T.C.
MARMARA ÜNİVERSİTESİ
FEN BİLİMLERİ ENSTİTÜSÜ

YÜKTE KADEME DEĞİŞTİRİCİLERİN İNCELENMESİ VE TRANSFORMATÖRLER ÜZERİNDEKİ ETKİLERİ

Ragıp TÜRKAN
(141101220060219)

YÜKSEK LİSANS TEZİ
ELEKTRİK EĞİTİMİ ANABİLİM DALI
ELEKTRİK EĞİTİMİ PROGRAMI

DANIŞMAN
Yrd. Doç. Dr. Adnan KAKİLLİ

İSTANBUL 2009

ÖNSÖZ (TEŞEKKÜR)

Ülkemizin teknoloji alanında gelişmesinde bilimsel alanlarda yapılan çalışmalar büyük önem arzetmektedir. Üniversitelerimizin akademik personelinin sürekli eğitimini verdikleri konularda eksik gördükleri alanlar üzerinde öğrencileri araştırma ve çalışma yapmalarını sağlayarak mevcut bilim seviyesini daha ileriye götürerek, uluslararası teknolojide ülkemizi iyi bir noktaya getirmeyi beraber başarmaktır.

Bu çalışmada elektrik sebekelerinin en önemli unsurlarından olan transformatörlerde kullanılan yükte kademe değiştiricilerinin incelenmesi hedeflenmiştir. Konu ile ilgili literatür taraması yapıldıktan sonra yükte kademe değiştiricilerin dizayn kavramları, çalışma prensibi ve tipleri açıklanmıştır. Ayrıca transformatörde kademe şalterinin belirlenmesindeki ana konular belirtilmiştir.

Üretimi yapılmış transformatörler üzerinde yapılan yıldırım darbe dağılımı ölçümleri ile transformatör dizaynının kademe şalteri üzerindeki etkileri ortaya konmuştur. Olumsuzlukların giderilmesi için çözümler sunulmuştur.

"Yükte Kademe Değiştiricilerin İncelenmesi ve Transformatörler üzerindeki Etkileri" konusundaki tez çalışmamı özveri ve anlayışla yürüten çok değerli hocam Sayın Yrd.Doç.Dr. Adnan KAKİLLİ'ye, çalışma saatlerimi ayarlamamda gösterdikleri özveri için AREVA T&D Enerji Endüstrisi Test Laboratuvarından mesai arkadaşlarım Sayın Mustafa ÜNAL ve Barlas DİKMEN'e ve transformatörler üzerinde yaptığım ölçümlerde yardımcı olan arkadaşlarım Elektrik Teknisyenleri Sayın İrfan Aksoy'a, Nuray Kayrak'a , Gürsel Çağlar'a, Osman Uzuner'e ve Ersen Çavdar'a ilgilerinden dolayı teşekkür ederim.

Yaptığım çalışmanın literatüre ve araştırma yapacak diğer kişilere katkı sağlamasını dilerim.

Temmuz, 2009 **Ragıp TÜRKAN**

İÇİNDEKİLER

SAYFA

ÖNSÖZ ..... **i**

İÇİNDEKİLER ..... **ii**

ÖZET ..... **v**

ABSTRACT ..... **vi**

SEMBOLLER ..... **vii**

KISALTMALAR ..... **viii**

ŞEKİLLER ..... **ix**

TABLOLAR ..... **xii**

BÖLÜM I.GİRİŞ **1**

BÖLÜM II. YÜKTE KADEME DEĞİŞTİRİCİLERİN TASARIM KAVRAMLARI **4**

II.1 YÜKSEK HIZLI DİRENÇ TİPİ YÜKTE KADEME DEĞİŞTİRİCİ **7**

II.1.1 Anahtarlama Sırası **8**

II.1.2 Ana Ve Geçiş Kontaklarının Çalışma Oranı **13**

II.1.2.1. Bayrak Peryodu Çalışması (Aktarma Anahtarlı) **13**

II.1.2.2. Bayrak Peryotlu Çalışma (Seçici Anahtarlı) **19**

II.1.2.3. Simetrik Flama Peryotlu Çalışma (Aktarma Anahtarlı) **22**

II.1.2.4. Asimetrik Flama Peryotlu Çalışma (Seçici Anahtarlı) **27**

II.1.2.5. Çoklu Direnç Peryotlu İşlem (Aktarma Anahtarlı) **29**

II.2 REAKTÖR TİPİ YÜKTE KADEME DEĞİŞTİRİCİ **37**

II.2.1 Anahtarlama Sırası **39**

II.2.1.1. Ark Kontaklı ve Kademe Seçicili Yükte Kademe Değiştiriciler **40**

II.2.1.2. Arklı Kademe Anahtarlı Yükte Kademe Değiştirici **42**

II.2.1.3. Vakum Kesicili Yükte Kademe Değiştirici **43**

II.2.2 Anahtarlama Kontaklarında Çalışma Oranı **44**
II.2.2.1. Ark Anahtarlı ve Kademe Seçicili Yükte Kademe Değiştiriciler **48**
II.2.2.2. Arklı Kademe Anahtarlı Yükte Kademe Değiştiriciler ... **52**
II.2.2.3. Vakum Kesicili Yükte Kademe Değiştiriciler **53**
II.3 KADEME ŞEÇİCİ 56
II.3.1 Kazan-içi Tip Yükte Kademe Değiştiricilerde Kademe Seçiciler **57**
II.3.2 Kompartıman Tip Yükte Kademe Değiştiricilerde Kademe Seçiciler **60**
II.4 YÜKTE KADEME DEĞİŞTİRİCİLİ TRANSFORMATÖRLERDE AYAR DEVRELERİ 62
II.4.1 Nötr Uçta Gerilim Ayarı İçin Devreler **69**
II.4.2 Üçgen Bağlı Sargılarda Gerilim Ayarı İçin Devreler **70**
II.4.3 Yardımcı Transformatör ile Gerilim Ayarı İçin Devreler (Yükseltici/Alçaltıcı) **74**
II.4.4 Ototransformatörlerde Gerilim Ayarı İçin Devreler **77**
II.5 YKD'NİN BELİRLENMESİ VE İŞLETME ŞARTLARINDA BAKIMI VE KORUNMASI 85
II.5.1 YKD Belirlenirken Dikkat Edilen Teknik Özellikler **85**
II.5.2 YKD'lerde Arıza Tespiti **89**
II.5.3 YKD'lerde Genel Bakım **91**
II.5.4 YKD'ler için Koruyucu Cihazlar **93**
BÖLÜM III. YILDIRIM DARBE TESTLERİNDE YÜKTE KADEME DEĞİŞTİRİCİLERDE OLUŞAN ELEKTRİKSEL ZORLANMALAR 95
III.1 ORTA GÜÇLÜ TRANSFORMATÖRLERDE ELEKTRİKSEL ZORLANMALAR 98
III.2 BÜYÜK GÜÇLÜ TRANSFORMATÖRLERDE ELEKTRİKSEL ZORLANMALAR 102
III.3 OTOTRANSFORMATÖRLERDE ELEKTRİKSEL ZORLANMALAR 111
BÖLÜM IV. SONUÇLAR ve TARTIŞMA 120
BÖLÜM V. SON DEĞERLENDİRME VE ÖNERİLER 125

KAYNAKLAR..... 127
EKLER..... 129
ÖZGEÇMİŞ..... 182

ÖZET

YÜKTE KADEME DEĞİŞTİRİCİLERİN (YKD) İNCELENMESİ VE TRANSFORMATÖRLER ÜZERİNDEKİ ETKİLERİ

Bu çalışmada elektrik şebekelerinin vazgeçilmez unsurlarından birisi olan transformatörlerin ana parçalarından YKD incelenmiştir. Günümüzde elektrik şebekelerinde gerilimin değişik yük koşullarında belirli değer aralığında tutulması son derece önemlidir. Sistem gerilimini istenen değerler arasında ayarlamak için, YKD spir oranlarının değiştirilmesi işlemini yapabilmemizi ve sistemin enerjisini kesmeden arzu edilen gerilime ulaşılabilmemizi sağlamaktadır. Bu özelliğinden dolayı YKD gerekliliği daha çok hissedilmekte ve transformatörlerde kullanma oranı her geçen yıl daha da artmaktadır.

YKD'ler *Direnç Tipi* ve *Reaktör Tipi* olmak üzere ikiye ayrılmaktadır. Reaktör tipi ABD orijinlidir ve 1900'lü yılların başında bulunmuştur. Reaktör tip YKD yüksek adım gerilimlerinde kullanılamaz ama yüksek akımda ve kademe spirinin az olduğu uygulamalarda avantajlıdır. Kullanımı fazla yaygın değildir. Ülkemiz ve diğer birçok ülkede Dr.JANSEN tarafından 1926 yılında bulunan direnç tipi YKD çok yüksek oranda kullanılmaktadır. Direnç tipinde kademe değiştirme işlemi hızlı bir şekilde ve geçiş dirençleri üzerinden yapılmaktadır.

Değişik gerilimlere olan ihtiyaç arttığı sürece YKD'lerin önemi daha da artacaktır. Daha çok generatör, şebeke ve endüstri tipi transformatörlerinde kullanılan YKD'ler geliştirilmiş halleriyle daha hassas gerilim ayarına ve daha güvenli çalışmaya olanak sağlamaktadır. Kademe değiştirme işlemi esnasında tüm anahtarlama işlemlerinde olduğu gibi aşırı akım ve gerilimler oluşmaktadır. Bu aşırı akım ve gerilimler şebekeyi güvenli kılmak için transformatöre zarar vermeyecek şekilde olmalıdır. Bu nedenle tasarım aşamasında kademe değiştirici elektriksel gereksinimleri karşılayacak şekilde belirlenmelidir.

YKD imalatçıları sürekli olarak ürünlerini geliştirmektedirler. Bu alandaki oluşan yenilikler genellikle kullanılan malzeme, güvenilirlik ve anahtarlama cihazlarındaki değişiklikler ile ilgilidir .

Anahtar kelimeler : YKD, transformatör, kademe şeçici, aktarma anahtarı, taşıma akımı, adım gerilimi, kesme kapasitesi.

Temmuz , 2009 **Ragıp TÜRKAN**

ABSTRACT

ANALYSIS OF ON-LOAD TAP CHANGERS AND THEIR EFFECTS ON THE TRANSFORMERS

In this study, OLTC (on-load tap changer) of transformer is investigated and transformers are one of the most important equipment of the electrical networks. Today to regulate the voltage of the network is very important at different load conditions. In order to keep the network voltages between certain values, OLTC's are strictly necessary. With the operation of OLTC's the number of turns of the transformers are changed without any de-energisation and the desired voltage level is adjusted. This advantage directs us to understand the necessity and day by day the use of OLTC's is increasing.

There are two types of OLTC's, *Resistor Type* and *Reactor Type*. Reactor type was invented in U.S.A. at the beginning of 1900's. Reactor type is not suitable at high step voltage applications but it has advantage at high current applications where the step voltages are low. Today it is not very common. In many countries resistor type is widely used which was invented by Dr.JANSEN in 1926. At resistor type the operation is completed very fast and during the tap changing operation transition resistors are used.

As the need of different voltages increases, the importance of OLTC's will increase in future. Generally OLTC's are used at generator, network and industry transformers and with the innovations they are more reliable and it is possible to make more sensitive regulation. During the tap changing operations over voltages and high currents are occures as the other switching operations. These stresses must not damage instruments at the network so the determined OLTC's must cover the electrical needs.

OLTC manufacturers are continuously improving themselves. The main innovations at this area are mainly at the material, reliability and at the switching devices.

Key words : OLTC, transformer, tap selector, diverter switch, rated through current, step voltage, breaking capacity.

July , 2009 **Ragıp TÜRKAN**

SEMBOLLER

$\mathbf{M_{A,\,B}}$	: Yağlı tip YKD'de A ve B tarafı ana kontakları
$\mathbf{MS_{A,\,B}}$	: Yağlı tip YKD'de A ve B tarafı ana anahtarlama kontakları
$\mathbf{T_{A,\,B}}$	: Yağlı tip YKD'de A ve B tarafı geçiş kontakları
$\mathbf{U_S}$	: Kademe değiştirici adım gerilimi
$\mathbf{I_L}$	: Kademe değiştirici yük akımı
$\mathbf{I_C}$	: Kademe değiştiricideki dolaşım akımı
$\mathbf{U_{rMSA}}$	: Toparlanma gerilimi
$\mathbf{R_{A,B}}$	: Yağlı tip YKD'de A ve B tarafı geçiş dirençleri
$\mathbf{Cos\ \varphi}$	: Güç faktörü
$\mathbf{TFS_{A,B}}$	: Vakum tipi YKD'de ark anahtarı
$\mathbf{ATS_{A,B}}$	: Vakum tipi YKD'de arklı kademe anahtarı
$\mathbf{BYC_{A,B}}$	: Vakum tipi YKD'de By-Pass kontakları
VI	: Vakum kesici
$\mathbf{U_{rVI}}$	: Vakum kesici toparlanma gerilimi
$\mathbf{I_{VI}}$	: Vakum kesici dolaşım akımı
$\mathbf{U_1}$	: Transformatör primer gerilimi
$\mathbf{U_2}$	: Transformatör sekonder gerilimi
$\mathbf{I_{MAKS}}$	: Maksimum akım
$\mathbf{U_{TV}}$	: İnce ayar sargısı gerilimi
$\mathbf{U_{CV}}$	: Kaba ayar sargısı gerilimi
$\mathbf{S_N}$	: Transformatör 3 faz gücü
m	: Ayar sargısı üzerindeki adım sayısı
$\mathbf{U_m}$	: Maksimum sistem gerilimi
$\mathbf{U_k}$	: Transformatör empedansı
$\mathbf{U_{res}}$	: İki fazın salınımda olan ayar sargısı uçları arasındaki gerilim
w	: Spir sayısı
K	: Kelvin olarak sıcaklık
A , kA	: Amper ve kiloamper olarak akım birimi
V , kV	: Volt ve kilovolt olarak gerilim birimi
MVA	: Mega Volt Amper olarak güç birimi

KISALTMALAR

YKD	: Yükte Kademe Değiştirici
OLTC	: On Load Tap Changer
IEC	: International Electrotechnical Commission
IEEE	: The Institute of Electrical and Electronics Engineers
IEC 60214-1	: Tap Changers Performance Requirements and Test Methods
IEC 60214-2	: Tap Changers Application Guide
IEC 60076-1	: Power Transformers – Part 1: General
IEC 60076-3	: Power Transformers – Part 3: Insulation Levels and Dielectric Tests
IEC 60076-7	: Power Transformers – Part 7: Loading Guide for Oil Immersed Power Transformers
IEEE C57.131	: IEEE Standard Requirements For Load Tap Changers
FRP	: Epoksi Reçine ile Güçlendirilmiş Fiberglas (Glassfibre Reinforced Epoxy Resin)
BIL	: Yıldırım Darbe Gerilimi Seviyesi (Basic Insulation Level)
HVDC	: Yüksek Gerilim Doğrultucu (High Voltage DC)
VFTO	: Çok Hızlı Geçici Ani Aşırı Gerilim (Very Fast Transient Overvoltage)
GIS	: Gaz İzoleli Şalt (Gas Insulated Switchgear)
MHz	: Megahertz
RMS	: Etkin Değer (Root Means Square)
FRA	: Frekans Cevabı Analizi (Frequency Response Analysis)
ZnO	: Çinko Oksit
SiC	: Silikon-Karbit
SI	: Anahtarlamalı Darbe (Switching Impulse)
LI	: Yıldırım Darbe (Lightning Impulse)
ACLD	: AC Uzun Süreli Endüklenen Gerilim (AC Long Duration)
ACSD	: AC Kısa Süreli Endüklenen Gerilim (AC Short Duration)

ŞEKİLLER

SAYFA NO

Şekil II.1 Yıldız Bağlı Basit Tip Kademe Değiştirici. **5**

Şekil II.2 Kademe Değiştirici Dizaynlarının Prensip Şemaları..... **6**

Şekil II.3a Şeçici Anahtarlı Tip Kademe Değiştirici Prensip Şeması..... **7**

Şekil II.3b Kademe Seçicili ve Aktarma Anahtarlı Tip Kademe Değiştirici Prensip Şeması..... **7**

Şekil II.4a Aktarma Anahtarlı Sistemdeki Kontak Düzenlemsinin Prensip Şeması..... **9**

Şekil II.4b Simetrik Bayrak Peryotlu Çalışmanın Anahtarlama Esnasındaki Osilogramları..... **9**

Şekil II.5 Aktarma Anahtarlı ve Kademe Seçicili Tip Kademe Değiştiricinin Prensip Anahtarlama Sırasıdır. **10**

Şekil II.6 Seçici Anahtarlı Tip Kademe Değiştiricinin Prensip Anahtarlama Sırasıdır..... **13**

Şekil II.7 Geçiş Kontaklarındaki Akımların Fazör Diyagramları. **16**

Şekil II.8 Bayrak Peryodu Çıkış Geriliminin Lokus Eğrisi..... **17**

Şekil II.9 Simetrik Flama Peryotlu Çalışma Çıkış Geriliminin Lokus Eğrisi **24**

Şekil II.10 Asimetrik Flama Peryotlu Çalışma Çıkış Geriliminin Lokus Eğrisi.. **24**

Şekil II.11 Bayrak-Flama Peryotlu Çalışma Çıkış Geriliminin Lokus Eğrisi..... **35**

Şekil II.12 Ark Anahtarı ve Kademe Seçicisi Olan Reaktans Tipi Yükte Kademe Değiştiricisinin Prensip Şemasıdır. (Köprü Olduğu ve Köprü Olmadığı Durumlar)..... **38**

Şekil II.13 Vakum Kesicisi, By-Pass Anahtarı ve Kademe Seçicisi Olan Reaktans Tipi Yükte Kademe Değiştiricisinin Prensip Şemasıdır. (Köprü Olduğu ve Olmadığı Durumlar) **39**

Şekil II.14 Ark Anahtarlı ve Kademe Seçicisi olan Reaktans Tipi Yükte Kademe Değiştiricinin Prensip Anahtarlama Sırası **41**

Şekil II.15 Arklı Kademe Anahtarlı Reaktans Tipi Yükte Kademe Değiştiricinin Prensip Anahtarlama Sırası **42**

Şekil II.16 Vakum Kesicili ve Kademe Seçicili Reaktans Tipi Yükte Kademe Değiştiricinin Prensip Anahtarlama Sırası **43**

Şekil II.17 Anahtarlama Kontaklarındaki Akımların Fazör Diyagramları..... **45**
Şekil II.18 Köprüsüz Pozisyonda İken Koruyucu Ototransformatörde Akımların Bölünmesi **46**
Şekil II.19 Bir Tarafın Açtığı Esnada Koruyucu Ototransformatörde Akımların Bölünmesi **47**
Şekil II.20 Köprülü Pozisyonda İken Koruyucu Ototransformatörde Akımların Bölünmesi..... **47**
Şekil II.21 Çıkış gerilimi U'nun gösterimi..... **51**
Şekil II.22 Kazan-içi Tip Kademe Değiştiricide Seçici Anahtarın Basitleştirilmiş Diyagramı **59**
Şekil II.23 Kazan-içi Tip Kademe Değiştiricide Kademe Seçicisinin Basitleştirilmiş Diyagramı..... **60**
Şekil II.24 Kompartıman Tip Kademe Değiştiricide Seçici Anahtarın Basitleştirilmiş Diyagramı..... **61**
Şekil II.25 Kompartıman Tip Reaktörlü Kademe Değiştiricinin Basitleştirilmiş Diyagramı **62**
Şekil II.26 Kademe Sargıları İçin Temel Düzenlemelerin Tek Faz Gösterimi **63**
Şekil II.27 19 Kademesi Olan Kademe Değiştiricide Ters Dönen Seçicili ve Kaba/İnce Ayar Sargı Seçicili Durumlardaki Devre Şemaları..... **65**
Şekil II.28 17 Kademesi Olan Kademe Değiştiricide Ters Dönen Seçicili ve Kaba/İnce Ayar Sargı Seçicili Durumlardaki Devre Şemaları..... **66**
Şekil II.29 W Spir Anlamında ve Lineer Gerilim Ayarı Durumundaki Tek Fazlı Şema **67**
Şekil II.30 Yıldız Bağlı Sargılarda Kademe Değiştiriciler..... **70**
Şekil II.31 Üçgen Bağlı Sargılarda Kademe Değiştiriciler **71**
Şekil II.32 Üçgen Bağlı Sargılarda Salınımdaki Ayar Sargılarının Dielektrik Testler Esnasındaki Durumu **72**
Şekil II.33 Yardımcı Devreye Sahip Gerilim Ayarında Tek Faz Şeması **74**
Şekil II.34 Ototransformatörlerde Gerilim Ayarının Oto Noktasında Yapılması Durumunda Olası Ayar Sargısı Düzenlemeleri..... **78**
Şekil II.35 Ototransformatörlerde Gerilim Ayarının Yüksek Gerilim Sargısı Sonunda Yapıldığı Durumda Olası Ayar Sargısı Düzenlemlemeleri. **81**
Şekil II.36 Ototransformatörlerde Gerilim Ayarı İçin Seri Transformatör Kullanıldığında Olası Ayar Sargısının Düzenlemlemeleri..... **84**

Şekil III.1 Yıldırım Darbe Gerilimi Eğri Şekli **96**
Şekil III.2 100 MVA Transformatörün Pozisyon 13 (Nominal Kademe) İçin Bağlantı Şekli **99**
Şekil III.3 100 MVA Transformatörün Endüklenen Gerilim Devre Şeması..... **101**
Şekil III.4 125 MVA Transformatörün YG Çıkışı Tarafından Görünüşü **103**
Şekil III.5 125 MVA Transformatörün Pozisyon 25 (Maksimum Kademe) İçin Bağlantı Şekli **104**
Şekil III.6 125 MVA Transformatörün Pozisyon 13 (Nominal Kademe) İçin Bağlantı Şekli **106**
Şekil III.7 125 MVA Transformatörün Pozisyon 1 (Minimum Kademe) İçin Bağlantı Şekli **108**
Şekil III.8 125 MVA Transformatörün Endüklenen Gerilim Devre Şeması..... **110**
Şekil III.9 250 MVA Ototransformatörün Pozisyon 16 (Maksimum Kademe) İçin Bağlantı Şekli **113**
Şekil III.10 250 MVA Ototransformatörün Pozisyon 8 (Nominal Kademe) İçin Bağlantı Şekli **116**
Şekil III.11 250 MVA Transformatörün Endüklenen Gerilim Devre Şeması**..... 119**

TABLOLAR

SAYFA NO

Tablo II.1 Aktarma Anahtarlı ve Bayrak Peryotlu Çalışmanın Kontak Çalışma Sıraları, Bağlantı ve Fazör Diyagramları..... **14**

Tablo II.2 Bazı Ard Arda Yapılacak Kademe Değiştirme İşlemlerinde Aktarma Anahtarı Kontaklarının İşlem Yapma Sırasını Göstermektedir (Bayrak Peryotlu)..... **18**

Tablo II.3 Aktarma Anahtarlı ve Bayrak Peryotlu Çalışmada Ana Anahtarlama Kontağının Çalışma Oranı **18**

Tablo II.4 Aktarma Anahtarlı ve Bayrak Peryotlu Çalışmada Geçiş Kontağının Çalışma Oranı..... **19**

Tablo II.5 Seçici Anahtarlı ve Bayrak Peryotlu Çalışmada Kontakların Çalışma Sırası, Bağlantı ve Fazör Diyagramları **20**

Tablo II.6 Bazı Ard Arda Yapılacak Kademe Değiştirme İşlemlerinde Seçici Anahtarın Kontaklarının İşlem Yapma Sırasını Göstermektedir (Bayrak Peryotlu) **21**

Tablo II.7 Seçici Anahtarlı ve Bayrak Peryotlu Çalışmada Ana Anahtarlama Kontağının Çalışma Durumu..... **21**

Tablo II.8 Seçici Anahtarlı ve Bayrak Peryotlu Çalışmada Geçiş Kontağının Çalışma Durumu..... **21**

Tablo II.9 Simetrik Flama Peryotlu ve Aktarma Anahtarlı Çalışmada Kontakların Çalışma Sırasının, Fazör ve Bağlantı Diyagramlarının Gösterimi..... **25**

Tablo II.10 Bazı Ard Arda Yapılacak Kademe Değiştirme İşlemlerinde Aktarma Anahtarı Kontaklarının İşlem Yapma Sırasını Göstermektedir. (Simetrik Flama Peryotlu) **26**

Tablo II.11 Simetrik Flama Peryotlu ve Aktarma Anahtarlı Çalışmada Ana Kontağın Çalışma Durumu..... **26**

Tablo II.12 Simetrik Flama Peryotlu ve Aktarma Anahtarlı Çalışmada Geçiş Kontağının Çalışma Durumu..... **26**

Tablo II.13 Asimetrik Flama Peryotlu Seçici Anahtarlı Çalışmada Kontakların Çalışma Sırasının, Fazör ve Bağlantı Diyagramlarının Gösterimi..... **28**

Tablo II.14 Bazı Ard Arda Yapılacak Kademe Değiştirme İşlemlerinde Seçici Anahtarın Kontaklarının İşlem Yapma Sırasını Göstermektedir. (Asimetrik Flama Peryotlu) **29**

Tablo II.15 Asimetrik Flama Peryotlu ve Seçici Anahtarlı Çalışmada Ana Kontağın Çalışma Durumu **29**

Tablo II.16 Asimetrik Flama Peryotlu Seçici Anahtarlı Çalışmada Geçiş Kontağının Çalışma Durumu **29**

Tablo II.17 Çoklu Direnç Peryotlu ve Aktarmalı Çalışmada Kontakların Çalışma Sırasının, Fazör ve Bağlantı Diyagramlarının Gösterimi **32**

Tablo II.18 Bazı Ard Arda Yapılacak Kademe Değiştirme İşlemlerinde Aktarma Anahtarı Kontaklarının İşlem Yapma Sırasını Göstermektedir. (Çoklu Direnç Bayrak-Flama Peryotlu) **36**

Tablo II.19 Çoklu Direnç Peryotlu ve Aktarma Anahtarlı Çalışmada Geçiş Kontağının Çalışma Durumu **36**

Tablo II.20 Çoklu Direnç Peryotlu ve Aktarma Anahtarlı Çalışmada Geçiş Kontağının Çalışma Durumu **37**

Tablo II.21 Ark Anahtarlı ve Kademe Seçicili Çalışmada Kontakların Çalışma Sırası, Fazör ve Bağlantı Diyagramları **50**

Tablo II.22 Ark Anahtarlı ve Kademe Seçicili Yükte Kademe Değiştiricide Bazı Ard Arda Yapılacak Kademe Değiştirme İşlemlerinde Kontaklarının (Aktarma Anahtarları) İşlem Yapma Sırasını Göstermektedir..... **52**

Tablo II.23 Ark Anahtarlı ve Kademe Seçicili Yükte Kademe Değiştirici Çalışmasında Aktarma Anahtarı Çalışma Oranı **52**

Tablo II.24 Vakum Kesicili Yükte Kademe Değiştiricilerde Kontakların Çalışma Sırası, Fazör ve Bağlantı Diyagramları **54**

Tablo II.25 Vakum Kesicili Yükte Kademe Değiştiricide Bazı Ard Arda Yapılacak Kademe Değiştirme İşlemlerinde Kontakların İşlem Yapma Sırasını Göstermektedir **56**

Tablo II.26 Vakum Kesicili Yükte Kademe Değiştirici Çalışmasında Kontakların Çalışma Oranı **56**

Tablo II.27 Değişken ve Sabit Endüksiyon Durumlarında Yükte Kademe Değiştiricilerin İlgili Verilerinin karşılaştırması **68**

Tablo III.1 100 MVA Transformatörün ve YKD'nin Teknik Verileri **98**

Tablo III.2 100 MVA Transformatör Üzerinde Pozisyon 13 İçin Yapılan Ölçümler **100**
Tablo III.3 125 MVA Transformatörün ve YKD'nin Teknik Verileri **102**
Tablo III.4 125 MVA Transformatör Üzerinde Pozisyon 25 İçin Yapılan Ölçümler **105**
Tablo III.5 125 MVA Transformatör Üzerinde Pozisyon 13 İçin Yapılan Ölçümler **107**
Tablo III.6 125 MVA Transformatör Üzerinde Pozisyon 1 İçin Yapılan Ölçümler **109**
Tablo III.7 250 MVA ototransformatörün ve YKD'nin teknik verileri **111**
Tablo III.8 250 MVA Ototransformatör Üzerinde Pozisyon 16 İçin YG Tarafından Yıldırım Darbe Uygulandığında Yapılan Ölçümler **114**
Tablo III.9 250 MVA Ototransformatör Üzerinde Pozisyon 16 İçin AG Tarafından Yıldırım Darbe Uygulandığında Yapılan Ölçümler **115**
Tablo III.10 250 MVA Ototransformatör Üzerinde Pozisyon 8 İçin YG Tarafından Yıldırım Darbe Uygulandığında Yapılan Ölçümler **117**
Tablo III.11 250 MVA ototransformatör üzerinde Pozisyon 8 İçin AG Tarafından Yıldırım Darbe Uygulandığında Yapılan Ölçümler **118**
Tablo IV.1 IEC 60076-3'teki Dielektrik Testlerin Uygulanma Şekilleri **121**

BÖLÜM I

GİRİŞ

Transformatörün en temel aksesuarlarının başında kademe değiştiricileri gelmektedir. Çalışma şekline göre yükte kademe değiştirici ve enerjisiz halde kademe değiştirici olarak ikiye ayrılmaktadır. Bu çalışmada yük altında iken gerilim ayarı yapmamızı sağlayan kademe değiştiricilerin çalışma şekilleri hakkında bilgi verilmiştir.

1900'lü yılların başlarında üretilmeye başlayan yükte kademe değiştiricileri çalışma şekli bakımından *Reaktör Tipi* ve *Direnç Tipi* olmak üzere iki gruba ayrılmaktadır. Günümüzde daha yaygın olan kullanım direnç tipidir. 1980'li yılların başlarından itibaren direnç tipi'nin bir çeşidi olan vakum tipi yükte kademe değiştiriciler de üretilmeye başlanmıştır. Vakum tipi YKD'lerde anahtarlama esnasındaki ortam vakumlu olduğu için ark oluşmamaktadır.

Üçüncü bir tip vardır ve o da *Elektronik Tip* olarak adlandırılmaktadır. Bu tip üzerinde çalışmalar devam etmektetir ve yüksek güçlerde yarıiletken malzemelerin kullanılmaya başlanması ile üzerindeki protatip çalışmaları başarılı bir şekilde yapılmıştır [11].

Yükte kademe değiştiricileri transformatör kazanındaki yerleştirilme yerine göre de iki tiptir. Bunlar *Kazan-İçi Tip* ve *Kompartıman Tip* yükte kademe değiştiriciler olarak adlandırılmaktadırlar.

Kademe değiştiriciler kademe seçme dizaynı bakımından da *Seçici Anahtarlı* ve *Kademe Seçicili ve Aktarma Anahtarlı* olmak üzere iki tiptedirler.

Bir kademe değiştirme işlemi bir çok mekaniki olayın ard arda gerçekleşmesi ile olabilmektedir. Bu olayların fazör diyagramları incelendiğinde *Bayrak Peryotlu* ve *Flama Peryotlu* olarak iki tip çalışma şekli vardır.

Transformatör üzerindeki spir sayılarının ayarlanmasında üç yöntem vardır. Bunlar *Lineer Gerilim Ayarı*, *Yön Değiştirmeli Gerilim Ayarı* ve *Kaba/İnce Ayar Sargılı Gerilim Ayarı* diye adlandırılmaktadır [1]. Bu ayar şekillerinin her birinin avantaj ve dezavantajları vardır. Yapılacak gerilim ayarı ihtiyacına göre bu üç

gerilim düzenleme şeklinden biri seçilir. Lineer gerilim ayarı yönteminin toplam içindeki payı % 20 kadardır, basit bir dizaynı vardır, gerilim ayar sahası küçüktür ve kayıpları azdır. Yön değiştirmeli gerilim ayarı yöntemi günümüzde en yaygın olandır ve toplam içindeki payı %70 gibidir. Bu yöntemde ayar sargısı pozitif ve negatif yönde devreye sokularak ayar yapılmaktadır. Yön değiştirme seçicisi olmak zorundadır. Bu üç tipten en az kullanılan yöntem %10 ile kaba/ince ayar sargı ile gerilim ayarıdır. Bu tip te de yön değiştirme seçicisi mevcut olup kaybı en düşük olan yöntemdir.

Yükte kademe değiştiricileri bulundukları transformatör sargısının bağlantı şekline göre yıldız, yada üçgen olarak bağlanmaktadırlar. Uygulamaların çok büyük bir bölümünde YKD'ler yıldız sargıların nötr ucuna bağlanır. Çok istenmese de üçgen sargılarda gerilim ayarı gerektiği durumlarda mecburen üçgen olarak bağlanır. Üçgen tercih edilmemesinin en büyük sebebi izolasyon seviyesinin otomatikman sargı izolasyon seviyesinde olması gerekliliğindendir. Nötr ucuna yerleştirildiğinde ise nötr izolasyon seviyesinde olması yeterli olmaktadır ve elektriksel zorlanmalarda bir avantaj olarak ortaya çıkmaktadır.

Bir uygulamada kullanılacak yükte kademe değiştirici belirlenirken öncelikle elektriksel açıdan ihtiyaçlar ve gereksinimler belirlenmeli ve yükte kademe değiştiricinin teknik özellikleri en az bu gereksinimleri karşılayacak seviyede olmalıdır. Bu özellikler izolasyon seviyesi, nominal akımı, aşırı yükleme akımı, kısa-devre akımı, kesme kapasitesi ve kademe pozisyon sayısıdır.

Transformatörlerde arıza oluşması istenmeyen bir durum olup oluştuğunda çok tehlikeli sonuçlar doğurabilmektedir. Toplam arızaların dağılımı incelendiğinde en büyük arıza kaynağı YKD'lerdir. YKD'lerin çalışması elektriki olduğu kadar mekanikidir de ve mekanik aksamda olabilecek aksaklıklar birer arıza sebebi olabilmektedir. Bu nedenle yükte kademe değiştiricilerde kullanılan malzemenin kalitesi cihazın güvenilirliğini ve emniyetini arttırmaktadır. Zaten YKD kaynaklı arızaların oranı incelendiğinde son yıllarda transformatör arızalanma seviyeleri 1990'lı yıllarda binde 4-5 iken, 2000'li yıllarda bu oran binde 1-2 seviyelerine düşmüştür.

Transformatörlerin devre dışı kalması hem elektrik üreticilerinin, hem de elektrik tüketicilerinin maddi zarar görmesine neden olmaktadır. Bu nedenle yükte kademe değiştiricilerinin ve transformatörlerinin bakımlarının düzenli ve iyi bir şekilde yapılmalıdır. İşletme esnasında yapılan kontrollerle takip altında

bulundurulmalıdır ki arıza büyümeden önlenebilsin. Bu amaçla yükte kademe değiştiricilerde koruma ve ölçme amaçlı cihazlar daha imalat aşamasında öngörülerek işletmede arızanın sayısının daha az ve daha hafif olmasını sağlayacaktır. Transformatörlerde *Wavelet Analizi* ile hata diagnostiği ve koruma işlemi son yıllarda uygulanmaya başlamıştır [2].

Yükte kademe değiştiricileri ile ilgili kitaplar, makaleler ve standartlar incelenerek, yükte kademe değiştiricilerin ortaya çıkış dönemi, kullanıldığı tipler ve tiplerin avantajları ve dezavantajlarını belirterek transformatör tasarımı ile olan ilişkisi ortaya konulmuştur.

Bu çalışmada imalat aşamasında transformatör üzerinde yapılacak darbe gerilimi dağılımı ölçümleri ile yükte kademe değiştiricileri üzerinde oluşan gerilimler tespit edilip, hem transformatör dizaynının hem de şeçilen ürünün izolasyon kontrolleri esnasınaki elektriki zorlanmalardaki yeterliliği daha imalat tamamlanmadan tespit edilebileceği ve eğer gerekiyorsa ekstra koruma tedbirleri ele alınması gerekliliği üzerine irdelemeler yapılmıştır.

BÖLÜM II

YÜKTE KADEME DEĞİŞTİRİCİLERİN TASARIM KAVRAMLARI

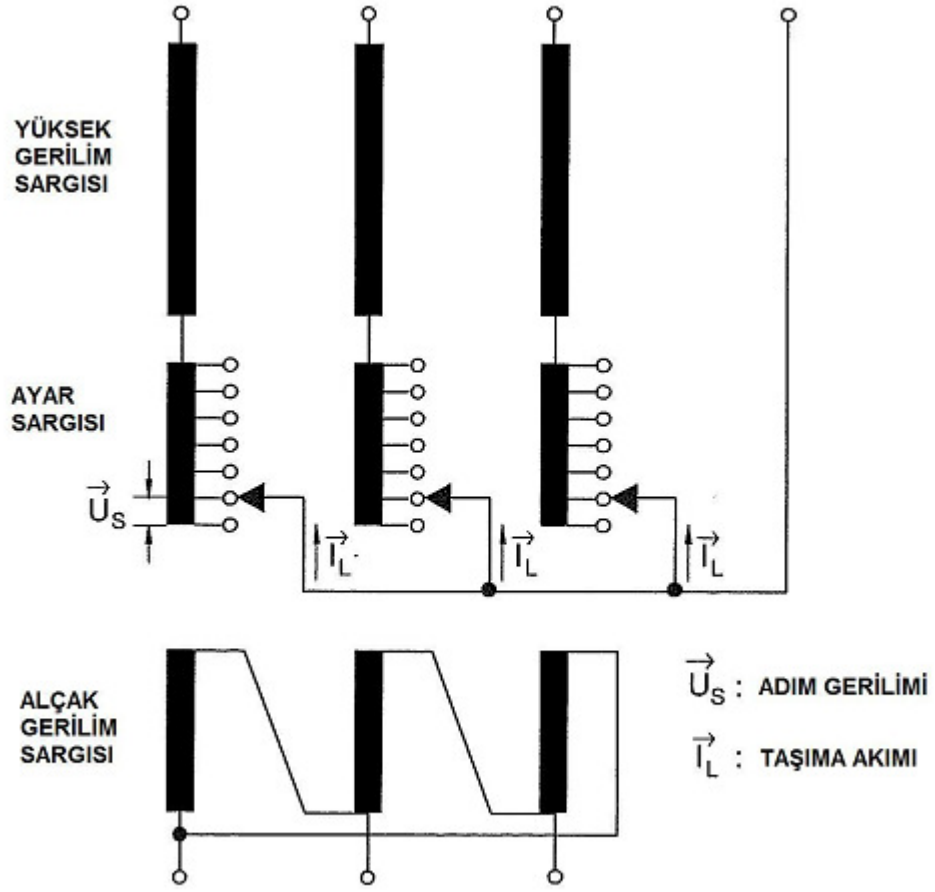
Transformatörlerde gerilimin değeri yükte kademe değiştiriciler (YKD) vasıtası ile devrede olan spir sayıları arttırılarak veya azaltılarak gerçekleştirilir. Bu nedenle transformatörlerde ayar sargıları mevcuttur ve bu sargıların uçları kademe değiştirici üzerine bağlanır. YKD'nin iki temel fonksiyonu vardır. Bunlardan birincisi açık-devre durumunda kademe değiştirme işlemini yapmak ve ikincisi ise enerji altında gücü ve akımı kesmeden değiştirme işlemini tamamlamak. Basit tip YKD'lerde seçici anahtar bu iki işlemi aynı anda yapmaktadırlar. Daha büyük güçlerde *kademe seçici* ve *aktarma anahtarı* olarak iki ayrı birimdir ve Şekil II.3'ün b şıkkında gösterilmiştir.

Değişik tip ayar sargısı konfigürasyonları kullanılabilir. YKD'lerde pozisyon seçimi fonksiyonu ya lineerdir ya da yön değiştirme seçicisi yoktur. Ya da yön değiştirme seçicisi mevcuttur ve ayar sargısı çift yönlü devreye alınır veya transformatörde kaba ayar ve ince ayar sargıları mevcut olduğu durumlarda da yön değiştirme seçicisi gerekmektedir. YKD'nin kademe seçicisinin mekanik konfigürasyonu tek yönlü veya çift yönlü olarak çok yönlü seçici olabilir. Şekil II.1'de yıldız bağlı basit tip kademe değiştirici verilmiştir [1].

Yük akımının transferi işlemi kademe değiştirme esnasında dirençli geçişle veya reaktörlü geçişle sağlanır. İşletmede pozisyon değiştirme anahtarına ihtiyaç duyulmaktadır ve bu anahtar akımı öyle bir toparlanma gerilimi ile kesmelidir ki bu gerilim iki kademe arasındaki gerilimi farkı ile aynı olmalıdır.

Güç transfer fonksiyonu simetrik veya asimetrik olabilir. Transformatörde olan güç akışı benzer anahtarlama durumlarında ileri veya geri durumda olabilir. Seçici anahtarın hareketi dönen veya osilasyon yapan bir hareket olabilir.

Tüm YKD dizaynlarında kademe şecici, yön-değiştirme seçicisi ve aktarma anahtarı arasındaki mekaniksel senkronizasyon sağlanmaktadır.



Şekil II.1 Yıldız Bağlı Basit Tip Kademe Değiştirici.

Elektriksel gücün transfer edilmesi esnasında ark oluşur bu da yalıtkan yağın zamanla bozulmasına sebep olur. Bu nedenle YKD'ler kendi bölmelerinde bulunur ve bu sayede bozulmaya uğramış YKD yağı ile transformatör yağı karışmamış olur. Bu karışmayı engellemek için bir kaç dizayn geliştirilmiştir. Bu durum vakumlu kesicilerin anahtarlama elemanı olarak kullanıldığı kademe şalterlerinde yoktur.

Seçici anahtarların transformatör kazanı içinde kapalı bir bölümde olduğu durumda *Kazan-içi Tip*, transformatör kazanı dışında bir yine yağ dolu bir bölmede olduğu durumda ise *Kompartıman Tipi* olarak adlandırılmaktadır [1]. Kazan içi tip YKD'ler daha yüksek akım ve gerilim seviyelerinde kullanılmaktadır [3].

YKD *Seçici Anahtarlı* veya *Aktarma Anahtarlı ve Kademe Seçicili* olmaları durumunlarında hem *kazan-içi tip* hem de *kompartıman tipi* olarak dizayn edilebilir. Yüksek hızlı direnç tipi YKD kazan-içi tip olduğu durumda, sadece aktarma anahtarı bölmesi yağlı ayrı bir bölmede tutulmaktadır ve bu bölme ile transformatör kazanı

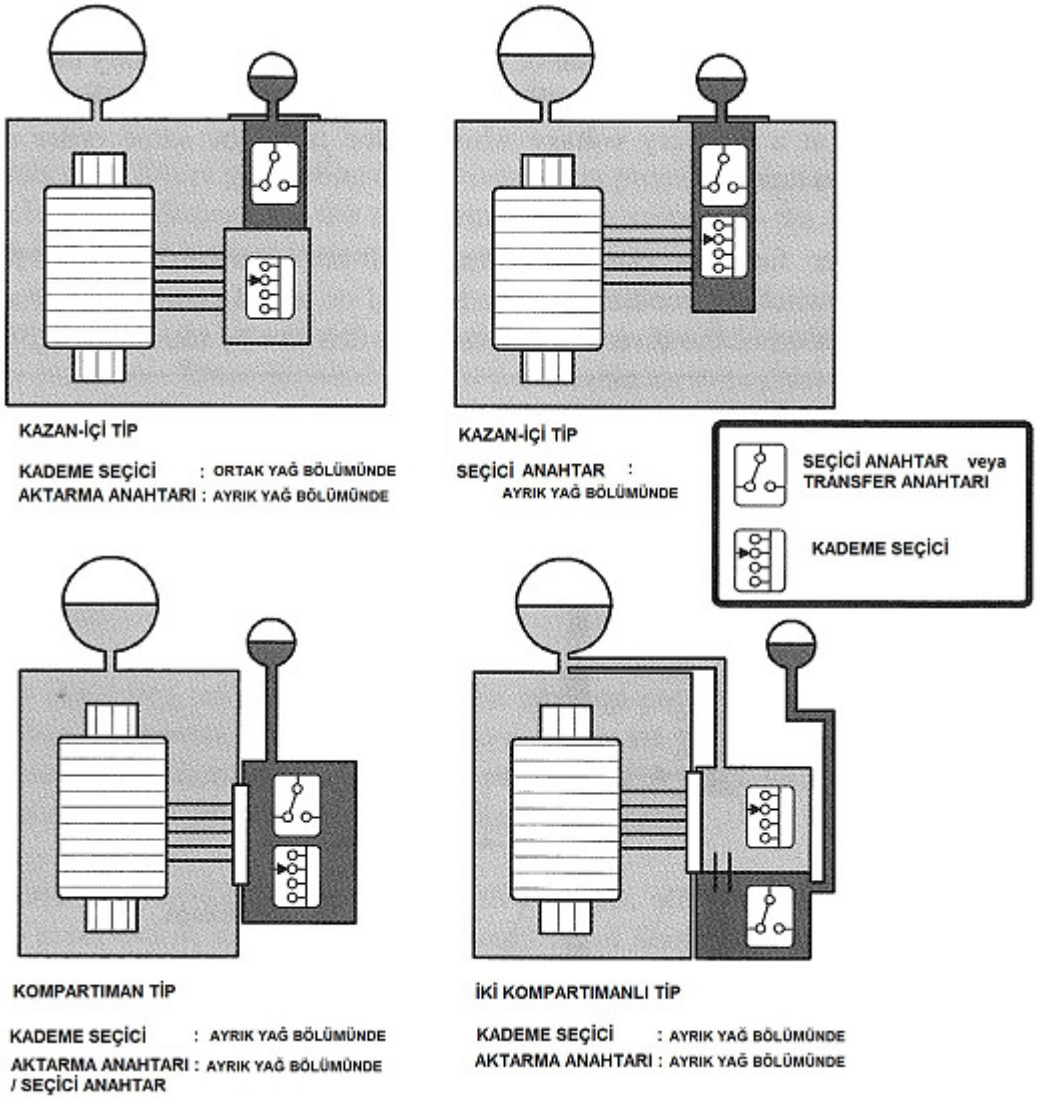
arasında sızdırmazlık sağlanmaktadır. Kademe seçici transformatör kazanı ile aynı bölmededir. Günümüzde kullanılan en yaygın tip budur.

Kompartıman Tipi yükte kademe değiştiricilerde ise iki tip dizayn yaygındır.

1-) Aktarma anahtarı bölmesi ve kademe seçici bölmelerinin ikiside ana gövde yağı ile izoledir.

2-) Aktarma anahtarı bölmesi izoleli olup, kademe seçici bölmesi ana gövde ile aynı yağı kullanmaktadır.

Buradan anlaşılacağı gibi aktarma anahtarı bölmesinde anahtarlama işleminden dolayı oluşan ark nedeni ile her durumda bu bölümün yağı ana gövde yağı ile izoledir. Kademe seçici bölmesi ise tercihe bağlı olarak ana gövde yağı bölmesi ile izoleli veya ortak olabilmektedir.



Şekil II.2 Kademe Değiştirici Dizaynlarının Prensip Şemaları.

Harici montajlı yükte kademe değiştiriciler iki tipte olabilir. Bunlar srasıyla,

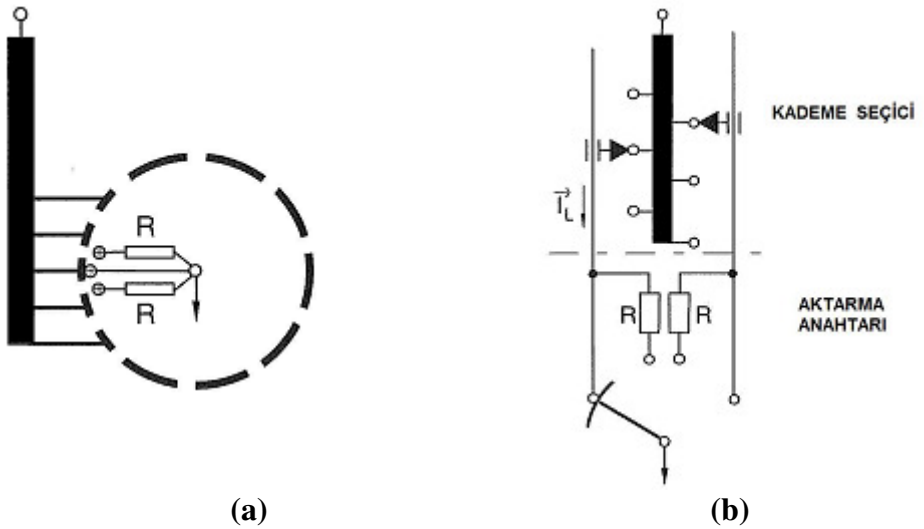
1-) Transformatörle aralarındaki bir bariyer ve terminal kutusu ile birleştirilmiş ve ayrılabilen tip.

2-) Transformatörle sabit olarak birleştirilmiş ve ana gövdeden ayrılamayan tip'dir.

Reaktör tipi YKD'ler her zaman kompartıman tipi olarak dizayn edilirler. Yukarıda belirtilen tiplerde bir çok dizayn geliştirilmiştir ve günümüzde kullanılmaktadır.

II.1. YÜKSEK HIZLI DİRENÇ TİPİ YÜKTE KADEME DEĞİŞTİRİCİ

Yüksek hızlı direnç tipi yükte kademe değiştirici *aktarma anahtarlı ve kademe seçicili* yada *seçici anahtarlı* olarak dizayn edilir [1]. Şeçici anahtarlı dizayn tipinde kademe seçicinin ve aktarma anahtarın özellikleri bir cihazda birleştirilir. Bu ikinci çözümün imalatı daha ekonomiktir. Fakat bu tipte akım ve gerilim seviyelerinde sınırlamalar vardır. Şeçici anahtarlı tipte akım seviyesi üst limiti 500-600 amper ve gerilimin üst seviyesi de 123 kV ile sınırlandırılmıştır. Bu tip sadece bir kapalı bölme ile elde edilmektedir. Bu nedenle arktan dolayı ortaya çıkan ürünler hem mekaniki parçalarla hem de yalıtım unsurlarla birebir temas halindedir. Şeçici anahtarlı dizaynın prensip şeması Şekil II.3a'da verilmiştir [1].



(a) **(b)**

Şekil II.3 a-) Şeçici Anahtarlı Tip Kademe Değiştirici Prensip Şeması.

b-) Kademe Seçicili ve Aktarma Anahtarlı Tip Kademe Değiştirici Prensip Şeması.

Aktarma anahtarlı ve kademe şeçicisi olan yükte kademe değiştiricileri şu anda üretilebilen transformatörlerde kullanılabilmektedir. Bu tipte yükte kademe değiştiricilerde akım üst limiti 4500 amperdir ve gerilimin üst seviyesi 362 kV'tur. Aktarma anahtarlı ve kademe şeçicili dizaynın prensip şeması Şekil II.3b'de görülmektedir [1]. Aktarma anahtarlı ve kademe şeçicili YKD'lerde kademe değiştirme işlemi iki adımda gerçekleşir.

1.Adım: Kademe seçici arzu edilen kademe ucuna boşta hareket ederek geçer.

2.Adım: Daha sonra aktarma anahtarı akımı mevcut kademeden geçilecek kademeye aktarır.

Bu işlemin tümü bir motor sürücülü bir mekanizma ile gerçekleştirilir. Bu mekanizma kademe seçiciyi dişliler vasıtası düşürülmüş hızla sürer ve aynı anda mekanizma bir yay ile kurulur. Kademe seçicinin pozisyonunu alması tamamlandıktan sonra kurma işlemi de tamamlanır ve yayda depolanan enerji aktarma anahtarının pozisyonu değiştirir. Yaylı mekanizmanın enerjisinin boşaldığı pozisyon değiştirme işlemi yükte kademe değiştiricinin dizaynına bağlı olarak 40 ile 60 milisaniye içinde tamamlanır. Aktarma anahtarı çalışma peryodunun bir defa tamamlanması işlemi, ne zaman ki yay mekanizması motor sürücü mekanizmasından bağımsız olarak serbest bırakılır, o zaman tamamlanır. Bu operasyon esnasında yükte kademe değiştiricisinin tipine ve dizaynına bağlı olarak yaklaşık 20 ile 30 milisaniye süresince geçiş dirençleri devreye girmektedir. Yükte kademe değiştiricide bir kademe değiştirme işleminin motor sürücü mekanizmasının başlamasından itibaren aktarma anahtarının operasyonunun tamamlanmasına kadar geçen süre 3 ile 10 saniye arasındadır.

II.1.1. Anahtarlama Sırası

IEC 60214-1 yayınına göre kontakların çalışması dikkate alındığında bir kademe değiştirme işlemi iki metod ile gerçekleşebilir.

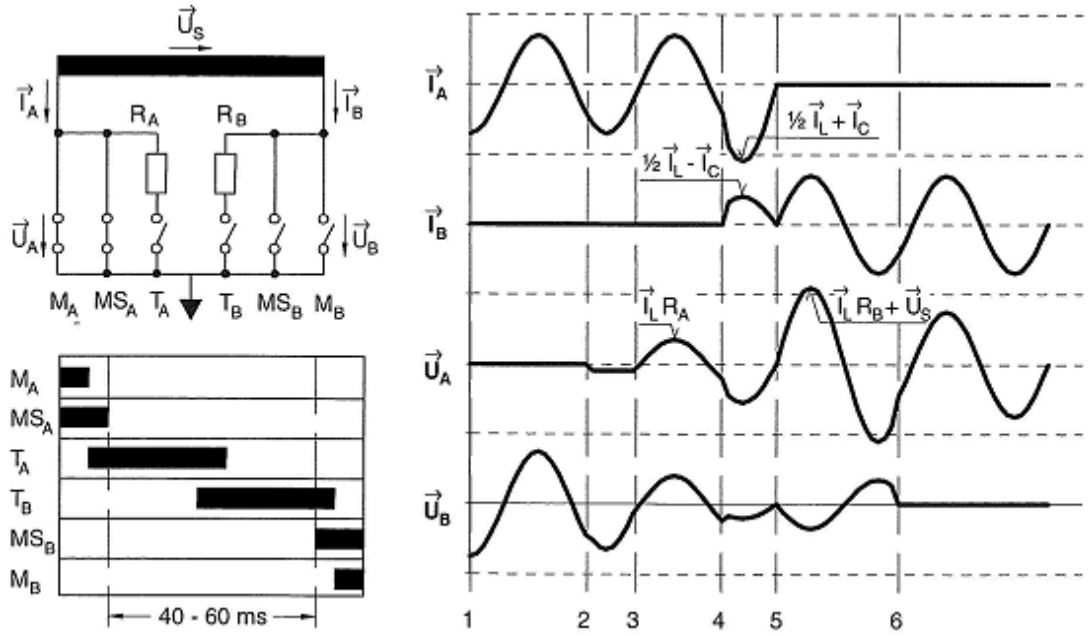
1- BAYRAK PERYODU (FLAG CYCLE)

2- FLAMA PERYODU (PENNANT CYCLE)

Bayrak Peryodu ve *Flama Peryodu* dizaynların türevlerinde kademe değiştirme işlemi esnasında transformatör çıkış gerilimindeki değişimin gösterildiği vektör diyagramlarından kaynaklanmaktadır [1]. Günümüzde *Bayrak Peryodu* aktarma anahtarlı ve seçici anahtarlı durumların ikisinde de en çok kullanılan metodtur. Bu

metodun en büyük avantajı aşırı yüklemelerde kademe değiştirme işlemi esnasında maksimum güvenilirlik sağlamasıdır.

Şekil II.4'te aktarma anahtarlı sistemdeki kontak düzenlemesinin prensip şeması ve *Bayrak Peryodu* (simetrik) durumunda anahtarlama esnasındaki osiligramlar görülmektedir. Aktarma anahtarı hareketli ve sabit kontaklara sahip bir sistem olarak dizayn edilir.



(a) **(b)**

Şekil II.4 a-) Aktarma Anahtarlı Sistemdeki Kontak Düzenlemsinin Prensip Şeması b-) Simetrik Bayrak Peryotlu Çalışmanın Anahtarlama Esnasındaki Osilogramları.

Ana Kontaklar ($M_{A,B}$);

Üzerinde akım taşıyan ve transformatör sargısı ve kontaklar arası geçiş empedansı olmayan bir set olarak mevcuttur. Bu kontaklar akım anahtarlaması yapmazlar ve genellikle bakırdan veya bakır-gümüş karışımdan yapılır. Bu set kontaklar düşük akımlı aktarımların yapıldığı yükte kademe değiştiricilerde bulunmazlar.

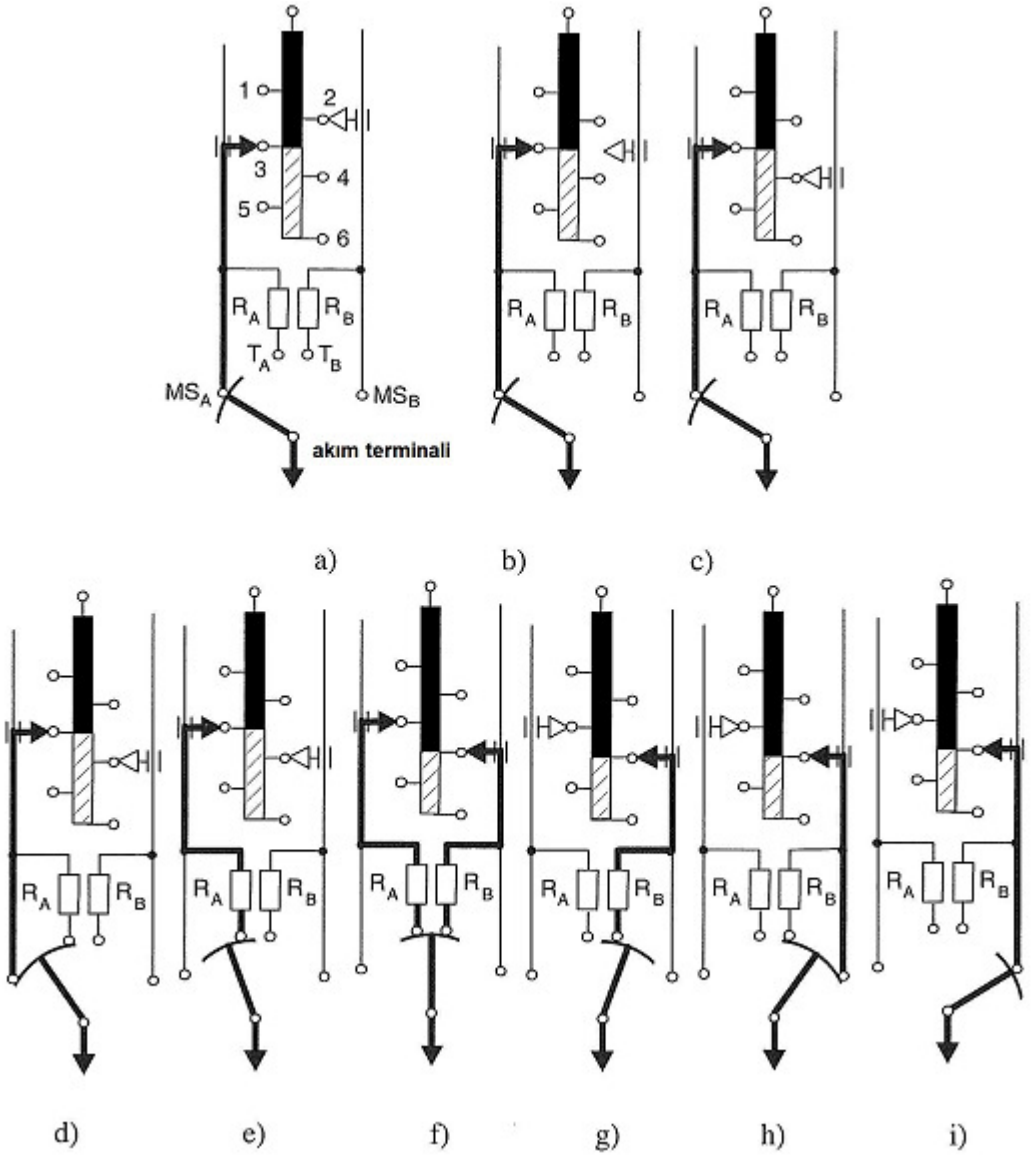
Ana Anahtarlama Kontaklar ($MS_{A,B}$) ;

Transformatör sargısı ve kontaklar arası geçiş empedansı olmayan bir set olarak mevcuttur. Bu kontaklar akımı kesme işlemi yaptığından genellikle bakır-

tungsten karışımlı üretilir. Ana kontakların olmadığı durumlarda ana anahtarlama kontakları bakırdan yapılırlar.

Geçiş Kontakları ($T_{A, B}$) ;

Geçiş empedansı ile seri bağlanmış bir set olarak mevcuttur. Bu kontaklar akımı kesme işlemi yaptığından genellikle bakır-tungsten karışımlı üretilir.



Şekil II.5 Aktarma Anahtarlı ve Kademe Seçicili Tip Kademe Değiştiricinin Prensip Anahtarlama Sırasıdır.

(a-c : Kademe Seçici Çalışma Sırası)

(d-i : Aktarma Anahtarı Çalışma Sırası)

Bir kademe değiştirme işlemi esnasında aktarma anahtarının ve kademe seçicinin anahtarlama sırası Şekil II.5'te gösterilmiştir. Bu şekilde ana kontaklar

görünmemektedir. Kademe seçicinin motor sürücülü mekanizma ile 3 ile 10 saniye arasında hareketinin değişimi Şekil II.5'in a, b ve c şıklarında gösterilmiştir. Aktarma anahtarının değişimi ise Şekil II.5'in d ile i arasındaki şıklarında görülmektedir. Bu işlem yaylı sistemle 40 ile 60 milisaniye arasında gerçekleşmektedir [1].

Aktarma anahtarının A ve B isimli iki ucundan biri kademe şeçici plakanın tek numaralı kontakların olduğu diğeri de çift numaralı kontakların olduğu tarafına bağlanır. Aktarma anahtarının kontaklarının diğer uçları çıkış terminaline bağlanır. Anahtarlama sırasının başlaması için aktarma anahtarının Şekil II.5'in a şıkkındaki gibi herhangi bir uç pozisyonda olması gerekmektedir. Bu durum Şekil II.4'te de gösterilmiştir. M_A (A tarafı ana kontağı) akımı üzerinde taşımaktadır Şekil II.5'in a şıkkında gösterilmiş olduğu gibi kademe pozisyonu 3'tedir [1].

1.Adım : Operasyonun ilk aşamasında hareket eden kontak tek uçlar plakasındadır. Kademe şeçici yüksüz bir ortamda 2 nolu uçtan 4 nolu uca hareket etmektedir (Şekil II.5'in a, b ve c şıkları). Kademe seçici istenen kademeye ulaştığında aktarma anahtarı harekete geçecektir. Aktarma anahtarının değişik konumları Şekil II.5'in d ve i arasındaki şıklarda gösterilmiştir.

2.Adım : Aktarma anahtarının anahtarlama sırası A tarafındaki ana kontak M_A'nın açması ile başlamış olur. Geçiş kontağı T_A'nın kapatmasından sonra, R_A direnci hala ana anahtarlama kontağı MS_A ile by-pass edilmiştir. Bu durum Şekil II.5'in d şıkkında gösterilmiştir.

3.Adım : Daha sonra MS_A (ana anahtarlama kontağı) açar. Şekil II.5'in e şıkkında ve Şekil II.4'teki karşılaştırma osilogramlarda 2 nolu zamanda görülmektedir. Ancak MS_A'nın (ana anahtarlama kontağı) temasının kesilmesi ile ilk kez akımın sıfır olması gerçekleşir. Şekil II.4'teki karşılaştırma osilogramlarda 3 nolu zamanda görülmektedir. Ayrılmış ana anahtarlama kontakları bir yay ile köprülenir. Daha sonra I_L yük akımı R_A direnci üzerinden akar.

4.Adım : Bir sonraki adım ise T_B'nın (geçiş kontağı) kapanmasıdır. Şekil II.5'in f şıkkında ve Şekil II.4'teki karşılaştırma osilogramlarda 4 nolu zamanda görülmektedir. Bu esnada üzerinden geçen akım R_A ve R_B arasında paylaşılır ve I_C dolaşım akımı akar.

5.Adım : Daha sonra geçiş kontağı T_A açar (Şekil II.5'in g şıkkı) ve akım sıfırda iken keser. Şekil II.4'teki karşılaştırma osilogramlarda 5 nolu zamanda görülmektedir. T_A (geçiş kontağı) ile U_{rMSA} (toparlanma gerilimi) değeri I_L (yük

akımı) ile I_C'nin (dolaşım akımı) vektörel toplamının R_B (geçiş direnci) ile çarpılması sonucu bulunur. I_L akımı sadece R_B direnci üzerinden akmaktadır.

6.Adım : MS_B (ana anahtarlama kontağı) R_B'yi (geçiş direnci) by-pass ederek kapatır. Bu durumda I_L (yük akımı) MS_B kontağı üzerinden akmaktadır. Şekil II.5'in h şıkkında görülmektedir.

7.Adım : Son olarak anahtarlama işlemi T_B'nin (geçiş kontağı) açması ve M_B'nin (B tarafının ana kontağı) kapanması ile tamamlanır Şekil II.5'in i şıkkında görülmektedir.

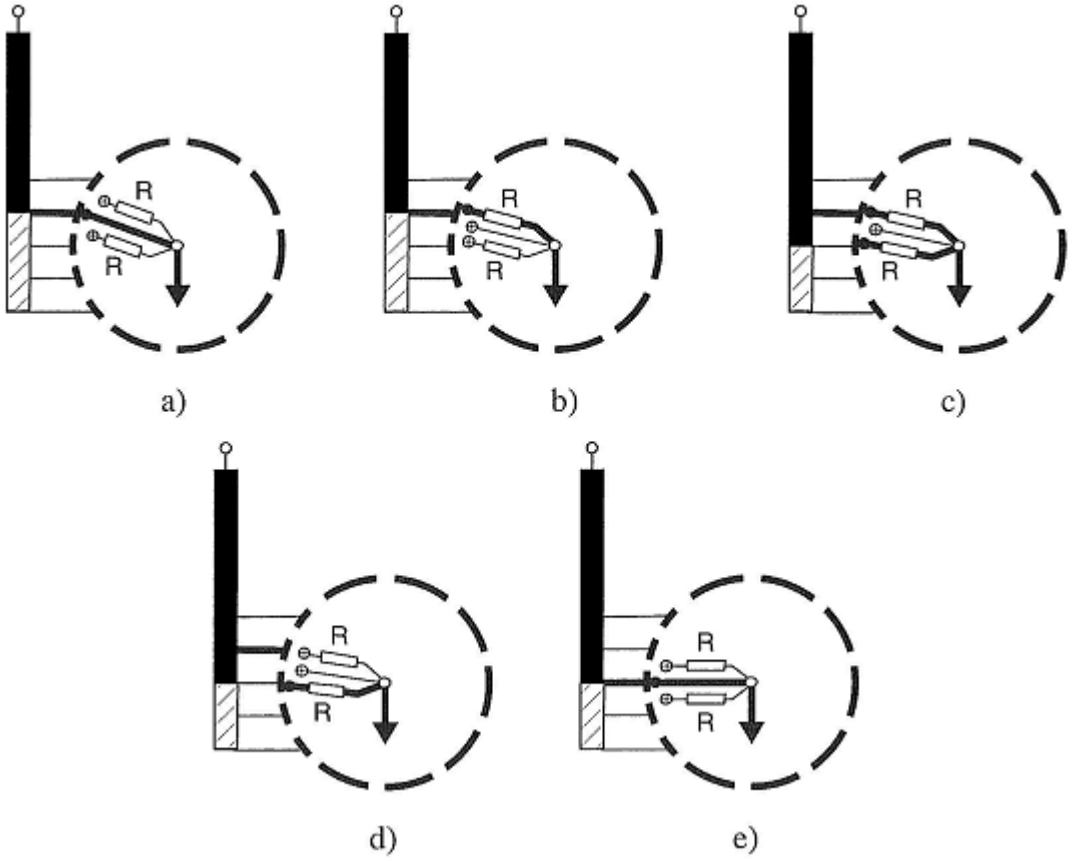
MS_A kontağı kontakları arasındaki U_{rMSA} (toparlanma gerilimi) değeri (II.1) nolu denklemdeki gibidir. I_C (dolaşım akımı) değerini belirleyen iki kademe arasındaki gerilim farkı ve birbirine seri gelen geçiş dirençlerinin değerleridir ve (II.2) nolu denklemdeki gibidir.

$$\vec{U}_{rMSA} = \vec{I}_L \cdot R_A \qquad \text{(II.1)}$$

$$\vec{I}_C = \frac{\vec{U}_S}{R_A + R_B} \qquad \text{(II.2)}$$

Aynı yönde olacak bir sonraki kademe değiştirme işleminde yukarıda anlatılan işlem tekrarlanır, fakat bu sefer tek numaralı kademelerin bulunduğu A plakasındaki kademe seçici hareket edecektir ve aktarma anahtarı ise B plakasından ayrılır ve A plakasında kapatma işlemini tamamlar.

Seçici anahtarlı yükte kademe değiştiricilerde bulunduğu kademeden komşu kademeye bir adımda geçmektedir. Yukarıda belirtildiği gibi bir yaylı mekanizmada enerji depolandıktan sonra bu yaylı mekanizma serbest kalır ve seçici anahtarın hareketli kontak sistemini harekete geçirmesi ile çalışmaktadır. Bu işlem esnasında kontak sistemi mevcut kademeden komşu kademeye çok hızlı bir şekilde hareket eder. Tipine ve dizaynına bağlı olarak 40 ile 180 milisaniye arasında bu kontak sistemi kademeyi değiştirir, ama bu motor sürücülü sistemin tüm işlemi tamamlama süresi 3 ile 10 saniye arasında tamamlanmaktadır. Şekil II.6'da seçici anahtarlı bir yükte kademe değiştiricinin bayrak peryodu metoduna göre prensip çalışması resimlendirilmiştir. Akım akışının değişik aşamaları yukarıda aktarma anahtarlı yükte kademe değiştircilerde anlatıldığındaki gibidir. Kademe değiştirme esnasında transformatörün iki sargısı arasında kısadevre oluşturmadan yük akımının anahtarlamasını yapabilmelidir [3].



Şekil II.6 Seçici Anahtarlı Tip Kademe Değiştiricinin Prensip Anahtarlama Sırasıdır.

II.1.2 Ana Ve Geçiş Kontaklarının Çalışma Oranı

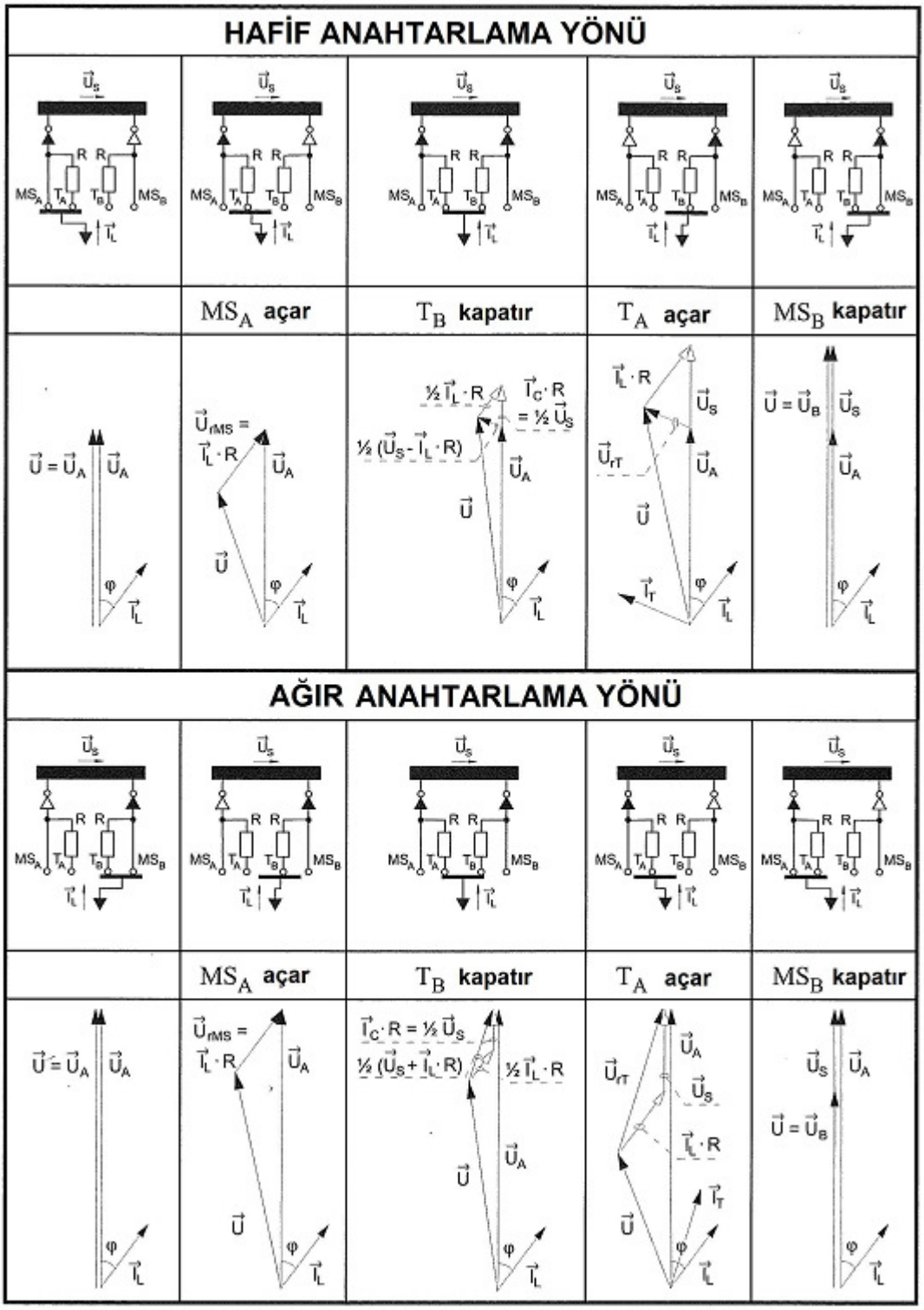
Yükte kademe değiştiricilerin geçiş dirençleri bulunan ana ve geçiş kontaklarının anahtarlama çalışma oranları kademe değiştirme işleminde kullanılan metoda bağlıdır. Yukarıda belirtildiği gibi değişik temel metodlar uygulanmaktadır.

Yukarıda belirtilen kademe değiştirme işleminde kullanılan metodların gerektirdiği tipik kontak ayarlamaları Tablo II.2, Tablo II.6, Tablo II.10, Tablo II.14 ve Tablo II.18'de görülmektedir. Şekillerde sadece bir çift kontak gösterilmesine rağmen uygulamada bu işlem kontak seti ile gerçekleştirilebilir. Gösterilen kontak ayarlamaları tek çözüm değildir, bunların dışında da çözümler ortaya çıkarılabilir.

II.1.2.1. Bayrak Peryodu Çalışması (Aktarma Anahtarlı)

Kademe değiştirme işleminde bu metodun en tipik olanında dolaşım akımları akmaya başlamadan önce akım direkt olarak ana kontaktan aktarılır. Aktarma anahtarının her iki tarafındaki geçiş dirençlerinin eşit olduğu varsayılır.

Tablo II.1 Aktarma Anahtarlı ve Bayrak Peryotlu Çalışmanın Kontak Çalışma Sıraları, Bağlantı ve Fazör Diyagramları.



Tablo II.1'de bayrak peryodu aktarma anahtarı çalışmasının değişik işlem adımları *Düşük Akım Yoğunluklu* ve *Yüksek Akım Yoğunluklu* anahtarlama yönleri için fazör diyagramları gösterilmiştir. *Düşük Akım Yoğunluklu* ve *Yüksek Akım Yoğunluklu* akım ifadeleri geçiş kontaklarından aktarılan akımın değeri ile ilişkili ortaya çıkmıştır [1].

Aktarma anahtarının başlangıç pozisyonunda MS_A (ana anahtarlama kontağı) ve T_A (geçiş kontağı) kapalıdır. M_A ve M_B (ana kontaklar) burada gösterilmemiştir çünkü sadece ana anahtarlama kontağına aktarılan akımı taşıma işlemi yapmaktadırlar. MS_A kontağı T_A kontağını by-pass etmektedir ve I_L (yük akımı) üzerinden akmaktadır. MS_A kontağı açar ve üzerinden geçen akımı keser. Bu durumda I_L akımı R (geçiş direnci) üzerinden akmaktadır. Açılmış olan MS_A kontağı üzerindeki toparlanma gerilimi şu şekilde ifade edilebilir.

$$\vec{U}_{rMS} = \vec{I}_L \cdot R \qquad \text{(II.3)}$$

Bir sonraki adım ise T_B'nin (geçiş kontağı) kapanmasıdır. Bu pozisyonda yük akımı iki adet geçiş direnci tarafından paylaşılır. Her iki geçiş direnci üzerinden yük akımı yarı yarıya paylaşılır ayrıca dolaşım akımı da iki geçiş direnci üzerinden akmaktadır. Burada dolaşım akımının geçmeye başlaması için T_B kontağının kapanması gerekmektedir. I_C'nin (dolaşım akımı) değerini belirleyen iki kademe arasındaki gerilim farkı ve birbirine seri gelen geçiş dirençlerinin değerleridir.

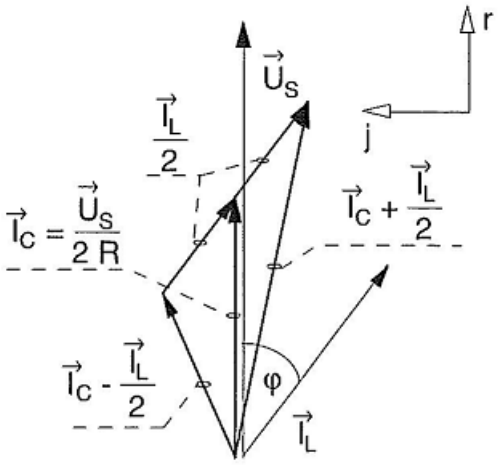
$$\vec{I}_C = \frac{\vec{U}_S}{2 \cdot R} \qquad \text{(II.4)}$$

Daha sonraki adımda ise T_A kontağı açar ve üzerinden geçmekte olan I_L akımının yarısı ve I_C akımının toplamına eşit akımın kesilmesi işlemidir. Bu iki akımın vektörel yönü anahtarlama yönü yani kademe değiştiğinde devreye spir eklenmesi veya spir çıkarılması işlemine bağlıdır.

Geçiş kontaklarının kestiği akımın değeri *yüksek akım yoğunluklu* çalışmada dolaşım akımı ile yük akımının yarısının toplamı ile elde edilir, buna karşı diğer yönde kademe değiştirme yapılıyorsa dolaşım akımından yük akımının yarısının çıkarılması ile bulunur ve *düşük akım yoğunluklu* çalışma olarak adlandırılır. Bu ilişkiler Şekil II.7'de ölçeksiz olarak gösterilmiştir.

Geçiş kontaklarının aktaracağı akımın değeri

$I_L = |I_L| . (Cos\ \varphi - jSin\varphi)$ formülü takip edilerek bulunabilir.



Şekil II.7 Geçiş Kontaklarındaki Akımların Fazör Diyagramları.

Yüksek Akım Yoğunluklu çalışmada formül

$$\left|\vec{I}_T\right| = \left|\vec{I}_C + \frac{\vec{I}_L}{2}\right| = \sqrt{\left(\frac{\left|\vec{U}_S\right|}{2 \cdot R} + \frac{\left|\vec{I}_L\right|}{2} \cdot Cos\varphi\right)^2 + \left(-\frac{\left|\vec{I}_L\right|}{2} \cdot Sin\varphi\right)^2} \qquad \text{(II.5a)}$$

Düşük Akım Yoğunluklu çalışmada ise

$$\left|\vec{I}_T\right| = \left|\vec{I}_C - \frac{\vec{I}_L}{2}\right| = \sqrt{\left(\frac{\left|\vec{U}_S\right|}{2 \cdot R} - \frac{\left|\vec{I}_L\right|}{2} \cdot Cos\varphi\right)^2 + \left(-\frac{\left|\vec{I}_L\right|}{2} \cdot Sin\varphi\right)^2} \qquad \text{(II.5b)}$$

Bu denklemlerden *Yüksek Akım Yoğunluklu* çalışmada geçiş kontaklarında aktarılan I_T akımın maksimum değere ulaştığı durum faz açısı $\varphi = 0$ olduğu durumda yani güç faktörünün 1 olduğu durumdur. Güç faktörü sadece aktarılan akımın büyüklüğünü ve toparlama gerilimini etkilemektedir. Aktarılan akım ile toparlama gerilimi arasındaki faz açısı farklı her güç faktörü durumunda da 0 derecedir. Ana anahtarlama kontakları üzerinden geçen akımı her durumda aktarmak durumundadır.

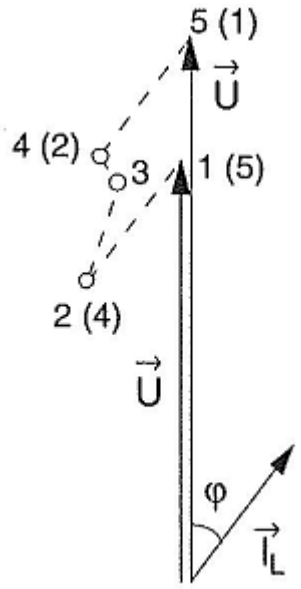
T_A kontağı üzerindeki toparlanma gerilimi kademe gerilimi ile yük akımından dolayı R geçiş direnci üzerinde oluşan gerilim düşümünün vektörel toplamına eşittir. Bu değer ayrıca transfer yönüne de bağlıdır ve aşağıdaki şekilde ifade edilir.

$$\vec{U}_{rT} = \vec{U}_S \pm \vec{I}_L \cdot R \qquad \text{(II.6)}$$

Son olarak ana kontak işlemini göz önüne almazsak kapatma tarafındaki ana anahtarlama kontağının kapatılması ile aktarma anahtarının çalışması tamamlanmış olur.

Aynı yönde yapılacak bir sonraki kademe değiştirme işleminde yukarıda anlatılan işlemler sıra ile tekrarlanacaktır, fakat bu sefer aktarma anahtarının B tarafı açılan taraf olacak ve A tarafı ise kapatılan taraf olacaktır. Bu durum Tablo II.2'de verilmiştir. Sonuç olarak aktarma anahtarının iki tarafı devam eden kademe değiştirmelerde yer değiştirmektedir. Her iki taraf için de kontaklarda ortaya çıkan zorlamalar benzerdir, sadece kademe değiştirmede devreye spir girmesine veya çıkmasına bağlı olarak azalır veya çoğalır.

Kademe değiştirme işlemi esnasında transformatörün çıkış gerilimi Tablo II.1'deki fazör diagramlarından türetilmiştir ve Şekil II.8'de gösterilmiştir. Bu şeklin görünümü bir bayrağa benzemektedir. Bu nedenle kademe değiştirme işleminde bu metoda *Bayrak Peryodu* metodu denir.



Şekil II.8 Bayrak Peryodu Çıkış Geriliminin Lokus Eğrisi.

Tablo II.2'de yükte kademe değiştiricinin her iki yönde olmak üzere ard arda yapılacak kademe değiştirme işlemlerinde aktarma anahtarının kontaklarının işlem yapma sırasını göstermektedir. Ana anahtarlama kontaklarının ve geçiş kontaklarının çalışması Tablo II.3 ve Tablo II.4' te verilmiştir. Bu tablolarda ayrıca

her bir kontak setinin işlem yapma sayısı transfer anahtarının N adet işlem yapmasıyla bağlantılı olarak verilmiştir.

Aktarma anahtarının her iki tarafında bulunan ana transfer kontaklarının işlem yapma sayılarını yükte kademe değiştiricilerin toplam kademe değiştirme sayısının yarısı olarak basitçe hesaplanabilir çünkü aktarma anahtarının iki tarafı birbiri ile her kademe değiştirmede yer değiştirmektedir.

Transfer kontakları için de durum aynıdır. Bu tespite ek olarak transfer kontak çalışmalarının yarısı *yüksek akım yoğunluklu* diğer yarısı da *düşük akım yoğunluklu* olacaktır. Bir taraftaki işlem miktarı N/2 olarak ifade edilebilir ve bunların N/4 adedi *yüksek akım yoğunluklu* ve kalan diğer N/4 adedi de *düşük akım yoğunluklu* çalışma olarak dağıtılabilir.

Fazör diyagramlarından güç faktörünün sadece geçiş kontaklarının çalışma oranını etkilediği sonucuna ulaşılabilir.

Tablo II.2 Bazı Ard Arda Yapılacak Kademe Değiştirme İşlemlerinde Aktarma Anahtarı Kontaklarının İşlem Yapma Sırasını Göstermektedir. (Bayrak Peryotlu)

Anahtarlama işlemi	Kontakların işlem yapma sırası			
Kademe m'den m+1 'e	MS_A açar	T_B kapatır	T_A açar	MS_B kapatır
Kademe m+1'den m+2 'ye	MS_B açar	T_A kapatır	T_B açar	MS_A kapatır
Kademe m+2'den m+3 'ye	MS_A açar	T_B kapatır	T_A açar	MS_B kapatır
……	Ve böyle devam eder	Ve böyle devam eder	Ve böyle devam eder	Ve böyle devam eder
Kademe n'den n-1 'e	MS_B açar	T_A kapatır	T_B açar	MS_A kapatır
Kademe n-1'den n-2 'e	MS_A açar	T_B kapatır	T_A açar	MS_B kapatır
Kademe n-2'den n-3 'e	MS_B açar	T_A kapatır	T_B açar	MS_A kapatır
……	Ve böyle devam eder	Ve böyle devam eder	Ve böyle devam eder	Ve böyle devam eder

Tablo II.3 Aktarma Anahtarlı ve Bayrak Peryotlu Çalışmada Ana Anahtarlama Kontağının Çalışma Oranı.

Ana Anahtarlama Kontağı Çalışma Oranı				
Kontak	Anahtarlanan Akım	Toparlanma Gerilimi	İşlem Adedi	Yük Güç Faktörü Etkisi
MS_A	$\vec{I}_L$	$\vec{I}_L \cdot R$	N/2	Yok
MS_B	$\vec{I}_L$	$\vec{I}_L \cdot R$	N/2	Yok

Tablo II.4 Aktarma Anahtarlı ve Bayrak Peryotlu Çalışmada Geçiş Kontağının Çalışma Oranı.

Geçiş Kontağı Çalışma Oranı				
Kontak	Anahtarlanan Akım	Toparlanma Gerilimi	İşlem Adedi	Yük Güç Faktörü Etkisi
T_A	$\left(\vec{U}_S + \vec{I}_L \cdot R\right) \cdot \frac{1}{2 \cdot R}$	$\vec{U}_S + \vec{I}_L \cdot R$	N/4	G.F.=1'de maksimum çalışma
	$\left(\vec{U}_S - \vec{I}_L \cdot R\right) \cdot \frac{1}{2 \cdot R}$	$\vec{U}_S - \vec{I}_L \cdot R$	N/4	
T_B	$\left(\vec{U}_S + \vec{I}_L \cdot R\right) \cdot \frac{1}{2 \cdot R}$	$\vec{U}_S + \vec{I}_L \cdot R$	N/4	G.F.=1'de maksimum çalışma
	$\left(\vec{U}_S - \vec{I}_L \cdot R\right) \cdot \frac{1}{2 \cdot R}$	$\vec{U}_S - \vec{I}_L \cdot R$	N/4	

II.1.2.2. Bayrak Peryotlu Çalışma (Seçici Anahtarlı)

Tipik *Bayrak Peryotlu* metod ile kademe değiştirme gerçekleştirildiğinde ana kontaktan geçen yük akımı kesildikten sonra dolaşım akımı dolaşmaya başlar. Aktarma anahtarındaki iki tarafta bulunan geçiş direncinin değerinin eşit olduğu varsayılmaktadır.

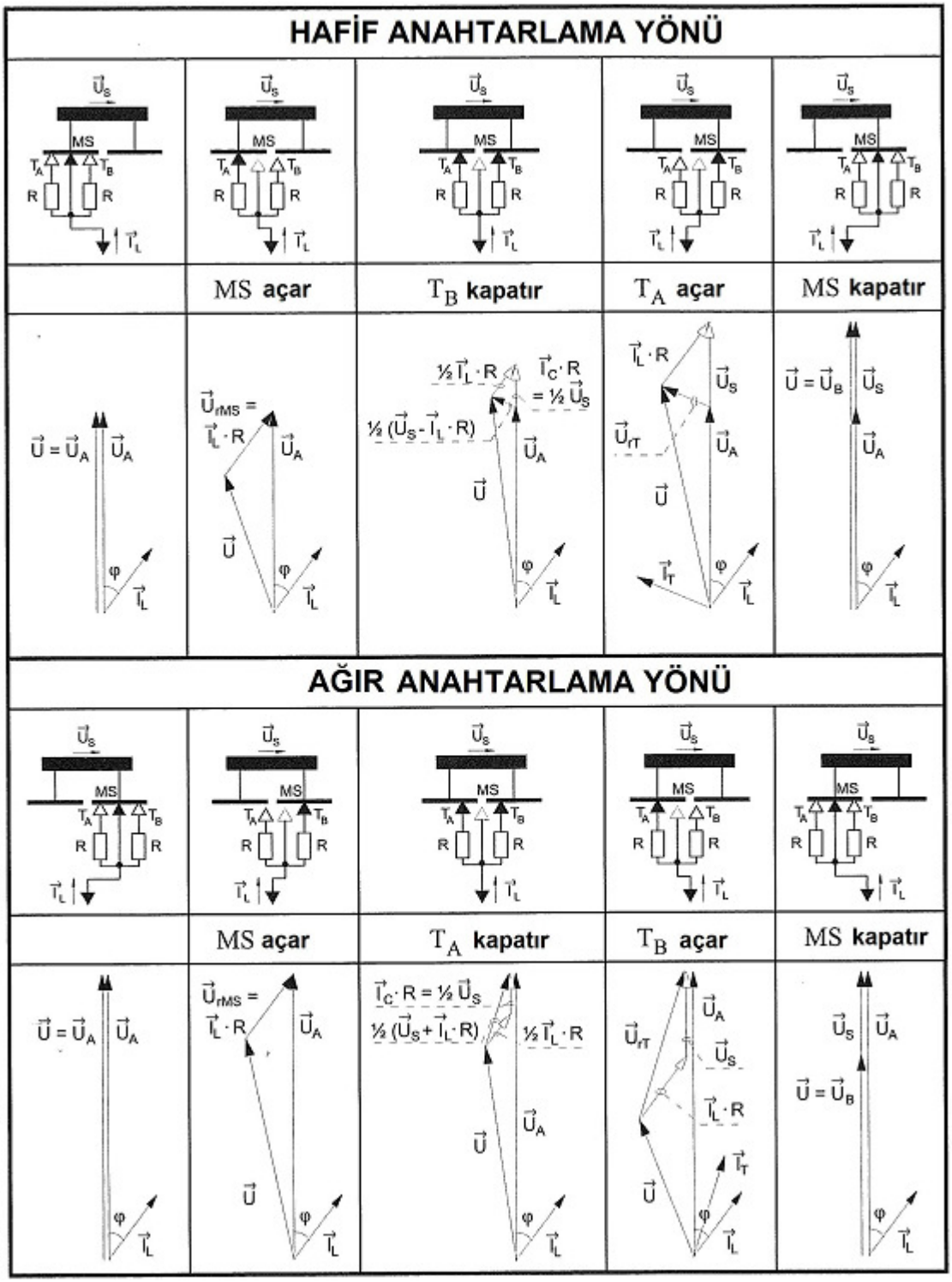
Tablo II.5'te seçici anahtarlı yükte kademe değiştirmede *Bayrak Peryotlu* çalışmanın değişik işlem adımları ve anahtarlama yönlerinin *Yüksek Akım Yoğunluklu* veya *Düşük Akım Yoğunluklu* olduğu durumlardaki fazör diyagramlar gösterilmiştir.

Yükte kademe değiştirici ile komşu diğer kademeye geçildiğindeki fazör diyagramları ve transformatör çıkışındaki gerilimin eğrisi Şekil II.8'de gösterildiği gibidir. YKD'nin aktarma anahtarlı veya seçici anahtarlı olması farketmez ve her iki tipte de fazör diyagramları identiktir.

Seçici anahtarlı çalışmada aktarma anahtarlı çalışmadan farklı olarak ard arda gelen kademe değiştirmelerde iki geçiş kontağı yer değiştirme işlemi yapmaz. Bunun için Tablo II.6'ya bakınız. Geçiş kontağının biri spir eklemede devreye girer, diğer geçiş kontağı ise spir eksiltmede devreye girer. Bunun sonucu olarak geçiş kontağının biri her kademe değiştirmede yük akımının yarısı ve sirkülasyon akımlarının toplamını "yüksek akım yoğunluklu" kesmeli ve diğer geçiş kontağı ise sirkülasyon akımından yük akımının çıkarılması ile ortaya çıkacak akımda "düşük

akım yoğunluklu" kesmelidir. Ana anahtarlama kontağı ise her durumda yük akımının tamamını kesmelidir.

Tablo II.5 Seçici Anahtarlı ve Bayrak Peryotlu Çalışmada Kontakların Çalışma Sırası, Bağlantı ve Fazör Diyagramları.



Ana anahtarlama kontağının ve geçiş kontaklarının çalışması Tablo II.7 ve Tablo II.8'de verilmiştir. Bu tablolarda ayrıca her bir kontak setinin işlem yapma sayısı şeçici anahtarının N adet işlem yapmasıyla bağlantılı olarak verilmiştir.

Tablo II.6 Bazı Ard Arda Yapılacak Kademe Değiştirme İşlemlerinde Seçici Anahtarın Kontaklarının İşlem Yapma Sırasını Göstermektedir. (Bayrak Peryotlu)

Anahtarlama işlemi	Kontakların işlem yapma sırası			
Kademe m'den m+1 'e	MS açar	T_B kapatır	T_A açar	MS kapatır
Kademe m+1'den m+2 'ye	MS açar	T_B kapatır	T_A açar	MS kapatır
Kademe m+2'den m+3 'ye	MS açar	T_B kapatır	T_A açar	MS kapatır
……	Ve böyle devam eder	Ve böyle devam eder	Ve böyle devam eder	Ve böyle devam eder
Kademe n'den n-1 'e	MS açar	T_A kapatır	T_B açar	MS kapatır
Kademe n-1'den n-2 'e	MS açar	T_A kapatır	T_B açar	MS kapatır
Kademe n-2'den n-3 'e	MS açar	T_A kapatır	T_B açar	MS kapatır
……	Ve böyle devam eder	Ve böyle devam eder	Ve böyle devam eder	Ve böyle devam eder

Tablo II.7 Seçici Anahtarlı ve Bayrak Peryotlu Çalışmada Ana Anahtarlama Kontağının Çalışma Durumu.

Ana Anahtarlama Kontağı Çalışma Oranı				
Kontak	Anahtarlanan Akım	Toparlanma Gerilimi	İşlem Adedi	Yük Güç Faktörü Etkisi
MS	$\vec{I}_L$	$\vec{I}_L \cdot R$	N	Yok

Tablo II.8 Seçici Anahtarlı ve Bayrak Peryotlu Çalışmada Geçiş Kontağının Çalışma Durumu.

Geçiş Kontağı Çalışma Oranı				
Kontak	Anahtarlanan Akım	Toparlanma Gerilimi	İşlem Adedi	Yük Güç Faktörü Etkisi
T_A	$\left(\vec{U}_S + \vec{I}_L \cdot R\right) \cdot \frac{1}{2 \cdot R}$	$\vec{U}_S + \vec{I}_L \cdot R$	N/2	G.F.=1'de maksimum çalışma
T_B	$\left(\vec{U}_S - \vec{I}_L \cdot R\right) \cdot \frac{1}{2 \cdot R}$	$\vec{U}_S - \vec{I}_L \cdot R$	N/2	

Aktarma anahtarlı çalışma ile seçici anahtarlı çalışmadaki işlem sayılarındaki değişiklik daha önceden oranıde belirtilen farklı çalışma modu nedeniyle ortaya çıkmaktadır.

II.1.2.3. Simetrik Flama Peryotlu Çalışma (Aktarma Anahtarlı)

Bu metodun tipik özelliği, kademe değiştirme işleminin gerçekleştirilmesinde ana akımın ana kontaklardan geçiş kontaklarına aktarılması işleminden önce dolaşım akımı akmaya başlar. Aktarma anahtarının her iki tarafındaki geçiş direnç değerlerinin aynı olduğu varsayılır.

Tablo II.9'da *Simetrik Flama Peryotlu* çalışmadaki aktarma anahtarının çalışması esnasındaki değişik adımları ve *Hafif* ve *Ağır* anahtarlama yönlerindeki fazör diyagramları gösterilmiştir. Akımın *Hafif* ve *Ağır* çalışmada ana anahtarlama kontaklarının güç faktörü üzerindeki prensip etkisi *Bayrak Peryotlu* çalışmadaki geçiş kontaklarının dizaynlarına benzemektedir.

Açan taraftaki ana anahtarlama kontağı (burada MS_A), U_S (adım gerilimi) ve R (geçiş direnci) tarafından belirlenen I_{C1}'i (dolaşım akımı) ve üzerinden akan akımı kesmek zorundadır. Bu değer vektörel toplama ile elde edilir ve anahtarlama yönüne bağlı olarak değişmektedir.

$$\vec{I}_{C1} = \frac{\vec{U}_S}{R} \tag{II.7}$$

$$\vec{I}_{MS} = \vec{I}_{C1} \pm \vec{I}_L = \frac{\vec{U}_S}{R} \pm \vec{I}_L \tag{II.8}$$

U_{rMS} (açan kontaklar tarafındaki toparlanma gerilimi) R (geçiş direnci üzerindeki) gerilim düşümüdür. Geçiş direnci üzerindeki bu gerilim düşümünü I_L'nin (yük akımı) yarısı ve I_{C2} (dolaşım akımı) akımlarının toplamının sebebiyet vermesi ile oluşmaktadır. I_L'nin yarısı kadar akım akmasının sebebi iki geçiş direnci üzerinden yarı yarıya dağıldığı içindir. I_{C2} (dolaşım akımı) değeri U_S (adım gerilimi) ve her iki geçiş direnci tarafından belirlenir. Toparlanma gerilimi ayrıca anahtarlama yönüne bağlı olduğu için (II.10) nolu denklemdeki gibi hesaplanır.

$$\vec{I}_{C2} = \frac{\vec{U}_S}{2 \cdot R} \tag{II.9}$$

$$\vec{U}_{rMS} = \vec{I}_{C2} \cdot R \pm \frac{\vec{I}_L}{2} \cdot R = \frac{\vec{U}_S}{2 \cdot R} \cdot R \pm \frac{\vec{I}_L}{2} \cdot R = \frac{1}{2} \cdot \left(\vec{U}_S + \vec{I}_L \cdot R \right) \tag{II.10}$$

Açan taraftaki geçiş kontağı (burada T_A) açmadan önce, kapatan taraftaki ana anahtarlama kontağı (burada MS_B) kapatır ve geçiş kontağını by-pass eder. Açan taraftaki geçiş kontağı (burada T_A) sadece I_{C1} dolaşım akımını kesmelidir. Ortaya

çıkan toparlanma gerilimi adım gerilimidir. Bu durumlar her iki yöndeki anahtarlamalarda da geçerlidir.

Aynı yöndeki bir sonraki kademe değiştirme işlemi esnasında yukarıda açıklanan sıralamadaki işlemler tekrarlanacaktır, yalnız aktarma anahtarının B tarafı açan taraf ve A tarafı ise kapatan taraf olacaktır. Tablo II.10'da bunu görebilirsiniz. Sonuç olarak aktarma anahtarının her iki tarafı aynı yönde yapılan ard arda kademe değiştirme işlemi esnasında yer değiştirirler. Aktarma anahtarının her iki tarafındaki kontaklarda ortaya çıkan elektriksel zorlanmalar aynı değerdedir sadece anahtarlama yönüne göre spir ekleme ve çıkarmaya bağlı olarak değişmektedir.

Şekil II.9'da kademe değiştirme işlemi esnasında transformatör çıkış gerilimi U'nun değişimi gösterilmiştir. Tablo II.9'daki fazör diyagramlarından türetilmiştir. Bu şekil bir flamaya benzemektedir. Bu nedenle bu metod ile yapılan kademe değiştirme işlemi *Simetrik Flama Peryotlu Çalışma* diye isimlendirilmiştir.

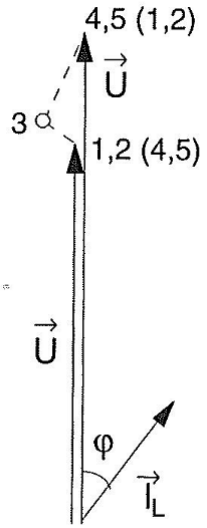
Tablo II.10'da yükte kademe değiştiricinin ard arda gelen kademe değiştirmelerinde aktarma anahtarının kontaklarının spir ekleme ve çıkarma yapıldığı her iki durum gösterilmiştir.

Ana anahtarlama kontaklarının ve geçiş kontakların çalışma durumları Tablo II.11 ve Tablo II.12'de verilmiştir. Bu tablolarda ayrıca her bir set kontağın aktarma anahtarının N adet işlem yaptığındaki işlem adetleri verilmiştir.

Aktarma anahtarının her iki tarafındaki geçiş kontaklarının her birinin işlem sayısının hesabı, aktarma anahtarının her iki tarafı birbirine alterne edecek şekilde çalışıyor olması durumu dikkate alındığında, basit bir şekilde hesaplanabilir ve kademe değiştirici işlem sayısının yarısı kadardır.

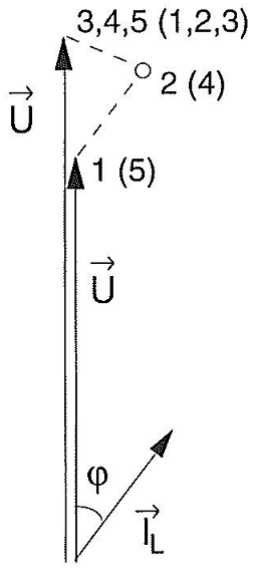
Ana anahtarlama kontakları için de durum yine aynısıdır. Bu duruma ek olaraka her bir kademe değiştirme işlemi *ağır anahtarlama işlemi* olmadığı dikkate alınmalıdır. Bu durumda her bir ana kontağın N/2 adet işleminin N/4 adeti *hafif anahtarlama işlemi* ve N/4 adeti ise *ağır anahtarlama işlemi* olarak dağıtılmalıdır.

Fazör diyagramları incelendiğinde, güç faktörü sadece ana kontakların çalışma oranını etkilemektedir.



Şekil II.9 Simetrik Flama Peryotlu Çalışma Çıkış Geriliminin Lokus Eğrisi.

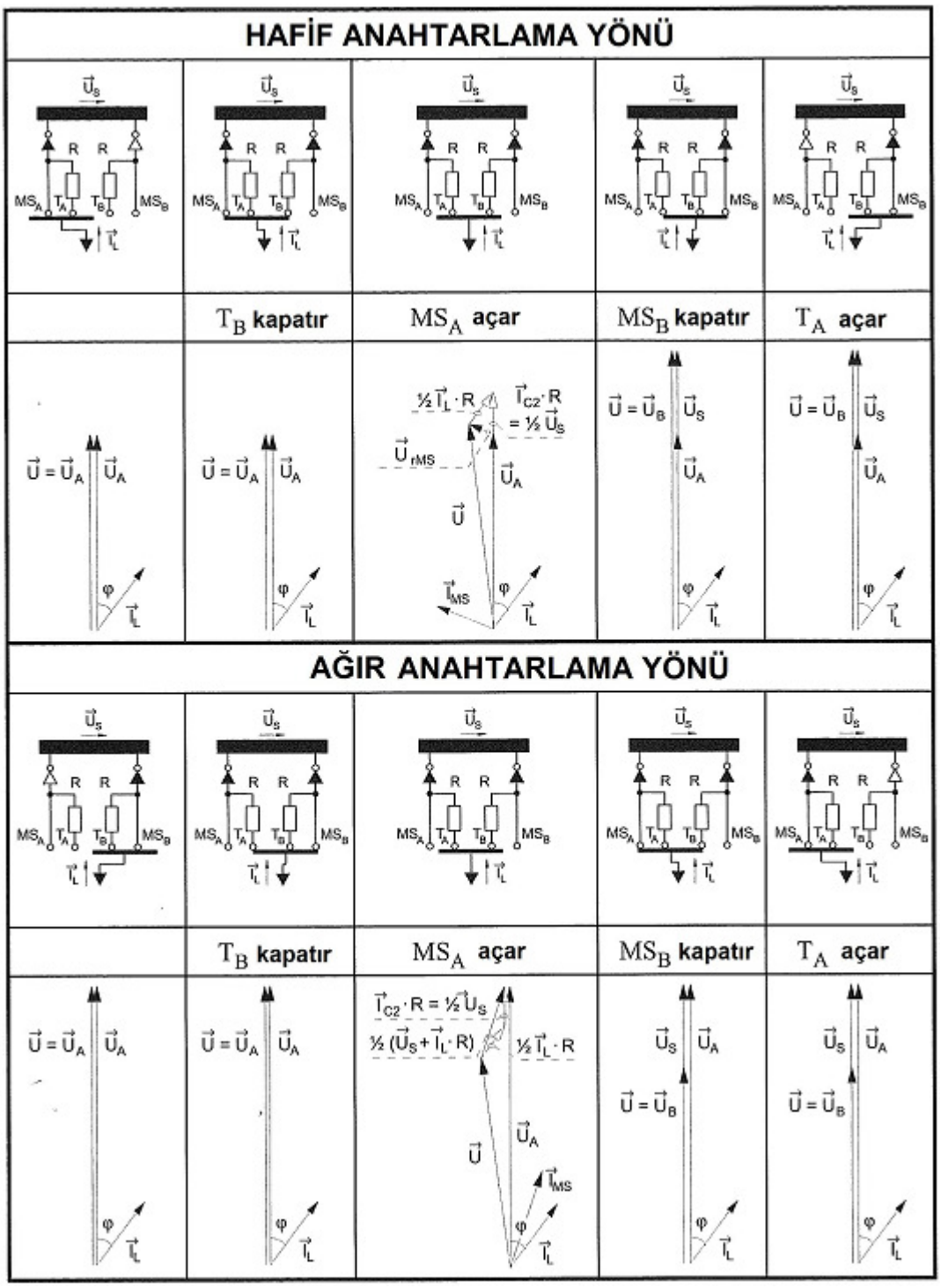
Simetrik flama peryotlu çalışmada 5 adımda gerçekleştirilen kademe değiştirme işleminin birinci adımı ikinci adımı ile ve dördüncü adımı beşinci adımı ile birleşir.



Şekil II.10 Asimetrik Flama Peryotlu Çalışma Çıkış Geriliminin Lokus Eğrisi.

Asimetrik flama peryotlu çalışmada ise 5 adımda gerçekleştirilen kademe değiştirme işleminin üçüncü, dördüncü ve beşinci adımları birleşir.

Tablo II.9 Simetrik Flama Peryotlu ve Aktarma Anahtarlı Çalışmada Kontakların Çalışma Sırasının, Fazör ve Bağlantı Diyagramlarının Gösterimi.



Tablo II.10 Bazı Ard Arda Yapılacak Kademe Değiştirme İşlemlerinde Aktarma Anahtarı Kontaklarının İşlem Yapma Sırasını Göstermektedir. (Simetrik Flama Peryotlu)

Anahtarlama işlemi	Kontakların işlem yapma sırası			
Kademe m'den m+1 'e	T_B kapatır	MS_A açar	MS_B kapatır	T_A açar
Kademe m+1'den m+2 'ye	T_A kapatır	MS_B açar	MS_A kapatır	T_B açar
Kademe m+2'den m+3 'ye	T_B kapatır	MS_A açar	MS_B kapatır	T_A açar
……	Ve böyle devam eder	Ve böyle devam eder	Ve böyle devam eder	Ve böyle devam eder
Kademe n'den n-1 'e	T_A kapatır	MS_B açar	MS_A kapatır	T_B açar
Kademe n-1'den n-2 'e	T_B kapatır	MS_A açar	MS_B kapatır	T_A açar
Kademe n-2'den n-3 'e	T_A kapatır	MS_B açar	MS_A kapatır	T_B açar
……	Ve böyle devam eder	Ve böyle devam eder	Ve böyle devam eder	Ve böyle devam eder

Tablo II.11 Simetrik Flama Peryotlu ve Aktarma Anahtarlı Çalışmada Ana Kontağın Çalışma Durumu.

Ana kontağın çalışma oranı				
Kontak	Anahtarlanan Akım	Toparlanma Gerilimi	İşlem Adedi	Yük Güç Faktörü Etkisi
MS_A	$\frac{\vec{U}_S}{R} + \vec{I}_L$	$\frac{1}{2} \cdot \left(\vec{U}_S + \vec{I}_L \cdot R\right)$	N/4	G.F.=1'de maksimum çalışma
	$\frac{\vec{U}_S}{R} - \vec{I}_L$	$\frac{1}{2} \cdot \left(\vec{U}_S - \vec{I}_L \cdot R\right)$	N/4	
MS_B	$\frac{\vec{U}_S}{R} + \vec{I}_L$	$\frac{1}{2} \cdot \left(\vec{U}_S + \vec{I}_L \cdot R\right)$	N/4	G.F.=1'de maksimum çalışma
	$\frac{\vec{U}_S}{R} - \vec{I}_L$	$\frac{1}{2} \cdot \left(\vec{U}_S - \vec{I}_L \cdot R\right)$	N/4	

Tablo II.12 Simetrik Flama Peryotlu ve Aktarma Anahtarlı Çalışmada Geçiş Kontağının Çalışma Durumu.

Geçiş Kontağı Çalışma Oranı				
Kontak	Anahtarlanan Akım	Toparlanma Gerilimi	İşlem Adedi	Yük Güç Faktörü Etkisi
T_A	$\frac{\vec{U}_S}{R}$	$\vec{U}_S$	N/2	Yok
T_B	$\frac{\vec{U}_S}{R}$	$\vec{U}_S$	N/2	Yok

II.1.2.4. Asimetrik Flama Peryotlu Çalışma (Seçici Anahtarlı)

Bu metodun tipik özelliği, kademe değiştirme işleminin gerçekleştirilmesi esnasında, bir yöne doğru çalışmada ana akımın ana kontaklardan aktarılmasından önce dolaşım akımları akmaya başlar. Diğer yöne çalışmada ise önce ana akım akar daha sonra dolaşım akımları akar. *Asimetrik Flama Peryotlu* kademe değiştiricilerde normalde seçici anahtar var ve yük akımı sadece bir yönde akmaktadır [1].

Tablo II.13'de *Asimetrik Flama Peryotlu* çalışmadaki seçici anahtarının çalışması esnasındaki değişik adımları ve her iki yöndeki anahtarlamalardaki fazör diyagramları gösterilmiştir. Ana anahtarlama kontağı bir yöndeki kademe değiştirmelerde ana akımı kesmek zorundadır, diğer yöndeki kademe değiştirmelerde ise kestiği akım değeri ana akımdan dolaşım akımı değeri çıkarılarak bulunan değerdir. Ana akımdan dolaşım akımı değeri kadar eksiğinin aktarıldığında güç faktörü ana anahtarlama kontağının çalışma oranını etkilemektedir. Maksimum akım aktarılması durumu bu iki akımın vektörel toplamının en büyük olduğu durumda gerçekleşmektedir. Bu seviyeye ulaşıldığı durum, iki akım arasındaki faz açısı 90^0 olduğu ve güç faktörünün de 0 olduğu durumdur. Geçiş kontağı bir yöndeki çalışmada dolaşım akımını kesmektedir. Ama diğer yöndeki kademe değiştirmelerde herhangi bir akım kesmemektedir. Dolaşım akımı değeri ise iki kademe arasındaki adım gerilimi ve geçiş direnci değerlerine bağlıdır.

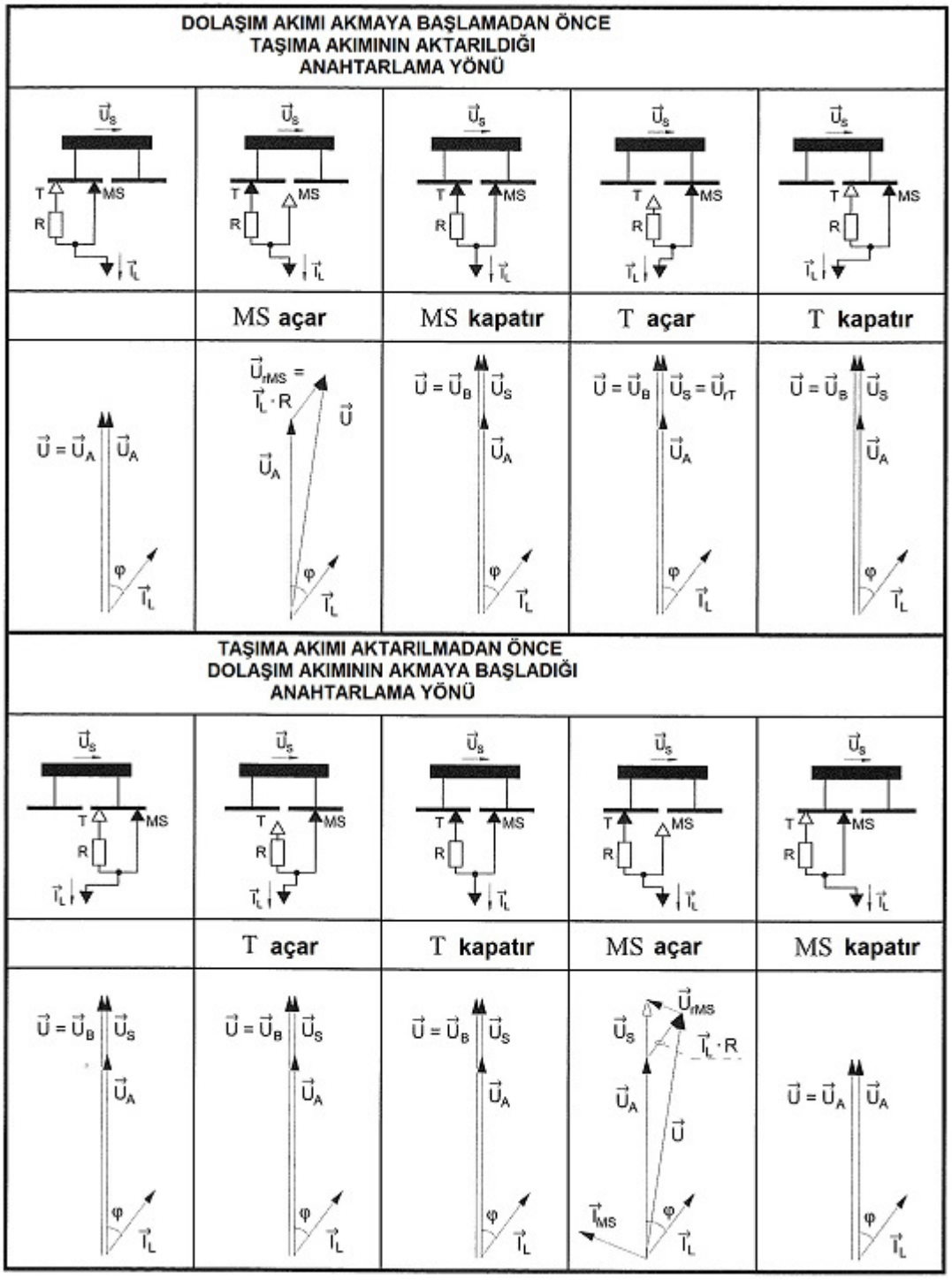
Şekil II.10'da kademe değiştirme işlemi esnasında transformatör çıkış gerilimi U'nun değişimi gösterilmiştir. Tablo II.13'deki fazör diyagramlarından türetilmiştir.

Tablo II.14' te yükte kademe değiştiricinin spir eklemek ve spir eksiltmek için her iki yönde gerçekleşen birbirini takip eden kademe değiştirmelerindeki seçici anahtarın kontaklarının çalışma sırası gösterilmektedir.

Ana anahtarlama kontaklarının çalışma oranı Tablo II.15'te ve geçiş kontaklarının çalışma oranı Tablo II.16'da verilmiştir. Bu tablolarda seçici anahtarın N adet işlem yapmasında her bir set kontağın ne kadar işlem yaptığı verilmiştir.

Ana anahtarlama kontaklarının ve geçiş kontaklarının yaptıkları işlem adetleri kademe değiştiricinin toplam işlem adetinin yarısı kadar olduğu ifade edilebilir.

Tablo II.13 Asimetrik Flama Peryotlu Seçici Anahtarlı Çalışmada Kontakların Çalışma Sırasının, Fazör ve Bağlantı Diyagramlarının Gösterimi.



Tablo II.14 Bazı Ard Arda Yapılacak Kademe Değiştirme İşlemlerinde Seçici Anahtarın Kontaklarının İşlem Yapma Sırasını Göstermektedir. (Asimetrik Flama Peryotlu)

Anahtarlama işlemi	Kontakların işlem yapma sırası			
Kademe m'den m+1 'e	MS açar	MS kapatır	T açar	T kapatır
Kademe m+1'den m+2 'ye	MS açar	MS kapatır	T açar	T kapatır
Kademe m+2'den m+3 'ye	MS açar	MS kapatır	T açar	T kapatır
……	Ve böyle devam eder	Ve böyle devam eder	Ve böyle devam eder	Ve böyle devam eder
Kademe n'den n-1 'e	T açar	T kapatır	MS açar	MS kapatır
Kademe n-1'den n-2 'e	T açar	T kapatır	MS açar	MS kapatır
Kademe n-2'den n-3 'e	T açar	T kapatır	MS açar	MS kapatır
……	Ve böyle devam eder	Ve böyle devam eder	Ve böyle devam eder	Ve böyle devam eder

Tablo II.15 Asimetrik Flama Peryotlu ve Seçici Anahtarlı Çalışmada Ana Kontağın Çalışma Durumu.

Ana kontağın çalışma oranı				
Kontak	Anahtarlanan Akım	Toparlanma Gerilimi	İşlem Adedi	Yük Güç Faktörü Etkisi
MS	$\vec{I}_L$	$\vec{I}_L \cdot R$	N/2	Yok
	$\frac{\vec{U}_S}{R} - \vec{I}_L$	$\vec{U}_S - \vec{I}_L \cdot R$	N/2	G.F.=0'de maksimum çalışma

Tablo II.16 Asimetrik Flama Peryotlu ve Seçici Anahtarlı Çalışmada Geçiş Kontağının Çalışma Durumu.

Geçiş Kontağı Çalışma Oranı				
Kontak	Anahtarlanan Akım	Toparlanma Gerilimi	İşlem Adedi	Yük Güç Faktörü Etkisi
T_A	$\frac{\vec{U}_S}{R}$	$\vec{U}_S$	N/2	Yok
	0	0	N/2	Yok

II.1.2.5. Çoklu Direnç Peryotlu İşlem (Aktarma Anahtarlı)

Bu tip kademe değiştirme işleminin kullanımı *bayrak peryotlu ve flama peryotlu* çalışmanın genişletilmesidir. Önceki paragraflarda ana anahtarlama kontaklardaki toparlanma gerilimi ve dolaşım akımlarını belirleyen unsurun geçiş dirençleri olduğu açıklanmıştı. İzin verilen adım gerilimi veya kesilebilecek akımın değerini yükseltmek için bu metod kullanılmaktdır.

Toparlanma gerilimini ve ana anahtarlama kontaklarındaki zorlanmayı azaltmak için küçük bir geçiş direnci kullanılmalıdır. Artan adım gerilimlerinde dolaşım akımını sınırlamak için geçiş direnci değerini arttırmak gerekecektir. Bu gereksinimler tek bir set geçiş direnci ile karşılanamamaktadır. Bu ihtiyaçları karşılamak için çoklu direnç olan aktarma anahtarlı kademe şalterleri dizayn edilmiştir.

Bu tip kademe şalterinde aktarma anahtarlarının her iki tarafında da birbirini takip eden iki adet geçiş direnci mevcuttur. Birinci geçiş direnci değeri küçüktür ve ana anahtarlama kontaklarındaki toparlanma gerilimini düşük tutmayı sağlar ve ikinci geçiş direnci değeri ise dolaşım akımı değerini küçük tutmak için büyük seçilir.

Tablo II.17'de çoklu direnç peryotlu çalışmada aktarma anahtarının çalışması esnasındaki değişik adımları, spir ekleme ve çıkarma durumlarında yani *hafif anahtarlama* ve *ağır anahtarlama* yönlerindeki fazör diyagramları gösterilmiştir. Aktarma anahtarının her iki tarafındaki birinci geçiş dirençlerinin ve ikinci geçiş dirençlerinin aynı değerde olduğu varsayılır.

Aktarma anahtarının başlama pozisyonunda olduğu durumda (ana kontaklar test edilmiyor) ana anahtarlama kontağı (MS_A) ve açan taraftaki iki adet geçiş kontağı (T_{1A} ve T_{2A}) kapalıdır. Ana anahtarlama kontağı geçiş kontaklarını by-pass eder ve ana akımı taşır. Ana anahtarlama kontağı açar ve I_L yük akımı paralel bağlanmış R_1 ve R_2 geçiş dirençlerinden geçer. Ana kontak ayrılmasından sonra akımın ilk sıfır değerinde ana akımı açar, oluşan arkın bastırılmasından sonra açan kontak M_S tarafındaki toparlanma gerilimi değeri aşağıdaki şekilde ifade edilir.

$$\vec{U}_{rMS} = \vec{I}_L \cdot \frac{R_1 \cdot R_2}{R_1 + R_2} \qquad \text{(II.11)}$$

Bir sonraki pozisyonda kapatan taraftaki T_2 kontağı (burada T_{2B}) kapanır. Ana akım açılan taraftaki R_1 ve R_2 geçiş dirençleri ve kapatan taraftaki R_2 geçiş dirençleri arasında paylaşılır. Bu durumda I_{C1} dolaşım akımı dolaşır. Dolaşım akımının değeri kademe değiştirmedeki adım gerilimine ve geçiş dirençlerinin değerlerine bağlıdır.

$$\vec{I}_{C1} = \frac{\vec{U}_S}{\frac{R_1 \cdot R_2}{R_1 + R_2} + R_2} = \frac{\vec{U}_S \cdot (R_1 + R_2)}{R_2 \cdot (2 \cdot R_1 + R_2)} \qquad \text{(II.12)}$$

Açan taraftaki T_1 geçiş kontağı (burada T_{1A}) kontak ayrılmasından sonra akımın sıfırdan geçtiği anda akımı açar. Kestiği akımın değeri kontağın üzerine düşen dolaşım akımına, yönüne bağlı olarak üzerine düşen ana akımın eklenmesi veya çıkarılması ile elde edilir. Burada kesilen akımın değeri geçiş dirençlerinde bölünmesiyle belirlenir.

$$\vec{I}_{T1} = \vec{I}_{C1} \cdot \left(\frac{R_2}{R_1 + R_2} \right) \pm \vec{I}_L \cdot \left(\frac{R_2}{R_1 + R_2} \right) \cdot \left\{ \frac{R_2}{\frac{R_1 \cdot R_2}{R_1 + R_2} + R_2} \right\} \qquad \text{(II.13a)}$$

( ) : Açan taraftaki R_1 ve R_2 geçiş dirençleri arasındaki akım dağılımı

{ } : Açan ve kapatan taraflar arasındaki akım dağılımı

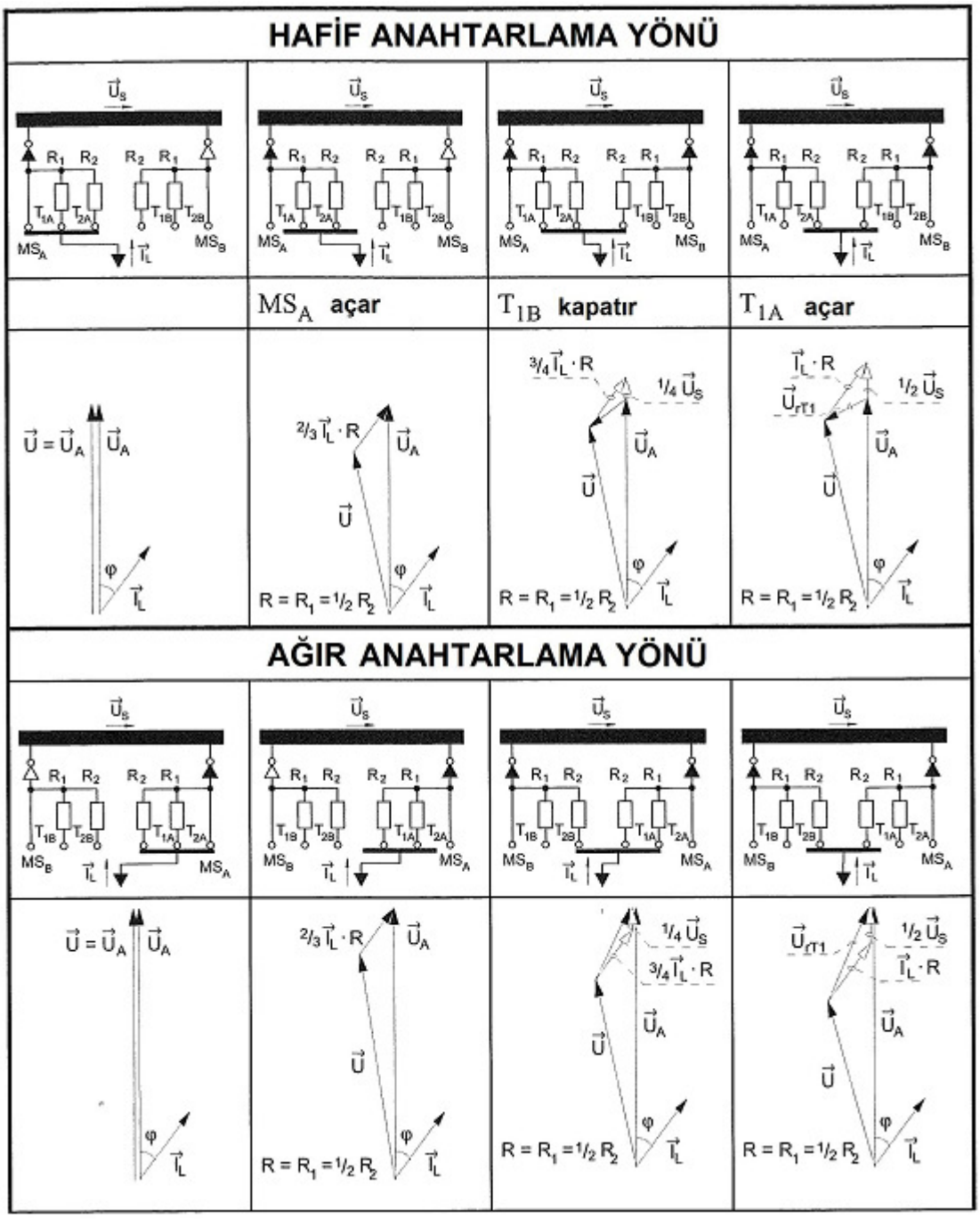
$$\vec{I}_{T1} = \frac{\vec{U}_S \cdot (R_1 + R_2)}{R_2 \cdot (2 \cdot R_1 + R_2)} \cdot \frac{R_2}{R_1 + R_2} \pm \vec{I}_L \cdot \frac{R_2}{2 \cdot R_1 + R_2} = (\vec{U}_S \pm \vec{I}_L \cdot R_2) \cdot \frac{1}{2 \cdot R_1 + R_2} \qquad \text{(II.13b)}$$

Açan taraftaki T_1 geçiş kontağındaki (burada T_{1A}) toparlanma gerilimi değeri, kapanan taraftaki R_2 geçiş direncinden akan akımın sebebiyet verdiği gerilim düşümüne eşittir. Dolaşım akımı I_{C2} 'nin arkının bastırılmasından sonra

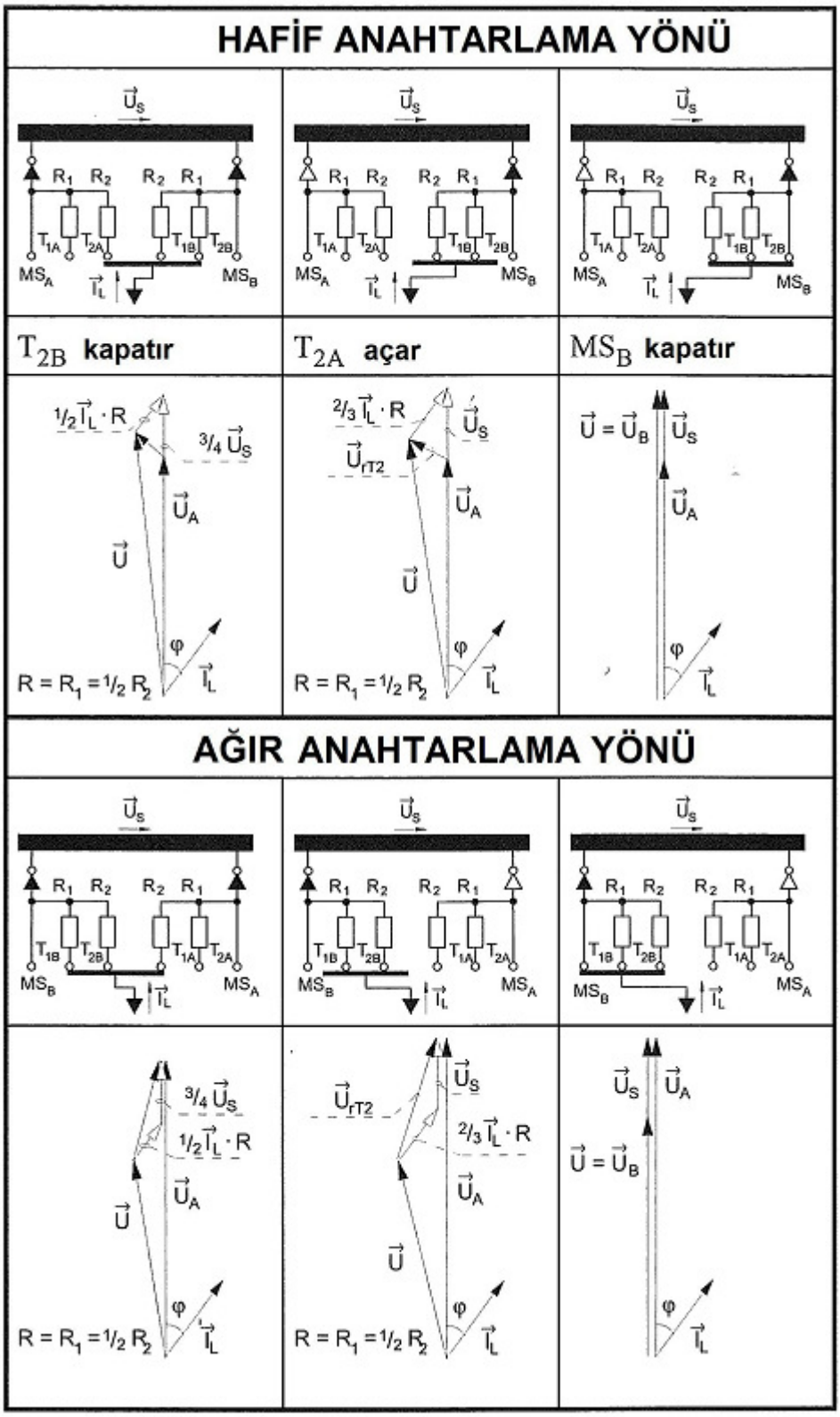
$$\vec{I}_{C2} = \frac{\vec{U}_S}{2 \cdot R_2} \qquad \text{(II.14)}$$

Açan taraftaki T_1 geçiş kontağındaki (burada T_{1A}) toparlanma gerilimi değeri (II.14) nolu denklemde verilmiştir.

Tablo II.17 Çoklu Direnç Peryotlu ve Aktarmalı Çalışmada Kontakların Çalışma Sırasının, Fazör ve Bağlantı Diyagramlarının Gösterimi.



Tablo II.17 (Devamı)



$$\vec{U}_{rT1} = \vec{I}_{C2} \cdot R_2 \pm \vec{I}_L \cdot \frac{R_2}{R_2 + R_2} \cdot R_2 = \left(\vec{U}_S \pm \vec{I}_L \cdot R_2\right) \cdot \frac{1}{2} \qquad \text{(II.15)}$$

Bir sonraki pozisyonda T_1 geçiş kontağı (burada T_{1B}) kapanır. Ana akım açılan taraftaki R_2 geçiş direnci ve kapatan taraftaki R_1 ve R_2 geçiş dirençleri arasında paylaşılır. Bu durumda dolaşım akımı şu şekilde ifade edilir.

$$\vec{I}_{C3} = \frac{\vec{U}_S}{R_2 + \frac{R_1 \cdot R_2}{R_1 + R_2}} = \frac{\vec{U}_S \cdot \left(R_1 + R_2\right)}{R_2 \cdot \left(2 \cdot R_1 + R_2\right)} = \vec{I}_{C1} \qquad \text{(II.16)}$$

Şimdi T_2 geçiş kontağı (burada T_{2A}) kontak ayrılmasından sonra akımın sıfırdan geçtiği anda akımı açar.

$$\vec{I}_{T2} = \vec{I}_{C3} \pm \vec{I}_L \cdot \frac{\frac{R_1 \cdot R_2}{R_1 + R_2}}{R_2 + \frac{R_1 \cdot R_2}{R_1 + R_2}} = \frac{\vec{U}_S \cdot \left(R_1 + R_2\right)}{R_2 \cdot \left(2 \cdot R_1 + R_2\right)} \pm \vec{I}_L \cdot \frac{R_1 \cdot R_2}{R_1 + R_2} \cdot \frac{\left(R_1 + R_2\right)}{R_2 \cdot \left(2 \cdot R_1 + R_2\right)}$$

$$\vec{I}_{T2} = \left(\vec{U}_S \pm \vec{I}_L \cdot \frac{R_1 \cdot R_2}{R_1 + R_2}\right) \cdot \frac{R_1 + R_2}{R_2 \cdot \left(2 \cdot R_1 + R_2\right)} \qquad \text{(II.17)}$$

Açan taraftaki T_2 geçiş kontağındaki (burada T_{2A}) toparlanma gerilimi değeri, adım gerilimine artı olarak veya eksi olarak gelen kapanan taraftaki paralel bağlı R_1 ve R_2 geçiş direncinden akan ana akımın sebebiyet verdiği gerilim düşümünün toplamına eşittir ve (II.18) nolu denklemdeki gibidir.

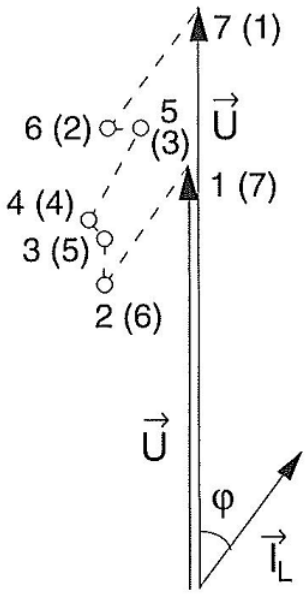
$$\vec{U}_{T2} = \vec{U}_S \pm \vec{I}_L \cdot \frac{R_1 \cdot R_2}{R_1 + R_2} \qquad \text{(II.18)}$$

Ana kontakların işlemi gözardı edersek, dolaşım akımı I_{C2}'nin arkı bastırıldıktan sonra kapatan taraftaki MS ana anahtarlama kontağının kapanması ile aktarma anahtarı işlemini tamamlamış olur.

Aynı yöndeki bir sonraki kademe değiştirme esnasında yukarıda belirtilen işlemler aynı sırada tekrarlanır, fakat bu kademe değiştirmede aktarma anahtarının B tarafı açan taraf, A tarafı ise kapatan taraf olacaktır. Sonuç olarak ard arda gelen kademe değiştirme işlemlerinde A ve B tarafları birbirinin yerini alır. Kontaklarda ortaya çıkan zorlanmalar her iki taraf için de aynıdır, ama sadece spir eklemeye veya çıkarmaya bağlı olarak anahtarlama yönüyle değişmektedir.

Anahtarlanan I_{T1} ve I_{T2} akımlarının denklemleri (II.13b) ve (II.17) nolu denklemlerde verilmiştir ve II.1.2.1 nolu bölümde anlatıldığı gibi güç faktöründen etkilendiği görülmektedir. Akım değerinin maksimum değere ulaşması "ağır anahtarlama" yönündeki kademe değiştirmede ve güç faktörünün 1 olduğu durumdadır.

Şekil II.11'de kademe değiştirme işlemi esnasında transformatör çıkış gerilimi U'nun değişimi gösterilmiştir. Tablo II.17'deki fazör diyagramlarından türetilmiştir. Bu çoklu direnç peryotlu aktarma anahtarının olduğu çalışma *Bayrak-Flama* peryodu olarak bilinir. Fazör diyagramlarından anlaşılacağı gibi güç faktörü sadece geçiş kontaklarında çalışma oranını etkileyecektir.



Şekil II.11 Bayrak-Flama Peryotlu Çalışma Çıkış Geriliminin Lokus Eğrisi.

Tablo II.18'de yükte kademe değiştiricinin spir eklemek ve spir eksiltmek için her iki yönde gerçekleşen birbirini takip eden kademe değiştirmelerindeki seçici anahtarın kontaklarının çalışma sırası gösterilmektedir.

Ana anahtarlama kontaklarının çalışma oranı Tablo II.19'da ve geçiş kontaklarının çalışma oranı Tablo II.20'de verilmiştir. Bu tablolarda aktarma anahtarın N adet işlem yapmasında her bir set kontağın ne kadar işlem yaptığı verilmiştir.

Aktarma anahtarının her iki tarafı birbirinin yerini aldıkları için, aktarma anahtarının MS_A ve MS_B (ana anahtarlama) kontaklarının yaptıkları işlem adetleri kademe değiştiricinin N adet toplam işlem adetinin yarısı kadar olduğu yani N/2 adet olduğu ifade edilebilir [1].

Aynı durum geçiş kontakları için geçerlidir. Ayrıca her bir kademe değiştirme işleminin "ağır anahtarlama" çalışması olmadığı göz önünde bulundurulmalıdır. Geçiş kontaklarının yapacağı N/2 adet işleminin N/4 adeti "ağır anahtarlama" işlemi, kalan N/4 adet işlemi de "hafif anahtarlama" işlemi olarak kabul edilebilir.

Tablo II.18 Bazı Ard Arda Yapılacak Kademe Değiştirme İşlemlerinde Aktarma Anahtarı Kontaklarının İşlem Yapma Sırasını Göstermektedir. (Çoklu Direnç Bayrak-Flama Peryotlu)

Anahtarlama işlemi	Kontakların işlem yapma sırası					
Kademe m'den m+1'e	MS_A açar	T_{1B} kapatır	T_{1A} açar	T_{2B} kapatır	T_{2A} açar	MS_B kapatır
Kademe m+1'den m+2'ye	MS_B açar	T_{1A} kapatır	T_{1B} açar	T_{2A} kapatır	T_{2B} açar	MS_A kapatır
Kademe m+2'den m+3'e	MS_A açar	T_{1B} kapatır	T_{1A} açar	T_{2B} kapatır	T_{2A} açar	MS_B kapatır
……	Ve böyle devam eder	Ve böyle devam eder	Ve böyle devam eder	Ve böyle devam eder	Ve böyle devam eder	Ve böyle devam eder
Kademe n'den n-1'e	MS_B açar	T_{1A} kapatır	T_{1B} açar	T_{2A} kapatır	T_{2B} açar	MS_A kapatır
Kademe n-1'den n-2'ye	MS_A açar	T_{1B} kapatır	T_{1A} açar	T_{2B} kapatır	T_{2A} açar	MS_B kapatır
Kademe n-2'den n-3'e	MS_B açar	T_{1A} kapatır	T_{1B} açar	T_{2A} kapatır	T_{2B} açar	MS_A kapatır
……	Ve böyle devam eder	Ve böyle devam eder	Ve böyle devam eder	Ve böyle devam eder	Ve böyle devam eder	Ve böyle devam eder

Tablo II.19 Çoklu Direnç Peryotlu ve Aktarma Anahtarlı Çalışmada Ana Kontağın Çalışma Durumu.

Ana kontağın çalışma oranı				
Kontak	Anahtarlanan Akım	Toparlanma Gerilimi	İşlem Adedi	Yük Güç Faktörü Etkisi
MS_A	$\vec{I}_L$	$\vec{I}_L \cdot \frac{R_1 \cdot R_2}{R_1 + R_2}$	N/2	Yok
MS_B	$\vec{I}_L$	$\vec{I}_L \cdot \frac{R_1 \cdot R_2}{R_1 + R_2}$	N/2	Yok

Tablo II.20 Çoklu Direnç Peryotlu ve Aktarma Anahtarlı Çalışmada Geçiş Kontağının Çalışma Durumu.

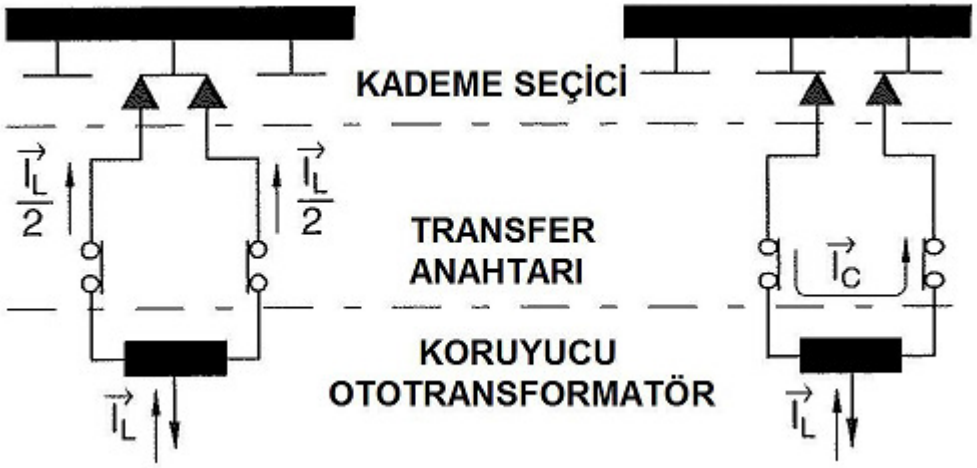
Geçiş Kontağı Çalışma Oranı				
Kontak	Anahtarlanan Akım	Toparlanma Gerilimi	İşlem Adedi	Yük Güç Faktörü Etkisi
T_{1A}	$\left(\vec{U}_S + \vec{I}_L \cdot R_2\right) \cdot \frac{1}{2 \cdot R_1 + R_2}$	$\frac{1}{2} \cdot \left(\vec{U}_S + \vec{I}_L \cdot R_2\right)$	N/4	G.F.=1'de maksimum çalışma oranı
	$\left(\vec{U}_S - \vec{I}_L \cdot R_2\right) \cdot \frac{1}{2 \cdot R_1 + R_2}$	$\frac{1}{2} \cdot \left(\vec{U}_S - \vec{I}_L \cdot R_2\right)$	N/4	
T_{2A}	$\left(\vec{U}_S + \vec{I}_L \cdot \frac{R_1 \cdot R_2}{R_1 + R_2}\right) \cdot \frac{R_1 + R_2}{R_2\left(2R_1 + R_2\right)}$	$\vec{U}_S + \vec{I}_L \cdot \frac{R_1 \cdot R_2}{R_1 + R_2}$	N/4	G.F.=1'de maksimum çalışma oranı
	$\left(\vec{U}_S - \vec{I}_L \cdot \frac{R_1 \cdot R_2}{R_1 + R_2}\right) \cdot \frac{R_1 + R_2}{R_2\left(2R_1 + R_2\right)}$	$\vec{U}_S - \vec{I}_L \cdot \frac{R_1 \cdot R_2}{R_1 + R_2}$	N/4	
T_{1B}	$\left(\vec{U}_S + \vec{I}_L \cdot R_2\right) \cdot \frac{1}{2 \cdot R_1 + R_2}$	$\frac{1}{2} \cdot \left(\vec{U}_S + \vec{I}_L \cdot R_2\right)$	N/4	G.F.=1'de maksimum çalışma oranı
	$\left(\vec{U}_S - \vec{I}_L \cdot R_2\right) \cdot \frac{1}{2 \cdot R_1 + R_2}$	$\frac{1}{2} \cdot \left(\vec{U}_S - \vec{I}_L \cdot R_2\right)$	N/4	
T_{2B}	$\left(\vec{U}_S + \vec{I}_L \cdot \frac{R_1 \cdot R_2}{R_1 + R_2}\right) \cdot \frac{R_1 + R_2}{R_2\left(2R_1 + R_2\right)}$	$\vec{U}_S + \vec{I}_L \cdot \frac{R_1 \cdot R_2}{R_1 + R_2}$	N/4	G.F.=1'de maksimum çalışma oranı
	$\left(\vec{U}_S - \vec{I}_L \cdot \frac{R_1 \cdot R_2}{R_1 + R_2}\right) \cdot \frac{R_1 + R_2}{R_2\left(2R_1 + R_2\right)}$	$\vec{U}_S - \vec{I}_L \cdot \frac{R_1 \cdot R_2}{R_1 + R_2}$	N/4	

II.2 REAKTÖR TİPİ YÜKTE KADEME DEĞİŞTİRİCİ

Reaktör Tipi yükte kademe değiştirciler ayrıca *Reaktans Tipi* olarak da adlandırılırlar ve ark anahtarlarına göre iki prensibe göre imal edilmektedirler. Birinci konseptte koruyucu ototransformatörü olan iki tane ark anahtarı mevcuttur, burada ototransformatör geçiş empedansı gibi davranmaktadır ve orta kademede reaktör gibi akım terminaline yerleştirilmiştir. Reaktör tipi YKD'si Şekil II.12'de verilmiştir [1]. Bu tipteki bir kademe değiştirici seçici anahtar olarak veya ark anahtarı (aktarma anahtarı) olarak dizayn edilmektedir ve bir kademe seçicisi mevcuttur. Aktarma anahtarları alışılagelmiş kontaklar veya vakumlu kesiciler ile üretilmiştir. Geçiş esnasında devreye giren koruyucu ototransformatörler geçiş dirençleri kadar enerji tüketmezler [3]. Reaktör tipi YKD'ler kompartıman tipi olmaktadır [4].

Yüksek Hızlı Direnç Tipi ve Reaktör Tipinin tarihi farklılığı olarak belirtilen kesme esnasındaki kontak hızlarının farklılığı, bugün için geçerliliğini yitirmiştir. Vakum kesicileri olan *Reaktör Tipi* yükte kademe değiştiricilerinin açma kontakları özellikle günümüzde *Direnç Tipi* yükte kademe değiştiricilerikiyle karşılaştırılabilir

hızlardadır. Başlangıçta *reaktör tipi* yükte kademe değiştiricileri transformatörlerin alçak gerilim tarafı için dizayn edilmiştir. Bu nedenden dolayı yüksek akımları kesmek, bağlamak ve taşımak üzere boyutlandırılmışlardır. Günümüzde bu tarz uygulamalara Kuzey Amerika'da karşılaşılmaktadır.



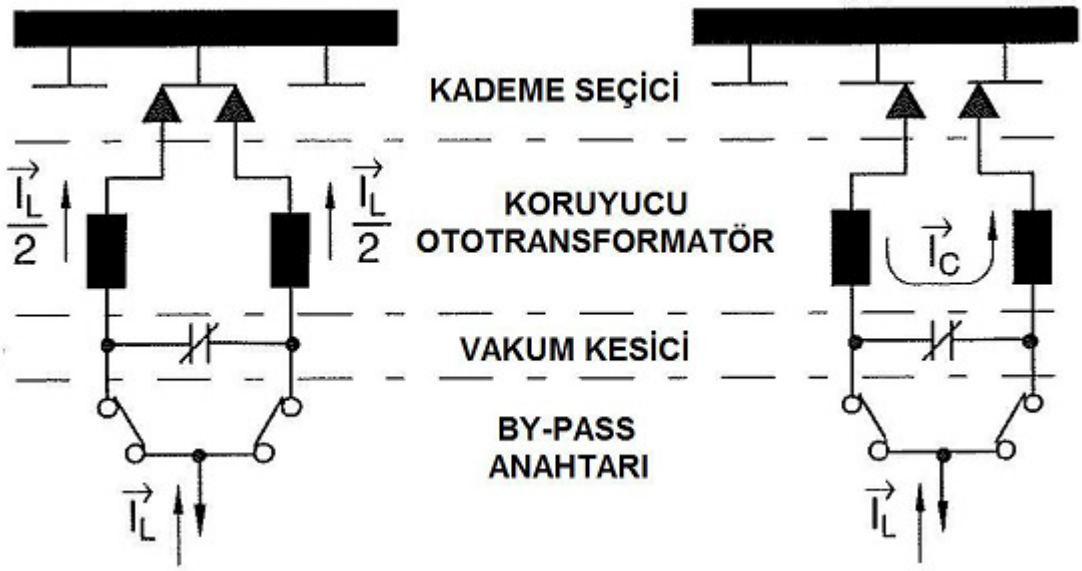
Şekil II.12 Ark Anahtarı ve Kademe Seçicisi Olan Reaktans Tipi Yükte Kademe Değiştiricisinin Prensip Şemasıdır. (Köprü Olduğu ve Köprü Olmadığı Durumlar)

Bu anahtarlama prensibine göre bir kademe değiştirme işlemi üç adımda gerçekleştirilmelidir. Kademe değiştirici bir motor sürücülü mekanizma ile çalıştırılmaktadır. Bu işlemi yaparken aktarma anahtarının açma ve kapatması işlemi ve kademe şeçicisini uygun pozisyonda bırakabilmeyi bir dişli vasıtası ile yapmaktadır.

Bir kademeden diğer kademeye geçerken ilk önce aktarma anahtarı yayla çalışan bir mekanizma vasıtası ile çalışır ve akımı açar. Daha sonra uygun kademe şeçicisi diğer kademeye geçer. Sonra aktarma anahtarı kapanır.

Reaktör tipi YKD'lerdeki koruyucu ototransformatörler nominal akımı ve dolaşım akımını taşıyabilecek seviyede olmalıdır. Transformatörün boşta akım değerini ve gürültüsünü arttırırlar [3].

Seçici anahtar dizaynı kullanılırsa bu üç adım aynı anda gerçekleşmektedir. Bu aynı zamanda *Arklı Kademe Anahtarı* olarak da anılır. *Arklı Kademe Anahtarı* akımı kesme, sonraki kademeyi seçme ve akımı tekrar bağlama işlemlerini birleştirmektedir [1].



Şekil II.13 Vakum Kesicisi, By-Pass Anahtarı ve Kademe Seçicisi Olan Reaktans Tipi Yükte Kademe Değiştiricisinin Prensip Şemasıdır. (Köprü Olduğu ve Olmadığı Durumlar)

İkinci prensip Şekil II.13'te görüldüğü gibi bir tane vakum kesicisi kullanmaktadır. Burada vakum kesici ark anahtarı ve iki by-pass anahtarı vazifesi görmektedir. Koruyucu ototransformatör (geçiş empedansı) iki kısma bölünmeli ve her bir yarısı kademe seçicisi ile vakum kesicisi arasına yerleştirilmelidir. Kademe değiştirici yine bir motor sürücülü mekanizma ile çalıştırılmaktadır ve bu işlemi bir dişli vasıtası ile yapmaktadır. By-pass anahtarı ve vakum kesicisi açma ve kapatma işlemlerinin gerçekleşmesinden sonra kademe seçicisi uygun pozisyonda olmalıdır.

Bir kademeden diğer kademeye giderken, bir by-pass anahtarı açar ve akımı vakum kesicisi yoluna yönlendirir. İkinci by-pass anahtarı kapalı durumda bekler. Kademe seçici diğer kademeye geçtiği zaman vakum kesicisi yayla çalışan mekanizma ile açar. Vakum kesici yay kuvvetiyle kapattıktan sonra, by-pass anahtarı kapatır ve vakum kesiciyi paraleller.

II.2.1 Anahtarlama Sırası

IEEE C57.131 Standartına göre üç tip yükte kademe değiştiricisi veya kademe değiştirme işleminin yapılması için 3 tip metod mevcuttur [16].

1-) Arklı Kademe Anahtarı,

2-) Ark anahtarı ve kademe seçicisi

3-) Vakum kesicisi

Yükte kademe değiştiricilerin Şekil II.14 ve Şekil II.16'da prensip dizaynları ve anahtarlama sıraları gösterilmiştir. Farklı anahtarlar ve kontaklar aşağıdaki gibi tanımlanmıştır.

Ark Anahtarı (Aktarma anahtarı) ($TFS_{A,B}$):

Seçilen devrelerdeki akımı taşımak, bağlamak ve kesmek işlemlerinin gerçekleştirilmesi için olan kademe seçici ile anahtarlama elemanının arasında bir bağlantı vardır. Anahtarların kontakları genellikle bakır-tungsten karışımından yapılmıştır.

Anahtarlama elemanı olarak vakum kesicilerin kullanımı da mümkündür.

Arklı Kademe Anahtarı ($ATS_{A,B}$):

Akım taşıyabilen, kademeyi seçerken akımı kesip bağlayabilen bir anahtarlama elemanıdır. Bu eleman hem ark anahtarı hem de kademe seçicinin görevini yapabilmektedir. Bu anahtarın kontakları genellikle bakır-tungsten karışımından yapılmıştır.

By-Pass Kontakları ($BYC_{A,B}$):

Ana akımı taşıyabilecek bir set olarak vardır ve akımı aktarma anahtarına geçirir. Örnek olarak vakum kesici verilebilir. Bu kontaklar genellikle bakırdan yapılmaktadır. Anahtarlamanın ilk başlagıcındaki kontak bölümü bakır-tungsten karışımlıdır.

II.2.1.1. Ark Kontaklı ve Kademe Seçicili Yükte Kademe Değiştiriciler

Şekil II.14'te ark kontakları ve kademe seçicisi olan yükte kademe değiştiricinin bir köprüsüz kademeden diğer köprüsüz kademeye geçtiği esnadaki anahtarlama sıraları verilmiştir [1].

1.Adım : Şekil II.14'ün a şıkkında görüldüğü gibi kademe seçici kademe 4'tedir. Bu bir köprüsüz kademedir. I_L yük akımı A ve B yolları tarafından yarı yarıya paylaşılmıştır.

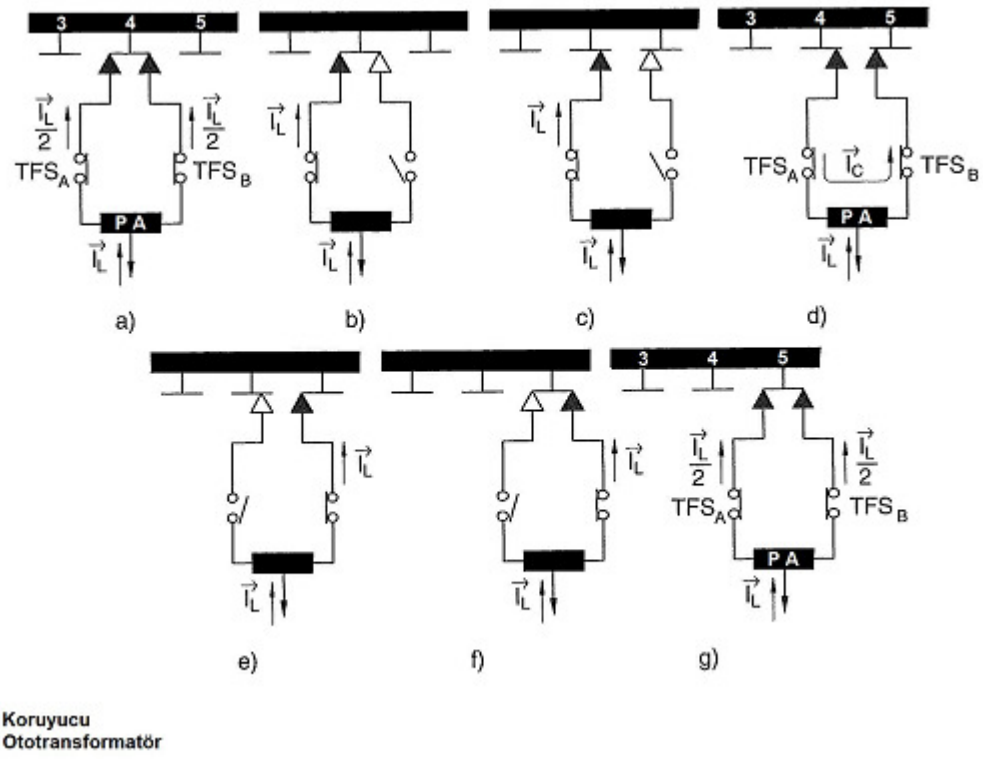
2.Adım : Şekil II.14'ün b şıkkında görüldüğü gibi anahtarlama sırası TFS_B ark anahtarının açması ile başlar. Kontak ayrılmasından sonra akımın sıfırdan geçtiği ilk anda akım kesilir. Bu durumda ana akım sadece A yolundan akmaktadır.

3.Adım : Şekil II.14'ün c şıkkında görüldüğü gibi B yolunun kademe seçicisi yüksüz olarak kademe 4'ten kademe 5'e hareket eder.

4.Adım : Şekil II.14'ün d şıkkında görüldüğü gibi kademe seçicisinin işlemini tamamlamasından sonra TFS_B aktarma anahtarı tekrar kapatır. Ana akım yine A ve B yolları tarafından paylaşılır. Her iki kademe seçici sargının değişik kademelerine bastığı için I_C dolaşım akımı da akmaktadır.

5.Adım : Bir sonraki kademe değiştirme işlemi Şekil II.14'ün e şıkkında görüldüğü gibi TFS_A ark anahtarının açması ile başlar. Kontak ayrılmasından sonra akımın sıfırdan geçtiği ilk anda akım kesilir ve ana akım sadece B yolundan akmaktadır.

6.Adım ve 7. Adım : Şekil II.14'ün f ve g şıklarında görüldüğü gibi A yolunun kademe seçicisi yüksüz şekilde sonraki kademe olan 5'e hareket eder ve TFS_A 'nın tekrar kapatmasıyla anahtarlama işlemi tamamlanır. Ana akım A ve B yolları tarafından paylaşılır. Bu pozisyon yine bir köprüsüz bir pozisyondur.



PA : Koruyucu
Ototransformatör

Şekil II.14 Ark Anahtarlı ve Kademe Seçicisi olan Reaktans Tipi Yükte Kademe Değiştiricinin Prensip Anahtarlama Sırası.
a: Kademe 4'te köprüsüz pozisyon
d: Kademe 4 ile 5 arasında köprülü pozisyon
g: Kademe 5'te köprüsüz pozisyon

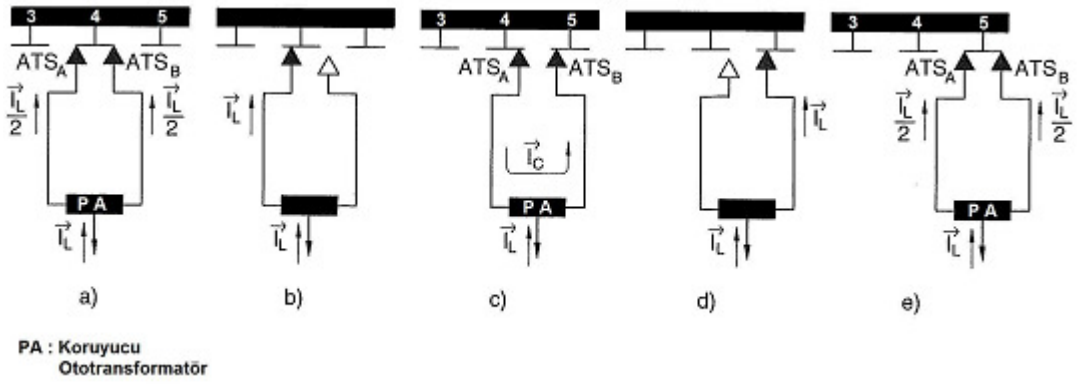
I_C dolaşım akımının değerini etkileyen unsurlar U_S (adım gerilimi) ve koruyucu ototransformatörün Z empedansıdır ve (II.19) nolu denklemde verilmiştir. Genellikle I_C dolaşım akımının değeri I_L ana akımın değerinin yüzdesi olarak verilmektedir.

$$\left|\vec{I}_C\right| = \left|\frac{\vec{U}_S}{Z}\right| = \frac{pa}{100\%} \cdot \left|\vec{I}_L\right| \qquad \text{(II.19)}$$

Dolaşım akımı adım gerilimini 90 derece geriden takip etmektedir. Bu pozisyon genellikle köprülü pozisyon olarak adlandırılır ve servis pozisyonudur.

II.2.1.2. Arklı Kademe Anahtarlı Yükte Kademe Değiştirici

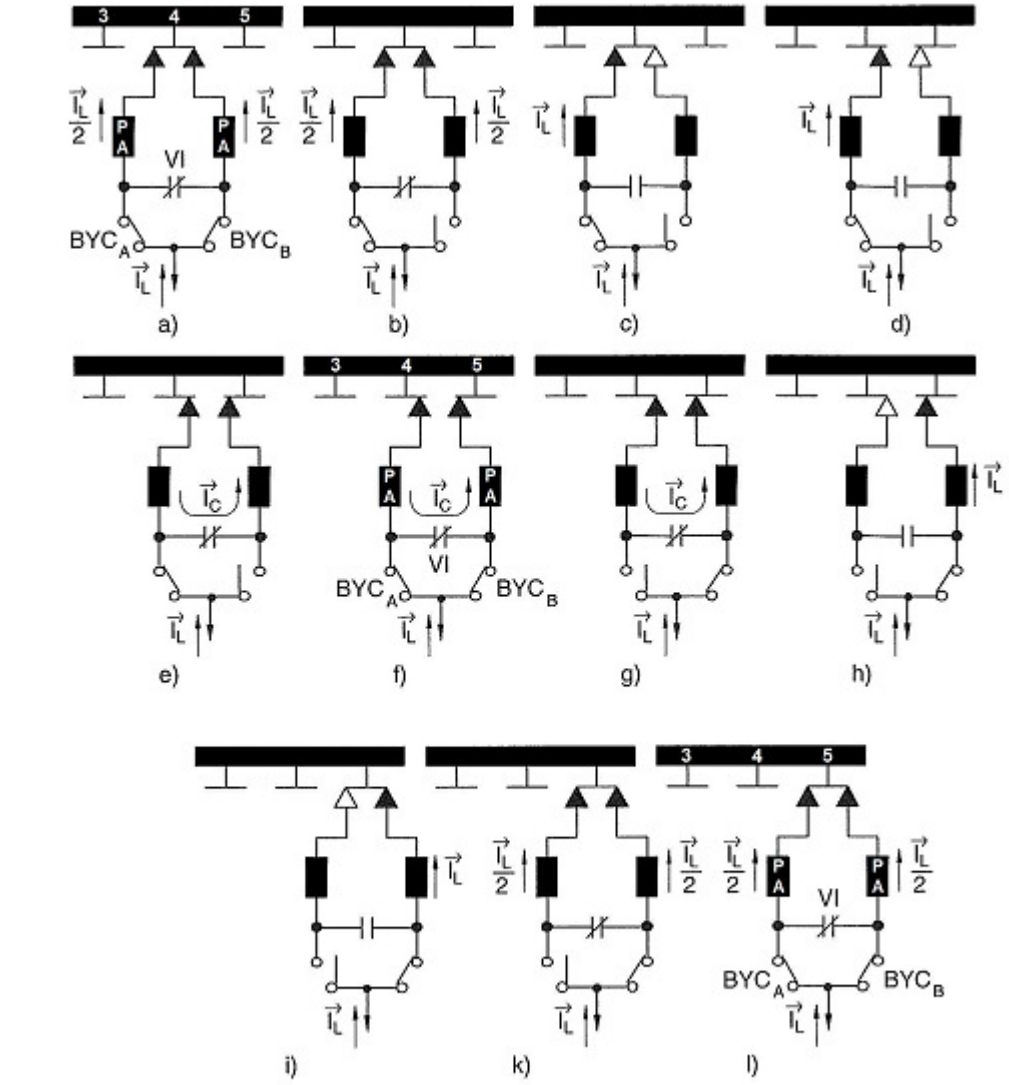
Şekil II.15'te arklı kademe anahtarlı yükte kademe değiştiricinin köprüsüz bir pozisyondan bir sonraki köprüsüz pozisyona geçişinin anahtarlama sırası gösterilmektedir. Ark kontakları ve kademe seçicisi olan yükte kademe değiştiricisinde üç aşamada gerçekleştirilen akımı kesmek, sonraki kademeyi seçmek ve akımı bağlamak işlemi arklı kademe değişitirici ile bir defada tamamlanır.



Şekil II.15 Arklı Kademe Anahtarlı Reaktans Tipi Yükte Kademe Değiştiricinin Prensip Anahtarlama Sırası.
a: Kademe 4'te Köprüsüz Pozisyon
c: Kademe 4 ile 5 Arasında Köprülü Pozisyon
e: Kademe 5'te Köprüsüz Pozisyon

II.2.1.3. Vakum Kesicili Yükte Kademe Değiştirici

Vakum kesicilerin yükte kademe değiştircileri tekniğinde kullanılmaya başlaması ile küçük bir kontak kaplama ile büyük sayıda işlem yapabilme avantajı gelmiştir. Bu dizaynda bu avantaja ek olarak yağ arkla temas etmemesinden dolayı karbonlaşma da olmamaktadır.



Şekil II.16 Vakum Kesicili ve Kademe Seçicili Reaktans Tipi Yükte Kademe Değiştiricinin Prensip Anahtarlama Sırası.

a: Kademe 4'te köprüsüz pozisyon

d: Kademe 4 ile 5 arasında köprülü pozisyon

g: Kademe 5'te köprüsüz pozisyon

Vakum kesicili yükte kademe değiştiricilerde anahtarlama işlemi daha fazla adımda gerçekleştiği Şekil II.16'da görüldüğü gibidir [1].

1.Adım : Şekil II.16'nın a şıkkında görüldüğü gibi köprüsüz bir pozisyon olan Kademe 4'te başlar.

2.Adım : Şekil II.16'nın b şıkkında görüldüğü gibi ilk önce BYC_B by-pass kontağı açar. Bu işlem esnasında ana akım vakum kesici yoluna yönlendirilir.

3.Adım : Şekil II.16'nın c şıkkında görüldüğü gibi daha sonra kontak ayrımından sonra akım sıfırdan ilk geçtiği anda vakum kesici açar ve akımı açar. Ana akım bu esnada sadece A yolundan akar.

4.Adım ve 5.Adım: Şekil II.16'nın d ve e şıklarında görüldüğü gibi kademe seçici yüksüz şekilde bir sonraki kademeye hareket eder ve vakum kesici tekrar kapatır.

6.Adım : Şekil II.16'nın f şıkkında görüldüğü gibi Vakum kesicinin tekrar kapatması ile dolaşım akımı akmaya başlar. BYC_B by-pass kontağının tekrar kapatması ile köprülü pozisyona ulaşılmış olur. Bu esnada dolaşım akımı vakum kesici yolu (%30 gibi) ve by-pass kontakları (% 70 gibi) arasında paylaşılır. Bu tip yükte kademe değitiricilerde köprülü pozisyonda işletme pozisyonudur.

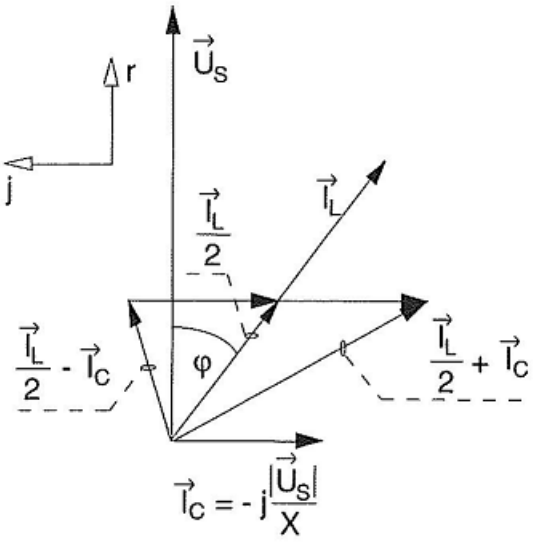
7. , 8. , 9. , 10. ve 11. Adımlar : Anahtarlama sırasının devamı bir sonraki köprüsüz pozisyona biraz önce anlatıldığı gibi aynı şekilde geçilir, fakat bu sefer A yolu akımı kesmek durumunda olacaktır. İlgili resimleri Şekil II.16'nın g, h, j, k ve l şıklarında görülmektedir.

II.2.2 Anahtarlama Kontaklarında Çalışma Oranı

Reaktans Tipi yükte kademe değiştiricilerde anahtarlama kontaklarının çalışma oranı kademe değiştirme işleminde kullanılan metoda bağlı olarak değişmektedir. Yukarıda anlatıldığı gibi bu amacı gerçekleştirmek için değişik temel metodlar mevcuttur.

Bu metodların hepsinin de ortak yönü köprülü pozisyon esnasında akan I_C dolaşım akımının adım gerilim ile arasındaki faz açısı 90 derecedir, bunun da sebebi koruyucu ototransforamtörün Z=jX empedansıdır. Köprülü pozisyon esnasında I_L ana akım iki akım yolu tarafından paylaşılmaktadır. Bu gerçek kademe değiştirme işlemi esnasında anahtarlanması gereken sonuç akımı içerisinde dikkkate alınır ve Şekil II.17'de gösterilmiştir. Şekil II.13'ten ve bu şekilden anahtarlama kontaklarının çalışma oranı üzerinde güç faktörünün etkisi görülmektedir ve güç

faktörünün 0 yani faz açısının 90 derece olduğu durumda anahtarlanan akım maksimum değerini almaktadır. Gerçek değerler güç faktörünün yani faz kaymasının 90 derece ilerde veya geride olması durumlarının her ikisinde de aynıdır.



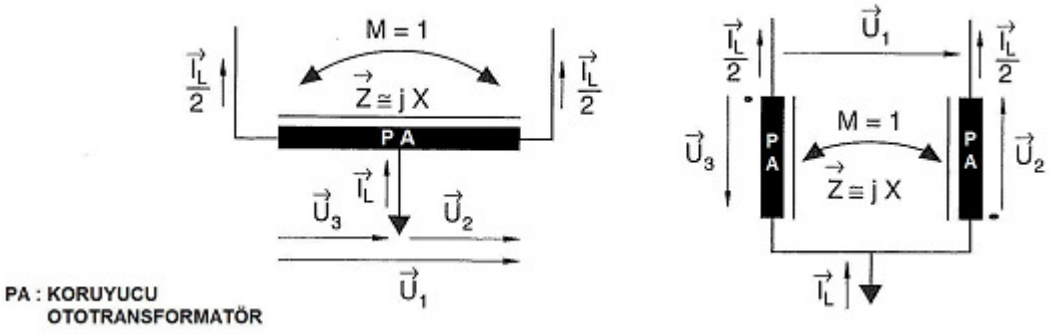
Şekil II.17 Anahtarlama Kontaklarındaki Akımların Fazör Diyagramları.

Anahtarlama kontaklarının çalışma oranını değerlendirmeden önce bazı temel tanımlamalar yapılmalıdır. Yukarıda belirtilen anahtarlama sıralamalarından koruyucu ototransformatörün üç değişik durumu için bölünen akımlardan dolayı anahtarlama elemanlarının çalışma oranının etkilendiği sonucunu çıkarabiliriz.

$$\left|\frac{\vec{I}_L}{2} + \vec{I}_C\right| = \left|\frac{\vec{I}_L}{2} + \frac{\vec{U}_S}{jX}\right| = \sqrt{\left(\left|\frac{\vec{I}_L}{2} \cdot Cos\varphi\right|\right)^2 + \left(\left|\frac{\vec{I}_L}{2} \cdot Sin\varphi - \frac{\vec{U}_S}{X}\right|\right)^2} \qquad \text{(II.20)}$$

Reaktörün Z empedansı ototransformatördeki spir oranının karesi ile orantılıdır. Reaktörün yarı empedansı Z empedansının dörtte bir değerindedir.

Akım ve gerilim arasındaki ilişki tamamen değişik anahtarlama prensiplerinden bağımsızdır ve bu nedenle genellikle kullanılan koruyucu ototransformatörün yapılabilen iki tip dizaynından bağımsızdır. Bu iki tip dizayn, merkez-kademeli reaktör ve iki münferit sargılı reaktör. M manyetik kuplajı değeri 1'e eşittir. Şekil II.18'de yükte kademe değiştiricilerin köprüsüz pozisyonunda her iki tip koruyucu ototransformatörde akımların bölünmesini göstermektedir. Şekil II.14'ün a şıkkı ile Şekil II.16'nın a şıkkını karşılaştıralım. Sonuç denklemleri aşağıdaki (II.21a), (II.21b) ve (II.21c) nolu denklemlerde gösterilmiştir.



Şekil II.18 Köprüsüz Pozisyonda İken Koruyucu Ototransformatörde Akımların Bölünmesi.

$$\vec{U}_2 = \frac{\vec{I}_L}{2} \cdot \frac{jX}{4} + M \cdot \vec{U}_3 = \frac{\vec{I}_L}{2} \cdot \frac{jX}{4} - 1 \cdot \frac{\vec{I}_L}{2} \cdot \frac{jX}{4} = 0 \qquad \text{(II.21a)}$$

$$\vec{U}_3 = -\frac{\vec{I}_L}{2} \cdot \frac{jX}{4} + M \cdot \vec{U}_2 = -\frac{\vec{I}_L}{2} \cdot \frac{jX}{4} + 1 \cdot \frac{\vec{I}_L}{2} \cdot \frac{jX}{4} = 0 \qquad \text{(II.21b)}$$

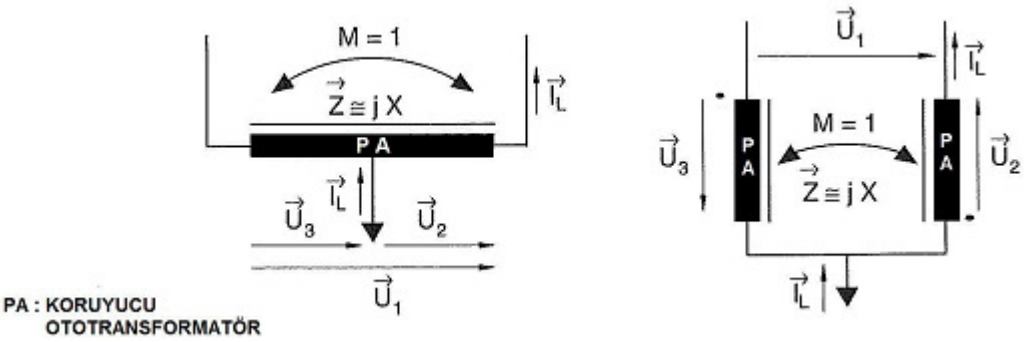
$$\vec{U}_1 = \vec{U}_2 + \vec{U}_3 = 0 \qquad \text{(II.21c)}$$

Şekil II.19'da her iki tip koruyucu ototransformatörlü durumda ana akımın yükte kademe değiştiricilerde sadece bir tarafından aktığın da akımların bölünmesini göstermektedir. Şekil II.14'ün b şıkkı ile Şekil II.15'in b şıkkını Şekil II.16'nın c şıkkı ile karşılaştıralım. Sonuç gerilimleri (II.22a), (II.22b) ve (II.22c) nolu denklemlerde gösterilmiştir.

$$\vec{U}_2 = \vec{I}_L \cdot \frac{jX}{4} + M \cdot \vec{U}_3 = \vec{I}_L \cdot \frac{jX}{4} + 0 = \vec{I}_L \cdot \frac{jX}{4} \qquad \text{(II.22a)}$$

$$\vec{U}_3 = 0 + M \cdot \vec{U}_2 = 0 + 1 \cdot \vec{I}_L \cdot \frac{jX}{4} = \vec{I}_L \cdot \frac{jX}{4} 0 \qquad \text{(II.22b)}$$

$$\vec{U}_1 = \vec{U}_2 + \vec{U}_3 = 2 \cdot \left(\vec{I}_L \cdot \frac{jX}{4} \right) \qquad \text{(II.22c)}$$



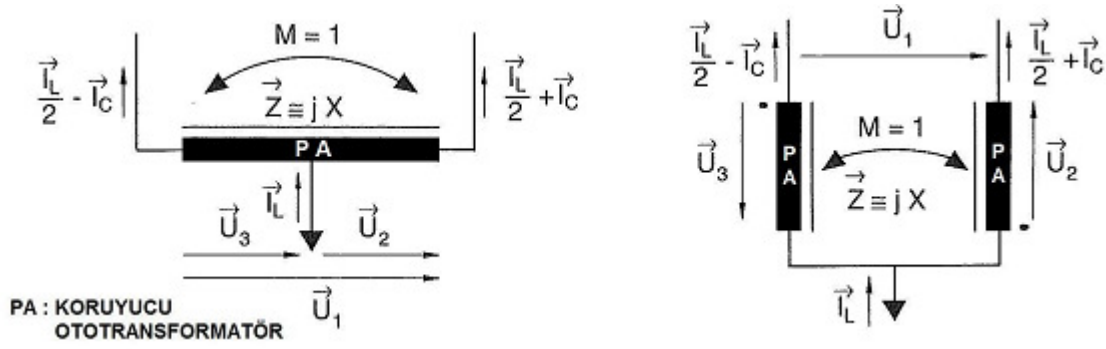
Şekil II.19 Bir Tarafın Açtığı Esnada Koruyucu Ototransformatörde Akımların Bölünmesi.

Şekil II.20'de yükte kademe değiştiricilerin köprülü pozisyonunda her iki tip koruyucu ototransformatörde akımların bölünmesini göstermektedir. Şekil II.14'ün d şıkkı, Şekil II.15'in c şıkkı ile Şekil II.16'nın f şıkkını karşılaştıralım. Sonuç gerilimleri (II.23a), (II.23b) ve (II.23c) nolu denklemlerde gösterilmiştir.

$$\vec{U}_2 = \left(\frac{\vec{I}_L}{2} + \vec{I}_C\right)\cdot\frac{jX}{4} + M\cdot\vec{U}_3 = \left(\frac{\vec{I}_L}{2} + \vec{I}_C\right)\cdot\frac{jX}{4} - 1\cdot\left(\frac{\vec{I}_L}{2} - \vec{I}_C\right)\cdot\frac{jX}{4} = \vec{I}_C\cdot\frac{jX}{4} \qquad \text{(II.23a)}$$

$$\vec{U}_3 = -\left(\frac{\vec{I}_L}{2} - \vec{I}_C\right)\cdot\frac{jX}{4} + M\cdot\vec{U}_2 = -\left(\frac{\vec{I}_L}{2} - \vec{I}_C\right)\cdot\frac{jX}{4} + 1\cdot\left(\frac{\vec{I}_L}{2} + \vec{I}_C\right)\cdot\frac{jX}{4} = \vec{I}_C\cdot\frac{jX}{4} \qquad \text{(II.23b)}$$

$$\vec{U}_1 = \vec{U}_2 + \vec{U}_3 = 2\cdot\left(\vec{I}_C\cdot\frac{jX}{2}\right) = \vec{I}_C\cdot jX \qquad \text{(II.23c)}$$



Şekil II.20 Köprülü Pozisyonda İken Koruyucu Ototransformatörde Akımların Bölünmesi.

II.2.2.1. Ark Anahtarlı ve Kademe Seçicili Yükte Kademe Değiştiriciler

Şekil II.12'de ark anahtarlı ve kademe seçicili olan "reaktans tipi" yükte kademe değiştiricilerin işlem adımları gösterilmiştir. Bu gösterimde anahtarlama şekilleri ve transformatörün çıkış gerilim şekilleri bulunabilir.

Şekil II.14'te tüm anahtarlama sırası gösterilmiştir. Şekilde verilen örnekte köprüsüz pozisyonda olan Kademe 4'ten diğer bir köprüsüz pozisyon olan Kademe 5'e yapılan kademe değiştirme işlemi ve bunun tam tersi bir kademe değişikliği olan Kademe 5'ten Kademe 4'e geçiş te gösterilmiştir.

Köprüsüz pozisyon için akım dağılımı ve gerilimler Şekil II.18'de, ilgili denklemeler ise (II.21a), (II.21b) ve (II.21c) nolu denklemlerde verilmiştir. Köprüsüz pozisyon Kademe 4'ten, Kademe4-5 arasındaki köprülü pozisyon esnasında ilk olarak TFS_B aktarma anahtarı akımı kesmelidir.

$$\vec{I}_{TFSB} = \frac{1}{2} \cdot \vec{I}_L \tag{II.24}$$

Ark bastırıldıktan sonra açma kontaklarındaki toparlanma gerilimi reaktördeki gerilim düşümü ile elde edilir. Şekil II.19 ve (II.22a), (II.22b) ve (II.22c) nolu denklemleri karşılaştıralım.

$$\vec{U}_{rTFSB} = 2 \cdot \left(\vec{I}_L \cdot \frac{jX}{4} \right) \tag{II.25}$$

Kademe 4'ten Kademe 5'e kademe seçicisinin hareketinden ve aktarma anahtarının tekrar kapatmasından sonra köprülü pozisyona ulaşılmış olur. Köprülü pozisyondaki akım dağılımı ve gerilimler Şekil II.20'de verilmiştir. İlgili denklemeler ise (II.23a), (II.23b) ve (II.23c) nolu denklemlerdir.

Köprülü pozisyondan bir sonraki köprüsüz pozisyona geçiş işlemi TFS_A aktarma anahtarının açılması ile başlar. Bu aktarma anahtarı ana akım ve dolaşım akımlarını kesmelidir.

$$\vec{I}_{TFSA} = \frac{1}{2} \cdot \vec{I}_L - \vec{I}_C \tag{II.26}$$

Açan kontaklar arasındaki toparlanma gerilimi şu şekilde ifade edilebilir.

$$\vec{U}_{rTFSA} = \vec{U}_S - 2 \cdot \left(\vec{I}_L \cdot \frac{jX}{4} \right) \quad \text{(II.27)}$$

Bu işlem *hafif anahtarlama çalışması* olarak adlandırılır ve (II.26) ve (II.27) nolu denklemlerdeki *"-"* hafif çalışmayı işaret etmektedir.

Bu kademe değiştirme işleminin tersi yapılarak Kademe 5'ten Kademe 4'e gidildiğinde, bu *ağır anahtarlama çalışması* olarak adlandırılır ve (II.30) ve (II.31) nolu denklemlerdeki *"+"* ağır çalışmayı işaret etmektedir. *Ağır* ve *hafif* çalışmaların aktarma anahtarlarına veya anahtarlama yönüne dağılımı ana akım ve adım gerilimi unsurlarına bağlıdır.

Aşağıdaki denklemler köprüsüz pozisyon olan Kademe 5'ten Kademe 4'e gidildiğinde geçerlidir.

$$\vec{I}_{TFSA} = \frac{1}{2} \cdot \vec{I}_L \quad \text{(II.28)}$$

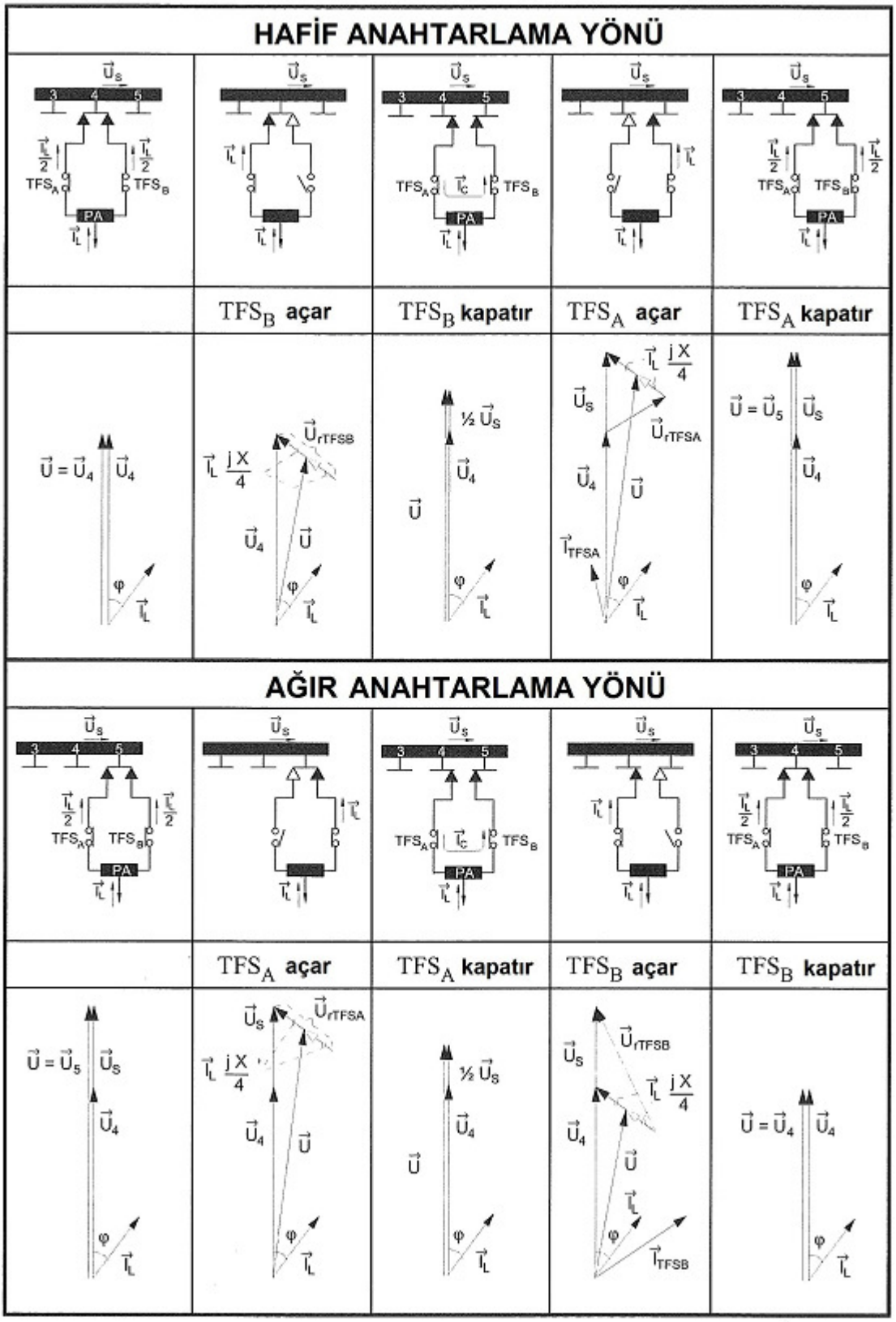
$$\vec{U}_{rTFSA} = 2 \cdot \left(\vec{I}_L \cdot \frac{jX}{4} \right) \quad \text{(II.29)}$$

$$\vec{I}_{TFSB} = \frac{1}{2} \cdot \vec{I}_L + \vec{I}_C \quad \text{(II.30)}$$

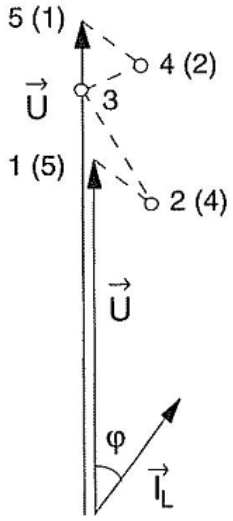
$$\vec{U}_{rTFSB} = \vec{U}_S + 2 \cdot \left(\vec{I}_L \cdot \frac{jX}{4} \right) \quad \text{(II.31)}$$

Şekil II.21'de köprüsüz pozisyondan diğer köprüsüz pozisyona kademe değiştirme işlemi esnasında transformatör çıkış gerilimi U'nun değişimi gösterilmiştir. Tablo II.21'deki fazör diyagramlarından türetilmiştir. Eğrinin şekli *yüksek hızlı direnç tipi* yükte kademe değitiricilerdeki gibi ya bir flamaya veya köprüsüz pozisyondan köprüsüz pozisyona geçişte olduğu gibi iki flamaya benzemektedir.

Tablo II.21 Ark Anahtarlı ve Kademe Seçicili Çalışmada Kontakların Çalışma Sırası, Fazör ve Bağlantı Diyagramları.



Tablo II.22'de yükte kademe değiştiricinin her iki yönde ard arda gelen kademe değiştirme işlemleri esnasında anahtarlama kontaklarının işlem sıraları gösterilmiştir. Anahtarlama kontaklarının (aktarma anahtarları) çalışma oranı Tablo II.23'te verilmiştir. Bu tabloda ayrıca yükte kademe değiştiricinin N adet işlem yaptığında her bir set kontağın işlem adetleri ve güç faktörünün anahtarlama yüklemesine etkileri gösterilmiştir.



Şekil II.21 Çıkış gerilimi U'nun gösterimi.

Yükte kademe değiştiricinin bir anahtarlama işlemi köprüsüz pozisyondan köprülü pozisyona geçiş olarak veya bunun tam tersi olarak tanımlanabilir. Aktarma anahtarlarının işlem adetleri Şekil II.14'te görüldüğü gibi anahtarlama sırasından temin edilebilir ve her bir aktarma anahtarının (TFS_A ve TFS_B) N/2 adet olarak belirlenir. Kontaklardaki işlem adetleri (II.24), (II.25), (II.28) ve (II.29) nolu denklemler dikkate alındığında N/4 adet olduğu sonucuna ulaşılır. Kalan N/4 adet işlem ise birinci aktarma anahtarının "hafif" işlemleri ve ikinci aktarma anahtarının "ağır" işlemleri ile yapılır. Burada iki aktarma anahtarından hangisinin "ağır" veya "hafif" çalışmayı gerçekleştireceği sorusu daha önceden de belirtildiği gibi ana akıma ve adım gerilimi unsurlarına bağlıdır. Şekil II.17 anahtarlama kontaklarının çalışma oranı üzerinde güç faktörünün etkisini açıklamaktadır. Maksimum akım değerine güç faktörünün 0 olduğu durumda ulaşılmaktadır.

Tablo II.22 Ark Anahtarlı ve Kademe Seçicili Yükte Kademe Değiştiricide Bazı Ard Arda Yapılacak Kademe Değiştirme İşlemlerinde Kontaklarının (Aktarma Anahtarları) İşlem Yapma Sırasını Göstermektedir.

Anahtarlama işlemi	Kontakların işlem yapma sırası	
Köprüsüz pozisyondan köprülü pozisyona (Yükselme)	TFS_B açar	TFS_B kapatır
Köprülü pozisyondan köprüsüz pozisyona (Yükselme)	TFS_A açar	TFS_A kapatır
Köprüsüz pozisyondan köprülü pozisyona (Yükselme)	TFS_B açar	TFS_B kapatır
Köprülü pozisyondan köprüsüz pozisyona (Yükselme)	TFS_A açar	TFS_A kapatır
……	Ve böyle devam eder	Ve böyle devam eder
Köprüsüz pozisyondan köprülü pozisyona (Alçalma)	TFS_A açar	TFS_A kapatır
Köprülü pozisyondan köprüsüz pozisyona (Alçalma)	TFS_B açar	TFS_B kapatır
Köprüsüz pozisyondan köprülü pozisyona (Alçalma)	TFS_A açar	TFS_A kapatır
Köprülü pozisyondan köprüsüz pozisyona (Alçalma)	TFS_B açar	TFS_B kapatır
……	Ve böyle devam eder	Ve böyle devam eder

Tablo II.23 Ark Anahtarlı ve Kademe Seçicili Yükte Kademe Değiştirici Çalışmasında Aktarma Anahtarı Çalışma Oranı.

	Geçiş Kontağı Çalışma Oranı			
Kontak	Anahtarlanan Akım	Toparlanma Gerilimi	İşlem Adedi	Yük Güç Faktörü Etkisi
TFS_A	$\frac{1}{2}\cdot\vec{I}_L$	$\frac{1}{2}\cdot\vec{I}_L\cdot jX$	N/4	Yok
	$\frac{1}{2}\cdot\vec{I}_L-\frac{\vec{U}_S}{jX}$	$\vec{U}_S-\frac{1}{2}\cdot\vec{I}_L\cdot jX$	N/4	
TFS_B	$\frac{1}{2}\cdot\vec{I}_L$	$\frac{1}{2}\cdot\vec{I}_L\cdot jX$	N/4	Yok
	$\frac{1}{2}\cdot\vec{I}_L+\frac{\vec{U}_S}{jX}$	$\vec{U}_S+\frac{1}{2}\cdot\vec{I}_L\cdot jX$	N/4	G.F.=0'de maksimum çalışma

II.2.2.2. Arklı Kademe Anahtarlı Yükte Kademe Değiştiriciler

Bu tip yükte kademe değiştiricilerin anahtarlama çalışması açısından ark anahtarı ve kademe seçicili yükte kademe değiştiricilerdeki anahtarlama prensibiyle aynıdır. Ama yinede, bu durumda anahtarlama elemanı arklı kademe seçicidir ve akımı kesmesi ve kademeyi seçmesi gereken unsurdur. Arklı kademe seçicili yükte kademe değiştiricileride işlem adetleri, *ağır* ve *hafif* çalışmalar ve anahtarlanan akım üzerinde güç faktörünün etkisi Bölüm II.2.2.1'de beliritilmişti ve ark anahtarlı ve kademe seçicili yükte kademe değiştiricilerde olduğu gibidir.

II.2.2.3. Vakum Kesicili Yükte Kademe Değiştiriciler

Tablo II.24'te vakum kesicili reaktans tipi yükte kademe değiştiricide işlem adımlarındaki anahtarlama sıraları ve transformatörün çıkış gerilimleri gösterilmiştir. Anahtarlama sıralamasının tamamı Şekil II.16'da gösterilmiştir. Verilen örnekte köprüsüz pozisyon olan Kademe 4'ten diğer bir köprüsüz pozisyon olan Kademe 5'e yapılan kademe değiştirme işlemi ve bu işlemin tam tersi çalışma gösterilmiştir.

Köprüsüz pozisyondaki akım dağılımları ve gerilimler Şekil II.18'de ve (II.21a), (II.21b) ve (II.21c) nolu denklemlerde gösterilmiştir. Köprüsüz pozisyon Kademe 4'ten, Kademe 4-5 arasındaki köprülü pozisyona geçiş esnasında ilk olarak BYC_B by-pass kontakları akımı vakum kesici (VI) yoluna aktarmalıdır. Daha sonra vakum kesici açar ve akımı açar.

$$\vec{I}_{VI} = \frac{1}{2} \cdot \vec{I}_L \tag{II.32}$$

Ark söndürüldükten sonra açan kontaklar arasındaki toparlanma gerilim reaktördeki gerilim düşümü ile belirlenir.

$$\vec{U}_{rVI} = 2 \cdot \left(\vec{I}_L \cdot \frac{jX}{4} \right) \tag{II.33}$$

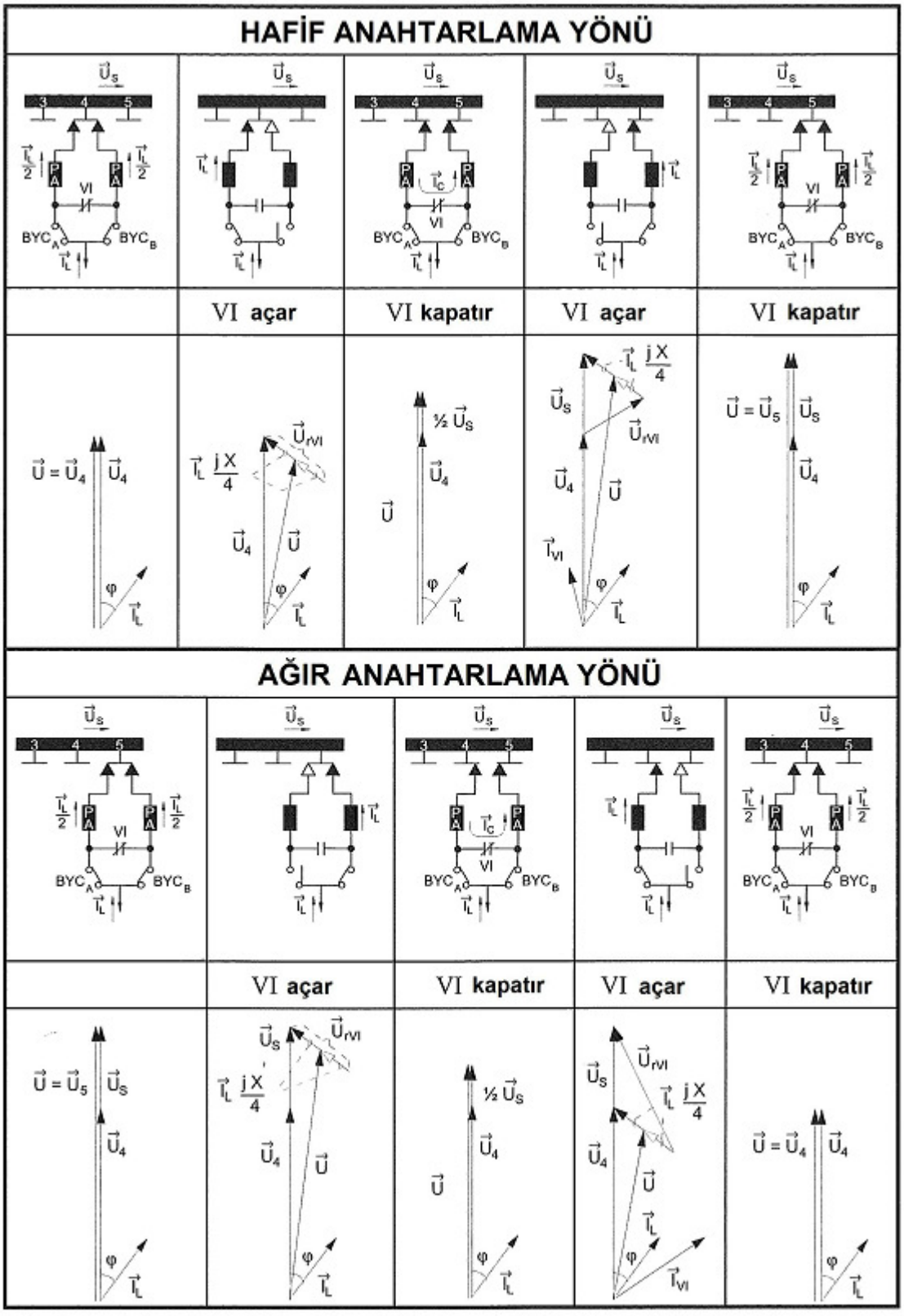
Kademe 4'ten Kademe 5'e kademe seçici işleminden sonra ve vakum kesicinin kapatmasından sonra köprülü pozisyona ulaşıldı demektir. Köprüsüz pozisyonda akım dağılımları ve gerilimler gerilimler Şekil II.20'de ve (II.23a), (II.23b) ve (II.23c) nolu denklemlerde gösterilmiştir.

Köprülü pozisyondan bir sonraki köprüsüz pozisyona geçiş işlemi BYC_A by-pass kontağının açılması ve akımın vakum kesici yoluna aktarılması ile başlar. Artık vakum kesici açar ve ana akım ve buna ek olarak gelen dolaşım akımını açar. Açan kontakların toparlanma gerilimi aşağıdaki şekli alır.

$$\vec{I}_{VI} = \frac{1}{2} \cdot \vec{I}_L - \vec{I}_C \tag{II.34}$$

$$\vec{U}_{rVI} = \vec{U}_S - 2 \cdot \left(\vec{I}_L \cdot \frac{jX}{4} \right) \tag{II.35}$$

Tablo II.24 Vakum Kesicili Yükte Kademe Değiştiricilerde Kontakların Çalışma Sırası, Fazör ve Bağlantı Diyagramları.



Bu işlem *hafif* çalışma olarak adlandırılır ve (II.34) ve (II.35) nolu denklemlerdeki "-" hafif çalışmayı işaret etmektedir. Bu kademe değiştirme işleminin tersi yapılarak Kademe 5'ten Kademe 4'e gidildiğinde, bu "ağır" çalışma olarak adlandırılır ve (II.38) ve (II.39) nolu denklemlerdeki "+" ağır çalışmayı işaret etmektedir. Vakum kesiciye ait bu ilişkiler ana akım veya adım gerilimi ters yönde olması durumunda değişmektedir [1].

Aşağıdaki denklemler köprüsüz pozisyon olan Kademe 5'ten Kademe 4'e gidildiğinde geçerlidir.

$$\vec{I}_{VI} = \frac{1}{2} \cdot \vec{I}_L \tag{II.36}$$

$$\vec{U}_{rVI} = 2 \cdot \left(\vec{I}_L \cdot \frac{jX}{4} \right) \tag{II.37}$$

$$\vec{I}_{VI} = \frac{1}{2} \cdot \vec{I}_L + \vec{I}_C \tag{II.38}$$

$$\vec{U}_{rVI} = \vec{U}_S + 2 \cdot \left(\vec{I}_L \cdot \frac{jX}{4} \right) \tag{II.39}$$

(II.24)'ten (II.31)'e kadar olan denklemler (II.32)'den (II.39)'a kadar olan denklemlerle karşılaştırıldığında vakum kesicilerdeki anahtarlanan akımlar ve aktarma anahtarlarında oluşan toparlanma gerilimlerin identik olduğu görülür.

Köprüsüz pozisyondan diğer köprüsüz pozisyona hareket ettiğinde transformatörün U çıkış gerilimi ark anahtarı ve kademe seçicili tip yükte kademe değiştiricikinin ki gibidir ve bu Şekil II.21'de gösterilmiştir.

Tablo II.25'te yükte kademe değiştiricinin her iki yönde ard arda gelen kademe değiştirme işlemleri esnasında anahtarlama kontaklarının işlem sıraları gösterilmiştir. Anahtarlama kontaklarının (vakum kesicisi) çalışma oranı Tablo II.26'da verilmiştir. Ayrıca yükte kademe değiştiricinin N adet işlem yaptığında her bir set kontağın işlem adetleri ve güç faktörünün anahtarlama yüklemesine etkileri gösterilmiştir.

Vakum kesiciler yükte kademe değiştiricilerin her anahtarlama işlemine girmiştir. Köprüsüz pozisyondan köprülü pozisyona geçiş veya bunun tam tersi bir anahtarlama işlemi olarak tanımlanır. Vakum kesicilerin işlem adetleri N olarak tanımlanabilir. Ayrıca her işlem ne ağır ne de hafif işlem olarak adlandırılamayacağı dikkate alınmalıdır. Vakum kesicinin yaptığı anahtarlama işlemlerinin N/2 adeti ağır ve N/2 adeti de hafif işlem olacağı düşünülebilir [1].

Şekil II.17 güç faktörünün anahtarlama kontaklarının çalışma oranı üzerindeki etkisini açıklamaktadır. Maksimum akım değerine güç faktörünün 0 olduğu durumda ulaşılmaktadır.

Tablo II.25 Vakum Kesicili Yükte Kademe Değiştiricide Bazı Ard Arda Yapılacak Kademe Değiştirme İşlemlerinde Kontakların İşlem Yapma Sırasını Göstermektedir.

Anahtarlama işlemi	Kontakların işlem yapma sırası	
Köprüsüz pozisyondan köprülü pozisyona (Yükselme)	VI açar	VI kapatır
Köprülü pozisyondan köprüsüz pozisyona (Yükselme)	VI açar	VI kapatır
Köprüsüz pozisyondan köprülü pozisyona (Yükselme)	VI açar	VI kapatır
Köprülü pozisyondan köprüsüz pozisyona (Yükselme)	VI açar	VI kapatır
……	Ve böyle devam eder	Ve böyle devam eder
Köprüsüz pozisyondan köprülü pozisyona (Alçalma)	VI açar	VI kapatır
Köprülü pozisyondan köprüsüz pozisyona (Alçalma)	VI açar	VI kapatır
Köprüsüz pozisyondan köprülü pozisyona (Alçalma)	VI açar	VI kapatır
Köprülü pozisyondan köprüsüz pozisyona (Alçalma)	VI açar	VI kapatır
……	Ve böyle devam eder	Ve böyle devam eder

Tablo II.26 Vakum Kesicili Yükte Kademe Değiştirici Çalışmasında Kontakların Çalışma Oranı.

Geçiş Kontağı Çalışma Oranı				
Kontak	Anahtarlanan Akım	Toparlanma Gerilimi	İşlem Adedi	Yük Güç Faktörü Etkisi
VI	$\frac{1}{2}\cdot\vec{I}_L$	$\frac{1}{2}\cdot\vec{I}_L\cdot jX$	N/2	Yok
	$\frac{1}{2}\cdot\vec{I}_L-\frac{\vec{U}_S}{jX}$	$\vec{U}_S-\frac{1}{2}\cdot\vec{I}_L\cdot jX$	N/4	
	$\frac{1}{2}\cdot\vec{I}_L+\frac{\vec{U}_S}{jX}$	$\vec{U}_S+\frac{1}{2}\cdot\vec{I}_L\cdot jX$	N/4	G.F.=0'de maksimum çalışma

II.3 KADEME ŞEÇİCİ

Transformatörde ayar sargısı uçları yükte kademe değiştiriciye kadar uzatılmıştır ve ilgili pozisyon kontaklarına bağlanmıştır. Kademe seçicisi, yükte kademe değiştirici gezici ucunun ilgili pozisyon kontaklarına basarak bağlantı aktarımını sağlamaktır. Bu nedenle en basit kademe seçicisi tipi ya yuvarlak şekilde veya lineer çokyönlü endeks anahtarı şeklinde olur. Yuvarlak şekildeki tip kullanıldığında, kademe seçici terminalleri ya dairesel şekilde veya dairenin yayı şeklinde olacaktır. Hangi dizayn şeçilirse seçilsin, bir çesit sürücü metodu

mevcuttur. Bu metodta tekli veya çiftli şeçici hareketi sağlamaktadır fakat hareket eden kontakları iki işlem arasında kilitler. Diğer sistemlerde ise eliptik sürücü dişlileri veya normal ve kısmi dişli hız azaltma metodları içermektedir.

Teorik olarak, kontak terminalleri dairesel şekilde ayarlanmış kademe seçicinin sahip olduğu kademe sayısı iki komşu kademe arasındaki mesafenin komşu uçlar arasındaki gerilim seviyesinin gerektirdiği minimum mesafe sağlandığı sürece arttırılabilir. Eğer simetrik bir kontak perdesi kullanılırsa maksimum gerilim zorlanması kademe sargısının başında ve sonunda bulunan iki komşu kontak arasında olacaktır. Bu iki kademe arasındaki gerilim tüm kademe sargısı düşünüldüğünde belirsizdir.

Uygulamada kademe sayısı genellikle 17 ile 35 kademe aralığında olmaktadır. Bazı özel durumlarda (endüstri transformatörlerinde) 107 kademeye kadar yükte kademe değiştiriciler kullanılmaktadır. Transformatör sargısı kademe bölümleri transformatör dizaynıyla belirlenir ama kademe sargısında oluşan yıldırım darbe seviyesi sınırlayıcı bir unsur olduğu dikkate alınmalıdır. İşletme kademe saysını arttırmak ve kademe sargsının elektriksel uzunluğunu arttırmamak için kademe seçicide bir *Yön Değiştirme Seçicisi* kullanılmak suretiyle ayar sargısının iki katı nispetinde işletme pozisyonu elde edilebilmektedir.

Yön değiştirme seçicili kademe seçici kullanıldığında, tamamen dairesel bir kademe seçici kullanmak zorunluluk olmaktadır.

Değişik yükte kademe değiştirici dizaynlarının (*Kazan-içi tip* veya *kompartıman tipi*) ve değişik anahtarlama prensiplerinin (*direnç tipi* ve *reaktör tipi*) temelinde değişik kademe seçici dizaynları gereklidir. Tek-çok yönlü seçici dizaynı direnç tipi seçici anahtar kullanıldığında mümkündür. Diğer tüm yükte kademe değiştirici dizaynlarında (*direnç tipi* ve *reaktör tipi*) kademe seçiciler çiftli-çokyönlü seçici olmak zorundadır.

II.3.1 Kazan-içi Tip Yükte Kademe Değiştiricilerde Kademe Seçiciler

Yükte kademe değiştiriciler seçici anahtar prensibine göre dizayn edilir ve temelde bir yağ kompartımanı ve kademe değiştirici içi vardır. Şekil II.22'de görülmektedir. Yağ kompartımanı bir silindirdir, günümüzde epoksi reçine ile güçlendirilmiş fiberglastan (FRP) yapılmaktadır, transformatör ana kazan ile gaz ve yağ açısından geçirmezlik özelliği vardır. Seçici anahtarın sabit kontakları ve eğer var ise yön değiştirme seçicisi ayrı kontak seviyesinde ayarlanmıştır. Bu kontaklar

yağ kompartımanı silindirinin iç kısmına monte edilmiştir ve dış terminale bağlantısı yapılmıştır. Seçici anahtarın anahtarlama prensibine göre her bir faz için sadece bir kontak peryoduna ihtiyaç vardır (tekli çok-yönlü endeks anahtarı).

Kademe değiştirici içi seçici anahtarın tüm hareketli kontak sistemini içerisine almaktadır. Kademe değiştirici içinin içerdiği unsurlar şunlardır.

1-) Şeçici anahtar izole sürücü şaftı ,

Günümüzde epoksi reçine ile güçlendirilmiş fiberglastan (FRP) yapılmaktadır.

2-) Anahtarlama elemanları,

3-) Yön değiştirme şeçicisi kontak taşıyıcısı (öngörülmüş ise),

Şeçici anahtar izole sürücü şaftı tepede dişli mekanizmaya bağlanmıştır ve mekanizmanın ismi *GENEVA*'dır.

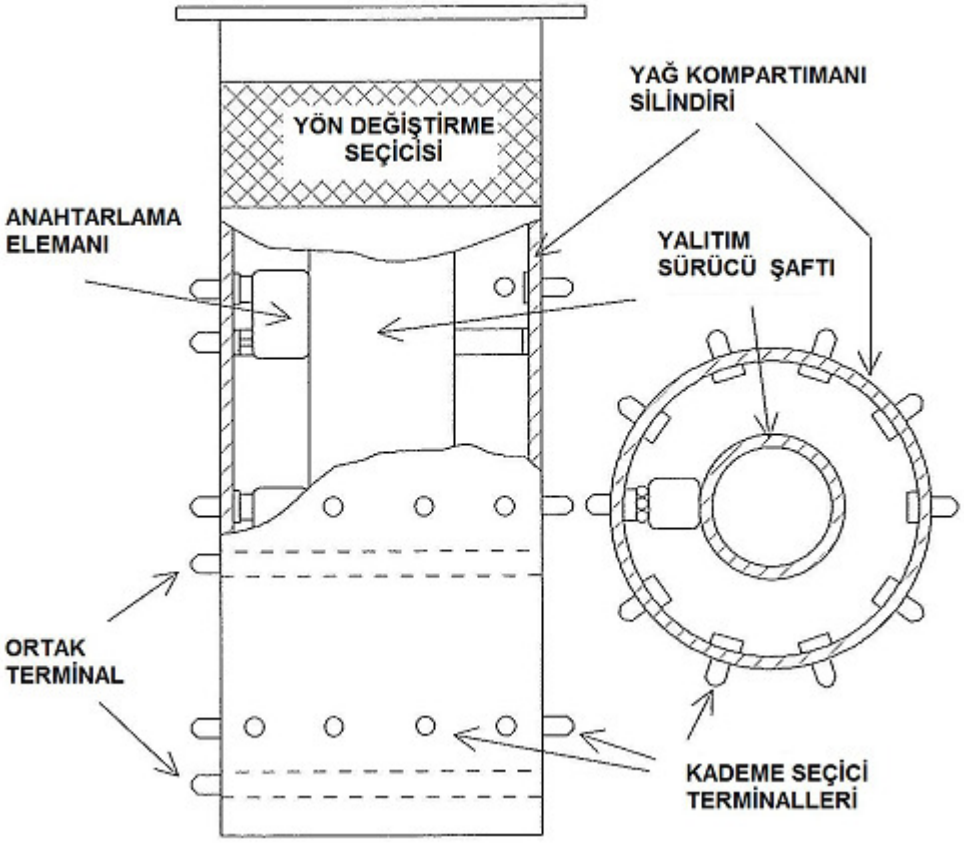
Aktarma anahtarı ve kademe şeçicisi olan direnç tipi yükte kademe değiştiricilerin kademe seçicisi transformatörün kazanı içine yerleştirilmiştir ve ayrı bir kompartıman söz konusu değildir. Kademe seçici genellikle aktarma anahtarı yağ kompartımanının altına yerleştirlmektedirler. Kademe seçicinin izole sürücü şaftı *GENEVA* dişli mekanizması üzerinden motor sürücüsüne bağlıdır ve yeri de aktarma anahtarının yağ kompartımanının ortası veya dışıdır.

Kademe seçicinin sabit kontakları dairesel şekilde ayarlanır ve iki şekilde monte edilir.

1-) Kaplamalı kağıttan veya epoksi reçine ile güçlendirilmiş fiberglastan (FRP) yapılmış çubuklara

2-) Epoksi reçine ile güçlendirilmiş fiberglastan (FRP) yapılmış muhafazalara monte edilir. Buna ait tasarım Şekil II.23'te verilmiştir.

Kademe seçici ayrıca bir yön değiştirme seçicisi de içerebilir. Her faz için iki grup kontak (tek ve çift numaralı kontaklar olmak üzere) mevcuttur. Bu kontaklar hareketli kontak montajı (kontak köprüsü) üzerinden kalkış halkalarına bağlıdır. Her faza ait her iki kontak grubunun kalkış halkaları aktarma anahtarının ilgili tarafına bağlanmıştır.

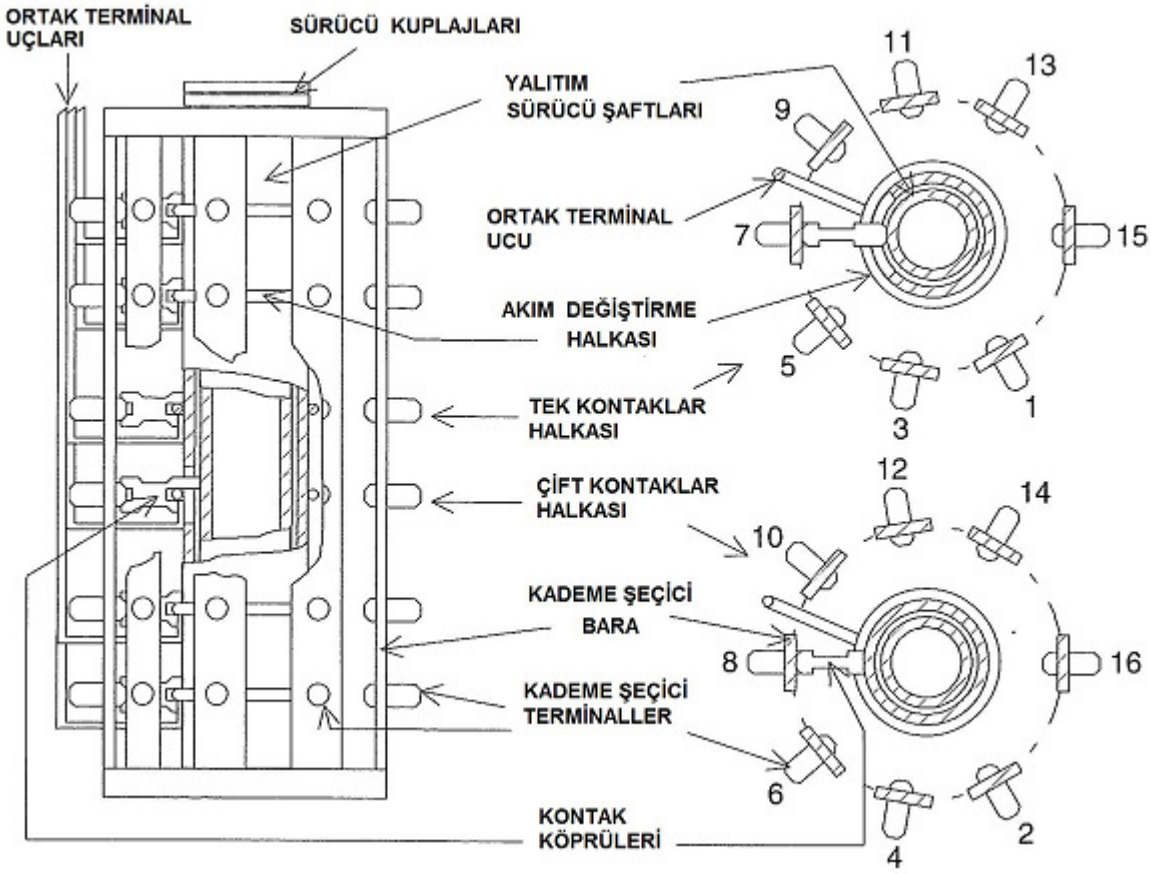


Şekil II.22 Kazan-içi Tip Kademe Değiştiricide Seçici Anahtarın Basitleştirilmiş Diyagramı.

Bölüm II.2.1'de açıklandığı gibi tek ve çift kontak halkalarının kontak köprüleri ard arda olan kademe değiştirme işlemleri esnasında birbirinin yerini alırlar. Bu amaç için dişli sistemi adım adım kademeli olarak iki GENEVA halkası ve iki sürücü dişlisini GENEVA manivela ile çalıştırır. Şekil II.23'te gösterilen kademe seçici dizaynı ile iki eşmerkezli izolasyon sürücü şaftı bir GENEVA halkası ile kuplaj edilir. Böyle bir dizaynda aktarma anahtarını kademe seçicinin kaldırma halkasına bağlayan uçlar gerekli hale gelir ve bu bağlayıcı uçlar kademe seçici kafesinin dışına yerleştirilmelidir.

Kuplaj öyle dizayn edilmeli ki ters yöndeki kademe değiştirmelerde motor sürücüsünün hareketi hareketli kademe seçici kontak köprüsünü hareket ettirmemeli ve sadece aktarma anahtarını hareket ettirmelidir.

Kademe seçicisinin sabit ilk ve son konatğının arasındaki yalıtım mesafesi genellikle yıldırım darbe testi nedeniyle arttırılır. Bunun anlamı ayar sargısının başı ve sonu arasında yıldırım darbe seviyesi en yüksektir.



Şekil II.23 Kazan-içi Tip Kademe Değiştiricide Kademe Seçicisinin Basitleştirilmiş Diyagramı.

II.3.2 Kompartıman Tip Yükte Kademe Değiştiricilerde Kademe Seçiciler

Fiziksel olarak dairesel kademe seçicisi olan yükte kademe değiştircilerde iki temel konfigürasyon mümkündür.

1-) Kademe seçicisi bariyer plakası ile aynı çizgide, (Şekil II.24)

2-) Kademe seçicisi bariyer plakası ile dikey olarak, (Şekil II.25)

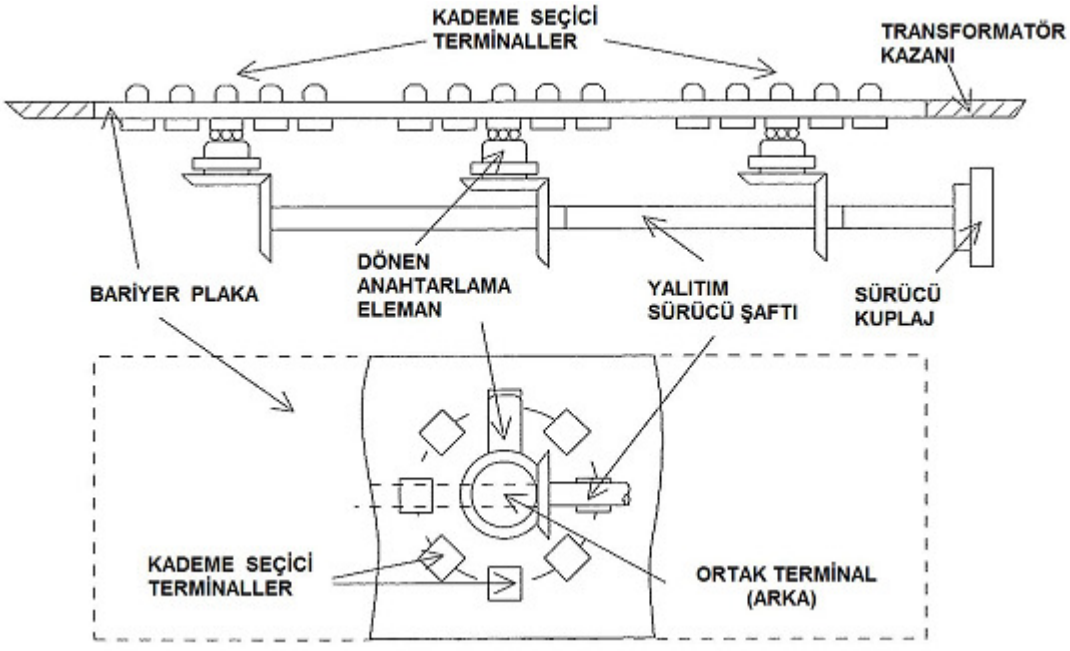
Birinci seçenekte elektriksel yol en basit şekli almaktadır ve ikinci şeçenekte bağlantı uçlarının bariyer plakasına monte etmek gerekmesine rağmen tek sürücü şaftı kullanılarak gerçekleştirilebilir. Kademe seçicileri üç faza ayrı ayrı dağıtılırlar.

Aktarma anahtarı ve kademe seçicisi olan direnç tipi yükte kademe değiştiricilerde her faz montajı için iki adet kademe seçici mevcuttur. Bunlardan bir

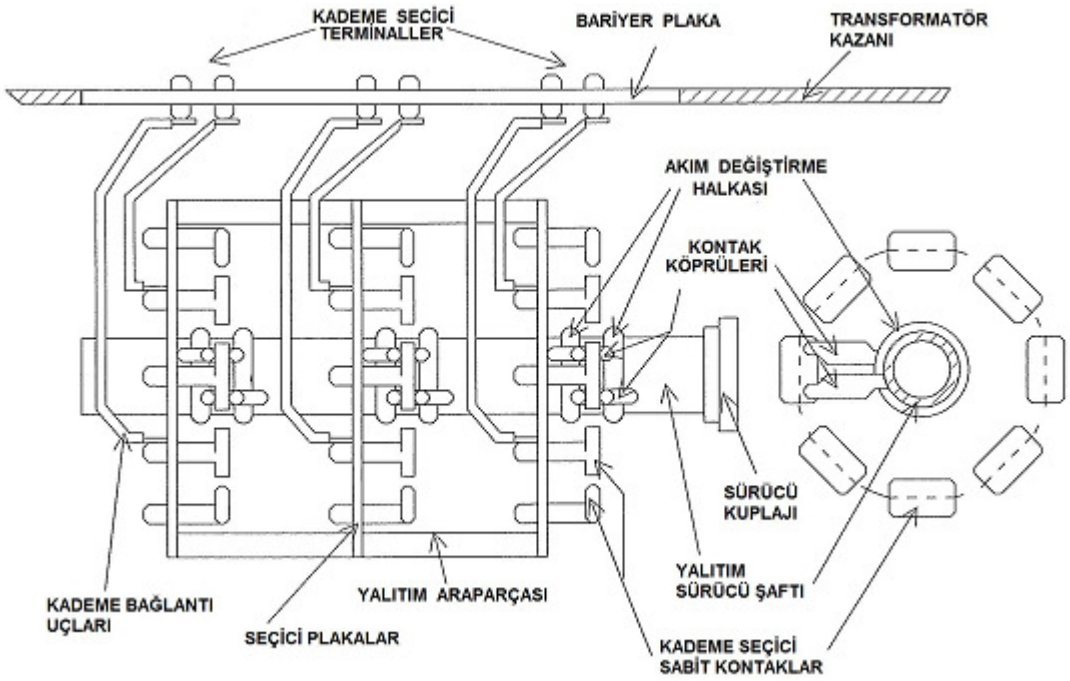
tanesi tek numaralı kademeler için, ikincisi ise çift numaralı kademeler içindir. İki adet kontak halkası birbirinin üzerinde olabilir veya birbirinin yanında olabilir.

Seçici anahtarı olan direnç tipi yükte kademe değiştiricilerde her bir faz için tek ve çift kontak terminalleri için ortak bir kontak halkası vardır.

Genellikle reaktör tipi yükte kademe değiştiricilerin kademe seçicileri de üç faza ayrı ayrı dağıtılırlar ve biri tek kontak terminalleri ikincisi çift kontak terminalleri için olmak üzere iki adet kademe seçici ile donatılırlar. İki kademe seçiciye ait hareketli kontak köprüleri ard arda olan kademe değiştirme işlemleri esnasında sıra ile devreye girerler. Bu tip kademe seçicisinin diğer bir dizaynında birbirinin üzerinde olan iki adet hareketli kontak köprüsü ve iki ayrı akım kalkış halkası vardır fakat tek ve çift numaralı terminalleri içeren sadece bir tane kontak halkası mevcuttur. Bu durunda her iki kontak halkası aynı anda devreye girer. Bu tip dizaynda iki kontak arasındaki mesafe kontağın kendi büyüklüğünden daha kısadır ve her iki kontak köprüsü sadece bir sürücü şaftı ile sürülebilir.



Şekil II.24 Kompartıman Tip Kademe Değiştiricide Seçici Anahtarın Basitleştirilmiş Diyagramı.



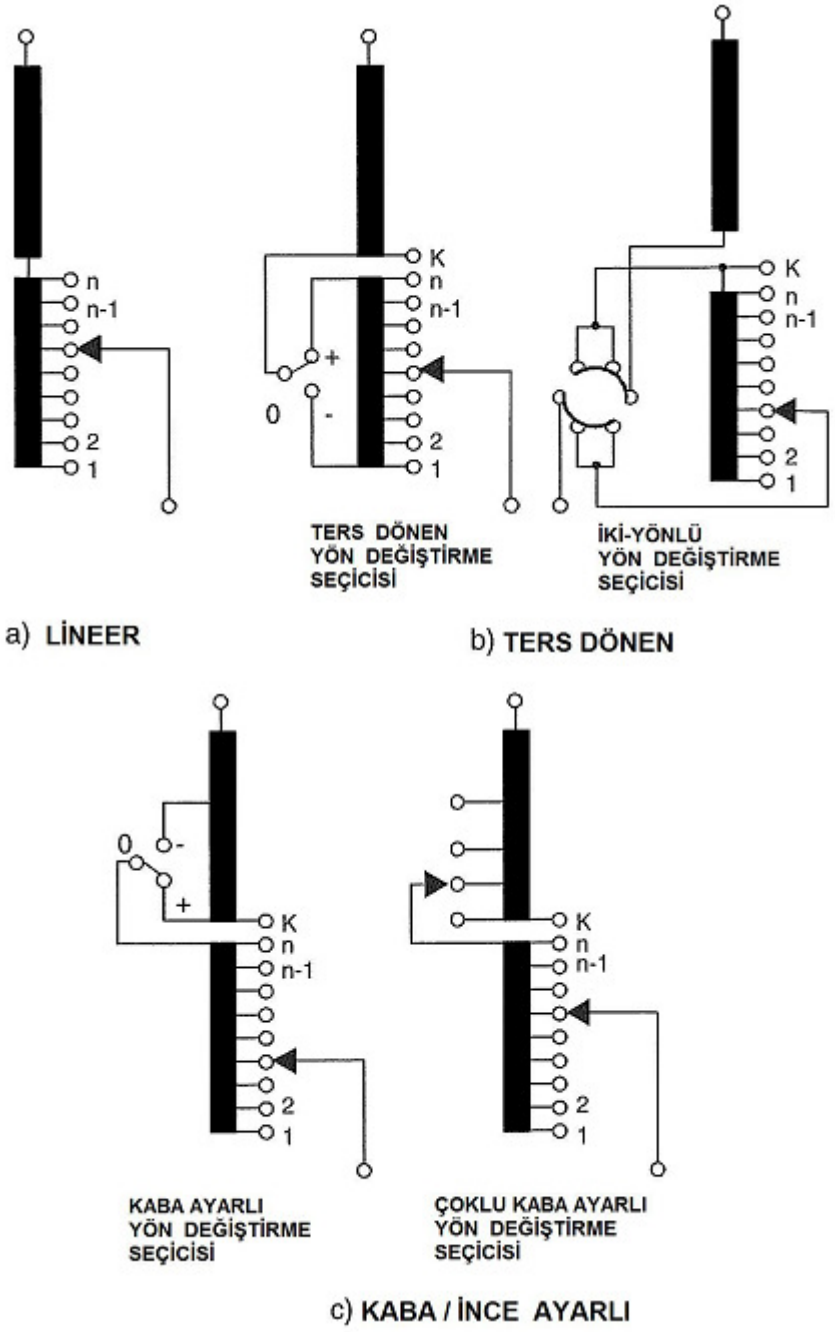
Şekil II.25 Kompartıman Tip Reaktörlü Kademe Değiştiricinin Basitleştirilmiş Diyagramı.

II.4 YÜKTE KADEME DEĞİŞTİRİCİLİ TRANSFORMATÖRLERDE AYAR DEVRELERİ

Transformatörlerde çevirme oranının değişmesi için primer veya sekonder sargılardan birinde spir ekleme veya eksiltme işlemi yapılmalıdır. Şekil II.26'da üç temel şema gösterilmiştir. Sistem veya dizayn parametrelerine bağlı olarak bu üç şemadan herhangi biri kullanılabilir.

Şekil II.26'nın a şıkkında gösterilen lineer sema % 20'ye kadar olan gerilim ayarlarında kullanılmaktadırlar. Ama yinede endüstriyel proses transformatörlerinde bu ayar yüzdesi daha da artabilmektedir. Genellikle bu tip transformatörler değişken akı yoğunluklu çalışmaktadırlar ve optimum proses kontrolü için bu şema tarzı ile kademeler arası değişken spir sayıları oluşturulmasına izin vermektedir.

Lineer Gerilim Ayarlı, *Yön Değiştirmeli Gerilim Ayarlı* ve *Kaba/İnce Ayar Sargılı Gerilim Ayarlı* devreler mevcuttur [3,4]. Uygulama türüne göre bu ayar şekillerinden bir tanesi tercih edilmektedir.



Şekil II.26 Kademe Sargıları İçin Temel Düzenlemelerin Tek Faz Gösterimi.

Şekil II.26'nın b ve c şıklarında gösterildiği gibi, yön-değiştirme seçicisi ile kademe sahası iki katına açıkarılmış olmaktadır. Ters dönen yön-değiştirme anahtarı seçicisi ile ayar sargısının ana sargıya bağlantısını spir arttırıcı ve spir azaltıcı yönde devreye girmesini sağlayabilmektedir. Bu işlemin faydası iki sekilde ortaya çıkabilir, ya ayar sahasının iki kat büyük olması ya da ayar sargısının yarı yarıya düşük olması ile sonuçlanır. Ama bu durumda minimum spirin devrede olması ile

bakır kayıplarının maksimum olması ile sonuçlanmaktadır. Genellikle tek kutuplu yön-değiştirme seçicili dizayn kullanılmaktadır. Büyük güçlerdeki tek fazlı transformatörlerde nötr noktalı kademe değiştiricilerin kullanılmasında iki-yönlü yön-değiştirme seçicisi kullanılabilir. Bu tip dizaynın avantajı ters anahtarlama esnasında ayar sargıları ana sargıya sürekli olarak bağlı bulunmaktadır. İki yönlü yön-değiştirme anahtarı kullanılması durumunda özel bir dişli kullanılması gerekmektedir [1].

Şekil II.26'nın c şıkkı kaba ve ince ayar sargılarının düzenlemelerinin olduğu şemaları göstermektedir. Kaba ayar sargısının elektriksel uzunluğu yaklaşık olarak ince ayar sargısının elektriksel uzunluğu kadardır. Bu tip şemadaki avantaj en düşük spir devrede iken bakır kayıplarının daha az olmasıdır. Bu düzenlemeye dielektrik açıdan bakıldığında daha gelişmiş sargı düzenlemesi gerektirmektedir. Daha geniş ayarlama sahası gerektiren çalışmalarda birden çok kaba ayar sargısı kullanılmaktadır ve bu daha ziyade kimyasal proseslerde kullanılan transformatörler olmaktadır. Çoklu kaba ayar sargısının kullanıldığı düzenlemelerde her bir kaba ayar sargısının elektriksel uzunluğu ince ayar sargısına bir adım eklemekle eşdeğerdir.

Bölüm II.3'te anatıldığı gibi yön değiştirme seçicili yükte kademe değiştiricinin kademe şeçicisinin hareketli kontağı bir uç-pozisyondan diğer uç poziyona hareket ederken iki ana işlem yapmaktadır.

Bu direnç-tipi bir kademe değiştiricide gösterilecektir. Belirli bir tip farklılık için, örneğin 18 adımlı ve 19 kademeli bir transformatör için, transformatör üreticisi ayar sargısında mümkün olan en az ayar sargısı olmasını isteyecektir. Bu örnek için ters dönen değiştirme seçicisi olması durumunda 10 adım demektir. Kaba ayar ve ince ayar sargılarının beraber olduğu durumda ise 9 adım demektir. Bu her iki durumda da kademe seçicinin 10 sabit kontağının olmasını gerektirmektedir [1].

Seçici anahtar dizaynında aşağıdaki unsurlara ihtiyaç duyulmaktadır. Bu Şekil II.27'de gösterilmiştir.

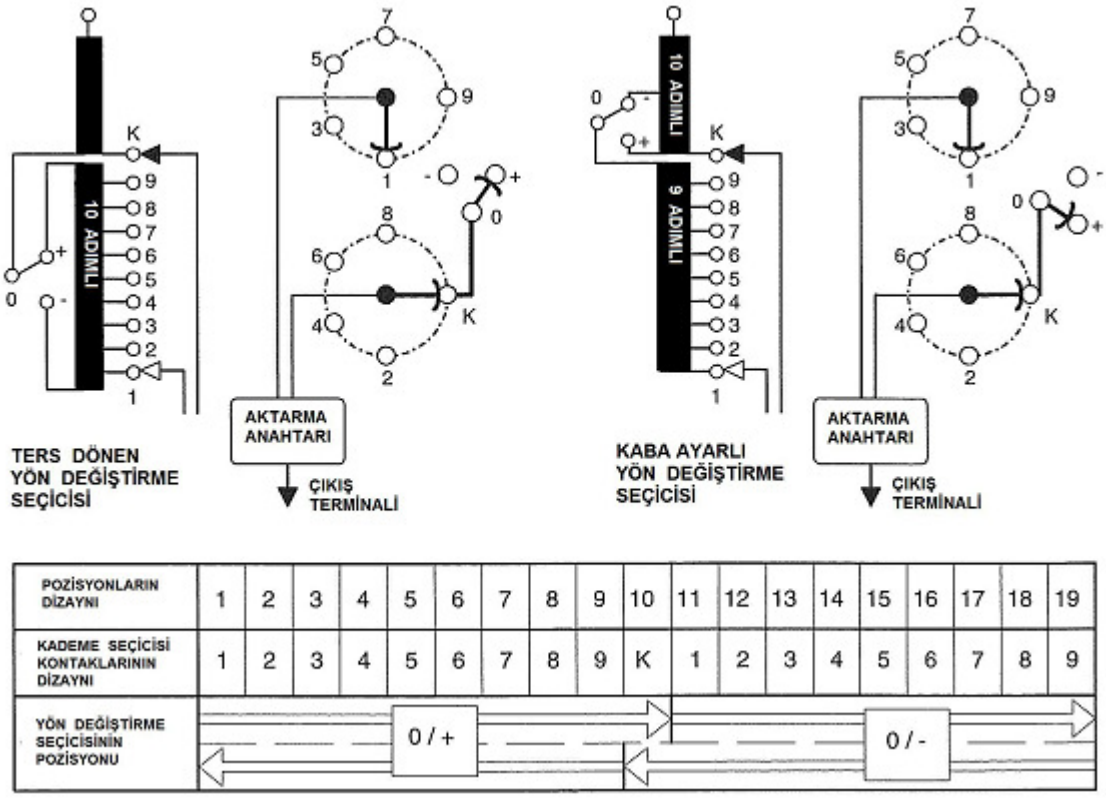
1-) Her bir faz için 10 kontağın olduğu bir seçici kontak halkası,

2-) Ayrılmış bir aktarma anahtarı ve kademe seçici dizaynı,

3-) 5 adet tek kontağı ve 5 adet te çift kontağı olan bir kademe seçicisi halkası.

Olası değişik pozisyon sayısı gereksinimlerinin olması yüzünden, yükte kademe değişitirici tip çeşitliliğine ihtiyaç duymaktadır. Kompartıman tipi yükte kademe değişticilerde bu farklılık seçici dizaynı ve GENEVA boyutlarndırmasının yanında terminalleri ve şeçici plakayı da etkilemektedir. Uygulama ile ilgili ve

ekonomik nedenlerden dolayı *Run Through* veya *Dummy* diye adlandırılan bir metod bulunmuştur. Bu metod yükte kademe değiştiricinin kullanılmayan pozisyonlarından olan kademe seçicinin iki uç pozisyonu arasında aktarma işleminin yapılabilmesine olanak sağlamaktadır. Elektriksel ve mekaniksel olarak kademe seçici bu ortak kontaklar üzerinden otomatik olarak geçiş yapabilmelidir. Bu bir seçiciye veya bariyer plakasına birleştirilmiş standart kontak halkasının yapılabilmesine olanak sağlamaktadır.



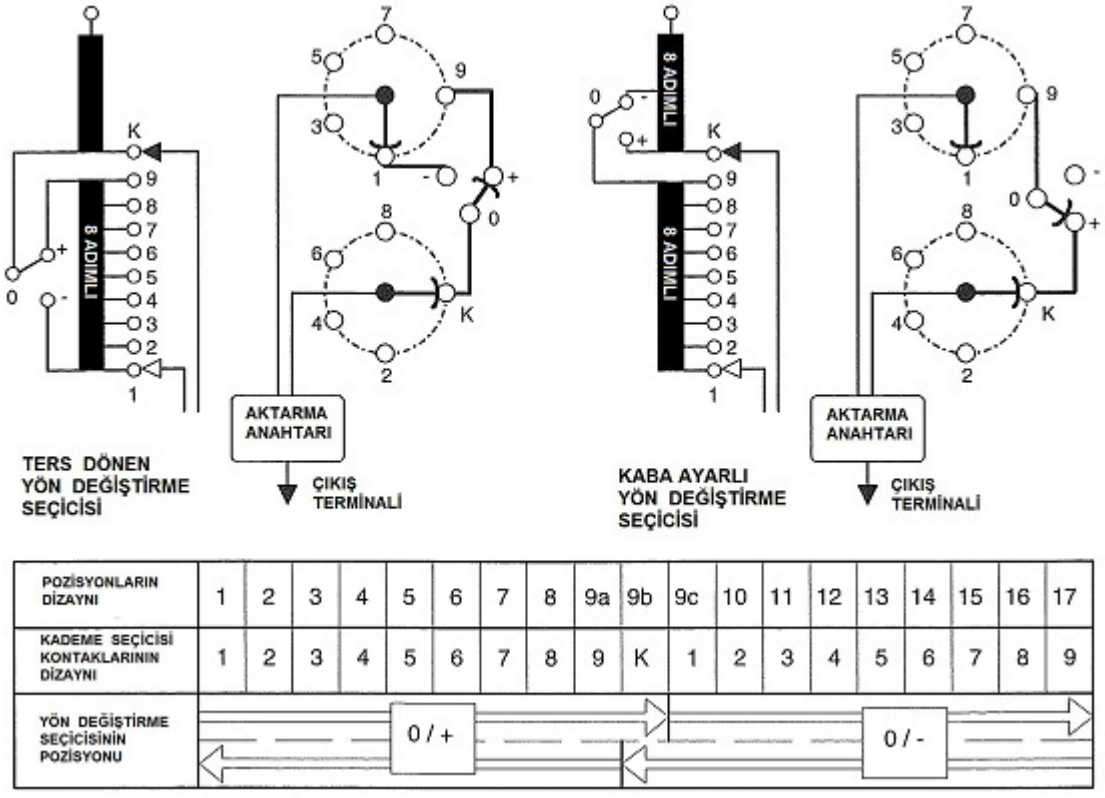
Şekil II.27 19 Kademesi Olan Kademe Değiştiricide Ters Dönen Seçicili ve Kaba/İnce Ayar Sargı Seçicili Durumlardaki Devre Şemaları.

Kazan içi tip ve direnç-tipi olan yükte kademe değiştiricilerde aktarma anahtarı ve kademe seçicisi iki ayrı ünite olduğundan, bu problem açısından çok daha esnektir, fakat *yön değiştirme seçicisi* kullanıldığı durumda D*ummy* kontakları metoduna ihtiyaç duyulmaktadır. Eğer adım sayısı (kademe sayısının bir eksiği) ikiye bölündüğünde çıkan rakam tek ise *Dummy* kademelerine ihtiyaç duyulmamaktadır [1]. Fakat çıkan rakam çift ise yükte kademe değiştiricide 2 adet *Dummy* pozisyonu olmalıdır. Bu konu şu şekilde açıklanabilir. Kademe seçici tekler ve çiftler olmak üzere her bir faz için iki kontak halkasına sahiptir. Ama yinede bu iki kontak halkalarının kontak sayıları eşittir ve bu iki halkadaki kontak saysı toplamı

kesinlikle çifttir. Bir uç kontaktan diğer uç kontağa geçerken bir kontak daha vardır. *K kontağı* veya *orta kontak* diye adlandırılan bu kontak bir defa işlem yapar. Bu kontakla birlikte iki defa işlem yapan kontakların sayısı tek bir sayı olmalıdır. Bu bu sayı adım sayısının ikiye bölünmesi ile bulunur.

Kazan içi tiplerdeki seçici anahtarlar bu tip sınırlamalara maruz kalmamaktadırlar, çünkü bunlarda her bir faz için bir adet kontak halkası mevcuttur. Fakat ekonomik nedenlerden dolayı onlarda da aynı devre diyagramları takip edilmektedir.

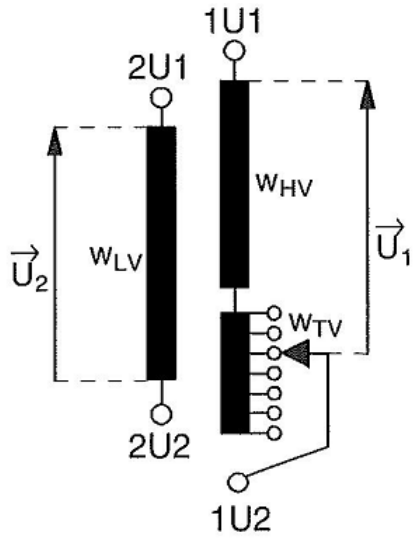
Şekil II.27'de gösterilen kademe seçicide dummy kademeleri mevcuttur ve 10 adet sabit kontakları olmasına rağmen 17 kademesi ve 16 adımı olan transformatörlerde kullanılabilir. Bu kademe değiştiricide 9a ve 9c dummy pozisyonları mevcuttur ve Şekil II.28'de gösterilmiştir. Kademe sargısında değiştirme seçicisinin tipinden bağımsız olarak 8 adımı olmalı. Eğer kaba ayar sargısı da kullanılsaydı 8 adımlık elektriksel uzunlukta olacaktı.



Şekil II.28 17 Kademesi Olan Kademe Değiştiricide Ters Dönen Seçicili ve Kaba/İnce Ayar Sargı Seçicili Durumlardaki Devre Şemaları.

Şekil II.27'deki *bir orta pozisyonlu*, Şekil II.28'de *üç orta pozisyonlu* yükte kademe değiştirici olarak ifade edilir.

Fiziksel olarak, her bir gerilim ayarlaması sabit endüksiyon veya değişken endüksiyon ile sağlanabilir. Şekil II.29'da ayar sargısı olan ve lineer ayar yapan üç fazlı iki sargısı olan transformatörün bir fazı gösterilmektedir. Ayar sargısı olan primer sargıya sabit bir gerilim uygulanması durumunda spir başına düşen gerilim kademe değiştikçe farklılık gösterecektir. Bu sekonder gerilimini etkileyecektir ve sekonder gerilimi spir oranları nispetinde değişken olacaktır. Ayar sargısının adım gerilimi devrede olan aktif spir sayısı ile değişecektir ve spir başına en yüksek gerilimin düşeceği minimum spir kademesinde en yüksek değere ulaşacaktır. Bu konu yükte kademe değiştirici seçerken dikkate alınmalıdır.



Şekil II.29 W Spir Anlamında ve Lineer Gerilim Ayarı Durumundaki Tek Fazlı Şema.

Ayar sargısının olduğu sargı üzerindeki gerilim değişken ise, endüksiyon ve spir başına düşen gerilim sabittir. Bunun sonucu çıkış geriliminin sabit olması demektir.

Yükte kademe değiştirici boyutlandırmasında ilgili veriler değişken ve sabit endüksiyonda farklıdır. Tablo II.27'de ilgili verilerin karşılaştırması gösterilmiştir.

Tablo II.27 Değişken ve Sabit Endüksiyon Durumlarında Yükte Kademe Değiştiricilerin İlgili Verilerinin karşılaştırması. (Şekil II.29'da Gösterilen Devre Diyagramındaki Durum İçin)

	Sabit Endüksiyon	Değişken Endüksiyon
U_1 Primer gerilimi	$U_{1\min} \le U_1 \le U_{1maks}$	$U_1 = Sabit$
U_2 Sekonder gerilimi	$U_2 = Sabit$	$U_{2\min} \le U_2 \le U_{2maks}$
U_R Ayar sahası	$U_R = U_{1maks} - U_{1\min}$	$U_{Rmaks} = U_1 \cdot \frac{U_{2maks} - U_{2\min}}{U_{2\min}}$
I_{MAKS} Maksimum taşıma akımı (OLTC)	$I_{maks} = \frac{S_N}{3 \cdot U_{1\min}}$	$I_{maks} = \frac{S_N}{3 \cdot U_{1\min}} = Sabit$
U_S Adım gerilimi	$U_S = \frac{U_{TV}}{m}$	$U_{Smaks} = \frac{U_{TVmaks}}{m}$
Lineer Ayar		
U_{TV} Ayar sargısı üzerindeki gerilim	$U_{TV} = U_R$	$U_{TVmaks} = U_{Rmaks}$
Ters dönen yön değiştirme seçicili gerilim ayarı		
U_{TV} "Bir orta pozisyonlu" Ayar sargısı üzerindeki gerilim "Üç orta pozisyonlu"	$U_{TV} = \frac{U_R}{2} \cdot \frac{m}{m-1}$ $U_{TV} = \frac{U_R}{2}$	$U_{TVmaks} = \frac{U_{Rmaks}}{2} \cdot \frac{m}{m-1}$ $U_{TVmaks} = \frac{U_{Rmaks}}{2}$
Kaba ayar sargılı yön değiştirme seçicili gerilim ayarı		
U_{TV} Ayar sargısı üzerindeki gerilim	$U_{TV} = \frac{U_R}{2}$	$U_{TVmaks} = \frac{U_{Rmaks}}{2}$
U_{CV} "Bir orta pozisyonlu" Kaba ayar sargısı üzerindeki gerilim "Üç orta pozisyonlu"	$U_{CV} = U_{TV} + U_S$ $U_{CV} = U_{TV}$	$U_{CVmaks} = U_{TVmaks} + U_{Smaks}$ $U_{CVmaks} = U_{TVmaks}$

Sabit ve değişken endüksiyonda belirleyici parametreler S_N (transformatörün 3 faz gücü), U_1 (faz arası transformatör primer gerilimi), U_R (faz arası transformatör ayar sahası gerilimi), I_{MAKS} (yükte kademe değiştiricinin maksimum taşıma akımı), U_S (adım gerilimi), U_{TV} (ayar sargısı üzerindeki gerilimi), U_{CV} (kaba ayar sargısı üzerindeki gerilim) ve m (kademe sayısı) olarak karşımıza çıkmaktadır.

Sisteme ve işletme gereksinimlerine bağlı olarak anlatılan temel bağlantı şemaları iki sargılı transformatörlere, ototransformatörlere, faz-kaydırma transformatörlerine ve yükseltici devrelere uygulanabilir.

II.4.1. Nötr Uçta Gerilim Ayarı İçin Devreler

İki sargılı güç transformatörlerde en yaygın şekilde kullanılan yıldız bağlı sargının nötr ucuna bağlı kademe değiştirici ile gerilim ayarı Şekil II.30'da gösterilmiştir. Bu çözüm en ekonomik ayar sargısı düzenlemesini sağlamaktadır ve genellikle kademeli yalıtım ile yükte kademe değiştiricinin kompakt üç-faz yıldız noktası birleştirilir.

Aşağıdaki veri yükte kademe değiştiricinin boyutlandırılması ile ilgili olarak önemlidir.

$U_{1\min} \le U_1 \le U_{1maks}$; S_N = Sabit ; Endüksiyon = Sabit

$$U_R = U_{1maks} - U_{1\min} \tag{II.40}$$

$$I_{maks} = \frac{S_N}{3 \cdot U_{1\min}} \tag{II.41}$$

$$U_S = \frac{U_{TV}}{m} \tag{II.42}$$

Lineer gerilim ayarı için (her adımda sabit spir farkı olması):

$$U_{TV} = \frac{U_R}{\sqrt{3}} \tag{II.43}$$

Ters dönen değiştirme seçicili gerilim ayarı için :

"Bir orta pozisyonlu" $$U_{TV} = \frac{U_R}{2 \cdot \sqrt{3}} \cdot \frac{m}{m-1} \tag{II.44}$$

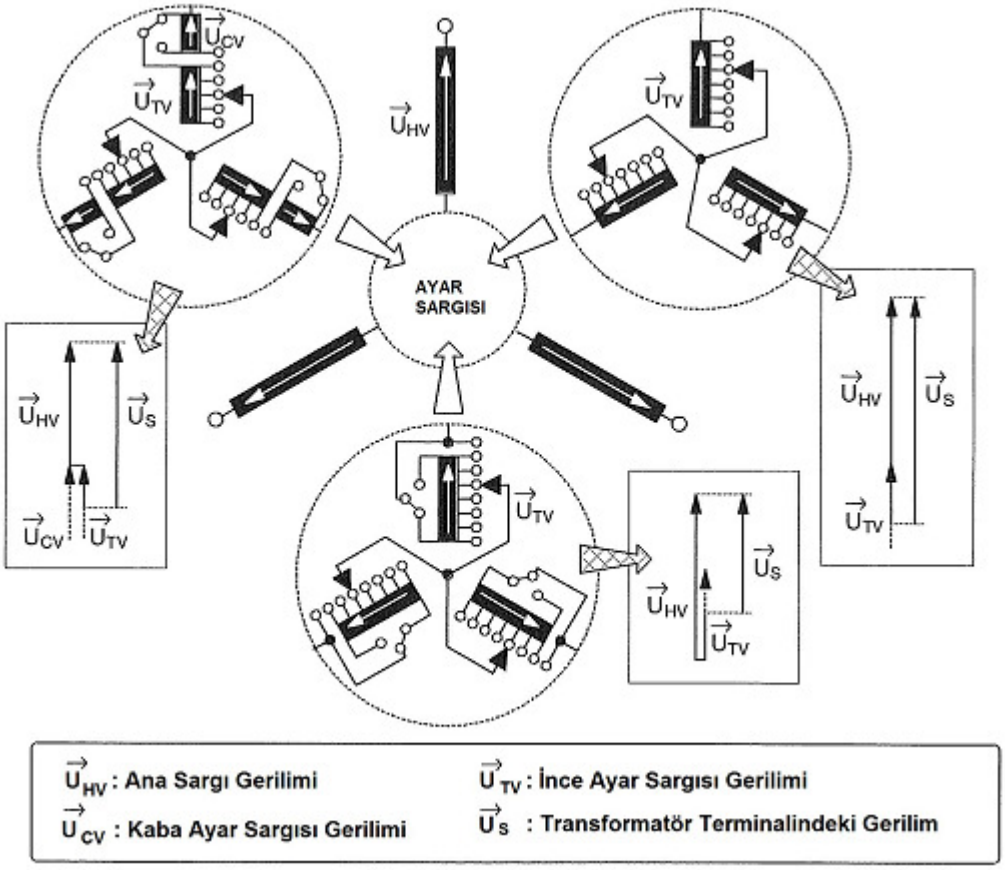
"Üç orta pozisyonlu" $$U_{TV} = \frac{U_R}{2 \cdot \sqrt{3}} \tag{II.45}$$

Kaba ayar sargılı değiştirme seçicili gerilim ayarı için :

$$U_{TV} = \frac{U_R}{2 \cdot \sqrt{3}} \tag{II.46}$$

"Bir orta pozisyonlu" $$U_{CV} = U_{TV} + U_S \tag{II.47}$$

"Üç orta pozisyonlu" $$U_{CV} = U_{TV} \tag{II.48}$$



Şekil II.30 Yıldız Bağlı Sargılarda Kademe Değiştiriciler.

II.4.2 Üçgen Bağlı Sargılarda Gerilim Ayarı İçin Devreler

Üçgen bağlı sargılarda gerilim ayarı için Şekil II.31'de gösterilen düzenlemeler kullanılabilir. Bu şekil sadece yön değiştirme seçicili gerilim ayarı yapılmış sargı düzenlemesini göstermektedir. Kaba ayarlı ve lineer ayarlama gibi diğer ayar prensipleri kullanılan ayar sargısı düzenlemeleri için karşılığı olan bağlantılarla yerdeğiştirmelidir. Bunu yapabilmek için Şekil II.30'u inceleyiniz.

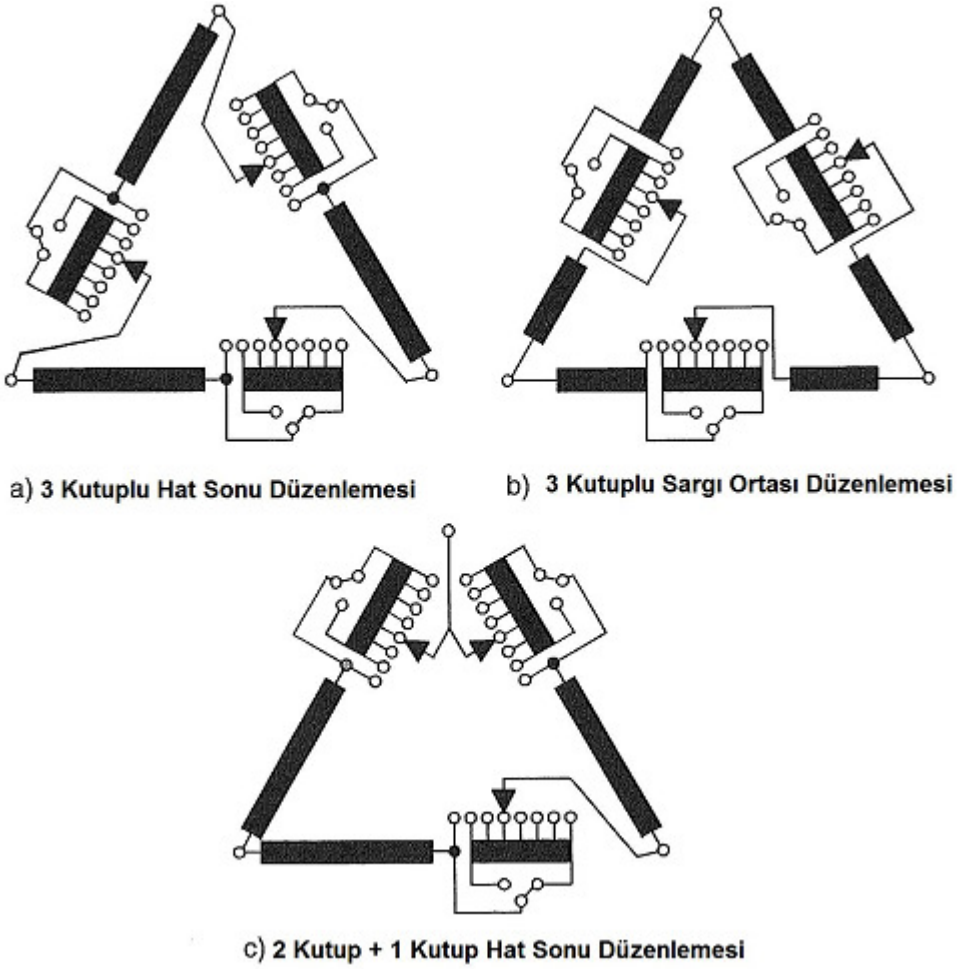
Sargı düzenlemelerdeki tercihi yaparken U_m (maksimum sistem gerilimi), U_k (transformatör empedansı), BIL (yıldırım darbe seviyesi) ve YKD (yükte kademe değiştirici) dizaynı gibi parametrelere bağlıdır. Sargı düzenlemelerdeki tercihler şunlardır [1,4].

1-) 3 kutuplu sargı-sonu

2-) 2 kutuplu + 1 kutuplu sargı-sonu

3-) 3 kutuplu sargı-ortası

3 kutuplu sargı-sonu düzenlemesinde ya 3 fazlı kademe değiştirici ya da üç adet tek fazlı kademe değiştirici kullanılmalıdır. Günümüzde üretilen üç fazlı kademe değiştiricideki en yüksek gerilim seviyesi 145 kV'a kadar mümkündür**.** Şekil II.31'in c şıkkındaki düzenlemeye göre bir adet iki-fazlı bir adet te bir-fazlı kademe değiştirici kullanılmasına izin vermektedir. Bu sayede Şekil II.31'in a şıkkındaki üç fazlı kademe değiştiricisinin uygulanamaması durumundan sonra kullanılacak kademe değiştirici sayısını azaltacaktır [1].



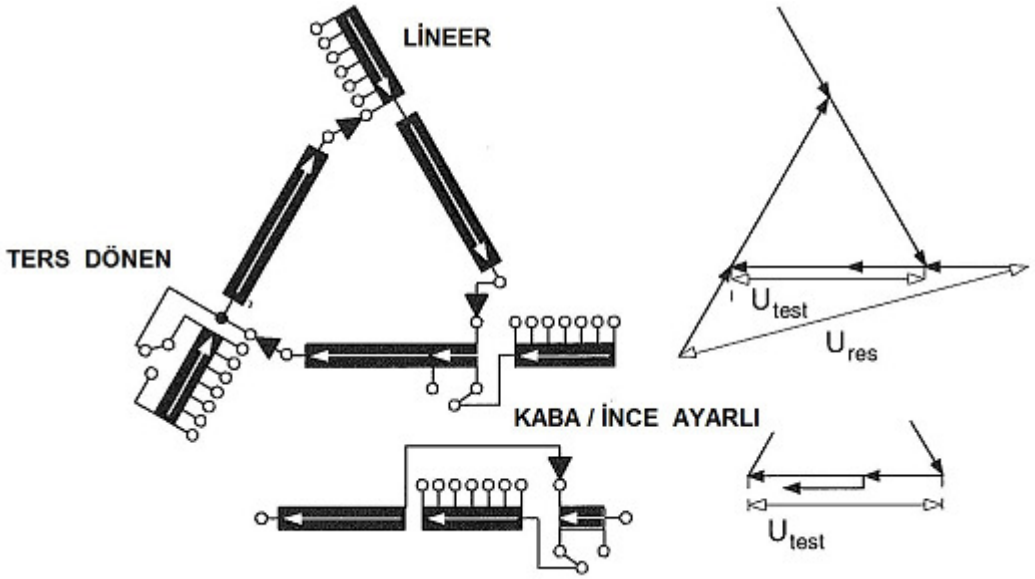
Şekil II.31 Üçgen Bağlı Sargılarda Kademe Değiştiriciler.

Sargı-ortası düzenlemesi YKD'nin maksimum gerilimi konusunda bir avantaj olarak ortaya çıkmaktadır, çünkü yaklaşık olarak transformatörün Um'nin (maksimum sistem gerilimi) yaklaşık üçte birine düşmektedir. Fakat buradaki önemli konu, toprak mesafesinin kontrol edildiği uygulanan gerilim testi esnasında

kademe değiştiricinin maruz kalacağı test gerilimi transformatörün test gerilimi seviyesi ile aynıdır. Bu tip üçgen sargıda kullanıldığı uygulamalarda Um (Maksimum sistem gerilimi) parametresi YKD ve transformatör için aynı olmalıdır.

Üç fazlı kademe değiştirici kullanıldığında dielektrik testler esnasında, özellikle yıldırım darbe testinde, faz-faz mesafelerde oluşacak zorlanmalar açısından dikkate alınmalıdır. Şekil II.32'de gösterildiği gibi, öyle bir kademe varki ayar sargısının tamamı üçgenin dışında kalmaktadır ve salınımdadır. Lineer ayarlamada bu pozisyon negatif uç-pozisyonudur ve tüm spirler devredışındadır. Yön değiştirme seçicili (ters dönen veya kaba ayarlı) ayarlamada bu pozisyon sargı-ortasıdır ve değiştirme seçicisi "+" kontağa basmaktadır.

Şekil II.32'de gösterilen fazör diyagramlardan çıkartılabilecek sonuç, iki farklı fazın salınımda olan ayar sargılarının uçları arasındaki gerilim olan U_{res} değeri, bir faza ugulanan gerilim olan U_{test} değerinden büyük olduğudur. Yıldırım darbe testi esnasında oluşacak U_{res} gerilimi transformatör dizaynına bağlıdır. Bu konu transformatör dizayn edilirken ve kademe değiştirici seçerken dikkate alınmalıdır.



Şekil II.32 Üçgen Bağlı Sargılarda Salınımdaki Ayar Sargılarının Dielektrik Testler Esnasında Durumu.

Ama yine de, U_{res} gerilimi değeri YKD nominal değerlerine göre çok yüksek bir değere ulaşıyorsa, diğer bir olasılık ise elektriksel olarak ayar sargısını kaba ayar ile ana sargı arasına koymaktır ve Şekil II.32'de gösterilmiştir. Böyle bir bağlantı şekli ile ayar sargısı her zaman için üçgenin içinde kalmaktadır ve böylece salınımda

olmadığından emin olabiliriz. Lineer ayarlamada ve değiştirme seçicili gibi diğer bağlantılarda U_{res} gerilimi sınırlandırılmalı veya Şekil II.31'in b ve c şıklarındaki bağlantı seçilmelidir.

Aşağıdaki veri yükte kademe değiştiricinin boyutlandırılması ile ilgili olarak önemlidir.

$U_{1\min} \le U_1 \le U_{1maks}$; S_N = Sabit ; Endüksiyon = Sabit

$$U_R = U_{1maks} - U_{1\min} \tag{II.49}$$

$$I_{maks} = \frac{S_N}{3 \cdot U_{1\min}} \tag{II.50}$$

$$U_S = \frac{U_{TV}}{m} \tag{II.51}$$

Lineer gerilim ayarı için (her adımda sabit spir farkı olması):

$$U_{TV} = U_R \tag{II.52}$$

Yön değiştirme seçicili gerilim ayarı için :

"Bir orta pozisyonlu" $$U_{TV} = \frac{U_R}{2} \cdot \frac{m}{m-1} \tag{II.53}$$

"Üç orta pozisyonlu" $$U_{TV} = \frac{U_R}{2} \tag{II.54}$$

Kaba ayar sargılı değiştirme seçicili gerilim ayarı için :

$$U_{TV} = \frac{U_R}{2} \tag{II.55}$$

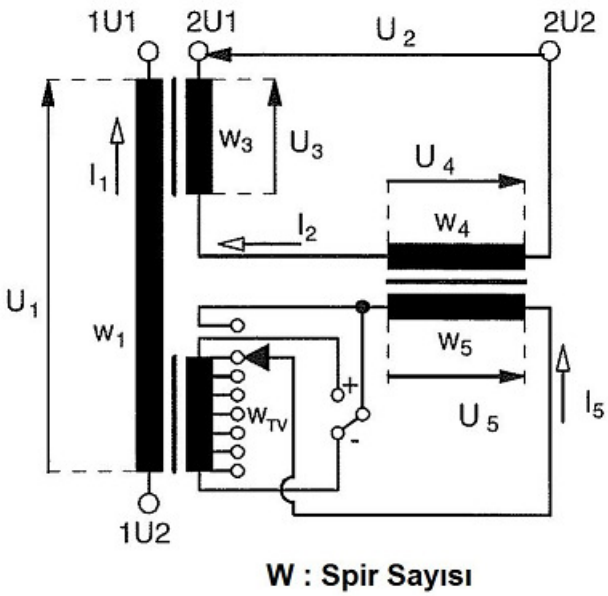
"Bir orta pozisyonlu" $$U_{CV} = U_{TV} + U_S \tag{II.56}$$

"Üç orta pozisyonlu" $$U_{CV} = U_{TV} \tag{II.57}$$

II.4.3 Yardımcı Transformatör ile Gerilim Ayarı İçin Devreler (Yükseltici/Alçaltıcı)

Yardımcı transformatörlü devreler daha ziyade endüstriyel proses transformatörlerde (akım değerlerinin birkaç kiloamper olan) ara devrelerin verilerini kullanarak kademe değiştiriciyi ayarlamaktır. Şekil II.33'te prensip çalışma modu gösterilmiştir [1]. Yardımcı devreler iki sargılı transformatörlerde olduğu gibi ototransformatörlere de uygulanabilir.

Yükte kademe değiştirici ile ilgili verilerin hesaplanması için transformatörün primer ve sekonder devrelerin verileri yeterli değildir. Yani YKD için I_{maks} (maksimum taşıma akımı), U_S (Adım gerilimi) ve U_{TV} (Ayar sargısı üzerindeki gerilim) gibi veriler yeterli değildir. Ayrıca ara devre ve yardımcı devrenin ayrıntıları da gereklidir. Burada en azından yardımcı devrenin çevirme oranı



gereklidir.

Şekil II.33 : Yardımcı Devreye Sahip Gerilim Ayarında Tek Faz Şeması.

Genellikle yardımcı devre ile yapılan ayarlama prensibinde sabit endüksiyon vardır. Eğer değişken endüksiyon ile ayarlama var ise ayarlama primer sargıda gerçekleşir ve Şekil II.33'te gösterilmiştir.

Şekil II.33'te gösterilen devrede olduğu gibi U_1 primer gerilimi sabittir ve U_2 sekonder gerilimi yardımcı transformatör yardımıyla değişmektedir.

Primer : S_N , U_1 ve I_1 = sabittir.

Sekonder : S_N = Sabit , $U_{2\min} \le U_2 \le U_{2maks}$, $I_{2\min} \le I_2 \le I_{2maks}$

Şekil II.33'ten seçilen tanımlar şu şekildedir.

$$U_{2\min} = U_3 - U_4 \tag{II.58a}$$

$$U_{2maks} = U_3 + U_4 \tag{II.58b}$$

$$I_{2\min} = \frac{S_N}{3 \cdot U_{2maks}} \tag{II.59a}$$

$$I_{2maks} = \frac{S_N}{3 \cdot U_{2\min}} \tag{II.59b}$$

Sabit endüksiyon olması durumunda ayar sargısı üzerindeki gerilim yükte kademe değiştirici pozisyonundan bağımsızdır.

I_5 akımı yükte kademe değiştiricinin taşıdığı akımdır. I_5 akımının maksimum değerine ulaştığı değer amper-sarım denkleminden gidilerek I_2 akımının maksimum değere ulaştığı zamandadır. I_2 akımı ise (II.59b) nolu denklem incelendiğinde maksimum değerine $U_{2MİN}$'de ulaşmaktadır. Bu da Şekil II.33'te gösterildiği gibi kademe değiştiricinin uç pozisyonuna karşılık gelmektedir.

Aşağıdaki temel denklemler kademe değiştiricinin eksi uç pozisyonda olması durumunda geçerlidir.

Ana transformatör ;

Amper-sarım denkleminden gidilerek şu denklemlere ulaşılır.

"Bir orta pozisyonlu" $$I_1 \cdot w_1 = I_{maks} \cdot w_{TV} \cdot \frac{m-1}{m} + I_{2maks} \cdot w_3 \tag{II.60a}$$

"Üç orta pozisyonlu" $$I_1 \cdot w_1 = I_{maks} \cdot w_{TV} + I_{2maks} \cdot w_3 \tag{II.60b}$$

çevirme oranlarından şu denkleme ulaşılır.

$$\frac{U_1}{w_1} = \frac{U_{TV}}{w_{TV}} = \frac{U_3}{w_3} \tag{II.61}$$

Yardımcı transformatör ;

Amper-sarım denkleminden gidilerek (II.62) nolu denkleme ve çevirme oranlarından (II.63a) ve (II.63b) nolu denklemlere ulaşılır.

$$I_{maks} \cdot w_5 = I_{2maks} \cdot w_4 \qquad \text{(II.62)}$$

"Bir orta pozisyonlu"
$$\frac{U_4}{w_4} = \frac{U_5}{w_5} = \frac{U_{TV}}{w_5} \cdot \frac{m-1}{m} \qquad \text{(II.63a)}$$

"Üç orta pozisyonlu"
$$\frac{U_4}{w_4} = \frac{U_5}{w_5} = \frac{U_{TV}}{w_5} \qquad \text{(II.63b)}$$

Yükte kademe değiştirici ile ilgili verilerin belirlenmesinde yardımcı transformatör primer ve sekonder devrelerin verileri ve ana transformatörün çevirme oranı (w_1/w_{TV}) gereklidir.

(II.61) nolu denklem kullanılarak ulaşılan denklem ve U_S (Adım gerilimi) aşağıdaki gibidir.

$$U_{TV} = U_1 \cdot \frac{w_{TV}}{w_1} \qquad \text{(II.64)}$$

$$U_S = \frac{U_{TV}}{m} \qquad \text{(II.65)}$$

Maksimum taşıma akımını elde edebilmek için (II.60a) veya (II.60b) nolu denklemlerde (II.61), (II.58a) ve (II.58b) nolu denklemler kullanmak gerekir.

"Bir orta pozisyonlu" $I_{maks} = \left(I_1 - I_{2maks} \cdot \frac{U_{2maks} + U_{2\min}}{2 \cdot U_1} \right) \cdot \frac{w_1}{w_{TV}} \cdot \frac{m}{m-1}$ (II.66a)

"Üç orta pozisyonlu" $I_{maks} = \left(I_1 - I_{2maks} \cdot \frac{U_{2maks} + U_{2\min}}{2 \cdot U_1} \right) \cdot \frac{w_1}{w_{TV}}$ (II.66b)

Yükte kademe değiştirici ile ilgili verilerin belirlenmesinde ana transformatör primer ve sekonder devrelerinin verileri ve yardımcı transformatörün çevirme oranı (w_4/w_5) ile hesaplanabilir. (II.63a) veya (II.63b) nolu denklemlerde (II.58a) ve (II.58b) nolu denklemler kullanılarak :

"Bir orta pozisyonlu" $$U_{TV} = \frac{U_{2maks} - U_{2\min}}{2} \cdot \frac{w_5}{w_4} \cdot \frac{m}{m-1} \qquad \text{(II.67a)}$$

"Üç orta pozisyonlu" $$U_{TV} = \frac{U_{2maks} - U_{2\min}}{2} \cdot \frac{w_5}{w_4} \qquad \text{(II.67b)}$$

U_S (Adım gerilimi) ise (II.65) nolu denklemdeki gibi hesaplanır. Bu durumda I_{maks} (maksimum taşıma akımı) denklemi (II.62) nolu denklem kullanılarak şu şekilde elde edilir.

$$U_S = \frac{U_{TV}}{m}$$

$$I_{maks} = I_{2maks} \cdot \frac{w_4}{w_5} \qquad \text{(II.68)}$$

Endüstriyel veya proses transformatörlerindeki tipik uygulamalarda (fırın transformatörleri gibi) sekonder gerilimi değiştirilerek sekonder akımı sabit tutulması istenmektedir. Yukarıdaki denklemler bu durum içinde geçerlidir, yalnız bu çalışmada transformatör gücü S_N (transformatör gücü) değişkendir ve $I_{2maks} = I_2 =$ sabittir.

II.4.4 Ototransformatörlerde Gerilim Ayarı İçin Devreler

İki yüksek gerilim şebekesi arasında enterkonekte olarak çalışan üç fazlı bir adet veya tek fazlı üç adet transformatörlerin nötr terminalleri topraklanmalıdır. Eğer yüksek gerilim sistemine paralel olarak bağlı daha fazla ototransformatör var ve ayrı gerilim sistemlerini besliyorlar ise tüm yıldız noktalarını topraklamamak toprak arızası akım değerini sınırlaması açısından bir avantaj olacaktır.

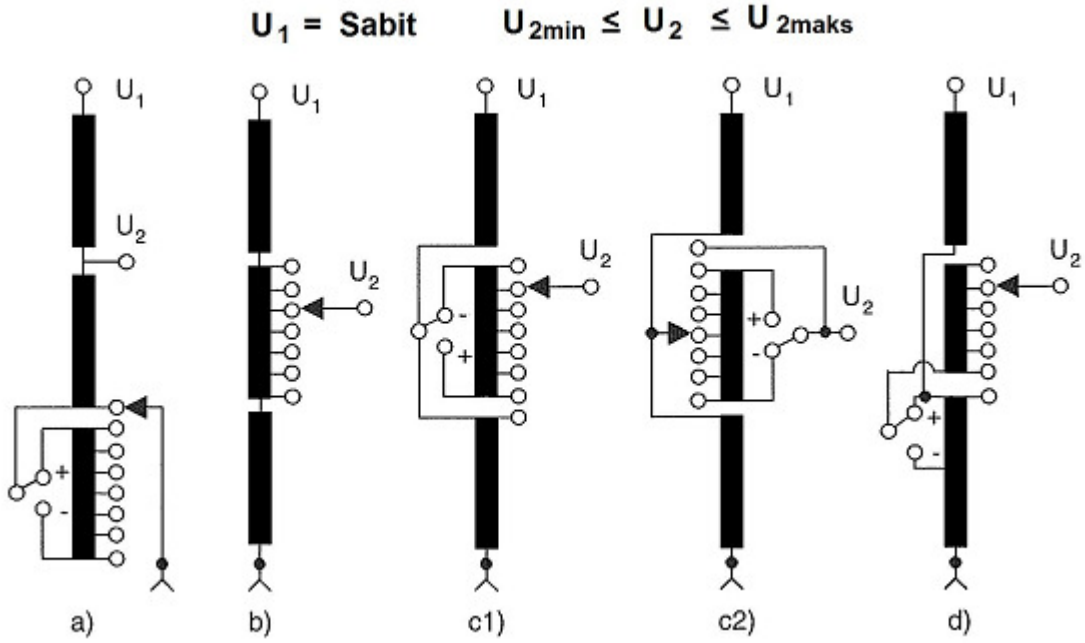
Ototransformatörler gerilim ayarı yaparken iki grup olarak sınıflandırabilir.

1-) Direk gerilim ayarı (Ayar sargısı ototransformatör üzerinde)

2-) Endirek gerilim ayarı (Seri bir ayar sargısı kullanarak)

Direk gerilim ayarı için değişik olasılıklar Şekil II.34'te ve Şekil II.35'te verilmiştir. Endirek gerilim ayarı için Şekil II.36'ta verilmiştir [1]. Prensip olarak, yükte kademe değiştircisi ile gerilim ayarı tipi değerlendirilmesi için, yüksek gerilimin sabit tutulup, çıkış geriliminin değişken olması veya bunun tam tersi olması konusu dikkate alınmalıdır.

Şekil II.34'nin a, b, c1, c2 ve d şıklarında ototransformatörlerin olası sargı düzenlemeleri gösterilmiştir [1]. Bu durumlar incelenirse yüksek gerilim tarafında spir sayısı değişmemektedir ve bu nedenle gerilim sabittir. Bu tarz direk gerilim ayarlı ototransformatör düzenlemesindeki avantaj YKD'nin Um (maksimum işletme gerilimi) seviyesi yüksek gerilim ve alçak gerilim sargılarının işletme gerilimlerine göre düşük olmasıdır. Ama yinede, değişik manyetik ile birleştirilen bir metodtur.



Şekil II.34 Ototransformatörlerde Gerilim Ayarının Oto Noktasında Yapılması Durumunda Olası Ayar Sargısı Düzenlemeleri.

Aşağıdaki veri yükte kademe değiştiricinin boyutlandırılması ile ilgili olarak önemlidir.

$U_{2\min} \le U_2 \le U_{2maks}$; S_N = Sabit ; Endüksiyon = Sabit

$$U_{Rmaks} = U_{2maks} - U_{2\min} \tag{II.69}$$

$$U_{Smaks} = \frac{U_{TVmaks}}{m} \tag{II.70}$$

$$I_{maks} = \frac{S_N}{\sqrt{3}} \cdot \left(\frac{1}{U_{2\min}} - \frac{1}{U_1} \right) \tag{II.71}$$

Lineer gerilim ayarı için (her adımda sabit spir farkı olması):

$$U_{TVmaks} = \frac{U_{Rmaks}}{\sqrt{3}} \cdot \frac{U_1}{U_1 - U_{2maks}} \qquad \text{(II.72)}$$

Ters dönen değiştirme seçicili gerilim ayarı için :

"Bir orta pozisyonlu" $$U_{TVmaks} = \frac{U_{Rmaks}}{\sqrt{3}} \cdot \frac{U_1}{2 \cdot (U_1 - U_{2maks})} \cdot \frac{m}{m-1} \qquad \text{(II.73)}$$

"Üç orta pozisyonlu" $$U_{TVmaks} = \frac{U_{Rmaks}}{\sqrt{3}} \cdot \frac{U_1}{2 \cdot (U_1 - U_{2maks})} \qquad \text{(II.74)}$$

Kaba ayar sargılı değiştirme seçicili gerilim ayarı için :

$$U_{TVmaks} = \frac{U_{Rmaks}}{\sqrt{3}} \cdot \frac{U_1}{2 \cdot (U_1 - U_{2maks})} \qquad \text{(II.75)}$$

"Bir orta pozisyonlu" $$U_{CVmaks} = U_{TVmaks} + U_{Smaks} \qquad \text{(II.76)}$$

"Üç orta pozisyonlu" $$U_{CVmaks} = U_{TVmaks} \qquad \text{(II.77)}$$

Ototransformatör ile gerilim ayarının diğer uygulamalarında endüksiyon sabittir. Şekil II.34'ün b şıkkında lineer ayar gösterilmiştir. Şekil II.34'ün d şıkkında kaba ayar ve ince ayar sargıları ile ayar gösterilmiştir. Şekil II.34'ün c1 ve c2 şıklarındaki düzenlemeler ise transformatör dizaynı ve ayar sahası ile alakalıdır.

Şekil II.34'ün c2 şıkkındaki düzenlemede kademe seçicinin ortak terminali direk olarak aktarma anahtarına bağlıdır ve işletme esnasında sabit bir potansiyele sahiptir fakat Şekil II.34'ün c1 şıkkındaki düzenlemede ise değişkendir.

Aktarma anahtarının maksimum potansiyeli yükte kademe değiştiricinin toprak potansiyeline karşı izolasyon seviyesini belirlemektedir. Ama aslında, toprak potansiyeline olan izolasyon seviyeleri cihazların Um (maksimum sistem gerilimi) ile orantılıdır ve uluslararası standartlar tarafından belirlenmektedir.

Şekil II.34'ün c2 şıkkındaki bağlantının avantajını bir örnekle gösterelim. Örneğin aşağıdaki teknik özelliklere sahip transformatörde inceleyelim.

S_N = 700 MVA,

U_1 / U_2 = 400 / 240 kV (± 10 x %1,5)

Aktarma anahtarının maksimum gerilimi 240 kV + %15 = 276 kV ‘tur. Şekil II.34’ün c1 şıkkındaki uygulanmasında kademe değiştiricinin Um=300 kV (maksimum sistem gerilimi) olması gerekmektedir çünkü ilgili teknik özellilkte bir alt seviye Um=245 kV’tur ve bu örnek için kullanılamaz.

Ama Şekil II.34’ün c2 şıkkındaki gibi kullanılmasında gerilim sabittir ve 240 kV’tur ve Um = 245 kV’luk kademe değiştirici tercih edilebilmektedir. Kademe seçicilerin iç izolasyonlarının dayanma gerilimleri bu iki düzenlemede de aynıdır ve Um ‘e bağlı değildir.

Taşıma akımları ve adım gerilimleri aşağıda listelenen denklemler ile hesaplanabilir.

$U_{2\min} \le U_2 \le U_{2maks}$; S_N = Sabit ; Endüksiyon = Sabit

$$U_R = U_{2maks} - U_{2\min} \tag{II.78}$$

$$U_S = \frac{U_{TV}}{m} \tag{II.79}$$

$$I_{maks} = \frac{S_N}{\sqrt{3} \cdot U_{2\min}} \tag{II.80}$$

Lineer gerilim ayarı için (her adımda sabit spir farkı olması) Şekil II.34’ün b şıkkında gösterilmiştir:

$$U_{TV} = \frac{U_R}{\sqrt{3}} \tag{II.81}$$

Ters dönen değiştirme seçicili gerilim ayarı için Şekil II.34’ün c1 ve c2 şıklarında gösterilmiştir:

“Bir orta pozisyonlu” $$U_{TV} = \frac{U_R}{2 \cdot \sqrt{3}} \cdot \frac{m}{m-1} \tag{II.82}$$

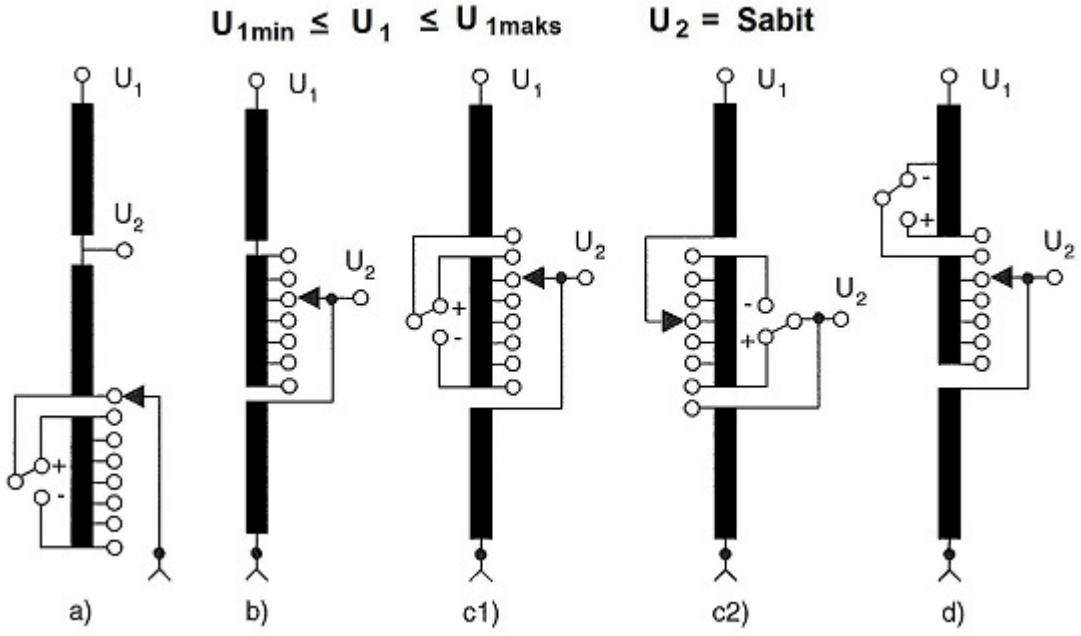
“Üç orta pozisyonlu” $$U_{TV} = \frac{U_R}{2 \cdot \sqrt{3}} \tag{II.83}$$

Kaba ayar sargılı ve değiştirme seçicili gerilim ayarı için Şekil II.34’ün d şıkkında gösterilmiştir:

$$U_{TV} = \frac{U_R}{2 \cdot \sqrt{3}} \qquad \text{(II.84)}$$

"Bir orta pozisyonlu" $$U_{CV} = U_{TV} + U_S \qquad \text{(II.85)}$$

"Üç orta pozisyonlu" $$U_{CV} = U_{TV} + U_S \qquad \text{(II.86)}$$



Şekil II.35 Ototransformatörlerde Gerilim Ayarının Yüksek Gerilim Sargısı Sonunda Yapıldığı Durumda Olası Ayar Sargısı Düzenlemelemeleri.

Şekil II.35'in a, b, c1, c2 ve d şıklarındaki sargı düzenlemelerde ototransformatörün yüksek gerilim sargısı ile ayar yapılmakta ve bu esnada alçak gerilim sargısı sabit tutulmaktadır [1]. Bir önceki durumda açıklanan farklılık c1 ve c2 için yine aynı şekilde geçerlidir.

Şekil II.35'in c1 şıkkındaki avantajını bir örnekle gösterelim. Örneğin aşağıdaki teknik özelliklere sahip transformatörde inceleyelim.

S_N = 700 MVA,

U_1 / U_2 = 400 (± 10 x %1,5) / 240 kV

Aktarma anahtarının maksimum gerilimi 400 kV + %15 = 460 kV 'tur. Şekil II.34'ün c2 şıkkındaki düzenleme uygulanmasında kademe değiştiricinin aktarma anahtarındaki en yüksek gerilim 460kV – (400 kV-240 kV) = 300 kV'tur ve Um=300 kV'luk kademe değiştirici kullanılmalıdır.

Ama Şekil II.34'ün c1 şıkkındaki gibi kullanılmasında gerilim sabittir ve 240 kV'tur ve Um = 245 kV'luk kademe değiştirici tercih edilebilmektedir. Buna alternatif olarak ayar sargısı yüksek gerilim sargısının sonunda olmaktadır fakat kademe değiştirici yüksek gerilim sargısının izolasyon seviyesi ile dizayn edilmelidir. Bu nedenden dolayı nadiren bu yöntem tercih edilmektedir.

Şekil II.35'in a şıkkında gösterilen ve yıldıznoktasında değişken endüksiyon ile gerilim ayarı kullanılan düzenlemelerde kademe değiştirici için gerekli verileri aşağıdaki denklemeler ile hesaplanır.

$U_{1\min} \le U_1 \le U_{1maks}$; S_N = Sabit ; Endüksiyon = Değişken

$$U_{Rmaks} = U_{1maks} - U_{1\min} \tag{II.87}$$

$$U_{Smaks} = \frac{U_{TVmaks}}{m} \tag{II.88}$$

$$I_{maks} = \frac{S_N}{\sqrt{3}} \cdot \left(\frac{1}{U_2} - \frac{1}{U_{1maks}} \right) \tag{II.89}$$

Lineer gerilim ayarı için (her adımda sabit spir farkı olması):

$$U_{TVmaks} = \frac{U_{Rmaks}}{\sqrt{3}} \cdot \frac{U_2}{U_{1\min} - U_2} \tag{II.90}$$

Ters dönen değiştirme seçicili gerilim ayarı için:

"Bir orta pozisyonlu" $U_{TVmaks} = \frac{U_{Rmaks}}{\sqrt{3}} \cdot \frac{U_2}{2 \cdot (U_{1\min} - U_2)} \cdot \frac{m}{m-1}$ (II.91)

"Üç orta pozisyonlu" $U_{TVmaks} = \frac{U_{Rmaks}}{\sqrt{3}} \cdot \frac{U_2}{2 \cdot (U_{1\min} - U_2)}$ (II.92)

Kaba ayar sargılı değiştirme seçicili gerilim ayarı için :

$$U_{TVmaks} = \frac{U_{Rmaks}}{\sqrt{3}} \cdot \frac{U_2}{2 \cdot (U_{1\min} - U_2)} \tag{II.93}$$

"Bir orta pozisyonlu" $U_{CVmaks} = U_{TVmaks} + U_{Smaks}$ (II.94)

"Üç orta pozisyonlu" $U_{CVmaks} = U_{TVmaks}$ (II.95)

Şekil II.35'in b, c1, c2 ve d şıklarında gösterilen gerilim ayarlarında kullanılan düzenlemelerde yükte kademe değiştiricileri için gerekli verileri aşağıdaki denklemeler ile hesaplanır.

$U_{1\min} \le U_1 \le U_{1maks}$; S_N = Sabit ; Endüksiyon = Sabit

$$U_{Rmaks} = U_{1maks} - U_{1\min} \quad \text{(II.96)}$$

$$U_S = \frac{U_{TV}}{m} \quad \text{(II.97)}$$

$$I_{maks} = \frac{S_N}{\sqrt{3} \cdot U_{1\min}} \quad \text{(II.98)}$$

Lineer gerilim ayarı için (her adımda sabit spir farkı olması) Şekil II.35'in b şıkkında gösterilmiştir :

$U_{TV} = \frac{U_R}{\sqrt{3}}$ (II.81)'deki gibidir :

Ters dönen değiştirme seçicili gerilim ayarı için Şekil II.35'in c1 ve c2 şıklarında gösterilmiştir:

"Bir orta pozisyonlu" $U_{TV} = \frac{U_R}{2 \cdot \sqrt{3}} \cdot \frac{m}{m-1}$ (II,82)'deki gibidir :

"Üç orta pozisyonlu" $U_{TV} = \frac{U_R}{2 \cdot \sqrt{3}}$ (II.83)'teki gibidir :

Kaba ayar sargılı değiştirme seçicili gerilim ayarı için Şekil II.35'in d şıkkında gösterilmiştir:

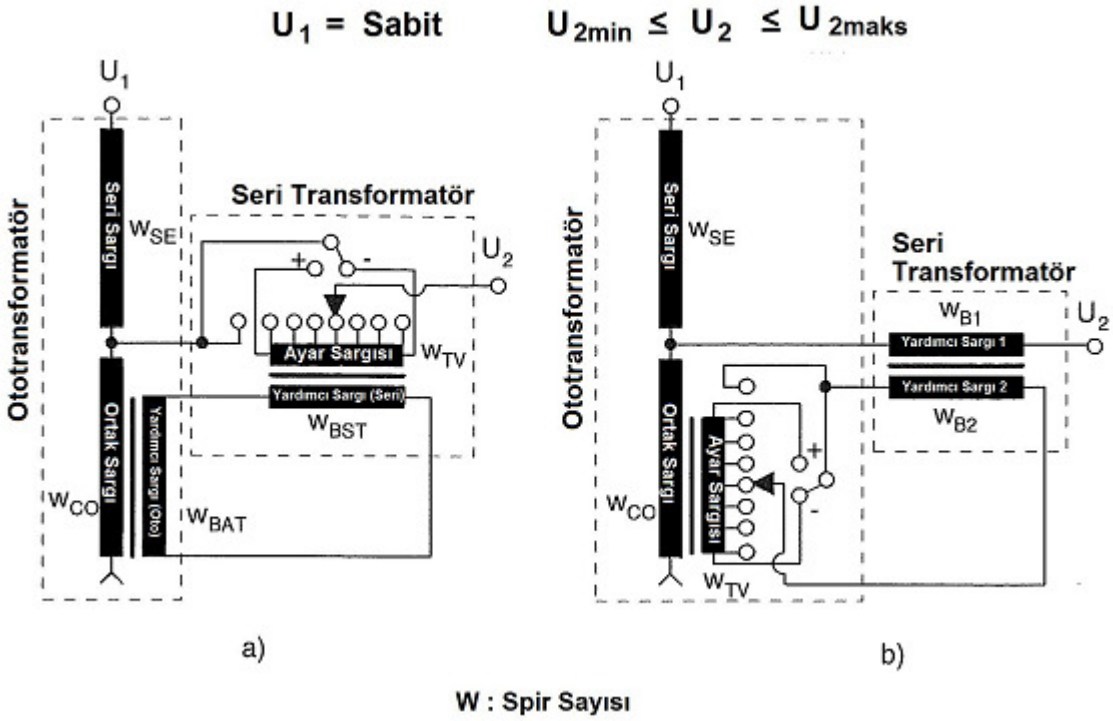
$U_{TV} = \frac{U_R}{2 \cdot \sqrt{3}}$ (II.84)'teki gibidir :

"Bir orta pozisyonlu" $U_{CV} = U_{TV} + U_S$ (II.85)'teki gibidir :

"Üç orta pozisyonlu" $U_{CV} = U_{TV}$ (II.86)'taki gibidir :

Ototransformatörlerde endirek gerilim ayarı için kullanılan tipik düzenlemelerden ikisi Şekil II.36'da gösterilmiştir[1]. Bu çalışma modu Bölüm II.4.3'te açıklanmıştır. Yükte kademe değiştiricisinin ana ototransformatörde kullanılmasında sınırlıyıcı unsurlar olduğunda, iki düzenleme de uygulanabilir. Buna ek olarak bu iki düzenlemenin bir diğer avantajı ise bir faz kaydırma işleminin yapılabilir duruma gelinmesidir. Faz kaydırma işlemi yardımcı transformatörün primer sargısı ana ototransformatörün diğer iki fazının herhangi birine bağlanması durumunda sağlanabilmektedir. Şekil II.36'nın b şıkkında gösterilen düzenleme ototransformatörlerde kullanılabilir ve alçak gerilim değeri kademe değiştirici için olabilen Um (maksimum gerilim) değerinden daha büyüktür.

Yukarıda belirtilen özellikleri ile yardımcı devreli ototransformatörler ayrıca yüksek gerilim U_1'in ayarlanması için de gerçekleştirilirler.



Şekil II.36 Ototransformatörlerde Gerilim Ayarı İçin Seri Transformatör Kullanıldığında Olası Ayar Sargısının Düzenlemleri.

Yukarıda anlatılan direk ve endirek gerilim ayarlama metodlarından hangisinin daha avantajlı olduğu veya her ikisi için sınırlamaların tanımlanması mümkün

değildir. Herbirinin birbirinden farklı avantajları mevcuttur. Direk gerilim ayarı çok fazla ekonomiktir. Endirek gerilim ayarı faz kaydırma işlemi yapmaya imkan sağlamaktadır ve ayar transformatörünün ayrı bir ünite olduğu durumda daha uygundur.

II.5 YKD'NİN BELİRLENMESİ VE İŞLETME ŞARTLARINDA BAKIMI VE KORUNMASI

Belirli bir uygulama veya transformatör için her ne kadar da toplam ürün maliyetinin küçük bir kısmını teşkil etsede uygun YKD seçimi çok dikkatli şekilde yapılmalı. Ama yinede geçmiş 70 yıldaki deneyimler göstermiştir ki transformatörün güvenilirliği ve güvenliği konuları dikkate alındığında, bu hususlarda YKD'nin önemli bir yeri olduğu kesindir. Sonuç olarak istenen her kriterde YKD bulmak mümkün değildir çünkü imalatçılar belli aralıklarda olmak üzere standart değerlere sahip YKD'ler üretmektedirler. Bu ürünler arasından seçmek zorunluluğu vardır. Bu ürünlerin verilerine internet üzerinden ulaşılabilmektedir.

II.5.1 YKD Belirlenirken Dikkat Edilen Teknik Özellikler

IEC 60214-2 nolu yayını YKD'nin seçimi için bir rehber niteliğindedir ve YKD şartnamesi belirlenirken hangi özelliklere dikkat edilmesini açıklamaktadır. Ek olarak yine IEC 60214-2 nolu yayınında transformatör üreticisinin YKD siparişi verirken birlikte vermesi gerektiği bilgilerin listesi mevcuttur [13]. Burada amaç doğru kademe seçimini sağlamak içindir. Ama yinede *Faz-kaydırmalı transformatör* ve *HVDC Doğrultucu transformatör* gibi bazı özel uygulamalarda bu bilgiler yeterli değildir.

Aşağıda belirtilen maddeler YKD seçiminde dikkate alınmalıdır ve IEC 60214-2 nolu yayınından alınarak bazı ek yorumlarda bulunulmuştur [13].

a-) İzolasyon Seviyesi

Transformatörün her bir ayar ucunda oluşacak gerilimlerle ilgili YKD üreticisinden bu gerilimlere müsade edildiğine karşı onayı alınmalıdır. IEC 60214-1 nolu yayınına istinaden bu gerilimler şunlardır [12].

1-) Normal işletme şartlarında maruz kalacağı gerilimler.

2-) Transformatör deneyleri esnasında kademe değiştiricinin de maruz kalacağı uygulanan gerilimler.

3-) Transformatör deneyleri esnasında ve işletme esnasında maruz kalacağı yıldırım darbe gerilimleri.

Ek olarak bazı sargı düzenlemelerinde anormal aşırı gerilimler oluşabilir. Örneğin ototransformatörlerdeki nötr-ucu gerilim ayarı, üçgen bağlı sargılarda sargı-sonu gerilim ayarı ve yükseltici devrelerle gerilim ayarlarında olabileceği gibi. Lineer, kaba-ince ayarlı ve ters dönen kademe düzenlemesi gibi gerilim ayar tipinden oluşan aşırı gerilimler etkilenmektedirler. Transformatör çekirdeğinde değişken endüksiyon olması bile kademe değiştiricide oluşan gerilimleri etkilemektedir.

Çok hızlı geçici ani aşırı gerilimler (VFTO) şebeke arızları ve anahtarlama işlemleri esnasında oluşmaktadır. Bu tarz çok hızlı geçici ani aşırı gerilimlerin (VFTO) sebepleri aşağıda sıralanmıştır.

1-) Yüksek gerilimde hava patlaması ,

2-) 10kHz'in altındaki tetikleme ile çalışan SF6 kesiciler,

3-) 500kHz'e kadar tetikleme ile çalışan vakum kesiciler

4-) Gaz izoleleli (GIS) transformatör merkezleridir.

Osilasyonlu gerilimleri oluşturan en önemli faktörler reaktör yüklü transformatörlerin anahtarlaması, inrush akımlarının kesilmesi, yakın mesafe hataları (2-faz ve 3 faz), ve transformatörlü hatların enerjilendirilmesidir. Özellikle Türkiye Elektrik İletim Anonim Şirketi bu anahtarlama esnasında oluşan gerilimlerin transforamtöre zarar verip vermediğini ürün kabul testleri arasına koyarak ve yağda çözünmüş gaz analizi ölçümü isteyerek kontrol etmektedirler [21].

GIS transformatör merkezlerindeki çok hızlı geçici ani aşırı gerilimler (VFTO), konvansiyonel transformatör merkezlerindekilerden karakteristiksel olarak farklıdır. İletken-toprak arızalarındaki ve devre-kesici tetiklemelerdeki atlama zamanı genellikle 5 ila 10 nanosaniye arasındadır. GIS sistemlerindeki dalgaların frekansı kısa boyutlandırmalardan ve bastırmalardan dolayı MHz mertebesindedir.

Bu aşırı gerilimler transformatörleri zorladıkları gibi YKD'leri de zorlamaktadırlar. Bu nedenden dolayı, kullanıcı şebeke koşullarını ve problemlerini iyi bilerek kritik şebeke koşullarının ihtiyaçlarını belirtmelidir.

Genellikle şebeke ve sistemler parafudurlar ile korunduklarından, faz-toprak olarak bağlantıları yapılır. Hat-sonu uygulamalarındaki üç fazlı YKD kullanıldığında, kademe değiştiricinin faz arası mesafeleri parafudurların kalıcı gerilim büyüklüğünün iki katı büyüklükte olacaktır. Bu olayın olması için üç fazlı

anahtarlama aşırı gerilim oluşması durumunda faz olarak karşı karşıya geldiğinde olacaktır.

b-) Nominal Taşıma Akımı

Kademe değiştiricinin maksimum taşıma akımı (I_{um}) değeri transformatörün ayar sargısının en yüksek değerinden ve kademe değiştiricinin nominal taşıma akımı (I_u veya I_{maks}) değerinden daha büyük olmak zorundadır. Gerilim ayar devresine bağlı olarak nominal taşıma akımının hesaplanması Bölüm II.4'te anlatılmıştır.

c-) Aşırı Yükleme Akımı

IEC 60076-7 nolu yayınında belirtildiği şekliyle transformatörler ve YKD'ler aşırı-yüklemeye maruz kalırlar. Bu standartta yükte kademe değiştiricilerin transformatörler üzerindeki etkileri açıklanmıştır [17]. YKD ile ilgili istekler IEC 60214-2 nolu yayınla uyumludur. YKD'lerin maksimum taşıma akımı (I_{um}) değeri nominal taşıma akımı (I_u) değerinin 1.2 katıdır. Bu işlem esnasında YKD'nin kontaklarındaki sıcaklık artışları IEC 60214-1 nolu yayınında belirtilen sıcaklık limitleri aşmamalıdır. Yağ içindeki kontaklardaki sıcaklık artışı 20 K'ni aşmamalıdır. Kontak malzemesine bağlı olarakta hava ortamında 35 ile 65 K'ni aşmamalıdır [12].

Maksimum taşıma akımı geçtiğinde geçiş dirençlerindeki sıcaklık artışı yağlı ortamdakilerde 350 K'dir. Hava ortamında ise bu değer 400 K'dir. Kademe değiştirme işlemlerinin sayısı değişik aşırı yükleme koşullarında sınırlandırılmalıdır. Bu sınırlandırma değeri IEC 60214-1 nolu yayınında istendiği gibi geçiş dirençlerinin test edilmesini karşılamalıdır.

d-) Kısa-Devre Akımı

YKD'nin dayanabileceği kısadevre akımı değeri IEC 60214-1 nolu yayınında istendiği değere dayanmalıdır ve kullanıldığı transformatörün kısa-devre akımı değerinden daha büyük olmalıdır.

Küçük empedans ve yardımcı transformatör olması durumlarında daha özel dikkat verilmelidir. Bazı durumlarda kısa-devre akımı değeri YKD seçiminde belirliyici unsur olur.

Genel olarak YKD'nin kısa-devre akımına dayanması beklenir ama bu kısa-devre akımı altında işlem yapması beklenmez. IEC 60214-1 nolu yayınında belirtildiği şekli ile, kısa-devre akımının R.M.S değeri (2 saniye) kademe değiştiricinin maksimum taşıma akımının 10 ila 20 katı kadar bir değere kadar

olabilir. Kısa-devre akımının başlangıç değeri R.M.S. değerinin 2.5 katı değerdedir [12].

e-) Kesme Kapasitesi

Transformatörün nominal akımı ile komşu iki kademesi arasındaki gerilim farkı YKD'nin maksimum taşıma akımı ile adım gerilimi parametreleri açısından uyumlu olmalıdır. Çoğu durumlarda maksimum taşıma akımı değerine ulaşılan adım gerilimine maksimum adım geriliminden daha küçük değerde ulaşılmaktadır.

Genelde geçiş empedansları uygun taşıma akımı ve uygun adım gerilimi değerlerine ayarlanır ki YKD tarafından anahtarlanan akımlar ve bu esnada oluşan toparlanma gerilimlerinin tip testleri ile kontrol edilen değerleri aşmaması sağlanır. Geçiş empedansının belirlenmesi için kontak kaplaması ve geçiş dirençlerinin ısınma değerleri dikkate alınır.

Belirli uygulamalarda, örneğin ark-ocağı transformatörlerinde olduğu gibi, maksimum sürekli değerinin iki veya üç katı oranındaki anlık aşırı yüklemelerle de işlem yapmak ihtiyacı olabilir. YKD seçerken bu tarz gereksinimlere de dikkat etmek gerekir.

Manyetik endüksiyonun değişmesi ile gerilim ayarı yapılan transformatörlerde, bu olayın adım gerilimini dolaysısyla da kesme kapasitesini etkilediği konusu gözönünde tutulmalıdır. Değişken endüksiyonda maksimum adım gerilimi ile ilgili hesaplamalar Bölüm II.4'te verilmiştir.

f-) Kademe Pozisyonu Sayısı

YKD üreticileri tarafından standartize edilen pozisyon sayılarındaki aralıklarda pozisyon seçimi yapılmalıdır.

Kademe sahası arttıkça işletme ve test esnalarında ayar sargısı üzerindeki gerilim zorlanmaları artabilmektedir. Özellikle ark-ocağı ve doğrultucu elektroliz transformatörlerinde geniş ayar sahasına ihtiyaç duyulmaktadır. YKD'nin bulunduğu sargıya sabit gerilim uygulanıyorsa, işletme ve testler esnasında minimum spir olduğu pozisyonda ayar sargısında oluşan aşırı zorlanmalar dikkatle göz önünde bulundurulmalı ve gerekli önlemler alınmalıdır.

g-) Değiştirme Seçicilerinde Deşarj Problemleri

Değiştirme seçicisi işlemi kademe değiştirici orta pozisyonunda iken oluşmaktadır. Bu işlem esnasında, yük akımı ayar sargısı üzerinden akmamaktadır. Bu nedenledir ki ayar sargısı geçici olarak ana sargıdan bağlantısı kesilmektedir. Ve sargı potansiyeli boşta kalmaktadır. Bu tarz durumlarda, açan ve kapatan kontaklar

arasındaki desarjlar değiştirme seçicilerinin işlemi esnasında oluşmaktadır. Dielektrik aşırı zorlanmalarla ilgili zorluklardan kaçınmak için ve gas oluşumlarını engellemek için özel tedbirler gereklidir.

h-) Mekanik Ömür

Eğer yıllık işlem adedi 50.000 adeti geçmekte ise mekanik çalışma oranı dikkate alınmalıdır. Örneğin, ark-ocağı, elektroliz gibi transformatörlerde bir yıl içinde bu miktarda kademe değiştirici işlemi mümkündür. Modern kademe değiştiricilerde mekanik ömür genellikle 1.000.000 ile 1.500.000 adet işlemdir ve hatta daha da fazladır.

ı-) Motor-Sürücü Mekanizması

Motor-sürücü mekanizması YKD üreticisinden farklı bir üreticiden alınması durumunda, motor-sürücü mekanizmasının gerekli tüm görevleri yerine getirip getirememesinden alıcı sorumludur.

j-) Basınç ve Vakum Testleri

Modern yükte kademe değiştiriciler transformatörler kurutma işlemleri esnasında maruz kalacakları vakuma dayanıklıdırlar. Ayrıca transformatöre yapılan basınç testleri esnasında kademe değiştiricilere de basınç uygulanmaktadırlar. Eğer özel bir vakum veya basınç testi transformatöre uygulanacak ise konu ile ilgili olarak kademe değiştirici üreticisi bilgilendirilmelidir.

k-) Düşük Sıcaklık Şartları

Yükte kademe değiştiricileri –25 ^{0}C gibi düşük sıcaklıklarda çalışacakmı, bu konu ile ilgili YKD imalatçısı bilgilendirilmeli ve transformatör yağının kalitesi dikkate alınmalıdır. Transformatör yağının düşük sıcaklıklardaki kinematik viskositesi, parlama noktası ve ark söndürme kapasitesi önemli faktörlerdir.

l-) Sürekli Çalışma

Eğer yükte kademe değiştirici biribirini takip eden birkaç kademe değiştirme işlemi yapacaksa, sıcaklık koşullarının onaylanması gerekmektedir.

II.5.2 YKD'lerde Arıza Tespiti

Transformatör arızalarının çok büyük bir bölümünün yükte kademe değiştiricilerde ve bunlarla ilgili olduğu bilinmektedir. Bu nedenle YKD'nin işletme güvenliği hayati önem arzetmektedir. YKD'deki problemler mekanik doğaya veya elektriksel doğaya sahip olabilirler. Mekanik sebepler olarak sürücü mekanizması, yaylar, şaft ve benzeri olaylardır. Elektriksel sebepler olarak ise kontak kaplaması,

geçiş dirençlerinin yanması, dielektrik arızlar ve benzeri olaylardır. Problemin tespit edilmesinde aşağıdaki metodlar ile iyi indikatörler elde edilebilir [2].

1-) Sürücü motor torku ve akımının ölçülmesi,

2-) YKD çalışması esnasında akustik sinyallerin kaydedilmesi,

3-) Transformatör yağı ile aktarma anahtarı arasındaki sıcaklık farkının tespiti,

4-) Kontak direncinin ölçülmesi

Yukarıda belirtilen metodlarla elde edilen sonuçlar referans değerler ile karşılaştırılarak bir yorum yapma imkanı olacaktır. Bu görüntüleme sistemlerinin önemli faydası bu tarz bilgilerin değerlendirilmesi için uzun süreli deneyim kazanmaktır.

Arıza tespiti için "Wavelet Analizi" önemli yollardan biridir. Yükte kademe değiştiriciler işlemleri esnasında kendilerine ait vibrasyon işaretleri üretmektedir. Vibrasyon sinyalinin tabiatı gereği harmoniksel ve durağan olmaması nedeni ile geleneksel frekans ve zaman-frekans teknikleri ile vibrasyon sinyalinin büyüklüğü, sayısı ve oluşum aralığı gibi ayrıntılı verilerin tespiti mümkün olmamaktadır. Bu durumda kullanılması gereken Wavelet Analizidir. Bu şekilde YKD'nin durumu hakkında fikir sahibi olabiliriz [6].

Bu teknik son yıllarda transformatör arıza araştırması ve korumasında uygulanmaktadır. Fourier Dönüşüm Temelli Metodlar üzerine geliştirilmiştir. Her bir frakans bileşeninin herhangi bir zaman çözünürlüğünde çalışma imkanı vermektedir.

Farklı arıza şartlarında transformatör nötr akımının dalga şekli darbe uyarmalarına bağlı olarak değişken doğaya sahiptir ve etkin şekilde sınıflandırılabilir. Bu sınıflandırmada frekans ve zaman seçicili özellik kullanılır. Alışılagelmiş FRA temelli teknikler ile zamana bağlı bir sinyalin belirli bir frekans bileşeninin zaman yerleşimini tespit etmek mümkün değildir. Wavelet Analizi ile hem istenilen frekansta ve istenilen zamanda inceleme yapmak mümkündür [2].

Bu zaman-frekans belirleme özelliği ile darbe arıza akımlarının sınıflandırılmasında kullanılmaktadır. "Wavelet Analizi" ve "Nörol Şebeke" yaklaşımlarının birleştirilmesi ile dahili bir arızanın veya harici demaraj akımı olması durumunlarının birbirinden ayırt edilebilmektedir.

Yukarıda anlatılan elektriksel ve mekaniksel teknik özellikler bakımından daha önceki bölümlerdede sınırlamalar olduğunu belirtmiştim. Bu sınırlamalar ile ilgili ayrıntılı bilgi edinmek için bu alanda imalat yapan ABB ve MR gibi iki önemli

üreticinin kataloglarını incelemek fikir verici olacaktır. Burada en önemli sınırlayıcı unsurlar taşıma akımı ve maksimum işletme gerilimi değerleridir. Bu üreticilerin internet sitelerinde çok faydalı bilgiler mevcuttur [18,19].

YKD'lerde arıza tespiti için vibrasyon sinyallerinin takibi önemli bir yoldur. Bu konu ile ilgili çalışmalar yapılmaktadır ve ulaşılan sonuçlar makaleler halinde yayınlanmaktadır. IEEE'nin internet sitesi ziyaret edildiğinde bu konu ile ilgili çok sayıda çalışmaya ulaşılabilmektedir [20].

II.5.3 YKD'lerde Genel Bakım

YKD'de bakım yapmanın amacı güvenilirliğinin arttırılması içindir. Hareketli parçaların olduğu ve akımı ve gerilimi kesme işlemi için kullanılan herhangi bir cihazda bakım yapılmalıdır. İmalatçıların bakım talimatlarında belirtilen konuları burada tekrar etmeye gerek yok. Bakım için gerekli genel prensipleri belirtmek faydalı olacaktır. YKD güvenilirliğini etkileyen faktörler şunlardır.

1-) Yağın kalitesi

2-) Kontak basıncı

3-) Kontak direnci ve sıcaklığı

4-) Hareketlerin zamanlaması (kontakların geçiş zamanları)

5-) Yük akımları

6-) İşlem adedi

Kumanda devresinin ve sürücü mekanizmasının bakımı sıkıntı olmaz çünkü harici parçalardır. Dişliler ve diğer hareketli parçalar yıpranmış olabilir ve yenisi ile değiştirmek gerekebilir. Fakat genel olarak, bu parçalar uzun yıllar ve çok sayıda işlem yapabilecek gibi dizayn edilirler ve çok sık olarak bakıma ihtiyaç duymazlar. Ağırlıklı olarak anahtarlar ve eğer var ise bağlantı plakaları kontrol edilir. Kontaklar periyodik olarak incelenmeli ve düzgünlüğü onaylanmalı. Bu kontrollerin sıklığını belirleyen unsur yükte kademe değiştiricinin işlem adedine, kontaklardaki taşıma akımının değerine ve yağın temizliğine bağlıdır.

Kontakların incelenmesi için ve problemli olanların yenileri ile değiştirlmesi için transformatör servis dışı bırakılmalı ve enerjisiz durumda iken çalışma yapılabilmektedir. Transformatörü servis dışına almak maliyeti yüksek olduğu için, inceleme aralığının mümkün olduğunca uzun tutmak istenmektedir. Yukarıdaki tavsiyeler bir çok imalatçının kullanım kılavuzlarında belirtilmektedir.

Aşağıda yükte kademe değiştiricilerin arıza oranını ve bakım maliyetlerini azaltıcı tavsiyeler verilmektedir.

1-) Kademe değiştirme işlemini gaz ve karbon üretmektedir. Kontakların hareketi ise metalde aşınmaya ve metal parçacıkların kopmasına sebep olacaktır. Uzun vadede bu parçacıklar yalıtkan yağın dielectrik özelliğini etkileyecektir. Dahası, karbon parçacıklar kontaklara yapışır ve kontak direncini arttırır. Ayrıca karbon parçacıklar bağlantı plakasında oluşabilir ve plaka yüzeyinde iz yapabilir.

Bu nedenlerden dolayı YKD'nin yağı filtrelenerek temizlenirse güvenilirliği ve performansı arttırılmış olur. Bu özellikle ark anahtarının seçici anahtar ve yön değiştirme anahtarı aynı kompartımanda olduğunda geçerlidir. Bazı YKD'lerde filtreler mevcuttur ve izolasyon yağı inceleme aralıkları daha uzun tutulmaktadır. Ama bazı YKD'lerde ark vakumlu ayrı bir ortamda olmaktadır ve yağda bozulma işlemi olmamaktadır.

2-) YKD'de sık sık çalışan kontaklar temiz kalmaktadırlar. Fakat hareket etmeyen kontaklarda oksidasyon olmaktadır ve karbon toplanmaktadır. Zamanla kontak dirençleri artmakta ve daha fazla ısı üretmektedir. Bu sıkıntı yön değiştirme seçicilerinde tipik olarak olmaktadır. Bunlardan bazıları yılda birkaç defa işlem yapmaktadır. Nadiren işlem yapan bu anahtarlarda hasar oluşabilmektedir. Bazı kullanıcılar YKD'lerini ayda en az bir defa orta pozisyondan geçirerek yön değiştirme seçicisini kullanıma sokmakta ve bu şekilde YKD'nin performansını arttırmayı hedeflemektedir.

3-) Bazı kullanıcılar YKD bakımı ve incelemesi için transformatörleri servis dışı yapmak yerine YKD'leri için görüntüleme prosesleri kullanmaktadırler ve böylece maliyet kaybından kurtulmuş olurlar. Bu proseslerden bir tanesi yağda çözünmüş gazların analizidir. Düzenli olarak alınan yağ numunelerindeki çözünmüş gaz miktarları takip edilerek durum hakkında fikir sahibi olunabilir. Her bir YKD için normal bir gaz artışı trendi tespit edilir ve artış trent dışına çıktığında problem oluşmuş anlamına gelir ve inceleme yapılır. Bu yağda çözünen gaz analizi ile bakım aralığı daha uzun tutulabilmekte ve ayrıca çok kötü bir arızanın sinyalleri oluşmadan alınabilmektedir.

4-) Diğer bir yöntem ise YKD kutusunda gözetleme pencereleri olmasıdır. Yağ filtresi ile beraber kullanıldığında kutuyu açmadan kontakların durumu kontrol edilebilir ve transformatörü de servis dışı bırakmak zorunluluğu ortadan kalmış olur.

5-) Diğer olası bir prosedür ise yükte kademe değiştiricisi kompartımanında infrared ölçme cihazları ile düzenli olarak sıcaklık kontrolü yapılır. Bu ölçüm çok ucuz ve kolaydır. Kontaklarda olan sıcaklık artış değerlerini YKD kutusunun duvar sıcaklığı ölçülerek tespit edilebilir. Eğer YKD kutusunun duvarının sıcaklığı transformatör kazan yüzeyinin sıcaklığından 7 ile 10 ^{0}C'den daha fazla sıcak ise transformatör içinde ters giden durumlar var demektir. Bu durumda YKD incelenmeli. Bu yöntemle oldukça fazla problem tespit edilebilir [4].

Günümüzde modern kazan-içi tip kademe değiştiricilerin periyodik bakımları 100.000 kademe değiştirme işleminde veya 6-7 yılda bir olacak şekilde bu iki kriterden hangisi önce gerçekleşirse onu takip ederiz. Burada bakımdan anlatılmak istenen aktarma anahtarının ilgili bölmesinden çıkarılıp ark kontakları temizlenip geçiş dirençlerinin sağlamlığı kontrol edildikten sonra yerine yeniden monte edilir [5].

Durum görüntüleme sistemleri ile bakım yapılmış durumdaki ve bakım yapılmamış durumdaki vibrasyon sinyalleri incelendiğinde birbirinden farklılık göstermektedir. Bakım yapılmamış durumda vibrasyon sinyalleri arasındaki süre daha kısadır [7]. Buda arızaya yakın olduğumuzu göstermektedir ve buradaki en büyük etken temizliği yapılmamış olan kontaklardır.

II.5.4 YKD'ler İçin Koruyucu Cihazlar

YKD'ler için koruyucu cihazlar aşağıda belirtilen zorlanmaların etkisinden korunmak ve sınırlamak için dizayn edilir.

1-) Ark anahtarı kompartımanındaki basıncın kabul edilebilir seviyeyi aşmaması,

2-) YKD'nin aşırı akımının belli değerleri aşmaması,

3-) YKD için izin verilen alt sıcaklık değeri –25 ^{0}C'den düşük sıcaklıklarda çalışmama,

4-) Ark anahtarının izolasyonundaki geçici aşırı gerilim zorlanmalarını kabul edilebilir seviyeyi aşmaması.

Koruyucu cihazlar

1-) Kazan-içi tip YKD'lerde şalter kafasının üzerindeki boruda yağ akış rölesi (Buchholz) kullanarak koruma yapılır. Röle transformatöre alarm/açma sinyali verir. Sadece alarm sinyali almak olası büyük arızaların oluşmasına sebebiyet verecektir.

2-) Basınç ile çalışan röleler yine YKD kafasına yerleştirilir. Basınç rölelerinin cevap süresi yağ akış rölesine göre biraz daha hızlıdır. Yalnız burada önemli olan kesiciye açma yaptırılana kadar geçen toplam süre önemli olduğu için yağ akış rölesinin açtırması daha hızlıdır.

3-) Sıcaklık değeri –25 ^{0}C'den düşük olduğunda YKD'yi süren mekanizmaya bloklayacak şekilde cihazlar kullanmak.

4-) YKD sürücü mekanizmasını aşırı akım durumunda bloklayacak şekilde cihazlar yerleştirmek. Bu aşırı yükleme genellikle transformatör akımının 1.5 katı değeridir.

5-) Kaba/İnce Ayar sargısının yüksek gerilim tarafında olduğu durumlarda yıldırım darbe testleri esnasında "Direnç Tipi" YKD'leri orta pozisyonda iken ark anahtarındaki dahili zorlanmalar çok yüksek seviyelere çıkmaktatır. Bu değer yıldırım darbe geriliminin % 25'i ve kesikli yıldırım darbenin %40'ına kadar değerlere ulaşabilmektedir. Yıldırım darbe gerilimi seviyesi 550 kV'tan sonra bu değerler önem kazanmaktadır.

Ark anahtarını aşırı gerilimlere karşı korumak için iki prensip vardır. Atlama küreleri ve lineer olmayan dirençler geçiş dirençlerine seri olarak yerleştirilir. Atlama küreleri orta büyüklükteki transformatörler için güvenilir bir çözümdür. Lineer olmayan dirençler ise büyük güçlü transformatörlerde dahil olmak üzere tüm transformatörlerde kullanılabilir. Eğer işletme şartları gereği atlama küreleri sık sık devreye giriyorsa lineer olmayan direnç kullanmak daha iyi bir çözümdür.

İlk başlarda, Silikon-Karbit (SiC) elemanlar kullanılmaktaydı. Bu maddenin özel karakteristiğinden dolayı tüm sahada kullanma imkanı olmamaktadır. Ne zaman ki yüksek güçlü Çinko Oksit (ZnO) varistörler kullanılmaya başlandı, soruna çözüm olduğu görülmüştür. Son yirmi yıldır Çinko Oksit (ZnO) varistörler ile sorun çözülmüştür.

6-) Görüntüleme ve diyagnostik cihazlar ile YKD'lerin durumları takip altında tutularak düşük bir ek maliyet ile olası büyük arızalarda maruz kalınacak yüksek maliyetlerden kurtulmuş olabiliriz [8]. Geleneksel yöntem olan ve transformatör yağında çözünmüş gazların takibi ile yapılan durum tespitinde transformatör enerjisiz bırakılmalı ve YKD'nin bazı parçlarının sökülmesi gerekmektedir. Fakat son zamanlarda yaygınlaşmaya başlayan görüntüleme cihazları ile transformatör enerjisiz bırakılmadan da kontrol yapılabileceği görülmüştür [9].

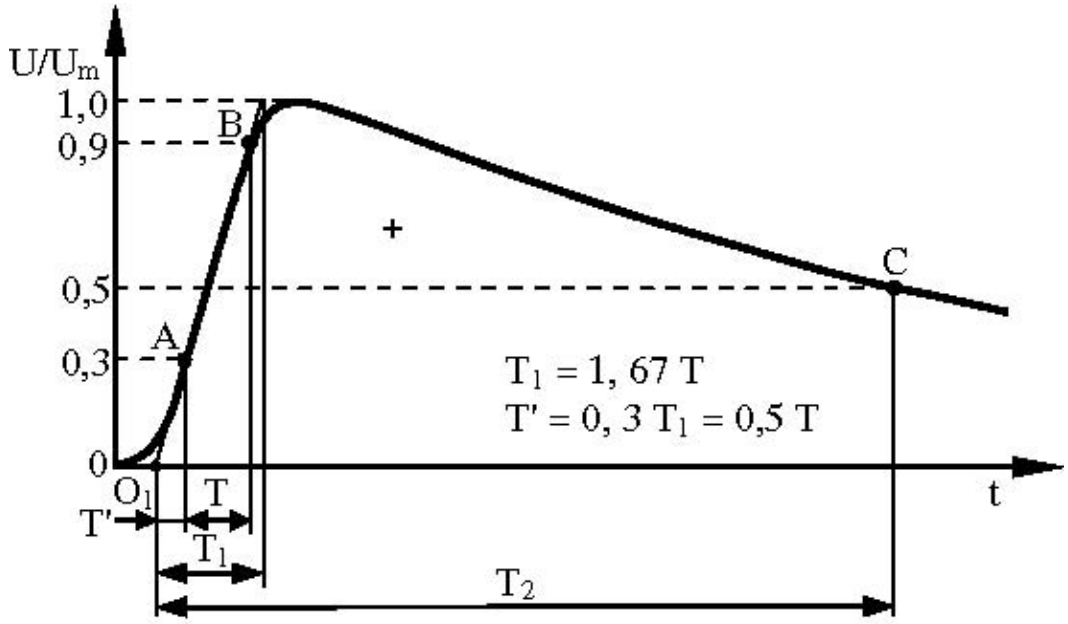
BÖLÜM III

YILDIRIM DARBE TESTLERİNDE YÜKTE KADEME DEĞİŞTİRİCİLERDEKİ ELEKTRİKSEL ZORLANMALAR

Transformatör dizayn edilirken müşterinin talep ettiği teknik değerler sağlanacak şekilde hesaplar yapılır. Yine transformatörün ana aksesuarlarından olan yükte kademe değiştircilere tasarım esnasında karar verilir. Yükte kademe değiştirici seçilirken bu alanda üretim yapan firmaların katalogların faydalanır. Seçme işlemi esnasında YKD'nin I_{um} (nominal taşıma akımı), U_s (adım gerilimi), I_{kd} (kısa devre dayanma akımı), U_M değeri (maksimum sistem gerilimi), AC değeri (Güç frekansı gerilimi dayanımı seviyesi) ve BIL değeri (yıldırım darbe gerilimi seviyesi) gibi teknik değerlerinin en az transformatör teknik değerleri seviyesinde veya daha büyük değerlerde olması gerekmektedir. İlk aşamada bu değerler IEC 60214-1'e göre belirlenir ve yükte kademe değiştirici üretimi tamamlanmış transformatör üzerine bağlanmasından sonra yıldırım darbe dağılımı ölçümü yapılarak transformatörün ve kademe değiştiricinin yıldırım darbe testi esnasındaki gerilimlere uyumluluğu tespit edilebilmektedir.

Bu çalışmada çeşitli güç ve gerilim seviyelerinde transformatörlerde yapılan ölçümler ile transformatörün yıldırım darbe testi esnasında maruz kalacağı elektriksel zorlanmalar incelenmiştir. Bu çalışmayı yapabilmek için yıldırım darbe gerlimini üretebilecek bir güç kaynağına ihtiyaç vardır. Bu güç kaynağının ürettiği enerji paralel ve seri dirençler üzerinden boşaltılarak ideal darbe gerilim şekli elde edilir. Tabi ki bu kaynakta üretilen gerilimin ölçülebilmesi için dijital bir osiloskopa ihtiyaç vardır. Yapılan bu çalışmada kullanılan güç kaynağı, osiloskop, bağlantı kabloları ve transformatörlerin resimlerini EK I'de verilmiştir. Güç kaynağı üzerinde Rp (paralel direnç), Rs (seri direnç), L (endüktans), Cs (seri kapasite) ve Cb (kapasite) elemanları değerleri ayarlanabilmektedir. Bu elemanların değerleri ile oynayarak ideal eğri bulunur. Eğrinin uygunluğuna dijital osiloskopumuzun ekranında gördüğümüz şekiller ile karar verilmektedir. Bu çalışmada kullanılan osiloskop TEKTRONIX markasının DPO 4054 modelidir.

Darbe gerilimi üreticisinde bulunan Rp, Rs, L, Cs ve Cb ayar elemanlarının ne işe yaradığını anlamak için kısaca şu bilgileri vermekte faydalı olacaktır. Yıldırım darbe gerilimi şeklinde dikkat ettiğimiz T_1 ve T_2 zamanları ve eğri şekli IEC 60076-3 standartında açıklanmıştır. T_1 zamanı yükselme zamanı olarak adlandırılır ve istenen değeri 1.2 μs ± %20'dir [15]. T_2 zamanı ise yarılanma zamanı veya kuyruk zamanı olarak adlandırılmakta ve istenen değeri 50 μs ± %30'dur [15]. Darbe gerilimi şekli Şekil III.1'de verilmiştir.



Şekil III.1 Yıldırım darbe gerilimi eğri şekli.

Rs (seri direnç) değeri arttırıldığında T_1 zamanı artmakta, azaltıldığında ise T_1 zamanı düşmekte yani ikisi arasında doğru orantı vardır.

Rp (paralel direnç) değeri arttırıldığında T_2 zamanı artmakta, azaltıldığında ise T_2 zamanı düşmekte yani ikisi arasında doğru orantı vardır.

Cs (paralel kapasite) değeri arttırıldığında T_2 zamanı artmakta, azaltıldığında ise T_2 zamanı düşmekte yani ikisi arasında doğru orantı vardır.

Cb (kapasite) değeri arttırıldığında T_1 zamanı artmakta, azaltıldığında ise T_1 zamanı düşmekte yani ikisi arasında doğru orantı vardır.

L (endüktans) değeri arttığında T_1 zamanı düşmekte yani aralarında ters bir korelasyon vardır.

Bu araştırma kapsamında yapılan her 3 transformatördeki ölçümlerde güç kaynağı ayarları aşağıdaki şekilde yapılmıştır.

Rs = 68 E Ω

Rp = 6 E8 Ω

L = 0 H

Cs = 1000 nF

Cb = 68 F

Ölçümlerin yapılış şekli, darbe yapılacak faz terminaline 400 V gibi bir gerilim uygulayarak transformatörün sargılarında oluşan gerilimleri tespit etmektir. Bu işlemi yapabilmek için 4 kanallı dijital osiloskop kullanılmıştır. Osiloskopun bir kanalı ile uygulanan gerilimi, diğer iki kanal ile herhangi iki noktanın toprağa olan potansiyel farkı ölçülmektedir. Bizi ilgilendiren bu iki nokta arasındaki potansiyel farkıdır. Bu işlem osiloskopun fonksiyonundan faydalanılarak bir gerilimden diğeri çıkartılmak suretiyle potansiyel farkı elde edilir. Osiloskop ekranındaki eğri şekilleri bu ölçümler esnasında elde edilen eğrilerdir ve EK II, EK III ve EK IV'de verilmiştir.

Yapılan çalışmaların her birinin çok sayıda ölçüm içermesinin sebebi darbe testi esnasında yükte kademe değiştiricisinin üzerinde oluşan gerlimlerin ayrıntılı elde edilmesi içindir. Ölçümler esnasında darbe yapılan fazın kaba ve ince ayar sargıları boyunca dolayısıyla kademe değiştiricinin + , - ve ayar uçlarında oluşan zorlanmalar tespit edilmiştir. Bunun yanında test edilmeyen komşu fazların uçlarındaki zorlanmalar hakkında bilgiler toplanmıştır. İkinci ve üçüncü deney transformatörlerinde minimum, maksimum ve nominal gibi kademelerde ölçümler yapılarak sargıların değişik durumlarında kademe değiştiricideki zorlanmalar belirlenmiştir.

Yükte kademe değiştiricinin değişik uçlarında oluşan gerilimlerin eğri şekilleri genlikleri ve zaman boyunca gösterdiği farklılıklar incelenmiştir. Ölçümlerde kademe değiştiricinin iki noktası arasındaki potansiyel farkının belirlenmesine ek olarak bu iki noktanın toprağa karşı potansiyelleri de tespit edilmiştir.

III.1 ORTA GÜÇLÜ TRANSFORMATÖLERDE ELEKTRİKSEL ZOLANMALAR

Araştırmanın yapıldığı birinci örnekteki transformatörün gücü 100 MVA'dır. Transformatörün yüksek gerilim ve alçak gerilim sargıları yıldız bağlıdır. Gerilim ayarı yüksek gerilim sargısındadır. EK II'de transformatör, kademe değiştirici ve osilokop çıktıları ile ilgili resimler verilmiştir.100

Tablo III.1 100 MVA Transformatörün ve YKD'nin Teknik Verileri.

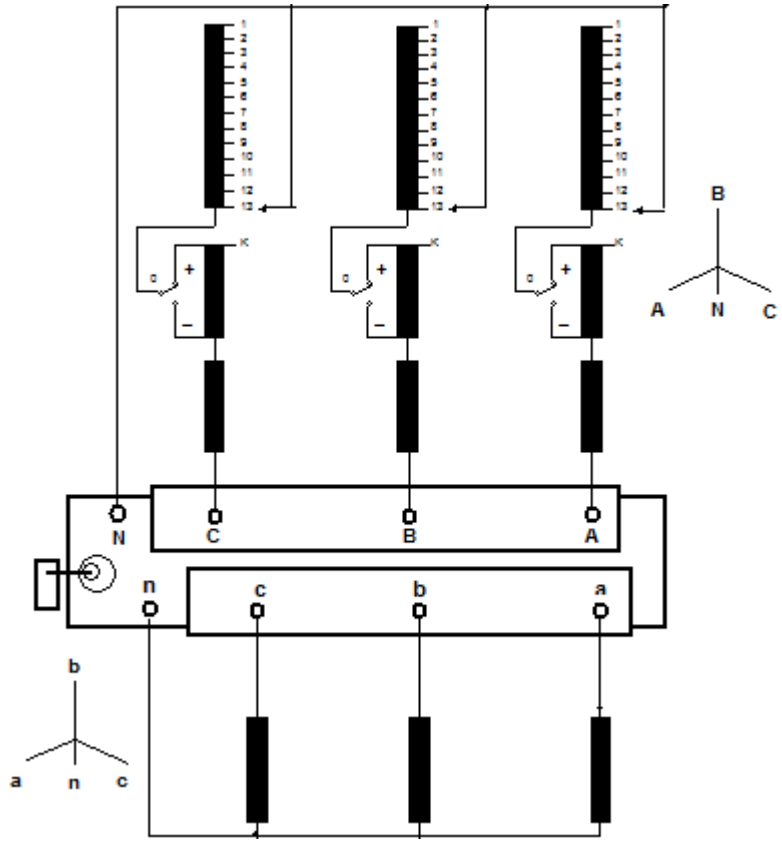
TRANSFORMATÖR (ORTA GÜÇTE)			
		YG Sargısı	AG Sargısı
NOMİNAL GÜÇ	MVA	100	100
MAKSİMUM GERİLİM (Poz 25) NOMİNAL GERİLİM (Poz 13) MİNİMUM GERİLİM (Poz 1)	kV	177,1 154,0 130,9	33,6
MİNİMUM AKIM (Poz 25) NOMİNAL AKIM (Poz 13) MAKSİMUM AKIM (Poz 1)	A	326,0 374,9 441,1	1718,3
BAĞLANTI ŞEKLİ	-	YILDIZ	YILDIZ
GERİLİM AYAR ŞEKLİ	-	Nötr Ucunda	Yok
ADIM GERİLİMİ	V	1111,4 (1925/√3)	Yok

TRANSFORMATÖR ELEKTRİKSEL TEST SEVİYELERİ				
	YG	YG-N	AG	AG-N
Um (kV)	170	-	36	36
AC (kV)	275	38	70	70
BIL (kV)	650	95	170	170
SI (kV)	-	-	-	-

YÜKTE KADEME DEĞİŞTİRİCİ		
MARKASI		MR
TİPİ	OLTC	M III 500-Y-72.5 / C-14273 G
UYGULAMASI		Üç fazlı nötr ucu
MAKSİMUM TAŞIMA AKIMI	A	500
MAKSİMUM ADIM GERİLİMİ	V	3300
ANAHTARLAMA KAPASİTESİ	kVA	1400
ELEKTRİKSEL ÖZELLİKLERİ	kV	Um = 72,5 , AC= 140 , BIL=350

Yüksek gerilim sargısının nominal gerilimi 154,0 kV'tur ve uç kademelerdeki gerilimler maksimum kademede %15 yüksek ve 177,1 kV'tur. Minimum kademede ise %15 düşük ve 130,9 kV'tur. Transformatör için düşünülen gerilim değişimi her bir kademede %1.25'tir ve bu nedenle ±12 olmak üzere toplam 25 kademe mevcuttur. Gerilim ayarı yapmak için kaba ve ince ayar sargıları mevcuttur. YG sargısı AC gerilimi seviyesi 275 kV ve BIL gerilimi seviyesi 650 kV'tur. Transformatör YG sargısı kademeli izoleli olduğu için YG-N ucu AC gerilimi seviyesi 38 kV ve BIL gerilimi seviyesi 95 kV'tur. AG sargısı AC gerilimi seviyesi 70 kV ve BIL gerilimi seviyesi 170 kV'tur. AG sargısı tam izoleli olduğu için AG-N ucu AC ve BIL seviyeleri aynıdır. Verilen bu bilgilerin özeti Tablo III.1'de verilmiştir.

100 MVA transformatörde yapılan darbe dağılımı ölçümünde transformatör nominal pozisyon olan kademe 13'te idi. Şekil III.2'de kademe 13 için bağlantı şekli görülmektedir. Transformatörün 13 nolu kademesinde kaba ayar sargısı devrededir ve ince ayar sargısı 13 nolu ayar ucuna basmaktadır ve tümüyle devre dışındadır.



Şekil III.2 100 MVA Transformatörün Pozisyon 13 (Nominal Kademe) İçin Bağlantı Şekli.

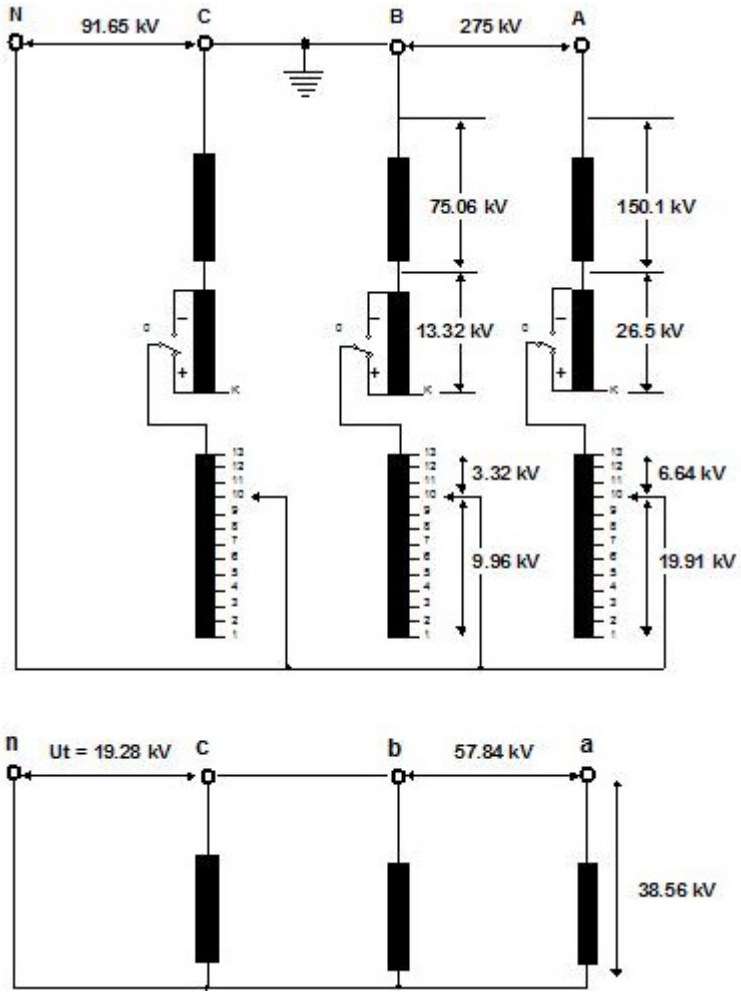
100 MVA transformatör üzerinde yapılan ölçümlerde elde edilen sonuçlar herhangi bir aşırı gerilim oluşmadığını göstermiştir. Deney sonucu veriler Tablo III.2'de verilmiştir. 100 MVA transformatör üzerindeki ölçümler esnasında elde edilen osiloskop eğrileri EK II'de verilmiştir.

Tablo III.2 100 MVA Transformatör Üzerinde Pozisyon 13 İçin Yapılan Ölçümler.

Poz. No : 13 (NOMİNAL KADEME) **Gerilimli :** **A** **Topraklı :** B, C, N, a, b, c, n			
Ölçüm No:	Ölçüm yeri	**Genlik (V)**	**LI (kV)**
Referans	**A - TOPRAK**	*400,0*	650,0
1	A(1) - A(+)	*14,2*	23,1
	A(1) - TOPRAK	*-14,0*	-22,8
	A(+) - TOPRAK	*9,6*	15,6
2	A(+) - B(+)	*1,4*	2,3
	A(+) - TOPRAK	*-9,8*	-15,9
	B(+) - TOPRAK	*1,4*	2,3
3	B(-) - A(-)	*-100,0*	-162,5
	B(-) - TOPRAK	*24,0*	-48,8
	A(-) - TOPRAK	*112,0*	182,0
4	B(-) - C(-)	*-4,8*	-7,8
	B(-) - TOPRAK	*-15,0*	-24,4
	C(-) - TOPRAK	*-16,0*	-26,0
5	A(+) - C(+)	*3,2*	5,2
	A(+) - TOPRAK	*-10,0*	-16,3
	C(+) - TOPRAK	*-19,0*	-30,9
6	A(1) - A(+)	*13,2*	21,5
	A(1) - TOPRAK	*13,6*	22,1
	A(+) - TOPRAK	*-14,0*	-22,8

100 MVA transformatör üzerinde yapılan ölçüm neticelerini ayrıntılı şekilde incelersek, en yüksek gerilimin darbe yapılan fazın kaba ayar sargısı uçlarına geldiği ve 182 kV mertebelerinde olduğunu görebiliriz. Buradan kaba ayar sargısına gelen darbe seviyesi normal darbenin % 28'i gibidir. İnce ayar sargısına düşen gerilim ise 22 kV civarındadır. Kademe değiştirici darbe gerilimi seviyesi 350 kV'tur ve oluşan maksimum değerden küçüktür. B ve C fazlarının kaba ayar sargılarında oluşan gerilimler düşüktür. Ama yine o fazlar test edildiğinde A fazı seviyesindeki gerilimler oluşacaktır.

Bu transformatör için seçilen yükte kademe değiştiricinin üreticisi MR'dır ve tipi M III 500-Y-72.5 / C-14273 G. Bu tipin katalog değerleri incelendiğinde nominal taşıma akımı değeri 500 amper, maksimum işletme gerilimi 72,5 kV, AC gerilimi dayanma seviyesi 140 kV ve yıldırım darbe gerilimi seviyesi 350 kV'tur. Bu değerler incelendiğinde YG sargısının nötr ucuna yerleştirilen kademe şalteri seçilirken, nötr izolasyon seviyesinden yüksek seçilmiştir. Endüklenme gerilimi deneyi esnasında transformatörün YG sargısının nötründe 91,65 kV gerilim oluşmaktadır. Sargı ve kademe değiştirici izolasyonu bu teste dayanacak seviyede tercih edilmelidir. Endüklenen gerilim deneyinin bağlantı şeması Şekil III.3'te verilmiştir.



Şekil III.3 100 MVA Transformatörün Endüklenen Gerilim Bağlantı Şeması.

III.2 BÜYÜK GÜÇLÜ TRANSFORMATÖRLERDE ELEKTRİKSEL ZOLANMALAR

Araştırmanın yapıldığı ikinci örnekteki transformatörün gücü 125 MVA'dır. Transformatörün YG sargısı yıldız ve AG sargısı üçgen bağlıdır. Gerilim ayarı yine yüksek gerilim sargısındadır. EK III'te transformatör, kademe değiştirici ve osilokop çıktıları ile ilgili resimler verilmiştir.

Tablo III.3 125 MVA Transformatörün ve YKD'nin Teknik Verileri.

TRANSFORMATÖR (BÜYÜK GÜÇTE)			
		YG Sargısı	AG Sargısı
NOMİNAL GÜÇ	MVA	125	125
MAKSİMUM GERİLİM (Poz 25) NOMİNAL GERİLİM (Poz 13) MİNİMUM GERİLİM (Poz 1)	kV	437,0 380,0 323,0	33,25
MİNİMUM AKIM (Poz 25) NOMİNAL AKIM (Poz 13) MAKSİMUM AKIM (Poz 1)	A	165,1 189,9 223,4	1718,3
BAĞLANTI ŞEKLİ	-	YILDIZ	ÜÇGEN
GERİLİM AYAR ŞEKLİ	-	Nötr Ucunda	Yok
ADIM GERİLİMİ	V	2742,4 (4750/√3)	Yok

TRANSFORMATÖR ELEKTRKSEL TEST SEVİYELERİ				
	YG	YG-N	AG	
Um (kV)	420	52	36	
AC (kV)	630	95	70	
BIL (kV)	1425	250	170	
SI (kV)	1050	-	-	

YÜKTE KADEME DEĞİŞTİRİCİ		
MARKASI		MR
TİPİ	OLTC	M III 350-Y-123 / D-14273 G
UYGULAMASI		Üç fazlı nötr ucu
MAKSİMUM TAŞIMA AKIMI	A	350
MAKSİMUM ADIM GERİLİMİ	V	3300
ANAHTARLAMA KAPASİTESİ	kVA	1000
ELEKTRİKSEL ÖZELLİKLERİ	kV	Um = 123,0 , AC= 230 , BIL=550

Yüksek gerilim sargısının nominal gerilimi 380,0 kV'tur ve uç kademelerdeki gerilimler maksimum kademede %15 yüksek ve 437,0 kV'tur. Minimum kademede ise %15 düşük ve 323,0 kV'tur. Transformatör için düşünülen gerilim değişimi her bir kademede %1.25'tir ve bu nedenle ±12 olmak üzere toplam 25 kademe mevcuttur. Gerilim ayarı yapılırken kaba ve ince ayar sargıları mevcuttur. YG sargısı AC gerilimi seviyesi 630 kV ve BIL gerilimi seviyesi 1425 kV'tur. Transformatör YG sargısı kademeli izoleli olduğu için YG-N ucu AC gerilimi seviyesi 38 kV ve BIL gerilimi seviyesi 95 kV'tur. AG sargısı AC gerilimi seviyesi 70 kV ve BIL gerilimi seviyesi 170 kV'tur. AG sargısı tam izoleli olduğu için AG-N ucu AC ve BIL seviyeleri aynıdır. Verilen bu bilgilerin özeti Tablo III.3'te verilmiştir.

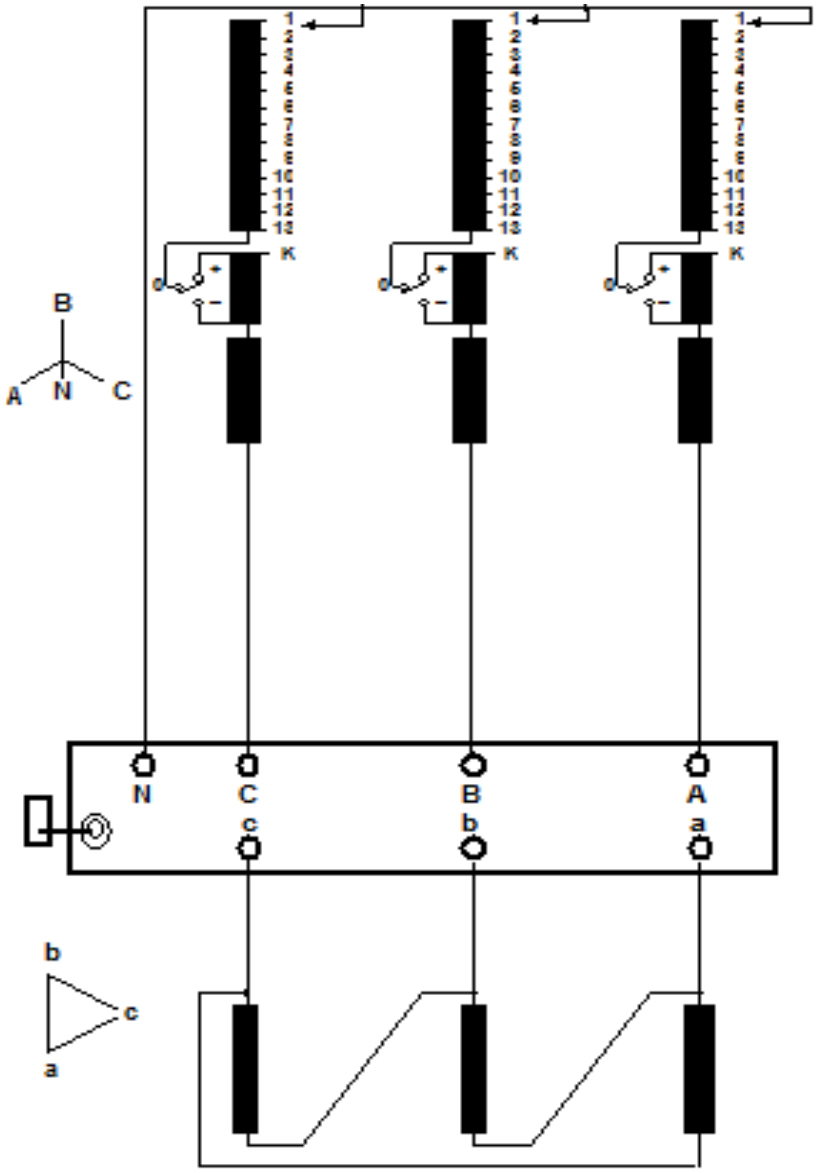
125 MVA transformatör üzerinde darbe dağılımı prensip kademeler olan minimum, maksimum ve nominal pozisyonlarda yapılmıştır. Ölçümlerin yapılma şekli Bölüm III'ün giriş kısmında anlatıldığı gibi yapılmıştır. 125 MVA transformatör üzerindeki ölçümler esnasında elde edilen osiloskop eğrilerini EK III'de verilmiştir.



Şekil III.4 125 MVA Transformatörün YG Çıkışı Tarafından Görünüşü.

POZİSYON 25

İlk grup ölçümler pozisyon 25'te yapılmıştır. Bu pozisyonun bağlantısı Şekil III.5'te gösterildiği gibidir. YG sargısına kaba ayar ve ince ayar sargıları seri gelmektedir ve devredeki spir oranının en yüksek olduğu kademedir.



Şekil III.5 125 MVA Transformatörün Pozisyon 25 (Maksimum Kademe) İçin Bağlantı Şekli.

7 adet ölçümdeki değerleri incelersek, darbe testi yapılan fazın kaba ayar sargısı üzerindeki gerilim 499 kV civarındadır ve bu değer nominal darbe seviyesinin % 35'i kadardır. İnce ayar sargısı üzerine düşen gerilim 428 kV kadardır ve %30'a tekabül etmektedir. İnce ayar sargısı ile kaba ayar sargısı üzerine düşen gerilim bu iki sargıya düşen münferit gerilimlerin toplamı olan 927 kV olmamaktadır bunun da

sebebi iki eğrinin şekli birbirinden farklı olmasıdır ve farklı zamanlarda tepe değere ulaşmasıdır.

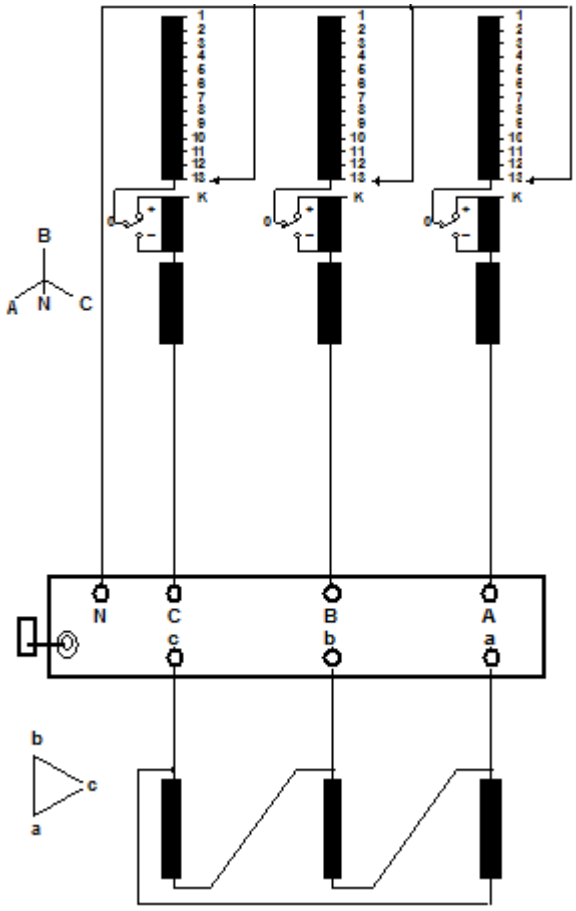
Tablo III.4 125 MVA Transformatör Üzerinde Pozisyon 25 İçin Yapılan Ölçümler.

Poz. No : 25 (MAKSİMUM KADEME) **Gerilimli :** **A** **Topraklı :** B, C, N, a, b, c, n			
Ölçüm No:	**Ölçüm yeri**	**Genlik (V)**	**LI (kV)**
Referans	A - TOPRAK	*400,0*	1425,0
1	A(+) - A(-)	*-140,0*	-498,8
	A(+) - TOPRAK	*120,0*	427,5
	A(-) - TOPRAK	*185,0*	659,1
2	A(+) - B(+)	*107,0*	381,2
	A(+) - TOPRAK	*100,0*	356,3
	B(+) - TOPRAK	*15,0*	53,4
3	A(+) - C(+)	*103,0*	366,9
	A(+) - TOPRAK	*100,0*	356,3
	C(+) - TOPRAK	*13,0*	46,3
4	A(-) - B(-)	*169,0*	602,1
	A(-) - TOPRAK	*156,0*	555,8
	B(-) - TOPRAK	*13,0*	46,3
5	A(-) - C(-)	*161,0*	573,6
	A(-) - TOPRAK	*156,0*	555,8
	C(-) - TOPRAK	*13,0*	46,3
6	A(+) - A(1)	*101,0*	374,1
	A(+) - TOPRAK	*100,0*	356,3
	A(1) - TOPRAK	*35,0*	117,6
7	A(-) - A(1)	*159,0*	573,6
	A(-) - TOPRAK	*156,0*	555,8
	A(1) - TOPRAK	*31,0*	117,6

Test edilmeyen B ve C fazlarına ait "+" ve "-" uçlarda oluşan gerilimler 45-55 kV mertebelerinde olduğu gösterilmiştir ve nominal darbe gerilimi seviyesinin %3-4 gibi seviyelerine tekabül etmektedir. Değerlerin bu seviyelerde olmalarının sebebi topraklı noktalara çok yakın olmaları ile açıklanabilir. A fazı için tespit edilen zorlanma seviyeleri, B ve C fazlarında darbe testi yapıldığı zaman benzer değerlerde olacaktır.

POZİSYON 13

İkinci grup ölçümler Pozisyon 13'te yapılmıştır. Bu pozisyonun bağlantısı Şekil III.6'da gösterilmiştir. YG sargısına sadece kaba ayar sargısı seri gelmektedir, ince ayar sargısı ise salınımdadır. Devredeki spir sayısı kademe 25'e göre daha az olmasına rağmen yıldırım darbe seviyesi değişmez ve 1425 kV ile yapılır. Bunun anlamı bu kademedeki zorlanma Pozisyon 25'e göre daha fazla olması ile açıklayabiliriz.



Şekil III.6 125 MVA Transformatörün Pozisyon 13 (Nominal Kademe) İçin Bağlantı Şekli.

7 adet ölçümü incelersek, darbe testi yapılan fazın kaba ayar sargısı üzerindeki gerilim 410 kV civarındadır, bu değer nominal darbe seviyesinin % 29'u kadardır ve Pozisyon 25'e göre daha düşüktür. Salınımda olan ince ayar sargısı üzerine düşen gerilim 514 kV kadardır ve %36'ya tekabül etmektedir. İnce ayar sargısı devrede olmamasına rağmen bu kademede daha fazla gerilime maruz kalmaktadır.

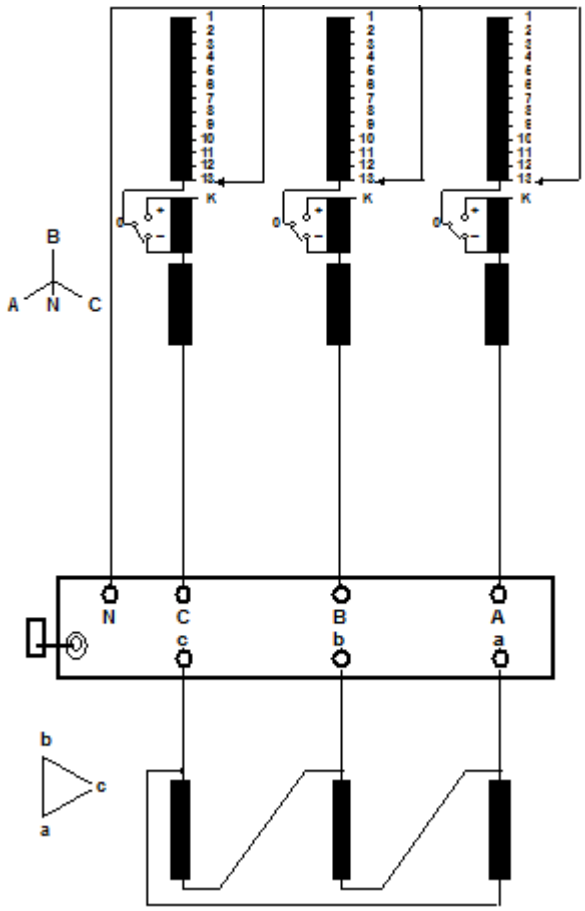
Ölçülen değerler göstermektedir ki test edilmeyen B ve C fazlarına ait "+" ve "-" uçlarda oluşan gerilimler 132 kV'ta kadar yükselebilmekte ve bu değer Kademe 25'e göre daha yüksektir. Ama yinede % 9 seviyelerini aşmamaktadır. Yine değerlerin bu seviyelerde olmalarının sebebi topraklı noktalara çok yakın olmaları ve Pozisyon 25'e göre iki katı gibi çıkmasının sebebi ise kademe şalteri seçici ucunun bastığı uçların B ve C fazlarına ait "+" ve "-" uçlarda noktalarına yakın olması ile açıklanır. A fazı için tespit edilen zorlanma seviyeleri, B ve C fazlarında darbe testi yapıldığı zaman benzer değerlerde olacaktır.

Tablo III.5 125 MVA Transformatör Üzerinde Pozisyon 13 İçin Yapılan Ölçümler.

Poz. No : 13 (NOMİNAL KADEME) **Gerilimli :** **A** **Topraklı :** B, C, N, a, b, c, n			
Ölçüm No:	**Ölçüm yeri**	**Genlik (V)**	**LI (kV)**
Referans	A - TOPRAK	*400,0*	1425,0
1	A(+) - A(-)	*-115,0*	-409,7
	A(+) - TOPRAK	*36,0*	128,3
	A(-) - TOPRAK	*111,0*	395,4
2	A(+) - B(+)	*17,0*	60,6
	A(+) - TOPRAK	*36,0*	128,3
	B(+) - TOPRAK	*37,0*	131,8
3	A(+) - C(+)	*17,0*	60,6
	A(+) - TOPRAK	*40,0*	142,5
	C(+) - TOPRAK	*37,0*	131,8
4	A(-) - B(-)	*117,0*	416,8
	A(-) - TOPRAK	*116,0*	413,3
	B(-) - TOPRAK	*25,0*	89,1
5	A(-) - C(-)	*119,0*	423,9
	A(-) - TOPRAK	*112,0*	399,0
	C(-) - TOPRAK	*13,0*	46,3
6	A(+) - A(1)	*137,0*	488,1
	A(+) - TOPRAK	*40,0*	142,5
	A(1) - TOPRAK	*-150,0*	-534,4
7	A(-) - A(1)	*181,0*	644,8
	A(-) - TOPRAK	*96,0*	342,0
	A(1) - TOPRAK	*-150,0*	-534,4

POZİSYON 1

Üçüncü grup ölçümler Pozisyon 1'de yapılmıştır. Bu pozisyonun bağlantısı Şekil III.7'de verilmiştir. Bu pozisyonda sadece YG ana sargı devrededir. Kaba ayar ve ince ayar sargıları salınımdadır ve devredeki spir oranının en düşük olduğu kademedir. Devredeki spir sayısının en az olduğu kademedir ve yıldırım darbe testi 1425 kV ile yapılacağından en büyük zorlanma bu kademede olacaktır.



Şekil III.7 125 MVA Transformatörün Pozisyon 1 (Minimum Kademe) İçin Bağlantı Şekli.

Pozisyon 1'de yapılan ölçüm değerleri, darbe testi yapılan fazın salınımda olan kaba ayar sargısı üzerindeki gerilim 445 kV civarında olduğunu göstermektedir, bu değer nominal darbe seviyesinin % 31'i kadardır. Yine salınımda olan ince ayar sargısı üzerine düşen gerilim 587 kV kadardır ve %41'e tekabül etmektedir. İnce ayar sargısı üzerinde en büyük gerilim Pozisyon 1'de oluşmaktadır. 12 adet ayar

ucu olması sebebiyle her bir ayar ucu arasında (587/12=49) 49 kV gibi bir gerilim oluşmaktadır.

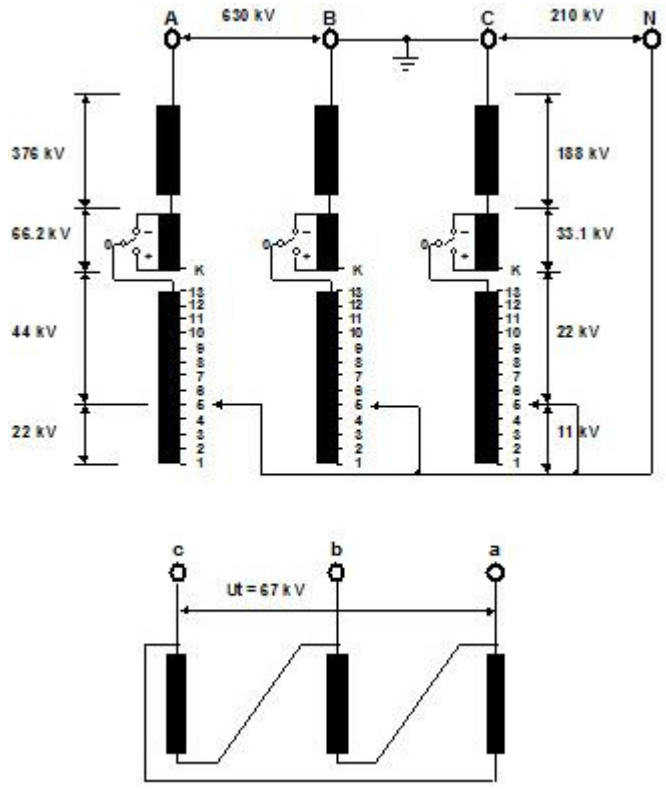
Değerler incelendiğinde A fazının "+" ucu ile B ve C fazlarının "+" uçları arasında oluşan gerilimlerin değerleri sırasıyla 463 kVve 445 kV seviyelerinde ve yüksek sayılabilecek değerlerdedir.

Test edilmeyen B ve C fazlarına ait "-" uçlarda toprağa karşı oluşan gerilim 153 kV civarındadır ve "+" uçlarda oluşan gerilimlere göre daha yüksektir ve % 11 seviyelerindedir. A fazı için tespit edilen zorlanma seviyeleri, B ve C fazlarında darbe testi yapıldığı zaman benzer değerlerde olacaktır.

Tablo III.6 125 MVA Transformatör Üzerinde Pozisyon 1 İçin Yapılan Ölçümler.

Poz. No : 1 (MİNİMUM KADEME) **Gerilimli :** **A** **Topraklı :** B, C, N, a, b, c, n			
Ölçüm No:	**Ölçüm yeri**	**Genlik (V)**	**LI (kV)**
Referans	A - TOPRAK	*400,0*	1425,0
1	A(+) - A(-)	*-125,0*	-445,3
	A(+) - TOPRAK	*-130,0*	-463,1
	A(-) - TOPRAK	*51,0*	181,7
2	A(+) - B(+)	*-130,0*	-463,1
	A(+) - TOPRAK	*-125,0*	-445,3
	B(+) - TOPRAK	*23,0*	81,9
3	A(+) - C(+)	*-125,0*	-445,3
	A(+) - TOPRAK	*-115,0*	-409,7
	C(+) - TOPRAK	*13,0*	46,3
4	A(-) - B(-)	*11,0*	39,2
	A(-) - TOPRAK	*40,0*	142,5
	B(-) - TOPRAK	*43,0*	153,2
5	A(-) - C(-)	*11,0*	39,2
	A(-) - TOPRAK	*42,0*	149,6
	C(-) - TOPRAK	*43,0*	153,2
6	A(+) - A(1)	*105,0*	374,1
	A(+) - TOPRAK	*-120,0*	-427,5
	A(1) - TOPRAK	*-165,0*	-587,8
7	A(-) - A(1)	*155,0*	552,2
	A(-) - TOPRAK	*48,0*	171,0
	A(1) - TOPRAK	*-145,0*	-516,6

Bu transformatör için seçilen yükte kademe değiştiricinin üreticisi MR olup tipi M III 350-Y-125 / D-14273 G'dir. Bu tipin nominal taşıma akımı değeri 350 amper, maksimum işletme gerilimi 125 kV, AC gerilimi dayanma seviyesi 230 kV ve yıldırım darbe gerilimi seviyesi 550 kV'tur. Bu değerler incelendiğinde YG sargısının nötr ucuna yerleştirilen kademe şalteri seçilirken, nötr izolasyon seviyesinden yüksek seçildiği görülmektedir. Endüklenme gerilimi deneyi esnasında transformatörün YG sargısının nötründe 210 kV gerilim oluşmaktadır. Sargı ve kademe değiştirici izolasyonu bu teste dayanacak seviyede tercih edilmelidir. Beraber çalışacak transformatör ve yükte kademe değiştirici birbirleri ile uyumlu olmak zorundadır. Endüklenen gerilim deneyinin bağlantı şeması Şekil III.8'de verilmiştir.



Şekil III.8 125 MVA Transformatörün Endüklenen Gerilim Bağlantı Şeması.

III.3 OTOTRANSFORMATÖRLERDE ELEKTRİKSEL ZOLANMALAR

Araştırmanın yapıldığı üçüncü örnekteki transformatörün gücü 250 MVA'dır. Ototransformatör olduğu için bağlantı şekli otomatik olarak yıldız olmaktadır. Bu uygulamada gerilim ayarı alçak gerilim sargısındadır. EK IV'de transformatör, kademe değiştirici ve osilokop çıktıları ile ilgili resimler verilmiştir.

Tablo III.7 250 MVA ototransformatörün ve YKD'nin teknik verileri.

OTOTRANSFORMATÖR (BÜYÜK GÜÇTE)			
		YG Sargısı	AG Sargısı
NOMİNAL GÜÇ	MVA	250	250
MAKSİMUM GERİLİM (Poz 16) NOMİNAL GERİLİM (Poz 8) MİNİMUM GERİLİM (Poz 1)	kV	380,0	173,8 158,0 142,2
MİNİMUM AKIM (Poz 16) NOMİNAL AKIM (Poz 8) MAKSİMUM AKIM (Poz 1)	A	379,8	830,5 913,5 1015,0
BAĞLANTI ŞEKLİ	-	YILDIZ	YILDIZ
GERİLİM AYAR ŞEKLİ	-	Yok	Nötr Ucunda
ADIM GERİLİMİ	V	Yok	1140,3 (1975/√3)

TRANSFORMATÖR ELEKTRİKSEL TEST SEVİYELERİ				
	YG	AG	N	
Um (kV)	420	170	52	
AC (kV)	630	275	95	
BIL (kV)	1425	650	250	
SI (kV)	1050	-	-	

YÜKTE KADEME DEĞİŞTİRİCİ		
MARKASI		MR
TİPİ	OLTC	RM III 600-Y-123 / D-10183W
UYGULAMASI		Üç fazlı nötr ucu
MAKSİMUM TAŞIMA AKIMI	A	600
MAKSİMUM ADIM GERİLİMİ	V	4000
ANAHTARLAMA KAPASİTESİ	kVA	2400
ELEKTRİKSEL ÖZELLİKLERİ	kV	Um = 123,0 , AC= 230 , BIL=550

Yüksek gerilim sargısı 380 kV ve sabittir. Alçak gerilim sargısının nominal gerilimi 158,0 kV ve uç kademedeki gerilim maksimum kademede %10 yüksek ve 173,8 kV'tur. Minimum kademede %10 düşük ve 142,2 kV'tur. Transformatör için öngörülen gerilim değişimi her bir kademede %1.25'tir. Pozitif yöndeki kademe sayısı 8 ve negatif yöndeki kademe sayısı 7 olmak üzere toplam 16 kademe mevcuttur. Gerilim ayarı sadece ince ayar sargısı ile yapılmakta ve ince ayar sargısı çift yönlü devreye girerek gerilim ayarlaması yapılmaktadır.

Burada önemli bir unsur ise ince ayar sargısı hem YG hem de AG sargısının bir parçası olduğu için YG tarafındaki spir sayısı değişmektedir ama YG sargı gerilimi değişmediğinden *değişken endüksiyon* uygulamasıdır. Bundan önceki 100 MVA ve 125 MVA *sabit endüksiyon* uygulamalarıdır.

250 MVA ototransformatörün elektriksel seviyelerini özetlersek, YG sargısı AC gerilimi seviyesi 630 kV ve BIL gerilimi seviyesi 1425 kV'tur. AG sargısı AC gerilimi seviyesi 275 kV ve BIL gerilimi seviyesi 650 kV'tur. Transformatörde bulunan bir adet nötr terminali kademeli izoleli olmasından dolayı AC gerilimi seviyesi 95 kV ve BIL gerilimi seviyesi 250 kV'tur.

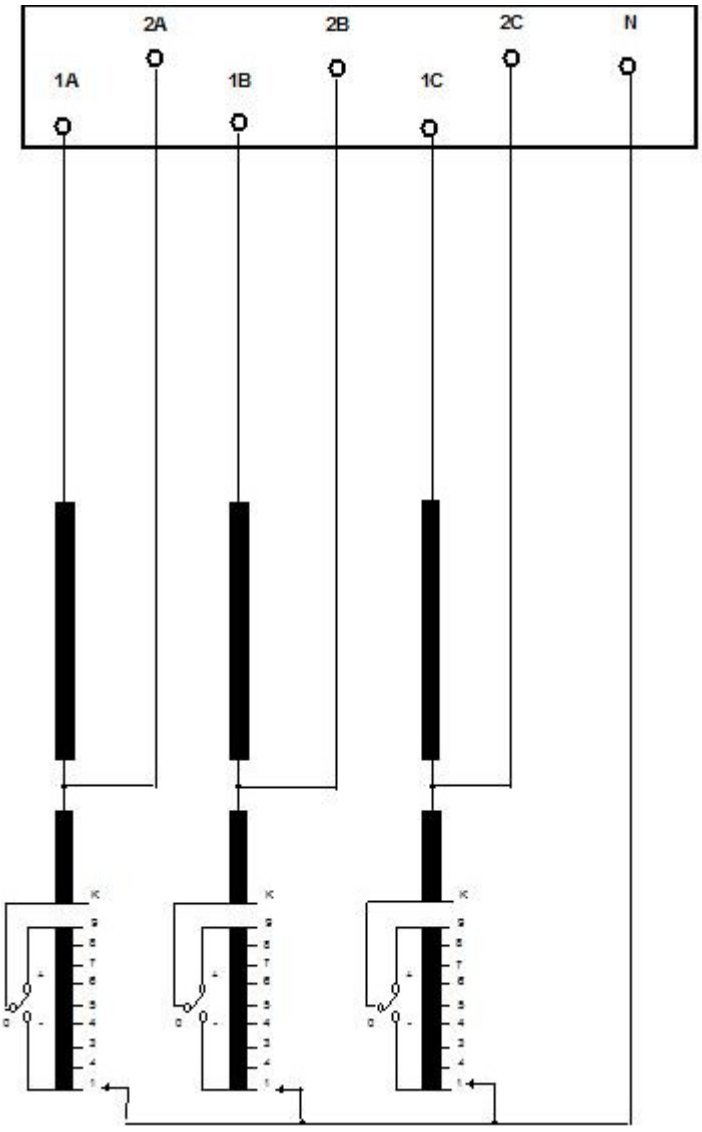
Ototransformatörde yapılan ölçümler hem YG hem de AG sargıları tarafından yapılmıştır. Bunun sebebi ayar sargısının ve bunun vasıtasıyla yükte kademe değiştiricinin hem YG hem de AG tarafını ilgilendirmesinden dolayıdır. Kullanılan sistem ve ölçüm tarzı önceki iki uygulama ile aynıdır. Bir faza yıldırım darbe gerilimi yapılırken diğer tüm terminaller topraklanmıştır. Ölçümler kademe şalterinin 8 ve 16 nolu kademeleri için yapılmıştır. Transformatörün elektriksel bilgilerinin toplu halde özetini Tablo III.7'de verilmiştir.

250 MVA ototransformatör üzerinde darbe dağılımı nominal (Pozisyon 8) ve maksimum (Pozisyon 16) kademelerinde yapılmıştır. Ölçümler daha önceki iki uygulamada olduğu gibi yapılmıştır.

Kademe değiştirici üzerinden akacak akımın değeri ototransformatör olması ve yerleştirildiği konum itibari ile AG akımı değerinden YG akım değeri çıkartılarak bulunmaktadır. Tablo III.7'de verilen akım değerlerini irdelersek, Pozisyon 8'de 533,7A, ve Pozisyon 1'de ise 635,2 A'dir. Bu değer kademe değiştiricinin 600 A olan nominal taşıma akımı değerinden büyüktür. Kademe değiştiricileri $1.2xI_N$ seviyesinde sürekli yüklenebildiklerinden dolayı bir problem oluşturmamaktadır.

POZİSYON 16 (YG TARAFI)

İlk grup ölçümler Pozisyon 16'da yapılmıştır. Bu pozisyonun bağlantısı Şekil III.9'da verilmiştir. YG sargısına, AG ve ince ayar sargıları seri gelmektedir ve devredeki spir oranının en yüksek olduğu kademedir.



Şekil III.9 250 MVA Ototransformatörün Pozisyon 16 (Maksimum Kademe) İçin Bağlantı Şekli.

Tablo III.8 250 MVA Ototransformatör Üzerinde Pozisyon 16 İçin YG Tarafından Yıldırım Darbe Uygulandığında Yapılan Ölçümler.

Poz. No : 16 (MAKSİMUM KADEME)			
	Gerilimli :	**1A**	
	Topraklı :	1B, 1C, N, 2A, 2B, 2C	
Ölçüm No:	**Ölçüm yeri**	**Genlik (V)**	**LI (kV)**
Referans	1A - TOPRAK	*400,0*	1425,0
1	A(+) - A(-)	*-20,0*	-71,3
	A(+) - TOPRAK	*-22,0*	-78,4
	A(-) - TOPRAK	*14,0*	49,9
2	A(+) - B(+)	*20,4*	72,7
	A(+) - TOPRAK	*-21,0*	-74,8
	B(+) - TOPRAK	*12,4*	44,2
3	A(+) - C(+)	*19,6*	69,8
	A(+) - TOPRAK	*-21,0*	-74,8
	C(+) - TOPRAK	*11,2*	39,9
4	A(-) - B(-)	*-4,4*	-15,7
	A(-) - TOPRAK	*12,4*	44,2
	B(-) - TOPRAK	*10,4*	37,1
5	A(-) - C(-)	*-4,8*	-17,1
	A(-) - TOPRAK	*11,6*	41,3
	C(-) - TOPRAK	*10,6*	37,8
6	A(8) - A(-)	*-12,4*	-44,2
	A(8) - TOPRAK	*-21,0*	-74,8
	A(-) - TOPRAK	*15,6*	55,6

Pozisyon 16'da iken YG tarafından darbe uygulandığında yapılan ölçüm neticeleri Tablo III.8'de gösterilmiştir. Değerler incelendiğinde, ince ayar sargısı üzerinde oluşan gerilim 70 kV'lar mertebesindedir ve herhangi bir aşırı zorlanma görülmemektedir. Yapılan diğer ölçümlerde incelendiğinde B ve C fazlarının "+" ve "-" kontaklarının toprağa karşı olan potansiyel farklılıklarıda 40 kV'lar mertebesindedir. Seviye itibari ile 1425 kV yıldırım darbe uygulandığında kademe değiştiricinin bazı terminallerinde 60-70 kV mertebelerinde gerilimler oluştuğunu görmek, zorlanmanın az olduğunu ortaya çıkarır. Bunun bir diğer anlamı ise darbe geriliminin büyük bir bölümü YG ana sargı üzerinde sönümlenmektedir. Yani kademe değiştiricinin nötr ucuna yerleştirilmesinin bir sonucudur.

Bu değerler 125 MVA'nın değerleri ile karşılaştırıldığında daha düşüktür.

Tablo III.9 250 MVA Ototransformatör Üzerinde Pozisyon 16 İçin AG Tarafından Yıldırım Darbe Uygulandığında Yapılan Ölçümler.

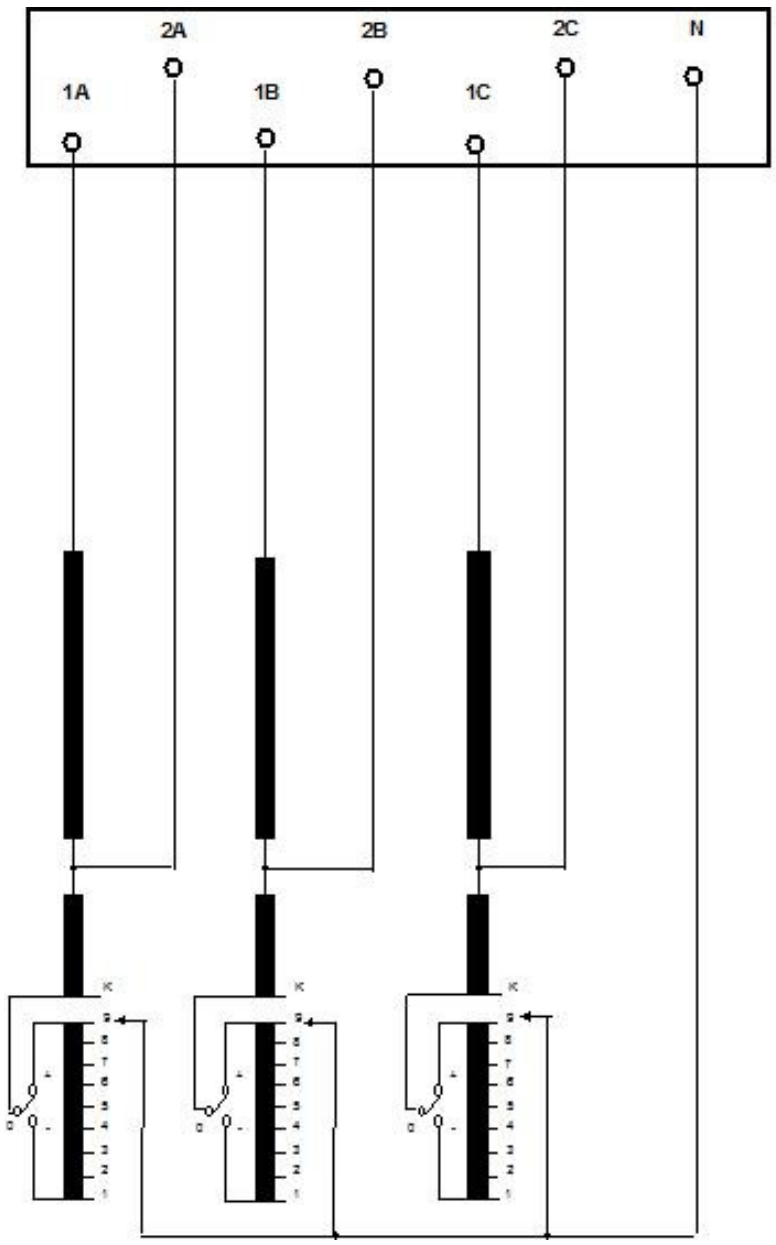
Poz. No : 16 (MAKSİMUM KADEME)			
	Gerilimli :	**2A**	
	Topraklı :	2B, 2C, N, 1A, 1B, 1C	
Ölçüm No:	**Ölçüm yeri**	**Genlik (V)**	**LI (kV)**
Referans	2A - TOPRAK	*400,0*	650,0
1	A(+) - A(-)	*113,0*	183,6
	A(+) - TOPRAK	*112,0*	182,0
	A(-) - TOPRAK	*-19,0*	-30,9
2	A(+) - B(+)	*110,0*	178,8
	A(+) - TOPRAK	*112,0*	182,0
	B(+) - TOPRAK	*16,0*	26,0
3	A(+) - C(+)	*113,0*	183,6
	A(+) - TOPRAK	*112,0*	182,0
	C(+) - TOPRAK	*16,0*	26,0
4	A(-) - B(-)	*15,2*	24,7
	A(-) - TOPRAK	*20,0*	32,5
	B(-) - TOPRAK	*-19,5*	-31,7
5	A(-) - C(-)	*-15,2*	-24,7
	A(-) - TOPRAK	*20,0*	32,5
	C(-) - TOPRAK	*-20,0*	-32,5
6	B(-) - C(-)	*-13,6*	-22,1
	B(-) - TOPRAK	*20,0*	32,5
	C(-) - TOPRAK	*-20,0*	-32,5
7	A(-) - A(8)	*-100,0*	-162,5
	A(-) - TOPRAK	*20,0*	32,5
	A(8) - TOPRAK	*98,0*	159,3

Pozisyon 16'da iken YG tarafından darbe uygulandığında yapılan ölçüm neticeleri Tablo III.9'da verilmiştir. İnce ayar sargısı üzerinde oluşan gerilim 184 kV mertebesindedir ve bu değer nominal değerin %28'i gibidir. Bu mertebe 550 kV BIL seviyesine sahip yükte kademe şalteri için aşırı bir zorlanma değildir. AG tarafından yapılan diğer ölçümler de incelendiğinde ölçülen diğer gerilimler de mertebe olarak düşük sayılabilir. Örneğin B ve C fazlarının "+" ve "-" kontaklarının toprağa karşı olan potansiyelleri 40 kV mertebesindedir. AG tarafına 650 kV darbe uygulandığında oluşan gerilimler YG tarafına 1425 kV uygulandığında oluşan gerilimlerden daha büyük değerlere sahip olabilmektedir.

Bu değerler 125 MVA'nın değerleri ile karşılaştırıldığında daha düşüktür.

POZİSYON 8 (YG TARAFI)

Ototransformatörde ikinci grup ölçümler Pozisyon 8'de yapılmıştır. Bu pozisyonun bağlantısı Şekil III.10'da verilmiştir. YG sargısına sadece AG sargısı seri gelmektedir ve ince ayar sargısı salınımdadır.



Şekil III.10 250 MVA Ototransformatörün Pozisyon 8 (Nominal Kademe) İçin Bağlantı Şekli.

Tablo III.10 250 MVA Ototransformatör Üzerinde Pozisyon 8 İçin YG Tarafından Yıldırım Darbe Uygulandığında Yapılan Ölçümler.

Poz. No : 8 (NOMİNAL KADEME) **Gerilimli :** **1A** **Topraklı :** 1B, 1C, N, 2A, 2B, 2C			
Ölçüm No:	**Ölçüm yeri**	**Genlik (V)**	**LI (kV)**
Referans	1A - TOPRAK	*400,0*	1425,0
1	A(+) - A(-)	*-20,0*	-71,3
	A(+) - TOPRAK	*13,2*	47,0
	A(-) - TOPRAK	*20,8*	74,1
2	A(+) - B(+)	*4,0*	14,3
	A(+) - TOPRAK	*12,4*	44,2
	B(+) - TOPRAK	*11,2*	39,9
3	A(+) - C(+)	*4,0*	14,3
	A(+) - TOPRAK	*11,2*	39,9
	C(+) - TOPRAK	*10,0*	35,6
4	A(-) - B(-)	*20,8*	74,1
	A(-) - TOPRAK	*21,6*	77,0
	B(-) - TOPRAK	*12,0*	42,8
5	A(-) - C(-)	*21,6*	77,0
	A(-) - TOPRAK	*21,2*	75,5
	C(-) - TOPRAK	*11,6*	41,3
6	A(8) - A(-)	*19,2*	68,4
	A(8) - TOPRAK	*20,8*	74,1
	A(-) - TOPRAK	*-18,0*	-64,1

Pozisyon 8'de iken YG tarafından darbe uygulandığında yapılan ölçüm neticeleri Tablo III.10'da verilmiştir. Ölçüm neticeleri incelendiğinde, ince ayar sargısı üzerinde oluşan gerilim Pozisyon 16'da olduğu gibi 70 kV mertebesindedir ve herhangi bir aşırı zorlanma görülmemektedir. Yapılan diğer ölçümler de incelendiğinde B ve C fazlarının "+" ve "-" kontaklarının toprağa karşı olan potansiyeller 40 kV mertebesindedir. Bu değerler de yine Pozisyon 16'daki değerlere benzerdir. Bu sonuçlardan yapabileceğimiz bir diğer çıkarım ise YG tarafından darbe uygulandığında kademe değiştiricide oluşan gerilimler transformatör pozisyonunundan bağımsızdır. Böyle bir sargı düzenlemesinde YG sargısının kademe değiştiricide belirleyici bir etkisi yoktur ve AG sargısı daha belirleyicidir.

Ölçüm neticeleri 125 MVA'nın değerleri ile karşılaştırıldığında daha düşüktür.

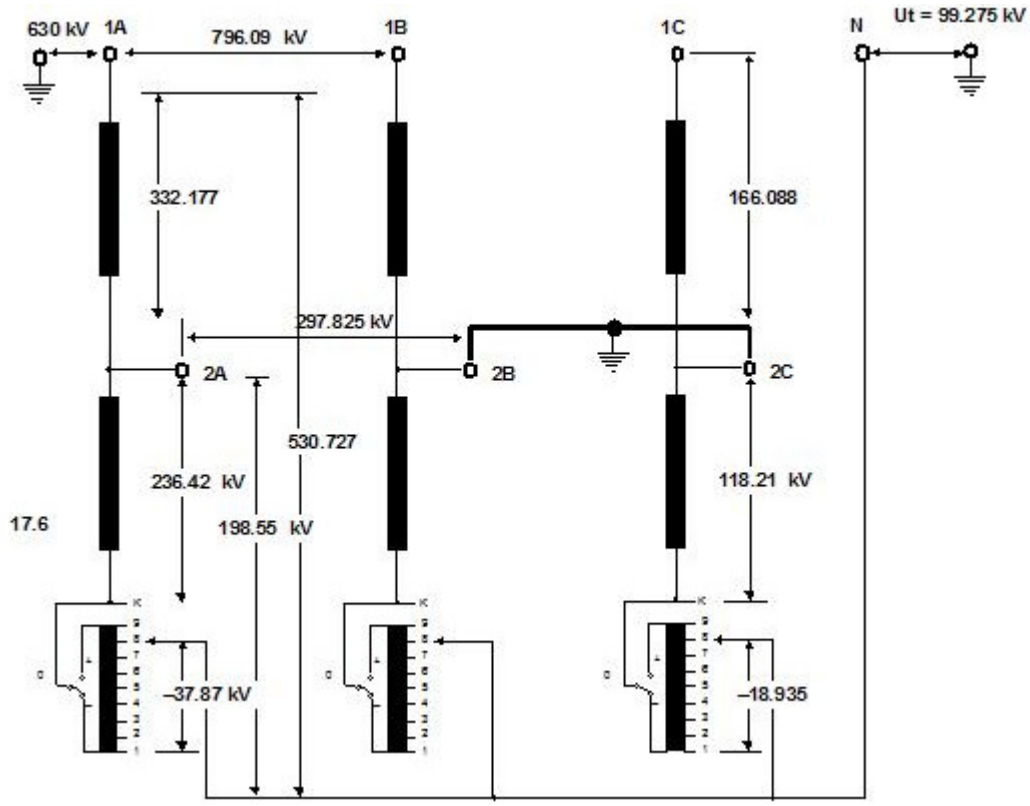
Tablo III.11 250 MVA Ototransformatör Üzerinde Pozisyon 8 İçin AG Tarafından Yıldırım Darbe Uygulandığında Yapılan Ölçümler.

Poz. No : 8 (NOMİNAL KADEME)			
	Gerilimli :	**2A**	
	Topraklı :	2B, 2C, N, 1A, 1B, 1C	
Ölçüm No:	**Ölçüm yeri**	**Genlik (V)**	**LI (kV)**
Referans	2A - TOPRAK	*400,0*	650,0
1	A(+) - A(-)	*167,0*	271,4
	A(+) - TOPRAK	*22,0*	35,8
	A(-) - TOPRAK	*-170,0*	-276,3
2	A(+) - B(+)	*-8,0*	-13,0
	A(+) - TOPRAK	*-22,0*	-35,8
	B(+) - TOPRAK	*-20,0*	-32,5
3	A(+) - C(+)	*-6,4*	-10,4
	A(+) - TOPRAK	*-22,0*	-35,8
	C(+) - TOPRAK	*-20,0*	-32,5
4	A(-) - B(-)	*-169,0*	-274,6
	A(-) - TOPRAK	*-180,0*	-292,5
	B(-) - TOPRAK	*14,4*	23,4
5	A(-) - C(-)	*-170,0*	-276,3
	A(-) - TOPRAK	*-180,0*	-292,5
	C(-) - TOPRAK	*14,4*	23,4
6	B(-) - C(-)	*-16,0*	-26,0
	B(-) - TOPRAK	*20,0*	32,5
	C(-) - TOPRAK	*14,4*	23,4
7	A(-) - A(8)	*-148,0*	-240,5
	A(-) - TOPRAK	*-180,0*	-292,5
	A(8) - TOPRAK	*-32,0*	-52,0

Pozisyon 8'de iken AG tarafından darbe uygulandığında yapılan ölçüm neticeleri Tablo III.11'de verilmiştir. İnce ayar sargısı üzerinde oluşan gerilim 271 kV mertebesindedir ve bu değer nominal değerin %41'i gibidir. İnce ayar sargısı üzerinde salınımda olduğu bu pozisyonda daha fazla gerilim oluşmaktadır. Bu mertebe 550 kV BIL seviyesine sahip yükte kademe değiştirici için aşırı bir zorlanma değildir. AG tarafından yapılan diğer ölçümler de incelendiğinde ölçülen diğer gerilimler de mertebe olarak düşük sayılabilirler. Örneğin B ve C fazlarının "+" ve "-" kontaklarının toprağa karşı olan potansiyel farklılıklarıda 40 kV mertebesindedir.

Bu değerler 125 MVA'nın değerleri ile karşılaştırıldığında daha düşüktür.

Bu transformatör için seçilen yükte kademe değiştiricisinin üreticisi MR ve tipi RM III 600-Y-123 / D-10183 W'dir. Bu tipin nominal taşıma akımı değeri 600 amper, maksimum işletme gerilimi 123 kV, AC gerilimi dayanma seviyesi 230 kV ve yıldırım darbe gerilimi seviyesi 550 kV'tur. Bu değerler incelendiğinde YG sargısının nötr ucuna yerleştirilen kademe şalteri seçilirken, nötr izolasyon seviyesinden yüksek seçilmiştir. Endüklenme gerilimi deneyi esnasında kademe değiştiricinin "-" terminali ile toprak arasında 118,21 kV gerilim oluşmaktadır. Sargı ve kademe değiştirici izolasyonu bu gerilime dayanacak seviyede tercih edilmelidir. Endüklenen gerilim deneyinin bağlantı şeması Şekil III.11'de verilmiştir.



Şekil III.11 250 MVA Transformatörün Endüklenen Gerilim Bağlantı Şeması.

BÖLÜM IV

SONUÇLAR VE TARTIŞMA

Bu çalışmada transformatörün temel bir parçası olan yükte kademe değiştiricinin belirlenmesinde dikkate alınan temel verilerin uygulamarda karşımıza nasıl çıkabileceği gösterildi. Yükte kademe değiştiricilerin seçiminde dikkate alınan konuları iki ana başlık altında toplayabiliriz.

1-) İşletme şartlarının gerektirdiği konular

2-) Transformatör fabrika testlerinin gerektirdiği konular

İşletme şartları olan nominal akım ve nominal gerilim altında iken YKD emniyetli ve sağlıklı şekilde kademe değiştirme işlemini yapabilmelidir. Bu şartları sağlaması için yükte kademe değiştirici nominal taşıma akımı değeri en az transformatör nominal akımı değeri kadar olmalıdır. Nominal gerilim altında kademe değiştirdiğinde problem çıkmaması için YKD'nin adım gerilimi her bir kademe değiştiğindeki gerilim farkı değerinden büyük olmalıdır. Her kademe değiştirme işlemi esnasında oluşan U_{rMSA} (toparlanma gerilimi) ve I_C (dolaşım akımı) değerleri öyle olmalı ki YKD zarar görmeden kademe değiştirme işlemini tamamlamalıdır.

YKD, her transformatör imalatçısının uluslararası standartlar gereği yapmış olduğu fabrika testleri esnasındaki zorlanmalara dayanmalıdır. Fabrika testlerini mantık olarak iki gruba ayırabiliriz.

Birinci grup, normal işletme şartlarında maruz kalacakları çalışma koşullarının kontrol edildiği testler, bunlar nominal gerilim ve nominal akım altında rahatça kademe değiştirme işlemini yapabilmeleridir. Bu kontrollerle ilgili konular IEC 60076-1'de açıklanmıştır [14]. Bu kontrollerden nominal akımda 10 kademe değiştirme işlemi öngörülmüştür. Bu 10 işlemde yön değiştirme seçicisinin çalıştığı kademe etrafında ileri ve geri yönde 2 kademe gidilerek yapılır. Nominal gerilimde ise toplam kaç kademe var ise tüm kademeleri tarayacak şekilde bir tam tur yapılır. Bu işlemler esnasında yükte kademe değiştiriciden anormal sesler gelmemelidir. Tabi bu iki testen önce yapılan birtakım ölçümler esnasında transformatör ayar

sargıları uçlarının bağlantısın doğruluğu yapılan çevirme oranı ve DC direnci gibi ölçümlerle kontrol edilmelidir. YKD'ler elektriksel oldukları kadar mekaniksel bir malzeme olduğundan dolayı mekanik aksamın ve motor sürücülü sistemin senkron şekilde çalıştığından emin olmalıyız. Mekanik sistemin ve motor sürücülü sistemin senkron çalışmadığı durumlarda yüksek gerilimli bir elektrik makinası olan transformatörün arızalanması engellenemez. Zaten arızalarının sebeplerinin başında YKD ile ilişkili arızalar gelmektedir.

İkinci grup olarak dielektrik testler esnasında maruz kalacağı aşırı zorlanmalardır. Dielektrik testler IEC 60076-3'te ayrıntılı olarak açıklanmıştır ve uygulama şekilleri Tablo IV.1'de belirtilmiştir [15].

Tablo IV.1 IEC 60076-3'teki Dielektrik Testlerin Uygulanma Şekilleri.

sargı yapısı	En yüksek işletme gerilimi U_m kV	deneyler				
		yıldırım darbe (LI)	anahtarlama darbe (SI)	uzun süreli AC (ACLD)	kısa süreli AC (ACSD)	uygulanan gerilim AC
düzgün yalıtılmış	$U_m \leq 72,5$	tip (not 1)	uygulanmaz	uygulanmaz (not 1)	rutin	rutin
düzgün ve kademeli yalıtılmış	$72,5 < U_m \leq 170$	rutin	uygulanmaz	özel	rutin	rutin
	$170 < U_m < 300$	rutin	rutin (not 2)	rutin	özel (not 2)	rutin
	$U_m \geq 300$	rutin	rutin	rutin	özel	rutin

Not 1 : Bazı ülkelerde $U_m \leq 72,5$ kV transformatörlerde de rutin deney olarak uygulanır ve ACLD deneyi rutin veya tip deneyi olarak uygulanır.

Not 2 : Şayet ACSD deneyi belirtilmiş ise SI deneyi uygulanmaz.

Dielektrik testleri şu şekilde sıralayabiliriz.

1-) Uygulanan gerilim deneyi

2-) Kısa süreli AC gerilim deneyi

3-) Uzun süreli AC gerilim deneyi-kısmi boşalma ölçümü ile birlikte.

4-) Yıldırım darbe gerilimi deneyi (FAZ LAR İÇİN)

5-) Kesikli yıldırım darbe gerilim deneyi (FAZLAR İÇİN)

6-) Yıldırım darbe gerilimi deneyi (NÖTR TERMİNALİ İÇİN)

7-) Anahtarlama darbe gerilimi deneyi (FAZ LAR İÇİN)

Yükte kademe değiştiricinin bulunduğu sargılarda uygulanan gerilim, endüklenen gerilim ve yıldırım darbe deneyleri esnasındaki zorlanmalar incelenmiştir. Bu zorlanma değerlerinin tespiti ile YKD seçiminin ne kadar doğru olduğu veya ne gibi yanlışlıklar yapıldığı belirlenebilir.

Bu çalışmada imalatı devam eden transformatör üzerinde şalter monteli durumda yıldırım darbe dağılımı ölçümleri yapıldı. Ölçümler 100 MVA, 125 MVA ve 250 MVA olmak üzere 3 adet transformatör üzerinde gerçekleştirildi. Kademe değiştiricinin değişik pozisyonlarında ölçülen değerlerin farklılık gösterdiği görülmüştür.

Bu transformatörlerin üçünde de yükte kademe değiştiricinin bağlı olduğu yer nötr noktasıdır bunun sebebi nötr noktası toprak potansiyelinde olduğu için buraya yakın yerlerdeki gerilimler de transformatör gerilimine göre düşüktür. YKD'ler yerleştirilirken öncelikli olarak sargının nötr tarafı tercih edilir. Bazı ototransformatör uygulamalarında istenen gerilim değerlerine ulaşabilmek için ayar sargısının yeri değişmektedir ve bu tip ototransformatörlerde bu tarz dizaynın dışına çıkılabilmektedir.

YKD'ler çok yüksek oranda yıldız bağlantılı YG sargılarına yerleştirilir. Nadiren üçgen sargılarda kullanılır, bunun en büyük sebebi üçgen sargı olması durumunda maruz kalacağı gerilim zorlanmalarının daha fazla olmasındandır.

YKD'ler akımın daha yüksek olduğu AG sargılarında fazla tercih edilmez. Buradaki üç örnekte de ayar yapılan sargıların gerilimleri 154 kV, 380 kV ve 158 kV'tur. Yalnız 250 MVA örneğinde ototransformatör olmasından dolayı AG ve YG sargıları birbirlerinden ayrılamamasından dolayı YKD aynı zamanda YG sargısına da bağlı demektir. Bu nedenle ototransformatörde hem YG'den hem de AG'den darbe gerilimi dağılımına bakılmıştır.

YKD'ler transformatör sargılarının nötr izolasyonu seviyesinde seçilmesi beklenirken daha yüksek seviyelerde öngörülmektedir. 100 MVA örneğinde YG-N AC değeri 38 kV olmasına rağmen YKD AC değeri 140 kV'tur. 125 MVA örneğinde YG-N AC değeri 95 kV olmasına rağmen YKD AC değeri 230 kV'tur. 250 MVA örneğinde N AC değeri 95 kV olmasına rağmen YKD AC değeri 230 kV'tur. İşletme şartlarında topraklı olacak nötr terminallerindeki yüksek bir izolasyona gerek duyulmamaktadır. Fakat transformatör testlerinden uygulanan ve endüklenen gerilim deneyleri esnasında hem sargı hem de YKD maruz kalacakları AC gerilimi aşırı zorlamalarına dayanabilmesi için üst seviyede seçilmektedirler.

YKD'lerde önemli parametrelerden biri de nominal taşıma akımıdır. 100 MVA'da transformatörün maksimum akımı 441.1 A iken, YKD maksimum akımı 500A'dir. 125 MVA'da transformatörün maksimum akımı 223,4 A iken, YKD maksimum akımı 350A'dir. 250 MVA'da transformatörün maksimum akımı 635,2 A iken, YKD maksimum akımı 600A'dir. Burada değerler karşılaştırıldığında birinci ve ikinci örnekte YKD akımı daha yüksek seçilmiş, üçüncü örnekte ise daha düşük seçilmiştir. Şalter seçilirken maksimum taşıma akımı değeri transformatör sargısı maksimum akımı değerinden büyük olması ideal durumdur. Bazen işletme şartlarının nominal değerlere ulaşacağı nadir durumlarda YKD'lerin 1.2 katına kadar yüklenebilecek olması YKD için öngörülen nominal değerlerin transformatör nominal değerlerine yakın değerler olabilmektedir.

Adım gerilimi ise önemli bir diğer olgu. Buradaki üç örnekte adım gerilimleri sırasıyla 1111.4, 2742.4 ve 1140.3 volttur. Görüldüğü gibi ikinci örnekteki adım gerilimi diğer ikisinden yüksektir. Burada adım gerilimi değeri bağlı bulunduğu sargının nominal geriliminin bir kademedeki gerilim ayarı yüzdesiyle çarpılarak bulunur. Sargı gerilimleri veya ayarı yüzdesi değerleri arttıkça adım gerilimi değeri yükselecektir.

Anahtarlama kapasitesi açısından inceleme yaparsak, sargı nominal akım değeri ile adım gerilimi değerinin çarpımı ile bulunan değer olduğundan, bu üç örnekte hesaplanan değerler sırasıyla 490.2, 612.7 ve 724.3 kVA'dır. Transformatör gücü ve kademe başına düşen adım gerilimi değerleri büyüdükçe kademe başına karşılık gelen anahtarlama kapasitesi büyüyecektir. YKD anahtarlama kapasitesi değerinin ihtiyaç duyulandan büyük olması gerekmektedir.

Transformatörlerde darbe gerilimi dağılımı ölçümü yapılarak, YKD üzerinde yıldırım darbe testi esnasındaki zorlanmaların seviyeleri tespit edilebilir ve seçilen YKD'nin uygunluğu konusunda yorum yapabiliriz.

250 MVA ototransformatördeki darbe dağılımı ölçümleri, AG sargısına 650 kV'luk yıldırım darbe yapıldığında YKD'de ölçülen değerlerinin YG sargısına 1425 kV'luk yıldırım darbesi yapıldığında ölçülen değerlerden büyüktür. Yani YKD'yi belirleyen sargı AG sargısıdır. Ototransformatörlerde YKD'lerde oluşan zorlanmaları belirlemek için hem YG hem de AG sargılarında ölçüm yapılmalıdır.

125 MVA'da YG sargısına yapılan 1425 kV'luk yıldırım darbe testi esnasında ölçülen değerler 250 MVA'nın YG sargısına yapılan yıldırım darbe testi esnasında oluşan gerilimlerden yüksektir. YKD'de oluşan gerilimleri transformatör tasarımı ve

yıldırım darbe gerilimi seviyesi beraber belirlemektedir. Transformatör tasarımı sargılar üzerindeki darbe gerilimi dağılımını belirlemektedir ve YKD'lerdeki elektriksel zorlanmaları etkilenmektedir.

Transformatör üzerinde değişik kademelerde yapılan darbe testleri esnasında YKD'de oluşan gerilim değerlerinin farklılık gösterdiği yıldırım darbe dağılımı değerleri incelendiğinde görülmektedir. Transformatörün bulunduğu kademe, sargılar üzerinde dolayısıyla YKD üzerinde oluşan gerilim zorlanmalarını değiştirmektedir. Nominal ve minimum kademelerdeki değerler ve bağlantılar incelendiğinde, salınımda sargılar olduğu ve devrede olmamalarına rağmen bu sargılarda da elektriksel zorlanmalar olmaktadır.

Transformatör tasarımının yön değiştirme seçicili olması yada olmaması durumlarında YKD'de oluşan aşırı gerilimler açısından farklılık göstermektedir. Çünkü transformatörde sadece ince ayar sargısı veya kaba/ince ayar sargılarının beraber kullanılması durumlarında salınımda olan sargı miktarları değişmektedir. Dolayısıla gerilim ayarı yapma şekli de YKD'de oluşan aşırı gerilimleri etkilemektedir.

Dünyadaki önemli üreticilerden olan MR ve ABB firmasının katalogları incelenirse, görülecektir ki firmaların ürünlerinde akım ve gerilim gibi parametrelerde sınırlar vardır [18,19]. Mevcut üreticilerin katalogları incelenmeli ve YKD'lerde limitler bilinerek transformatör dizaynı yapılmalıdır. YKD'ler transformatör tasarımını etkileyici bir faktör olarak ortaya çıkabilmektedir.

Buradaki üç örnektede kullanılan YKD direnç tipidir. Günümüzde çok yüksek oranda direnç tipi YKD kullanılmaktadır. Reaktör tipi ilk bulunan YKD tipi olması rağmen yaygınlaşamamasının en büyük sebebi yüksek adım gerilimi uygulamalarında kullanılamamasındandır.

BÖLÜM V

SON DEĞERLENDİRMELER VE ÖNERİLER

Yükte kademe değiştiricilerin üzerinde bulundukları transformatörlerden ayrılamaz bir parçası olduğu aşikardır. Bu iki eleman birbirlerinden ayrılamamaktadır ve birbirlerini etkilemektedirler. Her adım geriliminde ve taşıma akımı değerinde transformatör tasarımı yapma imkanı olsa bile uygun YKD üretilmiyorsa teknolojinin izin verdiği limit değerler çerçevesinde transformatör tasarımı yapılabilmektedir.

Transformatöre YKD seçerken işletme şartlarında ve fabrika testleri esnasındaki zorlanmaları karşılayacak değerlerde olmasından emin olmalıyız. Burada takip edilecek yol seçilen YKD'nin en az bir üst seviyede seçilmesidir. Arızanın önemli kayıplara sebebiyet vereceği uygulamalarda nominal değerler açısından iki üst seviyeye sahip YKD seçilebilir. İlk aşamada yatırım maliyetini arttırsa bile uzun vadede YKD kaynaklı arızalanma sayısı düşecektir ve parasal kazanım olarak dönecektir.

YKD'lerin işletmede oldukları esnada koruyucu cihaz kullanımı ve düzenli bakım işlemlerinin yapılması problem çıkarma olasılığını azalatacak ve arıza başlangıçların daha önceden tespit edilerek gerekli önlemleri alma fırsatı verecektir.

YKD'lerde güvenilirliğin bir diğer unsuru ise kalitesi kanıtlanmış MR ve ABB gibi üreticilerin ürünlerini ve bu üreticilerin de arıza çıkarma oranı düşük modelleri tercih edilmelidir.

Ortaya çıkan ihtiyaçlar ve kendini geliştirme isteği çerçevesinde yeni ürünler sunulmaktadır. Buna örnek olarak 2000'li yıllarda ortaya çıkan vakum tipi YKD'ler alışılagelmiş yağlı tip YKD'ler kadar güvenli olmamalarıdır. Bunun nedeni bu tipin teknolojisinin yeni olmasıdır. Zamanla çıkan problemler giderildiğinde vakum tipi YKD'lerde aynı seviyede güvenilir olacaklardır.

YKD'ler belirlendikten sonra seçilen ürünün yeterli olup olmadığı tespit edilebilir. Transformatör imalatı esnasında yıldırım darbe dağılımı ölçümü yapılmalıdır. Sonuçta YKD'deki zorlanmalarda kendisinin bir etkisi yoktur ve

tamamen transformatör tasarımı belirleyici unsurdur. Farklı tip tasarımlara sahip transformatörler üzerinde yapılmalıdır ve sadece numune çalışması olarak bir ünitede yapılması yeterli olacaktır.

Kademe değiştirme esnasında oluşan iki tip zorlanma U_{rMSA} toparlama gerilimi ve I_C dolaşım akımı zorlanmalarını makul seviyelerde tutan çoklu direnç tipi YKD kullanılması çözümleyici olacaktır. Hem toparlanma gerilimi hemde dolaşım akımı değerleri düşecekir.

YKD yıldız sargıların nötr tarafına koyularak daha düşük elektriksel zorlanmalara maruz kalacaklardır ve mümkün mertebe üçgen sargılarda kullanılmamalıdır. Pratikte çok büyük oranda yıldız bağlı sargı uygulamalarında ve düşük oranda da üçgen sargı uygulamalarında kullanılmaktadır.

YKD'lerin elektrik şebekelerinde daha güvenli ve daha sağlıklı çalışmasını hedeflemeliyiz ve bu nedenden dolayı kullanılan malzemelerin üst seviye kaliteye ve iyi bir işçiliğe sahip olmasını sağlamalıyız.

Şu ana kadar YKD'lerde arıza oluşumunu minimize etmek için önerilerde bulundum. Nasıl ki YKD arızası transformatörde hasara sebebiyet veriyorsa, transformatör sargılarındaki problemler veya elektrik şebekesindeki diğer uygunsuzluklar da YKD'lerde hasarlara sebep olabilirler. Elektrik arızası esnasında aşırı akımlar ve gerilimler oluşmaktadır. Bu konu dikkate alındığında elektriksel sistemdeki tüm unsurlar kendi vazifelerini en iyi şekilde yapmalıdır ki sistemdeki arızanın en az sayıda olması ve en az hasarla atlatılması sağlansın.

KAYNAKLAR

[1]. Kramer, A. : "ON LOAD TAP CHANGERS FOR POWER TRANSFORMERS OPERATION PRINCIPLES, APPLICATION AND SELECTION" MR Yayını, Regensburg, Almanya, **(2000)** 1-75**.**

[2]. Kulkarni, S.V.; Khaparde, S.A.: "TRANSFORMER ENGINEERING DESIGN AND PRACTICE" Marcel DEKKER Inc., New York, Amerika Birleşik Devletleri , **(2004)** 437-449**.**

[3]. Del Vecchio, R.M; Poulin, B; Feghali, P; Shah, D.M.; Ahuja, R. : "TRANFORMER DESIGN PRINCIPLES , With Applications to Core-Form Power Transformers" CRC PRESS , New York, Amerika Birleşik Devletleri , **(2002)** 481-497**.**

[4]. Harlow, J.H : "ELECTRIC POWER TRANSFORMER ENGINEERING" CRC PRESS, New York, Amerika Birleşik Devletleri , **(2004)** 3_29–3_49**.**

[5]. Spence, G.; Hall, A.C.: "On-load tap-changers current experience and future development: Users experience and perspective" , Developments On-Load Tapchangers: Current Experience and Future, IEE European Seminar, Nov , **(1995)** 4**.**

[6]. Kang, P.; Birtwhistle , D.: "Condition Assessment of Power Ttransformer On-Load Tap Changers Using Wavelet Analysis", Power Delivery, IEEE Transactions July , **(2001)** 394 – 400.

[7]. Kang, P.; Birtwhistle, D.: "Condition Monitoring of Power Transformer On-Load Tap Changers. Part 2. Detection of Ageing From Vibration Signatures" , Generation, Transmission and Distribution, IEE Proceedings, Vol. 148, No. 4 July , (2001) 307 – 311.

[8]. Simas, E.F.; de Almeida, L.A.L.; de Lima, A.C.: "Vibration Monitoring of On-Load Tap Changers Using a Genetic Algorithm", Instrumentation and Measurement Technology Conference, **(2005)** 2288-2293**.**

[9]. de Almeida, L.; Fontana, M.; Wegelin, F.A.; Ferreira, L.: "A New Approach for Condition Assessment of On-Load Tap-Changers using DiscreteWavelet Transform" Instrumentation and Measurement Technology Conference, May , **(2005)** 653 – 656.

[10]. Poza, F.; Marino, P.; Otero, S.; Pastoriza, V.: "OLTC Measurements in Electrical Power Grids", Circuits and Systems, 49th IEEE International Midwest Symposium, August, **(2006)** 631 – 635.

[11]. Mailah, N. F.; Bashi S. M.; Meng W. H.: "Microcontroller Based Semiconductor Tap Changer for Power Transformer", IEEE Bologna PowerTech Conference, June **(2005)** 7967.

[12]. IEC PUBLICATION 60214-1.: "Tap Changers Performance Requirements and Test Methods" first edition, **(2003)**

[13]. IEC PUBLICATION 60214-2.: "Tap Changers Application Guide" First Edition, **(2004)**

[14]. IEC PUBLICATION 60076- 1.: "Power transformers Part 1: General" , Second Edition, **(2000)**

[15]. IEC PUBLICATION 60076- 3.: "Power transformers Part 3: Insulation Levels and Dielectric Tests", Second Edition, **(2000)**

[16]. IEEE C57.131.: "Standard Requirements For Load Tap Changers", **(1995)**
[17]. IEC PUBLICATION 60076-7.: "POWER TRANSFORMERS – PART 7: LOADNG GUIDE FOR OIL IMMERSED POWER TRANSFORMERS " First Edition, **(2005)**
[18]. http:\\ www.abb.com/product/tr/9AAC750254.aspx
(Erişim Aralık 2008)
[19]. http:\\www.reinhausen.com/XparoDownload.ashx
(Erişim Eylül 2008)
[20]. http://www.ieee.org/web/publications/journmag/
(Erişim Kasım 2008)
[21]. http://www.teias.gov.tr/ihaledokumanlari/sartnameler/baskanlik_sartnameler_ototrafo_380kV-YG_tip_teknik_sart.doc
(Erişim Şubat 2009)

EKLER

EK I **:** Ölçüm Cihazları Olan Darbe Gerilimi Üreticisi, Dijital Osiloskop, Bağlantı Plakası ve Test Objeleri.

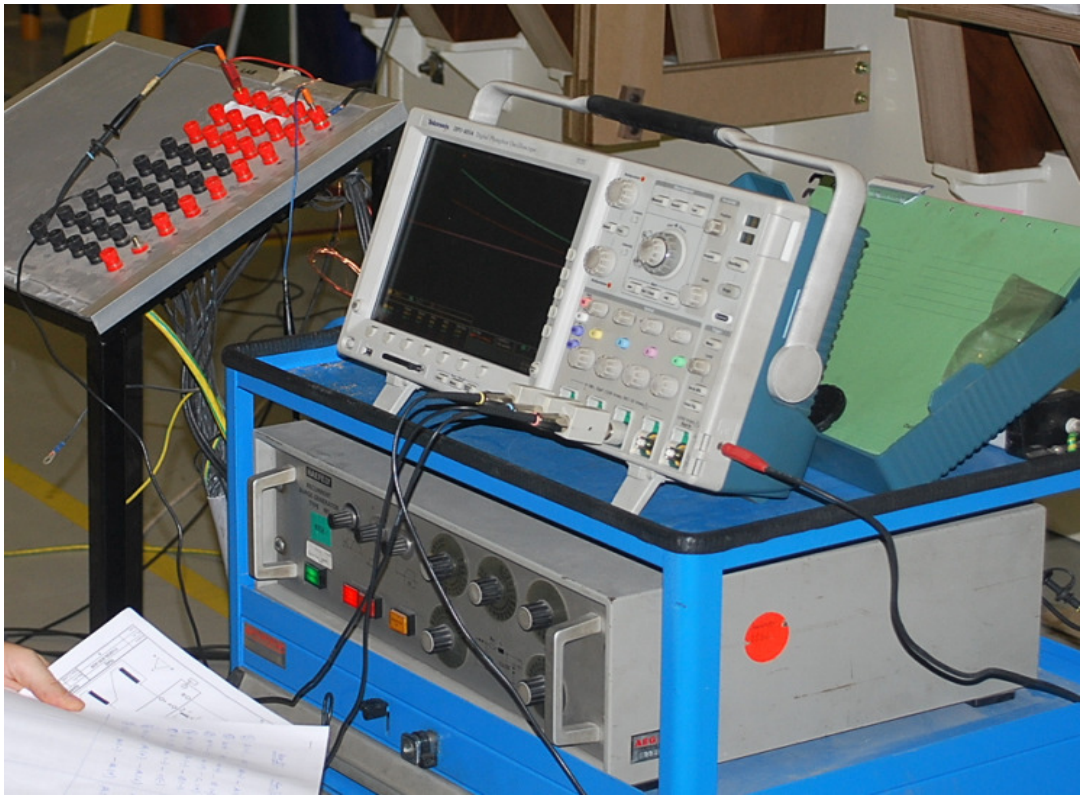
EK II **:** 100 MVA Transformatör Üzerinde Yapılan Ölçümlerin Osiloskop Resimleri

EK III **:** 125 MVA Transformatör Üzerinde Yapılan Ölçümlerin Osiloskop Resimleri

EK IV **:** 250 MVA Transformatör Üzerinde Yapılan Ölçümlerin Osiloskop Resimleri

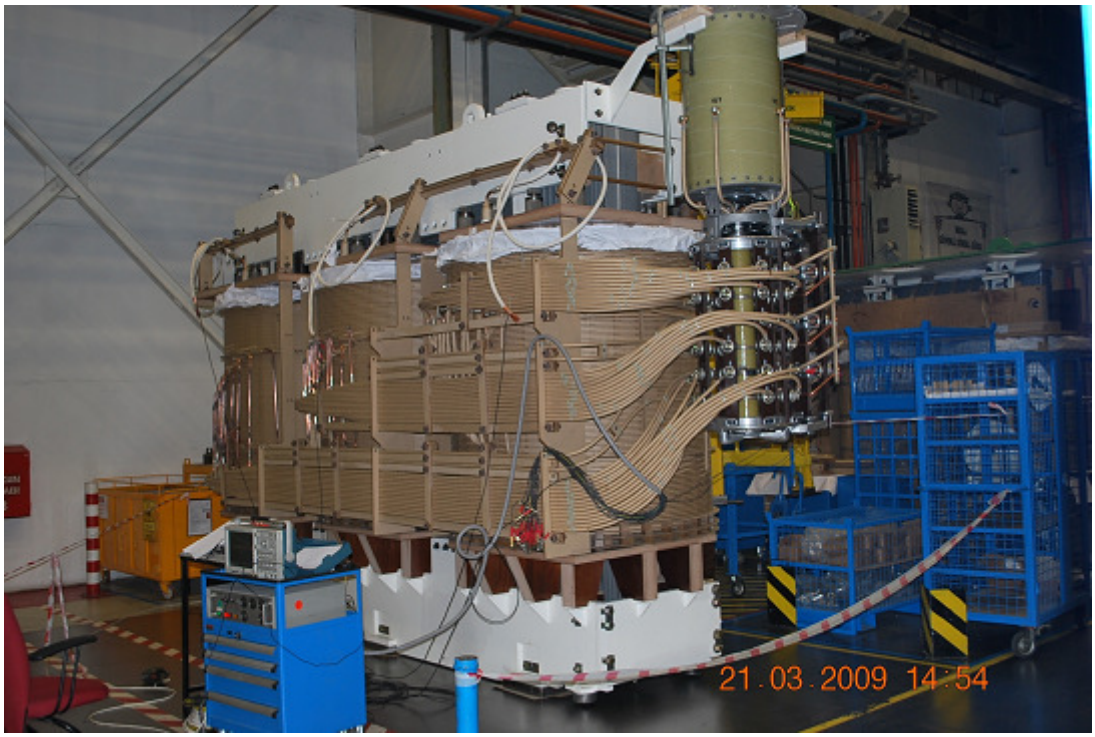
EK I

Ölçüm Cihazları Olan Darbe Gerilimi Üreticisi, Dijital Osiloskop, Bağlantı Plakası ve Test Objeleri.

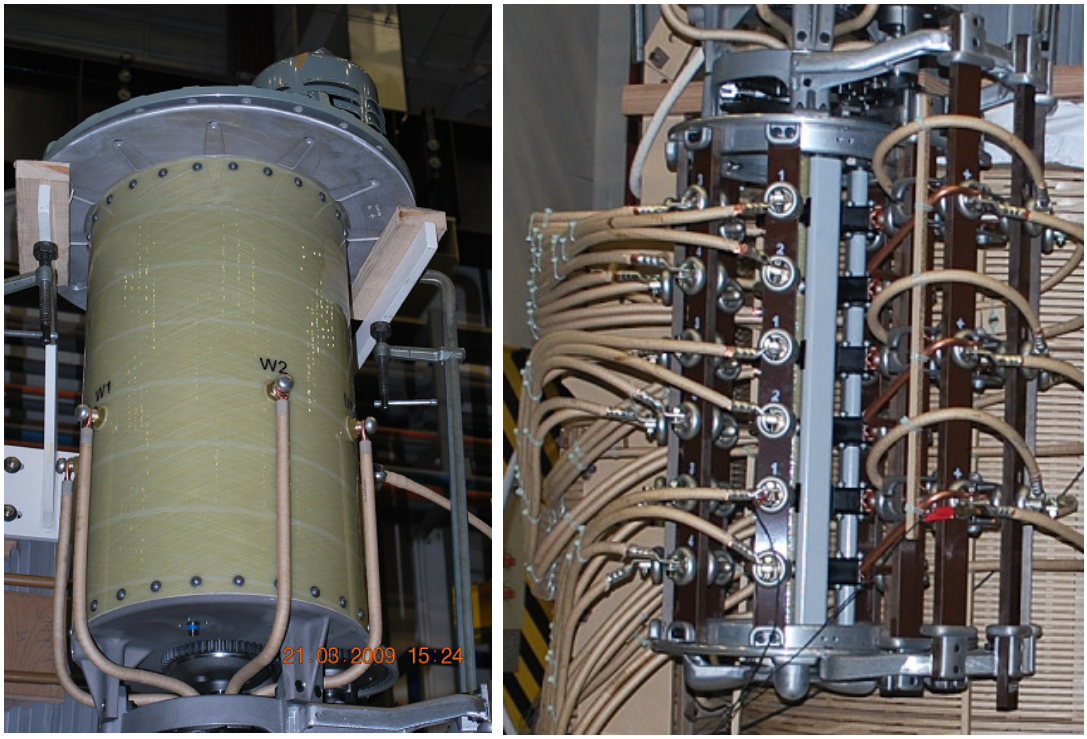


EK I Şekil 1 Dijital Osiloskop, Darbe Gerilimi Üreticisi ve Bağlantı Plakası

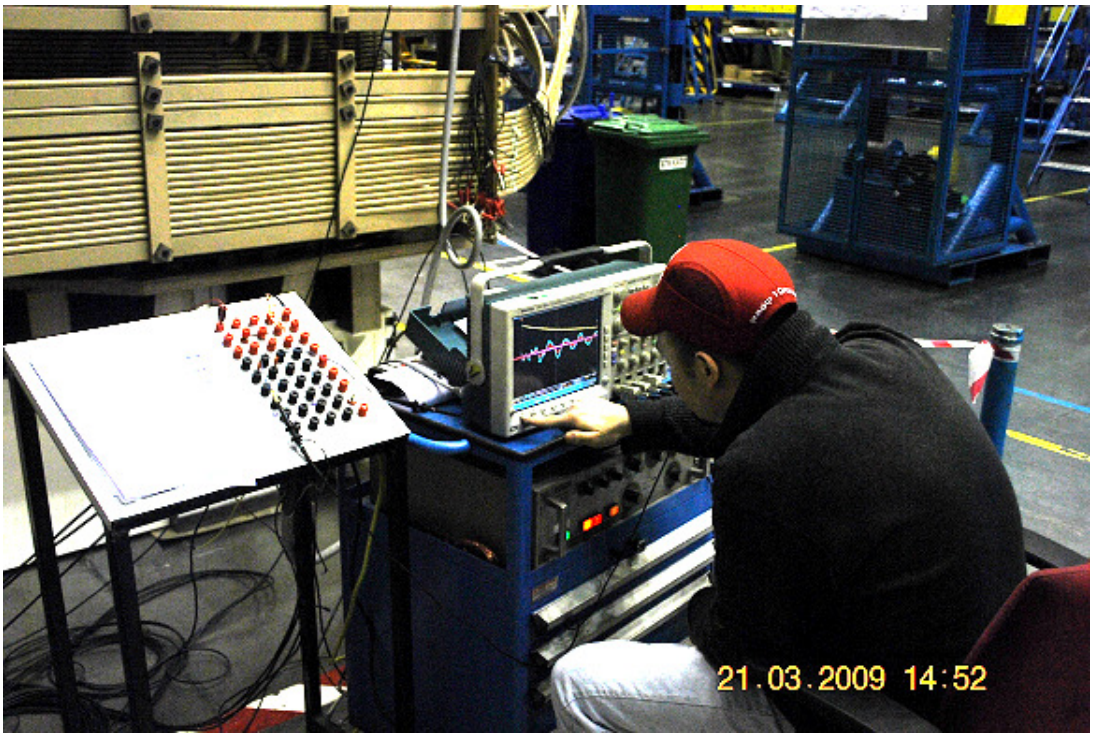
Ölçümlerin yapılmasında kullanılan osiloskop 4 adet ölçüm kanalına sahiptir. Üzerinde her bir kanalın yapılan ölçüm eğrisini ayarlamak için gerekli düğmeler mevcuttur. Bu çalışmada 3 adet kanal kullanılmıştır. Birinci kanal darbe gerilimin uygulandığı faz terminaline bağlanmıştır. İkinci kanal kademe değiştiricinin üzerinde toprağa karşı oluşan gerilimini ölçmek istediğimiz ilk noktaya, üçüncü kanal ise yine kademe değiştiricinin üzerinde toprağa karşı oluşan gerilimini ölçmek istediğimiz ikinci noktaya bağlanmıştır. Ölçüm eğrileri incelendiğinde dördüncü bir eğri mevcuttur ve bu da kademe değiştirici üzerindeki ölçüm yapılan noktanın arasındaki potansiyel farkıdır. Bu fark geriliminin tespiti osiloskopun matematiksel fonksiyonu kullanılarak ikinci ve üçüncü kanalda ölçülen eğrilerin birbirinden çıkarılması ile elde edilir. Darbe gerilimi üretici mavi dolabın ilk bölmesinde olup testlerde faz terminaline uyguladığımız 400 V'luk darbe gerilimini üretmiştir. Eğri şekli üzerinde sağ tarafta bulunan 5 adet siyah düğme ile ayarlanmıştır ve ayarlama şekli Bölüm III'te anlatılmıştır. Faz terminali ve kademe değiştirici ölçü noktaları kablo ile yanda görülen bağlantı plakasına bağlanmıştır ve osiloskop ölçüm probları bu plakada ölçüm yapmak istediğimiz noktalara bağlanmıştır.



EK I Şekil 2 100 MVA Transformatör Genel Görünüşü ve Üzerinde Hazırlanan Ölçme Düzeni



EK I Şekil 3 100 MVA Transformatör Üzerinde Kademe Değiştiricinin Aktarma Anahtarı ve Seçici Anahtar Bölümlerinin Dışarıdan Genel Görünüşü



EK I Şekil 4 100 MVA Transformatör Üzerinde Yapılan Ölçümden Bir Enstantane



EK I Şekil 5 100 MVA Transformatör Üzerinde Yapılan Ölçümden Bir Enstantane



EK I Şekil 6 125 MVA Transformatör Genel Görünüşü



EK I Şekil 7 125 MVA Transformatör Üzerinde Hazırlanan Ölçme Düzeni ve Ölçümden Bir Enstantane.



EK I Şekil 8 125 MVA Transformatör Üzerinde Kullanılan Kademe Değiştirici ve İmalatçısı Tarafından Öngörülen Koruyucu Direnç (Tie-In) Plakası



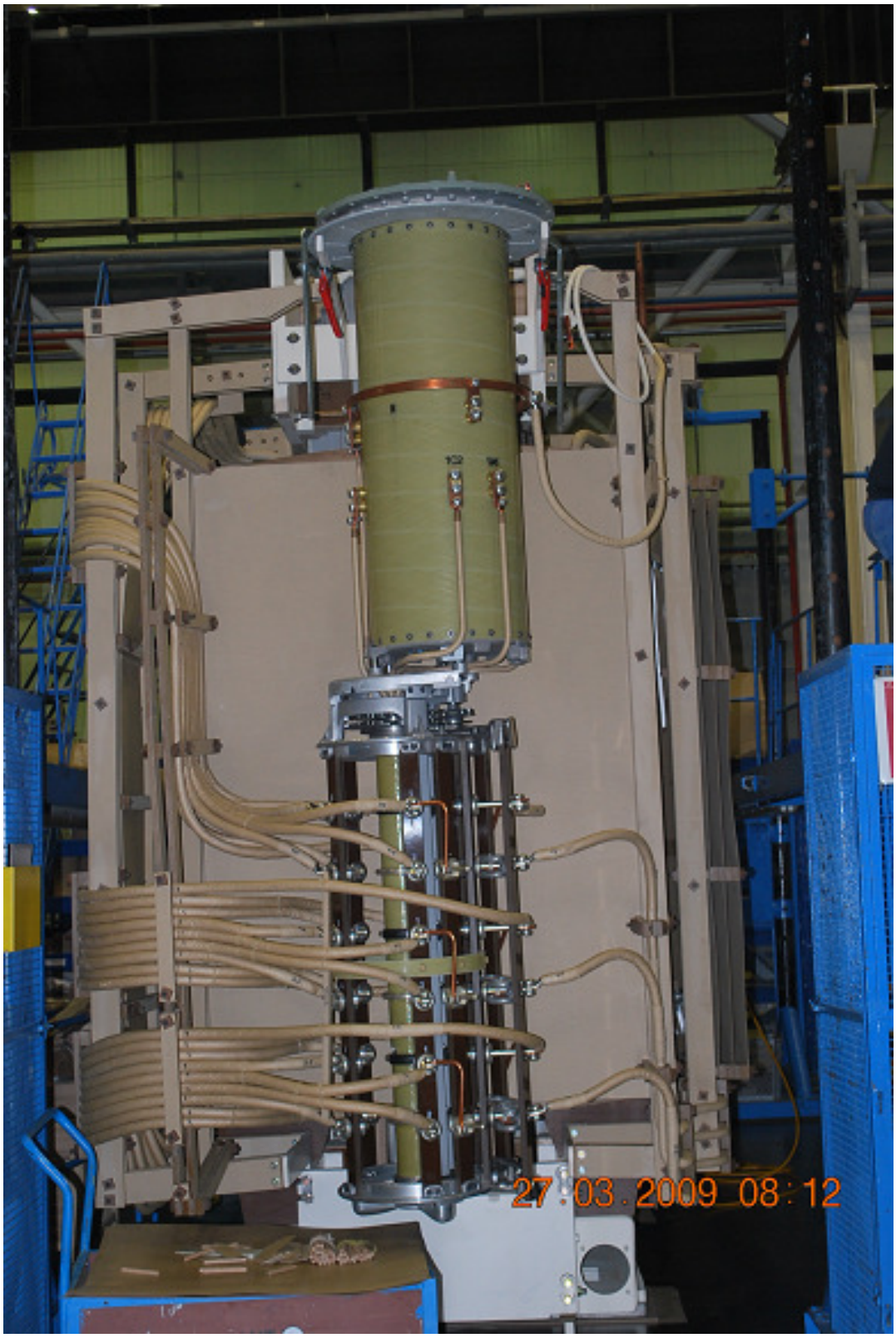
EK I Şekil 9 125 MVA Transformatör Üzerinde Kademe Değiştiricinin Diğer bir Görünüşü.



EK I Şekil 10 Koruyucu Direnç (Tie-In) Plakasının Yakından Görünüşü



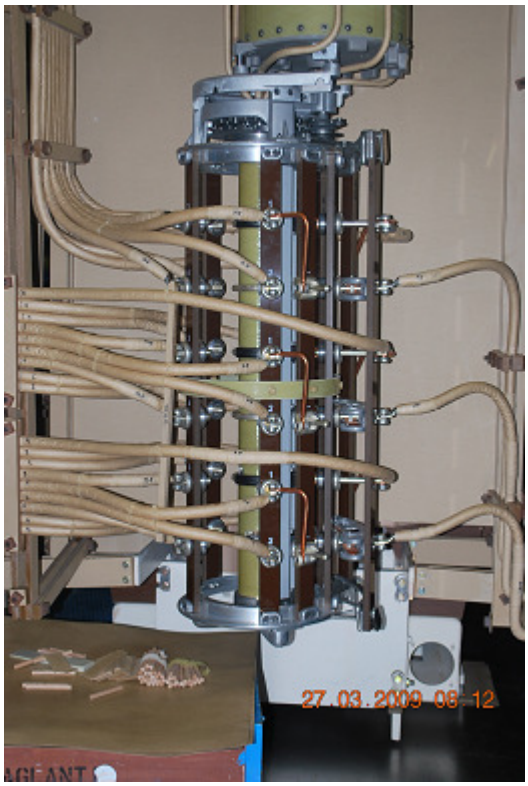
EK I Şekil 11 Koruyucu Direncin Yakından Görünüşü



EK I Şekil 12 250 MVA Transformatörün Kademe Değiştirici Tarafından Genel Görünüşü



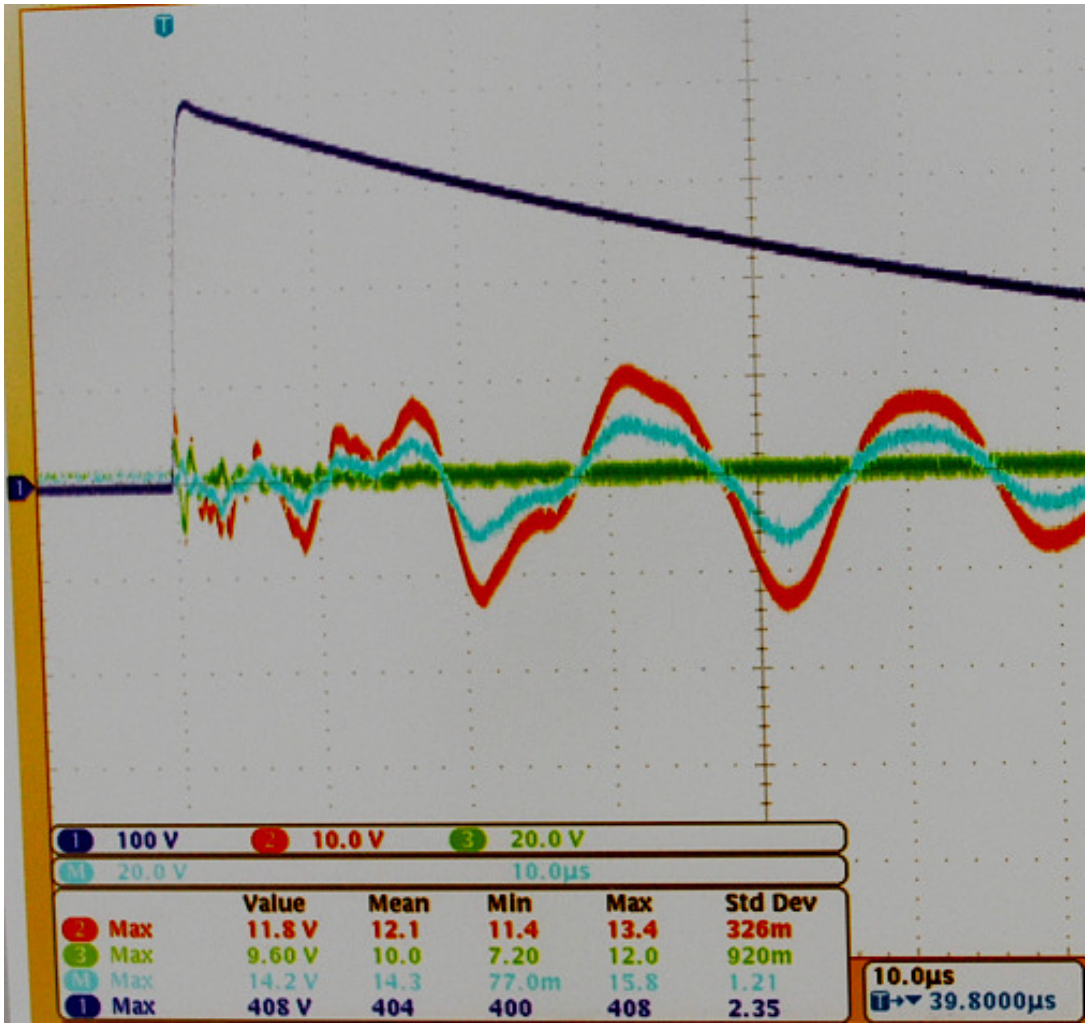
EK I Şekil 13 250 MVA Transformatörün Kademe Değiştiricisinin Aktarma Anahtarı Bölümü Dışardan Görünüşü



EK I Şekil 14 250 MVA Transformatörün Kademe Değiştiricisinin Seçici Anahtarı Bölümü Dışardan Görünüşü

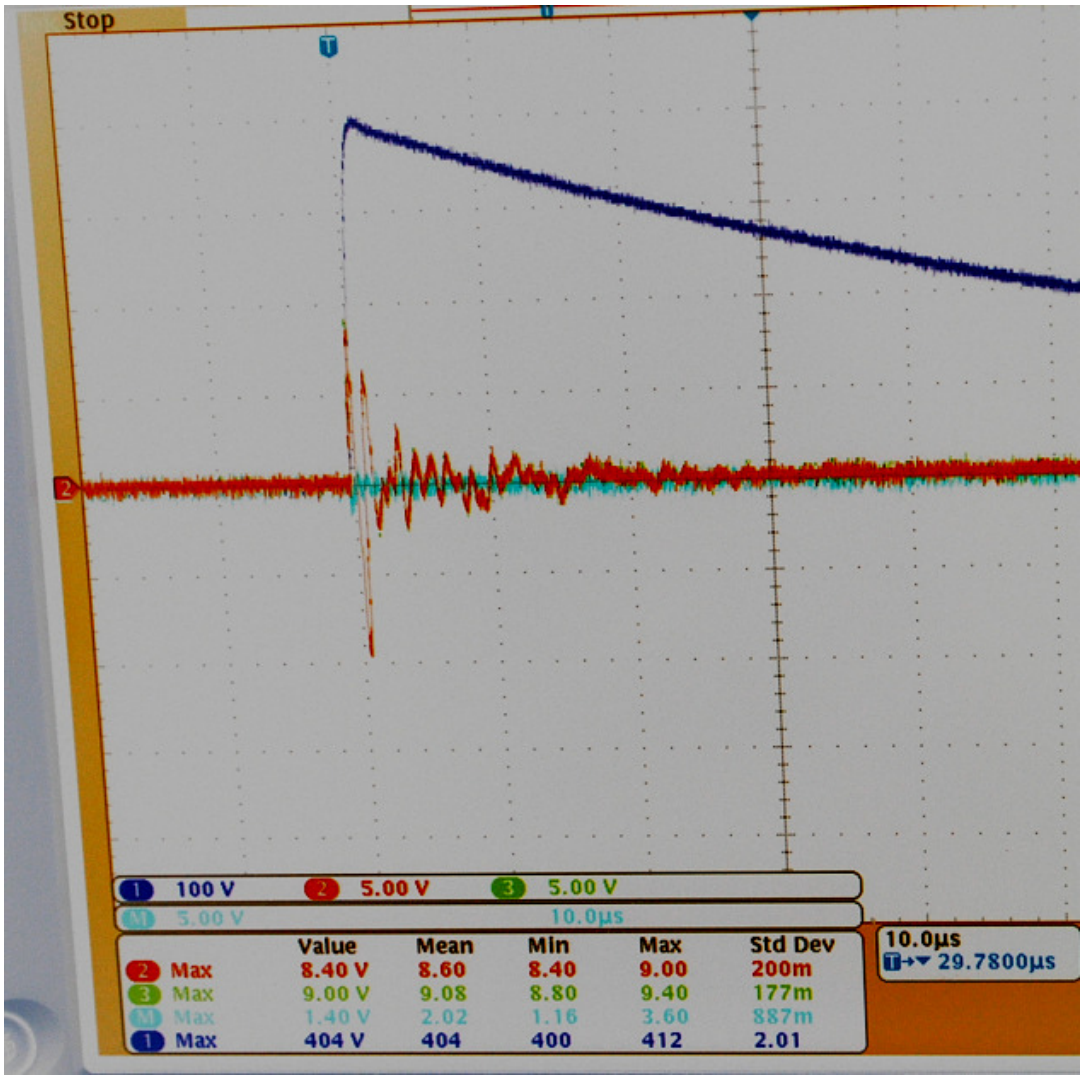
EK II

100 MVA Transformatör Üzerinde Yapılan Ölçümlerin Osiloskop Resimleri

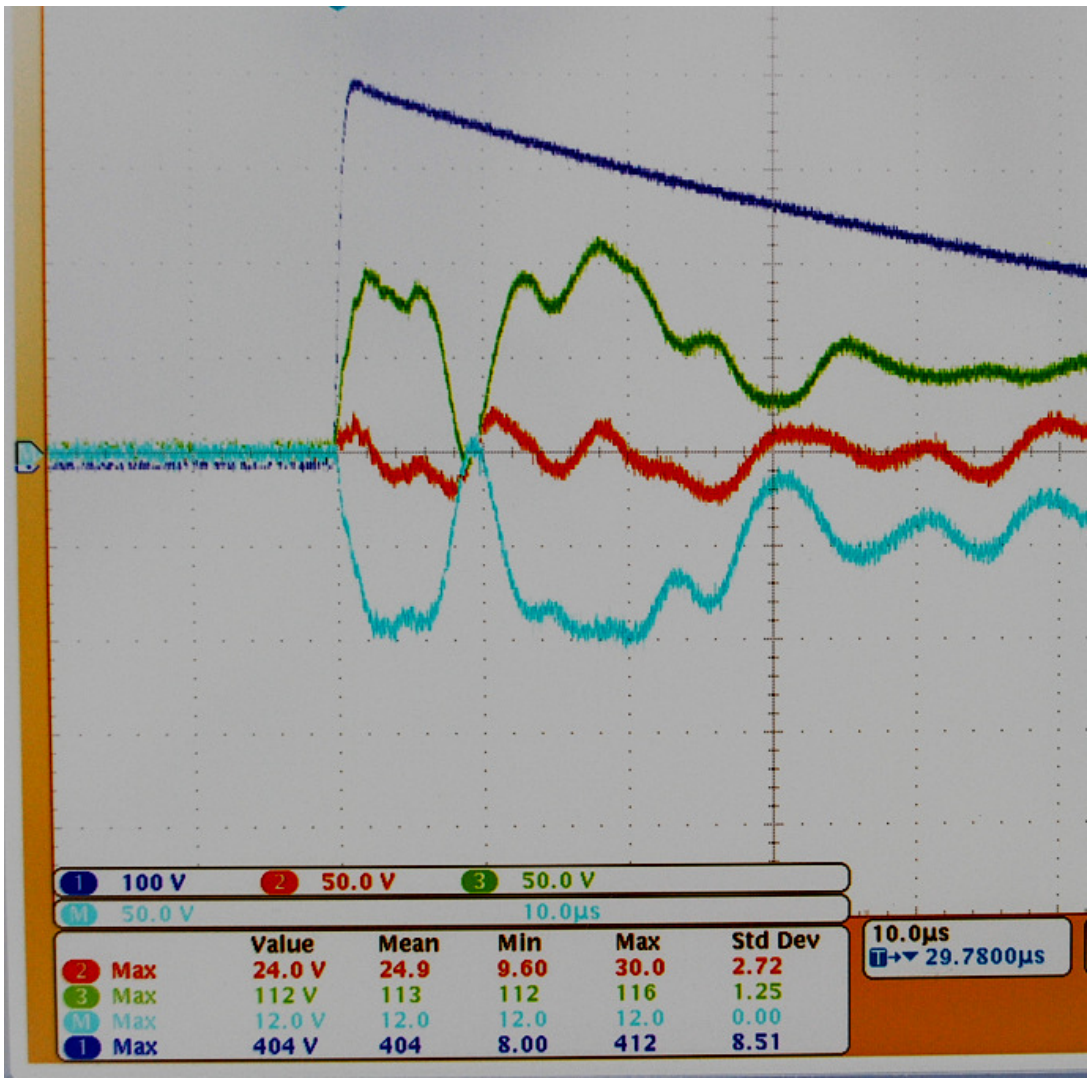


EK II Şekil 1 100 MVA Transformatör Üzerindeki 1 Numaralı Ölçüm.

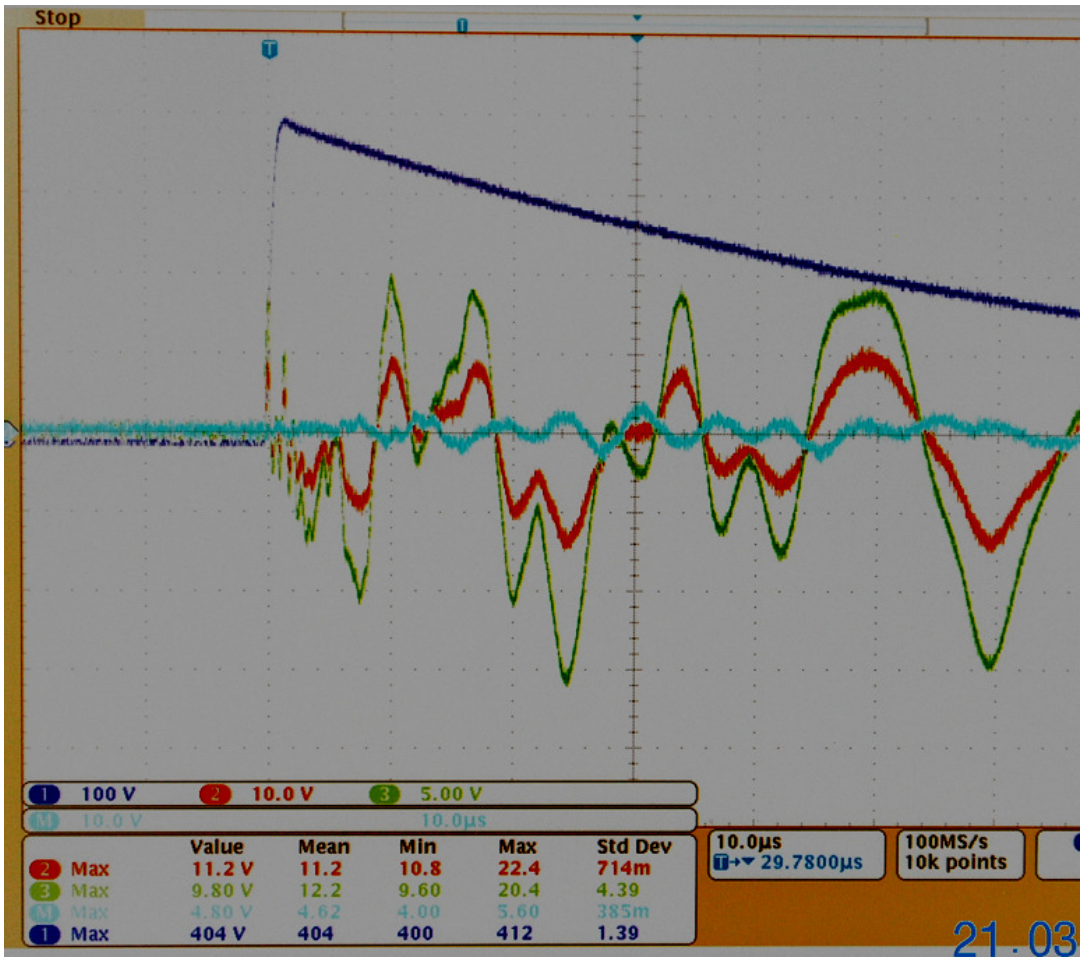
1. Kanal (Lacivert) : Darbe gerilimi uygulanan kanal
2. Kanal (Turuncu) : Kademe değiştirici üzerindeki birinci ölçüm noktası
3. Kanal (Yeşil) : Kademe değiştirici üzerindeki ikinci ölçüm noktası
M Kanalı (Turkuaz) : 2 ve 3 nolu gerilimin farkı



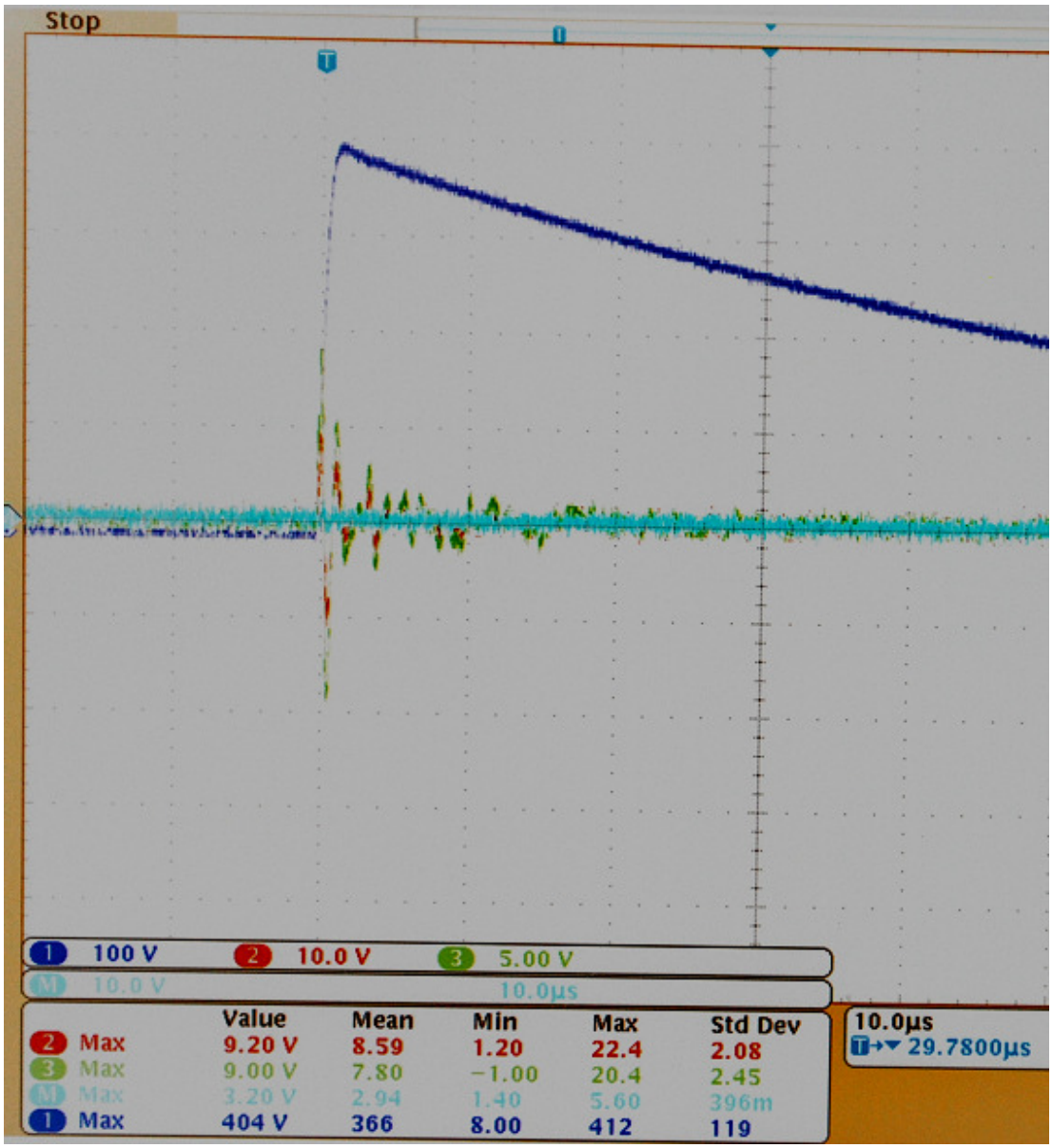
EK II Şekil 2 100 MVA Transformatör Üzerindeki 2 Numaralı Ölçüm.



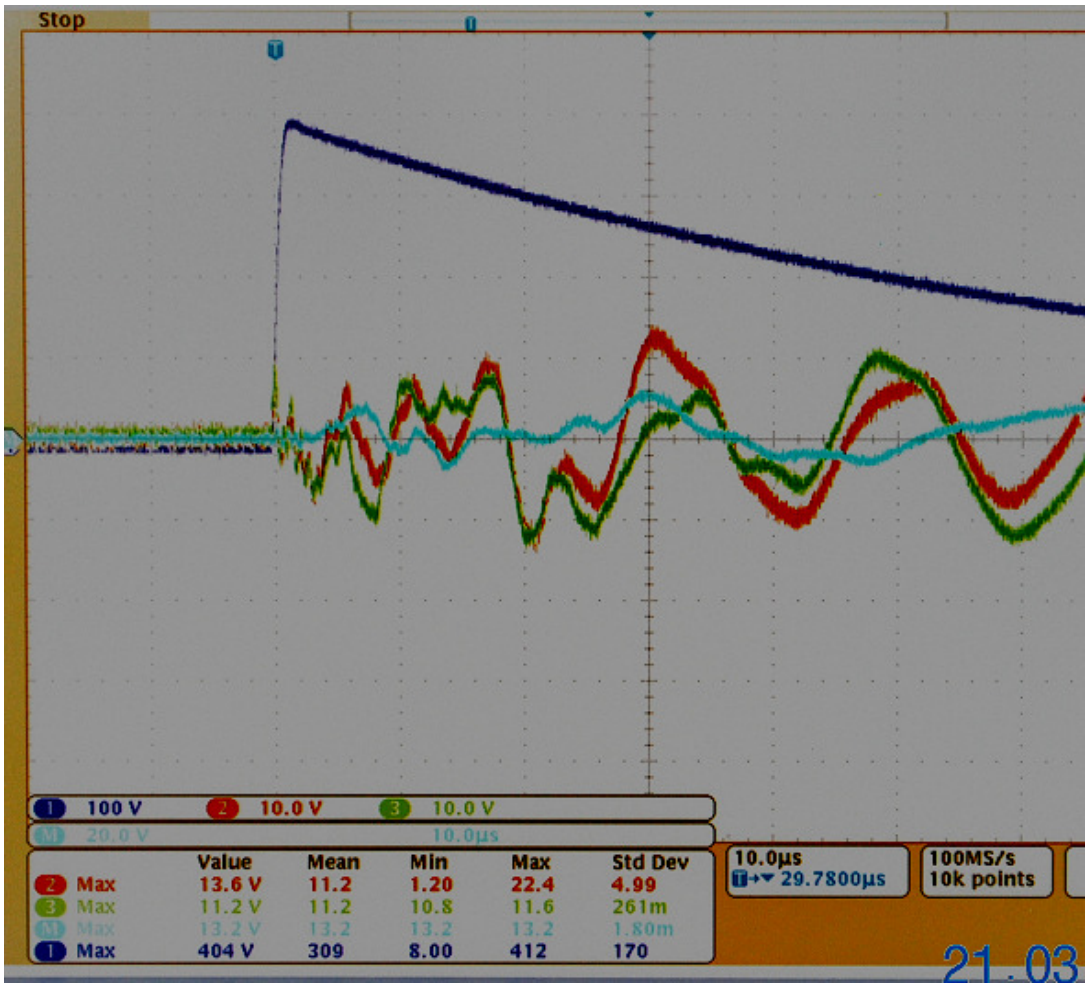
EK II Şekil 3 100 MVA Transformatör Üzerindeki 3 Numaralı Ölçüm.



EK II Şekil 4 100 MVA Transformatör Üzerindeki 4 Numaralı Ölçüm.



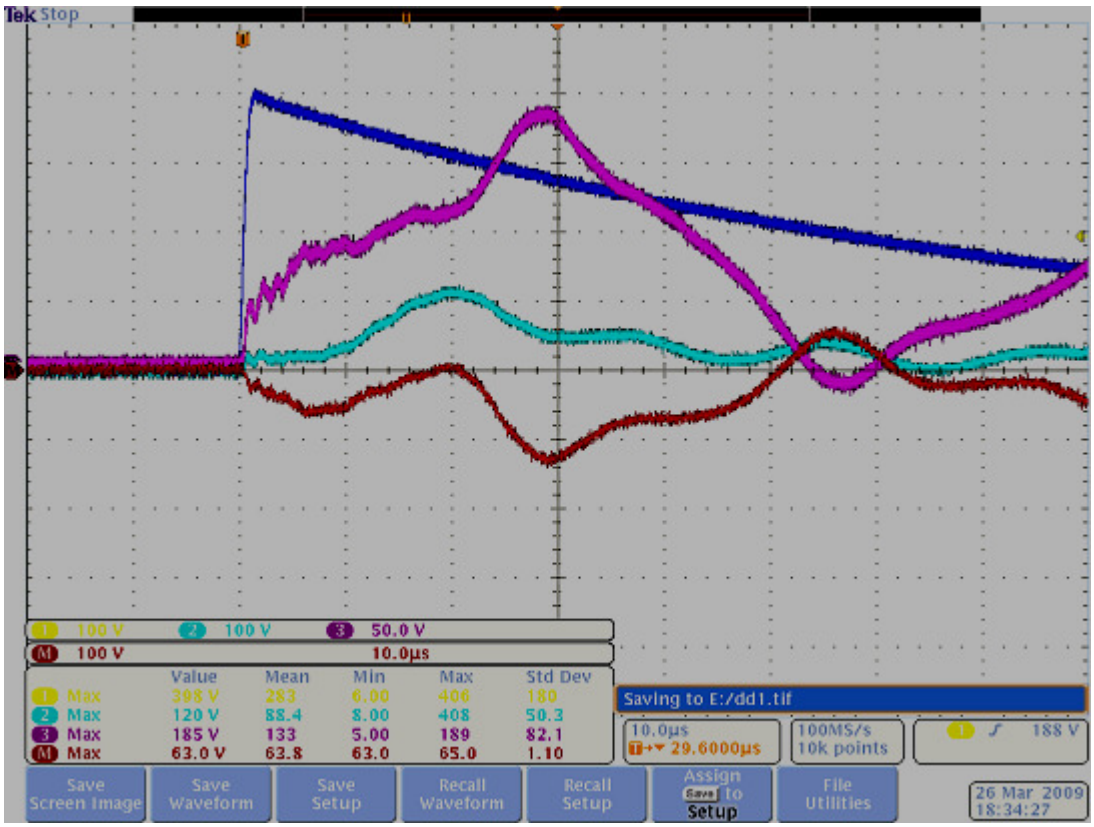
EK II Şekil 5 100 MVA Transformatör Üzerindeki 5 Numaralı Ölçüm.



EK II Şekil 6 100 MVA Transformatör Üzerindeki 6 Numaralı Ölçüm.

EK III

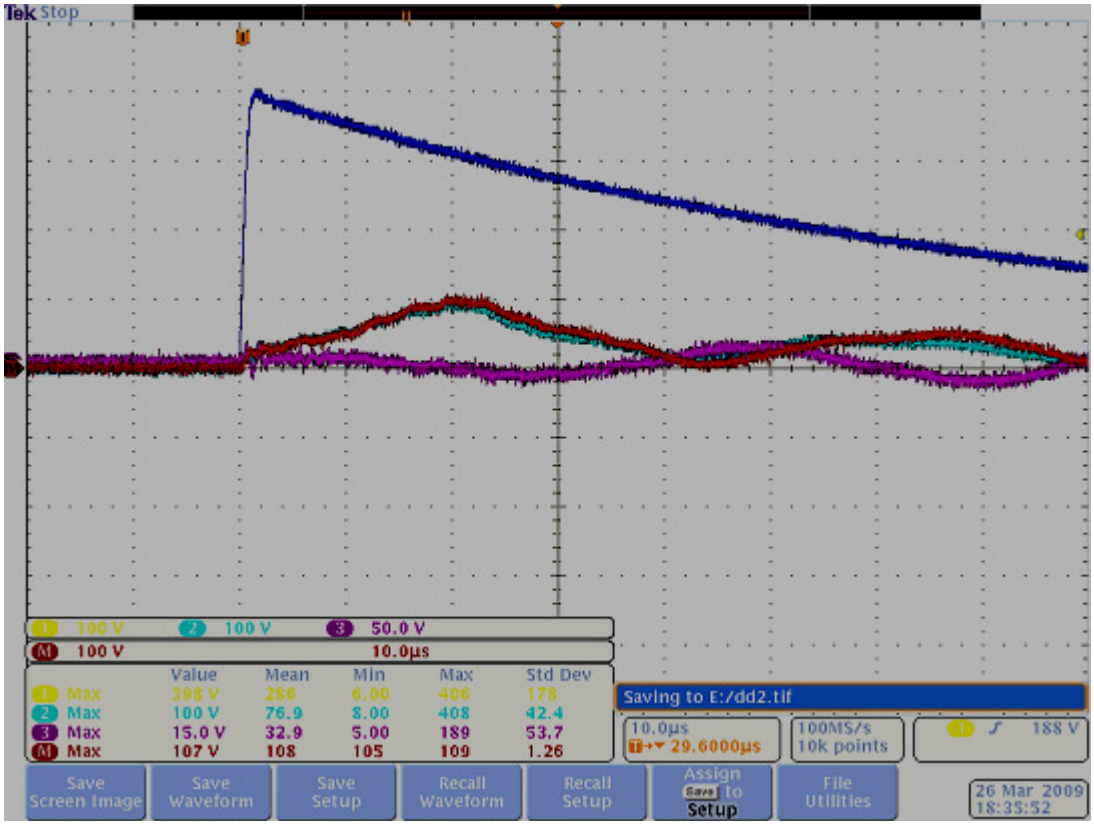
125 MVA Transformatör ve Üzerinde Yapılan Ölçümlerin Osiloskop Resimleri



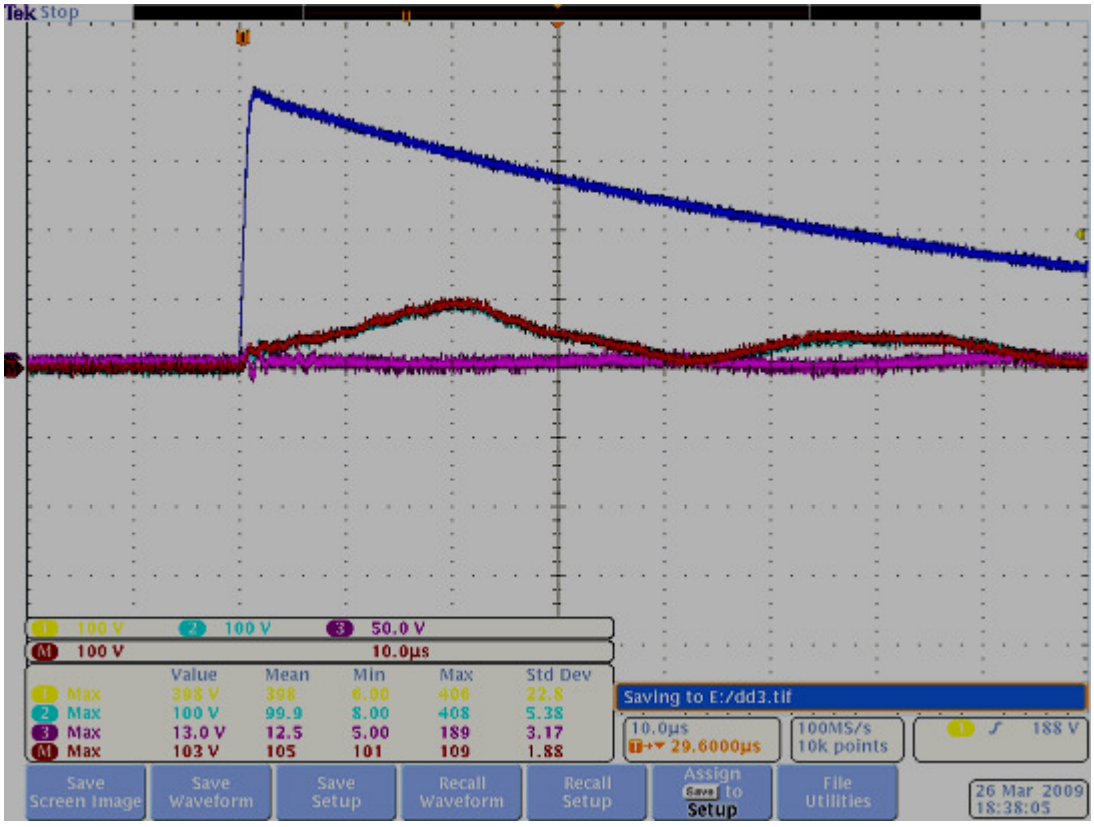
EK III Şekil 1 125 MVA Transformatör Üzerinde Poz. 25 için 1 Numaralı Ölçüm.

1. Kanal (Lacivert)* : Darbe gerilimi uygulanan kanal
2. Kanal (Turkuaz) : Kademe değiştirici üzerindeki birinci ölçüm noktası
3. Kanal (Eflatun) : Kademe değiştirici üzerindeki ikinci ölçüm noktası
M Kanalı (Kırmızı) : 2 ve 3 nolu gerilimin farkı

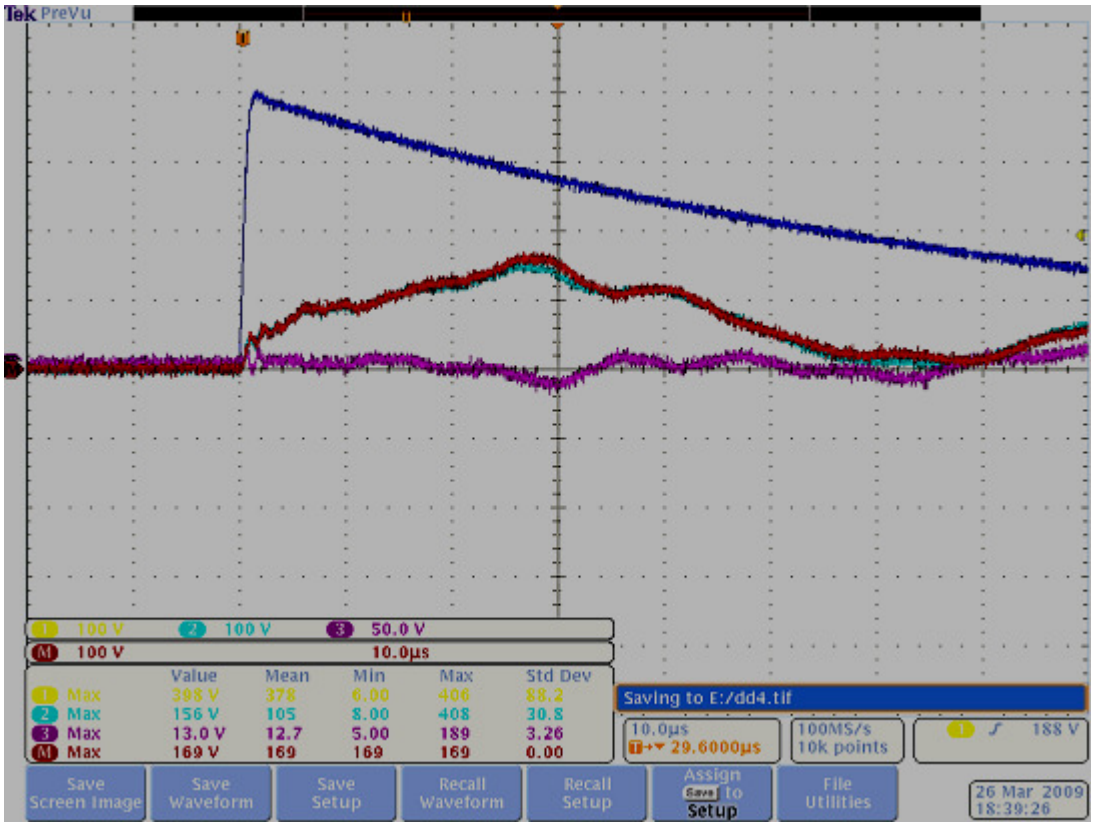
* Arka fonun siyah olduğu durumlarda 1 nolu kanal rengi sarı olmaktadır.



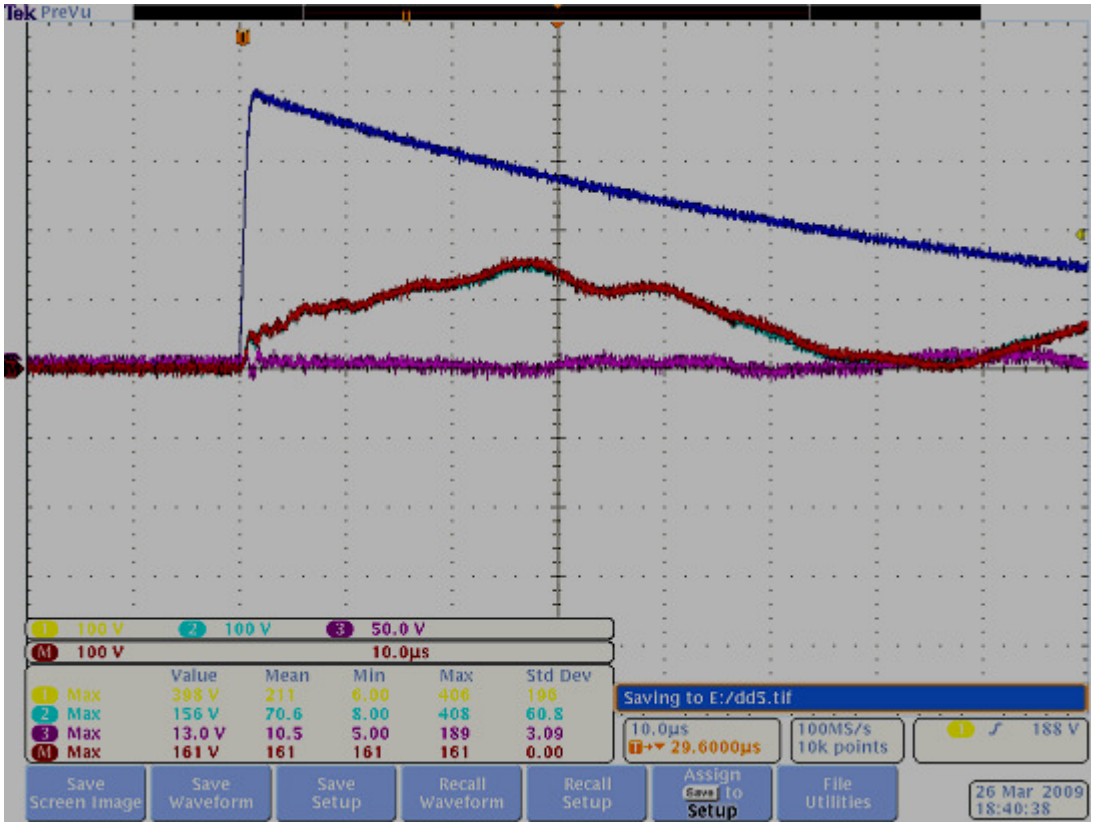
EK III Şekil 2 125 MVA Transformatör Üzerinde Poz. 25 için 2 Numaralı Ölçüm.



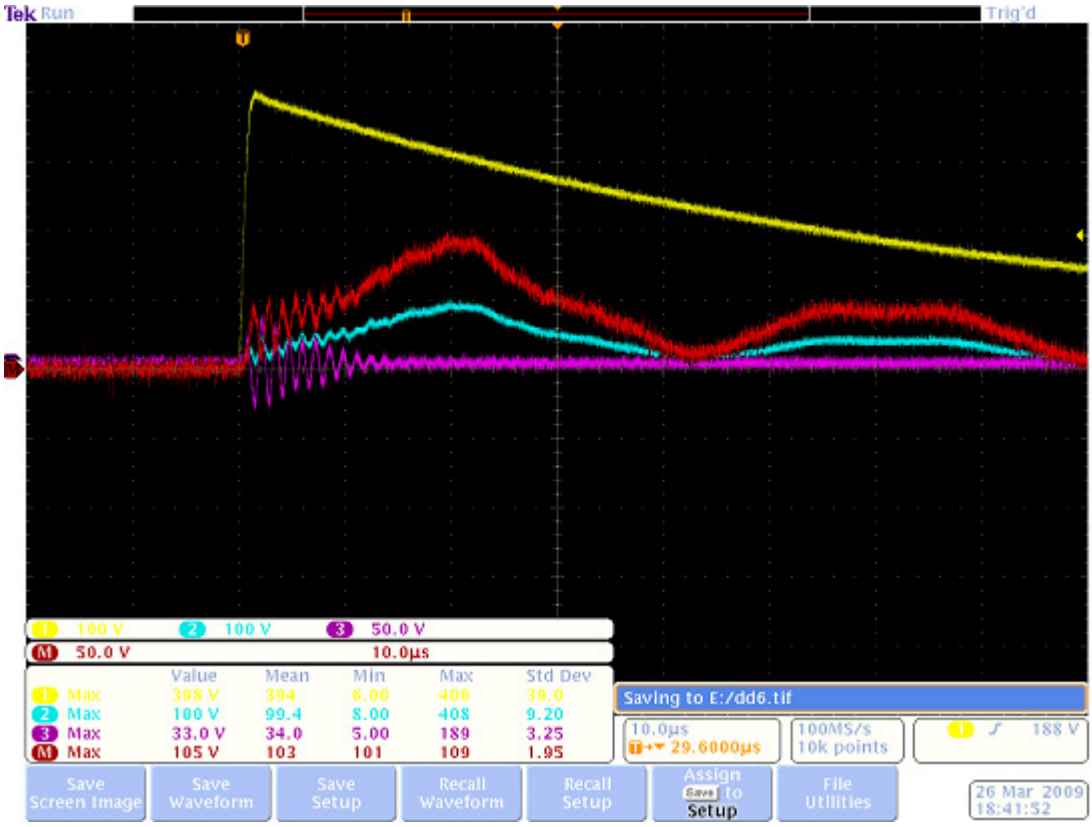
EK III Şekil 3 125 MVA Transformatör Üzerinde Poz. 25 için 3 Numaralı Ölçüm.



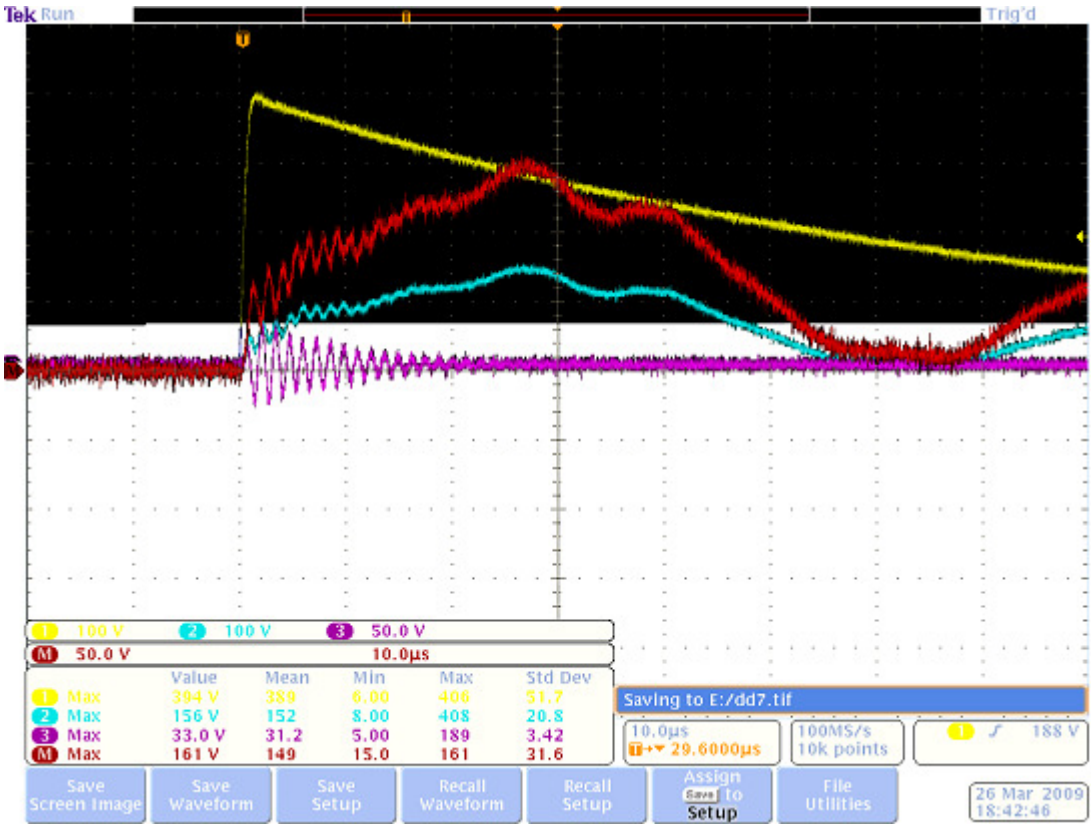
EK III Şekil 4 125 MVA Transformatör Üzerinde Poz. 25 için 4 Numaralı Ölçüm.



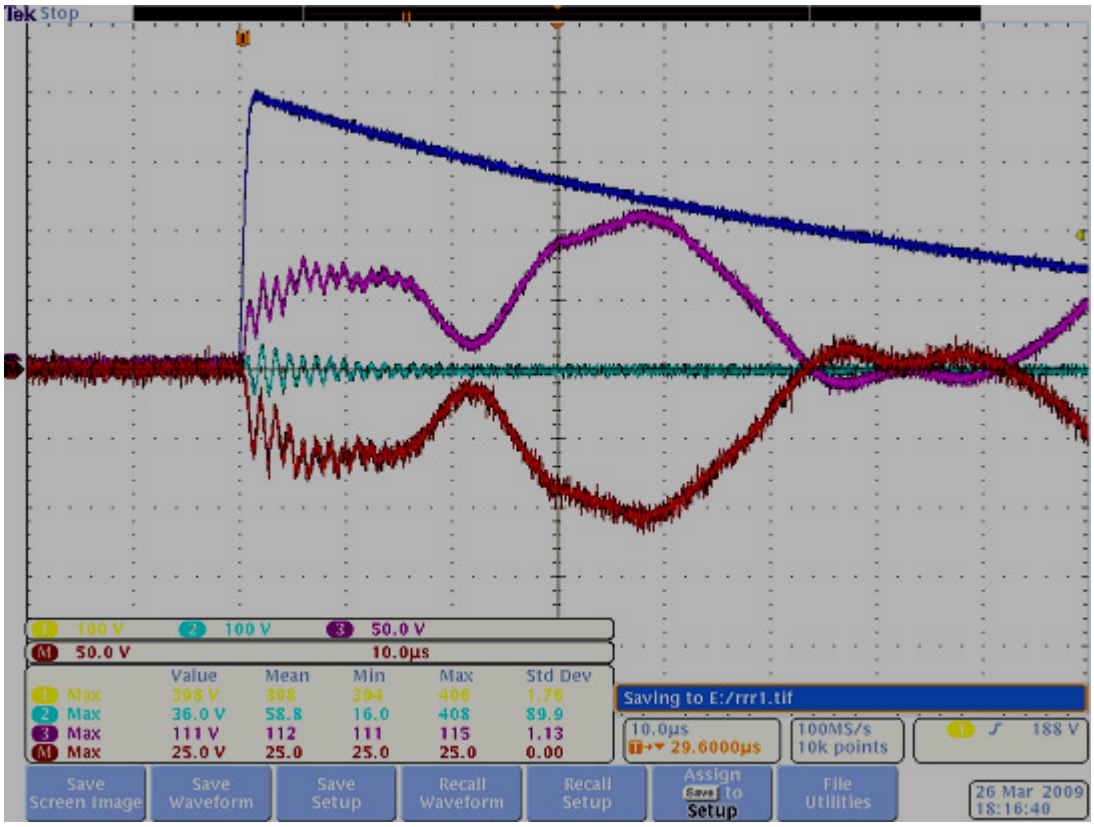
EK III Şekil 5 125 MVA Transformatör Üzerinde Poz. 25 için 5 Numaralı Ölçüm.



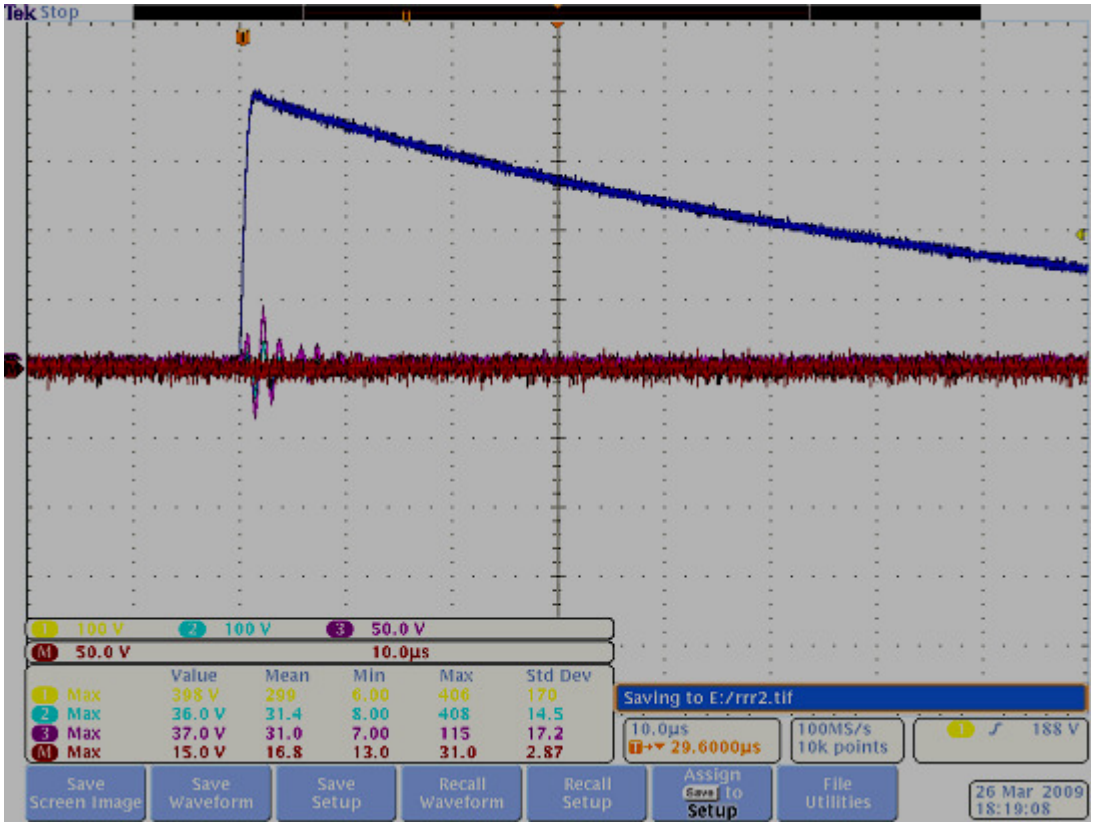
EK III Şekil 6 125 MVA Transformatör Üzerinde Poz. 25 için 6 Numaralı Ölçüm.



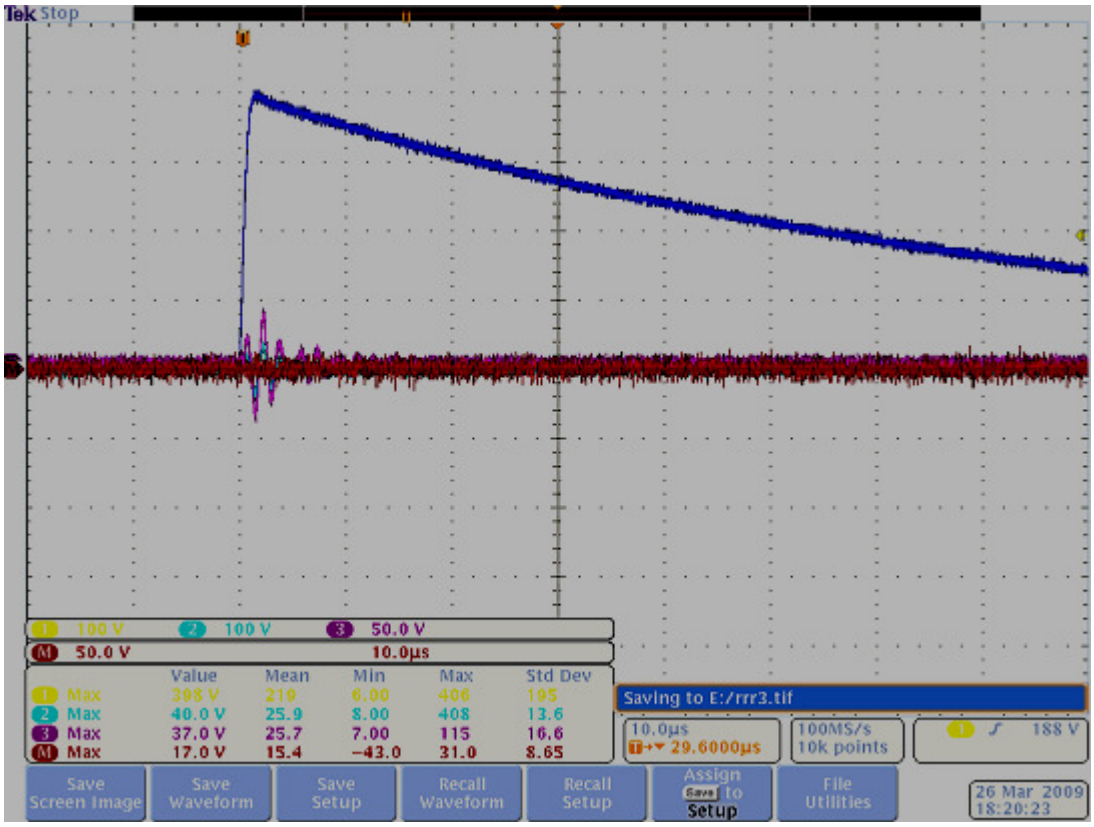
EK III Şekil 7 125 MVA Transformatör Üzerinde Poz. 25 için 7 Numaralı Ölçüm.



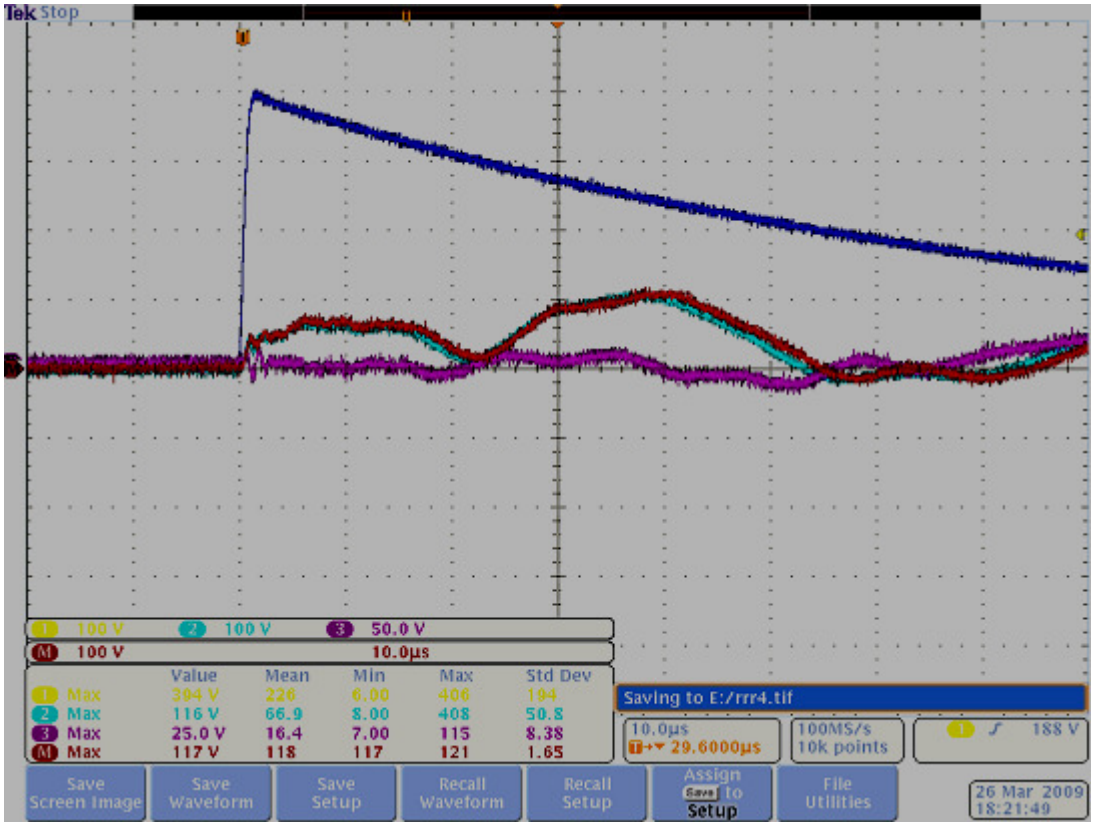
EK III Şekil 8 125 MVA Transformatör Üzerinde Poz. 13 için 1 Numaralı Ölçüm.



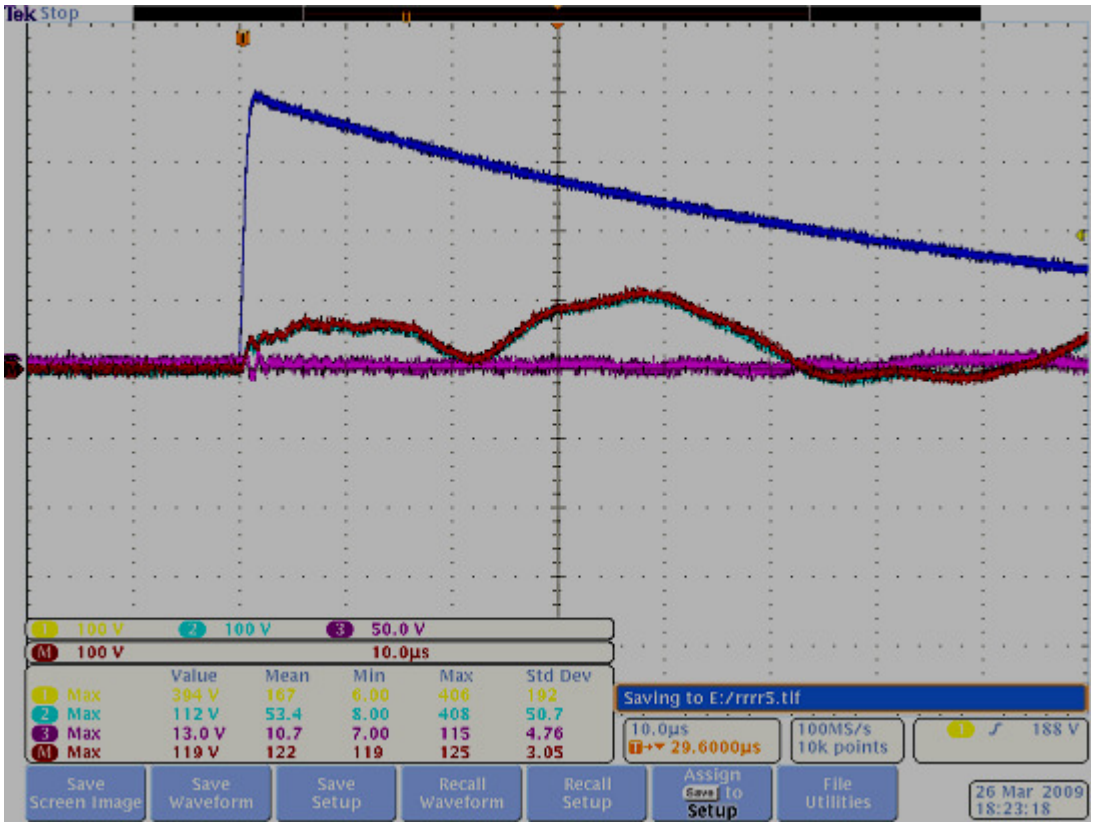
EK III Şekil 9 125 MVA Transformatör Üzerinde Poz. 13 için 2 Numaralı Ölçüm



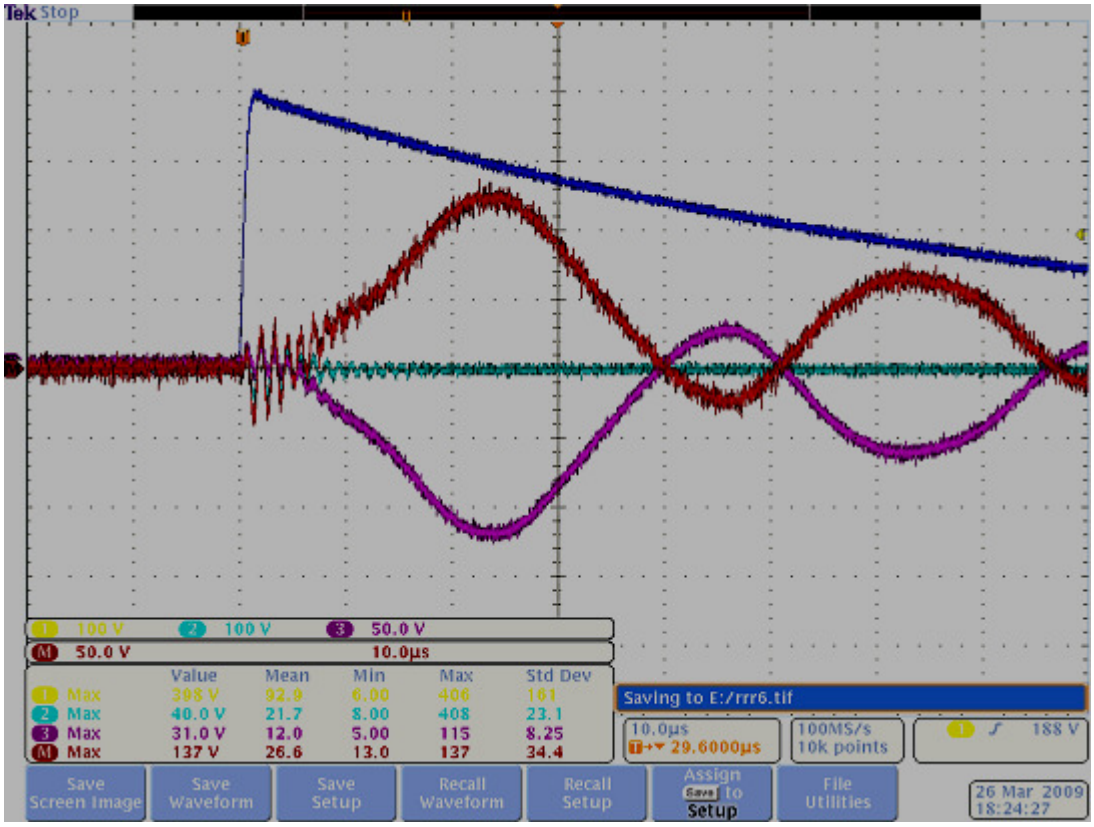
EK III Şekil 10 125 MVA Transformatör Üzerinde Poz. 13 için 3 Numaralı Ölçüm



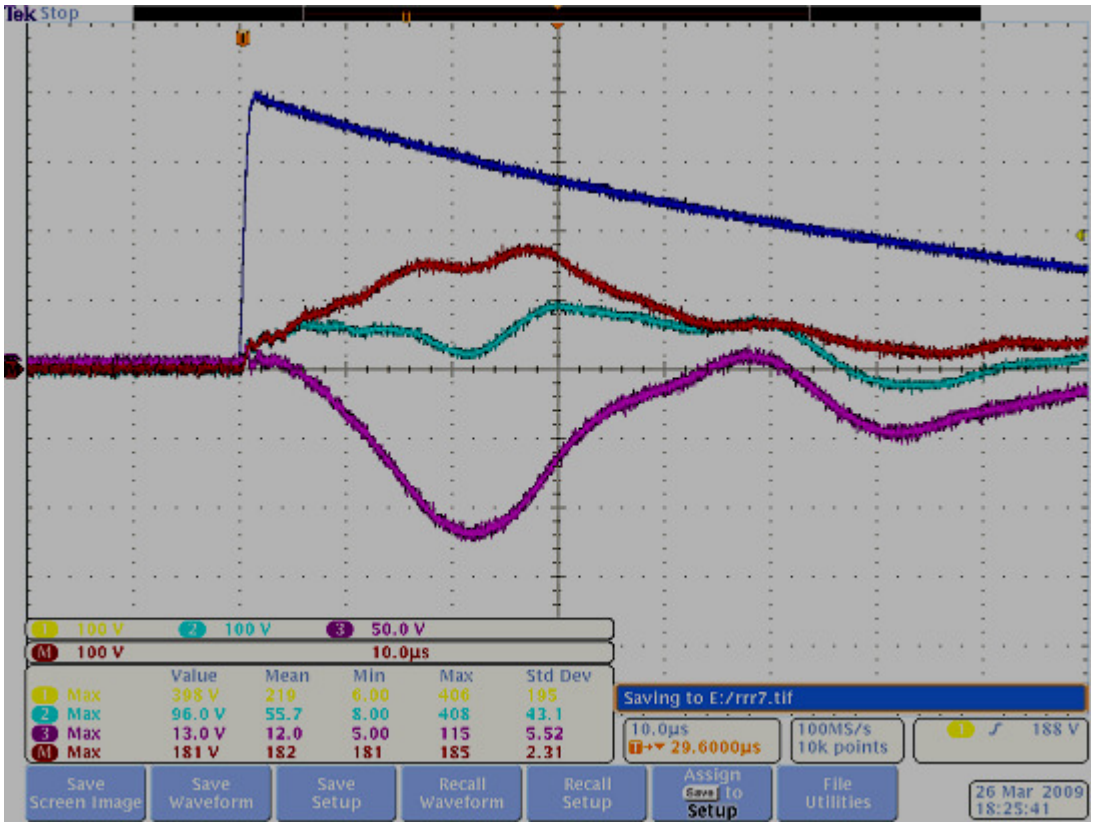
EK III Şekil 11 125 MVA Transformatör Üzerinde Poz. 13 için 4 Numaralı Ölçüm



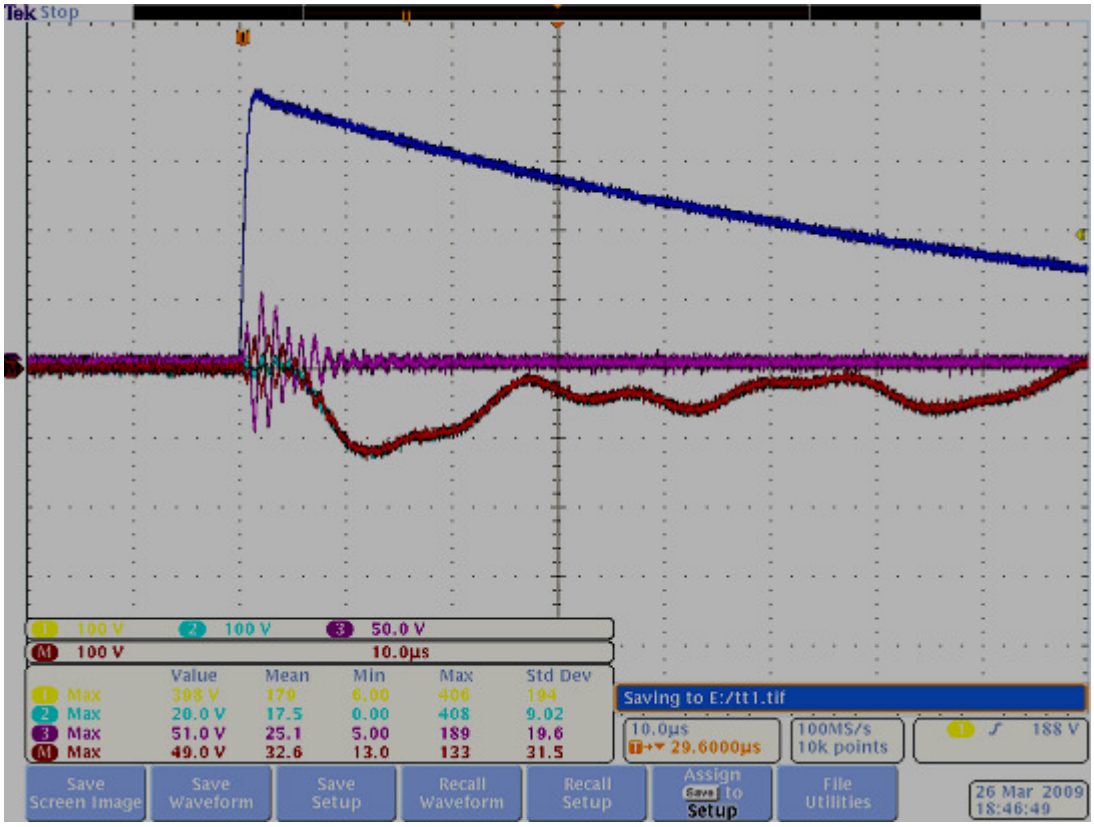
EK III Şekil 12 125 MVA Transformatör Üzerinde Poz. 13 için 5 Numaralı Ölçüm



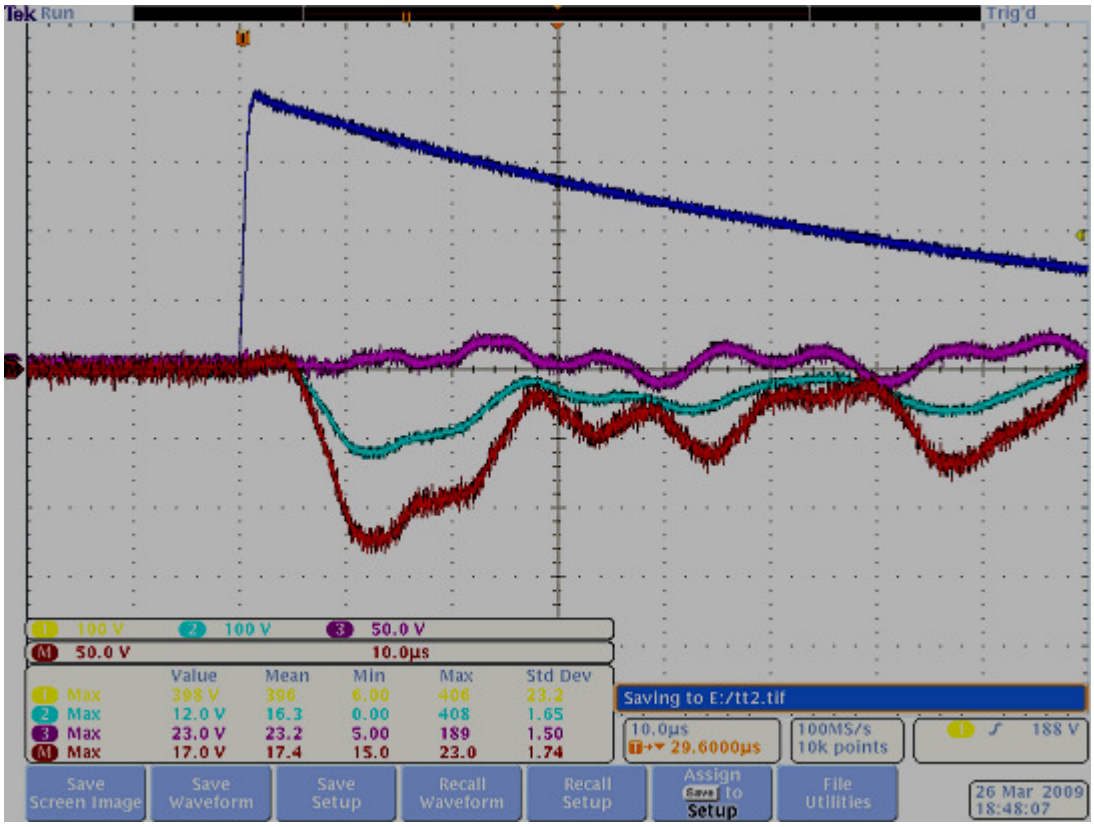
EK III Şekil 13 125 MVA Transformatör Üzerinde Poz. 13 için 6 Numaralı Ölçüm



EK III Şekil 14 125 MVA Transformatör Üzerinde Poz. 13 için 7 Numaralı Ölçüm



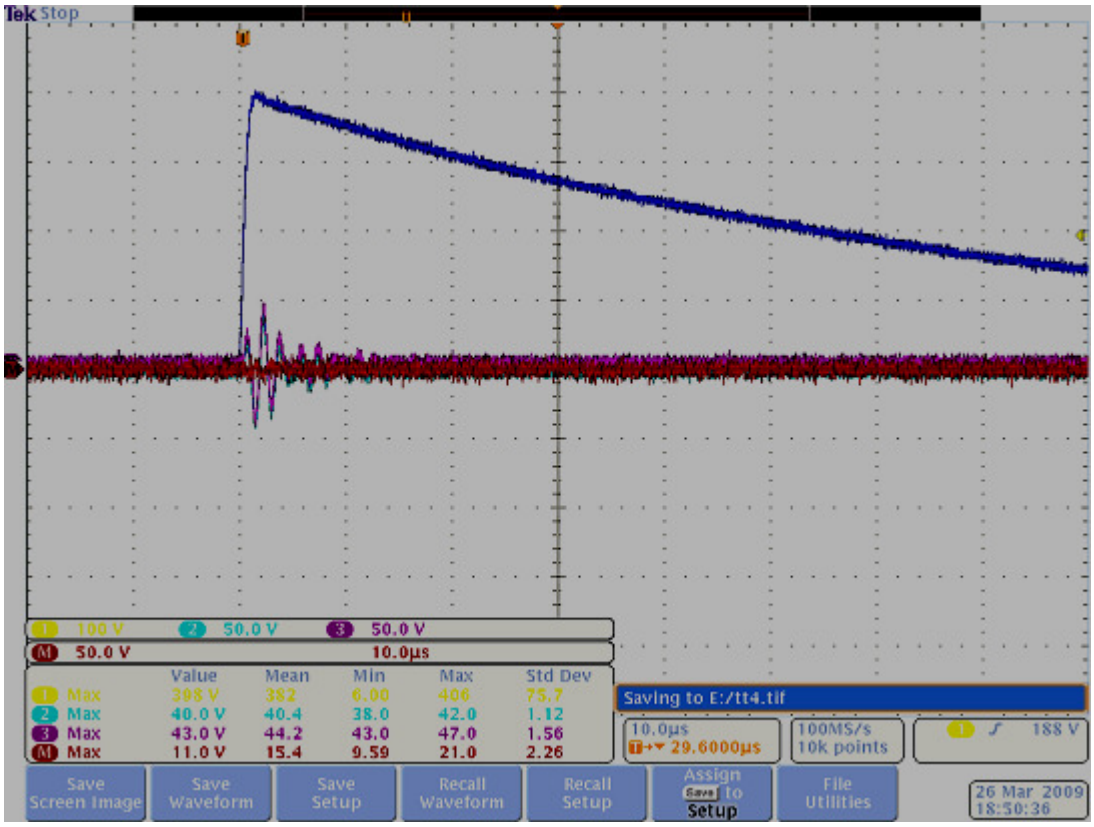
EK III Şekil 15 125 MVA Transformatör Üzerinde Poz. 1 için 1 Numaralı Ölçüm



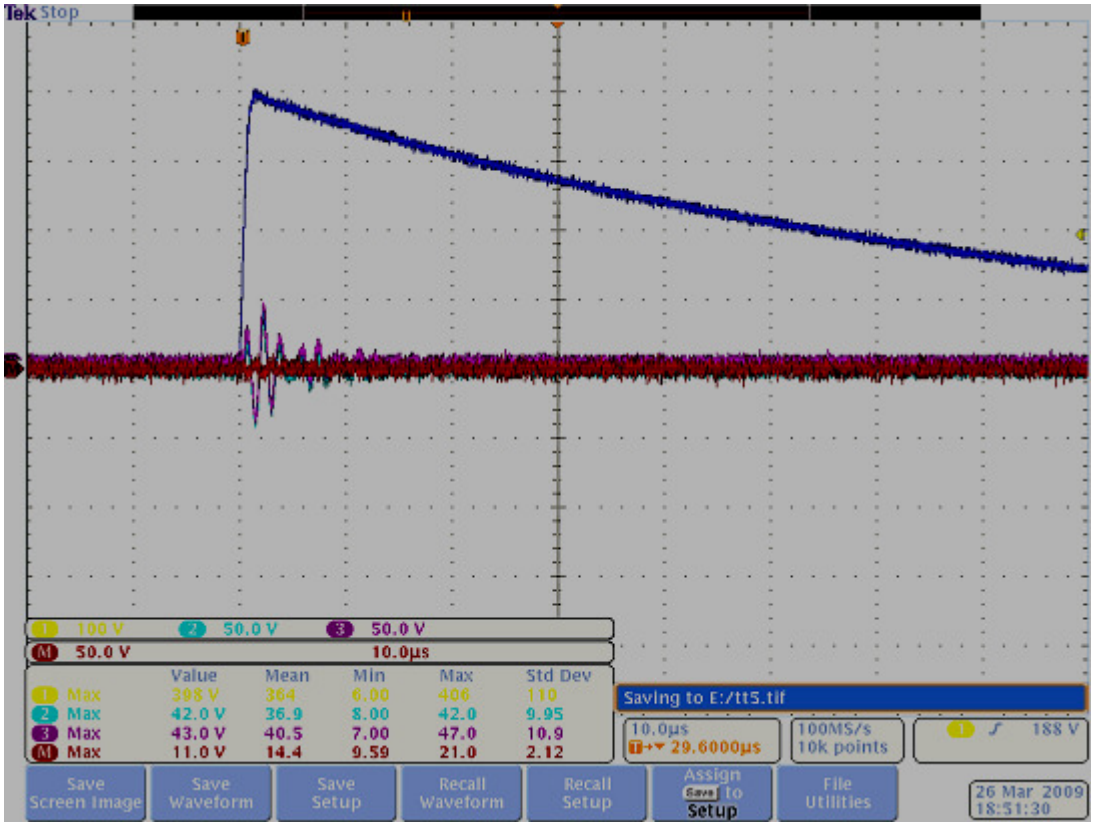
EK III Şekil 16 125 MVA Transformatör Üzerinde Poz. 1 için 2 Numaralı Ölçüm



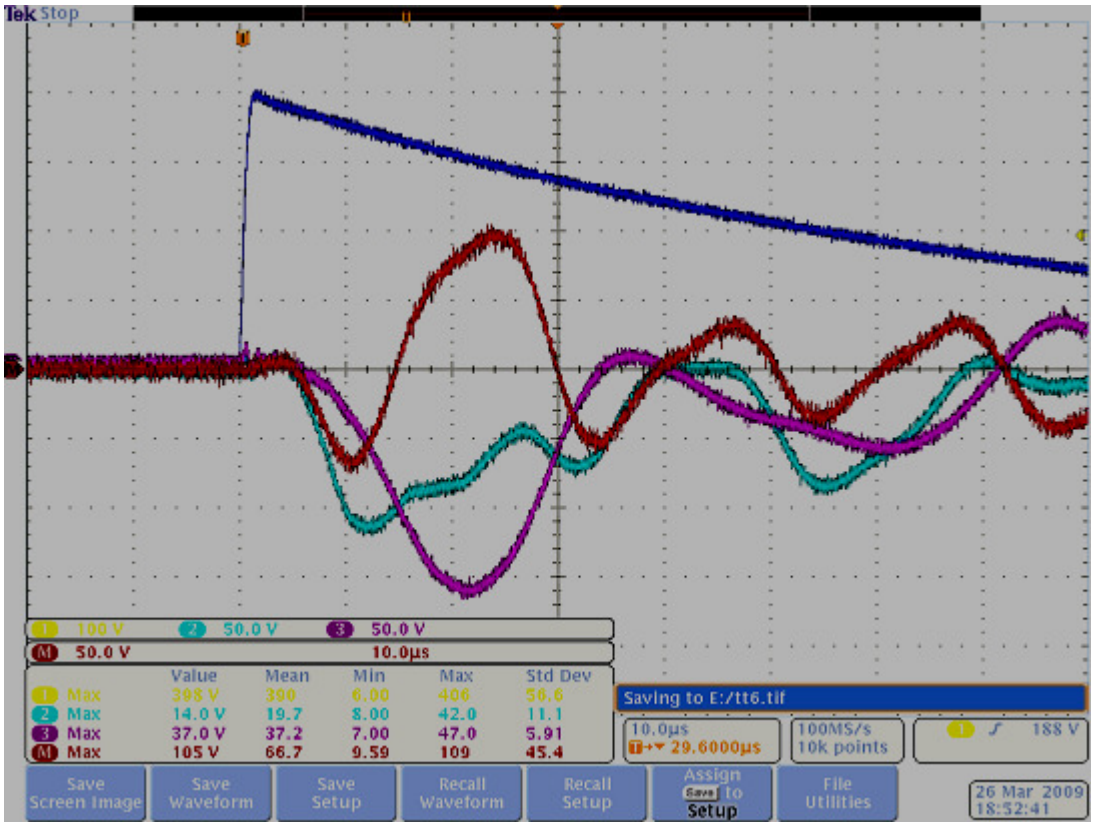
EK III Şekil 17 125 MVA Transformatör Üzerinde Poz. 1 için 3 Numaralı Ölçüm



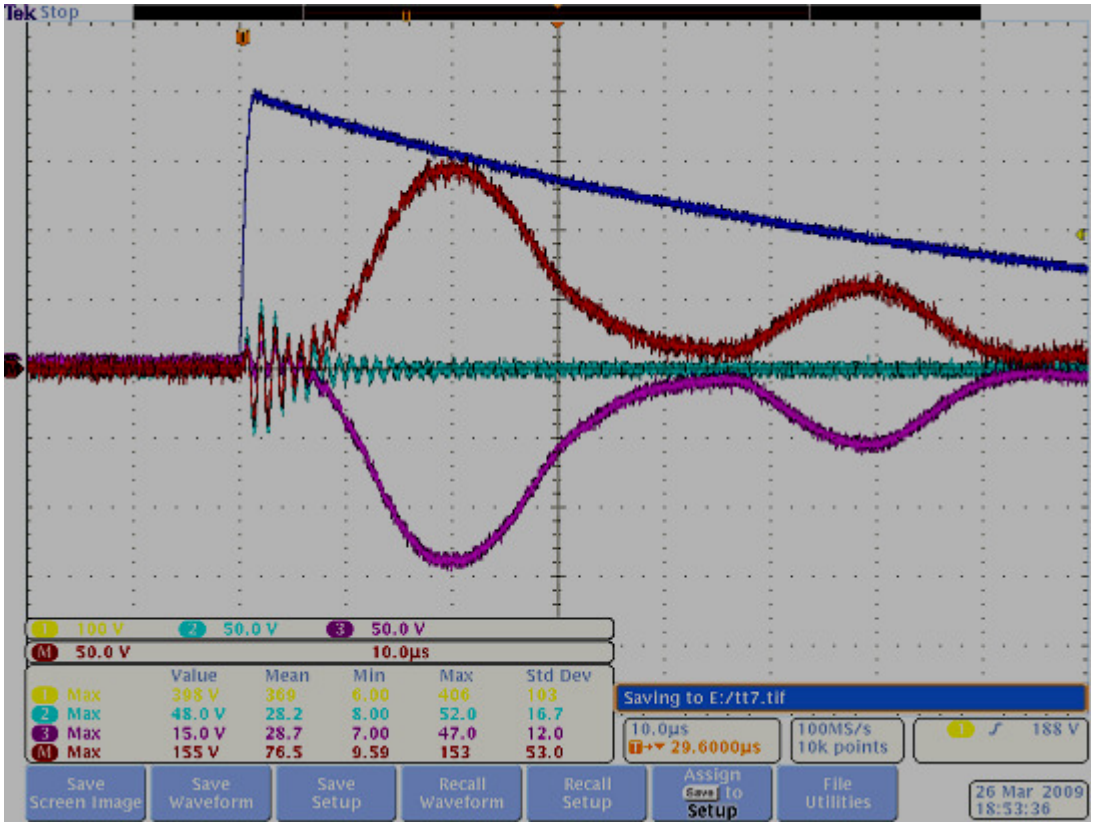
EK III Şekil 18 125 MVA Transformatör Üzerinde Poz. 1 için 4 Numaralı Ölçüm



EK III Şekil 19 125 MVA Transformatör Üzerinde Poz. 1 için 5 Numaralı Ölçüm



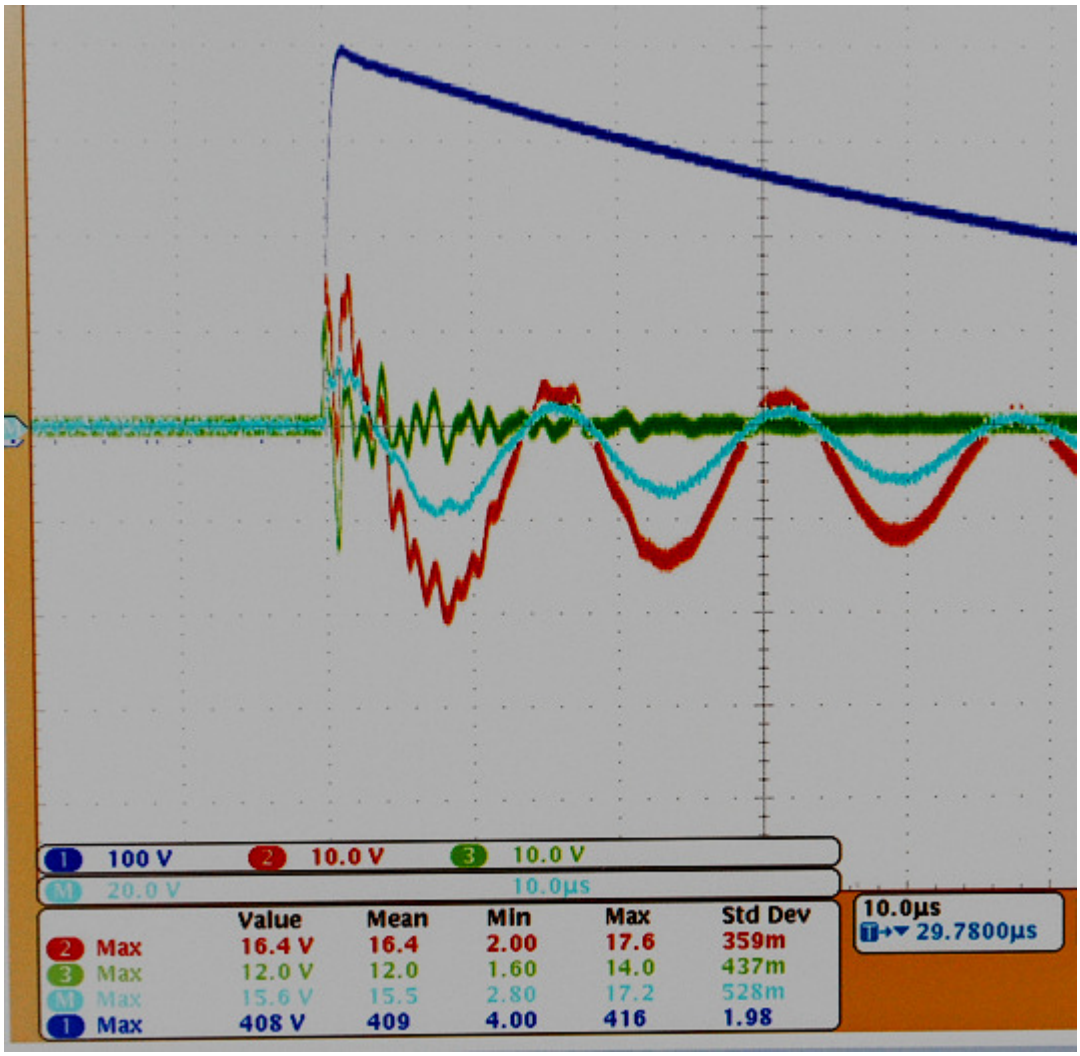
EK III Şekil 20 125 MVA Transformatör Üzerinde Poz. 1 için 6 Numaralı Ölçüm



EK III Şekil 21 125 MVA Transformatör Üzerinde Poz. 1 için 7 Numaralı Ölçüm

EK IV

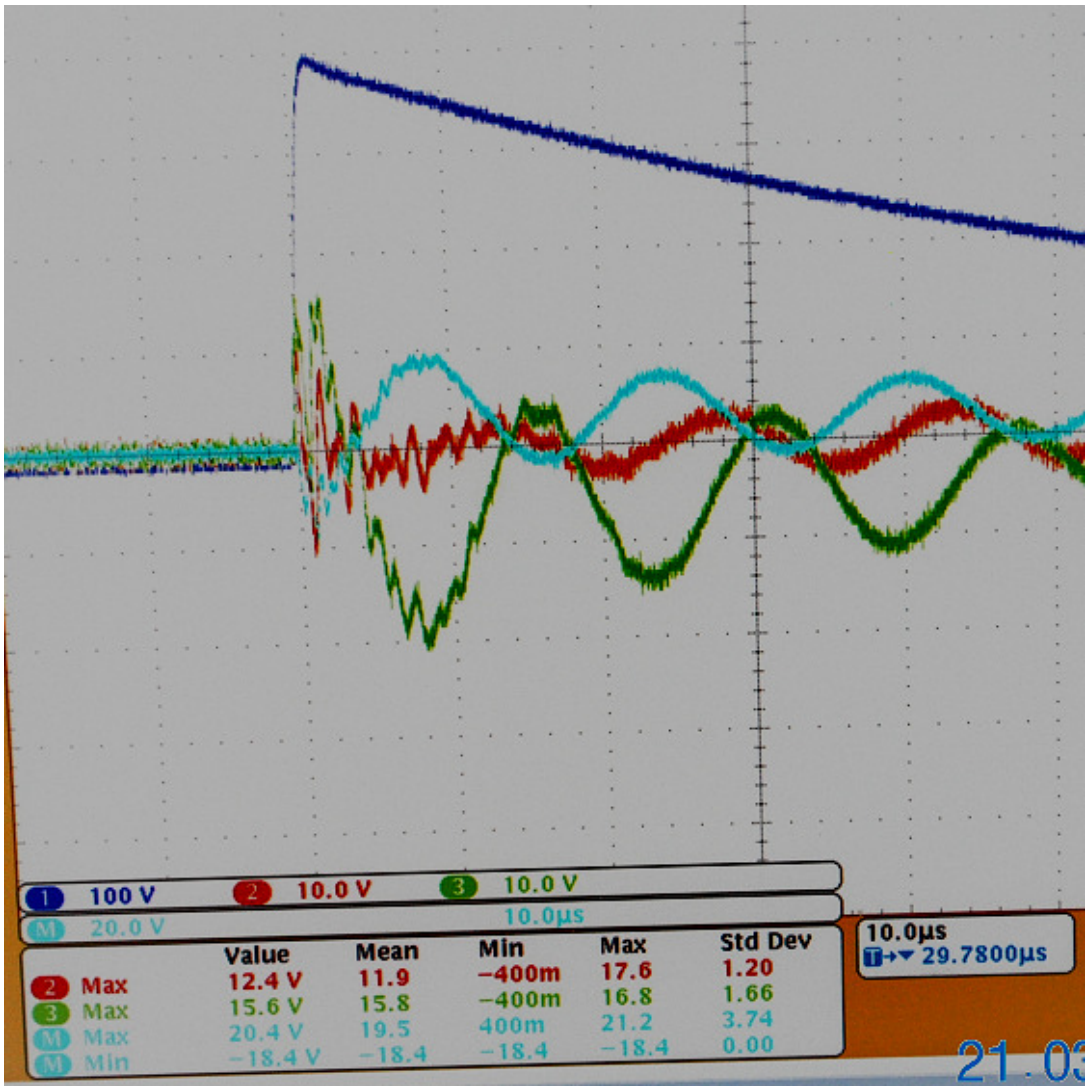
250 MVA Transformatör ve Üzerinde Yapılan Ölçümlerin Osiloskop Resimleri



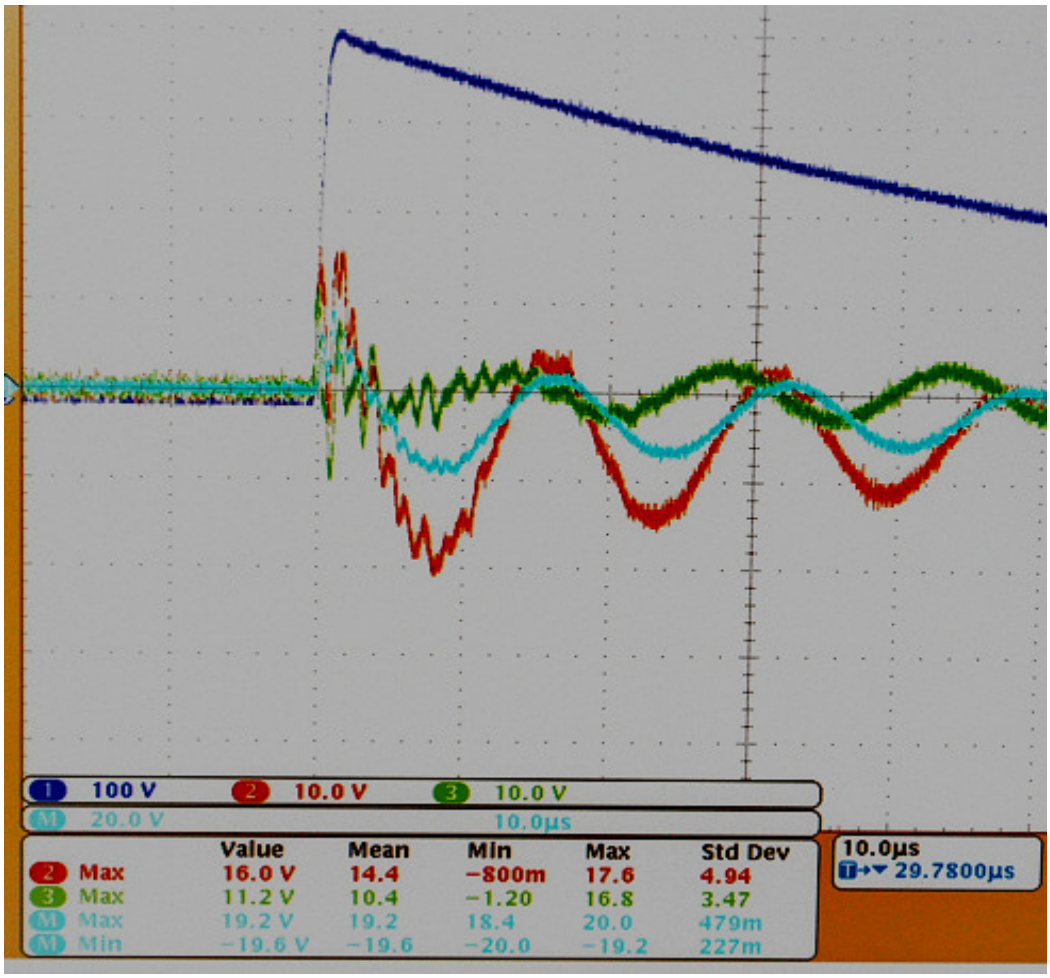
EK IV Şekil 1 250 MVA Transformatör Üzerinde YG trafından Poz. 16 için 1 Numaralı Ölçüm.

1. Kanal (Lacivert) : Darbe gerilimi uygulanan kanal
2. Kanal (Turuncu) : Kademe değiştirici üzerindeki birinci ölçüm noktası
3. Kanal (Yeşil) : Kademe değiştirici üzerindeki ikinci ölçüm noktası
M Kanalı (Turkuaz) : 2 ve 3 nolu gerilimin farkı

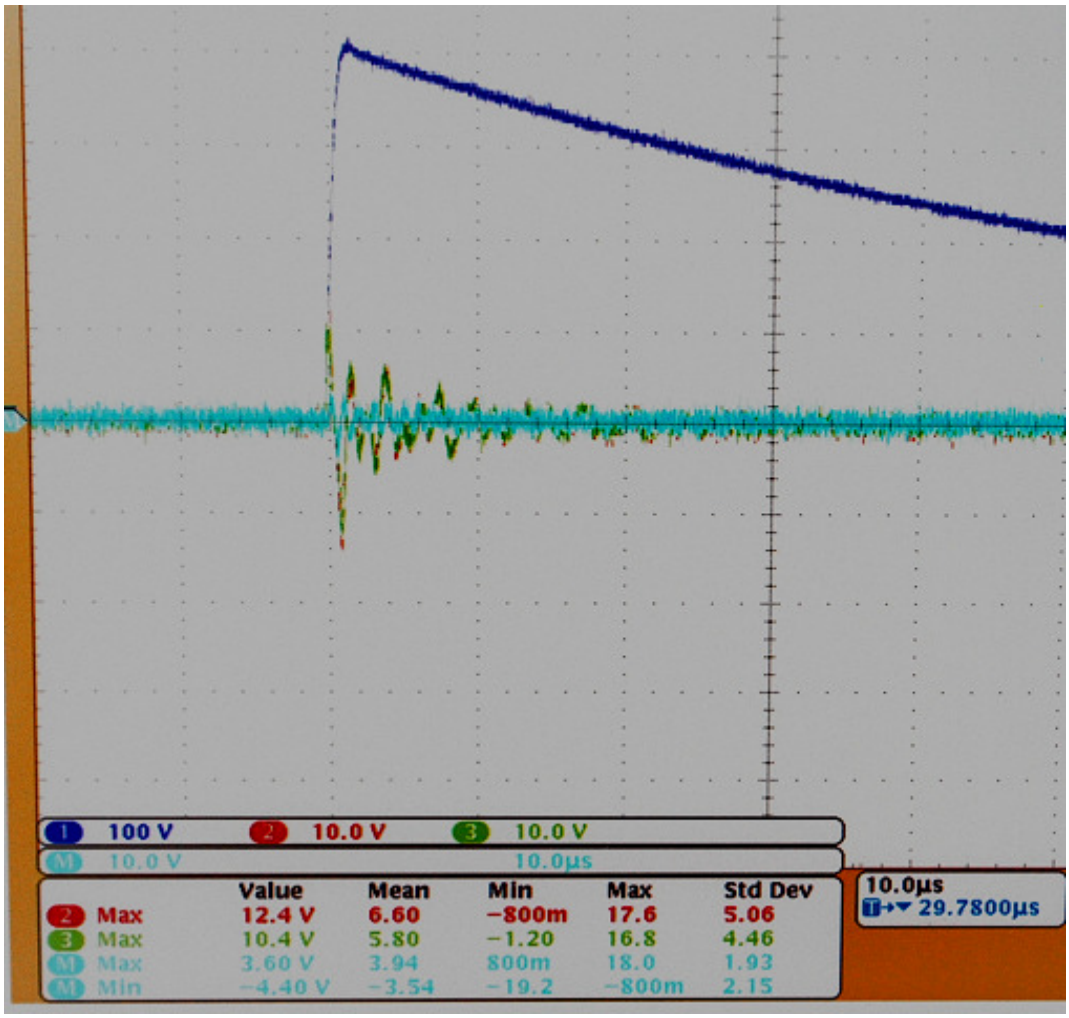
250 MVA transformatördeki ölçümde alttaki tabloda fark geriliminin hem minimum hem de maksimum değerlerine bakılmıştır.



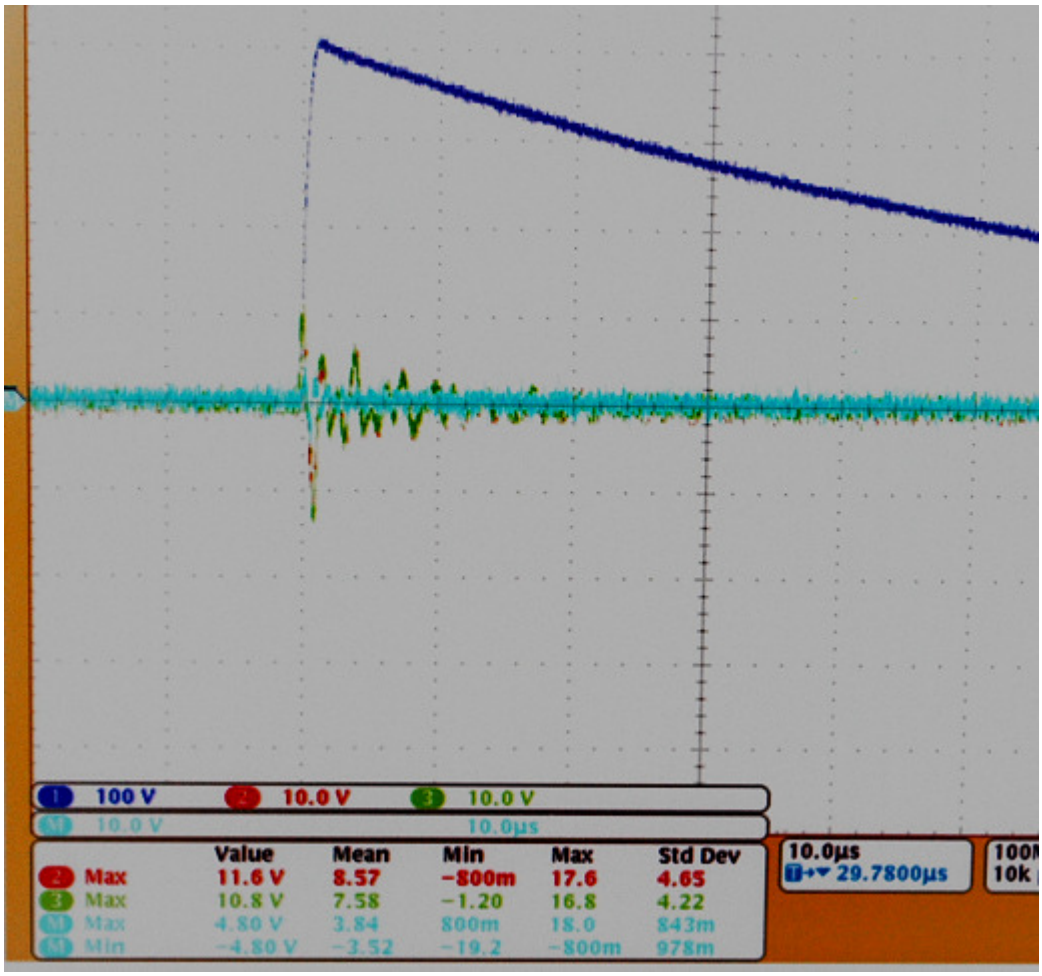
EK IV Şekil 2 250 MVA Transformatör Üzerinde YG trafından Poz. 16 için 2 Numaralı Ölçüm.



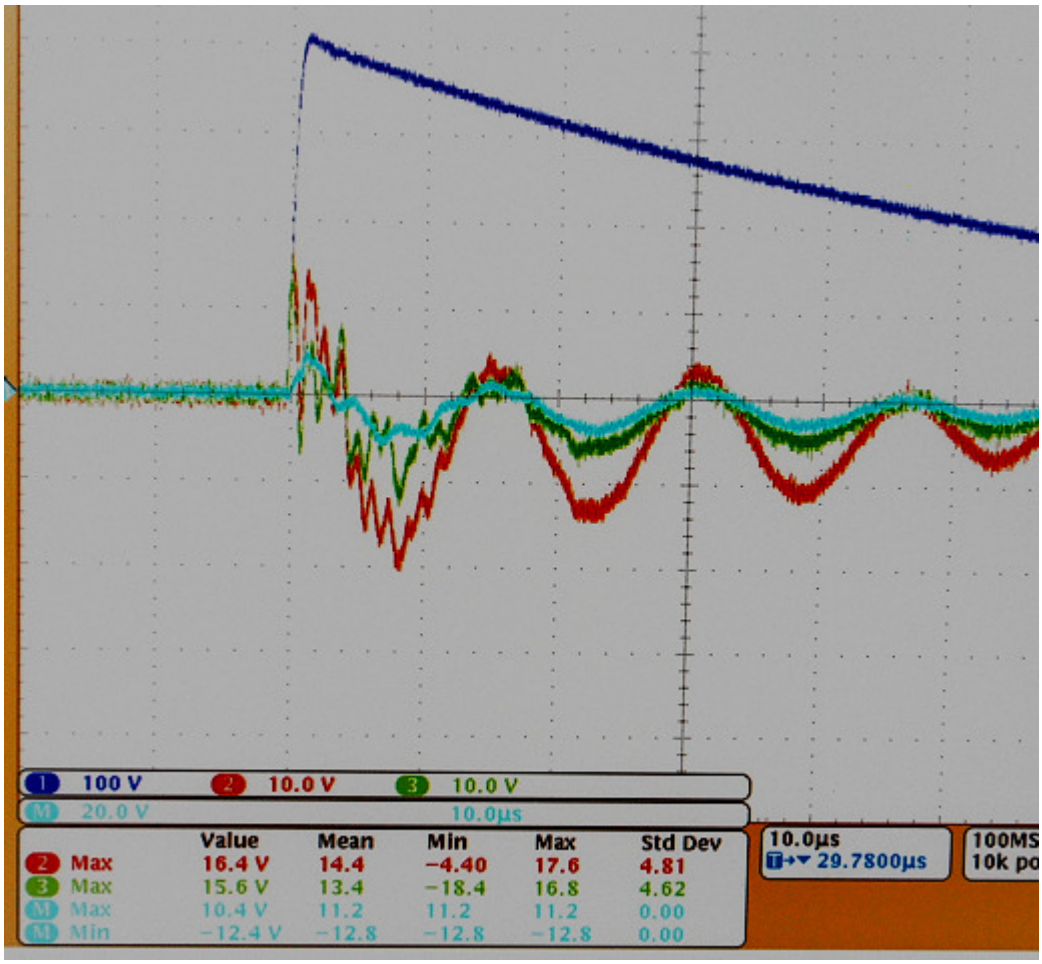
EK IV Şekil 3 250 MVA Transformatör Üzerinde YG trafından Poz. 16 için 3 Numaralı Ölçüm.



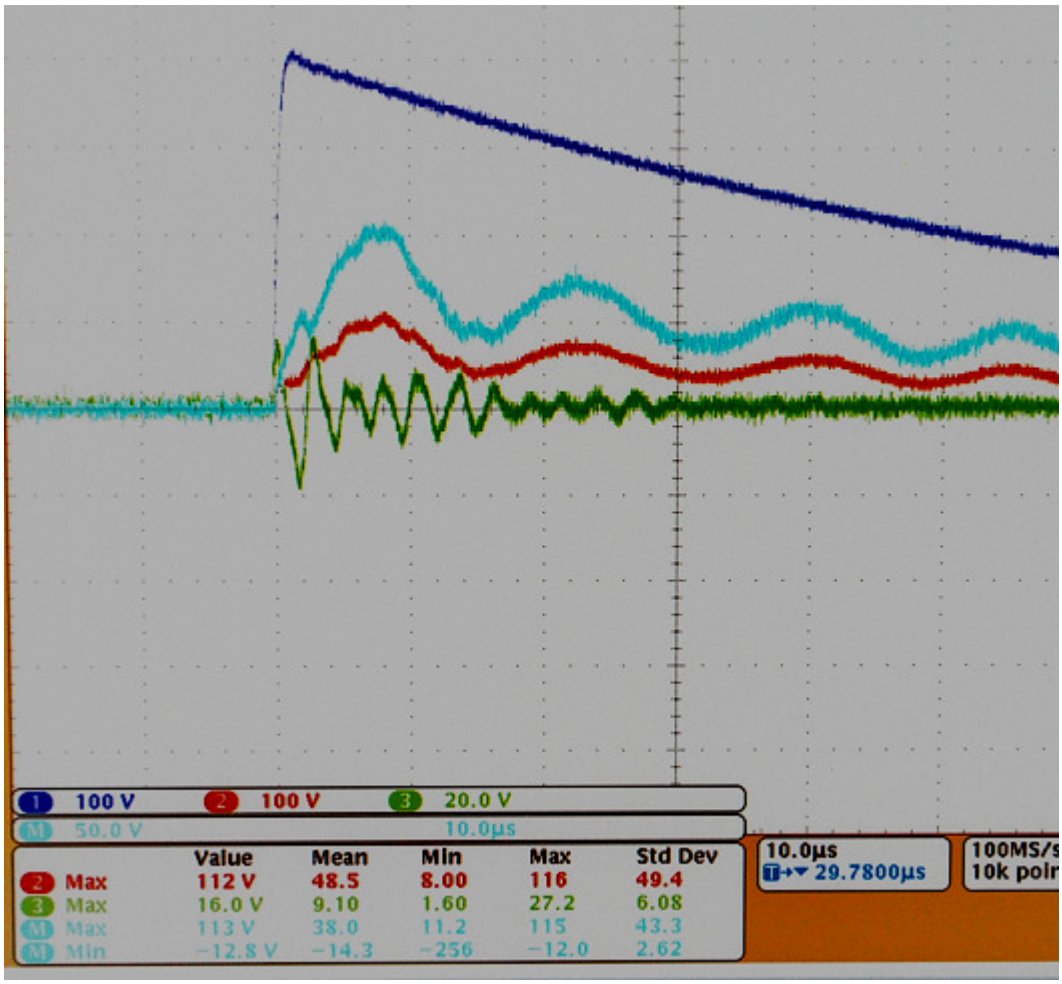
EK IV Şekil 4 250 MVA Transformatör Üzerinde YG trafından Poz. 16 için 4 Numaralı Ölçüm.



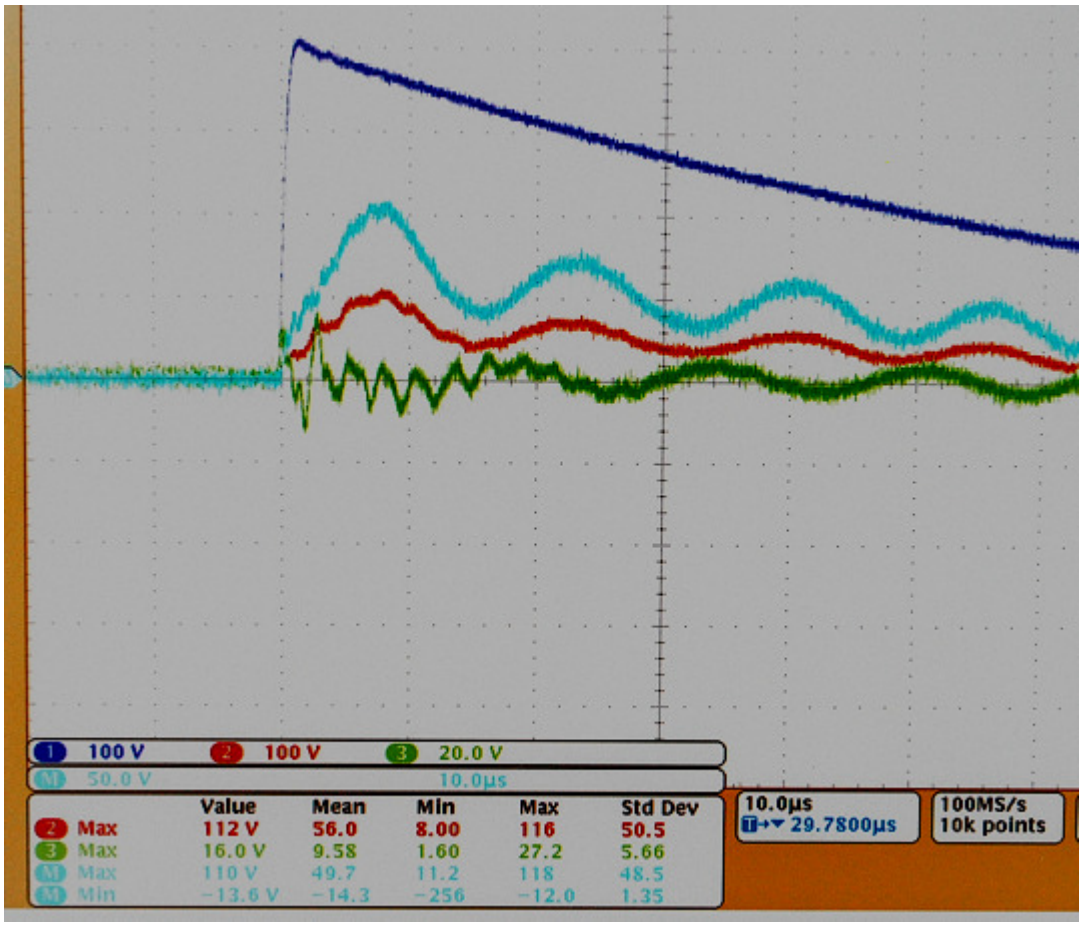
EK IV Şekil 5 250 MVA Transformatör Üzerinde YG trafından Poz. 16 için 5 Numaralı Ölçüm.



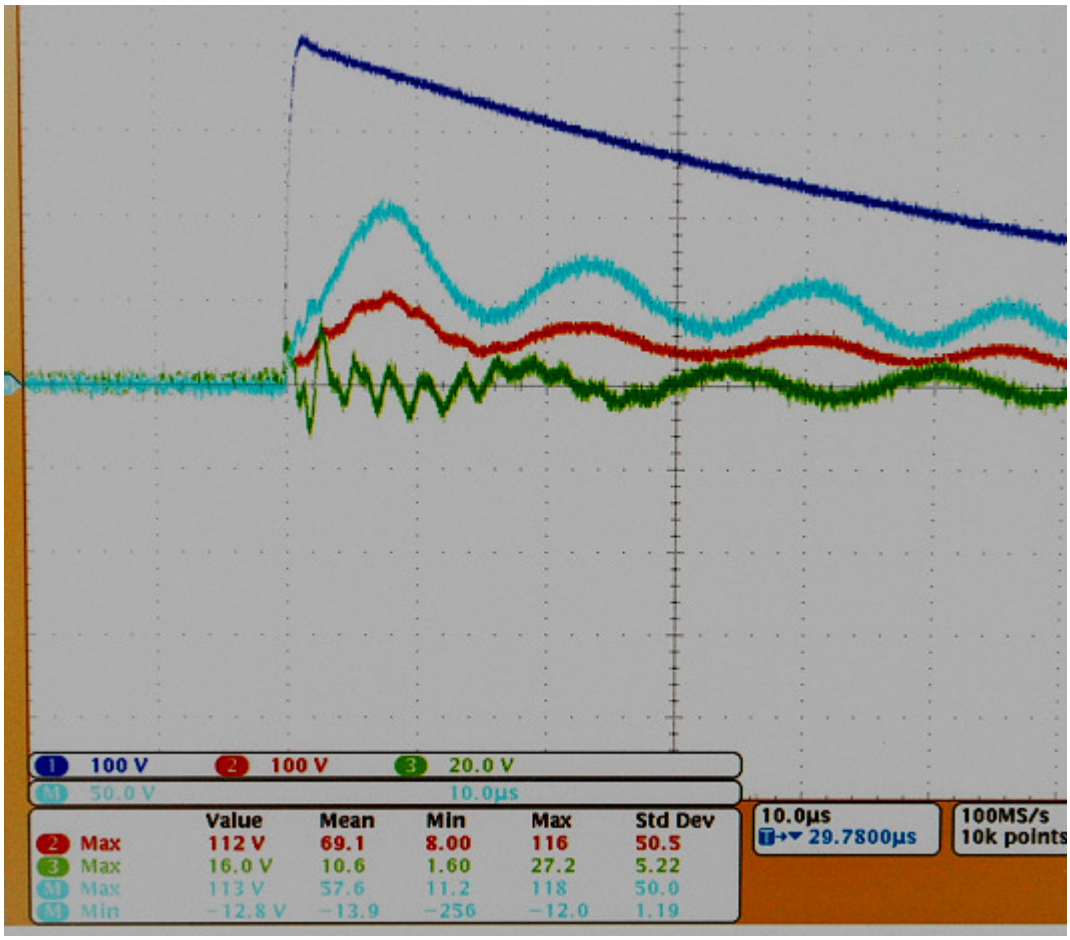
EK IV Şekil 6 250 MVA Transformatör Üzerinde YG trafından Poz. 16 için 6 Numaralı Ölçüm.



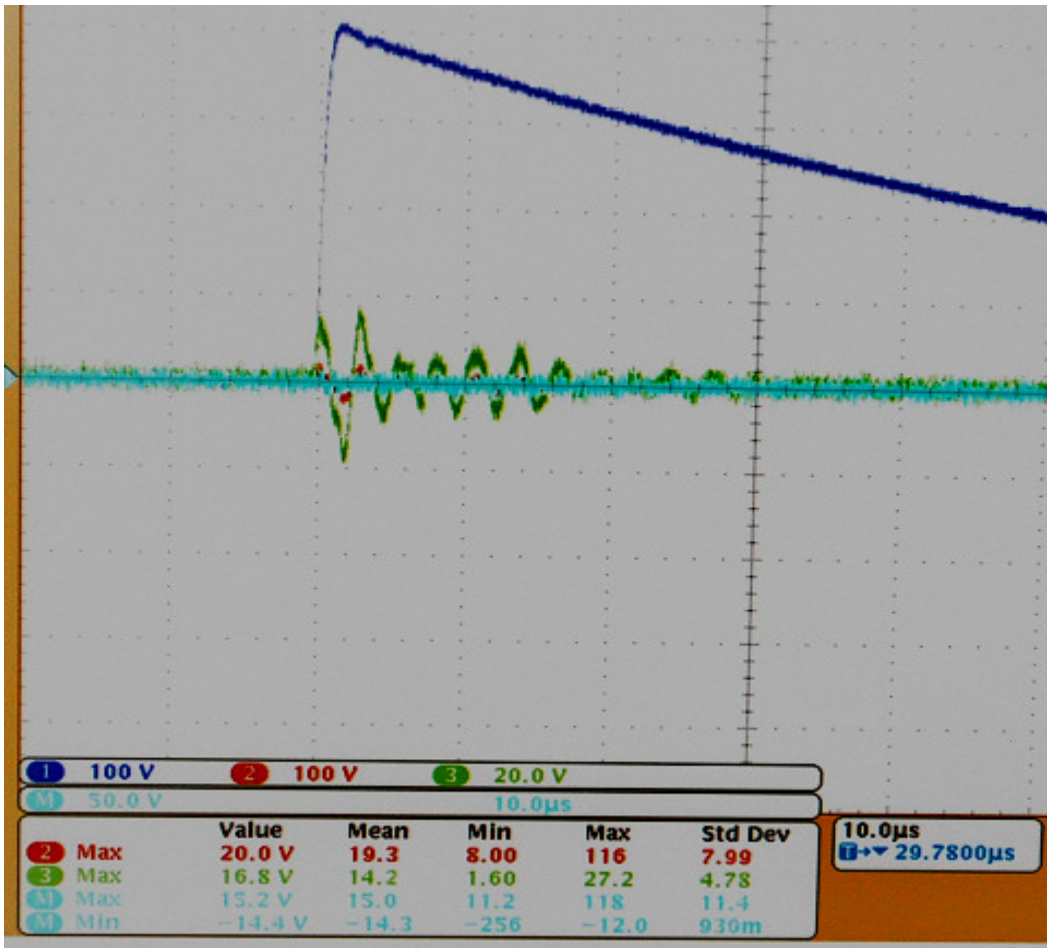
EK IV Şekil 7 250 MVA Transformatör Üzerinde AG trafından Poz. 16 için 1 Numaralı Ölçüm.



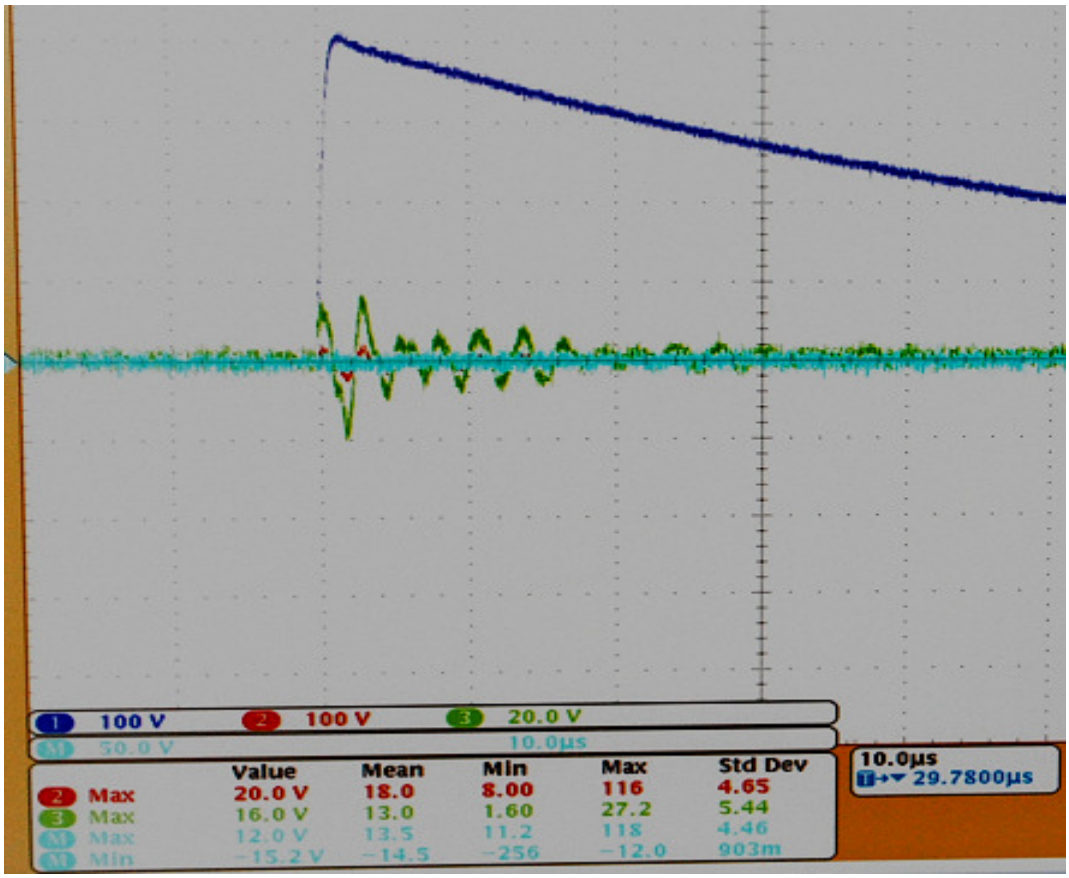
EK IV Şekil 8 250 MVA Transformatör Üzerinde AG trafından Poz. 16 için 2 Numaralı Ölçüm.



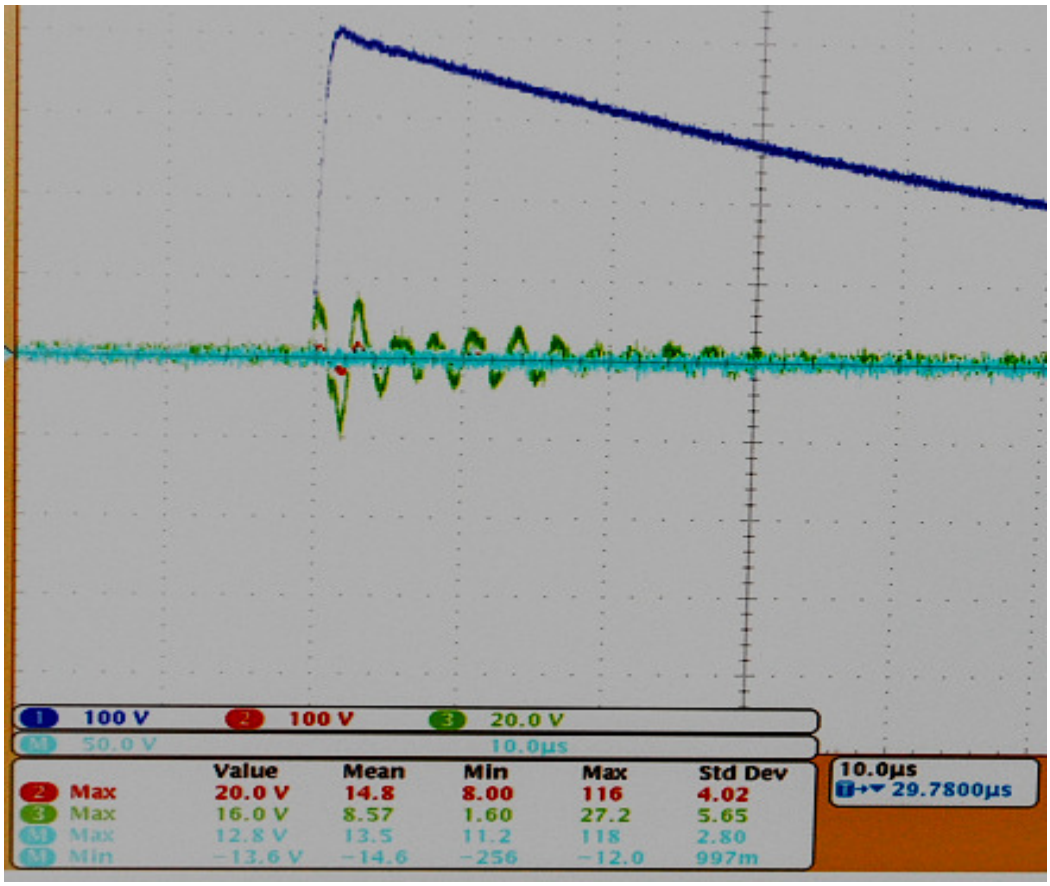
EK IV Şekil 9 250 MVA Transformatör Üzerinde AG trafından Poz. 16 için 3 Numaralı Ölçüm.



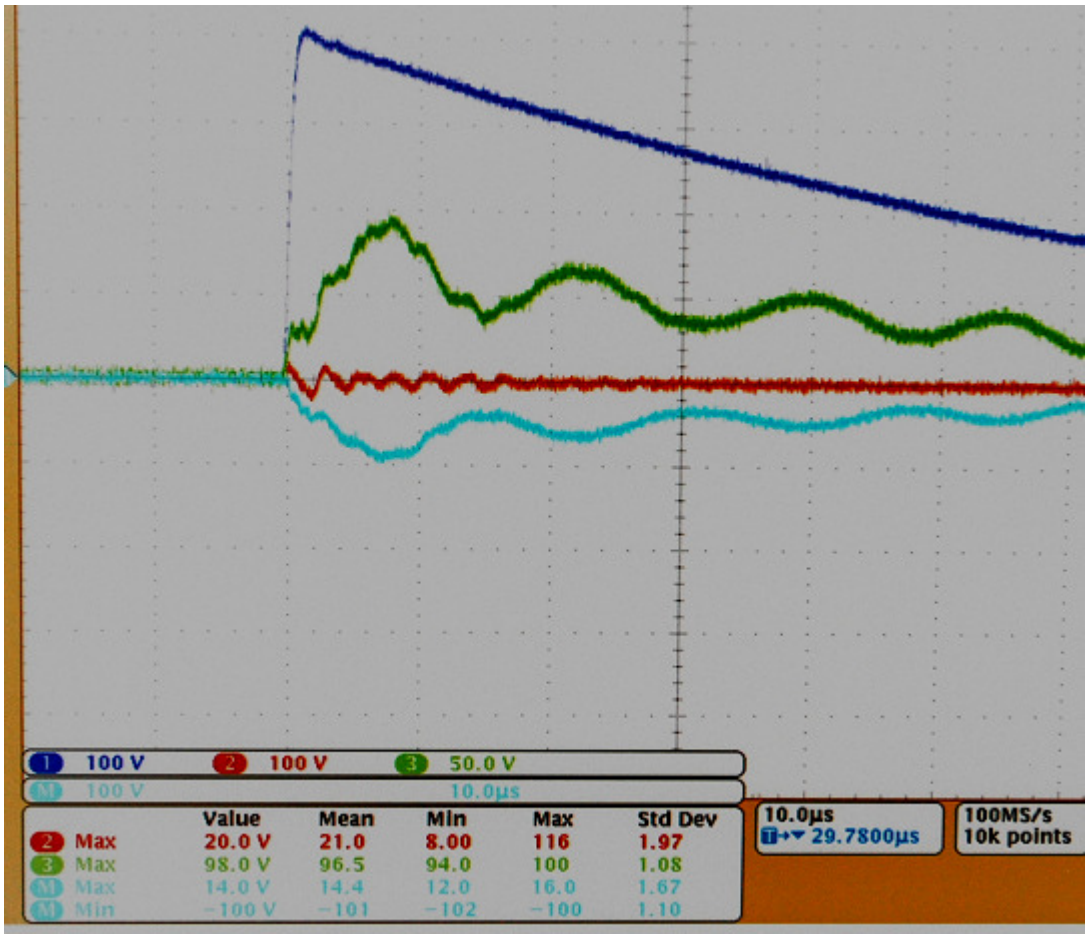
EK IV Şekil 10 250 MVA Transformatör Üzerinde AG trafından Poz. 16 için 4 Numaralı Ölçüm.



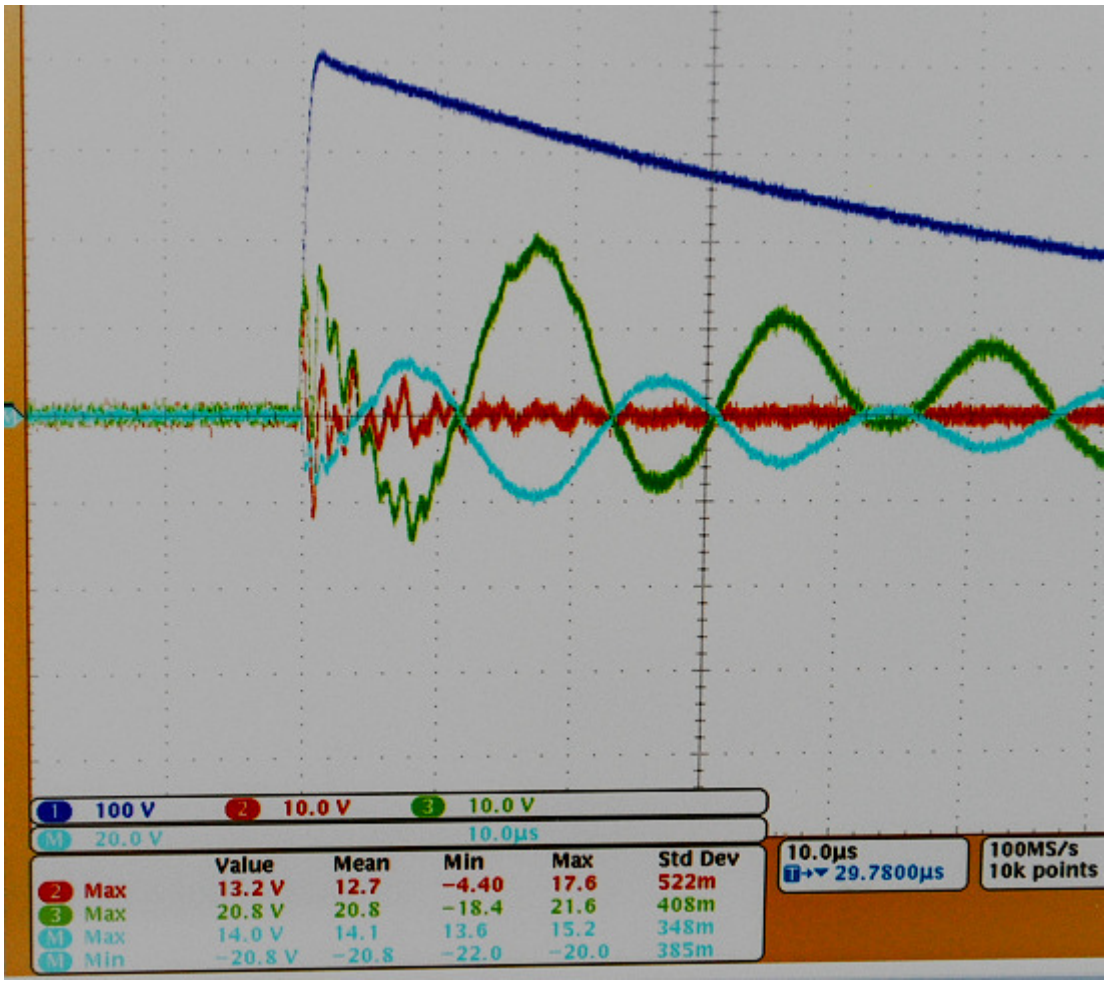
EK IV Şekil 11 250 MVA Transformatör Üzerinde AG trafından Poz. 16 için 5 Numaralı Ölçüm.



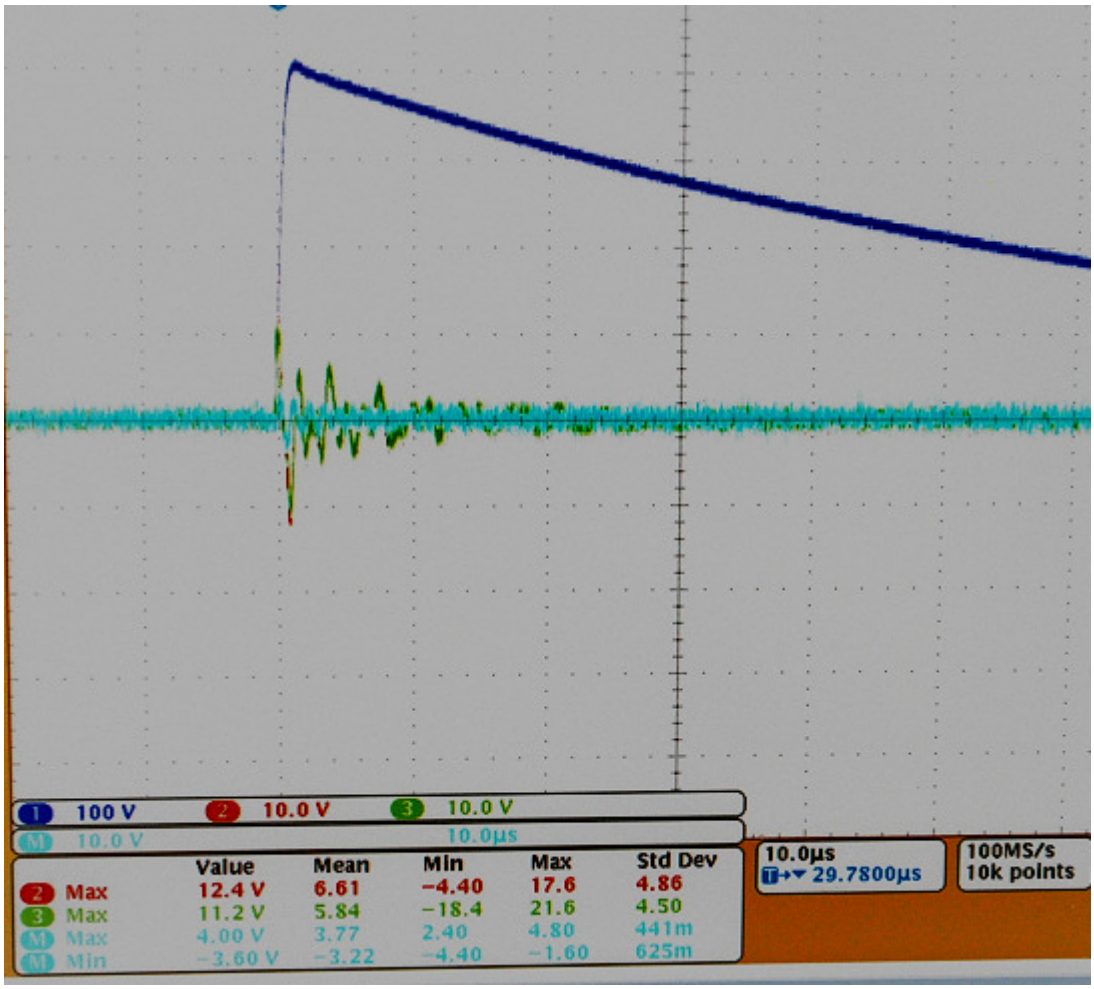
EK IV Şekil 12 250 MVA Transformatör Üzerinde AG trafından Poz. 16 için 6 Numaralı Ölçüm.



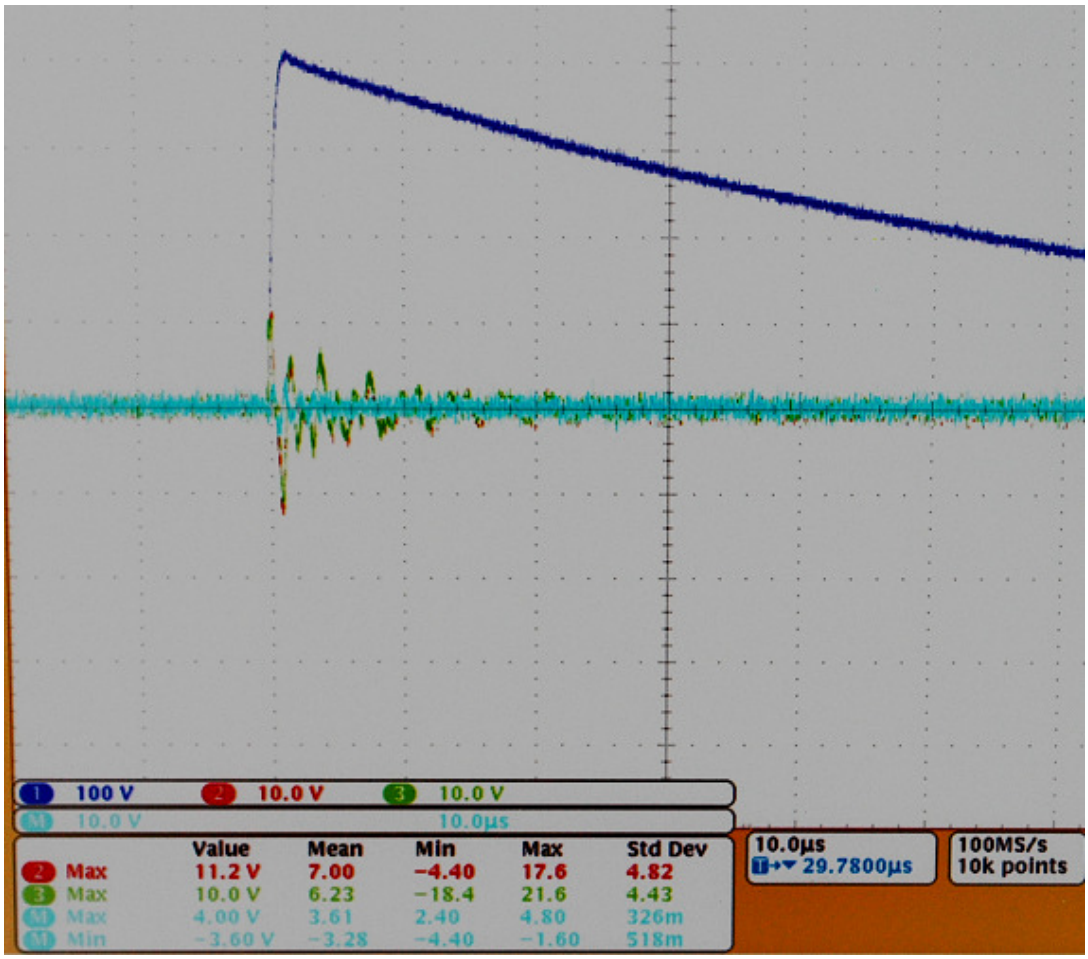
EK IV Şekil 13 250 MVA Transformatör Üzerinde AG trafından Poz. 16 için 7 Numaralı Ölçüm.



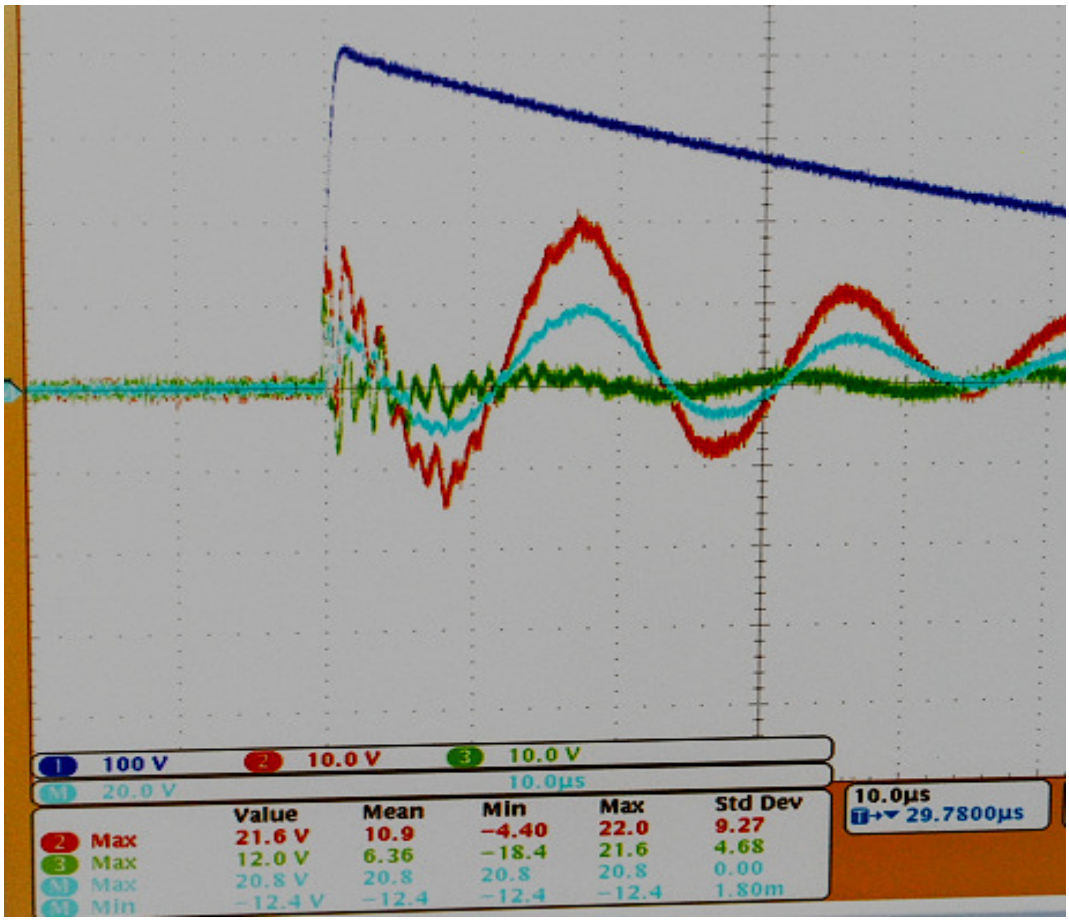
EK IV Şekil 14 250 MVA Transformatör Üzerinde YG trafından Poz. 8 için 1 Numaralı Ölçüm.



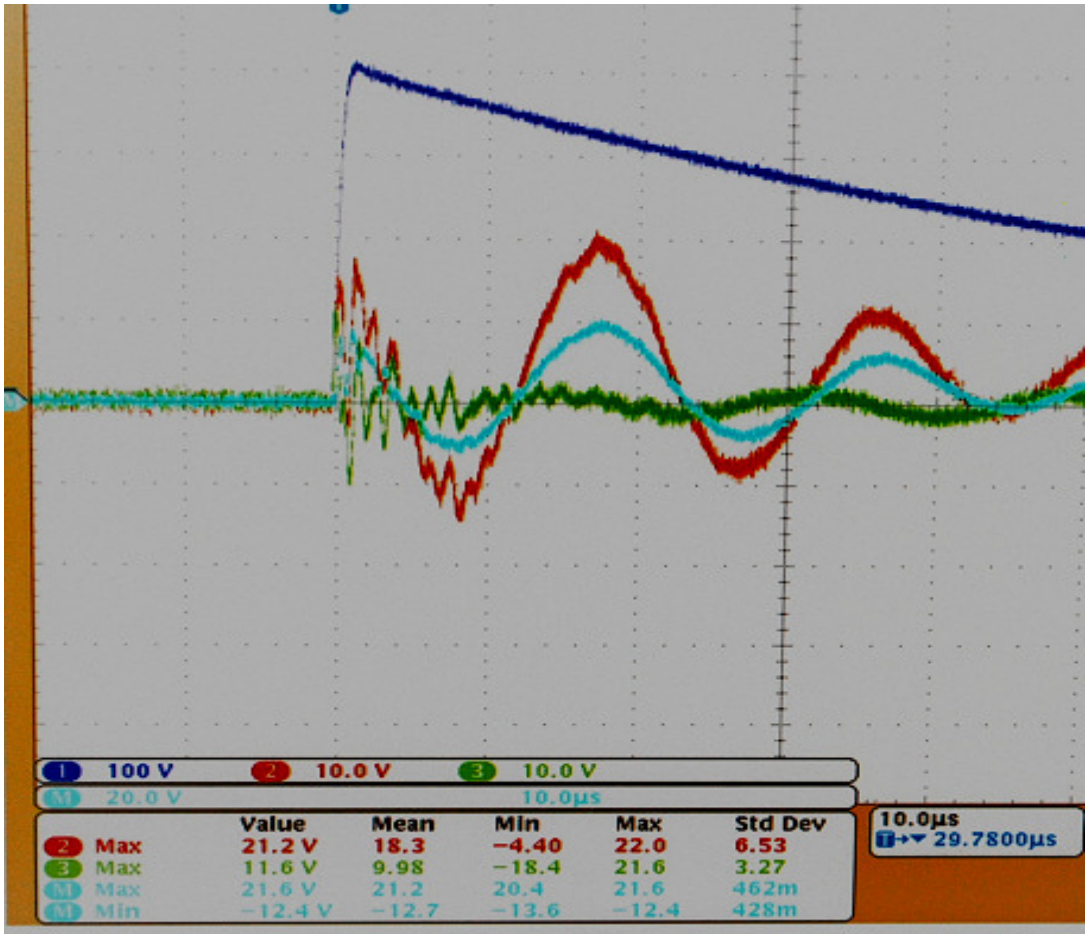
EK IV Şekil 15 250 MVA Transformatör Üzerinde YG trafından Poz. 8 için 2 Numaralı Ölçüm.



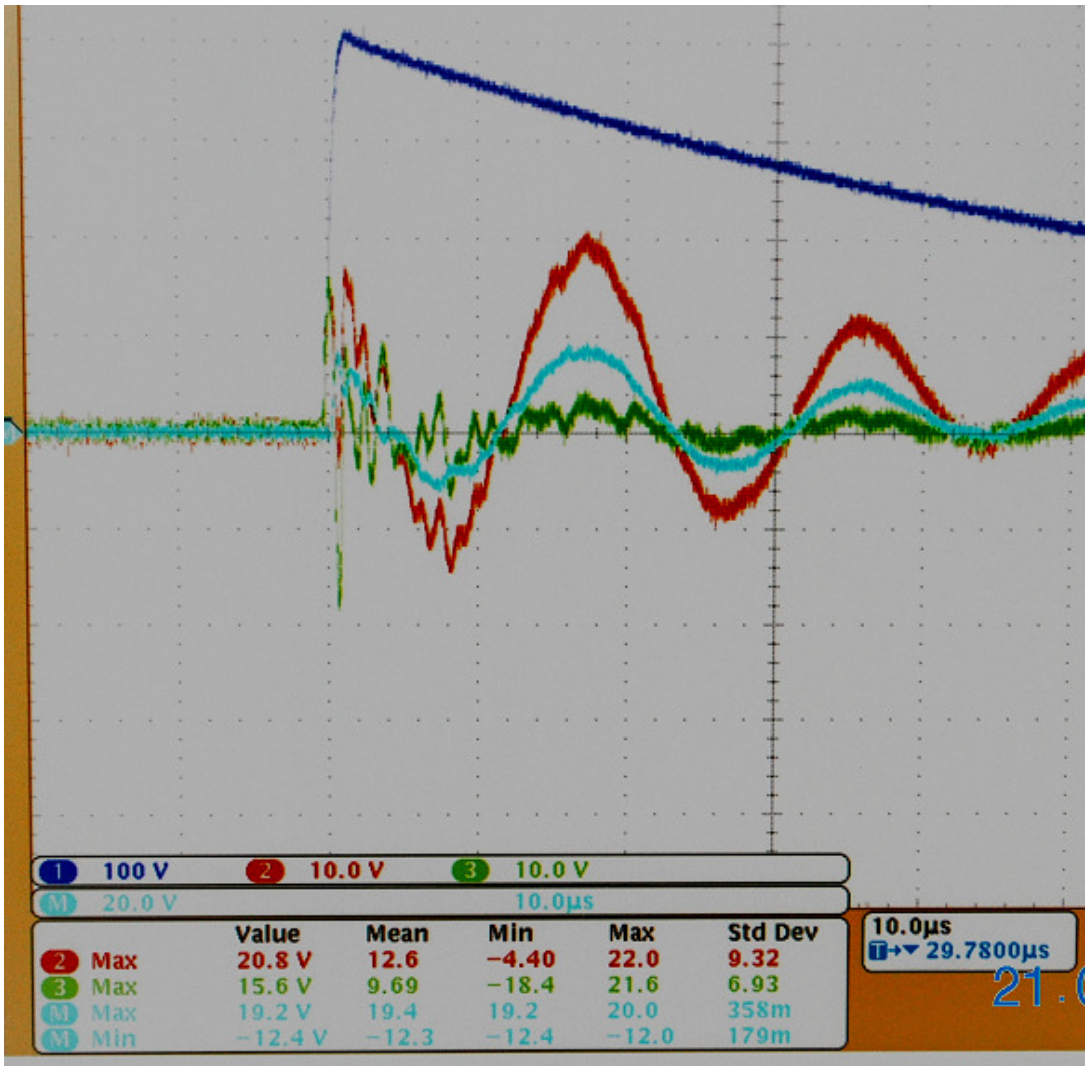
EK IV Şekil 16 250 MVA Transformatör Üzerinde YG trafından Poz. 8 için 3 Numaralı Ölçüm.



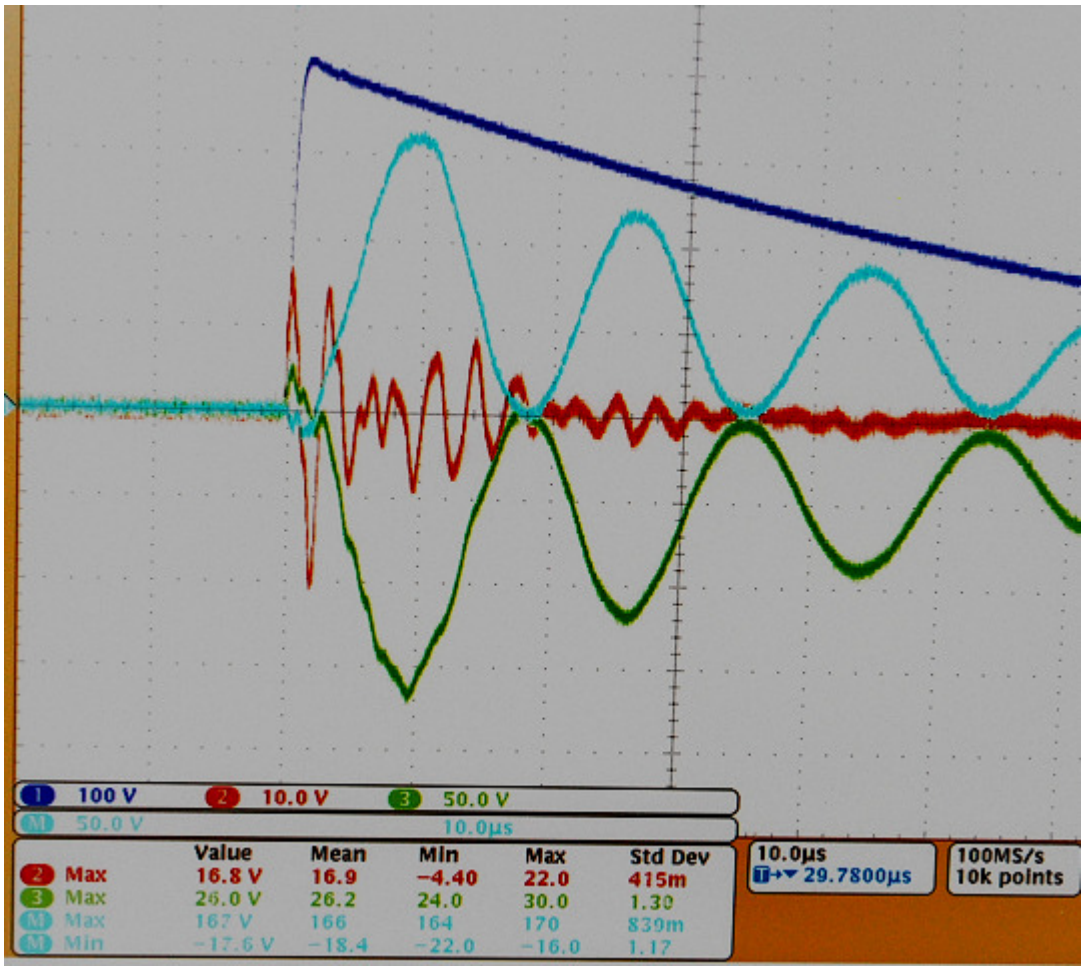
EK IV Şekil 17 250 MVA Transformatör Üzerinde YG trafından Poz. 8 için 4 Numaralı Ölçüm.



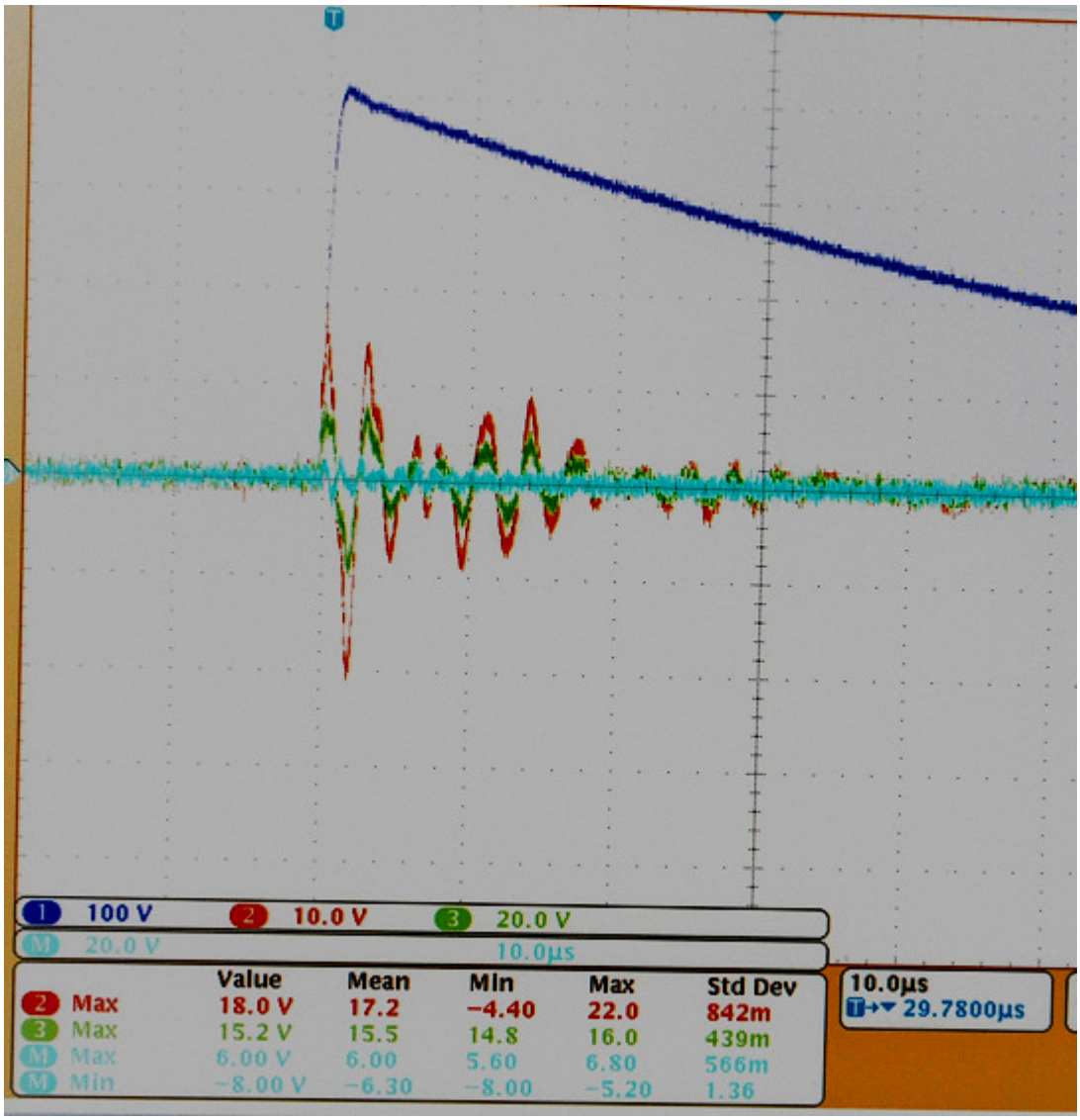
EK IV Şekil 18 250 MVA Transformatör Üzerinde YG trafından Poz. 8 için 5 Numaralı Ölçüm.



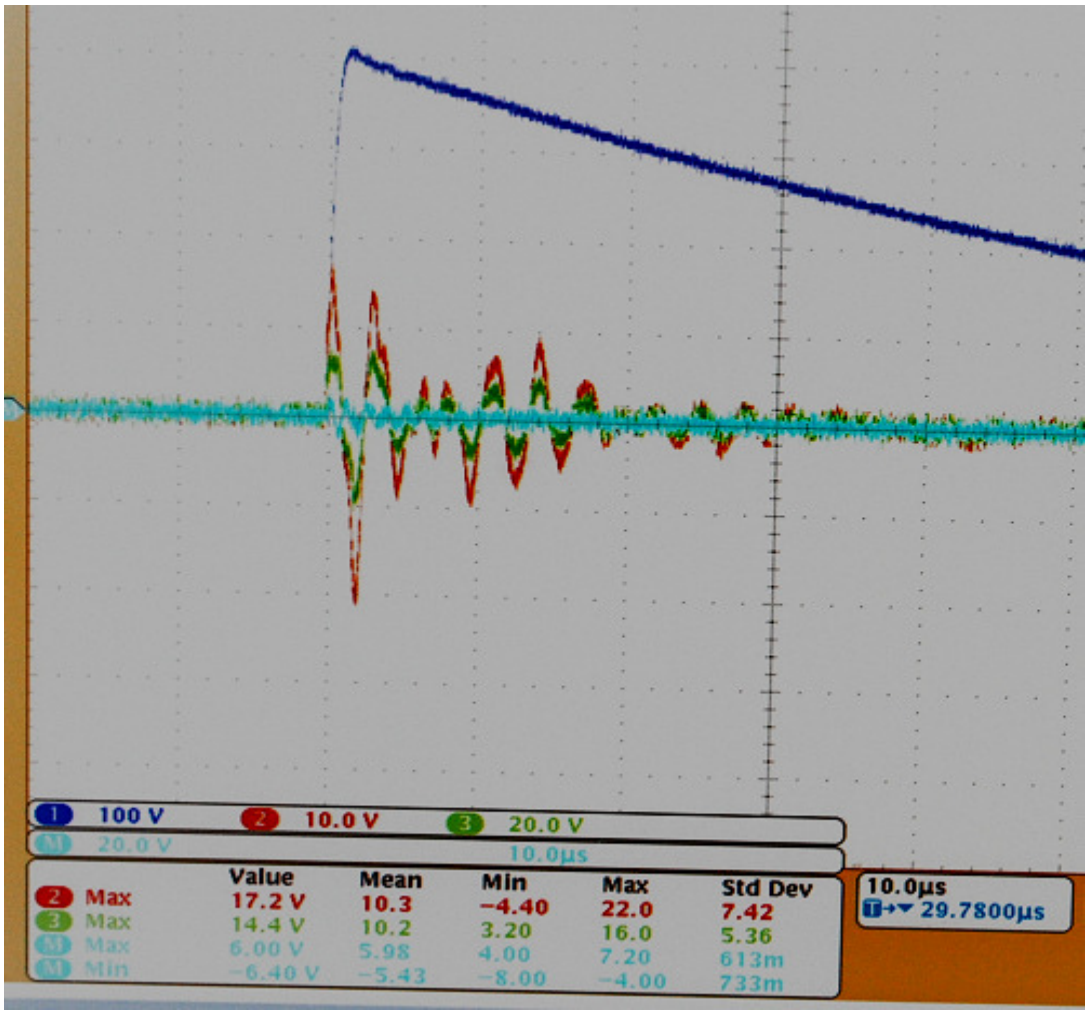
EK IV Şekil 19 250 MVA Transformatör Üzerinde YG trafından Poz. 8 için 6 Numaralı Ölçüm.



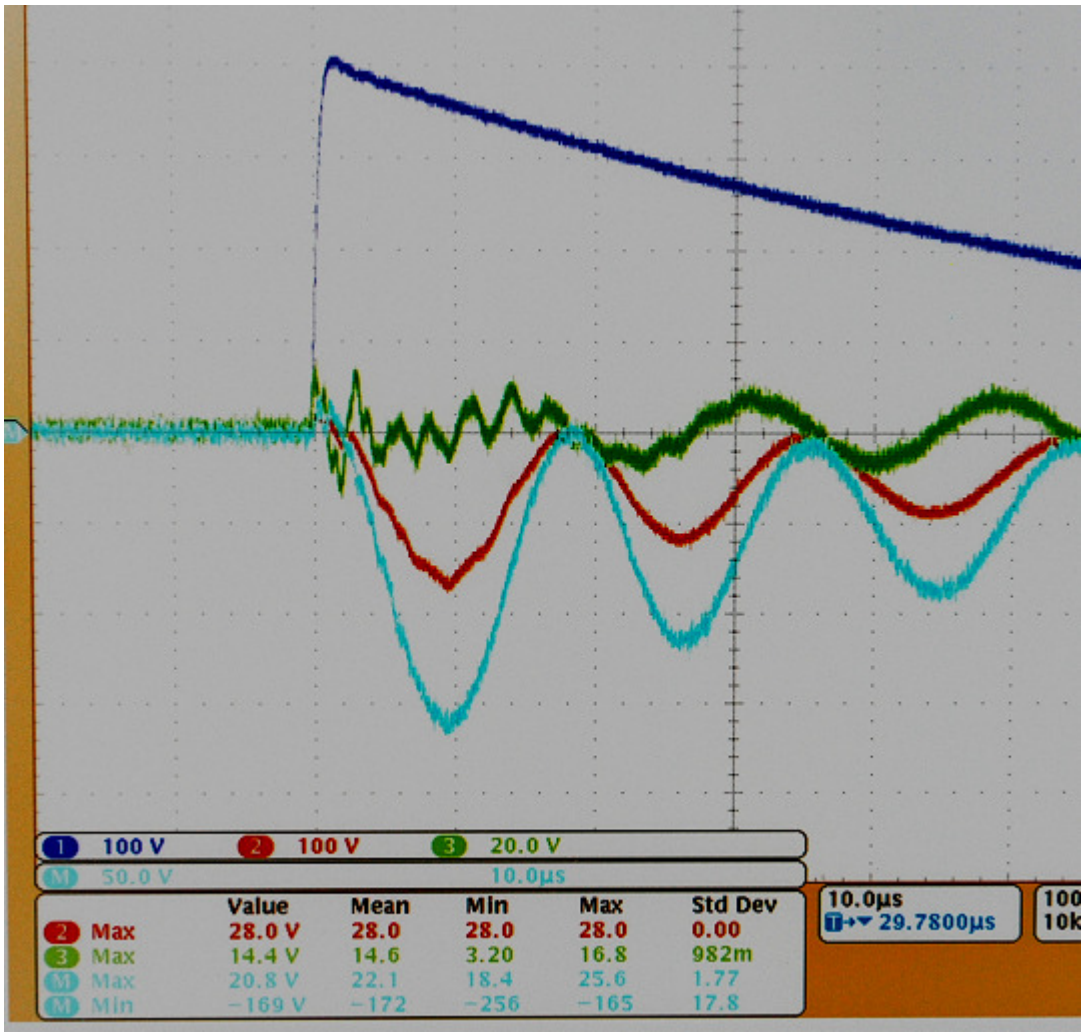
EK IV Şekil 20 250 MVA Transformatör Üzerinde AG trafından Poz. 8 için 1 Numaralı Ölçüm.



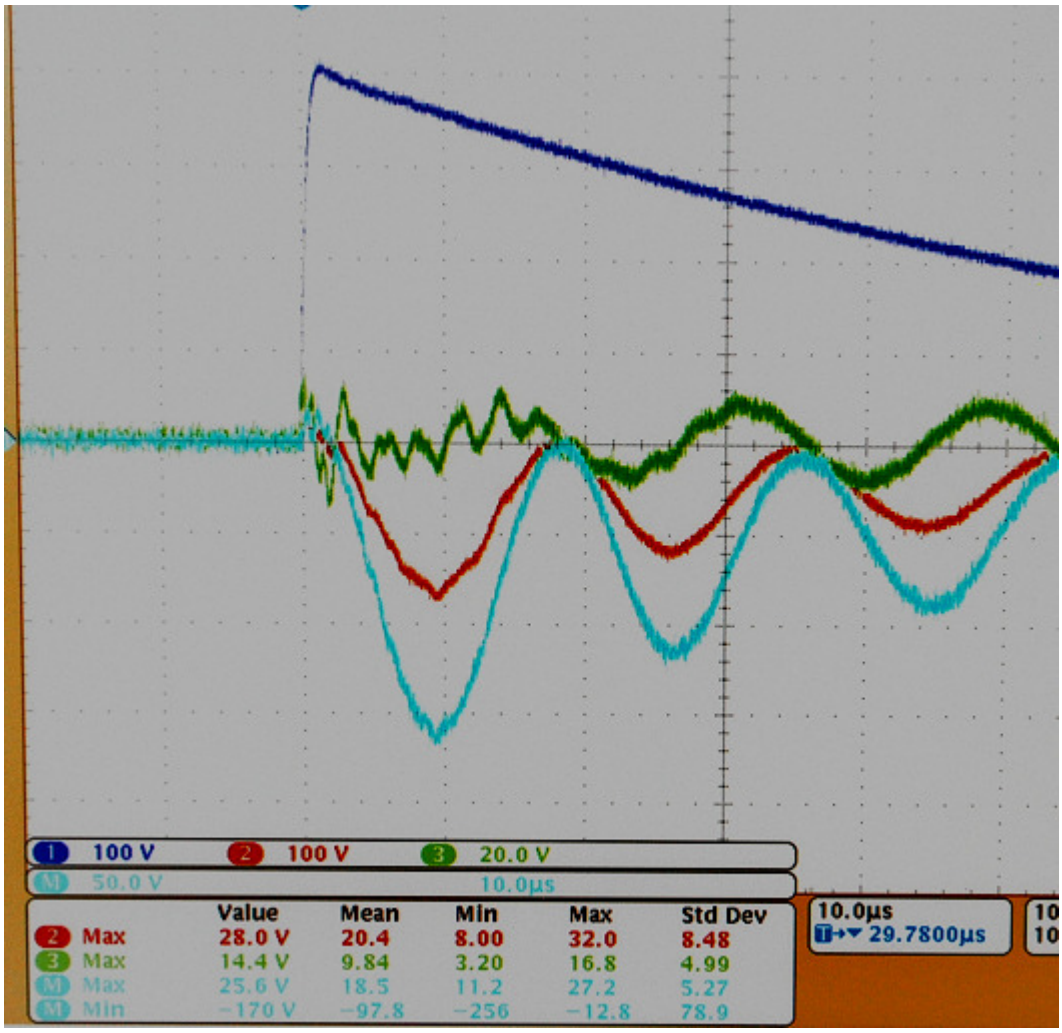
EK IV Şekil 21 250 MVA Transformatör Üzerinde AG trafından Poz. 8 için 2 Numaralı Ölçüm.



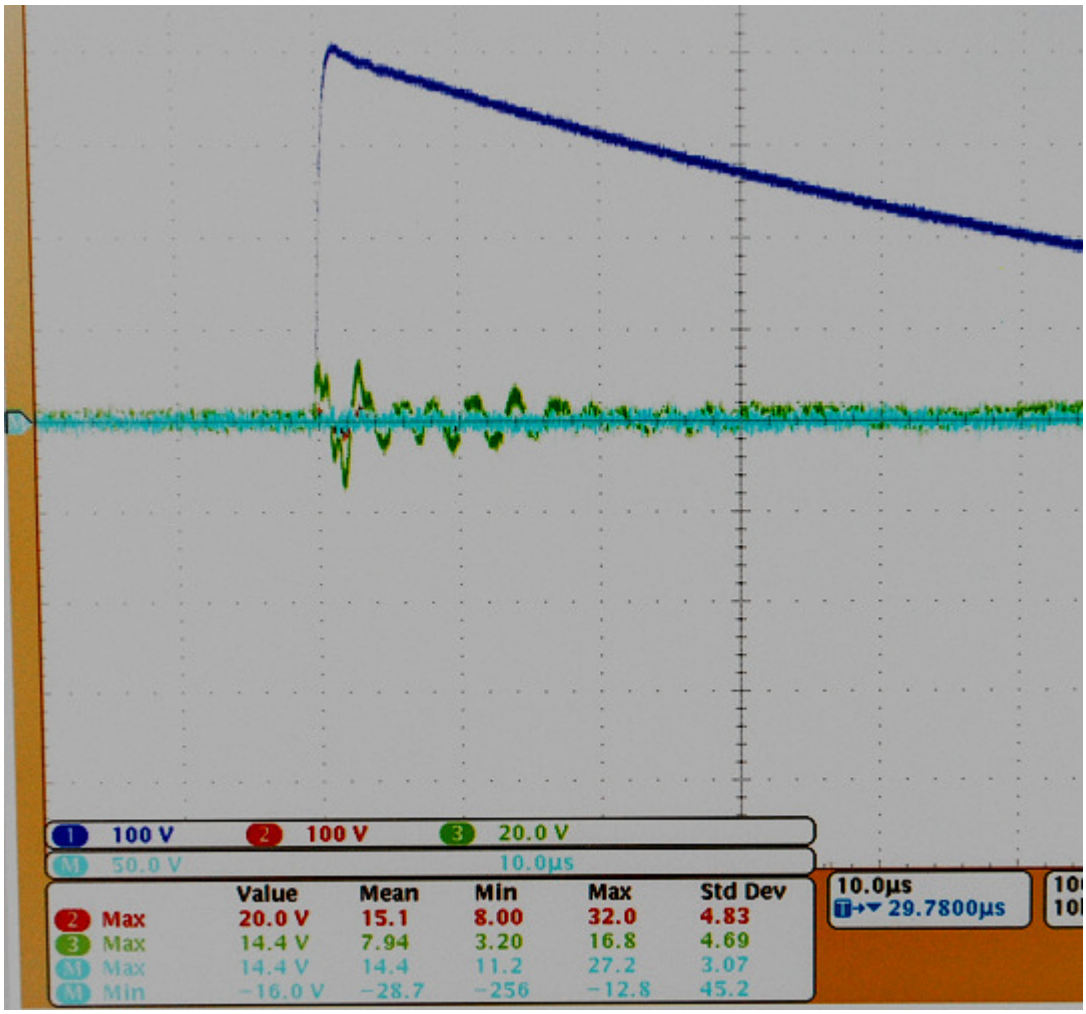
EK IV Şekil 22 250 MVA Transformatör Üzerinde AG trafından Poz. 8 için 3 Numaralı Ölçüm.



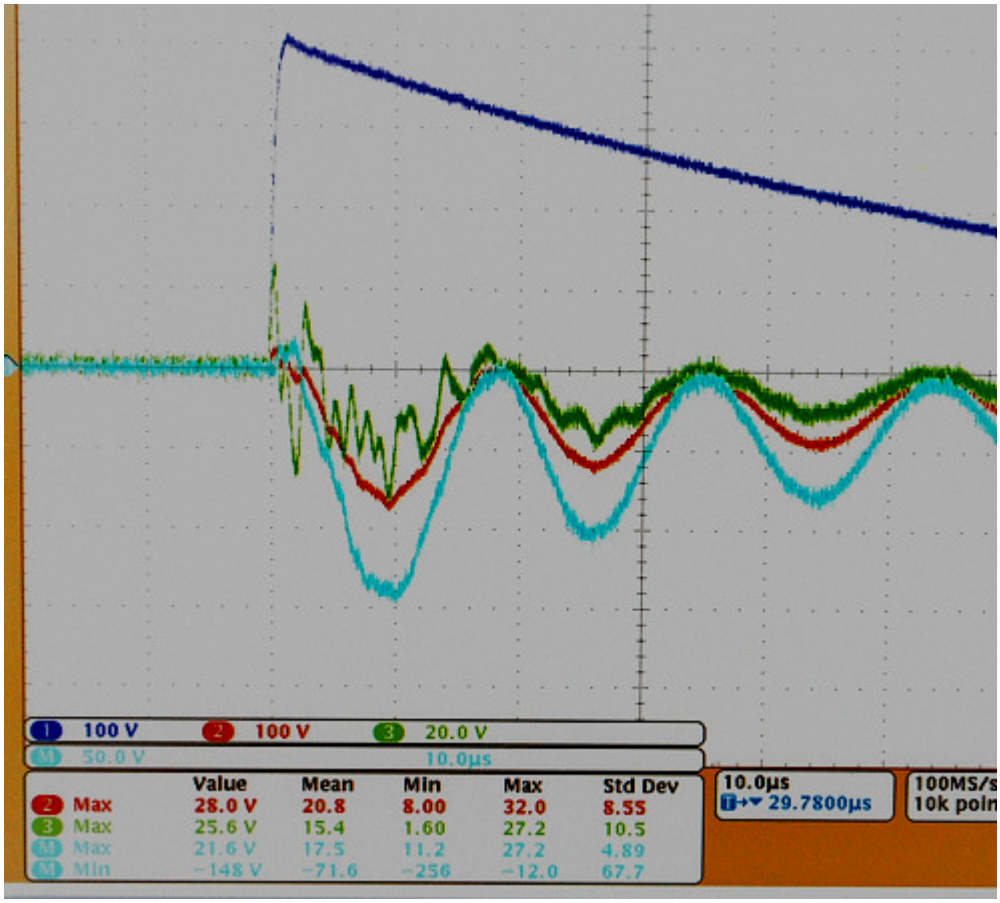
EK IV Şekil 23 250 MVA Transformatör Üzerinde AG trafından Poz. 8 için 4 Numaralı Ölçüm.



EK IV Şekil 24 250 MVA Transformatör Üzerinde AG trafından Poz. 8 için 5 Numaralı Ölçüm.



EK IV Şekil 25 250 MVA Transformatör Üzerinde AG trafından Poz. 8 için 6 Numaralı Ölçüm.



EK IV Şekil 26 250 MVA Transformatör Üzerinde AG trafından Poz. 8 için 7 Numaralı Ölçüm.

ÖZGEÇMİŞ

Adı	: RAGIP	
Soyadı	: TÜRKAN	
Doğum Tarihi	: 26.07.1974	
Doğum Yeri	: ÜRGÜP / NEVŞEHİR	
İlkokul	: 1980-1984	Erenköy Zihnipaşa İlköğretim Okulu
Lise	: 1985-1992	H.Avni Sözen Anadolu Lisesi
Lisans	: 1992-1993	İstanbul Teknik Üniversitesi Yabancı Diller Bölümü, İngilizce Hazırlık Programı
	1993-1998	İstanbul Teknik Üniversitesi Elektrik-Elektronik Fakültesi Elektrik Mühendisliği Bölümü
Yüksek Lisans	: 2006-2009	Marmara Üniversitesi Fen Bilimleri Enstitüsü Elektrik Eğitimi Bölümü