

**YILDIZ TEKNİK ÜNİVERSİTESİ
FENBİLİMLERİ ENSTİTÜSÜ**

**GÜÇ TRANSFORMATÖRLERİ VE HARMONİKLERİN
İNCELENMESİ**

Elektrik Mühendisi Yaşar Beyazıt YOLDAŞ

**FBE Elektrik Mühendisliği Anabilim Dalı Elektrik Makineleri ve Güç Elektroniği Programında
Hazırlanan**

YÜKSEK LİSANS TEZİ

Tez Danışmanı : Prof. Dr. Asım KASAPOĞLU (YTÜ)

İSTANBUL, 2011

İÇİNDEKİLER

	Sayfa
SİMGE LİSTESİ.....	v
KISALTMA LİSTESİ.....	vi
ŞEKİL LİSTESİ.....	vii
ÇİZELGE LİSTESİ.....	x
ÖNSÖZ.....	xi
ÖZET.....	xii
ABSTRACT.....	xiii
1. GİRİŞ.....	1
2. HARMONİKLER.....	2
2.1 Harmonik Tanımı.....	2
2.2 Harmoniklerin Analitik Yöntemle Analizi.....	2
2.3 Harmoniklerin Etkileri.....	5
2.4 Harmoniklerin Transformatörler Üzerindeki Olumsuz Etkileri.....	6
3. TRANSFORMATÖRLER.....	7
3.1 Transformatörlerde Uyarım.....	7
3.2 Tek Fazlı Transformatörde Harmonikler.....	11
3.3 Üç Fazlı Transformatörler.....	15
3.3.1 Üç Fazlı Transformatörlerde Harmonikler.....	15
3.3.1.1 Temel Bağlantı Şekilleri.....	17
3.3.1.1.1 Yıldız Bağlantı.....	17
3.3.1.1.2 Üçgen Bağlantı.....	18
3.3.1.2 Yy Bağlantı (Nötrsüz).....	20
3.3.1.2.1 Bağımsız Manyetik Devreli Transformatörler.....	20
3.3.1.2.2 Birleşik veya Kuplajlı Manyetik Devreli Transformatör.....	23
3.3.1.3 Yy Nötr Bağlantılı.....	24
3.3.1.4 Dy Bağlantı (Bağımsız Manyetik Devreye Sahip)	24
3.3.1.5 Yd Bağlantı.....	25
3.3.1.6 Dd Bağlantı.....	26
3.3.2 Sayısal Örnek.....	26
3.3.3 Transformatörlerdeki Harmoniklerin Dezavantajları.....	28
3.3.3.1 Akım Harmonikleri.....	28
3.3.3.2 Gerilim Harmonikleri.....	29
3.4 Tersiyer(Tertiary) veya Stabilize Sargılar.....	30

3.5	Üç Fazlı Sistemler için Transformatör Seçimi.....	31
3.5.1	Üç Adet Tek Fazlı Transformatör Bankı.....	31
3.5.2	Üç Fazlı Çekirdek Tip Transformatör.....	32
3.6	Yıldız Bağlantı İle Üçgen Bağlantı Arasındaki Seçimde Önemli Olan Noktalar.....	32
3.7	Üç Sargılı Transformatörün Eşdeğer Devresi.....	33
3.7.1	Kuplaj Devresi Bakış Açısıyla.....	33
3.7.2	Üç Sargılı Transformatörlerin Parametreleri.....	40
3.8	Gerilim Regülasyonu.....	43
4.	ÜÇ FAZLI OTOTRANSFORMATÖRLER.....	46
4.1	Yıldız Bağlı Ototransformatörler.....	46
4.2	Üçgen Bağlı Ototransformatörler.....	48
4.3	Geliştirilmiş Üçgen Ototransformatörler.....	53
5.	TRANSFORMATÖRLERİN DİZİ BİLEŞEN (SEQUENCE) EMPEDANSLARI.....	56
5.1	Sıfır Dizi Bileşen Eşdeğer Devresi.....	58
5.1.1	Görsel Örnek.....	63
6.	TRANSFORMATÖR TRANSİYENTLERİ.....	65
6.1	Aşırı Akım Transiyentleri.....	65
6.1.1	Devreye Girme (inrush) Olayı.....	65
6.1.1.1	Niteliksel Yaklaşım.....	65
6.1.1.2	Analitik Yaklaşım.....	69
6.1.2	Devreye Girme Akımının Belirlenmesi.....	74
6.1.3	Üç Fazlı Transformatörlerde Devreye Girme Akımı.....	76
6.1.3.1	Üçgen Bağlı Sargıda.....	76
6.1.3.2	Yıldız Üçgen Bağlı Transformatör Bankı.....	77
6.1.3.3	Üç Bacaklı Yıldız Bağlı Transformatör.....	78
6.1.4	Yüksek Devreye Girme Akımlarının Azaltılması.....	80
6.1.5	Yüklü Transformatörlerin Primerden Anahtarının Kapatılması (Enerjilenmesi).....	80
7.	154 kV KASIMPAŞA GIS TRAFO MERKEZİ TRAFO-1 33,6 kV SEKONDERİNDEN YAPILAN ÖLÇÜMLER.....	82
8.	GÜÇ TRANSFORMATÖRLERİNDE HARMONİKLERİN SİMULASYONU.....	88
8.1	Transformatörün Eşdeğer Devresinin Çıkarılması.....	88
8.1.1	Transformatörün Açık Devre Testi.....	91
8.1.2	Transformatörün Kısa Devre Testi.....	93
8.2	Simulasyon.....	95
8.2.1	Gerçek Sistemin Simulasyonu.....	95
8.2.2	Gerçek Sistemin Transformatörü Tersiyer Sargılı Simulasyonu.....	97
8.3	Simulasyonun Yorumu.....	99

9.	SONUÇLAR ve ÖNERİLER.....	104
	KAYNAKLAR.....	106
	ÖZGEÇMİŞ.....	107

SİMGE LİSTESİ

ω	Açısal frekans
f	Frekans
C	Kapasitans
N	Transformatörün ilgili sargısının sarım sayısı
Wb/m^2	Akı yoğunluğu birimi
AT/cm	Manyetik akı yoğunluğu birimş (Amper sarım/santimetre)
B	Akı yoğunluğu
H	Manyetik alan şiddeti
μ_0	Manyetik geçirgenlik
T	Manyetik akı yoğunluğu birimi (Tesla)

KISALTMA LİSTESİ

TEİAŞ	Türkiye Elektrik İletim Anonim Şirketi
GIS	Gas Insulated Substation
TÜBİTAK	Türkiye Bilimsel ve Teknolojik Araştırma Kurumu
IEC	The International Electrotechnical Commission
ONAN	Oil Natural Air Natural (Transformatör Soğutma Tipi)
ONAF	Oil Natural Air Forced (Transformatör Soğutma Tipi)
OLTC	On-Load Tap Changer

ŞEKİL LİSTESİ

	Sayfa
Şekil 2.1	Harmonik bileşenler.....2
Şekil 3.1	(a) Histerisiz ihmal edildiğinde manyetize akım i_ϕ 'nin dalga şekli, (b) i_ϕ 'nin temel bileşeni ve üçüncü harmonik bileşeni.....8
Şekil 3.2	(a) Histerisiz varken boşta akım veya uyarım akımı ve sinusoidal akı dalga şekli (b) i_e uyarım akımının, i_ϕ ve i_h bileşenine ayrılmış hali.....10
Şekil 3.3	Sinusoidal manyetize akım için oluşan manyetik akı ϕ 'nin dalga şekli.....11
Şekil 3.4	(a), (b), (c) Sinusoidal i_ϕ manyetize akısı için emk ve akı dalga şekilleri.....13 (d), (e) Pikli(tepesi sivri) akı için emk dalga şekli.....14
Şekil 3.5	Temel, üçüncü, beşinci ve yedinci harmonik gerilimlerinin fazör diyagramı.....16
Şekil 3.6	Temel, üçüncü, beşinci ve yedinci harmonik gerilimlerinin fazör diyagramı.....17
Şekil 3.7	Yıldız bağlantı için üçüncü harmonik emk'nın gösterimi.....18
Şekil 3.8	Üçgen bağlantıda üçüncü harmonikler.....18
Şekil 3.9	Üç fazlı kabuk(mantel) tip transformatör.....20
Şekil 3.10	Üç fazlı transformatör bankı.....20
Şekil 3.11	Nötr noktasında oluşan osilasyonlar.....22
Şekil 3.12	Üç fazlı çekirdek tip transformatörde üç ve üçül harmonikler için yollar.....24
Şekil 3.13	i_ϕ 'nin temel ve üçüncü harmonik bileşenleri.....25
Şekil 3.14	Üçül harmonikleri bastırmak için yıldız-üçgen topraklama transformatörü.....26
Şekil 3.15	Üç adet birbirine transformatörden oluşan transformatör bankı.....26
Şekil 3.16	Haberleşme devreleriyle elektrostatik girişim olayı.....29
Şekil 3.17	Uzun bir hat ya da kabloya bağlanmış, yıldız/yıldız (sekonderi topraklı) bağlı transformatördeki seri rezonans olayı.....30
Şekil 3.18	Tersiyer sargılı transformatör.....31
Şekil 3.19	Üç sargılı transformatörde akım yönleri gösterimi.....33
Şekil 3.20	Üç sargılı transformatörde manyetik akı gösterimi.....34
Şekil 3.21	Üç sargılı transformatörün tek fazlı eşdeğer devresi.....39
Şekil 3.22	Üç sargılı transformatörün tek fazlı eşdeğer devresi.....40
Şekil 3.23	Üç sargılı transformatörde kısa devre testi (a) Devre şeması (b) Eşdeğer devre.....41
Şekil 4.1	Yıldız bağlı ototransformatör.....46
Şekil 4.2	(a) Uzun bir iletim hattın ya da kabloyu besleyen Yy bağlı ototransformatör bankındaki üçül frekans akımı yolları (b) Faz toprak arızasına maruz kalmış 3 fazlı ototransformatör (c) (b) için fazör diyagramı.....47
Şekil 4.3	(a) Üçgen bağlı ototransformatörler için bağlantı şeması (b) Gerilim fazör diyagramı.....49
Şekil 4.4	Şekil 4.3 (a) için akım fazör diyagramı.....52
Şekil 4.5	(a) (b) Geliştirilmiş üçgen ototransformatör.....53
Şekil 4.6	Şekil 4.5 (a) için akım fazör diyagramı.....54
Şekil 5.1	(a) İki sargılı transformatör için eşdeğer devre (b) Üç sargılı transformatör için eşdeğer devre.....56
Şekil 5.2	(a) Pozitif dizi bileşen fazör diyagramı (b) Negatif dizi bileşen fazör diyagramı (c) sıfır dizi bileşen fazör diyagramı.....56

Şekil 5.3	Yd bağlı primer nötrü topraklı bir transformatörde faz toprak arızası meydana geldiği durumdaki sıfır dizi bileşen akımları.....57
Şekil 5.4	(a) İki sargılı transformatörün sıfır dizi bileşen akımları gösterimi (b) eşdeğer devresi.....58
Şekil 5.5	(c) İki sargılı transformatörün sıfır dizi bileşen akımları gösterimi (d) eşdeğer devresi.....59
Şekil 5.6	(e) İki sargılı transformatörün sıfır dizi bileşen akımları gösterimi (f) eşdeğer devresi.....59
Şekil 5.7	İki sargılı transformatörün sıfır dizi bileşen eşdeğer devresi.....60
Şekil 5.8	(a) (b) (c) (d) (e) (f) Üç fazlı üç sargılı transformatörle ilgili sıfır dizi bileşen eşdeğer devreleri.....61
Şekil 5.9	Üç fazlı iki sargılı ototransformatörün sıfır dizi bileşen eşdeğer devresi.....62
Şekil 5.10	Üç fazlı iki sargılı ototransformatörün sıfır dizi bileşen eşdeğer devresi.....63
Şekil 5.11	Üç fazlı üç sargılı ototransformatörün sıfır dizi bileşen eşdeğer devresi.....63
Şekil 5.12	Tek hat diyagramı.....63
Şekil 5.13	Şekil 5.12'deki sistemin sıfır dizi bileşen empedansı.....64
Şekil 6.1	(a) İdeal transformatörde uygulanan v_1 gerilim ve ϕ akısı için dalga şekilleri (b) Uygulanan gerilim ob 'deyken anahtarlanan yüksüz transformatördeki etki.....66
Şekil 6.2	(a) v_1 pozitif maksimumda ve ϕ sıfırda iken (b) v_1 sıfırda ve ϕ negatif maksimumda iken yüksüz transformatörün anahtarlanması.....66
Şekil 6.3	Dengesiz yüklenmiş transformatörün gerilimi sıfırda iken ve artık (rezidüel) manyetizma ϕ_r mevcut iken anahtarlanması(enerjilenmesi).....68
Şekil 6.4	Transformatördeki histerizis çevrimi ve manyetize akım dalga şekli.....69
Şekil 6.5	(a) Transformatörde devreye girme olayı.....73
Şekil 6.6	Üçgen bağlantıda devreye girme hat ve faz akımları birbirine eşittir.....76
Şekil 6.7	Yıldız/üçgen bağlı transformatör bankında devreye girme akımı.....77
Şekil 6.8	Yıldız bağlı üç bacaklı transformatörde devreye girme akımı.....79
Şekil 7.1	Transformatörün A,B ve C fazlarına ait gün içindeki gerilim değişimi.....82
Şekil 7.2	Transformatörün A,B ve C fazlarına ait gün içindeki akım değişimi.....83
Şekil 7.3	Transformatörün gün içindeki toplam görünen güç değişimi (kVA).....83
Şekil 7.4	Transformatörün A,B ve C fazlarına ait gün içindeki aktif güç değişimi (kW).....84
Şekil 7.5	Transformatörün A,B ve C fazlarına ait gün içindeki reaktif güç değişimi (kVAr).....84
Şekil 7.6	Transformatörün A,B ve C fazlarına ait gün içindeki görünen güç değişimi (kVA).....85
Şekil 7.7	Transformatörün gün içindeki güç faktörü değişimi ($\cos\phi$).....85
Şekil 7.8	Transformatörün gün içindeki toplam gerilim harmonik bozulma değerleri (THB_V).....86
Şekil 7.9	Transformatörün gün içindeki toplam akım harmonik bozulma değeri (THB_I).....86
Şekil 7.10	Transformatörün gün içindeki 3, 5, 7, 11 ve 13'üncü akım harmoniği değerleri.....87
Şekil 7.11	Kasımpaşa TM tek-hat şeması.....87
Şekil 8.1	Transformatörün tek faz kararlı hal eşdeğer devresi.....95
Şekil 8.2	Gerçek sistemin devresi.....96
Şekil 8.3	Gerçek sistemin transformatörü tersiyer sargılı devresi.....98
Şekil 8.4	Transformatörün primerinden okunan akım ve gerilimler.....101

Şekil 8.5	Transformatörün sekonderinden okunan akım ve gerilimler.....	102
Şekil 8.6	Yükten okunan akım ve gerilimler.....	103

ÇİZELGE LİSTESİ

	Sayfa
Çizelge 8.1	Gün içinde yükün maksimum olduğu andaki değerler.....88
Çizelge 8.2	Transformatör etiket bilgileri.....89
Çizelge 8.3	Gerilim çevirme oranının ölçülmesi.....89
Çizelge 8.4	Sargı DC direnci ölçümü.....90
Çizelge 8.5	Transformatörün açık devre testi sonuçları.....91
Çizelge 8.6	Transformatörün kısa devre testi sonuçları.....91
Çizelge 8.7	Mevcut güç transformatöründen okunan ve simulasyon sonucu okunan THB değerleri.....99

ÖNSÖZ

Güç transformatörleri ve harmoniklerini işlediğim tez çalışmamda, temel transformatör kavramları ve alışlagelmiş harmonik standartlarının dışında daha kapsamlı, teknik bir harmonik incelemesi üzerine çalıştım.

Bu hususta sevgili aileme, dostlarıma, iş arkadaşlarıma ve bana deneyimi ve vizyonu ile yol gösteren Hocam Prof. Dr. Asım KASAPOĞLU' na teşekkür ederim.

Ocak, 2011

ÖZET

Güç transformatörleri enerji iletiminde en önemli bileşenlerden biridir. Burada da güç transformatörlerinde önemli olan temel prensipler ve harmonik konusu işlenmiştir.

Güç transformatörleri sürekli olarak sorunsuz bir şekilde çalışması iletim sistemimizde arz güvenliliğinin devamlılığı ve kararlılığın sağlanması bakımından önem arz etmektedir.

Bu nedenle transformatörlerin temel prensiplerini iyi anlamak gerekmektedir.

Bu tezde çeşitli bağlantı şekillerindeki güç transformatörlerinde oluşan harmonik gerilimleri, akan harmonik akımları ve bunların etkileri, eşdeğer devresi, ototransformatörler, güç transformatörlerinde uyartım, sıra dizi akımları ve eşdeğer devreleri, devreye girme anında oluşan devreye girme akımları anlatılmıştır.

Anlatılan harmonik konusu ile ilgili mevcut çalışmakta olan bir güç transformatöründen ölçümler alınmış, fabrika test verilerinden elde edilen değerlerle güç transformatörünün eşdeğer devresi çıkartılmış ve bu eşdeğer devre kullanılarak güç transformatöründe harmoniklerin simulasyonu yapılmıştır.

Anahtar kelimeler: Güç transformatörü, ototransformatörler, harmonikler, eşdeğer devresi, devreye girme akımı

ABSTRACT

Power transformers are one of the most important components of power transmission. Basic principles and harmonics, which is important for power transformers have been subjected.

Seamlessly work of power transformers is important for our transmission network to continuity of supply safety and ensure stability. Therefore basic principles of transformers need to be understood.

In these thesis; for different connection types of power transformers, voltage and current harmonics and effects of these, equivalent circuits, autotransformers, excitation of power transformers, sequence currents and sequence equivalent circuits and inrush currents have been explained.

Power transformer equivalent circuit obtained from experimental values, measurements taken from power transformer which is now on use and a simulation of harmonics has been made with this measurement results on a simulation model of power transformer.

Keywords: Power transformers, autotransformers, harmonics, equivalent circuit, inrush current

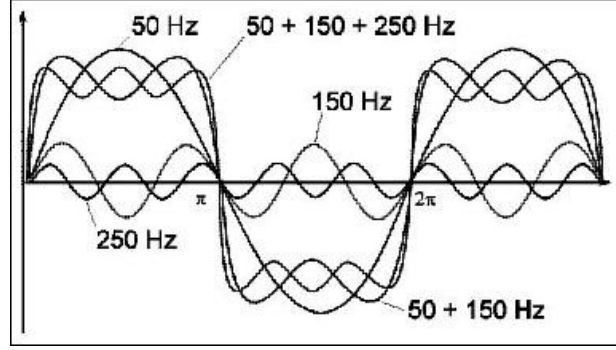
1. GİRİŞ

Güç transformatörleri enerji iletim sisteminin en önemli elemanlarındanır. İşletmeye alma ve işletme şartlarında çeşitli zorlamalara maruz kalmaktadırlar. Güç transformatörlerinin işletilmesi bilinse de iç yapısı ve bu yapının işleyiş mantığı fazla bilinmemektedir. Bunu anlayabilmek için önce güç transformatörlerinin teorik altyapısını bilmek gerekir. Sonra bu altyapı ile mevcut bir transformatörün test verilerinden bir eşdeğeri elde edilebilir. Bu eşdeğer ile transformatör üzerinde çeşitli simülasyonlar yapılabilir.

Sistemdeki harmonikler ise transformatörler üzerinde çeşitli etkiler oluşturmaktadır. Mesela birbirine yakın yerde benzer şekilde işletilen, aynı teknik özellikler sahip ve üzerinden aynı yük çekilen iki transformatör farklı miktarda ısınmaktadırlar. Bunun sebebine baktığımızda temel frekansta aynı akım çekilmesine rağmen, diğer frekanslarda farklı akımlar çekilmektedir. Bu farklı frekanslarda analag ölçü aletleriye gözle tespit edilemeyip oluşan farklı ısınmanın sebebi anlaşılamamaktadır. İşte bu temel frekanstan (50 Hz) farklı frekanstaki akımlar veya gerilimler yani harmoniklerin güç transformatörüne etkileri araştırılmıştır. Bu konu ile ilgili mevcut bir transformatörün simülasyonu yapılmış ve bu transformatörde eğer bir tersiyer sargı olsaydı bu sargı harmonikler üzerinde ne tür bir etki yapabileceği gözlenmiştir.

2. HARMONİKLER

Elektrik enerjisinin üretimi, iletimi ve dağıtımı esnasında akım ve gerilim büyüklüklerinin 50 Hz frekansında, sinusoidal olarak taşınması istenmektedir. Fakat çeşitli nedenlerle bu bozulmaktadır. Bu bozulmaların en önemlilerinden biri olan harmonikler anlatılacaktır.



Şekil 2.1 Harmonik bileşenler

Farklı frekansta bileşenlerin mevcut sinyale ilave edilmesi ile dalga şekli sinusoidalden uzaklaşır ve dalgaşeklinde bir bozulma görülür.

2.1 Harmonik Tanımı

Eğer devrede nonlinear elemanlar ve/veya nonsinusoidal kaynaklar bulunuyorsa enerji sistemindeki sinusoidal dalga şekli bozulur. Bu dalga şekli detaylı olarak incelendiğinde normal şebeke frekansının yanında farklı frekansta büyüklükler de bulunduğu görülür. Bu temel frekanstan farklı bir frekansta olan büyüklüklere **harmonik** adı verilir.

Güç sistemindeki sinusoidal dalganın simetrisinden dolayı 3, 5, 7, 9, 11... gibi tek harmonik bileşenleri bulunur. Çift harmonik bileşenler bulunmaz.

2.2 Harmoniklerin Analitik Yöntemle Analizi

Periyodik bir nonsinusoidal dalganın değişik genlik ve faz açılarına sahip sinusoidal dalgaların toplamı olarak yazılabileceği veya çeşitli genlik ve faz açılarına sahip sinusoidal dalgaların toplamı ile nonsinusoidal dalganın meydana geldiği Fourier eşitliği ile ifade edilebilmektedir. Fourier serisi :

$$f(x) = a_0 + \sum_{n=1}^{\infty} (a_n(\cos n2\pi f_n t + \Phi_n) + b_n(\sin n2\pi f_n t + \Phi_n)) \quad (2.1)$$

şeklinde ifade edilir.

Burada a_0 , ortalama değeri; 1 indisli terim, temel bileşeni; diğer rakamlarla ifade edilenler ise harmonik bileşeni ifade eder. $a_0, a_1, \dots, a_n$ genlikleri; f , frekansı; Φ , faz açısını ifade etmektedir. Φ_1 , temel bileşen faz açısını; $\Phi_2, \dots, \Phi_n$ ise harmonik bileşenlerin faz açılarını ifade etmektedir.

$$i(t) = I_0 + \sum_{n=1}^{\infty} I_{maks} (\sin n\omega t + \delta_n) \quad (2.2)$$

$$V(t) = V_0 + \sum_{n=1}^{\infty} V_{maks} (\sin n\omega t + \gamma_n) \quad (2.3)$$

I_{maks} ve V_{maks} tepe değerleridir. Efektif değerler,

$$I_n = \frac{I_{maks}}{\sqrt{2}} \quad (2.4)$$

$$V_n = \frac{V_{maks}}{\sqrt{2}} \quad (2.5)$$

ifadelerinden elde edilir.

Harmonikli akım ve gerilimin efektif değeri

$$I = \sqrt{\sum_{n=0}^{\infty} I_n^2} = \sqrt{I_0^2 + I_1^2 + I_2^2 + \dots + I_n^2} \quad (2.6)$$

$$V = \sqrt{\sum_{n=0}^{\infty} V_n^2} = \sqrt{V_0^2 + V_1^2 + V_2^2 + \dots + V_n^2} \quad (2.7)$$

ifadeleri ile hesaplanır.

Aktif güç,

$$P = V_0 \cdot I_0 + \sum_{n=1}^N V_n \cdot I_n \cos(\delta_n - \gamma_n) \quad (2.8)$$

reaktif güç,

$$Q = \sum_{n=1}^N V_n I_n \cdot \sin(\delta_n - \gamma_n) \quad (2.9)$$

görünür güç ise,

$$S = V \cdot I = \sqrt{\sum_{n=0}^N V_n^2} \cdot \sqrt{\sum_{n=0}^N I_n^2} \quad (2.10)$$

eşitlikleri ile ifade edilebilir.

Bozulma(distorsiyon) gücü,

$$D = \sqrt{S^2 - P^2 - Q^2} \quad (2.11)$$

İle hesaplanır.

Toplam harmonik bozulma, gerilim için,

$$THD_V = \frac{1}{U_1} \left(\sum_{n=2}^{\infty} U_n^2 \right)^{1/2} \quad (2.12)$$

akım için,

$$THD_I = \frac{1}{I_1} \left(\sum_{n=2}^{\infty} I_n^2 \right)^{1/2} \quad (2.13)$$

Şeklinde ifade edilir.

Bozulma faktörü, gerilim için,

$$DF_V = \frac{1}{U} \left(\sum_{n=2}^{\infty} U_n^2 \right)^{1/2} \quad (2.14)$$

akım için,

$$DF_I = \frac{1}{I} \left(\sum_{n=2}^{\infty} I_n^2 \right)^{1/2} \quad (2.15)$$

formülü ile hesaplanır.

Crest faktörü sinüsün tepe değerinin efektif değere bölümü ile ifade edilir. İdeal bir sinusoidal dalganın Crest faktörü 1.414'tür.

$$CF = \frac{\text{Tepe değeri}}{\text{Efektif değer}} \quad (2.16)$$

2.3 Harmoniklerin Etkileri

Harmonikler güç sistemindeki elemanları olumsuz yönde etkiler. Bu etkiler aşağıdaki gibi sıralanabilir.

- 1- Enerji sistemindeki elemanların kayıplarının artması
- 2- Enerji sistemindeki elemanların dielektrik yalıtkanlığının bozulması
- 3- Transformatörlerin ısınması
- 4- Dönen makinalarda moment salınımlarının ve aşırı ısınmaların oluşması
- 5- Gerilim düşümünün artması
- 6- Şebeke geriliminin sinusodallıktan çıkması
- 7- Kompanzasyon tesislerinin aşırı reaktif yüklenmesi
- 8- Endüksiyon tipi sayaçlarda yanlış ölçmeler

- 9- Kontrol devrelerinde işlev bozuklukları
- 10- Koruma rölelerinde yanlış alarm ve açtırmalar
- 11- Mikroişlemcilerin hatalı çalışması ve veri kayıpları
- 12- İletişim araçlarında parazitlenme
- 13- Güç faktörünün değişmesi
- 14- Şebekede rezonans olaylarının meydana gelmesi

2.4 Harmoniklerin Transformatörler Üzerindeki Olumsuz Etkileri

- Transformatörler yükün MVA gereksinimine göre seçilirler. Harmonik akımlar nedeniyle efektif akım değeri transformatörün maksimum akım taşıma kapasitesini aşmasına neden olabilir. Bu durum da transformatörün omik yani bakır kayıplarının artmasına sebep olur.
- Manyetik akılar çekirdekten dolaşır. Manyetik alanın yön değiştirmesi, yüksek frekanslarda daha hızlı olduğundan, çekirdekteki histerizis kayıpları artar. Çekirdekteki kayıplar da akımın frekansının karesi ile orantılı olarak artar. Bu nedenle harmonik akımlar transformatör çekirdeğinin ısınmasına sebep olan önemli bir etkidir.

3. TRANSFORMATÖRLER

Gücün bileşenleri olan akım veya gerilimi değiştirmeye yarayan statik elektrik makinelerine transformatör denir. Transformatörler faz sayısına göre tek, üç veya çok fazlı transformatörler olarak sınıflandırılabilirler.

Transformatörler kullanıldıkları yerler neresi olursa, prensip bakımından daima aynıdır ve genel olarak birbirine ve toprağa karşı izole edilmiş iki sargı ile üzerinde sargıları taşıyan demir çekirdekten oluşurlar. Transformatörün yükseltici veya alçaltıcı olmasına göre primerin gerilimi sekonderden küçük veya büyük olabilir. Transformatörün ucuza mal olması ve dağılma kuvvet çizgilerini lüzumsuz yere büyütmek amacıyla düşük gerilimli sargı iç kısma ve demir çekirdeğe çok yakın olarak yerleştirilir. Üst gerilim sargısı ise dış taraftadır.

Transformatörlerin hareket eden parçaları olmadığından sürtünme ve rüzgar kayıpları söz konusu değildir. Bunun sonucu verimi en yüksek elektrik makineleri olarak gösterilebilir. Transformatörlerin verimleri %99.9'a kadar çıkabilir. Güçleri birkaç Volt Amper (VA)'dan yüzlerce mega Volt Amper (MVA)'e kadar çıkabilir.

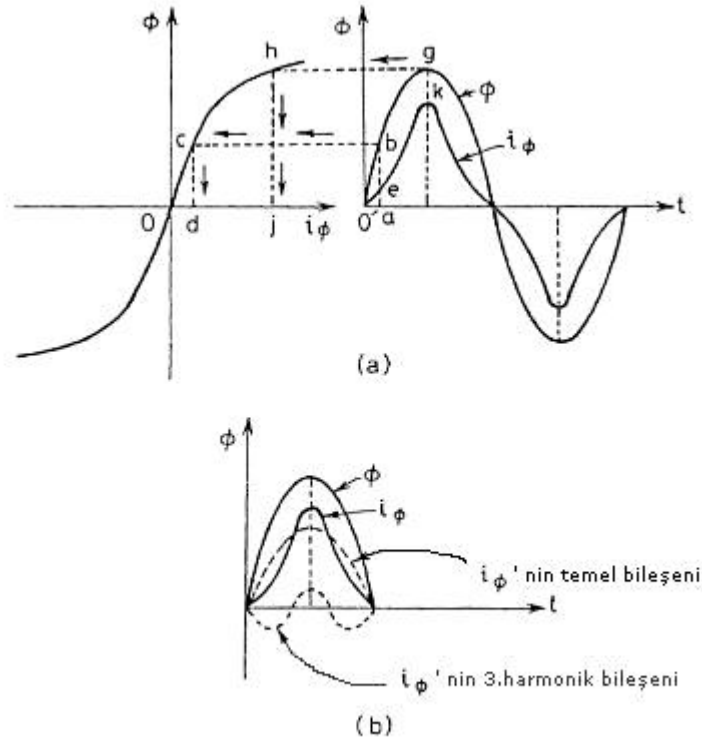
3 fazlı transformatörlerin paralel işletilmesi, transformatör fazör grupları, transformatör de uyartım, faz dönüşümü ve transformatörlerde harmonikler konuları işlenmiştir.

3.1 Transformatörlerde Uyartım

İdeal bir transformatörde manyetik doyumun olmadığı farz edilir. Transformatörün fazör diyagramı ve eşdeğer devresi oluşturulduğunda, manyetik lineerlik doğrusal olarak kabul edilir. Bunun sebebi manyetik nonlineerlik transformatörün fazör diyagramı ve eşdeğer devresinde ifade edilemez olduğundandır.

Lineer manyetizasyon eğrisi için; akı, manyetize akı ile orantılıdır ve dalga formları aynıdır. Pratikte, manyetik doyum meydana gelir, akı ve manyetize akım dalga şekli birbirinden farklıdır.

Manyetik devrede akı oluşturabilmek için gerekli olan akıma uyartım akımı denir. Transformatördeki uyartım olayını anlamak için transformatörün sekonderi açıkken primerden enerjilendiğindeki uyartım akımı, gerilim ve akıyı incelemek gerekir.



Şekil 3.1 (a) Histerisiz ihmal edildiğinde manyetize akım i_ϕ 'nin dalga şekli, (b) i_ϕ 'nin temel bileşeni ve üçüncü harmonik bileşeni

İncelerken ilk olarak kolaylık için çekirdek için olan manyetizasyon eğrisinde histerisiz olmadığı kabul edilmiştir, (Şekil 3.1 (a)). Şekilde manyetizasyon eğrisi klasik akı yoğunluğu B ve manyetik alan yoğunluğu H yerine; akı ϕ ($B \times \text{Alan}$) ve manyetize akım i_ϕ ($\frac{H \cdot l}{N}$) ile ifade edilmiştir. Bu belirli bir verilen ϕ akısı için i_ϕ değerini okuyarak gerçekleştirilmiştir. Uygulanan V_1 gerilimi sinusoidal kabul edilmiştir. Yüksüz koşulda iken primerdeki kaçak empedanstan dolayı olan düşüm çok küçük olacağından ihmal edilmiştir. Demir çekirdekte oluşan akı $V_1 = \sqrt{2} \pi f N_1 \phi_m$ 'den elde edilir ve V_1 sinüs olduğundan ϕ akısı da sinüs olur. Artık sinusoidal akıdan uyartım akımı elde edilebilir.

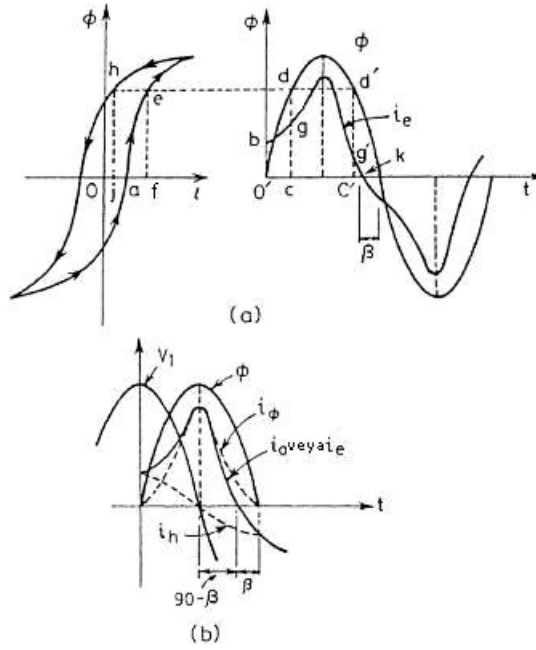
ab'ye eşit herhangi bir akı için, oo' 'ne dik cd çizelim, şekil 3.1 (a). ab akısı için $od=ae$ manyetize akıdır. (Manyetize akım ve çekirdek kayıp akımının fazörel toplamı, uyartım ya da yüksüz(boşta) akımı verir. Histerisiz çevrimi girdap(eddy) akımı kayıplarını içeremez ve burada bahsedilen manyetizasyon eğrisinde histerisiz yok kabul edilmektedir. Sinüs akısından şekil 3.1 (a) 'da elde edilen akım dalga şekli i_ϕ manyetize akımını ifade eder.) fg 'ye eşit olan pik akı için okları gh ve hj boyunca uzatırız. oj=fk akımı fg akısından elde edilir. e ve k noktalarını ihtiyaç duyulan manyetize akım dalga şeklinin üzerinde seçilmiş noktalardır. Bu

uygulama akım dalga şeklinin birçok noktasında uygulanır. Bu noktalardan geçen eğri şekil 3.1 (a)'daki istenen akım dalga şeklini verir. Bu akım dalga şeklinin ayırtedici özellikleri:

- i. doğal olarak piklidir ve maksimum değer noktasında simetriktir,
- ii. akı ve akım maksimum değerlerine aynı anda ulaşır.

Bu dalga şeklinin fourier analizi, manyetize akım temel sinusoidal bileşen ve bir dizi tekil harmonikten oluştuğunu gösterir, bunlardan baskın olanı üçüncü harmoniktir. i_ϕ 'nin temel bileşeni ϕ ile aynı fazdadır ve ϕ , V_1 'in 90° gerisindedir, i_ϕ 'nin temel bileşeni de V_1 'in 90° gerisindedir. Sonuçta kaynaktan çekilen güç sıfırdır, çünkü V_1 ve i_ϕ 'nin temel bileşeni arasında 90° faz açısı farkı vardır. Temel frekans gerilimi V_1 ve i_ϕ 'nin tekil harmonikleri ile ilişkili olan güç her zaman sıfırdır. Bu da göstermektedir ki manyetik doyum(histerisiz yokken) herhangi bir güç kaybına neden olmaz, akım dalga şeklini de çok az bozar.

Şekil 3.2'deki histerisizli manyetizasyon eğrisini incelersek, akı sıfırken ve o' noktasından yükselmeye başlarken, akım $oa=o'b$ 'dir. Bu nedenle, b noktası uyartım akımı dalga şekli üzerinde yer alır. Akı artarken cd 'de gösterilen değere ulaştığında uyartım akımı $of=cg$ 'ye eşit olur. $c'd'$ 'de verilen azalan akı için, uyartım akımı $oj=c'g'$ 'dür. Uyartım akımı dalga şekli üzerinden alınan yeterli miktarda noktalar ile, istenen uyartım akım dalga şekli elde edilir. Akı zamanla artarken, akı da artıyorkenki histerisiz çevriminin ilgili kısmını kullanmak gerekir. Aynısı azalan akı değere için de geçerlidir.

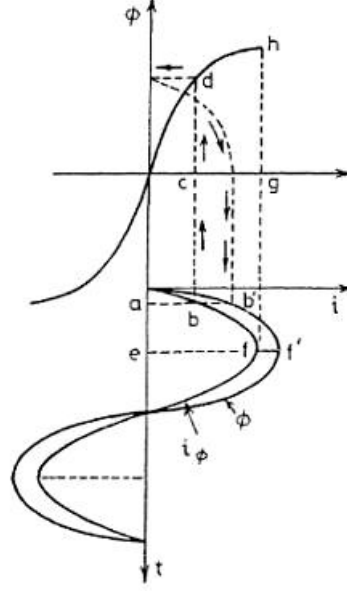


Şekil 3.2 (a) Histerisiz varken boşta akım veya uyarıtım akımı ve sinusoidal akı dalga şekli (b) i_e uyarıtım akımının, i_ϕ ve i_h bileşenine ayrılmış hali

Yüksüz durumdaki dalga şekli veya uyarıtım akımından (i_0 veya i_e), uyarıtım akımı tepe değerine varmadan simetrisini kaybetmiştir. (Şekil 3.2 (a)'da elde edilen akımın dalga şekli; i_ϕ manyetize akımını ve çekirdek kaybı akım i_e 'yi içermektedir. Histerisiz kayıpları çekirdek kaybının büyük kısmını oluşturduğundan, şekil 3.2 (a)'daki akım, transformatörün yüksüz durumdaki veya uyarıtım akımı olarak da adlandırılır.). i_e k noktasında sıfırda iken, akı pozitif, bu nedenle i_e akımı ϕ akısından küçük bir β açısı kadar ileridedir, bu açiya histerisiz açısı denir. ϕ akısı kaynak gerilimi V_1 'e göre 90° geridedir ve uyarıtım akımı i_e akının β° kadar ilerisindedir. Diğer bir deyişle, i_e V_1 'in $(90-\beta)^\circ$ gerisindedir, şekil 3.2 (b). $V_1 \times$ uyarıtım akımı $\times \cos(90 - \beta)^\circ$ 'dan histerisiz kayıp elde edilir.

i_e akımı ϕ ile aynı fazdaki manyetize akım i_ϕ ve şekil 3.2 (b)'de gösterildiği gibi ϕ akısından 90° ileride histerisiz kayıp akımı i_h 'ye ayrılabilir. i_ϕ yine temel sinüs bileşen ve tekil harmoniklerden oluşmaktadır ve üçüncü harmonik daha baskındır. $V_h \cdot I_{h_{rms}}$ çarpımı histerisiz kaybını verir. P_e 'nin V_1 'e bölümü ile elde edilen girdap (eddy) kayıp akımı I_{ed} , toplam çekirdek kayıp akımı I_c 'yi elde etmek için I_h ile toplanmalıdır.

Teorik olarak, sinusoidal olmayan bir nicelik fazörel olarak ifade edilemez. Fakat transformatör analizinde asıl akım dalgasının efektif değeri alınır ve fazörel olarak ifade edilir.



Şekil 3.3 Sinusoidal manyetize akım için oluşan manyetik akı ϕ 'nin dalga şekli

Eğer uyartım akımının sinusoidal olarak değişime zorlarsak (mesela primer devreye büyük seri bir direnç koyarsak) akı değişiminin dalga şekli aşağıda anlatıldığı gibi olacaktır. Manyetizasyon eğrisini histerisiz olarak düşünürsek, şekil 3.3'deki gibi olur. Sinusoidal akım ab olduğunda akı $cd=ab'$ dür. ef 'ye eşit olan manyetize akımın maksimum değeri için, akı $gf=ef'$ dür. Bir çok nokta ile akı için bu yöntemi uyguladığımızda elde edilen eğri i_ϕ sinusoidal manyetize akımı için akı dalga şeklidir. Şekil 3.3'de görüldüğü gibi sinusoidal i_ϕ tepesi düz akı dalga şeklini oluşturur.

Üç fazlı birleşik devreli(kuplajlı) transformatörlerde her üç fazda da uyartım akımları eşit olmamaktadır. Her zaman orta faz yanlardaki fazlara göre daha düşük uyartım akımına ihtiyaç duymaktadır. Orta bacağın (fazın) her iki yanındaki bacakların relüktans değeri birbirine eşit olduğundan toplamaları endüklenen akı için daha düşük relüktanslı yol sunar. Orta bacadaki endüklenen akı daha düşük relüktanslı yoldan akacağı için daha düşük uyartım akımı akar. Dışarıdan kalan diğer iki faz ise diğer iki faza farklı mesafede olduğundan iki farklı relüktans değeri mevcuttur ve bu iki farklı relüktans değeri toplam orta bacağın izlediği yolun relüktans değerine göre daha yüksek olduğundan daha büyük uyartım akımı akar.

3.2 Tek Fazlı Transformatörde Harmonikler

Uyartım olayı alternatif gerilim uygulanmış tüm manyetik devrelere uygulanabilir.

Sinusoidal bir kaynak gerilimi için, akı da sinusoidaldir, fakat manyetize akım güçlü bir üçüncü harmonik akım taşımaktadır. Üçül (üç ve üçün katı) frekanslı akımlar, eğer bir transformatör sargısında üçül frekanslı emk'lar var ise bulunabilir. Üçül frekanslı emk da sadece üçül frekanslı akı tarafından endüklenebilir. Bu nedenle, gerçek akı dalga şekli, sinüs akı ve üçüncü harmonik akı dalga şeklinin birleşimidir. Bileşke akı dalgasının sinüs dalgadan uzaklaşması(şeklinin sinüs olmaktan çıkması) çekirdekteki akı yoğunluğuna bağlıdır. Eğer transformatör daha yüksek bir akı yoğunluğunda çalıştırılıyorsa, burada daha belirgin bir üçüncü harmonik akı vardır (şekil 3.1) ve bu nedenle dolaşabilmesi(sirkülasyon) için daha büyük üçüncü harmonik emk'ya (E_3) ihtiyaç vardır. Yüksek değerli bir E_3 , yüksek değerli bir ϕ_3 üçüncü harmonik akısı ile endüklenebilir. Bunun sonucunda, bileşke akı (ϕ_1 sinusoidal akı + büyük değerli ϕ_3 üçüncü harmonik akısı) daha yüksek akı yoğunluklarında ideal sinüs dalga şeklinden belirgin bir şekilde uzaklaşır. Daha düşük akı yoğunluklarında; üçüncü harmonik akım azalır, E_3 , dolayısıyla ϕ_3 azalır ve bileşke akı neredeyse tam bir sinüs olur.

Eğer transformatörün üçüncü harmonik empedansı Z_3 , küçükse, $I_3 \cdot Z_3 = E_3$ küçüktür, bu nedenle ϕ_3 'de (E_3 'ü endükleyen) büyük olur. Bunun sonucunda da bileşke akı ($\phi_1 + \phi_3$) sinüs dalgadan uzaklaşır.

a) Şekil 3.3'de gösterilen tepesi bastırılmış bir akı dalga şeklinin fourier analizi şöyle ifade edilebilir;

$$\phi = \phi_{m_1} \sin \omega t + \phi_{m_3} \sin 3\omega t + \phi_{m_5} \sin 5\omega t + \dots \quad (3.1)$$

$\phi_{m_1}, \phi_{m_3}, \phi_{m_5}, \dots$ ϕ akısının temel ve harmonik bileşenlerinin maksimum değeridir. Her bir sarım için primer ve sekonder sargıdaki emk,

$$e = -\frac{d\phi}{dt} \\ = -\omega[\phi_{m_1} \cos \omega t + 3\phi_{m_3} \cos 3\omega t + 5\phi_{m_5} \cos 5\omega t + \dots] \quad (3.2)$$

Eşitlik 3.2'deki emk şekil 3.4 (a) 'daki gibi, sinüsoidal manyetize akım şekil 3.4 (b)'deki gibi, tepesi bastırılmış olan akı da şekil 3.4 (c)'deki gibi olmaktadır. Şekilde görüldüğü gibi tepesi bastırılmış akı tepesi sivri (maksimum değerinde pikli) olmak üzere primerde E_1 emk'sını, sekonderde de E_2 emk'sını endükler. Şekilde sadece temel frekans ve üçüncü harmonik bileşen gösterilmiştir.

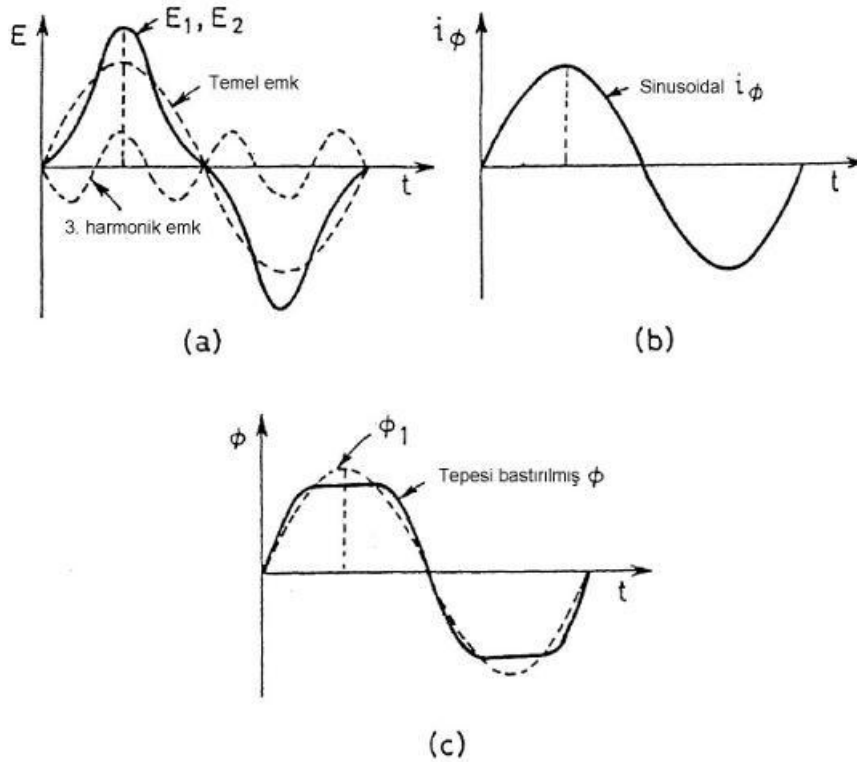
b) Bu durumda akı piklidir, şekil 3.4 (d) 'nin Fourier analizi sonucunda;

$$\phi = \phi_{m_1} \sin \omega t - \phi_{m_3} \sin 3\omega t - \phi_{m_5} \sin 5\omega t - \dots \quad (3.3)$$

$$e = -\frac{d\phi}{dt}$$

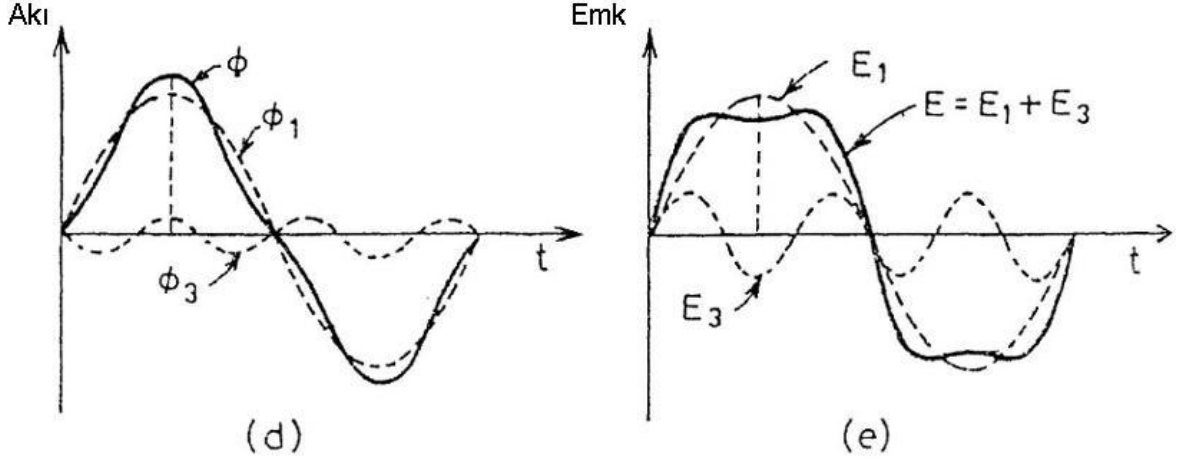
$$= -\omega[\phi_{m_1} \cos \omega t - 3\phi_{m_3} \cos 3\omega t - 5\phi_{m_5} \cos 5\omega t - \dots] \quad (3.4)$$

Eşitlik 3.4 'ün emk'sı şekil 3.4 (e)'deki gibi olmaktadır. Tepesi sivri akı, tepesi bastırılmış emk endükler. Şekillerde primer ve sekonderde sadece temel frekans ve üçüncü harmonik bileşenler gösterilmiştir.



Şekil 3.4 (a), (b), (c) Sinusoidal i_ϕ manyetize akısı için emk ve akı dalga şekilleri

Eşitlik 3.2 ve 3.4'teki endüklenen emk'lardaki üçüncü harmonik bileşenler, eşitlik 3.1 ve 3.3'deki akılardaki üçüncü harmonik bileşenlerin üç katıdır, aynı durum diğer harmonik bileşenler ve katları için de geçerlidir. Örneğin akının üç ve beşinci harmonik bileşenleri sırasıyla temel akının %10'u ve %3'ü ise, endüklenen emk'nın üçüncü ve beşinci bileşenleri sırasıyla temel endüklenen emk'nın %30'u ve %15'i olur.



Şekil 3.4 (d), (e) Pikli(tepesi sivri) akı için emk dalga şekli

Manyetize akım I_ϕ 'yi aşağıdaki gibi ifade edebiliriz.

$$I_\phi = \sqrt{I_1^2 + I_3^2 + I_5^2 + \dots} \quad (3.5)$$

Emk'lar da;

$$E = \sqrt{E_1^2 + E_3^2 + E_5^2 + \dots} \quad (3.6)$$

Harmonik emk'nın bileşenleri $E_1, E_3, E_5, \dots$ harmonik emk'nın işaretinden ve birbirleri arasındaki faz açılarından bağımsızdır.

Bir transformatördeki çekirdek kayıpları yaklaşık olarak maksimum akı yoğunluğunun karesi ile orantılıdır. Bu yüzden tepesi düz akıdaki çekirdek kaybı sinüs akıya göre daha düşüktür. Pratikte uygulanan gerilim sinüs, uyartım akımı pikli(tepesi sivri) ve akı da tepesi sivridir. Bu nedenle harmonikler çekirdek kaybını artırmaktadır. Özetle:

a) Uygulanan sinusoidal gerilim için, akı sinüs dalgasıdır ve manyetize akım belirgin üçüncü harmonik akımı içerir ve piklidir. (Şekil 3.1)

b) Sinusoidal manyetize akım için, akı dalgası tepesi bastırılmıştır ve primer ve sekonderde endüklenen emk'lar yoğun üçüncü harmonik emk içerir ve piklidir. (Şekil 3.3)

Eğer transformatör manyetize akımların akmasına izin veriyorsa, (a) maddesindeki ifadeler geçerlidir. Eğer bir sebepten, harmonik manyetize akımlar transformatör sargılarından akamıyorsa, (b) maddesindeki ifadeler geçerli olmaktadır.

Harmonikler transformatörü daha düşük akı yoğunluğunda çalıştırarak azaltılabilir, hatta yok edilebilir. Fakat transformatörler genellikle manyetizasyon eğrisinin tepesine yakın olan bölgede çalıştırıldığı için, harmonikler transformatörün uyartım akımının içinde mevcuttur.

Beşinci, yedinci, ... yüksek numaralı harmonikler üçüncü harmoniğe göre daha az belirgindir. Bu nedenle üçüncü harmonik detaylı olarak işlenecek, diğer harmonikler yok sayılacaktır.

3.3 Üç Fazlı Transformatörler

Elektrik santrallerinde senkron generatörlerinde elde edilen gerilim üç fazlı olduğunda bu gerilim yükseltilerek kullanım yerine kadar taşınması ve kullanım yerinde tekrar alçaltılması üç fazlı olarak yapılmaktadır. Bu amaç için ya üç adet tek fazlı transformatör ya da üç fazlı bir transformatör kullanılır.

Modern güç sistemlerinde neredeyse tüm elektrik enerjisi üç fazlı generatörler tarafından üretilir. Üç fazlı olarak iletilir ve dağıtılır.

3.3.1 Üç Fazlı Transformatörlerde Harmonikler

Güç ve dağıtım transformatörlerinde uyartım akımları toplam akımların sadece küçük bir oranını oluşturur (% 2-6). Uyartım akımı sırasında oluşan harmonikler koruma teçhizatının istenmeyen çalışmalarına ve haberleşme cihazlarında kesintilere sebep olabilir.

Üç fazlı transformatörlerde harmonikler şu durumlara göre değişiklikler gösterir :

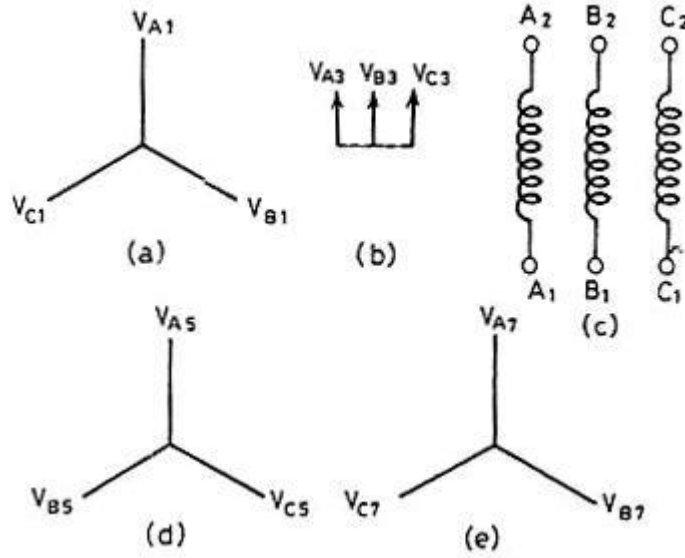
- Transformatör sargılarının yıldız, üçgen ya da zigzag bağlı olmasına
- Üç faza ait manyetik devrenin birleşik ya da ayrı ayrı olmasına göre değişir.

Üç fazlı bir sistemde tekil harmonikleri ele alırsak, her faza ait gerilim değerleri aşağıdaki gibi ifade edilir;

$$v_A = V_{m_1} \sin \omega t + V_{m_3} \sin 3\omega t + V_{m_5} \sin 5\omega t + \dots \quad (3.7)$$

$$v_B = V_{m_1} \sin(\omega t - 120^\circ) + V_{m_3} \sin 3(\omega t - 120^\circ) + V_{m_5} \sin 5(\omega t - 120^\circ) + \dots \quad (3.8)$$

$$v_C = V_{m_1} \sin(\omega t - 240^\circ) + V_{m_3} \sin 3(\omega t - 240^\circ) + V_{m_5} \sin 5(\omega t - 240^\circ) + \dots \quad (3.9)$$



Şekil 3.5 Temel, üçüncü, beşinci ve yedinci harmonik gerilimlerinin fazör diyagramı

V_{m_1} = Temel frekansın maksimum gerilim değeridir

V_{m_3} = 3. harmonik bileşeninin maksimum gerilim değeridir

$$v_{A3} = V_{m_3} \sin 3\omega t \quad (3.10)$$

$$v_{B3} = V_{m_3} \sin(3\omega t - 360^\circ) = V_{m_3} \sin 3\omega t \quad (3.11)$$

$$v_{C3} = V_{m_3} \sin(3\omega t - 720^\circ) = V_{m_3} \sin 3\omega t \quad (3.12)$$

Yukarıdan da görüldüğü gibi üçüncü harmonik gerilimle şekil 3.5 (b)' deki gibi aynı fazdadır. Üç ve üçün katı gerilim harmonikleri A_1, B_1, C_1 ' den A_2, B_2, C_2 ' ye veya A_2, B_2, C_2 ' den A_1, B_1, C_1 ' e doğru 3.5 (c)' deki gibi üç sargıda da eş zamanlı olarak görülürler.

$$v_{A5} = V_{m5} \sin 5\omega t \quad (3.13)$$

$$v_{B5} = V_{m5} \sin(5\omega t - 600^\circ) = V_{m5} \sin(5\omega t - 240^\circ) \quad (3.14)$$

$$v_{C5} = V_{m5} \sin(5\omega t - 1200^\circ) = V_{m5} \sin(5\omega t - 120^\circ) \quad (3.15)$$

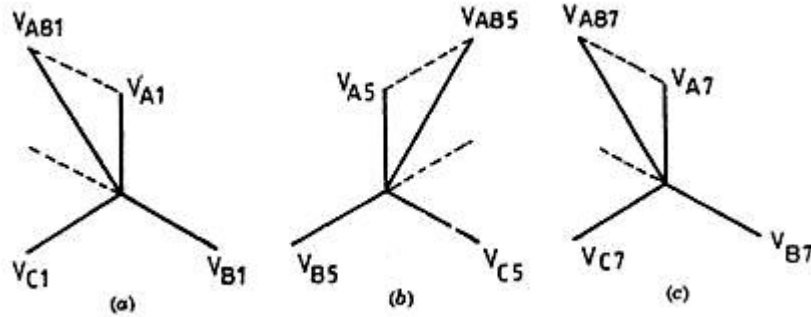
Beşinci gerilim harmonikleri de birbirleri ile 120° fark ile ama şekil 3.5 (d)'deki gibi farklı faz sırasında (ACB) görülürler. (Temel frekansta faz sırası ABC dir)

Yedinci gerilim harmonikleri ise ABC faz sırasındadır. (Şekil 3.5 (e))

3.3.1.1 Temel Bağlantı Şekilleri

3.3.1.1.1 Yıldız Bağlantı

$$\bar{V}_{AB} = \bar{V}_A - \bar{V}_B \quad (3.16)$$



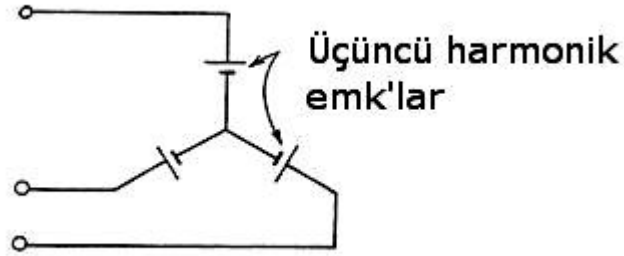
Şekil 3.6 Temel, üçüncü, beşinci ve yedinci harmonik gerilimlerinin fazör diyagramı

Temel frekans, 5. ve 7. harmonikler için hat gerilimleri V_{AB1} , V_{AB5} ve V_{AB7} şekil 3.6'deki gibidir. Üçüncü gerilim harmonikleri ise;

$$v_{AB3} = v_{A3} - v_{B3} \quad (3.17)$$

$$v_{AB3} = v_{m3} \sin 3\omega t - v_{m3} \sin 3\omega t = 0 \quad (3.18)$$

Bu nedenle hat gerilimlerinde 3 ve 3'ün katı harmonikler mevcut değildir, bununla birlikte faz gerilimlerinde bu harmonik mevcuttur. 3.harmonik faz emk'ları şekil 3.7'deki gibi gösterilebilir. Hatla yıldız noktası arası gerilim düşümü, yıldız noktasıyla hat arasına göre gerilim yükselimi vardır. Bu yüzden 3 ve 3'ün katı harmonikler iki hat arasında sıfırdır.

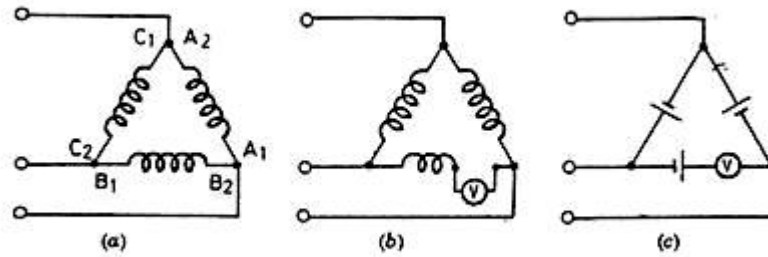


Şekil 3.7 Yıldız bağlantı için üçüncü harmonik emk'nın gösterimi

3.3.1.1.2 Üçgen Bağlantı

Bağlantı şekli şekil 3.8 (a)'daki gibidir. Eğer şekil 3.8 (b) deki gibi açık üçgen uca bir voltmetre bağlanırsa, eğer burada üç fazda da sadece temel frekans, 5 ve 7. harmonik emk'ları varsa, voltmetrede gerilim sıfır (0) okunur.

Üçüncü harmonik emk'sı şekil 3.8 (c)'deki gibi ifade edilebilir.



Şekil 3.8 Üçgen bağlantıda üçüncü harmonikler

Eğer her fazda $E_3 E_9 \dots$ gibi üç ve üçün katı olan harmonik emk'ları varsa şekil 3.8 (b)'deki voltmetrede

$$V_3 = 3\sqrt{E_3^2 + E_9^2 + \dots} \text{ değeri okunur.}$$

(3.19)

Eğer buradan voltmetre alınıp yerine ampermetre bağlanırsa üçüncü harmonik akımı I_3 (I_9 ' u ihmal edersek) okunur.

Üçgen bağlı transformatörün hatlar arasında üçüncü harmonik bulunmaz. Bunun ispatı:

$$i_{A_3} = I_{m_3} \sin 3\omega t \quad (3.20)$$

$$i_{B_3} = I_{m_3} \sin 3(\omega t - 120^\circ) = I_{m_3} \sin 3\omega t \quad (3.21)$$

$$i_{C_3} = I_{m_3} \sin 3(\omega t - 240^\circ) = I_{m_3} \sin 3\omega t \quad (3.22)$$

ve üçgen bağlantı için faz akımı

$$i_{AB_3} = i_{A_3} - i_{B_3} \quad (3.23)$$

$$I_{AB} = I_{m_3} \sin 3\omega t - I_{m_3} \sin 3\omega t = 0 \quad (3.24)$$

Tekrar belirtirsek, üçüncü harmonik manyetize akım kapalı üçgende akar ama hatlardan akmaz.

Üç ve üçün katı harmonik emk'lar üçgen bağlı sargılardan çıkan hatlar arasında görülmez. Bu nedenle üç ve üçün katı emk'lar tamamen dengelidir. Ayrıca fazlararası bağlı olan gerilim transformatörü ile yanlış ölçümlere neden olabilir.

Örneğin kapalı üçgen bağlı devrede üçüncü harmonik emk'sı E_3 , üçüncü harmonik empedansı Z_3 , I_3 akımı

$$I_3 = \frac{3E_3}{3Z_3} = \frac{E_3}{Z_3} \text{ veya } E_3 = I_3 Z_3 \quad (3.25)$$

Yukarıdanda da anlaşıldığı gibi üçüncü harmonik emk'sı her fazda dengelidir ve her faz için üçüncü harmonik empedans azalması değeri aynıdır. Bu durum üç ve üçün katı tüm harmonikler için aynıdır.

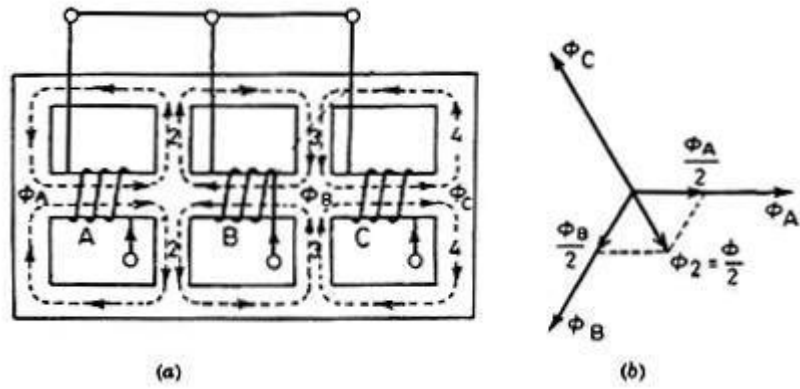
Üç fazlı transformatörlerdeki harmonikler iki kategoriye ayrılır ve bunlara göre harmonik incelemesi yapılır.

1. Her üç fazı birbirinden bağımsız manyetik devreye sahip
2. Her üç fazı da manyetik olarak birbiri ile bağlı ya da ilişkilendirilmiş olan.

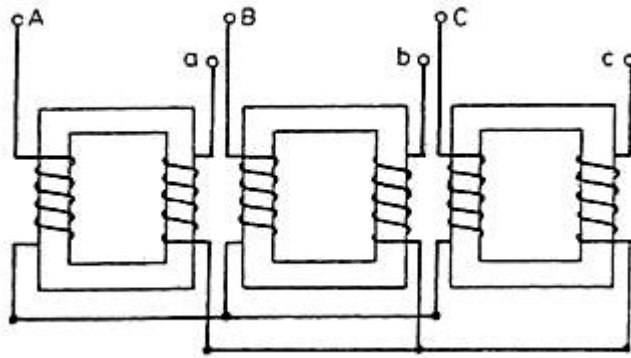
3.3.1.2 Yy Bağlantı (Nötrsüz)

3.3.1.2.1 Bağımsız Manyetik Devreli Transformatörler

Üç fazlı kabuk(mantel) tip transformatörler ve üç adet tek fazlı transformatör bankı bağımsız manyetik devreye sahiptir.



Şekil 3.9 Üç fazlı kabuk(mantel) tip transformatör



Şekil 3.10 Üç fazlı transformatör bankı

Daha önce bahsettiğimiz gibi yıldız bağlı transformatörlerde hatlar arasında harmonik gerilimler bulunmaz fakat faz geriliminde bulunur.

$$i_{A_3} = I_{m_3} \sin 3\omega t \quad (3.26)$$

$$i_{B_3} = I_{m_3} \sin 3\omega t \quad (3.27)$$

$$i_{C_3} = I_{m_3} \sin 3\omega t \quad (3.28)$$

Bu akımlar yıldız noktasına doğru akar veya yıldız noktasından terse doğru akar. Bu nedenle yıldız noktası topraklanmamış trafodan üçüncü harmonik akımları akmaz.

Eğer nötr mevcutsa ;

$$i_n = i_{A_3} + i_{B_3} + i_{C_3} = 3I_{m_3} \sin 3\omega t \quad (3.29)$$

Eğer nötr yoksa i_n sifıra eşit olur.

$$i_n = 3I_{m_3} \sin 3\omega t = 0 \quad (3.30)$$

$$I_{m_3} = 0 \quad (3.31)$$

Yy bağlı nötr noktası topraksız transformatörlerde üçüncü harmonikler hatlar arasından ve fazdan akamaz. Yüksüz halde manyetize akım üçüncü harmoniği içermez fakat yüksek dereceli harmonikleri içerebilir. Bu sayede yıldız bağlantıda manyetize akım yaklaşık olarak sinüse eşittir (yüksek dereceli harmonikleri ihmal edersek). Fakat sinüs dalga manyetize akım tepesi düz olan akı gerektirir, bu akıda üçüncü harmonik akıyı içerir. Transformatörümüz bağımsız manyetik devrelerden oluştuğu için ϕ_3 'e karşı olan relüktans çok küçüktür. Bu nedenle ϕ_1 'e oranla ϕ_3 'ün değeri de büyüktür, bu nedenle akı değeri tam sinüs olmaz. ϕ_3 'ün ϕ_1 'e oranı % 20' yi bulabilir hatta doyuma göre bu değeri geçebilir.

$$\phi = \phi_{m_1} \sin \omega t + \phi_{m_3} \sin 3\omega t + \phi_{m_5} \sin 5\omega t + \dots \quad (3.32)$$

$$e = -\frac{d\phi}{dt} \quad (3.33)$$

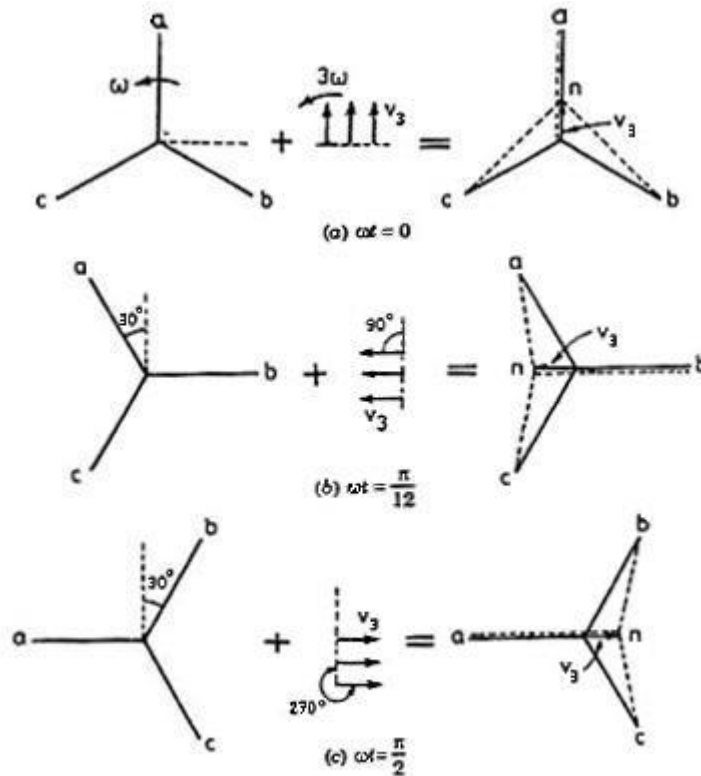
$$e = -\omega(\phi_{m_1} \cos \omega t + 3\phi_{m_3} \cos 3\omega t + 5\phi_{m_5} \cos 5\omega t + \dots) \quad (3.34)$$

Eşitlik 3.34'den, $3f$ frekansta %20 ϕ_3 , üçül frekans emk'sı temel frekansta endüklenen emk'nın %60'ına kadar çıkabilir. Toplam emk maksimum değeri temel frekans emk'sının %160'ına varır, bu da izolasyonu tehdit eder. Bu nedenle bağımsız devreli Yy bağlı transformatörler yüksek gerilim sistemlerinde kullanılmamalıdır. Hat gerilimleri üçüncü harmonik gerilimlerini içermediği için hat gerilimleri sinüsoidaldir.

ϕ_3 akısı ϕ_1 'in %20'si iken temel frekansın faz geriliminin rms değeri $\sqrt{1^2 + 0.6^2} = 1.17$

katıdır.

Faz geriliminin $\sqrt{3}$ katı olan hat gerilimi bağıntısı Yy bağlı manyetik devresi bağımsız nötrsüz sistemler için doğru değeri vermeyebilir.



Şekil 3.11 Nötr noktasında oluşan osilasyonlar

Üçüncü harmoniklerin diğer etkisi ise şekil 3.11’de görüldüğü gibi $3f$ frekansında nötrde osilasyona sebep olur. Şekilde üç farklı zamanda temel ve üçüncü harmonik emk’ları görülmektedir. Burada üçüncü harmonik gerilimi de her üç fazın gerilimiyle eş fazdadır. Temel gerilimin ve üçüncü harmonik gerilimin bileşkesi noktasal çizgilerle ifade edilmiştir.

$\omega t = 0$, $\omega t = \frac{\pi}{12}$, $\omega t = \frac{\pi}{2}$ anlarında v_3 fazörü 3ω rad/s döner, temel fazörler ω rad/s’ de döner. Yani temel frekans fazörü 30° dönerse v_3 fazörü $3 \times 30^\circ = 90^\circ$ döner (Şekil 3.11 (b)).

Eğer transformatör büyük bir üç fazlı sisteme bağlanırsa a,b,c’ nin temel frekans fazörleri kendi konumlarını değiştiremez. $3f$ frekansındaki nötr ise şekil 3.11’deki gibi konum değiştirir. Osilasyon yapan nötr, faz nötr geriliminde dalgalanmalara sebep olur.

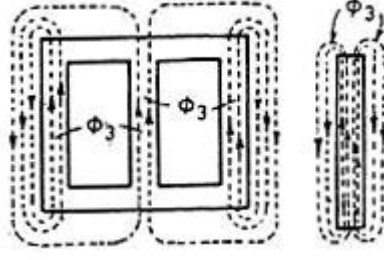
Şekil 3.11’den aşağıdaki sonuçlara varırız.

- Fazdaki maksimum gerilim V_1 ve V_3 konumuna göre $V_{m_1} + V_{m_3}$ ’ e eşittir. Örneğin şekil 3.11 (b)’de B faz sargısında maksimum gerilim oluşurken şekil 3.11 (c)’de A faz sargısında maksimum gerilim oluşur. Buradan da anlaşılmaktadır ki faz gerilimleri ek gerilim streslerine maruz kalmaktadır, bu da izolasyon için tehlikeli olabilir.
- Hat gerilimleri etkilenmeden kalır, fakat faz nötr gerilimi $\sqrt{V_1^2 + V_3^2}$ olur. Buradan da hat geriliminin $\sqrt{3}$ katı olmadığı görülür.(Yy bağlı bağımsız manyetik devreli nötr topraklı transformatörlerde)

3.3.1.2.2 Birleşik veya Kuplajlı Manyetik Devreli Transformatör

Üç fazlı çekirdek tip transformatör, üç bacaklı transformatör olarak da nitelendirilebilen bu transformatörlerin manyetik devresinde üç fazda birbiriyle ilişkilidir. Başka bir deyişle bir faza ait manyetik akı devresine diğer fazlara ait bacaklardan ve ayaklardan tamamlar.

Her an için üç ve üçün katı harmonikler büyüklük olarak birbirlerine eşittir. Bu nedenle bir bacaktaki üçüncü harmonik diğer iki bacadan dönemez, çünkü aynı büyüklükte diğer iki bacadan dönen akı ile karşılaşır. Yani üçüncü harmonik akılar devresini şekil 3.12’deki gibi hava üzerinden, çekirdeğin etrafındaki yağ üzerinden tamamlar. Hava yüksek relüktansa sahip olması nedeniyle üçüncü akılar ve bu nedenle üçüncü emk’lar faz gerilimleri içinde çok küçük bir yer kaplar üç fazın gerilimi de eğer yüksek değerli diğer harmonikler yoksa sinüs olur.



Şekil 3.12 Üç fazlı çekirdek tip transformatörde üç ve üçül harmonikler için yollar

Üçül akılar çelik tank, borular, vida ve somunların sağladığı en düşük relüktanslı yolu izlemeye meyillidirler.

Üçül frekanslı akı bu nedenle girdap(eddy) akımı kayıplarında artışa sebep olup transformatörün verimliliğini azaltır. Bu nedenle üçül harmonik akımlarını bastırabilmek için bir çaba harcanmalıdır. Bu yöntemlerden biri tüm transformatörün etrafına iletken bir halka koymaktır. Bu halkalar üçül frekansın endüklediği akımlar üçüncü harmonik akısına büyük oranda karşı koyar.

Eğer tankı çelik yerine alüminyumdan yaparsak üçül harmoniklere karşı sunulan relüktans daha büyük olacaktır. Bunun sonucu olarak üçül akılar küçük ve alüminyum tankta endüklenen üçül frekanslı akım daha da azalacaktır. Bu yöntem iletken halkaya göre üçüncü harmonik akıya daha fazla karşı koyacaktır. Sonuçta çelik tanklı iletken halkalı trafoya göre verimi daha yüksek olacak ve daha az ısınacaktır.(Bu nedenle alüminyum tanklı üç fazlı transformatörler bu sıralar daha çok tercih edilebilir.)

3.3.1.3 Yy Nötr Bağlantılı

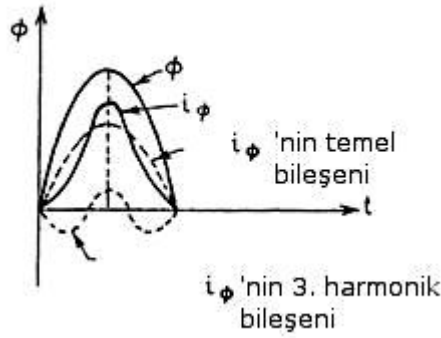
Eğer generatör ve Yy bağlı transformatörün nötr noktası topraklı ise üçüncü harmonik akımları toprak üzerinden geri dönebilir. Bu nedenle üçüncü harmonik manyetize akım transformatörün faz sargılarında olduğu gibi hatlarda da bulunur. Bunun sonucu olarak akı bu nedenle faz gerilimleri de sinüstür. Hat gerilimi faz geriliminin $\sqrt{3}$ katıdır ve nötr stabilize edilir. Topraktan geçen üçüncü harmonik akım hatlardan ve faz sargılarından geçen üç katıdır.

Hatlardan geçen üçüncü harmonik akım hatlara paralel olan haberleşme devreleriyle etkileşime girebilir.

3.3.1.4 Dy Bağlantı (Bağımsız Manyetik Devreye Sahip)

Kaynak tarafından Dy bağlantılı transformatörlere uygulanan sinüsoidal gerilim hatlarda da sinüsoidal manyetize akım geçmesine sebep olur. Bu sinüsoidal manyetize akım transformatör

sargılarından geçer, üçüncü harmonik akıyı içeren tepesi düz akı formu oluşturur. Üçü frekanslı akı üçgen sargının her üç fazında da aynı yönlü üçü frekanslı emk'yı oluşturur. Bu emk'lar kapalı üçgende üçüncü harmonik akımı oluştururlar. Bu nedenle transformatör sargı akımı üçüncü harmonik manyetize akımı artı sinüsoidal manyetize akımdan oluşur, bileşke akımın akım dalga şekli şekil 3.13'deki gibi olur.



Şekil 3.13 i_{ϕ} 'nin temel ve üçüncü harmonik bileşenleri

Dy bağlantıda hatlardaki manyetize akı sadece temel bileşeni içerir.(5. ve 7. harmonikler varsa onları da içerir). Fakat kapalı üçgende temel bileşen + üçüncü harmonik bileşenini içerir (5. ve 7. harmonikler varsa onları da içerir).

Kapalı üçgende üçüncü harmonik manyetize akım sadece üçüncü harmonik emk oldukça akabilir, bu nedenle üçüncü harmonik akı gereklidir. Φ_3 akısı sekondere de yansır. Sekonderde oluşan bu üçüncü harmonik emk çok küçük bir miktardır (faz geriliminin %1 ve aşağısı kadar). Sekonder hat gerilimlerinde üçüncü harmonik emk mevcut değildir. Bu sayede sekonderdeki hat gerilimi faz geriliminin yaklaşık olarak $\sqrt{3}$ katına eşittir ve sekonder yıldız noktası toprak potansiyeli sabittir.

3.3.1.5 Yd Bağlantı

Üçüncü harmonik akıyı üretebilmek için sinüsoidal manyetize akı tepesi düz akı şekline ihtiyaç duyar. Bu üçüncü harmonik akı primer ve sekonder sargılarda üçüncü harmonik emk'yı endükler. Sekonder üçgen bağlı olduğundan üçüncü harmonik emk üçüncü harmonik akımda artışa neden olur. Üçgen bağlı sekonderde manyetize akı sadece üçüncü harmonik akımdan oluşur. Primerdeki temel frekans akımları ve üçgen bağlı sekonderdeki üçüncü harmonik akımı beraber hareket ederek çekirdekten bir akı oluştururlar.

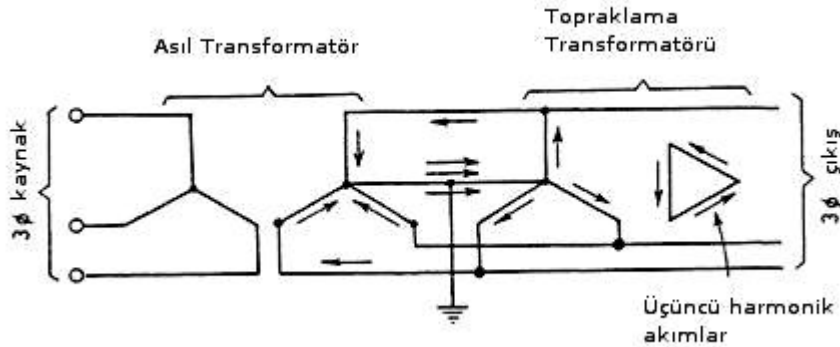
Manyetize akım temel akım ve üçüncü harmonik akımdan oluştuğu için akı sinüs olmalıdır. Böylece primer ve sekonderi bağlayan manyetize akı sinüstür. Primer ve sekonder

faz emkalarında üçüncü harmonik mevcut değildir ve dalga şekli yaklaşık olarak tam bir sinüstür. Yd bağlantıda primer faz gerilimi %1 ve daha az bir oranda üçüncü harmonik emksi içerebilir. Primer ve sekonder hat gerilimlerinde de üçüncü harmonik bulunmaz.

3.3.1.6 Dd Bağlantı

Dd bağlı transformatörde hat akımı sinüsoidal fakat primer ve sekonder üçgenlerde üçüncü harmonik manyetize akım akar. Gerekli olan üçüncü harmonik akı primer ve sekonder üçgenlerde dolaşan sirkülasyon akımları sayesinde oluşur. Üçüncü harmonik manyetize akımlar primer ve sekonder üçgenlere üçül frekans kaçak empedanslarına göre ters orantılı olarak dağılırlar. Dd bağlantıda bileşke akı üçüncü harmonik akının çok küçük olması nedeniyle sinüse çok yakındır.

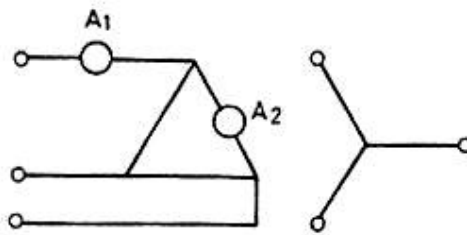
Sekonderi üçgen bağlı olan güç transformatörlerinde arıza akımını sınırlamak için nötr direnci olmaması nedeniyle topraklama transformatörü kullanılmaktadır. Aynı zamanda topraklama transformatörü üçül harmonikleri bastırılmasında etkindir. (Şekil 3.14)



Şekil 3.14 Üçül harmonikleri bastırmak için yıldız-üçgen topraklama transformatörü

3.3.2 Sayısal Örnek

Üç adet birbirine eş birim oranlı transformatörden oluşan transformatör bankı şekil 3.15’de verilmiştir. Yüksüz halde iken A_1 ’den 0.75 A, A_2 ’den 0.46 A okunmaktadır.



Şekil 3.15 Üç adet birbirine transformatörden oluşan transformatör bankı

- a) Eğer sekonder de üçgen bağlı olsaydı, A_1 ve A_2 ampermetrelerinde ne gibi değişiklikler olurdu?
- b) Eğer transformatör yıldız/üçgen bağlı olsaydı, primer yıldız ve sekonder kapalı üçgende akımlar ne olurdu?
- c) Eğer transformatör dört iletken bağlantısı ile yıldız bağlı olsaydı, hattaki ve nötr iletkenindeki akımlar ne olurdu?

Çözüm:

A_2 de I_1, I_3, I_5 ve I_7 akımlarının bileşkesi okunur.

$$\sqrt{I_1^2 + I_3^2 + I_5^2 + I_7^2} = 0,46 \text{ A}$$

Üçüncü harmonik akımı üçgende akar ama hatlara geçmez.

$I_{hat} = A_1$ ampermetresinden okunan değerden

veya

$$\sqrt{3} \cdot \sqrt{I_1^2 + I_5^2 + I_7^2} = 0,75$$

$$\cdot \sqrt{I_1^2 + I_5^2 + I_7^2} = \frac{0,75}{\sqrt{3}} = 0,433 \text{ A}$$

$$I_3 = \sqrt{(0,46)^2 - (0,433)^2} = 0,1553 \text{ A}$$

a) Sekonderde kapalı üçgen olduğunda üçüncü harmonik akım primer ve sekonder üçgenden akar. Üçüncü harmonik akı toplam akının sinüsoidal olması için gerekli olduğundan, primerden ve sekonderden akan üçüncü harmonik akımların bileşke etkisinden oluşturulur, A_2 ' den okunan değer düşer. A_1 ' in değeri ise değişmeden kalır.

b) Primer yıldız bağlı olursa A_1 ampermetresinden I_1, I_5 ve I_7 'nin bileşke değeri okunur.

$$\text{Primer yıldızdan akan akım} = \sqrt{I_1^2 + I_5^2 + I_7^2} = \frac{0,75}{\sqrt{3}} = 0,433 \text{ A}$$

Sekonder kapalı üçgende E_1, E_5 ve E_7 'nin bileşkesi sıfır olur. Fakat üçüncü harmonik emk'lerinin bileşke değeri $3 E_3$ olur. Böylece sekonderdeki kapalı üçgenden sadece üçüncü harmonik akımları akar.

Sekonder kapalı üçgenden akan akım

$$I_3 = 0,1553 \text{ A}$$

c) 4 iletken bağlantısıyla yıldız/yıldız bağlıyken, nötrde 3 I_3 akımı akar.

Nötrden akan akım;

$$= 3 I_3$$

$$= 3 (0,1553) = 0,4659 \text{ A}$$

Hattaki akım ise I_1, I_3, I_5 , ve I_7 'nin bileşesidir, çünkü üçüncü harmonik akım yolunu nötr den tamamlar.

$$\begin{aligned} \text{Hat akımı} &= \sqrt{I_1^2 + I_3^2 + I_5^2 + I_7^2} \\ &= 0,46 \text{ A olur.} \end{aligned}$$

3.3.3 Transformatörlerdeki Harmoniklerin Dezavantajları

3.3.3.1 Akım Harmonikleri

- $R I^2$ kayıpları üzerindeki etkisi

Dolaşan harmonik akımlar transformatör sargılarında ilave omik kayıplara ve bu nedenle de sıcaklık artışına ve verimin düşmesine yol açar.

- Haberleşme devreleriyle elektromanyetik etkileşimi

Harmonik akımla iletim hatlarının iletkenleri etrafında harmonik akı oluştururlar. Bu harmonik akılar bu hatlara paralel giden haberleşme devreleri üzerinde emk endüklerler. Bu oluşan girişim koruma cihazlarının hatalı çalışmasına sebep olabilir(Pilot kablolar kullanılırsa).

- Çekirdek kayıplarına olan etkisi

Emk tepe noktasındayken akı tepesi düzdür. Bu nedenle histerizis kaybı yaklaşık olarak $(akı)^2$ ile orantılı olarak azalır. Girdap(eddy) akım kayıpları $(emk)^2$ ile orantılı olarak artar. Çekirdek kayıplarının büyük bir kısmını histerizis kayıpları oluşturduğu için toplam çekirdek kaybı düşer. Eğer emk nın tepe noktasında ise çekirdek kayıpları artar. Eğer akının tepe noktası düz ise transformatör sargılarında üçüncü harmonik akımları akmıyor demektir.

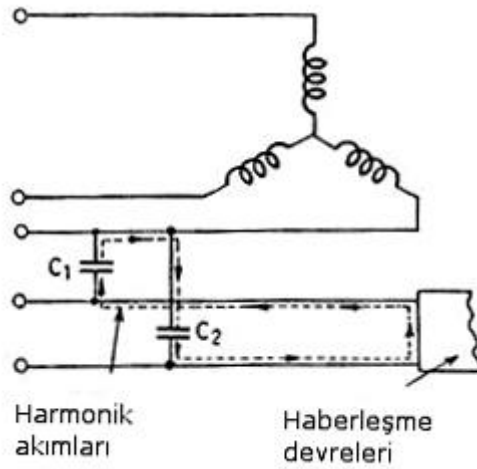
3.3.3.2 Gerilim Harmonikleri

- İzolasyon üzerindeki gerilim stresi

Eğer transformatör sargıları üzerindeki gerilim değeri nominalin üzerine çıkarsa transformatör izolasyonu yüksek gerilim stresine maruz kalır ve dielektrik kayıplar artar. İzolasyonun ömrü kısalmır ve transformatör veriminde düşüş yaşanır. Nötrü topraksız yıldız yıldız bağlı transformatörde faz gerilimleri normal değerden yüksektir ve baskın üçüncü harmonik emk içerir. Bu transformatörde izolasyon ömrü azdır ve verim düşer.

- Haberleşme devreleriyle elektrostatik girişim

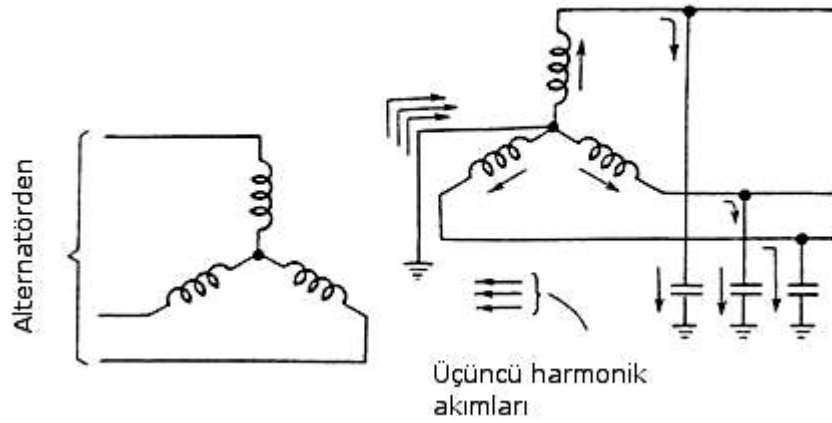
İletim hatlarına paralel olarak giden haberleşme hatları şekil 3.16’da gösterildiği gibi kapasitif yüklü olabilir. $C_1 + C_2$ kapasitansı haberleşme devresinin endüktansı ile seri devre olur. $C_1 + C_2$ kapasitansı endüktif reaktansa herhangi bir harmonik frekansta iken eşit olursa seri rezonans meydana gelir. Harmonik akımın artış da haberleşme devresi ile etkileşimin artmasına sebep olur.



Şekil 3.16 Haberleşme devreleriyle elektrostatik girişim olayı

- Yüksek rezonans gerilimleri

Sekonderi topraklı yıldız yıldız bağlı transformatör uzun iletim hattı yada kabloya bağlı ise bu durumda rezonans meydana gelebilir. Transformatör endüktansı ile iletim hattı veya kablo kapasitansı ile şekil 3.17’ deki gibi seri devre olur.



Şekil 3.17 Uzun bir hat ya da kabloya bağlanmış, yıldız/yıldız (sekonderi topraklı) bağlı transformatördeki seri rezonans olayı

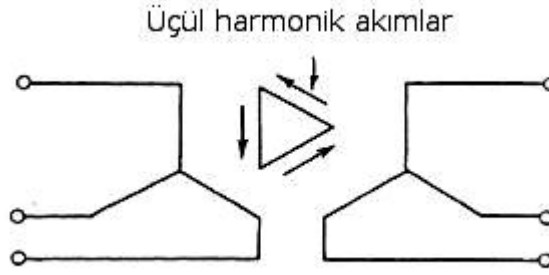
Transformatörün manyetize reaktansı ile hattın kapasitif reaktansı $3f$ frekansında birbirine eşit olursa seri rezonans oluşur. Bu nedenle hat ile toprak arasında üçüncü harmonik frekansında çok büyük uyarım akımları dolaşır. Bu üçüncü harmonik akımlar hat ile toprak arasında tehlikeli seviyelerde üçüncü harmonik gerilimler oluşur. Bu seri rezonans omik kayıpları artırır, yüksek üçüncü harmonik gerilimler çekirdek ve dielektrik kayıpları artırır. Eğer böyle bir durum oluşursa sistem dikkatlice incelenmelidir. Özellikle ilk enerjilenme anında istenmeyen açmalara sebep olabilir. (ferrorezonans etkisi ile)

3.4 Tersiyer(Tertiary) veya Stabilize Sargılar

Transformatörün primer ve sekonder sargılarına ilaveten bazen üçüncü bir sargı bulunabilir, bu sargıya tersiyer veya stabilize sargı denir.

Tersiyer sargılar genellikle üçgen bağlı olur ve çıkış terminalleri transformatörün dışına çıkarılmaz. Tersiyer sargıların kullanım amaçları aşağıdaki gibidir.

- Üçüncü harmonik manyetize akım üçgen bağlı tersiyer sargıdan akar (şekil 3.18). Bunun sonucunda çekirdek akısı ve emknın sinüs olması sağlanır.
- Tersiyer sargılı yıldız/yıldız bağlı üç fazlı transformatör bankı ile tek fazlı yükler beslenebilir (üç adet tek fazlı tersiyer sargılı transformatör ile).
- Faz- toprak arızasında tersiyer sargı koruma cihazlarının çalışabilmesi için bir miktar arıza akımının üzerinden akmasına müsaade eder.



Şekil 3.18 Tersiyer sargılı transformatör

Tersiyer sargı terminalleri tankın dışına çıkarılırsa bir trafo merkezi, ev veya bir güç faktörü düzeltme cihazları (kompanzasyon, vb), beslemesinde de kullanılabilir.

Tersiyer sargının oranı müsaade edilen sıcaklık artış limitine göre yapılır. Tersiyer sargının tasarımı da arıza durumlarına göre gerçekleştirilir. Çünkü bu durumların tersiyer sargı üzerinde daha olumsuz etkileri vardır.

3.5 Üç Fazlı Sistemler için Transformatör Seçimi

Üç adet tek fazlı transformatörden oluşan bank ile üç fazlı çekirdek tip transformatörün kıyaslanması aşağıda verilmiştir.

3.5.1 Üç Adet Tek Fazlı Transformatör Bankı

- 1- Daha pahalıdır, çünkü üç ayrı tank olduğundan, daha fazla demir, daha fazla yağ, daha fazla yardımcı aparatlar kullanılır.
- 2- Yıldız/ üçgen bağlantıda yüksek gerilim tarafında dışarıya altı adet uç çıkarmak lazım. Bu nedenle altı tane buşing kullanmak gerekir ve toplam maliyeti arttırır.
- 3- Daha geniş bir alanı kaplar, toplam arazi maliyeti artar.
- 4- Tesis aşaması daha kolaydır. (Nakliye ve konumlandırma)
- 5- Eğer bir transformatör hasar görürse arızalı fazdaki transformatör kolayca değiştirilir.
- 6- Üç faz da ayrık olduğu için tamiri daha kolaydır.
- 7- Daha fazla demir kullanıldığından daha fazla demir kaybı olur. Dolayısıyla verimi daha düşüktür.
- 8- Yıldız/ yıldız bağlı nötrü topraksız transformatör, tek fazlı bir yükü besleyemez, çünkü faz gerilimlerinde büyük dengesizlikler oluşur.

3.5.2 Üç Fazlı Çekirdek Tip Transformatör

- 1- Daha ucuzdur, çünkü daha kısa manyetik yol, daha küçük hacimde demir, küçük tank ve daha az yağ gerekir.
- 2- Yıldız üçgen bağlantıda bağlantılar tankın içinden yapılmış olduğu için, yüksek gerilim tarafında üç adet buşing yeterlidir bu da maliyeti düşürür.
- 3- Daha az yer kaplar toplam arazi miktarı ve maliyeti azalır.
- 4- Tesis aşaması zordur. (Nakliye ve konumlandırma)
- 5- Bir faz hasar görürse komple transformatör değiştirilmelidir, bu nedenle yedek parça ve işçilik maliyeti artar.
- 6- Tamiri daha zordur. Bir fazında bir hasar oluşmussa tüm transformatör nakil edilir, tüm yağ boşaltılır, tüm destek ekipmanları sökülür.
- 7- Daha az demir olduğundan demir kayıpları daha azdır ve verimi yüksektir.
- 8- Yıldız/ yıldız bağlı nötrü topraksız transformatör, tek fazlı bir yükü besleyebilir, faz gerilimlerinde büyük dengesizlikler oluşmaz.

3.6 Yıldız Bağlantı İle Üçgen Bağlantı Arasındaki Seçimde Önemli Olan Noktalar

- Yıldız bağlantıda nötr noktası topraklandığında sargılar ile çekirdek (gövde) arasındaki gerilim hat geriliminin $\frac{1}{\sqrt{3}}$ ' ü dür. Bu nedenle gerekli olan izolasyon küçüktür.
- Üçgen bağlantıda faz toprak arasında sargı ile çekirdek arasındaki gerilim hat gerilimine eşittir. Bu nedenle transformatör daha fazla izolasyona ihtiyaç duyar. Teknik açıdan bir sargının üçgen olmasında fayda vardır. Kapalı üçgen üçüncü harmonik manyetize akımların dolaşmasına izin verir, böylece akının sinüs olması sağlanır. Buna göre faz gerilimleri de sinüs olur.

Üçgen/ üçgen bağlı transformatörlerin alçak gerilim sistemleri için kullanılması aşağıdaki avantajları getirir.

- a) Yük düşük ise iki transformatör açık üçgen olarak işletilebilir. Yük arttıkça transformatör kapalı üçgene geçebilir.
- b) Bir transformatörde arıza çıkarsa, bir transformatör devreden çıkarılır, kalan iki faz sistemi besleyebilir. Eğer transformatör üç bacaklı çekirdek tip transformatör ise hasarlı sargı açık transformatör tankı açılıp açık devre edilmelidir.

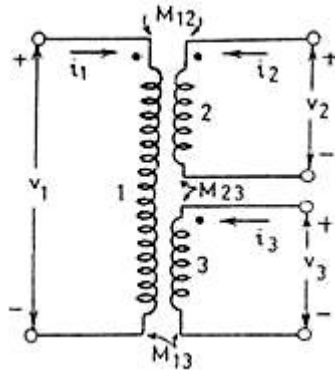
- c) Üçgen üçgen bağlı transformatör, tekrardan üçgen/yıldız olarak bağlantılandırılabilir, iletim hattının gerilimi %73,2 artar, iletilen güç değişmez. Dd bağlantının dezavantajlı tarafı toprağının olmamasıdır.

Dağıtım transformatörlerinde ise üçgen/ yıldız bağlantı gereklidir, çünkü fazlı yükler ve üç fazlı yükler sorunsuzca beslenebilmektedir. Primer sargı üçgen olduğundan her bir primer fazı diğer iki fazı etkilemeden kaynaktan güç çekebilmektedir. Bu sayede primer, sekonderden çekilen akımı karşılayabilmek için istenilen akımı verebilir.

3.7 Üç Sargılı Transformatörün Eşdeğer Devresi

Bu bölümde üç sargılı transformatörün eşdeğer devresi, kuplaj devresi bakış açısıyla incelenecektir. 1, 2, 3 sırasıyla primer, sekonder ve tersiyer sargıları ifade etmektedir.

3.7.1 Kuplaj Devresi Bakış Açısıyla



Şekil 3.19 Üç sargılı transformatörde akım yönleri gösterimi

Şekil 3.19 'da üç sargılı transformatör gösterilmektedir. Akımın girişi nokta tarafından olduğu kabul edilmiştir. Her sargı için gerilim denklemi bir direnç, bir self endüktans ve iki karşılıklı endüktanstan oluşur. 1 ve 2 nolu sargılar arasındaki karşılıklı endüktans 1 nolu sargıdan 2 ye doğru veya 2' den 1' e doğru aynıdır. ($M_{12} = M_{21}$). L ve M harfleri self ve karşılıklı endüktansı ifade eder.

$$v_1 = r_1 i_1 + L_1 \frac{di_1}{dt} + M_{12} \frac{di_2}{dt} + M_{13} \frac{di_3}{dt} \quad (3.35)$$

$$v_2 = r_2 i_2 + L_2 \frac{di_2}{dt} + M_{12} \frac{di_1}{dt} + M_{23} \frac{di_3}{dt} \quad (3.36)$$

$$v_3 = r_3 i_3 + L_3 \frac{di_3}{dt} + M_{13} \frac{di_1}{dt} + M_{23} \frac{di_2}{dt} \quad (3.37)$$

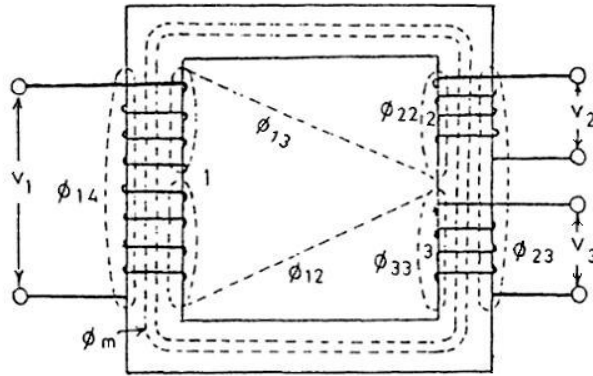
M_{12}, M_{13}, M_{23} karşılıklı endüktanslarının önünde artı işaretinin olmasının anlamı, her üç sargının akımlarının (i_1, i_2, i_3) aynı yönde olması anlamındadır. Eğer gerilim ve akımları sinüsoidal kabul edip doyumu ihmal edersek, eşitlik 3.35 , 3.36 ve 3.37' yi fazörel olarak aşağıdaki gibi yazabiliriz.

$$\bar{V}_1 = r_1 \bar{I}_1 + j\omega L_1 \bar{I}_1 + j\omega M_{12} \bar{I}_2 + j\omega M_{13} \bar{I}_3 \quad (3.38)$$

$$\bar{V}_2 = r_2 \bar{I}_2 + j\omega L_2 \bar{I}_2 + j\omega M_{12} \bar{I}_1 + j\omega M_{23} \bar{I}_3 \quad (3.39)$$

$$\bar{V}_3 = r_3 \bar{I}_3 + j\omega L_3 \bar{I}_3 + j\omega M_{13} \bar{I}_1 + j\omega M_{23} \bar{I}_2 \quad (3.40)$$

Çekirdek manyetik malzemeden oluştuğundan, self ve karşılıklı endüktanslar sabit değildir çünkü üç fazın herhangi birinden akan akımlar nedeniyle çekirdek doyuma gidebilir. Bununla birlikte akı- mmk arasındaki ilişki lineer kabul edildiğinden, self ve karşılıklı endüktans sabit olur.



Şekil 3.20 Üç sargılı transformatörde manyetik akı gösterimi

Şekil 3.20'de sargı 1'in toplam akısı 1, 2 ve 3 nolu sargıların karşılıklı akısı ϕ_m + sargı 1 kaçak akısı ϕ_{11} + sargı 1 ve 2 nin kaçak akısı ϕ_{12} + sargı 1 ve 3 ün kaçak akısı ϕ_{13} dur.

$$\phi_1 = \phi_m + \phi_{11} + \phi_{12} + \phi_{13} \quad (3.41)$$

$$\phi_2 = \phi_m + \phi_{22} + \phi_{12} + \phi_{23} \quad (3.42)$$

$$\phi_3 = \phi_m + \phi_{33} + \phi_{13} + \phi_{23} \quad (2.43)$$

Self endüktanslar;

$$L_1 = M + l_{11} + l_{12} + l_{13} \quad (3.44)$$

$$L_2 = M + l_{22} + l_{12} + l_{23} \quad (3.45)$$

$$L_3 = M + l_{33} + l_{13} + l_{23} \quad (3.46)$$

M karşılıklı endüktanstır, çekirdekte sınırlıdır ve her üç sargıyla ilişkilidir. l_{11}, l_{12}, l_{22} ilgili akıyla ilişkili kaçak endüktanslardır.

Her endüktanstan $j\omega M$ 'i çıkarırsak ve bu çıkarılanı sona eklersek;

$$\bar{V}_1 = r_1 \bar{I}_1 + j\omega(L_1 - M)\bar{I}_1 + j\omega(M_{12} - M)\bar{I}_2 + j\omega(M_{13} - M)\bar{I}_3 + j\omega M(\bar{I}_1 + \bar{I}_2 + \bar{I}_3) \quad (3.47)$$

$$\bar{V}_2 = r_2 \bar{I}_2 + j\omega(L_2 - M)\bar{I}_2 + j\omega(M_{12} - M)\bar{I}_1 + j\omega(M_{23} - M)\bar{I}_3 + j\omega M(\bar{I}_1 + \bar{I}_2 + \bar{I}_3) \quad (3.48)$$

$$\bar{V}_3 = r_3 \bar{I}_3 + j\omega(L_3 - M)\bar{I}_3 + j\omega(M_{13} - M)\bar{I}_1 + j\omega(M_{23} - M)\bar{I}_2 + j\omega M(\bar{I}_1 + \bar{I}_2 + \bar{I}_3) \quad (3.49)$$

i_1, i_2, i_3 akımlarının oluşturduğu karşılıklı akı ϕ_m

$$\phi_m = M(i_1 + i_2 + i_3) \quad (3.50)$$

Per unit sistemde (her sargı bir sarımdan oluşmakta) karşılıkları akıların oluşturduğu emk

$$\begin{aligned}
 e &= \frac{d}{dt}(\phi_m) = \frac{d}{dt} M(i_1 + i_2 + i_3) \\
 &= pM(i_1 + i_2 + i_3)
 \end{aligned} \tag{3.51}$$

RMS değeri;

$$E = j\omega M(\bar{I}_1 + \bar{I}_2 + \bar{I}_3) \tag{3.52}$$

Bu emk her üç faz içinde aynı büyüklüklerde fakat endüklenen emk nın asıl değeri her sargıdaki sarım değerine de bağlıdır.

$\omega(L_1 - M)I_1$ kaçak akı tarafından ($= \phi_{11} + \phi_{12} + \phi_{13}$) 1 nolu sargıda endüklenen gerilimdir. Bu kaçak akı havadan dolaşmaktadır, doyuma ulaşmaz ve kaçak reaktans $\omega(L_1 - M)$ sabit kabul edilir. $\omega(L_1 - M)$ ' ı self kaçak reaktans olarak adlandırılır. 1. ve 2. sargılar arasındaki karşılıklı endüktans M_{12} karşılıklı akı $\phi_m + \phi_{12}$ ' den dolayı oluşmaktadır. $\omega(M_{12} - M)$ sargı 1-2 arasındaki karşılıklı kaçak reaktans olarak adlandırılır. ϕ_{12} akısı havadan dolaşır bu nedenle $\omega(M_{12} - M)$ kaçak reaktansı sabit olarak kabul edilebilir. Kaçak reaktansları ifade edersek

$$\omega(L_1 - M) = x_1' \text{ sargı 1'in self-kaçak reaktansı}$$

$$\omega(L_2 - M) = x_2' \text{ sargı 2'in self-kaçak reaktansı}$$

$$\omega(L_3 - M) = x_3' \text{ sargı 2'in self-kaçak reaktansı}$$

$$\omega(M_{12} - M) = x_{12} \text{ veya } x_{21} \text{ sargı 1 ve 2 arasındaki karşılıklı kaçak reaktans}$$

$$\omega(M_{23} - M) = x_{23} \text{ veya } x_{32} \text{ sargı 2 ve 3 arasındaki karşılıklı kaçak reaktans}$$

$$\omega(M_{13} - M) = x_{13} \text{ veya } x_{31} \text{ sargı 3 ve 1 arasındaki karşılıklı kaçak reaktans}$$

eşitlik 3.38, 3.39, 3.40'ı aşağıdaki gibi yazabiliriz :

$$\bar{V}_1 = r_1 \bar{I}_1 + jx_1' \bar{I}_1 + jx_{12} \bar{I}_2 + jx_{13} \bar{I}_3 + \bar{E} \quad (3.53)$$

$$\bar{V}_2 = r_2 \bar{I}_2 + jx_2' \bar{I}_2 + jx_{12} \bar{I}_1 + jx_{23} \bar{I}_3 + \bar{E} \quad (3.54)$$

$$\bar{V}_3 = r_3 \bar{I}_3 + jx_3' \bar{I}_3 + jx_{13} \bar{I}_1 + jx_{23} \bar{I}_2 + \bar{E} \quad (3.55)$$

şeklinde yazılır.

Eşitlik 3.53, 3.54 ve 3.55'den $\bar{V}_1 - \bar{V}_2, \bar{V}_1 - \bar{V}_3$ aşağıdaki gibi elde edilir:

$$\bar{V}_1 - \bar{V}_2 = r_1 \bar{I}_1 - r_2 \bar{I}_2 + j(x_1' - x_{12}) \bar{I}_1 - j(x_2' - x_{12}) \bar{I}_2 + j(x_{13} - x_{23}) \bar{I}_3 \quad (3.56)$$

$$\bar{V}_1 - \bar{V}_3 = r_1 \bar{I}_1 - r_3 \bar{I}_3 + j(x_1' - x_{13}) \bar{I}_1 - j(x_{23} - x_{12}) \bar{I}_2 + j(x_3' - x_{13}) \bar{I}_3 \quad (3.57)$$

Üç sargılı transformatörler için mmk;

$$\bar{F}_1 + \bar{F}_2 + \bar{F}_3 = \bar{F}_0 \quad (3.58)$$

$\bar{F}_0$ = uyartım mmk'sı

Eğer akımlar tek sargı tarafında gösterilidiğinde uyartım akımı ihmal edilir. 3.58 eşitliği

$$\bar{I}_1 + \bar{I}_2 + \bar{I}_3 = 0 \quad (3.59)$$

haline gelir.

Eşitlik 3.59 'nın yardımıyla, eşitlik 3.56'daki $\bar{I}_3$ 'ü yok edersek ;

$$\bar{V}_1 - \bar{V}_2 = r_1 \bar{I}_1 - r_2 \bar{I}_2 + j(x_1' - x_{12}) \bar{I}_1 - j(x_2' - x_{12}) \bar{I}_2 - j(x_{13} - x_{23})(\bar{I}_1 + \bar{I}_2) \quad (3.60)$$

Eşitlik 3.57'den de $\bar{I}_2$ 'yi yok edersek;

$$\bar{V}_1 - \bar{V}_3 = r_1 \bar{I}_1 - r_3 \bar{I}_3 + j(x_1' - x_{13}) \bar{I}_1 + j(x_{23} - x_{12})(\bar{I}_1 + \bar{I}_3) - j(x_3' - x_{13}) \bar{I}_3 \quad (3.61)$$

$$= [r_1 + j(x_1' - x_{13} - x_{12} + x_{23})] \bar{I}_1 - [r_3 + j(x_3' - x_{13} - x_{23} + x_{12})] \bar{I}_3 \quad (3.62)$$

Daha önce belirtildiği gibi x_1' için $\phi_{11} + \phi_{12} + \phi_{13}$, x_{12} için ϕ_{12} , x_{13} için ϕ_{13} ve x_{23} için ϕ_{23} hesaba katılır. Bu nedenle eşitlik (3.60)'deki $x_1' - x_{12} - x_{13}$ ve eşitlik (3.61) için ϕ_{11} hesaba katılır ve

$$x_1' - x_{12} - x_{13} = x_{11} \quad (3.63)$$

Benzer olarak eşitlik (3.54)'deki $x_2' - x_{13} - x_{23}$ kaçak akı ϕ_{22} için hesaba katılır ve

$$x_2' - x_{12} - x_{23} = x_{22} \quad (3.64)$$

Eşitlik (3.55)'deki $x_3' - x_{13} - x_{23}$ kaçak akı ϕ_{33} için hesaba katılır ve

$$x_3' - x_{13} - x_{23} = x_{33} \quad (3.65)$$

Yukarıdaki ilişkilerden, eşitlik (3.60) ve (3.61) aşağıdaki gibi yazılabilir:

$$\bar{V}_1 - \bar{V}_2 = [r_1 + j(x_{11} + x_{23})] \bar{I}_1 - [r_2 + j(x_{22} + x_{13})] \bar{I}_2 \quad (3.66)$$

$$\bar{V}_1 - \bar{V}_2 = [r_1 + j(x_{11} + x_{23})] \bar{I}_1 - [r_2 + j(x_{22} + x_{13})] \bar{I}_2 \quad (3.67)$$

$$= (r_1 + jx_1)\bar{I}_1 - (r_2 + jx_2)\bar{I}_2 \quad (3.68)$$

$$= z_1\bar{I}_1 - z_2\bar{I}_2 \quad (3.69)$$

$$\bar{V}_1 - z_1\bar{I}_1 = \bar{V}_2 - z_2\bar{I}_2 \quad (3.70)$$

$$\bar{V}_1 - \bar{V}_3 = [r_1 + j(x_{11} + x_{23})]\bar{I}_1 - [r_3 + j(x_{33} + x_{12})]\bar{I}_3 \quad (3.71)$$

$$= [r_1 + jx_1]\bar{I}_1 - (r_3 + jx_3)\bar{I}_3 \quad (3.72)$$

$$= z_1\bar{I}_1 - z_3\bar{I}_3 \quad (3.73)$$

$$\bar{V}_1 - z_1\bar{I}_1 = \bar{V}_3 - z_3\bar{I}_3 \quad (3.74)$$

Bu ifadelerdeki:

$r_1, r_2, r_3 = 1, 2, 3$ nolu sargıların dirençleri

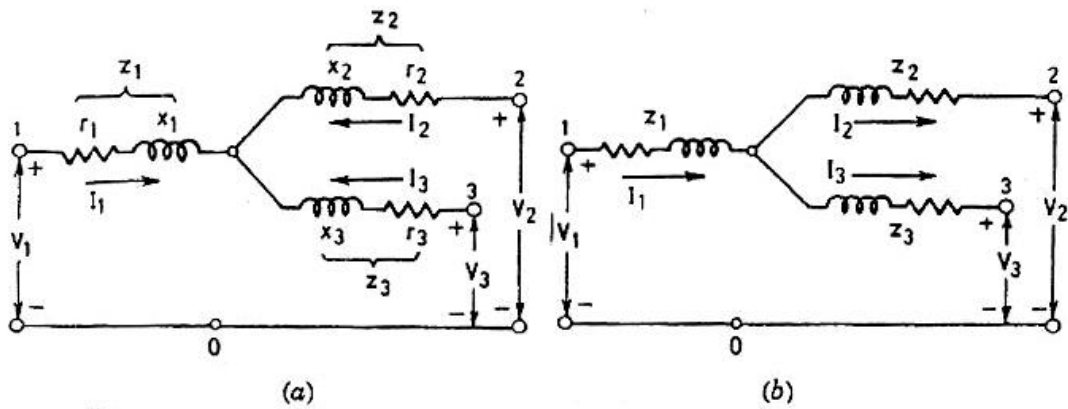
$x_1 = x_{11} + x_{23} = 1$ nolu sargının eşdeğer kaçak reaktansı

$x_2 = x_{22} + x_{13} = 2$ nolu sargının eşdeğer kaçak reaktansı

$x_3 = x_{33} + x_{11} = 3$ nolu sargının eşdeğer kaçak reaktansı

$z_1, z_2, z_3 = 1, 2, 3$ nolu sargıların eşdeğer kaçak empedansı

x_{23} kaçak reaktansı 1 nolu sargıya indirgenmiş değerdir.

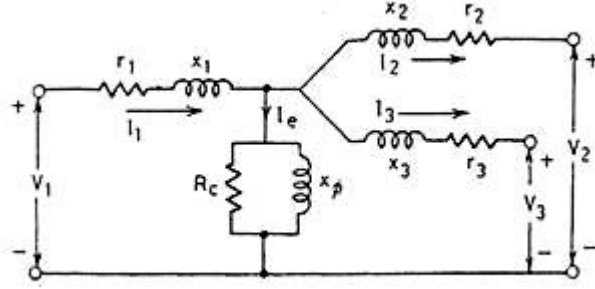


Şekil 3.21 Üç sargılı transformatörün tek fazlı eşdeğer devresi

Denklem (3.70) ve denklem (3.74)'ün sonucunda üç sargılı transformatörün yıldız eşdeğer devresi şekil 3.21 (a)'da verilmiştir. z_1, z_2, z_3 'ü birbirine bağlayarak elde edilen yıldız noktası hayalidir ve 3 fazlı sistemin nötr noktası ile bir ilgisi yoktur. Bu yıldız noktası, ancak üç sargılı transformatörün primer, sekonder ve tersiyer sargıları arasındaki kuplajı ifade eder ve bu yıldız noktası iki sargılı transformatörün eşdeğer devresindeki paralel olan R_c , X_ϕ ile benzerdir.

Eşitlik 3.35, 3.36 ve 3.37'deki karşılıklı endüktans başındaki pozitif işaret I_1 , I_2 ve I_3 akımlarının aynı yönde olduğunu gösterir. Bu da 1, 2 ve 3 nolu bobinlerin enerji tüketim kaynağı olduğunu gösterir.(Şekil 3.21 (a)). Pratikte ise, primer enerji tüketim kaynağı, sekonder ve tersiyer de enerji üretim kaynağı gibidir. Bu durumda gösterim şekil 3.21 (b)'deki gibi olur. Bu durum da da enerji akışı AC kaynaktan yüke doğru olur.

Şekil 3.21(b) 'deki eşdeğer devrede z_1, z_2 ve z_3 primer, sekonder ve tersiyer sargıların herhangi bir sargı tarafına indirgenmiş per unit cinsinden ifade edilmiş kaçak empedanslarıdır.



Şekil 3.22 Üç sargılı transformatörün tek fazlı eşdeğer devresi

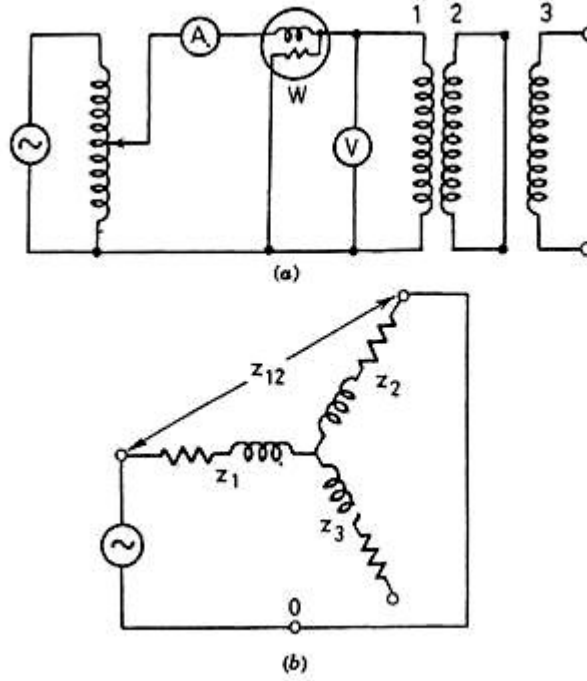
Eğer uyartım akımı I_e 'yi de hesaba katarsak R_c ve X_ϕ şekil 3.22'deki gibi olur. R_c çekirdek direnci, X_ϕ manyetize reaktanstır. Primer akımı I_1 , I_e , I_2 ve I_3 'ün fazörel toplamıdır.

3.7.2 Üç Sargılı Transformatörlerin Parametreleri

Üç sargılı transformatörlerde de iki sargılı transformatörlerdeki gibi bu parametreleri açık devre ve kısa devre testleri yaparak belirleriz.

(a) Kısa devre testleri : İlgili tarafa indirgenmiş z_1 , z_2 ve z_3 kaçak empedansları aşağıdaki gibi üç adet kısa devre testi yapılarak belirlenir:

(i) Şekil 3.23 (a) 'daki gibi bağlantılar yapılır. Şekil 3.21 (b)'nin eşdeğer devresi Şekil 3.23 (b)'deki gibi gösterilir.



Şekil 3.23 Üç sargılı transformatörde kısa devre testi (a) Devre şeması (b) Eşdeğer devre
 Voltmetre, ampermetre ve wattmetreden V_1 , I_1 ve P_1 okunur, 1 ve 2 sargılara ait z_{12} kısadevre empedansı :

$$z_{12} = \frac{V_1}{I_1} \quad (3.75)$$

Eşdeğer direnç

$$r_{12} = \frac{P_1}{I_1^2} \quad (3.76)$$

Eşdeğer kaçak reaktans

$$x_{12} = \sqrt{z_{12}^2 - r_{12}^2} \quad (3.77)$$

$$z_{12} = \frac{\text{faz başına voltmetrede okunan gerilim}}{\text{faz başına ampermetrede okunan akım}} \quad (3.78)$$

Şekil 3.23 (b)'deki eşdeğer devreyi incelersek; z_{12} , z_1 ve z_2 'nin seri kombinasyonudur.

$$z_{12} = r_{12} + jx_{12} = z_1 + z_2 \quad (3.79)$$

(ii) Bu sefer ölçüm cihazlarını sargı 1'e bağlanır, 3. sargıyı kısadevre ve 2. sargıyı da açık devre edilir. 1 ve 3 sargılara ait kısa devre empedansı z_{13} :

$$\frac{\text{faz başına gerilim}}{\text{faz başına akım}} = z_1 + z_3 \quad (3.80)$$

(iii) Ölçüm cihazları sargı 2'ye bağlanır, 3. sargı kısa devre ve 1. sargı açık devre edilir. Buradan:

$$z_{23} = r_{23} + jx_{23} \quad (3.81)$$

$$\frac{\text{faz başına gerilim}}{\text{faz başına akım}} = z_2 + z_3 \quad (3.82)$$

Eşitlik 3.79, 3.80 ve 3.81'in çözümlerinden

$$z_1 = r_1 + jx_1 = \frac{1}{2}(z_{12} + z_{13} - z_{23}) \quad (3.83)$$

$$z_2 = r_2 + jx_2 = \frac{1}{2}(z_{12} + z_{23} - z_{13}) \quad (3.84)$$

$$z_3 = r_3 + jx_3 = \frac{1}{2}(z_{13} + z_{23} - z_{12}) \quad (3.85)$$

Hesaplanan z_{12} ve z_{13} empedansları 1. sargı tarafına indirgenmiş değerlerdir, çünkü cihazlar bu tarafa bağlanmıştır. z_{23} empedansı 2. sargı tarafına indirgenmiş değerdir, bu nedenle 1.

sargı tarafına çevrilmelidir $\left[= z_{23} \left(\frac{N_1}{N_2} \right)^2 \right]$. Eşitlik 3.83, 3.84 ve 3.85'deki z_1 , z_2 ve z_3

hesaplanır.

(b) Açık devre testleri : Bu test çekirdek kayıplarını, manyetize empedansı ve çevrim oranını belirlemek için yapılır.

$$a_{12} = \frac{V_1}{V_2}, \quad a_{13} = \frac{V_1}{V_3} \quad (3.86)$$

$$a_{23} = \frac{V_2}{V_3} \quad (3.87)$$

$$= \frac{V_2/V_1}{V_3/V_1} = \frac{a_{13}}{a_{12}} \quad (3.88)$$

3.8 Gerilim Regülasyonu

Üç sargılı tr. nin gerilim regülasyonu aşağıdaki gibi bulunur.

(i) İlk yüklü durumda iken her sargıya düşen güç (kVA) değerini bulunur. Sonra her sargı için k elde edilir. “k” gerçek kVA değerinin temel kVA değerine oranıdır.

(ii) Her sargı için işletme güç faktöründe per unit cinsinden kaçak empedans düşümü(veya gerilim regülasyonu) hesaplanır.

Primer sargı için gerilim regülasyonu;

$$\varepsilon_1 = k_1 (\varepsilon_{r1} \cos \theta_1 + \varepsilon_{x1} \sin \theta_1) \quad (3.89)$$

$$k_1 = \frac{\text{Primer kVA yük}}{\text{nominal kVA}} \quad (3.90)$$

Sekonder sargı için;

$$\varepsilon_2 = k_2(\varepsilon_{r2} \cos \theta_2 + \varepsilon_{x2} \sin \theta_2) \quad (3.91)$$

$$k_1 = \frac{\text{Sekonder kVA yük}}{\text{nominal kVA}} \quad (3.92)$$

Tersiyer sargı için;

$$\varepsilon_3 = k_3(\varepsilon_{r3} \cos \theta_3 + \varepsilon_{x3} \sin \theta_3) \quad (3.93)$$

$$k_1 = \frac{\text{Tersiyer sargı kVA yük}}{\text{nominal kVA}} \quad (3.94)$$

Burada $\cos \theta_1$, $\cos \theta_2$, $\cos \theta_3$; 1,2 ve 3 nolu sargılar için işletim güç faktörleridir.

ε_{r1} , ε_{r2} , ε_{r3} ; 1, 2, ve 3 nolu sargılar için per unit cinsinden direnç düşümleridir.

ε_{x1} , ε_{x2} , ε_{x3} ; 1, 2 ve 3 nolu sargılar için per unit cinsinden kaçak reaktanslardır.

(iii) Her sargı çifti için gerilim regülasyonu bu çifte ait her bir gerilim regülasyonu değerinin cebri(fazörel değil) toplamı ile bulunur, eğer ki güç birinden diğerine doğru akıyorsa. Yoksa aşağıdaki gibi negatif işaret kullanılır.

Primeri AC kaynak tarafından enerjili sekonderi ve tersiyeri yüke bağlı üç sargılı bir transformatör için gerilim regülasyonu;

$$\text{primerden sekondere } \varepsilon_{12} = \varepsilon_1 + \varepsilon_2 \quad (3.95)$$

$$\text{primerden tersiyere } \varepsilon_{13} = \varepsilon_1 + \varepsilon_3 \quad (3.96)$$

Güç sargı 1'den sargı 2 ve 3 'e doğru aktığından, ε_{12} ve ε_{13} her bir ε_1 , ε_2 , ε_3 gerilim regülasyonu değeri eklenerek bulunur. Gerilim regülasyonu;

$$\text{sekonderden tersiyere } \varepsilon_{23} = \varepsilon_2 - \varepsilon_3 \quad (3.97)$$

$$\text{tersiyerden sekondere } \varepsilon_{32} = \varepsilon_3 - \varepsilon_2 \quad (3.98)$$

Sargı 2'den 3'e ya da sargı 3'den 2'ye doğru bir güç akışı olmadığından; ε_{23} ve ε_{32} , sırası ile ε_2 ve ε_3 çıkarılarak elde edilir. Gerilim regülasyonu;

$$\text{sekonderden primere } \varepsilon_{21} = -(\varepsilon_1 + \varepsilon_2) \quad (3.99)$$

$$\text{tersiyerden primere } \varepsilon_{31} = -(\varepsilon_1 + \varepsilon_3) \quad (3.100)$$

4. ÜÇ FAZLI OTOTRANSFORMATÖRLER

Gerilim dönüştürme oranı 2'den daha düşük olduğunda iki sargılı transformatör yerine ototransformatör kullanımı tercih edilir. Üç fazlı ototransformatörün üç fazlı iki sargılı transformatöre kıyaslar aşağıdaki gibi dezavantajları mevcuttur:

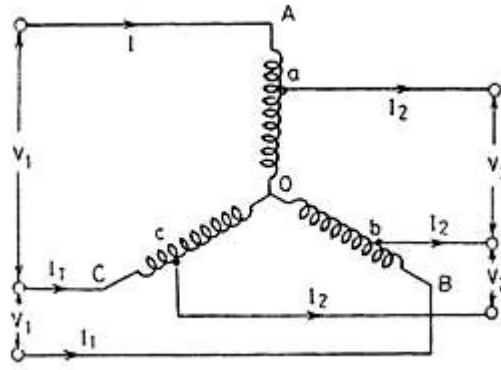
- Ototransformatörler daha düşük kaçak empedansa sahiptir, bu da kısa devre koşullarında ağır mekanik zorlanmalara sebep olur.
- Bağlantı şekilleri yıldız ve üçgenden oluşur.

Günümüzde ototransformatörler şu sebeplerden dolayı kullanılmaktadır:

- Test devreleri ve laboratuvarlar için ayarlanabilir çıkış gerilimi elde edilir.
- Enterkonekte sistemde farklı gerilim seviyesini birbirine bağlamak için kullanılır. (154 kV, 380 kV)
- Asenkron ve senkron motorlarda yol vermek için kullanılır

Yıldız bağlı, üçgen bağlı ve genişletilmiş-üçgen bağlı ototransformatörler anlatılacaktır.

4.1 Yıldız Bağlı Ototransformatörler

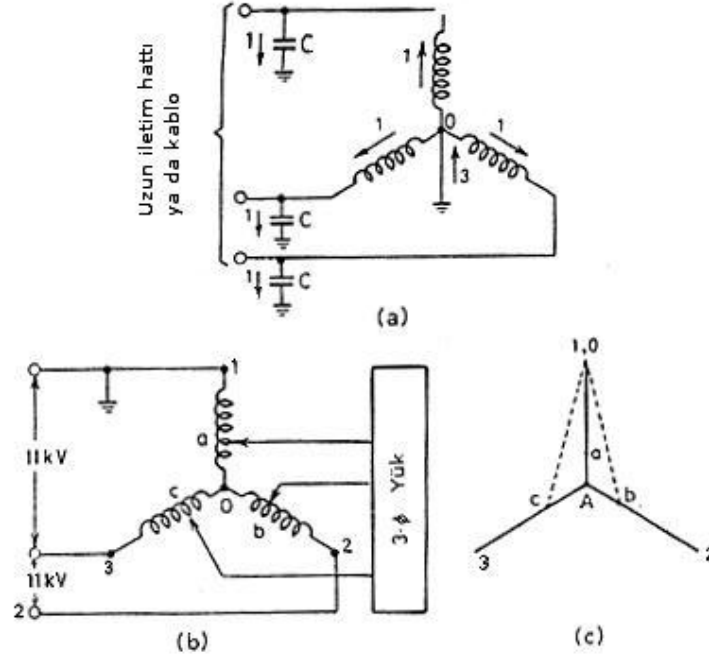


Şekil 4.1 Yıldız bağlı ototransformatör

Üç fazlı yıldız bağlı ototransformatör bankı bir çok açıdan iki sargılı transformatör gibi davranır. Mesela, ototransformatör nötrü izole ise üçüncü harmonik uyartım akımlarının bastırılmış olması nedeniyle hat ile toprak arası gerilimde yüksek üçüncü harmonik gerilim bileşenleri görülür. Ancak bu durum üç fazlı üç bacaklı çekirdek tip ototransformatörlerde oluşmamaktadır.

- Ototransformatör nötrü topraklı ve diğer tüm sistem nötrleri izole ise, endüklenen üçüncü frekans gerilimleri hat-toprak arasında her bir transformatörde mevcuttur, fakat hat-hat

arasında mevcut değildir. Bu üçül frekans gerilimleri hat-toprak arası kapasitansdan C transformatör sargılarına doğru üçül frekans uyartım akımlarının oluşmasına neden olur. C 'den akan hat-toprak arası aka akımı 1 birim kabul edersek, Şekil 4.2(a)'da gösterilen topraktan yıldız noktası O 'ya akan toplam dönen akım 3 birim olur. Bu durumda transformatör sargılarının üçül frekans manyetize reaktansı hatlardan toprağa doğru olan üçül frekans kapasitif reaktans $\left(\frac{1}{2\pi \cdot 3f \cdot C}\right)$ 'ye eşit olur, bu da seri rezonansa neden olur. Bu nedenle, eğer hat-toprak arasındaki kapasitans büyük ise (uzun bir iletim hattı ya da kablo) ototransformatör nötrü ve şebeke nötrleri büyük üçül frekans gerilimlerinden korunmak için topraklı olmalıdır.



Şekil 4.2 (a) Uzun bir iletim hattın ya da kabloyu besleyen Yy bağlı ototransformatör bankındaki üçül frekans akımları yolları (b) Faz toprak arızasına maruz kalmış 3 fazlı ototransformatör (c) (b) için fazör diyagramı

- Ototransformatör nötrü izole ve tüm sistemin nötrleri de izole olan şekil 4.2 (b)'deki gibi bir üç fazlı sistemi incelersek; YG tarafındaki bir hat-toprak arızası diğer YG terminalleri ile toprak arasında aşırı yüksek gerilimlerin oluşmasına neden olur. Şekil 4.2 (b)'de YG tarafında 1 nolu yerde hat-toprak arızası oluştuğunu kabul edelim. Arızadan sonra O noktası, 1 nolu hat-toprak gerilimine doğru kayar ve b AG terminali ile toprak arası, c AG terminali ile toprak arası gerilimleri $V_{b1} = V_{c1}$ veya $V_{bo} = V_{co}$ 'a yükselir ve bu değer aşağıdaki gibi olur.

$$V_{b1} = V_{c1} = [V_{A_1}^2 + V_{A_b}^2 - 2V_{A_1} \cdot V_{A_b} \cdot \cos 120^\circ]^{1/2} \quad (4.1)$$

Örneğin şekil 4.2 (b) $V_{oa} = 0,2V_{o1}$, $V_{ob} = 0,2V_{o2}$ alırsak, arızadan sonra nötrler arızalı hat 1'e kayar ve V_{b1}, V_{b0}, V_{c1} veya V_{c0} gerilimleri

$$V_{b1} = V_{c1} = [(6351)^2 + (0,2 \times 6351)^2 - 2 \times 6351 \times (0,2 \times 6351) \cos 120^\circ]^{1/2}$$

$$= 7072,2 \text{ V}$$

Buradan da anlaşılmaktadır ki: YG tarafında bir hat-toprak arızası, b ve c AG terminallerinde 7072,2 V oluşturur. Bu gerilim $0,2 \times 11000 = 2200 \text{ V}$ 'a göre oldukça yüksektir. Bu nedenle topraklanmamış yıldız bağlı ototransformatörler eğer gerilim dönüştürme oranı 1'e yakın değilse topraksız sistemlerde kullanılmamalıdır.

Yıldız bağlı ototransformatörlerde oluşacak bu sorunlar Yy bağlı transformatör banklarındaki gibi aynı yöntemlerle üstesinden gelinebilir. (i) Üçgen bağlı tersiyer sargı ile, (ii) ototransformatörün ve üç fazlı kaynağın nötrünün topraklanması ile giderilebilir.

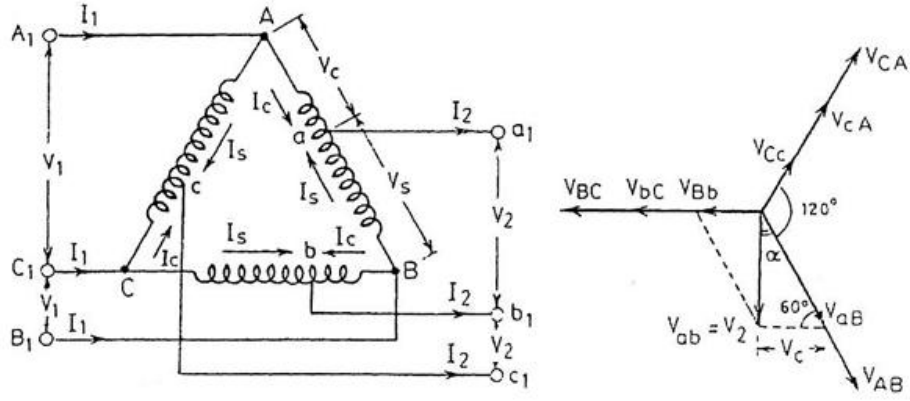
Şekil 4.1'den, tek fazlı ototransformatörlerde, Aa sargısının mmk'sı 0a sargısının mmk'sı ile dengelenmiştir.

$$I_1 N_{Aa} = I_{oa} N_{oa} \quad (4.2)$$

$$I_2 = I_1 + I_{oa} \quad (4.3)$$

Tek fazlı ototransformatörler için kurulan bağıntılar yıldız bağlı ototransformatörlerde de her bir faz için uygulanabilir.

4.2 Üçgen Bağlı Ototransformatörler



Şekil 4.3 (a) Üçgen bağlı ototransformatörler için bağlantı şeması (b) Gerilim fazör diyagramı

Üçgen bağlı ototransformatör şekil 4.3 (a)'da gösterilmiştir. Kapalı üçgen üçüncü harmonik akımlar için bir yol sağlar, bu nedenle hatlarda üçüncü harmonik akımlar bulunmaz. Üçgen bağlı ototransformatörlerin yıldız bağlı ototransformatörlere göre dezavantajları:

- (i) Sistem nötrünün olmaması,
- (ii) Primer ve sekonder hat gerilimleri arasındaki faz konumları
- (iii) Gerilim dönüştürme oranının en yüksek 2 ile sınırlı olması.

Şekil 4.3 (a)'ya göre üçgen bağlı ototransformatörün analizini yapalım. Burada

V_1, I_1 = hat gerilim ve hat akım girişi

V_2, I_2 = hat gerilim ve hat akım çıkışı

Şekil 4.3 (a)'nın gerilim fazör diyagramı şekil 4.3 (b)'de verilmiştir. Bu şekilde V_{AB}, V_{BC}, V_{CA} kolay olması için üçgen bağlı sargılar AB, BC, CA 'ya paralel çizilmiştir.

$$V_{AB} = V_{Aa} + V_{aB} = V_C + V_S \quad (4.4)$$

Çıkış gerilimi $V_2 = V_{ab}$, şekil 4.3 (a)'dan yazılırsa;

$$\bar{V}_{ab} = \bar{V}_{aB} + \bar{V}_{Bb} \quad (4.5)$$

Şekil 4.3 (b)'den görüldüğü gibi V_{aB} ve V_{Bb} arasındaki açı 120° ' dir, bu nedenle $V_{ab} = V_2$ geriliminin büyüklüğü;

$$V_{ab}^2 = V_{Bb}^2 + V_{aB}^2 + 2(V_{Bb})(V_{aB})\cos 120^\circ \quad (4.6)$$

$$V_2^2 = V_C^2 + V_S^2 + 2V_C V_S \cos 120^\circ \quad (4.7)$$

Fakat şekil 4.3 (a)'da gösterildiği gibi $V_1 = V_C + V_S$ 'dir.

Eşitlik 4.7'de $V_S = V_1 - V_C$ yerine koyarsak

$$\begin{aligned} V_2^2 &= V_C^2 + (V_1 - V_C)^2 + 2V_C (V_1 - V_C) \left(-\frac{1}{2} \right) \\ &= 3V_C^2 + V_1^2 - 3V_C V_1 \end{aligned} \quad (4.8)$$

ve

$$3V_C^2 - 3V_C V_1 + V_1^2 - V_2^2 = 0 \quad (4.9)$$

$$V_C = \frac{3V_1 \pm \sqrt{9V_1^2 - 12(V_1^2 - V_2^2)}}{6} \quad (4.10)$$

$$\frac{V_1}{2} - \sqrt{\frac{V_2^2}{3} - \frac{V_1^2}{12}} \quad (4.11)$$

ve

$$V_S = V_1 - V_C \quad (4.12)$$

$$\frac{V_1}{2} + \sqrt{\frac{V_2^2}{3} - \frac{V_1^2}{12}} \quad (4.13)$$

Eşitlik (4.11)'de, negatif işaret korunmuştur, çünkü $V_C < \frac{V_1}{2}$ 'dir. Şekil 4.3 (a)'dan

$$I_2 = I_C + I_S \quad (4.14)$$

Transformatör temel prensibinden

$$I_C N_C = I_S N_S \quad (4.15)$$

Eşitlik 4.14 ve 4.15'den I_S ve I_C 'yi I_2 cinsinde elde ederiz.

$$I_S = \frac{V_C I_C}{V_S} \quad (4.16)$$

$$I_C = I_2 - I_S \quad V_S = V_1 - V_C \quad (4.17)$$

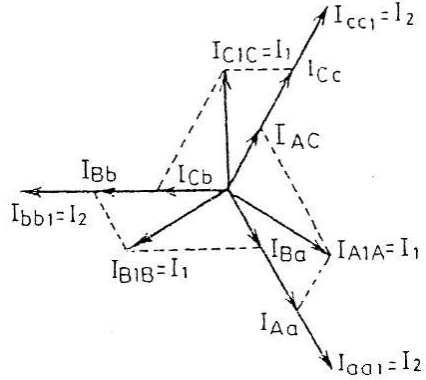
$$I_S = \frac{V_C (I_2 - I_S)}{V_1 - V_C} \quad (4.18)$$

$$I_S = I_2 \frac{V_C}{V_1} \quad (4.19)$$

$$\begin{aligned} I_C &= \frac{V_S I_S}{V_C} = \frac{V_S}{V_C} \cdot I_2 \frac{V_C}{V_1} \\ &= I_2 \frac{V_S}{V_1} \end{aligned} \quad (4.20)$$

Şekil 4.3 (a)'nın akım fazör diyagramı şekil 4.4'de gösterilmiştir. Çıkış akımları $I_{aa1}, I_{bb1}, I_{cc1}$ aralarında 120° faz farkı vardır. Kirchoff 'un akım yasasından a noktasında $I_{aa1} = I_2 = I_{Ba} + I_{Ca}$ olur. I_{aa1}, I_{Ba} ve I_{Ca} 'nın cebri toplamına eşit olduğundan, faz akımları

I_{Ba} ve I_{Aa} çıkış akımı I_{aa1} ile aynı fazdadır. Benzer olarak I_{Bb} ve I_{Cb} I_{bb1} ile; I_{Cc} ve I_{Ac} I_{cc1} ile aynı fazdadır.



Şekil 4.4 Şekil 3 (a) için akım fazör diyagramı

A noktasında, Kirchhoff akım yasasından,

$$I_{A'A} = I_1 = I_{Aa} + I_{Ac} \quad (4.21)$$

I_{Aa} ve I_{Ac} arasındaki faz açısı 120° ' dir.

Şekil 4.4'de gösterildiği gibi I_{Aa} ve I_{Ac} 'nin fazörel toplamı $I_{A'A}$ 'yı verir ve benzer olarak :

$$I_{B'B} = I_1 = I_{Ba} + I_{Bb} \quad (4.22)$$

$$I_{C'C} = I_1 = I_{Cb} + I_{Cc} \quad (4.23)$$

$$I_{Ac} = I_{Ba} = I_{Cb} = I_S \quad (4.24)$$

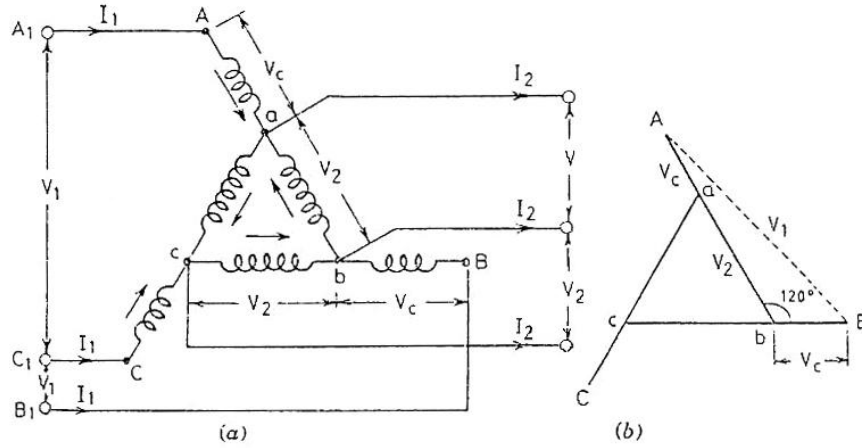
$$I_{Aa} = I_{Bb} = I_{Cc} = I_C \quad (4.25)$$

Giriş akımı :

$$I_{A'A} = I_{B'B} = I_{C'C} = I_1 = \sqrt{I_C^2 + I_S^2 + 2I_C I_S \cos 120^\circ} \quad (4.26)$$

4.3 Geliştirilmiş Üçgen Ototransformatörler

Üçgen bağlı ototransformatörlerin geliştirilmiş türü şekil 4.5 (a)'da gösterilmiştir. Bu bağlantı şeklinde, YG hatları Aa, ab... sargılarına seri olarak bağlanmıştır, ab, bc, ca ortak sargıları ise üçgen bağlıdır. Hat gerilimi oranları 2'den büyük olabilir, fakat bu oran 2'den büyük olduğunda avantajı ortadan kalkar. Normal üçgen bağlantıda primer ve sekonder hat gerilimleri birbirleri ile aynı fazda değildir.



Şekil 4.5 (a) (b) Geliştirilmiş üçgen ototransformatör

Gerilim fazör diyagramı şekil 4.5 (b)'de gösterilmiştir ve gerilimler arasındaki ilişkiyi belirleyebilmek için gereklidir. Kolay olması için gerilim fazörleri Ab, Bc, Ca ilgili sargılarına paralel olarak çizilmiştir. Fazör diyagramından giriş hat gerilimi V_1 :

$$V_{AB} = V_1 = [(V_C + V_2)^2 + V_C^2 - 2(V_C + V_2)V_C \cos 120^\circ]^{1/2} \quad (4.27)$$

$$V_1^2 = 3V_C^2 + 3V_C V_2 + V_2^2 \quad (4.28)$$

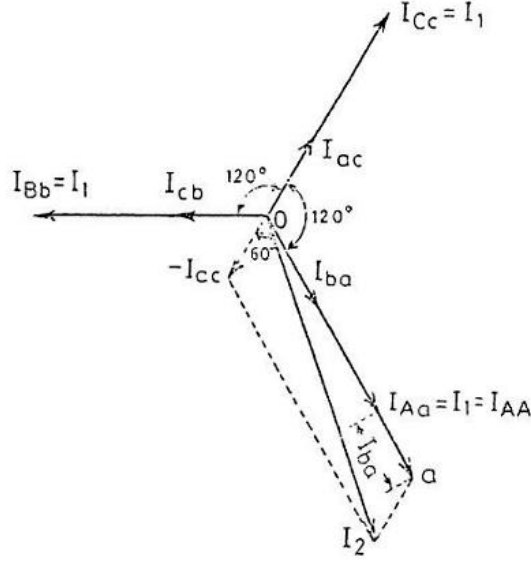
$$3V_C^2 + 3V_C V_2 + (V_2^2 - V_1^2) = 0 \quad (4.29)$$

$$V_C = \frac{-3V_2 \pm \sqrt{9V_2^2 - 12(V_2^2 - V_1^2)}}{6} \quad (4.30)$$

$$= -\frac{V_2}{2} + \sqrt{\frac{V_1^2}{3} - \frac{V_2^2}{12}}$$

Eşitlik 4.30'da pozitif işaret korunmuştur, çünkü $V_C + \frac{V_2}{2}$ pozitif olmak zorundadır.

Geliştirilmiş üçgen ototransformatörlerde akım fazör diyagramı şekil 4.6'da gösterilmiştir.



Şekil 4.6 Şekil 4.5 (a) için akım fazör diyagramı

I_{Aa} , I_{ba} birbirleri ile aynı fazdadır ve I_{Bb} , I_{Cb} ve I_{Cc} , I_{ac} için geçerlidir. V_c V_2 'den daha küçük alındığından, V_c ile ilgili I_{Aa} akımı V_2 ile ilgili I_{ba} akımından daha büyüktür. Benzer şekilde I_{Bb} , I_{Cc} I_{cb} , I_{ac} 'den daha büyüktür.

Şekil 4.5 (a)'da a noktasında Kirchoff'un akım kanunu uygularsak

$$I_2 = I_{Aa} + I_{ba} - I_{ac} \quad (4.31)$$

A noktasında Kirchoff akım yasasını uygularsak

$$I_{Aa} = I_1 = I_{Aa} \quad (4.32)$$

$$I_2 = I_1 + I_{ba} - I_{ac} \quad (4.33)$$

$I_1 + I_{ba} = oa$ ve $(-I_{ac})$ 'nin fazörel toplamı şekil 4.6'da görüldüğü gibidir. Bu şekil'den I_2 akımının büyüklüğü

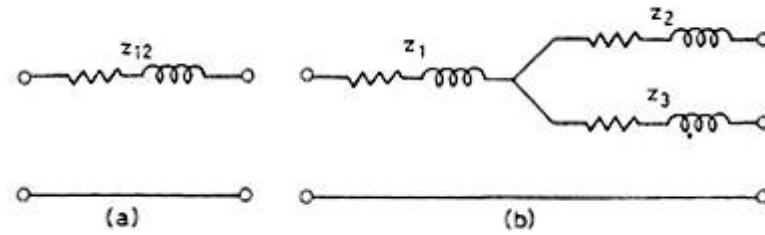
$$I_2 = \sqrt{I_{oa}^2 + I_{ac}^2 + 2I_{oa}I_{ac} \cos 60^\circ} \quad (4.34)$$

Şonuç olarak yıldız bağılı ototransformatörler üçgen bağılı ototransformatörlere göre daha yaygındır. Üç fazlı ototransformatörler yüksek güç değerlerinde ve yüksek gerilimlere sahip enerji iletim hattı sistemlerinde kullanılmaktadır. 154 kV , 380 kV gerilim seviyesindeki iki farklı enerji iletim hattını birbirine ototransformatör ile bağlamak, üç fazlı iki sargılı ototransformatöre göre daha ucuz olmaktadır. Yy transformator bankında olduğu gibi Y bağılı ototransformatörlerde de tek fazlı hat ile nötr arasındaki bir yükü besleyemeyiz.

5. TRANSFORMATÖRLERİN DİZİ BİLEŞEN (SEQUENCE) EMPEDANSLARI

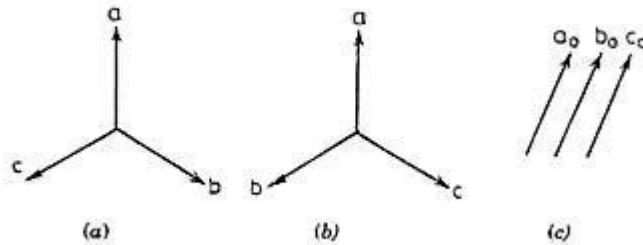
Üç fazlı sistemlerde pozitif-dizi bileşen, negatif dizi bileşen ve sıfır-dizi bileşen gerilim ve akımları ile dizi bileşen empedanslar belirlenir.

İletim hatları, kablolar ve transformatörler gibi statik teçhizatların empedansları uygulanan gerilimlerin faz sırasına bağlı değildir. Bu da statik teçhizatların pozitif veya negatif dizi bileşen gerilimler tarafından beslenmesi bu cihazların işletimini etkilememesinden kaynaklanmaktadır. Bu nedenle transformatör empedanslarında pozitif ve negatif dizi bileşen akımları birbirinin aynısıdır. İki sargılı bir transformatörün pozitif faz dizi bileşen empedansı transformatörün kaçak empedansı z_{12} 'ye eşittir. (Şekil 5.1). Bu da transformatöre kısa devre testi uygulayarak elde edilir. pozitif dizi bileşen empedansı = negatif dizi bileşen empedansı = transformatör kaçak empedansı z_{12} .



Şekil 5.1 (a) İki sargılı transformatör için eşdeğer devre (b) Üç sargılı transformatör için eşdeğer devre

Pozitif ve negatif dizi bileşen empedansları eşit büyüklüktedir fakat fazları 120 şer derece farklıdır, sıfır dizi bileşenlerde ise fazlar aynı büyüklüktedir fakat birbirleri ile aynı fazdadırlar.



Şekil 5.2 (a) Pozitif dizi bileşen fazör diyagramı (b) Negatif dizi bileşen fazör diyagramı (c) sıfır dizi bileşen fazör diyagramı

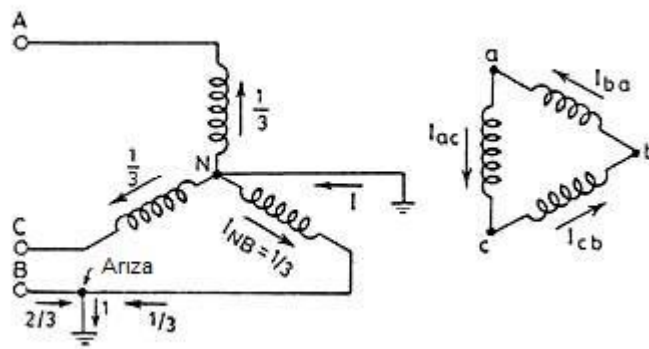
Üç fazlı bir sistemde sıfır dizi bileşen bileşenleri :

$$I_0 = \frac{1}{3}(I_a + I_b + I_c) \quad (\text{yıldız bağlantı}) \quad (5.1)$$

$$I_0 = \frac{1}{\sqrt{3}}(I_a + I_b + I_c) \quad (\text{üçgen bağlantı}) \quad (5.2)$$

Şekil 5.2’da üç faz akımların fazörel toplamı devreden dolayı sıfır olursa sıfır dizi bileşen akımı da sıfır olur. Bunun anlamı, bir veya daha fazla nötr noktası topraklı veya birbirine bağlı olan döner makineler, transformatörler, iletim hatlarında sıfır dizi bileşen akımları bulunmaz.

Şekil 5.3’ü göz önünde bulundurursak; arıza akımı topraktan nötre doğru akar, I_{NB} arıza noktasına tekrardan geri döner. I_{NB} ’nin oluşturduğu mmk I_{ba} sekonder akımı tarafından dengelenmek zorundadır. Bu I_{ba} akımı diğer sekonder fazlardan, yani ac ve ab’den akar. Bunun sonucu olarak, A ve C primer fazları birbirine zıt yönlü akımlar taşımak zorundadır. Aynı akımlar sekonderden de akar bu nedenle primer akımları hepsi eşit ve hata akımının $1/3$ ’üne eşittir. Bu primer ve sekonder akımları eşittir ve aynı fazdadır, bu akımlara da sıfır dizi bileşen akımları denir. Şekil 5.3’de yıldız noktası topraklanmamış olsaydı sıfır dizi bileşen akımları olmazdı.



Şekil 5.3 Yd bağlı primer nötrü topraklı bir transformatörde faz toprak arızası meydana geldiği durumdaki sıfır dizi bileşen akımları

Üçgen bağlı sargılarda sıfır dizi bileşen akımları birbiri ile aynı fazdadır , üçgenin içinde dolaşır ve hatlarda bulunmazlar.

5.1 Sıfır Dizi Bileşen Eşdeğer Devresi

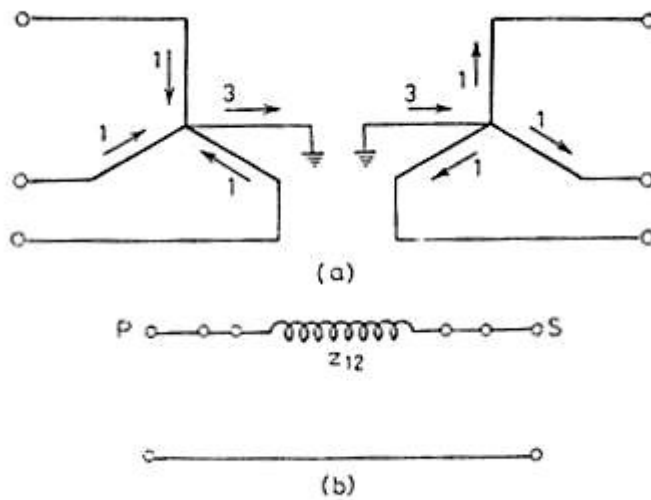
Sıfır dizi bileşen eşdeğer devresi dengesizlik veya toprak arızası durumlarında gereklidir.

Üç fazlı transformatörün sargılarında sıfır dizi bileşen akımları ile ilgili temel prensipler aşağıda verilmiştir:

- Eğer yıldız bağlı sargılarda üç faz akımları izole nötrle engellenmişse eşdeğer devre sıfır dizi bileşen akımları için açık devre edilir. Yıldız-nötrde nötr topraklı ya da kaynak nötrüne bağlı ise sıfır dizi bileşen akımları akabilir.
- Eğer üç fazlı hatlar üçgen bağlı sargı ile engellenmişse, eşdeğer devre sıfır dizi bileşen akımları için açık devredir. Çünkü akımın geri dönüş yolu bulunmamaktadır. Sıfır dizi bileşen akımları buna rağmen üçgen bağlı sargılarda akabilir.

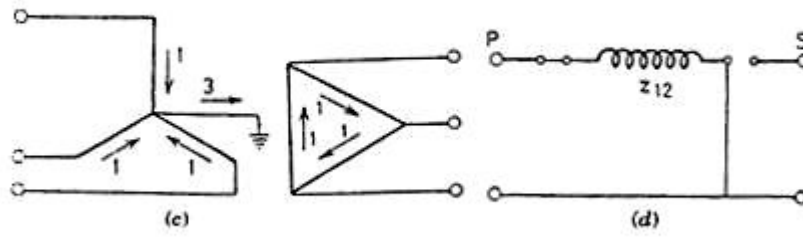
Üç fazlı transformatörlerde sıfır dizi bileşen akımları için temel prensipler:

(a) Eğer primer ve sekonder taraflarda sıfır dizi bileşen akımı primer ve sekonder sargılarda serbestçe akabiliyorsa, sekonder mmk primer tarafından dengelenmiş demektir. (uyartım akımlarının ihmali halinde). Bu durumda sıfır dizi bileşen akımlarına karşılık gelen empedans her faz için kaçak veya kısa devre empedansı z_{12} 'ye eşittir. Örneğin her iki nötrü de topraklı Yy bağlı transformatörde sıfır dizi bileşen devresi şekil 5.4 (b)'deki gibidir, çünkü sıfır dizi bileşen akımları primer ve sekonder sargılarda mevcuttur. Şekil 5.4 (a) ve (b)'de gösterildiği gibi devreler sıfır dizi bileşen akımlarının akmasına müsaade etmektedir.



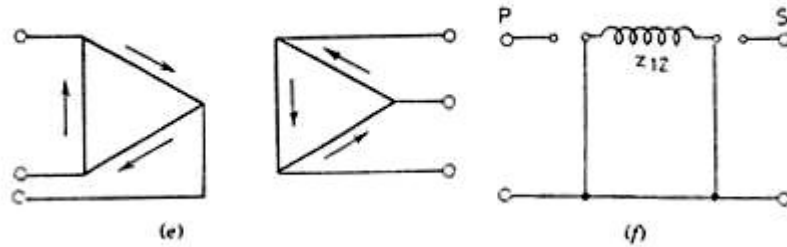
Şekil 5.4 (a) İki sargılı transformatörün sıfır dizi bileşen akımları gösterimi (b) eşdeğer devresi

Yıldız noktası nötrü topraklı, Yd bağlı transformatör şekil 5.5 (c) (d) 'de gösterilmiştir. Yıldız sargılardaki sıfır dizi bileşen akımları üçgen sargılarda sıfır dizi bileşen akımları endükler. Sekonder mmk primer mmk tarafından dengelenir, sıfır dizi bileşen empedansı z_{12} 'dir. Eğer sıfır dizi bileşen akımı dış devreden primer yıldıza doğru akabilirse, eşdeğer devre şekil 5.5 (d)'deki gibi olur. Dışarıdan üçgen bağlı sargılara doğru herhangi bir sıfır dizi bileşen akımı akmadığından, sekonderde sıfır dizi bileşen devresi açık devre olur.



Şekil 5.5 (c) İki sargılı transformatörün sıfır dizi bileşen akımları gösterimi (d) eşdeğer devresi

Şekil 5.6 (e) (f)'deki gibi Dd bağlı bir transformatörü düşünersek; sıfır dizi bileşen akımı primer ve sekonder üçgende akar fakat hatlardan akmaz. Primer mmk sekonder mmk'yı dengelediğinden, sıfır dizi bileşen akımına karşılık gelen empedans z_{12} kaçak empedansı tarafından sağlanır. Sıfır dizi bileşen akımları dış devreden üçgene doğru akamaz, bu sıfır dizi bileşen eşdeğer devrede primer ve sekonder tarafta açık devre şeklinde ifade edilmiştir.(Şekil 5.6 (e) (f))

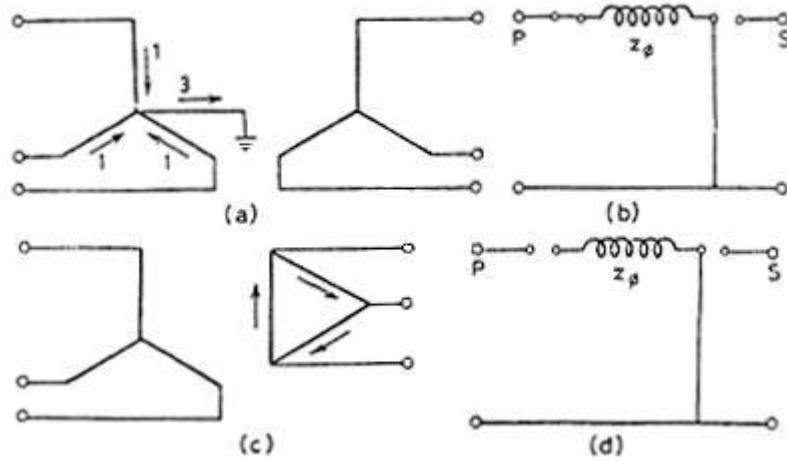


Şekil 5.6 (e) İki sargılı transformatörün sıfır dizi bileşen akımları gösterimi (f) eşdeğer devresi

(b) Eğer sıfır dizi bileşen akımı bir sargıda var diğer sargıda yoksa bu tarafın mmk'sı karşı tarafın mmk'sı tarafından dengelenmemiştir. Sonuçta sıfır dizi bileşen akımlarının aktığı tarafın uyartım empedansı Z_{ϕ} 'dir. Sıfır dizi bileşen akımlarının mevcut olduğu tarafta sıfır

dizi bileşen akımlarına karşılık empedans bir fazın uyarım(açık devre) empedansıdır. Diğer taraflarda transformatör sıfır dizi bileşen akımları için açık devre olarak davranır.

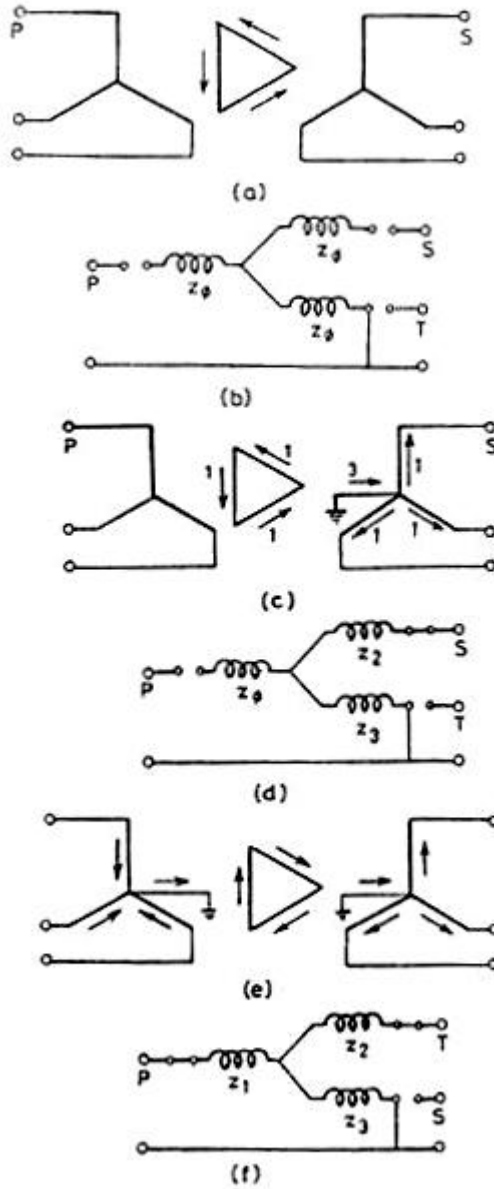
Şekil 5.7 (a)'daki gibi Yy bağlı sadece primer nötrü topraklı bir transformatörde, sıfır dizi bileşen akımları sadece primerde bulunur, sekonderde bulunmaz. Şekil 5.7 (a)'nın eşdeğeri şekil 5.7(b)'de gösterilmiştir.



Şekil 5.7 İki sargılı transformatörün sıfır dizi bileşen eşdeğer devresi

Yıldız noktası izole Yd bağlı transformatörde, sıfır dizi bileşen akımı sadece sekonder üçgen içinde akabilir, dış devreden akamaz. Bu nedenle sıfır dizi bileşen akımları primer ve sekonder dış devrelerde akamaz. (Şekil 5.7 (d))

Yukarıda anlatılan durumlar tüm üç fazlı transformatörlere ve transformatör banklarına uygulanabilir, arasındaki tek fark ise üç fazlı çekirdek tip transformatörlerin sıfır dizi bileşen uyarım empedansı Z_0 üç fazlı transformatör bankınıninkine göre daha küçüktür.



Şekil 5.8 (a) (b) (c) (d) (e) (f) Üç fazlı üç sargılı transformatörle ilgili sıfır dizi bileşen eşdeğer devreleri

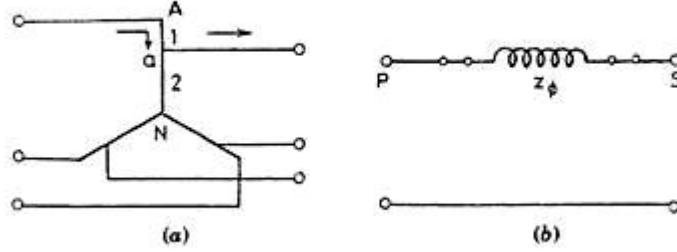
Şekil 5.8 (a)'da gösterilen Yyd bağlı nötrleri izole transformatörde sıfır dizi bileşen akımları sadece kapalı üçgende akabilir. Primer ve sekonder yıldızdan dış devre arasındaki kısımda akamaz. Eşdeğer devre şekil 5.8 (b)'deki gibidir.

Yyd bağlı sekonder yıldız noktası topraklı transformatör sıfır dizi bileşen akımları şekil 5.8 (c)'de gösterilmiştir. Sekonderdeki dış devre tarafı sıfır dizi bileşen akımlarının akması için bir yol sağlarsa eşdeğer devre şekil 5.8 (d)'deki gibi olur.

Yyd bağlı her iki nötrü de topraklı transformatör şekil 5.8 (e)'de gösterilmiştir. Sıfır dizi bileşen eşdeğer devresi eğer dış devre sıfır dizi bileşen akımlarının akması için bir yol

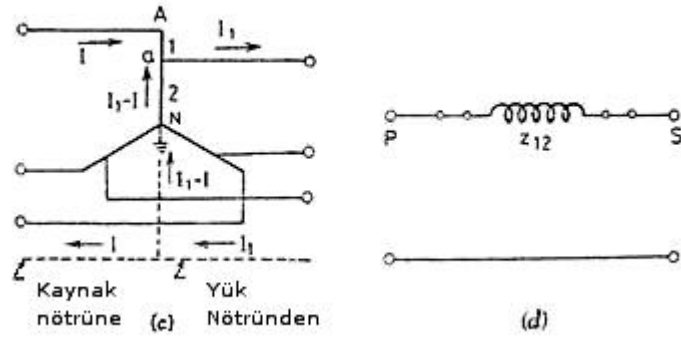
sağlıyorsa şekil 5.8 (f)'deki gibi olur. Eğer primer nötrü izole ise şekil 5.8 (e)'nin eşdeğer devresi Şekil 5.8 (d)'deki gibi olur. Eğer primer ve sekonder dış devreler sıfır dizi bileşen akımlarının akması için bir yol sağlamıyorsa eşdeğer devresi 5.8 (b)'deki gibidir.

Yukarıdaki temel prensipler üç fazlı ototransformatörlerde de uygulanabilir. Primer ve sekonder dış devresi sıfır dizi bileşen akımlarının akması için bir yol sağlayan şekil 5.9 (a)'daki gibi nötrü izole bir üç fazlı ototransformatörü düşünürsek; sıfır dizi bileşen akımları Aa sargılarında bulunduğu için üç fazlı bank veya üç fazlı kabuk tiplerde uyartım empedansı Z_ϕ 'ye karşılık gelen eşdeğer devre şekil 5.9 (b)'deki gibi olur. Transformatorün üç bacaklı çekirdek tip olması durumunda bacaklar arası kaçak empedans z_1 , şekil 5.9 (b)'deki Z_ϕ 'nin yerine yazılmalıdır.



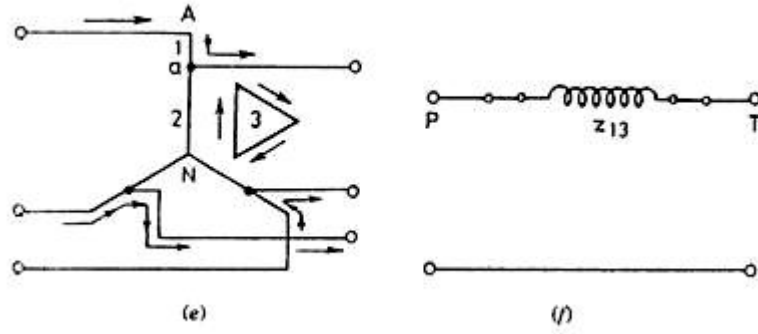
Şekil 5.9 Üç fazlı iki sargılı ototransformatörün sıfır dizi bileşen eşdeğer devresi

Şekil 5.10 (c)'deki gibi eğer ototransformatörün nötrü topraklı ise sıfır dizi bileşen akımları Aa ve Na 'da mmk dengesi olacak şekilde bu sargılardan akabilir. Şekil 5.10 (d)'deki eşdeğer devrede kaçak empedans gösterilmiştir. Şekil 5.10 (c)'de primer kaynak nötrü izole ise, sıfır dizi bileşen akımları sadece 2 nolu sargıdan akar, bu nedenle eşdeğer devre birbirinde ayrı manyetik devreye sahip transformatorlerde şekil 5.9 (b)'deki gibi olur. Birbiri ile ilişkili manyetik devreye sahip transformatorde ise şekil 5.9 (b)'deki z_ϕ , z_2 ile değiştirilmelidir.



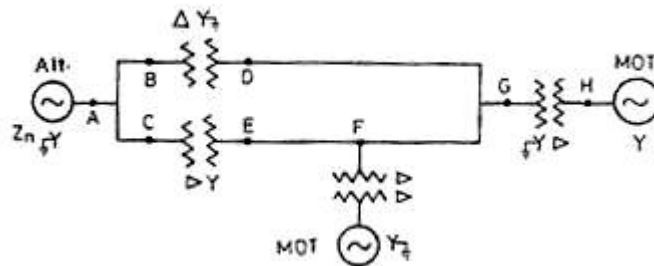
Şekil 5.10 Üç fazlı iki sargılı ototransformatörün sıfır dizi bileşen eşdeğer devresi

Yıldız noktası izole, tersiyer sargılı ototransformatör şekil 5.11 (e)'de gösterilmiştir. Aa sargısının mmk'sı tersiyer sargının mmk'sı ile dengelenmiştir, sıfır dizi bileşen eşdeğer devre şekil 5.11 (f)'de gösterilmiştir. Devrede z_{13} 1 ve 3 nolu sargılar arasındaki kaçak empedanstır.



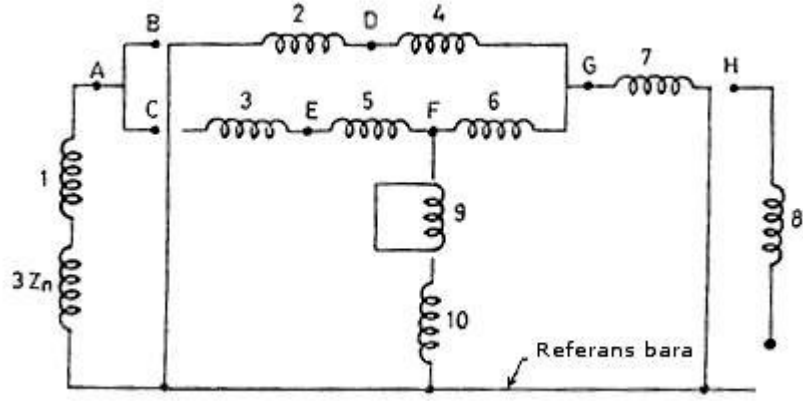
Şekil 5.11 Üç fazlı üç sargılı ototransformatörün sıfır dizi bileşen eşdeğer devresi

5.1.1 Görsel Örnek



Şekil 5.12 Tek hat diyagramı

Şekil 5.12'de gösterilen sistemin sıfır dizi bileşen empedansı şekil 5.13'de gösterildiği gibi olmaktadır.



Şekil 5.13 Şekil 5.12'deki sistemin sıfır dizi bileşen empedansı

6. TRANSFORMATÖR TRANSİYENTLERİ

Transformatör, kararlı hal koşullarında işletimde iken gerilim, akım, frekansı arasında belirli bir düzen vardır. Bu birimlerden herhangi birinin değişmesi ile kararlı halden en son kararlı hale geçiş sırasında bir süre transiyent süreci yaşanır. Bu transiyentler kısa süreli yüksek güçlü güç transformatörlerinde zararlı etkiler oluşturabilir. Bu etkilerden bazıları:

- Ani yüksek gerilimlerin oluşması transformatörün sargılarının izolasyonunu bozabilir.
- Oluşacak bir kısa devrenin meydana getireceği yüksek akımların oluşturacağı mekanik kuvvetler transformatör sargılarının deforme olmasına neden olabilir.
- Kısa süreli yüksek kısa devre akımları transformatörü aşırı ısıtabilir.

Bu gibi durumlar nedeniyle transiyentler YG güç transformatörlerinin tasarımında göz önünde bulundurulmalıdır.

Transiyentler aşırı gerilim ve aşırı akım olarak ikiye ayrılır.

6.1 Aşırı Akım Transiyentleri

Bu transiyentler, yüksüz transformatörün primerinden anahtardığında normal gerilimde enerjilendiğinde ya da sekonder tarafta bir kısa devre durumu oluştuğunda meydana gelir. Yüksüz haldeki transformatörün anahtarlanması olayına devreye alma veya devreye girme(inrush) olayı denir.

6.1.1 Devreye Girme (inrush) Olayı

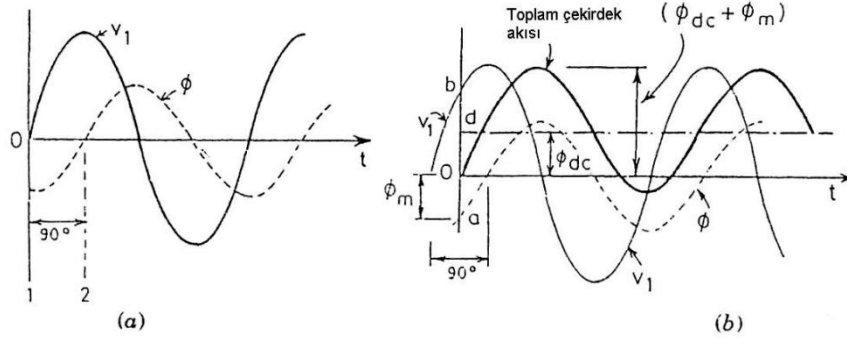
Sekonder açık durumda iken transformatör sadece uyarım akımını(boşta akımı) çeker. Akımın manyetize bileşeni, uygulanan gerilime göre 90° geridir ve akımın çekirdek kayıplarını oluşturan bileşenine göre çok daha büyüktür. Yüksüz durumda transformatör basit bir endüktif reaktör gibi davranır. Bunun sonucunda primerde endüklenen emk kaçak empedans düşümünü ihmal edersek uygulanan gerilime eşit ve zıt değerdedir.

Manyetize akımın devreye girme olayı esnasındaki davranışı niteliksel ve niceliksel olarak incelenebilir.

6.1.1.1 Niteliksel Yaklaşım

Uygulanan V_1 gerilimi ve çekirdek akısının kararlı haldeki dalga formları şekil 6.1 (a)'da gösterilmiştir. 1 anında, v_1 sıfır ve ϕ negatif maksimum olur, 2 anında v_1 maksimum fakat akı sıfırdır. Devreye girme akımlarının niteliksel incelemek için sabit kaçak akı teoremi

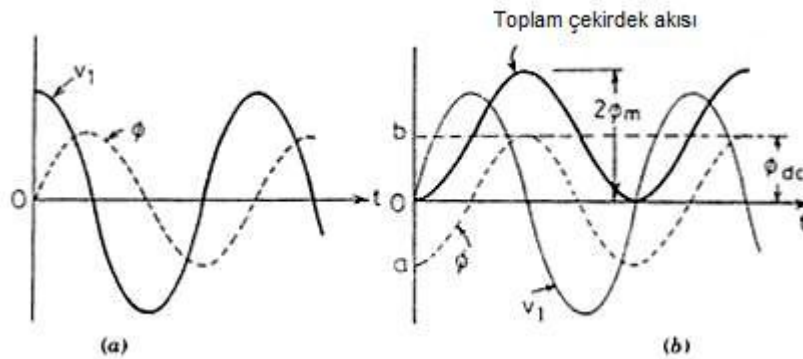
incelenmelidir. Bu teoreme göre, endüktif devrede manyetik akı aniden değişemez, anahtarı kapadıktan sonraki ($t=0+$) akı anahtarı kapamadan önceki ($t=0-$) akıya eşit olmalıdır.



Şekil 6.1 (a) İdeal transformatörde uygulanan v_1 gerilim ve ϕ akısı için dalga şekilleri (b) Uygulanan gerilim ob'deyken anahtarlanan yüksüz transformatördeki etki

Şekil 6.1 (b)'deki 1 ve 2 anlarında, ob anahtarlama gerilimi, kararlı hal akısı oa'yı gerektirir. Anahtarı kapamadan hemen önceki akı ($t=0-$) sıfırdır, çünkü v_1 sıfırdır ve sabit kaçak akı teoremine göre $t=0+$ 'da da sıfır olarak kalmak zorundadır.

Bu nedenle şekil 6.1 (b)'de gösterildiği gibi transformatör enerjilendiğinde, akı $\phi_{dc} = od = oa$ transformatör çekirdeğinde oluşmalıdır, böylece çekirdekteki bileşke akı $t=0+$ anında sıfır olarak kalır. ϕ_{dc} akısı sabit veya dc akıdır ve primer sargı direnci r_1 'i ihmal edersek sabit büyüklüktedir. DC akı, kararlı hal alternatif akı ϕ 'ye eklenir ve bileşke çekirdek akısı şekil 6.1 (b)'deki kalın çizgi olarak gösterildiği şekilde olur. Çekirdek akısının maksimum değeri $\phi_{dc} + \phi_m$ 'dir.

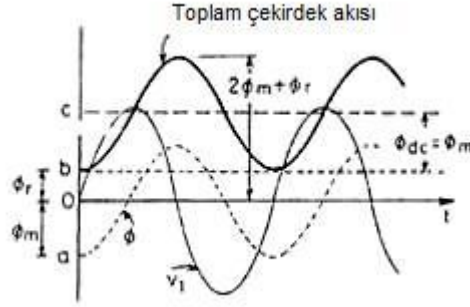


Şekil 6.2 (a) v_1 pozitif maksimumda ve ϕ sıfırda iken (b) v_1 sıfırda ve ϕ negatif maksimumda iken yüksüz transformatörün anahtarlanması

2 anında uygulanan v_1 gerilimi pozitif maksimum ve ϕ akısı sıfırdır. Akı $t=0^-$ ve $t=0^+$ anında sıfırdır, bu nedenle $\phi_{dc} = 0$ ve herhangi bir transiyent mevcut değildir. Çekirdek akısı şekil 6.2 (a)'da gösterilmiştir. Buradan da transformatör anahtarlandığı (enerjilendiği) anda uygulanan gerilim tepe noktasında ise çekirdek akısı ϕ , primer enerjilendikten sonra hemen kararlı hal değerini alır. Bu nedenle herhangi bir transiyent durum oluşmaz.

Şekil 6.1 (a)'da 1 anında uygulanan v_1 gerilimi akı negatif maksimumda iken sıfırdan geçer ve akı negatif maksimumda iken pozitif olur. 1 anında yüksüz transformatörü anahtarladığımızı (enerjilediğimizi) farz edelim. Akı $t=0^-$ anında (anahtarı kapamadan hemen önceki anda) sıfırdır ve $t=0^+$ 'da akı $oa = -\phi_m$ olur. (Şekil 6.2 (b)). Fakat sabit kaçak-akı teoremine göre akı $t=0^+$ anında sıfır olmalıdır. Bu bağlamda akı $\phi_{dc} = ob = oa = \phi_m$ çekirdekte oluşmalıdır, böylece $t=0^+$ anında akı sıfır olur. Daha önce belirtildiği gibi ϕ_{dc} , ϕ akısına eklenir ve bileşke çekirdek akısı şekil 6.2 (b)'de gösterilen kalın çizgideki gibidir. Eğer şekil 6.2 (b)'de anahtarı kapama anımızı $t=0$ olarak alırsak, bileşke çekirdek akısı $\phi_{dc} - \phi_m \cos \omega t = \phi_m (1 - \cos \omega t)$, $\omega t = 180^\circ$ 'de, yarım peryot sonra, çekirdek akısı maksimum akının iki katı olur, bu duruma çift etki (doubling effect) denir. Bu çifte etki çekirdeği doyuma götürebilir. Akı yoğunluğu $1,6 \text{ Wb}/\text{m}^2$ olabilir, tipik bir transformatör B-H eğrisinde, akı yoğunluğu $3,2 \text{ Wb}/\text{m}^2$ ve AT/cm değeri önceki değerinin 80-120 katına kadar çıkabilir.

Manyetize akı ana akımın %5'i kadarsa, çifte etki manyetize akımı $4-6 \left(\left(\frac{80 \times 5}{100} \right) \dots \left(\frac{120 \times 5}{100} \right) \right)$ kat artırılabilir. Bu büyüklükteki manyetize akımlarda, primer kaçak empedans düşümü büyük olur ve endüklenen emk da azalır. Endüklenen emk'nın azalması çekirdek akısının iki katı tepe değerine ulaşmasını sınırlandırır. Buradan da anlaşılacağı üzere çifte etki (doubling effect) çok tehlikeli bir durum oluşturmaz. Fakat YG güç transformatörlerinde devreye girme (inrush) manyetize akımlarının etkisi tasarım aşamasında incelenmelidir.

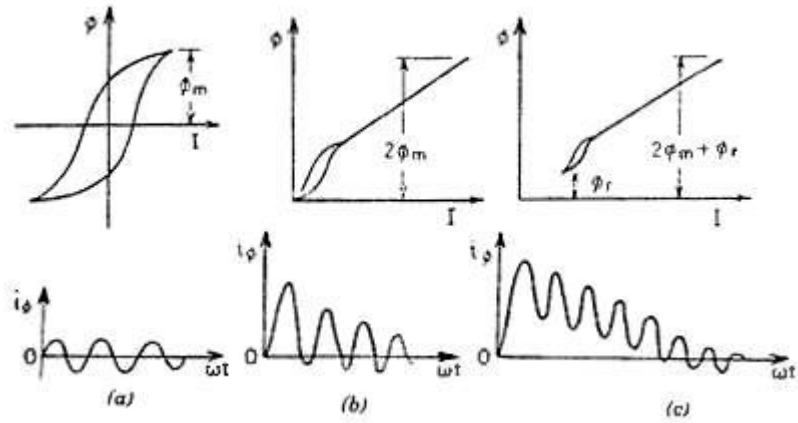


Şekil 6.3 Dengesiz yüklenmiş transformatörün gerilimi sıfırda iken ve artık(rezidüel) manyetizma ϕ_r mevcut iken anahtarlanması(enerjilenmesi)

Rezidiüel (artık) manyetizma $\phi_r = ob$ transformatör çekirdeğinde bulunduğunu kabul edelim. Eğer şekil 6.3'deki gibi primeri gerilim sıfır anındayken ve pozitif doğru giderken anahtarladığımızda, akı $t=0+$ anında ϕ_r 'ye ($t=0+$ 'deki akı) eşit olmalıdır. Bu durum sadece sabit akı $bc = \phi_{dc} = oa = \phi_m$ olduğunda olur. Primer direnci r_1 ihmal edilmediğinde, ϕ_r ve ϕ_{dc} kararlı hal akısı ϕ 'ye eklenir ve bileşke akı şekil 6.3'deki kalın çizgi halinde gösterilmiştir.

Anahtarı kapama anımızı $t=0$ olarak alırsak, bileşke akı $\phi_r + \phi_{dc} - \phi_m \cos \omega t = \phi_r + \phi_m (1 - \cos \omega t)$ olur. Anahtarın kapanmasından yarım periyot sonra çekirdek akısı $\phi_r + 2\phi_m$ 'ye eşit olur. Primer sargı direnci r_1 'i de hesaba katarsak, ϕ_{dc} ve ϕ_r zamanla sıfıra düşer ve çekirdek akısı sinüs şeklini alır.

Şekil 6.2 (a), (b) ve şekil 6.3'de histerizis çevrimleri ve manyetize akıların dalga şekilleri sırasıyla şekil 6.4 (a) (b) ve (c)'de gösterilmiştir. Şekil 6.4 (a)'da histerizis çevrimi ve manyetize akı i_ϕ şekil 6.2 (a)'daki gibi normal ve simetriktir. Şekil 6.4 (b)'de, çekirdek akısı şekil 6.2 (b)'deki gibi 0 ile $2\phi_m$ arasında değişir ve bu nedenle histerizis çevrimi düşer ve i_ϕ de başlangıçta tek yönlüdür. Şekil 6.4 (c)'de çekirdek akısı şekil 6.3'deki gibi $+\phi_r$ 'den $+(\phi_r + 2\phi_m)$ arasında değişir, çekirdek aşırı doyar, histerizis çevrimi ihmal edilebilecek kadar küçüktür ve i_ϕ başlangıç değeri 0'dan başlanmaz. Şekil 6.4 (b) ve (c)'de manyetize akıların dalga şekilleri I^2R kayıplarından dolayı bir müddet sonra simetrik hale gelir.



Şekil 6.4 Transformatördeki histerizis çevrimi ve manyetize akım dalga şekli

6.1.1.2 Analitik Yaklaşım

Yüksüz transformatörü primerden anahtarladığımızda (enerjilendirdiğimizde) , Kirchoff'un gerilim kanunundan primer devre için emk eşitliği:

$$v_1 = V_{m1} \sin(\omega t + \theta_0)$$

$$= i_\phi r_1 + N_1 \frac{d\phi_t}{dt} \quad (6.1)$$

v_1 = anahtarı kapattığımız anda uygulanan gerilim

ϕ_t = herhangi bir t anında çekirdek akısı

i_ϕ = manyetize akım

N_1 = primer sarım sayısı

V_{m1} = uygulanan gerilimin dalgasının maksimum değeri

θ_0 = Şekil 6.5'de gösterilen gerilim dalgası ile zamanın orijin noktası arasındaki açı

Çekirdek akısı ϕ_t tüm primer sarımları ile bağlantılı olduğunu kabul edersek, primer sargı endüktansı L_1 :

$$L_1 = \frac{N_1 \cdot \phi_t}{i_\phi} \text{ olur.} \quad (6.2)$$

L_1 'in değeri transformatör manyetizasyon (B-H) eğrisindeki doyum nedeniyle sabit değildir, fakat ϕ_t ve i_ϕ arasında bir lineer ilişki olduğu kabul edersek :

$$i_\phi = \frac{N_1 \cdot \phi_t}{L_1} \quad (6.3)$$

Eşitlik 6.1'deki i_ϕ 'de yerine yazarsak :

$$\frac{N_1 \cdot \phi_t}{L_1} r_1 + N_1 \frac{d\phi_t}{dt} = V_{m1} \sin(\omega t + \theta_0) \quad (6.4)$$

veya

$$\left(\frac{r_1}{L_1} + p \right) \phi_t = \frac{V_{m1}}{N_1} \sin(\omega t + \theta_0) \quad (6.5)$$

Eşitlik 6.5'nin çözümü

$$\phi_t = C.F. + P.I. \quad (6.6)$$

$C.F.$: tamamlayıcı fonksiyon çözümün transiyent kısmını verir.

$$\left(\frac{r_1}{L_1} + p \right) \phi_t = 0 \quad (6.7)$$

$$p = -\frac{r_1}{L_1} \quad (6.8)$$

$$C.F. = C e^{-\frac{r_1}{L_1} t} \quad (6.9)$$

C burada sabittir.

P.I. : kısmi integral kararlı hal çözümünü verir ve eşitlik 6.5'e $p = j\omega$ konularak bulunur.

$$P.I. = \frac{V_{m1}}{N_1 \sqrt{\left(\frac{r_1}{L_1}\right)^2 + \omega^2}} \sin\left(\omega t + \theta_0 - \tan^{-1} \frac{\omega L_1}{r_1}\right) \quad (6.10)$$

$$r_1 = 0 \text{ olduğunda, } P.I. = \frac{V_{m1}}{N_1 \omega} \sin(\omega t + \theta_0 - \tan^{-1} \infty) \quad (6.11)$$

$$= \phi_m \sin\left(\omega t + \theta_0 - \frac{\pi}{2}\right) \quad (6.12)$$

$$= -\phi_m \cos(\omega t + \theta_0) \quad (6.13)$$

Bu nedenle, ϕ_t değeri

$$\phi_1 = C.F. + P.I. \quad (6.14)$$

$$= C \cdot e^{-\frac{r_1}{L_1} t} - \phi_m \cos(\omega t + \theta_0) \quad (6.15)$$

C sabitinin değeri başlangıç koşullarından belirlenebilir. ϕ_t akısının değeri, anahtarı kapama anında rezidüel (artık) çekirdek akısı ϕ_r , $\pm \phi_r$ değerini alabilir.

$$t=0, \phi_t = \pm\phi_r \quad (6.16)$$

$$\pm\phi_r = C - \phi_m \cos \theta_0 \quad (6.17)$$

$$C = \pm\phi_r + \phi_m \cos \theta_0 \quad (6.18)$$

$$\phi_t = (\phi_m \cos \theta_0 \pm \phi_r) e^{-\frac{r_1}{L_1} t} - \phi_m \cos(\omega t + \theta_0) \quad (6.19)$$

6.19'daki denklemde ilk parantez içindeki terimler eksponansiyel olarak düşen sabit bir $\phi_{dc} \pm \phi_r$ dc akıyı temsil eder. Burada $\phi_{dc} = \phi_m \cos \theta_0$ 'dir. $\cos(\omega t + \theta_0)$ 'yı içeren terim temel frekanstaki kararlı hal alternatif akıyı ifade eder.

Koşul 1: Uygulanan gerilim maksimumda iken primer anahtarlandığında, $\theta_0 = \frac{\pi}{2}$ ve $\phi_r = 0$,
şekil 6.5 (a)'dan

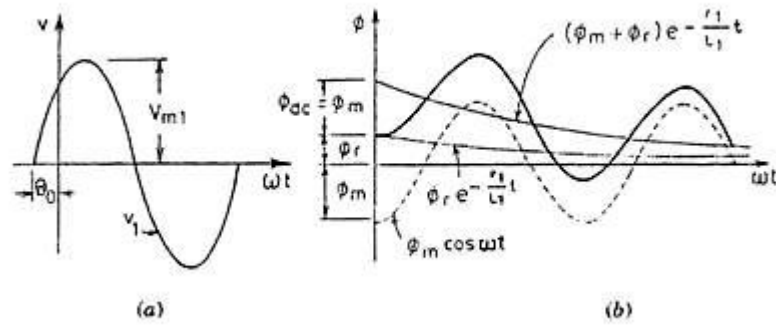
$$v_1 = V_{m1} \sin\left(\omega t + \frac{\pi}{2}\right) = V_{m1} \cos \omega t \quad (6.20)$$

ve eşitlik 6.19'dan

$$\phi_t = \left(\phi_m \cos \frac{\pi}{2}\right) e^{-\frac{r_1}{L_1} t} - \phi_m \cos\left(\omega t + \frac{\pi}{2}\right) \quad (6.21)$$

$$= \phi_m \sin \omega t = \text{kararlı hal alternatif akı} \quad (6.22)$$

$t = 0$, $v_1 = V_{m1}$ ve $\phi_t = 0$ anında; transformatöre uygulanan gerilimin maksimum anında anahtarlandığından kısa bir süre sonra akının kararlı hale oturduğu görülmektedir. Bu nedenle bu durum transformatörün primer anahtarının kapamada en çok tercih edilen durumdur. Bu durum da şekil 6.2 (a)'da gösterilen niteliksel yaklaşımı onaylar niteliktedir.



Şekil 6.5 (a) Transformatörde devreye girme olayı

Koşul 2: Eğer primeri uygulanan gerilim sıfırdan geçerken anahtarlarsak, örneğin $\theta_0 = 0$ ve ϕ_r pozitifken,

$$v_1 = V_{m1} \sin \omega t \quad (6.23)$$

eşitlik 6.19'dan

$$\phi_t = (\phi_m + \phi_r) e^{-\frac{r_1}{L_1} t} - \phi_m \cos \omega t \quad (6.24)$$

Anahtarı kapadıktan yarım periyot sonra ($\omega t = \pi$), eşitlik 6.24'ten

$$\phi_t = (\phi_m + \phi_r) e^{-\frac{r_1}{L_1} \frac{\pi}{\omega}} - \phi_m \cos \pi \quad (6.25)$$

Genellikle $\omega L_1 \gg \pi$, sonuçta $e^{-\frac{r_1 \pi}{\omega L_1}}$ (burada $\omega t = \pi$ ve $t = \frac{\pi}{\omega}$) $e^{-0} = 1$ 'e gider. Bu nedenle anahtarı kapadıktan sonra yarım periyot sonra bileşke çekirdek akısı eşitlik 6.24'ten ;

$$\phi_{t-m} = 2\phi_m + \phi_r \quad (6.26)$$

Eşitlik 6.26, niteliksel yaklaşımlarla elde edilen niteliklerle uyumludur. Eşitlik 6.24'ün çizimi şekil 6.5 (b)'de gösterilmiştir.

Eğer niteliksel yaklaşımda olduğu gibi primer direnci r_1 'i ihmal edersek eşitlik 6.24

$$\phi_t = \phi_r + \phi_m(1 - \cos \omega t) \quad (6.27)$$

Yarım peryot sonra $\phi_{t,m} = 2\phi_m + \phi_r$ olur. Buradan da anlaşılıyor ki transformatör primere uygulanan gerilim sıfırdan geçerken anahtarlama istenmeyen bir durumdur. Çekirdek akısının $2\phi_m + \phi_r$ 'ye eşit olduğu yüksek değerlerde, transformatör çekirdeği reaktör gibi davranır, çünkü geçirgenlik yaklaşık olarak 1'e eşittir. Transformatördeki manyetize akımın devreye girme esnasında transformatör boyutuna bağlı bir süre içinde manyetize akım kararlı hale geçer. YG güç transformatörlerinde, kararlı hal durumuna primer anahtarını kapadıktan 20 sn veya üstü bir süre sonra geçer.

Devreye girme anında manyetize akımın transformatöre zararlı etkileri olmayabilir, fakat aşırı yük rölelerinin istenmeyen çalışması transformatörü devreden çıkarabilir.

6.1.2 Devreye Girme Akımının Belirlenmesi

Transformatördeki devreye girme manyetize akımın tepe değerinin belirlenmesi işlenecektir.

A_i 'ye demir (çekirdek) alanıdır. A_t 'de primer sargının bir sarımı ile kapatılan ortalama alandır. Buradan da $(A_t - A_i)$ 'da bir sarım ile kapatılan non-manyetik alandır. B çekirdek akı yoğunluğu ve H havanın (non-manyetik malzemenin) birim başına mmk'sı ise; primer sargının oluşturduğu maksimum akı $2\phi_m + \phi_r$,

$2\phi_m + \phi_r = A_i B$ 'dir. Başka bir ifadeyle çekirdek tarafından taşınan akı $+(A_t - A_i)\mu_0 H$, diğer bir ifadeyle de non-manyetik malzeme tarafından taşınan akıdır.

$$2\phi_m + \phi_r = A_i \mu_0 H + A_i (B - \mu_0 H) \quad (6.28)$$

$(B - \mu_0 H)$ değeri esas akı yoğunluğudur, yaklaşık olarak transformatör çeliği için 2,22 T'dir. Buradan eşitlik 6.28;

$$2\phi_m + \phi_r = A_t \mu_0 H + 2,22 A_t \quad (6.29)$$

$$H = \frac{2\phi_m + \phi_r - 2,22 A_t}{\mu_0 A_t} \quad (6.30)$$

Primer sargının mmk'sı per unit cinsinden yüksekliğini demir çekirdek ve etrafındaki manyetik olmayan malzeme için kabul edersek

$$H = \frac{N_1 \cdot i_{\phi_m}}{H_\omega} = \frac{2\phi_m + \phi_r - 2,22 A_t}{\mu_0 A_t} \quad (6.31)$$

i_{ϕ_m} = devreye girme manyetize akımının tepe değeri

H_ω = primer sargı yüksekliği

$$i_{\phi_m} = \frac{H_\omega}{N_1} \left(\frac{2\phi_m + \phi_r - 2,22 A_t}{\mu_0 A_t} \right) \quad (6.32)$$

Eğer $B_m = \frac{\phi_m}{A_i}$ ve $B_r = \frac{\phi_r}{A_i}$ sırasıyla; maksimum ve artık(rezidüel) akı yoğunluklarıdır.

B_r değeri genellikle $0,6B_m$ olarak alınır. Pik devreye girme manyetize akımının tepe değeri gerçek değeri eşitlik 6.32'den daha küçük de olabilir.

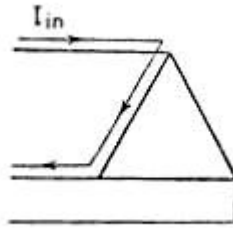
$$i_{\phi_m} = \frac{H_\omega A_i}{N_1 A_t} \cdot \frac{1}{\mu_0} (2B_m + B_r - 2,22) \quad (6.33)$$

Transformatörlerde AG sargısı çekirdeğe yakındır ve sarımı tarafından çevrelenen alan küçüktür. AG sargısının dışına sarılan YG sargısı ve sarımlar tarafından çevrelenen alan büyüktür. Bu nedenle transformatörlerde $\frac{A_i}{A_t}$ oranı AG sargısı için büyük, YG sargısı için küçük olur. Bu da bize göstermektedir ki eşitlik 6.33’de ifade edilen devreye girme manyetize akımı eğer transformatör YG sargı tarafından enerjilenirse daha düşük olmaktadır.

6.1.3 Üç Fazlı Transformatörlerde Devreye Girme Akımı

Üç fazlı transformatör veya üç fazlı transformatör bankı devreye alındığında devreye girme manyetize akımının üç fazı arasında 120° faz farkı olduğundan, oluşumu sınırlanmaktadır. Üç fazlı transformatörlerde devreye girme akımının büyüklüğü tek fazlı transformatörlere göre daha küçüktür.

6.1.3.1 Üçgen Bağlı Sargıda



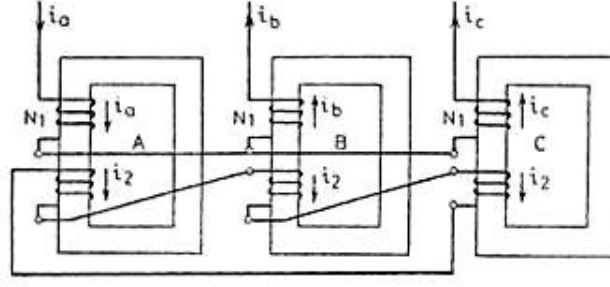
Şekil 6.6 Üçgen bağlantıda devreye girme hat ve faz akımları birbirine eşittir

Primer sargı üçgen olduğunda transformatörün her bir faz sargısı tek fazlı transformatör şeklinde incelenebilir. Üçgen bağlantıda normal koşullarda hat akımı faz akımının $\sqrt{3}$ katıdır. Bu transformatör anahtarlandığında, devreye girme manyetize akımı sadece doyuma ulaşmış bacakta oluşur (diğer bacaklar için ihmal edilebilir). Bu durumda hat ve faz akımları şekil 6.6’da gösterildiği gibi olur. Bu durumda üçgende devreye girme hat akımı,

$$\frac{\text{Üçgen bağlantıda devreye girme hat akımı } (I_{in})}{\text{Hat akımı } (\sqrt{3}I_{ph})} = \frac{1}{\sqrt{3}} \frac{\text{Tek fazlı transformatördeki devreye girme akımı}}{\text{Faz akımı } (I_{ph})} \quad (6.34)$$

Bu da şu anlama gelir ki; üçgen bağlantıdaki devreye girme akımı, tek fazlı transformatör faz akımına oranlı devreye girme akımının $\frac{1}{\sqrt{3}}$ (0,577) katıdır.

6.1.3.2 Yıldız Üçgen Bağlı Transformatör Bankı



Şekil 6.7 Yıldız/üçgen bağlı transformatör bankında devreye girme akımı

i_{1m} 'ye tek fazlı transformatörün maksimum devreye girme akımı diyelim, üç adet tek fazlı yıldız üçgen bağlı transformatörde şekil 6.7'de gösterilmiştir. A fazında maksimum devreye girme akımı i_a olduğu kabul edelim, o zaman B ve C'de ihmal edilebilir transiyentler oluşur, çünkü $v_b = v_c = (0,866V_{m1})$ neredeyse maksimum gerilimlerine çok yakındır.

i_a akımının dönüş yolu B ve C fazlarında i_b ve i_c olarak şekil 6.7'de gösterilmiştir.

B ve C fazlarında ihmal edilebilir transiyentler olduğundan, i_b ve i_c akımlarının manyetik etkisi şekilde gösterildiği gibi kapalı sekonderlerinden akan i_2 tarafından nötralize edilmelidir. Bu i_2 sekonder akımı A fazının sekonderinden geri dönüş yolu olmalıdır. Şekil 6.7 ortaya koyar ki i_a ve i_2 çekirdeği aynı yönde manyetize eder. Sekonder üçgen olduğundan primer nötrü stabilize olmaktadır, bu da primer faz gerilimlerinin dengeli kaldığını, tek faz işletmede değerlerine eşit olduğu anlamına gelir. Bu nedenle şekil 6.7'deki A fazının transiyent mmk'sı $N_1(i_a + i_2)$ tek faz devreye girme olayındayken elde edilen N_1i_{1m} mmk'sına eşit olmak zorundadır.

$$N_1(i_a + i_2) = N_1i_{1m} \quad (6.35)$$

$$i_a + i_2 = i_{1m} \quad (6.36)$$

$$i_b - i_2 = 0 \quad (6.37)$$

$$i_c - i_2 = 0 \quad (6.38)$$

B ve C fazlarından dönen i_a akımı aşağıdaki gibidir:

$$i_a = i_b + i_c \quad (6.39)$$

Eşitlik 6.38'den

$$i_a = 2i_2 \quad (6.40)$$

Eşitlik 6.36'den

$$2i_2 + i_2 = i_{1_m} \quad (6.41)$$

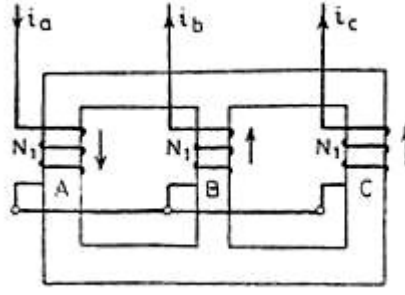
$$i_2 = \frac{1}{3} i_{1_m} \quad (6.42)$$

$$i_a = \frac{2}{3} i_{1_m} \quad (6.43)$$

Eşitlik 6.43 göstermektedir ki incelenmekte olan bu bağlantı şeklindeki maksimum devreye girme akımı tek fazlı transformatörün $\frac{2}{3}$ 'ü kadardır.

6.1.3.3 Üç Bacaklı Yıldız Bağlı Transformatör

A fazında maksimum devreye girme akımı i_a olduğunu kabul edelim. i_b ve i_c , i_a akımının dönüş akımlarıdır. i_{1_m} 'ye de B ve C sargıları kaldırılmış olan tek fazlı bir transformatörün maksimum devreye girme akımı diyelim. Bu durumda A ve B bacaklarında i_a ve i_b mmk'ları için şekil 6.8'deki gibi olur.



Şekil 6.8 Yıldız bağlı üç bacaklı transformatörde devreye girme akımı

B ve C bacakları için i_b ve i_c tarafından oluşturulan mmk'lar birbirine zıttır.

$$N_1(i_b - i_c) = 0 \quad (6.44)$$

i_b ve i_c , i_a 'nın dönüş akımları olduğundan;

$$i_a = i_b + i_c \quad (6.45)$$

Yukarıdan $i_b = i_c$ ve $i_a = 2i_b$

Fakat $i_a + i_b = i_{l_m}$ veya $3i_b = i_{l_m}$ 'den

$$i_b = i_c = \frac{1}{3}i_{l_m} \quad (6.46)$$

ve

$$i_1 = \frac{2}{3}i_{l_m} \quad (6.47)$$

Eşitlik 6.47'dan anlaşılmaktadır ki; üç bacaklı çekirdek tip yıldız bağlı transformatördeki maksimum devreye girme akımı, bir bacaklı tek fazlı transformatör gibi işletilenin $\frac{2}{3}$ 'ü kadardır.

6.1.4 Yüksek Devreye Girme Akımlarının Azaltılması

Devreye girme akımları yüksüz transformatörlerin anahtarlanması sırasında söz konusudur, normal şartlar altında ciddi bir soruna neden olmazlar ve bu nedenle bunu azaltmak için herhangi bir metod kullanılmamaktadır. Buna karşın bunu azaltmak için aşağıda bazı yöntemler önerilmiştir.

- İki adımlı anahtar kullanımı:

İki adımlı anahtarın ilk kontakları kapandığında, transformatörün primerine seri olacak bir direnç eklenir. Transformatörün primerine uygulanan gerilimi azaltabilecek bir oranda olmalı, genellikle kaynak geriliminin yarısı kadar olmalıdır. İkinci kontak kapandığında, bu seri direnç kısa devre olur ve transformatör primerine normal gerilim değeri uygulanır. Gerilim iki adımda yükseldiğinden, her adımda üretilen transiyent akı küçüktür ve devreye girme akımı neredeyse ihmal edilebilir.

- Artık (rezidüel) manyetizmanın yok edilmesi:

Bu yöntemde, transformatörün primerine bir kondansatör bağlıdır. Bu kondansatör transformatörün manyetize akımını iyi bir oranda üzerine alabilecek şekilde uygun bir değerde seçilmelidir. Transformatörün anahtarı kapandığında, transformatör primer endüktansı ile kondansatör arasında sönümlü osilasyonlar oluşur, böylece transformatör demanyetize olur.

- Yüksek Gerilim tarafında anahtarlama:

Eğer transformatör primer tarafından anahtarı kapatılırsa, devreye girme akımı eşitlik 6.33'deki gibi azalır.

6.1.5 Yüklü Transformatörlerin Primerden Anahtarının Kapatılması (Enerjilenmesi)

Güç transformatörleri sekonderi yükten ayrı durumda iken anahtarı kapatılır, fakat dağıtım transformatörlerinde genellikle sekonderi yüklü iken (tüketici tarafında anahtar kapalı durumda) anahtar kapatılır.

Yüklü bir transformatörün primer ve sekonder sargılarında üretilen transiyent akımlar aşağıdaki gibidir.

$$i_{1t} = \frac{1}{2}(\text{manyetize akım})e^{-\frac{r_1}{L_1}t} + I \cdot e^{-\frac{r_1}{L_1}t} \quad (6.48)$$

ve

$$i_{2t} = \frac{1}{2}(\text{manyetize akım})e^{-\frac{r_1}{L_1}t} + I \cdot e^{-\frac{r_1}{L_1}t} \quad (6.49)$$

Yukarıda i_{1t} ve i_{2t} sırası ile primer ve sekonder sargıların transiyent akımlarıdır ve I primer ve sekonder yük akımları I_1 ve I_2 'nin ortalamasıdır.

Transiyent yük akımı kaçak endüktansı I_1 'e bağlı olan zaman sabiti $\frac{L_1}{r_1}$ ile düşer. Zaman sabiti $\frac{L_1}{r_1}$ ile düşen manyetize akımı self endüktans L_1 'e bağlıdır. l_1 , L_1 'den çok daha küçük olduğundan, transiyent yük akımları manyetize akımlara göre daha hızlı yok olurlar. Buna rağmen zaman sabiti $\frac{L_1}{r_1}$ yarım peryottan daha uzun olmaktadır ve bu da transiyent yük akımının yarım peryot geçmeden düşmeyeceği anlamına gelir. Sonuçta, en istenmeyen durumda, transiyent bileşenleri içeren yük akımları yüklü transformatörün anahtarı kapatılma anından yarım peryot sonra neredeyse iki katı değerine ulaşır.

Yüksüz transformatörlerde devreye girme akımı anahtarı kapadıktan yarım peryot sonra nominal akımının 4-6 katına çıkabilir.

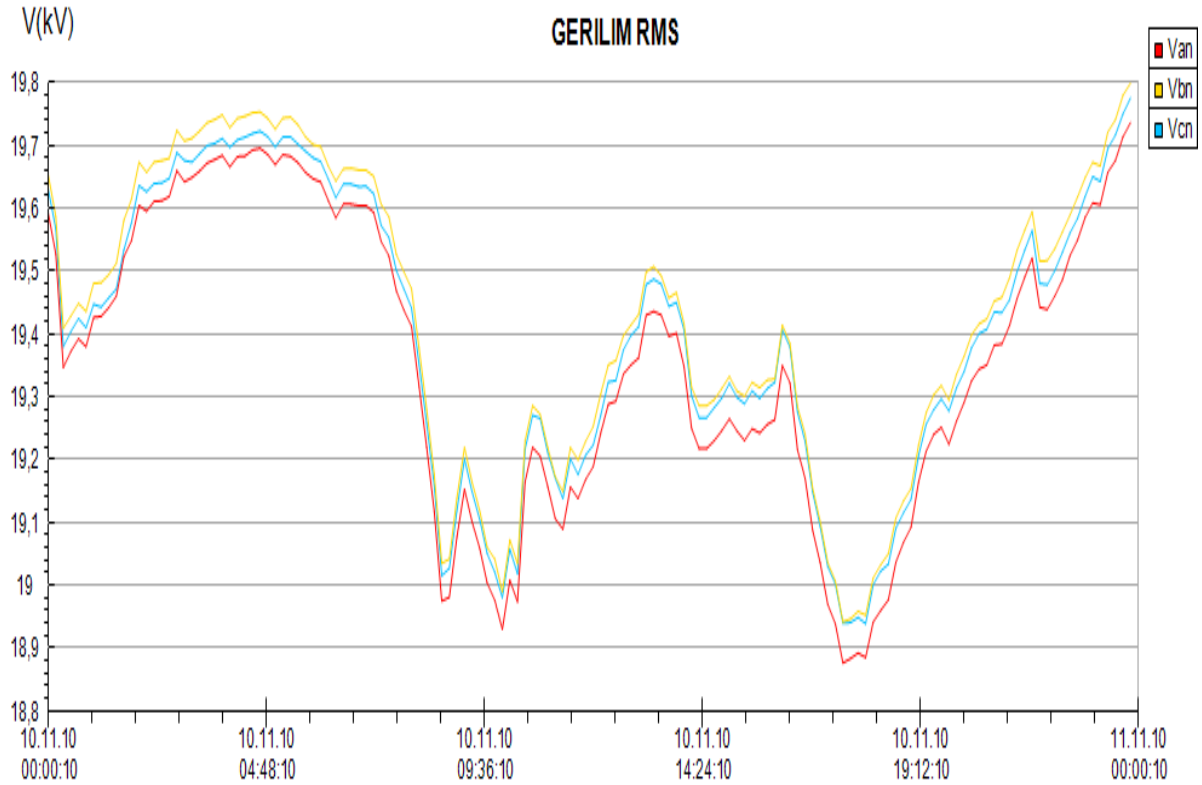
Yüklü transformatörde anahtarı kapama anından yarım peryot sonra toplam primer akımı, nominal akımın 2-3 katına ulaşabilir, sekonderdeki yük nedeniyle yük akımının iki katı da buna eklenir(fazörel toplamı). Böylece yüklü transformatörün anahtarını kapadıktan sonraki toplam primer akımının tepe değeri neredeyse yüksüz transformatörü anahtarladktan sonraki gibi nominal akımın 4-5 katına erişebilir. Bu da bize şunu göstermektedir; yüklü veya yüksüz transformatörlerin anahtarlanmasıyla sonra elde edilen toplam primer akımlarının büyüklüğü neredeyse aynıdır.

7. 154 kV KASIMPAŞA GIS TRAFO MERKEZİ TRAFO-1 33,6 kV SEKONDERİNDEN YAPILAN ÖLÇÜMLER

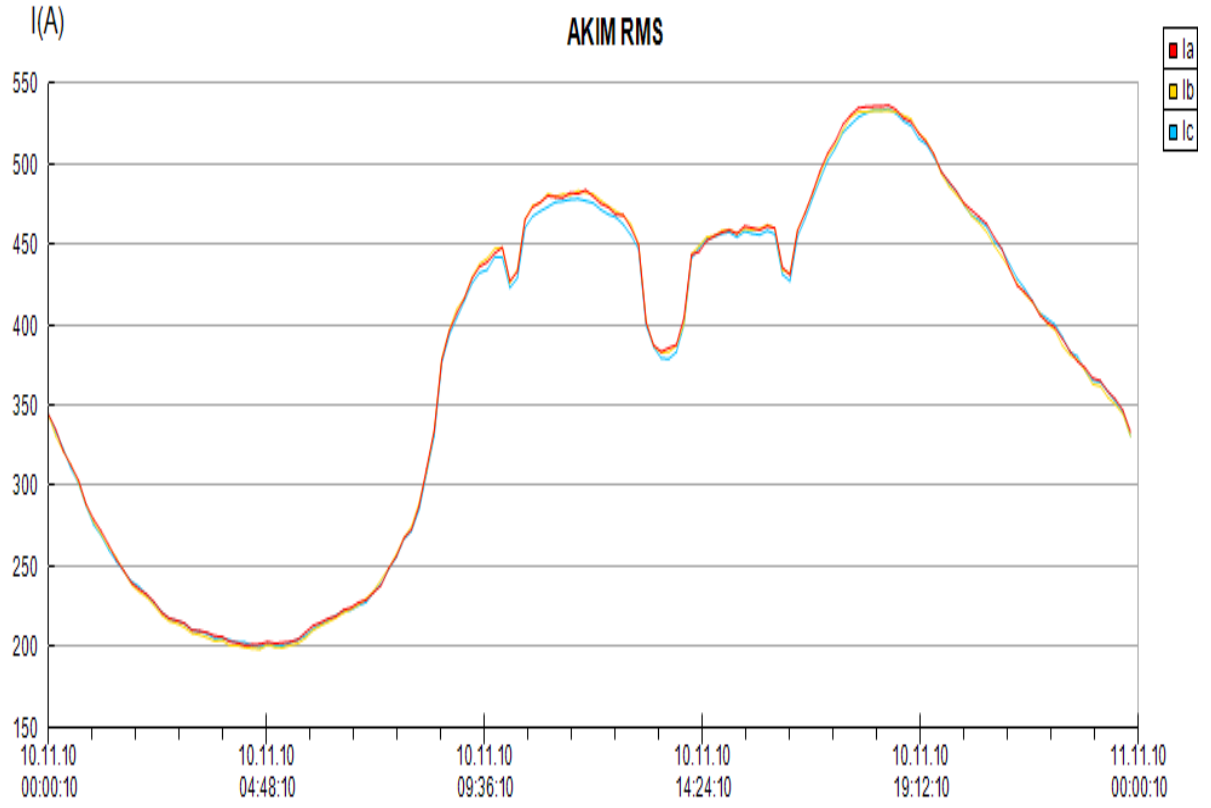
TEİAŞ'a ait 154 kV Kasımpaşa GIS Trafo Merkezinde bulunan 154/33,6 kV , 80/100 MVA, YNyn0 bağlı ALSTHOM marka güç transformatörünün sekonderinden Tübitak'ın Milli Güç Kalitesi Programı çerçevesinde kurmuş olduğu cihazla yapılan ölçümler sonucunda aşağıdaki veriler elde edilmiştir.

Grafiklerde düz çizgi ile gösterilmiş olan limit değerler IEC 61000-4-7, 61000-4-15 ve 61000-4-30 standartlarında belirtilen zaman periyotlarına ve güç kalitesi parametrelerine göre çizilmiştir.

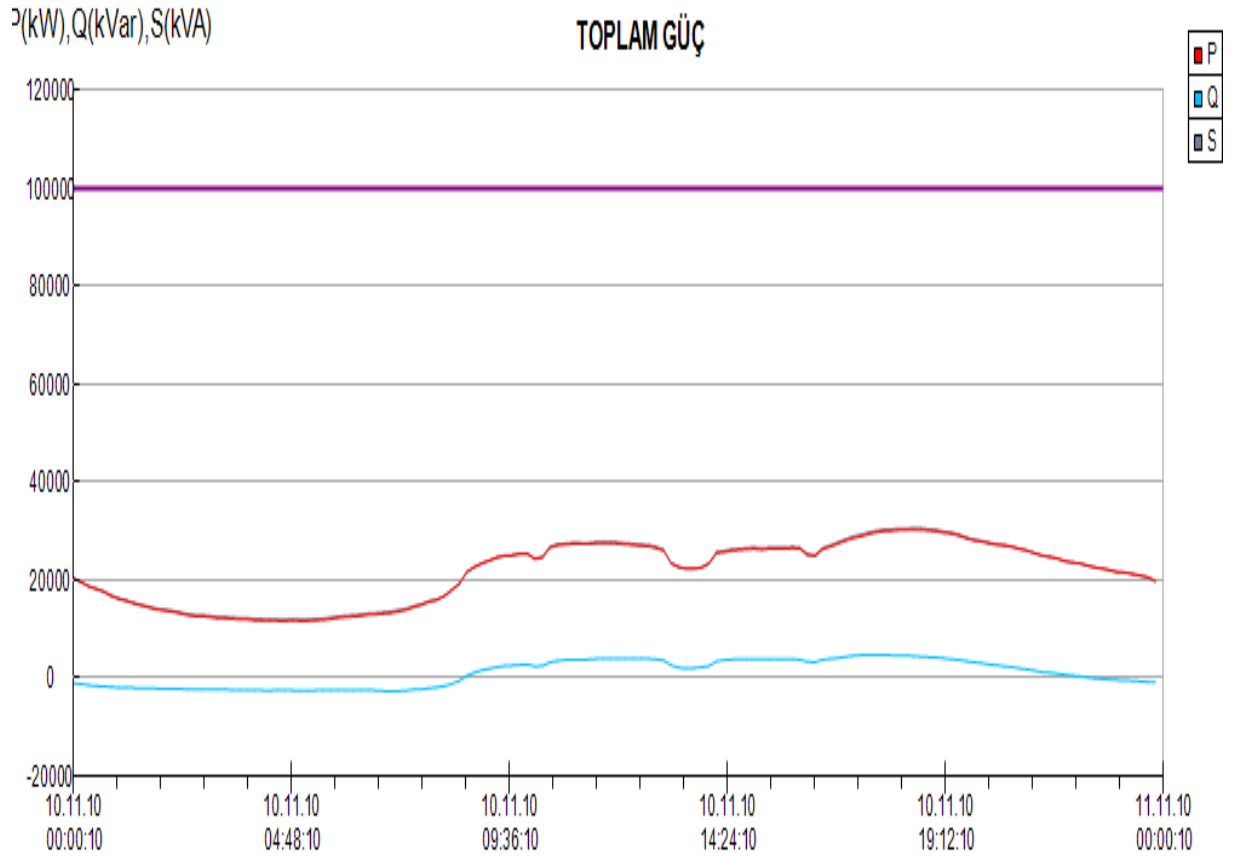
Ölçümler 10.11.2010 tarihi saat sabah 00:00 ile gece 24:00 arasında alınmıştır.



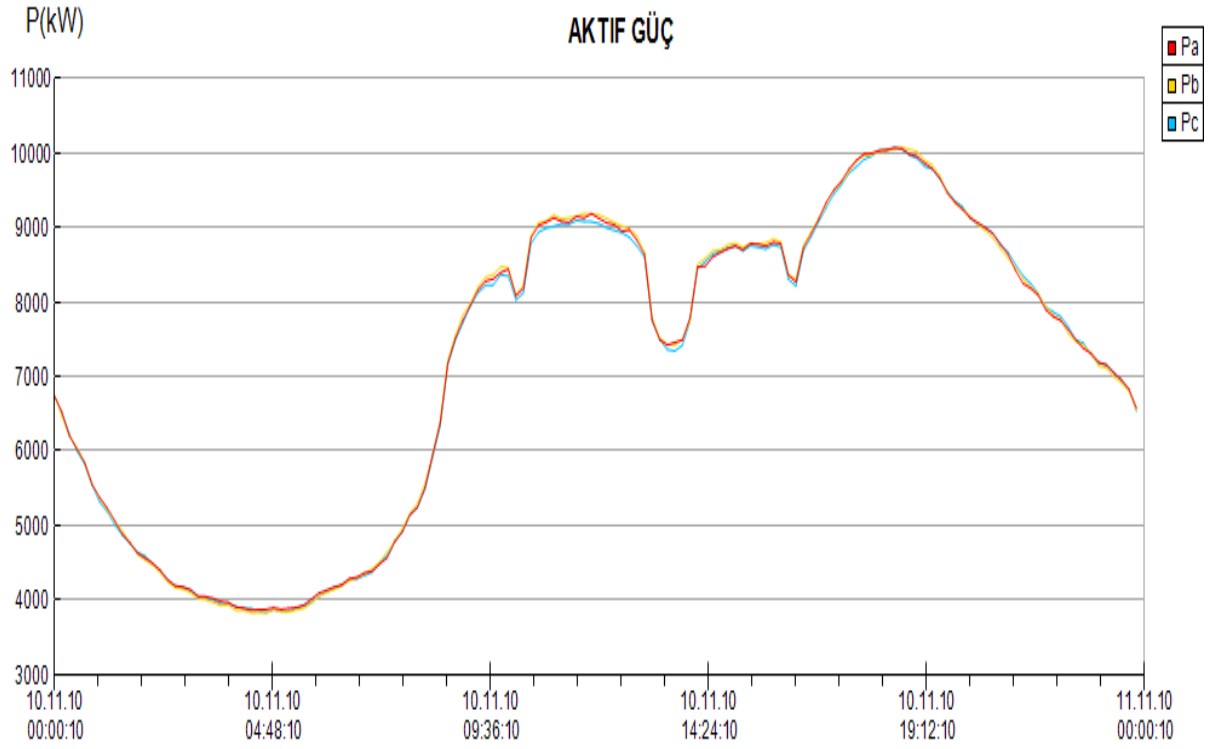
Şekil 7.1 Transformatörün A,B ve C fazlarına ait gün içindeki gerilim değişimi



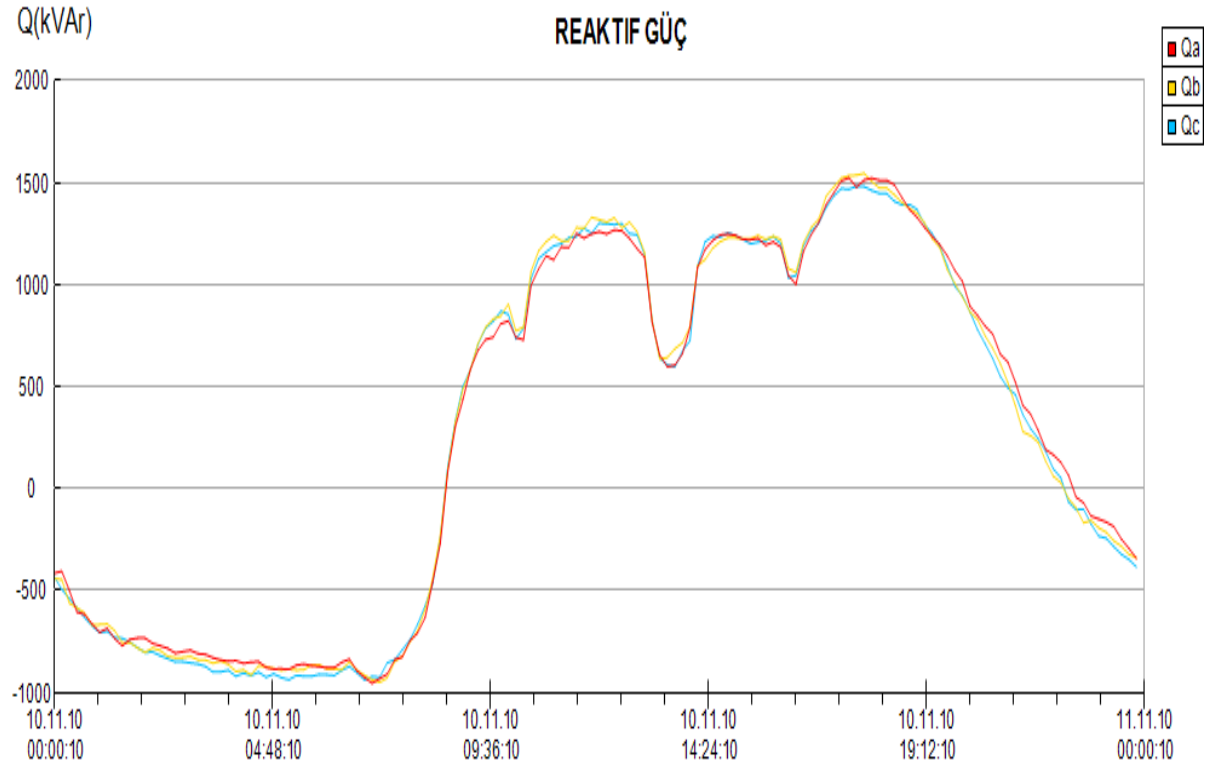
Şekil 7.2 Transformatörün A,B ve C fazlarına ait gün içindeki akım değişimi



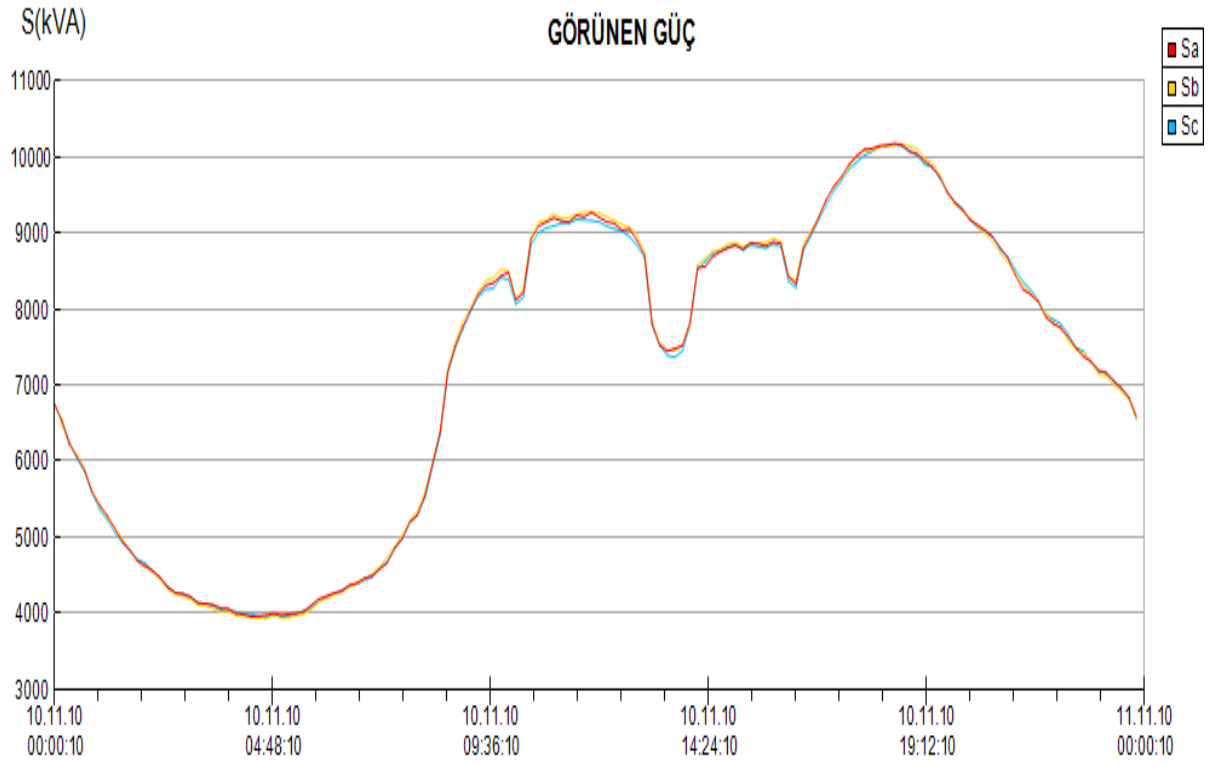
Şekil 7.3 Transformatörün gün içindeki toplam görünen güç değişimi (kVA)



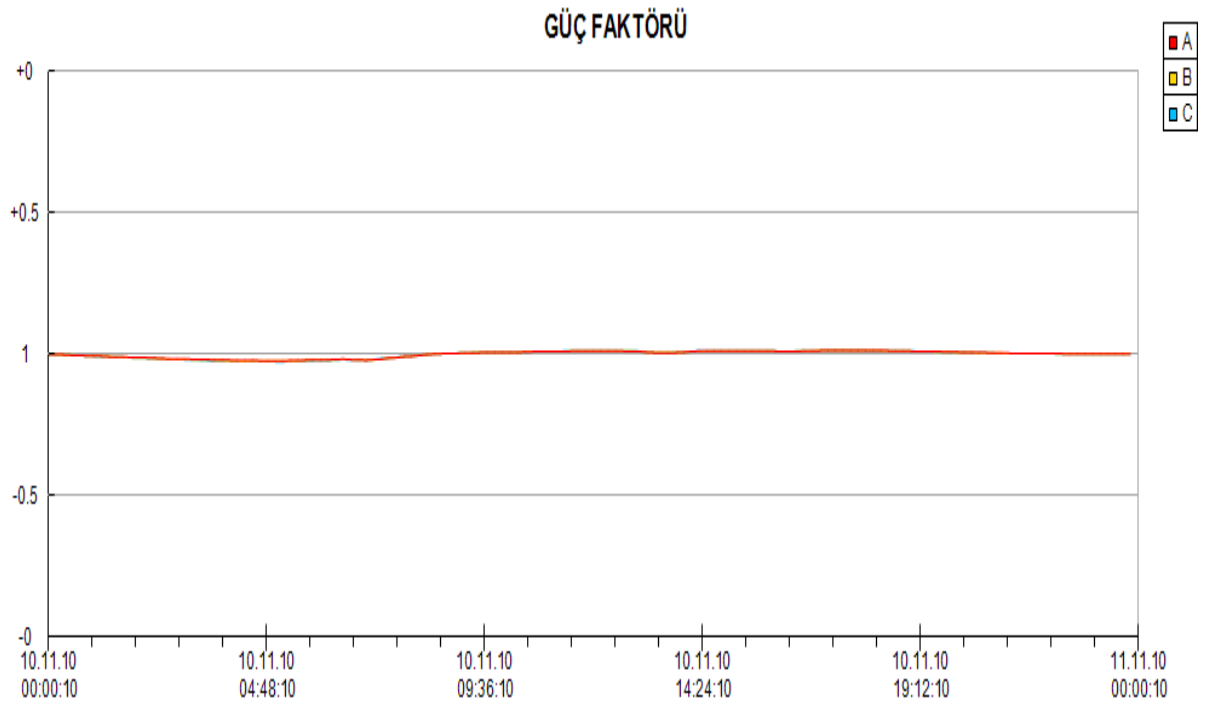
Şekil 7.4 Transformatörün A,B ve C fazlarına ait gün içindeki aktif güç değişimi (kW)



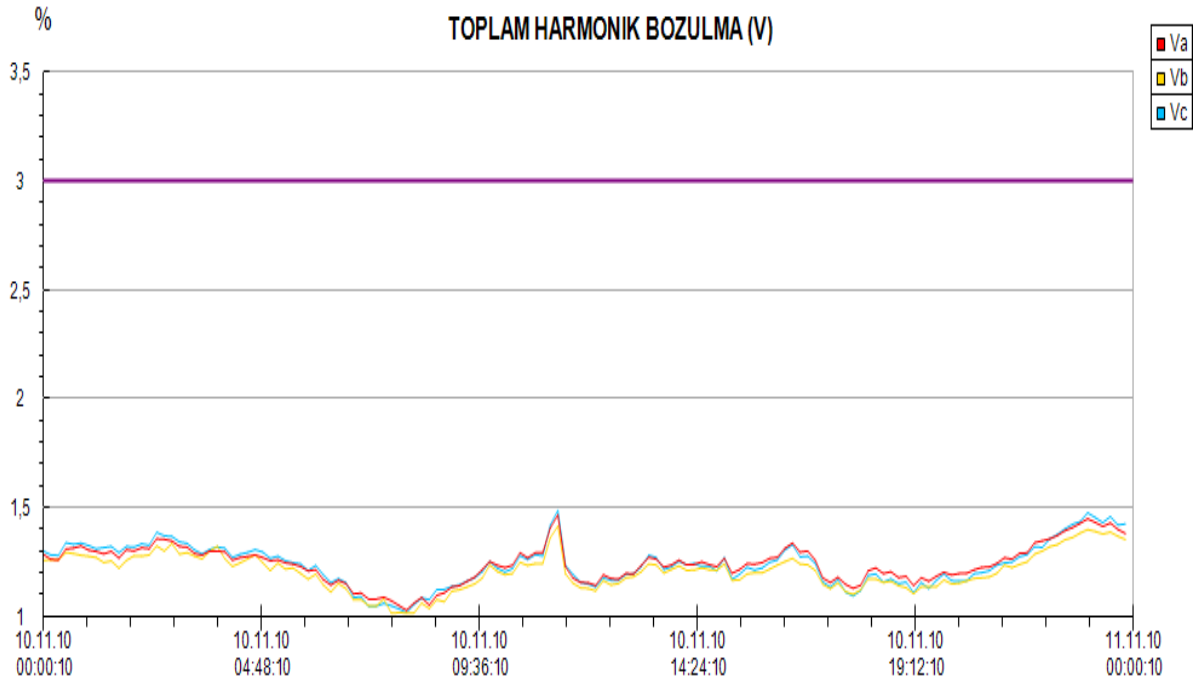
Şekil 7.5 Transformatörün A,B ve C fazlarına ait gün içindeki reaktif güç değişimi (kVAr)



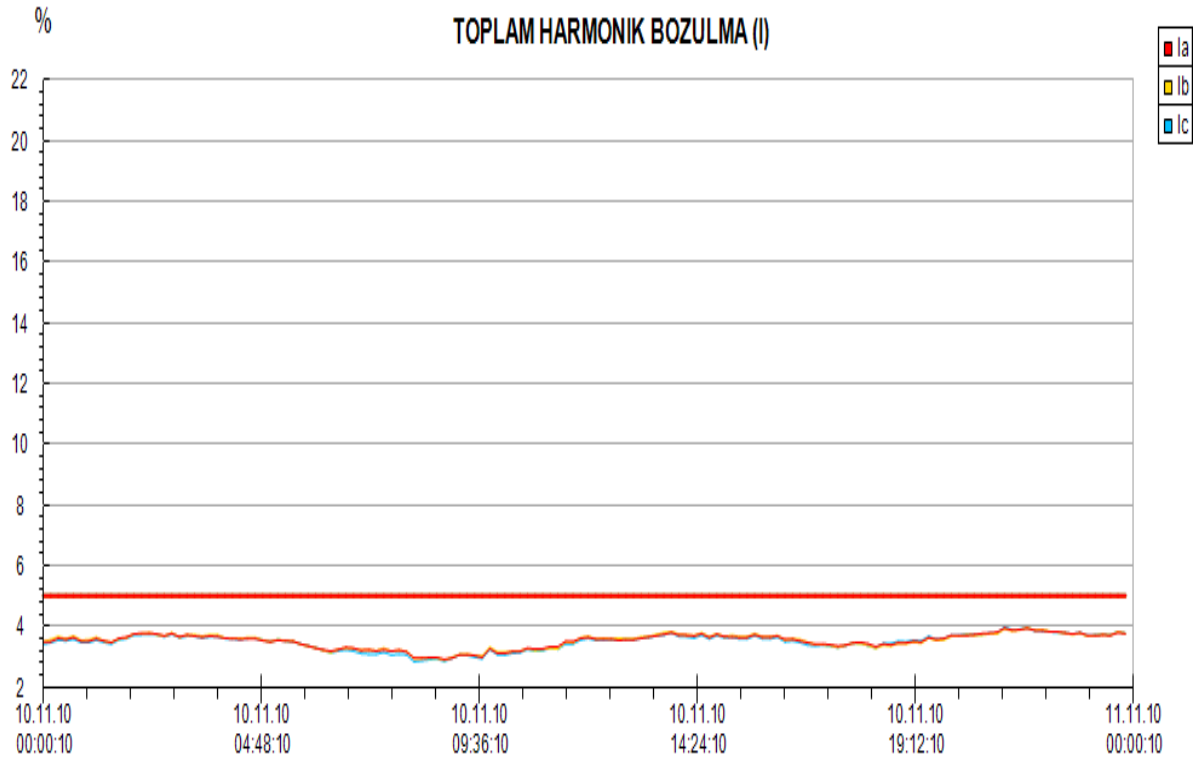
Şekil 7.6 Transformatörün A,B ve C fazlarına ait gün içindeki görünen güç değişimi (kVA)



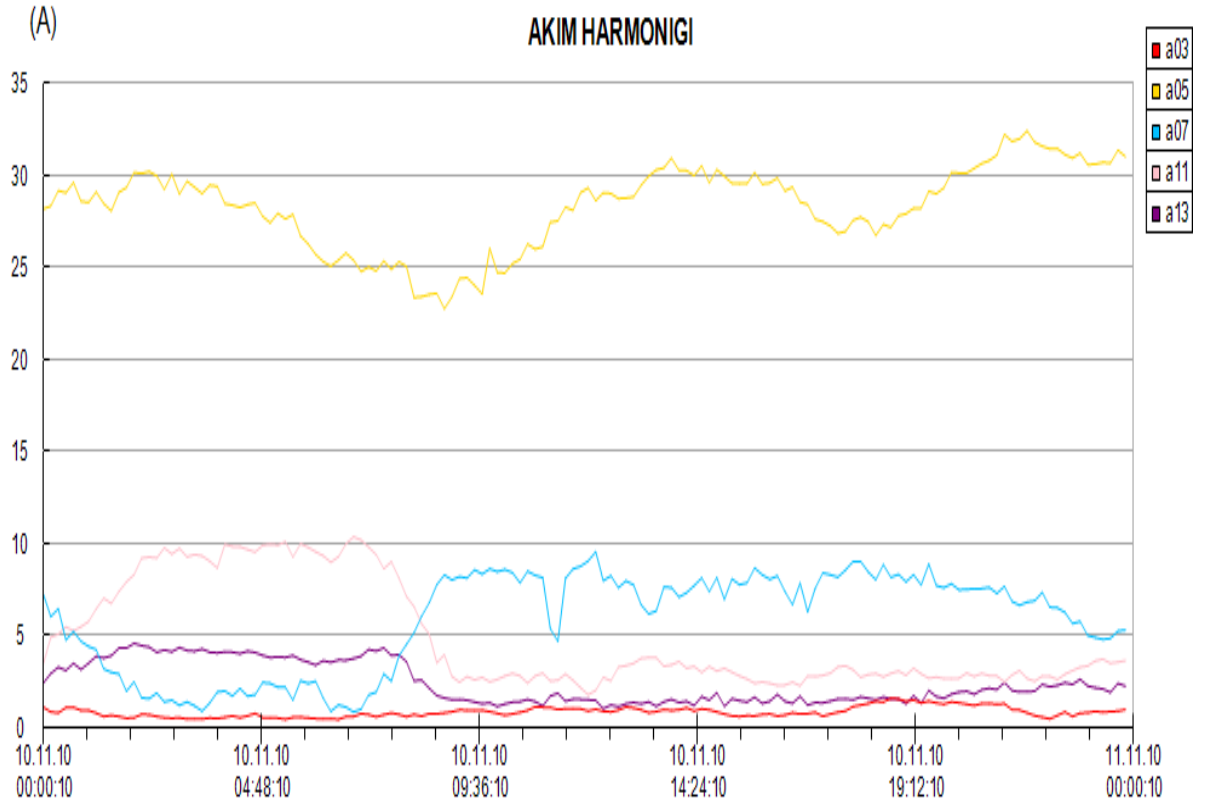
Şekil 7.7 Transformatörün gün içindeki güç faktörü değişimi ($\cos\phi$)



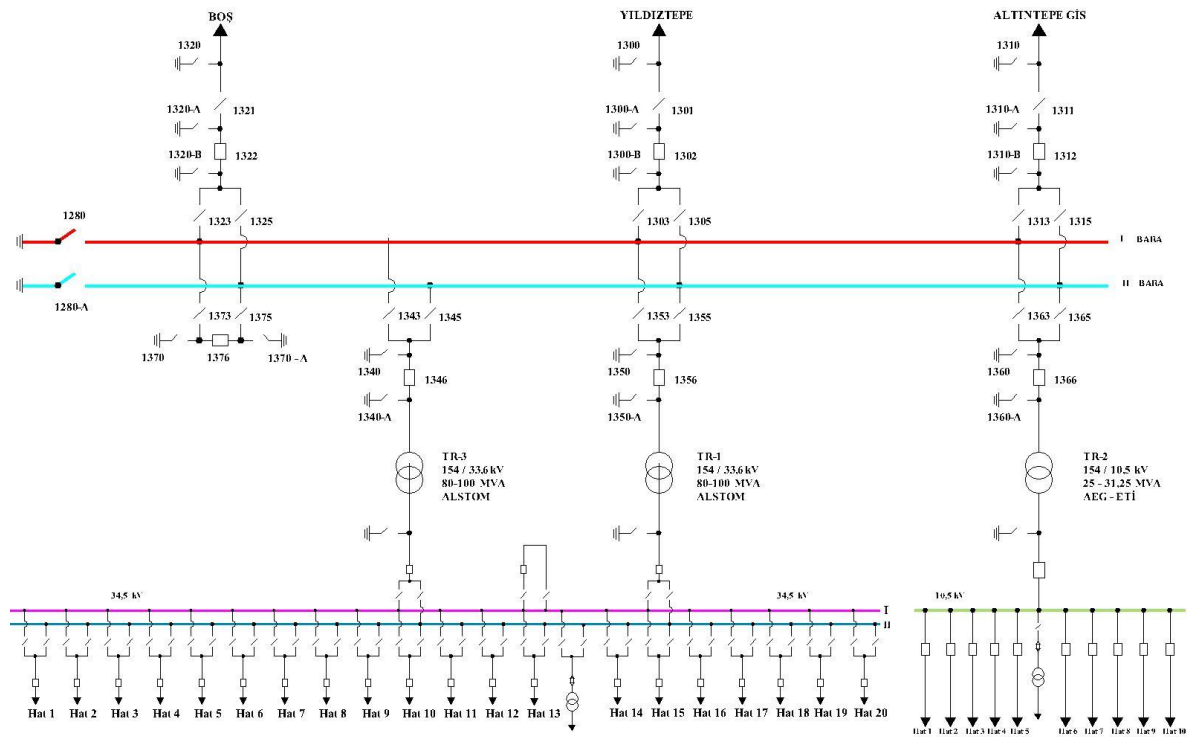
Şekil 7.8 Transformatörün gün içindeki toplam gerilim harmonik bozulma değerleri (THB_V)



Şekil 7.9 Transformatörün gün içindeki toplam akım harmonik bozulma değeri (THB_I)



Şekil 7.10 Transformatörün gün içindeki 3, 5, 7, 11 ve 13'üncü akım harmoniği değerleri



Şekil 7.11 Kasımpaşa TM tek-hat şeması

8. GÜÇ TRANSFORMATÖRLERİNDE HARMONİKLERİN SİMULASYONU

Transformatörün sekonder değerleri ölçüldükten sonra gün içinde transformatörün en yüklü olduğu andaki değerler aşağıdaki tabloda verilmiştir.

Çizelge 8.1 Gün içinde yükün maksimum olduğu andaki değerler

Değerler	Maksimum yükte	Birim
Va (eff)	19,04	kV
Vb (eff)	19,11	kV
Vc (eff)	19,09	kV
Ia (eff)	533,93	A
Ib (eff)	532,57	A
Ic (eff)	531,67	A
Pa	10063,01	kW
Pb	10078,28	kW
Pc	10053,67	kW
Qa	1427,8	kVAr
Qb	1403,98	kVAr
Qc	1391,66	kVAr
Sa	10163,99	kVA
Sb	10175,78	kVA
Sc	10149,67	kVA
P (toplam)	30194,96	kW
Q (toplam)	4223,43	kVAr
S (toplam)	30489,44	kVA
THBv (A)	1,2	
THBv (B)	1,2	
THBv (C)	1,2	
THBi (A)	3,37	
THBi (B)	3,37	
THBi (C)	3,37	
I3 (eff)	2	A
I5 (eff)	27	A
I7 (eff)	8	A
I9	3	A
I11	2	A
Zaman	10:11:2010 - 18:40:10	

8.1 Transformatörün Eşdeğer Devresinin Çıkarılması

Simulasyonu yapılacak olan Kasımpaşa TM’de kullanılan mevcut güç transformatörüne ait test sonucu verileri çizelge 8.2 , 8.3 , 8.4 ve 8.5 ‘de verilmiştir.

Çizelge 8.2 Transformatör etiket bilgileri

GÜÇ (ONAN / ONAF)	80 / 100 MVA
Gerilim	154 kV / 33.6 kV (±%15)
Bağlantı Şekli	YNyn0
OLTC Kademe Sayısı	25

Çizelge 8.3 Gerilim çevirme oranının ölçülmesi

Sargı Çifti : YG / AG

Bağlantı Grubu Kontrolü : YNyn0

[illegible]

Çizelge 8.4 Sargı DC direnci ölçümü

YG Sargısı (mohm)				AG Sargısı (mohm)			
Sıcaklık : 22,3 °C				Sıcaklık : 22,3 °C			
Poz.	A - N	B - N	C - N	Poz.	a - n	b - n	c - n
1	195,63	194,72	194,36	-	9,9955	9,8603	9,8646
2	202,56	201,10	200,44				
3	207,92	206,53	205,78				
4	213,29	211,89	211,16				
5	218,69	217,34	216,54				
6	224,08	222,67	221,88				
7	229,47	228,14	227,28				
8	234,94	233,56	232,74				
9	240,26	238,95	238,09				
10	245,71	244,34	243,57				
11	251,12	249,78	248,89				
12	256,56	255,18	254,32				
13	260,56	259,87	259,35				
14	267,70	266,52	265,60				
15	273,08	271,95	270,97				
16	278,49	277,30	276,30				
17	283,88	282,74	281,70				
18	289,32	288,12	287,10				
19	294,66	293,60	292,50				
20	300,16	298,98	297,92				
21	305,53	304,41	303,30				
22	310,97	309,78	308,74				
23	316,34	315,26	314,16				
24	321,80	320,70	319,57				
25	327,20	326,12	324,99				

Çizelge 8.5 Transformatörün açık devre testi sonuçları

Bağlantı : a - b - c		Boştaki Kayıp ve Akımın Ölçülmesi (IEC 60076-1§10.5)						Frekans : 50 Hz		
Besleme	Gerilimi	Boşta Akım Değerleri						Boşta Kayıp Değerleri		
Yüzde	Ortalama	Faz a	Faz b	Faz c	Ortalama	Garanti		Ölçülen Pm	Düzeltilmiş Pc	Garanti
(%)	(V)	(A)			(%)		(kW)			
90	30240	0,725	0,422	0,640	0,596	0,035	0,100	25,05	25,07	-
100	33600	0,956	0,590	0,903	0,816	0,047	0,150	32,85	32,81	35,0
110	36960	1,882	1,419	1,951	1,751	0,102	0,400	44,73	44,23	45,0
115	38640	3,254	2,774	3,460	3,163	0,184	1,000	53,01	51,75	-

Çizelge 8.6 Transformatörün kısa devre testi sonuçları

Kısa Devre Geriliminin, Kısa Devre Empedansının ve Yükte Kayıplarının Ölçülmesi (IEC 60076-1§10.4)													
Bağlantı			A - B - C		Kısa Devre: a - b - c				Frekans: 50 Hz				
Kademe No		Akım	Gerilim	Empedans		Baz	Yükte Kayıplar	I ² R Kayıpları	A.A. Kayıplar	I ² R Kayıpları	A.A. Kayıplar	Yükte Kayıplar	Garanti
				Ölçülen	Garanti		Sıcaklık: 22,3 °C			Sıcaklık: 75 °C			
YG	AG	(A)	(V)	(%)		(MVA)	(kW)						
1	-	352,8	11575	8,84	-	80,0	141,4	129,0	12,41	155,4	10,30	165,7	-
13	-	299,9	14818	9,62	-	80,0	147,0	126,3	20,66	152,2	17,15	169,3	-
25	-	260,8	18048	10,19	-	80,0	140,9	122,7	18,19	147,8	15,10	162,9	-
1	-	441,1	14469	11,05	11,0	100	220,9	201,5	19,38	242,8	16,09	258,9	272,0
13	-	374,9	18522	12,03	12,0	100	229,6	197,4	32,28	237,8	26,79	264,6	272,0
25	-	326,0	22560	12,74	12,7	100	220,1	191,7	28,42	231,0	23,59	254,6	282,0

8.1.1 Transformatörün Açık Devre Testi

$$P_{OC} = \frac{V_{OC}^2}{R_{CLV}} \quad (8.1)$$

$$R_{CLV} = \frac{V_{OC}^2}{P_{OC}} \quad (8.2)$$

$$R_{CLV} = \frac{(33600 / \sqrt{3})^2}{(32850 / 3)}$$

$$R_{CLV} = 34367 \Omega$$

Çizelge 8.3'ten kademe 13 'teki gerilim çevirme oranınınından

$$R_{CHV} = R_{CLV} \times a^2 \quad (8.3)$$

$$R_{CHV} = 34367 \times (4.583^2)$$

$$R_{CHV} = 721,84 k\Omega$$

Sekonder taraftaki direnç değerini R_{CHV} yanında oldukça küçük olduğundan yok kabul edebiliriz.

$$\cos \varphi = \frac{P_{OC}}{(V_{OC} / \sqrt{3}) \cdot I_{OCort}} \quad (8.4)$$

$$\cos \varphi = \frac{10950}{(33600 / \sqrt{3}) \cdot 0.816}$$

$$\cos \varphi = 0,69174$$

$$\varphi = 46,2317^\circ$$

$$\tan \varphi = 1,0439$$

$$Q_{OC} = P_{OC} \cdot \tan \varphi \quad (8.5)$$

$$Q_{OC} = 10950 \times 1,0439$$

$$Q_{OC} = 11431,20 \text{ VAr}$$

$$X_m = \frac{V_{OC}^2}{Q_{OC}} \quad (8.6)$$

$$X_m = \frac{(33600 / \sqrt{3})^2}{11431,20}$$

$$X_m = X_{mLV} = 32920,416 \Omega$$

$$X_{mHV} = X_{mLV} \times a^2 = 691,456 \text{ k}\Omega$$

8.1.2 Kısa Devre Testi

$$Z_{eq} = \frac{V_{SC}}{I_{SC}} \quad (8.7)$$

$$Z_{eq} = \frac{(14818 / \sqrt{3})}{299,9}$$

$$Z_{eq} = 28,5267 \Omega$$

$$R_{eq} = \frac{P_{SC}}{I_{SC}^2} \quad (8.8)$$

$$R_{eq} = \frac{(126300 / 3)}{299,9^2}$$

$$R_{eq} = 0,46809 \Omega$$

$$X_{eq} = \sqrt{Z^2 - R^2} \quad (8.9)$$

$$X_{eq} = 28,52286 \Omega$$

Çizelge 8.4'ten kademe 13'teki DC direnç ölçümü oranından

$$\frac{A - N + B - N + C - N}{3} = 259,92 m\Omega$$

$$\frac{a - n + b - n + c - n}{3} = 9,9068 m\Omega$$

Çizelge 8.3'den kademe 13'teki gerilim dönüştürme oranından

$$a = 4,583$$

$$R_{eq} = R_1 + a^2 R_2 \quad (8.10)$$

$$0,46809 = 259,92 k + (4,583^2) \cdot 9,9068 k$$

$$k = 1 \times 10^{-3}$$

$$R_1 = 259,92 k = 0,25996 \Omega$$

$$R_2 = 9,9068 k = 0,00991 \Omega$$

Çizelge 8.4'den kademe 13'teki DC direnç ölçümü oranını endüktif reaktanslar için de uygularsak ;

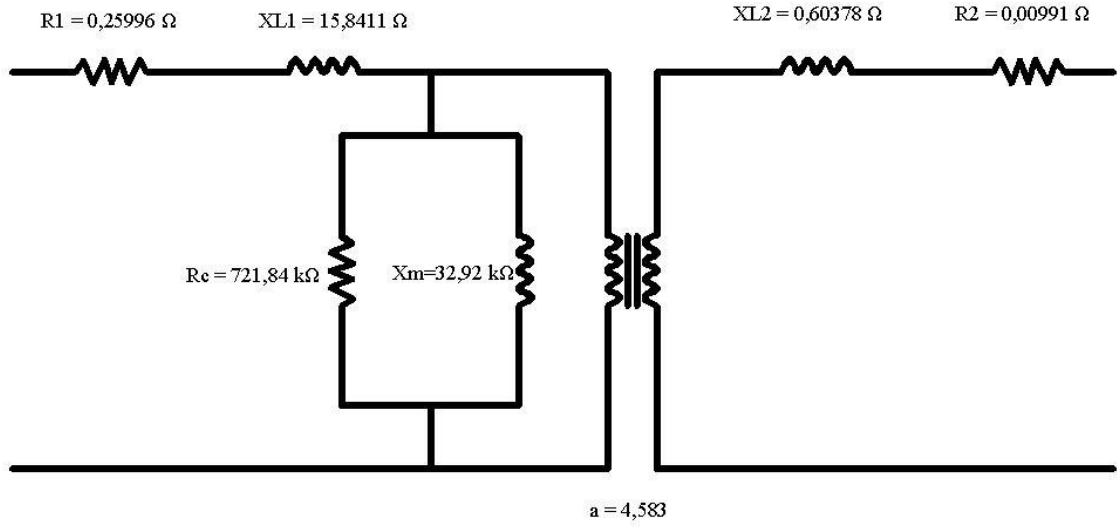
$$X_{eq} = X_1 + a^2 X_2 \quad (8.11)$$

$$28,52286 = 259,92 k + a^2 9,9068 k$$

$$k = 0,060946$$

$$X_{l1} = 15,8411 \Omega$$

$$X_{l2} = 0,60378 \Omega$$



Şekil 8.1 Transformatörün tek fazının kararlı hal eşdeğer devresi

8.2 Simulasyon

Yapılan simulasyonlarda sırasıyla transformatör giriş gerilimi, transformatör giriş akımı, transformatör çıkış akımı, transformatör çıkış gerilimi, yük akımı ve yük gerilim değerleri incelenmiştir.

Kaynak olarak hazır üç fazlı bir generatör modeli kullanılmıştır. İlk olarak gerilim kaynağı ile sisteme enerji verilip denenmiştir. Fakat transformatörü tersiyer sargılı sistemde simulasyon süresi (160 ms) yapılan hesaplama işlemi içinde tamamlanamadığı için mecburen her iki sistemde de sorunsuz olarak çalışan generatör modeli kullanılmıştır.

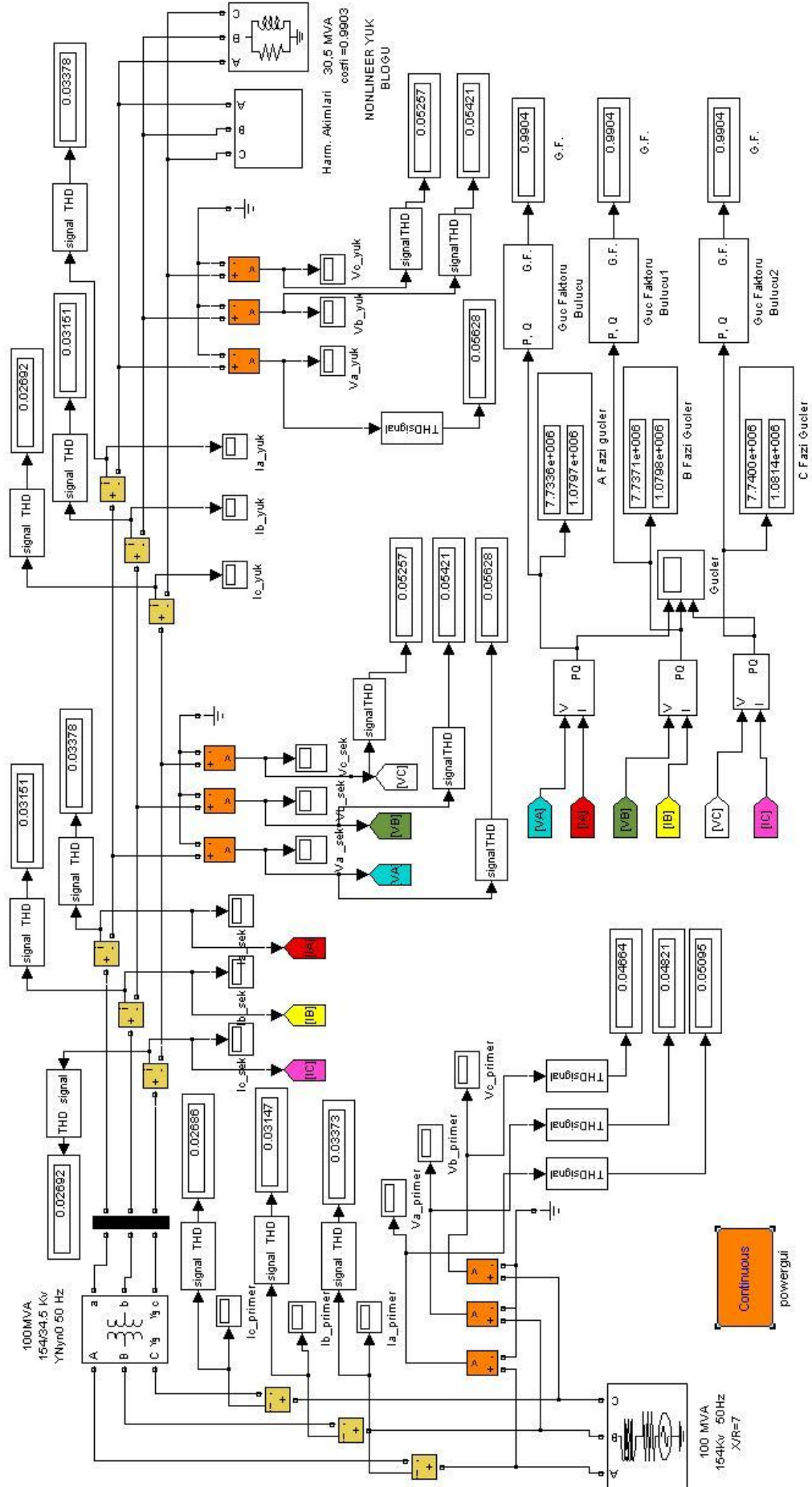
Bu sistemimiz mevcut güç sistemi şebekesi değerleri alınmıştır. Bunlar:

$$V_{\text{primer}} = 154 \text{ kV}$$

$$V_{\text{sekonder}} = 34,5 \text{ kV 'dur.}$$

8.2.1 Gerçek Sistemin Simulasyonu

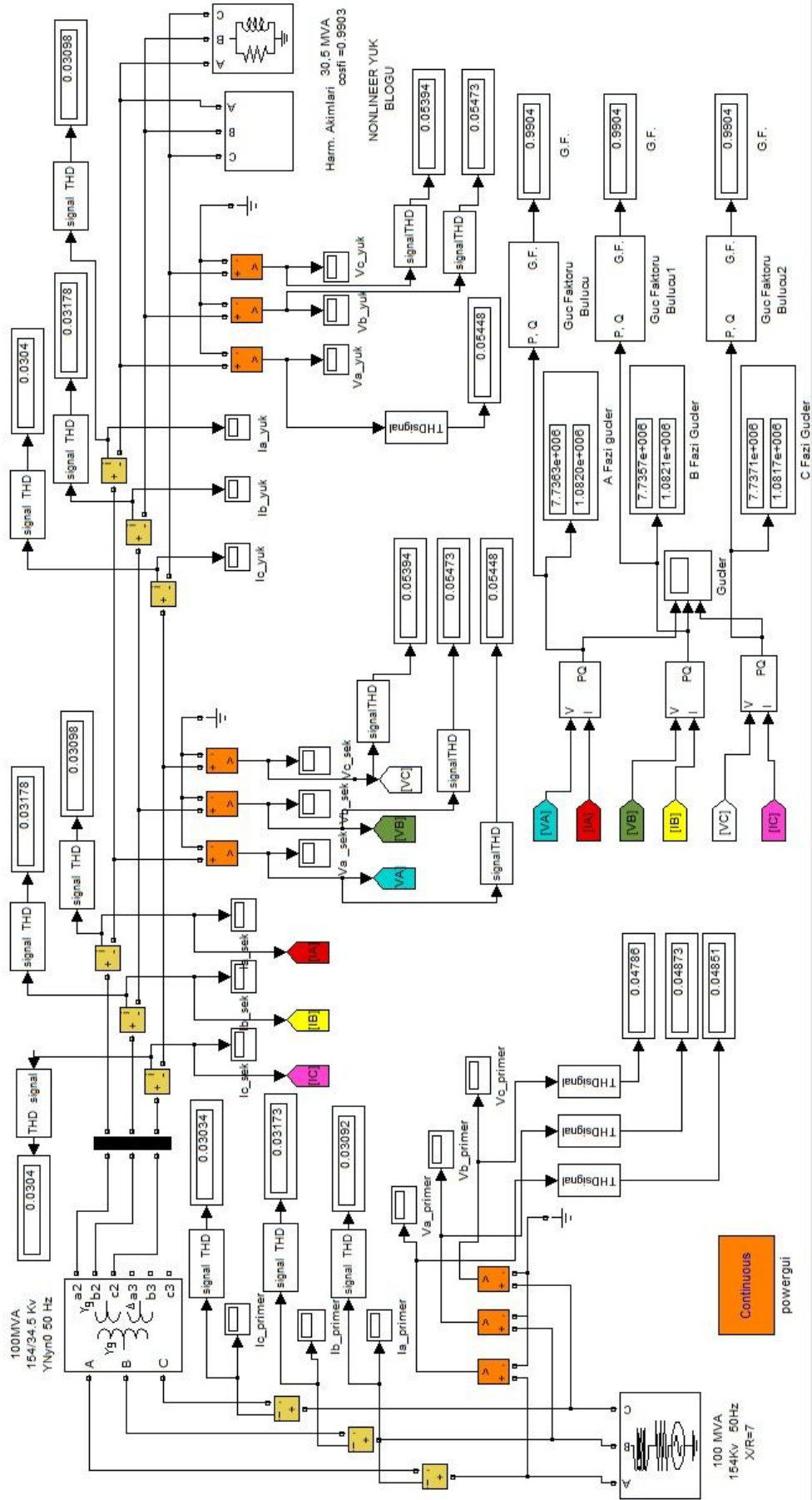
Lineer bir yük bloğuna paralel olarak harmonik akımları bloğu konulmuştur. Bu blokla harmonik akımlarını yük tarafından sisteme basılamaktadır. Bu sayede harmonik akımları üreten bir nonlineer yük bloğu oluşturulmuştur. Harmonik akımları bloğu içindeki veriler gerçek sistemimizle elde edilen ölçüm sonuçları sonucundaki verileri barındırmaktadır.



Şekil 8.2 Gerçek sistemin devresi

8.2.2 Gerçek Sistemin Transformatörü Tersiyer Sargılı Simulasyonu

Gerçek sistemin simulasyonundan farklı olarak burada kullanılan güç transformatöründe üçüncü sargı olarak tersiyer sargı bulunmaktadır. Tersiyer sargı dl bağlantı şekline sahiptir. Yani üçgen bağlı tersiyer sargı emk'sı yıldız bağlı yüksek gerilim sargı emk'sına göre 30° geridedir. Tersiyer sargı normalde transformatörün içindedir ve dışarıya herhangi bir çıkış verilmemiştir, simulasyonda ise dışarıya çıkış verilmiştir fakat bu uçlar açık bırakılmıştır. Tersiyer sargı mevcut güç transformatörünün içinde olduğu için fabrikada ve sahada yapılan testlerde bu sargının testi yapılmamıştır, dolayısıyla bununla ilgili herhangi bir test sonucu veya veri yoktur. Bu nedenle tersiyer sargının değerleri keyfi olarak $V_3 = 3 \text{ kV}$, $R_3 = 0,002 \Omega$, $L_3 = 0,0002 \text{ H}$ alınmıştır.



Şekil 8.3 Gerçek sistemin transformatörü tersiyer sargılı devresi

8.3 Simulasyonun Yorumu

Dengeli bir sistemde her bir fazda okunan değerlerin birbiri ile aynı olması gerekir. Generatörün ve transformatörün iç yapısından kaynaklanan dengesizlik nedeniyle okunan değerlerde küçük farklılıklar olmaktadır. Bu her bir fazda farklı değer okunması simulasyon sonucunda pek bir önem arz etmemektedir. Yukarıda simulasyonu yapılan her iki sisteme ait toplam THB tablosu aşağıda verilmiştir.

Çizelge 8.7 Mevcut güç transformatöründen okunan ve simulasyon sonucu okunan THB değerleri

	Kasımpaşa TM'deki Mevcut Güç Transformatöründen Okunan Değerler (%)	Gerçek Sistem (%)	Gerçek Sistem Transformatörü Tersiyer Sargılı (%)
Va_primer		5,0950	4,8510
Vb_primer		4,8210	4,8730
Vc_primer		4,6640	4,7856
Ia_primer		3,3730	3,0920
Ib_primer		3,1470	3,1730
Ic_primer		2,6860	3,0340
Ia_sekonder		3,3780	3,0980
Ib_sekonder		3,1510	3,1780
Ic_sekonder		2,6920	3,0400
Va_sekonder		5,6280	5,4480
Vb_sekonder		5,4210	5,4730
Vc_sekonder		5,2570	5,3940
Ia_yük	3,37	3,3780	3,0980
Ib_yük	3,37	3,1510	3,1780
Ic_yük	3,37	2,6920	3,0400
Va_yük	1,2	5,6280	5,4480
Vb_yük	1,2	5,4210	5,4730
Vc_yük	1,2	5,2570	5,3940

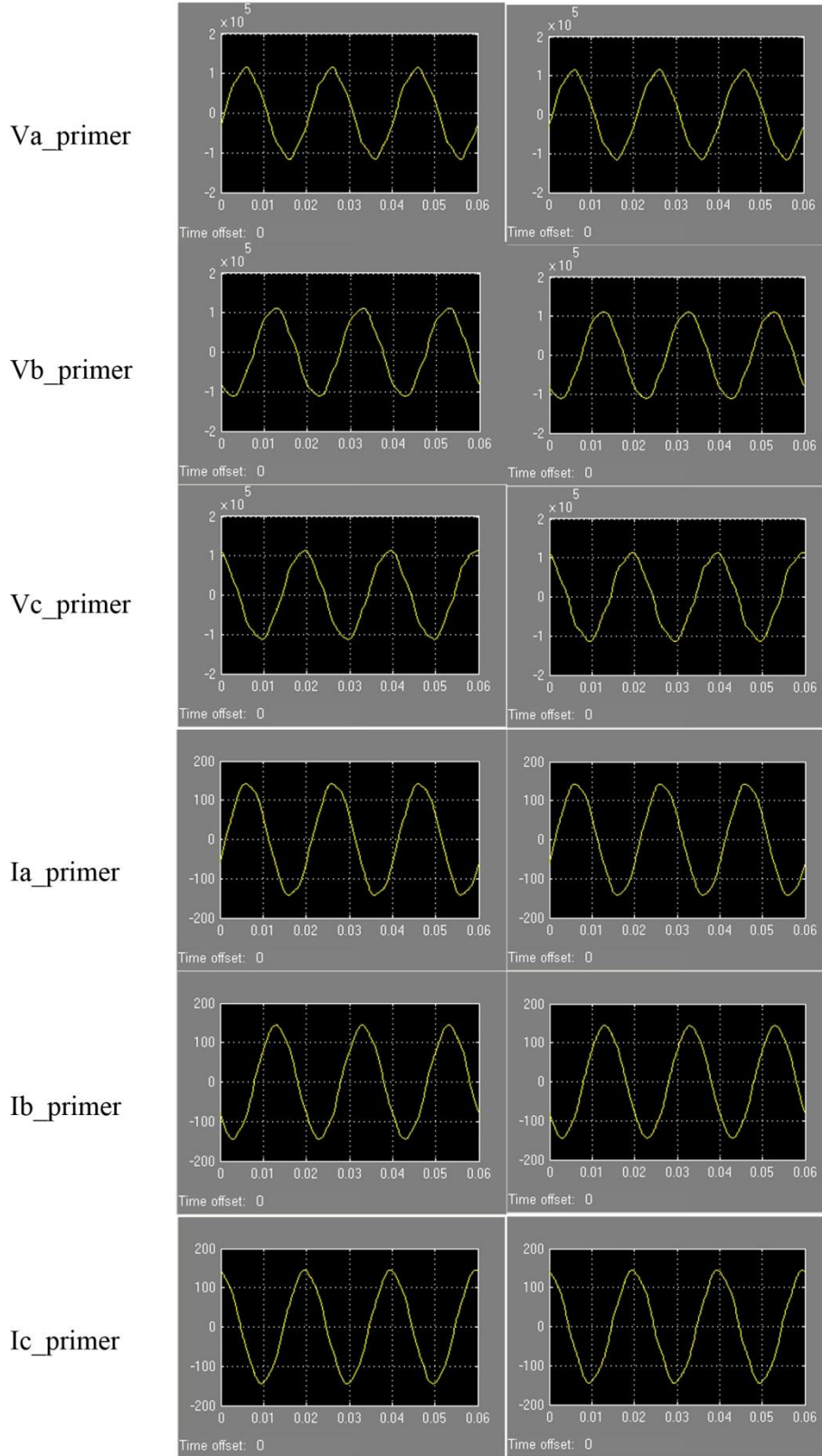
Kasımpaşa TM'deki mevcut güç transformatöründen okunan gerilim harmonikleri değeri oldukça küçüktür. Kasımpaşa TM'de simulasyonumuzdaki gibi bir yük profili mevcut değildir. Yük profilinde aynı anda yük çeken yüzlerce farklı karakteristikteki kullanıcı vardır. Her bir kullanıcının yük profilini eş zamanlı olarak okumak gerekmektedir. Bunun içinse birbiri ile senkron uzaktan okuma sistemi altyapısı kurulması gerekmektedir. Halihazırda böyle bir okuma sistemi de mevcut değildir.

Gerçek sistemde Kasımpaşa TM'de okunan akım harmonik değerleri yakalanmıştır. Fakat yük tarafından enjekte edilen akım harmonikleri sistemde hem akım hem de gerilim harmoniklerini artmasına sebep olmaktadır. Simulasyon sonucunda gerilim harmonik

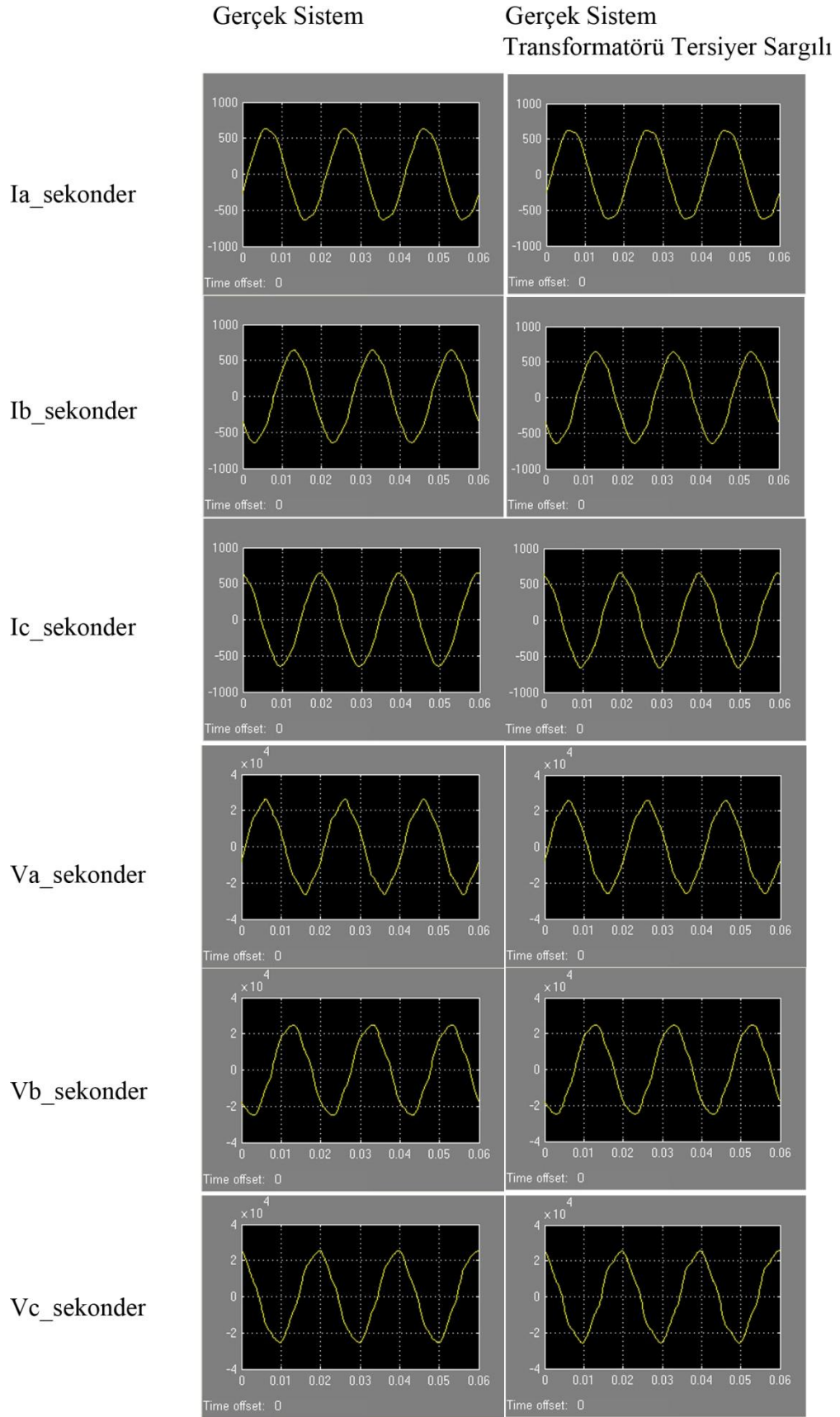
değerleri yaklaşık 4,5 katına çıkmıştır. Bunun nedeni sisteme basılan akım harmoniklerinin transformatör ve özellikle yük tarafındaki dirençten dolayı gerilim harmonikleri olarak da gözükmesidir.

Transformatörü üçgen bağlı tersiyer sargıya sahip olan sistemde akım harmoniklerinin azaldığı görülmektedir.

Gerçek Sistem

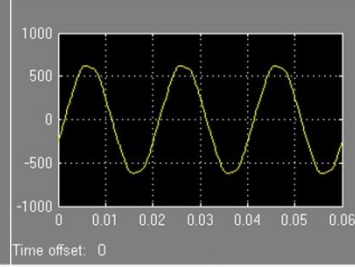
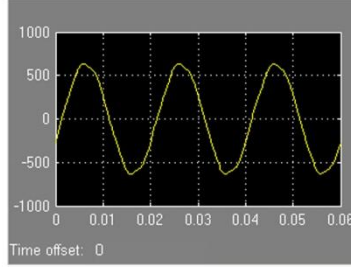
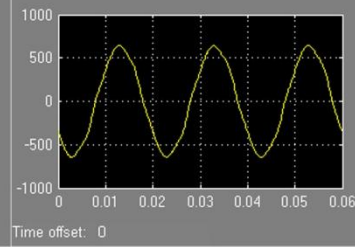
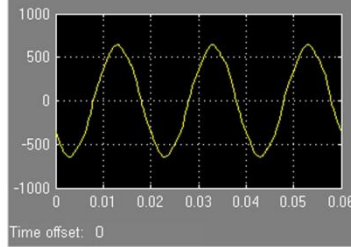
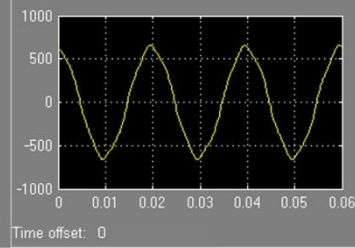
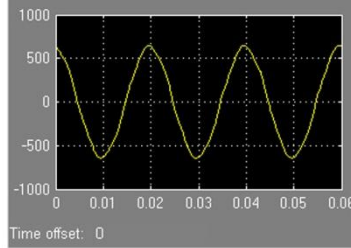
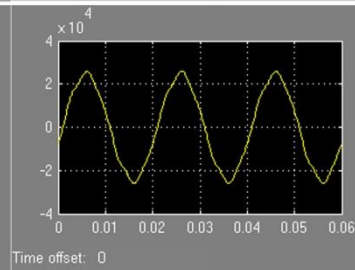
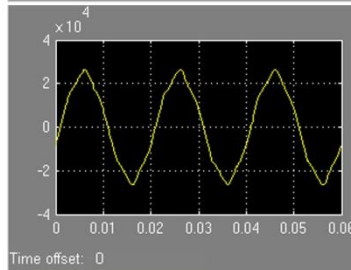
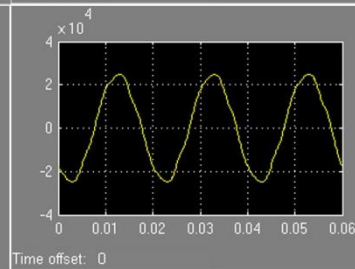
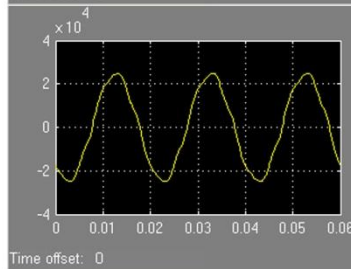
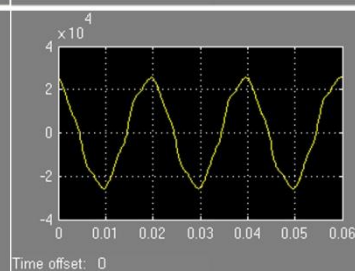
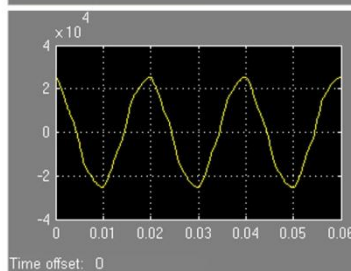
Gerçek Sistem
Transformatörü Tersiyer Sargılı

Şekil 8.4 Transformatörün primerinden okunan akım ve gerilimler



Şekil 8.5 Transformatörün sekonderinden okunan akım ve gerilimler

Gerçek Sistem

Gerçek Sistem
Transformatörü Tersiyer Sargılı $I_{a_yük}$  $I_{b_yük}$  $I_{c_yük}$  $V_{a_yük}$  $V_{b_yük}$  $V_{c_yük}$ 

Şekil 8.6 Yükten okunan akım ve gerilimler

9. SONUÇLAR ve ÖNERİLER

- Düşük akı yoğunluğu:

Harmonikler düşük çekirdek akı yoğunluğu kullanılarak azaltılabilir. Bunun içinde çekirdek alanı büyütülebilir, daha fazla iletken malzemesi ve daha pahalı hale gelir (aynı gerilim için). Bu nedenle bu yöntem ekonomik olmaz.

- Bağlantı şekilleri:

Hatlardaki üçüml harmonik akımları ve gerilimler transformatör yıldız (topraksız) veya üçgen bağlanarak bastırılabilir.

- Primer veya sekonder sargısı üçgen bağlı:

Harmonik gerilimler harmonik akımlara göre daha fazla sorun değeri taşırlar. Bu nedenle üçüncü harmonik gerilimini bastırmak oldukça önemlidir. Eğer transformatörün herhangi bir sargısını üçgen bağlarsak üçüncü harmonik gerilimlerini kayda değer ölçüde bastırırız.

- Tersiyer sargıyla:

Eğer primer veya sekonder sargılardan birini üçgen bağlama imkanımız yoksa , o zaman üç fazlı transformatör üçüncü bir sargıya sahip olmalıdır. Bu sargıyatersiyer sargı adı verilir ve üçgen bağlantılıdır. Kapalı üçgen bağlı tersiyer sargı üçüncü harmonik akımlarının akması için bir yol sunar, bu nedenle akı ve emk neredeyse tam bir sinüs olur.

Tersiyer sargının temel gerilim bileşenine hiçbir etkisi yoktur. Çünkü her üç fazdaki emk 120° aç farkı vardır, bunların toplamı kapalı üçgen sargıda sıfırdır.

- Yıldız üçgen topraklama transformatörü:

Üçüncü harmonik gerilimler yıldız/yıldız bağlı transformatörde yıldız/üçgen bağlı topraklama transformatörü kullanılarak bastırılabilir . Kapalı üçgen üçüncü harmonik akımlarının akması için bir yol sağlar, bu nedenle akı ve emk sinüs olarak kalır. Bu sayede yıldız noktası potansiyeli stabil olur ve nötr noktasındaki salınımlardan kurtulur.

Yıldız/yıldız bağlı transformatörde üçüncü harmonik gerilimler 4 uçlu kaynak kullanılarak bastırılabilir (veya generatörün nötrü topraklı ise transformatörün nötrüde topraklı olmalı). Nötr kablo üçüncü harmoniklerin akması için bir yol sağlar, akı ve emk sinüs olarak kalır.

- Üç adet tek fazlı transformatör yerine bir adet çekirdek tip üç fazlı transformatör kullanılması:

Yy bağlı birbiri ile manyetik bağı olmayan transformatöre göre harmonik değerinin daha düşük olmaktadır Bunun nedeni üçöl akılar diğer iki bacaktan dönemez, çünkü diğer akılar ile eş fazlı olduğundan bu bacaklarda çakışırılar. Üçöl akı dönebilmek için yolunu havadan tamamlar. Hava da yüksek relüktans sunduğu için, üçöl emk değeri de daha düşük olmaktadır. Bu akı bazı şekillerde tanktan da dolaşabilir, istenmeyen kayıplara sebep olabilir. Aslında bu durum sıfır dizi bileşen akımları ve fazlararası dengesizlik açısından iyi bir durum teşkil eder.

KAYNAKLAR

Adak S.(2003), Enerji Sistemlerinde Harmonik Distorsiyonun Azaltılması, YTÜ F.B.E.

Apay F. T. (2008), Güç Kalitesi Parametrelerinin Ölçülmesi ve Değerlendirilmesi, YTÜ F.B.E.

Areva (2008), Power Transformers Vol.1: Fundamentals, Areva T&D

Areva (2008), Power Transformers Vol.2: Expertise, Areva T&D

Areva (2004), The Testing of Power Transformers, Areva T&D

Arıkan O.(2003), Nonlinear Yüklerin Transformatörler Üzerindeki Etkileri, YTÜ F.B.E.

Bhatt K. ve Pradhan O. P. , Effects of Numerical Oscillation in Switching of Power Transformer Connected to a Power Network, Lisans Tezi, National Institute of Technology Bourkela Department of Electrical Engineering

Bimbhra P.S. , Generalized Theory of Electrical Machines, Khanna Publishers, Delhi

Bimbhra P.S. (1997) , Electrical Machinery, Khanna Publihers, Delhi

Fitzgerald A.E. ve Kingsley C.Jr., Umans S.D. (1992) , Electric Machinery, Mcgraw-Hill Book Co. Singapore

Guru B.S. ve Hızıroğlu H.R. (2001) , Electric Machinery & Transformers, Oxford University Press

Kavak M. (2008), Harmonikli Devrelerde Güç Katsayısının Düzeltilmesi, Yüksek Lisans Tezi, YTÜ F.B.E.

Modipane K. C. (2005), An Investigation of the Effects of Voltage and Current Harmonics on Electrical Distrubition Island Network, Yüksek Lisans Tezi, University of Johannesburg Electrical and Electronic Engineering Science in the Faculty of Engineering

ÖZGEÇMİŞ

Doğum tarihi 10.07.1984

Doğum yeri İstanbul

Lise 1995-2002 Kocaeli Anadolu Lisesi

Lisans 2003-2008 Yıldız Teknik Üniversitesi
Elektrik Mühendisliği Bölümü

Yüksek Lisans 2008-2011 Yıldız Teknik Üniversitesi
Fen Bilimleri Enstitüsü
Elektrik Mühendisliği Anabilim Dalı
Elektrik Makinaları ve Güç Elektroniği Programı

Çalıştığı Kurumlar

2008-2009 Yüksel Karapınar Mimarlık Atölyesi Ltd. Şti.

2009-Devam ediyor TEİAŞ 1. İletim ve Tesis Grup Müdürlüğü