VI. 3'de, RGÜS'nin kanat eğim açısı denetiminin ANFÇK' ile yapılmasında ANFÇK'nün veri tabanının ve bulanık (fuzzy) çıkarım sisteminin oluşturulmasında kullanılacak olan datalar verilmiştir. Toplam kullanılan data sayısı 64654 adettir. Bütün dataları vermemiz durumunda çok yer kaplayacağından sınırlı sayıda verilmiştir.

Tablo VI. 3 ANFÇK'nin veri tabanının oluşturulması için kullanılan giriş ve çıkış data değerleri

Veri adeti	Hata[e(t)]	Hatadaki değişim[de(t)/dt]	Ölçülen Güç (p.u)	Kontrolör Çıkışı [u(t)]
1	-0.000104	0	0	-0.0004056
2	-0.000104	0	0	-0.0004056
3	-0.000146312	-201.3793552	3.14482E-07	-0.000570618
4	-0.000230937	-201.3787778	2.8261E-06	-0.000900653
5	-0.000479869	-201.3765019	2.46226E-05	-0.001871488
6	-0.000831779	-201.3724022	9.14635E-05	-0.003243938
7	-0.002591205	-201.3579958	0.001020219	-0.0101057
8	-0.004350422	-201.3339867	0.002840509	-0.016966644
9	-0.006109428	-201.3099799	0.005428364	-0.02382677
10	-0.007868225	-201.2859754	0.008672956	-0.030686078
11	-0.009626812	-201.2619733	0.012475308	-0.037544568
12	-0.01138519	-201.2379735	0.016747138	-0.04440224
13	-0.013618116	-201.2107362	0.022727411	-0.053110653
14	-0.015850704	-201.180262	0.029197766	-0.061817747
15	-0.018739103	-201.1453135	0.038103737	-0.073082503
16	-0.021626936	-201.105892	0.047408362	-0.084345052
17	-0.025283027	-201.0612293	0.059489856	-0.098603807
....	....	....	....	....
....	....	....	....	....
....	....	....	....	....
....	....	....	....	....
....	....	....	....	....
....	....	....	....	....
....	....	....	....	....
64634	-9.166378281	0.231014723	0.53909535	-35.7488753
64635	-9.166368317	0.230969473	0.539095343	-35.74883644
64636	-9.166337095	0.230782351	0.539095318	-35.74871467
64637	-9.166337095	0	0.539095318	-35.74871467
64638	-9.16633212	0.230595112	0.539095313	-35.74869527
64639	-9.166322174	0.230549851	0.539095305	-35.74865648
64640	-9.166291009	0.230362693	0.53909528	-35.74853494
64641	-9.166291009	0	0.53909528	-35.74853494
64642	-9.166286044	0.230175416	0.539095274	-35.74851557
64643	-9.166276115	0.230130144	0.539095266	-35.74847685
64644	-9.166245008	0.22994295	0.539095242	-35.74835553
64645	-9.166245008	0	0.539095242	-35.74835553
64646	-9.166240051	0.229755638	0.539095236	-35.7483362
64647	-9.166230139	0.229710353	0.539095228	-35.74829754
64648	-9.166199091	0.229523124	0.539095203	-35.74817645
64649	-9.166199091	0.598130841	0.539095203	-35.74817645
64650	-9.166194142	0.229335779	0.539095197	-35.74815716
64651	-9.166184248	0.22929048	0.539095189	-35.74811857
64652	-9.166153257	0.229103215	0.539095164	-35.7479977
64653	-9.166153257	0	0.539095164	-35.7479977
64654	-9.166148318	0.228915833	0.539095158	-35.74797844

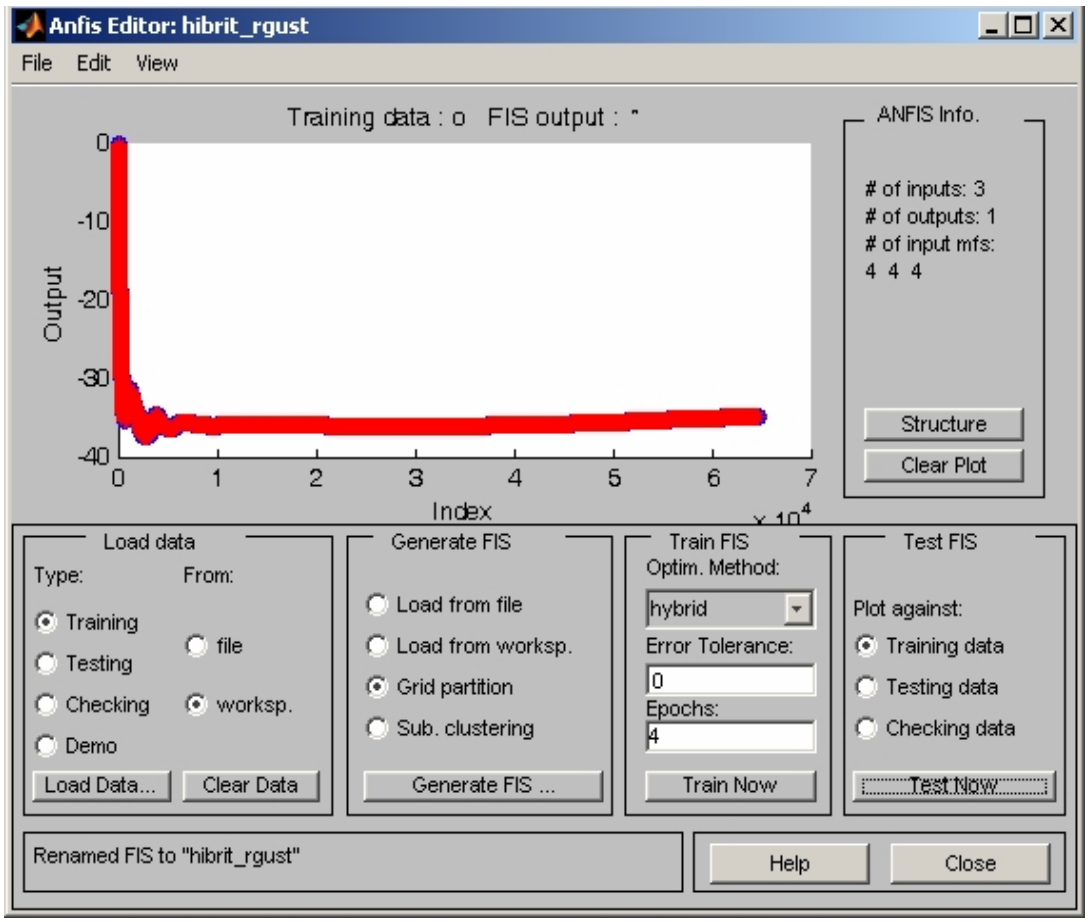


Şekil VI. 46 RGÜS'nin Kanat Eğim Açı Denetiminin ANFÇK ile Yapılması İçin Kontrolör Giriş ve Çıkış Datalarının ANFIS Editörüne Aktarımının Görüntüsü

Tablo VI. 3'de verilen toplam 64654 data ***anfisedit*** yazılımına aktarılır. Bu yazılım ile bulanık çıkarım sistemini otomatik olarak oluşturmak için üyelik fonksiyonu tipi, dilsen değişken sayısı ve kaç iterasyon yapılarak hibrid öğrenme algoritmasının uygulanacağı tespit edilmiştir. Aşağıda Şekil VI. 46'da ANFIS editörüne kontrolör giriş ve çıkış datalarının aktarıldıktan sonraki görüntüsü verilmektedir.

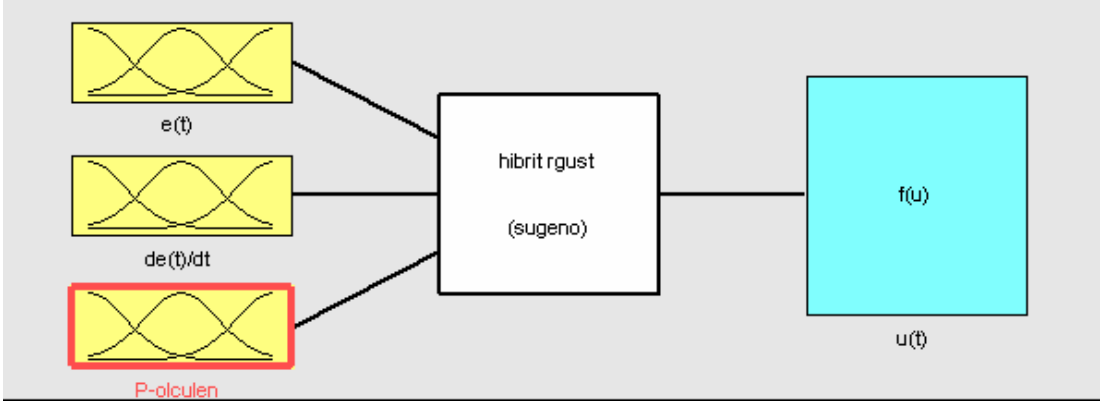
ANFIS editörüne veri aktarım işlemi tamamlandıktan sonra, RGÜS'nin kanat eğim açısı kontrolü için üyelik fonksiyonu tipi üçgen, dilsel değişken sayısı dört ve hibrid öğrenme algoritması ile dataların eğitimi için dört iterasyon(deneme) uygulanmıştır. Dört iterasyon sonucunda, sistemin kararlı çalışma durumu için önceden belirlediğimiz kontrolör çıkışına göre sistemin çalışma anında giriş sinyalleri eğitilmiştir. Önceden belirlediğimiz kontrol çıkışı ile eğitim sonucunda elde edilen kontrol çıkışı üst üste çıkmış olması gerekir ki, RGÜS'den beklenilen elektriksel büyüklük değerlerini elde edelim. Hibrid öğrenme algoritması sonucunda

da istenilen durumun gerçekleştiğini gösteren durum Şekil VI. 47'de gösterilmektedir.

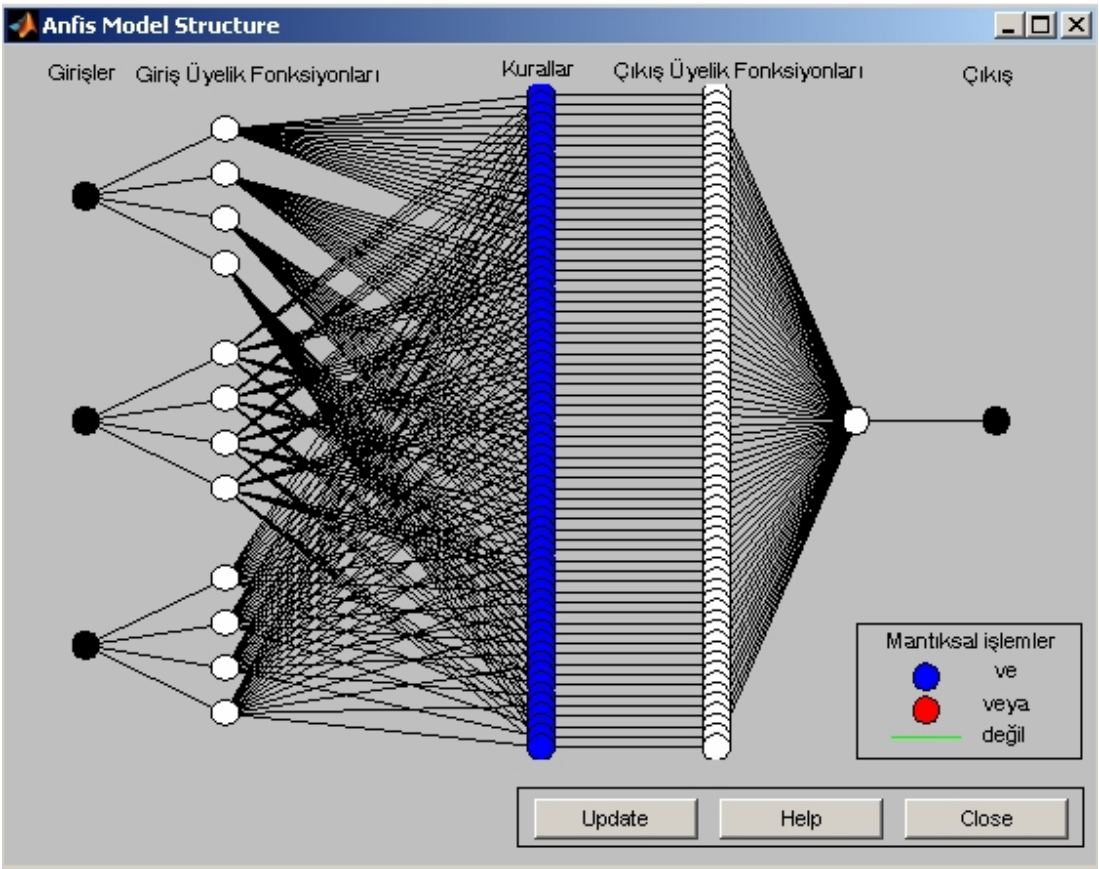


Şekil VI. 47 Kanat Eğim Açısı Denetimi İçin Kullanılan ANFÇK'nun Veri Tabanına Hibrid Öğrenme Algoritmasının Uygulanması Sonucunda Çıkış Sinyalinin Son Durumu

ANFIS editörde verilen eğitimi sonucu, üç giriş ve bir çıkış sinyaline sahip Sugeno tipi bulanık çıkarım sistemi (Fuzzy Inference System) otomatik olarak Şekil VI. 48'de görüldüğü gibi elde edilmiştir. Bu elde edilen bulanık çıkarım sisteminin girişlerinin üçgen tipi üyelik fonksiyonlarının değer aralıkları ile birlikte aşağıda gösterilmiştir.



Şekil VI. 48 RGÜS için Sugeno Tipi ANFÇK'nün Üç Giriş ve Bir Çıkış Sinyalinden Oluşan Yapısı



Şekil VI. 49 Kanat Eğimi Açısı Denetimi İçin Dizayn Edilen ANFÇK'nün Yapısı

Sugeno tipi ANFÇK'nün çıkış reel sayılardan oluştuğundan dolayı giriş sinyali üyelik fonksiyonu gibi işaretlemesi söz konusu değildir. Çıkış değişkeni 64 adet reel sayılardan oluşmaktadır ve değer aralığı -42.79 ile $3.5 \cdot 10^{-9}$ dir.

Şekil VI. 49'dan ANFÇK'nün genel yapısı Bölüm VI'de belirtildiği gibi beş tabakan oluşmaktadır. Kural tabanını oluşturulurken mantıksal işlemlerden ***"ve"*** operatörü kullanılmıştır. ANFÇK'nün giriş değişkenlerinin üyelik fonksiyonları

dilsel değişkenleri ve değer aralıkları ile birlikte Şekil VI. 50, Şekil VI. 51 ve Şekil VI. 52'de ayrı ayrı gösterilmektedir. Elde edilen bulanık çıkarım sisteminin kural tabanı 64 tane kuraldan oluşmaktadır. Bu kurallarla ilgili ayrıntılı bilgi Ek.B'de verilmişdir.

ANFÇK'nin giriş değişkenlerinden hata sinyalinin *[e(t)]* dilsel değişkenleri; çok büyük negatif (ÇBN), büyük negatif(BN), orta negatif(ON) ve negatif(N)'dir. İkinci giriş değişkeni olan hatadaki değişim sinyali *[de(t)/dt]* dilsel değişkenleri; büyük negatif(BN), orta negatif(ON), orta pozitfi(OP) ve büyük pozitif(BP)'dir. Üçüncü giriş değişkeni *P_ölçülen*'in dilsel değişkenleri; pozitif(P), orta pozitif(OP), büyük pozitif(BP) ve çok büyük pozitif(ÇBP)'dir.



Şekil VI. 50 ANFÇK'nun Giriş Değişkenlerinden Olan Hata[e(t)] Üyelik Fonksiyonu ve Değer Aralığı



Şekil VI. 51 ANFÇK'nun İkinci Giriş Değişkeni Hatadaki Değişimin[de(t)/Dt] Üyelik Fonksiyonu ve Değer Aralığı



Şekil VI. 52 ANFÇK'nun Üçüncü Giriş Değişkeni Ölçülen güç değişiminin [(P_ölçülen(p.u)] Üyelik Fonksiyonu ve Değer Aralığı

ANFÇK'nün kural tabanında oluşturulan 64 tane kural, ***Eğer, O halde*** kelimeleri ile sistemin giriş ve çıkış sinyalleri arasında mantıksal operatör kullanarak elde edilmiştir. ANFÇK'ün giriş değişkenleri "***ve***" bağlacı ile birleştirilmiştir. Matlab/Simulink programı, Fuzzy Logic Toolbox içerinde yer alan ***anfisedit*** yazılımı ile elde edilen 64 kural Tablo VI. 4'de verilmektedir. Elde edilen 64 kuralla ilgili ayrıntılı veriler ve üyelik fonksiyonlarının değer aralıkları Ek.B'de verilmiştir.

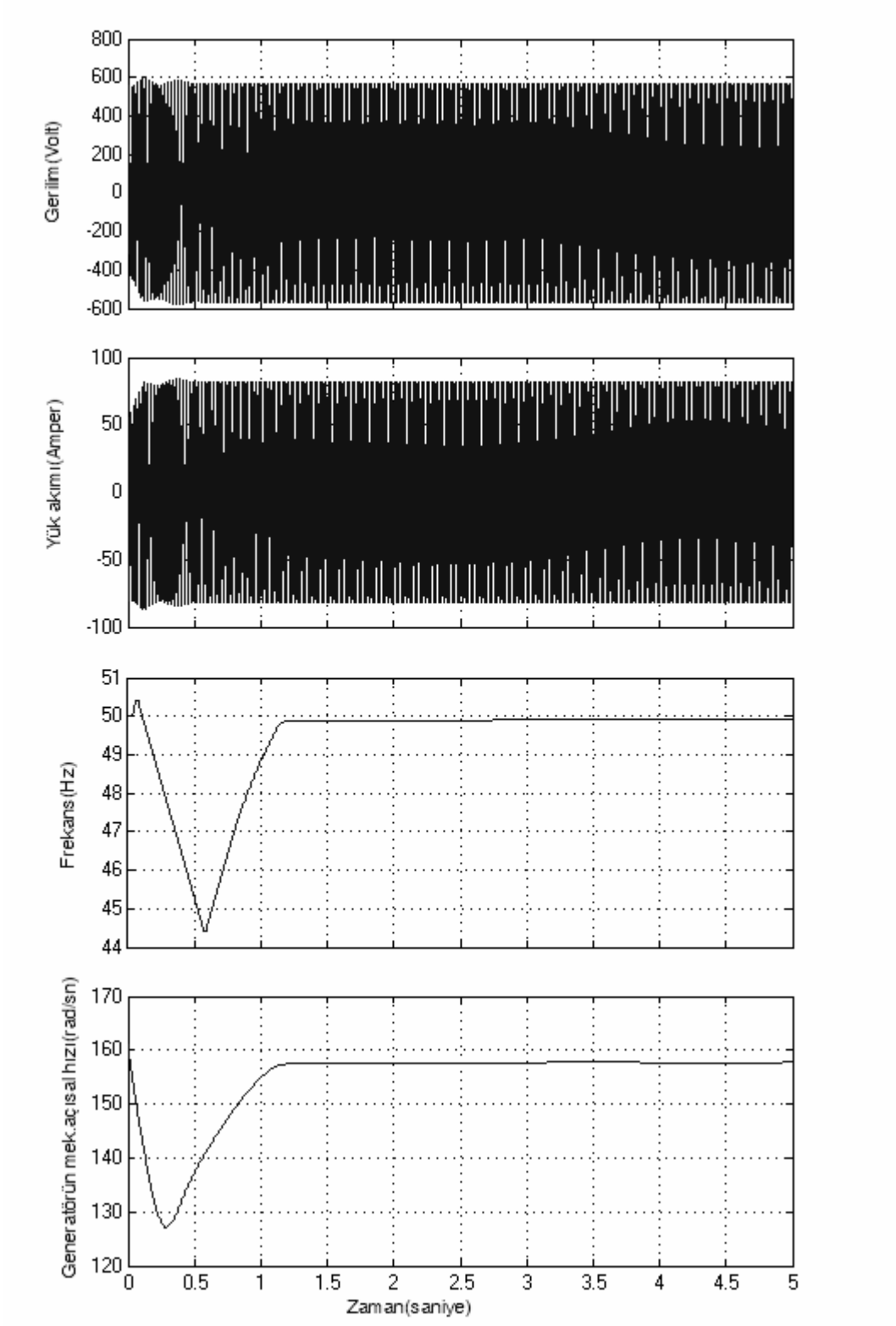
Tablo VI. 4 RGÜS'nin Kanat Eğim Açı Denetimi için Dizayn Edilen ANFÇK'nun Kural Tablosu

KURAL NO	EĞER			O HALDE
	e(t)	de(t)/dt	P_ölçülen(p.u)	Kontrolör Çıkışı
1	ÇBN	BN	P	ÇIKIŞ 1
2	ÇBN	BN	OP	ÇIKIŞ 2
3	ÇBN	BN	BP	ÇIKIŞ 3
4	ÇBN	BN	ÇBP	ÇIKIŞ 4
5	ÇBN	ON	P	ÇIKIŞ 5
6	ÇBN	ON	OP	ÇIKIŞ 6
7	ÇBN	ON	BP	ÇIKIŞ 7
8	ÇBN	ON	ÇBP	ÇIKIŞ 8
9	ÇBN	OP	P	ÇIKIŞ 9
10	ÇBN	OP	OP	ÇIKIŞ 10
11	ÇBN	OP	BP	ÇIKIŞ 11
12	ÇBN	OP	ÇBP	ÇIKIŞ 12
13	ÇBN	BP	P	ÇIKIŞ 13
14	ÇBN	BP	OP	ÇIKIŞ 14
15	ÇBN	BP	BP	ÇIKIŞ 15
16	ÇBN	BP	ÇBP	ÇIKIŞ 16
17	BN	BN	P	ÇIKIŞ 17

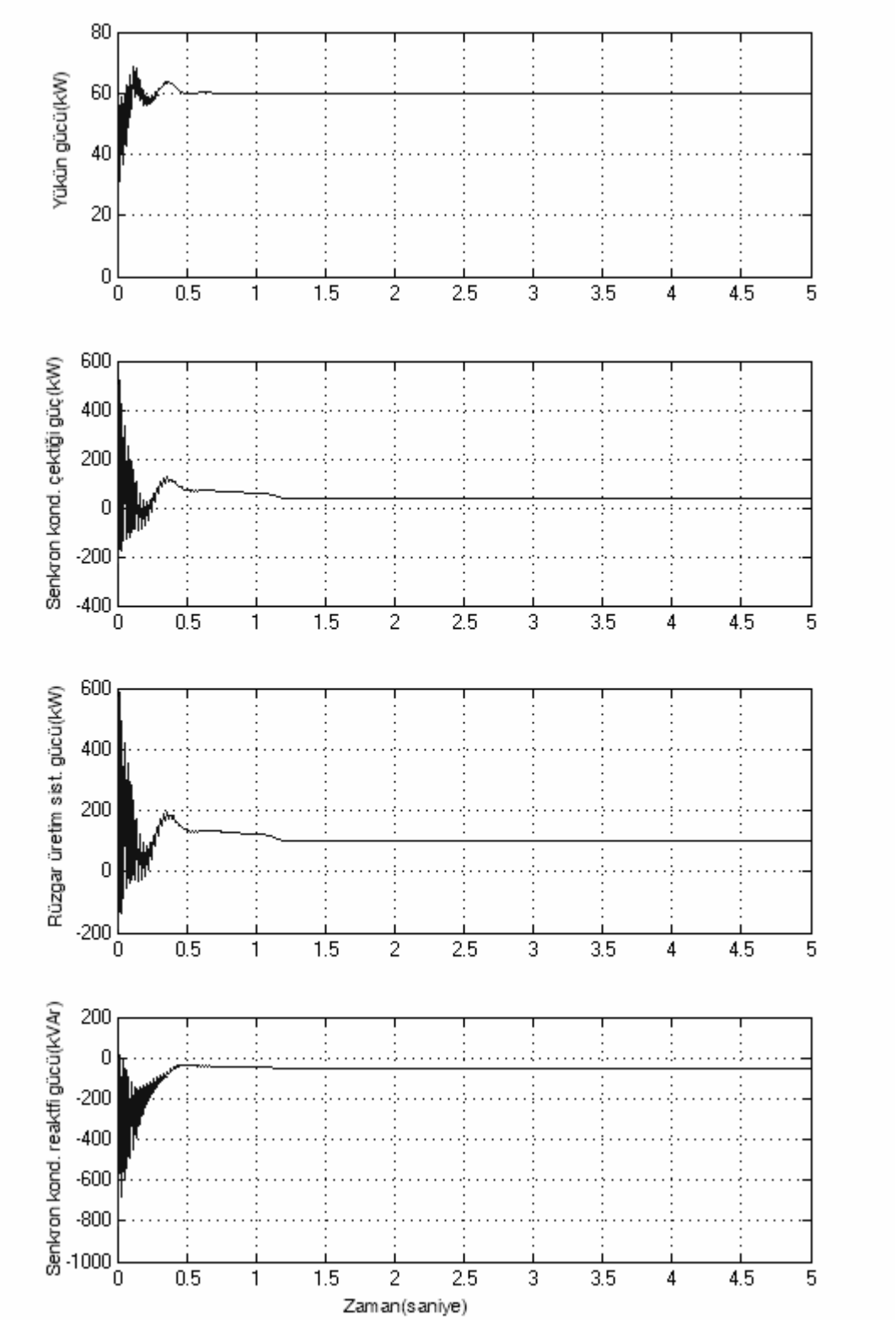
18	BN	BN	OP	ÇIKIŞ 18
19	BN	BN	BP	ÇIKIŞ 19
20	BN	BN	ÇBP	ÇIKIŞ 20
21	BN	ON	P	ÇIKIŞ 21
22	BN	ON	OP	ÇIKIŞ 22
23	BN	ON	BP	ÇIKIŞ 23
24	BN	ON	ÇBP	ÇIKIŞ 24
25	BN	OP	P	ÇIKIŞ 25
26	BN	OP	OP	ÇIKIŞ 26
27	BN	OP	BP	ÇIKIŞ 27
28	BN	OP	ÇBP	ÇIKIŞ 28
29	BN	BP	P	ÇIKIŞ 29
30	BN	BP	OP	ÇIKIŞ 30
31	BN	BP	BP	ÇIKIŞ 31
32	BN	BP	ÇBP	ÇIKIŞ 32
33	ON	BN	P	ÇIKIŞ 33
34	ON	BN	OP	ÇIKIŞ 34
35	ON	BN	BP	ÇIKIŞ 35
36	ON	BN	ÇBP	ÇIKIŞ 36
37	ON	ON	P	ÇIKIŞ 37
38	ON	ON	OP	ÇIKIŞ 38
39	ON	ON	BP	ÇIKIŞ 39
40	ON	ON	ÇBP	ÇIKIŞ 40
41	ON	OP	P	ÇIKIŞ 41
42	ON	OP	OP	ÇIKIŞ 42
43	ON	OP	BP	ÇIKIŞ 43
44	ON	OP	ÇBP	ÇIKIŞ 44
45	ON	BP	P	ÇIKIŞ 45
46	ON	BP	OP	ÇIKIŞ 46
47	ON	BP	BP	ÇIKIŞ 47
48	ON	BP	ÇBP	ÇIKIŞ 48
49	N	BN	P	ÇIKIŞ 49
50	N	BN	OP	ÇIKIŞ 50
51	N	BN	BP	ÇIKIŞ 51
52	N	BN	ÇBP	ÇIKIŞ 52
53	N	ON	P	ÇIKIŞ 53
54	N	ON	OP	ÇIKIŞ 54
55	N	ON	BP	ÇIKIŞ 55
56	N	ON	ÇBP	ÇIKIŞ 56
57	N	OP	P	ÇIKIŞ 57
58	N	OP	OP	ÇIKIŞ 58
59	N	OP	BP	ÇIKIŞ 59

60	N	OP	ÇBP	ÇIKIŞ 60
61	N	BP	P	ÇIKIŞ 61
62	N	BP	OP	ÇIKIŞ 62
63	N	BP	BP	ÇIKIŞ 63
64	N	BP	ÇBP	ÇIKIŞ 64

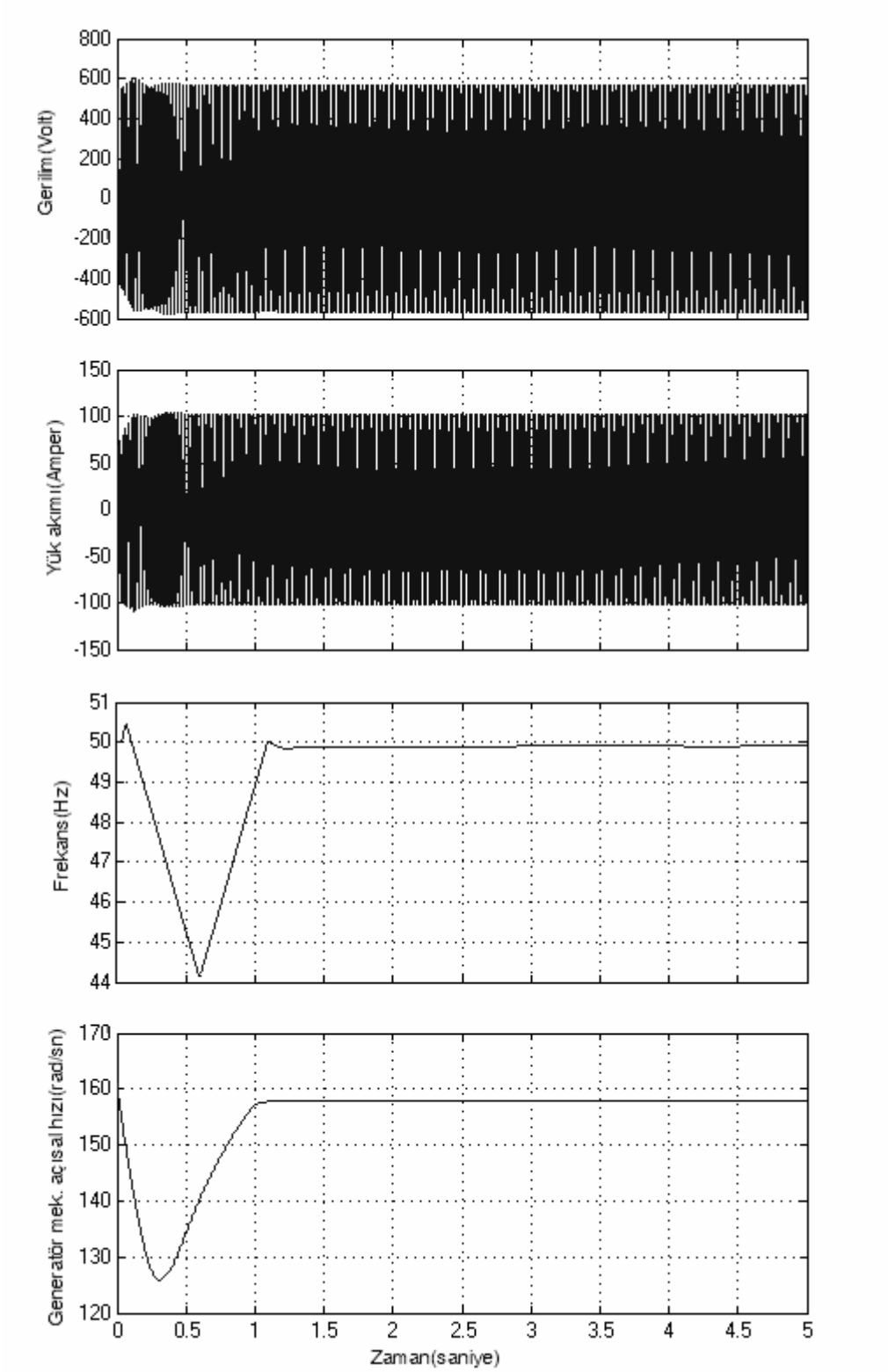
Şehir merkezinden uzak yerleşim birimlerindeki tüketicilerin yükleri 40kW, 60kW, 80kW, 100kW ve 120kW değerleri arasında değiştiği kabul edilmiştir. Değişken hızlı rüzgar türbininin kanat eğimi açısı denetiminin ANFÇK ile yapılması durumunda, rüzgar güç üretim sisteminin belirtilen elektriksel büyüklerindeki değişimler aşağıda ayrı ayrı simülasyon sonuçları ile gösterilmektedir.



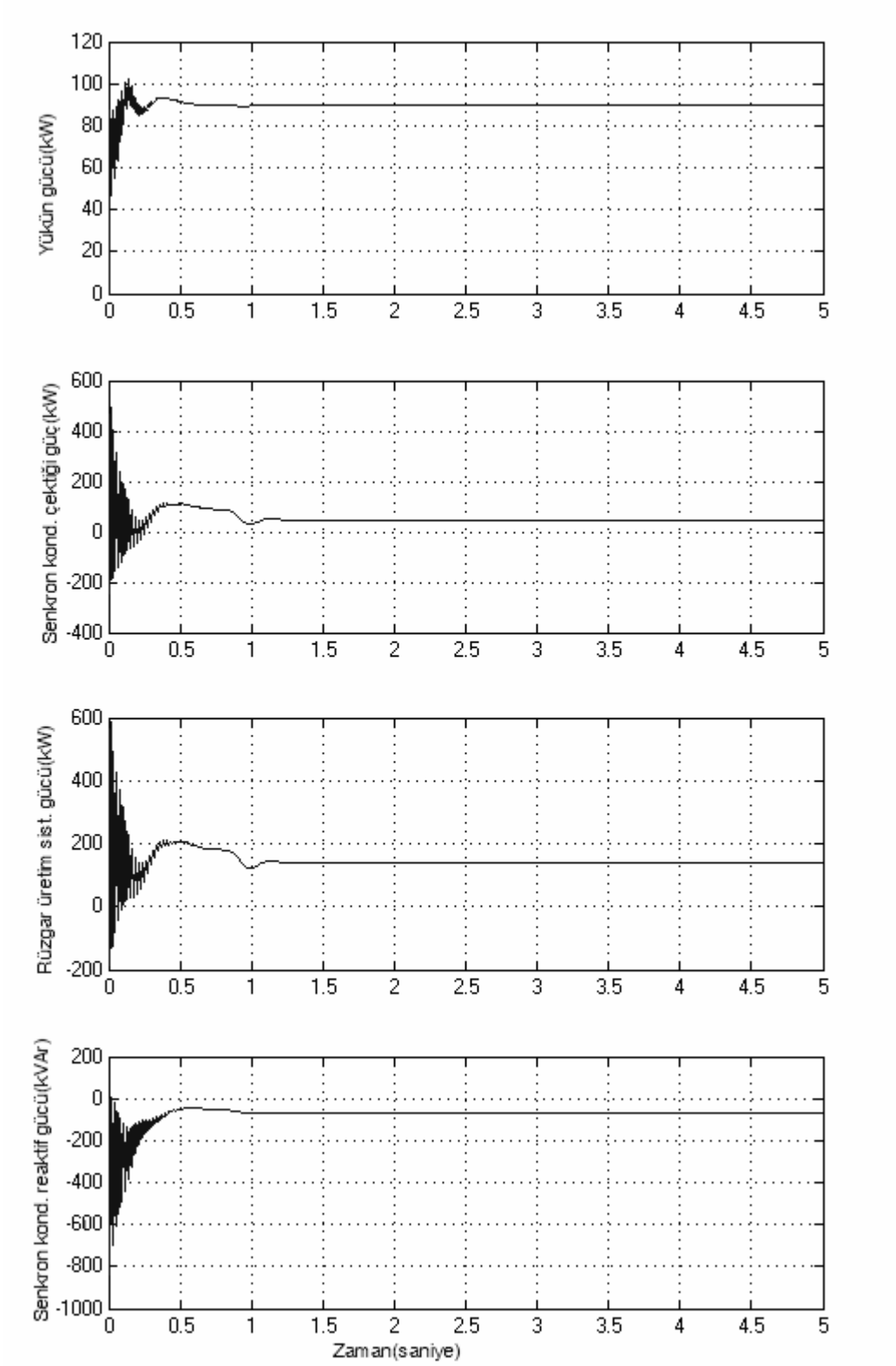
Şekil VI. 53 ANFÇK'lü Rüzgar güç üretim sisteminin 40kW'lık yükle yüklenmesi durumunda gerilim, akım, frekans ve generatör mekanik hızındaki değişim eğrileri



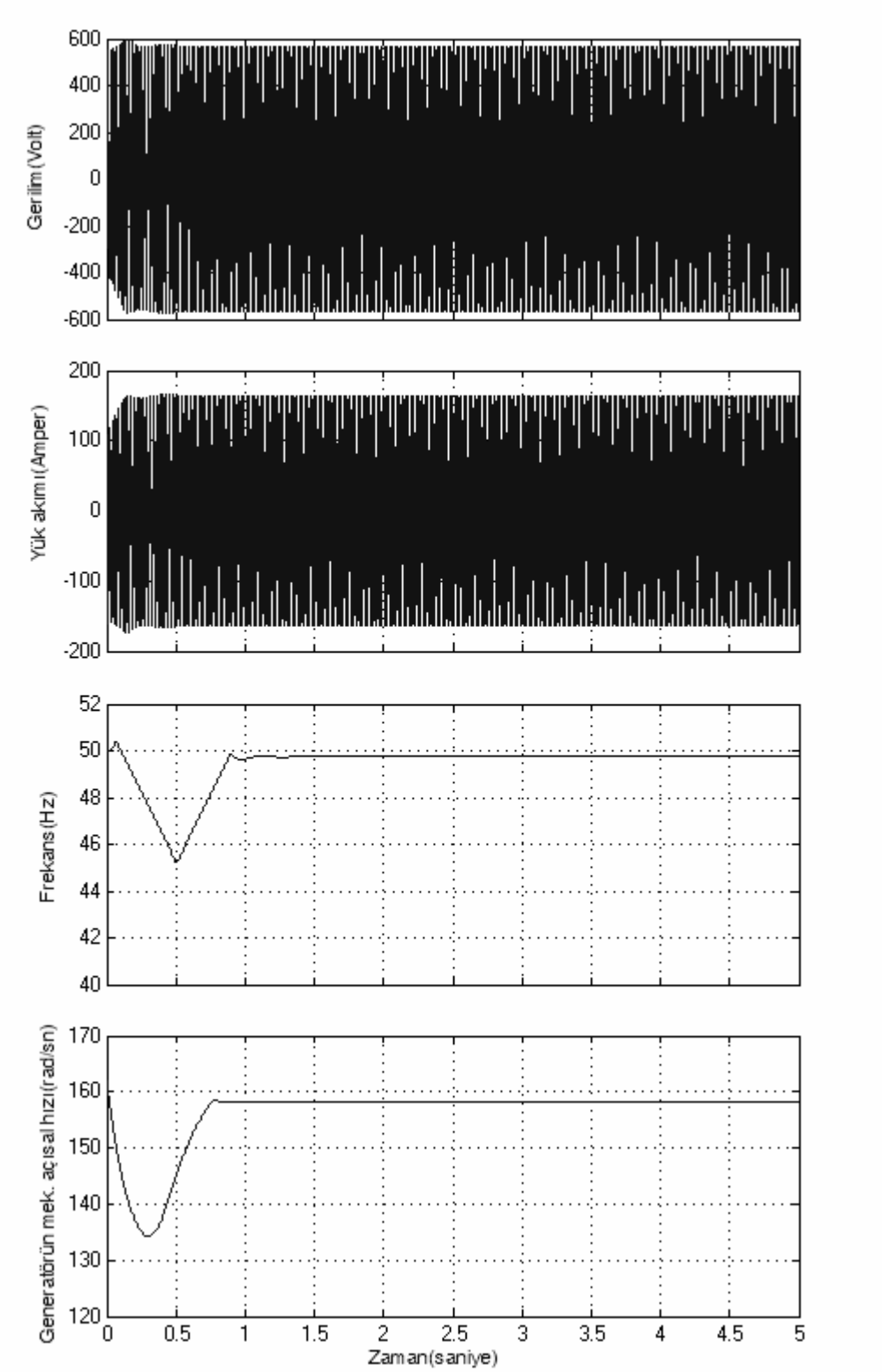
Şekil VI. 54 ANFÇK'lü Rüzgar güç üretim sisteminin 40kW'lık yükle yüklenmesi durumunda sistemden üretilen ve çekilen güçlerdeki değişim eğrileri



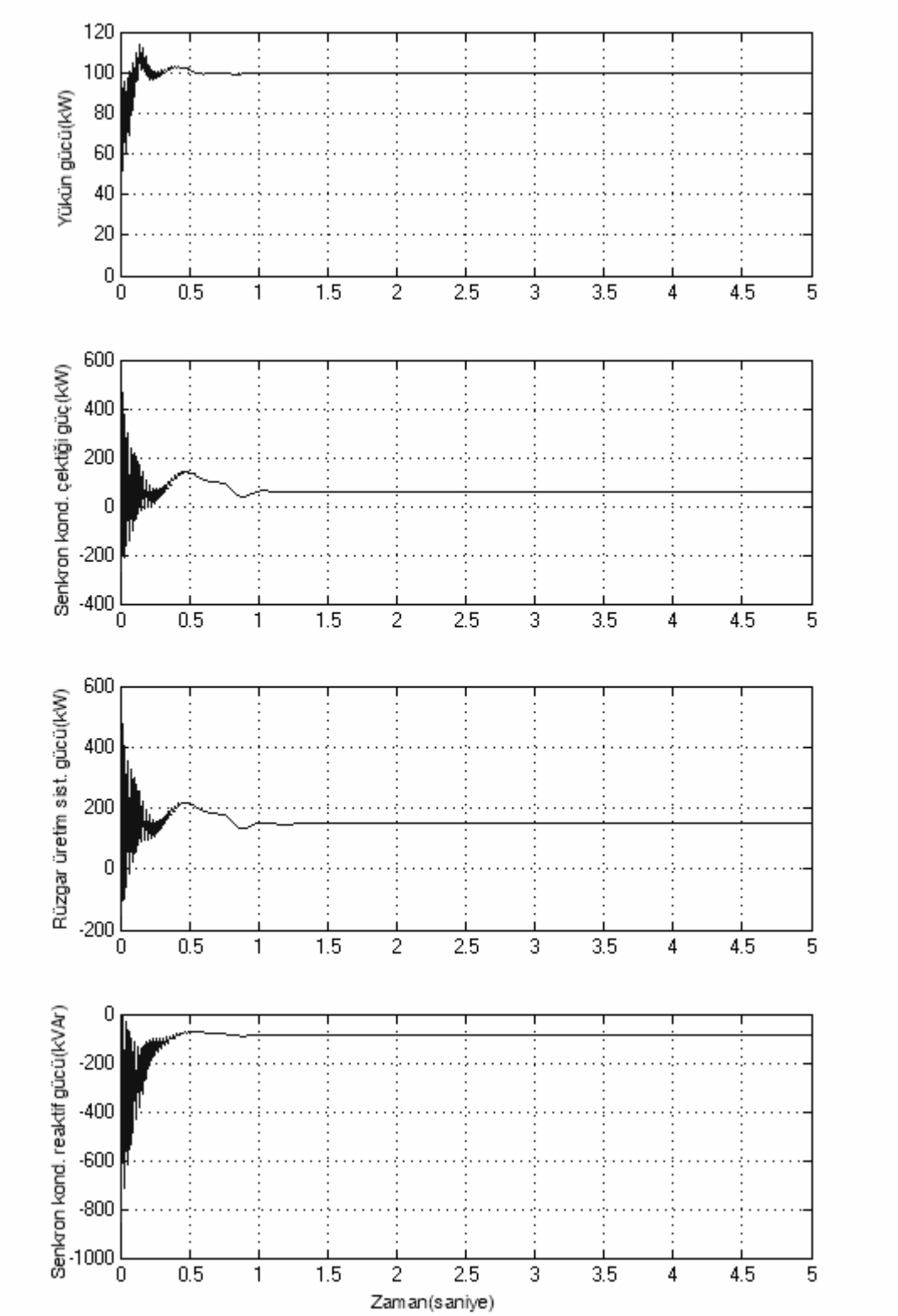
Şekil VI. 55 ANFÇK'lü Rüzgar güç üretim sisteminin 60kW'lık yükle yüklenmesi durumunda gerilim, akım, frekans ve generatör mekanik hızındaki değişim eğrileri



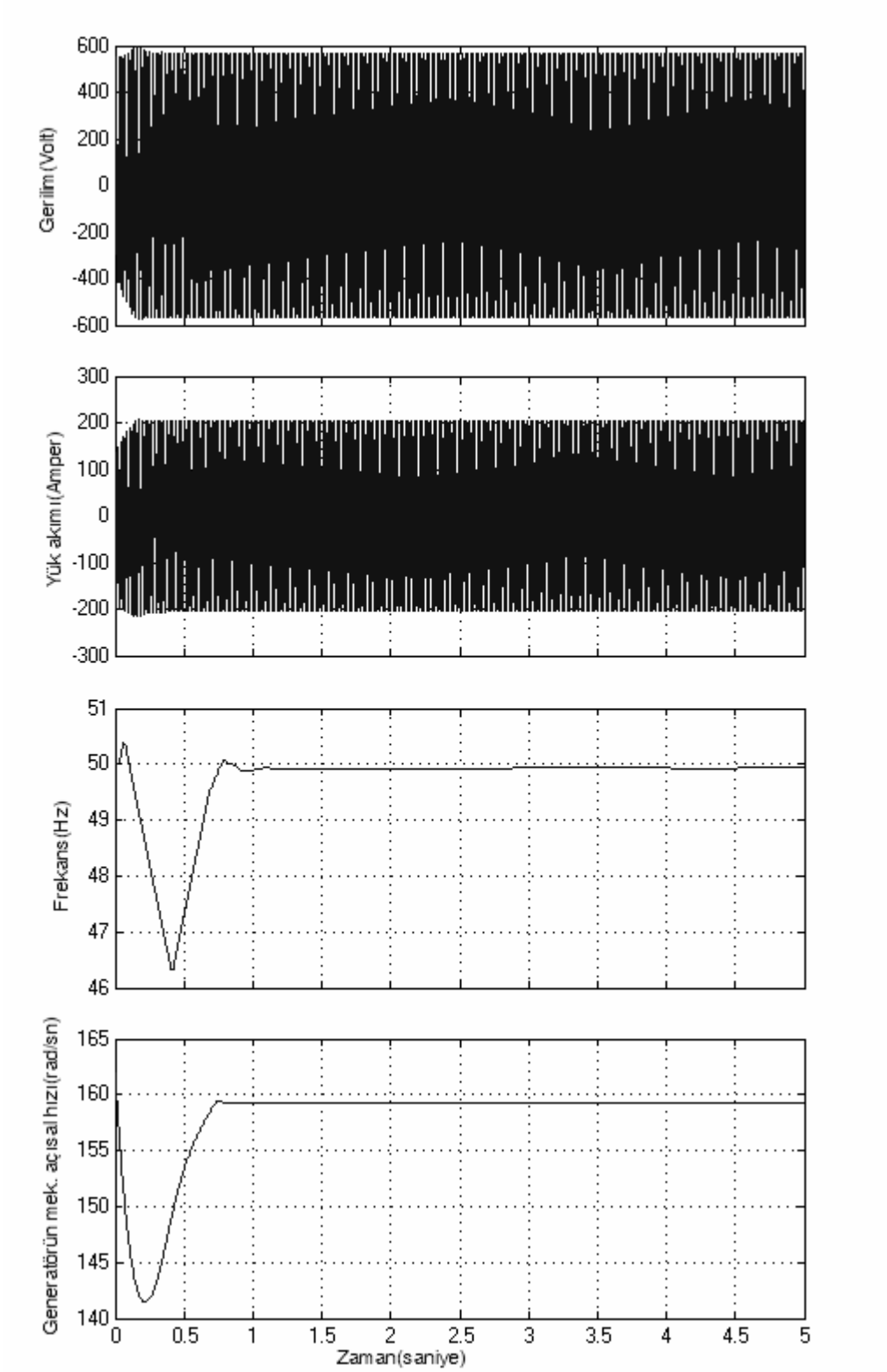
Şekil VI. 56 ANFÇK'lü Rüzgar güç üretim sisteminin 60kW'lık yükle yüklenmesi durumunda sistemden üretilen ve çekilen güçlerdeki değişim eğrileri



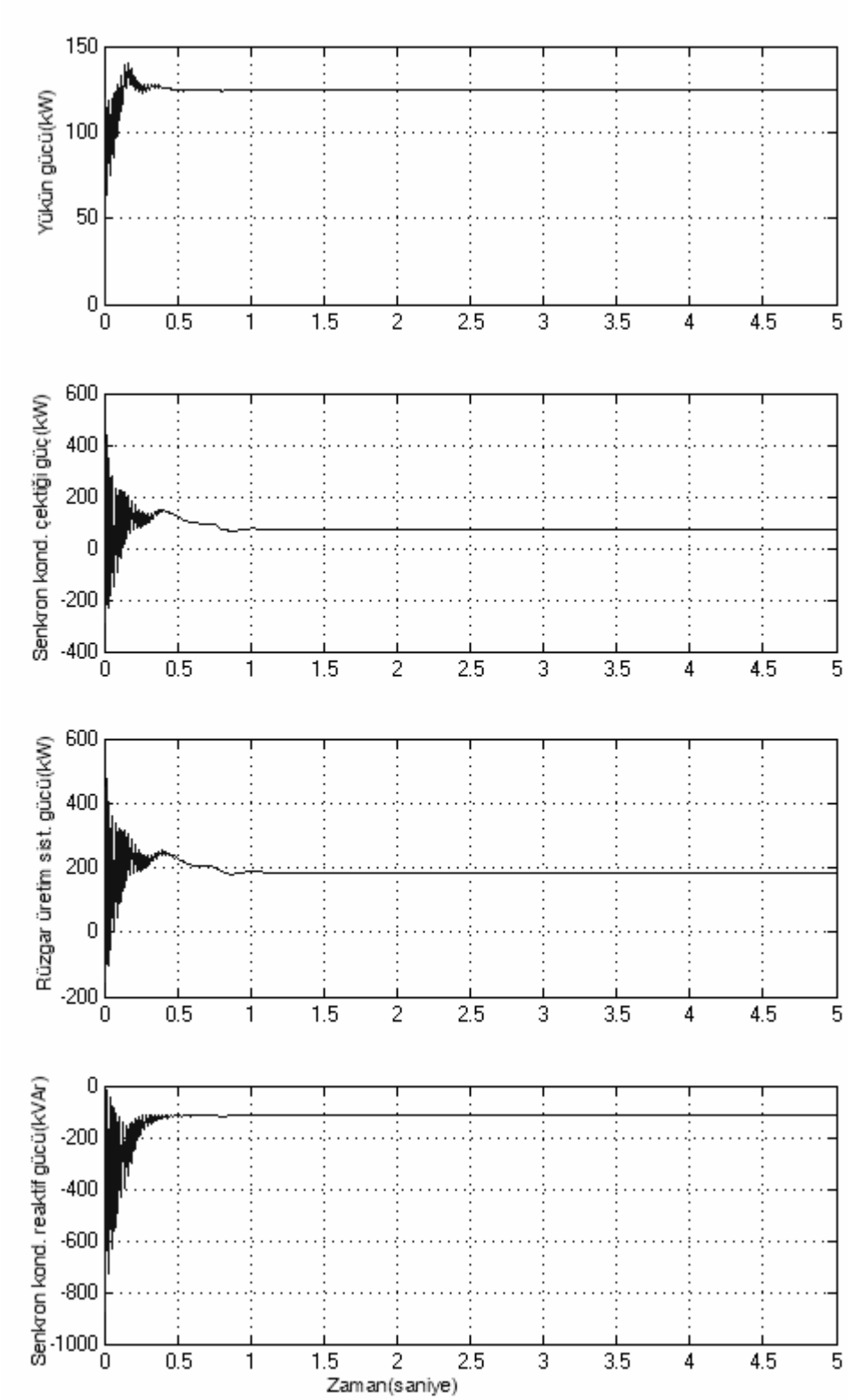
Şekil VI. 57 ANFÇK'lü Rüzgar güç üretim sisteminin 80kW'lık yükle yüklenmesi durumunda gerilim, akım, frekans ve generatör mekanik hızındaki değişim eğrileri



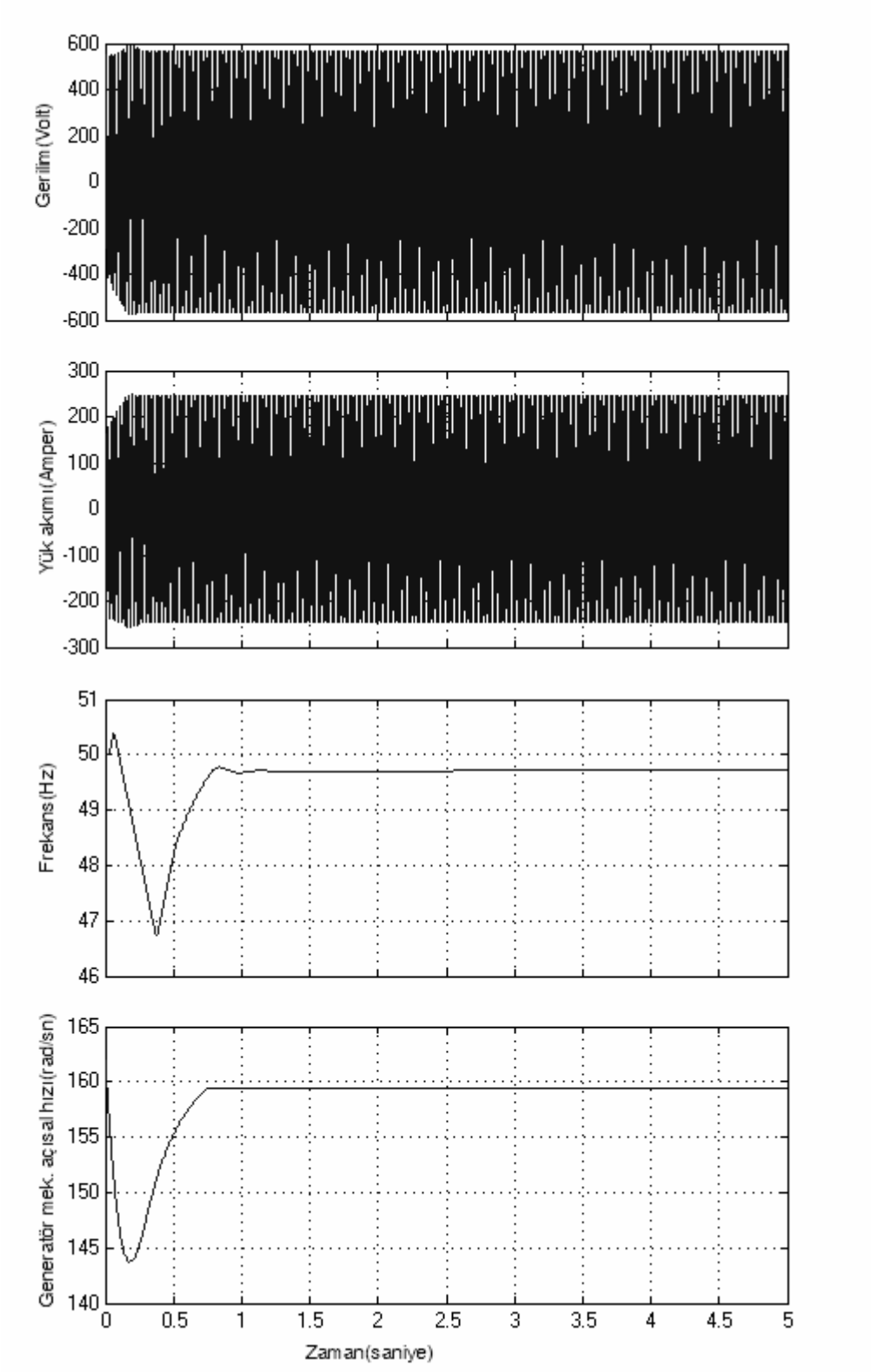
Şekil VI. 58 ANFÇK'lü Rüzgar güç üretim sisteminin 80kW'lık yükle yüklenmesi durumunda sistemden üretilen ve çekilen güçlerdeki değişim eğrileri



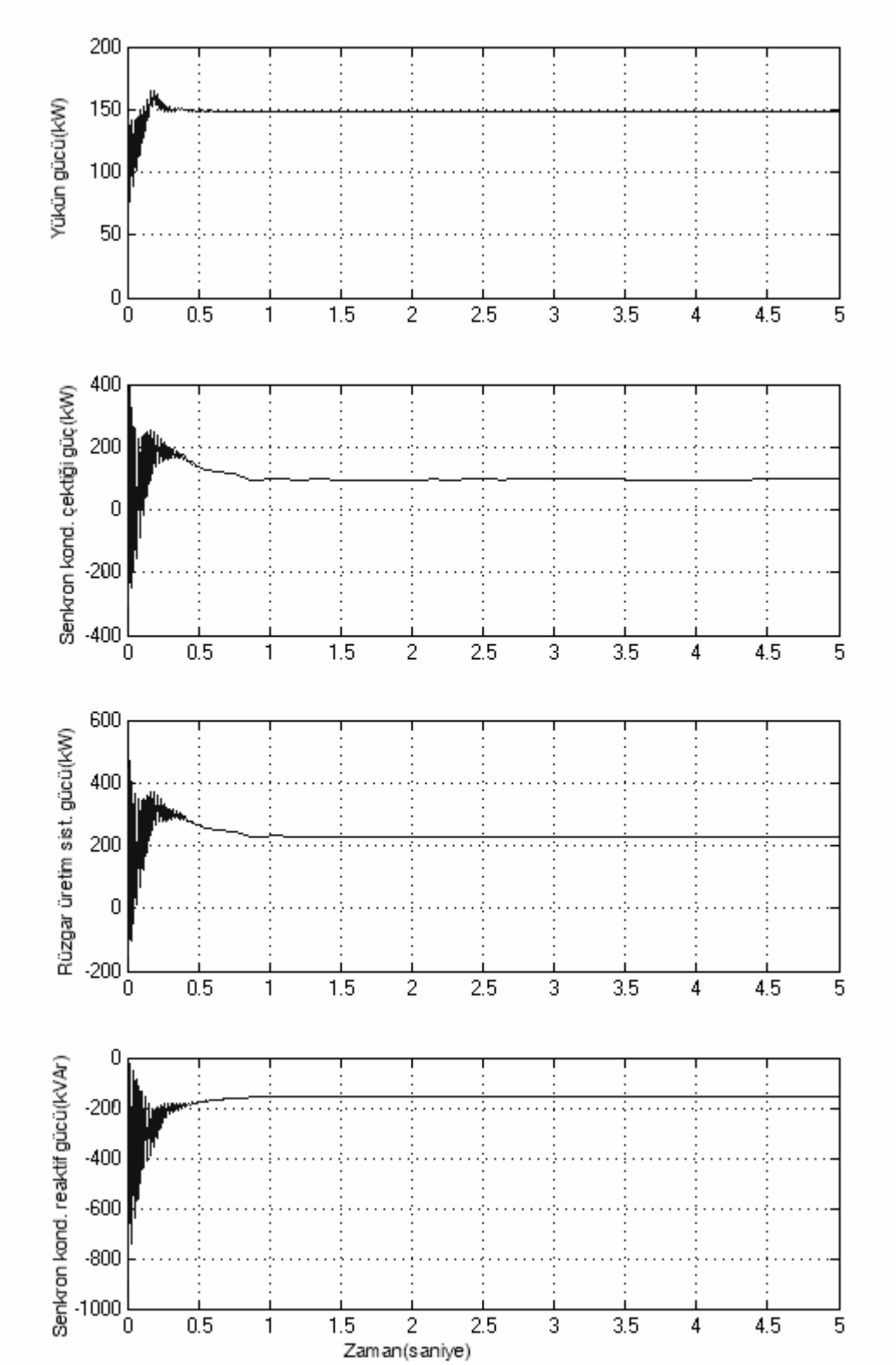
Şekil VI. 59 ANFÇK'lü Rüzgar güç üretim sisteminin 100kW'lık yükle yüklenmesi durumunda gerilim, akım, frekans ve generatör mekanik hızındaki değişim eğrileri



Şekil VI. 60 ANFÇK'lü Rüzgar güç üretim sisteminin 100kW'lık yükle yüklenmesi durumunda sistemden üretilen ve çekilen güçlerdeki değişim eğrileri



Şekil VI. 61 ANFÇK'lü Rüzgar güç üretim sisteminin 120kW'lık yükle yüklenmesi durumunda gerilim, akım, frekans ve generatör mekanik hızındaki değişim eğrileri



Şekil VI. 62 ANFÇK'lü Rüzgar güç üretim sisteminin 120kW'lık yükle yüklenmesi durumunda sistemden üretilen ve çekilen güçlerdeki değişim eğrileri

ANFÇK'lü Rüzgar güç üretim sistemi tarafından 40kW, 60kW, 80kW, 100kW ve 120kW'lık tüketici yükleri beslenirken yük uçlarındaki gerilim, yük akımı, yük uçlarındaki gerilimin frekansı ve asenkron generatörün mekanik açısal hızındaki değişiklikler zamana bağlı olarak değişimi Şekil VI. 53, Şekil VI. 55, Şekil VI. 57, Şekil VI. 59 ve Şekil VI. 61'de gösterilmektedir. RGÜS'den yükün çektiği güç, RGÜS'ün üretim gücü, senkron kondansatörün harcadığı aktif güç ve senkron kondansatörün asenkron generatörün reaktif güç ihtiyacını karşılamak amacıyla ürettiği güçteki zamana bağlı olarak değişimler Şekil VI. 54, Şekil VI. 56, Şekil VI. 58, Şekil VI. 60 ve Şekil VI. 62'de sırasıyla verilmektedir.

ANFÇK'lü RGÜS'den elde edilen simülasyon sonuçlarının, kontrolsüz durumdaki ve klasik PID kontrollü RGÜS'den alınan simülasyon sonuçları ile mukayesesi yapılmıştır. ANFÇK'lü RGÜS'de, kontrolsüz durumdaki RGÜS'in çıkış geriliminin ve akımının sinüzoidal eğriden uzak görüntüsünün yerini arzu edilen bicimde düzgün ve sinüzoidal eğri aldığı görülmektedir. Arzu edilen işletme frekansı 50Hz değerine 1 saniye gibi kısa sürede ulaşıldığı simülasyon sonuçların görülmektedir. Klasik PID kontrollü RGÜS'nin elektriksel büyüklüklerinin (akım, gerilim, güç ve frekans) simülasyon sonuçlarını, ANFÇK kontrollü RGÜS'nin elektriksel büyüklükleri ile karşılaştırdığımızda sürekli çalışma durumuna geçiş ANFÇK'de klasik PID kontrollü duruma göre biraz daha kısa olduğu(1sn) simülasyon sonuçlarında açık bir şekilde görülmektedir. Kararlı çalışma durumundaki hata oranı değerinin simülasyon sonuçlarından da görüldüğü gibi sıfıra yakındır.

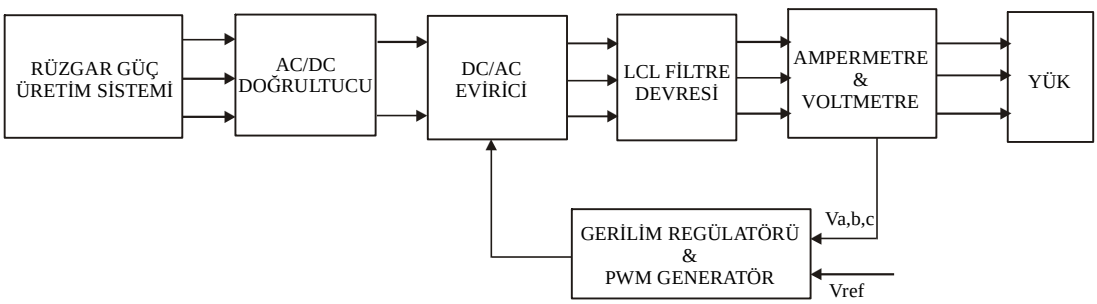
Klasik PID kontrolörde, her bir yük kademesinde RGÜS'nin çıkış elektriksel büyüklüklerini arzu edilen değer aralığında tutmak için kontrolörün kazanç katsayılarını yeniden ayarlamak durumunda kalınıyordu. Oysa ANFÇK'lü sistemde, 40kW, 50kW, 60kW, 70kW ve 80kW için aynı veri tabanını kullanarak sistemin arzu edilen değerlerde kararlı bir şekilde işletilmesi gerçekleştiriliyor. Eğer Matlab 65536 adet veriden daha fazla veriyi aynı anda kullanabilseydi 90kW, 100kW, 110kW ve 120kW'lık yükleme durumları için ayrı bir kural tabanı oluşturmamıza gerek kalmayacaktı. ANFÇK, bulanık çıkarım sistemini otomatik olarak elde edebilmesi için, RGÜS'nin davranışını operatörün çok iyi analiz etmiş olması gerekir. Eğer biz sisteminin davranışını çok tanıyorsak, ANFÇK'nun data eğitiminde herhangi bir problemle karşı karşıya kalmayız.

RGÜS'nin kanat eğimi açısının denetiminin yapılmasında ANFÇK'ü kullanmamızın nedeni, değişen yük durumlarında istenilen elektriksel değerleri elde edebilmek için rüzgar türbininin kanat eğim açısını otomatik olarak ayarlamaktır. Kanat eğim açısının istenilen biçimde ayar edilerek çıkış büyüklüklerinin gerçekleştirildiği yukarıda gösterilen simülasyon sonuçlarından da görülmektedir.

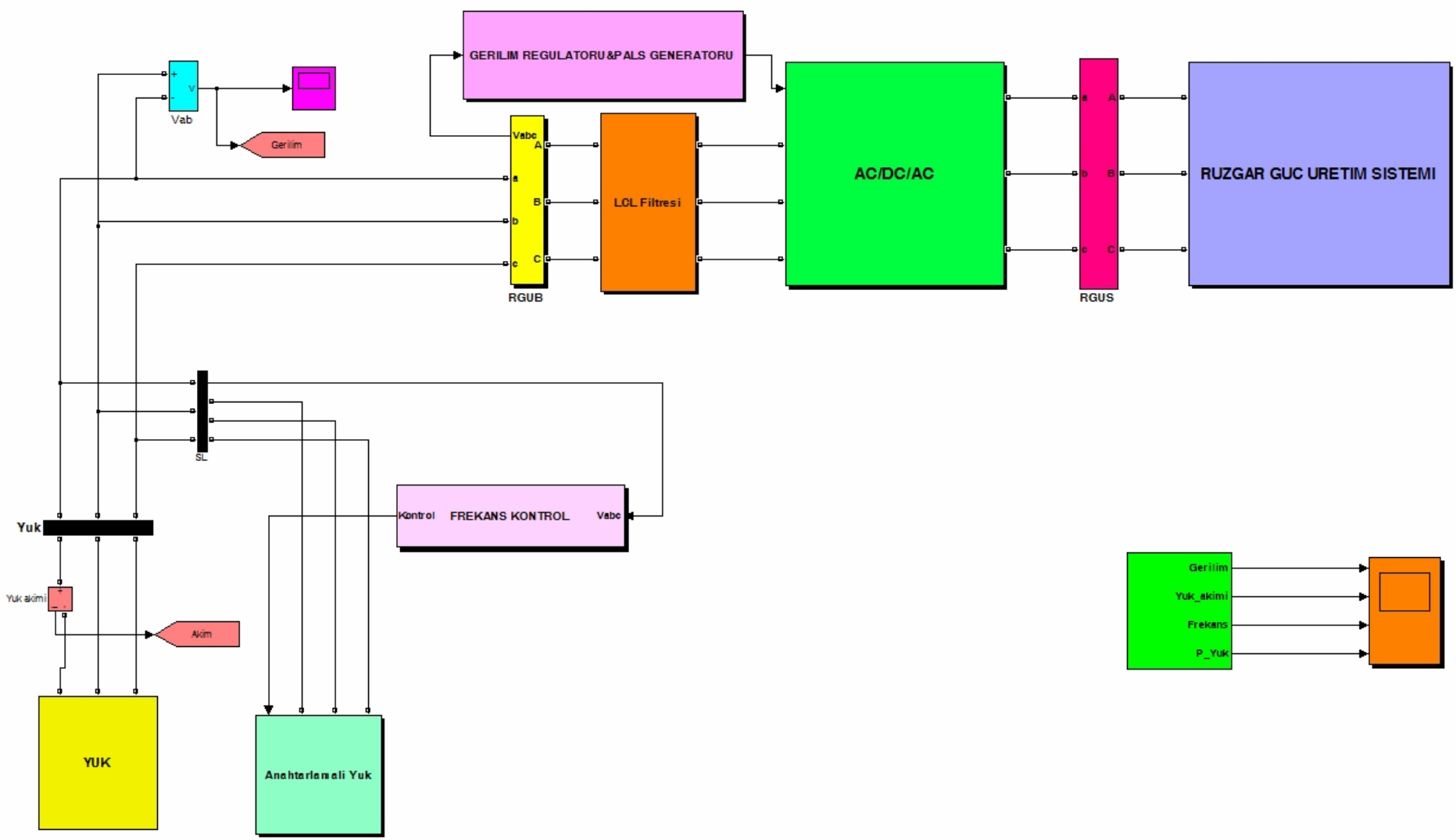
VI.1.5.3.1 AC/DC/AC Güç Dönüştürücülü Rüzgar Güç Üretim Sisteminin Kanat Eğimi Açısının Adaptif Neuro-Fuzzy Kontrolör ile Denetimi

Hibrid güç üretim sistemini oluşturan farklı enerji türlerine sahip güç üretim sistemlerinin çıkış gerilimi ve frekansını önceden belirlenmiş işletme değerlerinde korumak veya ayarlamak gerekmektedir. Her bir güç bileşeninin çıkış gerilimi ve frekansı belirlenmiş değerlere ayarlandıktan sonra kendi aralarında enterkonnekte bağlantı gerçekleştirilir. Bu arzu edilen gerilim ve frekans ayarlaması güç elektroniği devre elemanları ile gerçekleştirilir. Güç elektroniği ara yüzey devresini gerçekleştirilmesi sırasında hibrid güç üretim sisteminin çıkış değişkenlerinden (gerilim, frekans, aktif ve reaktif) herhangi birisine veya daha fazla çıkış değişkeninin belirlenen referans değere göre kontrol edilmesi gerekmektedir.

Yapılan hibrid güç üretim sistemi rüzgar ve gaz olmak üzere iki farklı güç üretim ünitesinden oluşmaktadır. İlk önce her birini şebekeden bağımsız olarak çalıştırıp elektriksel büyüklük değerleri elde edilir. Daha sonra arzu edilen gerilimin ve frekansın istenilen değerde olması için AC/DC/AC güç dönüştürücüleri kullanılmıştır. Şekil VI. 63'de, RGÜS'nin güç dönüştürücülü çalışma durumunun blok diyagramı, Şekil VI. 64'de ise Matlab programı ortamında simülasyon blok diyagramı aşağıda gösterilmektedir.

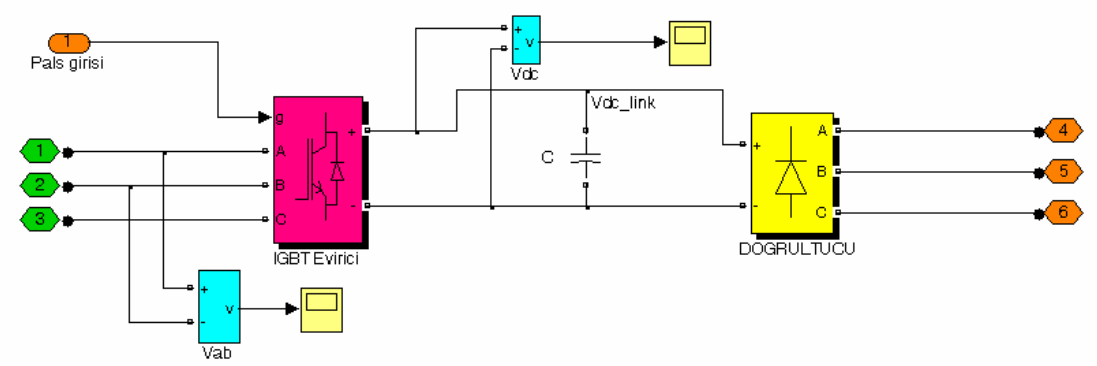


Şekil VI. 63 AC/DC/AC Güç Dönüştürücülü RGÜS'nin Blok Diyagramı



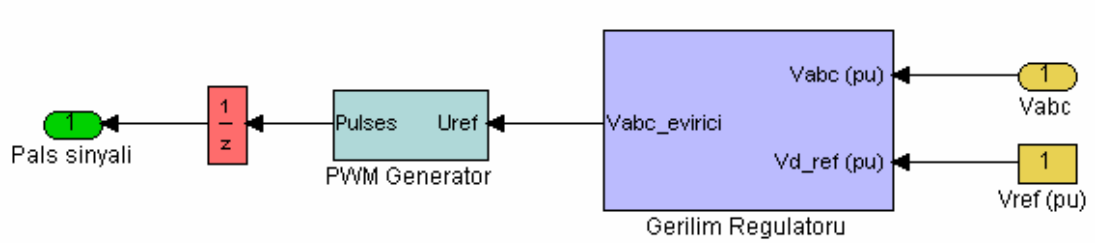
Şekil VI. 64 AC/DC/AC Güç Dönüştürücülü RGÜS'nin Simülasyon Blok Diyagramı

Hibrid güç üretim sistemlerinde, evirici çıkış gerilimi ve frekansının kontrol edilmesiyle güç dönüştürücülerin sistemin aktif ve reaktif gücünü kontrol edilebilme kabiliyetlerine sahiptirler. Rüzgar güç üretim sisteminde, generatörden elde edilen çıkış gücü, kontrolsüz altı adet köprü bağlı diyotlardan oluşan doğrultucularla DC güce dönüştürülür. Daha sonra, IGBT eviriciyle DC çıkış gücü AC güce çevrilir. Yapılan çalışmada, eviricinin kontrolü çıkış geriliminin kontrolüyle sağlanmaktadır. Aynı zamanda akım kontrolü ve gerilim kontrol döngüsü birlikte kullanarak güç kontrol döngüsü de gerçekleştirilebilir. Şekil VI. 65'da AC/DC/AC güç dönüştürücüsünün simülasyon blok diyagramı görülmektedir.

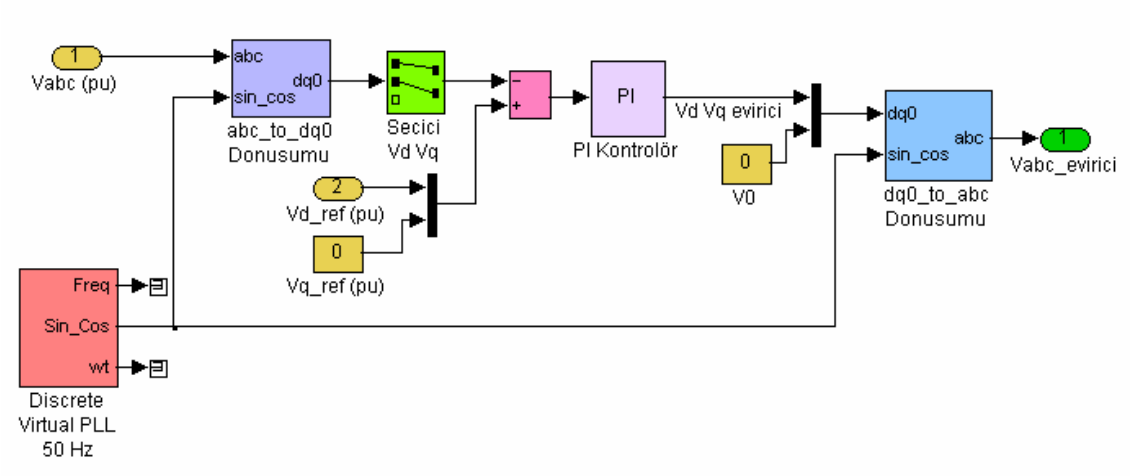


Şekil VI. 65 AC/DC/AC Güç Dönüştürücüsünün Simülasyon Blok Diyagramı

Şekil VI. 65'de gösterilen IGBT evirici, kapı sinyali kontrollü yarı iletken devre elemanıdır. IGBT yarı iletken devre elemanı, direnç(R) ve endüktansın(L) seri birleşimi olarak simule edilebilir. IGBT'nin emiter, kolektör ve kapı olmak üzere üç bağlantı ucu vardır. kolektör-emiter gerilimi negatif olduğu durumda açık devre özelliğinde, pozitif veya sıfır olduğu durumda ise iletim özelliği göstermektedir. Şekil VI. 66'da IGBT evirici kontrolü için gerilim regülatörü ve PWM generatörün blok diyagramı, Şekil VI. 67 ise, gerilim regülatörün açık blok diyagramı görülmektedir.



Şekil VI. 66 AC/DC/AC Güç Dönüştürücüsünün IGBT Eviricinin Kontrolü için Gerilim Regülatörü ve PWM Generatörün Simülasyon Blok Diyagramı



Şekil VI. 67 IGBT Evirici Kontrolü için Gerilim Regülatörünün Blok Diyagramı

IGBT evirici, yüke üç fazlı, 50Hz sinüzoidal 400Volt gerilim sağlayan dalga genişlik modülasyonudur (PWM). Evirici, yük uçlarındaki gerilimin değerini 400 Voltta korumak için PI kontrolörle denetimi sağlanır. IGBT evirici tarafından üretilen harmonikler LCL filtresiyle filtrelenir.

AC/DC/AC güç dönüştürücü devresinden kullanılan evirici devresinde, anahtarlama frekansı(kıyıcı) yüksek seçilir. Çünkü, yüksek frekanslarda, harmonik gerilimi nedeniyle anahtarlama frekansı mümkün olabildiği ölçüde yüksek seçilmektedir. Birçok uygulamalarda anahtarlama frekansı 6 kHz ile 20 kHz arasında seçilmektedir[93]. Endüstriyel uygulamalarda daha düşük derecedeki harmoniklerden kaçınmak için dalga genişlik modülasyonları (PWM) kullanılmaktadır. Yapılan çalışmada, anahtarlama frekansı 4000 kHz seçilmiştir.

DC taraf maksimum bağlantı gerilimi aşağıdaki bağıntıyla hesaplanır.

$$V_{DC_bağlantı} = 1{,}1 \cdot V_{faz-faz} \cdot \sqrt{2} \tag{6.10}$$

Anahtarlama kayıplarını azaltmak için DC taraf geriliminin maksimum gerilim seviyesinin altında olması tercih edilmektedir. Yapılan çalışmada, maksimum DC taraf bağlantı gerilimi yaklaşık 622 Volttur. AC ve DC tarafında bir anda olan aktif güç farkı DC bağlantı kondansatöründe depolanır. Bu depolanan güç DC bağlantı gerilimine göre değişkenlik göstermektedir. Bu nedenle DC bağlantı(link) kapasitörünün boyutu izin verilen maksimum DC link gerilimine göre seçilir. DC link kapasitörünün boyutu aşağıda verilen bağıntıyla hesaplanır[94].

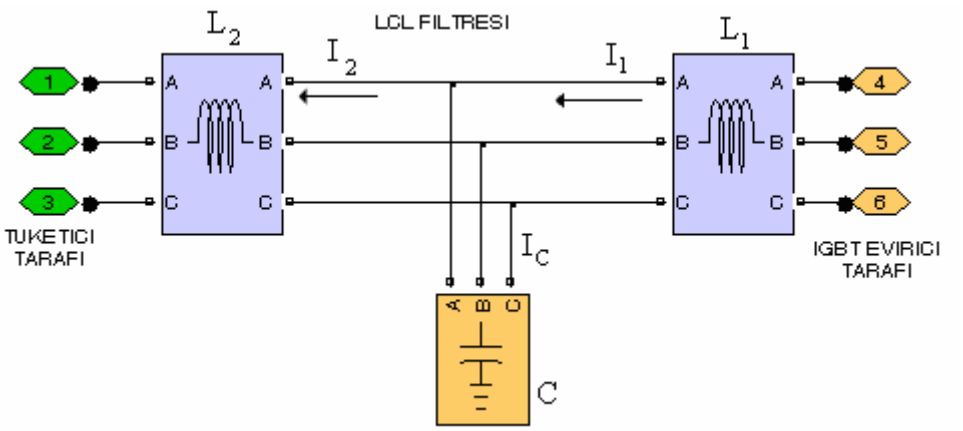
$$C_{dc_link} = \frac{S_N}{u^*_{dc} \Delta u_{dc}} \cdot \frac{1}{2w_n} \tag{6.11}$$

Denklem(6.11)'de, S_N; gerilim kaynağı dönüştürücüsünün veya sistemin nominal gücü, u^*_{dc}; DC taraf referans gerilimi, Du_{dc}; ölçülen DC taraf gerilimi ile referans DC gerilim arasındaki fark gerilimi ve w_n; açısal frekansı ifade etmektedir.

DC gücü AC güce dönüştürmek için kullanılan güç elektroniği devresine evirici denilir. Eviriciye DC giriş gerilimi uygulanır. DC kaynak akımı, 50Hz, üç fazlı, 400 Voltluk yükün gücünü karşılayacak şekilde anahtarlanır. Evirici çıkış akımı önemli ölçüde harmonik akımları içermektedir. Nominal frekansı 50 Hz olan evirici çıkışının faz-nötr gerilimi aşağıdaki bağıntıyla hesaplanır[36].

$$V_{faz} = \frac{2\sqrt{2}}{p}\cos\left(\frac{p}{6}\right)\cdot V_{dc} \tag{6.11}$$

Gerilim kaynağı dönüştürücüleri (IGBT evirici) PWM anahtarlaması nedeniyle şebeke akım ve gerilim değerleri yüksek frekans harmonik bileşenleri içerir. Bu harmonik bileşenleri hassas veya duyarlı yüklerin işletilmesini olumsuz şekilde etkilemektedir. Tüketici ile gerilim kaynağı dönüştürücüsü arasına konulan LCL filtre devresiyle yüksek frekans harmoniklerinin etkisi minimum düzeye çekilir. Hatta düşük değerdeki anahtarlama frekanslarındaki harmoniklerin etkisi de zayıflamış olmaktadır[95]. Şekil VI. 68'de, gerilim kaynağı dönüştürücüsünün çıkışı (IGBT evirici) LCL filtresi üzerinden tüketiciye bağlantısı görülmektedir.



Şekil VI. 68 LCL Filtresi Aracılığı ile IGBT Eviricisinin (Gerilim Kaynağı Dönüştürücüsü) Tüketiciye Bağlantısının Simülasyon Blok Diyagramı

Şekil VI. 68'deki LCL filtre devresinin etkin dirençlerinin ihmal edilerek, *s* domeninde I_1 akımının IGBT evirici çıkış gerilimine(U) oranı aşağıda verilen bağıntı ile elde edilir.

$$\frac{U(s)}{I_1(s)} = \frac{L_2 / C}{sL_2 + \frac{1}{sC}} + sL_1 = \frac{sL_2 + 1/sC}{s^2 L_1 L_2 + \frac{(L_1 + L_2)}{C}} \tag{6.12}$$

Akım bölüm kuralını kullanarak I_1 ve I_2 akımları aşağıdaki gibi elde edilir.

$$I_2(s) = I_1(s) \frac{1/sC}{sL_2 + \frac{1}{sC}} \tag{6.13}$$

$$I_1(s) = I_2(s) \cdot \left(s^2 L_2 C + 1\right) \tag{6.14}$$

I_2 akımının U gerilime oranı yani sistemin transfer fonksiyonu,

$$\frac{I_2(s)}{U(s)} = \frac{1/CL_1L_2}{s\left(s^2 + \frac{L_1 + L_2}{L_1 L_2 C}\right)} \tag{6.15}$$

biçiminde elde edilir. Yukarda ki denklem(6.15) bağıntısından yararlanarak sistemin rezonans frekansı,

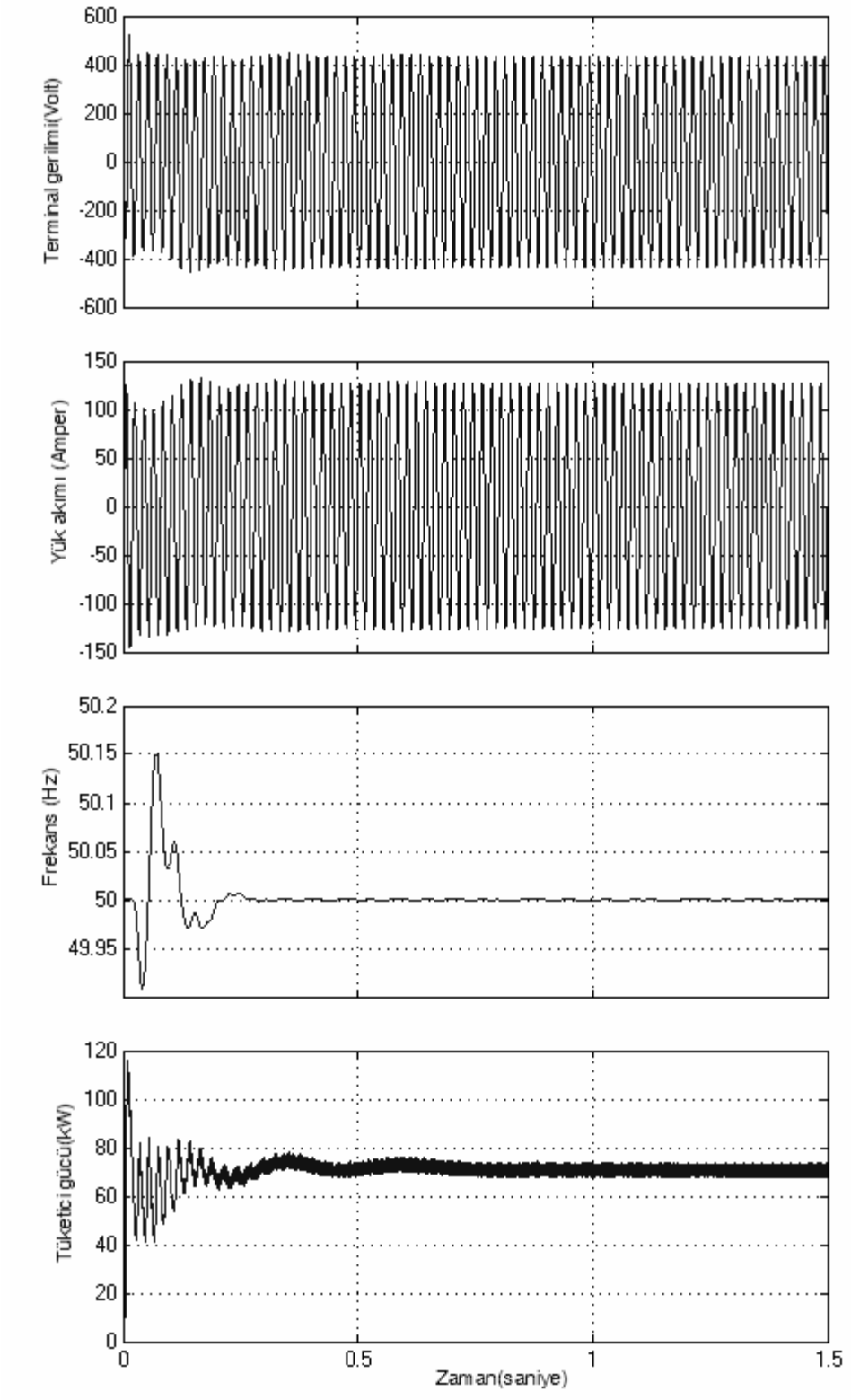
$$f_{rez} = \frac{1}{2p}\sqrt{\frac{L_1 + L_2}{L_1 L_2 C}} \tag{6.16}$$

biçiminde elde edilir[96].

LCL filtre dirençlerinin ihmal edilmesiyle gerilim düşümü değeri nominal işletme geriliminin %10 u, kapasite (C) değeri oranlanmış aktif güç değeri ile sınırlandırılır. LCL filtresinin rezonans frekansı temel frekansın (50Hz) on katı ile anahtarlama frekansının ½ oranındaki değer aralığında olması istenilmektedir[96]. Yapılan çalışmada, LCL filtresine ait parametreler Ek.A'da verilmektedir.

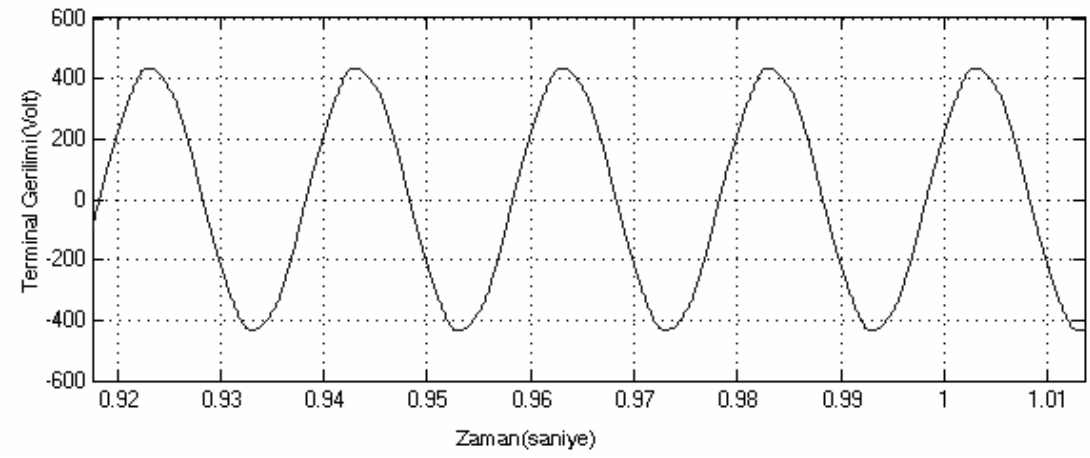
Rüzgar güç üretim sisteminin çıkış uçlarını AC-DC-AC güç dönüştürücülerine bağladığımızda, eğer devrede LCL filtre devresi yoksa yüksek anahtarlama frekansı (4kHz) nedeniyle akım veya gerilim harmonikleri gözle görülebilir şekilde fark edilmektedir. Yani gerilim eğrisi sinüzoidal eğri şeklinden uzaklaşmaktadır. Harmonik bileşenlerini içeren terminal gerilimi ile hassas tüketiciler hissedilebilir oranda zarar görmektedirler. Harmoniklerin tüketicilere verdikleri olumsuz etkileri yok etmek veya en aza indirmek amacıyla evirici ile tüketici arasına LCL filtre devresi yerleştirilmiştir. ANFÇK'lü RGÜS'nin devresine

LCL filtre devresinin yerleştirilmesiyle yük akımı, yükün çektiği güç, terminal gerilimi ve sistemin frekans değeri 80kW'lık yük için simülasyon sonuçları aşağıda Şekil VI. 69'da verilmektedir.



Şekil VI. 69 AC-DC-AC Güç Dönüştürücülü ve ANFÇK'lü RGÜS'nin Terminal Gerilimi, Yük Akımı, Tüketici Gücü ve Sistemin Frekansındaki Değişim Eğrileri

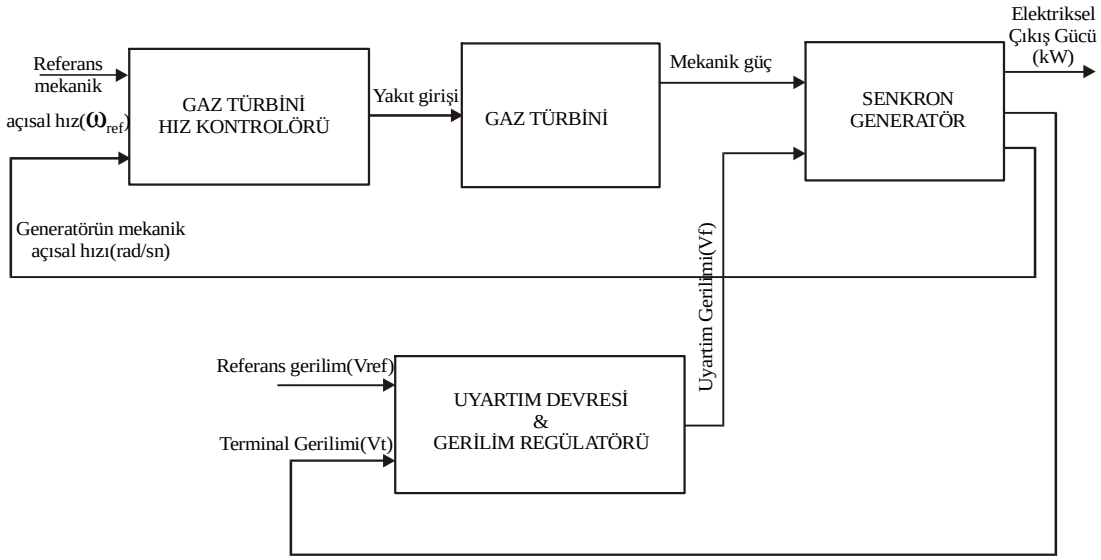
Şekil VI. 69'da görüldüğü, AC-DC-AC güç dönüştürücüsü kullanarak arzu ettiğimiz 50Hz frekansta terminal geriliminin 400V değerine yakın bir gerilim değeri elde edilmiştir. Tüketici yüklerinin beslenmesi için şebeke gerilimi 400V ± %5·$U_{faz-faz}$ ve frekansın 50Hz ± %1 olması istenilmektedir. Bu istenilen işletme değerleri ile Şekil VI. 69'da elde ettiğimiz elektriksel büyüklükleri kıyasladığımızda arasında hemen hemen çok büyük bir fark olmadığı görülmektedir. Yalnız harmonik etkisini tamamen yok edemediğimizden dolayı güç eğrisi diğer eğrilere kıyasla biraz daha kalın görülmektedir. RGÜS'i, yaklaşık 0.3 saniye gibi kısa bir sürede gerilim ve frekans istenilen işletme değerine ulaşmıştır. Bu değerlere bağlı olarak akım ve tüketici gücü eğrileri de aynı zaman aralığında kararlı çalışma noktasına gelmiştir. Belirtilen zaman aralığından (0.3 saniye) sonra, elektrik işletmelerinde sürekli hal hatasının sıfır olduğu ve sistemin stabilite olması yönünden iyi bir sonuç olduğunu söyleyebilir. Şekil VI. 70'deki gerilim eğrisi Şekil VI. 69'da gösterilen terminal gerilim eğrisinin aynısıdır. Fakat Şekil VI. 69'da zaman aralığı 0-1.5 saniye olduğundan eğriler üst üste oturmuştur. Gerilim eğrisindeki bozukluk ve harmonik etkileri net görülmediği için Şekil VI. 70'deki terminal gerimi eğrisi yeniden gösterilmektedir.



Şekil VI. 70 Güç Dönüştürücülü Ve ANFÇK'lü RGÜS'nin Terminal Geriliminin 0.1 Saniyelik Zaman Aralığında Daha Açık Görünümü

VI.2 GAZ GÜÇ ÜRETİM SİSTEMİNİN SİMÜLASYONU VE KONTROLÜ

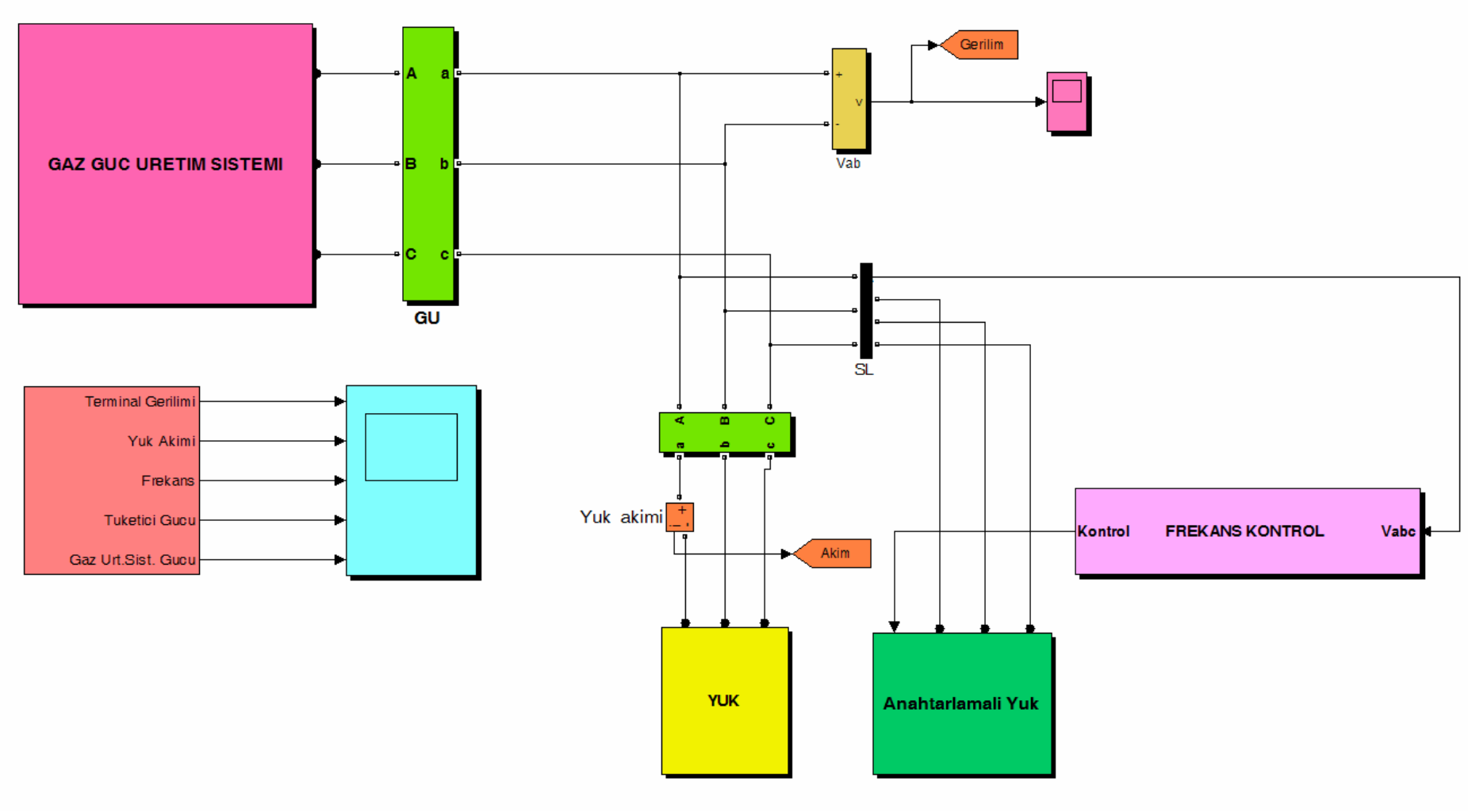
Gaz güç üretim sistemi(GGÜS); gaz türbini hız kontrolörü, gaz türbini, senkron generatör, uyartım devresi ve gerilim regülatöründen oluşmaktadır. Gaz güç üretim sisteminin simülasyon blok diyagramı aşağıda Şekil VI. 71'de görülmektedir.



Şekil VI. 71 Gaz Güç Üretim Sisteminin Blok Diyagramı

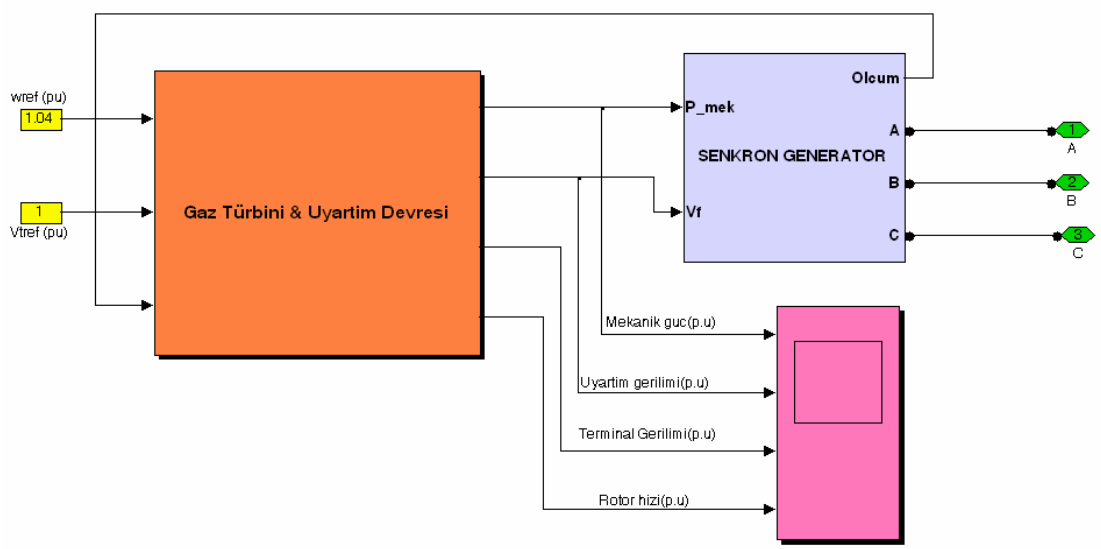
Yapılan çalışmada kullanılan gaz türbininin gücü 400kW'dır. Gaz güç üretim sisteminin dinamik davranışını gözlemleyebilmek için Şekil VI. 71'de verilen sistem bileşenleri MATLAB/Simulink programı ve bu program içersinde yer alan Power System Toolbox'un kullanılarak gerçekleştirilmiştir. Gaz güç üretim sistemini oluşturan bileşenlerin her biri Bölüm V'de ayrıntılı analizi yapılmış ve bileşenlerin davranışlarını tanımlayan denklemlerle de ifade edilmiştir. Bölüm V'de verilen blok diyagramlarını ve bileşen davranışlarını tanımlayan bağıntıları bir araya getirerek gaz güç üretim sistemi bu bölümde oluşturulmuştur.

Gaz güç üretim sisteminde, sistemin terminal gerilimi ve frekansı arzu edilen veya işletme şartlarının izin verdiği sınırlar dahilinde korunmaya çalışılırsa, kararlı bir çalışma gerçekleştirilmiş demektir. Gaz güç üretim sistemini sürekli çalışma durumunda istenilen elektriksel büyüklüklerde işletmek için iki temel kontrol ünitesi vardır. bunlardan birincisi; hız kontrolü, ikincisi ise uyartım devresi gerilim kontrolüdür.



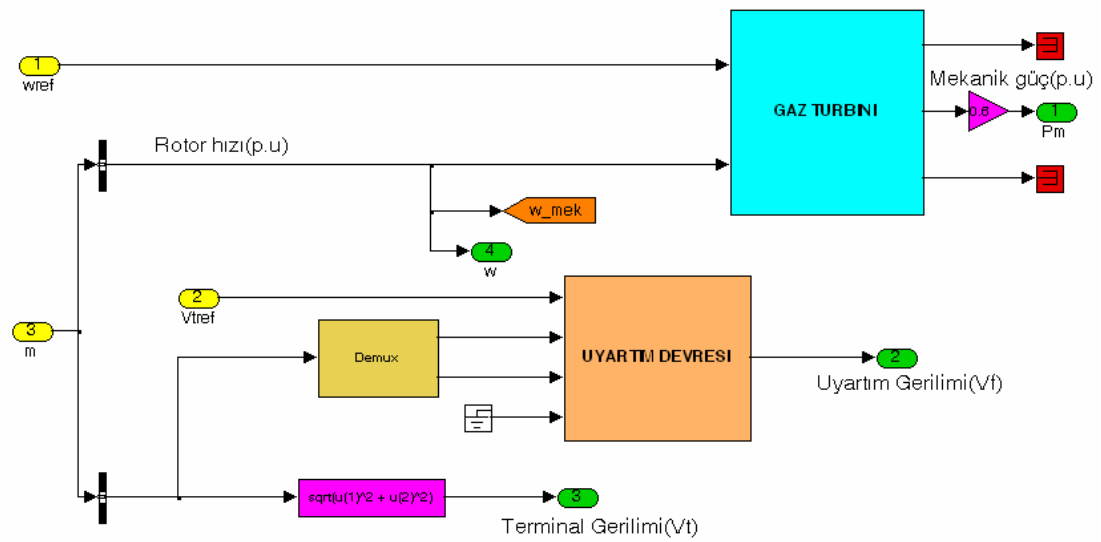
Şekil VI. 72 Gaz Güç Üretim Sisteminin Simülasyon Blok Diyagramı

Şekil VI. 72'de, gaz güç üretim sistemi ve bileşenlerinin Matlab/Simulink programında gerçekleştirilen simülasyon blok diyagramı gösterilmektedir. GGÜS'i gaz türbini, uyartım devresi, gerilim regülatörü, silindirik kutuplu senkron generatör, baralar, yük, anahtarlamalı yük, frekans kontrol ünitesi, ampermetre, voltmetre ve elektriksel büyüklükleri gösteren gösterge elemanından oluşmaktadır. Gaz güç üretim sisteminin alt bileşeni Şekil VI. 73'de verilmiştir.



Şekil VI. 73 GGÜS'nin Gaz Türbini, Uyartım Devresi, Gerilim Regülatörü ve Senkron Generatörü İçeren Simülasyon Blok Diyagramı

GGÜS'nin bileşenlerinden gaz türbini ve uyartım devresinin simülasyon blok diyagramı da Şekil VI. 74'de gösterilmektedir.



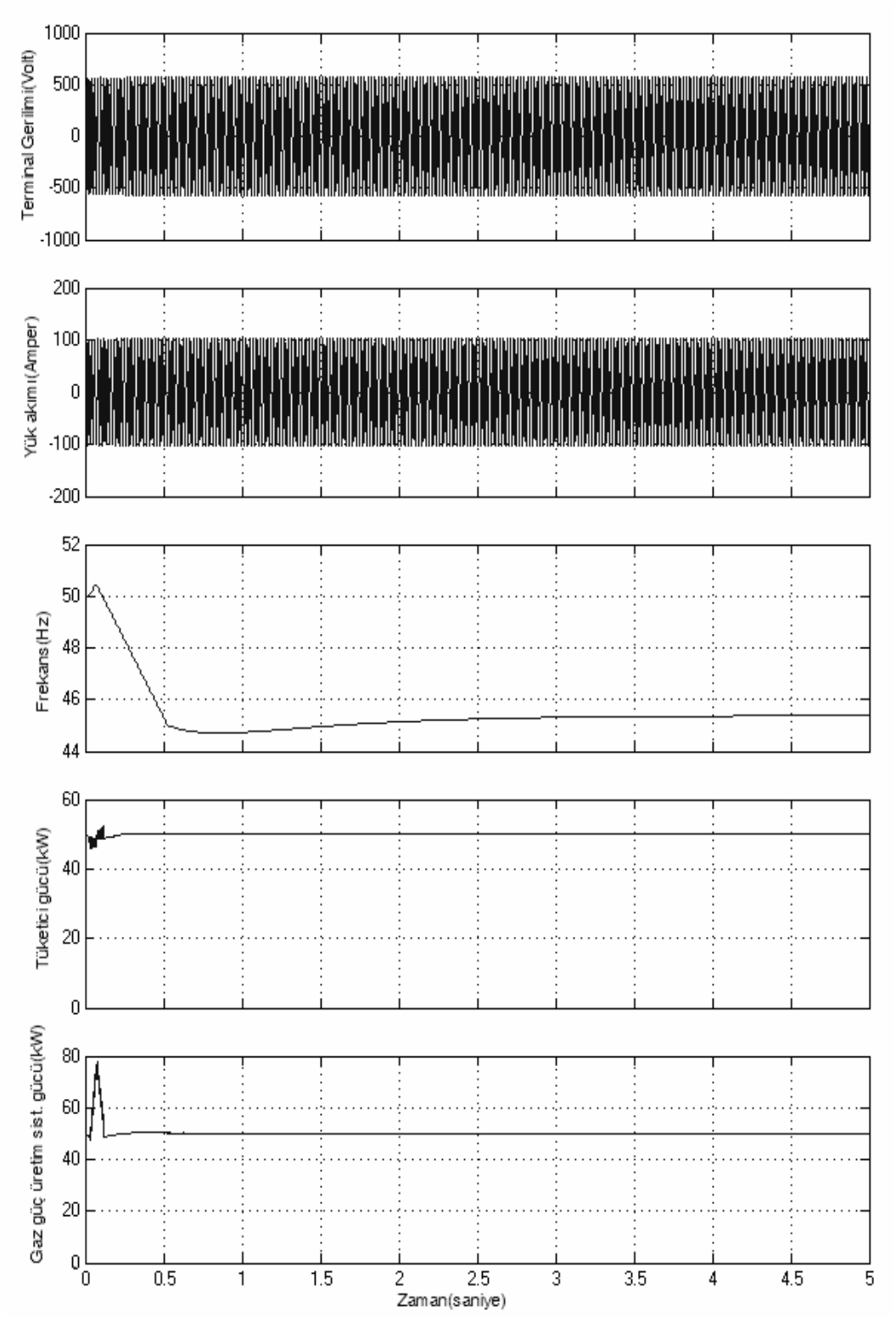
Şekil VI. 74 GGÜS'nin Gaz Türbini ve Uyartım Devresinin Alt Simülasyon Blok Diyagramı

Gaz güç üretim sisteminde, senkron generatörün uyartım devresi gerilimi sabit olup generatör girişine uygulanan ikinci büyüklük mekanik enerji girişini ayar ederek sistemin frekansı aynı zamanda gerilimi denetim altına alınmaktadır. Hız kontrolör elemanı, senkron generatör için uygun yakıt akışını(gaz) veya hava oranını sağlamakla görevlidir. Hız kontrolör elemanı ile gaz türbin sistemi senkron makina için gerekli olan mekanik gücü sağlarken iki önemli husus göz önünde bulundurulur. Bunlardan birincisi; tüketiciler için gerekli olan güç gereksinimi, ikincisi ise terminal gerilimi ve frekansının işletmenin izin verdiği sınırlar içinde tutulmasıdır. Eğer bu iki önemli husus arzu edilen değere ne kadar yakın olursa, işletmenin güvenirliliği ve verimliliğinden o kadar söz edebiliriz.

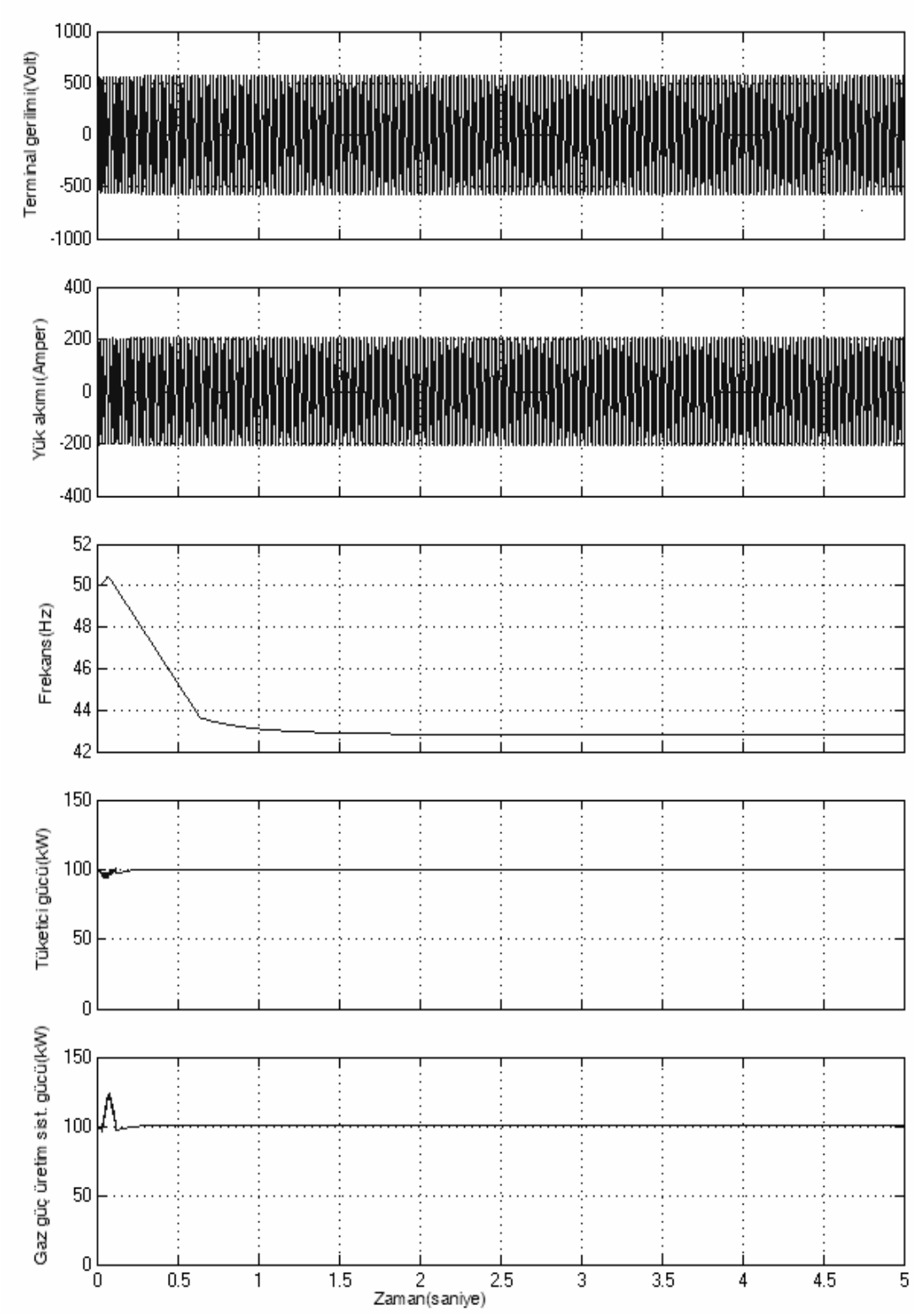
Senkron generatöre giren ikinci giriş büyüklüğü, uyartım devresi alan akımı veya gerilimidir. Uyartım devresi akımını ayar ederek generatörün çıkış gerilimi denetim altına alınır. Aynı zamanda uyartım akımı ile senkron generatörün ürettiği reaktif güç ayarlaması da gerçekleştirilir. Yapılan çalışmada, öncelikli olarak tüketiciler için gerekli olan aktif güç gereksinimi olduğu için, generatörün mekanik enerji girişi hız kontrolör elemanı ile kontrol edilmiştir. Senkron generatörün mekanik enerji girişini ayar ederek aynı zamanda gerilim, frekans ve alınan elektriksel güçte denetim altına alınmıştır.

Yapılan çalışmada, gaz güç üretim sisteminden beslenen tüketici yükü arttıkça sistemin frekansı işletmenin izin verdiği 50Hz değerinin altına düşmektedir. İşletmelerde ve şebekelerde izin verilen frekans aralığı 50Hz ± %1·50Hz değerindedir. Arzu edilen frekans aralığında sistemin frekansını korumak için gaz girişini veya akışını kontrol ederek gaz türbin sisteminin ürettiği mekanik gücü senkron generatör için uygun büyüklüğe getirilir. Bu kontrol işlemi de hız kontrolör elemanı gerçekleştirilir. Bu çalışmada, GGÜS'nin çıkış gücünü, frekansını ve gerilimini hız kontrolör elemanı olarak kullandığımız klasik PID kontrolör ve ANFÇK ile denetim altına alınmıştır.

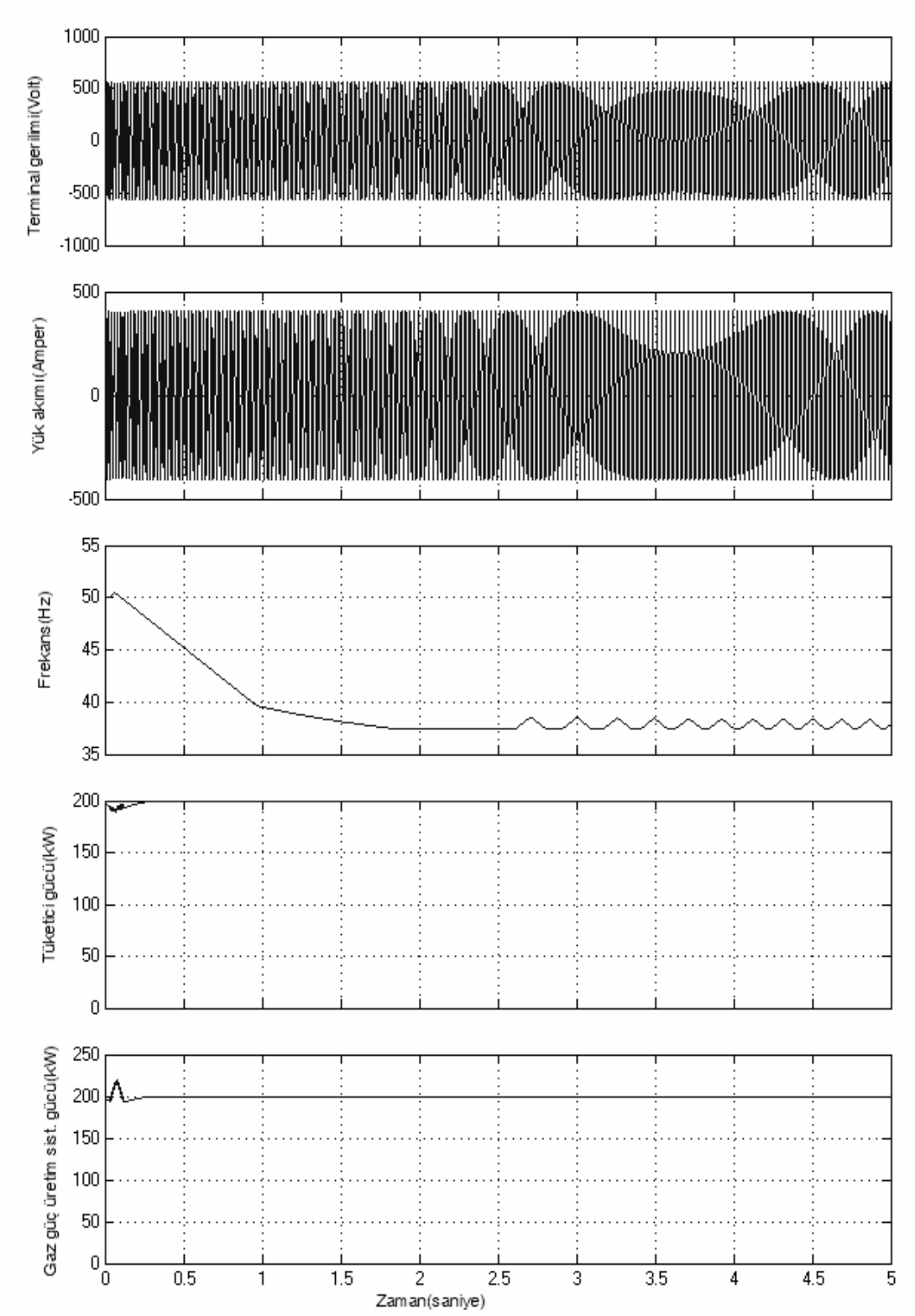
GGÜS'ninde herhangi bir kontrolör elemanı devrede değilken sistemin dinamik davranışı yapılan simülasyon çalışması sonucunda elde edilmiştir. Elde edilen simülasyon verileri zamana bağlı olarak aşağıda yer alan şekillerde ifade edilmektedir. GGÜS'ninde yer alan sistem bileşenlerinin parametreleri Ek.A'da verilmektedir.



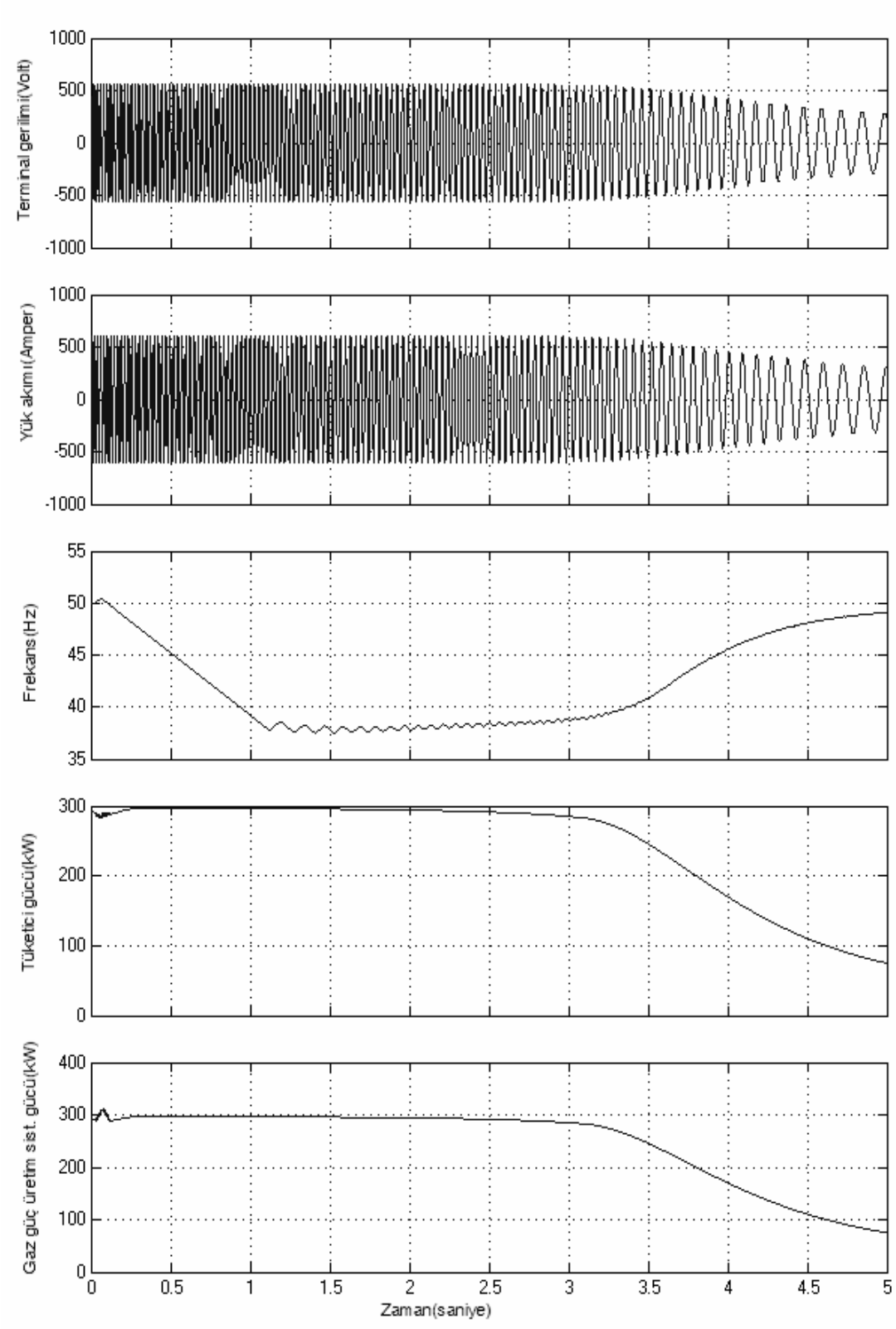
Şekil VI. 75 Hız Kontrolsüz GGÜS'nin 50 kW'lık Tüketici Yükü ile Yüklendiğindeki Elektriksel Çıkış Büyüklüklerindeki Değişim Eğrileri



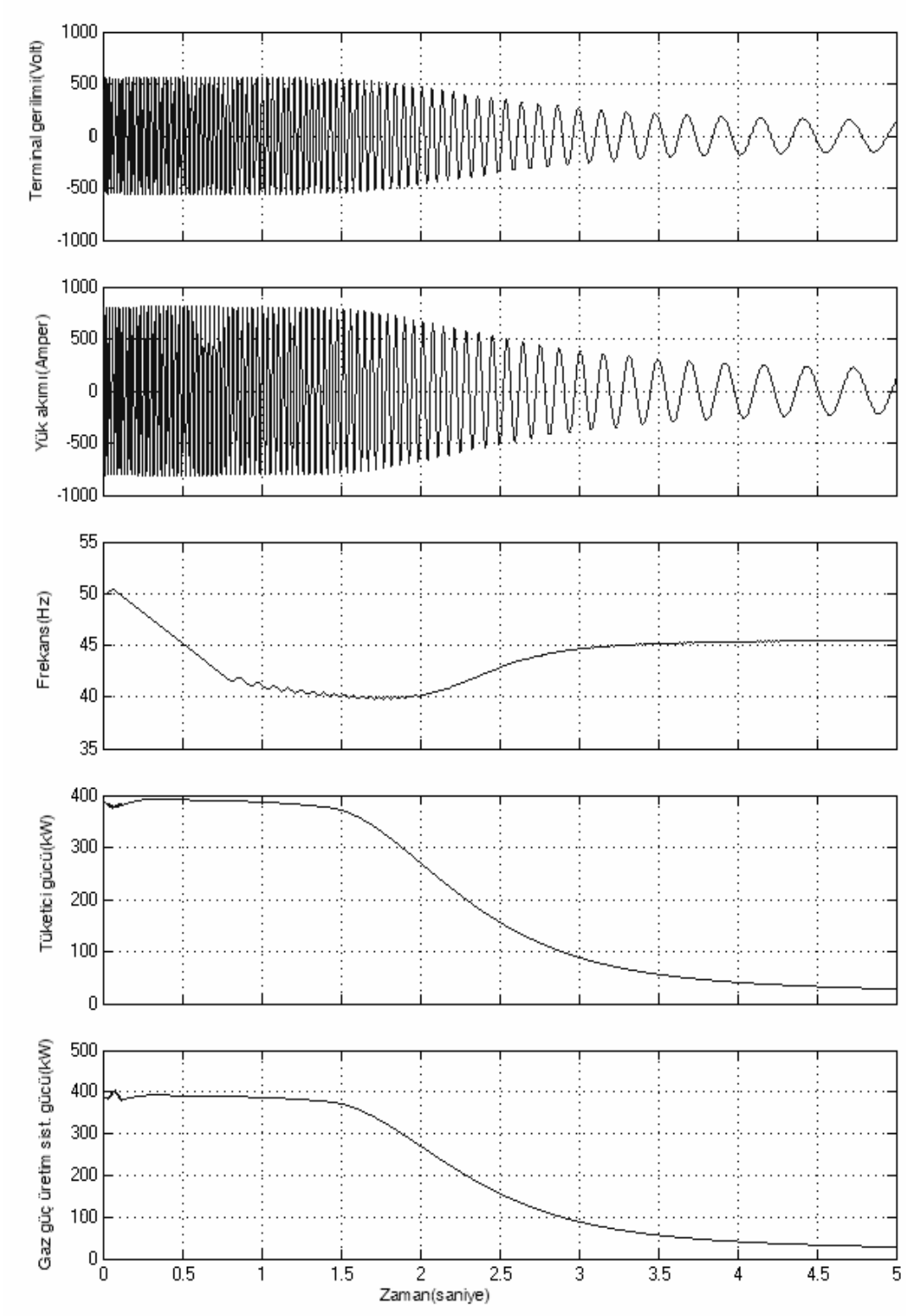
Şekil VI. 76 Hız Kontrolsüz GGÜS'nin 100 kW'lık Tüketici Yükü ile Yüklendiğindeki Elektriksel Çıkış Büyüklüklerindeki Değişim Eğrileri



Şekil VI. 77 Hız Kontrolsüz GGÜS'nin 200 kW'lık Tüketici Yükü ile Yüklendiğindeki Elektriksel Çıkış Büyüklüklerindeki Değişim Eğrileri



Şekil VI. 78 Hız Kontrolsüz GGÜS'nin 300 kW'lık Tüketici Yükü ile Yüklendiğindeki Elektriksel Çıkış Büyüklüklerindeki Değişim Eğrileri



Şekil VI. 79 Hız Kontrolsüz GGÜS'nin 400 kW'lık Tüketici Yükü ile Yüklendiğindeki Elektriksel Çıkış Büyüklüklerindeki Değişim Eğrileri

GGÜS'nde, türbin hızını ayar etmek için kullanılan herhangi bir kontrolör elemanı devrede yok iken ve senkron generatörün uyartım devresi gerilimi oranlanmış değerde sabit tutulduğunda, sistemin elektriksel çıkış büyüklüklerindeki değişimler yapılan simülasyon çalışması sonucunda elde edilmiştir. GGÜS'nin çıkış elektriksel büyüklükleri; terminal gerilimi(volt), yükün çektiği akım(amper), sistemin frekansı(Hz), tüketicinin çektiği güç(kW) ve üretilen aktif güç(kW) olarak yapılan simülasyon çalışmasında ölçülmüştür. Bu ölçülen sistemin çıkış elektrik büyüklükleri farklı tüketici yüklerinin olması durumunda ayrı ayrı incelenmiştir. Yapılan çalışmada, GGÜS'nin nominal işletme gücü 400 kW olduğundan yükleme sınırı nominal gücün %20 kadar izin verilmiştir.

Tüketici yüklerinin 50kW, 100kW, 200kW, 300kW ve 400 kW olması halinde, sırasıyla Şekil VI. 75, Şekil VI. 76, Şekil VI. 77, Şekil VI. 78 ve Şekil VI. 79'da GGÜS'nin dinamik davranışının simülasyon sonuçları verilmiştir. Tüketici güçlerinin 50kW, 100kW ve 200kW olması durumunda alınan simülasyon sonuçlarına baktığımızda, frekansın izin verilen sınırlar dahilinde gerçekleşmediği, gerilimin maksimum değeri *400Ö2 = 565* Volt olması gerekirken bu değerin altında çıktığı Şekil VI. 75, Şekil VI. 76 ve Şekil VI. 77 incelendiğinde görülmektedir.

GGÜS'ninden beslenen tüketici gücü 300 kW ve 400kW olması halinde sistemin çöküşe geçtiği Şekil VI. 78 ve Şekil VI. 79'da görülmektedir. Şekil VI. 78'de görüldüğü gibi, tüketici gücü 300kW değerinde iken GGÜS'i yaklaşık 3 saniye sonra artık talep edilen gücü karşılayamaz duruma gelmiştir. Bu işletme süresinden sonra güç değeri sıfıra doğru iniş göstermiştir. Çünkü, senkron generatörün mekanik enerji girişi sabit kalmış ama beslenen tüketici gücü arttığından dolayı kendisinden istenilen gücü karşılayamamıştır. Tüketici gücü 400kW olduğunda, Şekil VI. 79'danda görüldüğü gibi GGÜS'i yaklaşık 1.5 saniye sonra çöküşe geçmiş, üretim gücü sıfıra doğru inmeye başlamıştır. Aynı şekilde gerilim, akım ve frekans değerleri minimum değere düşmüştür. Bu şekilde GGÜS'i işletmek hem işletme yönünden hem de tüketicilerin beslenmesi açısından kesinlikle mümkün değildir.

Kontrolsüz GGÜS'nin tüketicilerin talep ettikleri gücü karşılaması durumunda, özellikle frekansa ve gerilime çok duyarlı olan alıcılar hissedilebilir oranda zarar göreceklerdir. Hiç bir güç üretim ünitesi kontrolsüz çalıştırılmaz. Çünkü, kontrolsüz

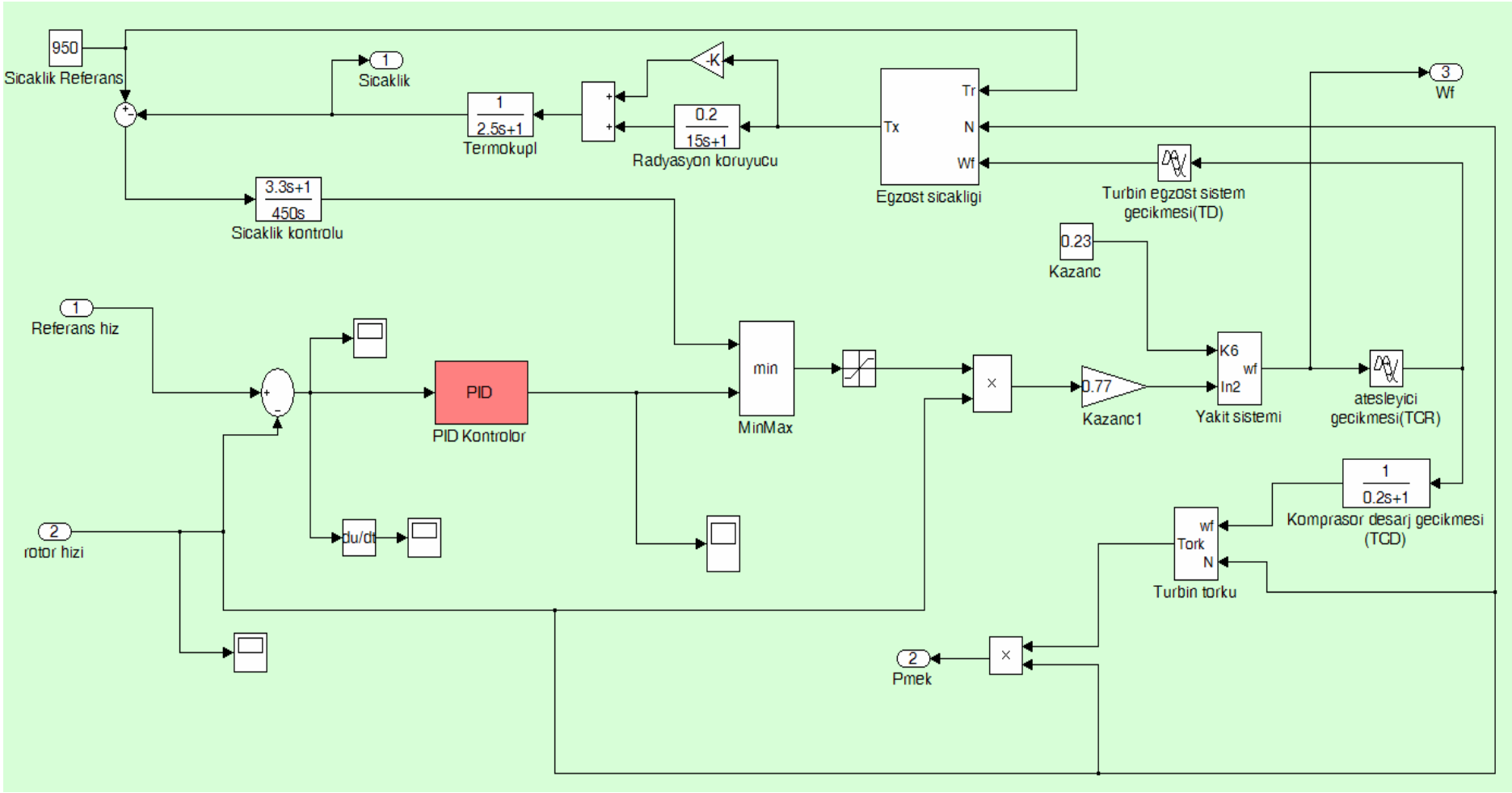
olması halinde üretilen gücün kalitesinden söz edemediğimiz gibi beslenen bütün alıcıların maddi anlamda çok büyük zararlar açacağı görülmüştür. Bu olumsuz işletme şartlarının dolayı tüketicilere istenilen değerlerde elektriksel gücü sağlamak için güç üretim ünitelerinin kontrolü üzerine bilimsel ve teknolojik gelişmelere paralel olarak ileri düzeyde insan mantığı gibi hareket eden kontrolörler geliştirilmiştir. Bu ileri düzey kontrolörler; bulanık kontrolör, yapay sinir ağ kontrolörü, adaptif neuro_fuzzy kontrolör ve benzeri gibidir.

VI.2.1 Gaz güç üretim sistemi türbin hızının klasik PID kontrolör ile denetimi

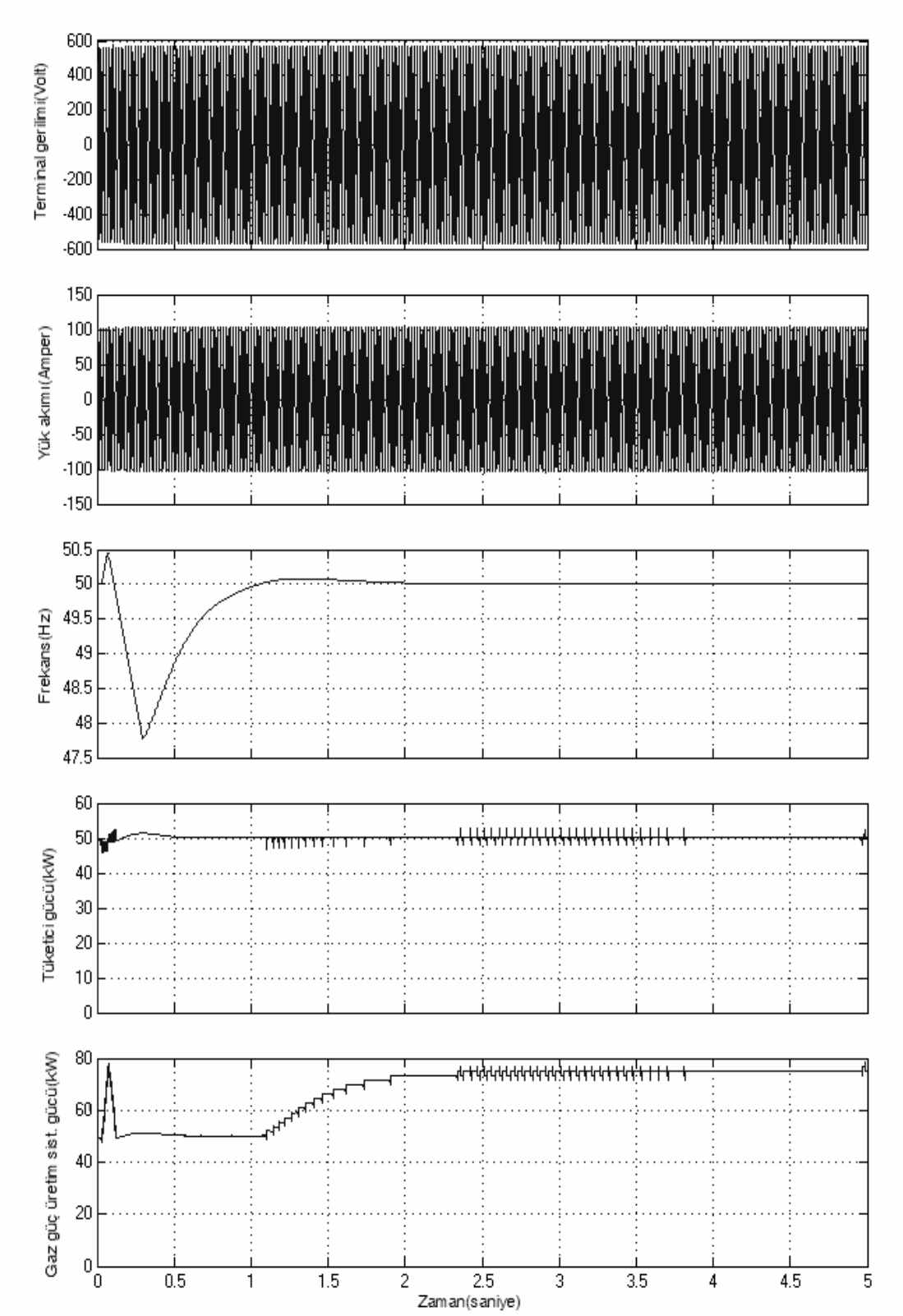
GGÜS'i çıkışından arzu edilen değerlerde elektriksel büyüklükleri(terminal gerilimi, akımı, frekansı ve üretim gücünü) elde etmek için gaz türbinin hız kontrolünü denetim altına almak gerekmektedir. Gaz türbini hız denetimi için kullanılan klasik PID kontrolör hakkında bilgi Bölüm VI.1.5.2'de verilmektedir. Gaz türbin hız kontrolünü denetlememizdeki amaç, GGÜS'nin yakıt(gaz) akışını kontrol ederek türbin çıkışında elde edilen mekanik gücü istenilen noktaya getirmektir.

Gaz akışı arttıkça türbin çıkışından elde edilen mekanik güç artmakta, buna bağlı olarak ta senkron generatörün rotor hızı yükselmektedir. Senkron generatörün rotor hızına bağlı olarak üretilen gerilimin hem genliği hem de frekansı sınır işletme değerinin üzerine çıkmaktadır. Bu durum senkron makina açısından düşünüldüğünde, yüksek hızlarda generatör mekanik zorlamalara maruz kalmakta ve büyük maddi hazara neden olmaktadır. Tüketici tarafından incelediğimizde, yüksek frekans ve gerilimde çalışan özellikle döner alan makinaları hissedilebilir oranda zarar görmektedir.

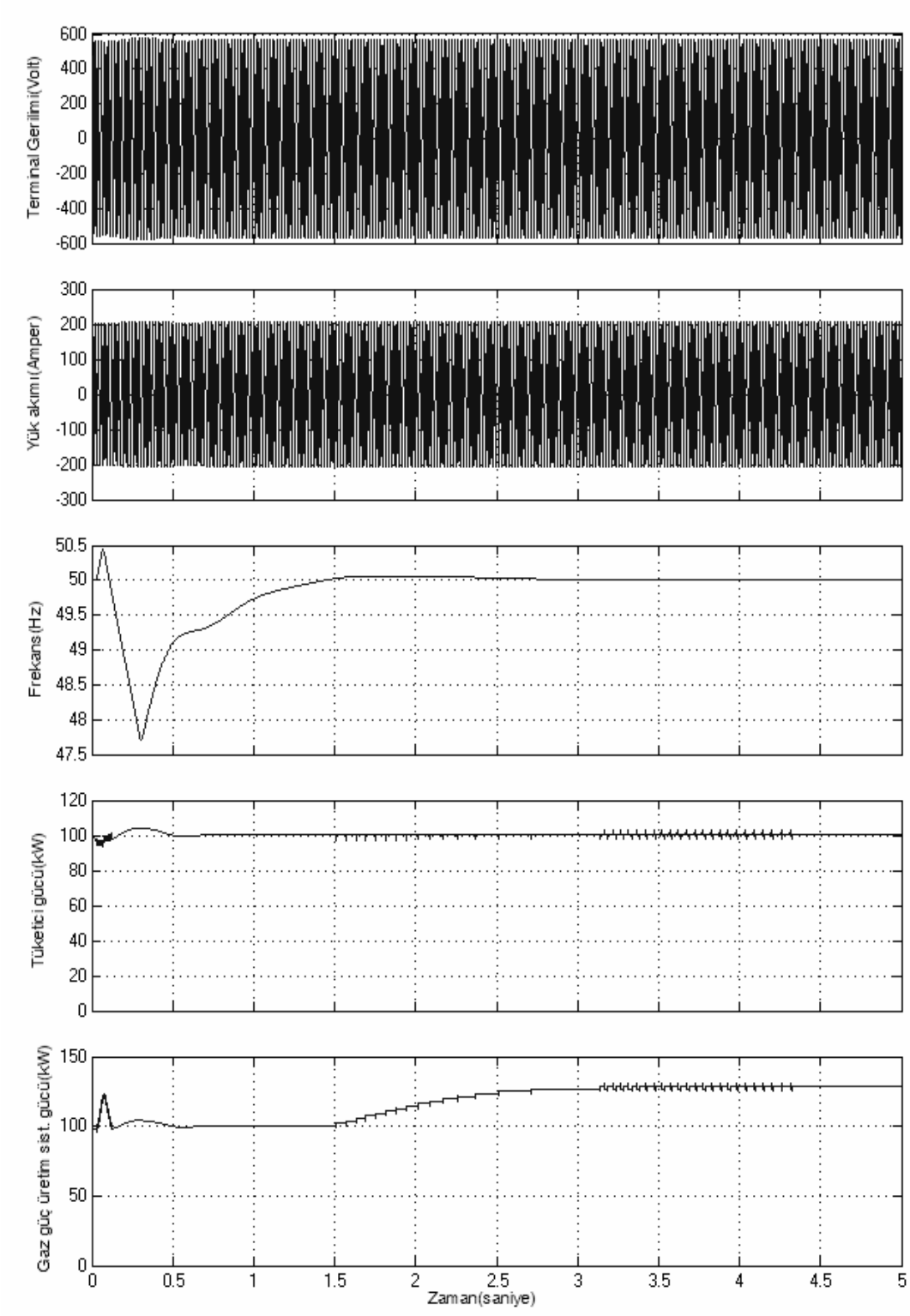
GGÜS'nde, gaz akışı istenilen değerin altında gerçekleştiğinde, senkron generatörün hızı oranlanmış hızın altında olacağından frekans ve gerilim değeri aynı oranda düşük olacaktır. Sonuçta, bu gibi işletme durumlarında en büyük zararı beslenen tüketiciler görmektedir. Güç üretim enerji tesisleri de, bu olumsuz işletme şartlarından etkilendiği görülmektedir. Bu gibi olumsuz işletme şartlarına uzun süre izin vermemek için, Şekil VI. 80'de görüldüğü gibi gaz türbininin hız denetimi klasik PID kontrolör ile gerçekleştirilmiştir.



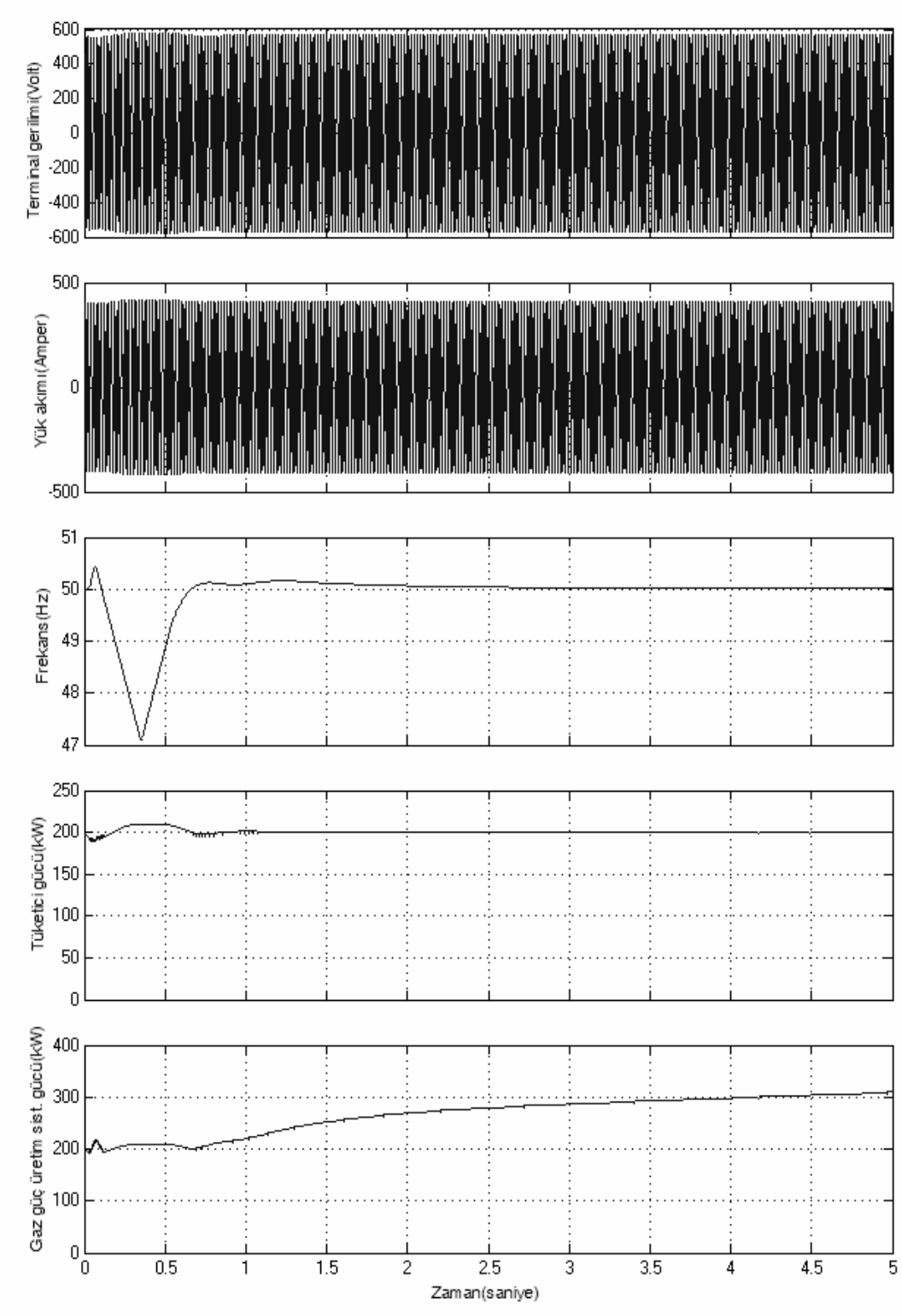
Şekil VI. 80 Gaz Türbini Hız Denetiminin Klasik PID Kontrolör ile Gerçekleştirilmesi ait Simülasyon Blok Diyagramı



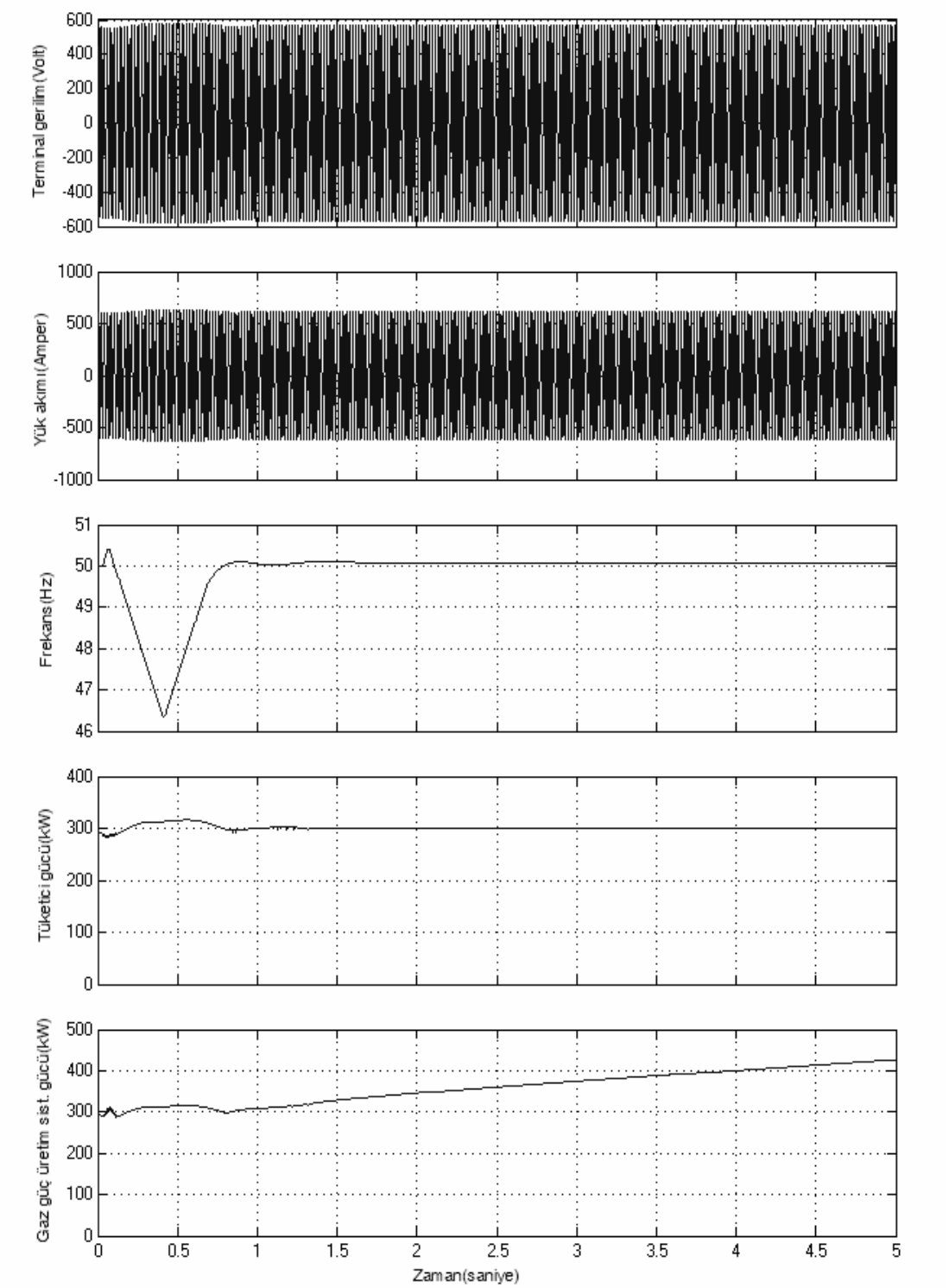
Şekil VI. 81 Klasik PID Hız Kontrollü GGÜS'nin 50 kW'lık Tüketici Yükü ile Yüklendiğindeki Elektriksel Çıkış Büyüklüklerindeki Değişim Eğrileri



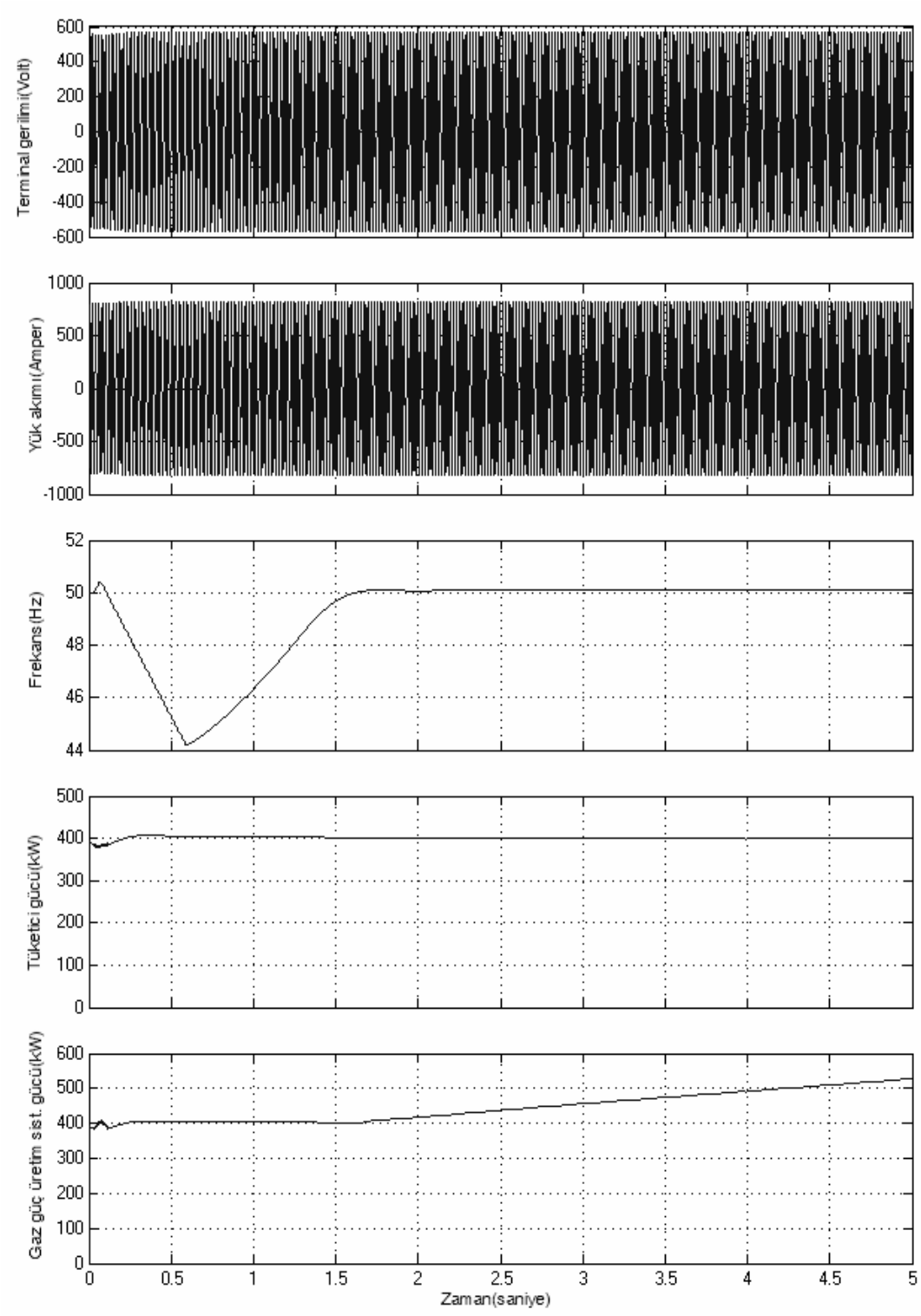
Şekil VI. 82 Klasik PID Hız Kontrollü GGÜS'nin 100 kW'lık Tüketici Yükü ile Yüklendiğindeki Elektriksel Çıkış Büyüklüklerindeki Değişim Eğrileri



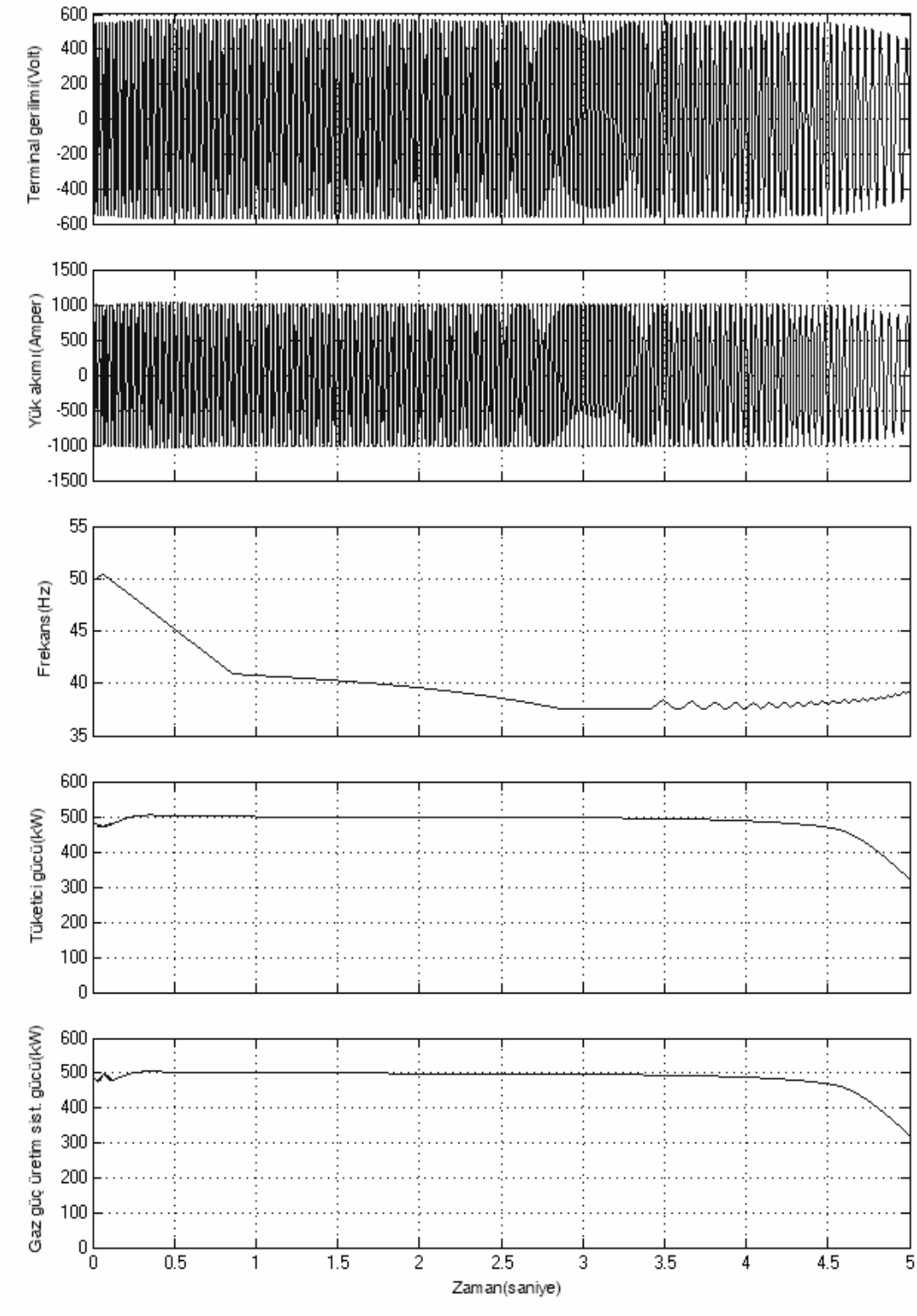
Şekil VI. 83 Klasik PID Hız Kontrollü GGÜS'nin 200 kW'lık Tüketici Yükü ile Yüklendiğindeki Elektriksel Çıkış Büyüklüklerindeki Değişim Eğrileri



Şekil VI. 84 Klasik PID Hız Kontrollü GGÜS'nin 300 kW'lık Tüketici Yükü ile Yüklendiğindeki Elektriksel Çıkış Büyüklüklerindeki Değişim Eğrileri



Şekil VI. 85 Klasik PID Hız Kontrollü GGÜS'nin 400 kW'lık Tüketici Yükü ile Yüklendiğindeki Elektriksel Çıkış Büyüklüklerindeki Değişim Eğrileri



Şekil VI. 86 Klasik PID Hız Kontrollü GGÜS'nin 500 kW'lık Tüketici Yükü ile Yüklendiğindeki Elektriksel Çıkış Büyüklüklerindeki Değişim Eğrileri

Gaz güç üretim sisteminin türbin hız kontrolü klasik PID kontrolör denetiminde gerçekleştirilmiş ve alınan simülasyon sonuçları eğrilerle yukarda ayrı ayrı verilmiştir. GGÜS'nin 50kW, 100kW, 200kW, 300kW, 400kW ve 500kW'lık tüketici yükleri ile yüklenmesi durumundaki dinamik davranışı her bir yük durumu için incelenmiştir. Belirtilen tüketici yüklerinin her bir durumu için alınan simülasyon sonuçları Şekil VI. 81, Şekil VI. 82, Şekil VI. 83, Şekil VI. 84, Şekil VI. 85 ve Şekil VI. 86'da ayrı ayrı gösterilmektedir. Her bir yükleme durumunda, GGÜS'nin elektriksel çıkış büyüklüklerini (terminal gerilimi, yük akımı, frekans, tüketicinin çektiği güç ve üretim gücü) istenilen değerlerde korumak için klasik PID kontrolörün kazanç katsayıları deneme yoluyla belirlenmiştir. Belirlenen klasik PID hız kontrolünün kazanç parametre değerleri aşağıda verilmiştir.

Tablo VI. 5 Gaz Türbini Hız Kontrolü için Klasik PID Kontrolörün Kazanç Katsayıları

Tüketici Gücü(kW)	K_P(oransal)	K_I(integral)	K_D(türevsel)
50	4.75	0.02	1.175
100	5.5	0.025	2.15
150	6.75	0.165	2.1
200	8.5	0.25	1.7
250	9	0.5	1.95
300	9.3	0.6	1.6
400	12	1.25	2

GGÜS'nin 50kW, 100kW, 200kW, 300kW ve 400kW'lık tüketici yükleri ile yüklendiği durumdaki Şekil VI. 81, Şekil VI. 82, Şekil VI. 83, Şekil VI. 84 ve Şekil VI. 85 eğrilerine bakıldığında, terminal gerilimi maksimum değerinde(*400xÖ2 @ 565 Volt*) ve sinüzoidal bicimdedir. Yük akımıda çekilen güç oranı değerinde ve düzgün sinüzoidal eğri şeklindedir. İşletme frekansı 50Hz'e hemen hemen eşit ve bütün yük durumlarında 1.5 saniye gibi kısa sürede istenilen değere oturmaktadır. Terminal gerilimi, yük akımı ve frekans değerleri arzu edilen değer aralığında olduğundan dolayı GGÜS'den çekilen ve üretilen güç eğrilerine bakıldığında istenilen biçimde gerçekleştiği görülmüştür. GGÜS'nin nominal gücü 400 kW değerinde olduğundan dolayı tüketicinin talep ettiği 500 kW'lık güç talebine Şekil VI. 86'da görüldüğü gibi

yaklaşık 4.5 saniye dayanabilmiştir. Bu işletme süresinden sonraki sürelerde bütün elektriksel büyüklük değerleri sıfıra doğru inmiştir. Yani GGÜS'i talep edilen güç talebini karşılayamadığı için çökmüştür. Bu gibi işletme durumlarında, yedek güç üretim ünitesi devreye alınmalı veya işletme durumundaki güç devre dışı bırakılmalıdır. Genellikle, talep güç arttığında her zaman işletmelerde hazır bekletilen yedek güç üretim üniteleri devreye alınarak tüketicilerin enerjisiz kalması önlenmiş olmaktadır.

VI.2.2 Gaz Güç Üretim Sistemi Türbin Hızının Adaptif Neuro-Fuzzy Kontrolör ile Denetimi

Gaz güç üretim sisteminin işletme performansını geliştirmek, istenilen kalitede ve değerde elektriksel çıkış büyüklüklerini(terminal gerilimi, yük akımı, frekans, tüketicinin çektiği güç ve üretim gücü) elde etmek için adaptif neuro-fuzzy çıkarım sistemine dayalı kontrolör dizayn edilmiştir. Adaptif neuro-fuzzy çıkarım sistemi Bölüm IV'de ayrıntılı bir şekilde anlatılmıştır. Gaz güç üretim sisteminin klasik PID kontrolörü ile denetiminde belirtildiği gibi, türbin hızının adaptif neuro-fuzzy çıkarım kontrolörü(ANFÇK) ile denetimi yapılarak işletmenin izin verdiği sınırlar dahilinde elektriksel büyüklükler elde edilmiştir. GGÜS'nin çıkış geriliminin frekansı da senkron generatörün hızıyla doğru orantılı olduğundan aynı zamanda frekans ayarlaması da yapılmaktadır.

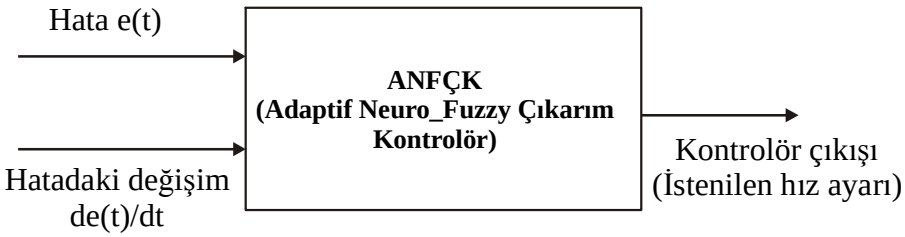
GGÜS'den elde edilen gücün kaliteli olmasının en önemli şartlarından birincisi; gerilimin belirlenen toleranslar dahilinde gerçekleşmesi, ikincisi ise frekansın şebeke frekansı için 50Hz ± %1 dahilinde gerçekleşmesidir. Yani işletme frekansı 49.5 Hz ile 50.5 Hz arasında olduğu zaman herhangi bir olumsuz durumla karşılaşmamız söz konusu değildir. Diğer taraftan gerilim içinde belirlenen tolerans sınırı 400V ± %5'dir. Şebeke gerilimi veya yük terminali uçlarındaki gerilim minimum 360 V ile maksimum 420 V arasıda değişebilmektedir. Günlük yaşantımızdaki işletmelerde de gerilim açısından baktığımızda, çoğu zaman gerilim değerini standart 380 Voltta görmemiz imkansız olabilmektedir.

Gaz türbini hız kontrolünde, ANFÇK'e iki tane giriş sinyali vardır. bunlardan birincisi; referans senkron generatörün hızı (p.u) ile generatörün işletme

durumundaki hızı(p.u) arasındaki fark hata sinyalidir . İkincisi; hata sinyalinin zamana göre değişimidir. Bu belirtilen iki sinyal aşağıda verilen bağıntılarla ifade edilmiştir.

$$e(t) = w_{ref}(p.u) - w_{mek}(p.u) \tag{6.17}$$

$$\frac{de(t)}{dt} = \frac{w_{ref} - w_{mek}}{dt}\ (p.u) \tag{6.18}$$



Şekil VI. 87 Gaz Türbin Hız Kontrolü için ANFÇK'nün Blok Diyagramı

GGÜS'nin klasik PID kontrollü türbin hız denetimi için hazırlanan simülasyon blok diyagramı Şekil VI. 80 verilmiştir. Bu blok diyagramında klasik PID kontrolör yerine ANFÇK'ü kullanılmıştır. Gaz türbini hız kontrolü için gerçekleştirilen ANFÇK'ün blok diyagramı Şekil VI. 87'de görülmektedir.

ANFÇK ile GGÜS'nin kararlı çalışabilmesi için öncelikle sistemi çok iyi tanımamız veya analiz etmemiz gerekmektedir. Eğer sistemi iyi analiz edememişsek yapacağımız kontrol işleminden hiç zaman başarı elde etmemiz mümkün görülmemektedir. Bu yapılan çalışmada, gaz türbin hızının denetimini yaparak sisteme yakıt girişini kontrollü vermek olmak olmuştur. Türbin hızının kontrolünü sağlamakla birlikte sistemin frekansı, çıkış terminallerinden elde edilen gerilimin ve tüketicilerin çektiği gücün sürekli ve istenilen değerde kararlık içinde olması hedeflenmiştir. Öncelikli amacımız bu çalışmada, hız kontrolünü gerçekleştirerek sistemin frekansını ve gerilimini arzu edilen noktaya getirmek olmuştur.

GGÜS'nin frekansı, gerilimi ve tüketicilerin çektiği güç kalitesi istenilen özellikte iken hız kontrolünün çıkışının değerleri belirlenmiştir. Belirlenen bu değerler ANFÇK'ün çıkış büyüklüğünü oluşturmuştur. GGÜS'nin altı farklı 50kW, 100KW, 150kW, 200kW, 250kW ve 300kW değerlerindeki tüketici yüklerinin talep

ettiği enerjiyi karşılarken sistem frekansının ve geriliminin belirlenmiş oranlarda korunması sağlanmıştır. Genellikle elektrik işletmelerinde izin verilen maksimum gerilim düşümü değeri ±%5 değerindedir. Şebekelerde frekans değer aralığındaki durum içinde maksimum değişim aralığı ±%1 olarak ifade edilmektedir. Matlab programı aynı anda 65536 adet veriyi işlediği için 4 farklı yük kademesi için ANFÇK veri tabanı oluşturulabiliyor. Çünkü yukarda belirttiğimiz altı farklı yük kademesini aynı ANFÇK veri tabanına koymak istediğimizde Matlab programında herhangi bir işlemi gerçekleştiremiyoruz. Kalan iki farklı yük kademesi içinde ayrı bir ANFÇK veri tabanı oluşturulmuştur.

GGÜS'nin kontrolsüz durumundaki hata sinyali ***(e(t))*** ve hata sinyalindeki değişim sinyali ***de(t)/dt*** verileri ayrı ayrı kayıt edilmiştir. Daha sonra bu kayıt edilen veriler, MATLAB programında yer alan Fuzzy Logiç Toolbox içersinde ***anfisedit*** yazılımının kullanımıyla işlenmiştir. Bu veriler Bölüm IV'de anlatılan hibrid öğrenme algoritmasının kullanılmasıyla eğitimden geçirilerek önceden tespit ettiğimiz çıkış büyüklüğü ile üst üste gelmesi sağlanmıştır. Eğer belirlediğimiz çıkış sinyali ile ***anfisedit*** yazılımında yapılan eğitim neticesinde elde edinilen sinyaller birebir uymuyorsa sistemin kararlı çalışmasından söz edemeyiz.

Aşağıda Tablo VI. 6'da, GGÜS'nin türbin hız denetiminin ANFÇK' ile yapılmasında ANFÇK'nün veri tabanının ve bulanık (fuzzy) çıkarım sisteminin oluşturulmasında kullanılacak olan datalar verilmiştir. Toplam kullanılan data sayısı 59935 adettir. Bütün dataları vermemiz durumunda çok yer kaplayacağından sınırlı sayıda verilmiştir.

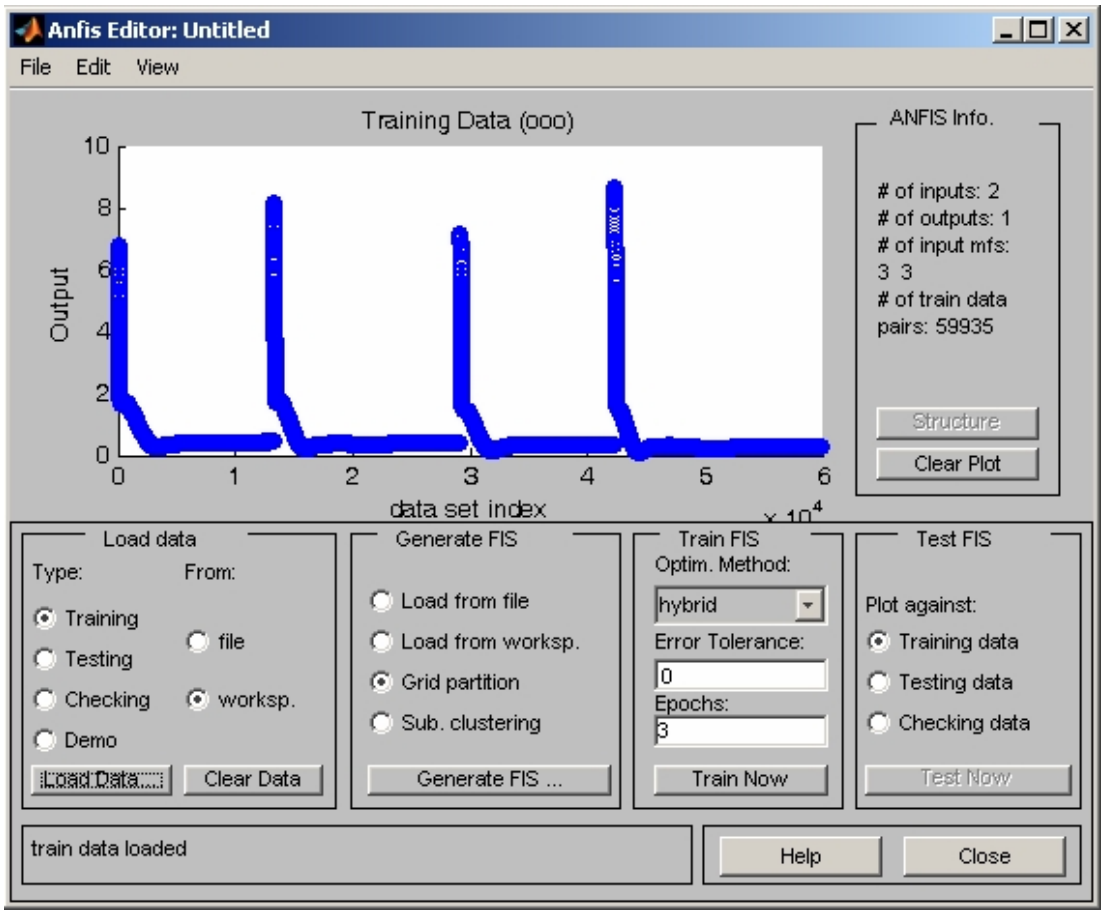
Tablo VI. 6 Gaz Türbin Hız Denetimi için ANFÇK'nin veri tabanının oluşturulmasında kullanılan giriş ve çıkış data değerleri

Veri adeti	Hata[e(t)]	Hatadaki değişim[de(t)]	Kontrolör çıkışı[u(t)]
1	0,04	0	6,772000000000006
2	0,04	0	6,772000000000006
3	0,040000028584959	0,367799574825819	6,77195510158763
4	0,04000008578169	0,367972073358606	6,771865310004296
5	0,040000326806333	0,368867037383962	6,771487964405639
6	0,040000700412136	0,370695423376049	6,770906296732522
7	0,040002601125864	0,37718144305858	6,768004374992795
8	0,040005113368307	0,389102645742314	6,764301489097074
9	0,040008772627065	0,404190716352554	6,759136475148565
10	0,040012580486311	0,420604679321736	6,754001313441071

11	0,040017805950173	0,43789667537425	6,747274749500914
12	0,040023244702046	0,455770325234069	6,740592355294696
13	0,040030217468971	0,473453517130425	6,732400281361961
14	0,040037445051187	0,490755571971895	6,724263469636392
15	0,040044895241149	0,50587072227987	6,716176393330938
16	0,040054621986936	0,520598166009549	6,70598064989467
.....	.....	.....	.....
.....	.....	.....	.....
.....	.....	.....	.....
.....	.....	.....	.....
.....	.....	.....	.....
.....	.....	.....	.....
.....	.....	.....	.....
.....	.....	.....	.....
.....	.....	.....	.....
.....	.....	.....	.....
59914	0,039089428485576	0,001539027940645	0,287533500335813
59915	0,0390897357585	0,00153636462108	0,287537211549273
59916	0,039090042499126	0,001533703130052	0,28754080162943
59917	0,039090348707816	0,001531043447578	0,287544272981651
59918	0,039090654384926	0,001528385550342	0,28754762796271
59919	0,039090959530809	0,001525729418361	0,28755086888191
59920	0,039091264145815	0,001523075029427	0,28755399800191
59921	0,039091568230288	0,001520422362456	0,287557017539712
59922	0,039091871784567	0,001517771397453	0,2875599296676
59923	0,039092174808989	0,001515122108886	0,287562736513795
59924	0,039092477303885	0,001512474478993	0,287565440163652
59925	0,039092779269582	0,001509828486679	0,287568042660378
59926	0,039093080706403	0,001507184106409	0,287570546005657
59927	0,039093381614668	0,001504541321529	0,287572952160874
59928	0,039093681994689	0,001501900107615	0,28757526304756
59929	0,039093981846778	0,001499260444682	0,287577480548384
59930	0,03909428117124	0,001496622311637	0,287579606507869
59931	0,039094579968378	0,001493985685164	0,287581642733051
59932	0,039094878238487	0,0014913505475	0,287583590994464
59933	0,039095175981862	0,001488716875331	0,287585453026615
59934	0,039095473198791	0,001486084646452	0,287587230528758
59935	0,03909576988956	0,001483453843099	0,287588925165763

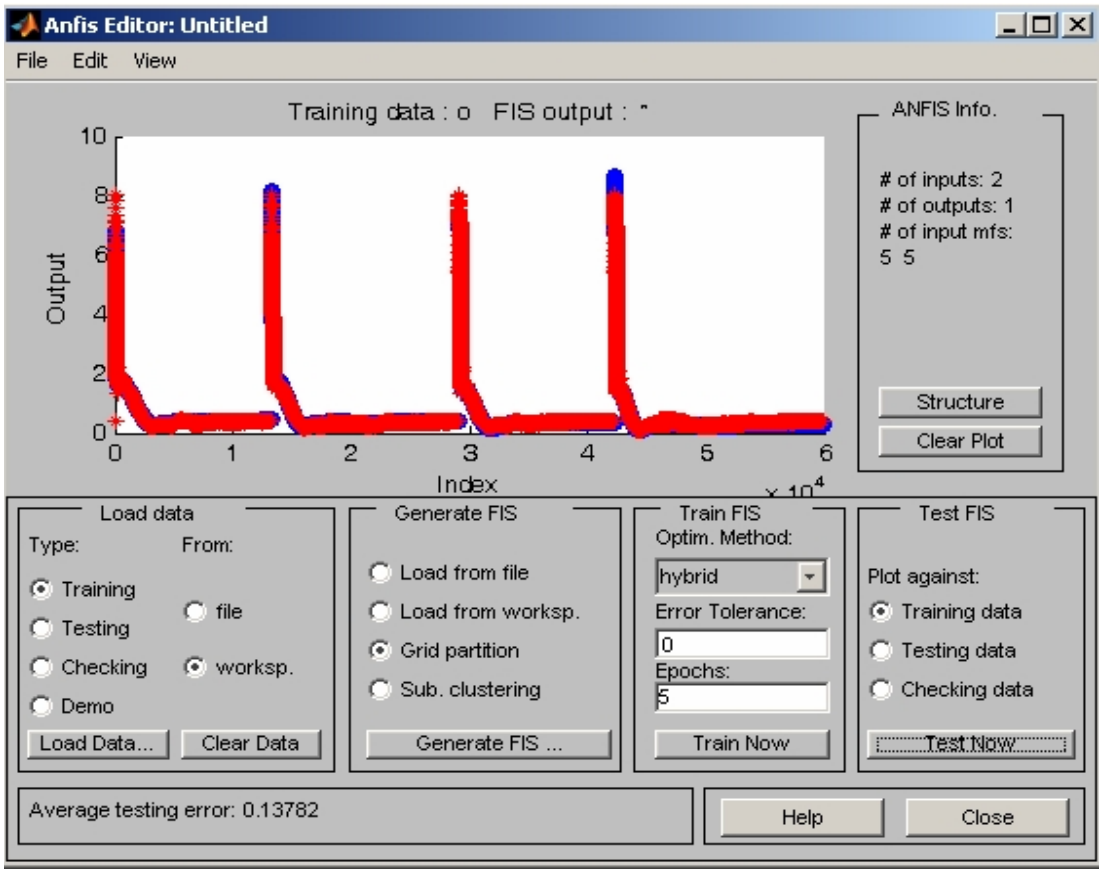
Tablo VI. 6'de verilen toplam 59935 data ***anfisedit*** yazılımına aktarılır. Bu yazılım ile bulanık çıkarım sistemini otomatik olarak oluşturmak için üyelik fonksiyonu tipi, dilsen değişken sayısı ve kaç iterasyon yapılarak hibrid öğrenme algoritmasının uygulanacağı tespit edilmiştir. Aşağıda Şekil VI. 88'de ANFIS

editörüne kontrolör giriş ve çıkış datalarının aktarıldıktan sonraki görüntüsü verilmektedir.

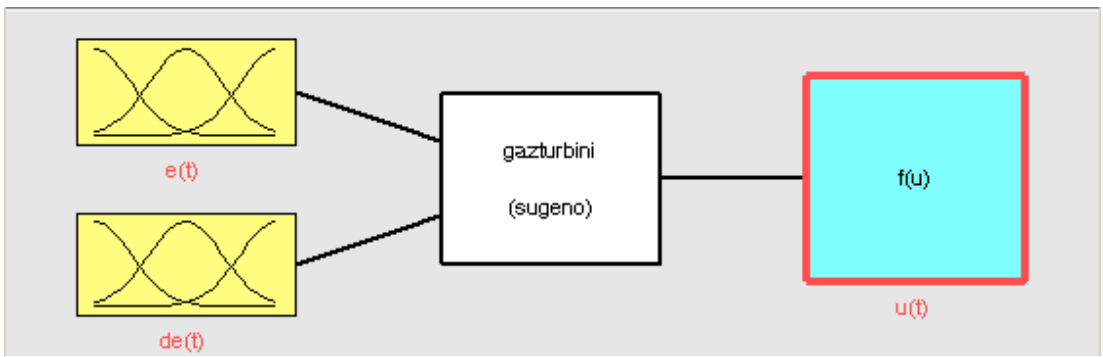


Şekil VI. 88 GGÜS'nin Türbin hız Denetiminin ANFÇK ile Yapılması için Kontrolör Giriş ve Çıkış Datalarının ANFIS Editörüne Aktarımının Görüntüsü

ANFIS editörüne veri aktarım işlemi tamamlandıktan sonra, GGÜS'nin türbin hız kontrolü için üyelik fonksiyonu tipi üçgen, dilsel değişken sayısı beş ve hibrid öğrenme algoritması ile dataların eğitimi için beş iterasyon(deneme) uygulanmıştır. beş iterasyon sonucunda, sistemin kararlı çalışma durumu için önceden belirlediğimiz kontrolör çıkışı göre sistemin çalışma anında giriş sinyalleri eğitilmiştir. Önceden belirlediğimiz kontrol çıkışı ile eğitim sonucunda elde edilen kontrol çıkışı üst üste çıkmış olması gerekir ki, GGÜS'den beklenilen elektriksel büyüklük değerlerini elde edelim. Hibrid öğrenme algoritması sonucunda da istenilen durumun gerçekleştiğini gösteren durum Şekil VI. 89'de gösterilmektedir.

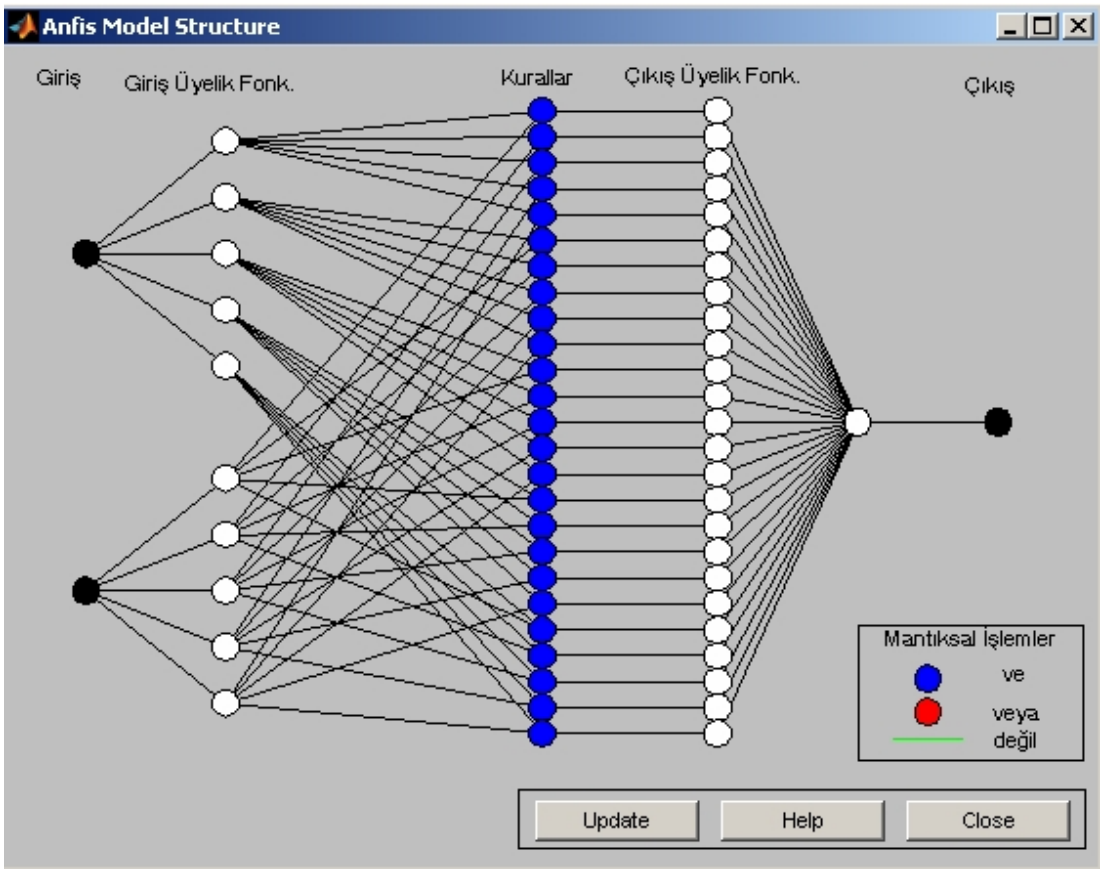


Şekil VI. 89 Gaz Türbini Hız Denetimi için Kullanılan ANFÇK'nun veri Tabanına Hibrid Öğrenme Algoritmasının Uygulanması Sonucunda Elde Edilen Çıkış Sinyalinin Son Durumu



Şekil VI. 90 RGÜS için Sugeno Tipi ANFÇK'nün Üç Giriş ve Bir Çıkış Sinyalinden Oluşan Yapısı

ANFIS editörde yapılan eğitim sonucu, iki giriş ve bir çıkış sinyaline sahip Sugeno tipi bulanık çıkarım sistemi (Fuzzy Inference System) otomatik olarak Şekil VI. 90'da görüldüğü gibi elde edilmiştir. Bu elde edilen bulanık çıkarım sisteminin girişlerinin üçgen tipi üyelik fonksiyonlarının değer aralıkları ile birlikte aşağıda gösterilmiştir.



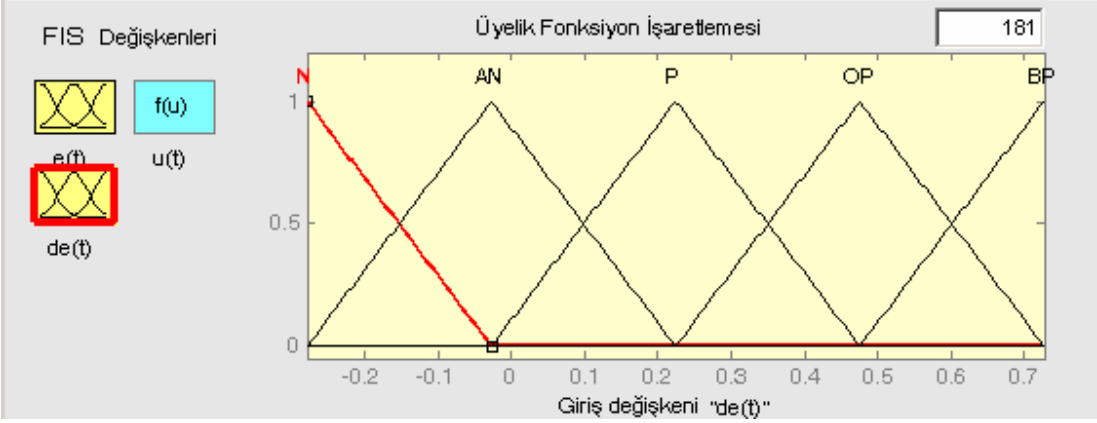
Şekil VI. 91 Gaz Türbin Hız Denetimi için Dizayn Edilen ANFÇK'nün Yapısı

Sugeno tipi ANFÇK'nün çıkış reel sayılardan oluştuğundan dolayı giriş sinyali üyelik fonksiyonu gibi işaretlemesi söz konusu değildir. Çıkış değişkeni 25 adet reel sayılardan oluşmaktadır ve değer aralığı 0.0955 – 8.67 dir.

Şekil VI. 91'den ANFÇK'nün genel yapısı Bölüm IV'de belirtildiği gibi beş tabakan oluşmaktadır. Kural tabanını oluşturulurken mantıksal işlemlerden ***"ve"*** operatörü kullanılmıştır. ANFÇK'nün giriş değişkenlerinin üyelik fonksiyonları dilsel değişkenleri ve değer aralıkları ile birlikte Şekil VI. 92 ve Şekil VI. 93'de ayrı ayrı gösterilmiştir. Elde edilen bulanık çıkarım sisteminin kural tabanı 25 tane kuraldan oluşmaktadır. Bu kurallara ait ayrıntılı bilgi Ek.C'de verilmiştir.



Şekil VI. 92 ANFÇK'nun Giriş Değişkenlerinden Olan Hata[e(t)] Üyelik Fonksiyonu ve Değer Aralığı



Şekil VI. 93 ANFÇK'nun Giriş Değişkenlerinden Olan Hatadaki Değişimin[de(t)] Üyelik Fonksiyonu ve Değer Aralığı

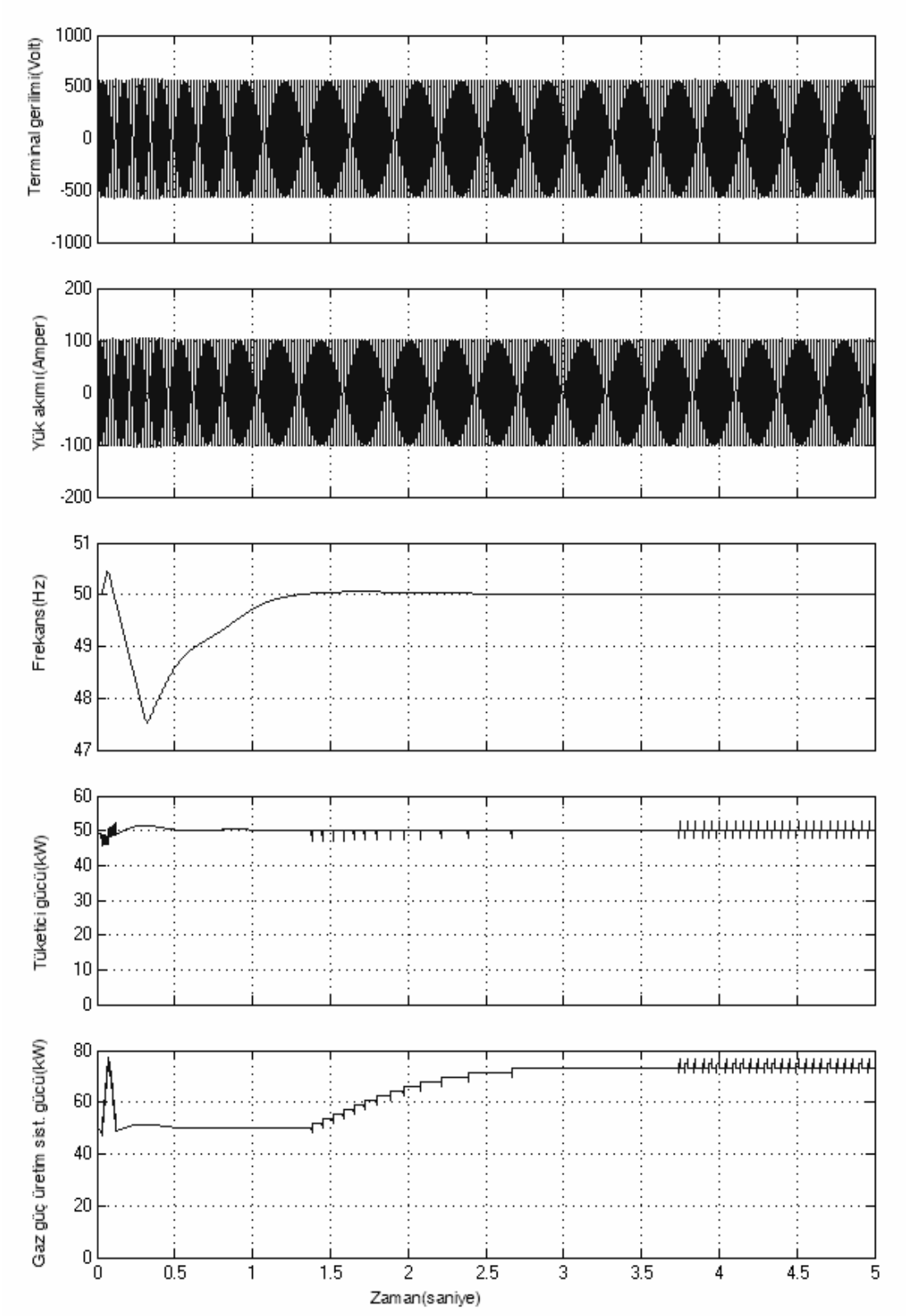
ANFÇK'nin giriş değişkenlerinden hata sinyalinin *[e(t)]* dilsel değişkenleri; küçük pozitif (KP), pozitif(P), orta pozitif(OP), büyük pozitif(BP) ve çok büyük pozitif(ÇBP)'dir. İkinci giriş değişkeni olan hatadaki değişim sinyali *[de(t)/dt]* dilsel değişkenleri; egatif(N), az negatif(AN), pozitif(P), orta pozitif(OP) ve büyük pozitif(BP)'dir.

ANFÇK'nün kural tabanında oluşturulan 25 tane kural, ***Eğer, O halde*** kelimeleri ile sistemin giriş ve çıkış sinyalleri arasında mantıksal operatör kullanarak elde edilmiştir. ANFÇK'ün giriş değişkenleri "***ve***" bağlacı ile birleştirilmiştir. Matlab/Simulink programı, Fuzzy Logic Toolbox içerinde yer alan ***anfisedit*** yazılımı ile elde edilen 25 kural Tablo VI. 7'de verilmektedir. Elde edilen 25 kuralla ilgili ayrıntılı veriler ve üyelik fonksiyonlarının değer aralıkları Ek.C'de verilmiştir.

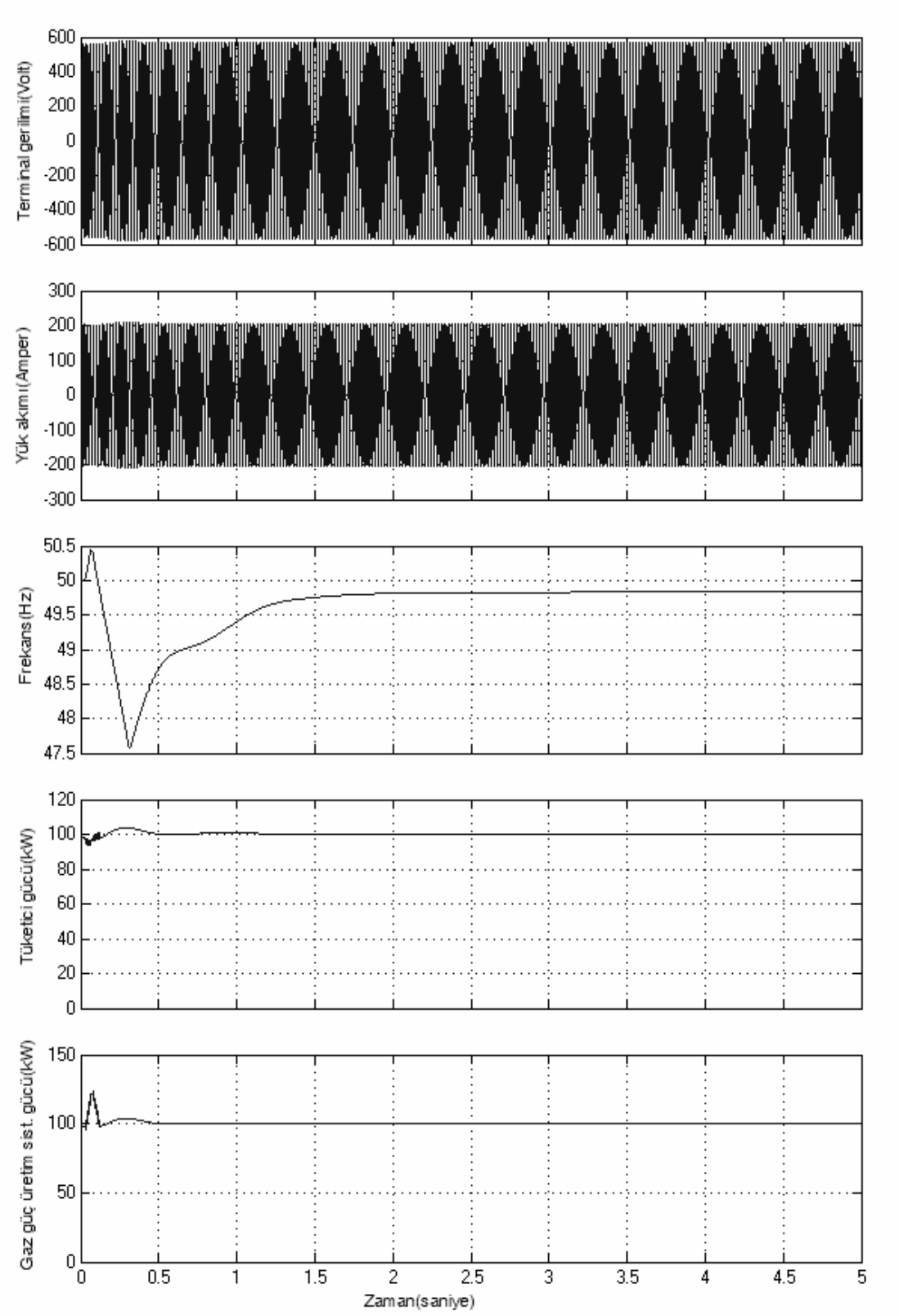
Tablo VI. 7 GGÜS'nin Türbin Hız Kontrolü için Dizayn Edilen ANFÇK'nun Kural Tablosu

KURAL NO	EĞER		O HALDE
	e(t)	de(t)/dt	Kontrolör Çıkışı
1	KP	N	ÇIKIŞ 1
2	KP	AN	ÇIKIŞ 2
3	KP	P	ÇIKIŞ 3
4	KP	OP	ÇIKIŞ 4
5	KP	BP	ÇIKIŞ 5
6	P	N	ÇIKIŞ 6
7	P	AN	ÇIKIŞ 7
8	P	P	ÇIKIŞ 8
9	P	OP	ÇIKIŞ 9
10	P	BP	ÇIKIŞ 10
11	OP	N	ÇIKIŞ 11
12	OP	AN	ÇIKIŞ 12
13	OP	P	ÇIKIŞ 13
14	OP	OP	ÇIKIŞ 14
15	OP	BP	ÇIKIŞ 15
16	BP	N	ÇIKIŞ 16
17	BP	AN	ÇIKIŞ 17
18	BP	P	ÇIKIŞ 18
19	BP	OP	ÇIKIŞ 19
20	BP	BP	ÇIKIŞ 20
21	ÇBP	N	ÇIKIŞ 21
22	ÇBP	AN	ÇIKIŞ 22
23	ÇBP	P	ÇIKIŞ 23
24	ÇBP	OP	ÇIKIŞ 24
25	ÇBP	BP	ÇIKIŞ 25

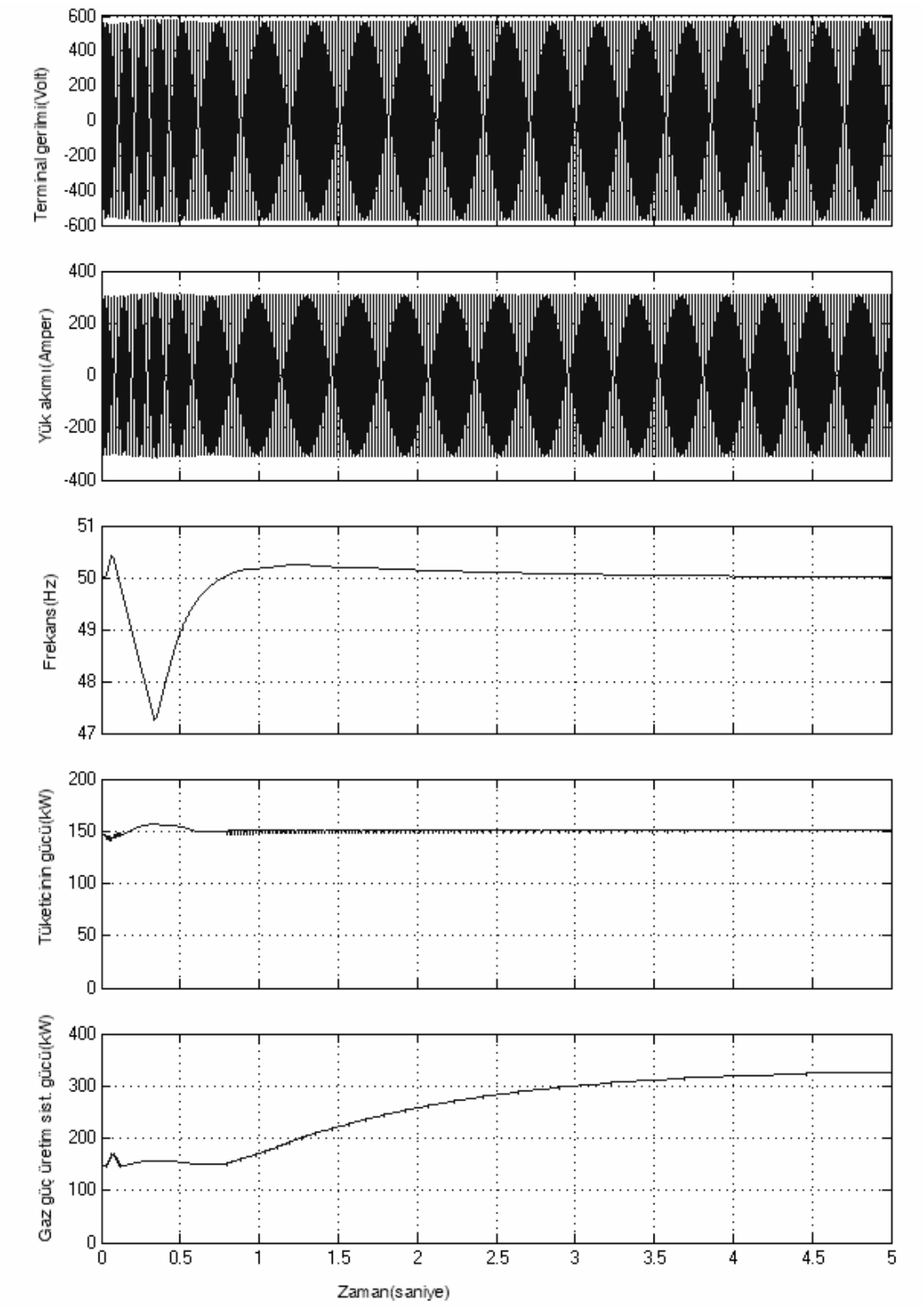
Şehir merkezinden uzak yerleşim birimlerindeki tüketicilerin yükleri 50kW, 100kW, 150kW, 200kW, 250 ve 300kW değerleri arasında değiştiği kabul edilmiştir. GGÜS'nin türbin hız denetimi ANFÇK ile yapılması durumunda, GGÜS'nin belirtilen elektriksel büyüklerindeki değişimler yapılan simülasyon çalışması sonucunda aşağıda ayrı ayrı gösterilmiştir.



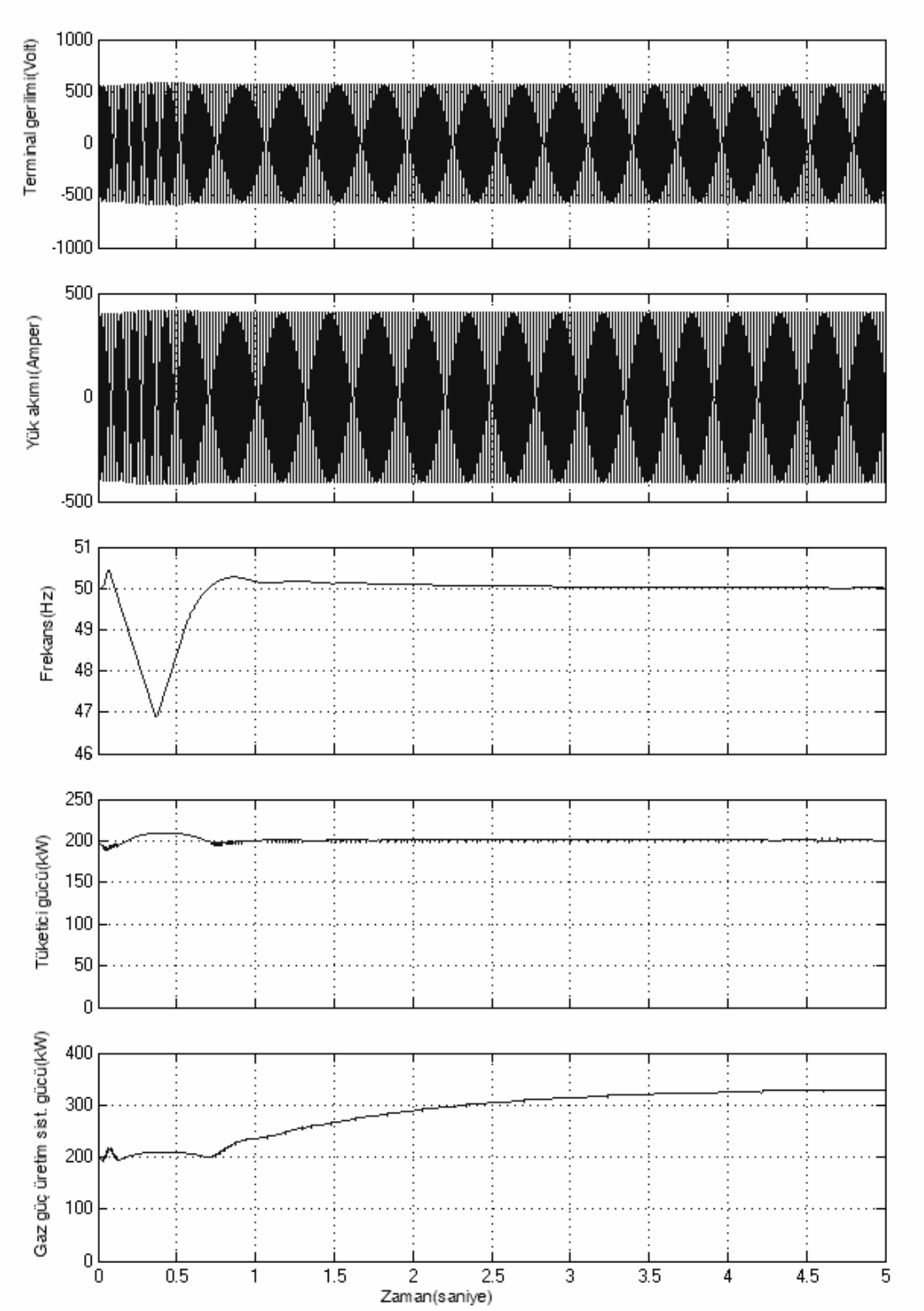
Şekil VI. 94 ANFÇK Hız Kontrollü GGÜS'nin 50 kW'lık Tüketici Yükü ile Yüklendiğindeki Elektriksel Çıkış Büyüklüklerindeki Değişim Eğrileri



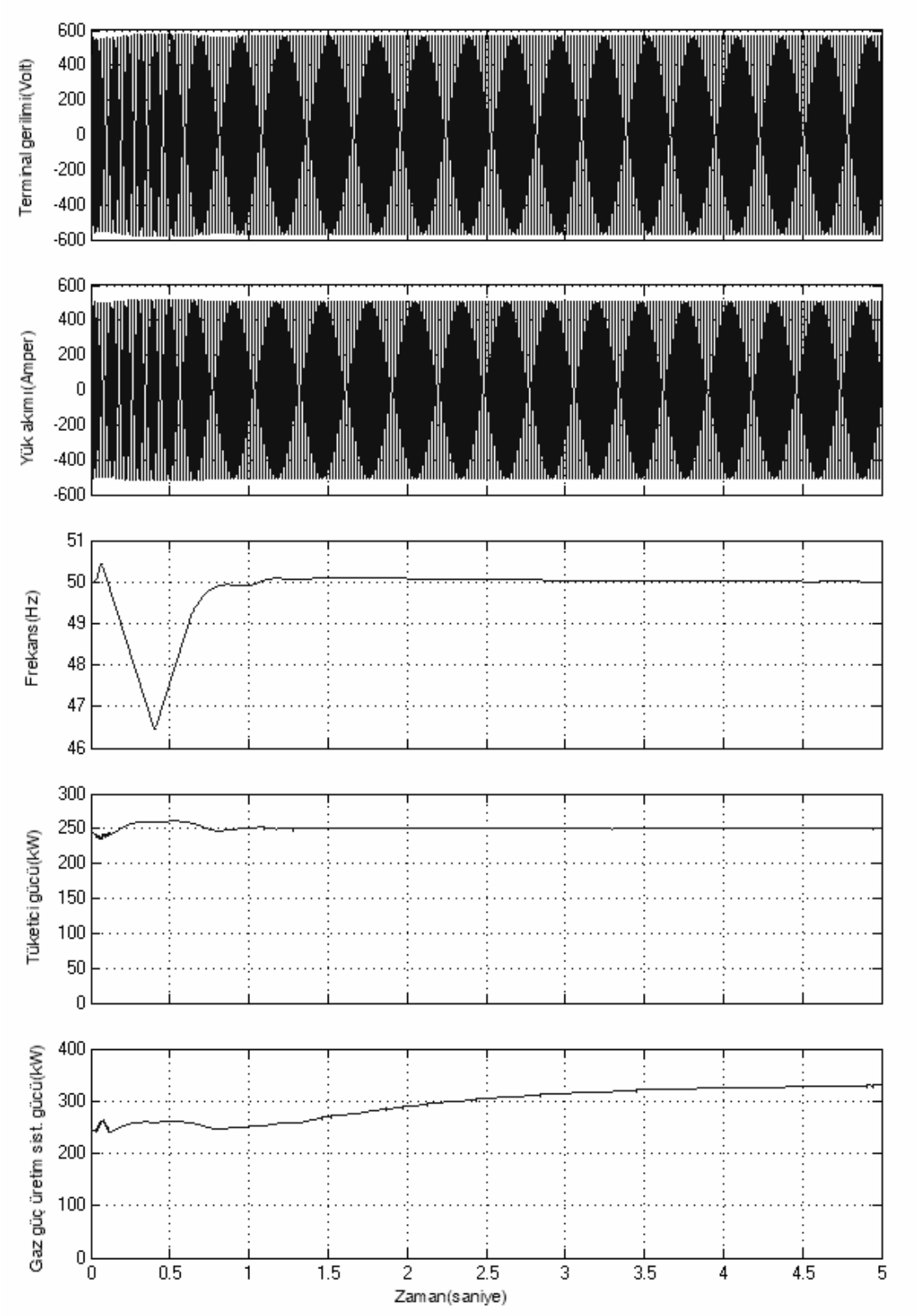
Şekil VI. 95 ANFÇK Hız Kontrollü GGÜS'nin 100 kW'lık Tüketici Yükü ile Yüklendiğindeki Elektriksel Çıkış Büyüklüklerindeki Değişim Eğrileri



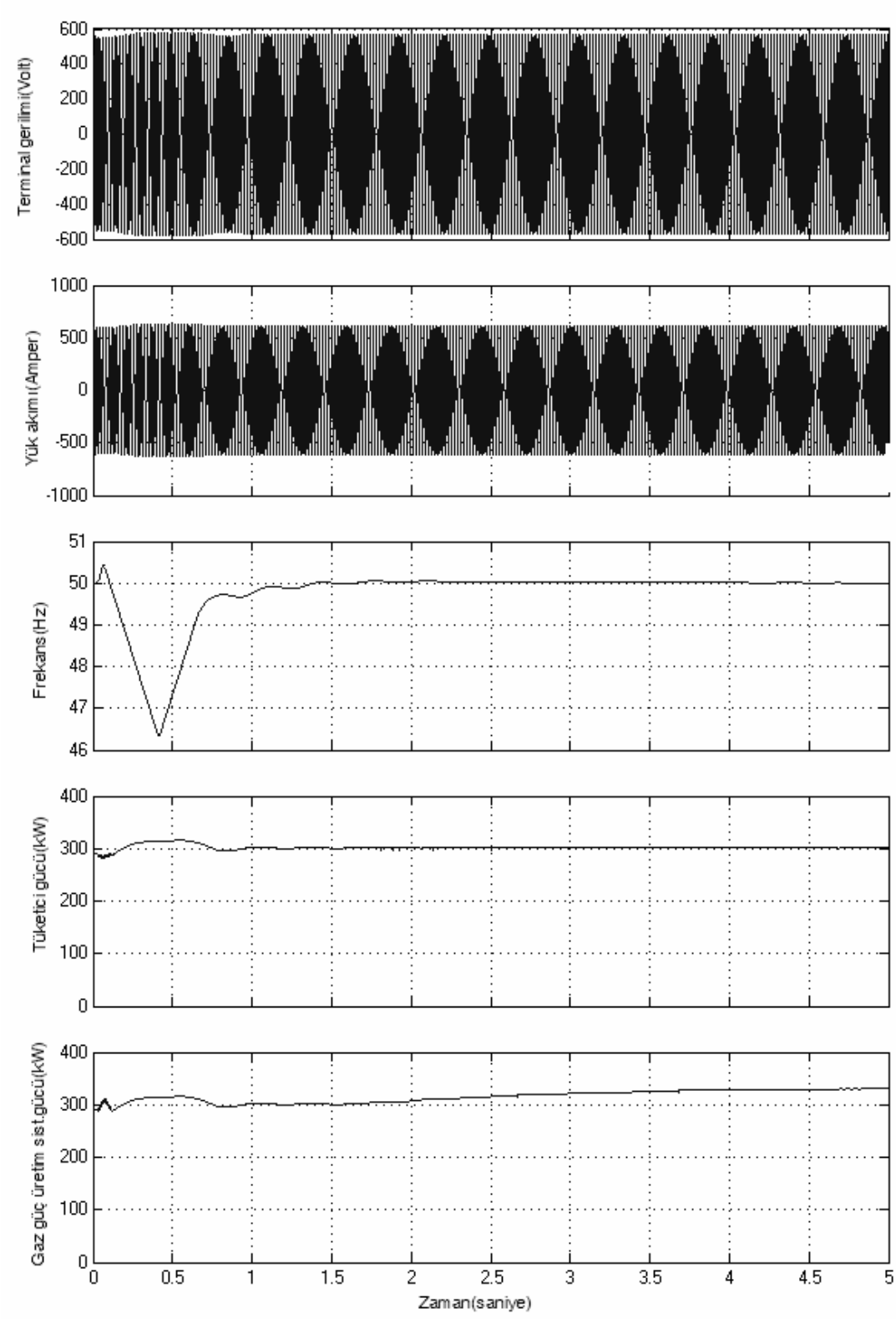
Şekil VI. 96 ANFÇK Hız Kontrollü GGÜS'nin 150 kW'lık Tüketici Yükü ile Yüklendiğindeki Elektriksel Çıkış Büyüklüklerindeki Değişim Eğrileri



Şekil VI. 97 ANFÇK Hız Kontrollü GGÜS'nin 200 kW'lık Tüketici Yükü ile Yüklendiğindeki Elektriksel Çıkış Büyüklüklerindeki Değişim Eğrileri



Şekil VI. 98 ANFÇK Hız Kontrollü GGÜS'nin 250 kW'lık Tüketici Yükü ile Yüklendiğindeki Elektriksel Çıkış Büyüklüklerindeki Değişim Eğrileri



Şekil VI. 99 ANFÇK Hız Kontrollü GGÜS'nin 300 kW'lık Tüketici Yükü ile Yüklendiğindeki Elektriksel Çıkış Büyüklüklerindeki Değişim Eğrileri

ANFÇK'lü gaz güç üretim sistemi tarafından 50kW, 100kW, 150kW, 200kW, 250kW ve 300kW'lık tüketici yükleri beslenirken yük uçlarındaki gerilim, yük akımı, yük uçlarındaki gerilimin frekansı, tüketicinin çektiği güç ve üretim gücü Şekil VI. 94, Şekil VI. 95, Şekil VI. 96, Şekil VI. 97, Şekil VI. 98 ve Şekil VI. 99 'da gösterilmiştir. Aynı zamanda, sadece belirtilen güçlerde değil bu değerler arasında kalan güçlerde de sistem kararlı çalışmaktadır. Örneğin; 60kW, 90kW, 120kW ve 280kW gibi yüklerde istenilen elektriksel büyüklükler elde edilmiştir.

ANFÇK'lü GGÜS'den elde edilen simülasyon sonuçlarının, kontrolsüz durumdaki ve klasik PID kontrollü RGÜS'den alınan simülasyon sonuçları ile mukayesesi yapılmıştır. ANFÇK'lü GGÜS'de, kontrolsüz durumdaki GGÜS'in işletme frekansının belirlenen değerden uzak görüntüsünün yerini arzu edilen bicimde ve kısa sürede (1 ile 1.5 saniye) sürekli çalışma durumundaki yerini aldığı görülmüştür.

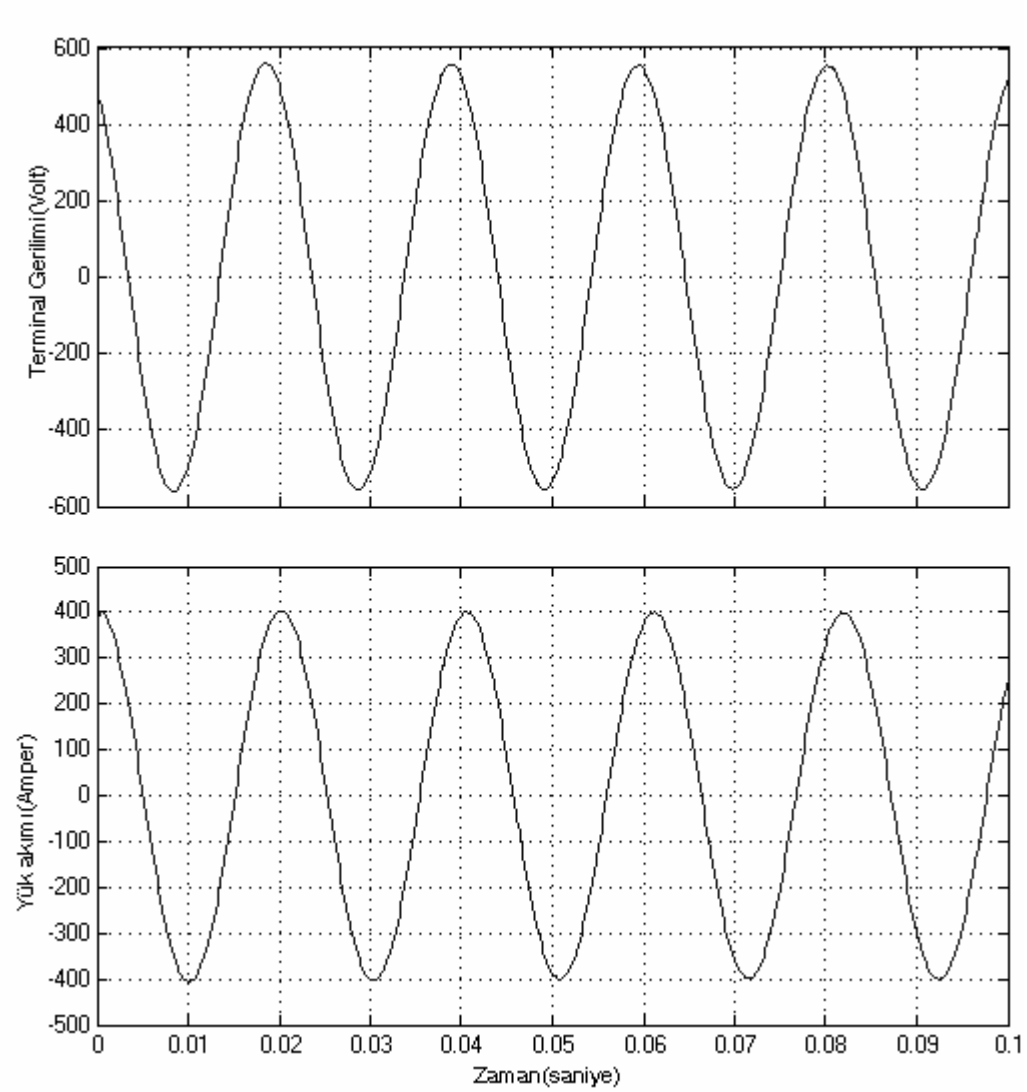
Klasik PID kontrollü GGÜS'nin elektriksel büyüklüklerinin (akım, gerilim, güç ve frekans) simülasyon sonuçlarını, ANFÇK kontrollü GGÜS'nin elektriksel büyüklükleri ile karşılaştırdığımızda, sürekli çalışma durumuna geçiş ANFÇK'de klasik PID kontrollü duruma göre biraz daha kısa olduğu simülasyon sonuçlarında açık bir şekilde görülmektedir. Kararlı çalışma durumundaki hata oranı değerinin simülasyon sonuçlarından da görüldüğü gibi sıfıra yakındır.

Klasik PID kontrolörde, her bir yük kademesinde GGÜS'nin çıkış elektriksel büyüklüklerini arzu edilen değer aralığında tutmak için kontrolörün kazanç katsayılarını yeniden ayarlamak durumunda kalınıyordu. Oysa ANFÇK'lü sistemde, 50kW ve 100kW için aynı veri tabanını kullanarak sistemin arzu edilen değerlerde kararlı bir şekilde işletilmesi gerçekleştirilmiştir. Eğer Matlab 65536 adet veriden daha fazla veriyi aynı anda kullanabilseydi 150kW, 200kW, 250kW ve 300kW'lık yükleme durumları için ayrı bir kural tabanı oluşturmamıza gerek kalmayacaktı. ANFÇK, bulanık çıkarım sistemini otomatik olarak elde edebilmesi için, GGÜS'nin davranışını operatörün çok iyi analiz etmiş olması gerekir. Eğer biz sisteminin davranışını çok tanıyorsak, ANFÇK'nun data eğitiminde herhangi bir problemle karşı karşıya kalmayız.

GGÜS'nin türbin denetiminin yapılmasında ANFÇK'ü kullanmamızın nedeni, değişen yük durumlarında istenilen elektriksel değerleri elde edebilmek için türbin

hızını otomatik olarak ayarlamaktır. Türbin hızının işletmenin izin verdiği değerler arasında denetimi yapılarak elektriksel büyüklüklerin yukarıda verilen simülasyon sonuçlarından görüldüğü gibi gerçekleşmesi sağlanmıştır.

GGÜS'i 200 kW'lık tüketici yükünü beslerken terminal gerilimi ve yük akımın 0.1 saniyelik süredeki değişim eğrisi Şekil VI. 100'de görülmektedir. Gerilim ve akımın maksimum değerlerine bakıldığında sinüzoidal eğri şeklindedir. Yukarda verilen şekillerde simülasyon süresi 5 sn olduğu için eğriler üst üste toplandığından dolayı sinüzoidal eğri şeklinde görülmemektedir.

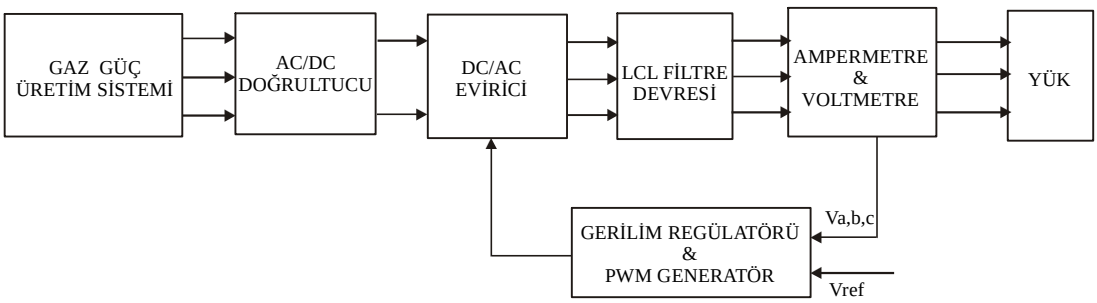


Şekil VI. 100 ANFÇK Hız Kontrollü GGÜS'nin 200 kW'lık Tüketici Yükü ile Yüklendiğinde Terminal Gerilimi ve Yük akımındaki Değişim

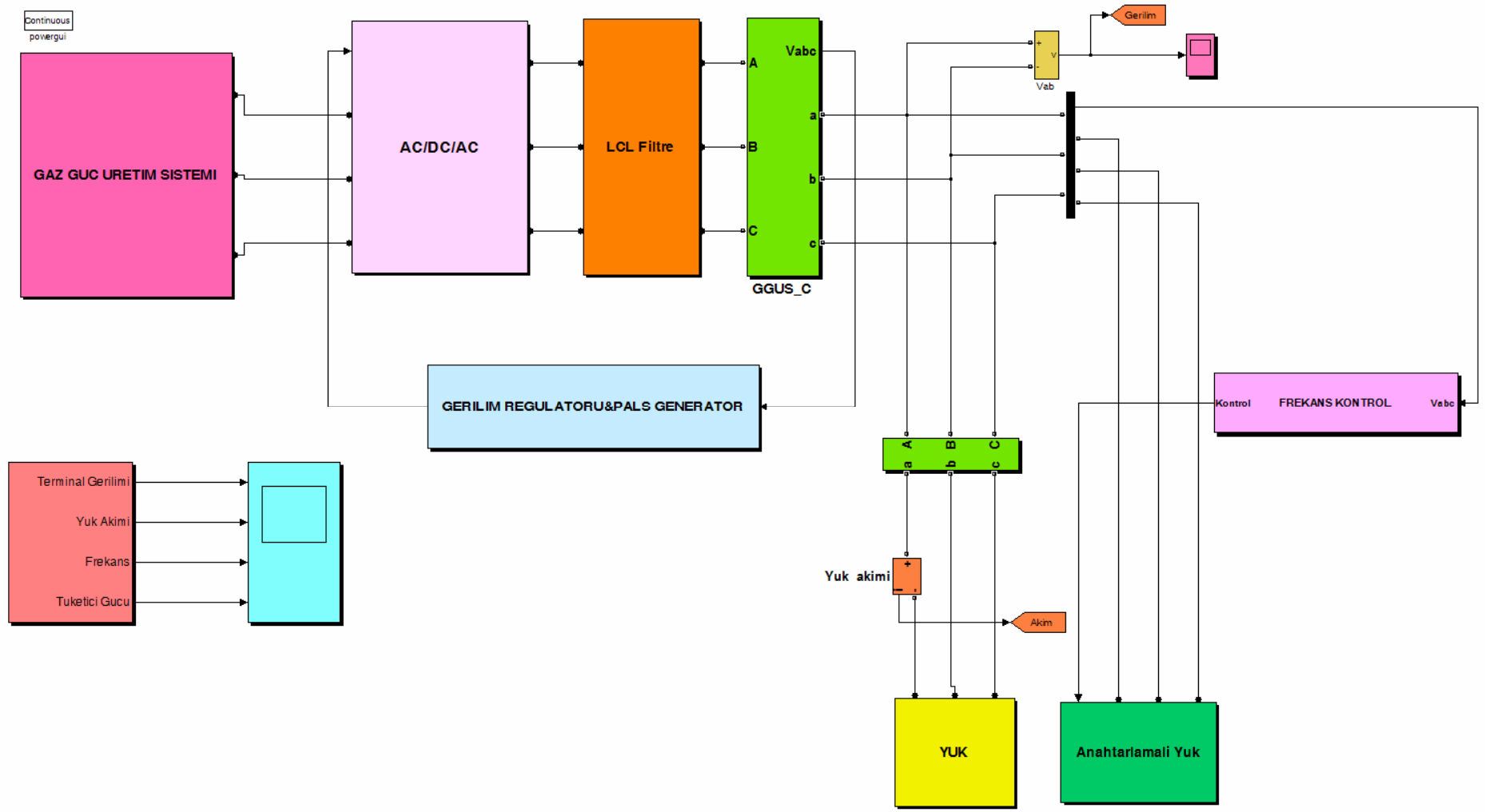
VI.2.3 AC/DC/AC Güç Dönüştürücülü Gaz Güç Üretim Sisteminin Adaptif Neuro-Fuzzy Kontrolör ile Denetimi

Hibrid güç üretim sistemini oluşturan farklı enerji türlerine sahip güç üretim sistemlerinin çıkış gerilimi ve frekansını önceden belirlenmiş işletme değerlerinde korumak veya ayarlamak gerekmektedir. Her bir güç bileşeninin çıkış gerilimi ve frekansı belirlenmiş değerlere ayarlandıktan sonra kendi aralarında enterkonnekte bağlantı gerçekleştirilir. Bu arzu edilen gerilim ve frekans ayarlaması güç elektroniği devre elemanları ile gerçekleştirilir. Güç elektroniği ara yüzey devresini gerçekleştirilmesi sırasında hibrid güç üretim sisteminin çıkış değişkenlerinden (gerilim, frekans, aktif ve reaktif) herhangi birisine veya daha fazla çıkış değişkeninin belirlenen referans değere göre kontrol edilmesi gerekmektedir.

Yapılan hibrid güç üretim sistemi rüzgar ve gaz olmak üzere iki farklı güç üretim ünitesinden oluşmaktadır. İlk önce her birini şebekeden bağımsız olarak çalıştırıp elektriksel büyüklük değerleri elde edilir. Daha sonra arzu edilen gerilimin ve frekansın istenilen değerde olması için AC/DC/AC güç dönüştürücüleri kullanılmıştır. Şekil VI. 101'de, GGÜS'nin güç dönüştürücülü çalışma durumunun blok diyagramı, Şekil VI. 102'de ise Matlab programı ortamında simülasyon blok diyagramı aşağıda gösterilmektedir.



Şekil VI. 101 AC/DC/AC Güç Dönüştürücülü Gaz Güç Üretim Sisteminin Blok Diyagramı

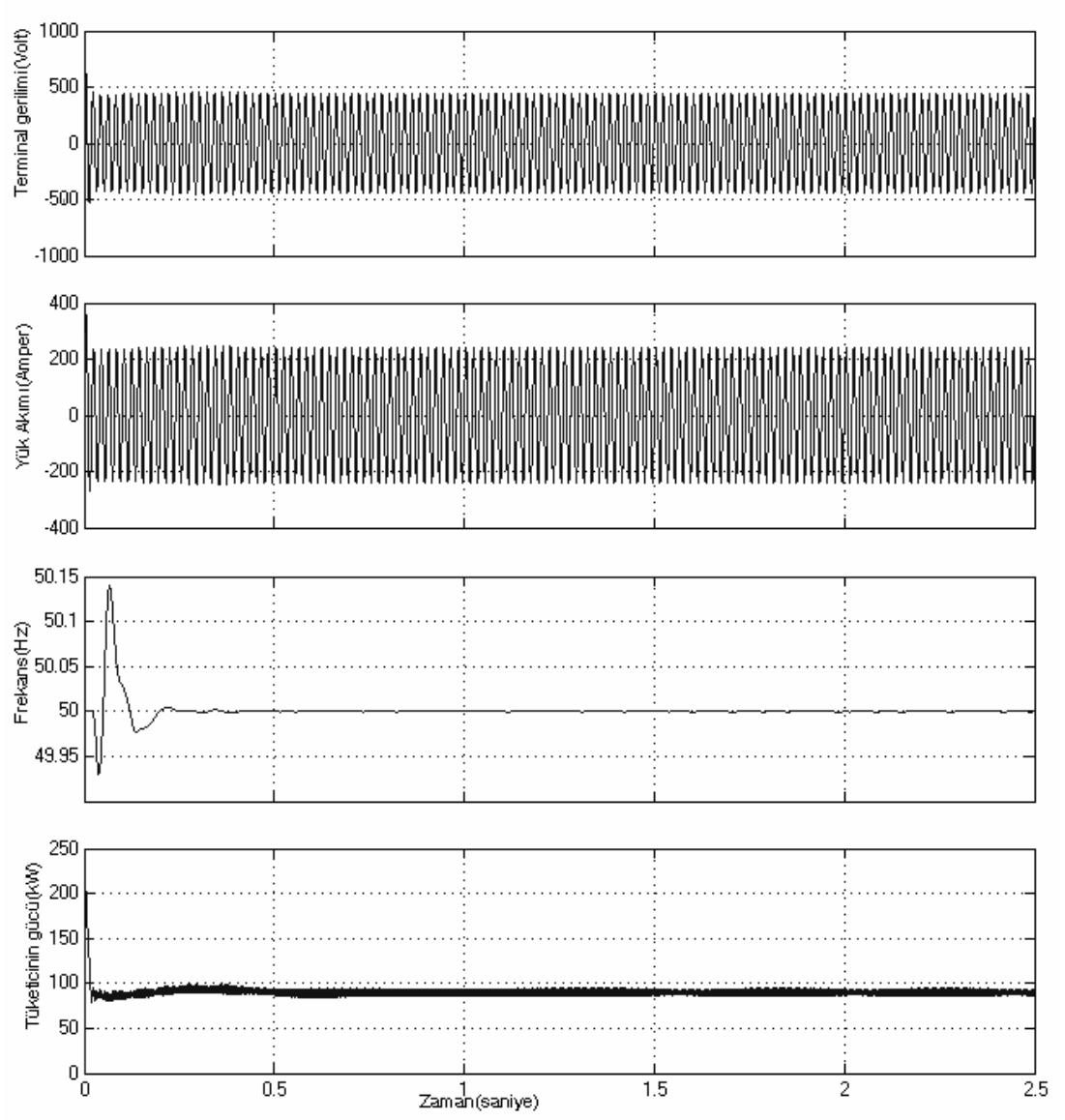


Şekil VI. 102 AC/DC/AC Güç Dönüştürücülü Gaz Güç Üretim Sisteminin Blok Diyagramı

Hibrid güç üretim sistemlerinde, evirici çıkış gerilimi ve frekansının kontrol edilmesiyle güç dönüştürücülerin sistemin aktif ve reaktif gücünü kontrol edilebilme kabiliyetlerine sahiptirler. Gaz güç üretim sisteminde, generatörden elde edilen çıkış gücü, kontrolsüz altı adet köprü bağlı diyotlardan oluşan doğrultucularla DC güce dönüştürülür. Daha sonra, IGBT eviriciyle DC çıkış gücü AC güce çevrilir. Yapılan çalışmada, eviricinin kontrolü çıkış geriliminin kontrolüyle sağlanmaktadır. Aynı zamanda akım kontrolü ve gerilim kontrol döngüsü birlikte kullanarak güç kontrol döngüsü de gerçekleştirilebilir.

Gaz güç üretim sisteminde, RGÜS'de olduğu gibi yüksek anahtarlama frekansından kaynaklanan gerilim ve akım harmoniklerini yok etmek veya en aza indirmek için AC-DC-AC güç dönüştürücünün çıkışı LCL filtre devresi üzerinden yükle bağlantısı sağlanmıştır. RGÜS ile GGÜS'nin birlikte paralel çalışabilmesi için çıkış gerilimi ve frekanslarının birbirine eşit olması gerekmektedir. Bu amaçla, şebekelerden bağımsız çalışan güç üretim sistemlerinde, istenilen değerde gerilim ve frekansı elde etmek için yüksek anahtarlama frekansına sahip güç dönüştürücüleri kullanılır. Yüksek frekans değerinden dolayı istenilmeyen harmonik gerilimleri veya akımları oluşmaktadır. Harmonik gerilimleri, gerilime hassas olan tüketiciler için hiçte hoş karşılanmamaktadırlar. GGÜS'de güç dönüşümleri sırasında meydana gelen harmonikler LCL filtre devresiyle filtrelenmiştir. LCL filtresi hakkında ayrıntılı bilgi Bölüm VI.1.5.3.1'de anlatıldığından dolayı bu bölümde tekrar anlatılmamıştır.

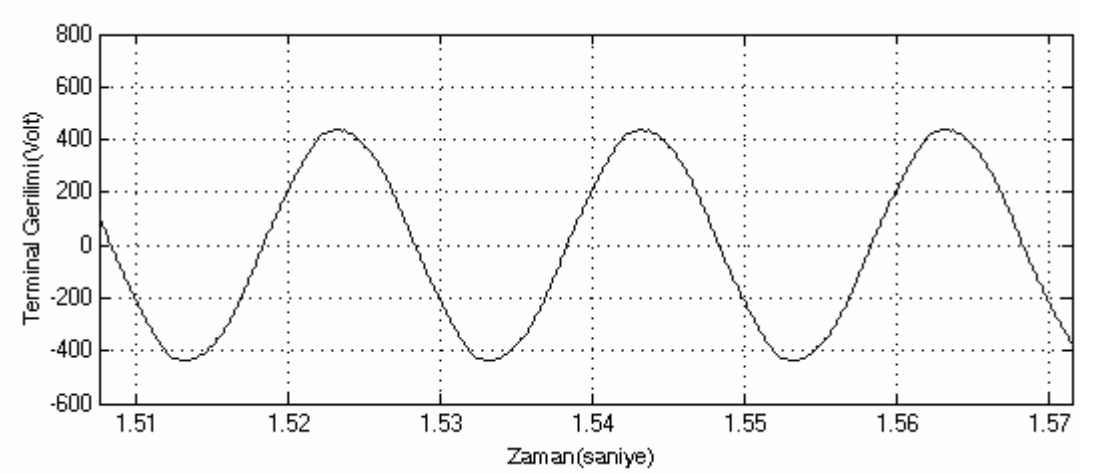
Gaz güç üretim sisteminin çıkış uçlarını AC-DC-AC güç dönüştürücülerine bağladığımızda, eğer devrede LCL filtre devresi yoksa yüksek anahtarlama frekansı (4kHz) nedeniyle akım veya gerilim harmonikleri gözle görülebilir şekilde fark edilmektedir. Yani gerilim eğrisi sinüzoidal eğri şeklinden uzaklaşmaktadır. ANFÇK kontrollü GGÜS'nin devresine LCL filtre devresinin yerleştirilmesiyle yük akımı, yükün çektiği güç, terminal gerilimi ve sistemin frekans değeri 100kW'lık yük için simülasyon sonuçları aşağıda Şekil VI. 103'de verilmektedir.



Şekil VI. 103 AC-DC-AC Güç Dönüştürücülü ve ANFÇK'lü GGÜS'nin Terminal Gerilimi, Yük Akımı, Tüketici Gücü ve Sistemin Frekansındaki Değişim Eğrileri

Şekil VI. 103'den görüldüğü, AC-DC-AC güç dönüştürücüsü kullanarak arzu ettiğimiz 50Hz frekansta terminal geriliminin 400V değerine yakın bir gerilim değeri elde edilmiştir. Tüketici yüklerinin beslenmesi için şebeke gerilimi 400V ± %5·$U_{faz-faz}$ ve frekansın 50Hz ± %1 olması istenilmektedir. Bu istenilen işletme değerleri ile Şekil VI. 103'de elde ettiğimiz elektriksel büyüklükleri kıyasladığımızda arasında hemen hemen çok büyük bir fark olmadığı görülmektedir. Yalnız harmonik etkisini tamamen yok edemediğimizden dolayı güç eğrisi diğer eğrilere kıyasla biraz daha kalın görülmektedir. GGÜS'i, yaklaşık 0.25 saniye gibi kısa bir sürede gerilim ve frekans istenilen işletme değerine oturmuştur. Bu değerlere bağlı olarak akım ve tüketici gücü eğrileri de aynı zaman aralığında kararlı çalışma noktasına gelmiştir.

Belirtilen zaman aralığından(0.25 saniye) sonra elektrik işletmelerinde sürekli hal hatasının sıfır olduğu ve sistemin stabilite olması yönünden iyi bir sonuç olduğunu söyleyebilir. Şekil VI. 104'deki gerilim eğrisi Şekil VI. 103'de gösterilen terminal gerilimi eğrisinin aynısıdır. Fakat Şekil VI. 103'de zaman aralığı 0-2.5 saniye olduğundan eğriler üst üste oturmuştur. Gerilim eğrisindeki bozukluk ve harmonik etkileri net görülmediği için Şekil VI. 104'deki terminal gerimi eğrisi yeniden gösterilmektedir.



Şekil VI. 104 Güç Dönüştürücülü ve ANFÇK'lü GGÜS'nin Terminal Geriliminin 0.08 Saniyelik Zaman Aralığında Daha Açık Görünümü

VI.2.4 Hibrid Rüzgar-Gaz Güç Üretim Sisteminin Simülasyonu ve Kontrolü

Şehir merkezlerinden veya elektrik dağıtım şebeklerinden uzak yerleşim birimlerinin elektrik enerji ihtiyacını daha az maliyetle karşılamak amacıyla son yıllarda hibrid güç üretim sistemine olan ilgi ve talep hızla artmaktadır. Kurulu olan şebeke ve enerji üretim santrallarında, hibrid güç üretim sistemleri puant yük santralı olarak kullanılabilmektedir.

Hibrid güç üretim sistemleri, farklı enerji kaynaklarının bir birleşimi olarak kullanılabilir. Yapılan çalışmada da, rüzgar güç üretim sistemi ile gaz güç üretim sisteminin bir birleşimi incelenmiştir. Gaz güç üretim sistemi tamamlayıcı görevini üstlenmektedir. Yani tüketici güç talebi fazla olması durumunda, bu güç RGÜS'den karşılanamadığı anlarda GGÜS'i devreye girerek gerekli olan talep gücün karşılanması sağlanmıştır. Rüzgar güç üretim sistemlerinin kurulum maliyeti yüksek işletme maliyeti ise düşüktür. Diğer yandan, gaz güç üretim sistemlerinin kurulum maliyeti RGÜS'ne göre daha düşük, işletme maliyeti ise daha yüksektir. Bu işletme maliyetleri göz önünde bulundurulduğunda, RGÜS'i temel güç üretim sistemi, GGÜS'i puant veya yedek güç üretim sistemi olarak çalıştırılmaktadır.

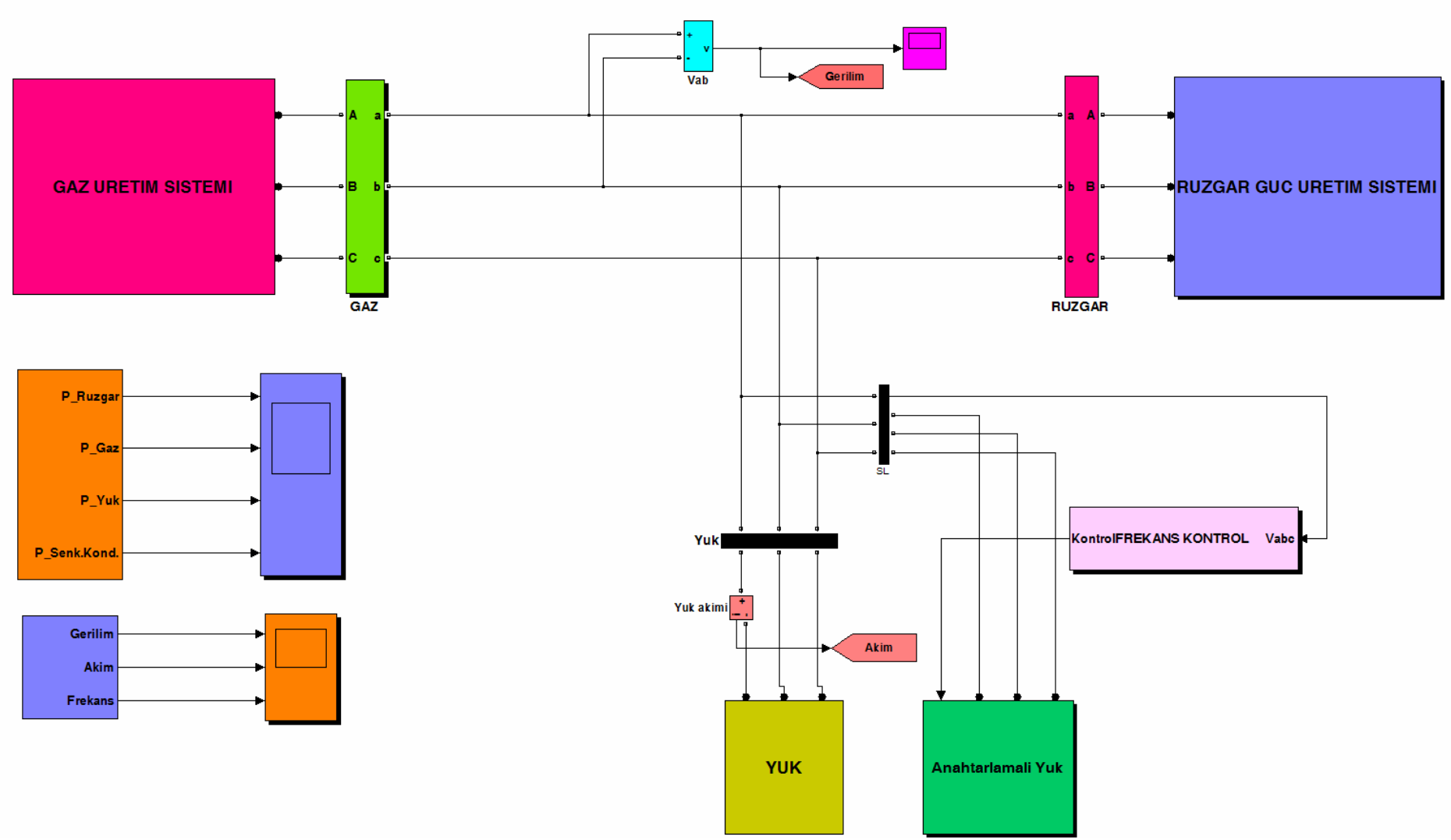
Yapılan çalışmada 300kW'lık rüzgar güç üretim sistemi ile 400 kW'lık gaz güç üretim sisteminin birleşiminden oluşan hibrid güç üretim sisteminin dinamik modellemesi, Matlab/Simulink, Power System Toolbox, Fuzzy Logic Toolbox yazılım programları kullanılarak gerçekleştirilmiştir. Bölüm VI'nın alt ana başlıklarında, her iki güç üretim sistemi farklı tüketici yüklerinde, klasik PID kontrollü ve ANFÇK'lü durumlarda ayrı ayrı incelenmiş ve elde edilen simülasyon sonuçları eğrilerle gösterilmiştir. Daha sonra, RGÜS'nin ve GGÜS'nin gerilimlerinin ve frekansının farklı olması durumları göz önüne alınarak iki güç üretim sisteminin birbirine enterkonnekte biçimde bağlandığında sorun yaşanmaması için AC-DC-AC güç dönüştürücüleri üzerinden şebekeyle veya yükle bağlantısı gerçekleştirilmiştir. Bu çalışmada, RGÜS'nin ve GGÜS'nin gerilim ve frekans değerleri bir birine eşit olduğundan istenirse güç dönüştürücüleri kullanılmayabilir.

Çalışmada, hibirt rüzgar-gaz güç üretim sistemi(HRGGÜS)'nin yükü olarak şehir merkezinden uzak 40 daireli bir köy kabul edilmiştir. Her bir dairenin ortalama gücüde 10 kW olarak belirlenmiştir. Tüketicilerin çektiği yükler daha çok omik

özellikteki yüklerdir. Diğer bir yük türü olan anahtarlamalı yük(dump load), elektrikli ısıtıcı özelliğinde olup rezistanslardan oluşmaktadır. Anahtarlamalı yükü kullanmamızdaki amaç; oranlanmış güç değerinde sistemin frekansını istenilen değerde tutmaktır. Bu işlemi gerçekleştirme sırasında, kontrol girişine gelen yük uçlarındaki gerilimin frekans değerine göre üretilen kontrol sinyalleri anahtarlamalı olarak rezistanslar devreye alınıp çıkartılmaktadır.

Bu tez çalışmasında, RGÜS'nde değişken hızlı rüzgar türbininin kanat eğim açısı ve GGÜS'nde ise türbin hız kontrolü gerçekleştirilmiştir. Rüzgar türbini kanat eğimi açısı ve gaz türbini hız denetimi klasik PID kontrolör ve adaptif neuro_fuzzy kontrolör(ANFÇK) ile yapılmıştır. Ayrıca belirtilen iki güç üretim sisteminin, herhangi kontrolör elemanı devrede değilken dinamik davranışları ayrı incelenmiştir.

HRGGÜS'nin Matlab/Simulink programında gerçekleştirilmiş simülasyon blok diyagramı aşağıda Şekil VI. 105'de gösterilmiştir. Bu simülasyon blok diyagramı kullanılarak, değişen tüketici yük durumlarında sistemin davranışı simülasyon çalışması ile gözlenmiştir. HRGGÜS'nde kontrolör elemanı olarak ANFÇK kullanılmıştır. Tüketici yükünün 50kW ile 400 kW arasındaki değerler arasındaki HRGGÜS'nin çıkış elektriksel büyüklükleri simülasyon çalışması sonucu elde edilerek incelenmiştir.



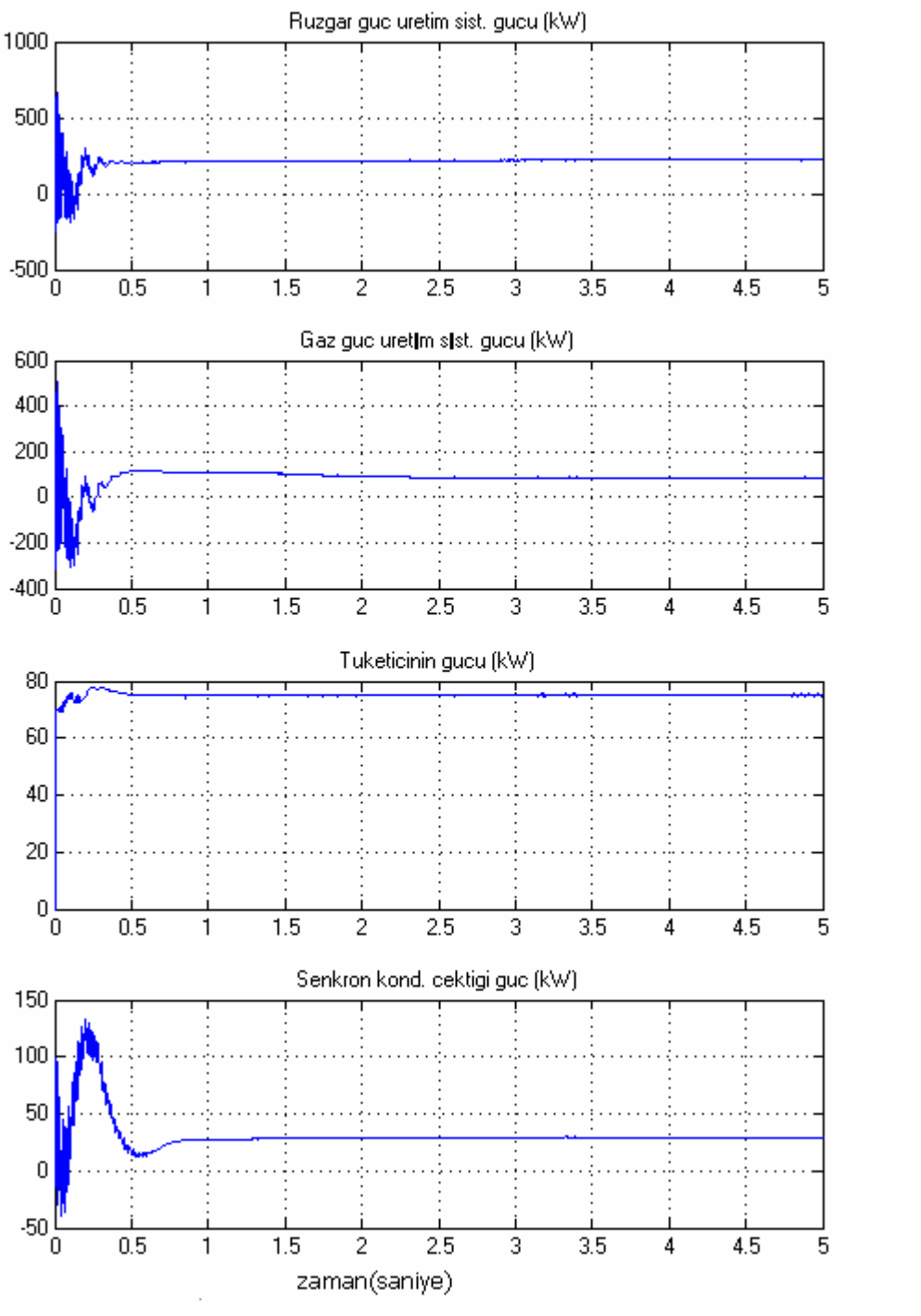
Şekil VI. 105 Hibrid Rüzgar-Gaz Güç Üretim Sisteminin Matlab/Simulink Programında Gerçekleştirilmiş Simülasyon Blok Diyagramı

Şekil VI. 105'de elde edilen Hibrid rüzgar-gaz güç üretim sisteminin simülasyon blok diyagramını kullanarak, işletme durumundaki analizi yapılmıştır. HRGGÜS'nin burada tekrar gaz türbin hız kontrolü ve rüzgar türbini kanat eğim açısı denetimi yapılmayacaktır. Rüzgar ve gaz güç üretim sistemlerinin kontrolü bu bölüm içersinde alt başlıklar halinde yapılmıştır. Burada iki güç üretim ünitesini birleştirerek birlikte çalışma durumundaki davranışı analiz edilmiştir. HRGGÜS'nin değişik tüketici yükleri ile yüklü iken çıkış büyükleri; terminal gerilimi(V_t), yük akımı(I_y), tüketici gücü($P_{tük}$), RGÜS'nin üretim gücü($P_{RGÜS}$), GGÜS'nin gücü($P_{GGÜS}$), sekonder kondansatörün çektiği güç(P_{sekn}) ve işletme frekansı($f_{işl}$) ayrı ayrı simülasyon eğrileri ile incelenmiştir. Bilindiği gibi, güç üretim sisteminin üretim gücü en az tüketici gücüne eşit veya büyük olmak zorundadır. Aşağıda verilen bağıntılarla üretim ve tüketim gücü arasındaki ilişkiler ifade edilmektedir.

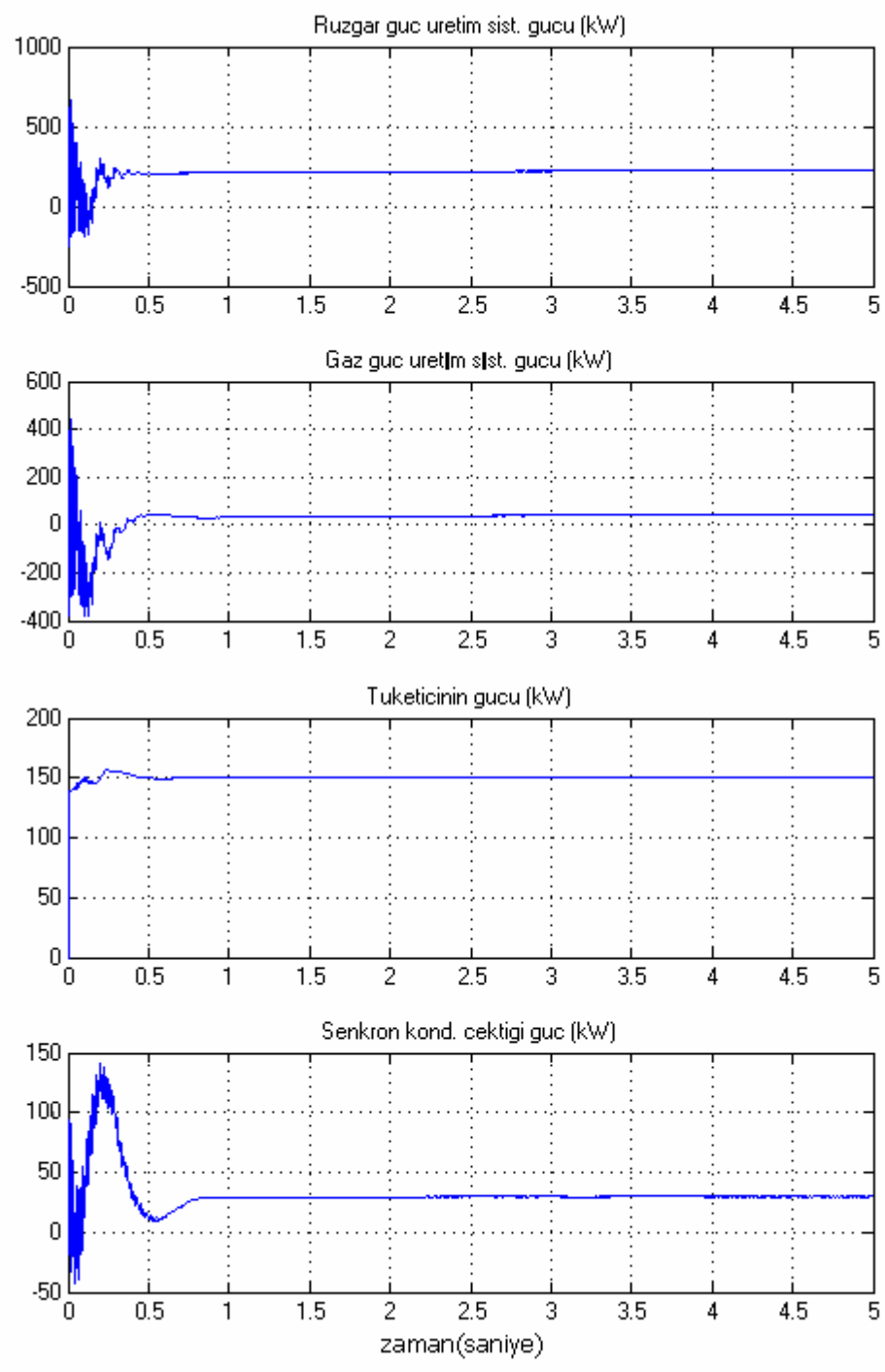
$$P_{üretim} \geq P_{tüketim} \tag{6.19}$$

$$P_{rüz_üretim} + P_{gaz_üretim} \geq P_{tüketici} + P_{senk_kond} + P_{anaht_yük} + P_{kayıp} + P_{iç_ihtiyaç} \tag{6.20}$$

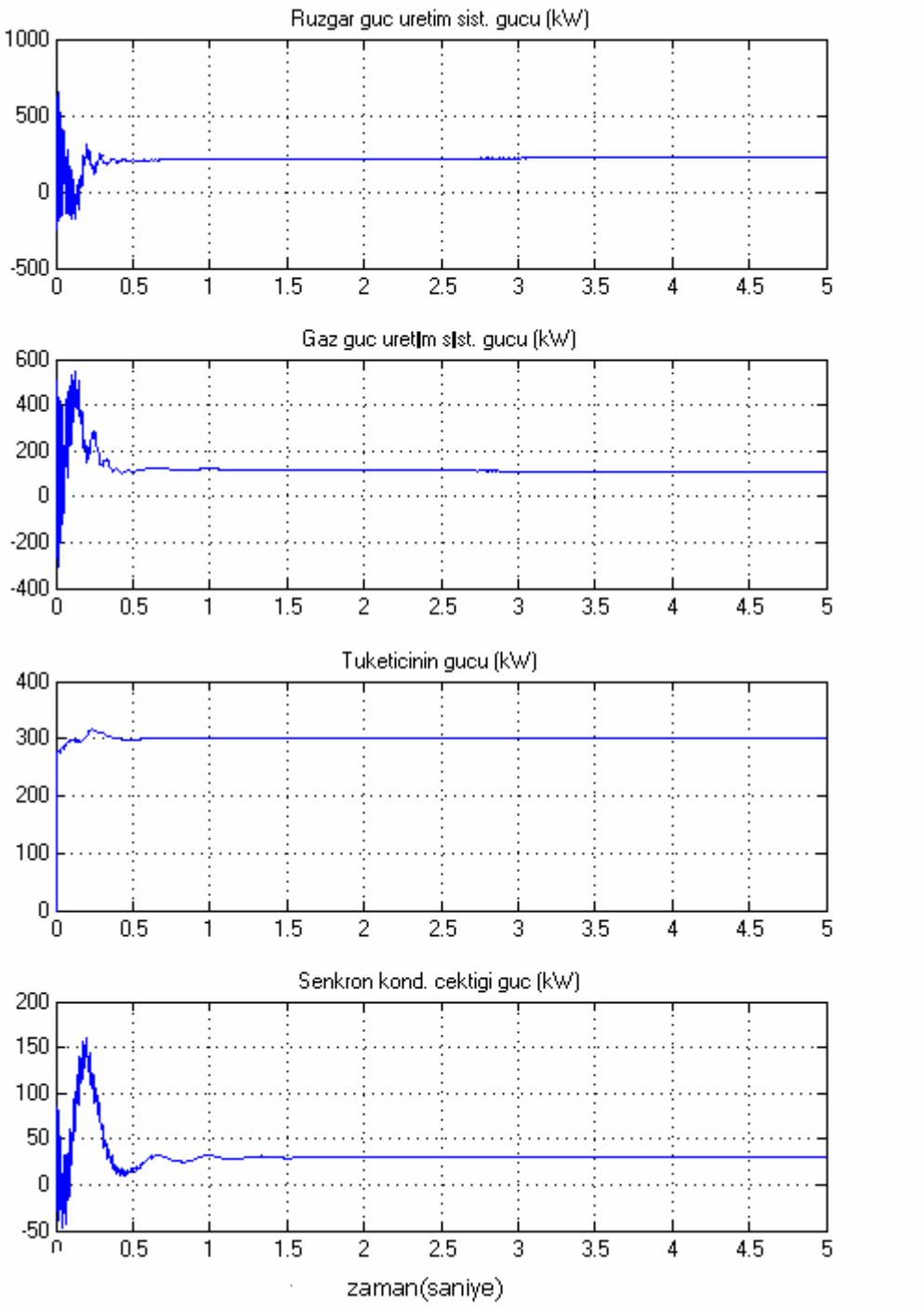
Adaptif Neuro_Fuzzy Çıkarım kontrolörlü HRGGÜS'nin, 50kW, 100kW, 200kW, 300kW ve 400kW'lık tüketicinin yük taleplerini karşıladığı işletme durumlarında yukarda ifade ettiğimiz çıkış büyüklükleri ayrı ayrı elde grafiklerle elde edilmiştir. Belirtilen yükleri sadece 5 sabit yük değil bu tüketici yük değerleri arasında kalan 60kW, 82kW, 115kW, 195kW, 220kW ve 330kW gibi değerler arasında da veriler rahatlıkla alınabilmektedir. Yapılan çalışmada, fazla yer kaplamaması amacıyla beş yük durumu için alınan simülasyon sonuçları gösterilmiştir. Neticede, yükler 50 kW ile 400kW arasında değişkenlik göstermektedir.



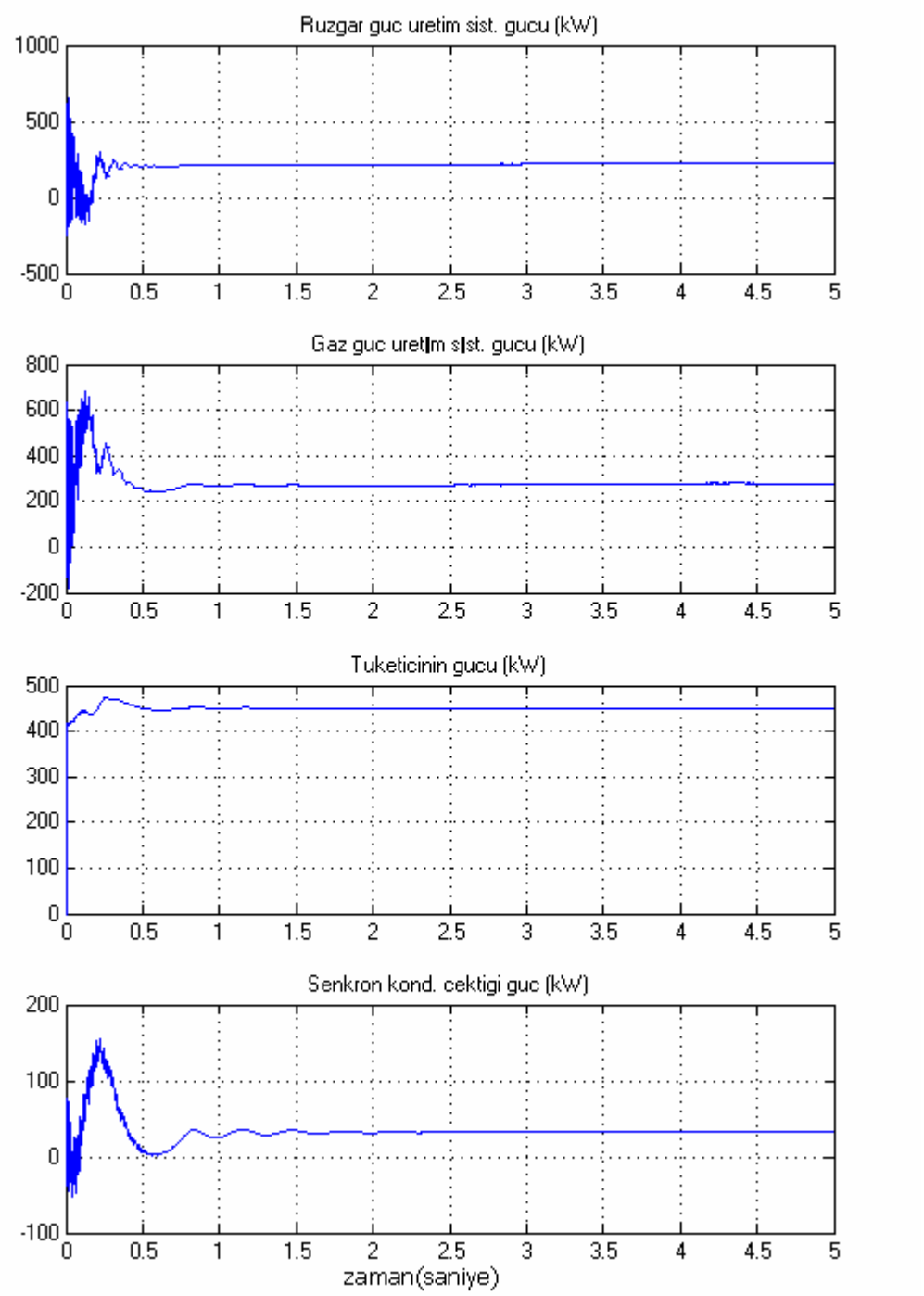
Şekil VI. 106 ANFÇK'lü HRGGÜS'nin 50kW'lık Tüketici Yükü ile Yüklendiğinde Üretim ve Tüketim Güçlerindeki Değişim Eğrileri



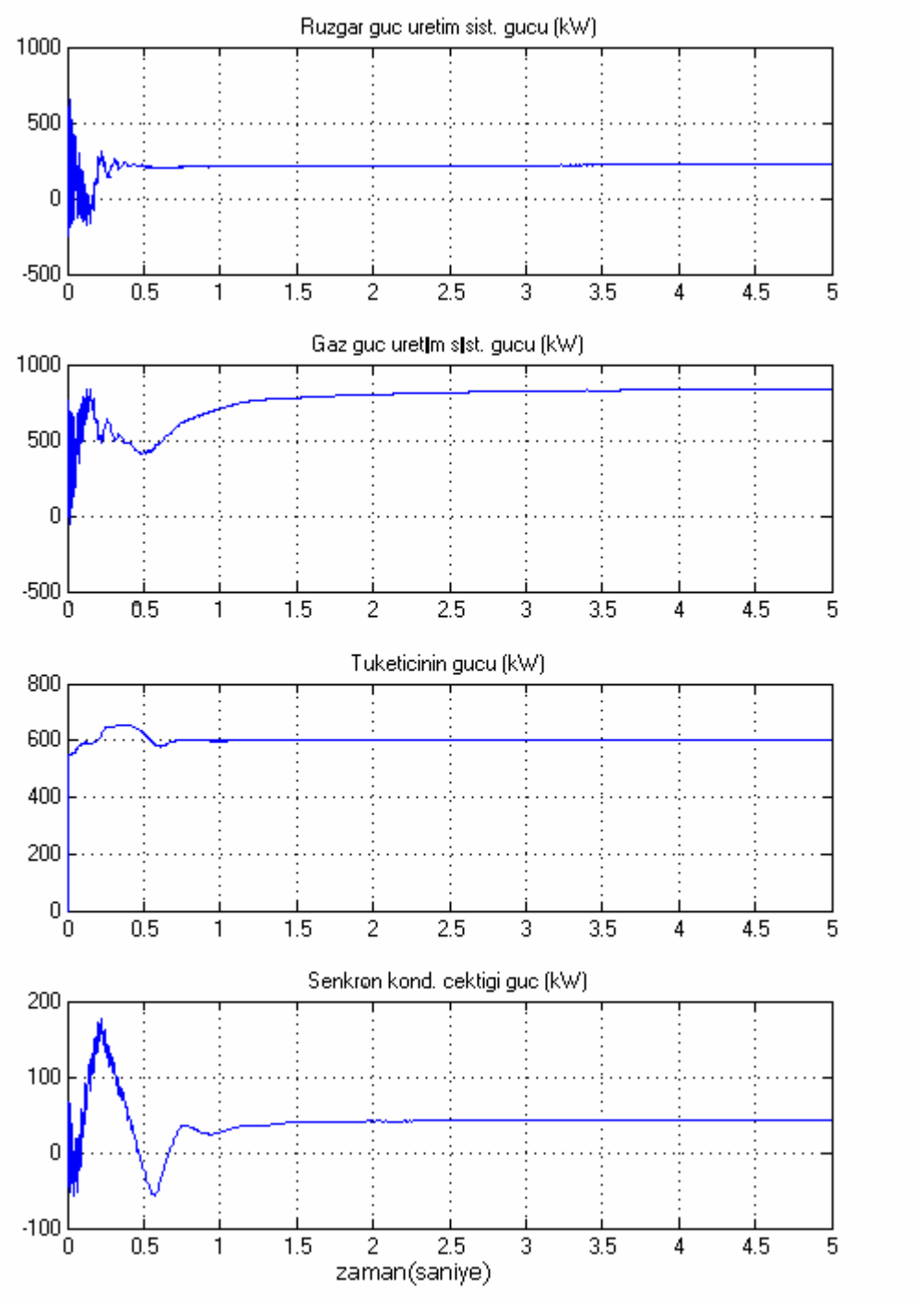
Şekil VI. 107 ANFÇK'lü HRGGÜS'nin 100kW'lık Tüketici Yükü ile Yüklendiğinde Üretim ve Tüketim Güçlerindeki Değişim Eğrileri



Şekil VI. 108 ANFÇK'lü HRGGÜS'nin 200kW'lık Tüketici Yükü ile Yüklendiğinde Üretim ve Tüketim Güçlerindeki Değişim Eğrileri



Şekil VI. 109 ANFÇK'lü HRGGÜS'nin 300kW'lık Tüketici Yükü ile Yüklendiğinde Üretim ve Tüketim Güçlerindeki Değişim Eğrileri



Şekil VI. 110 ANFÇK'lü HRGGÜS'nin 400kW'lık Tüketici Yükü ile Yüklendiğinde Üretim ve Tüketim Güçlerindeki Değişim Eğrileri

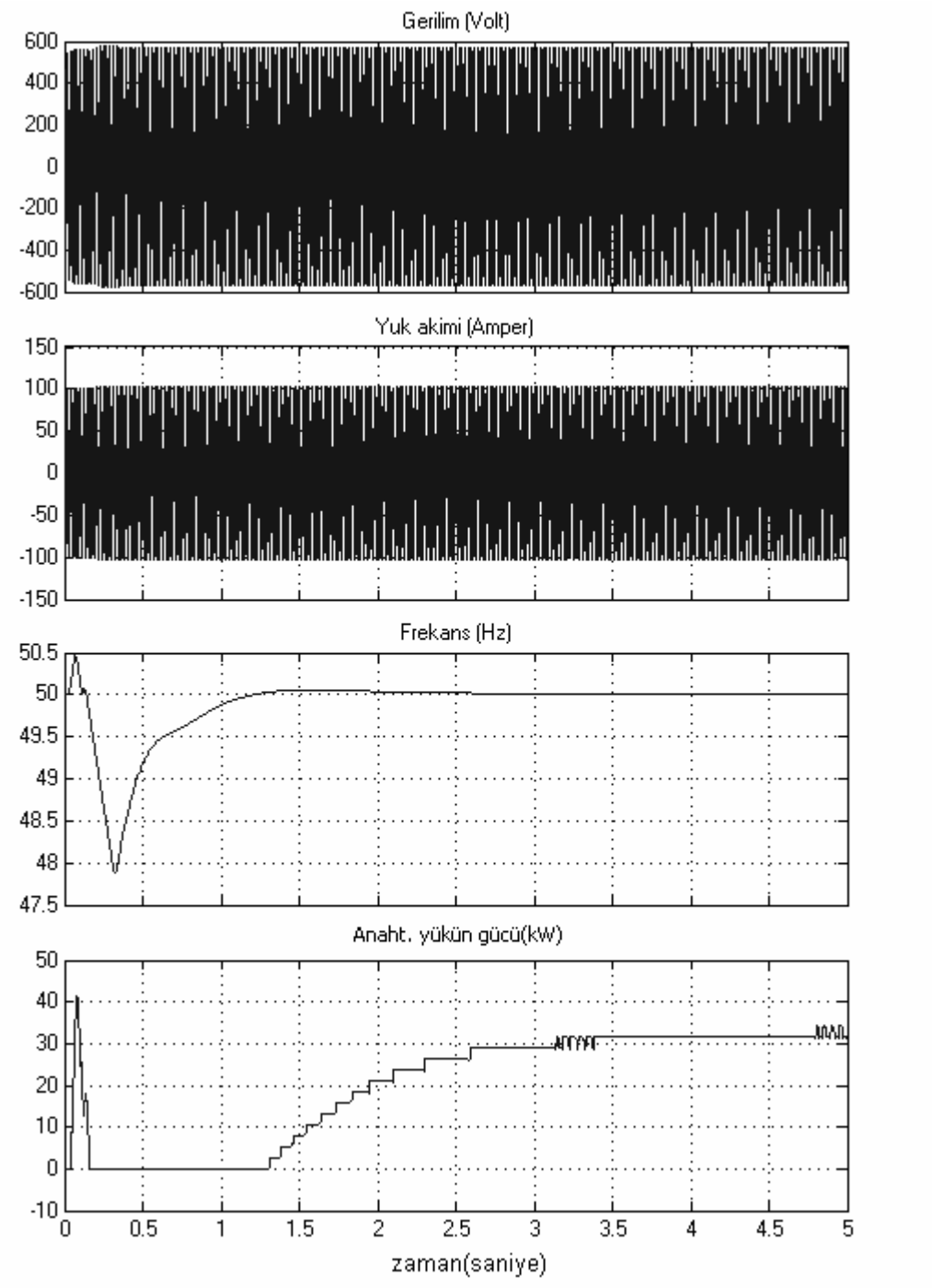
HRGGÜS'nin 50kW, 100kW, 200kW, 300kW ve 400kW tüketici yükleriyle yüklenmesi durumunda üretim ve tüketim güçlerindeki değişimler zamana bağlı olarak sırasıyla Şekil VI. 106, Şekil VI. 107i Şekil VI. 108i Şekil VI. 109 ve Şekil VI. 110 'da verilmiştir. Display ekranlarında okunan elektriksel büyüklerin maksimum değerleridir. Üretilen ve tüketilen güçler maksimum değer olarak display ekranında görülmektedir. Elektriksel bir büyüklüğün maksimum değeri *Ö2* değeri ile çarpımıdır.

ANFÇK'lü hibrid güç üretim sisteminde, öncelikli olarak tüketici yükleri rüzgar güç üretim sistemi tarafından üretilen güç ile beslenmektedir. Yukarda verilen simülasyon sonuçlarına bakıldığında bu durum daha iyi anlaşılmaktadır. Yukarda verilen simülasyon sonuçlarından bir yükleme durumunu incelersek, Şekil VI. 108'de çekilen gücün maksimum değeri 300kW'dır. Aynı yükleme durumunda, RGÜS'nin üretim gücü yaklaşık 250kW, GGÜS'nin gücü ise yaklaşık 150kW değerindedir. Sistem içersinde güç tüketiminde bulunan diğer bir işletme elamanı da senkron kondansatördür. Maksimum değeri 300kW'lık tüketicinin güç talebinin büyük bir kısmı RGÜS'den, geri kalan kısmı ve senkron kondansatörün tüketim gücü GGÜS'den karşılanmaktadır. Tüketici gücünün değeri azatlıkça GGÜS'den talep edilen güç miktarı da verilen simülasyon sonuçlarından görüldüğü gibi düşmektedir. Hibrid güç üretim sistemine ait yukarda verilen bütün üretim ve tüketim güç eğrilerini dikkatli incelediğimizde $P_{üretim_gücü} \geq P_{tüketi-gücü}$ koşulunu sağladığı görülmüştür.

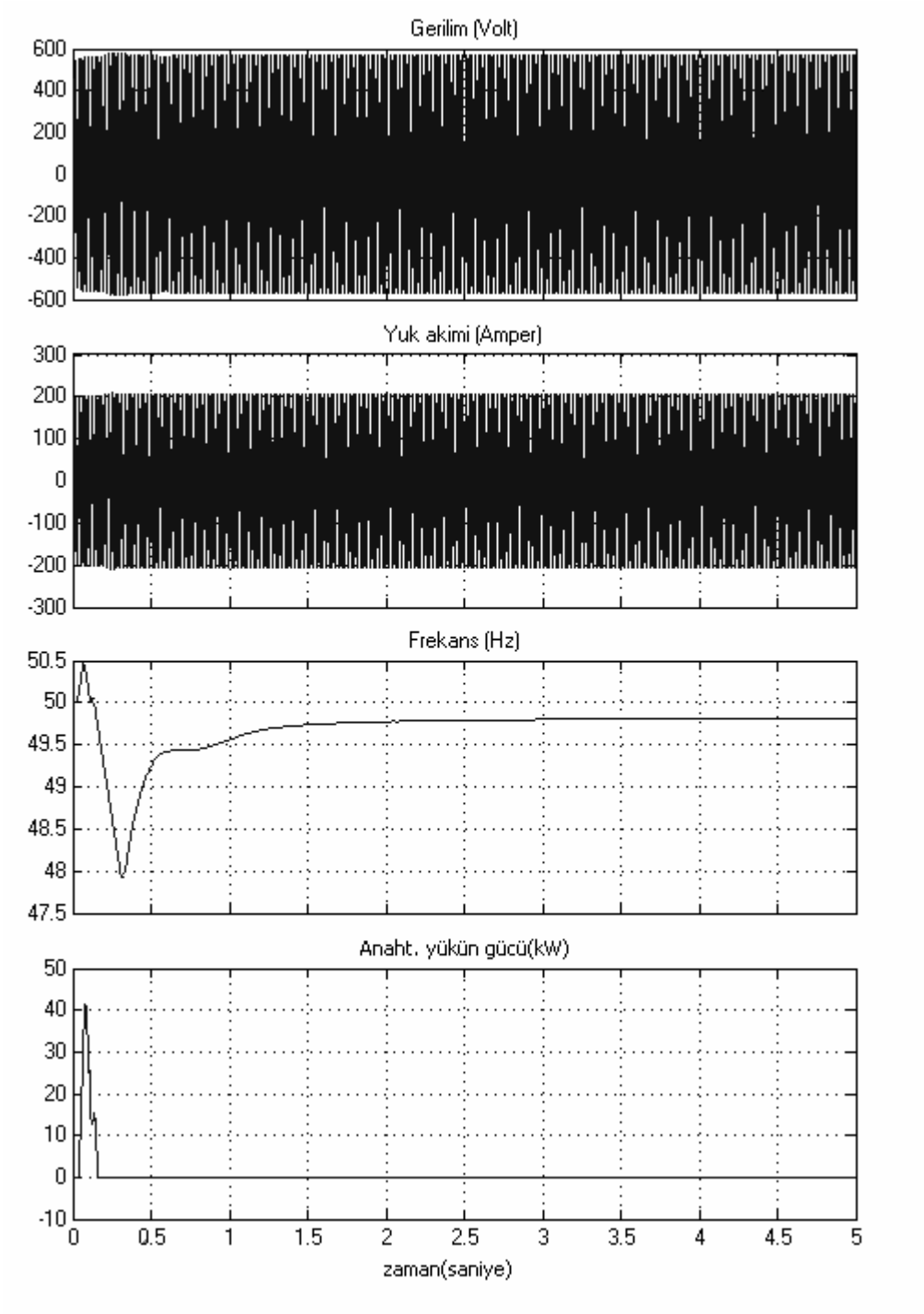
400kW'lık tüketici yükünün talep ettiği güç oranı işletme sınır değerlerini oldukça zorlamıştır. Çünkü GGÜS'nin nominal işletme gücü 400kW değerinde iken üretim gücünün maksimum değeri Şekil VI. 110'da görüldüğü gibi yaklaşık 780kW değerindedir. Bu üretim gücünün etkin değeri ise $780/\sqrt{2} \cong 550$kW dir. Sonuçta, GGÜS'i nominal değerinin %37.88 oranında fazla yüklenmiştir. Yapılan çalışmada, her iki güç üretim ünitesinin maksimum üretim güç sınır değerleri zorlanmıştır.

Adaptif Neuro-Fuzzy kontrolör ile hibrid güç üretim sisteminin çıkış elektriksel büyüklerinin performansının iyileştirilmesi amacı ile yapılan kontrolde arzu edilen sonuca ulaşılmıştır. HRGGÜS'nin elektriksel çıkış büyüklükleri yaklaşık 2 saniye gibi kısa bir sürede sürekli çalışma durumundaki değerine yerleştiği simülasyon sonuçlarından da açık ve net olarak görülmüştür. Bütün elektrik

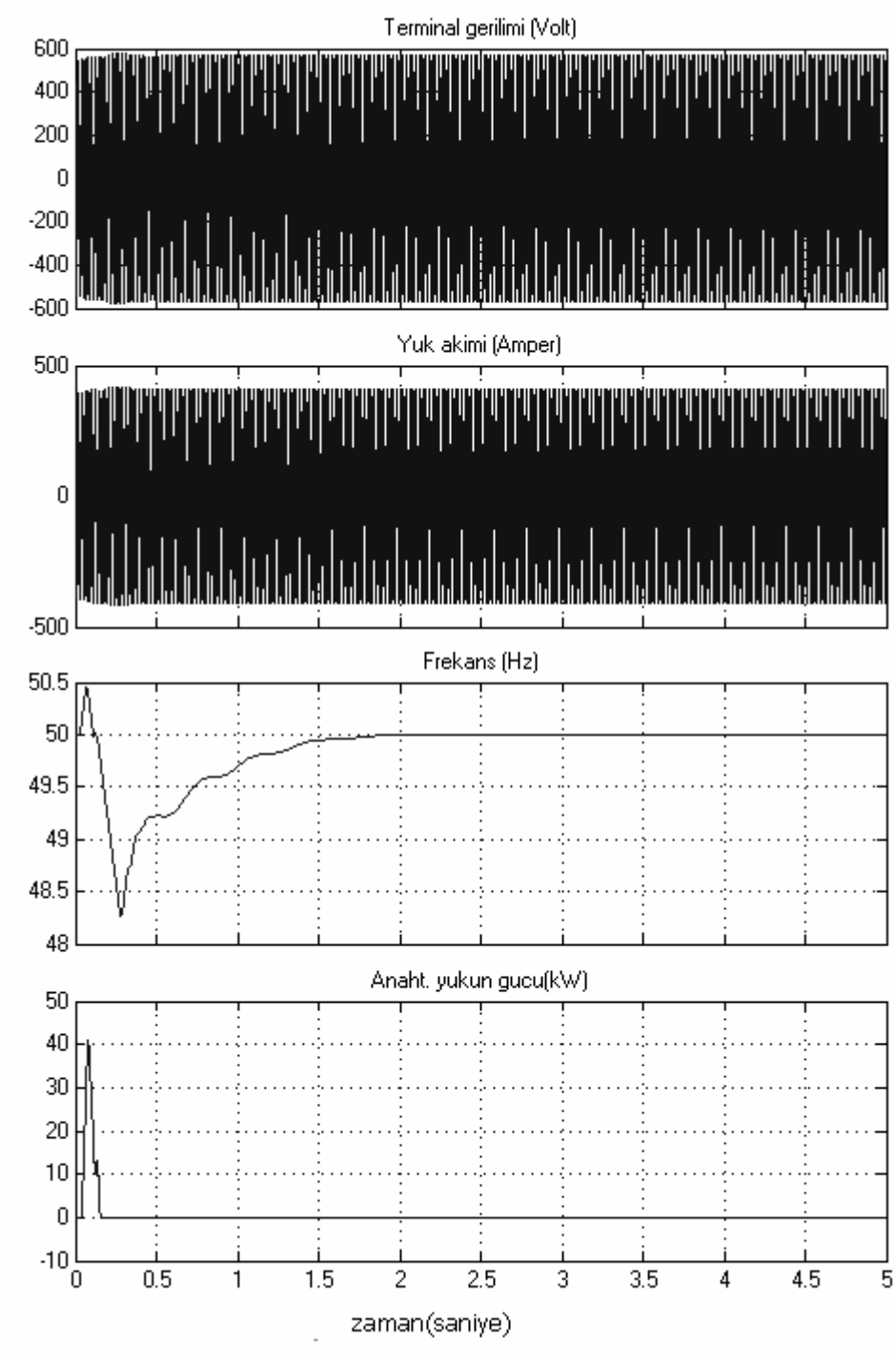
işletmeleri açısından sistemin kararlı çalışma durumuna geçiş süresi olan 2 saniyenin çokta uzun bir süre olmadığı bilinir.



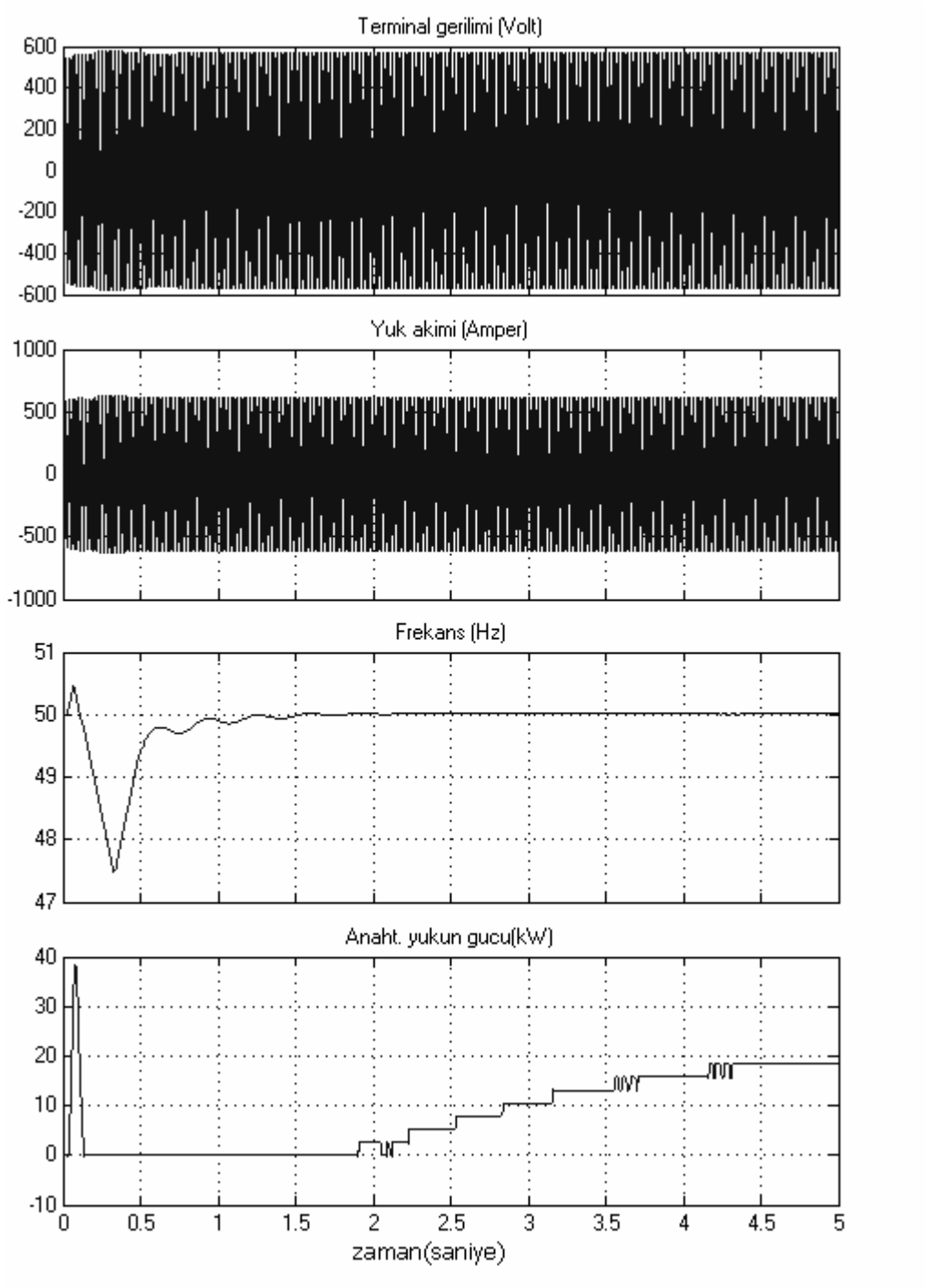
Şekil VI. 111 ANFÇK'lü HRGGÜS'nin 50kW'lık Tüketici Yükü ile Yüklendiğinde Terminal Gerilimi, Yük Akımı, Frekans ve Anahtarlama Gücündeki Değişim Eğrileri



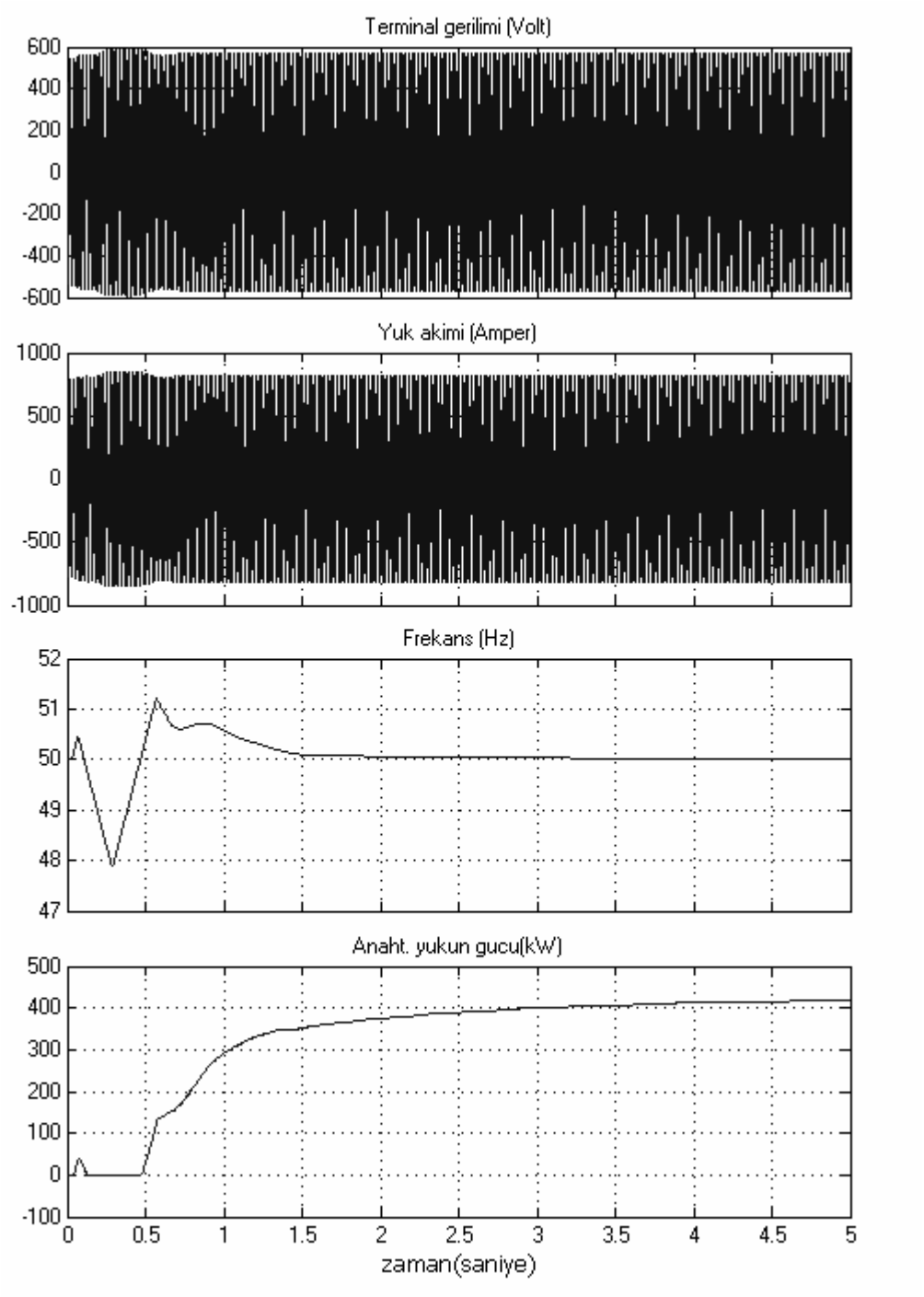
Şekil VI. 112 ANFÇK'lü HRGGÜS'nin 100kW'lık Tüketici Yükü ile Yüklendiğinde Terminal Gerilimi, Yük Akımı, Frekans ve Anahtarlama Gücündeki Değişim Eğrileri



Şekil VI. 113 ANFÇK'lü HRGGÜS'nin 200kW'lık Tüketici Yükü ile Yüklendiğinde Terminal Gerilimi, Yük Akımı, Frekans ve Anahtarlama Gücündeki Değişim Eğrileri



Şekil VI. 114 ANFÇK'lü HRGGÜS'nin 300kW'lık Tüketici Yükü ile Yüklendiğinde Terminal Gerilimi, Yük Akımı, Frekans ve Anahtarlama Gücündeki Değişim Eğrileri



Şekil VI. 115 ANFÇK'lü HRGGÜS'nin 400kW'lık Tüketici Yükü ile Yüklendiğinde Terminal Gerilimi, Yük Akımı, Frekans ve Anahtarlama Gücündeki Değişim Eğrileri

ANFÇK'lü HRGGÜS'nin çıkış elektrik büyüklerinden terminal gerilimi(yük uçlarındaki gerilim), yük akımı, işletme frekansı ve frekans kontrolü amacıyla kullanılan anahtarlamalı yükün çektiği güç değerleri yapılan simülasyon çalışması sonucunda ayrı ayrı elde edilmiştir. Terminal gerilimi, yük akımı ve anahtarlamalı yükün güç büyüklükleri maksimum büyüklüklerdir. Terminal geriliminin nominal işletme değeri 400 Volt iken bu değerin maksimum büyüklüğü $400 \cdot \sqrt{2} \cong 565.7$ Volt değerindedir. Yine aynı şekilde tüketici gücünün büyüklüğüne göre display ekranından okunan akım değeri de tepe değeri olan maksimum büyüklüktür. ANFÇK'lü HRGGÜS'nin 50kW, 100kW, 200kW, 300kW ve 400kW'lık tüketici yükleri ile yüklenmesi durumunda, terminal gerilimi, yük akımı, işletme frekansı ve anahtarlama gücündeki değişimler Şekil VI. 111, Şekil VI. 112, Şekil VI. 113, Şekil VI. 114 ve Şekil VI.115'de sırasıyla verilmiştir. Bu verilen şekiller ayrı ayrı analiz edildiğinde terminal gerilimi ve işletme frekansı daha önceki bölümlerde ifade ettiğimiz işletme sınır değerleri içersinde gerçekleşmiştir. İşletme frekansı 2 saniye gibi kısa bir sürede nominal değeri 50Hz'e oturduğu eğrilerden görülmektedir. Gerilim değerinin nominal işletme değeri 400 Volttur. Simülasyon neticesinde elde edilen gerilim ve akım büyüklüklerini $\sqrt{2}$ oranına böldüğümüzde etkin değerini elde ederiz. Bulduğumuz etkin değerlerin, bizim nominal işletme büyüklük değerlerine oldukça yakın değerler olduğu görülmüştür.

Anahtarlamalı yük, frekans büyüklüğünün durumuna göre üretilen kontrol pals sinyalleri ile gruplar halinde devreye girip çıkarak frekansı istenilen 50Hz frekans değerinde korunmasına yardımcı olan bir devre elemanı görevini üstlenmiştir. HRGGÜS'de kullanılan anahtarlamalı yükün maksimum güç değeri 448 kW'tır.

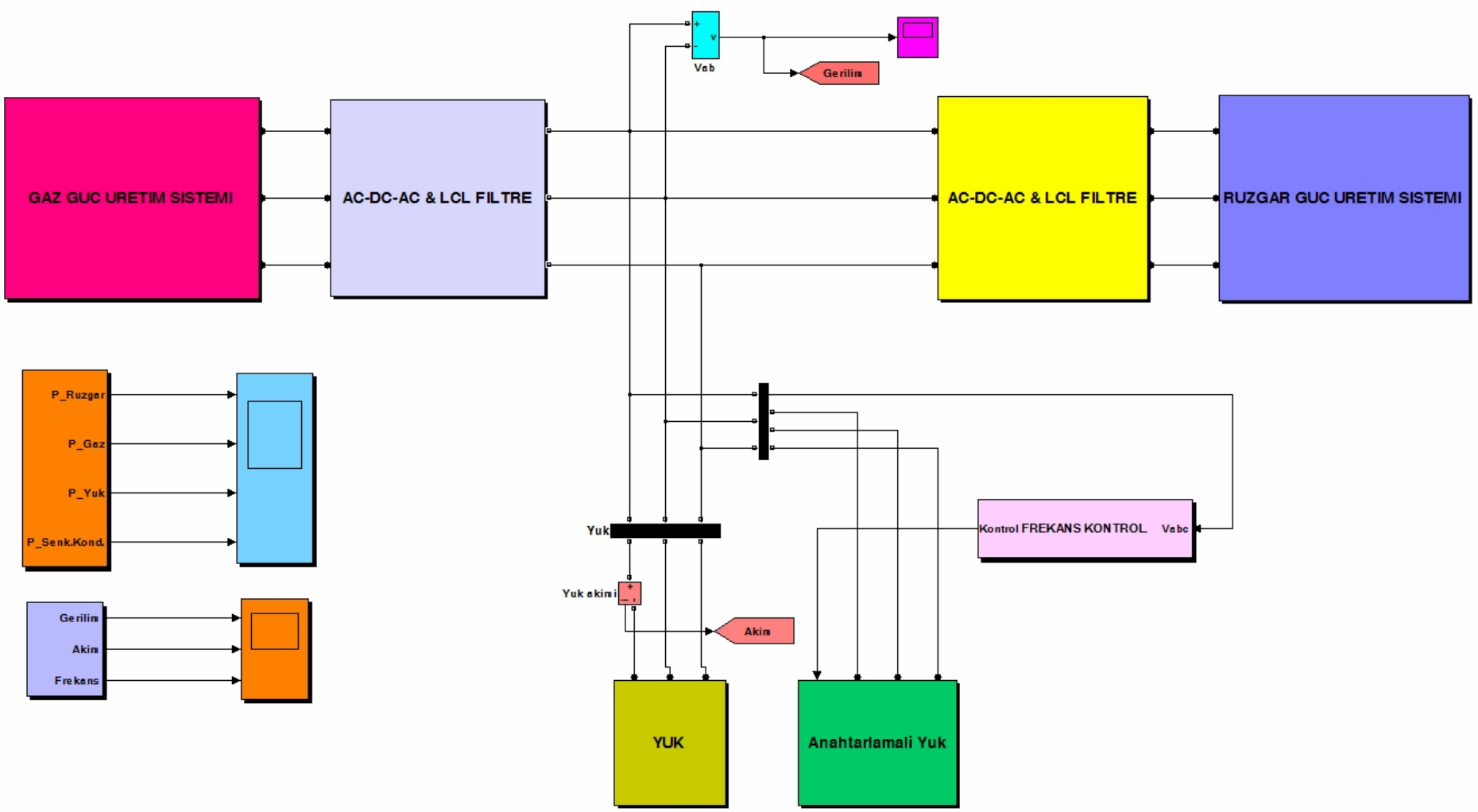
HRGGÜS'nin nominal işletme frekans değeri 50 Hz, işletme geriliminin etkin değeride 400 Volt olarak önceden belirlenmiştir. hibrid güç üretim sisteminden elde edilen gerilimin sinüzoidal dalga biçiminde olması ve genlik değerinin maksimum değeri de yaklaşık 565.7 Volt olması arzu edilen büyüklüklerdir. İstenilen biçimde ve değerde frekans ve gerilim değerlerinin elde edilmesi gerçekleştirildiğinde çekilen veya üretilen gücün kalitesinden de o oranda söz edebiliriz. Hibrid güç üretim sisteminin güç, gerilim, frekans ve akım eğrilerini incelediğimizde arzu ettiğimiz bicimde ve değerde elektriksel büyüklüklerin gerçekleştirildiği elde edilen sonuçlardan görülmektedir.

VI.2.5 AC-DC-AC Güç Dönüştürücülü HRGGÜS'nin Adaptif Neuro-Fuzzy Kontrolör ile Denetimi

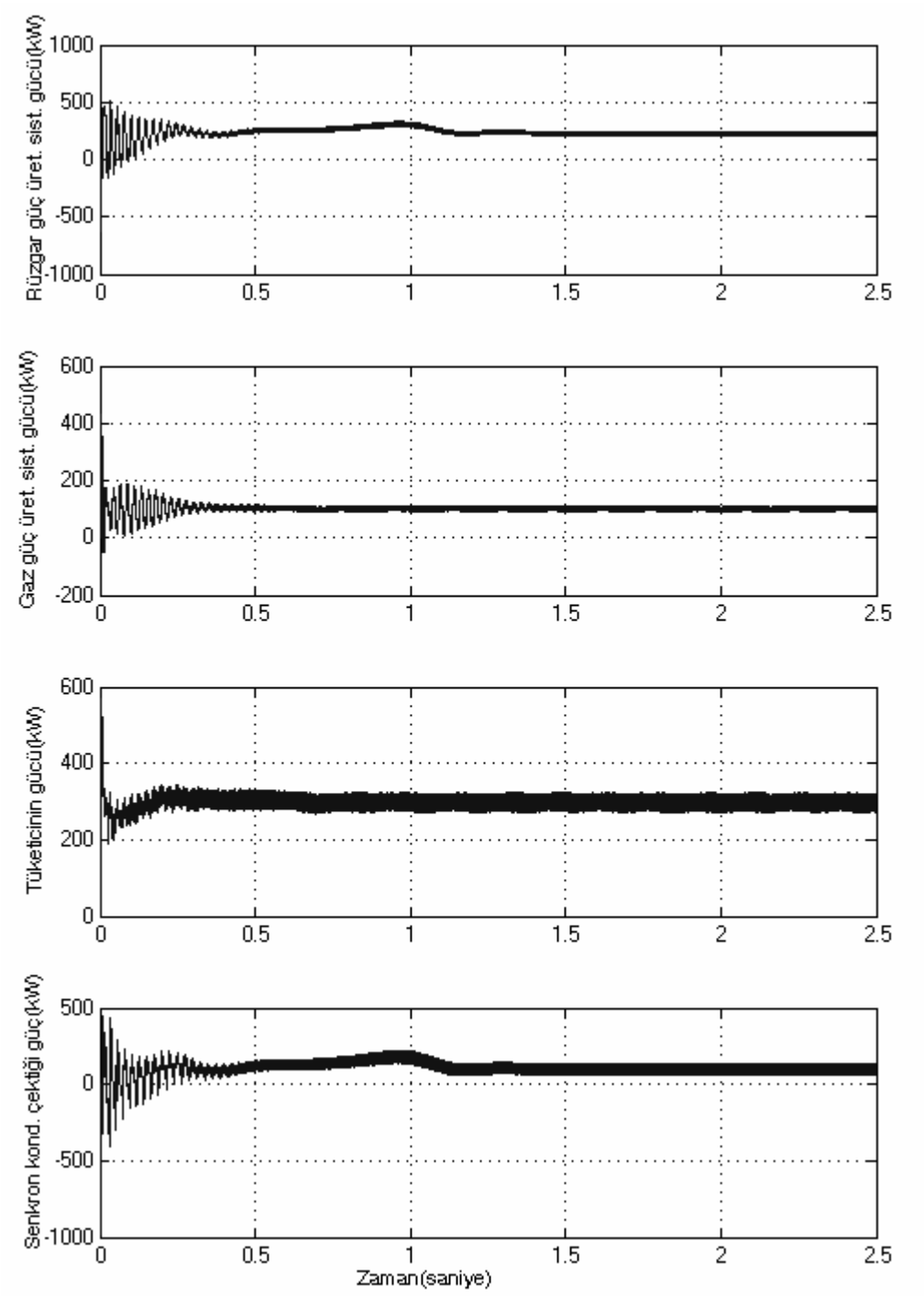
Rüzgar güç üretim sistemi ile gaz güç üretim sisteminin birbirine enterkonnekte bağlanması gerektiğinde, gerilim ve frekans değerlerinin birbirine eşit olması gerekmektedir. Diğer taraftan, iki güç üretim sisteminin birlikte çalıştırılması durumunda çıkış terminal gerilim ve frekans değerleri tüketici yüklerinin besleme gerilimine eşit olması gerekir. Belirtilen iki önemli şartın veya birisinin yerine getirilebilmesi için AC-DC-AC güç dönüştürücüleri ile istenilen gerilim ve frekans değerinde güç dönüşümü gerçekleştirilir. Bu dönüştürme işlemi yarı iletken devre elemanları ile sağlanır. RGÜS ve GGÜS alt başlıklarında AC-DC-AC güç dönüştürücüleri açık devre şemaları ve simülasyon blok diyagramları ile ayrıntılı olarak anlatılmıştır.

Önceki bölümlerde RGÜS ve GGÜS'nin AC-DC-AC güç dönüştürücülü durumdaki simülasyon blok diyagramları ayrı ayrı elde edilmiştir. Bu iki güç üretim sisteminin simülasyon diyagramları kullanılarak sistemin elektriksel çıkış büyüklükleri incelenmiştir. Ayrı ayrı incelediğimiz AC-DC-AC güç dönüştürücülü iki güç üretim sistemini birbirine paralel bağlayarak tüketici yüklerinin birlikte beslenmesi gerçekleştirilmiştir. Üretim sistemlerinin birbirlerine paralel bağlanması gerçekleştirilirken işletme gerilimleri ve frekanslarının birbirine eşit olması şartı aranmaktadır. Güç dönüştürücülü iki üretim ünitesi birbirine paralel bağlandığında sistemdeki bileşen sayısı arttığından dolayı farklı yük kademeleri için simülasyon çalışması yapılamamıştır. Çünkü, yapılan tez çalışması günümüzün en yüksek kapasiteli işlemci hızına sahip bilgisayarda gerçekleştirilmiş olmasına rağmen bileşen ve data sayısı çok fazla olduğundan dolayı bir tek yükleme durumu için simülasyon çalışması yapılabilmiştir. Hangi yük kademesi için yapılırsa yapılsın alınan sonuçların istenilen oranda gerçekleşeceği alınan simülasyon sonucundan net olarak görülmektedir.

300kW'lık RGÜS'i ile 400kW'lık GGÜS'nin AC-DC-AC güç dönüştürücüleri üzerinden birbirine bağlantısı ve hibrid güç üretim sistemi tarafından tüketicilerin yüklerinin beslenmesinin simülasyon blok diyagramı Şekil VI. 116'da gösterilmiştir. Bu simülasyon blok diyagramında ana sistem bileşenleri farklı renklerde ve kutular içersinde gösterilmiştir.



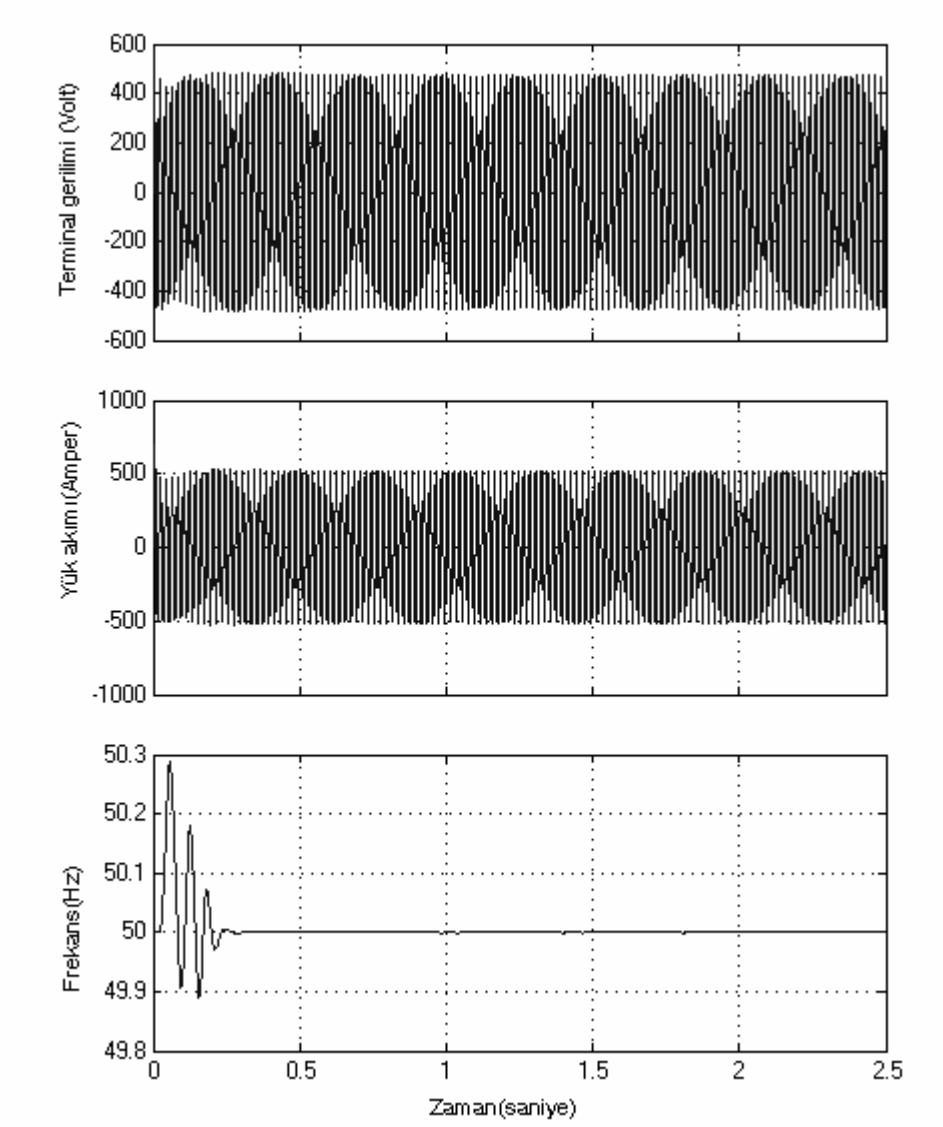
Şekil VI. 116 AC-DC-AC Güç Dönüştürücülü ve ANFÇK'lü Hibrid Rüzgar-Gaz Güç Üretim Sisteminin Simülasyon Blok Diyagramı



Şekil VI. 117 AC/DC/AC Güç Dönüştürücülü ve ANFÇK'lü HRGGÜS'den 300kW'lık Tüketici Gücü Çekilirken Üretim ve Tüketim Güçlerindeki Değişim Eğrileri

Şekil VI. 117'de, Güç Dönüştürücü devrede iken HRGGÜS'den 300kW'lık tüketici yükünün beslenmesi durumundaki üretim ve tüketim güçlerindeki değişimler eğrileri görülmektedir. Elde edilen simülasyon sonuçlarından da görüldüğü gibi yüksek anahtarlama frekanslarından dolayı oluşan harmoniklerin tamamen yok edilemediği anlaşılmaktadır. Yük geriliminin 400 Volt ve frekansının 50 Hz olması istenildiği için AC-DC-AC güç dönüştürücüsü kullanılmıştır. Güç dönüştürücüsüz

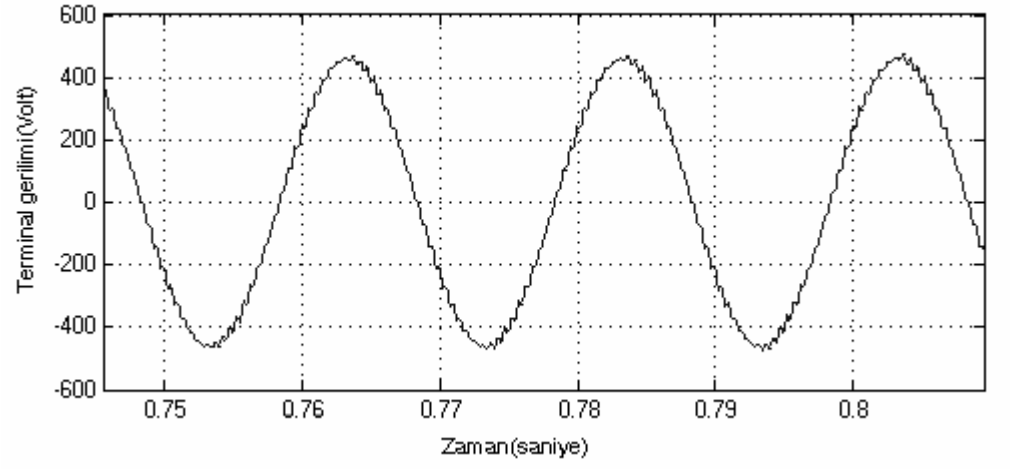
HRGGÜS'nin değişik tüketici yüklerini beslerken üretim ve tüketim güçlerindeki değişimlerle Şekil VI. 117'iyi karşılaştırdığımızda durum daha net anlaşılmaktadır. Yapılan çalışmada, güç dönüşümleri sırasında oluşan harmoniklerin etkisini azaltmak için LCL filtre devresi kullanılmasına rağmen tamamen etkisi ortadan kaldırılamamıştır.



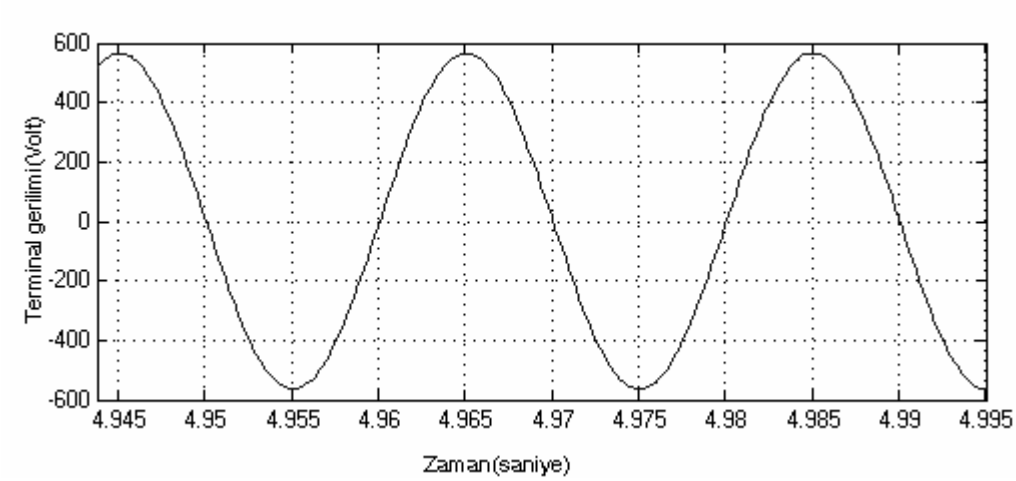
Şekil VI. 118 AC/DC/AC Güç Dönüştürücülü ve ANFÇK'lü HRGGÜS'den 300kW'lık Tüketici Gücü Çekilirken Terminal Gerilimi, Yük Akımı ve Frekanstaki Değişim Eğrileri

Güç dönüştürücülü ve ANFÇK'lü HRGGÜS'den 300kW'lık tüketici gücü beslenirken terminal gerilimi, yük akımı ve frekanstaki değişim eğrileri Şekil VI. 118'de görülmektedir. Terminal gerilimi 400Volt'un az üzerinde gerçekleşmiş, işletme frekansı ise yaklaşık 0.25 saniye gibi kısa bir sürede arzu edilen 50Hz

değerine oturmuştur. Yine burada, display ekranlarından okunan değerler gerilim ve akım için maksimum büyüklüklerdir. Gerilim eğrisini daha net görmek için 0.01 saniyelik simülasyon zaman aralığındaki değişim eğrisi Şekil VI. 119'da gösterilmiştir.



Şekil VI. 119 AC-DC-AC Güç Dönüştürücülü ve ANFÇK'lü HRGGÜS'den 300kW'lık Tüketici Yükü Beslenirken Terminal Geriliminde Değişim Eğrisi



Şekil VI. 120 Güç Dönüştürücüsüz ve ANFÇK'lü HRGGÜS'den 300kW'lık Tüketici Yükü Beslenirken Terminal Geriliminde Değişim Eğrisi

Güç dönüştürücüsüz HRGGÜS'i 300kW'lık yükü beslerken terminal geriliminin kısa zaman aralığındaki değişimi Şekil VI. 120'de gösterilmiştir. Şekil VI. 119 ile Şekil VI. 120'i karşılaştırdığımız zaman, Şekil VI. 119'da harmoniklerin gerilim eğrisini azda olsa bozduğu net olarak görülmektedir. Şekil VI. 120'de verilen gerilim eğrisi, pürüzsüz ve sinüzoidal biçimi hemen hemen hiç bozulmamış olarak görülmektedir.

BÖLÜM VII

SONUÇ VE ÖNERİLER

Son yıllarda, artan enerji talebine karşılık klasik güç üretim sistemlerine(diesel, doğal gaz çevrim santralları, nükleer santralar ve benzeri gibi) alternatif olarak yenilebilir enerji kaynaklarından yararlanarak yeni güç üretim sistemleri tesis edilmeye başlanılmıştır. Yenilebilir enerji kaynaklarından(rüzgar, güneş, mini veya mikro hidroelektrik güç sistemleri, v.b.) faydalanılarak üretilen elektriksel gücün kapasitesi klasik enerji üretim sistemlerinin gücüne göre oldukça düşüktür. Bu nedenle, küçük ölçekli bir sanayi kuruluşunun yada ilçe veya kasaba büyüklüğündeki bir yerleşim biriminin elektrik enerji ihtiyacının bir tek yenilebilir enerji kaynağından elde edilen elektrik enerjisi ile karşılanması her zaman yeterli gelmeyebilir. Tüketicilerin gerekli olan enerji talebini karşılamak için birden fazla yenilebilir enerji kaynaklarından ve enerjinin sürekliliğini garantiye almak amacıyla da enerji üretim ünitesi içinde yer alan klasik enerji üretim santralından faydalanılır. Bu tür güç üretim sistemleri aynı zamanda hibrid güç üretim sistemleri olarak ifade edilmektedir.

Yapılan çalışmada, 300 kW'lık rüzgar güç üretim sistemi ve 400 kW'lık gaz güç üretim sisteminin ayrı ayrı MATLAB/Simulink programında dinamik modellemeleri gerçekleştirilmiştir. Rüzgar güç üretim sistemi değişken hızlı rüzgar türbiniyle sürülen(tahrik edilen) kendinden uyartım sincap kafesli asenkron generatörden, gaz güç üretim sistemi ise; gaz türbiniyle sürülen silindirik kutuplu senkron generatörden oluşmaktadır. Her iki güç üretim sistemi bir araya getirildiğinde hibrid rüzgar-gaz güç üretim sistemi adını almıştır. Bu çalışmada, rüzgar güç üretim sistemi, temel güç üretim sistemi olarak kullanılmıştır. Tüketici güç talebi arttığında veya rüzgar güç üretim sisteminin rüzgar hızına bağlı olarak üretim gücü düştüğünde gaz güç üretim sisteme devreye alınmıştır. Yani, gaz güç

üretim sistemi enerjinin yetmediği zamanlarda destekleyici görevini üstlenmiştir.

Rüzgar güç üretim sisteminden(RGÜS) elde edilen gücün kaliteli olması için çıkış geriliminin etkin değerinin 400 Volt ve frekansının 50Hz işletme sınır değerlerinde gerçekleştirilmiş olması gerekmektedir. Bunun için, değişken hızlı rüzgar türbinin güç sınırlaması veya hız kontrolü ancak türbin kanat eğim açısının denetimi yapılarak gerçekleştirilmektedir. kanat eğim açısının denetimi için önce bilinen klasik PID kontrolör ile denetimi yapılmıştır. Rüzgar türbininin kanat eğim açısı kontrolü sonucunda, RGÜS'nin çıkış elektriksel büyüklükleri (gerilim, akım, frekans ve güç) yaklaşık 1.5 saniye gibi kısa bir zaman aralığında sürekli işletmedeki istenilen değerine oturduğu simülasyon sonuçlarından görülmüştür. Aynı zamanda, elde edilen simülasyon sonuçlarına bakıldığında sürekli işletmede sürekli hal hatası yaklaşık olarak sıfıra yakın çıkmıştır. Ancak RGÜS'nden beslenen tüketicilerin yükü günün her saatinden farklılık gösterdiğinden dolayı klasik PID kontrolün katsayılarını değişen yük durumlarına göre yeniden ayarlama zorunluluğu doğmuştur. Yapılan çalışmada, belirtilen zorunluluğu ortadan kaldırmak için rüzgar türbininin kanat eğim açısının denetimi PID kontrolör yerine Adaptif Neuro- Fuzzy Çıkarım Kontrolü(ANFÇK) ile sağlanmıştır. Adaptif Neuro-Fuzzy Çıkarım kontrolörünün kullanılmasının nedeni, önceden belirlenen işletme koşulları dahilinde değişen tüketici yük durumlarına göre türbin kanat eğim açısının adaptif olarak ayarlanmasıdır. Bu çalışmada, 40kW ile 110 kW'lık tüketici yük değerleri arasında türbin kanat eğim açısı ANFÇK ile otomatik olarak ayarlanmıştır. Diğer taraftan, tüketici yüklerinin istenilen besleme gerilim ve frekans değerlerinde işletilmesi söz konusu olacağı için AC-DC-AC güç dönüştürücü ara yüzeyi kullanılmıştır. RGÜS'nin istenilen gerilim ve frekans değerindeki üretim gücü AC-DC-AC güç dönüştürücüsü ve LCL filtre devresi üzerinden tüketiciye iletilmiştir. LCL filtre devresinin kullanılma nedeni ise, yüksek anahtarlama frekansıyla (4kHz) güç dönüşümünün gerçekleştirilmesi sırasında oluşan gerilim harmoniklerinin etkisini minimize etmektir.

Enerji dağıtım şebekesinden bağımsız çalışan gaz güç üretim sisteminin(GGÜS) elektriksel çıkış büyüklüklerinden gerilimin etkin değerinin 400Volt'ta ve frekansın da 50Hz'de olması istenilmektedir. GGÜS'nde elektriksel gücün elde edildiği senkron generatörde iki kontrol değişkenine sahiptir. Bunlardan birincisi; mekanik enerji girişi(mekanik güç, tork veya açısal hız şeklinde), diğeri uyartım devresi akımı veya gerilimidir. Aktif güç ayarlaması veya frekans ayarlması

söz konusu olduğunda senkron generatörün mekanik enerji girişi denetim altına alınır. Yapılan çalışmada, GGÜS'nin gaz türbin hızını ayar ederek senkron generatörde indüklenen gerilimin frekansı ve üretim gücü denetim altına alınmıştır. Senkron generatörde indüklenen gerilimin büyüklüğü aynı zamanda frekansla da doğru orantılı olarak değişmektedir. GGÜS'nin türbin hızı için hiç bir kontrolör elemanı kullanılmadığı değişik tüketici yüklerinde işletme frekansı değeri yük miktarına bağlı olarak düşüş göstermiştir. İşletme frekansını ve gerilimini istenilen değerde tutmak için ilk önce klasik PID kontrolör elemanı ile gaz türbini hız denetimi yapılmıştır. GGÜS'nden beslenen yük değerleri 50kW'dan 400kW ya kadar değişmesi sırasında PID kontrolörün kazanç katsayıları sürekli yenilenmiştir. Arzu edilen gerilim ve frekansın elde edilebilmesi için gaz türbini hızının değişen yük durumlarına otomatik olarak adapte etmesi için ANFÇK'ü kullanılmıştır. Gaz türbini hız denetiminde ANFÇK kullanarak her değişen yük durumunda, izin verilen işletme sınırları dahilinde türbin hızı istenilen gerilim ve frekans değerinde ayarlanmıştır. Diğer taraftan tüketici yüklerinin farklı gerilim ve frekans kademelerinde çalıştırılması söz konusu olduğu durumlarda AC-DC-AC güç dönüştürücüsü kullanılmıştır. GGÜS'nin üretim gücü AC-DC-AC güç dönüştürücüsü ve LCL filtre devresi üzerinden tüketiciye iletilmiştir.

300kW'lık RGÜS ile 400kW GGÜS birbirine paralel bağlanarak tüketici yükü ve anahtarlamalı yük bileşenini de içeren hibrid güç üretim sisteminin Matlab/Simulink programında simülasyon blok diyagramı gerçekleştirilmiştir. ilk önce AC-DC-AC güç elektroniği ara yüzey devre elemanı yok iken, hibrid güç üretim sistemimi 50 kW dan 400 kW değerine kadar değişen tüketici yüklerinde çalıştırılmıştır. Bu işletme durumlarında, hibrid güç üretim sistemini oluşturan RGÜS ve GGÜS'nin kontrolü ANFÇK ile sağlanmıştır. Hibrid güç üretim sisteminin elektriksel çıkış büyüklüklerindeki değişimler simülasyon çalışması ile ayrı ayrı elde edilerek eğrilerle gösterilmiştir. Bölüm VI'da bu simülasyon eğrilerinin ayrı ayrı analizleri yapılmıştır. Yapılan simülasyon çalışmaların da, gerçek işletmedeki rüzgar-gaz üretim ünitelerinin dinamik davranışının hemen hemen aynısı gözlemlenmiştir. Hibrid güç üretim sisteminin bütün elektriksel çıkış büyüklük değerleri sürekli işletme durumundaki istenilen değerelere1.5-2 saniye gibi zaman aralığında oturmuşlardır. Hibrid güç üretim sisteminden elde edilen gerilimin maksimum değeri yaklaşık 565 ile 570 Volt arasında ve sinüzoidal biçimdedir. İşletme frekansı ise izin verilen tolerans sınırlar dahilinde 50Hz ± %1·$f_{işl}$

gerçekleşmiştir. Bu gerilim ve frekans değeri tüketiciler için arzu edilen değerlerdir.

Hibrid rüzgar-gaz güç üretim sistemini oluşturan güç üretim ünitelerinin gerilim ve frekans değerleri birbirinden farklı değerlerde ise paralel bağlanıp çalıştırılamazlar. Farklı gerilim ve frekans değerine sahip güç üretim sistemlerini birbirine enterkonnekte biçiminde bağlanabilmesi için gerilim ve frekans değerlerinin eşit olması gerekmektedir. Bu amaçla güç elektroniği devre elemanlarından oluşan AC-DC-AC güç dönüştürücüler kullanılarak iki veya daha fazla güç üretim ünitesinin birbirine bağlantısı gerçekleştirilir. Yapılan çalışmada, RGÜS'nin ve GGÜS'nin çıkış gerilimi ve frekans değeri birbirine eşit olduğu için AC-DC-AC güç dönüştürücü kullanılmadan da paralel bağlantısı gerçekleştirilerek tüketicilerin beslenme durumuna ait simülasyon blok diyagramı gerçekleştirilmiştir. Diğer taraftan tüketicilerin 400 Volt maksimum gerilim ve 50Hz işletme frekans değeri ile beslenilmesi istenildiğinde AC-DC-AC güç dönüştürücüsü ve LCL filtre devresi üzerinden beslenmesi sağlanmıştır. AC-DC-AC güç dönüştürücülü ve ANFÇK'lü hibrid güç üretim sisteminin elektriksel çıkış büyüklükleri arzu edilen sürekli işletmedeki değerine oturma süresi 0.25 saniye gibi kısa bir sürede oturmuştur. Yalnız simülasyon üretim ve tüketim gücü eğrileri incelendiğinde güç dönüşümü sırasında oluşan harmoniklerin etkisi net olarak görülmektedir.

Yapılan tez çalışması sonucunda, hibrid güç üretim sisteminin elektriksel çıkış büyüklüklerinin performansını iyileştirmesi amacı ile kullanılan Adaptif Neuro-Fuzzy Kontrolörün sisteme uyumu ve kullanımı konusunda bir problemle karşılaşılmamıştır. Aksine istenilen kalitede ve verimlilikte sistemden elektriksel çıkış büyüklükleri elde edilmiştir.

Daha sonraki gerçekleştirilecek olan çalışmalarda, güç üretim sistemi sayısı artırılarak üç, dört veya beş güç üretim ünitesinden oluşan hibrid güç üretim sistemi gerçekleştirilip denetiminin de Adaptif Neuro-Fuzzy-PID kontrolör ile yapılması sağlanabilir.

KAYNAKLAR:

[1] Engin, M.: "Fotovoltaik-Rüzgar Hibrid Enerji Sistemlerinin İzmir Koşullarında Tasarımı ve Denenmesi", Doktora Tezi, Ege Üniversitesi Fen Bilimleri Enstitüsü, İzmir, Türkiye (**2002**)

[2] Slack, G.: "Design and Operation of Wind-Diesel Battery Systems" IEE, EWEC'89 Conference Puplucation Part One, (**1989**) 230-233

[3] Pereira, A.L.: "Modular supervisory controller for hybrid power systems" Risø-R-1202(EN), Risø National Laboratory, Roskilde, (**2000**)

[4] Jang, J.S.R, Sun, C.T., & Mizutani, E.: "Neuro-fuzzy and soft computing : a computational approach to learning and machine intelligence", Upper Saddle River, NJ: Prentice-Hall, (**1997**)

[5] Barlove, G., Day, R., Kilfoyle, D., Roberts, R., Sımıth, G.: "Hybrid Renewable Energy Systems for Off-Shore Naval Installations", IEEE Transactions on Energy Conversion, (**1988**) 1179-1181

[6] Huacuz, J.M., Agredone, J., Munguıa, G., Borja, M.A., Durand, S., Foster, R., Pate, R.: "One Year Evaluation of The PV-Wind-Diesel Hybrid Project in X-Calak", IEEE Transactions on Energy Conversion, (1**994**) 740-742

[7] Kimura, Y., Onai, Y., Ushiyama, I.: "A Demonstrativa Study for The Wind and Solar Hybrid Power System", Proceedings of World Renewable Energy Congress'96, (**1996**) 895-898

[8] Kurozumi, K., Tawara, T., Tanaka, T.: "A Hybrid System Composed of A Wind Power and A Photovoltaic System at NTT Kuma Jima Radio Relay Station", IEEE Transactions on Energy Conversion, (**1998**) 785-789

[9] Behave, A.G.: "Hybrid Solar-Wind Domectic Power Generating System: A Case Study", Renewable Energy, 17 (**1999**) 355-358

[10] Elhadidy, M.A., Shaahid, S.M.: "Parametric Study of Hybrid (Wind-Solar-Diesel) Power Systems", Renewable Energy, 21 (**2000**) 129-139

[11] http://www.worldwatch.org, Worldwatch Enstitute, Erişim Tarihi: **21.07.2006**

[12] http://www.awea.org, American Wind Energy Association (AWEA), Erişim Tarihi: **25.07.2006**

[13] EMSD(Electrical & Mechanical Services Department): "Study on The Potential Applications of Renewable Energy in Hong Kong : Stage 1 Study Report", Hong Kong Special Administrative Region (**2002**)

[14] Yang, H., Zheng, G., Burnett, J.: "Grid-Connected Building-Integrated Phovoltaics: A Hong Kong Case Study", Solar Energy (**2003**)

[15] http://www.mathworks.com, Matlab/Simulink Simpowersystems Documentation, Erişim Tarihi: **02.08.2006**

[16] Gillie, M.F. ve Leithead ,W.E.: "Operation and Regulation of A Wind and Gas Virtual Power Plant", 17 th Intl.Conf. Electricity Dist, Barcelona, Spain (**2003**)

[17] Mukund. R. P.: "Wind Power Systems", CRC Pres, (**1999**) Chp 4-6

[18] Zheng, G.F.: "High Efficiency Thin-Film Silicon Solar Cell" Ph.D.Thesis, University of New South Wales, Sydney, Australia (**1996**)

[19] Borowy, S.: "Optimum Photovoltaic Array Size for A Hybrid Wind/PV System", IEEE Transaction on Energy Conversion 9(3) (**1994**) 482-488

[20] Macleod, R.G., "Fuzzy Controller for A Hybrid Wind/Diesel System with Storage", Master of Applied Science, Electrical and Computer Engineering, Dalhousie University (**1999**)

[21] Davıd Arap, C.C., "Modelling, Simulation, and Performance Analysis of A Hybrid Power System for Mobile Medical Clinic", Kassel University Pres (**2004**)

[22] Lu, L.: "Investigation On Characteristics and Application of Hybrid Solar-Wind Power Generation Systems" The Hong Kong Polytechnic University (**2004**)

[23] Rajıb, D. Ranganathan, V.T. "Variable Speed Wind Power Generation Using Doubly Fed Wound Rotor Induction Machine-A Comparison With Alternative Schemes," IEEE Transaction on Energy Conversion, Vol.17, No.3 (**2002**) 414-420

[24] Bialasiewicz, J.T., Muljadi, E., Drouilhet, S., Nix, G.: "Hybrid Power Systems With Diesel and Wind Turbine Generation", Proceedings of the American Control conference, Philadelphia (**1998**)

[25] Alexandre, L.P.: "Modular supervisory controller for hybrid power systems", Risø National Laboratory, Roskilde (**2000**)

[26] Eduard, M., Edward M.H.:, "Power Quality Issues in a Hybrid Power System", IEEE Transactions on Industry Applications, Vol.38, No.3 (**2002**)

[27] Gabriele, S.H.: "Optimization of Hybrid Energy Systems Sizing and Operation Control",Ph.Thesis, University of Kassel, Germany, (**1998**)

[28] Manwell, J.F., Rogers, A., Hayman, G., Avelar, C.T., Mcgowan, J.G.: " Draft theory manual for hybrid2: the hybrid system simulation model, for hybrid energy systems" NREL/TP-440-21182, Golden, CO (**1996**)

[29] Green, H. J., Manwell, J.: "*Hybrid2-a versatile model of the performance of hybrid power systems"*, National Renewable Energy Laboratory, 1617 Cole Boulevard, Golden, CO 80401, USA (**1998**)

[30] Ibrahim, W.R.A., "Adaptive Neuro-Fuzzy and Expert Sysems for Power Quality Analysis and Prediction of Abnormal Operation", Ph.D.Thesis, Depertmant of Electrical and Control Engineering, Kansas State University, Manhattan, Kansas (**2001**)

[31] Yang Y.G.: "A Modified Adaptive-Networks-Based Fuzzy Inference Controller", Ph.D.Thesis, Mechanical and Aerospace Engineering, North Carolina State University, (1**998**)

[32] Alturkı, F.A., Abdennour, A.: "Design and Simplification of Adaptive Neuro-Fuzzy Inference Controllers For Power Plants" Electrical Power and Energy Systems, 21(**1999**) 465-474

[33] Manwell, J.F., Rogers, A., Hayman, G., Avelar, C.T., MCGOWAN, J.G.: "Hybrid2- A Hybrid System Simulation Model", National Renewable Energy Laboratory, Nowember 2 (**1998**)

[34] Seeling-Hochmuth**,** G.C.: "A combined Optimisation Concept For The Design and Operation Strategy of Hybrid-PV Energy Systems", Solar Energy Vol. 61, No. 2 (**1997**)77-87

[35] Slabbert, C., Seeling-Hochmuth, G.:"Review of Hybrid Energy System Design and Performance", Draft document, EDRC, University of Cape Town (**1997**)

[36] Mukund, R.P.: "Wind and Solar Power Systems", Second Edition, CRS Press,Taylor&Francis Group (**2005**)

[37] Working Group J6 of the Rotating Machinery Protection Subcommittee, Power System Relaying Committee, "Performance of generator protection during major system disturbances", IEEE Transactions on Power Delivery, Vol.19, No.4, (**2004**)1650-1662

[38] http://www.homepower.com/education/components.cfm, Education RE Components, Home Power, Erişim Tarihi**: 21.07.2006**

[39] Murray, L.: "Land Area and Storage Requierements for Wind and Solar Generation to Meet The US Hourly Elektrical Demands", Department of Mechanical engineering , University of Victoria (**2003**)

[40] Nayar C.V., Philips S.J., James W.L., Pryor T.L., Remmer D.:"Novel Wind/Diesel/Battary Hybrid Energy Systems", Solar Energy, 51 (**1993**)65-78

[41] Shankar, S., Marc, B.: "Adaptive Control" Prentice Hall, Englewood Cliffs, USA (**1989**)

[42] http://www.pages.drexel.edu/~kws23/tutorials/MRAC/MRAC.html, Erişim Tarihi: **28.07.2006**

[43] Strom, K.J., Wittenmark, B.: "*Adaptive Control*", Addison-Wesley. (**1995**)

[44] Zhongshan, W.: "Simulation Study and Instability Of Adaptive Control", B.S.E.E., Northeastern University, China (**2001**)

[45] Lee, C.C.: "Fuzzy Logic in Control Systems: Fuzzy Logic Controller-Part I-II ", IEEE Trans on Systems Man and Cybernetic, 20(**1990**) 404-435

[46] Editorial, "Fuzzy-Models- What are they, and Why?" IEEE Transaction on Fuzzy Systems,1(**1993**)1-5

[47] Oğuz, Y.: "Senkron Generatörlerin Uyartım Devresinin Bulanık Mantıkla Kontrolü", Y.Lisans Tezi, Marmara Üniversitesi Fen Bilimleri Enst. İstanbul, (**2000**)

[48] Chen, G., Phem, T.T., Weus, J.: " Fuzzy Modeling of Control Systems" IEEE Trans. on Aorospace and Electronics Systems, 31(**1995**)

[49] http://www.mathworks.com, Erişim Tarihi: **25.08.2006**

[50] Sugeno, M.: "Industrial Applications of Fuzzy Control", Elsevier Science Pub. Co.(**1985**)

[51] The Mathworks, "Fuzzy Logic Toolbox for use with Matlab" User Guide, Inc. (**2006**)

[52] Werbos, P.J.: "An Overview of Neural Networks for Control", IEEE Control Systems Magazine, 11(**1991**) 40-41

[53] Cirstea, M.N., Dinu, A., Khor, J.G., Mccormick, M., "Neural and Fuzzy Logic Control of Drives and Power Systems", Newnes, Kitap (**2002**)

[54] Yurtoğlu, H.: "Yapay Sinir Ağlari Metodolojisi İle Öngörü Modellemesi: Bazi Makroekonomik Değişkenler İçin Türkiye Örneği" Uzmanlık Tezi, Yayın No: DPT: 2683 (**2005**)

[55] Abraham, A.: "Neuro-Fuzzy Systems: State-of-the-Art Modeling Techniques, Connectionist Models of Neurons, Learning Processes, and Artificial Intelligence", Springer-Verlag Germany, Jose Mira and Alberto Prieto (Eds.), Granada, Spain (**2001**) 269-276

[56] Jang, R., Sun C.: "Neuro-Fuzzy Modeling and Control". Proceedings of IEEE, 83(3) (**1995**) 378-406

[57] Kım, J., Kasabov, N.: "HyFIS: Adaptive Neuro-Fuzzy Inference Systems and Their Application to Nonlinear Dynamical Systems", Neural Networks,12. (**1999**) 1301-1319

[58] Wang, L.X., & Mendel, J.M., "Generating Fuzzy Rules by Learning from Examples", IEEE Transactions on System, Man and Cybernetics, 22(6) (**1992**) 1414-1427

[59] Patrıcıa, M., & Oscar, C.. "Modelling, Simulation and Control of Non-Linear Dynamical System", Kitap, Taylor&Francis Press (**2002**)

[60] Brown, M., & Harrıs, C.: "Neuro-Fuzzy Adaptive Modelling and Control", Kitap, Prentice Hall, New York (**1994**)

[61] Jang, J.S.R.. "ANFIS: Adaptive-Network-Based Fuzzy Inference Systems" IEEE Transaction on Systems, Man & Cybernetics, 23(3) (**1993**)665-685

[62] Özçalik, H.R. & Uygur, A.F.: **"**Dinamik Sistemlerin Uyumlu Sinirsel-Bulanık Ağ Yapısına Dayalı Etkin Modellenmesi", KSÜ Fen ve Mühendislik Dergisi 6(1) (2003)

[63] Manwell, J.F., Mcgowan, J.G., Rogers, A.L.: "Wind Energy Explained – Theory,Design and Application", Kitap, John Wiley& Sons, 7 (**2002**)

[64] Siegfried, H.: "Grid Integration of Wind energy Conversion Systems", Kitap, John Wiley& Sons, 1-2 (**1998**)

[65] Tony, B., David, S., Nick, J., Ervin B.: "Wind Energy Handbook", Kitap, John Wiley& Sons (**2001**)

[66] Slootweg, J.G., "Wind Power: Modeling and Impact On Power System Dynamics," Ph. Thesis, Dept. Elect. Eng., Delft University of Technology, Delft, Netherlands,(**2003**)

[67] Sreedher, R.G.: "Modeling and Power Management of A Hybrid Wind-Microturbine Power Generation System", Master of Science in electrical engineering, Montana State University, Bozeman Montana, July (**2005**)

[68] Eduard, M., Butterfield, C. P.: "Pitch-Controlled Variable-Speed Wind Turbine Generation," IEEE Transactions on Industry Applications , 37(**2001**) 240-246

[69] Boduroğlu ,T.: "Elektrik Makinaları Dersleri", Cilt II Baskı: İstanbul (**1998**)

[70] Chee-Mun, C.: "Dynamic Simulation Of Electric Machinery Using Matlab/Simulink", Kitap, Prentice Hall PTR (**1998**)

[71] Chan, T.F.: "Capacitance Requirements of Self-Excited Induction Generators," IEEE Trans. Energy Conversion, 8(**1993**)304-311

[72] Ouazene, L., Mcpherson J. G.: "Analysis of the isolated induction generator,"*IEEE Trans. Power Apparatus and Systems*, vol. PAS-102, No. 8 (**1983**)2793-2798

[73] Murthy S. S., Malik O. P., and Tandon A. K.: "Analysis of Self Excited Induction Generators", Proceedings, IEE, pt. C, vol. 129, no. 6, pp. 260-265, (**1982**)

[74] Chan T.F. :"Steady-State Analysis Of Self-Excited Induction Generator", IEEE Transactions on Energy Conversion, 9(**1984**)

[75] Paul C. Krause, "Analysis of Electric Machinery", Kitap, International Editions, 2nd Printing, McGraw-Hill, (**1987**)

[76] Dawit Seyoum, Colin Grantham and M. F. Rahman, "The Dynamic Characteristics of An Isolated Self-Excited Induction Generator Driven by A Wind Turbine," IEEE Trans.Industry Applications, 39(4)(**2003**) 936-944

[77] Grantham C., Sutanto D., and Mismail B.:"Steady-State And Transient Analysis Of Selfexcited Induction Generators" Proceedings, IEE, 136(2)(**1989**) 61-68

[78] Güney İ.: "Elektrik Tesisleri I", Marmara Üniversitesi Teknik Eğitim Fakültesi, İkinci Baskı, (**2001**) İstanbul

[79] Hajagos L. M. and Berube G. R., "Utility Experience With Gas Turbine Testing and Modeling", in Proceedings, IEEE PES Winter Meeting, Columbus, OH, 2 (**2001**) 671-677

[80] Jurado F., and Cano A., "Use of ARX Algorithms For Modeling Micro-Turbines On The Distribution Feeder" in IEE Proceedings: Generation Transmission And Distribution, 151(2)(**2004**) 232-238

[81] Zhu Y. and Tomsovic K., "Development of Models For Analyzing The Load-Following Performance of Microturbines And Fuel Cells", Journal Of Electric Power Systems Research, 62 (2002) 1-11

[82] Goldstein L., Hedman B., Dave Knowles, Steven I. Freedman, Richard Woods and Tom Schweizer.: "Gas-fired distributed energy resource technology characterizations," National Renewable Energy Laboratory, NREL/TP-620-34783,(**2003**)

[83] Hannet L. N. and Khan A.: "Combustion Turbine Dynamic Model Validation From Tests" IEEE Transactions on Power Systems, 8(1**993**) 152-158

[84] Working Group on Prime Mover and Energy Supply Models for System Dynamic Performance Studies, "Dynamic Models For Combined Cycle Plants

In Power System Studies", IEEE Transactions On Power Systems, 9(**1994**) 1698-1708

[85] Jurado F. and Saenz J.R.: "Adaptive Control of A Fuel Cellmicroturbine Hybrid Power Plant" IEEE Transactions On Energy Conversion, 18(**2003**) 342-347

[86] Rowen W. I., "Simplified Mathematical Representations Of Heavy Duty Gas Turbines", Journal of Engineering for Power, Transactions ASME, 105(4)(**1983**) 865-869

[87] Sarioğlu, K., Dynamic of Electrical Machines, Department of Electrical Engineering University of Illions Urbane

[88] Sarioğlu, K.: "Elektrik Makinalarının Temelleri-II, İ.T.Ü. Elektrik Fakültesi, İstanbul(**1983**)

[89] Sørensen, P., Hansen, A.D., Rosas, P.A.C.: "Wind Models for Simulation of Power Fluctuations From Wind Farms", Journal of Wind Engineering, 90, (**2002**)1381-1402

[90] Marsaglia, G., Tsang, W.W.: "The Ziggurat Method For Generating Random Variables", Journal of Statistical Software, 5(8) (**2000**)

[91] http://www.mhi.co.jp/nsmw/mwt/indexe.html

[92] Sarioğlu, K.: "Otomatik Kontrol I-II", Birsen Yayınevi, İstanbul(**1997**)

[93] Leon, A.M.: "Advanced Power Electronıc For Wınd-Power Generatıon Bufferıng", Ph. Thesis, University of Florida, United States, (**2005**)

[94] G. Saccomando, "Grid-connected VSC operating under voltage disturbance conditions," Chalmers University of Technology, Tech. Rep. (**2001**) ISSN 1401-6176

[95] Blaabjerg F., Chiarantoni E., Dell'Aquila A., Liserre M., and Vergura S.: "Analysis of the Grid Side Behavior of a LCL-Filter Based Three-Phase Active Rectifier," IEEE International Symposium on Industrial Electronics *(ISIE '03)* 2 (**2003**), 775 – 780.

[96] Liserre M., Dell'Aquila A., and Blaabjerg F.: "Genetic Algorithm Based Design of The Active Damping For A LCL-Filter Three-Phase Active Rectifier," IEEE Trans. on Power Electronics, 19(**2004**)76 -86.

[97] Poul Sørensen and Peter Hauge Madsen, "Power Quality and Integration of Wind Farms in Weak Grids in India", Risø National Laboratory, Roskilde, (**2000**)

EKLER

EK.A

GAZ TÜRBİNİ PARAMETRELERİ[79,83]

Nominal İşletme gücü : 400 kW

Yakıt sistemi parametreleri:

K_v=1, T_v=0.05, c=1, $K3$=0.77, $K6$=0.23, K_f=1, T=0, T_f=0.04.

Kompresör-turbin sisteminin parametreleri:

T_{CR}=0.01, T_{TD}=0.04, T_{CD}=0.2, K_{HHV}=1.2.

Sıcaklık kontrolör parametreleri :

K_4=0.8, K_5=0.2, T_3=15, T_4=2.5, T_5=3.3, T_t=450 °F, T_R=950 °F.

SENKRON GENERATÖRÜN PARAMETRELERİ [15]

Nominal güç, gerilim ve frekans : 2000kW, 400Volt, 50Hz

R_s : 0.0095 p.u.

L_l : 0.05p.u

L_{mq} :1.51p.u

L_{md} : 2.06p.u

R_f : 0.001971p.u

L_{fd} : 0.3418 p.u.

H(atelet katsayısı) : 0.3072

F(sürtünme faktörü): 0.00987p.u

p :2

n_1 :1500 rpm

RÜZGAR TÜRBİNİ PARAMETRELERİ [91]

Tipi	*:MWT – 300kW*
Nominal hızı	: 15 m/sn
Üretime başlama rüzgar hızı	: 3m/sn
Maksimum üretim rüzgar hızı	: 25m/sn
Dayanma rüzgar hızı	: 60m/sn
Rotor çapı	: 30m
Rotor hızı	: 43rpm/28.6
Kullanılan asenkron gen. Kutup sayısı	: 4/6
Kullanılan asenkron generatör hız oranı	: 1500/1000rpm(50Hz), 1800/1200(60Hz)
*Güç kontrol*ü	: kanat eğim açı kontrollü, IGBT evirici-Kanat eğim açısı kontrollü
*Hız kontrol*ü	: kanat eğim açısı kontrollü

SENKRON KONDANSATÖR [15]**:**

S_N	: 250kVA
U	: 400V,
F	: 50Hz
X_d	: 2.84 p.u
$X_{d'}$	: 0.18 p.u
$X_{d''}$	: 0.13 p.u
X_q	: 2.44 p.u
$X_{q''}$	: 0.36 p.u
X_l	: 0.09 p.u
R_s	: 0.0036 p.u
H	: 0.1753 p.u
F	: 0.01579 p.u
p	: 2

ASENKRON GENERATÖRÜN PARAMETRELERİ [97]

Nominal aktif gücü	: 225kW
Reaktif gücü	: (yüksüz durumda) : 96kVAr
Güç Faktörü(cos j)	:0.81
Nominal tork	: 2170 Nm
Frekans	: 50Hz
Faz-Faz gerilimi	: 400Volt
R_1	: 0.019Ω
X_1	: 0.18Ω
R_2	: 0.019Ω
X_2	: 0.345Ω
R_m	: 180Ω
X_m	: 4.8Ω
n_1	: 1500 rpm
Asenkron generatör rotor ataleti	: 10kgm^2

EK.B

RÜZGAR TÜRBİNİ KANAT EĞİM AÇISI DENETİMİ DİZAYN EDİLEN ANFÇK'UN MATLAB PROGRAMINDA KURAL TABANI YAZILIMI

```
[System]
Name='hibrid rgust'
Type='sugeno'
Version=2.0
NumInputs=3
NumOutputs=1
NumRules=64
AndMethod='prod'
OrMethod='probor'
ImpMethod='prod'
AggMethod='sum'
DefuzzMethod='wtaver'

[Input1]
Name='e(t)'
Range=[-8.557806449 -7.00027e-010]
NumMFs=4
MF1='ÇBN':'trimf',[-11.4104085984333 -8.557806449 -5.70520429956668]
MF2='BN':'trimf',[-8.557806449 -5.70520429956668 -2.85260215013335]
MF3='ON':'trimf',[-5.70520429956668 -2.85260215013335 -
7.00027147360061e-010]
MF4='N':'trimf',[-2.85260215013335 -7.00027e-010 2.8526021487333]

[Input2]
Name='de(t)/dt'
Range=[-210.0512821 56.88888889]
NumMFs=4
MF1='BN':'trimf',[-299.031339096667 -210.0512821 -121.071225103333]
MF2='ON':'trimf',[-210.0512821 -121.071225103333 -32.0911681066667]
MF3='OP':'trimf',[-120.36490235201 -31.3848453553439
57.5952116413228]
MF4='BP':'trimf',[-32.0911681066667 56.88888889 145.868945886667]

[Input3]
Name='P-olculen'
Range=[0 1.006957137]
NumMFs=4
MF1='P':'trimf',[-0.335652379 0 0.335652379]
MF2='OP':'trimf',[0 0.335652379 0.671304758]
MF3='BP':'trimf',[0.335652379 0.671304758 1.006957137]
MF4='ÇBP':'trimf',[0.671304758 1.006957137 1.342609516]

[Output1]
Name='u(t)'
Range=[-42.78903225 -3.50013e-009]
NumMFs=64
MF1='cikis1':'constant',[0]
MF2='cikis2':'constant',[0]
MF3='cikis3':'constant',[-51.2396956325981]
MF4='cikis4':'constant',[-19.7336788391695]
MF5='cikis5':'constant',[0]
MF6='cikis6':'constant',[-42.7960039999927]
MF7='cikis7':'constant',[-42.7888651318443]
MF8='cikis8':'constant',[-42.78892664002]
```

```
MF9='cikis9':'constant',[0]
MF10='cikis10':'constant',[-42.778439782798]
MF11='cikis11':'constant',[-42.7890303405949]
MF12='cikis12':'constant',[-42.789039886405]
MF13='cikis13':'constant',[0]
MF14='cikis14':'constant',[0]
MF15='cikis15':'constant',[-42.7890115516934]
MF16='cikis16':'constant',[-42.7890275695556]
MF17='cikis17':'constant',[0]
MF18='cikis18':'constant',[-28.5243092967554]
MF19='cikis19':'constant',[-28.5316753055118]
MF20='cikis20':'constant',[-28.5564240329052]
MF21='cikis21':'constant',[0]
MF22='cikis22':'constant',[-28.5222554716186]
MF23='cikis23':'constant',[-28.5264721269179]
MF24='cikis24':'constant',[-28.5263206888261]
MF25='cikis25':'constant',[0]
MF26='cikis26':'constant',[-28.5372100184845]
MF27='cikis27':'constant',[-28.5260784655677]
MF28='cikis28':'constant',[-28.5259628047491]
MF29='cikis29':'constant',[0]
MF30='cikis30':'constant',[0]
MF31='cikis31':'constant',[-28.5261205146398]
MF32='cikis32':'constant',[-28.5260438823752]
MF33='cikis33':'constant',[-12.6944547574564]
MF34='cikis34':'constant',[-14.2666212260967]
MF35='cikis35':'constant',[-14.2577714051717]
MF36='cikis36':'constant',[-14.2078402047297]
MF37='cikis37':'constant',[-1.41139679769571]
MF38='cikis38':'constant',[-14.2632900456124]
MF39='cikis39':'constant',[-14.2636031144829]
MF40='cikis40':'constant',[-14.2605711107836]
MF41='cikis41':'constant',[0]
MF42='cikis42':'constant',[-13.662499940993]
MF43='cikis43':'constant',[-14.2636163971479]
MF44='cikis44':'constant',[-14.2552248057623]
MF45='cikis45':'constant',[0]
MF46='cikis46':'constant',[0]
MF47='cikis47':'constant',[0]
MF48='cikis48':'constant',[0]
MF49='cikis49':'constant',[0.529990966827344]
MF50='cikis50':'constant',[-0.000383723919312517]
MF51='cikis51':'constant',[0.00581486985723683]
MF52='cikis52':'constant',[0.00584027115423324]
MF53='cikis53':'constant',[-5.82888129331044]
MF54='cikis54':'constant',[-0.00170479139568276]
MF55='cikis55':'constant',[-0.0245787503162293]
MF56='cikis56':'constant',[-0.1015399206559]
MF57='cikis57':'constant',[-4.15301822602254e-009]
MF58='cikis58':'constant',[0]
MF59='cikis59':'constant',[0]
MF60='cikis60':'constant',[0]
MF61='cikis61':'constant',[-2.34272823093414e-009]
MF62='cikis62':'constant',[0]
MF63='cikis63':'constant',[0]
MF64='cikis64':'constant',[0]

[Rules]
1 1 1, 1 (1) : 1
1 1 2, 2 (1) : 1
1 1 3, 3 (1) : 1
```

```
1 1 4, 4 (1) : 1
1 2 1, 5 (1) : 1
1 2 2, 6 (1) : 1
1 2 3, 7 (1) : 1
1 2 4, 8 (1) : 1
1 3 1, 9 (1) : 1
1 3 2, 10 (1) : 1
1 3 3, 11 (1) : 1
1 3 4, 12 (1) : 1
1 4 1, 13 (1) : 1
1 4 2, 14 (1) : 1
1 4 3, 15 (1) : 1
1 4 4, 16 (1) : 1
2 1 1, 17 (1) : 1
2 1 2, 18 (1) : 1
2 1 3, 19 (1) : 1
2 1 4, 20 (1) : 1
2 2 1, 21 (1) : 1
2 2 2, 22 (1) : 1
2 2 3, 23 (1) : 1
2 2 4, 24 (1) : 1
2 3 1, 25 (1) : 1
2 3 2, 26 (1) : 1
2 3 3, 27 (1) : 1
2 3 4, 28 (1) : 1
2 4 1, 29 (1) : 1
2 4 2, 30 (1) : 1
2 4 3, 31 (1) : 1
2 4 4, 32 (1) : 1
3 1 1, 33 (1) : 1
3 1 2, 34 (1) : 1
3 1 3, 35 (1) : 1
3 1 4, 36 (1) : 1
3 2 1, 37 (1) : 1
3 2 2, 38 (1) : 1
3 2 3, 39 (1) : 1
3 2 4, 40 (1) : 1
3 3 1, 41 (1) : 1
3 3 2, 42 (1) : 1
3 3 3, 43 (1) : 1
3 3 4, 44 (1) : 1
3 4 1, 45 (1) : 1
3 4 2, 46 (1) : 1
3 4 3, 47 (1) : 1
3 4 4, 48 (1) : 1
4 1 1, 49 (1) : 1
4 1 2, 50 (1) : 1
4 1 3, 51 (1) : 1
4 1 4, 52 (1) : 1
4 2 1, 53 (1) : 1
4 2 2, 54 (1) : 1
4 2 3, 55 (1) : 1
4 2 4, 56 (1) : 1
4 3 1, 57 (1) : 1
4 3 2, 58 (1) : 1
4 3 3, 59 (1) : 1
4 3 4, 60 (1) : 1
4 4 1, 61 (1) : 1
4 4 2, 62 (1) : 1
4 4 3, 63 (1) : 1
4 4 4, 64 (1) : 1
```

EK.C

GAZ TÜRBİNİ HIZ DENETİMİ İÇİN DİZAYN EDİLEN ANFÇK'UN MATLAB PROGRAMINDA KURAL TABANI YAZILIMI

```
[System]
Name='gazturbini'
Type='sugeno'
Version=2.0
NumInputs=2
NumOutputs=1
NumRules=25
AndMethod='prod'
OrMethod='probor'
ImpMethod='prod'
AggMethod='sum'
DefuzzMethod='wtaver'

[Input1]
Name='e(t)'
Range=[0.036491803970773 0.132456337918879]
NumMFs=5
MF1='KP':'trimf',[0.0125006704837465 0.0299496233377014
0.0516575282164154]
MF2='P':'trimf',[0.0323302926449172 0.0524309790718466
0.0843600699422985]
MF3='OP':'trimf',[0.0588240112172724 0.0840484137217581
0.10830547534445]
MF4='BP':'trimf',[0.0843732801333328 0.108408510357391
0.132454326925745]
MF5='ÇBP':'trimf',[0.108521011031826 0.132458398049073
0.156447471405906]

[Input2]
Name='de(t)'
Range=[-0.278734874012929 0.727272727272727]
NumMFs=5
MF1='N':'trimf',[-0.530236774334343 -0.278733206525988 -
0.0271907659324548]
MF2='AN':'trimf',[-0.278736541379965 -0.0271565756486923
0.224282161817953]
MF3='P':'trimf',[-0.0269636207944195 0.224137176560872
0.475563589895782]
MF4='OP':'trimf',[0.224137875465206 0.475543477297413
0.727293546085924]
MF5='BP':'trimf',[0.475366914889368 0.727251914291355
0.97877462759414]

[Output1]
Name='u(t)'
Range=[0.095594925059365 8.67000000000001]
NumMFs=25
MF1='cikismf1':'constant',[0.874025282923104]
MF2='cikismf2':'constant',[0.216694260803359]
MF3='cikismf3':'constant',[0.498864416332029]
MF4='cikismf4':'constant',[12.9225047834173]
MF5='cikismf5':'constant',[5.12755606326505]
```

```
MF6='cikismf6':'constant',[0.197006725068369]
MF7='cikismf7':'constant',[0.261606016058901]
MF8='cikismf8':'constant',[3.75094048717321]
MF9='cikis1mf9':'constant',[1.35171636456115]
MF10='cikismf10':'constant',[2.41593842994141]
MF11='cikismf11':'constant',[0.366118966386967]
MF12='cikismf12':'constant',[-0.502500584019832]
MF13='cikismf13':'constant',[0.991394202184158]
MF14='cikismf14':'constant',[1.62350358888455]
MF15='cikismf15':'constant',[1.75013020136941]
MF16='cikismf16':'constant',[0.56382893219852]
MF17='cikismf17':'constant',[0.899301318060481]
MF18='cikismf18':'constant',[1.44653335644758]
MF19='cikismf19':'constant',[1.93208070403604]
MF20='cikismf20':'constant',[1.52105937986469]
MF21='cikismf21':'constant',[0.888078339049681]
MF22='cikismf22':'constant',[1.23661457790742]
MF23='cikismf23':'constant',[1.68083386762326]
MF24='cikismf24':'constant',[1.61003846604748]
MF25='cikismf25':'constant',[0]

[Rules]
1 1, 1 (1) : 1
1 2, 2 (1) : 1
1 3, 3 (1) : 1
1 4, 4 (1) : 1
1 5, 5 (1) : 1
2 1, 6 (1) : 1
2 2, 7 (1) : 1
2 3, 8 (1) : 1
2 4, 9 (1) : 1
2 5, 10 (1) : 1
3 1, 11 (1) : 1
3 2, 12 (1) : 1
3 3, 13 (1) : 1
3 4, 14 (1) : 1
3 5, 15 (1) : 1
4 1, 16 (1) : 1
4 2, 17 (1) : 1
4 3, 18 (1) : 1
4 4, 19 (1) : 1
4 5, 20 (1) : 1
5 1, 21 (1) : 1
5 2, 22 (1) : 1
5 3, 23 (1) : 1
5 4, 24 (1) : 1
5 5, 25 (1) : 1
```

ÖZGEÇMİŞ

Yüksel OĞUZ 28.11.1971 yılında Afyon'un Emirdağ ilçesinde doğdu. İlk ve orta öğrenimini Emirdağ'da tamamladı. 1993 yılında Marmara Üniversitesi Teknik Eğitim Fakültesi Elektrik Eğitimi Bölümüne dikey geçiş yaptı. 1996 yılında Marmara Üniversitesi Teknik Eğitim Fakültesi Elektrik Eğitimi Bölümünden birincilikle mezun oldu. 1996 yılında Marmara Üniversitesi Fen Bilimleri Enstitüsü Elektrik Eğitimi Ana Bilim Dalında açılan Yüksek Lisans sınavını kazanarak lisans üstü eğitimine başladı. Aynı yıl içersinde Milli Eğitim Bakanlığına bağlı Bitlis'in Adilcevaz ilçesinde bulunan çok programlı lisede 8 ay elektrik öğretmenliği yaptı. 1997 yılında Marmara Üniversitesi Fen Bilimleri Enstitüsü Elektrik Eğitimi Ana Bilim Dalında araştırma görevlisi olarak göreve başladı. 1999 yılında Marmara Üniversitesi Fen Bilimleri Enstitüsü Elektrik Eğitimi Ana Bilim Dalından Marmara Üniversitesi Teknik Eğitim Fakültesi Elektrik Eğitimi Enerji Tesisleri Ana Bilim Dalına araştırma görevlisi olarak atandı. Enerji Tesisleri, Elektrik makinaları, yenilenebilir enerji kaynakları ve otomatik kontrol sistemleri ile ilgili yayımlanmış ulusal ve uluslararası 21 adet bildirisi bulunmaktadır. 2000 yılında yüksek lisans eğitimini tamamladı. Şubat 2003'de M.Ü Fen Bilimleri Enstitüsü Elektrik Eğitimi Ana Bilim Dalında doktora eğitimine başladı. Halen Enerji Tesisleri Ana Bilim Dalında Araştırma Görevlisi olarak çalışmaktadır.

İstanbul , 23.01.2007