

**YILDIZ TEKNİK ÜNİVERSİTESİ
FEN BİLİMLERİ ENSTİTÜSÜ**

**ÜÇ FAZ TRANSFORMATÖRLERİN HARMONİK
ANALİZİ İÇİN MODELLEME, BİLGİSAYAR
SİMÜLASYONU VE BİR ALGORİTMA
OLUŞTURULMASI**

-134780-

Elektrik-Elektronik Yük. Müh. Mehmet ZİLE

**FBE Elektrik Mühendisliği Anabilim Dalında
Hazırlanan**

DOKTORA TEZİ

Tez Savunma Tarihi : 8 Ekim 2003
Tez Danışmanı : Prof. Dr. Asım KASAPOĞLU (YTÜ)
Jüri Üyeleri : Prof. Dr. Halit PASTACI (YTÜ)
: Prof. Dr. Emin TACER (İTÜ)
: Prof. Dr. Nariman ŞERİFOĞLU (İÜ)
: Doç. Dr. Hakan ÜNDİL (İÜ)

[Handwritten signatures and stamps]

İSTANBUL, 2003

**TEC. YÖNETİM KURULU
BAŞKANLIĞI**

İÇİNDEKİLER

	Sayfa
SİMGE LİSTESİ.....	iv
KISALTMA LİSTESİ.....	vi
ŞEKİL LİSTESİ.....	vii
ÇİZELGE LİSTESİ.....	xi
ÖNSÖZ.....	xii
ÖZET.....	xiii
ABSTRACT.....	xiv
1 GİRİŞ	1
1.1 Genel Tanıtım.....	1
1.2 Önce Yapılan Çalışmalar.....	4
2 ÜÇ FAZ TRANSFORMATÖRLERİN HARMONİK ANALİZİ.....	7
2.1 Giriş.....	7
2.2 Harmonik Konvolisyonu.....	7
2.3 Transformatör Modellemesi.....	9
3 ÜÇ FAZ TRANSFORMATÖRLERİN FARKLI BAĞLANTI ŞEKİLLERİNDE ÜÇ FAZ MODELLERİNİN VE SİMETRİK BİLEŞEN EŞDEĞER DEVRELERİNİN ELDE EDİLMESİ	13
3.1 Giriş.....	13
3.2 Üç Faz Transformatörlerin Farklı Bağlantı Şekillerinde Üç Faz Modellerinin Elde Edilmesi.....	13
3.3 Eşdeğer Devreler ve Dengesizliğin Tahmin Edilmesi.....	26
3.4 Özel Bağlı Transformatörlerin Farklı Tipleri için Dengesizlik Karşılaştırılması .	31
4 MODELLERİ GEÇERLİ KILMAK İÇİN FARKLI GÜÇLERDEKİ TRANSFORMATÖR ÜNİTELERİNDE YAPILAN DENEYLER	33
4.1 Giriş.....	33
4.2 Transformatör Eşdeğer Devresi.....	33
4.3 Transformatör Parametrelerin Tahmini.....	35
5 ÜÇ FAZLI TRANSFORMATÖRLERDE YIĞILMA AKIMLARIN HARMONİK ANALİZİ.....	43
5.1 Giriş.....	43
5.2 Üç Fazlı Transfoların Doyma Karakteristiklerinin Analizi.....	43
5.3 Beş Kollu Transformatörler.....	45
5.4 Üç Kollu Transformatörler	46

5.5	Nümerik Simülasyon.....	47
5.6	Deneyisel Analiz.....	49
5.7	Yığılma Akımlarının Harmonik Analizi	54
5.8	Sonuç.....	60
6	ÜÇ FAZ TRANSFORMATÖRLERİN FARKLI BAĞLANTI ŞEKİLLERİNDE DENEYSEL HARMONİK ANALİZ	61
6.1	Giriş.....	61
6.2	Laboratuar Deneyleri ve Elde Edilen Sonuçlar	61
6.3	Sonuç.....	69
7	ÜÇ FAZ TRANSFORMATÖR GURUBLARININ MANYETİK DOYMA İLE BİRLİKTE FARKLI DURUMLARDA HARMONİKLERİN BİLGİSAYAR SİMÜLASYONU İLE HESAPLANMASI.....	70
7.1	Giriş.....	70
7.2	Harmonik Hesaplama.....	70
7.3	Transformatörün Farklı Bağlantı Şekillerinde Gerilim Dalga Şekilleri.....	73
7.4	Topraklı Yıldız ve Empedans Topraklı Yıldız Bağlantıların Algoritmaları	74
7.5	Simülasyon Sonuçları	75
7.6	Sonuç.....	85
8	ÜÇ FAZ TRANSFORMATÖRLERİN HARMONİK ANALİZİ İÇİN BİLGİSAYAR SİMÜLASYONU	86
8.1	Giriş.....	86
8.2	Doymalı Transformatör Simülasyonu	86
8.3	Üç Faz Sıralı Analizör	91
8.4	Fourier Analizör	93
8.5	Uygulama	94
8.6	İki Sargılı Üç Fazlı Transformatör Simülasyonu	96
8.7	Üç Sargılı Üç Faz Transformatör Simülasyonu.....	100
8.8	Zig-Zag Faz Kaymalı Üç Faz Transformatör Simülasyonu	103
8.9	Harmonik Analizler için Geliştirilen Bir Uygulama Programı	105
9	SONUÇLAR.....	116
	KAYNAKLAR	122
	EKLER	137
Ek 1	Üç Faz Spice Program ile Faz Transformatörlerin Farklı Bağlantı Şekillerinde Harmonik Analiz.....	138
Ek 2	Deneylerde Kullanılan Cihazlar	150
Ek 3	Muhtelif Üç Faz Transformatörler.....	152
	ÖZGEÇMİŞ	159

SİMGE LİSTESİ

I_L	Sekonder hat akımı
I_{S1}	Sekonder faz akımı
I_0	Mıknatıslanma akımı
I_{IT}	Skot primer akımı
I_{2T}	Skot sekonder akımı
K	Dönüştürme oranı
$v(wt)$	Ani değer
V_0	$v(wt)$ eğrisinin ortalama değeri
V_1	$v(wt)$ eğrisinin birinci harmonik değeri
V_2	$v(wt)$ eğrisinin ikinci harmonik bileşeninin maksimum değeri
V_n	$v(wt)$ eğrisinin n. harmonik bileşeninin maksimum değeri
f	Ana harmonik frekansıc niteliğine ilişkin kısmi yarar fonksiyonu
f_s	Rezonans frekansı
GF	Güç faktörü
DF	Distorsiyon faktörü
μ	Akım distorsiyon faktörü
I_n	Nötr akımı
Φ_3	Üçüncü harmonik akısı
x, y	Harmonik domen vektörleri
F	Manyetik motor kuvveti
α	Demir nüvenin relüktans artımı
$\Delta\Phi_l$	Kaçak akı artımı
ΔF_l	Manyetik motor kuvveti
β	Kaçak yol relüktansı
Φ_{1a}	Kaçak akılar
Φ_{ab}	Çatal akı
CF	Tepe faktörü
Y_{L1}, Y_{L2}	Merkezi besleme sisteminin iki taraflarındaki eşdeğer admitansları
$Z(w)$	Frekans domeninde kısa devre empedansı
x_{f1}, x_{f2}	Ölçülmüş kısa devre empedansları
r_A, r_B, r_C	A, B ve C primer sargılarının direnci
i_A, i_B, i_C	Primer sargılarının kaçak endüktansları
r_a, r_b, r_c	a, b, ve c sekonder sargılarının direnci
i_a, i_b, i_c	Sekonder sargılarının kaçak endüktansları
λ_{Aa}	A ve a sargılarının karşılıklı magnetik akı çizgisi
λ_{Bb}	B ve b sargılarının karşılıklı magnetik akı çizgisi
λ_{Cc}	C ve c sargılarının karşılıklı magnetik akı çizgisi
i_p	Üçgen bağlı sargıdaki sirküle olan akım
V_{AN}	Transformatör faz gerilim
$V_{AN'}$	Kaynak faz gerilim
$V_{NN'}$	Nötr-nötr gerilimi
I_3, I_9	Üçlü harmonik akımları
B	Akı yoğunluğu
ϕ	Manyetik Akı
N	Primer sarım sayısı
λ	Akı bağlantısı
l	Nüvenin toplam uzunluğu
A	Nüvenin çelik çapraz bölüm alanı

H Manyetik alan şiddeti
 v Giriş gerilimi



KISALTMA LİSTESİ

<i>diag (jhw)</i>	Diagonal matris yanındaki bir ön çarpım
<i>THDF</i>	Transformatör harmonik olasılık faktörü
<i>MHLF</i>	Çok faz harmonik yük akış programı
<i>FFT</i>	Hızlı fourier dönüşümü
<i>THD</i>	Her bir fazın toplam harmonik distorsiyonu
<i>EMTP</i>	Elektromanyetik geçiş programı
<i>harm</i>	Harmonik içeren ve değişen giriş gerilimi
<i>Sin</i>	Sinüzoidal giriş gerilimini



ŞEKİL LİSTESİ

Şekil 2.1	Δ/Y kapasitif yüklü transformatör	9
Şekil 2.2	Tek fazlı transformatör	9
Şekil 2.3	Yıldız-üçgen bağlı üç faz transformatör	11
Şekil 3.1	Yükleri besleyen harici kullanılan trafo merkezi	13
Şekil 3.2.	Tek faz bağlantılı besleme transformatörü	14
Şekil 3.3	Simetrik bileşen devrelerine ilişkin fazör gösterimi.....	39
Şekil 3.4	V-V bağlantılı besleme transformatörü	16
Şekil 3.5a	Skot bağlantılı besleme transformatörü	17
Şekil 3.5b	Gerilim fazörü akış diyagramı.....	18
Şekil 3.6a.	Blank bağlantılı besleme transformatörü.....	20
Şekil 3.6b	Gerilim fazör diyagramı.....	20
Şekil 3.7a	Değişik-köprü bağlantılı besleme transformatörü	22
Şekil 3.7b	Gerilim fazörü ve akım akış şemaları.....	22
Şekil 3.8	Yıldız-üçgen bağlantılı besleme transformatörü	25
Şekil 3.9	Bir kullanıcı sistem için eşdeğer üç faz devresi	26
Şekil 3.10	Bir kullanıcı sistem için simetrik bileşen eşdeğer devresi.....	27
Şekil 3.11	Tek faz bağlantılı transformatör devresi.....	27
Şekil 3.12	V-V bağlantı için simetrik bileşen eşdeğer devresi	28
Şekil 3.13	Skot , blank ve değişik-köprü bağlantı için simetrik bileşen eşdeğer devresi	30
Şekil 3.14	Yıldız-üçgen bağlantı için simetrik bileşen eşdeğer devresi.....	30
Şekil 3.15	Özel bağlı transformatörlerin farklı tipleri için dengesizliğin karşılaştırılması	32
Şekil 4.1	Temel transformatör modeli.....	33
Şekil 4.2	Üç faz transformatör kısa devre testi	34
Şekil 4.3	150 kVA üç faz transformatör.....	37
Şekil 4.4	500 kVA üç faz transformatör.....	38
Şekil 4.5	500 kVA transformatör L/R eğrisi.....	38
Şekil 4.6	75 kVA transformatör kısa devre empedansları.....	39
Şekil 4.7	Üç faz transformatör açık devre testi.....	40
Şekil 4.8	75 kVA üç faz transformatörün $V_{rms} \times I_{rms}$ karakteristiği.....	40
Şekil 4.9	Deney sürücü seti	42
Şekil 4.10	Ölçülen gerilim ve akım dalga şekilleri.....	42
Şekil 4.11	Transformatörün sekonder hat gerilimi	42
Şekil 5.1	$\Delta-Y$ bağlı üç faz transformatör deney şeması	44
Şekil 5.2	Üç faz geriliminde ölçülen, üçgen-yıldız üç faz transformatörün A fazındaki histerezis eğrisi	44
Şekil 5.3	$\Delta-\Delta$ bağlı üç faz transformatör deney şeması.....	44
Şekil 5.4	Üç faz geriliminde ölçülen, üçgen-üçgen üç faz transformatörün A fazındaki histerezis eğrisi	45
Şekil 5.5	Üç faz geriliminde ölçülen, üçgen-yıldız beş bacaklı üç faz transformatörde A fazındaki histerezis eğrisi	45
Şekil 5.6	Tek faz geriliminde bağımsız olarak ölçülen, beş bacaklı üç faz transformatörün A fazındaki histerezis eğrisi	46
Şekil 5.7	Üç faz geriliminde ölçülen, üçgen-yıldız bağlı üç bacaklı üç faz transformatörde, A fazındaki histerezis eğrisi	46
Şekil 5.8	Tek faz geriliminde bağımsız olarak ölçülen, üç bacaklı üç faz transformatörde A fazındaki histerezis eğrisi	46
Şekil 5.9	Transformatörün endüktif yüklenmesi.....	47
Şekil 5.10	Nümerik simülasyon için algoritma	49
Şekil 5.11	Üç faz transformatörlerde anahtar kapama açısı için deney devresi	

a) Transformator ve anahtarlar b) Anahtarları kontrol etme devresi	50
Şekil 5.12 Beş bacaklı üç faz transformatorlerde tepe yığılma akımı üzerinde anahtar kapama açısının etkisini gösteren değişimler	51
Şekil 5.13 $\alpha=0^\circ$, $\lambda_r=0$ Wb sarımlar ve $R_2=44 \Omega$ da, rezistif yük şartlarında deney yaparak elde edilen beş bacaklı üç faz transformatorlerindeki yığılma akımı	52
Şekil 5.14 $\alpha=0^\circ$, $\lambda_r=0$ Wb sarımlarda, beş bacaklı üç faz transformatorlerin tepe yığılma akımı üzerinde rezistif yükün etkisi	52
Şekil 5.15 Tepe yığılma akımı üzerinde endüktif yükün etkisi	53
Şekil 5.16 Tepe yığılma akımı üzerinde kapasitif yükün etkisi	53
Şekil 5.17 Tepe yığılma akımı üzerinde gerilimin etkisi	53
Şekil 5.18 Üçgen-üçgen ve üçgen yıldız tepe yığılma akımının karşılaştırılması (beş kol trafo)	54
Şekil 5.19 Üç faz transformator gurublarında harmonikler üzerinde rezistif yükün etkisi	55
Şekil 5.20 $\alpha=0^\circ, 45^\circ, 90^\circ$ anahtar kapama açıları için R, S ve T hattı için mıknatıs yığılma akımı (α değişimli)	56
Şekil 5.21 $\alpha=0^\circ$, güç faktörü=1, $Z_2=88 \Omega$ ve 44Ω için R, S ve T hattı için mıknatıs yığılma akımı (R değişimli)	57
Şekil 5.22 $\alpha=0^\circ$, $Z_2=44 \Omega$, güç faktörü=0.8 ve 0.6 için R, S ve T hattı için mıknatıs yığılma akımı (L değişimli)	58
Şekil 5.23 $\alpha=0^\circ$, $Z_2=44 \Omega$, güç faktörü=0.8 ve 0.6 için R, S ve T hattı için mıknatıs yığılma akımı (C değişimli)	59
Şekil 6.1 Laboratuvar deney seti	61
Şekil 6.2 Laboratuvar besleme geriliminin harmonik içeriği a) V_{an} b) V_{bn} c) V_{cn}	62
Şekil 6.3 Nötrü topraklı yıldız-yıldız bağlantıda gerilim ve akım dalga şekilleri	63
Şekil 6.4 Nötrü topraklı yıldız-yıldız bağlantıdaki uyarma ve nötr akımlarının içeriği	63
Şekil 6.5 Nötrü izoleli yıldız-yıldız bağlantıda gerilim ve akım dalga şekilleri	64
Şekil 6.6 Yıldız-yıldız bağlantılarda a) faz akımlarının b) faz gerilimlerinin harmonik içeriğinin karşılaştırılması	65
Şekil 6.7 Nötrü topraklı yıldız-üçgen bağlantıda gerilim ve akım dalga şekilleri	65
Şekil 6.8 Nötrü topraklı yıldız-üçgen bağlantıda faz, nötr ve üçgen geriliminin harmonik içeriği	65
Şekil 6.9a Nötrü topraklı yıldız-üçgen bağlantıda faz akımının harmonik içeriği	66
Şekil 6.9b Nötrü topraklı yıldız-üçgen bağlantıda nötr akımının harmonik içeriği	66
Şekil 6.9c Nötrü topraklı yıldız-üçgen bağlantıda üçgen akımının harmonik içeriği	66
Şekil 6.10 Nötrü izoleli yıldız-üçgen bağlantıda faz gerilimi ve akım dalga şekilleri	67
Şekil 6.11 Nötrü izoleli yıldız-üçgen akımların harmonik içeriği	67
Şekil 6.12 Üçgen-yıldız bağlantıda gerilim ve akım dalga şekilleri	68
Şekil 6.13 Üçgen yıldız bağlantıda faz ve hat akımlarının harmonik içeriği	68
Şekil 6.14 Üçgen-üçgen bağlantıda faz ve hat akımları	68
Şekil 6.15 Üçgen-üçgen bağlantıda faz, hat ve üçgen akımlarının harmonik içeriği	69
Şekil 7.1 Sıfır uçlu harmonikler ile dalga şekli	72
Şekil 7.2 Primer sargıları için trafo bağlantıları	74
Şekil 7.3 Topraklanmamış yıldız bağlantısı	74
Şekil 7.4 Empedansı topraklanmış yıldız bağlantısı	75
Şekil 7.5 Mıknatıs eğrisi	75
Şekil 7.6 Distorsiyona uğrayan giriş gerilimi	76
Şekil 7.7 Durum 1 için akım dalga şekli ve spektrumu	77
Şekil 7.8 Durum 2 için akım dalga şekli ve spektrumu	78
Şekil 7.9 Durum 3 için akım dalga şekli ve spektrumu	79
Şekil 7.10 Durum 4 için akım dalga şekli ve spektrumu	79

Şekil 7.11 Durum 5 için akım dalga şekli ve spektrumu.....	80
Şekil 7.12 Durum 6 için akım dalga şekli ve spektrumu.....	81
Şekil 7.13 Topraksız yıldız bağlantının akış şeması.....	82
Şekil 7.14 Empedans ile topraklanan yıldız bağlantının akış şeması.....	83
Şekil 7.15 Dördüncü durum için kesikli-zaman akım dalga şekli	84
Şekil 7.16 Simülasyon için v_{ab} ayrık-zaman.....	85
Şekil 7.17 v_{ab} nin örnekleme.....	85
Şekil 8.1 İki ve üç sargılı doymalı transformatör	86
Şekil 8.2 Doymalı üç sargılı transformatör modeli.....	87
Şekil 8.3 Akım - akı değişimi a) Artık akı olmayan durumda b) Artık akı 2 ve -2 noktaları arasında artık akı bulunması durumunda.....	88
Şekil 8.4 Uygulama paneli.....	89
Şekil 8.5 Simülasyon devresi.....	90
Şekil 8.6 Simülasyon sonuçları.....	91
Şekil 8.7 Uygulama paneli.....	92
Şekil 8.8 Uygulama paneli.....	94
Şekil 8.9 Simülasyon devresi.....	95
Şekil 8.10 Simülasyon sonuçları.....	95
Şekil 8.11 Dört kurulum için gösterim.....	96
Şekil 8.12 Uygulama paneli.....	97
Şekil 8.13 Simülasyon devresi.....	99
Şekil 8.14 Simülasyon sonuçları.....	100
Şekil 8.15 Dört kurulum için gösterim.....	101
Şekil 8.16 Uygulama paneli.....	102
Şekil 8.17 Simülasyon devresi.....	103
Şekil 8.18 Zig-zag gösterim.....	104
Şekil 8.19 Uygulama paneli.....	104
Şekil 8.20 Çalışmada kullanılan sistemin tek hat şeması.....	105
Şekil 8.21 Güç kaynağı paneli	105
Şekil 8.22 Sistem cevabını bulmada kullanılan akış şeması	106
Şekil 8.23 Hat veri paneli	107
Şekil 8.24 Şönt kondansatör veri paneli	107
Şekil 8.25 Transformatör veri giriş paneli	108
Şekil 8.26 Tek faz güç kaynağının harmonik verileri ve dalga şekilleri	108
Şekil 8.27 Tek faz güç kaynağının harmonik verileri ve spektrumları	109
Şekil 8.28 Bara 1 harmonik gerilim verileri ve dalga şekli	111
Şekil 8.29 Bara 2 harmonik gerilim verileri ve dalga şekli	111
Şekil 8.30 Bara 3 harmonik gerilim verileri ve dalga şekli	112
Şekil 8.31 Bara 4 harmonik gerilim verileri ve dalga şekli	112
Şekil 8.32 Bara 1 harmonik gerilim verileri ve dalga şekli	114
Şekil 8.33 Bara 2 harmonik gerilim verileri ve dalga şekli	114
Şekil 8.34 Bara 3 harmonik gerilim verileri ve dalga şekli	115
Şekil 8.35 Bara 4 harmonik gerilim verileri ve dalga şekli	115
Şekil Ek 1.1 Faz sırası	142
Şekil Ek 1.2 Y-Y bağlı trafo ve Y yük	142
Şekil Ek 1.3 Topraklı Y-Y bağlı trafo ve Y yük	145
Şekil Ek 1.4 Yıldız-üçgen bağlı trafo ve Y yük	147
Şekil Ek 1.5 Yıldız-üçgen bağlı trafo ve üçgen yük	149
Şekil Ek 2.1 Sinyal jeneratörü	150
Şekil Ek 2.2 Frekansmetre	150
Şekil Ek 2.3 Harmonik analizör	150

Şekil Ek 2.4 Fonksiyon generatör	150
Şekil Ek 2.5 Spektrum analizör	151
Şekil Ek 2.6 Osilaskop 1	151
Şekil Ek 2.7 Osilaskop2	151
Şekil Ek 2.8 Multimetre	151
Şekil Ek 3.1 Üç faz güç transformatörü	152
Şekil Ek 3.2 Trafo testi	152
Şekil Ek 3.3 500 VA dan 500 kVA arası üç faz transformatör	153
Şekil Ek 3.4 500 VA dan 500 kVA arası üç faz transformatör	153
Şekil Ek 3.5 Üç faz kuru tip güç transformatör (10 kV ve yukarı/400 V)	153
Şekil Ek 3.6 Üç faz orta gerilim yağlı transformatör için aktif kısım	154
Şekil Ek 3.7 3UI tipi üç fazlı transformatörler	154
Şekil Ek 3.8 3UI tipi üç fazlı transformatörle	154
Şekil Ek 3.9 3UI tipi üç fazlı transformatörle	155
Şekil Ek 3.10 Toshiba üç faz transformatör	155
Şekil Ek 3.11 Bilgisayar destekli tasar.da kul.0,30mm M5 saçlarının kul.transformatör	155
Şekil Ek 3.12 Yağlı dağıtım transformatörleri-100 kVA to 10 MVA/36 Kv	156
Şekil Ek 3.13 Harmonik filtre reaktörleri (400 V kuru tip 100 kVAr yukarı)	156
Şekil Ek 3.14 Reçine tip transformatör (10 MVA/36 kV yukarısı)	157
Şekil Ek 3.15 Güç transformatörleri-5 MVA to 500 MVA/500 kV	157
Şekil Ek 3.16 Oto transformatörler 400 MVA/500 kV yukarısı	158
Şekil Ek 3.17 Trafo testi	158
Şekil Ek 3.18 Üç faz akım transformatörü	158

ÇİZELGE LİSTESİ

Çizelge 4.1 Üç faz dağıtım transformatörleri	35
Çizelge 4.2 Düzeltme katsayıları	41
Çizelge 4.3 Duyarlılık testinden elde edilen sonuçlar	41
Çizelge 5.1 Kullanılan transformatörün verileri	50
Çizelge 7.1 Her bir harmoniğin faz sırası	71
Çizelge 7.2 Simülasyon çıkış verileri	81
Çizelge 8.1 Ölçüm etiketi	89
Çizelge 8.2 Ölçüm etiketi	98
Çizelge 8.3 Ölçüm etiketi	98
Çizelge 8.4 Birinci durum için sistem verileri	109
Çizelge 8.5 Birinci durumda elde edilen sonuçları.....	110
Çizelge 8.5 İkinci durumda elde edilen sonuçları.....	113



ÖNSÖZ

Bu çalışmada, üç faz transformatörlerde harmonikler, doyma, geçiş akımları, uyarma akımları ve nötr akımları detaylı bir şekilde incelenmiş, deneyler ve simülasyonlar yapılarak bu harmonikler ait grafikler bilgisayar programlarıyla çizdirilmiştir. Harmonik analizi için Microsoft Visual C++ dili kullanılarak bir program geliştirilmiştir.

Tez çalışmalarımnda laboratuvarlarımdan faydalandığım Elitaş Trafo A.Ş., ABB Esaş Trafo, Emek Elektrik, beni yönlendiren her türlü desteği sağlayan değerli hocam Prof. Dr. Asım KASAPOĞLU ve değerli eşim Hatice ZİLE'ye teşekkür ederim.



ÖZET

Tezin birinci bölümünde konunun genel bir tanıtımı yapılarak harmoniklerin önlenmesi için öneriler sunulmuş ve bu konu hakkında daha önce yapılan çalışmalar sunulmuştur. İkinci bölümde, doğrusal olmayan elemanların harmonik domeninde direk olarak nasıl gösterileceği anlatılmıştır. Doğrusal olmayan elemanları direk harmonik frekans domeninde göstermek için genel bir yöntem tanımlanmış ve transformatör modelleme metoduna uygulanmıştır. Üçüncü bölümde, üç faz transformatörlerin farklı bağlantı şekillerinde üç faz modelleri ve simetrik bileşen eşdeğer devreleri elde edilmiştir. Transformatör bağlantı şekilleri tek faz, açık üçgen, yıldız-üçgen, skot, blank ve değişik-köprü bağlantılardan oluşmuştur. Üç faz modeli dengesiz sistemi bütünüyle analiz etmek için, üç faz yük akış programları ile birlikte oluşturulmuştur. Farklı bağlantı şekillerinde dengesizlik karşılaştırması yapmak için, üç faz yük akış programı ile yapılan bilgisayar simülasyonu çok etkili ve oldukça iyi bir yöntem olmuştur. Dördüncü bölümde, modelleri geçerli kılmak için farklı güçlerdeki transformatör ünitelerinde kısa devre ve boşa çalışma deneyleri, duyarlılık ve alan testleri yapılmıştır. Geliştirilen bilgisayar simülasyonlarından ve ölçümlerden elde edilen sonuçlar karşılaştırılmıştır. Sargıların ve nüvenin doğrusal olmayan etkilerine bağlı olan frekans incelenmiştir. Beşinci bölümde, üç faz transformatörlerin doyma karakteristiklerin analizi yapılmıştır. Yığılma akımının incelenmesi için bir model laboratuarda geliştirilmiştir. Yığılma akımını inceleyerek, nümerik simülasyon yapmak için birçok yöntem geliştirilmiştir. Yığılma akımlarının detaylı olarak bilinmesi bu çalışma vasıtasıyla gerçekleşmiştir. Farklı üç faz yapıları ve farklı sargı bağlantı içeren üç fazlı trafolar farklı işletme şartları, anahtar kapama açıları ve güç faktörleri göz önüne alınarak incelenmiştir. Yükler ve güç faktörleri artırarak ana harmoniklerin önlenilebileceği sonucu çıkarılmıştır. Bu geliştirilen yöntem ile hazırlama zamanı ve alan testleri azaltılabilir. Altıncı bölümde, üç faz transformatörlerin farklı bağlantı şekillerinde harmonik analizi için laboratuvar deneyleri yapılmıştır. Bu deneyler genel olarak iki kısımdan oluşmuştur. Birinci kısımda, histerisiz eğrisini ve uyarma akımının sinüzoidal olmayan dalga şeklini analiz ederek, tek faz transformatör nüvesinin doğrusal olmadığı ispatlanmıştır. İkinci kısımda ise, farklı üç faz transformatör akımı ve karşılıklı akı dalga şekilleri üzerinde farklı üç faz transformatör bağlantılarının etkileri incelenmiştir. Yedinci bölümde, üç faz transformatör guruplarının manyetik doyma ile birlikte harmonik analizi gerekli algoritmalar kullanılarak geliştirilen bir bilgisayar simülasyonu ile yapılmıştır. Simülasyon sonuçlarının çok başarılı olduğu görülmüştür. Sekizinci bölümde, geliştirilen algoritmalar ve modellemeler ile bilgisayar simülasyonları oluşturulmuştur. Doymalı transformatör simülasyonu, üç faz sıralı analizör simülasyonu fourier analizör simülasyonu, iki sargılı üç fazlı transformatör simülasyonu, üç sargılı üç faz transformatör simülasyonu, zig-zag faz kaymalı üç faz transformatör simülasyonu oluşturulmuştur. Farklı bağlantı şekillerinde simülasyon sonuçları elde edilmiştir. Microsoft programlarını ve Microsoft Visual C++ dilini kullanarak windows ortamında bir yazılım geliştirilmiştir. Bu uygulamada hem nümerik hem de grafik veriler gösterilmiştir. Microsoft Visual C++ dilinin gelişmiş özelliklerini kullanarak geliştirilen bu programla güç sistemlerindeki harmonikler en iyi bir şekilde anlaşılması ve harmonik dalga şekillerinin gösterilmesi sağlanmıştır. Farklı verilerde ve farklı çalışma durumlarında iyi sonuçlar elde edilmiştir.

Anahtar kelimeler: Harmonikler, üç faz transformatör, doyma.

ABSTRACT

Harmonic phenomena in three phase transformers are quite important. It is because under certain conditions, the exciting current harmonics may cause inadvertent operation of the protective equipment and may also cause interface with communication circuits. The study is to discuss the harmonics in three phase transformers. For the harmonic analysis of power systems, it is essential to have all components represented in the harmonic frequency domain. This study shows how nonlinear elements can be directly represented in the harmonic domain by using a convolution equivalent to time domain multiplications. The procedure is then applied to power transformers. The three-phase models with the specially connected transformers offered in this study distinctly represent the feeding system by means of the physical three-phase circuit and the symmetrical-component equivalent circuit. The three-phase model could be joined to three-phase load flow program to exactly analyse the system imbalance in the future. Transformer models for harmonic studies based on rated parameters are presented. Results from simulations and measurements on transformers are compared. Sensitivity studies are carried out to show how the total harmonic distortion of current and voltage behaves as parameters change. A variety of operating conditions simulated on a computer were used to test the algorithm. The results of the tests show that the algorithm performs well. Measurements of transient inrush currents in three-phase transformers offer important data for power system operation and protection. Because three-phase transformers are more widely used in industrial applications than single-phase transformers, the inrush current of the three-phase transformer is worthy of investigation. This study proposes a simple method, extended from that for three-phase transformer inrush currents. Harmonic analysis of the inrush currents is carried out. Various structures of three-phase transformers, including winding connections and loading conditions, are discussed. The simulation results are compared with experimental results. The proposed method is simple and effective for transformer banks and five-limb transformer. The harmonic analysis of inrush currents is useful for protective relay design. This study outlines an improved lecture or experiment that quantitatively analyses the wave forms of various transformer connections under steady-state no-load conditions while taking into account the nonideal voltage supply. The experimental data obtained with the aid of a harmonic analyser are then compared to the quantitative predictions and the discrepancies are discussed. New iterative procedures using Fourier transform algorithms are proposed for the harmonic studies of three-phase transformer banks with various connections under steady-state operating conditions produce different harmonic distortions, which are deliberately analysed and compared in this thesis. Good convergence is achieved for each iterative procedure of the corresponding transformer connection and the resulting current waveform and its spectrum are presented. An application program is advanced using Microsoft Visual C++ for harmonic analyses in this thesis. Simulation results prove the program's accuracy.

Keywords: Harmonic analysis, three-phase transformers, saturation.

1. GİRİŞ

1.1 Genel Tanıtım

Arızasız işletmede harmonikler çeşitli sebeplerle ortaya çıkarlar. Bunların başında doğrusal olmayan manyetik ve elektrik devreleri gelir. Genaratör, transformatör ve bobin gibi demir nüvenin doğrusal olmayan manyetik devreye dönüşmesi anlamına gelir. Eğer doğrusal olmayan devre genaratörün manyetik devresi ise genaratörün ürettiği gerilim sinüzoidal olması nedeni ile harmonikli olacaktır. Eğer doğrusal olmayan devre transformatöre ait ise bunun sekonder tarafına bağlanan kullanıcı gerilimi de harmonikli olacaktır. Eğer kullanıcının manyetik yada elektrik devresi doğrusal, fakat bu kullanıcıyı besleyen gerilim sinüzoidal değil ise, bu kullanıcının çektiği akım da harmonikli olacaktır. Harmonik ya kaynak taraftaki harmonikli gerilim etkisinden yada kullanıcı doğrusal olmayan bir devreye sahip olmasından dolayı meydana gelir.

Akım ve gerilim harmonikler paralel ve seri rezonans dolayısıyla harmonik seviyelerinin yükselmesine, elektrik üretim iletim ve tüketiminde verimin azalmasına, elektrik tesislerinde yalıtımı zayıflattığı için tesis elemanlarının ömürlerinin azalmasına, elemanlarda arızalar meydana gelmesine sebep olur.

Güç faktörünü düzeltmek amacı ile yerleştirilen kapasiteler, seri yada paralel rezonans olayları dolayısıyla yüksek akımlara maruz kalarak zarar görebilirler. Paralel rezonans durumunda, rezonans frekansında harmonik üreten kaynak yüksek değerde bir empedansla karşılaşır. Harmonik kaynakları çoğunlukla akım kaynağı olarak modellendiğinde, paralel kollardan akan harmonik akımlarında ve paralel kol gerilimlerinde de yükselme olur. Paralel rezonans değişik şekillerde meydana gelir. İlk akla gelen şekli, bir kapasitenin harmonik üreten kaynakla aynı baraya bağlanması ile ortaya çıkar. Bu durumda harmonik kaynağı ile kapasite arasında bir paralel rezonans meydana gelir. Seri rezonans etkisi, yüke paralel olarak bağlanan kapasitenin empedansı yüksek frekanslarda çok düşeceğinden dolayı omik yük göz önüne alınmayabilir. Transformatörün endüktansı ile güç faktörünü düzeltmek amacı ile yerleştirilen kapasite arasında seri rezonans meydana gelebilir. Seri rezonans devresinde yüksek değerde kapasite akımları fakat düşük harmonik gerilimleri gözlenir.

Harmonik akımları yüzünden makinalar ve transformatörler ısınır. Ayrıca generatörlerin amortisman sargıları, bir fazlı veya iki fazlı kısa devrelerde meydana gelen harmonikleri azaltacak ve ortadan kaldıracak şekilde etki ederken kendileri de çok ısınırlar ve generatörlerde ilave kayıplar meydana gelmesine yol açarlar. Harmonik akımları çeşitli devre

empedansları üzerinde ilave gerilim düşümlerine neden olurlar. Harmonik akımlarının frekansları, normal şebeke frekansı 50 Hz'in katlarına eşit olduğundan, bu akımlar karşısında generatör, transformatör ve hat reaktansları üzerinde meydana gelen gerilim düşümleri de harmonik frekansları ile orantılı olarak artar ve sonuç olarak gerilimin dalga şekli bozulur. Sinüs şeklindeki gerilim eğrisine eklenen gerilim harmoniklerinin meydana getirdiği iğne ucu şeklinde sivri, çok kısa süreli ani gerilim yükselmeleri, mesela gerilim rezonansı gibi hallerde, makina ve transformatör sargılarının izolasyonu ve kondansatörlerin di-elektrik maddesi için büyük bir tehlike teşkil eder ve hatta izolasyonda delinmeye yol açabilirler.

Transformatörlerde harmonik gerilimleri histerizis ve girdap akımlarını artırarak kayıpları büyütür ve yalıtımı zorlar. Harmonik akımları bakır kayıplarını da artırır. Bu durum özellikle çevirici transformatörlerde önem kazanır. Zira harmonikleri süzmek için kullanılan filtreler alternatif akım tarafına bağlanır, dolayısıyla harmonik generatörleri olarak kabul edebileceğimiz doğrultucu devrelerin ürettiği harmonikler, filtreye girmeden önce çevirici transformatörün üzerinden akarlar. Bu yüzden transformatörün gücü artırılmalıdır. Bu ise transformatörün maliyetini artırır. Ayrıca çevirici transformatörü tankı üzerinde ısınmış noktalar meydana gelir.

Eğer transformatör asimetrik bir yükü yüklenirse, yük akımının doğru akım bileşeni içermesi durumunda transformatörün manyetik devresi doymaya gidecektir ve uyarma akımının tüm harmonik bileşen seviyeleri artacaktır. Şebeke ve kapasite arasında meydana gelen seri ve paralel rezonans yüzünden oluşan aşırı gerilim ve yüksek akım harmonikleri kapasiteleri ısıtır ve hatta tahrip eder.

Harmonikler rölelerin çalışma karakteristiklerini bozma veya tahrip etme özelliğine sahiptir. Dijital röleler ve yazılımları, örneklenmiş data bilgisine ve sıfır geçişlerine çok duyarlıdır. Bu yüzden harmonik etkileri röleleri hata yapmaya meyilli bir duruma sokar. Harmoniğin bozucu özelliği dolayısıyla belirtilen olumsuz etki çoğu durumda röle çalışma karakteristiğini önemli miktarda değiştirmemekte ve ciddi bir problem meydana gelmemektedir. Harmonik gerilim seviyesinin %20'den az olduğu durumlarda çoğunlukla olumsuz sonuç alınmamıştır. Fakat gelecekte güçlü çeviricilerin varlığı, dolayısıyla bu durumun değişmesi kuvvetle muhtemel görülmektedir. Rölelerin koruma fonksiyonları çoğunlukla ana harmonik akım veya gerilim değeri gözetilerek veya hata oluştuğunda diğer harmoniklerin filtre edildiği kabulü ile ana harmonik dışındaki harmoniklerin ihmal edildiği bir sisteme göre gerçekleştirilir. Bu kabul özellikle aşırı akım korumasında kullanılan elektromanyetik röleler ise yapıları gereği yüksek dereceli harmoniklere karşı daha az duyarlıdır. Empedans ölçümünde harmonik etkileri

oldukça önemlidir. Mesafe röleleri ana frekansa tekabül eden empedans değerinin ölçülmesi üzerine bina edilen çalışma ilkesine sahiptir. Hata meydana geldiğinde özellikle üçüncü harmonik etkisi ile, ölçüm hatası meydana gelebilir. Direnç üzerinden meydana gelen kısa devrelerde akım yüksek değerde bir direnç üzerinden akacağı için yüksek harmonik bileşenleri ortaya çıkacaktır. Bu durumda büyük bir olasılıkla rölenin görev yapması imkanı olmaz. Eğer hata bir direnç üzerinden olmayıp metalik kısa devre ise akım ve gerilim ana harmonikleri önem kazanır. Akım transformatörlerinde meydana gelen doyma, dolayısıyla akım trafosu sekonder akımında bozulma meydana gelir. Sekonder sargıda yüksek değerde bir elektromotor kuvvet oluştuğunda, röle transformatörünün uyarma empedansından akan doğrusal olmayan akım, tek mertebeden harmonik distorsiyona neden olur. Çekirdek doyuma ulaştığında, harmonik üretim kaynağı, röle transformatör geriliminin ikinci ve üçüncü harmonik bileşenleri olacaktır. Yukarıda bahsedilen tasarım sorunlarından sistem gereksinimlerini karşılayan doğru cihaz seçimi yapılarak kaçınmak mümkündür. Özellikle dijital koruma sistemlerine sahip mesafe koruma esaslı sistemlerde, akım ve gerilim dalga şekillerinin filtre edilmesi oldukça önemlidir.

Normal sistem koşullarında koruyucu cihazların duyarsızlığı, bizlere, hata koşulları dışında g   sistemdeki harmoniklerin herhangi bir probleme sebep olmadığını ifade eder. G   transformatörlerinde, pratikte, transformatörün devreye girmesi sırasında, mıknatıslanma akımının ilk anlardaki değeri, yüksek harmonik bileşenlere sahiptir. Bu bileşen değerleri ortaya çıktığında, transformatörü koruyan sistemler devreye girerek devre kesicisini açmasını engeller. Zira enerjilenme esnasında çok yüksek genlikte akımlar dolayısı ile röle hata işareti verme eğilimindedir.

Transformat rlerdeki harmonikler aşağıda belirtildiği gibi  nlenebilir. Bunlar;

- Düşük nüve akı yoğunluğu kullanılarak; Bu nüve bölgesinde daha fazla iletken malzeme ve bu yüzden daha fazla maliyet ortaya çıkarır. Daha düşük akı yoğunluğunda transformatörü tasarlamak ve işletmek ekonomik değildir.
- Hatlardaki   l  harmonik akımları ve gerilimleri transformatörün yıldıız veya üçgen bağlantıları kullanılarak  nlendir.
- Primer veya sekonder sargıda üçgen bağlantı kullanarak; Transformatör sargılarının biri üçgen bağlandığında,   l  harmonik gerilimler oldukça  nlendir. Bu sebeple,   l  harmonik gerilimlerini önlemek için transformatör sargılarından birinin üçgen bağlanması gerekir.

- Primer ve sekonder sargılara ek olarak transformatörlere üçüncü bir sargı bağlanarak; Bu sargıya üçüncül veya stabil sargı adı verilir. Bu yüzden üçüncül sargılar ile donatılan transformatörler üç sargılı transformatör olarak adlandırılır. Üçüncül sargı genellikle üçgen bağlanır ve bir çok kez uçları tankın dışına çıkarılmaz. Benzer bir durumda yıldız-yıldız transformatörlerdeki farklı işlevleri aşağıda belirtildiği gibidir. Üçüncü harmonik mıknatıs akımı üçgen bağlanan üçüncül sargıda akar. Bunun bir sonucu olarak, nüve akısı ve emk'ler hemen hemen sinüs dalgası şeklindedir.
- Yıldız-üçgen topraklı transformatör kullanarak; yıldız-yıldız transformatörün iki sargısındaki üçüncü harmonik gerilimler yıldız-üçgen topraklı transformatör kullanılarak önlenir. Kapalı üçgen, üçüncü harmonik akımları için bir yol sağlar. Bu yüzden, akı ve emk dalgaları sinüs dalgası şeklinde kalır.

Yıldız-yıldız transformatör için üçüncü harmonik gerilimleri aynı zamanda dört iletkenli besleme (eğer generatör nötrü topraklanmış ise transformatör nötrünü topraklamak) kullanılarak önenebilir. Nötr teli üçüncü harmonik akım için bir yol sağlar. Bu yüzden, akı ve emk'lar sinüs dalgası şeklindedir.

Bu tezde, üç faz transformatörlerin farklı bağlantı şekillerinde harmonik analizi yapılmıştır. Üç faz transformatörlerin farklı bağlantı şekillerinin üç faz modelleri elde edilmiştir. Modelleri geçerli kılmak için kısa devre ve boşa çalışma deneyleri, duyarlılık ve alan testleri yapılmıştır. Geliştirilen algoritmalarla bu modelleri kullanarak Microsoft Visual C++ dilinin gelişmiş özellikleri kullanılarak güç sistemlerinde harmonik analizi yapan bilgisayar simülasyonu oluşturulmuştur. Farklı verilerde ve farklı çalışma durumlarında iyi sonuçlar elde edilmiştir.

1.2 Önce Yapılan Çalışmalar

Aşağıda geniş bir araştırmayla, konu ile ilgili daha önce yapılan çalışmalar özetlenmiştir. Bunlar; 1951'de, T.R. Specht, transformatör mıknatıs yığılma akımı üzerinde, 1962'de J.E. Hulcomb, dağıtım transformatörü yığılma akımı hesaplanması, 1967'de B. Pendlebury, transformatörü dağıtım yığılma akımlarının hesaplanması, 1969'da V. V. Karasev, transformatör tanklarında, kayıplarının akım, frekans ve sıcaklık ile ilişkisi üzerine, 1970'de L. O. Chua, histerizis eğrilerini gösteren doğrusal olmayan endüktans için yoğun devre modelleri üzerine, 1970'de S. Cropaz, transformatörlerde fuko akım kayıpları üzerine, 1973'de W.K. Macfadyen, transformatörlerde geçici yığılma akımı örneklerini tahmin etme

metodu üzerine, 1974'de H. L. Nakra, üç faz transformatör geçicileri üzerine, 1975'de S. N. Talukdar, dijital ve analog çalışmalar için transformatör ve reaktör doyma karakteristiklerinin modellenmesi üzerine, 1981'de D. M. German, topraklı yıldız-yıldız bağlı transformatörlerde aşırı gerilimler üzerine, 1981'de J. Rivas, mıknatıs eğrileri ve histerizis eğrilerinin basit tahmini üzerine, 1983'de E.H.Badawy, transformatör doymanın gösterilmesi üzerine, 1983'de A. A. A. Quader, temel ve harmonik akımlar nedeni ile transformatörlerde sargı kayıpları üzerine, 1984'de T. Nakata, Elektrik makinelerinde akı kayıpların dağılmasının nümerik analizi üzerine, 1984'de M.S. Hwang, harmonik akımlar nedeniyle transformatörlerde sargı kayıpları üzerine, 1985'de B. S. Ram, harmonik akımların etkisi nedeni ile transformatör sıcaklığının değişimi üzerine, 1985'de J. S. Tharp, mikroişlemci tabanlı üç faz transformatör diferansiyel röle üzerine, 1985'de D. S. Takach, dağıtım transformatörünün boştaki kayıpları üzerine, 1985'de A. E. Emanuel, doğrusal olmayan yükleri besleyen güç transformatörlerin kayıplarının tahmini üzerine, 1985'de J. Arrilaga, güç sistem harmonik analizi üzerine, 1986'da R. Yacamini, üç faz transformatörde geçici yığılma akımının analizi üzerine, 1986'da M. A. Rahman, üç faz transformatörlerde mıknatıs yığılma akımlarının dijital simülasyonu üzerine, 1986'da L. K. Ell, dağıtım transformatör aşırı doyması ve harmonik problemleri üzerine, 1986'da A. Semlyen, harmonik uzayda doğrusallaştırma üzerine dayandırılan periyodik uyarma ile doğrusal olmayan dinamik sistemlerin sürekli hal analizi üzerine, 1986'da D. N. Ewart, çelik nüve transformatörün dijital bilgisayar simülasyon modeli üzerine, 1987'de A. Semlyen, manyetik doğrusal olmayan özel referanslı periyodik sürekli halde doğrusal olmayan güç devrelerinin harmonik fazör analizi için newton-tip algoritma üzerine, 1988'de J.D. Greene, transformatörlerin doğrusal olmayan modellenmesi üzerine, 1988'de B. S. Ram, dönüştürücü transformatör yük kayıpları üzerinde harmoniklerin etkisi üzerine, 1988'de M. Davis, harmonik akımı konu alan dağıtım transformatörlerde sargı sıcaklıklarının hesaplanması üzerine, 1989'da E. Chin, histerezis eğrisi içeren transformatörün doyma karakteristikleri için geliştirilen yeni bir model üzerine, 1989'da, L. K. Ell, dağıtım transformatördeki uyarma harmonikleri üzerine, 1990'da Y. Mochinaga, besleme devresinde üç sargılı skot bağlantılı transformatörün izolasyon seviyesinin azaltılması üzerine, 1991'de C. M. Arturi, faz senkronizasyonun bir çıkışını izleyen üç faz beş kol transformatörün geçici simülasyonu ve analizi üzerine, 1991'de J. Moravek, modern elektrik sistemlerinde harmonikli çalışma üzerine, 1991'de M. Thomas, elektrik güç sistemlerinde harmonik akım distorsiyon limitlerindeki endişeler üzerine, 1992'de W. Xu, çok fazlı harmonik yük akış çözüm teknikleri üzerine, 1992'de T. Sidhu, üç faz transformatörlerde mıknatıs yığılma ve dahili hatların hat üzerinde tanımlanması üzerine,

1992'de R. J. Rusch, üç faz dağıtım transformatör bağlantılarının yıldız-yıldız bağlanması üzerine, 1992'de C. L. Cheng, transformatör yığılma akımı ve harmonik analizi için basit bir model geliştirilmesi üzerine, 1992'de J. Fluke, güç harmonikleri analizi üzerine, 1992'de A. Medina, harmonik domeninde güç transformatörlerinin genelleştirilen modellenmesi üzerine, 1993'de Ching-Chung Chu, üç faz yük akışı ve sistem dengesizliğinin azaltılması üzerine, 1993'de C.E. Lin , transformatörlerde mıknatıs yığılma akımı ve harmonik analizi üzerine, 1993'de W. L. A. Neves, doğrusal olmayan demir nüve modellemesi üzerine, 1993'de C. E. Lin, transformatörlerde mıknatıs yığılma akımının araştırılması ve harmonik analizi üzerine, 1994'de D. Robert, harmoniklerin güç faktöründe ve transformatörler üzerindeki etkileri üzerine, 1994'de W. Xu, doğru akımlı SVC transformatör doymasında harmoniklerin analizi üzerine, 1994'de J. Stenzel, üç faz transformatörlerin doğrusal olmayan davranışını gösteren model üzerine, 1994'de Ü. Purkayastha, güç ölçümlerinde harmoniklerin etkisi üzerine, 1994'de R. Henderson, harmoniklerin transformatör üzerindeki etkisi incelenmesi üzerine, 1995'de S. Chimklai, elektromagnetik geçici rejim çalışmaları için basitleştirilen üç faz transformatör modeli üzerine, 1995'de B.K. Perkins, elektromanyetik geçici programı ile doğrusal olmayan elemanların inselenmesi üzerine, 1996'da P. K. Dash, güç sistem harmoniklerin hat üzerinde izlenmesi için bir uygun doğrusal birleştirici üzerine, 1996'da G. Carpinelli, endüstriyel enerji sistemlerindeki harmonik kayıplardan dolayı ekonomik zararların muhtemelen değerlendirilmesi üzerine, 1996'da S. Chai, harmonik akımının azaltılması için indirgenen kVA kapasiteli transformatör düzenlemeleri üzerine, 1996'da N. Elleuch, relüktans kullanarak üç faz transformatörlerin modellemesi üzerine, 1996'da A. Bonner, elektrik güç şebekelerinde harmoniğin yayılmasının modellemesi ve simülasyonu üzerine, 1996'da X. Chen, endüktans matrisinin tersini direk kullanarak üç faz çok bacaklı transformatör modeli üzerine, 1996'da M. T. Bishop, harmoniklerin değerlendirilmesi ve endüklenen transformatörün sıcaklığının bulunması üzerine, 1996'da J. M. Prousalidis, üç faz transformatör modellerinde histeresis'in gösterilmesi üzerine, 1999'da D. E. Warner, güç transformatörlerinde sıfır dereceli (üçlü) harmoniklerin incelenmesi üzerine çalışmalar yapmışlardır.

2. ÜÇ FAZ TRANSFORMATÖRLERİN HARMONİK MODELLEMESİ

2.1 Giriş

Güç sistemlerinin harmonik analizinde bütün elemanlar harmonik frekans domeninde gösterilmelidir. Bu bölümde, doğrusal olmayan elemanlar (*) konvolüsyon eşdeğer zaman domen çarpımları kullanılarak harmonik frekans domeninde direk olarak nasıl gösterileceği anlatılmıştır. Yöntem güç trafolarına uygulanarak incelenmiştir. Doğrusal olmayan elemanların direk harmonik frekans domeninde göstermek için genel bir yöntem tanımlanmış ve transformatör modelleme metoduna uygulanmıştır.

2.2 Harmonik Konvolüsyonu

Doğrusal olmayan elemanların direk harmonik modellemesi, zaman domeni çarpımının frekans domenli eşdeğeri olan ve konvolüsyon adı verilen bu temele dayandırılmıştır. Çarpımların zaman domeninde olduğu frekans domeninde olmadığı görülür. x ve y iki periyodik zaman domeni değişkeni, x ve y ise karşılık gelen harmonik domen vektörleri olsun. Böylece;

$$x = \sum_{h=-\infty}^{\infty} x_h e^{jh\omega t} \quad (2.1)$$

$$y = \sum_{k=-\infty}^{\infty} y_k e^{jk\omega t} \quad (2.2)$$

ve

$$x = [\dots x_h \dots]^T = [\dots x_{-2}, x_{-1}, x_0, x_1, x_2, \dots]^T \quad (2.3)$$

$$y = [\dots y_k \dots]^T = [\dots y_{-2}, y_{-1}, y_0, y_1, y_2, \dots]^T \quad (2.4)$$

iki ifadeyi çarptığımızda,

$$z = xy = \sum_{l=-\infty}^{\infty} z_l e^{jl\omega t} \quad (2.5)$$

$$z = xy = [\dots z_l \dots]^T = [\dots z_{-2}, z_{-1}, z_0, z_1, z_2, \dots]^T \quad (2.6)$$

* Uç karakteristiği yani akımı ile gerilimi arasındaki ilişkisi doğrusal olmayan eleman

** Fourier dönüşüm, geçici bir olayın içeriğindeki enerji ile komşu frekans bileşenlerinin sürekli enerjili spektrumundaki enerji arasındaki bağıntıyı veren matematiksel ifade

Eğer 2.1 ile 2.2'yi 2.3'de yerine koyup ve katsayılarla karşılaştırdığımızda, aşağıdaki ifadeyi buluruz. Bütün $h+k=1$

$$z_1 = \sum x_k \cdot y_k \quad (2.7)$$

veya

$$z_1 = \sum_{h=-\infty}^{\infty} x_h y_{1-h} \quad (2.8)$$

Böylece açık olarak çarpım $z=x.y$, z 'nin bütün z_1 elemanları için eşitlik 2.8 konvolüsyonlarını gösterir. Aynı zamanda, eşitlik 2.1 ve 2.3'den

$$\dot{x} = [\dots j\omega x_h \dots]^T = \text{diag}(j\omega)x \quad (2.9)$$

Böylece zaman domenindeki diferansiyel karşılık gelen harmonik frekans domeni $\text{diag}(j\omega)$ diagonal matrisin bir ön çarpımıdır. Sonuçta, polinom biçiminde yazılmış zaman domenindeki diferansiyel eşitlik, harmonik domenli konvolüsyon teoremi uygulayarak direk olarak verilmiştir. Doğrusal olmayan mıknatıslama karakteristikleri ele alındığında,

$$F = c_1 \cdot \Phi + c_3 \cdot \Phi^3 \quad (2.10)$$

manyetik akı Φ manyetik motor kuvveti F ile gösterilirse, harmonik frekans domeninde eşitlik 2.10,

$$F = c_1 \cdot \Phi + c_3 \cdot \Phi^3 \quad (2.11)$$

olur. $\Phi^3 = (\Phi\Phi)\Phi$ işlemi sıralı konvolüsyonları ifade eder. Böylece F vektörü harmonik domeninde direk olarak hesaplanır. Eğer sürekli hal çalışmada Φ harmonik içeriği küçük ise, eşitlik 2.11 Φ_0 , F_0 , W_0 nin sinüzoidal halini doğrusal hale getiririz. Böylece aşağıdaki eşitlikleri elde ederiz.

$$\Delta F = F - F_0 = \alpha \cdot \Delta \Phi \quad (2.12)$$

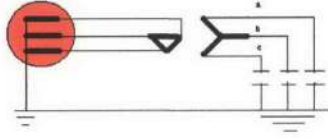
$$F_0 = c_1 \Phi_0 + c_3 \Phi_0^3 \quad (2.13)$$

$$\alpha = c_1 \cdot 1 + 3 \cdot c_3 \cdot \Phi_0^2 \quad (2.14)$$

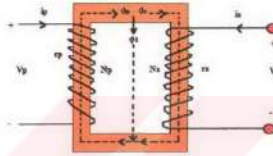
α demir nüvenin relüktans artımını ifade eder ve hava relüktansı ile karşılaştığında daha küçük olduğu görülür. Eşitlik 2.12 deki bütün işlemler konvolüsyon kullanılan harmonik

frekans domenlerindedir.

2.3 Transformatör Modellemesi



Şekil 2.1 Δ/Y kapasitif yüklü transformatör



Şekil 2.2 Tek fazlı transformatör

Şekil 2.2' de gösterilen tek fazlı transformatörün manyetik yapısından aşağıdaki eşitlikleri elde ederiz.

$$\Delta\Phi_p = \Delta\Phi_s + \Delta\Phi_l \quad (2.15)$$

$$\Delta F_p = \alpha_p \cdot \Delta\Phi_p \quad (2.16)$$

$$\Delta F_s = \alpha_s \cdot \Delta\Phi_s \quad (2.17)$$

$$\Delta F_l = \beta \cdot \Delta\Phi_l \quad (2.18)$$

$$N_p \cdot \Delta i_p = \Delta F_p + \Delta F_l \quad (2.19)$$

$$N_s \cdot \Delta i_s = \Delta F_s + \Delta F_l \quad (2.20)$$

$$\Delta v_p = r_p \cdot \Delta i_p + N_p \cdot p \cdot \Delta\Phi_p \quad (2.21)$$

$$\Delta v_s = r_s \cdot \Delta i_s + N_s \cdot p \cdot \Delta\Phi_s \quad (2.22)$$

dır. Bu eşitliklerde, $\Delta\Phi_l$ kaçak akı artımı, ΔF_l manyetik motor kuvveti, β kaçak yol relüktansıdır.

$$\beta \gg \alpha \quad (2.23)$$

Eşitliklik 2.21 ve 2.22 matrisel biçimde aşağıdaki gibi yazılır.

$$\begin{bmatrix} \alpha_p + \beta & -\beta \\ -\beta & \alpha_s + \beta \end{bmatrix} \begin{bmatrix} \Delta\Phi_p \\ \Delta\Phi_s \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} N_p \cdot \Delta i_p \\ N_s \cdot \Delta i_s \end{bmatrix} \quad (2.24)$$

Eşitlik 2.11 ve 2.12 den,

$$\Delta\Phi_p = \frac{1}{N_p \cdot p} (\Delta v_p - r_p \Delta i_p) \quad (2.25)$$

$$\Delta\Phi_s = \frac{1}{N_s \cdot p} (\Delta v_s - r_s \Delta i_s) \quad (2.26)$$

elde ederiz. Eşitlik 2.25-2.26 yı eşitlik 2.24 de yerine koyup düzenlediğimizde, aşağıdaki eşitliği elde ederiz.

$$\Delta i = G_N \cdot \Delta v \quad (2.27)$$

eşitlik 2.27 yi genişlettiğimizde,

$$i - i_0 = G_N \cdot (v - v_0) \quad (2.28)$$

veya

$$i = G_N \cdot v + i_N \quad (2.29)$$

dir. Eşitlik 2.29 transformatör modelinin norton (*) eşdeğerine karşılık gelir. Harmonik frekans domeninde eşitlik 2.29 aşağıda verilen ifade şeklini alır.

$$i = G_N \cdot v + i_N \quad (3.30)$$

$$G_N = \begin{bmatrix} \frac{\alpha_p + \beta}{N_p \cdot p} & \frac{-\beta}{N_s \cdot p} \\ \frac{N_p + \frac{r_p \cdot (\alpha_p + \beta)}{N_p \cdot p}}{N_p \cdot p} & \frac{N_p + \frac{r_p \cdot (\alpha_p + \beta)}{N_p \cdot p}}{N_p \cdot p} \\ \frac{-\beta}{N_p \cdot p} & \frac{\alpha_s + \beta}{N_s \cdot p} \\ \frac{N_s + \frac{(\alpha_s + \beta) r_s}{N_s \cdot p}}{N_s \cdot p} & \frac{N_s + \frac{(\alpha_s + \beta) r_s}{N_s \cdot p}}{N_s \cdot p} \end{bmatrix} \quad (2.31)$$

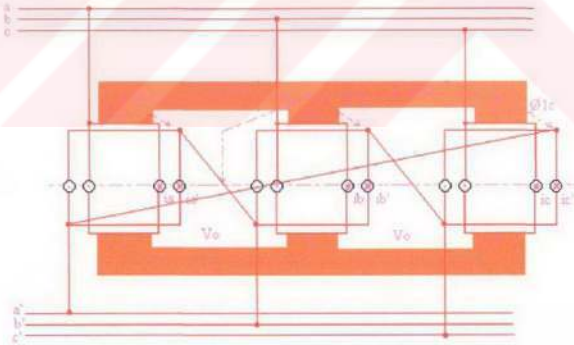
$$\begin{bmatrix} \Delta i_p \\ \Delta i_s \end{bmatrix} = G_N \begin{bmatrix} \Delta v_p \\ \Delta v_s \end{bmatrix} + i_N \quad (2.32)$$

$$i_N = \begin{bmatrix} 0 & \frac{\beta r_s}{N_p + \frac{r_p \cdot (\alpha_p + \beta)}{N_p \cdot p}} \\ \frac{\beta r_p}{N_s + \frac{(\alpha_s + \beta) r_s}{N_s \cdot p}} & 0 \end{bmatrix} \begin{bmatrix} i_p \\ i_s \end{bmatrix} \quad (2.33)$$

G_N norton admitans matrisidir. Boyutu bütün primer ve sekonder harmonik elemanları içeren v ve i ye karşılık gelir. Eğer şekil 2.2 de üç adet tek faz trafo üniteleri şekil 2.1 de gösterildiği gibi ifade edilirse, eşitlik 2.34 ile transformatörün tam harmonik modelini elde ederiz. Sistem çıkışı için norton eşdeğeri aşağıdaki gibi elde edilir.

$$i' = G'_N \cdot v + i'_N \quad (2.34)$$

Δv ve Δi hesaplanır. Tek ünite içinde geriye gidildiğinde $\Delta \Phi_p$ ve $\Delta \Phi_s$ eşitlik 2.25-2.26 dan ve diğer değişkenlerde eşitlik 2.15-2.22 den elde ederiz. İkinci bir örnek olarak, şekil 2.3 deki üç bacaklı transformatörü göz önüne alalım.



Şekil 2.3 Yıldız-üçgen bağlı üç faz transformatör

Primeri (a,b,c) yıldız, sekonderi (a',b',c') üçgen bağlıdır. Primer ve sekonder sargılar arasındaki kaçak akılar Φ_{1a} , Φ_{1b} , Φ_{1c} sıfır sıralı kaçak akı ise Φ_0 ile gösterilir. Çatal akılar Φ_{ab} ve Φ_{cb} dir. Akılar için süreklilik denklemleri,

$$\Delta\Phi_a = \Delta\Phi_{ab} + \Delta\Phi_{la}$$

$$\Delta\Phi_b = -\Delta\Phi_{ab} - \Delta\Phi_{cb} + \Delta\Phi_{lb} \quad (2.35)$$

$$\Delta\Phi_c = \Delta\Phi_{cb} + \Delta\Phi_{lc}$$

dır. Manyetik motor kuvveti ise,

$$\begin{aligned} \Delta F_i &= \alpha \cdot \Delta\Phi_i \quad (i = a, b, c), \quad \Delta F_{ab} = \alpha' \cdot \Delta\Phi_{ab}, \quad \Delta F_{cb} = \alpha' \cdot \Delta\Phi_{cb} \\ \Delta F_{li} &= \beta \cdot \Delta\Phi_{li} \quad i = (a, b, c), \quad \Delta F_0 = \beta_0 \cdot \Delta\Phi_0 \end{aligned} \quad (2.36)$$

ve şekil 2.3 de altı manyetik yol için karşılık gelen amper sarımları,

$$\begin{aligned} N_p \Delta i_a &= \Delta F_a + \Delta F_{la} & N_s i_a' &= -\Delta F_{la} + \Delta F_{ab} + \Delta F_0 \\ N_p \Delta i_b + N_s \Delta i_b' &= \Delta F_0 + \Delta F_b & N_p \Delta i_b &= \Delta F_b + \Delta F_{lb} \\ -N_s \Delta i_b' + N_s \Delta i_c' + N_p \Delta i_c &= \Delta F_{lb} + \Delta F_{cb} + \Delta F_c & N_p \Delta i_c &= \Delta F_c + \Delta F_{lc} \end{aligned} \quad (2.37)$$

dır. Sargı gerilimleri ise,

$$\begin{aligned} \Delta v_a - \Delta v_0 &= r_p \cdot i_a + N_p \cdot p \cdot \Delta\Phi_a & \Delta v_b - \Delta v_0 &= r_p \cdot i_b + N_p \cdot p \cdot \Delta\Phi_b \\ \Delta v_c - \Delta v_0 &= r_p \cdot i_c + N_p \cdot p \cdot \Delta\Phi_c & \Delta v_a' - \Delta v_b' &= r_s i_a' + N_s \cdot p \cdot \Delta\Phi_a \\ \Delta v_b' - \Delta v_b &= r_s i_b' + N_s \cdot p \cdot \Delta\Phi_b & \Delta v_c' - \Delta v_a' &= r_s i_c' + N_s \cdot p \cdot \Delta\Phi_c \end{aligned} \quad (2.38)$$

dir. Nötür için aşağıdaki ifade yazılır.

$$\Delta i_a + \Delta i_b + \Delta i_c = 0 \quad (2.39)$$

Yukarıda verilen 25 adet eşitlikteki değişken sayısı 31 dir. Bunların dokuz tanesi akı, dokuz tanesi manyetik motor kuvveti, altı tanesi akım ve yedi tanesi gerilim eşitliğidir. Eğer bu eşitliklerden akıları, mmk lerini ve Δv_0 çıkarırsak, on iki adet Δv ve Δi değişkeninde altı tane eşitlik kalır. Bunlar eşitlik 2.27 şeklinde tekrar düzenlenir.

Doğrusal olmayan elemanlar transformatörlerdeki gibi harmonik frekans domeninde ve türetilen norton eşdeğerlerinde doğrusal hale getirilir. Norton eşdeğeri ile bütün harmonikler tek adımda hesaplanır. Doğrusallaştırarak elde edilen norton eşdeğeri, harmonik frekans domeninde sistemde yineleyici çözümün temelini oluşturur.

3. ÜÇ FAZ TRANSFORMATÖRLERİN FARKLI BAĞLANTI ŞEKİLLERİNDE ÜÇ FAZ MODELLERİNİN ve SİMETRİK BİLEŞEN EŞDEĞER DEVRELERİNİN ELDE EDİLMESİ

3.1 Giriş

Üç faz yük simülasyon akışı için üç faz transformatörlerin modellemeleri (*) gereklidir. Bu bölümde, üç faz modelleri türetmek için özel bağlı transformatörler seçilmiştir. Bu transformatörler tek faz bağlantısı, V-V bağlantısı, yıldız-üçgen bağlantısı, skot bağlantı, blank bağlantı ve değişik-köprü bağlantılardan oluşur. Özel bağlantılı transformatörler ile üç faz modelleri fiziksel üç faz devreleri ve simetrik bileşen eşdeğer devresi ifade ederek, sistemi besleyen trafo merkezlerini açıkça göstermede yardımcı olur. Üç faz modeli, ileride dengesiz sistemi (**) bütünüyle analiz etmek için, üç faz yük akış programları ile birlikte oluşturulmuştur. Aynı zamanda, simetrik bileşen eşdeğer devresi formüllerini elde etmek için kullanılmıştır. (Astengo, G., 1989), (Mochiniga, Y., 1991)

Trafo merkezlerinde kullanılan özel bağlı transformatörlerin farklı tipleri mevcuttur. Farklı bağlantılar dengesizlik üzerinde farklı etkilere sebep olur. Farklı özel bağlantılı transformatörlerde dengesizlik karşılaştırması yapmak için, üç faz yük akış programı ile yapılan bilgisayar simülasyonu (***) çok etkili ve oldukça iyi bir metot olmuştur.

3.2 Üç Faz Transformatörlerin Farklı Bağlantı Şekillerinde Üç Faz Modellerinin Elde Edilmesi

Şekil 3.1'de görüldüğü gibi, trafo merkezlerindeki özel bağlantılı transformatörler, sadece yükleri besler.



Şekil 3.1 Yükleri besleyen harici kullanılan trafo merkezi

* Modelleme: İncelenmekte olan bir sistemin genel kolaylıkla görülüp anlaşılır bir gösterimi veya bir sistemin matematiksel gösterimi

** Dengesiz sistem: Simetrik üç fazlı bir ac sisteminin fazları üzerinde yükün eşit olmaması

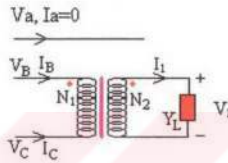
*** Simülasyon: Benzetim. Sistemlerin davranış ve özelliklerinin modeller, bilgisayarlar, yada donanımlarla gösterimi. Bu yöntemle belirli koşullar oluşturulduğunda neler olabileceğini inceleme imkanı verecek, bir bileşen yada sistemin uygulamada çok pahalıya çıkabilecek testlere başvurulmaksızın sınanmasına izin verir.

Y_L toplam admitansı gösterir ve transformatörün sekonderi üzerindeki bütün empedansların tersine eşittir. Bunlar zincirlemeli empedans, ray empedansı, çekiş yükünün eşdeğer empedansı ve sekonderin gösterildiği transformatör empedansıdır.

$\alpha : N_1 / N_2$ sarım oranı $\beta : N_2 / N_1$ sarım oranı

Tek faz bağlı transformatörler için üç faz modeli şekil 3.2’de gösterilmiştir ve aşağıdaki bağıntılar elde edilir.

$$V_{AC} = \alpha V_1 \quad I_B = -I_C = \beta I_1 \quad I_1 = Y_L V_1 \quad (3.1)$$



Şekil 3.2. Tek faz bağlantılı besleme transformatörü

Primer akımları I_A , I_B ve I_C aşağıdaki gibi ifade edilir.

$$I_A = 0 \quad I_B = \beta I_1 = \beta Y_L V_1 = \beta Y_L \beta (V_B - V_C) = \beta^2 Y_L V_B - \beta^2 Y_L V_C$$

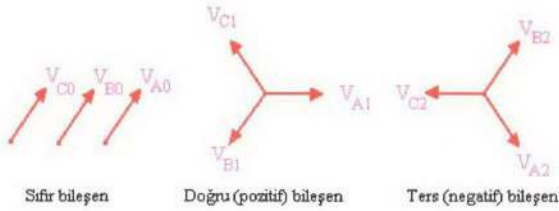
$$I_C = -I_B = -\beta^2 Y_L V_B + \beta^2 Y_L V_C \quad (3.2)$$

$\beta^2 Y_L = Y$ verildiğinde V_{ABC} ve I_{ABC} arasındaki ilişki aşağıdaki gibi ifade edilir.

$$\begin{bmatrix} I_A \\ I_B \\ I_C \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} 0 & 0 & 0 \\ 0 & Y & -Y \\ 0 & -Y & -Y \end{bmatrix} \begin{bmatrix} V_A \\ V_B \\ V_C \end{bmatrix} \quad (3.3)$$

Eşitlik 3.3, simetrik bileşenlere dönüştürürüz. Simetrik bileşenler metodu, çok fazlı sistemlerin basitleştirilerek incelenmesi amacı ile geliştirilmiş ve özellikle üç fazlı sistemlere uygulanması ile yaygınlık kazanmıştır. Simetrik bileşenler metodu dengeli üç fazlı sistemlere uygulandığında birbirinden bağımsız üç bileşen devre elde edilir. Transformatör gösterimleri doğru ve ters bileşen devreleri ile modellenebilir. Sıfır bileşen devresine ilişkin vektörler arasında faz farkı yoktur. Doğru (pozitif) bileşen devre vektörlerinin aralarında 120° faz farkı bulunur ve dönüş yönleri pozitifdir. Ters (negatif) bileşen devre vektörlerinin doğru bileşen devre vektörlerinden farkı ise vektörlerin dönüş yönüdür. Şekil 3.3’ de doğru, ters ve sıfır bileşen devrelerine ilişkin gerilim fazör gösterimleri verilmiştir. Burada doğru bileşen 1, ters

bileşen 2 ve sıfır bileşen 0 indisi ile tanımlanmıştır.



Şekil 3.3 Simetrik bileşen devrelerine ilişkin gerilim fazör gösterimi

Simetrik bileşen gösteriminde gerçek sistemdeki A, B ve C fazlarına ilişkin gerilim fazörleri, yukarıda verilen sıfır, doğru ve ters bileşen fazörleri kullanılarak elde edilebilirler. Gösterim kolaylığı açısından a fazı referans alındığında V_{a1} , V_{a2} , V_{a0} fazörlerinin yerine V_1 , V_2 , V_0 fazörleri kullanılır. $a = 1 \angle 120^\circ$ $a^2 = 1 \angle 240^\circ$ eşitlikleri yardımı ile,

$$\begin{bmatrix} V_A \\ V_B \\ V_C \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} 0 & 1 & 1 \\ 0 & a^2 & a \\ 0 & a & a^2 \end{bmatrix} \begin{bmatrix} V_0 \\ V_1 \\ V_2 \end{bmatrix}, \quad \begin{bmatrix} I_A \\ I_B \\ I_C \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} 1 & 1 & 1 \\ 1 & a^2 & a \\ 1 & a & a^2 \end{bmatrix} \begin{bmatrix} I_0 \\ I_1 \\ I_2 \end{bmatrix}$$

dir. V_{012} ve I_{012} arasındaki ilişki,

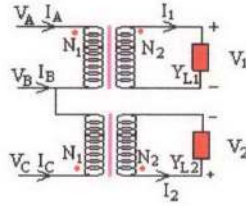
$$\begin{bmatrix} I_0 \\ I_1 \\ I_2 \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} 0 & 0 & 0 \\ 0 & Y & -Y \\ 0 & -Y & -Y \end{bmatrix} \begin{bmatrix} V_0 \\ V_1 \\ V_2 \end{bmatrix} \quad (3.4)$$

olarak elde edilir.

3.2.1 V-V bağlantılı transformatörler için üç faz modeli

Trafo merkezlerindeki V-V açık üçgen (*) bağlantılı besleme transformatörü şekil 3.4'de gösterilmiştir.

* V-V açık üçgen bağlantı: Δ - Δ trafonun birinin bankı devre dışı olduğunda yeni birisiyle değiştirilmesi veya arızalı olanın arızası giderilmesine kadar düşük kapasite de olsa çalışmasının devamı için bu trafo bağlantısı kullanılır.



Şekil 3.4 V-V bağlantılı besleme transformatörü

Y_{L1} ve Y_{L2} merkezi besleme sisteminin iki tarafındaki eşdeğer admitansları ifade eder. Akı kublajlaması ile Kirchhoff'un akımlar ve gerilimler kanunu ile aşağıdaki ifadeler elde edilir.

$$V_{AB} = \alpha V_1$$

$$V_{CB} = \alpha V_2$$

$$I_A = \beta I_1$$

$$I_C = \beta I_2$$

$$I_A + I_B + I_C = 0$$

$$I_1 = Y_{L1} \cdot V_1 \quad I_2 = Y_{L2} \cdot V_2 \quad (3.5)$$

Primer akımları I_A , I_B ve I_C aşağıdaki gibi ifade edilir.

$$\begin{aligned} I_A &= \beta I_1 = \beta Y_{L1} \cdot V_1 \\ &= \beta^2 Y_{L1} \cdot (V_A - V_B) \\ &= \beta^2 Y_{L1} V_A - \beta^2 Y_{L1} V_B \end{aligned} \quad (3.6)$$

Benzer olarak,

$$\begin{aligned} I_C &= \beta I_2 \\ &= \beta^2 Y_{L2} V_B + \beta^2 Y_{L2} V_C \\ I_B &= -(I_A + I_C) \\ &= -\beta^2 Y_{L1} V_A + \beta^2 (Y_{L1} + Y_{L2}) V_B - Y_{L2} V_C \end{aligned} \quad (3.7)$$

$\beta^2 Y_{L1} = Y_1$ ve $\beta^2 Y_{L2} = Y_2$ verildiğinde I_A , I_B ve I_C arasındaki ilişki aşağıdaki gibi ifade edilir.

$$\begin{bmatrix} I_A \\ I_B \\ I_C \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} Y_1 & -Y_1 & 0 \\ -Y_1 & Y_1 + Y_2 & -Y_2 \\ 0 & -Y_2 & Y_2 \end{bmatrix} \begin{bmatrix} V_A \\ V_B \\ V_C \end{bmatrix} \quad (3.8)$$

Eşitlik 3.8'i simetrik bileşenlerine dönüştürdüğümüzde V_{012} ve I_{012} arasındaki ilişkiyi aşağıdaki gibi elde ederiz.

$$\begin{bmatrix} I_0 \\ I_1 \\ I_2 \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} 0 & 0 & 0 \\ 0 & Y_1 + Y_2 & -aY_1 + Y_2 \\ 0 & -a^2Y_1 - Y_2 & Y_1 + Y_2 \end{bmatrix} \begin{bmatrix} V_0 \\ V_1 \\ V_2 \end{bmatrix} \quad (3.9)$$

3.2.2 Skot bağlantılı transformatörün üç faz modeli

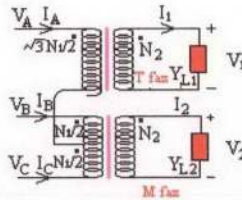
Şekil 3.5a'da trafo merkezlerindeki, skot bağlantılı (*) transformatör gösterilmiştir. Şekil 3.5b'de gerilim fazörü ve akım akış diyagramlarının her ikisi gösterilmiştir. Y_{L1} ve Y_{L2} merkezi besleme sisteminin iki tarafındaki ayrı ayrı eşdeğer admitansları ifade eder. Akı kublajlama, kirchhoff'un akım ve gerilim kanunlarından faydalanılarak aşağıdaki ilişkileri elde ederiz.

$$I_1 = Y_{L1} \cdot V_1 = \frac{2}{\sqrt{3}} \cdot \beta \cdot (V_A - \frac{1}{2}V_B - \frac{1}{2}V_C) \cdot Y_{L1} \quad (3.10)$$

$$I_2 = Y_{L2} \cdot V_2 = \beta \cdot (V_B - V_C) \cdot Y_{L2} \quad (3.11)$$

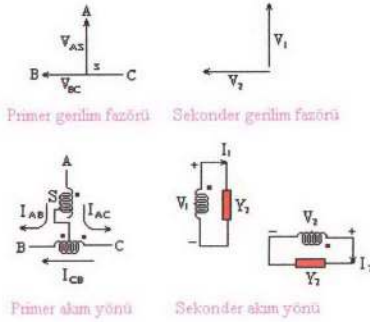
$I_A = I_{AC} + I_{AB}$, $I_B = -I_{CB} - I_{AB}$, $I_C = I_{CB} - I_{AC}$ ile ifade edilir.

Primerde ki gerilim fazörü, sekonder de ki gerilim fazörü, primer akım ve sekonder akım akışı şekil 3.5 b de gösterilmiştir.



a)

* Skot bağlantı: Tek fazlı iki transformatörün, üç fazlı üç-telli bir akımı iki fazlı üç-telli akıma veya iki fazlı üç-telli akımı üç fazlı üç-telli akıma dönüştürecek şekilde bağlanması



b)

Şekil 3.5 Skot bağlantılı besleme transformatörü ve gerilim fazör akış şeması

$$I_1 = \frac{\sqrt{3}}{2} \alpha \cdot I_{AC} + \frac{1}{2} \alpha \cdot I_{AB} = \frac{\sqrt{3}}{2} \alpha \cdot I_A$$

$$\therefore I_A = \frac{2}{\sqrt{3}} \beta \cdot I_1 \quad (3.12)$$

$$I_2 = -\alpha \cdot I_{CB} + \frac{1}{2} \alpha \cdot I_{AC} - \frac{1}{2} \alpha \cdot I_{AB} = -\alpha \cdot I_{CB} + \alpha \cdot I_{AC} - \frac{1}{2} \alpha \cdot I_{AC} - \frac{1}{2} \alpha \cdot I_{AB}$$

$$= -\alpha \cdot I_C - \frac{1}{2} \alpha \cdot I_A = -\alpha \cdot I_C - \frac{1}{\sqrt{3}} I_1$$

$$\therefore I_C = -\beta I_2 - \frac{1}{\sqrt{3}} \beta \cdot I_1 \quad (3.13)$$

sistem primeri topraklı olması nedeni ile,

$$I_B = -I_A - I_C = \beta I_2 - \frac{1}{\sqrt{3}} \beta \cdot I_1 \quad (3.14)$$

Eşitlik 3.10' u 3.12 de yerine koyduğumuzda, aşağıda verilen ifadeyi elde ederiz.

$$I_A = \frac{4}{3} \beta^2 Y_{L1} V_A - \frac{2}{3} \beta^2 Y_{L1} V_B - \frac{2}{3} \beta^2 Y_{L1} V_C \quad (3.15)$$

Eşitlik 3.10' u 3.11 ve 3.14 de yerine koyduğumuzda, aşağıda verilen ifadeyi elde ederiz.

$$I_B = \frac{2}{3} \cdot \beta^2 Y_{L1} V_A + \left(\frac{1}{3} \cdot \beta^2 Y_{L1} + \beta^2 Y_{L2} \right) V_B + \frac{1}{3} \beta^2 Y_{L1} - \beta^2 Y_{L2} V_C$$

$$I_C = -\beta^2 Y_{L1} V_A + \left(\frac{1}{3} \cdot \beta^2 Y_{L1} - \beta^2 Y_{L2} \right) V_B + \frac{1}{3} \beta^2 Y_{L1} + \beta^2 Y_{L2} V_C \quad (3.16)$$

$\beta^2 \cdot Y_{L1} = Y_1$ $\beta^2 \cdot Y_{L2} = Y_2$ verildiğinde V_{ABC} ve I_{ABC} arasındaki ilişki, aşağıdaki gibi ifade edilir.

$$\begin{bmatrix} I_A \\ I_B \\ I_C \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} \frac{4}{3} Y_1 & -\frac{2}{3} Y_1 & -\frac{2}{3} Y_1 \\ -\frac{2}{3} Y_1 & \frac{1}{3} Y_1 + Y_2 & \frac{1}{3} Y_1 - Y_2 \\ -\frac{2}{3} Y_1 & \frac{1}{3} Y_1 - Y_2 & \frac{1}{3} Y_1 + Y_2 \end{bmatrix} \begin{bmatrix} V_A \\ V_B \\ V_C \end{bmatrix} \quad (3.17)$$

Eşitlik 3.17'yi simetrik bileşenlere dönüştürdüğümüzde, V_{012} ve I_{012} arasındaki ilişkiyi aşağıdaki gibi elde ederiz.

$$\begin{bmatrix} I_0 \\ I_1 \\ I_2 \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} 0 & 0 & 0 \\ 0 & Y_1 + Y_2 & Y_1 - Y_2 \\ 0 & Y_1 - Y_2 & Y_1 + Y_2 \end{bmatrix} \begin{bmatrix} V_0 \\ V_1 \\ V_2 \end{bmatrix} \quad (3.18)$$

3.2.3 Blank bağlantılı transformatör için üç faz modeli

Trafo merkezlerindeki blank bağlantılı (*) transformatör şekil 3.6a' da, gerilim fazör ve akım akış şemaları ise şekil 3.6b'de gösterilmiştir. Akı kublajı (**) ile kirchhoff'un akımlar ve gerilimler kanunu ve ohm kanunundan yararlanarak aşağıdaki eşitlikler elde edilmiştir.

$$V_1 = \frac{1}{\sqrt{3}} \cdot \frac{N_2}{N_1} \cdot (V_{CA} - V_{AB}) = \frac{1}{\sqrt{3}} \cdot \beta \cdot (V_B + V_C - 2V_A)$$

$$V_2 = \frac{1}{\sqrt{3}} \cdot \beta \cdot (2V_{BC} - V_{AB} - V_{CA}) = \beta \cdot (V_B - V_C)$$

$$I_1 = Y_{L1} \cdot V_1, \quad I_2 = Y_{L2} \cdot V_2, \quad I_A = -I_{CA} + I_{AB}$$

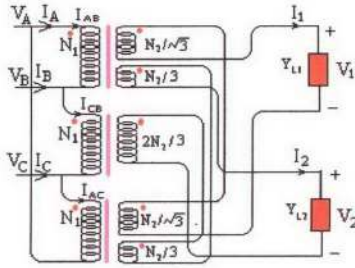
$$I_B = -I_{AB} + I_{BC}, \quad I_C = -I_{BC} + I_{CA}$$

$$I_{CA} = \beta \left(\frac{1}{\sqrt{3}} I_1 - \frac{1}{3} I_2 \right), \quad I_{BC} = \frac{2}{3} \cdot \beta \cdot I_2$$

* Blank bağlantı: Bir aygıt ya da kanalın istenilen bir zaman aralığı için etkisiz hale getirilebildiği bağlantı şekli

** Akı kublajı: İki devre arasında, birinden diğerine enerji transferine izin veren karşılıklı akı ilişkisi

$$I_{AB} = -\beta\left(\frac{1}{3}I_2 - \frac{1}{\sqrt{3}}I_1\right) \quad (3.19)$$



a)



b)

Şekil 3.6 Blank bağlantılı transformator ve gerilim fazör şeması

Primer akımları aşağıdaki gibi elde edilir.

$$I_A = -\frac{2}{\sqrt{3}}\beta I_1 \quad I_B = \frac{1}{\sqrt{3}}\beta I_1 + \beta I_2 \quad I_C = \frac{1}{\sqrt{3}}\beta I_1 - \beta I_2 \quad (3.20)$$

Yerlerine uygun bir şekilde koyduğumuzda, aşağıdaki ifadeleri elde ederiz.

$$\begin{aligned} I_A &= \frac{4}{3}\beta^2 Y_{L1} V_A - \frac{2}{3}\beta^2 Y_{L1} V_B - \frac{2}{3}\beta^2 Y_{L1} V_C \\ I_B &= \frac{2}{3}\beta^2 Y_{L1} V_A + \left(\frac{1}{3}\beta^2 Y_{L1} + \beta^2 Y_{L2}\right) V_B + \frac{1}{3}\beta^2 Y_{L1} - \beta^2 Y_{L2} V_C \\ I_C &= -\beta^2 Y_{L1} V_A + \left(\frac{1}{3}\beta^2 Y_{L1} - \beta^2 Y_{L2}\right) V_B + \frac{1}{3}\beta^2 Y_{L1} + \beta^2 Y_{L2} V_C \end{aligned} \quad (3.21)$$

$\beta^2 Y_{L1} = Y_1$ ve $\beta^2 Y_{L2} = Y_2$ verildiğinde, V_{ABC} ve I_{ABC} arasındaki ilişki aşağıdaki gibi ifade edilir.

$$\begin{bmatrix} I_A \\ I_B \\ I_C \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} \frac{4}{3}Y_1 & -\frac{2}{3}Y_1 & -\frac{2}{3}Y_1 \\ -\frac{2}{3}Y_1 & \frac{1}{3}Y_1 + Y_2 & \frac{1}{3}Y_1 - Y_2 \\ -\frac{2}{3}Y_1 & \frac{1}{3}Y_1 - Y_2 & \frac{1}{3}Y_1 + Y_2 \end{bmatrix} \begin{bmatrix} V_A \\ V_B \\ V_C \end{bmatrix} \quad (3.22)$$

Eşitlik 3.22'yi simetrik bileşenlerine dönüştürdüğümüzde, V_{012B} ve I_{012} arasındaki ilişkiyi aşağıdaki gibi elde ederiz.

$$\begin{bmatrix} I_0 \\ I_1 \\ I_2 \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} 0 & 0 & 0 \\ 0 & Y_1 + Y_2 & Y_1 - Y_2 \\ 0 & Y_1 - Y_2 & Y_1 + Y_2 \end{bmatrix} \begin{bmatrix} V_0 \\ V_1 \\ V_2 \end{bmatrix} \quad (3.23)$$

3.2.4 Değişik-köprü bağlantılı transformatör için üç faz modeli

Trafo merkezinde değişik-köprü bağlantılı transformatör şekil 3.7a'da gösterilmiştir. Gerilim fazörü ve akı şemalarının her ikisi şekil 3.7b'de gösterilmiştir. Akı kublajı ile kirchhoff'un akım ve gerilim kanununu uyguladığımızda aşağıdaki ilişkileri elde ederiz.

$$V_1 = \sqrt{3} V_{P3P4} = \sqrt{3} \cdot \beta \cdot V_A \quad (3.24)$$

$$V_2 = \beta \cdot (V_B - V_C) \quad (3.25)$$

$$I_A + I_B + I_C = I_N \quad (3.26)$$

$$I_2 = I_{B1} - I_{C1} \quad (3.27)$$

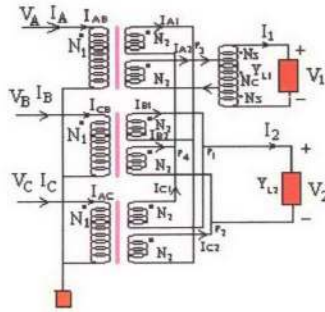
$$I_2 = I_{B2} - I_{C2} \quad (3.28)$$

$$\sqrt{3} \cdot I_1 = I_{A1} + I_{A2} - I_{B1} - I_{C2} \quad (3.29)$$

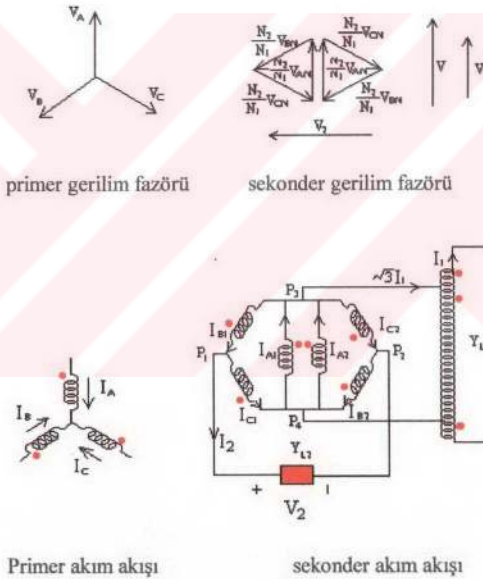
$$\sqrt{3} \cdot I_1 = I_{A1} + I_{A2} - I_{B2} - I_{C1} \quad (3.30)$$

$I_A = \beta \cdot I_{A1} + \beta \cdot I_{A2}$, $I_B = \beta \cdot I_{B1} + \beta \cdot I_{B2}$, $I_C = \beta \cdot I_{C1} + \beta \cdot I_{C2}$ ifade edilir. Eşitlik 3.29'u 3.30' a eklediğimizde aşağıdaki ifadeleri elde ederiz.

$$\begin{aligned} I_1 &= \frac{1}{\sqrt{3}} \cdot (I_{A1} + I_{A2}) - \frac{1}{2\sqrt{3}} \cdot (I_{B1} + I_{B2}) - \frac{1}{2\sqrt{3}} \cdot (I_{C1} + I_{C2}) \\ &= \frac{1}{\sqrt{3}} \alpha \cdot I_A - \frac{1}{2\sqrt{3}} \alpha \cdot I_B - \frac{1}{2\sqrt{3}} \alpha \cdot I_C \end{aligned} \quad (3.31)$$



a)



b)

Şekil 3.7 Değişik-köprü bağlantılı transformatör, gerilim fazör ve akım akış şemaları

$$= \frac{\sqrt{3}}{2} \alpha I_A - \frac{1}{2\sqrt{3}} \alpha (I_A + I_B + I_C) = \frac{\sqrt{3}}{2} \alpha I_A - \frac{1}{2\sqrt{3}} \alpha I_N$$

$$\therefore I_A = \frac{2}{\sqrt{3}} \cdot \beta \cdot I_1 - \frac{1}{3} \cdot I_N \quad (3.32)$$

Eşitlik 3.27'yi eşitlik 3.28'e eklediğimizde aşağıdaki ifadeyi elde ederiz.

$$\begin{aligned} I_2 &= \frac{1}{2} \cdot (I_{B1} + I_{B2}) - \frac{1}{2} \cdot (I_{C1} + I_{C2}) \\ &= \frac{1}{2\beta} \cdot (I_B - I_C) \\ \therefore I_B - I_C &= 2 \cdot \beta \cdot I_2 \end{aligned} \quad (3.33)$$

Eşitlik 3.28'i eşitlik 3.30'a eklediğimizde aşağıdaki ifadeleri elde ederiz.

$$\begin{aligned} \sqrt{3}I_1 + I_2 &= I_{A1} + I_{A2} - I_{C1} - I_{C2} \\ &= \alpha \cdot (I_A - I_C) \end{aligned} \quad (3.34)$$

Eşitlik 3.27'den eşitlik 3.30'u çıkardığımızda aşağıdaki ifadeleri elde ederiz.

$$\begin{aligned} \sqrt{3}I_1 - I_2 &= I_{A1} + I_{A2} - I_{B1} - I_{B2} \\ &= \alpha \cdot (I_A - I_B) \end{aligned} \quad (3.35)$$

Eşitlik 3.35'i 3.34'e eklediğimizde,

$$2\sqrt{3} \cdot \beta \cdot I_1 = 2 \cdot I_A - (I_B + I_C) \quad (3.36)$$

elde ederiz. Bunu eşitlik 3.32'de yerine koyduğumuzda,

$$I_B + I_C = \frac{2}{3} I_N - \frac{2}{\sqrt{3}} \cdot \beta \cdot I_1 \quad (3.37)$$

elde ederiz. Eşitlik (3.33)'ü eşitlik (3.37)'ye eklediğimizde,

$$I_B = -\frac{1}{\sqrt{3}} \cdot \beta \cdot I_1 + \beta \cdot I_2 + \frac{1}{3} I_N \quad (3.38)$$

elde ederiz. Eşitlik 3.33'den 3.37'yi çıkardığımızda,

$$I_C = -\frac{1}{\sqrt{3}} \cdot \beta \cdot I_1 - \beta \cdot I_2 + \frac{1}{3} I_N \quad (3.39)$$

elde ederiz. Sekonderde ki üçgen bağlantıdan aşağıdaki eşitlik elde edilir.

$$\frac{N_2}{N_1} \cdot V_{AN} \frac{N_2}{N_1} \cdot V_{BN} \frac{N_2}{N_1} \cdot V_{CN} = 0(KVL) \quad (3.40)$$

Ek olarak, eğer primer tarafı topraklanmış ise, ilişki $V_A + V_B + V_C = 0$ olacaktır.

$$V_A + V_B + V_C = 0 \quad (3.41)$$

$I_1 = Y_{L1} \cdot V_1$ ve eşitlik 3.24'ü eşitlik 3.32 de yerine koyduğumuzda,

$$\begin{aligned} I_A &= \frac{2}{\sqrt{3}} \cdot \beta \cdot Y_{L1} V_1 + \frac{1}{3} I_N = 2 \cdot \beta^2 Y_{L1} V_A + \frac{1}{3} I_N \\ &= \beta^2 Y_{L1} \left[2V_A - \frac{2}{3}(V_A + V_B + V_C) \right] + \frac{1}{3} I_N \\ &= \frac{4}{3} \beta^2 Y_{L1} V_A - \frac{2}{3} \beta^2 Y_{L1} V_B - \frac{2}{3} \beta^2 Y_{L1} V_C + \frac{1}{3} I_N \end{aligned} \quad (3.42)$$

elde ederiz. Benzer olarak,

$$\begin{aligned} I_B &= -\frac{1}{\sqrt{3}} \cdot \beta \cdot I_1 + \beta \cdot I_2 + \frac{1}{3} I_N = -\frac{1}{\sqrt{3}} \cdot \beta \cdot Y_{L1} V_1 - \beta \cdot Y_{L2} V_2 - \frac{1}{3} I_N \\ &= -\beta^2 Y_{L1} V_A - \beta^2 Y_{L2} V_B - \beta^2 Y_{L2} V_C + \frac{1}{3} I_N \\ &= -\frac{2}{3} \beta^2 Y_{L1} V_A + \left(\frac{1}{3} \beta^2 Y_{L1} + \beta^2 Y_{L2} \right) V_B + \left(\frac{1}{3} \beta^2 Y_{L1} - \beta^2 Y_{L2} \right) V_C + \frac{1}{3} I_N \\ I_C &= -\frac{1}{\sqrt{3}} \cdot \beta \cdot I_1 + \beta \cdot I_2 + \frac{1}{3} I_N = -\frac{1}{\sqrt{3}} \cdot \beta \cdot Y_{L1} V_1 - \beta \cdot Y_{L2} V_2 + \frac{1}{3} I_N \\ &= -\frac{2}{3} \beta^2 Y_{L1} V_A + \left(\frac{1}{3} \beta^2 Y_{L1} - \beta^2 Y_{L2} \right) V_B + \left(\frac{1}{3} \beta^2 Y_{L1} + \beta^2 Y_{L2} \right) V_C + \frac{1}{3} I_N \end{aligned} \quad (3.43)$$

elde edilir. $\beta^2 \cdot Y_{L1} = Y_1$ ve $\beta^2 \cdot Y_{L2} = Y_2$ olduğu varsayılırsa, V_{ABC} ve I_{ABC} arasındaki ilişki aşağıdaki gibi ifade edilir.

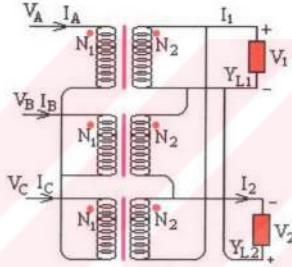
$$\begin{bmatrix} I_A \\ I_B \\ I_C \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} \frac{4}{3} Y_1 & -\frac{2}{3} Y_1 & -\frac{2}{3} Y_1 \\ -\frac{2}{3} Y_1 & \frac{1}{3} Y_1 + Y_2 & \frac{1}{3} Y_1 - Y_2 \\ -\frac{2}{3} Y_1 & \frac{1}{3} Y_1 - Y_2 & \frac{1}{3} Y_1 + Y_2 \end{bmatrix} \begin{bmatrix} V_A \\ V_B \\ V_C \end{bmatrix} + \frac{1}{3} I_N \begin{bmatrix} 1 \\ 1 \\ 1 \end{bmatrix} \quad (3.44)$$

Eşitlik 3.44'ü simetrik bileşenlere dönüştürdüğümüzde V_{012} ve I_{012} arasındaki bağlantıyı aşağıdaki gibi elde ederiz.

$$\begin{bmatrix} I_0 \\ I_1 \\ I_2 \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} 0 & 0 & 0 \\ 0 & Y_1 + Y_2 & Y_1 - Y_2 \\ 0 & Y_1 - Y_2 & Y_1 + Y_2 \end{bmatrix} \begin{bmatrix} V_0 \\ V_1 \\ V_2 \end{bmatrix} + \begin{bmatrix} \frac{1}{3} I_N \\ 0 \\ 0 \end{bmatrix} \quad (3.45)$$

3.2.5 Yıldız-üçgen bağlı üç faztransformatör için üç faz modeli

Trafo merkezinde yıldız-üçgen bağlantılı (*) besleme transformatörü şekil 3.8' deki gibi gösterilmiştir.



Şekil 3.8 Yıldız-üçgen bağlantılı besleme transformatörü

Aşağıda elde edilen ilişkilerle,

$$\begin{aligned} V_A + V_B + V_C &= 3V_N & V_1 &= \beta V_{AN} & V_2 &= -\beta V_{BN} \\ I_A + I_B + I_C &= 0 & I_1 &= \alpha I_A - \alpha I_C = 0 & I_2 &= \alpha I_C - \alpha I_B = 0 \\ I_1 &= Y_{L1} V_1, & I_2 &= Y_{L2} V_2 \end{aligned} \quad (3.46)$$

aşağıdaki ilişkileri elde ederiz.

$$\begin{aligned} 3I_A &= 2\beta I_1 - \beta I_2, & 3I_B &= -\beta I_1 - 2\beta I_2, & 3I_C &= -\beta I_1 - \beta I_2 \\ V_{AN} &= V_A - V_N = \frac{2}{3}V_A - \frac{1}{3}V_B - \frac{1}{3}V_C \\ V_{BN} &= -\frac{1}{3}V_A + \frac{2}{3}V_B - \frac{1}{3}V_C, & V_{CN} &= -\frac{1}{3}V_A - \frac{1}{3}V_B + \frac{2}{3}V_C \end{aligned} \quad (3.47)$$

* Yıldız-üçgen bağlantı şekli, gerilim düşürülmesi gereken iletim hattının sonundaki tali istasyonlarda kullanılır.

Yerine koyup düzenlediğimizde, $\beta^2 \cdot Y_{L1} = Y_1$ ve $\beta^2 \cdot Y_{L2} = Y_2$ olduğunu varsayarak V_{ABC} ve I_{ABC} arasındaki ilişki aşağıdaki gibi ifade edilir.

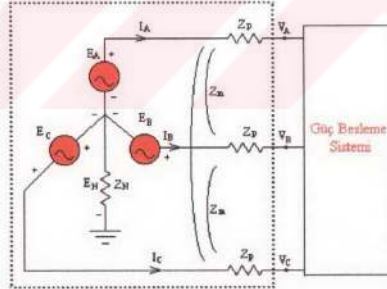
$$\begin{bmatrix} I_A \\ I_B \\ I_C \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} \frac{4}{3}Y_1 + \frac{1}{3}Y_2 & -\frac{2}{3}Y_1 - \frac{2}{3}Y_2 & -\frac{2}{3}Y_1 + \frac{1}{3}Y_2 \\ -\frac{2}{3}Y_1 - \frac{2}{3}Y_2 & \frac{1}{3}Y_1 + \frac{4}{3}Y_2 & \frac{1}{3}Y_1 - \frac{2}{3}Y_2 \\ -\frac{2}{3}Y_1 + \frac{1}{3}Y_2 & \frac{1}{3}Y_1 - \frac{2}{3}Y_2 & \frac{1}{3}Y_1 + \frac{1}{3}Y_2 \end{bmatrix} \begin{bmatrix} V_A \\ V_B \\ V_C \end{bmatrix} \quad (3.48)$$

Eşitlik 3.48'i simetrik bileşenlerine dönüştürdüğümüzde, V_{012} ve I_{012} arasındaki ilişkiyi aşağıdaki gibi elde ederiz.

$$\begin{bmatrix} I_0 \\ I_1 \\ I_2 \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} 0 & 0 & 0 \\ 0 & Y_1 + Y_2 & Y_1 + a^2Y_2 \\ 0 & Y_1 + aY_2 & Y_1 + Y_2 \end{bmatrix} \begin{bmatrix} V_0 \\ V_1 \\ V_2 \end{bmatrix} \quad (3.49)$$

3.3 Eşdeğer Devreler ve Dengesizliğin Tahmin Edilmesi

Üç faz eşdeğer devre, transformatör sekonder yükü ve aynı zamanda primer yükü ifade eder. Simetrik bileşen eşdeğer devresi, gerilim dengesizliğini tahmin etmek için kullanılır.



Şekil 3.9 Bir kullanıcı sistemi için eşdeğer üç faz devresi

V_A , V_B ve V_C çalışma noktasında ki üç faz hat-toprak gerilimlerini ifade eder.

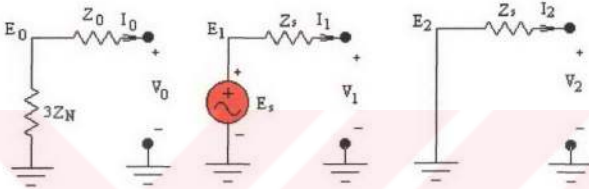
$$\begin{bmatrix} E_A \\ E_B \\ E_C \end{bmatrix} + \begin{bmatrix} E_N \\ E_N \\ E_N \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} Z_p & Z_m & Z_m \\ Z_m & Z_p & Z_m \\ Z_m & Z_m & Z_p \end{bmatrix} \begin{bmatrix} I_A \\ I_B \\ I_C \end{bmatrix} + \begin{bmatrix} V_A \\ V_B \\ V_C \end{bmatrix} \quad (3.50)$$

Simetrik dönüşüm ve bazı düzenlemeler yaptığımızda,

$Z_0=Z_p+2.Z_m$, $Z_1=Z_2=Z_s=Z_p-Z_m$, $E_s=E_A$ olduğunda

$$\begin{bmatrix} 0 \\ E_s \\ 0 \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} Z_0+3.Z_N & 0 & 0 \\ 0 & Z_s & 0 \\ 0 & 0 & Z_M & Z_s \end{bmatrix} \begin{bmatrix} I_0 \\ I_1 \\ I_2 \end{bmatrix} + \begin{bmatrix} V_0 \\ V_1 \\ V_2 \end{bmatrix} \quad (3.51)$$

elde ederiz. Kullanıcı sistemi, şekil 3.10' da gösterildiği gibi, simetrik bileşen eşdeğer devre ile ifade edilir.

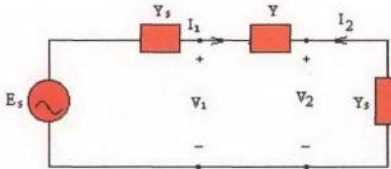


Şekil 3.10 Bir kullanıcı sistem için simetrik bileşen eşdeğer devresi

Simetrik bileşen eşdeğer devresi eşitlik 3.4, 3.9, 3.18, 3.23, 3.45 ve 3.49 ile eşitlik 3.51'in ayrı ayrı birleştirilmesi ile elde edilecektir. Sonuçlar çalışma noktasındaki gerilim dengesizliğini tahmin etmek için kullanılır.

3.3.1 Tek faz bağlantılı transformatör

Eşitlik 3.51 ile birleştirilerek, tek faz bağlantılı transformatör için simetrik bileşen eşdeğer devresi şekil 3.11' de gösterildiği gibi elde edilmiştir ve dengesizliği tahmin etmek için basit bir yöntem oluşturulmuştur. Şekil 3.11' den,



Şekil 3.11 Tek faz bağlantılı transformatörün simetrik bileşen eşdeğer devresi

$$\frac{V_2}{V_1} = \frac{\frac{1}{Y_s}}{\frac{1}{Y_s} + \frac{1}{Y}} = \frac{Y}{Y + Y_s} \quad (3.52)$$

bulunur. Genellikle $Y_s \gg Y$ dir. Böylece,

$$\left| \frac{V_2}{V_1} \right| \cong \left| \frac{Y}{Y_s} \right| \quad (3.53)$$

dir. $Y = Y_1 + Y_2$ olsun. Y merkezi besleme sistemindeki toplam eşdeğer admitanstır. Y_1 merkezi besleme sisteminin sol tarafındaki admitansı, Y_2 ise sağ tarafındaki admitansı ifade eder. O zaman,

$$\left| \frac{V_2}{V_1} \right| \cong \left| \frac{Y_1 + Y_2}{Y_s} \right| = \left| \frac{Y_1 V_1^2 + Y_2 V_1^2}{V_1^2 Y_s} \right| \cong \frac{S_1 + S_2}{S_3 \phi} \quad (3.54)$$

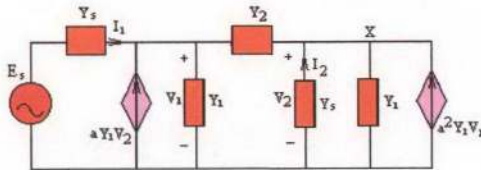
S_1 ve S_2 sırası ile Y_1 ve Y_2 'ye karşılık gelen görünür güçler MVA olarak ifade edilir. $S_{3\phi}$ üç faz kısa devre kapasitesidir. $S_{1\phi}$ merkezi besleme sistemindeki toplam yük olduğunu düşünürsek $S_{1\phi} = S_1 + S_2$ dir. O zaman,

$$\left| \frac{V_2}{V_1} \right| \cong \frac{S_1 \phi}{S_3 \phi} \quad (3.55)$$

dır.

3.3.2 V-V bağlantılı transformatör

V-V (açık üçgen) bağlı transformatör ile simetrik bileşen eşdeğer devresi şekil 3.12'de gösterildiği gibi elde edilmiştir.



Şekil 3.12 V-V bağlantı için simetrik bileşen eşdeğer devresi

Düğümü seçip kirchhoff'un akımlar kanununu uyguladığımızda,

$$\begin{aligned}
 I_2 &= -Y_s V_2 \\
 &= -a^2 Y_1 V_1 + Y_1 V_2 + Y_2 (V_2 - V_1) \\
 \Rightarrow (a^2 Y_1 + Y_2) V_1 &= (Y_1 + Y_2 + Y_s) V_2 \\
 \Rightarrow \left| \frac{V_2}{V_1} \right| &= \left| \frac{a^2 Y_1 + Y_2}{Y_1 + Y_2 + Y_s} \right| \quad (3.56)
 \end{aligned}$$

elde ederiz. Genellikle $Y_s \gg Y_1, Y_2$. O zaman,

$$\begin{aligned}
 \left| \frac{V_2}{V_1} \right| &\cong \left| \frac{a^2 Y_1 + Y_2}{Y_s} \right| = \left| \frac{a^2 Y_1 V_1^2 + Y_2 V_1^2}{Y_s V_1^2} \right| = \left| \frac{a^2 S_1 + S_2}{S_3 \phi} \right| \\
 \Rightarrow \left| \frac{V_2}{V_1} \right| &\cong \left| \frac{a^2 S_1 + S_2}{S_3 \phi} \right| \quad (3.57)
 \end{aligned}$$

dir. $S_{1\phi}$ merkezi besleme sistemindeki toplam yük olduğunu düşünelim. S_1 merkezi sistemin sol tarafındaki MVA olarak yük gücünü ifade eder. $S_1 = k \cdot S_{1\phi}$ ve $S_2 = (1-k) \cdot S_{1\phi}$ olur.

$$\begin{aligned}
 \left| \frac{V_2}{V_1} \right| &\cong \left| \frac{S_1 \phi}{S_3 \phi} \right| a^2 k + 1 - k \\
 \left| \frac{V_2}{V_1} \right| &\cong (3k^2 - 3k + 1)^{\frac{1}{2}} \left| \frac{S_1 \phi}{S_3 \phi} \right| \quad (3.58)
 \end{aligned}$$

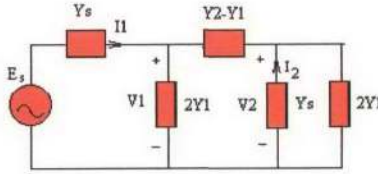
elde edilir.

3.3.3 Skot , blank ve değişik-köprü bağlantılı transformatör

Skot , blank ve değişik-köprü bağlantılarında besleme transformatörünün primerinde ki V_{ABC} ve I_{ABC} arasındaki ilişki aynı olduğu görülmüştür.

$$\left| \frac{V_2}{V_1} \right| = \left| \frac{\frac{1}{2Y_1 + Y_s}}{\frac{1}{-Y_1 + Y_2} + \frac{1}{2Y_1 + Y_s}} \right| = \left| \frac{-Y_1 + Y_2}{2Y_1 + Y_s - Y_1 + Y_2} \right| \cong \left| \frac{Y_2 - Y_1}{Y_s} \right| \cong \left| \frac{S_2 - S_1}{S_3 \phi} \right| \quad (3.59)$$

Skot , blank veya değişik-köprü bağlantılı transformatörün simetrik bileşen eşdeğer devresi ile eşitlik 3.51'i birleştirdiğimizde, eşdeğer devre şekil 3.13'de gösterildiği gibi elde edilmiştir.



Şekil 3.13 Skot, blank ve değişik-köprü bağlantı için simetrik bileşen eşdeğer devresi

önceden olduğu gibi $S_1 = k \cdot S_{1\phi}$ ve $S_2 = (1-k) \cdot S_{1\phi}$ olsun. O zaman,

$$\left| \frac{V_2}{V_1} \right| \cong |1 - 2k| \left| \frac{S_1 \phi}{S_3 \phi} \right| \quad (3.60)$$

dır.

3.3.4 Yıldız-üçgen bağlantılı üç faz transformatör

Eşitlik 3.51 ile eşitlik 3.49'u birleştirdiğimizde simetrik bileşen eşdeğer devresi şekil 3.14' de görüldüğü gibi elde edilmiştir.

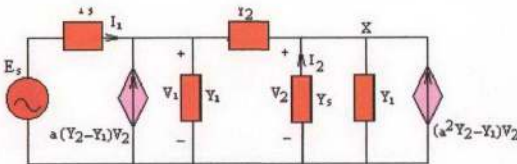
$$I_2 = -Y_s \cdot V_2 = -(a^2 \cdot Y_2 - Y_1) V_1 + Y_1 \cdot V_2 + Y_2 \cdot (V_2 - V_1)$$

$$\Rightarrow \frac{V_2}{V_1} = \frac{-Y_1 - aY_2}{Y_1 + Y_s + Y_2} \quad (3.61)$$

Genellikle $Y_s \gg Y_1, Y_2$ dir. O zaman,

$$\left| \frac{V_2}{V_1} \right| \cong \left| \frac{Y_1 + aY_2}{Y_s} \right| = \left| \frac{Y_1 V_1^2 + aY_2 V_1^2}{Y_s V_1^2} \right| = \left| \frac{S_1 + aS_2}{S_3 \phi} \right| \quad (3.62)$$

dir.



Şekil 3.14. Yıldız-üçgen bağlantı için simetrik bileşen eşdeğer devresi

Y_1 'e S_1 ve Y_2 'ye S_2 karşılık gelir ve MVA olarak ifade edilir.

$S_{1\phi}$ ile merkezi besleme sisteminde toplam yükün görünür gücü ifade edilir. $S_{1\phi} = S_1 + S_2$ dir.

S_1 ile sol taraftaki MVA yükün görünür gücü, S_2 ile sağ taraftaki MVA yükün görünür gücü ifade edilir. $S_1 = k.S_{1\phi}$ ve $S_2 = (1-k).S_{1\phi}$ dir. O zaman,

$$\left| \frac{V_2}{V_1} \right| \cong \left| k + a.(1-k) \right| \left| \frac{S_1\phi}{S_3\phi} \right| \quad \left| \frac{V_2}{V_1} \right| \cong (3k^2 - 3k + 1)^{\frac{1}{2}} \left| \frac{S_1\phi}{S_3\phi} \right| \quad (3.63)$$

dir. (Chen B.K, 1996)

3.4 Özel Bağlı Transformatörlerin Farklı Tipleri için Dengesizlik Karşılaştırması

Elde edilen dengesizlik (*) tahmin-etme yöntemleri iki varsayım üzerine dayandırılmıştır. Kullanıcı sistemin üç faz dengeli sistem olduğu, eşdeğer yük empedansı kullanıcı kaynak empedansından çok büyük olduğu varsayılmıştır..

Karşılaştırma için, merkezi besleme sisteminde seçilmiş bu transformatörler kullanılmıştır. Merkezi besleme sisteminin iki tarafındaki toplam yük $S_{1\phi}$ olduğu varsayılır ve üç faz hat seviyesi $S_{3\phi}$ 'dir.

Burada, $S_{1\phi}$ ve $S_{3\phi}$ iki sabittir. $S_r = \frac{S_{1\phi}}{S_{3\phi}}$ olduğu kabul edilir. S_r de aynı zamanda bir sabittir.

Eşitlik 3.55, 3.58, 3.60 ve 3.63'de dengesizlik tahmin etme formüllerinden, farklı bağlantılı transformatörlerde dengesizliğin azaltılması üç sınıf altında incelenmiştir. Bunlar;

- Tek faz bağlantı

$$\left| \frac{V_2}{V_1} \right| = S_r \quad (3.64)$$

- V-V açık üçgen bağlantı ve yıldız-üçgen bağlantı

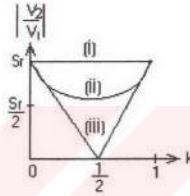
$$\left| \frac{V_2}{V_1} \right| = (3k^2 - 3k + 1)^{\frac{1}{2}} S_r \quad (3.65)$$

- Skot, blank ve değişik-köprü bağlantı

* Dengesizlik, faz iletkenler üzerindeki gerilimlerin eşit olmaması

$$\left| \frac{V_2}{V_1} \right| \cong |1 - 2k|Sr \quad 0 \leq k \leq 1 \quad (3.66)$$

Şekil 3.15'de elde edilen sonuçlar çizilmiştir ve özel bağlı transformatörlerin farklı tipleri için dengesizlik karşılaştırılmıştır. V-V ve yıldız-üçgen bağlantılar dengesizliğin azaltılmasında tek faz bağlantıdan daha iyi olduğu ve skot, blank ve değişik-köprü bağlantılarda V-V ve yıldız-üçgen bağlantılardan daha iyi olduğu anlaşılmıştır. Şekil 3.15 de özel bağlantılı transformatörlerin farklı tipleri için dengesizliğin karşılaştırılması yapılmıştır. (Methinier, M., 1992), (Ching, C., 1993)



Şekil 3.15. Özel bağlı transformatörlerin farklı tipleri için dengesizliğin karşılaştırılması

i) Tek faz bağlantı ii) V-V ve yıldız-üçgen bağlantı iii) skot, blank, değişik-köprü bağlantı

Trafo merkezlerinde kullanılması için özel bağlantılı üç-faz transformatör modeli oluşturulmuştur. Özel bağlantılı transformatörlerin farklı tipleri için dengesizlik tahmin formülleri simetrik-bileşen eşdeğer devrelerinden çıkarılmıştır. V-V ve yıldız-üçgen bağlantılarda tek faz bağlantıya göre daha az bir dengesizlik bulunduğu görülmüştür.

Dengesizlik seviyesini düşürmede skot, blank , değişik-köprü bağlantı şekli V-V ve yıldız-üçgen bağlantı şekline göre daha fazla etkili olduğu görülmüştür. Dengesiz sistemi analiz etmek için üç faz yük akış programı kullanılmıştır.

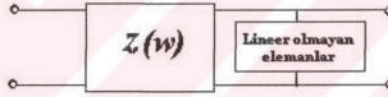
4. MODELLERİ GEÇERLİ KILMAK İÇİN FARKLI GÜÇLERDEKİ TRANSFORMATÖR ÜNİTELERİNDE YAPILAN DENEYLER

4.1 Giriş

Modelleri geçerli kılmak için, farklı güç oranlarındaki transformatör ünitelerinde bir çok test yapılmıştır (*). Duyarlılık çalışmaları, transformatör parametreleri değişirken akım ve gerilim harmoniklerin nasıl davrandığını incelemek için yapılmıştır. Sargıların ve nüvenin doğrusal olmayan etkilerine bağlı olan frekans incelenmiştir. Üç faz transformatörü kapsayan bir sistemde alan testi yapılmıştır. Simülasyonlardan (**) ve ölçümlerden elde edilen sonuçlar karşılaştırılmıştır.

4.2 Transformatör Eşdeğer Devresi

Şekil 4.1' de, basit transformatör modeli verilmiştir. $Z(w)$ frekans domeninde kısa devre empedansını ifade eder.



Şekil 4.1 Temel transformatör modeli

Uyarma kolu, gerilim ve akımların ölçülmüş rms değerlerinden $V_{rms}=f(I_{rms})$ ve boştaki kayıplardan elde edilen doğrusal olmayan RL elemanları ile gösterilir (Neves, W.L.A., 1993).

4.2.1 Üç faz transformatör

Üç faz transformatörler matris biçiminde gösterilmiştir. Tek faz transformatörleri formüle ederek üç faz iki sargılı transformatörleri ifade edilir. Kısa devre admitansı Y_{SH} aşağıdaki gibi yazılır.

$$[Y_{SH}] = [Z_{SH}]^{-1} \quad (4.1)$$

İki sargılı transformatörler üzerinde yapılan kısa devre testi için, her bir fazdaki akım ve gerilimler eşitlik 4.3 de verilen ilişki ile bulunur.

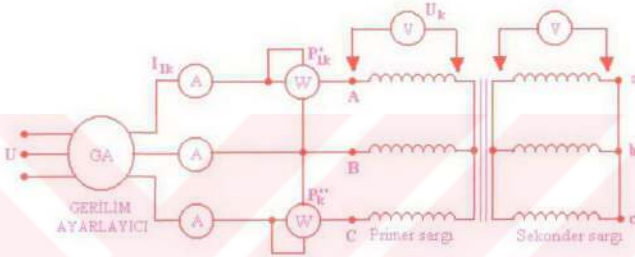
* Deneyler Emek Elektrik A.Ş. laboratuvarlarında yapılmıştır.

** Simülasyon: Benzetim. Sistemlerin davranış ve özelliklerinin modeller, bilgisayarlar, yada donanımlarla gösterimi. Bu yöntemle belirli koşullar oluşturulduğunda neler olabileceğini inceleme imkanı verecek, bir bileşen yada sistemin uygulamada çok pahalıya çıkabilecek testlere başvurulmaksızın sınanmasına izin verir.

$$[V_{ABC}] = [Z_{SH}] [I_{ABC}] \quad (4.2)$$

$$\begin{bmatrix} V_A \\ V_B \\ V_C \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} Z_{AA} & Z_{AB} & Z_{AC} \\ Z_{BA} & Z_{BB} & Z_{BC} \\ Z_{CA} & Z_{CB} & Z_{CC} \end{bmatrix} \begin{bmatrix} I_A \\ I_B \\ I_C \end{bmatrix} \quad (4.3)$$

Eşitlik 4.3 de Z_{SH} nin her bir elemanını elde etmek için, kısa devre testleri şekil 4.2 deki devreye uygun olarak yapılmıştır.



Şekil 4.2 Üç faz transformatör kısa devre testi

Gerilim sinyali bir faza uygulanır. A, B, C fazlarında akım ve gerilimler ölçülür. İlk olarak, $[Z_{SH}]$ sütunu elde edilir.

$$Z_{AA} = \frac{V_A}{I_A}, I_B = I_C = 0$$

$$Z_{BA} = \frac{V_B}{I_A}, I_B = I_C = 0$$

$$Z_{CA} = \frac{V_C}{I_A}, I_B = I_C = 0 \quad (4.4)$$

Aynı yük diğer sütunlarda da uygulanır. Simetrikten dolayı, $[Z_{SH}]$ oluşturmak için sadece sekiz adet ölçmeye gerek duyulmuştur. Pratikte, $[Z_{SH}]$ 'ın $[Z_{AB}=Z_{AC}=Z_{BC}$ ve $Z_{AA}=Z_{BB}=Z_{CC}]$ dengede olduğu varsayılır ve ölçme sayısı ikiye indirgenir. Pozitif ve sıfır sıralı kısa devre testleri, $[Z_{SH}]^2$ oluşturmak için gerekli standart verilerdir.

Kısa devre empedansında frekans-domenindeki etkiler tek faz transformatörler içinde aynıdır. Her bir transformatör bağlantısı için kullanılan ve otomatik olarak hesaplanan $[R_p]$ frekans

domenli etkileri oluşturmak için değiştirilir. Özelleştirilen k faktörü,

$$[R_p] = k[L] \quad (4.5)$$

dır. Doymayı ifade etmenin en uygun yolu, transformatör manyetik devresini incelemektir. Doyma, nüve ve tanktaki akırlarla ilişkilidir. Nüveyi oluşturanın birçok yöntemi vardır. Nüveyi modellemek için, transformatörün hangi çeşit bir geometriye sahip olduğu bilinmelidir. Yani üç kollu veya beş kollu olması halinde mıknatıslama empedansı hesap edilir. Bu, nüve elemanları ve tank arasındaki hava içerisinde geçen akırlar nedeniyle doğrusal olarak hesap edilir.

Doyma eğrisi, transformatörün her bir kısa kolu için elde edilmeli ve doğrusal olmayan etkileri gösteren sekonder uçlarındaki her bir sargıya yerleştirilmelidir (Dommel, H.W., 1986). Eğer nüve tasarımındaki detaylar bilinmiyorsa, pozitif sıralı doyma eğrisi her bir sargı karşısına yerleştirilmelidir.

4.3 Transformatör Parametrelerin Tahmini

Ölçümler, transformatör eşdeğer devresindeki parametrelerin değerlerini belirlemek için yapılmıştır. Kısa devre empedans ölçümleri ve açık devre doyma testleri aşağıda listelenen üniteler için yapılmıştır. Kısa devre empedansı için kullanılan per-unit (*) sistemin esası, nominal gerilim ve güç tür.

Çizelge 4.1 Üç faz dağıtım transformatörleri

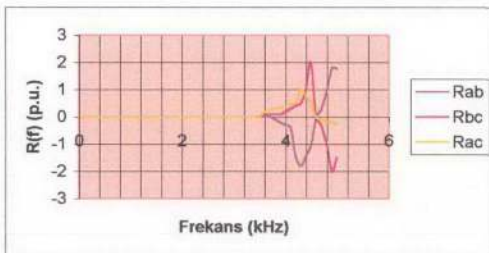
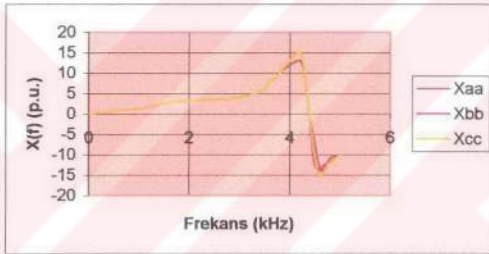
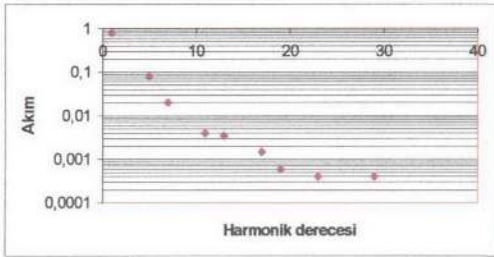
Kod	Güç (kVA)	Gerilim (kV)	Zsh (%)
xf1	150	7,2	4,21
xf2	500	7,2	5,6
xf3	75	14,4	-

4.3.1 Kısa devre testleri

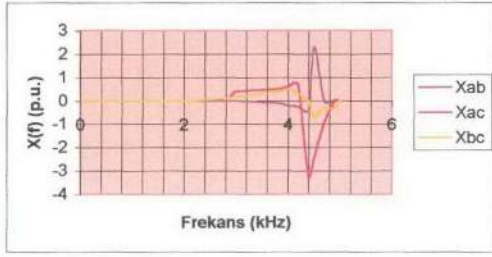
Sinyal analizi HP3562A tarafından üretilen yüksek frekans akımları, test altındaki transformatöre verilmiştir. Kısa devre frekans cevap empedans ölçümleri flopi diskteki ASCII dosyalarına kaydedilmiştir.

Kısa devre empedans ölçümleri şekil 4.3 deki devreye uygun olarak yapılmıştır. Şekil 4.4 ve şekil 4.5' de transformatörün xf1 ve xf2 ölçülen kısa devre empedansları gösterilmiştir.

* Per-unit: Gerçek büyüklüğün baz alınan değere oranı olan birim değer

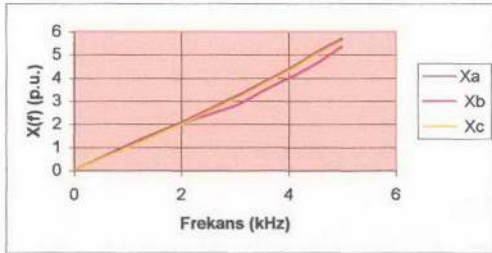
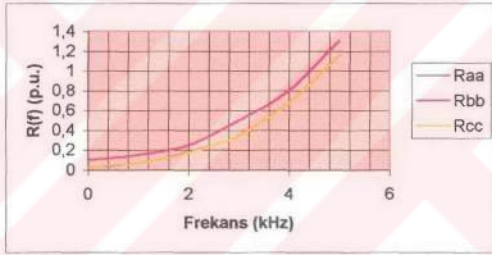


a) self empedans



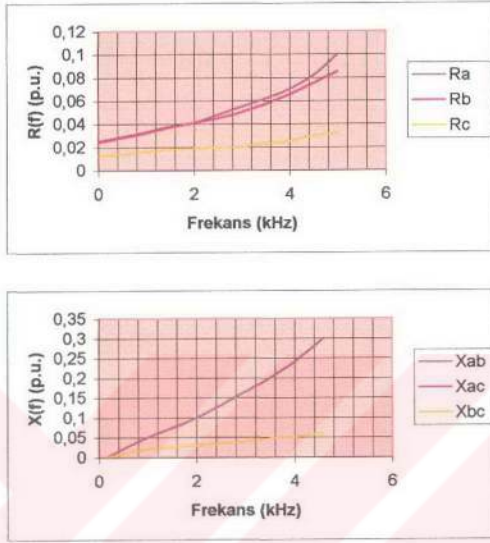
b) karşılıklı empedans (*)

Şekil 4.3 150 kVA üç faz transformatör



(a)

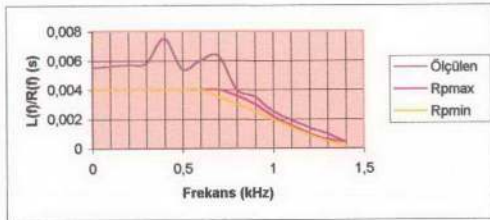
* Karşılıklı empedans: Ortak empedans, bir devrenin veya şebekenin herhangi iki çift terminali arasında, diğer bütün terminaller açık olarak, bu terminal çiftlerinden birisinin arasındaki açık devre potansiyel farkının diğer çifte uygulanan akıma oranı



(b)

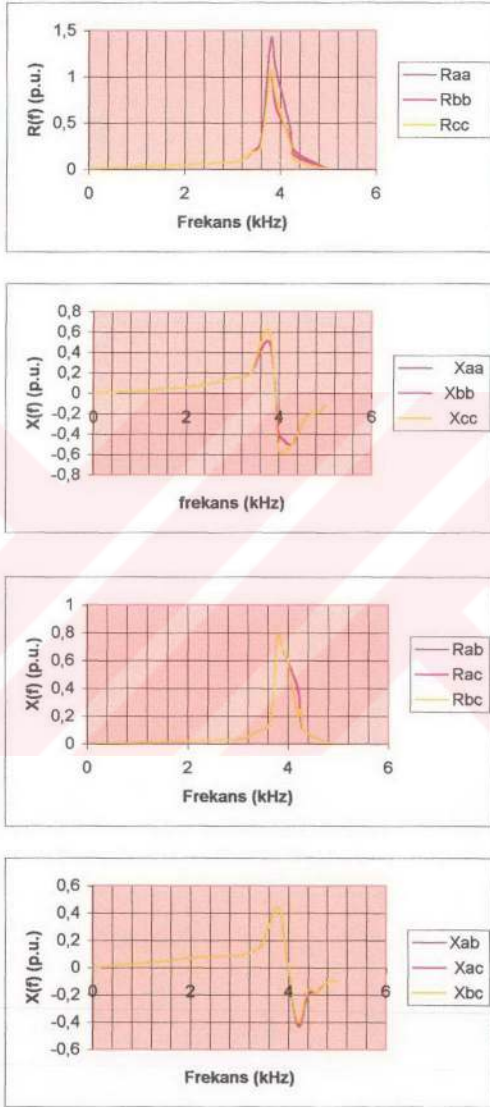
Şekil 4.4 500 kVA üç faz transformatör

Karşılıklı empedansların, self empedanslarına oranla küçük olduğu görülmüştür. Bu transformatörlerin her bir fazı, tek faz iki sargılı transformatörler gibi simule edilebileceği sonucu çıkarılmıştır. Şekil 4.5' de, simule edilen ve ölçülen L/R eğrileri gösterilmiştir. Simule edilen eğriler, ölçümlerden elde edilen eğrilerle yaklaşık olarak aynıdır ($R_p = R_{pmax}$).

Şekil 4.5 500 kVA transformatör L/R eğrisi

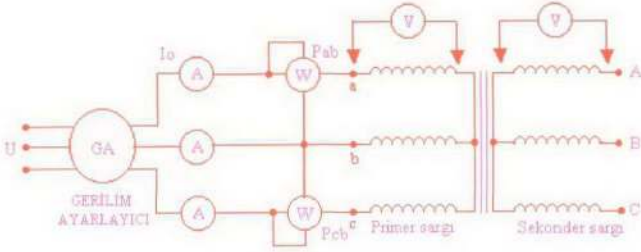
75 kVA lık transformatör için, fazlar arasında güçlü bir kublajlama bulunur (şekil 4.6). Matris

biçimi, transformatörü ifade etmek için daha elverişli olmuştur.



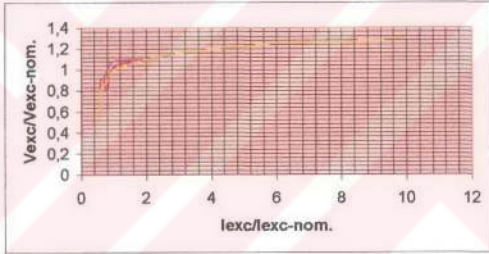
Şekil 4.6 75 kVA transformatör kısa devre empedansları

4.3.2 Açık devre testleri



Şekil 4.7 Üç faz transformatör açık devre testi

Açık devre testlerinde, alçak gerilim sargısı transformatör doyma karakteristiklerinden elde edilen 50 Hz. lik sinüzoidal gerilim kaynağı ile uyarılmıştır. Boştaki kayıplar ve efektif akım, farklı gerilim seviyeleri için ölçülmüştür.



Şekil 4.8 75 kVA üç faz transformatörün $V_{rms} \times I_{rms}$ karakteristiği

Koyu kısım ortalama eğriyi göstermektedir. Üç faz transformatörler için açık devre testleri pozitif sıralılar için yapılır. 75 kVA lık beş kollu transformatör test edilmiştir. Şekil 4.8 de, uyarma gerilimi değiştirirken her bir fazdaki uyarma akımının (*) nasıl davrandığı gösterilmiştir.

Çizelge 4.2' de, farklı dağıtım transformatörlerinin düzeltme katsayıları (**) verilmiştir. Transformatör doymada çalıştığında kayıpları doğru almak için nominal gerilimde ve boşta çalıştırılır (Electric Utility Engineering Reference Book, 1989). Bu çizelgenin ilk iki satırı ve şekil 4.8 in koyu hat eğrileri arasında karşılıklı bir uygunluk olduğu görülür.

* Uyarma akımı sekonder sargılarda bir yük bulunmadan primer sargılarından geçen akım, mıknatıslayıcı akım

** Düzeltme katsayısı: Gerçek değeri elde etmek üzere hesaplanan ya da gözlenilen bir değere eklenen katsayısı

Çizelge 4.2 Düzeltme katsayıları

İşletme gerilimi (%)	Düzeltilme	Katsayıları	kVA anma değeri
	Boşta ki Kayıplar	Uyarma Akımı	
105	1,5	1,5	150 kVA ve altı için (3 faz)
110	1,3	2,2	150 kVA ve altı için (3 faz)
105	1,5	2,3	225 kVA ve üstü için (3 faz)
110	2,4	4,6	225 kVA ve üstü için (3 faz)

4.3.3 Duyarlılık testi

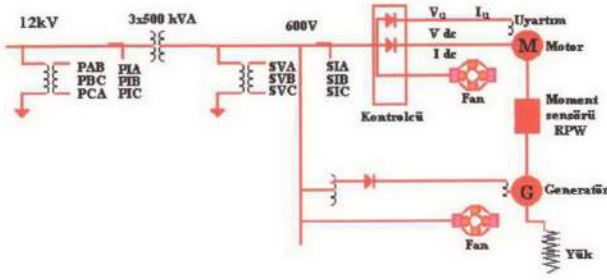
V_{rms} - I_{rms} eğrisi ve boşta ki kayıplar laboratuarda ölçülmüştür ve doğrusal olmayan nüve parametreleri hesaplanmıştır. Çok fazlı harmonik yük akış programı (MHLF) kullanılarak, kısa devre parametresi R_p ve dengelenen doğrusal değişimlerden primer akımı ve sekonder geriliminin toplam harmonik distorsiyonlarını nasıl etkilendiğini görmek için nümerik simülasyon yapılmıştır (Wilson, X., 1991). Transformatörün primer ucu sinüzoidal bir gerilimle uyartılır ve doyma bölgesinde çalıştırılır. Çizelge 4.3 deki simülasyon sonuçları elde edilmiştir.

Çizelge 4.3 Duyarlılık testinden elde edilen sonuçlar

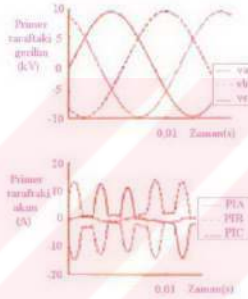
Gerilim p.u.	Yük (p.u.)	Yük Güç Faktörü	R_p (p.u.)	THD Primer Akımı (%)	THDSekonder gerilimi(%)
1,05	0	-	13	19,317	0,312
1,05	0	-	30	18,9	0,317
1,1	0	-	13	26,041	0,542
1,1	0	-	30	25,488	0,55
1,05	1	0,6	13	0,041	0,171
1,1	1	0,6	30	0,065	0,28

4.3.4 Alan testi

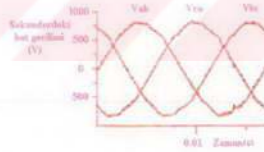
Şekil 4.9' da 500 kVA lık üç faz transformatör 12 kV üç faz güç sistemine bağlanmıştır ve 1500 HP lik bir dc sürücüyü beslemektedir. Akım ve gerilim dalga şekilleri her iki transformatör uçlarında ölçülmüştür. 12 kV lık taraftaki akım ve gerilim dalga şekilleri, şekil 4.10 da gösterilmiştir. Şekil 4.11 de, dc sürücü düşük yükte çalıştığındaki üçgen tarafındaki hat geriliminin ölçümleri ve simülasyonları gösterilmiştir.



Şekil 4.9 Deney sürücüsü seti



Şekil 4.10 Ölçülen gerilim ve akım dalga şekilleri



Şekil 4.11 Transformatörün sekonder hat gerilimi

Koyu hatlar hesaplanılan eğriler, noktalı olanlar ölçümlerden elde edilen eğrilerdir. Ölçümler ve simülasyonlar arasında iyi derecede uygunluk olduğu görülmüştür. Eğriler arasındaki küçük fark ölçüm gürültülerinden dolayıdır. Harmonik çalışmalar için transformatör modelleri sunulmuştur. Kısa devre empedansı ve açık devre doyma testleri yapılmıştır. Transformatör eşdeğer devrelerinin parametreleri belirlenmiş ve etiket verileri ile karşılıklı bir ilişki kurulmuştur. Duyarlılık çalışmalarında, uç gerilimleri ve akımlarının harmonik içeriğindeki yükün önemli bir rol oynadığı görülmüştür (Greenwood, A., 1991), (Cigre, 1991).

5. ÜÇ FAZLI TRANSFORMATÖRLERDE YIĞILMA AKIMLARIN HARMONİK ANALİZİ

5.1 Giriş

Transformatör enerjilenmesiyle kısa süreli ortaya çıkan, transformatör yük akımının on kat fazlası yüksek bir değerde olabilen ve sistem elemanlarına zarar veren akıma yığılma akımı denir (Lin, C.E., 1993). Bu bölümde, sürekli hal boşa çalışmada farklı transformatör bağlantılarının dalga şekillerini hassasiyetle analiz eden bilgi ve deneysel (*) açıklamalara yer verilmiştir. Harmonik analizör (**) yardımı ile elde edilen deneysel veriler nitelici tahminlerle karşılaştırılarak farklılıklar üzerinde durulmuştur. Üç faz trafoların yığılma akımının incelenmesinde yeni bir yöntem önerilmiştir. Bu yöntemle ileri doğru metotlar ile basit modelleme yapılarak etkin analitik veri sağlanır. Farklı üç faz yapıları ve farklı sargı bağlantıları içeren üç fazlı trafolar farklı işletme şartları, anahtar kapama açıları ve güç faktörleri göz önüne alınarak incelenmiş ve yığılma akımlarının harmonik analizi yapılmıştır.

5.2 Üç Fazlı Trafoların Doyma Karakteristiklerinin Analizi

Yığılma akımlarının hesaplanması için transformatörün doyma (***) karakteristiklerinin simülasyonu gerekir. Teknik literatürde (Badawy, E.H., 1983), (Prusty, S., 1984), (Keyhani, A., 1988), trafonun doyma karakteristiklerini elde etmek için birçok yöntem geliştirilmiştir. Alan test verileri olmadan, transformatör doyma karakteristiklerini belirlemek için polinom şeklinde kullanılan yöntem laboratuarda geliştirilmiştir (Lin, C.E., 1989), (Lin, C.E., 1993).

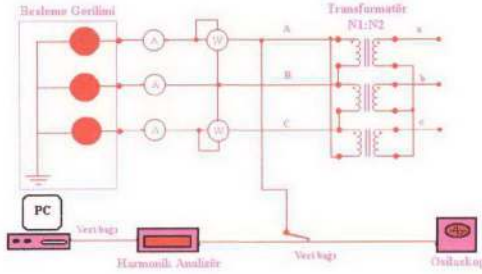
Tek faz transformatörlerde, yığılma akımının hesabı manyetik devreye bağımsız olduğu için basittir. Üç faz transformatörlerde bu hesaplama manyetik devreler arası etkileşimden dolayı çok daha karmaşık hali alır. Üç faz transformatörlerin farklı tipleri için, transformatör gurubu gibi beş kol ve üç kol transformatörlerin, mekanik yapılarında ve manyetik devrelerinde farklılıklar bulunur. Doyma karakteristiklerinde güçlü bir etkiye sahip olan Δ -Y ve Δ - Δ elektriksel bağlantılar ve üç faz transformatörlerin doyma karakteristikleri daha detaylı bir şekilde incelenmiştir.

* Deneyler Mersin Üniversitesi ve Setaş Trafo A.Ş. Laboratuvarlarında yapılmıştır.

** Harmonik analizör, periyodik bir fonksiyonun harmonik bileşenlerinin genlik ve fazını bu fonksiyonun grafiğinden ölçmek için kullanılan mekanik olan bir ayardır

*** Doyma: Manyetik bir materyelin belirli bir akı yoğunluğuna erişildikten sonra manyetik motor kuvveti artımlarının giderek azalan bir manyetik akı hasıl etmesine neden olan özelliği

5.2.1 Δ -Y bağlantı



Şekil 5.1 Δ -Y bağlı üç faz transformatör deney şeması

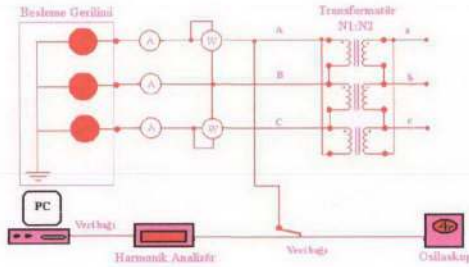
Bir üç faz transformatör gurubu üç ayrı tek faz transformatörden oluşur. Her bir trafodaki demir nüvenin manyetik devresi bağımsızdır. Şekil 5.2 de, Δ -Y bağlantılı üç faz trafo gurubunun A fazındaki histerezis eğrisi (*) gösterilmiştir.



Şekil 5.2 Üç faz geriliminde ölçülen, Δ -Y üç faz transformatörün A fazındaki histerezis eğrisi

Böylece Δ -Y bağlantılı trafo gruplarının tek fazlı trafolar gibi davrandığı görülmüştür.

5.2.2 Δ - Δ bağlantı



Şekil 5.3 Δ - Δ bağlı üç faz transformatör deney şeması

Şekil 5.4 de, Δ - Δ bağlı trafo gurubunun üç fazlı güç kaynağından beslendiğinde A fazındaki histerezis eğrisi gösterilmiştir. Şekil 5.2 ile şekil 5.4 karşılaştırıldığında, Δ - Δ bağlantılı manyetik devrenin tepe değeri Δ -Y bağlantılı manyetik devrenin tepe değerinden daha küçük olduğu açıkça görülmüştür. Δ - Δ bağlantılı transformatör sekonderinde dairesel akım mevcuttur. Bu dairesel akım ana akıyı zayıflatır ve demir nüve doyma riskini azaltır. Doyma bölgesindeki manyetik akımın tepe değeri daha küçük olur ve daha küçük yığılma akımına neden olur.

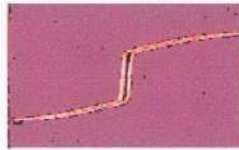


Şekil 5.4 Üç faz geriliminde ölçülen, Δ - Δ üç faz transformatörün A fazındaki histerezis eğrisi

5.3 Beş kollu transformatörler

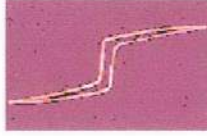
5.3.1 Δ -Y bağlantı

Beş kollu trafonun her bir fazındaki manyetik devrelerin yaklaşık olarak bağımsız olduğu kabul edilir. Fazlar arası etkileşim akımı önemli değildir. Doyma bölgesindeki manyetik akımın tepe değeri diğer fazlardan etkilenmez. Şekil 5.5 de, A fazında üç faz Δ -Y bağlantılı trafonun histerezis eğrisi gösterilmiştir.



Şekil 5.5 Üç faz geriliminde ölçülen Δ -Y beş bacaklı üç faz transformatörde A fazındaki histerezis eğrisi

Şekil 5.6 de ise, tek faz güç kaynağından beslenen A fazının histerezis eğrisi gösterilmiştir. Şekil 5.5 ve 5.6 karşılaştırıldığında, üç faz Δ -Y bağlantılı transformatörde histerezis eğrisi bağımsız tek faz transformatörün histerezis eğrisinden daha dar olduğu görülmüştür. Bununla birlikte, her iki histerezis eğrisindeki manyetik akımın tepe değeri yaklaşık olarak aynıdır.



Şekil 5.6 Tek faz geriliminde bağımsız olarak ölçülen, beş bacaklı üç faz transformatörün A fazındaki histerezis eğrisi

5.4 Üç kol transformatörler

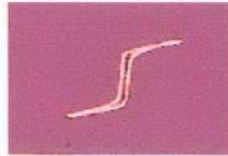
5.4.1 Δ -Y bağlantı

Şekil 5.7 de, üç kol Δ -Y bağlı üç fazlı transformatörün A fazındaki histerezis eğrisi verilmiştir.



Şekil 5.7 Üç faz geriliminde ölçülen, üçgen-yıldız bağlı üç bacaklı üç faz transformatörde, A fazındaki histerezis eğrisi

Şekil 5.8'de tek faz güç kaynaklı, bağımsız A fazındaki histerezis eğrisi verilmiştir.



Şekil 5.8 Tek faz geriliminde bağımsız olarak ölçülen, üç bacaklı üç faz transformatörde A fazındaki histerezis eğrisi

Şekil 5.7 ve şekil 5.8 yi karşılaştırdığımızda, üç fazlı Δ -Y bağlı histerezis eğrisi diğer fazların etkisinde kaldığı görülür. Doyma bölgesindeki manyetik akımın tepe değeri aynı zamanda diğer fazlardan etkilenir ve daha küçük değeri alır.

5.5 Nümerik Simülasyon

Üç faz transformatörlerin farklı tiplerinin doyma karakteristiğinin analizinde, trafo gurupları ve üçgen-yıldız bağlı beş kollu transformatörler üç bağımsız manyetik devre gibi düşünülür. Takriben tek fazlı transformatörlerinkine benzerdir (Lin, C.E. 1989, 1993). Yığılma akımının harmonik analizi hızlı fourier dönüşümü uygulanarak yapılmıştır.

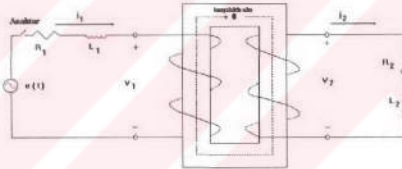
Güç trafosunun sonsuz baraya bağlandığı varsayılır. Kirchhoff gerilim kanunu ile şekil 5.9 da primer devrenin diferansiyel eşitliği aşağıdaki gibi yazılır.

$$e(t) = d\lambda_1 / dt + R_1 i_1 + L_1 di_1 / dt \quad (5.1)$$

ve

$$e(t) = E_{\max} \sin(\omega t + \alpha) \quad (5.2)$$

$e(t)$ çıkış gerilimi, t anahtar kapalı durumunda iken ölçülen zaman, λ_1 karşılıklı kaçak akı, i_1 primer akımı, R_1 primer direnci, L_1 primer endüktansı, $E_{\max}$ $e(t)$ nin maksimum değeri, ω frekansı, α anahtar kapama açısını ifade eder.



Şekil 5.9 Transformatörün endüktif yüklenmesi

Şekil 5.9 da, sekonder devrenin diferansiyel eşitliği aşağıdaki gibi yazılır.

$$d\lambda_2 / dt = R_2 i_2 + L_2 di_2 / dt \quad (5.3)$$

λ_2 karşılıklı kaçak akı, i_2 ani sekonder akımı, R_2 sekonder direnci, L_2 sekonder endüktansı ifade eder. Direnç artırıldığında, transformatörün sekonder devre yükü, devre açık duruma gelene kadar azalır.

5.5.1 Nümerik Metot

Eşitlik 5.1 ve 5.2 sonlu farklar biçiminde ifade edilir.

$$e_k = E_{\max} \sin(\omega t_k + \alpha) \quad (5.4)$$

$$(\Delta\lambda_1)_k / \Delta t = e_k - R_1(i_1)_k - (L_1\Delta i_1) / \Delta t$$

$$(\Delta\lambda_1)_k = (\lambda_1)_{k+1} - (\lambda_1)_k$$

$$(\Delta i_1)_k = (i_1)_k - (i_1)_{k-1} \quad (5.5)$$

Benzer olarak, eşitlik 5.3 oniki farklı yük karakteristiği için sonlu farklar biçiminde aşağıdaki gibi yazılır.

$$(i_2)_k = [(\Delta\lambda_2)_k / \Delta t - L_2(\Delta i_2)_k / \Delta t] / R_2$$

$$(\Delta\lambda_2)_k = (V_2 / V_1)(\Delta\lambda_1)_k \quad (\Delta i_2)_k = (i_2)_k - (i_2)_{k-1} \quad (5.6)$$

V_1 ve V_2 primer ve sekonder gerilimleridir ve eşitlik 5.6 den hesapladıktan sonra yeni $(i_1)_k$ ve $(\Delta i_1)_k$ bulunur.

$$(i_1)_k = (i_m)_k + (i_2)_k (V_2 / V_1) \quad (5.7)$$

$$(\Delta i_1)_k = (i_1)_k - (i_1)_{k-1} \quad (5.8)$$

Örnekleme için yeni bir $(i_1)_k$ elde edilir. Eğer, eşitlik 5.7 ve eşitlik 5.5 de başlangıç değeri arasındaki fark özelleştirilmiş tolerans dan daha büyükse bu iki değerin ortalaması, eşitlik 5.5 den sonraki iterasyon başlaması için $(i_1)_k$ kullanılır. Benzer olarak, $(\Delta i_1)_k$ içinde yapılır. Eşitlik 5.5 den 5.8 yapıları tanımlanan hata değerlerine azaltılana kadar tekrar edilir. O zaman $t=k.\Delta t$ de yığılma akımının simule edilen örnekleme $(i_2)_k$ şekil 5.7 de gösterildiği gibi iterasyon yönteminden elde edilir. $(\Delta\lambda_1)_k$ ve $(i_2)_k$ değerleri, en son k. iterasyonda eşitlik 5.5 ve 5.6 nın her ikisinden kolayca hesaplanır. $t=(k+1).\Delta t$ olduğunda, $(\lambda_1)_{k+1}$ aşağıdaki eşitlikten hesaplanır.

$$(\lambda_1)_{k+1} = (\lambda_1)_k - (\Delta\lambda_1)_k \quad (5.9)$$

O zaman, $(\lambda_1)_{k+1}$ e karşılık gelen $(i_m)_{k+1}$ $k=k+1$ için hesaplanır ve kullanılır.

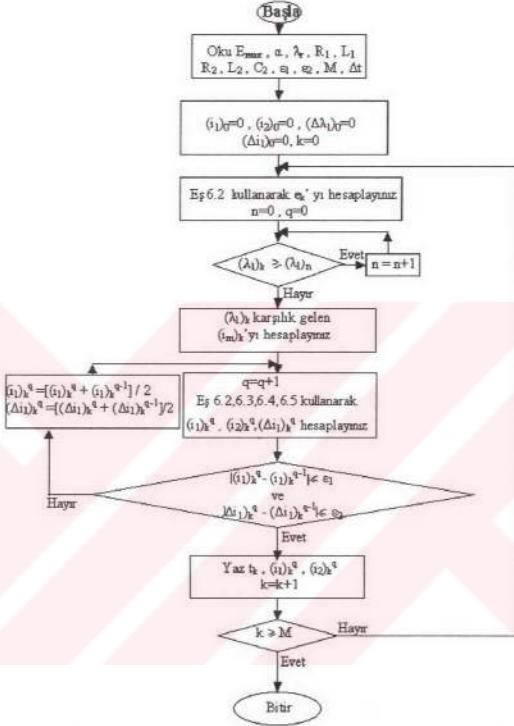
$$(i_1)_{k+1} = (i_m)_{k+1} + (i_2)_k (V_2 / V_1) \quad \text{ve} \quad (\Delta i_1)_{k+1} = (i_1)_{k+1} - (i_1)_k \quad (5.10)$$

Eşitlik 5.4 den e_{k+1} eşitlik 5.5 yerine konduğunda, aşağıdaki eşitlik elde edilir.

$$(\Delta\lambda_1)_{k+1} / \Delta t = e_{k+1} - R_1(i_1)_{k+1} - L_1(\Delta i_1)_{k+1} / \Delta t \quad (5.11)$$

Aynı yineleyici yöntemle, bütün k için $(i_1)_k$ mıknatıslama yığılma akımının simule sonucu

elde edilir. Baştan başa simülasyon yöntemi şekil 5.10 da gösterilmiştir. q iterasyon sayısını, n histerizis eğrisinde örnekleme noktalarının sayısını, M simülasyon örneklemelerin maksimum sayısını, ε_1 ve ε_2 toleransı ifade eder.



Şekil 5.10 Nümerik simülasyon için algoritma

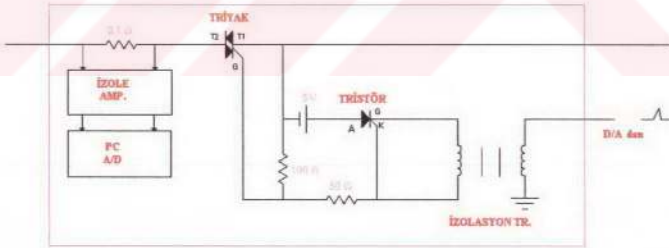
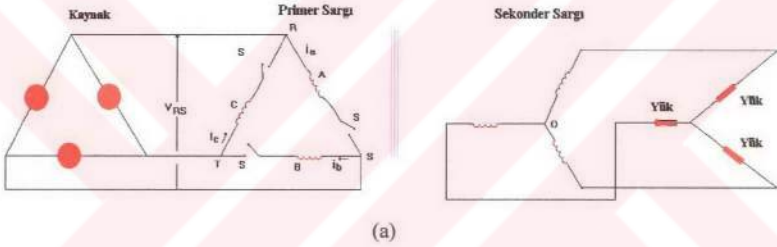
5.6 Deneysel Analiz

Üç tane 3 kVA 110V/220V üç faz transformatör, bir transformatör grubu, bir tane 5 kollu transformatör ve bir tane üç kol transformatör laboratuvarımızda yığılma akımını ölçmek için kullanılmıştır. Temel veriler çizelge 5.1 de verilmiştir. Üç faz transformatörlerde anahtar kapama aç kontrolü için, deneySEL devre şekil 5.11 de verilmiştir.

Çizelge 5.1 Kullanılan transformatörün verileri

	Beş-bacaklı	Ünite	Üç-bacaklı
Primer/Sekonder nominal gerilimi	110 V/220 V	110 V/220 V	110 V/220 V
Primer/Sekonder nominal akımı	10 A/ 5 A	10 A/ 5 A	10 A/ 5 A
Primer/Sekonder sargı direnci	0.13 Ω / 0.66 Ω	0.11 Ω / 0.36 Ω	0.09 Ω / 0.29 Ω
Primer sargı kaçak endüktansı	0.18 mH	0.15 mH	0.06 mH

Transformatör



Şekil 5.11 Üç faz transformatörlerde anahtar kapama açısı için deney devresi

a) Transformatör ve anahtarlar b) Anahtarları kontrol etme devresi

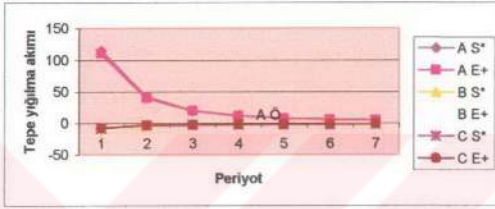
Şekil 5.11a' daki anahtarlar bilgisayarda kontrol edildi. Anahtarlama devresi şekil 5.11b' de gösterilmiştir. i_a , i_b ve i_c faz akımları örneklendi. Hat akımları ise üç faz akımlarından

hesaplanır.

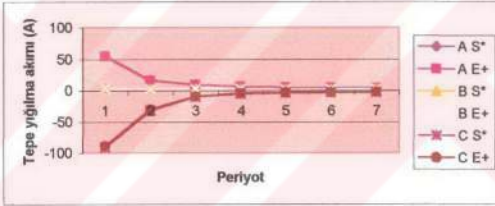
5.6.1 Alınan sonuçlar

5.6.1.1 Üçgen-yıldız bağlantı

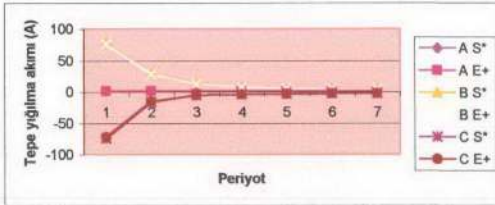
Transformatörün sekonderi açık, artık akının sıfır olduğu durumda, farklı anahtar kapama açılarında yığılma akımları incelenmiştir. Anahtar kapama açıları $\alpha=0^\circ$, 45° ve 90° de simule edilen ve ölçülen yığılma akımları şekil 5.12 de karşılaştırılmıştır.



a) $\alpha=0^\circ$ için



b) $\alpha=45^\circ$ için

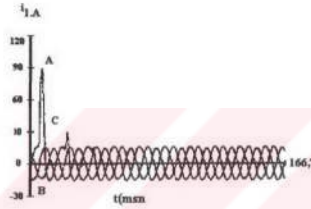


a) $\alpha=90^\circ$ için

Şekil 5.12 Beş bacaklı üç faz transformatörlerde tepe yığılma akımında anahtar kapama açısının etkisi

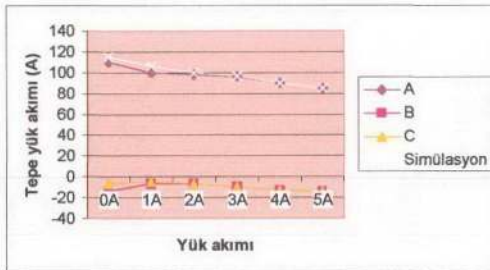
Eğer 45° ve 90° anahtar kapama açılarında, A fazında akı doyması küçük olursa oluşan yığılma akımları sırasıyla küçük olur. Aksi halde A fazında anahtar kapama açısı artarken yığılma akımı azalır. Bununla birlikte, üç faz devre için her bir fazın faz açısı 120° civarında değişir. A fazında daha küçük akımlar elde ettiğimizde, aynı zamanda B veya C fazında daha büyük akımlar gözükür. Anahtar kapama açısının yığılma akımları üzerindeki etkisi düzensiz ve önemsiz bir şekilde gözükür.

Omik yükleme şartları altında yığılma akımları, yükün değişmesi ile duyarlı bir şekilde değişir. $R_2=44 \Omega$ omik yük için ölçülmüş tipik yığılma akımları şekil 5.13' de gösterilmiştir.

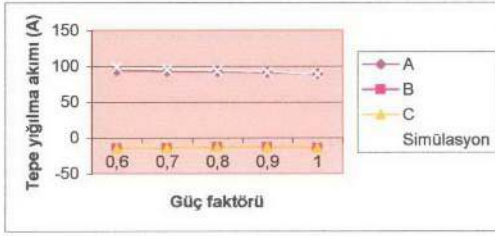


Şekil 5.13 $\alpha=0^\circ$, $\lambda_r=0$ Wb sarımlar ve $R_2=44 \Omega$ da, omik yük şartlarında deney yaparak elde edilen beş bacaklı üç faz transformatörün yığılma akımı

Şekil 5.13 de transformatör sekonderinde yük direnci ile tepe yığılma akımının açık farkı gösterilmiştir. Endüktif yükleme şartları altında, yığılma akımı yük güç faktörlerine duyarlı olduğu görülmüştür. Şekil 5.15'de yük güç faktörü ile tepe yığılma akımının değişimi gösterilmiştir. Daha büyük güç faktörü, demir nüve doymasının azalmasına sebep olan tepe yığılma akımının daha fazla olması anlamına gelir.

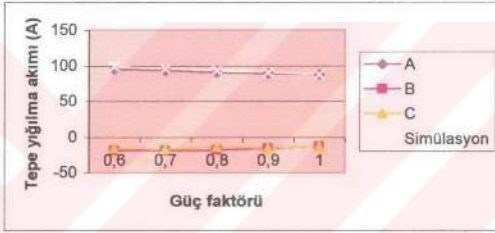


Şekil 5.14 $\alpha=0^\circ$, $\lambda_r=0$ Wb sarımlarda, beş bacaklı üç faz transformatörlerin tepe yığılma akımında omik yükün etkisi



Şekil 5.15 Tepe yığılma akımı üzerinde endüktif yükün etkisi

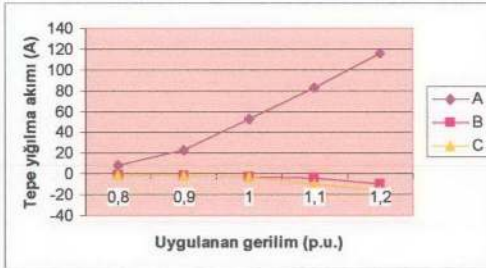
Kapasitif çalışma durumunda, yığılma akımı aynı zamanda güç faktörleri ile kapalı bir ilişkiye sahiptir. Şekil 5.16 da güç faktörü ile tepe yığılma akımının değişimi gösterilmiştir.



Şekil 5.16 Tepe yığılma akımı üzerinde kapasitif yükün etkisi

Güç faktörü 1 olduğunda, tepe yığılma akımı daha küçüktür. Bu endüktif yük durumu içinde aynıdır.

Şekil 5.17 de, primer geriliminin yığılma akımı üzerindeki etkisi gösterilmiştir.

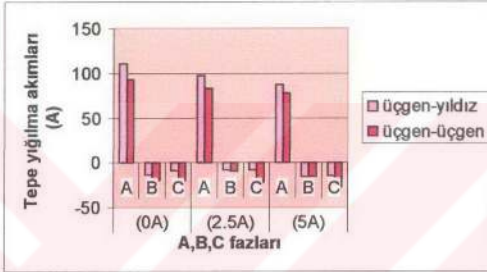


Şekil 5.17 Tepe yığılma akımı üzerinde gerilimin etkisi

A fazındaki tepe yığılma akımına uygulanan gerilimin doğrusal ilişkisi önemli bir olaydır.

5.6.1.2 Üçgen-üçgen bağlantı

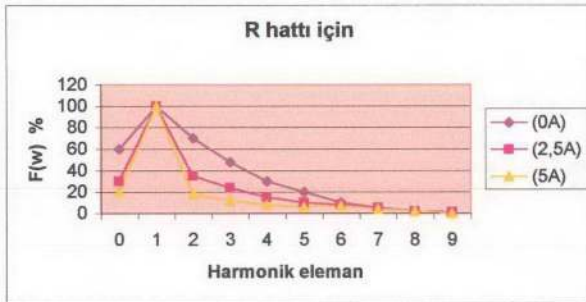
Üçgen bağlanan sekonder sargılarında dairesel bir akım mevcut olacaktır. Bu dairesel akımın büyüklüğü yük dengesizliğine duyarlıdır. Daha büyük dairesel akım ve bu akımdan oluşan zıt manyetik akı çizgilerinin azalttığı daha fazla ana akı demektir. Bu yüzden yayılma akımının daha küçük olması beklenir. Üçgen-üçgen bağlantıda yığılma akımları üçgen-yıldız bağlantıdakinden daha küçük olduğu görülmüştür.



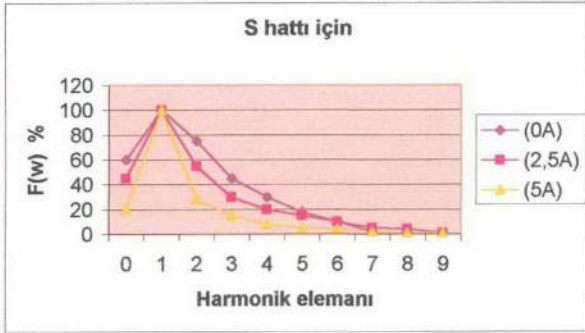
Şekil 5.18 Üçgen-üçgen ve üçgen-yıldız bağlantıda tepe yığılma akımlarının karşılaştırılması

5.7 Yığılma Akımlarının Harmonik Analizi

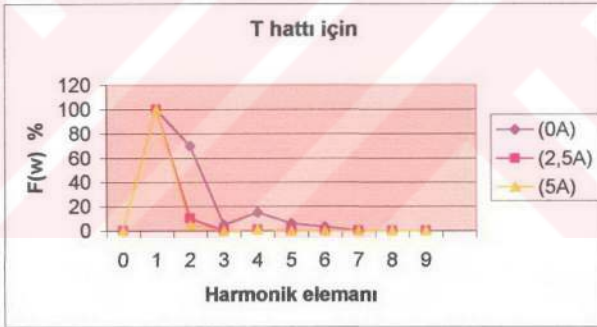
Üç faz transformatörlerde mıknatıslama yığılma akımının detaylı harmonik analizi yapılmıştır.



(a)



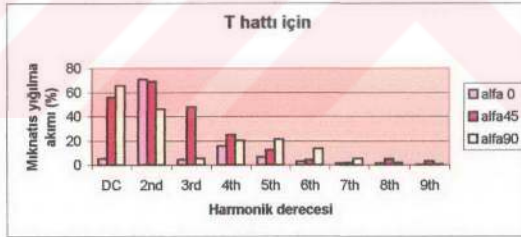
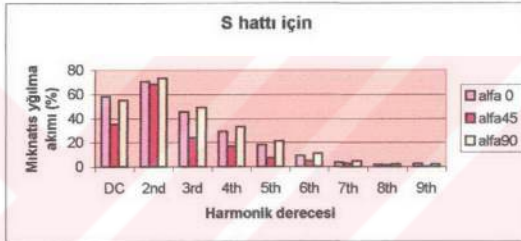
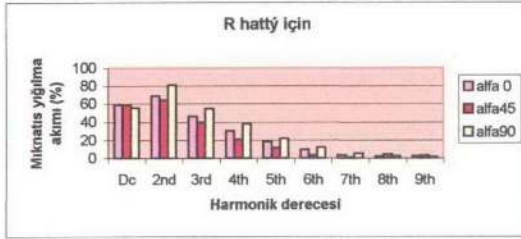
(b)



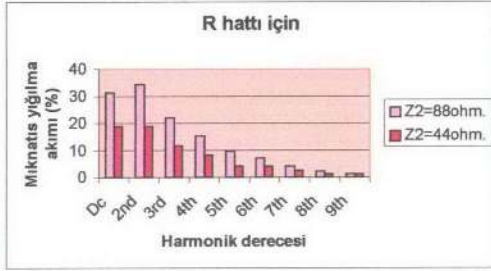
(c)

Şekil 5.19 Üç faz transformatör gurublarında harmonikler üzerinde omik yükün etkisi

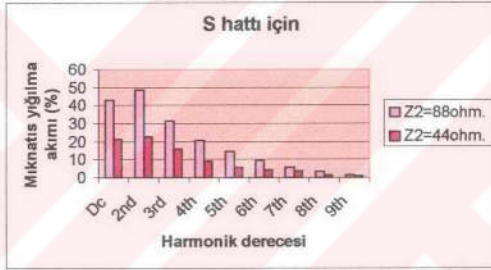
Şekil 5.20' de, değişik anahtar kapama açıları ve yükleme şartlarında yığılma akımının ilk periyodundaki harmonik içerik verilmiştir.



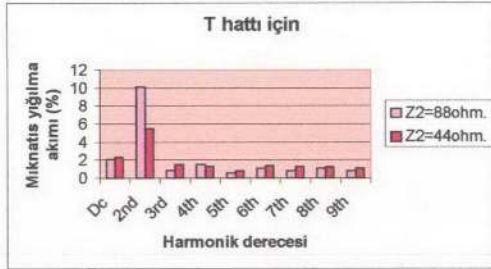
Şekil 5.20 $\alpha = 0^\circ, 45^\circ, 90^\circ$ anahtar kapama açıları için R, S ve T hattı için mıknatıs yığılma akımı (α değişimli)



(a)

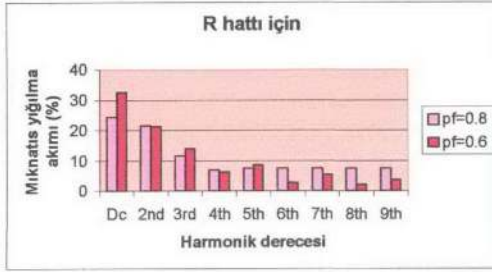


(b)

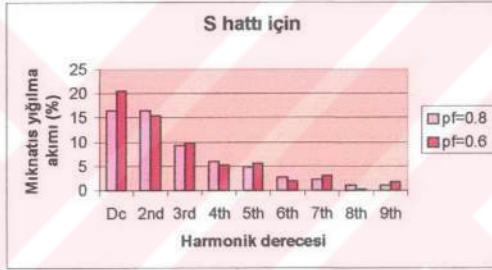


(c)

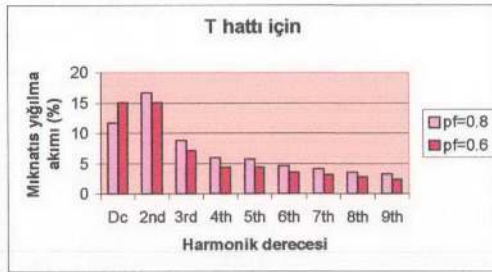
Şekil 5.21 $\alpha=0^\circ$, güç faktörü=1, $Z_2=88\ \Omega$ ve $44\ \Omega$ için R, S ve T hattı için miknatis yığılma akımı (R değişimli)



(a)

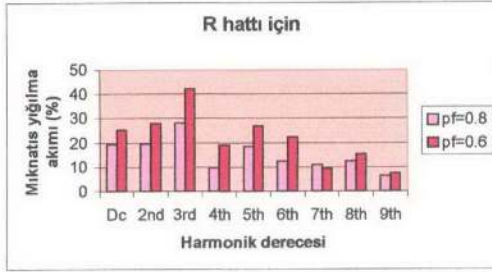


(b)

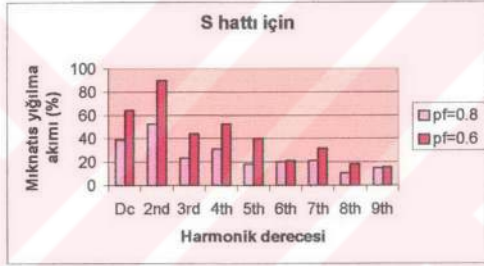


(c)

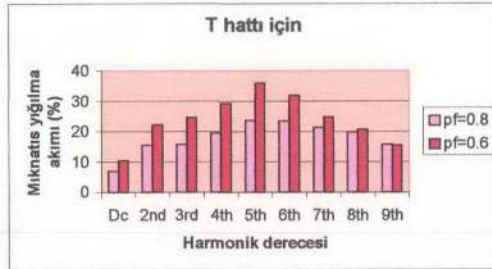
Şekil 5.22 $\alpha=0^\circ$, $Z_2=44 \Omega$, güç faktörü=0.8 ve 0.6 için R, S ve T hattı için mıknatıs yığılma akımı (I. değişimli)



(a)



(b)



(c)

Şekil 5.23 $\alpha = 0^\circ$, $Z_2 = 44 \Omega$, güç faktörü=0.8 ve 0.6 için R, S ve T hattı için mıknatıs yığılma akımı (C değişimli)

Başlıca çıkarılan sonuçlar şunlardır:

- Şekil 5.20, 5.21, 5.22, 5.23' de R, S, ve T hattın her biri için harmonik içerik ve anahtar kapama açısı arasındaki ilişki gösterilmiştir.
- $R_2=44 \Omega$, 88Ω omik yükler altında ve açık devredeki, sonuçlar karşılaştırıldığında daha büyük yük akımlarının daha küçük harmonik oluşturduğu görülmüştür.
- 1, 0.8 ve 0.6 geri güç faktörlerinde endüktif yüklerden elde edilen sonuçlar karşılaştırıldığında, harmonik değişim gözükmemiştir.
- 1, -0.8 ve -0.6 ileri güç faktörlerinde kapasitif yüklerden elde edilen sonuçlar karşılaştırıldığında, harmoniklerin güç faktörü değişimlerine duyarlı olduğu görülmüştür. Daha düşük güç faktöründe, harmonik içeriğindeki artımın daha büyük olduğu görülmüştür.

5.8 Sonuç

Bu bölümde, yığılma akımının harmonik analizi yapılmıştır. Yükler ve güç faktörleri arttırarak ana harmoniklerin önlenebileceği sonucu çıkarılmıştır. Dolayısıyla, üç faz trafolarında yığılma akımlarının daha detaylı olarak bilinmesi bu çalışma vasıtasıyla gerçekleşmiştir. Bu geliştirilen yöntem kullanılarak hazırlama zamanı ve alan testleri azaltılabilir.

6. ÜÇ FAZ TRANSFORMATÖRLERİN FARKLI BAĞLANTI ŞEKİLLERİNDE DENEYSEL HARMONİK ANALİZ

6.1 Giriş

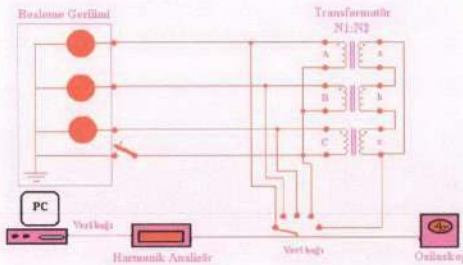
Laboratuar deneyleri (*) genel olarak iki kısımdan oluşmuştur. Birinci kısım histerisiz eğrisini ve uyarma akımının sinüzoidal olmayan dalga şeklini analiz ederek, tek faz transformatör nüfvesinin doğrusal olmadığı ispatlanmıştır. İkinci kısım ise, transformatör akımı ve karşılıklı akı dalga şekilleri üzerinde farklı üç faz transformatör bağlantılarının etkileri incelenmiştir. Birinci kısımda, sinüzoidal dalga şekillerinin fourier serileri ile tanımlanmış, harmonik bileşenler sınıflandırılmış ve farklı transformatör bağlantılarında elde edilen faz gerilim ve akım dalga şekilleri elde edilmiştir. Deneysel olan ikinci kısımda ise, akım ve gerilim dalga şekilleri ve harmonik içerikleri gösterilmiştir.

6.2 Laboratuar Deneyleri ve Elde Edilen Sonuçlar

Laboratuar deneyi her bir transformatör bağlantısı için aşağıda verilen işlem basamakların sırası ile yapılmasından oluşmuştur.

- Osilaskop kullanılarak farklı akımlar ve gerilim dalga şekilleri kaydedilmiştir.
- Harmonik analizör (**) kullanarak her bir dalga şeklinin harmonik içeriği analiz edilmiştir.
- Sıfır sıralı harmonik bileşenlerin bulunup bulunmadığı araştırılmıştır.

Şekil 6.1 de, yıldız-üçgen bağlantılı üç faz transformatörün deney seti gösterilmiştir.

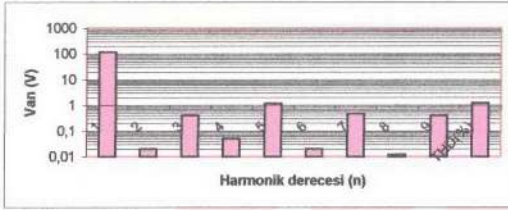


Şekil 6.1 Laboratuar deney seti

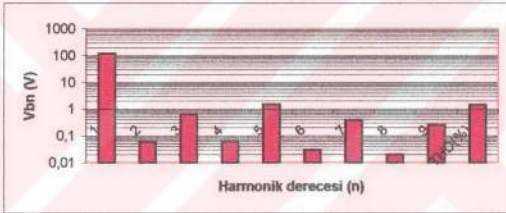
* Deneyler Mersin Üniversitesi ve Elitaş Trafo A.Ş. laboratuvarlarında yapılmıştır.

** Harmonik analizör periyodik bir fonksiyonun harmonik bileşenlerinin genlik ve fazını bu fonksiyonun grafiğinden ölçmek için kullanılan mekanik bir ayardır.

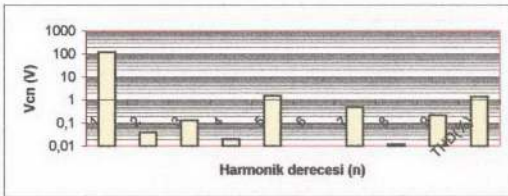
Deney düzeneği, 3 faz 4 iletkenli besleme, 120 V/60 V - 60 VA. lik üç faz kabuk tipi transformatör, akım probu, kameralı osiloskop ekipmanı ve verileri işlemek depolamak ve dalga şekillerini yeniden oluşturmak için bilgisayarlı bir harmonik analizör elemanlarından oluşmuştur.. Şekil 6.2 de, her bir fazın toplam harmonik distorsiyonu (*) boyunca düşük dereceli harmonik bileşenlerin efektif değerleri verilmiştir.



(a)



(b)



(c)

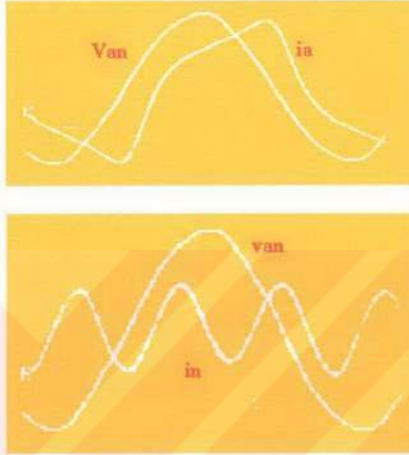
Şekil 6.2 Laboratuvar besleme geriliminin harmonik içeriği a) V_{an} b) V_{bn} c) V_{cn}

* Toplam harmonik distorsiyonu, ana harmonik dışında kalan harmoniklerin ana harmoniğe oranı veya toplam enerji miktarının temeldeki enerji miktarına oranıdır.

Şekil 6.2 deki verilerden, güç kaynağının dengesizlik derecesi ve harmonik içeriği küçük ve kabul edilebilir sınırların altında olduğu görülmüştür.

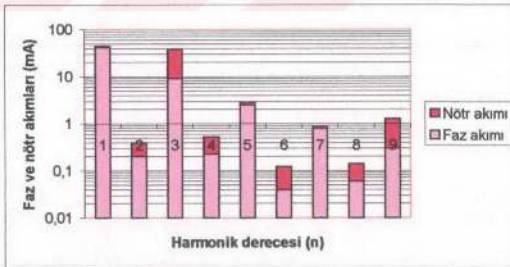
6.2.1 Nötrü topraklı yıldız-yıldız bağlantı

Şekil 6.3 de, V_{AN} faz gerilimi, i_A faz akımı ve i_N nötr akımı gösterilmiştir.



Şekil 6.3 Nötrü topraklı yıldız-yıldız bağlantıda gerilim ve akım dalga şekilleri

Şekil 6.4 de ise, bu akımların harmonik spektrumları gösterilmiştir.



Şekil 6.4 Nötrü topraklı yıldız-yıldız bağlantıdaki faz ve nötr akımlarının içeriği

Faz akımının harmonik bileşen genliği, deneyin birinci kısımda elde edilen değer ile benzer olduğu görülmüştür. Nötr akımının sadece sıfır sıralı bileşenleri içerdiği anlaşılmıştır. Bunun nedeni, beslemede bulunan dengesizliktir (Baghzouz, Y., 1993).

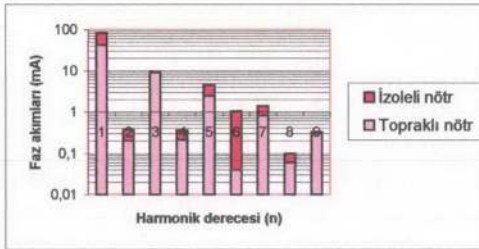
6.2.2 Nötrü izoleli yıldız-yıldız bağlantı

Şekil 6.5 de, i_A faz akım, V_{AN} transformatör faz gerilim, $V_{AN'}$ kaynak faz gerilim ve $V_{NN'}$ nötr-nötr gerilim dalga şekilleri gösterilmiştir.

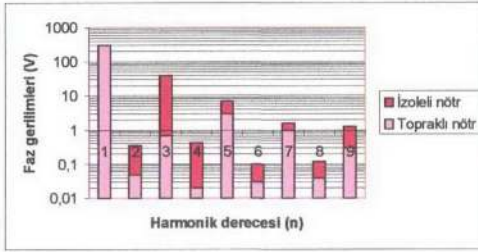


Şekil 6.5 Nötrü izoleli yıldız-yıldız bağlantıda gerilim ve akım dalga şekilleri

Şekil 6.6 da, nötrü izole edildiğinde, transformatör faz gerilimi ve akımının harmonik içeriğindeki değişim gösterilmiştir.



(a)



(b)

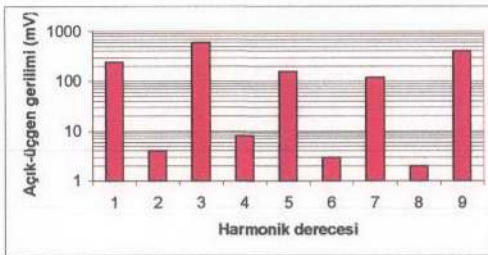
Şekil 6.6 Yıldız-yıldız bağlantıda a) faz akımlarının b) faz gerilimlerinin harmonik içeriğinin karşılaştırılması

6.2.3 Nötrü topraklı yıldız-üçgen bağlantı

Güç kaynağında bulunan dengesizlik nedeniyle, sekonder sargıların gerilimler toplamı şekil 6.7 de gösterildiği gibi, sıfır olmayan değer ile toplanır. V_{abc} gerilimi, şekil 6.8 de frekans spektrumunun içerdiği gibi üçüncü harmonik bileşeni ile karşılaştırılan bir dokuzuncu harmonik bileşeni bulunur.

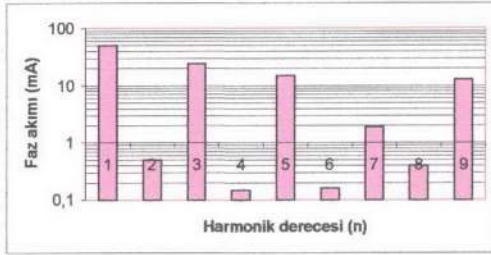


Şekil 6.7 Nötrü topraklı yıldız-üçgen bağlantıda gerilim ve akım dalga şekilleri

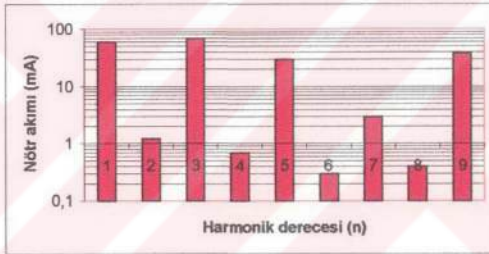


Şekil 6.8 Nötrü topraklı yıldız-üçgen bağlantıda açık üçgen geriliminin harmonik içeriği

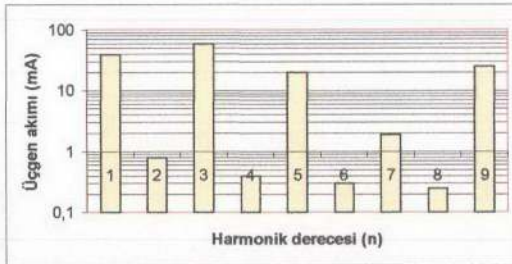
Üçgende dairesel olarak akan dokuzuncu harmonik bileşen akımının sonucu olarak, primer tarafındaki nötr ve faz akım dalga şekillerinin her ikisini de etkilediği görülmüştür. Şekil 6.9 da, faz nötr ve üçgen akımlarında görülmedik büyüklükte dokuzuncu harmonik bileşen içerdiği görülmüştür.



Şekil 6.9a Nötrü topraklı yıldız-üçgen bağlantıda, faz akımının harmonik içeriği



Şekil 6.9b Nötrü topraklı yıldız-üçgen bağlantıda, nötr akımının harmonik içeriği



Şekil 6.9c Nötrü topraklı yıldız-üçgen bağlantıda, üçgen akımının harmonik içeriği

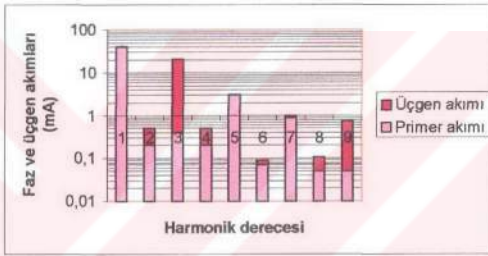
6.2.4 Nötrü izoleli yıldız-üçgen bağlantı

Şekil 6.10 da faz gerilim ve akım dalga şekilleri gösterilmiştir.



Şekil 6.10 Nötürü izoleli yıldız-üçgen bağlantıda, faz gerilimi ve akım dalga şekilleri

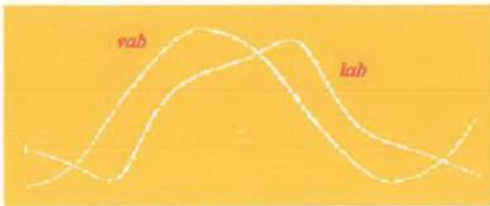
Primer faz ve üçgen akımlarının harmonik içeriği şekil 6.11 de gösterilmiştir.



Şekil 6.11 Nötürü izoleli yıldız-üçgen akımların harmonik içeriği

6.2.5 Üçgen-yıldız bağlantı

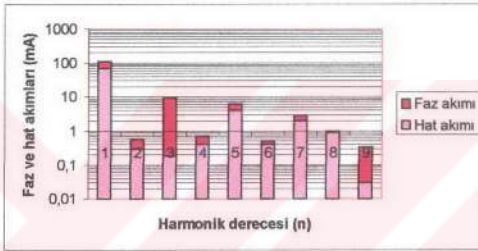
Şekil 6.12 de, üçgen-yıldız bağlantının faz gerilim, faz akım ve hat akım dalga şekilleri gösterilmiştir.





Şekil 6.12 Üçgen-yıldız bağlantıda, gerilim ve akım dalga şekilleri

Şekil 6.13 de faz ve hat akımlarının her ikisinin harmonik içeriği gösterilmiştir.



Şekil 6.13 Üçgen yıldız bağlantıda, faz ve hat akımlarının harmonik içeriği

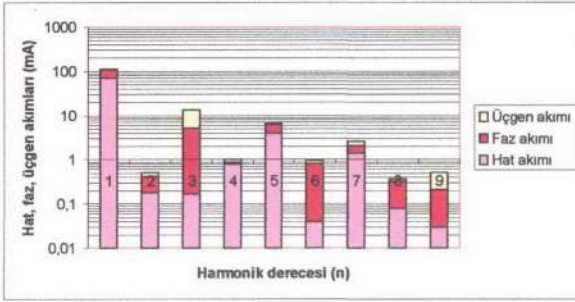
Faz akımında sıfır sıralı bileşenler çok fazla olurken, hat akımında hemen hemen hiçbir sıfır sıralı bileşen içermedi görülmüştür.

6.2.6 Üçgen-üçgen bağlantı

Sekonderi üçgen bağlantıda, dairesel akımının harmonikleri boyunca, hat ve faz akımları şekil 6.14 de ve bunların harmonik içeriği ise şekil 6.15 de gösterilmiştir. Hat ve faz akımlarının yukarıda bahsedilen üçgen-yıldız bağlantıda bulunan akımlara çok benzer olduğu görülür. Dairesel olan akım, gerilim dengesizliği nedeniyle nisbeten büyük sıfır sıralı bileşenler içerir.



Şekil 6.14 Üçgen-üçgen bağlantıda, faz ve hat akımları



Şekil 6.15 Üçgen-üçgen bağlantıda faz, hat ve üçgen akımlarının harmonik içeriği

6.3 Sonuç

Bu bölümde, sürekli hal boşta çalışma durumunda üç faz transformatör karakteristikleri üzerinde geliştirilen bir laboratuvar deneyi sunulmuştur. Transformatör bağlantı şekillerinde büyük sıfır sıralı bileşenler üzerinde durulmuştur. Gerilim ve uyarma akımlarının harmonik genliğini belirlemek için, harmonik analizör ve bilgisayar kullanılmıştır.

Şekil 6.2' nin akım dalga şekli, şekil 6.5' in faz gerilim dalga şeklinden bütünüyle farklı, şekil 6.3 de gerilim saf temel gerilime yakın, şekil 6.5 de akım temel akıma yakın olduğu görülmüştür. Şekil 6.3 de, akımın güçlü bir üçüncü harmoniği mevcuttur. Halbuki, Şekil 6.5 de, gerilim güçlü bir üçüncü harmoniğe sahiptir. Şekil 6.4 ve şekil 6.6 ya bakıldığında, faz akımının harmonik içeriği hemen hemen aynı olduğu görülmüştür.

7. ÜÇ FAZ TRANSFORMATÖR GURUPLARININ MANYETİK DOYMA İLE BİRLİKTE FARKLI DURUMLARDA HARMONİKLERİN BİLGİSAYAR SİMÜLASYONU İLE HESAPLANMASI

7.1 Giriş

Üç faz transformatör gruplarının topraklı yıldız ve empedans topraklı yıldız bağlantılarının algoritmaları oluşturulmuş ve topraklı yıldız-sin, topraklı yıldız-harm, topraksız yıldız-sin, topraksız yıldız-harm, empedans topraklı-sin, empedans topraklı-harm durumlarında akım dalga şekilleri ve harmonik spektrumları bilgisayar simülasyonu ile elde edilmiştir. *sin* sinüzoidal giriş gerilimini, *harm* harmonik içeren giriş gerilimini ifade eder.

7.2 Harmonik Hesaplama

T periyotlu, sürekli zaman periyodik sinyalleri fourier serisi olarak ifade edildiğinde,

$$f(t) = \sum_{k=-\infty}^{\infty} a_k e^{jk\omega t} \quad (7.1)$$

$$= a_0 + \sum_{k=1}^{\infty} 2A_k \cos(k\omega t + \theta_k) \quad (7.2)$$

$$= a_0 + \sum_{k=1}^{\infty} (c_k \cos k\omega t + d_k \sin k\omega t) \quad (7.3)$$

$$\omega = \frac{2\pi}{T} \quad (7.4)$$

$$a_k = A_k e^{j\theta_k} = \frac{1}{T} \int_T f(t) e^{-jk\omega t} dt \quad (7.5)$$

Üç simetrik özellik bulunur.

- Tek simetri: $f(-t) = -f(t)$, kosinüs terimi bulunmaz.
- Çift simetri: $f(-t) = f(t)$, sinüs terimi bulunmaz.
- Yarım dalga simetri: $f(t+T/2) = -f(t)$, çift harmonikleri bulunmaz.

Çizelge 7.1' de faz sırası ve harmonik derecesi arasındaki ilişki verilmiştir.

Çizelge 7.1 Her bir harmoniğin faz sırası

Faz sırası	+	-	0
Harmonik	1	2	3
derecesi	4	5	6
	7	8	9
	10	11	12
	.		.

Eğer üç faz transformatör gurupları topraklanmazsa, o zaman hata kısmının sıfır sıralı harmonikleri mevcut olmaz. Harmonik dereceleri $6n \pm 1$ olacak şekilde sınırlanır ve 5, 7, 11, 13,...dir. $f(t)$ 'nin periyodunun T olduğunu varsayalım. Üç fazlı akımların toplamı sıfır olduğunda,

$$f(t) + f\left(t + \frac{T}{3}\right) + f\left(t + \frac{2T}{3}\right) = 0 \quad (7.6)$$

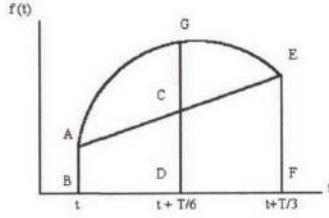
Yarım dalga simetrik özelliğinden,

$$f\left(t + \frac{2T}{3}\right) = -f\left(t + \frac{T}{6}\right) \quad (7.7)$$

Eşitlik 7.7 eşitlik 7.6'da yer değiştirilip, tekrar düzenlendiğinde, önemli bir ilişkiyi elde ederiz.

$$f(t) + f\left(t + \frac{T}{3}\right) = f\left(t + \frac{T}{6}\right) \quad (7.8)$$

Eşitlik 9.11' in değeri şekil 9.2' de gösterilmiştir. AEFB yamuk şeklinde ve $\overline{BD} = \overline{DF}$, $\overline{AC} = \overline{CE}$ dir. Dikkatle incelendiğinde, $\overline{CD}$ AEFB yamuğunun merkezidir. Bu yüzden $\overline{CD} = (\overline{AB} + \overline{EF})/2$ dir. Eşitlik 7,8 den, $\overline{AB} + \overline{EF} = \overline{DG}$ dir. Böylece $\overline{DG} = 2.\overline{CD}$, $\overline{CD} = \overline{CG}$ olur.



Şekil 7.1 Sıfır üçlü harmoniklerin dalga şekli

$f(t+T/3)$ yi $\overline{AC}$ yi çizerek ve E noktasını seçerek $f(t)$ ve $f(t+T/6)$ 'dan hesaplanır. Böylece, $\overline{AC} = \overline{CE}$ olur. Benzer olarak,

$$f(t + \Delta t + T/3) = f(t + \Delta t + T/6) - f(t + \Delta t) \quad (7.9)$$

Eşitlik 7.9 da, $f(t)$ 'nin fonksiyon değerleri $t+T/3$ ve $t+T/2$ arasında 0'dan $T/6$ 'ya kadar, t ve $t+T/3$ arasında Δt olarak nokta nokta ifade edilir. $t+T/2$ ve arasında kalan yarım periyot için $f(t)$ 'nin değeri, yarım dalga simetri özelliğinden hesaplanır. Tam dalga şekli bir üçüncüsünden belirlenir.

Nyquist teoreminden (*), eğer k . harmonik bilinirse, $2k$ noktaları her bir periyot için örneklenmelidir. Böylece zaman aralığının adım büyüklüğü ifade edilir. Fourier dönüşümü ve yarım dalga simetri kavramlarına dayanılarak, her yarım periyot için $3N$ noktaları örneklendiğinde, $x(n)$ ayrık zaman dalga şeklinin k . harmonik olan a_k aşağıdaki gibi elde edilir.

$$a_k = \frac{1}{6N} \sum_{n=0}^{6N-1} x(n) e^{-jk \frac{\pi}{3N} n} = \frac{1}{6N} \left[\sum_{n=0}^{3N-1} x(n) e^{-jk \frac{\pi}{3N} n} + \sum_{n=3N}^{6N-1} x(n) e^{-jk \frac{\pi}{3N} n} \right] \quad (7.10)$$

Parantez içindeki ikinci terim aşağıdaki gibi basitleştirilir.

$$\sum_{n=3N}^{6N-1} x(n) e^{-jk \frac{\pi}{3N} n} = \sum_{n=0}^{3N-1} x(n+3N) e^{-jk \frac{\pi}{3N} (n+3N)} = \sum_{n=0}^{3N-1} -x(n) e^{-jk \frac{\pi}{3N} n} e^{-jk \pi} \quad (7.11)$$

Eğer k çift sayı ise $e^{-jk \pi} = 1$ dir.

* Nyquist kriteri: Servomekanizma teorisinde kullanılan açık döngü harmonik cevap fonksiyonuna tekabül eden bir parametre.

Eşitlik 7.10 da iki terim iptal edilir ve a_k sıfır olur. Böylece $x(n)$ çift harmonik içermez. Eğer k tek sayı olursa, o zaman $e^{-jk\pi} = -1$ olur. İkinci terim ilk terime eşit olur ve aşağıdaki ilişki elde edilir.

$$a_k = \frac{1}{3N} \sum_{n=0}^{3N-1} x(n) e^{-jk\frac{\pi}{3N}n} \quad (7.12)$$

Hat akımını bulmak için giriş gerilimi v verilir. Transformatörlerde harmonik hesaplama şu adımlar da gerçekleşir.

$$v \xrightarrow{(a)} \lambda \xrightarrow{(b)} B \xrightarrow{(c)} H \xrightarrow{(d)} i$$

Yukarıdaki adımlar tek tek incelendiğinde;

- Bu, $\lambda = \int v dt$ dir ve yöntem $v(t) \xrightarrow{FFT} v(w) \xrightarrow{\text{integral}} \lambda(w) \xrightarrow{IFFT} \lambda(t)$, ile gerçekleşir. t , w sırası ile zaman ve frekans domenlerini gösterir.
- $\lambda = N \cdot \phi = N \cdot B \cdot S$ eşitliğinde λ dan B hesaplanır.
- Tahmini mıknatıslama eğrisiyle B' den H belirlenir.
- $F = N \cdot i = H \cdot l$ eşitliğinde H' dan i hesaplanır.

Yukarıdaki adımlar dalga şeklinin bir yarım periyodu içindir. Çünkü diğer yarım periyotlar, yarım dalga simetrik özelliğinden tanımlanır.

7.3 Transformatörün Farklı Bağlantı Şekillerinde Gerilim Dalga Şekilleri

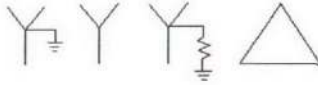
Üç faz transformatör gurupları için değişik bağlantı tipleri mevcuttur. Primer sargılarındaki bağlantılar şekil 7.2' de gösterilmiştir. Topraklı yıldız bağlantı için herbir transformatörün gerilimi biliniyorsa, hat akımı tek faz durumundaki gibi bulunur. Δ bağlantı için yöntem: $v_{ab} \rightarrow \lambda_{ab} \rightarrow i_{ab} \rightarrow i_a$ dir ve topraklı yıldız bağlantı da aynıdır. Bu yüzden, Δ bağlantı için hesaplama yapılır.

Giriş gerilimi hem sinüzoidal hem de değiştirilmiş dalga şeklindedir. Transformatörün farklı bağlantı şekillerinde, gerilim dalga şekilleri altı farklı durumda verilmiştir. Bu farklı durumlar;

- Birinci durum; topraklı yıldız, sin
- İkinci durum; topraklı yıldız, harm

- Üçüncü durum; topraksız yıldız, sin
- Dördüncü durum; topraksız yıldız, harm
- Beşinci durum; empedans topraklı yıldız, sin
- Altıncı durum; empedans topraklı yıldız, harm

Sin sinüzoidal giriş gerilimini, *harm* harmonik içeren ve değişen giriş gerilimini gösterir. Bu altı durum ayrı ayrı akım dalga şekli ve spektrumları ele alınacaktır. Hat akımının hesabı için yineleyici yöntemlere ihtiyaç duyulur.



Şekil 7.2 Primer sargıları için trafo bağlantıları

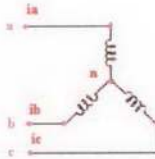
7.4 Topraklı Yıldız ve Empedans Topraklı Yıldız Bağlantılarının Algoritmaları

İlk olarak, topraklı yıldız bağlantısı ele alınacaktır. Topraklı yıldız bağlantılı üç faz trafo grubu şekil 7.3 de gösterilmiştir. v_{an} hesaplanırken i_a da belirlenir. Pozitif ve negatif sıralı harmonikler için v_{an} faz gerilimi v_{ab} hat geriliminden bulunur. Pozitif sıralı harmonikler,

$$v_{an} = v_{ab} \times \frac{1}{\sqrt{3}} \angle -30^\circ \quad (7.13)$$

Negatif sıralı harmonikler,

$$v_{an} = v_{ab} \times \frac{1}{\sqrt{3}} \angle 30^\circ \quad (7.14)$$

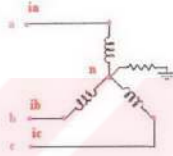


Şekil 7.3 Topraksız yıldız bağlantı

Sıfır sıralı harmonikleri içermeyen i_a hat akımının hesaplanması için v_{an} sıfır sıralı harmonikler hesaplanmalıdır. Yineleyici çözümün akış şeması şekil 7.13' de gösterilmiştir.

Bilgisayar simülasyonunda H ve B hesaplama zamanını kısaltmak için kullanılabilen i_a ve v_{an} ile orantılı olmalıdır. B nin pozitif ve negatif sıralı harmonikleri v_{an} başlangıç değerinden hesaplanır. Akış şemasının yineleyici kısmında i_a ve v_{an} H ve B ile yer değiştirir. Çıkış akımı i_a , H dan hesaplanır.

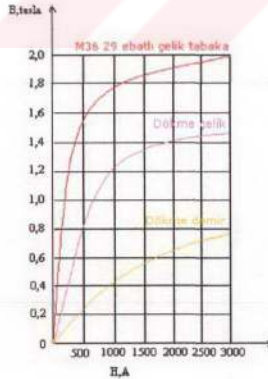
Empedans topraklı yıldız bağlantı içinde yineleyici yöntemlere başvurulmuştur. Şekil 7.4 de, empedans topraklı yıldız bağlantı gösterilmiştir. Z_n rezistansı toprağa bağlanır. Δi_a , i_a nın sıfır sıralı harmoniği olduğu varsayılır. Z_n geçen akım $3 \cdot \Delta i_a$ sıfır sıralı harmoniği içerir ve v_n / Z_n ye eşittir v_n gerilimi de sıralı harmonikleri içerir. Böylece v ve v_{an} aynı pozitif veya negatif sıralı harmoniklere sahiptir ve şekil 7.14' de verilen akış şemasından hesaplanmıştır.



Şekil 7.4 Empedans topraklı yıldız bağlantı

7.5 Simülasyon Sonuçları

Bilgisayar simülasyonu için kullanılan tek fazlı trafo 2kVA, 220/55 V, 50 Hz ve lamine tabaka nüve tipine sahiptir. Nüve çelik tabakalı M36 dır.



Şekil 7.5 Mıknatıslanma eğrisi

Transformatör verilere şunlardır; Primer sargı sayısı $N_1=220$, sekonder sargı sayısı $N_2=55$, yığınlama katsayısı $k_f=0,9$, sarım boşluk faktörü $k_w = 0,25$, kare nüve $c = 5,1$ cm., nüvenin alanı $=26,1$ cm², çelik alanı $= 23,4$ cm², pencere genişliğinin iki katı $d = 6,33$ cm., nüve çevresi merkez hattın toplam uzunluğu $= 58,38$ cm., beş ve altıncı durumlar için topraklama direnci 50Ω , sinüzoidal giriş gerilimi 380 V , frekans 50 Hz. dir. $w = 2.\pi.f=120.\pi$ rad/s olduğunda, hat toprak arası gerilim,

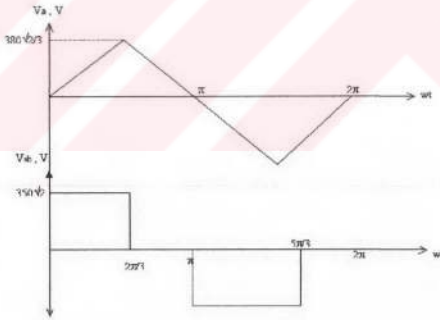
$$v_a = 380\sqrt{\frac{2}{3}} \sin wt \quad (7.15)$$

dir. Fourier seri açılımları aşağıda verildiği gibidir.

$$v_a = 380\sqrt{\frac{2}{3}} \times \frac{8}{\pi^2} (\sin wt - \frac{1}{9} \sin 3wt + \frac{1}{25} \sin 5wt - \dots) \quad (7.16)$$

$$v_{ab} = 350\sqrt{2} \times \frac{2\sqrt{3}}{\pi} \left[\cos(wt - \frac{\pi}{3}) - \frac{1}{5} \cos(5wt + \frac{\pi}{3}) + \frac{1}{7} \cos(7wt - \frac{\pi}{3}) - \dots \right] \quad (7.17)$$

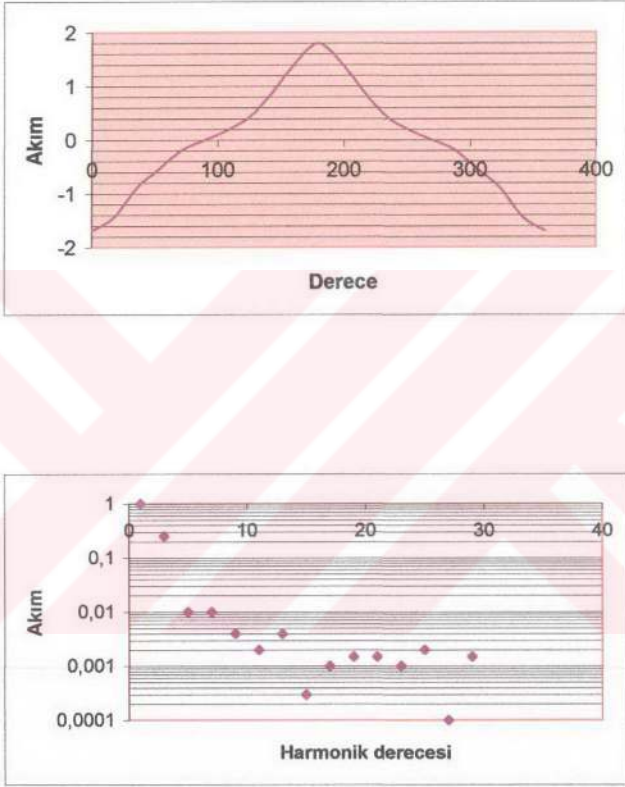
Şekil 7.6' da v_a topraklı yıldız ve empedans topraklı yıldız bağlantıda hat toprak gerilimi gösterilmiştir.



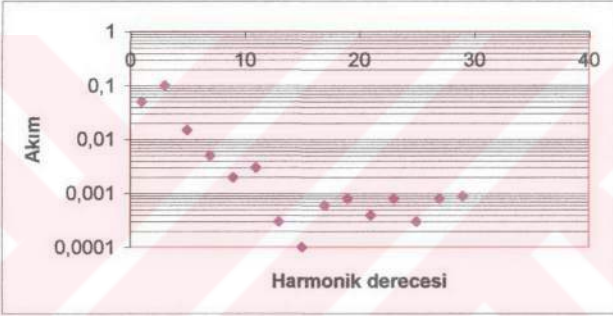
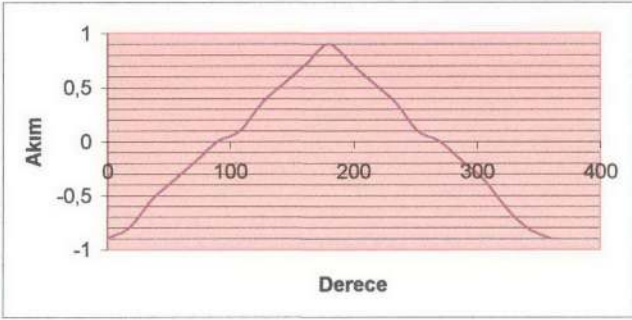
Şekil 7.6 Bozulmaya uğrayan giriş gerilimi

Bu simülasyonda bir periyotta 60 nokta örneklenmiştir. Bu yüzden, açı aralığı 6° ve tahmin edilen en yüksek harmonik 29 dur. Simülasyon programında birçok yineleyici yöntem bulunur. Üçüncü ve dördüncü durumlar için hatanın hesaplanmasında B akı yoğunluğu için izin verilen maksimum değer 0.0001 tesla dir. Beşinci ve altıncı durumlar için izin verilen maksimum hata v_{an} gerilimi için 0.01 volt ve maksimum hata $\% 0.01$ mertebesindedir. Her

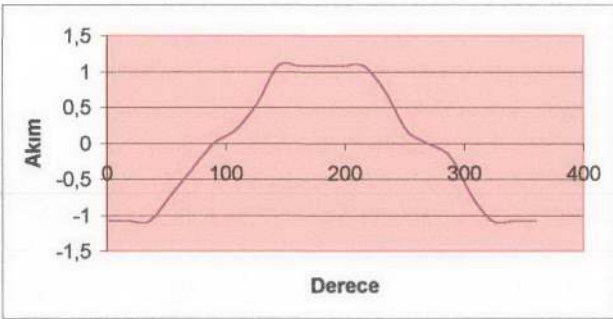
bir durum için akım dalga şekli ve spektrumu şekil 7.7, 7.8, 7.9, 7.10, 7.11, 7.12 de gösterilmiştir.

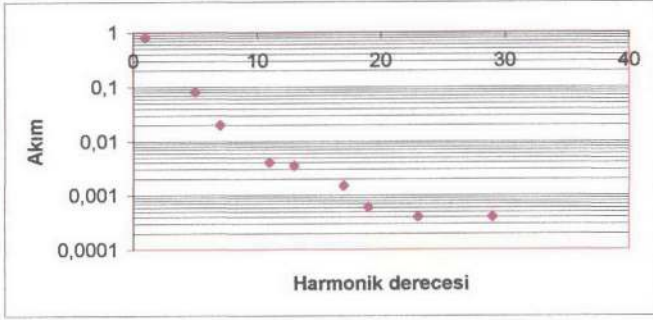


Şekil 7.7 Birinci durum için akım dalga şekli ve spektrumu

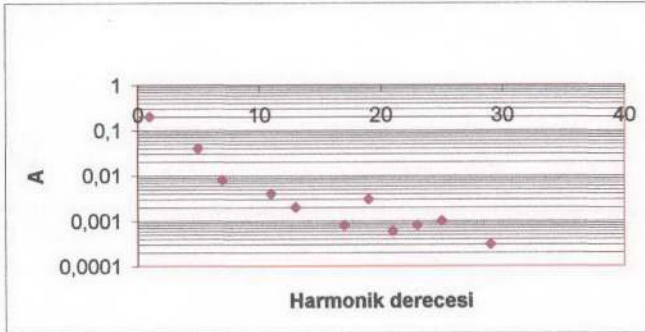
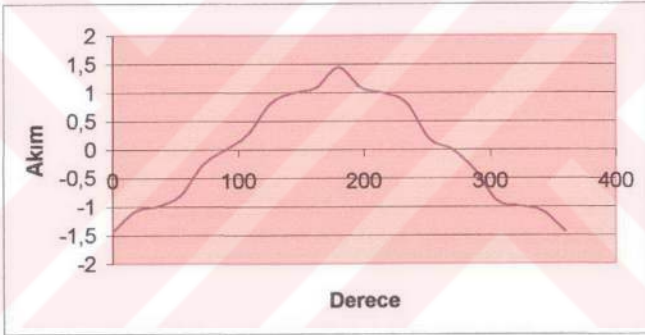


Şekil 7.8 İkinci durum için akım dalga şekli ve spektrumu

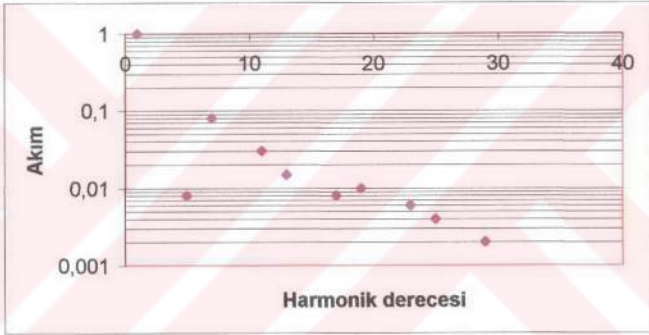
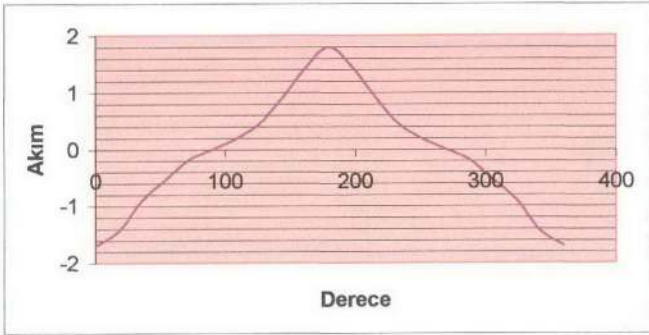




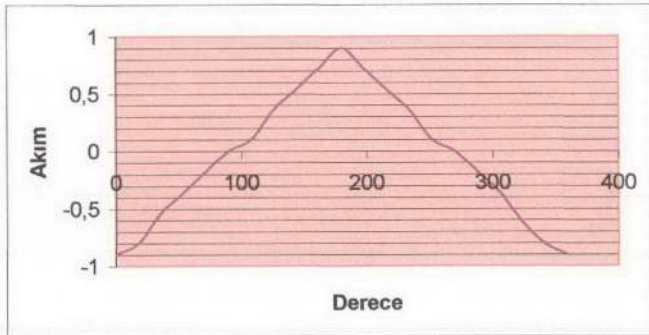
Şekil. 7.9 Üçüncü durum için akım dalga şekli ve spektrumu

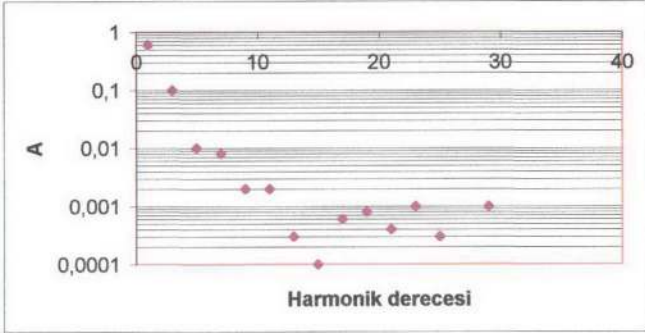


Şekil 7.10 Dördüncü durum için akım dalga şekli ve spektrumu



Şekil 7.11 Beşinci durum için akım dalga şekli ve spektrumu





Şekil 7.12 Altıncı durum için akım dalga şekli ve spektrumu

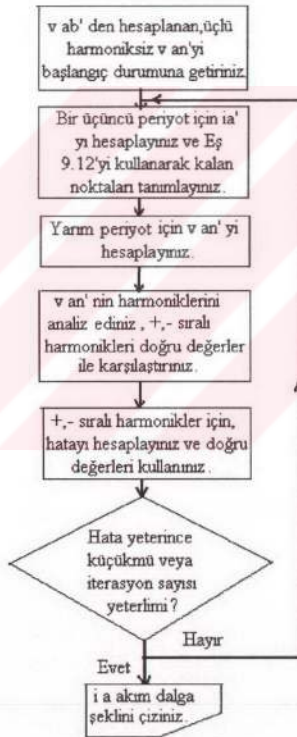
Çizelge 7.2’ de, distorsiyon katsayısı DK , maksimum akı yoğunluğu B_m , maksimum akım i_m , temel efektif akım I_1 , NI iterasyon sayısı ve hata verilmiştir.

Çizelge 7.2 Simülasyon çıkış verileri

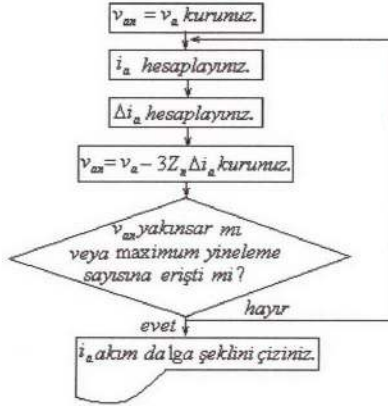
	DK	B_m (tesla)	$I_m(A)$	$I_1(A)$	NI	Hata
1.Durum	26,23%	1,599	1,695	0,9399		
2.Durum	16,64%	1,257	0,887	0,5437		
3.Durum	9,85%	1,389	1,116	0,8416	7	$4,947 \times 10^{-5}$ tesla
4.Durum	9,38%	1,49	1,39	0,8758	9	$7,510 \times 10^{-5}$ tesla
5.Durum	24,98%	1,585	1,655	0,9296	11	$5,005 \times 10^{-3}$ tesla
6.Durum	16,26%	1,253	0,88	0,5425	7	$5,922 \times 10^{-3}$ tesla

Akım dalga şekilleri, noktaları ara tahmin ile elde edilmiştir. Yukarıda verilen şekillerden üç ve dört durumları için dalga şekilleri çift harmonikler ve üçlü harmonikleri olmayan yarım dalga simetrik dalga şekilleri olduğu görülür. Elde edilen akı yoğunluğu yeterince küçük ise iki ve altıncı durumlar için dalga şekilleri, bir ve beşinci durumlardaki dalga şekillerine göre daha küçük distorsiyon faktörüne sahip olduğu görülür. Manyetik doymanın etkisinden dolayı son akımlar öncekilere göre daha büyüktür. Üçüncü ve dördüncü durumdaki dalga şekilleri, eğer üçlü harmonikler mevcut değilse küçük distorsiyon faktörüne sahiptir. Bununla birlikte,

dördüncü durumdaki akım dalga şekli keskin bir şekilde değişmiştir ve spektrumunda ise daha yüksek dereceli harmonikler mevcuttur. Bunun sebebi, giriş gerilimi v_{ab} nin eşitlik 7.17' de gösterildiği gibi yüksek harmonikli dalga şekli olmasıdır. Bir ve ikinci durumlardaki dalga şekilleri beş ve altıncı durumdaki dalga şekillerine benzerdir. Çünkü, sadece topraklama direncinde farklı olur. Eğer, iki kez örnekleme frekansı ile elde edilen sonuç akımları yaklaşık olarak aynı ise, bir periyot için 60 nokta kullanılarak elde edilen doğruluk yeterince iyidir. Birbirine yaklaşık yineleyici yöntemlerde iterasyon sayısı genellikle 10 dur. Akım dalga şekilleri takriben $-\cos \omega t$ şeklindedir. Çünkü $\sin \omega t$ biçimde giriş hat-toprak geriliminden $-\cos \omega t$ nin manyetik akı fonksiyonunu elde etmek için integrali alınır.



Şekil 7.13 Topraksız yıldız bağlantının akış şeması



Şekil 7.14 Empedans ile topraklanan yıldız bağlantının akış şeması

Birinci ve dördüncü durumlarda akım dalga şekillerinin simetrik özelliği çifttir (veya tek). Birinci ve ikinci durumlar için analitik metoda başvurularda nümerik sonuçlar doğrulanır. İkinci giriş gerilimi tek simetrik ve fourier serileri sadece sintüs ifadeleri içerir. İntegralden sonra akı çizgileri sadece kosinüs ifadeleri içerir ve çift simetrik. Miknatis eğrisini çizerek elde edilen akım dalga şekilleri de aynı zamanda çift simetrik ve sadece kosinüs ifadeleri içerir. Bilgisayar verilerinden k. harmonik için faz açısı θ_k sıfır veya π dir ve eşitlik 7.1' deki fourier serileri sadece kosinüs ifadeleri içerir. İkinci durum için şekil 7.6'daki v sıfır dc bileşeninin parabolik akı çizgisinden dalga şeklini elde etmek için integrali alınır.

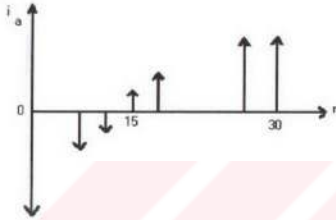
$\lambda_{\max} = 380 \sqrt{2} / \sqrt{3} / 8 / 60 = 0,6464$ Wb, ve karşılık gelen $B_{\max} = \lambda_{\max} / 220 / 0,00234 = 1,2556$ tesla değeri çizelge 7.2' de verilen nümerik sonuçlar ile uyum gösterir. Eşitlik 7.17 dördüncü durum için, v_{AB} 'nin fourier serileridir ve eşitlik 7.13 ve eşitlik 7.14 ü kullanarak v_{AN} nin doğru pozitif ve negatif sıralı harmonikleri hesaplanır. Böylece,

v_{an} (+, - sıralı)

$$= \frac{700\sqrt{2}}{\pi} \left[\cos\left(wt - \frac{\pi}{2}\right) - \frac{1}{5} \cos\left(5wt + \frac{1}{2}\right) + \frac{1}{7} \cos\left(7wt - \frac{\pi}{2}\right) - \dots \right]$$

$$= \left[\frac{700\sqrt{2}}{\pi} \left(\sin wt + \frac{1}{5} \sin 5wt + \frac{1}{7} \sin 7wt + \dots \right) \right] \quad (7.18)$$

dir. İntegralden sonra, akı çizgisi (+,- sıralı) sadece kosinüs terimleri içerir. Eğer sıfır sıralı harmonikler sadece kosinüs terimleri içerirse, akı çizgisi çift simetrik olacaktır. Bu yüzden, mıknatıs eğrisinden hesaplanan akım aynı zamanda simetrik ve sadece kosinüs terimleri içerir. Aynı sebeplerle çift simetrik akım özelliği için üçüncü duruma başvurulur. Bu birinci ve ikinci durum için dalga şekli ve faz açılarının her ikisi üçüncü durum için kontrol edilir. Bununla birlikte dördüncü durumda az farklılık bulunur. Bilgisayar verilerinden ayırık zaman çözümü, şekil 7.15' de gösterilmiştir ve $i_a(15)=-i_a(14), i_a(16)=-i_a(13), \dots$ ve $i_a(30)=-i_a(0)$ 'dir.



Şekil 7.15 Dördüncü durum için ayırık zaman akım dalga şekli

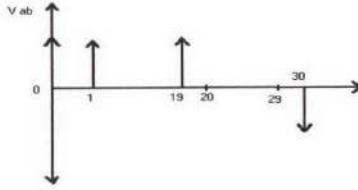
Örnekleme aralığı 6° olarak alınmıştır. i_a $n=14.5$ de tek simetrik ve $n=29.5$ de çift simetriktir. Bu, şekil 7.10' da verilen dalga şekline gözlemlenir. Noktalı hat simetrik eksenini gösterir. Fakat, birinci ve üçüncü durumlar için $i_a(15)=0, i_a(16)=-i_a(14)$ ve i_a $n=15$ de tek simetriktir ve $n=30$ da çift simetriktir. Bu yüzden, simetrik eksenini 3° lik zaman aralığının sol yarım kısmına kaydırılır. Bu, aşağıda verilen faz açısı ve fourier serileriyle kontrol edilir.

$$i_a(\omega t) = a_1 \cos(\omega t - 177^\circ) + a_3 \cos(5\omega t + 15^\circ) + a_7 \cos(7\omega t - 159^\circ) + \dots \quad (7.19)$$

dir. $f(\omega t)$ $i_a(\omega t)$ 3° lik gecikmeli olduğunu kabul edelim. O zaman,

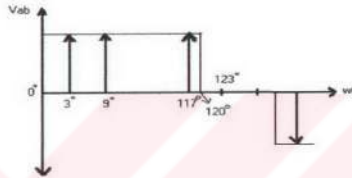
$$f(\omega t) = i_a(\omega t - 3) = -a_1 \cos \omega t + a_3 \cos 5\omega t - a_7 \cos 7\omega t - \dots \quad (7.20)$$

dir. $f(\omega t)$ sadece kosinüs terimleri içerir ve $\omega t = 180^\circ$ ($n=30$) da çift simetriktir. Eğer $i_a(\omega t)$ $f(\omega t)$ 'den 3° ileride ise, $i_a(\omega t)$ $\omega t=177^\circ$ ($n=29.5$) yönünde çift simetriktir. Akım dalga şekli sadece kosinüs terimleri içermelidir ve $\omega t = 180^\circ$ yönünde çift simetriktir. V_{ab} 'nin örneklenmesinde 3° lik bir hata oluşur. Simülasyon için V_{ab} ayırık zaman şekil 7.16'da gösterilmiştir. Şekil 7.16'nın V_{ab} 'si şekil 7.17' dekinden 3° ileridir. Böylece kesin cevap simülasyon sonucundan 3° geridedir ve bu simetrik eksenin 3° ile uyumludur.



Şekil 7.16 Simülasyon için v_{ab} ayrık-zaman

V_{ab} şekil 7.17'de gösterildiği gibi örneklenmiştir (*).



Şekil 7.17 v_{ab} nin örneklenmesi

7.6 Sonuç

Simülasyon sonuçları çok başarılı olmuştur. Çünkü her bir yineleyici metod en güzel bir şekilde yakınsamıştır. Elde edilen doğruluk mıknatıslama eğrisinin tahmininde kullanılan doğrusal kısımların sayısına bağlıdır. Her bir yüksek harmonik uygun bir şekilde örnekleme frekansında tahmin edilir. Eğer giriş gerilimi topraklı yıldız veya topraksız yıldız bağlantı durumunda tek (veya çift) simetrik olur ise, o zaman akım dalga şekli çift (veya tek) simetrik olacaktır. Bu simülasyon programı harmonik tahmin için transformatörlerin tasarımında kullanılır.

*Örnekleme, bir değişkenin değerlerini belirli zaman aralıkları ile belirleme

8. ÜÇ FAZ TRANSFORMATÖRLERİN HARMONİK ANALİZİ İÇİN BİLGİSAYAR SİMÜLASYON

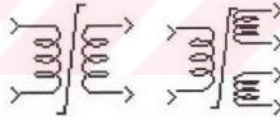
8.1 Giriş

Bu bölümde, geliştirilen algoritmalar ve modellemeler ile bilgisayar simülasyonları oluşturulmuştur. Doymalı transformatör simülasyonu, üç faz sıralı analizör simülasyonu, fourier analizör simülasyonu, iki sargılı üç fazlı transformatör simülasyonu, üç sargılı üç faz transformatör simülasyonu, zig-zag faz kaymalı üç faz transformatör simülasyonu oluşturulmuştur. Farklı bağlantı şekillerinde, üç sargılı üç adet faz transformatör kullanarak bir üç faz transformatör oluşturulmuştur.

Microsoft programlarını ve Microsoft Visual C++ dilini kullanarak windows ortamında bir yazılım geliştirilmiştir. Bu uygulamada hem nümerik hem de grafik veriler gösterilmiştir. Microsoft Visual C++ dilinin gelişmiş özelliklerini kullanarak geliştirilen bu programla güç sistemlerindeki harmonikler en iyi bir şekilde anlaşılmıştır ve harmonik dalga şekillerinin gösterilmesi sağlanmıştır. Farklı verilerde ve farklı çalışma durumlarında iyi sonuçlar elde edilmiştir.

8.2 Doymalı Transformatör Simülasyonu

İki ve üç sargılı doymalı transformatör oluşturulmuştur.



Şekil 8.1 İki ve üç sargılı doymalı transformatör

Doymalı transformatör blok modeli aynı nüve üzerinde üç sargıdan oluşur. Sargıların dirençleri $R_1 R_2 R_3$, kaçak endüktansları $L_1 L_2 L_3$, transformatörün anma gücü P_n , nominal frekansı f_n , nominal gerilimi V_n ile gösterilir.

Her bir sargı için per-unit direnç ve kaçak endüktans aşağıdaki gibi ifade edilir.

$$R(pu) = \frac{R(\Omega)}{R_{baz}} \quad (8.1)$$

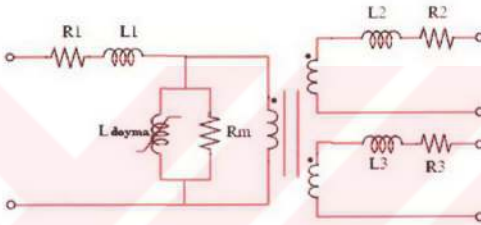
$$L(pu) = \frac{L(H)}{L_{baz}} \quad (8.2)$$

Her bir sargı için baz direnç ve baz endüktans,

$$R_{baz} = \frac{(V_n)^2}{P_n} \quad (8.3)$$

$$L_{baz} = \frac{R_{baz}}{2\pi f_n} \quad (8.4)$$

dir.



Şekil 8.2 Doymalı üç sargılı transformatör modeli

Mıknatıslanma direnci R_m için per-unit değerler transformatör anma gücü ve birinci sargının nominal gerilimine bağlıdır. Uygulamadaki R_{baz} ve L_{baz} değerleri,

$$R_{baz} = \frac{(735e3/\sqrt{3})^2}{250e6} = 720.3\Omega$$

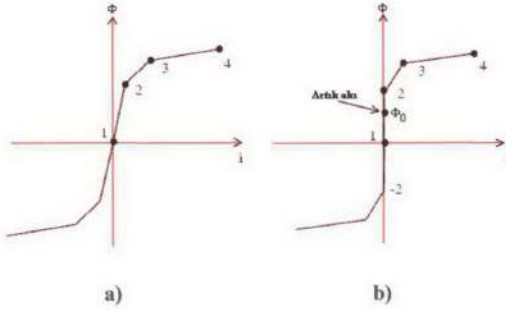
$$L_{baz} = \frac{720.3}{2\pi 50} = 1.91H$$

dir. Örneğin, birinci sargı parametreleri $R_1=1.44 \Omega$ ve $L_1=0.1528 H$. Uygulama paneline girilecek olan per-unit değerler ise,

$$R_1 = \frac{1.44\Omega}{720.3\Omega} = 0.002 pu.$$

$$L_1 = \frac{0.1528H}{1.91H} = 0.08 pu.$$

dir. Doymalı transformatör bloğunun doyma karakteristiği, akı ve mıknatıslanma akımı arasındaki doğrusal bir ilişkiyle tanımlanır. Eğer artık akı Φ_0 tanımlamak istersek, doyma karakteristiğinin ikinci noktası şekil b' de gösterildiği gibi sıfır akıma karşılık gelmelidir. Doyma karakteristiği i ve Φ nin per-unit değerleri girilir.



Şekil 8.3 Akım - akı değişimi a) Artık akı olmayan durumda b) Artık akı 2 ve -2 noktaları arasında artık akı bulunması durumunda

$$\Phi = \Phi_{pu} \Phi_{baz} \quad (8.5)$$

$$I = I_{pu} I_{baz} \quad (8.6)$$

Baz akı Φ_{baz} ve baz akım I_{baz} değerleri nominal gerilim, nominal güç ve nominal frekans değerlerinden elde edilir.

$$I_{baz} = \frac{P_n}{V_l} \sqrt{2} \quad (8.7)$$

$$\Phi_{baz} = \frac{V_l}{2\pi f_n} \sqrt{2} \quad (8.8)$$

Şekil 8.4 de gösterilen uygulama paneli oluşturulmuştur. Transformatörün nominal güç oranı (VA) ve nominal frekans (Hz) değeri girilir. Birinci sargı parametreleri faz-faz nominal gerilim (Volt), direnç ve kaçak endüktansı (pu) değeri girilir. İkinci sargı parametreleri faz-faz nominal gerilim (volt), direnç ve kaçak endüktansı (pu) değeri girilir. Üçüncü sargı parametreleri faz-faz nominal gerilim (Volt), direnç ve kaçak endüktans (pu) değeri girilir. Doymalı nüve için doyma karakteristiği (0,0) çifti ile başlayan akım/akı çiftlerinin (pu) bir serisi tanımlanır. Başlangıç akıları tanımlanır. Eğer kontrol edilmiş ise [Φ_{OB} , Φ_{OB} , Φ_{OC}] parametresi ile başlangıç akıları tanımlanır Φ_{OB} , Φ_{OB} , Φ_{OC} (p.u). Transformatörün her bir fazı için başlangıç akıları tanımlanır. Üç faz transformatör bloğunun sargı terminalleri arasındaki gerilim ölçümü seçilir. Üç faz transformatör bloğunun sargıları içinden geçen akımın ölçülmesi için sargı akımları seçilir. Akıyı (V.s) ve mıknatıs akımı (sadece doymalı

transformatörler için akılar ve mıknatıs akımları seçilir) ve akıları ölçmek için ölçüm (V,I,Ak1) seçilir. Simulasyon boyunca seçilmiş ölçümleri görüntülemek için, modelde bir multimetre bloğu yerleştirilir. Bu multimetre bloğunun mevcut ölçüm listesinde bir etiket ve bir blok ismi ile ölçümler sınıflandırılır. Eğer 1. sargı ABC bağlantı parametreleri Y, Y_n veya Y_g şeklinde olursa, etiketler çizelge 8.1 de verildiği gibi olacaktır.

BLOK PARAMETRELER: DOYMALI TRANSFORMATÖR

Doymalı Transformatör

Üç sargılı doymalı transformatör.

Parametreler

Nominal güç ve frekans [Pn(VA), fn(Hz)]

[250e6 , 50]

1.Sargı parametreleri [V1 (Vrms), R1(pu), L1(pu)]

[735e3/h5h(3) 0.002 0.08]

2.Sargı parametreleri [V2 (Vrms), R2(pu), L2(pu)]

[115e3/h5h(3) 0.002 0.08]

3.Sargı parametreleri [V3 (Vrms), R3(pu), L3(pu)]

[115e3/h5h(3) 0.002 0.08]

Doyma karakteristiği (pu)[I1 @1; I2 @2;...]

[00 ; 0.001 1.2 ; 1 1.3]

Nüve direnci ve bağlantı akısı [Rm(pu) @0(pu)] veya [Rm(pu)]

[500]

Ölçümler

Hiçbiri

Tamam İptal Yardım Uygula

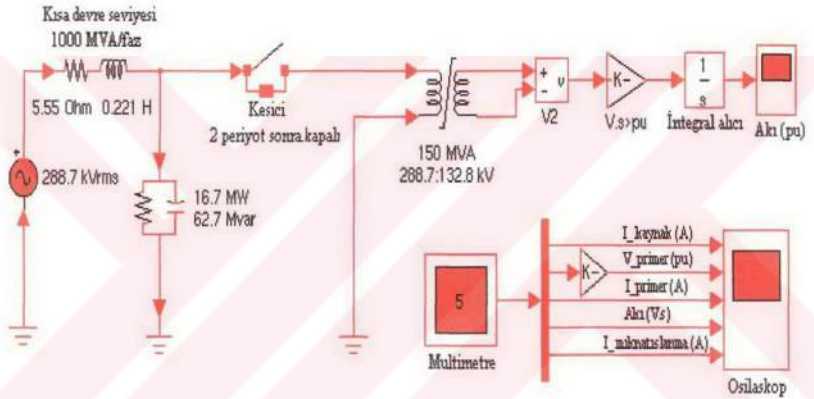
Şekil 8.4 Uygulama paneli

Çizelge 8.1 Ölçüm etiketi

Ölçümler	Etiket
Sargı gerilimleri	Uw1:, Uw2:, Uw3:
Sargı akımları	Iw1:, Iw2:, Iw3:
Ak1	Ak1:
Mıknatıs akımları	Imk:

8.2.1 Uygulama

Üç faz 450 MVA, 500/230 kV transformatör 3000 MVA bir kaynaktan beslenmektedir. Transformatör parametreleri şunlardır; nominal güç 150 MVA, frekans 50 Hz, primer sargı parametreleri $500 \text{ kV}/\sqrt{3} \text{ kV}$, $R=0.002 \text{ p.u.}$, $X=0.08 \text{ p.u.}$, sekonder sargı parametreleri $230 \text{ kV}/\sqrt{3} \text{ kV}$, $R=0.002 \text{ p.u.}$, $X=0.08 \text{ p.u.}$, nüve kaybı direnci 1000 p.u. , doyma karakteristiği $[0 \ 0 \ 0 \ 1.2 \ 1.0 \ 1.52]$, artık akı 0.8 p.u. dir.

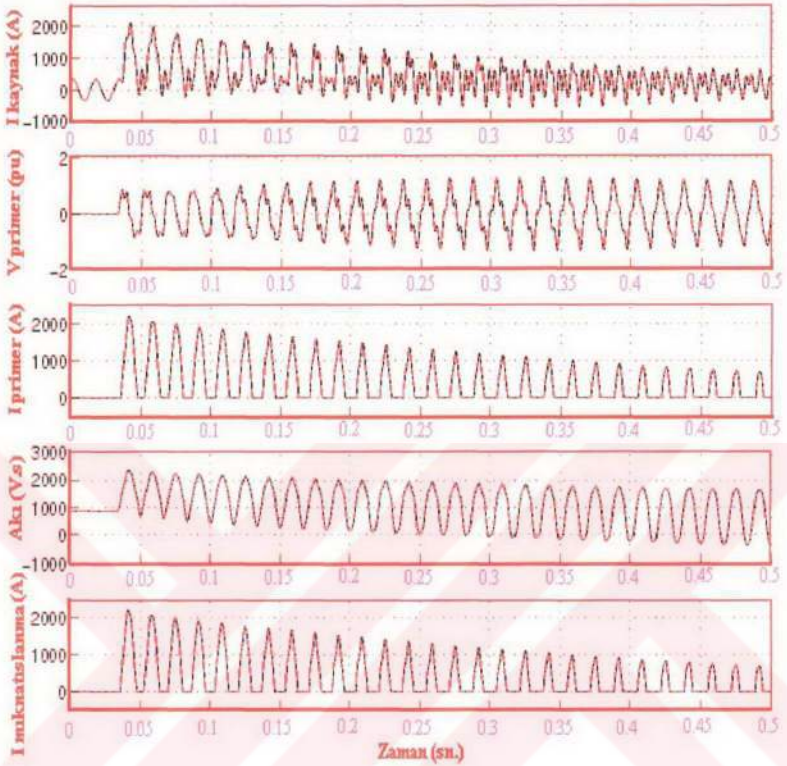


Şekil 8.5 Simülasyon devresi

Bu devrede akı iki yolla hesaplanabilir. Bunlar;

- Sekonder geriliminin integrali alınarak,
- Multimetre bloğu kullanılarak

Bu devrenin simülasyonu, transformatör akım ve gerilimi üzerinde doyma etkisi gösterilmiştir.



Şekil 8.6 Simülasyon sonuçları

8.3 Üç Faz Sıralı Analizör

Bir üç faz sinyalin pozitif, negatif ve sıfır sıralı bileşenleri ölçmek için üç faz sıralı analizör oluşturulmuştur. Üç faz sıralı analizör bloğu ile üç dengeli veya dengesiz sinyallerin kurulması ile pozitif, negatif ve sıfır sıralıların büyüklüğü ve fazı çıkışı elde edilmiştir. Üç faz sinyallerinin üç sıralı bileşenleri aşağıdaki gibi hesaplanır.

$$V_1 = \frac{1}{3}(V_a + aV_b + a^2V_c) \quad (8.9)$$

$$V_2 = \frac{1}{3}(V_a + a^2V_b + aV_c) \quad (8.10)$$

$$V_0 = \frac{1}{3}(V_a + V_b + V_c) \quad (8.11)$$

V_a, V_b, V_c öngörülen frekansta üç faz gerilimi $a = e^{j2\pi/3} = 1 \angle 120^\circ$ kompleks operatör ifade edilir. Öngörülen frekansın bir periyodunun fourier analizi ilk olarak üç giriş sinyaline uygulanır. Öngörülen temel veya harmonik frekansta V_a, V_b, V_c fazör değerleriyle ölçülür ve pozitif-sıralı, negatif-sıralı ve sıfır-sıralı bileşenleri elde etmek için uygulanır. Üç-faz sıralı analizör bloğu harmoniklere veya dengesizliklere duyarlı değildir. Bununla birlikte sistem filtre edilirken gecikmeyle karşılaşılır. Örneğin V_1 in adım değişim cevabı bir periyotluk rampadır. Giriş sinyallerinin farklı sıralıları ve harmonik bileşenleri elde etmek için simulasyon boyunca her bir parametre biraz değiştirilir.

Üç faz giriş sinyalinin temel frekans (Hz) değeri girilir. Harmonik bileşen tanımlanır. Bloğun çıkış verdiği sıralı bileşen tanımlanır. Pozitif sıralıları hesaplamak için pozitif, negatif sıralıları hesaplamak için negatif, üç faz giriş sinyali temel veya tanımlanan harmoniğin sıfır sıralı bileşenini hesaplamak için ise sıfır seçilir.

Blok Parametreler: Üç Faz Sıralı Analizör
X

Üç Faz Sıralı Analizör

Bu blok üç dengeli veya dengesiz sinyalin pozitif, negatif ve sıfır sıralı bileşenlerin büyüklüğü ve fazını çıktı olarak verir. Bu sinyaller harmonik içerir veya içermez.

Fourier analizi ilk olarak belirlenen frekansın bir periyodunda temel veya harmonik frekansındaki V_a, V_b ve V_c fazörlerini bulmak için üç giriş sinyaline uygulanır. $a = 120^\circ$ dönüştürme V_1 pozitif sıralı, V_2 negatif sıralı ve V_0 sıfır sıralı elde etmek için yapılır.

Parametreler

Temel frekans Ω (Hz):

Harmonikler (0=DC, 1=temel):

Sıralı: ▼

Tamam
İptal
Yardım
Uygula

Şekil 8.7 Uygulama paneli

abc Üç [V_a , V_b , V_c] sinüzoidal sinyalin vektörlü sinyali girişe bağlanır. Sıralı bileşenin büyüklüğü (tepe değeri) ilk çıkış olarak verilir. Tanımlanan bileşen derecesindeki faz, ikinci çıkış olarak verilir.

8.4 Fourier Analizör

Fourier bloğu giriş sinyalinin dc, temel ve her bir harmonik bileşenin büyüklüğünü ve fazını hesaplamak için oluşturulmuştur. $f(t)$ fourier serisi olarak ifade edilir.

$$f(t) = \frac{a_0}{2} + \sum_{n=1}^{\infty} a_n \cos(n\omega t) + b_n \sin(n\omega t) \quad (8.12)$$

n harmonik derecesini gösterir. $n=1$ temel bileşene karşılık gelir. Harmonik bileşenlerin büyüklüğü ve fazı aşağıda verilen eşitliklerden hesaplanılır.

$$|H_n| = \sqrt{a_n^2 + b_n^2} \quad (8.13)$$

$$\angle H_n = \arctan\left(\frac{b_n}{a_n}\right) \quad (8.14)$$

$$a_n = \frac{2}{T} \int_0^{(n+T)} f(t) \cdot \cos(n\omega t) dt \quad (8.15)$$

$$b_n = \frac{2}{T} \int_0^{(n+T)} f(t) \cdot \sin(n\omega t) dt \quad (8.16)$$

$T=1/f_1$ dir. f_1 temel frekansı ifade eder. Üç faz giriş sinyalinin temel frekansı (Hz) dir. Harmonik n ($0=DC$; 1 = temel ; 2 = ikinci harmonik ; 3=üçüncü harmonik ;...) dir. Fourier analiz uygulanması istenilen harmonik bileşen tanımlanır. Analiz edilmesi istenen dc bileşen için 0, temel bileşen için 1 ve harmonik bileşen için ise derecesi yazılır.

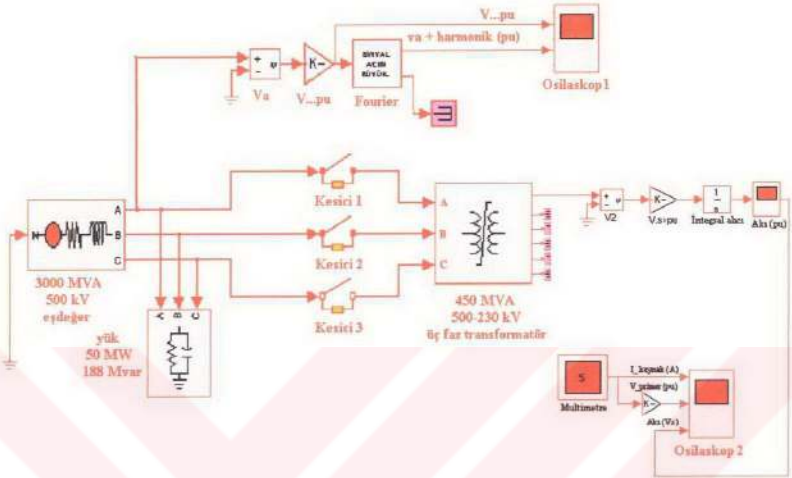
Oluşturulan uygulama paneli şekil 8.8 de gösterilmiştir.

Blok Parametreler: Fourier Analizör	
Fourier Analizör Bu blok üç dengeli veya dengesiz sinyalin pozitif, negatif ve sıfır sıralı bileşenlerin büyüklüğünü ve fazını çıktı olarak verir. Bu sinyaller harmonik içerir veya içermez. Fourier analizi ilk olarak belirlenen frekansın bir periyodunda temel veya harmonik frekansındaki V_a, V_b ve V_c fazörlerini bulmak için üç giriş sinyaline uygulanır. 128 dönüştürme V_1 pozitif sıralı, V_2 negatif sıralı ve V_0 sıfır sıralı elde etmek için yapılır.	
Parametreler Temel frekans f_1 (Hz): 50 Harmonikler (0=DC, 1=temel, 2= ikinci har., 3=üçüncü har.,) 1	
Tamam	İptal
Yardım	Uygula

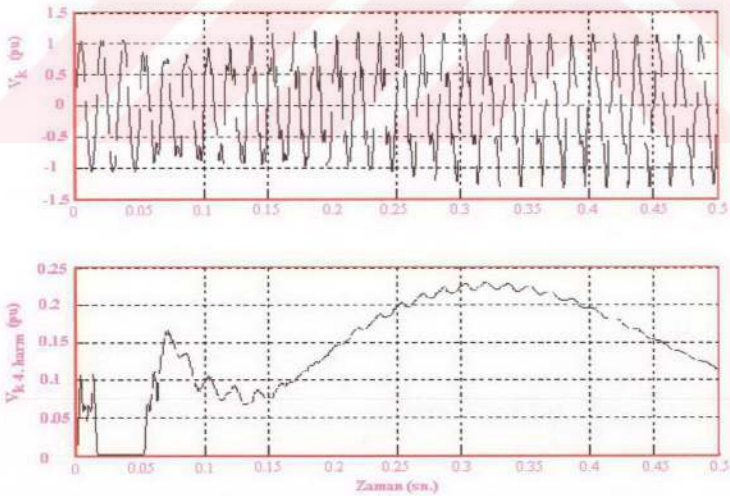
Şekil 8.8 Uygulama paneli

8.5 Uygulama

450 MVA üç faz transformatör 500 kV şebeke üzerinden besleniyor. Bu güç sistemi 3000 MVA kısa devre gücü ve bir paralel RC yükü bulunan endüktif kaynaktan oluşan bir eşdeğer devre ile simüle edilmiştir. Fourier bloğu, primer gerilimin A fazının 4. harmonik içeriğini ölçmek için kullanılmıştır.



Şekil 8.9 Simülasyon devresi



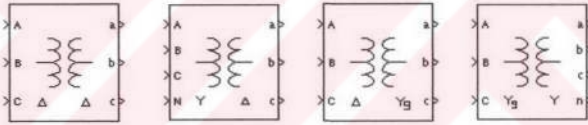
Şekil 8.10 Simülasyon sonuçları

8.6 İki Sargılı Üç Fazlı Transformatör Simülasyonu

Farklı bağlantı şekillerinde, üç sargılı üç adet faz transformatör kullanarak bir üç faz transformatör oluşturulmuştur. Transformatörün üç sargısı, aşağıda belirtilen farklı şekillerde bağlanabilir. Bunlar;

- Yıldız,
- Nötlü yıldız,
- Yıldız Topraklı,
- Üçgen (D11), üçgen yıldızdan 30° ileride,
- Üçgen (D1), Üçgen Yıldızdan 30° geride,

dir. Seçilen bağlantı şekli ve blokun ikonu otomatik olarak güncelleşir. Eğer sargı için nötür ile yıldız bağlantı seçilirse, N bir giriş portu bu bloğa eklenir. Eğer 2. sargı üzerinde nötr istenilirse ek olarak n ile ifade edilen çıkış portu oluşturulur. Rastgele farklı dört bağlantı şekli, aşağıdaki kurulumlarla gösterilir.



Şekil 8.11 Dört kurulum için gösterim

Aktif hale geldiğinde doymalı transformatör bloğu için doyma karakteristiği aynıdır ve blokun ikonu otomatik olarak güncelleştirilir. Eğer akı tanımlanmaz ise başlangıç değerleri otomatik olarak ayarlanacaktır. Bu yüzden simülasyon sürekli halde başlar. Her bir sargının kaçak endüktansı ve direnci, transformatör nominal güç P_n ve sargının (V_1, V_2) nominal gerilimine göre p.u cinsinden verilir.

Transformatörün nominal güç oranı (VA) ve nominal frekansı (Hz). Sargı 1 için faz bağlantısı Sargı 1 için faz-faz nominal gerilimi (volt), direnç ve kaçak endüktansı (pu). Sargı 2 için faz bağlantısı. İkinci sargı için faz-faz nominal gerilimi (volt), direnç ve kaçak endüktansı (pu). Eğer kontrol edildi ise, doymalı bir üç faz transformatör oluşturulur.

ÜÇ FAZ TRANSFORMATÖR (İKİ SARGILI) BLOK PARAMETRELERİ	
Üç Faz Transformatör (İki Sargılı) Üç adet tek faz transformatör kullanarak bir üç faz transformatör oluşturulur. Yıldız bağlantısının nötr noktasına girmek istediğinizde sarga bağlantısını 'Yn' biçiminde kurunuz	
Parametreler Nominal güç ve frekans [Pa(VA), fa(Hz)] [250e6 , 50] L.sargının [ABC] bağlantısı: Y ▼ Sarga parametreleri [V1 faz-faz (Vrms), R1(pu), L1(pu)] [424.35e3 , 0.002 , 0.08] 2.sargının [abc-2] bağlantısı: Üçgen ▼ Sarga parametreleri [V2 faz-faz (Vrms), R2(pu), L2(pu)] [315e3 , 0.002 , 0.08] ☒ Doymalı nüve Mıknatıslama rezistansı Rm (pu) 500 Doyma karakteristiği (pu)[i1 01; i2 02;...] [0.0 ; 0.005,1.2 ; 1.0,1.4] ☒ Başlangıç akıları belirlir: [Φ0A Φ0B Φ0C] (pu) [0.8 -0.8 0.7] Ölçümler: Hiçbiri ▼	
Tamam	İptal
Yardım	Uygula

Şekil 8.12 Uygulama paneli

Mıknatıslama direnci R_m (pu), Mıknatıslama reaktansı L_m dir. Doymamış bir nüve için mıknatıslanma endüktansı (L_m) dir. Eğer doymalı nüve parametresi kontrol edilirse, uygulama panelinde mıknatıs reaktans parametresi L_m gözükmez. Doymalı nüve için doyma karakteristiği (0,0) çifti ile başlayan akım/akı çiftlerinin (pu) bir serisi tanımlanır. Eğer sadece doymalı nüve ise, bu parametrede gözükür. Başlangıç akıları tanımlanır. Eğer kontrol edilmiş ise [Φ_{0B} , Φ_{0B} , Φ_{0C}] parametresi ile başlangıç akıları tanımlanır. Transformatörün her bir fazı için

başlangıç akıları tanımlanır. Eğer, tanımlanan başlangıç akıları ve doymalı nüve parametreleri kontrol edilmiş ise, bu parametrede gözükür. Üç faz transformatör bloğunun sargı terminalleri arasındaki gerilimi ölçmek için sargı gerilimi seçilir. Üç faz transformatör bloğunun sargıları içinden geçen akımı ölçmek için, sargı akıları seçilir. Akıyı (V.s) ve mıknatıs akımını (sadece doymalı transformatörler için akıları ve mıknatıs akımları seçilir) ve akıları ölçmek için tam ölçüm (V, I, Akı) seçilir. Simulasyon boyunca seçilmiş ölçümleri görüntülemek için, modelde bir multimetre bloğu yerleştirilir. Bu multimetre bloğunun, mevcut ölçüm listesinde bir etiket ve bir blok ismi ile ölçümler sınıflandırılır. Eğer 1. sargı ABC bağlantı parametreleri Y, Y_n veya Y_g bağlantı şeklinde olursa, etiketler aşağıdaki gibi olacaktır.

Çizelge 8.2 Ölçüm etiketi

Ölçümler	Etiket
Sargı gerilimleri	$U_{an_w1}; U_{bn_w1}; U_{cn_w1}$ veya $U_{ag_w1}; U_{bg_w1}; U_{cg_w1}$
Sargı akımları	$I_{an_w1}; I_{bn_w1}; I_{cn_w1}$ $I_{ag_w1}; I_{bg_w1}; I_{cg_w1}$
Akılar	$Ak1_A; Ak1_B; Ak1_C$
Mıknatıs akımları	$Im1k_A; Im1k_B; Im1k_C$

Eğer 1. sargı ABC bağlantı parametresi Üçgen (D11) veya Üçgen (D1)' e kurulduğunda, etiketler aşağıda verildiği gibi olacaktır.

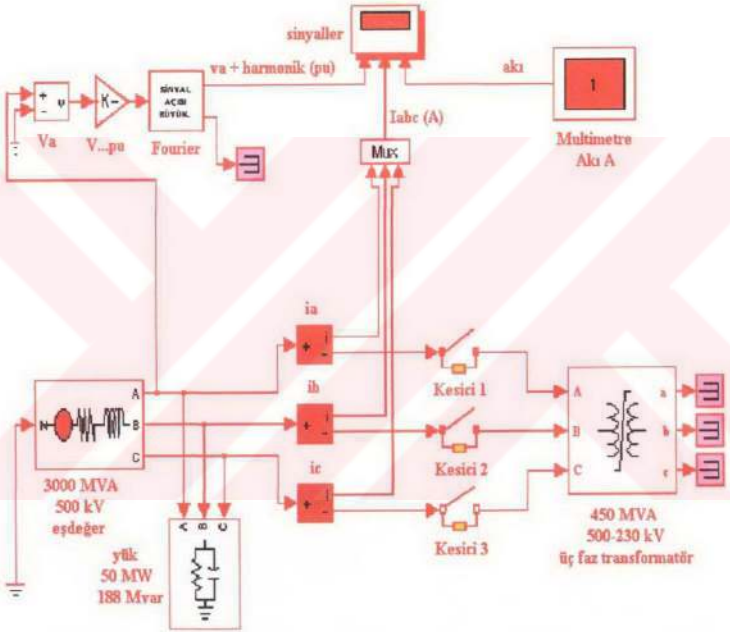
Çizelge 8.3 Ölçüm etiketi

Ölçüm	Etiket
Sargı gerilimleri	$U_{ab_w1}; U_{bc_w1}; U_{ca_w1}$
Sargı akımları	$I_{ab_w1}; I_{bc_w1}; I_{ca_w1}$
Akılar	$Ak1_A; Ak1_B; Ak1_C$
Mıknatıs akımları	$Im1k_A; Im1k_B; Im1k_C$

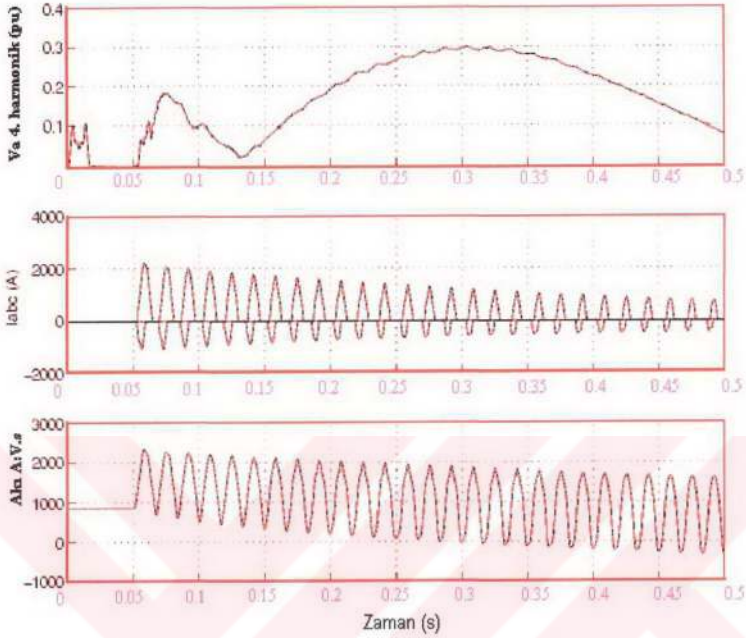
Aynı etiketler 2. sargı (abc) bağlantı parametresi içinde uygulanır.

8.6.1 Uygulama

Aşağıda verilen uygulama devresi için, simüle edilen doymalı nüvenin bulunduğu Üç-Faz Transformatör bloku kullanılır. Her iki sargı yıldız topraklı şeklinde bağlanır. İki sargının nötr noktaları ise toprağa bağlanır.



Şekil 8.13 Simülasyon devresi



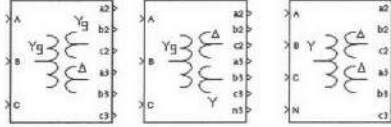
Şekil 8.14 Simülasyon sonuçları

8.7 Üç Sargılı Üç Faz Transformatör Simülasyonu

Farklı bağlantı şekillerinde üç sargılı üç adet faz transformatörleri kullanarak bir üç-faz transformatör oluşturulmuştur. Transformatörün üç sargısı, aşağıda verilen farklı şekillerde bağlanabilir. Bunlar;

- Yıldız,
- Nötlü yıldız (sadece sargı 1 ve 3 için),
- Yıldız Topraklı,
- Üçgen (D11), Üçgen Yıldızdan 30° geride,
- Üçgen (D1), Üçgen Yıldızdan 30° ileride,

dir. Seçilen bağlantı şekli ve blok' un ikonu otomatik olarak güncelleştir. Eğer sargı için nötrlü yıldız bağlantı seçilirse, N bir giriş portu bu bloğa eklenir. Eğer 3. sargı üzerinde istenilirse ilave olarak n3 ile ifade edilen çıkış portu oluşturulur. Rast gele dört bağlantı şekli için aşağıdaki kurulumlar gösterilmiştir.



Şekil 8.15 Dört kurulum için gösterim

Aktif hale geldiğinde doymalı transformatör bloğu için doyma karakteristiği aynıdır ve blokun ikonu otomatik olarak güncelleştirilir. Eğer akı tanımlanmaz ise başlangıç değerleri otomatik olarak ayarlanacaktır. Bu yüzden simülasyon sürekli halde başlar. Her bir sargının kaçak endüktans ve direnci, transformatör nominal güç P_n ve sargının (V_1, V_2 veya V_3) nominal gerilimine dayanarak p.u cinsinden değerleri girilir.

Giriş terminalleri ve çıkış terminalleri olarak bir sargının ABC portu tanımlanır. Transformatörün nominal güç oranı (VA) ve nominal frekansı (Hz). Sargı 1 için faz bağlantı şekli tanımlanır. Sargı 1 için faz-faz nominal gerilim (Volt), direnç ve kaçak endüktans (pu) değerleri girilir. Sargı 2 için faz bağlantı şekli tanımlanır. Sargı 2 için faz-faz nominal gerilim (volt), direnç ve kaçak endüktansı (pu) değerleri girilir. Sargı 3 için faz bağlantı şekli tanımlanır. Sargı 3 için faz-faz nominal gerilim (Volt), direnç ve kaçak endüktansı (pu) değerleri girilir. Doymalı nüve eğer kontrol edildi ise, doymalı bir üç faz transformatör oluşturulur. Mıknatıslama direnci R_m , mıknatıslama direnci R_m (pu), mıknatıslama reaktansı L_m değerleri girilir. Doymamış bir nüve için mıknatıslanma endüktansı (L_m), eğer doymalı nüve parametresi kontrol edilirse, diyalog kutusunda mıknatıs reaktans parametresi L_m gözükmez. Doymalı nüve için doyma karakteristiği (0,0) çifti ile başlayan akım/akı çiftlerinin (pu) bir serisi tanımlanır. Eğer sadece doymalı nüve ise bu parametre gözükür. Eğer kontrol edilmiş ise [Φ_{OB} , Φ_{OB} , Φ_{OC}] parametresi ile başlangıç akılar tanımlanır. Transformatörün her bir fazı için başlangıç akıları tanımlanır. Eğer özelleşen başlangıç akıları ve doymalı nüve parametreleri kontrol edilmiş ise bu parametre gözükür. Üç faz transformatör bloğunun sargı terminalleri arasındaki gerilim ölçümü seçilir. Üç faz transformatör bloğunun sargıları içinden geçen akımın ölçülmesi için sargı akımları seçilir Akıyı (V.s) ve mıknatıs akımı (sadece

ÜÇ FAZ TRANSFORMATÖR (ÜÇ SARGILI) BLOK PARAMETRELERİ

Üç Faz Transformatör (Üç Sargılı)

Üç adet tek faz transformatör kullanarak bir üç faz transformatör oluşturulur. Yıldız bağlantının nötr noktasına girmek istediğinizde sargı bağlantısını "Yn" biçiminde kur

Parametreler

Faz konfigürasyonu:

Nominal güç ve frekans [Pn(VA), fn(Hz)]

1.sargının [AB-C] bağlantısı:

Sargı parametreleri [V1 faz-faz (Vrms), R1(pu), L1(pu)]

2.sargının [abc-2] bağlantısı:

Sargı parametreleri [V2 faz-faz (Vrms), R2(pu), L2(pu)]

3.sargının [abc-3] bağlantısı:

Sargı parametreleri [V3 faz-faz (Vrms), R3(pu), L3(pu)]

☒ Doymalı nüve

Mıknatıslama reaktansı Lm (pu)

Doyma karakteristiği (pu)[I1-2; I2-2;...]

☒ Bağlantı akıları belirlenir:

[±0A ±0B ±0C] (pu)

Ölçümler:

Tamam İptal Yardım Uygula

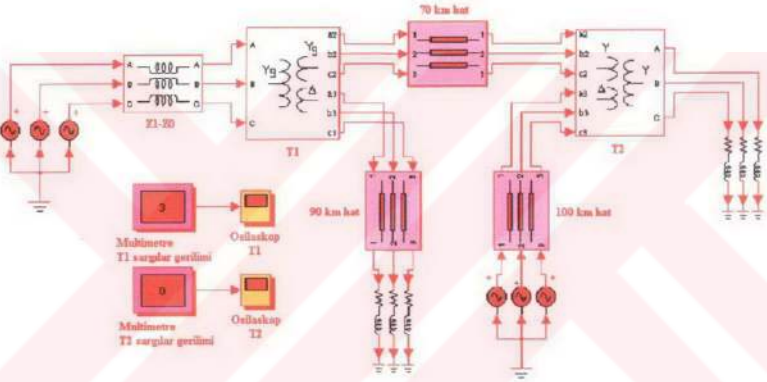
Şekil 8.16 Uygulama paneli

doymalı transformatörler için akılar ve mıknatıs akımları seçilir) ve akıları ölçmek için tam ölçüm (V,I,Akı) seçilir. Simulasyon boyunca seçilmiş ölçümleri görüntülemek için, modelde

bir multimedre bloğu yerleştirilir. Bu multimedre bloğunun mevcut ölçüm listesinde bir etiket ve bir blok ismi ile ölçümler sınıflandırılır. Eğer 1. sargı ABC bağlantı parametreleri Y, Y_n veya Y_g şeklinde olursa, etiketler çizelge 8.2 verildiği gibi olacaktır. Eğer 1. sargı ABC bağlantı parametresi üçgen (D11) veya üçgen (D1)¹ şeklinde olursa, etiketler çizelge 8.3 verildiği gibi olacaktır. Aynı etiketler 2. sargı (abc) bağlantı parametresi içinde uygulanır.

8.7.1 Uygulama

Aşağıda verilen uygulama devresi için, simüle edilen doymalı nüve bulunan Üç-Faz Transformatör bloğu kullanılır. Her iki sargı yıldız topraklı şeklinde bağlanır. Her iki sargının nötür noktaları toprağa bağlanır.

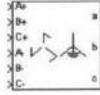


Şekil 8.17 Simülasyon devresi

8.8 Zig-Zag Faz Kaymah Üç Faz Transformatör Simülasyonu

Zigzag faz kaymalı transformatör bloğu ile primeri zigzag, sekonderi farklı şekilde bağlanan bir üç-faz transformatör oluşturulmuştur. Bu modelde üç adet tek faz veya üç sargılı transformatörler kullanılır. Tek faz transformatörlerin primer sargıları zigzag şeklinde bağlanır. Sekonder sargıları yıldız, nötürlü yıldız, yıldız topraklı, üçgen (D11), üçgen yıldızdan 30° ileri, üçgen (D1), üçgen yıldızdan 30° geride şeklinde bağlanabilir. Seçilen bağlantı şekli ve bloğunun kurulumu otomatik olarak güncelleşir. Eğer sargı için nötürlü yıldız bağlantı seçilirse, N bir giriş portu bu bloğa eklenir. Zigzag bağlantı şekil 8.18 de

gösterilmiştir. Aktif hale geldiğinde doymalı transformatör bloğu için doyma karakteristiği aynıdır.



Şekil 8.18 Zig-zag gösterim

BLOK PARAMETRELER: ZİG - ZAG FAZ KAYMALI TRANSFORMATÖR

Zig-Zag Faz Kaymalı Transformatör

Üç adet tek faz üç sargılı transformatör kullanılarak bir üç faz transformatör oluşturulur. Primer (1. ve 2. sargı) zig-zag, Sekonder (3.sargı) yıldız veya üçgen bağlanır.

Parametreler

Nominal güç ve frekans [Pa(VA), fa(Hz)] :

[100e6 50]

Primer (zig-zag) nominal gerilim Vp[Vrms faz-faz]:

10e3

Sekonder nominal gerilim_faz kaymalı [V3(Vrms faz-faz,Ø)]:

[30e3 +15]

Sekonder sargı [abc] bağlantısı Yg ▼

1. sargı [zig-zag]: [R1 (pu) L1 (pu)]:

[0.0032 0.08]

2. sargı [zig-zag]: [R2 (pu) L2 (pu)]:

[0.002 0.08]

3. sargı [sekonder]: [R3 (pu) L3 (pu)]:

[0.002 0.08]

☒ Doymalı nüve

Magnetalama direnci Rm (pu)

500

Doyma karakteristiği (pu)[I1 Ø1; I2 Ø2;...]

[0,0 ; 0.0024,1.2 ; 1.0,1.52]

Ölçümler Hiçbiri ▼

Tamam İptal Yardım Uygula

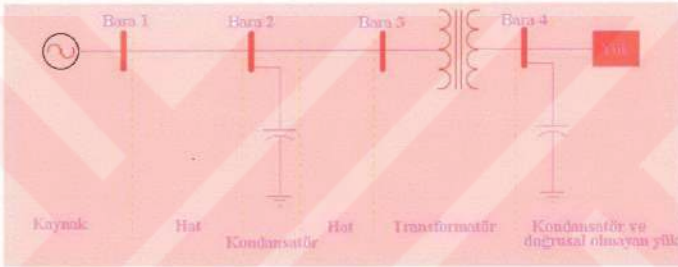
Şekil 8.19 Uygulama paneli

8.9 Harmonik Analizler için Geliştirilen Bir Uygulama Programı

Microsoft programlarını ve Microsoft Visual C++ dilini kullanarak windows ortamında bir yazılım geliştirilmiştir. Bu uygulamada hem nümerik hem de grafik veriler gösterilmiştir. Microsoft Visual C++ dilinin gelişmiş özelliklerini kullanarak geliştirilen bu programla güç sistemlerindeki harmonikler en iyi bir şekilde anlaşılmıştır ve harmonik dalga şekillerinin gösterilmesi sağlanmıştır.

Yazılım programı için analitik mantık birçok elemanı bulunan güç sistem şebekesi için geliştirilmiştir. Bu sistem bir transformatör, iki kondansatör, hat, besleme kaynağı ve doğrusal olmayan yüklerden oluşur.

Çalışmada kullanılan sistemin tek hat şeması şekil 8.20 de gösterilmiştir.



Şekil 8.20 Çalışmada kullanılan sistemin tek hat şeması

Güç Kaynağı:

Positif Sıralı: R= 0 p.u X= 0 p.u		Sıfır Sıralı: R= 0 p.u X= 0 p.u	
Per-unit reaktanslar (aşağıdaki kVA ve kV değerleri): Baz kVA: 100000 Baz kV: 0 (faz-faz)			
Tamam		İptal	

Şekil 8.21 Güç kaynağı paneli



Şekil 8.22 Sistem cevabını bulmada kullanılan akış şeması

Hat:

Periüf Sırahı: $R=$ 0 p.u $X=$ 0 p.u	Sıfır Sırahı: $R=$ 0 p.u $X=$ 0 p.u
---	--

Per unit reaktanslar (anma kVA ve kV değerleri):

Baz kVA:
 Baz kV: (faz-faz)

Şekil 8.23 Hat veri paneli

Kapasitör:

Kapasitör Oranları:

kVAR anma değeri

kV anma değeri (faz-faz)

Şekil 8.24 Şönt kondansatör veri paneli.

Transformatör Verileri :

Transformatör Oranları :

Nominal YG kV: (faz-faz) Nominal kVA:

Nominal AG kV: (faz-faz) Ara uç gerilimi kV : (faz-faz)
(YG tarafına (kV) ara uç giriniz)

(Pozitif sıralı empedans).

Z %: X/R Oranı:

AG Bağlantısı

☐ Yıldız

☐ Yıldıztopraklı

☐ Üçgen

YG Bağlantısı

☐ Yıldız

☐ Yıldıztopraklı

☐ Üçgen

Toprak Empedansı

YG (R ve X ohm)

R=

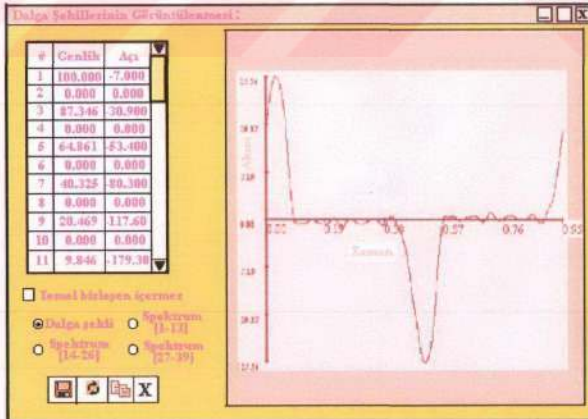
X=

AG (R ve X ohm)

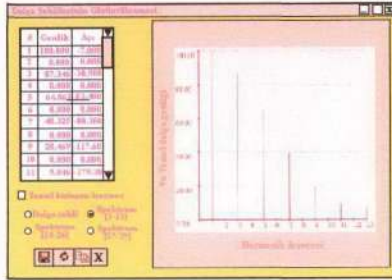
R=

X=

Şekil 8.25 Transformör veri giriş paneli.



Şekil 8.26 Tek faz güç kaynağının harmonik verileri ve dalgı şekilleri



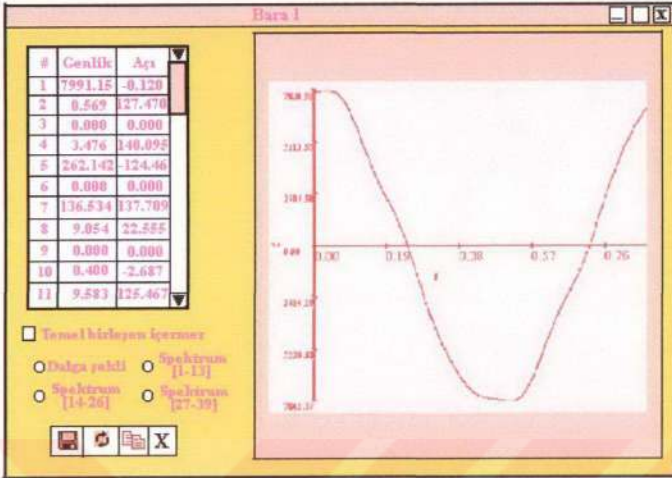
Şekil 8.27 Tek faz güç kaynağının harmonik verileri ve spektrumları

Çizelge 8.4 Birinci durum için sistem verileri

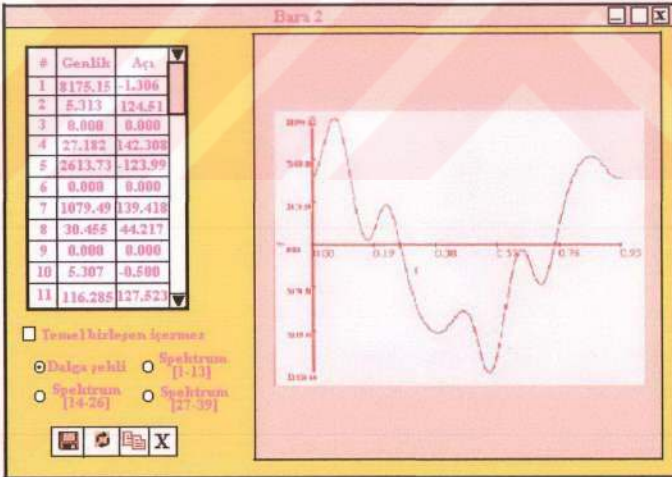
Eleman İsmi	Veriler
Güç kaynağı	1. Üç faz görünür güç (kVA); 200.000 kVA 2. Faz-faz gerilimi (kV) ; 13,7 kV 3. per-ünit pozitif sıralı ; 0,05+j1,0 4. per-ünit sıfır sıralı ; 0,0395+j0,895
Bara 1 ve bara 2 arası hat	1. Üç faz görünür güç (kVA); 100.000 kVA 2. Faz-faz gerilimi (kV) ; 13,7 kV 3. per-ünit pozitif sıralı ; 0,786+j4,206 4. per-ünit sıfır sıralı ; 0,556+j4,2165
Bara 2 de şönt kondansatör	1. Üç faz reaktif güç (kVar) ; 720 kVar 2. Faz-faz gerilimi (kV) ; 13,7 kV
Bara 2 ve bara 3 arası hat	1. Üç faz görünür güç (kVA); 100.000 kVA 2. Faz-faz gerilimi (kV) ; 13,7 kV 3. per-ünit pozitif sıralı ; 0,666+j4,206 4. per-ünit sıfır sıralı ; 0,557+j4,217
Transformatör	1. Üç faz görünür güç (kVA) ; 1500 kVA 2. Faz-faz gerilimi (y.g. tarafı); 13,7 kV 3. Faz-faz gerilimi (a.g. tarafı); 0,49 kV 4. Yüzde empedans (%Z) ; %5 5. X/R oranı ; 6 6. Δ-Y bağlı 7. y.g ve a.g tarafı topraklama direnci ve reaktansı sıfır ohm
Bara 4 de şönt kondansatör	1. Üç faz reaktif güç (kVar) ; 720 kVar 2. Faz-faz gerilimi (kV) ; 0,49 kV
Yük 1	1. Üç faz görünür güç (kVA) ; 150 kVA 2. Faz-faz gerilimi (y.g. tarafı); 0,49 kV 3. Güç faktörü ; 0,70 geri 4. Harmonik (h=1 den 50 ye kadar)
Yük 2	1. Üç faz görünür güç (kVA) ; 25 kVA 2. Faz-faz gerilimi (y.g. tarafı); 0,49 kV 3. Güç faktörü ; 0,70 geri 4. Harmonik (h=1 den 50 ye kadar)

Çizelge 8.5 Birinci durumda elde edilen sonuçlar

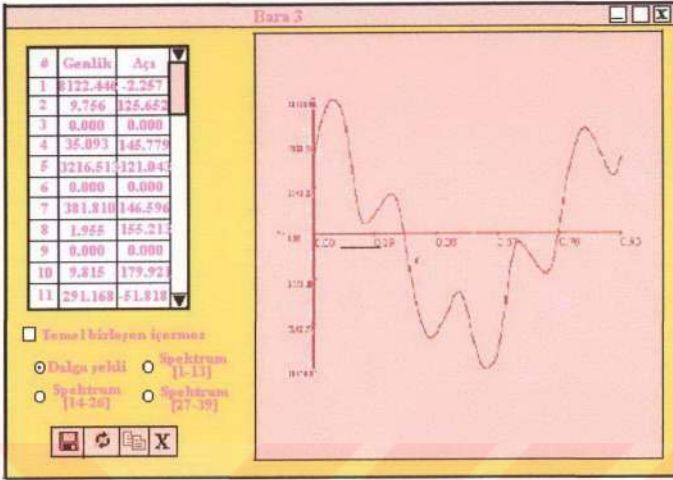
Har	Bara 1		Bara 2		Bara 3		Bara 4	
	Büyüklik	Açı	Büyüklik	Açı	Büyüklik	Açı	Büyüklik	Açı
1	7991	-0.1	8174	-1.30	8172	-2.2	281.3	-32.8
7	0.5	127	5	123	9	125	0.4	155
3	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00	0.45	1.83
4	3	146	23	130	35	145	1	117
5	298	-124	2858	-128	2906	-121	126	-89
6	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00	0.36	34.95
7	94	141	885	132	881	146	2	160
8	9	22	17	55	19	55	0.39	-103
9	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00	2.78	134
10	0.4	-2.6	12	6	14	7	1	153
11	19	125	196	132	198	132	24	-19
12	0.0	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00	3.10	-175
13	8	25	70	31	74	35	14	-178
14	0.02	-97	0.3	-92	1.2	-92	0.09	118
15	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00	3.13	52
16	0.02	155	0.	165	1	169	0.09	-46.
17	0.79	-162.63	8.73	-141.85	10.15	-142.76	3.59	55
18	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00	0.24	29.36
19	0.3	139.	4.	140	5	142	1.6	-71
20	0.01	75	0.2	79.5	1.8	80.	0.1	-74
21	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00	0.53	159.82
22	0.01	83	0.17	87	0.2	88	0.09	-125
23	0.03	127	0.42	122	1.05	122	0.31	-30
24	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00	0.08	-167
25	0.02	64	0.3	70	0.50	70	0.30	-142
26	0.01	-110.	0.08	-110	0.12	-110	0.08	102
27	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00	0.15	7
28	0.00	-154.	0.01	-160	0.02	-160	0.02	-9
29	0.01	-124	0.12	-121	0.24	-120	0.16	90
30	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00	0.01	11
31	0.01	96	0.16	97.	0.28	95	0.26	-117
32	0.00	112	0.02	117	0.01	116	0.02	-36
33	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00	0.04	170
34	0.00	62	0.02	62	0.02	62	0.03	-150
35	0.00	-151	0.03	-155	0.03	-155	0.06	56
36	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00	0.01	109
37	0.00	-22	0.06	-25	0.10	-25	0.13	126
38	0.00	-95	0.01	-100	0.01	-98	0.02	112
39	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00	0.03	-7
41	0.00	-174	0.02	-175	0.02	-175	0.05	36
42	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00	0.01	-31
43	0.00	172	0.03	175	0.03	175	0.07	-37
44	0.00	107	0.01	107	0.00	109	0.01	-44
45	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00	0.03	113
46	0.00	-35	0.00	-14	0.01	-11	0.01	138
47	0.00	57	0.01	57	0.01	56	0.03	-95
49	0.00	84	0.01	85	0.01	85	0.03	-127
50	0.00	-145	0.00	-145	0.01	-145	0.02	65



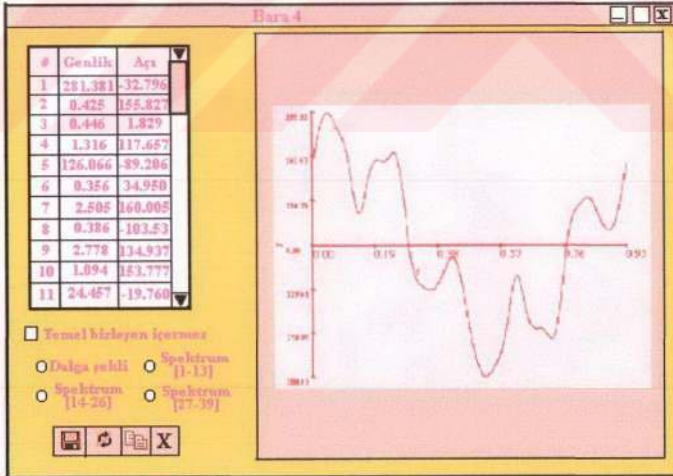
Şekil 8.28 Bara 1 için harmonik gerilim verileri ve dalga şekli



Şekil 8.29 Bara 2 için harmonik gerilim verileri ve dalga şekli



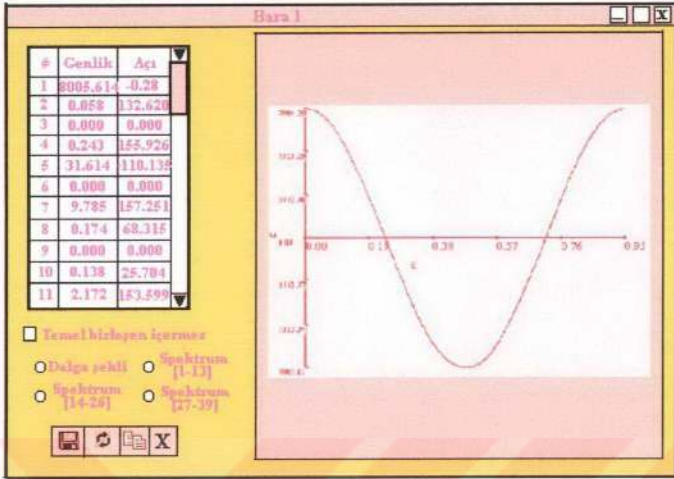
Şekil 8.30 Bara 3 için harmonik gerilim verileri ve dalga şekli



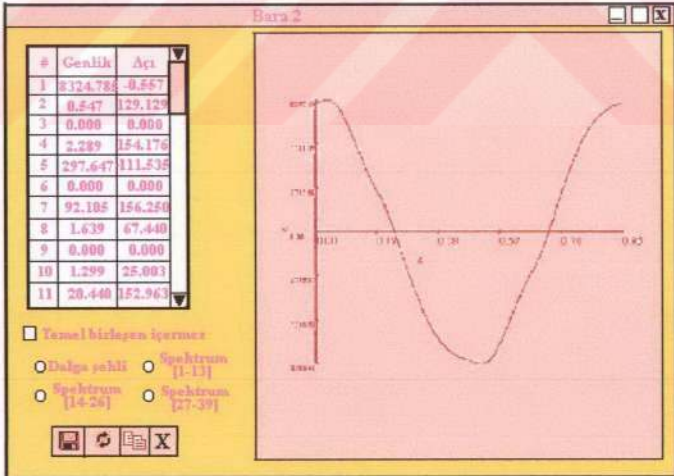
Şekil 8.31 Bara 4 için harmonik gerilim verileri ve dalga şekli

Çizelge 8.6 İkinci durumda elde edilen sonuçlar

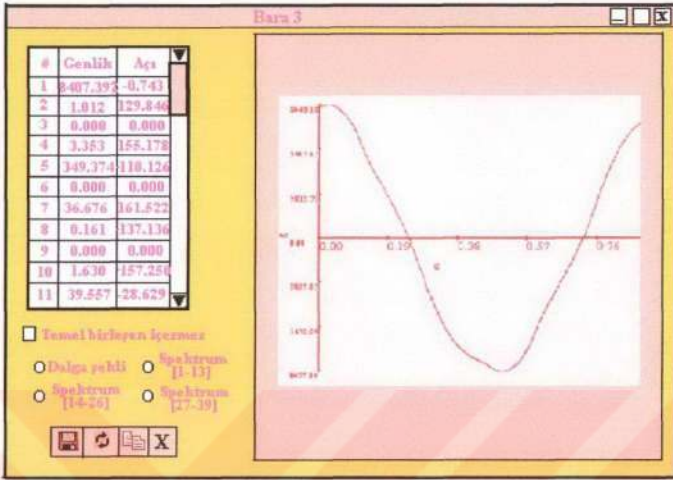
Har #	Bara 1		Bara 2		Bara 3		Bara 4	
	Büyüklik	Açı	Büyüklik	Açı	Büyüklik	Açı	Büyüklik	Açı
1	8004	-0	8318	-0.	8395	-0.7	293	-30
2	0.05	132	0.5	129	1.01	129	0.04	159
3	0.00	-82	0.00	-84	0.00	-83	0.05	7
4	0.2	156	2	154	3.32	155	0.1	125
5	31	-110	298	-111	350.18	-110	13.21	-79
6	0.00	141	0.00	139	0.00	142	0.04	46.
7	9	157	91	156	36.62	161.	0.2	173
8	0.1	68	1	67	0.16	-137.	0.04	-87
9	0.00	-130	0.00	-131	0.00	44	0.2	152.
10	0.1	25	1.	25.	1.63	-157	0.1	173
11	2.	153	20	153	39.52	-28	2.5	1.
12	0.00	136	0.00	136.	0.00	-45	0.3	-151
13	0.7	58	7	57.	25.25	-123	1.5	-153
14	0.00	-62	0.04	-63.	0.16	115	0.01	145
15	0.00	170	0.00	170	0.00	-10	0.3	80
16	0.00	-164	0.02	-164	0.15	14	0.01	-15
17	0.09	-107	0.8	-108	6.28	71	0.3	101
18	0.00	154	0.00	154	0.00	-25	0.02	64
19	0.03	176	0.3	176	3.09	-4.	0.1	-34
20	0.00	115	0.02	114	0.21	-65	0.01	-35
21	0.00	-68	0.00	-68	0.00	110	0.06	-159
22	0.00	128	0.01	128	0.18	-52	0.01	-82
23	0.00	164	0.04	164	0.59	-15	0.03	14
24	0.00	-29	0.00	-30	0.00	149	0.01	-120
25	0.00	116	0.03	116	0.56	-63	0.03	-93
26	0.00	-56.	0.01	-56	0.14	122	0.01	152
27	0.00	151	0.00	151	0.00	-29	0.02	60
28	0.00	-104	0.00	-104	0.04	74	0.00	44
29	0.00	-62	0.01	-62	0.31	116	0.02	146
30	0.00	160	0.00	159	0.00	-20	0.00	69
31	0.00	153	0.02	153	0.48	-27	0.03	-57
32	0.00	176	0.00	176	0.04	-3	0.00	26
33	0.00	-34	0.00	-34	0.00	145	0.00	-124
34	0.00	126	0.00	126	0.05	-53	0.00	-83
35	0.00	-84	0.00	-85	0.10	94	0.01	124



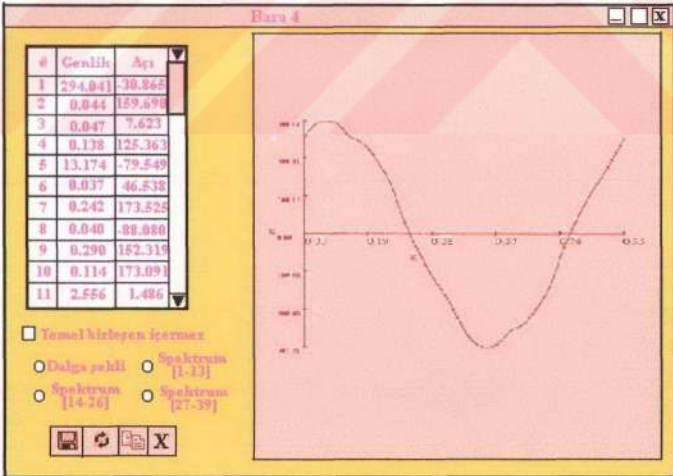
Şekil 8.32 Bara 1 için harmonik gerilim verileri ve dalga şekli



Şekil 8.33 Bara 2 için harmonik gerilim verileri ve dalga şekli



Şekil 8.34 Bara 3 için harmonik gerilim verileri ve dalga şekli



Şekil 8.35 Bara 4 için harmonik gerilim verileri ve dalga şekli

9. SONUÇLAR

Enerji tesislerinde en önemli harmonik üreten eleman transformatörler, bobinler v.b gibi demir çekirdeği bulunan sargılardır. Bunların harmonik üretme özelliği, demir çekirdeğin mıknatıslama karakteristiğinin doğrusal olmamasından ileri geldiği görülmüştür. Üç fazlı transformatörler şebekeden sinüs şeklinde bir gerilim ile beslendiklerinde, şebekeden bir mıknatıslama akımı çeker. Demir çekirdeğin manyetik karakteristiği doğrusal olmadığından, bu mıknatıslama akımı sinüzoidal değildir. Doyma arttıkça harmonik genliklerinin büyüdüğü görülmüştür. Harmonik akımları transformatörün primer reaktansı üzerinden geçtiğinden, bunlar üzerinde harmonikli gerilim düşümleri meydana gelir. Mıknatıslama akımının harmoniklerinin tepe değerleri, temel mıknatıslama akımının tepe değerlerinden hayli küçük olduğu görülmüştür. Transformatörlerin mıknatıslama akımları da, nominal akımların %1-%10'u kadardır. Buna rağmen seri bağlı generatör, hat ve transformatör reaktansları frekansla orantılı olarak arttıklarından, özellikle düşük yüklerde yüksek harmonik akımlarının bunlar üzerinde sebep oldukları reaktif gerilim düşümleri büyük değerler alır. Mıknatıslama akımındaki harmoniklerin şebekeye geçip geçmemesi transformatör sargılarının bağlanış şekline, primerdeki yıldız bağlı sargılarda yıldız noktasının ve şebekenin nötr hattına bağlanıp bağlanmamasına, transformatörde mıknatıslamanın serbest veya zorunlu olmasına bağlı olduğu görülmüştür. Akım şiddeti bakımından en önemli harmonik üçüncü harmoniktir.

Akım ve gerilim harmoniklerin etkileri, paralel ve seri rezonans dolayısıyla harmonik seviyelerinin yükselmesi, elektrik üretim iletim ve tüketiminde verimin azalması, elektrik tesislerinde yalıtımı zayıflattığı için tesis elemanlarının ömürlerinin azalması, tesislerde arızalar meydana gelmesidir. Elektrik tesislerinde güç faktörünü düzeltmek amacı ile yerleştirilen kapasiteler, seri yada paralel rezonans olayları dolayısıyla yüksek akımlara maruz kalarak zarar görür. Paralel rezonans durumunda, rezonans frekansında harmonik üreten kaynak yüksek değerde bir empedansla karşılaşır. Harmonik kaynakları çoğunlukla akım kaynağı olarak modellendiğinde, paralel kollardan akan harmonik akımlarında ve paralel kol gerilimlerinde de yükselme olduğu görülmüştür. Paralel rezonans değişik şekillerde meydana gelir. İlk akla gelen şekli, bir kapasitenin harmonik üreten kaynakla aynı baraya bağlanması ile ortaya çıkar. Bu durumda, harmonik kaynağı ile kapasite arasında bir paralel rezonans meydana gelir. Seri rezonans etkisi, yüke paralel olarak bağlanan kapasitenin empedansı yüksek frekanslarda çok düşeceğinden dolayı, omik yük gözönüne alınmayabilir. Transformatörün selfi ile güç faktörünü düzeltmek amacı ile yerleştirilen kapasite arasında

seri rezonans meydana gelebilir. Seri rezonans devresinde yüksek değerde kapasite akımları fakat düşük harmonik gerilimleri gözlenmiştir.

Harmonik akımları yüzünden makinalar ve transformatörler ısınır. Harmonik akımları çeşitli devre empedansları üzerinde ilave gerilim düşümlerine neden olur. Harmonik akımlarının frekansları, normal şebeke frekansı 50 Hz'in katlarına eşit olduğundan, bu akımlar karşısında generatör, transformatör ve hat reaktansları üzerinde meydana gelen gerilim düşümleri de harmonik frekansları ile orantılı olarak artar ve sonuç olarak gerilim dalga şekli bozulur. Kablo ile yapılan iletim sistemlerinde ise harmonik gerilimleri, tepe değerlerine bağlı olarak, kabloda dielektrik zorlanmayı artırıcı etki yaparlar. Bu yüzden kablounun ömrü azalır. Hata sayısı arttıkça onarım masrafları da artar. Sinüs şeklindeki gerilim eğrisine eklenen gerilim harmoniklerinin meydana getirdiği iğne ucu şeklinde sivri, çok kısa süreli ani gerilim yükselmeleri, mesela gerilim rezonansı gibi hallerde, transformatör sargılarının izolasyonu ve kondansatörlerin di-elektrik maddesi için büyük bir tehlike teşkil eder ve hatta izolasyonda delinmeye yol açabilir. Normal frekanslı gerilim üzerine bindirilmiş olan harmonik gerilimlerinin kısa süreli, iğne şeklinde ani yükselen uçları, izolatörlerde olduğu gibi yarı iletkenlerin de delinmesine sebep olur.

Transformatörlerde, harmonik gerilimlerinin histerizis ve girdap akımlarını artırarak kayıpları artırdığı ve yalıtımı zorladığı görülmüştür. Harmonik akımları bakır kayıplarını da artırır. Bu durum, özellikle dönüştürücü transformatörlerinde önem kazanır. Zira, harmonikleri süzmek için kullanılan filtreler alternatif akım tarafına bağlanır. Dolayısıyla, harmonik generatörleri olarak kabul edebileceğimiz doğrultucu devrelerin ürettiği harmonikler, filtreye girmeden önce dönüştürücü transformatörün üzerinden akar. Bu yüzden, transformatörün gücü artırılmalıdır. Bu ise transformatörün maliyetini artırır. Ayrıca çevirici transformatör tankı üzerinde ısınmış noktalar meydana gelir.

Güç transformatörlerinde üçlü harmonikler, üçgen sargı içinde dolaşır. Eğer transformatör tasarımında bu etki düşünülmemiş ise, bu etki önemsenmeli ve tedbir alınmalıdır. Eğer transformatör asimetrik bir yük ile yüklenirse, yük akımının doğru akım bileşeni içermesi durumunda transformatörün manyetik devresi doymaya gidecek ve uyarma akımının tüm harmonik bileşen seviyeleri artacaktır. Şebeke ve kapasite arasında meydana gelen seri ve paralel rezonans yüzünden oluşan aşırı gerilim ve yüksek akım harmonikleri kapasiteleri ısıtır ve hatta tahrip ederler.

Harmonikler rölelerin çalışma karakteristiklerini bozma veya tahrip etme özelliğine sahiptir.

Dijital röleler ve yazılımları, örneklenmiş data bilgisine ve sıfır geçişlerine çok duyarlıdır. Bu yüzden harmonik etkileri röleleri hata yapmaya meyilli bir duruma sokar. Harmoniğin bozucu özelliği dolayısıyla belirtilen olumsuz etki çoğu durumda röle çalışma karakteristiğini önemli miktarda değiştirmemekte ve ciddi bir problem meydana gelmemektedir. Harmonik gerilim seviyesinin %20'den az olduğu durumlarda herhangi bir olumsuz sonuç alınmamıştır. Fakat, gelecekte güçlü dönüştürücü varlığı dolayısıyla bu durumun değişmesi muhtemel görülmektedir. Rölelerin koruma fonksiyonları çoğunlukla ana harmonik akım veya gerilim değeri gözelttilerek veya hata oluştuğunda diğer harmoniklerin filtre edildiği kabulü ile ana harmonik dışındaki harmoniklerin ihmal edildiği bir sisteme göre gerçekleştirilir. Bu kabul, özellikle aşırı akım korumasında kullanılan elektromagnetik röleler yapıları gereği yüksek dereceden harmoniklere karşı daha az duyarlıdır. Empedans ölçümünde harmonik etkileri oldukça önemlidir. Mesafe röleleri ana frekansa tekabül eden empedans değerinin ölçülmesi üzerine bina edilen çalışma ilkesine sahiptir. Hata meydana geldiğinde, özellikle üçüncü harmonik etkisi ile ölçüm hatası meydana gelebilir. Direnç üzerinden meydana gelen kısa devrelerde akım yüksek değerlerde bir direnç üzerinden akacağı için yüksek harmonik bileşenleri ortaya çıkacaktır. Bu durumda, büyük bir olasılıkla rölenin görev yapmasına imkan olmaz. Eğer hata bir direnç üzerinden olmayıp metalik kısa devre ise akım ve gerilim ana harmonikleri önem kazanır. Akım transformatörlerinde meydana gelen doyma dolayısıyla akım trafosu sekonder akımında bozulma meydana gelir. Sekonder sargıda yüksek değerlerde bir elektromotor kuvvet oluştuğunda, röle transformatörünün uyarma empedansından akan doğrusal olmayan akım, tek mertebeden harmonik distorsiyona neden olur. Çekirdek doyuma ulaştığında, transformatör geriliminin ikinci ve üçüncü harmonik bileşenleri olacaktır. Yukarıda bahsedilen tasarım problemlerinden sistem gereksinimlerini karşılayan doğru cihaz seçimi yapılarak kaçınmak mümkündür. Özellikle dijital koruma sistemlerine sahip mesafe koruma esaslı sistemlerde, akım ve gerilim dalga şekillerinin filtre edilmesi oldukça önemlidir.

Normal sistem koşullarında koruyucu cihazların duyarsızlığı, bizlere hata koşulları dışında güç sistemindeki harmoniklerin herhangi bir probleme sebep olmadığını gösterir. Güç transformatörlerinde pratikte transformatörün devreye girmesi sırasında, mıknatıslama akımının ilk andaki değeri yüksek harmonik bileşenlere sahip olduğu görülmüştür. Bu bileşen değerleri ortaya çıktığında, transformatörü koruyan sistemler devreye girerek devre kesicisini açmasını engellemiştir.

Tezin birinci bölümünde, üç faz transformatörlerde harmoniklerin etkileri üzerinde durulmuş

ve harmoniklerin önlenmesi için alçak nüve akı yoğunluğu kullanılarak, hatlardaki üçlü harmonik akımları ve gerilimleri transformatörün yıldız veya üçgen bağlantıları kullanılarak, primer veya sekonder sargıda üçgen bağlantı kullanılarak, primer ve sekonder sargılara ek olarak transformatörlere üçgen şeklinde bağlı üçüncü bir sargı bağlayarak veya yıldız-üçgen topraklı transformatör kullanarak harmoniklerin önlenebileceği sonucu çıkarılmıştır.

Güç sistemlerinin harmonik analizinde, bütün elemanlar harmonik frekans domeninde gösterilmelidir. İkinci bölümde, doğrusal olmayan elemanlar konvolüsyon eşdeğer zaman domen çarpımları kullanılarak, harmonik domeninde direk olarak nasıl gösterileceği anlatılmıştır. Yöntem güç trafolarına uygulanarak incelenmiştir. Sistemde birçok harmonik üreten elemanlardan dolayı, güç sistem harmonik analizleri önemli hale gelmiştir. Bütün sistem elemanları harmonik frekans domen modellerine sahip olmalıdır. Doğrusal olmayan elemanların direk harmonik domeninde göstermek için, genel bir yöntem tanımlanmış ve transformatör modelleme metoduna uygulanmıştır.

Üç faz yük simülasyon akışı için üç faz transformatörlerin modellemeleri gereklidir. Üçüncü bölümde, üç faz transformatörlerin farklı bağlantı şekillerinde üç faz modelleri ve simetrik bileşen eşdeğer devreleri elde edilmiştir. Transformatörler bağlantı şekilleri tek faz bağlantısı, V-V bağlantısı, yıldız-üçgen bağlantısı, skot bağlantı, blank bağlantı ve değişik-köprü bağlantılardan oluşur. Özel bağlantılı transformatörlerin üç faz modelleri, fiziksel üç faz devreleri ve simetrik bileşen eşdeğer devreleri ile, sistemi besleyen trafo merkezleri açıkça ifade edilmiştir. Üç faz modeli, ilerde dengesiz sistemi bütünüyle analiz etmek için, üç faz yük akış programları ile birlikte oluşturulmuştur. Aynı zamanda, simetrik bileşen eşdeğer devre formüllerinin türetilmesi için kullanılmıştır. Trafo merkezlerinde kullanılan özel bağlı transformatörlerin farklı tipleri mevcuttur. Farklı bağlantılar dengesizlik üzerinde farklı etkilere sebep olur. Farklı özel bağlantılı transformatörler için dengesizlik karşılaştırmasında, üç faz yük akış programı ile yapılan bilgisayar simülasyonu çok etkili bir metot olmuştur. Özel bağlantılı transformatörlerin farklı bağlantı şekillerinde dengesizlik üzerindeki etkilerin karşılaştırmasını yapmak için, özel bağlantılı transformatörlerin dengesiz-tahmin etme formüllerinin simetrik bileşen eşdeğer devreleri ile ilişkisi çıkartılmıştır.

Dördüncü bölümde, nominal parametre temeline dayanan harmonik çalışmalar için transformatör modelleri verilmiştir. Simülasyon ve ölçümlerden elde edilen sonuçlar karşılaştırılmıştır. Duyarlılık çalışmaları, transformatör parametreleri değişirken akım ve gerilim harmoniklerin nasıl davrandığını incelemek için yapılmıştır. Dağıtım şebekelerinde harmonik çalışmalar için transformatör modelleri geliştirilmiştir. Modeller, 50 Hz parametre

bazında seçilmiştir. Sargıların ve nüvenin doğrusal olmayan etkilerine bağlı olan frekans incelenmiştir. Karşılıklı empedansların self empedansa oranla çok küçük olduğu görülmüştür. Buradan üç faz transformatörün üç adet bir fazlı transformatör gibi simüle edilebileceği sonucu çıkarılmıştır. Matris biçimi transformatörü ifade etmek için kısa devre empedansları elde edilmiştir. Modelleri geçerli kılmak için, farklı güç oranlarındaki transformatör ünitelerinde bir çok test yapılmıştır. Bir dc sürücüyü besleyen 500 kVA üç faz transformatör bulunan bir sistemde alan testi yapılmıştır.

Beşinci bölümde, üç faz transformatörlerin doyma karakteristiklerin analizi yapılmıştır. Üç fazlı trafolarla yığılma akımı dikkatle incelendiğinde, analitik çözümü türetmek veya değişik teknikler kullanılarak nümerik simülasyon yapmak için birçok yöntem kullanılmıştır. Özel durumlar incelenmiş ve sonlu farklar biçiminde dijital veri yakalama yöntemi kullanılarak yığılma akımının incelenmesi için bir model laboratuvarında geliştirilmiştir. Farklı üç faz yapıları ve farklı sargı bağlantı içeren üç fazlı trafolar farklı işletme şartları, anahtar kapama açıları ve güç faktörleri gözönüne alınarak incelenmiştir. Yükler ve güç faktörleri artırarak ana harmoniklerin önlenilebileceği sonucu çıkarılmıştır. Yığılma akımlarının daha detaylı olarak bilinmesi bu çalışma vasıtasıyla gerçekleşmiştir. Bu geliştirilen yöntem kullanılarak hazırlama zamanı ve alan testleri azaltılabilir.

Altıncı bölümde, üç faz transformatörlerin farklı bağlantı şekillerinde harmonik analizi için laboratuvar deneyleri yapılmıştır. Bu deneyler genel olarak iki kısımdan oluşmuştur. Birinci kısımda, histerisiz eğrisini ve uyarma akımının sinüzoidal olmayan dalga şeklini analiz ederek, tek faz transformatör nüvesinin doğrusal olmadığı ispatlanmıştır. İkinci kısımda ise, farklı üç faz transformatör akımı ve karşılıklı akı dalga şekilleri üzerinde farklı üç faz transformatör bağlantılarının etkileri incelenmiştir. Nötrü topraklı yıldız-yıldız bağlantıda gerilim saf temel gerilime yakın, akımın ise güçlü bir üçüncü harmoniği olduğu ve nötrü izoleli yıldız-yıldız bağlantıda akımın temel akıma yakın, gerilimin ise güçlü bir üçüncü harmoniği olduğu tesbit edilmiştir.

Yedinci bölümde, üç faz transformatör gurublarının manyetik doyma ile birlikte harmonik analizi gerekli algoritmalar kullanılarak geliştirilen bir bilgisayar simülasyonu ile yapılmıştır. Simülasyon sonuçlarının çok başarılı olduğu görülmüştür.

Sekizinci bölümde, geliştirilen algoritmalar ve modellerle bilgisayar simülasyonları oluşturulmuştur. Doymalı transformatör simülasyonu, üç faz sıralı analizör simülasyonu, fourier analizör simülasyonu, iki sargılı üç fazlı transformatör simülasyonu, üç sargılı üç faz

transformatör simülasyonu, zig-zag faz kaymalı üç faz transformatör simülasyonu oluşturulmuştur. Farklı bağlantı şekillerinde, üç sargılı üç adet faz transformatör kullanarak bir üç faz transformatör oluşturulmuştur. Farklı uygulama devrelerinin simulasyon sonuçları elde edilmiştir. Microsoft programlarını ve Microsoft Visual C++ dilini kullanarak windows ortamında bir yazılım geliştirilmiştir. Bu uygulamada hem nümerik hem de grafik veriler gösterilmiştir. Microsoft Visual C++ dilinin gelişmiş özelliklerini kullanarak geliştirilen bu programla güç sistemlerindeki harmonikler en iyi bir şekilde anlaşılmıştır ve harmonik dalga şekillerinin gösterilmesi sağlanmıştır. Farklı verilerde ve farklı çalışma durumlarında iyi sonuçlar elde edilmiştir.



KAYNAKLAR

Aaron, W. C., (1988), "Premium Service- an Answer to Power Quality", Southeastern Electric Exchange Annu. Conf., Bal Harbour, FL.

Acha, E. J., Arrillaga, Medina, A. ve Semlyen, A., (1989), "General Frame of Reference for Analysis of Harmonic Distortion in Systems with Multiple Transformer Nonlinearities", Proc. IEE, vol. 136, pt. C, no. 5, 271-278.

Acha, E., Semlyen, A., ve RajakóvN., (1990), " A Harmonic Domain Computational Package for Nolinear Problems and Its Application to Electric Arcs", IEEE Trans., PD-5,(3),1390-1397.

Addly, A., Girgis ve Bryan D. Guy, (1988), " A Computer Based Data Acquisition System for Teaching Transients and Switching Phenomena and Performing Research on Digital Protection ", IEEE Transactions on Power Systems, Vol. 3, No. 3, 1361-1368.

Adly, Girgis, A., Makram, E.B. ve Balwin, T.L., (1989), "Computer Based Harmonic Generator Facilities to Study Harmonic-related Problems", IEEE Transactions on Power Systems, PWRS Vol. 3, No. 1,301-309.

Adly, A. Girgis ve Daniel, T. L. Hwang, (1984), "Optimal Estimation of Voltage Phasors and Frequency Deciation using Linear and Non-Linear Kalman filtering: Theory and Limitation", IEEE Transsactions on Power Apparatus and Systems, Vol. PAS-103, No. 10, 2943-2951.

Adly A. Girgis, T. L., Baldwin, Makram, E. B. ve Hoke, S. Fortson, (1989), " Testing the Performance of Three-Phase Induction Watt-Hour Meters in the Presence of Harmonic Distortion", 1989 Rural Elecktric Power Conference.

Adly, A., (1990), "Evaluation of Temperature Rise of Distribution Transformers in the Presence of Harmonics and Distortion", Electric Power Research Vol 20, No.1, 15-22

Alexandrow, N., (1987), "Amorphous Alloys for Distribution Transformers: Design Considerations and Economic Impact ", IEEE Transactions on Power Delivery Vol. PWRD-2, No. 2, 420-424,

Allan G., (1991), "Electrical Transients in Power Systems", John Wiley & Sons Inc. , New York.

Alan, J., (1991), "Harmonic Load Losses in HVDC Converter Transformers", IEEE Transactions On Power Delivery, Vol:6, No:1, 153-157.

Alexander E., (1992), "The Effect of Nonsinusoidal Excitation on Eddy Current Losses in saturated Iran", IEEE Transactions On Power Delivery, Vol:3, No:2, April 1988 (662-671).

Aly, A. Mahmoud, (1984), " Power System Harmonics-An Assessment, " IEEE Tutorial Course on Power System Harmonics", 1-8.

Anderson, P.M., ve Fouad, A.A., (1997), "Power System Control and Stability", Iowa State University Press, Ames, Iowa, USA).

Anderson, O., (1997), "Large Transformers for Power Electronic Loads", IEEE transactions on power delivery, vol 12, no.4, 1532-1537

Arkadan, A.A., (1992), , "Finite Element Modelling of a Transformer Feeding a Rectifier Load: the Coupled Power Electronics and Nonlinear Magnetic Field Problem", IEEE Transactions on Magnetics, Vol. 27, No. 6, 5217-5219.

Arkadan, A.A., (1992) "Three-Dimensional Nonlinear Finite Element Modelling of a Voltage Source Excited Transformer Feeding a Rectifier Load ", IEEE Transactions on Magnetics, Vol. 28, No. 5, 2265-2267.

Arrillage, J., Bradley, D.A. ve Bodger P.S., (1985), "Power System Harmonics", John Wiley and Sons Inc.

Arsenau, R., (1995), -" A Survey of North American Electric Utility Concerns Regarding Nonsinusoidal Waveforms ", IEEE Transactions on Power Delivery, Vol. 11, No. 1, 73-78.

Arsenau, R., (1996), " Practical Definitions for Powers in Systems with Nonsinusoidal Waveforms and Unbalanced Loads: A Discussion ", IEEE Transactions on Power Delivery, Vol. 11, No. 1, 79-101.

Arsenau, R., (1997), "Application of IEEE Standart 519-1992 Harmonic Limits for Revenue Billing Meters ", IEEE Transactions on Povver Delivery, Vol. 12, No. 1, 346-353.

Arturi, C. M., (1991), " Transient Simulation and Analysis of a Three-Phase Five-Limb Step-up Transformer Following an out-of phase Synchronization", IEEE Trans. on PWRD. Vol. 6, No. 1, 196-203.

Aquilino, J.M., (1983), " Report of Transformer Reliability Survey-Industrial Plants and Commercial Buildings ", IEEE Transactions on Industry Applications, Vol IA-19 No:5, 858-866

Astengo, G., Rossi, C. ve Sciutto, G. Single, (1989), "Phase 25 kV Electrification on Sardinia Railway :Some Particular Problems Related to an Electrified Railway Located in an Island", IEE Conference Publication No. 312, International Conference on Main Line Railway Elektrification, 178-181.

ATP Rule Book, (1987), Leuven EMTP Center (LEC), Section XIX-g, Revision

Badawy, E. H. ve Youssef, R. D., (1983), " Representation of Transformer Saturation", Electric Power Systems Research, Vol. 6, No. 4, 301-304.

Baghzouz, Y., Gong, X.D., (1992), " Voltage-Dependent Model for Teaching Transformer Core Nonlinearity ", IEEE Transactions on Power Systems, Vol. 8, No. 2, 746-752.

Bejot, J.P., (1992), " Transformer Behaviour in Disturbed Power Systems ", GEC Alstom Technical Review, No: 9, 3-10.

Barker, P.P, (1994), " Power Quality Monitoring of a Distribution System", Transactions on Power Delivery, Vol. 9, No. 2, 1136-1142.

Blackburn, J. L., (1987), "Protective Relaying Principles and Applications", Marcel Dekker Inc. New York, U.S.A.

Bickford, J. P. ve Eaton, A. G., (1986), " Transient Overvoltages on Power Systems", IEE Proc. Vol. 133, Pt. C, No. 4, 201-225.

Bishop, M.T., (1991), PC-Controlled Hand-Held Meter Measures Power System.

Bonner, A., (1996), "Modeling and Simulation of the Propagation of Harmonics in Electric Power Networks", IEEE, transactions on power delivery, Vol:11, No:1, 466-474.

Bishop, M.T., (1991), " PC-Controlled Hand-Held Meter Measures Power System Harmonics ", IEEE Computer Applications in Power, 17-21.

Bishop, M.T., Gilker, C., (1992), " Portable Harmonics Meter Evaluates Transformer Heating", IEEE Computer Applications in Power, 41-44.

Bishop, M.T., Baranowski, J.F., Heath, D., Benna, S.J., (1996), " Evaluating Harmonic-Induced Transformer Heating ", IEEE Transactions on Power Delivery, Vol. 11, No. 1, 305-310.

Bonner, A., (1996), " Modelling and Simulation of the Propagation of Harmonics in Electric Power Networks ", Part I: Concepts, Models, and Simulation Techniques, IEEE Transactions on Power Delivery, Vol. 11, No. 1, 452-465, Part II: Sample Systems and Examples, IEEE Transactions on Power Delivery, Vol. 11, No. 1, 465-474.

Brandwajn, V., Dommel, H.W. ve Dommel, I.I., (1982), "Matrix Representation of Three Phase n-Winding Transformers for Steady-state and Transient Studies", IEEE Trans. on Power A Syst., vol. PAS-101, 1369-1378.

Bronislaw Tomczuk, "Analysis of 3-D Magnetic Fields in High Leakage Reactance Transformers" IEEE Transactions On Magnetics, Vol:30, No:5, September 1994, (2734,2738).

Bronzeado, H. S., (1993), " Transformer Interaction Caused by Inrush Current", MSc Thesis, University of Aberdeen (Scotland).

Bronzeado, H. S. ve Acamini, R., (1994), " Sympathetic Interaction Between Power Transformers", Proc. Of 29th Universities Power Engineering Conference – UPEC, Vol. 1 236-239, University College Galway, Ireland.

Basak, A. ve Qader, A.A.A., (1983), "Fundamental and Harmonic Flux Behaviour in a 100kVA Distribution Transformer Core", IEEE Trans. On Mag, Vol:Mag-19, No:5, 2100-2102.

Burke, J. J. ve Feltes, J. W., (1991), 'Railroad Elektrification on Utility Systems', EPRT Report EL-3001.

C57 Collection, (1991), Distribution Power and Regulating Transformers, IEEE Press.

Cameron, M.M., (1993), " Trends in Power Factor Correction with Harmonic Filtering", IEEE Transactions on Industry Applications, Vol. 29, No. 17 60-65.

Canadian Electrical Association Project, (1993), RP-070-D-165, "Power Line Carrier on Distribution Systems", Ontario Hydro's Research.

Chai, S., (1996), "Polyphase Transformer Arrangements with Reduced kVA Capacities for Harmonic Current Reduction in Rectifier- Type Utility Interface", IEEE Transactions on power electronics, vol 11, no.5, 680-690

Chen, B.K., (1996), " A Three-Phase Models of Special Connected Transformers", IEEE Transactions on Power Delivery, Vol. 11, No. 1, 323-331

Chen, X., (1996), " A Three-Phase Multi-Legged Transformer Model in ATP Using the Directly-Formed Inverse Inductance Matrix ", IEEE Transactions on Power Delivery, Vol. 11, No. 2, 1554-1562.

Chua, L.O., Stromsmoe, K.A, (1970), " Lumped-Circuit Models for Nonlinear Inductors Exhibiting Hysteresis Loops ", IEEE Transactions on Circuit Theory, Vol. CT-17, No. 4, 564-574.

Carpinelli, G., (1996), "Probabilistic Evaluation of the Aconomical Damage due to Harmonic Losses in Industrial Energy System", IEEE Transactions on power delivery, vol 11, no.2, 1021-1031

Chm, E., (1989), "A New Model for Transformer Saturation Charateristics by Including Hysteresis Loops", IEEE Transactions on magnetics, vol 25, no.3, 2706-2712

Choi, Sewan, (1996), "Polyphase Transformer Arrangements with Reduced kVA Capacities for Harmonic Current Reduction in Rectifier-Type Utility interface", IEEE Transactions On Power Delivery, Vol:11, No:5, 680-690.

Chua, L. O. ve Stromsmoe, K. A., (1970), Lumped Circuit Models for Nonlinear Inductors Exhibiting Hysteresis Loops", IEEE Trams, on Circuit Theory, bol. CT-17, No. 4, 234-240

Cigre Working Group 02 of Study Committee (1993), "Interruption of Small Inductive Currents: Chapter 5 – Part I, Electra No. 133, 79-96.

Cigre, W. G., (1993), " Chapter 5: Switching of Unloaded Transformers; Part 1: Basic Theory and Single Phase Transformer Interruption without Reignitions". Electra No 133, 78-97.

Cigre, W. G., (1993), " Chapter 5: Switching of Unloaded Transformers; Part 2: Three phase Transformer Interruption Reignition Phenomena, Test Result and Conclusions". Electra No 134, 23-134.

Cigre, W. G., (1993), "Harmonic, Characteristic Parameters, Methods of Study, Estimates of Existing Values in the Network", Elecktra No.77, 35-54.

Czarnecki, L.S., (1993), " Physical Reasons of Currents RMS Value Increase in Power Systems with Nonsinusoidal Voltage ",IEEE Transactions on Power Delivery,Vol. 11,No. 2, 437-447

Czarnecki, L.S., (1996), " Comments on Active Power Flow and Energy Accounts in Electrical Systems with Nonsinusoidal Waveforms and Asymmetry ", IEEE Transactions on Power Delivery, Vol. 11, No. 3, 1244-1250.

Çetin, I., (1987), " Transformatör, Çözümlü Problemlerle 1. Kısım ", İ.T.Ü. Matbaası.

Dash, P.K., D.P.Swain, A.C.Liew, Saifur Rahman, (1996), "An Adaptive Linear Combiner for On-Line Trackings on Power Systems Harmonics", IEEE Transactions On Power Systems, Vol:11, No:4, 1730-1735.

David Greene, J. ve Charles A., Gross, (1988), "Nonlinear Modelling of Transformers", IEEE Trans. on Industry Applications, Vol. 24, No. 3, 434-438.

Davis, M., (1988), "Calculation of Winding Temperatures in Distribution Transformers Subjected to Harmonic Currents", IEEE Transactions on Power Delivery Vol. 3, No. 3, 1074-1079

De Mello, F.P., ve Hannett, L.N., (1986), " Representation of Saturation in Synchronous Machines", IEEE Trans., PWRS-1, (4), 8-18.

Del Vecchio, R. M ,(1982), "The İnclusion of Hysteresis Processes in a Special Class of Electromagnetic finite element calculations", IEEE Trans. Mag-18 275-284.

Demerdash, N.A., Nehl, T.W., Mohammed, O.A., (1982), "Solution of Eddy-Current Problems", IEEE Transactions on Magnetics, Vol. Mag-18, No. 6, 1710-1712.

Denley, M.R., Gregor, A. W. ve Johnston,W. B., (1987), "The Electrification of New Zealand Railways North İsland Main Trunk Route", IEE Conference Publication No 279 International Conference on Elecktric Railway Systems for a new Century, 189-193.

Dijk, H. E.,(1986), "Voltage Jump at Transformer Terminals Due to Non-Simultaneous Switching", IEEE Trans. PWRD-1, No. 3, 147-155.

Diseko, N.L., Bickford, J.P., (1980), " A Method of Simulating Linear and Nonlinear Resonant Phenomena Associated with Transformer Feeders ", IEE Proc.,Vol. 127, Pt. C. No:3, 169-177

Domijan, A., (1993), "Directions of Research on Electric Power Quality Transactions on Power Delivery", Vol. 8, No. 1, 429-436.

Dommel, H.W., Yan, A., ve Wei, S., (1986), "Harmonics from Transformer Saturation", IEEE Trans on Power Systems, vol. PWRD-1, 209-214.

Dommel, H. W., (1986), "Electromagnetic Transients Program Reference Manual", Section 6, Department ef Electrical Engineering-The university of British Columbia, Vancouver.

Dommel, H.W. A., Yan ve Shi Wei, (1986), "Harmonics from Transformer Saturation" IEEE Trans on Power Systems, Vol. PWRD-1, No. 2, 209-215

Dsp-16,(1988), Real-Time Data Acquisition Processor, Ariel Corporation, New York, NY, USA.

Dugan, R.C., Mc Granaghan, M.F., Beaty, H.W., (1996)," Electrical Power system Quality ", McGraw-Hill Company.

Eggleston, J.F., Arrillaga, J. ve Semlyen, A, (1987), " Harmonic Norton Equivalent of the Synchronous Generator', J. Electr, Electron. Eng., 7, (1), 13-21.

Eggleston, J. F., Arrillaga, J. ve Semlyen, A.,(1988), "Analysis of Harmonic Distortion Resulting from the Interaction Between Synchronous Machines and HVDC Convertors", IEEE Trans. on Power Delivery, vol., 3 no. 1,325-332.

Electrical Transmission and Distribution, (1986), Westinghouse, 116-120

Ell, L.K., Councill, M.E., (1989), "Distribution Transformer Excitation Harmonics" Electric Power Systems Research, Vol. 17, 13-19

Elleuch, M., (1996), "A Contribution to the Modelling of There Phase Transformers Using Reluctances", IEEE transactions on magnetics, vol32, no.2, 335-343

Ell, L. K., (1986), "Distribution Transformer Oversaturation: A Problem in Harmonics", IEEE Conf. Region 5, Lafayette, LA.

Elham B., Makram, Rebekah L., Thompson ve Adly A. Girgis, (1988), " A New Laboratuary Modelling in the Prensence of Harmonic Generator", IEEE-Transsactions on Power Systems, Vol. 3, No. 4, 1857-1863.

Emanuel, A.E. ve Szabados, B., (1984), "Effect of Voltage and Current Distortion on Iron and Copper Losses in Power System Harmonics", IEEE Tutorial Course, Course Text 84 EH0221-2-PWR. 106-112

Emanuel, AE., Wang, X., (1985) "Estimation of Loss Life of Power Transformers Supplying Nonlinear Loads" , IEEE Transactions on Power Apparatus and Systems, Vol. PAS-104, No. 3, 628-635.

Emanuel, A. E., (1988), "The Effect of Nonsinusoidal Excitation on Eddy Current Losses in Saturated Iron", IEEE Trans. Power Delivery, 3, 662-671.

Enright, W., J.Arrillaga, A.R. Wood, F.Perez Hidalgo, (1996), "The Smoothing Transformer, A New Concept İndeside Harmonic Reduction of HVdc schemes", IEEE Transactions On Power Delivery, Vol:11, No:4, 1941-1947.

Ewart, D. N., (1986), "Digital Computer Simulation Model of a Steel-Core Transformer", IEEE Transactions on Power Delivery Vol. PWRD-1 No. 3 174-181.

- Ewart, D. N., (1988), "Digital Computer Simulation Model of a Steel-Core Transformer", IEEE Trans. on Power Delivery, Vol. PWRD-1, No.3, 174-183.
- Fardoun, A.A., (1994), "Experimental Analysis of a DC Bucking Motor Blocking Geomagnetically Induced Currents", IEEE Transactions On Power Delivery, Vol:9, No:1, Tanvary (88-89).
- Fish, G. E., (1990), "Soft magnetic Materials, Proceedings of the IEEE, Vol. 78, No.6, 947-972.
- Frank, J.M., (1997), "Origin, Development, and Design of K-Factor Transformers", IEEE 5 Industry Applications Magazine, 67-69.
- Gavrilovic, G. M. M. ve Belanger, J., (1985), "Transformer Saturation Effect on EHV System "Overvoltage", IEEE Trans. PAS-104, No. 3, 671-680.
- Grady, W. M., (1984), "Sources of Undesirable Harmonics on Distribution Systems, Proc. Conf. For Protective Relay Engineers, Texas A & M Univ.
- Greene, J. F., (1986), "Nonsinusoidal Excitation of Transformers: Analysis and Response." Master's Thesis, Auburn University, Auburn, AL.
- Greene, J., (1988), "Nonlinear Modelling of Transformers", IEEE transactions on industry applications, vol 24, no.3, 434-438
- Grover Brown, R., (1983), "Introduction to Random Signal Analysis and Kalman Filtering, John Wiley and Son, Inc.
- Hattiziantoniou, G., Galanos, G.D. ve Miliadis-Argitis, J., (1988), "An Incremental Transformer Model for The Study of Harmonic Over-Voltages in Weak AC/DC Systems", IEEE Trans. on Power Delivery, vol .3, No. 3, July 1988, 1111-1121.
- Heydt, G.T., Grady, W.M., Xia, D., (1983), " Harmonic Power Flow Studies", Volumes 1 and 2, RP1764-Final Report, EL-3300, Electric Power Research Institute, Palo Alto, California.
- Henderson R.D., ve Rose, P.J., (1994), "Harmonics: The Effect on Power and Transformers", IEEE Trans. on Industry Application, vol .30, No. 3, May 1994, 528-532.
- Herzer, G. ve Hilzinger, H., (1988), "Recent Developments in Soft Magnetic Materials", Physica Scripta, Vol. T24, 22-28.
- Hwang, M.S., Grady, W. M. ve Sanders, Jr., (1984), " Assessment of The Winding Losses in Transformers Due to Harmonic Currents", International Conference on Harmonics in Power Systems, Worcester Polytechnic Institute, Worcester, Massachusetts.
- Hwang, M.S., Grady, W. M. ve Sanders, H.W., (1988), " Calculation of Winding Temperatures in Distribution Transformers Subjected to Harmonic Currents", IEEE Trans. Power Delivery, 1074-1079.

Howroyd, D. C. , (1984), "Discussion on Electrification of Twain Main Line Railway from Keelung to Kaohsiung", IEE Proceedings, vol. 131 Pt. B, no. 5, 226-230.

IEEE Std.-519, (1992): "IEEE Recommended Practices and Requirements for Harmonic Control in Electric Power Systems" (final draft).

IEEE Working Group, (1983), on Power System Harmonics, " Power System Harmonics: an Overview", IEEE Transactions on Power Apparatus and Systems, Vol. PAS-102, No. 8, 2455-2459.

IEE Working Group System, (1983) , "Harmonics, Power System Harmonics: an Overview", IEEE Trans., PAS-102, 2455-2460.

IEEE Recommended Practices for Power Systems Analysis, (1993),. New York: IEEE, 1002.

IEEE PES Transformer Committee, (1985), "Recommended Practice for Establishing Transformer Capability When Supplying Nonsinusoidal Load Currents", IEEE Publ. 116. C57. 110.

IEEE PES Working Group, (1983), " On Power System Harmonics, Power system harmonics: an overview", IEEE Trans., PAS-102,2455-2460.

IEEE PES Working Group, (1985), " On Power System Harmonics, The Effects of Power System Harmonics, on Power System Equipment and Loads", IEEE Trans. PAS-104, 2555-2563.

IEEE-PES Transformer Committees, (1983), " Recommended Practice for Establishing Transformer Capability When Supplying Nonsinusoidal Load Currents." C57.110/D2.

Inagaki, K. (1987), "Digital Protection Method of Power Transformers Based on An Equipvalent Circuit Composed Inverse Inductance", IEEE PES Summer Meeting, San Fransisco, Claifornia.

Inagaki, K. (1988), "Digital Protection Method of Power Transformers Based on An Equivalent Circuit Composed of Inverse Inductance", IEEE Transactions on Power Delivery, Vol.3, 1501-1510.

Ino, T., Mathuz, R. M., Iravani, M. R. And Sasaki, S., (1985), "Validation of Digital Simulation of DC Links-PartII", IEEE paper 85 WM 214-2, PES Winter Meeting, New York.

Johnson, N. B. ve Girgis, A. A., (1987), "Measurement and Characterization of Actual Current and Voltage Harmonics and Distortation in Power Systems", Proceedings of the 19th Southeastern-Symposium on System Theory, SSST, 390-393.

Juan W. D., Gustavo V., Luis A. M., (1997), "A Series Active Power filter Based on a Sinusoidal Current-Controlled Voltage-Source Inverter", IEEE Transactions On Industrial Electronics, Vol:44, No:5, 612-620

Kappenman, J. G., Albertson, V. D., (1990), "Bracing for the Geomagnetic Storms", IEEE Spectrum, 27-33.

Kappenman, J. G. ,(1990), "Transformer Dc Excitation Field Test & Results", IEEE Special Panel Session Report, 1-5.

Katherine P., Thornton ve Makram, Elham, B., (1988), " Study of Power System Harmonics in an Unbalanced System Using the Three-Phase Bus Impedance Matrix", Proceedings of the Twentieth Southeastern on System Theorh Annual Conference, 30-34.

Kenneth Scot Smith ve Li Ran, (1996), "Input Current Harmonic Analipsis of Pseudo 12-Pulse 3-Phase to 6-Phase Cycloconverters", IEEE Transactions On Power Electronics, Vol:11, No:4, 629-640.

Kettleluborough, J., Ganthome, B., (1982), "Simulation of a Transformer/Rectifier Unit for Aircracft Power Supply Systems", IEE Proceedings, Vol. 129 part B No. 6, 323-329.

Keyhani, A. ve Miri, S.M., (1988), "Nonlinear Modelling of Magnetic Saturation", Electr. Power Syst. Res.,15-24.

Kiffer, L. P., Dutil, A., Granger, M. ve Bui Van, Q., (1990), " Currents and Harmonics Generated in Power Transformers by DC Polarization", CEA Transactions on Engineering & Operation, Vol. 29, Part 1.

Konrad , A., Chari, M.V.K, Csendes, Z.J., (1982), " New Finite Element Techniques for Skin Effect Problems", IEEE Transactions on Magnetics, Vol. MAG-18, No.2, 450-455.

Li, Q. Z., Zhang, J. S. ve Qian, Q. Q., (1989), "Optimization Design on Series Tuning Filtering and Reactive Compensation Used in Traction System", IEE Conference on Main Line Railway Electrification, 222-226.

Lin, C. E., Cheng, J. B., Huang, C. L., (1982), "Hysteresis Characteristic Analysis of Transformers Under Non-Sinusoidal Excitations Using Real Time Measurement", IEEE T C. Wm. T. McLyman, Magnetic Core Selection for Transformers and Inductors. New York : Marcel Dekker.

Lin , C. E., Wei, J. B., . Huang, C. L ve Huang, C. J., (1989), " A New Model for Transformer Saturation Charecteristics by Including Hysteresis Loop", IEEE Trans. on Magnetics, Vol. 25, No. 3, 2706-2712.

Lin, C. E., Cheng, C. L., Huang, C. L. ve Yeh, J. C., (1992), " A Simple Model for Transformer Inrush Electric Calculation and Harmonic Analysis", Electric Power System Research, Vol. 24, No. 2, 153-163.

Lin, C. E., Wei, J. B., Huang, C. L. Ve Huang, C. J., (1993), " A New Model for Representation of Hysteresis Loops", IEEE Trans. on PWRD. Vol. 4, No. 1, 413-420.

Lin, C. E., Wei, J. B., Huang , C. L. and Yeh, J. C., (1993), " Investigation of Magnetizing Inrush Current in Transformer Part I-Numerical Simulation", IEEE Trans. on PWRD. Vol. 8, No. 1, 246-254

- Lin, C. E., (1993). "Investigation of Magnetizing Inrush Current In Transformers. Part II – Harmonic Analysis", IEEE Ttransaction on Power Delivery, Vol:8, No:1, 255-263
- Lin, C. E., Cheng, C. L., Huang, C. L. Ve Yeh, J. C. (1993), " Invesgation of Magnetizing Inrush Current in Transformers, Part II. Harmonic Analysis", IEEE Trans. Power Delivery, 255-263.
- Linders, J. R., (1979), 'Electric Wave Distortions: Their Hidden Costs and Containment', IEEE Trans., IA-15 458-471.
- Liu, P., Malik, O:P., Chen, D. And Hope, G.S., (1989), "Study of Non-Operation for Internal Faults of Second-Harmonic Restraint Differential Protection of Power Transformers", Transactions of the Engineering and Operating Division of the Canadian Electrical Association, Vol .28, Part 3, 1-23.
- Ludeman, L.C., (1986), 'Fundemental of Digital Signal-Processing'', Harper and Row, New York.
- Mahmoud, A., (1984), "Power System Harmonics: An Assessment", in Power System Harmonics, IEEE tutorial Course Text 84 Eh0221-2PWR, 1094, 1-8.
- Mahmoud, A., Shultz R. D., (1982), " A method for Analyzing Harmonics Distirbution in A.C. Power Systems", IEEE Transactions on Power Systems, Vol. PAS-101, No. 6, 1815-1824.
- Mancini, R., (1996), "An Area Substation Load Model in the Prensence of Harmonics", IEEE Transactions On Power Delivery, Vol:11, No:4, 2013-2019.
- Medina, A., Arrillaga, J. ve Acha, E., (1990), "Sparsity-Oriented Hybrid Formulation of Linear Multiports and its Application to Harmonic Analysis", IEEE Trans. on Power Delivery, vol. 5, no. 3, 1453-1458..
- Medina, A., (1992), "Generalised Modelling of Power Transformers in the Harmonic Domain", IEEE transactions on power delivery, vol 7, no.3, 1458-1465
- Medina, A. ve Arrillaga, J., (1992), " Simulation of Multilimb Power Transformers in the Harmonic Domain', IEE Proc. C., 139,269-276.
- Medina, A.,(1994), " Analysis of Transformer-Genarator Interaction in the Harmonic Domain",IEE PROC-Gener transm .Distrib .,Vol.141.No.1,38-46
- Member, Chi-Jui Wu, (1997), "Developing a Harmonics Education Facility in a Power system Simulator for Power Engineering Education", IEEE Transactions On Power Systems, Vol:12, No:1, 22-29.
- McLyman, C. Wm. T., (1982), "Magnetic Core Selection for Transformers and Inductors", New York, Marcel Dekker.

- Mielczarski, Wladyslaw, (1997), "Harmonic Current Reduction in Three-Phase Bridge-Rectifier Circuits Using Controlled Current Injection", IEEE Transactions on Industrial electronics, Vol:44, No:5, 604-611.
- Mochigana, Y., Koyama, Y. ve Takeuchi, T.(1990), "Insulation Level Reduction of Shinkansen at Feeder Circuit", T.IEE Japan, vol. 110-d, no 5, 570-579.
- Mochinaga, Y., Akasuka, Y., Arai, K. ve Ono, M., (1991), "Development of Three-Winding Transformer for Shinkansen Auto-Transformer Feeding System Receiving Extra-High Voltage", T. IEE Japan, Vol.111-d, No.3, 237-244.
- Nakata, T., (1984), "Numerical Analysis of Flux and Loss Distribution in Electrical Machinery", IEEE Trans. On Magnetics, Vol. Mag-20, No. 5.
- Neves, W. L. A., Dommel, H. W., (1993), "On Modelling Iron Core Nonlinearities", IEEE Transactions on Power Systems, vol. PWR8-8, 417-425.
- Nims, L.W., (1996), "Application of a Generic Algorithm to Power Transformer Design", Electric Machines and Power Systems, Taylor & Francis, 669-680.
- Nonuo T., Tetsuo O., Fumihiko M., Samau S., (1994), " An Experimental Analysis of DC Excitation of Transformers by Geomagnetically Induced Currents", IEEE Transactions on Power Delivery Vol. 9, No. 2 , 1173-1179.
- O'Dell, (1981), T. H. Ferromagnetodynamics, Chapters 1 and 5, Mcmillan Press Ltd, London.
- Oliver, G., (1993), " Novel Transformer Connection to Improve Current Sharing in High Current DC Rectifiers, " in IEEE IAS'93 Conf. Proc., 986-992.
- Papadias, B. C., Hatziargyriou, N. D., Bakopoulos, J. A., Prousalidis, J. M., (1993), " Three-Phase Transformer Modelling for Fast Electromagnetic Transients", paper No 93 SM-PWRD presented at 1993 IEEE PES Summer Meeting Vancouver(Canada).
- Pasco, W., Norton, E. T., Nilson, S. L., (1985), " High Voltage Direct Current Converter Transformer Magnetics", EPRI Report EL-4340, Research Project 1424-3.
- Pierce, L.W., (1994), " Predicting Liquid Filled Transformer Loading Capability" , IEEE Transactions on Industry Applications, Vol. 30, No. 1, 170-178.
- Pierce, L. W., (1994), "Thermal Considerations in Specifying Dry-Type Transformers", IEEE Transactions on Industry Applications, Vol. 30, No. 4, 1090-1098.
- Pierce, L.W., (1996), "Transformer Design and Application Considerations for Nonsinusoidal Load Currents ", IEEE Transactions on Industry Applications, Vol. 32, No. 3, 633-645.
- Poloujadoff, M., Findlay, R.D., (1993), " A Procedure for Illustrating the Effect of Various of Parameters on Optimal Transformer Design ", IEEE Transactions on Power Systems, Vol. PWR8-1, No.4, 202-205

- Prusty, S., (1984), "A Novel Approach for Predetermination of Magnetization Characteristics of Transformers Including Hysteresis", IEEE Transactions on Magnetics, Vol. Mag-20, No:4, 607-612.
- Prousalidis, J. M., Hatzargyriou, N. D., Papadias, B. C., (1993): " The Effect of Mutual Phase Coupling on Three-Phase Transformer Models", EPST '93, Lisbon(Potugal).
- Prousalidis, J.M., B.C., (1996), " Representation of Hysteresis in Three-Phase Transformer Models for Electromagnetic Transient ", IEE Proc-Elect. Power Appl. Vol. 143. No. 4, 331-338.
- Puent, H.R., Burgers. M. L., L. Larsen. E. V. ve Elahi H., (1989), "Energization of Large Shunt Reactors Near Static Ven Compensators and HVDC Converters", IEEE Trans on Power Delivery Vol. 4, No 2, 629-635.
- Purkayastha, L, Sayoie P.J., (1994), " Effect of Harmonics on Power Measurement ", IEEE Transactions on Industry Applications, Vol. 26, No. 5, 944-946.
- Rahman, M. A. ve Gangopadhyay, (1993), " A Digital Simulation of Magnetizing Inrush Currents in Three Phase Transformers, IEEE Trans. Power Delivery, PWRD-I (235-242).
- Rajakovic, N. ve Semlyen, A., (1989), "Investigation of the Inrush Phenomenon. A Quasistationary Approach in the Harmonic Domain", IEEE Trans., PD-4, (4), 2114-2120.
- Ray, R., (1988), " Digital Similation of B/H Excursions for Power System Studies", IEE Proceedings-C. Vol. 135, No.3, 229-235.
- Reason, J. (1994), " Power Transformers: Performance Improves in Many Small Steps", Electrical World, 48-62.
- Reeve, J., Chen, S. P., (1984), " Digital Simulation of Multiterminal HVDC Transmission System", IEEE paper 84 WM 199-6, PES Winter Meeting.
- Reference Manual for Electromagnetic Transient Program (EMTP) developed by Bonneville Power Administration, Portlan, Oregon.
- Reid, W.E., (1996), " Power Quality Issues-Standarts and Guidilines ", IEEE Transactions on Industry Applications, Vol. 32, No. 3, 625-632.
- Roussel, H., (1989) "Power Suply for the Atlantic TGV High Speed Line", IEE Conference on Main Line Railway Electrification, 388-392.
- Rubaai, A, (1994),"Computer-Aided-Instnaction of Power-Transformer Design in the Undergratuete Power Engineering Class ", IEEE Transactions on Power Systems, Vol. 9, No. 3, 1174-1181.
- Rusch, R.J., Good, M.L., (1993), "Wyes and Wye Nots of Three-Phase Distrubution Transformer Connections", IEEE Transactions on Industry Applications Vol. 26, No. 4, 683-688.

Sachdev M.S., (1989), "A Digital Relaying Algorithm For Detecting Transformer Winding Faults", IEEE Transactions on Power Delivery, vol 4, no.3, 1638-1648

Seguier, G.,(1986), 'Power Electronic Converters AC/DC Conversion', New York, McGraw-Hill.

Semlyen, A., (1986), "Steady-State Analysis of Nonlinear Dynamic Systems with Periodic Excitation Based on Linearization in Harmonic Space", Canadian Electrical Engineering Journal, Vol.11, No.3, 114-117.

Semlyen, A., Acha, E. ve Arrillaga, J., (1987), "Newton-Type Algorithms for the Harmonic Phasor Analysis of Non-Linear Power Circuits in Periodical Steady State with Special Reference to Magnetic Non-Linearities", IEEE Paper No. 87 Wm 170-4, presented at the 1987 Power Engineering Society Winter Meeting, New Orleans, Louisiana, USA

Semlyen, A., Acha, E. ve Arrillaga, J., (1988), "Newton-Type Algorithms for the Harmonic Phasor Analysis of Non-Linear Power Circuits in Periodical Steady State with Special Reference to Magnetic Non-Linearities", IEEE Trans. on Power Delivery, Vol. 3. No. 3, 1090-1098.

Semlyen, A. ve Arrillaga, J., (1987), "Harmonic Norton Equivalent for the Magnetising Branch of a Transformer", IEE Proc. Vol. 134, Pt. C, No. 2, 162-169

Sidhu, T.S., (1992), "Design, Implementation and Testing of a Microprocessor-Based High-Speed Relay For Detecting Transformer Winding Faults", Transactions On Power Delivery, Vol:7, No:1, 108-117.

Sidhu, T., (1992), "Model Representing the Nonlinear Behaviour of Three-Phase Transformers", Archiv für Elektrotechnik, Vol.77, No.1, 143-150

Simpson, R.H., (1998), "Instrumentation, Measurement Techniques, and Analytical Tools in Power Quality Studies", Distortion, IEEE Transactions on Industry Applications, Vol.-34, No. 3, 534-548

Smith, B., (1996), "A Newton Solution for the Harmonic Phasor Analysis of AC/DC Converters", IEEE transactions on power delivery, vol 11, no.2, 965-971

Shu, Lu., (1993), "Harmonics Generated from ADC Biased Transformer", IEEE Transactions on Power Delivery, vol 8, no.2, 725-731

Stensland, T., (1997), " Modeling of Magnetizing and Core-Loss Currents in Single Phase Transformers with Voltage Harmonics for use in Power Flow.", IEEE Transactions On Power Delivery, Vol:12, No:2, 768-774.

Stenzel, J., (1994) " Model Representing the Nonlinear Behaviour of Three-Phase Transformers", Archiv für Elektrotechnik, Vol.77, No.1, 143-150

Strembler, F. G., (1982), "Introduction to Communication Systems", Addison-Wesley, Reading, MA, 2nd edn., 43.

Sybille, G., Gavrilovic, M., Belanger, J., (1985), "Transformer Saturation Effects on EHV System Overvoltages", IEEE Transactions on Power Apparatus and Systems, Vol. PAS-104 No. 3, 671-680.

Takach, D. S. ve Boggavarappu R. L., (1985), "Distribution Transformer No Load Losses", IEEE Trans. Power A Syst., vol. 104. no .1, 181-193.

Tanneau, Gerard, (1996), "Surface Impedance for 3D Non-Linear Eddy Current Problems-Application to Loss Computation in Transformers", IEEE Transactions On magnetics, Vol:32, No:3, 808-811

Tay, H. C., Swift, G. S., (1985), " On the Problem of Transformer Overheating due to Geomagneticallcally Incuded Currents", IEEE Trans., Vol. PAS-104, No. 1, 212-219.

Tiipana, E., (1989), "Supply of Electricity for Electrified Lines in Finland", IEE Conference on Main Line Railway Elecktrification, 174-177.

Tomczuk., Bronislaw, (1992), "Tree-Dimensional Leakage Reactance Calculation and Magnetic Field Analylsis for Unbounded Problems", IEEE Transactions On Magnetics, Vol:28, No:4, 1935-1940.

Thorp, J.S. ve Phadke, A.G., (1993), "A Microprocessor Based Three Phase Transformer Differential Relay", IEEE Trans. on Power Apparatus and Systems, Vol. PAS-102, no. 11,3624-3628

Thomas, M., (1991), "Uncertainties in Compliance with Harmonic Current Distortion Limits in Electric Power System", IEEE Transactions on Industry Applications, Vol. 27, No 4, 680-685

TMS320C25 Compiler, (1989), Reference Guide, Texas Instruments, Houston, Tx, USA.

Vovos, N., Galanos, G., Giannakopoulos, G., (1983), "A Mathematical Model for Dynamic Simulation of HVDC Systems", IEEE Transactions on Power Apparatus and Systems, Vol. PAS-102 No. 6, 1755-1763,.

Westing House, (1986), Distribution Transformer Guide, Athens, GA.

Willing, R. A., Khan, A. H., (1991), " Characteristics of Transformer Exciting-Current During Geomagnetic Disturbances", IEEE/PES, 91 WM 095-0 PWRD.

Williment, P. T., (1989), "East Coast Main Line Electrification 25 kV AC system design", IEE Conference Publication No. 312, International Conference on Main Line Railway Electrification, 306-310.

Wilkins, F.J. ve Drake, A. E., (1965), "Measurement and Interpetation of Power Losses in Elecktrical Sheet Steell", Proc .IEE Vol. 112, No. 4, 771-785.

Wilson Xu, (1991), Multiphase Harmonic Load Flow Program (MHLF) Reference Manual, Powertech, Labs,Inc.

Woodford, D. A., Gole, A. M., Menzies, R. W., (1983), "Digital Simulation of DC Links and AC Machines", IEEE Transactions on Power Apparatus and Systems, Vol. PAS-102, 1616-1623.

Woodford, D. A., (1985), "Validation of Digital Simulation of DC Link", IEEE paper 85 WM 213-4, PES Winter Meeting, New York.

Wood, H.C., Sidhu, T.S., Satchev, M.S. ve Nagpal, M., (1989), "A General-Purpose Hardware for Microprocessor Based Relays", Proceedings of the International Conference on Power System Protection '89, Singapore, 13-14, 43-59.

Wu, C.J., Chang, W.N., (1997), "Developing a Harmonics Education Facility in a Power System Simulator for Power Engineering Education", IEEE Transactions on Power Systems Vol. 12, No. 1, 22-29.

Xu, W. ve Dommel, H. W., (1993), "Computation of Steady State Harmonics of Static Var Compensator."

Xu, W., Marti, J.R. ve Dommel, H. W., (1991) "A Multiphase Harmonic Load Flow Solution Technique", IEEE Trans. on Power Systems, PS vol.6, 174-182.

Xu, W.W., Dommel, H.W., ve Marti, J.R., (1991), "A Synchronous Machine Model for Three-Phase Harmonic Analysis and EMTP Initialization", IEEE Trans., PWRD-6,(4), 1530-1538.

Xu, W., (1994), "Harmonics from SVC Transformer Saturation with Direct Current Offset", IEEE Transactions on Power Delivery, vol 9, no.3, 1502-1509

Yacamini, R. ve Abu Nasser, A., (1986), "Transformer Inrush Current and Their Associated Overvoltages in HVDC Schemes", IEE Proc. Vol. 133, Pt. C, No. 6, 353-358.

Yacamini, R. ve Abu Nasser, A., (1986), "Numerical Calculation of Inrush Current in Single-Phase Transformers", IEE Proc. Vol. 133, Pt. B, No. 1, 31-40.

Yacamini, R. ve Abu Nasser, (1986), "The Calculation of Inrush Current in Three-phase Transformers", IEE Proc. B, Vol:133, 31-40.

Yousef-Zai, F.Q., (1996), "Solid-State on Load Transformer Tap Changer", IEEE Proc-Electr. Power Appl., Vol.143, No.6, (481-491).

KAYNAKLAR

Aaron, W. C., (1988), "Premium Service- an Answer to Power Quality", Southeastern Electric Exchange Annu. Conf., Bal Harbour, FL.

Acha, E. J., Arrillaga, Medina, A. ve Semlyen, A., (1989), "General Frame of Reference for Analysis of Harmonic Distortion in Systems with Multiple Transformer Nonlinearities", Proc. IEE, vol. 136, pt. C, no. 5, 271-278.

Acha, E., Semlyen, A., ve RajakóvN., (1990), " A Harmonic Domain Computational Package for Nolinear Problems and Its Application to Electric Arcs", IEEE Trans., PD-5,(3),1390-1397.

Addly, A., Girgis ve Bryan D. Guy, (1988), " A Computer Based Data Acquisition System for Teaching Transients and Switching Phenomena and Performing Research on Digital Protection ", IEEE Transactions on Power Systems, Vol. 3, No. 3, 1361-1368.

Adly, Girgis, A., Makram, E.B. ve Balwin, T.L., (1989), "Computer Based Harmonic Generator Facilities to Study Harmonic-related Problems", IEEE Transactions on Power Systems, PWRS Vol. 3, No. 1,301-309.

Adly, A. Girgis ve Daniel, T. L. Hwang, (1984), "Optimal Estimation of Voltage Phasors and Frequency Deciation using Linear and Non-Linear Kalman filtering: Theory and Limitation", IEEE Transsactions on Power Apparatus and Systems, Vol. PAS-103, No. 10, 2943-2951.

Adly A. Girgis, T. L., Baldwin, Makram, E. B. ve Hoke, S. Fortson, (1989), " Testing the Performance of Three-Phase Induction Watt-Hour Meters in the Presence of Harmonic Distortion", 1989 Rural Elecktric Power Conference.

Adly, A., (1990), "Evaluation of Temperature Rise of Distribution Transformers in the Presence of Harmonics and Distortion", Electric Power Research Vol 20, No.1, 15-22

Alexandrow, N., (1987), "Amorphous Alloys for Distribution Transformers: Design Considerations and Economic Impact ", IEEE Transactions on Power Delivery Vol. PWRD-2, No. 2, 420-424,

Allan G., (1991), "Electrical Transients in Power Systems", John Wiley & Sons Inc. , New York.

Alan, J., (1991), "Harmonic Load Losses in HVDC Converter Transformers", IEEE Transactions On Power Delivery, Vol:6, No:1, 153-157.

Alexander E., (1992), "The Effect of Nonsinusoidal Excitation on Eddy Current Losses in saturated Iran", IEEE Transactions On Power Delivery, Vol:3, No:2, April 1988 (662-671).

Aly, A. Mahmoud, (1984), " Power System Harmonics-An Assessment, " IEEE Tutorial Course on Power System Harmonics", 1-8.

Anderson, P.M., ve Fouad, A.A., (1997), "Power System Control and Stability", Iowa State University Press, Ames, Iowa, USA).

Anderson, O., (1997), "Large Transformers for Power Electronic Loads", IEEE transactions on power delivery, vol 12, no.4, 1532-1537

Arkadan, A.A., (1992), , "Finite Element Modelling of a Transformer Feeding a Rectifier Load: the Coupled Power Electronics and Nonlinear Magnetic Field Problem", IEEE Transactions on Magnetics, Vol. 27, No. 6, 5217-5219.

Arkadan, A.A., (1992) "Three-Dimensional Nonlinear Finite Element Modelling of a Voltage Source Excited Transformer Feeding a Rectifier Load ", IEEE Transactions on Magnetics, Vol. 28, No. 5, 2265-2267.

Arrillage, J., Bradley, D.A. ve Bodger P.S., (1985), "Power System Harmonics", John Wiley and Sons Inc.

Arsenau, R., (1995), -" A Survey of North American Electric Utility Concerns Regarding Nonsinusoidal Waveforms ", IEEE Transactions on Power Delivery, Vol. 11, No. 1, 73-78.

Arsenau, R., (1996), " Practical Definitions for Powers in Systems with Nonsinusoidal Waveforms and Unbalanced Loads: A Discussion ", IEEE Transactions on Power Delivery, Vol. 11, No. 1, 79-101.

Arsenau, R., (1997), "Application of IEEE Standart 519-1992 Harmonic Limits for Revenue Billing Meters ", IEEE Transactions on Povver Delivery, Vol. 12, No. 1, 346-353.

Arturi, C. M., (1991), " Transient Simulation and Analysis of a Three-Phase Five-Limb Step-up Transformer Following an out-of phase Synchronization", IEEE Trans. on PWRD. Vol. 6, No. 1, 196-203.

Aquilino, J.M., (1983), " Report of Transformer Reliability Survey-Industrial Plants and Commercial Buildings ", IEEE Transactions on Industry Applications, Vol IA-19 No:5, 858-866

Astengo, G., Rossi, C. ve Sciutto, G. Single, (1989), "Phase 25 kV Electrification on Sardinia Railway :Some Particular Problems Related to an Electrified Railway Located in an Island", IEE Conference Publication No. 312, International Conference on Main Line Railway Elektrification, 178-181.

ATP Rule Book, (1987), Leuven EMTP Center (LEC), Section XIX-g, Revision

Badawy, E. H. ve Youssef, R. D., (1983), " Representation of Transformer Saturation", Electric Power Systems Research, Vol. 6, No. 4, 301-304.

Baghzouz, Y., Gong, X.D., (1992), " Voltage-Dependent Model for Teaching Transformer Core Nonlinearity ", IEEE Transactions on Power Systems, Vol. 8, No. 2, 746-752.

Bejot, J.P., (1992), " Transformer Behaviour in Disturbed Power Systems ", GEC Alstom Technical Review, No: 9, 3-10.

Barker, P.P, (1994), " Power Quality Monitoring of a Distribution System", Transactions on Power Delivery, Vol. 9, No. 2, 1136-1142.

Blackburn, J. L., (1987), "Protective Relaying Principles and Applications", Marcel Dekker Inc. New York, U.S.A.

Bickford, J. P. ve Eaton, A. G., (1986), " Transient Overvoltages on Power Systems", IEE Proc. Vol. 133, Pt. C, No. 4, 201-225.

Bishop, M.T., (1991), PC-Controlled Hand-Held Meter Measures Power System.

Bonner, A., (1996), "Modeling and Simulation of the Propagation of Harmonics in Electric Power Networks", IEEE, transactions on power delivery, Vol:11, No:1, 466-474.

Bishop, M.T., (1991), " PC-Controlled Hand-Held Meter Measures Power System Harmonics ", IEEE Computer Applications in Power, 17-21.

Bishop, M.T., Gilker, C., (1992), " Portable Harmonics Meter Evaluates Transformer Heating", IEEE Computer Applications in Power, 41-44.

Bishop, M.T., Baranowski, J.F., Heath, D., Benna, S.J., (1996), " Evaluating Harmonic-Induced Transformer Heating ", IEEE Transactions on Power Delivery, Vol. 11, No. 1, 305-310.

Bonner, A., (1996), " Modelling and Simulation of the Propagation of Harmonics in Electric Power Networks ", Part I: Concepts, Models, and Simulation Techniques, IEEE Transactions on Power Delivery, Vol. 11, No. 1, 452-465, Part II: Sample Systems and Examples, IEEE Transactions on Power Delivery, Vol. 11, No. 1, 465-474.

Brandwajn, V., Dommel, H.W. ve Dommel, I.I., (1982), "Matrix Representation of Three Phase n-Winding Transformers for Steady-state and Transient Studies", IEEE Trans. on Power A Syst., vol. PAS-101, 1369-1378.

Bronislaw Tomczuk, "Analysis of 3-D Magnetic Fields in High Leakage Reactance Transformers" IEEE Transactions On Magnetics, Vol:30, No:5, September 1994, (2734,2738).

Bronzeado, H. S., (1993), " Transformer Interaction Caused by Inrush Current", MSc Thesis, University of Aberdeen (Scotland).

Bronzeado, H. S. ve Acamini, R., (1994), " Sympathetic Interaction Between Power Transformers", Proc. Of 29th Universities Power Engineering Conference – UPEC, Vol. 1 236-239, University College Galway, Ireland.

Basak, A. ve Qader, A.A.A., (1983), "Fundamental and Harmonic Flux Behaviour in a 100kVA Distribution Transformer Core", IEEE Trans. On Mag, Vol:Mag-19, No:5, 2100-2102.

Burke, J. J. ve Feltes, J. W., (1991), 'Railroad Elektrification on Utility Systems', EPRT Report EL-3001.

C57 Collection, (1991), Distribution Power and Regulating Transformers, IEEE Press.

Cameron, M.M., (1993), " Trends in Power Factor Correction with Harmonic Filtering", IEEE Transactions on Industry Applications, Vol. 29, No. 17 60-65.

Canadian Electrical Association Project, (1993), RP-070-D-165, "Power Line Carrier on Distribution Systems", Ontario Hydro's Research.

Chai, S., (1996), "Polyphase Transformer Arrangements with Reduced kVA Capacities for Harmonic Current Reduction in Rectifier- Type Utility Interface", IEEE Transactions on power electronics, vol 11, no.5, 680-690

Chen, B.K., (1996), " A Three-Phase Models of Special Connected Transformers", IEEE Transactions on Power Delivery, Vol. 11, No. 1, 323-331

Chen, X., (1996), " A Three-Phase Multi-Legged Transformer Model in ATP Using the Directly-Formed Inverse Inductance Matrix ", IEEE Transactions on Power Delivery, Vol. 11, No. 2, 1554-1562.

Chua, L.O., Stromsmoe, K.A, (1970), " Lumped-Circuit Models for Nonlinear Inductors Exhibiting Hysteresis Loops ", IEEE Transactions on Circuit Theory, Vol.CT-17, No. 4, 564-574.

Carpinelli, G., (1996), "Probabilistic Evaluation of the Aconomical Damage due to Harmonic Losses in Industrial Energy System", IEEE Transactions on power delivery, vol 11, no.2, 1021-1031

Chm, E., (1989), "A New Model for Transformer Saturation Charateristics by Including Hysteresis Loops", IEEE Transactions on magnetics, vol 25, no.3, 2706-2712

Choi, Sewan, (1996), "Polyphase Transformer Arrangements with Reduced kVA Capacities for Harmonic Current Reduction in Rectifier-Type Utility interface", IEEE Transactions On Power Delivery, Vol:11, No:5, 680-690.

Chua, L. O. ve Stromsmoe, K. A., (1970), Lumped Circuit Models for Nonlinear Inductors Exhibiting Hysteresis Loops", IEEE Trams, on Circuit Theory, bol. CT-17, No. 4, 234-240

Cigre Working Group 02 of Study Committee (1993), "Interruption of Small Inductive Currents: Chapter 5 – Part I, Electra No. 133, 79-96.

Cigre, W. G., (1993), " Chapter 5: Switching of Unloaded Transformers; Part 1: Basic Theory and Single Phase Transformer Interruption without Reignitions". Electra No 133, 78-97.

Cigre, W. G., (1993), " Chapter 5: Switching of Unloaded Transformers; Part 2: Three phase Transformer Interruption Reignition Phenomena, Test Result and Conclusions". Electra No 134, 23-134.

Cigre, W. G., (1993), "Harmonic, Characteristic Parameters, Methods of Study, Estimates of Existing Values in the Network", Elecktra No.77, 35-54.

Czarnecki, L.S., (1993), " Physical Reasons of Currents RMS Value Increase in Power Systems with Nonsinusoidal Voltage ",IEEE Transactions on Power Delivery,Vol. 11,No. 2, 437-447

Czarnecki, L.S., (1996), " Comments on Active Power Flow and Energy Accounts in Electrical Systems with Nonsinusoidal Waveforms and Asymmetry ", IEEE Transactions on Power Delivery, Vol. 11, No. 3, 1244-1250.

Çetin, I., (1987), " Transformatör, Çözümlü Problemlerle 1. Kısım ", İ.T.Ü. Matbaası.

Dash, P.K., D.P.Swain, A.C.Liew, Saifur Rahman, (1996), "An Adaptive Linear Combiner for On-Line Trackings on Power Systems Harmonics", IEEE Transactions On Power Systems, Vol:11, No:4, 1730-1735.

David Greene, J. ve Charles A., Gross, (1988), "Nonlinear Modelling of Transformers", IEEE Trans. on Industry Applications, Vol. 24, No. 3, 434-438.

Davis, M., (1988), "Calculation of Winding Temperatures in Distribution Transformers Subjected to Harmonic Currents", IEEE Transactions on Power Delivery Vol. 3, No. 3, 1074-1079

De Mello, F.P., ve Hannett, L.N., (1986), " Representation of Saturation in Synchronous Machines", IEEE Trans., PWRS-1, (4), 8-18.

Del Vecchio, R. M ,(1982), "The İnclusion of Hysteresis Processes in a Special Class of Electromagnetic finite element calculations", IEEE Trans. Mag-18 275-284.

Demerdash, N.A., Nehl, T.W., Mohammed, O.A., (1982), "Solution of Eddy-Current Problems", IEEE Transactions on Magnetics, Vol. Mag-18, No. 6, 1710-1712.

Denley, M.R., Gregor, A. W. ve Johnston,W. B., (1987), "The Electrification of New Zealand Railways North Island Main Trunk Route", IEE Conference Publication No 279 International Conference on Electric Railway Systems for a new Century, 189-193.

Dijk, H. E.,(1986), "Voltage Jump at Transformer Terminals Due to Non-Simultaneous Switching", IEEE Trans. PWRD-1, No. 3, 147-155.

Diseko, N.L., Bickford, J.P., (1980), " A Method of Simulating Linear and Nonlinear Resonant Phenomena Associated with Transformer Feeders ", IEE Proc.,Vol. 127, Pt. C. No:3, 169-177

Domijan, A., (1993), "Directions of Research on Electric Power Quality Transactions on Power Delivery", Vol. 8, No. 1, 429-436.

Dommel, H.W., Yan, A., ve Wei, S., (1986), "Harmonics from Transformer Saturation", IEEE Trans on Power Systems, vol. PWRD-1, 209-214.

Dommel, H. W., (1986), "Electromagnetic Transients Program Reference Manual", Section 6, Department of Electrical Engineering-The university of British Columbia, Vancouver.

Dommel, H.W. A., Yan ve Shi Wei, (1986), "Harmonics from Transformer Saturation" IEEE Trans on Power Systems, Vol. PWRD-1, No. 2, 209-215

Dsp-16,(1988), Real-Time Data Acquisition Processor, Ariel Corporation, New York, NY, USA.

Dugan, R.C., Mc Granaghan, M.F., Beaty, H.W., (1996)," Electrical Power system Quality ", McGraw-Hill Company.

Eggleston, J.F., Arrillaga, J. ve Semlyen, A, (1987), " Harmonic Norton Equivalent of the Synchronous Generator', J. Electr, Electron. Eng., 7, (1), 13-21.

Eggleston, J. F., Arrillaga, J. ve Semlyen, A.,(1988), "Analysis of Harmonic Distortion Resulting from the Interaction Between Synchronous Machines and HVDC Convertors", IEEE Trans. on Power Delivery, vol., 3 no. 1,325-332.

Electrical Transmission and Distribution, (1986), Westinghouse, 116-120

Ell, L.K., Council, M.E., (1989), "Distribution Transformer Excitation Harmonics" Electric Power Systems Research, Vol. 17, 13-19

Elleuch, M., (1996), "A Contribution to the Modelling of There Phase Transformers Using Reluctances", IEEE transactions on magnetics, vol32, no.2, 335-343

Ell, L. K., (1986), "Distribution Transformer Oversaturation: A Problem in Harmonics", IEEE Conf. Region 5, Lafayette, LA.

Elham B., Makram, Rebekah L., Thompson ve Adly A. Girgis, (1988), " A New Laboratuary Modelling in the Prensence of Harmonic Generator", IEEE-Transsactions on Power Systems, Vol. 3, No. 4, 1857-1863.

Emanuel, A.E. ve Szabados, B., (1984), "Effect of Voltage and Current Distortion on Iron and Copper Losses in Power System Harmonics", IEEE Tutorial Course, Course Text 84 EH0221-2-PWR. 106-112

Emanuel, AE., Wang, X., (1985) "Estimation of Loss Life of Power Transformers Supplying Nonlinear Loads" , IEEE Transactions on Power Apparatus and Systems, Vol. PAS-104, No. 3, 628-635.

Emanuel, A. E., (1988), "The Effect of Nonsinusoidal Excitation on Eddy Current Losses in Saturated Iron", IEEE Trans. Power Delivery, 3, 662-671.

Enright, W., J.Arrillaga, A.R. Wood, F.Perez Hidalgo, (1996), "The Smoothing Transformer, A New Concept İndeside Harmonic Reduction of HVdc schemes", IEEE Transactions On Power Delivery, Vol:11, No:4, 1941-1947.

Ewart, D. N., (1986), "Digital Computer Simulation Model of a Steel-Core Transformer", IEEE Transactions on Power Delivery Vol. PWRD-1 No. 3 174-181.

Ewart, D. N., (1988), "Digital Computer Simulation Model of a Steel-Core Transformer", IEEE Trans. on Power Delivery, Vol. PWRD-1, No.3, 174-183.

Fardoun, A.A., (1994), "Experimental Analysis of a DC Bucking Motor Blocking Geomagnetically Induced Currents", IEEE Transactions On Power Delivery, Vol:9, No:1, Tanvary (88-89).

Fish, G. E., (1990), "Soft magnetic Materials, Proceedings of the IEEE, Vol. 78, No.6, 947-972.

Frank, J.M., (1997), "Origin, Development, and Design of K-Factor Transformers", IEEE 5 Industry Applications Magazine, 67-69.

Gavrilovic, G. M. M. ve Belanger, J., (1985), "Transformer Saturation Effect on EHV System "Overvoltage", IEEE Trans. PAS-104, No. 3, 671-680.

Grady, W. M., (1984), "Sources of Undesirable Harmonics on Distribution Systems, Proc. Conf. For Protective Relay Engineers, Texas A & M Univ.

Greene, J. F., (1986), "Nonsinusoidal Excitation of Transformers: Analysis and Response." Master's Thesis, Auburn University, Auburn, AL.

Greene, J., (1988), "Nonlinear Modelling of Transformers", IEEE transactions on industry applications, vol 24, no.3, 434-438

Grover Brown, R., (1983), "Introduction to Random Signal Analysis and Kalman Filtering, John Wiley and Son, Inc.

Hattiziantoniou, G., Galanos, G.D. ve Miliadis-Arghitis, J., (1988), "An Incremental Transformer Model for The Study of Harmonic Over-Voltages in Weak AC/DC Systems", IEEE Trans. on Power Delivery, vol .3, No. 3, July 1988, 1111-1121.

Heydt, G.T., Grady, W.M., Xia, D., (1983), " Harmonic Power Flow Studies", Volumes 1 and 2, RP1764-Final Report, EL-3300, Electric Power Research Institute, Palo Alto, California.

Henderson R.D., ve Rose, P.J., (1994), "Harmonics: The Effect on Power and Transformers", IEEE Trans. on Industry Application, vol .30, No. 3, May 1994, 528-532.

Herzer, G. ve Hilzinger, H., (1988), "Recent Developments in Soft Magnetic Materials", Physica Scripta, Vol. T24, 22-28.

Hwang, M.S., Grady, W. M. ve Sanders, Jr., (1984), " Assessment of The Winding Losses in Transformers Due to Harmonic Currents", International Conference on Harmonics in Power Systems, Worcester Polytechnic Institute, Worcester, Massachusetts.

Hwang, M.S., Grady, W. M. ve Sanders, H.W., (1988), " Calculation of Winding Temperatures in Distribution Transformers Subjected to Harmonic Currents", IEEE Trans. Power Delivery, 1074-1079.

Howroyd, D. C. , (1984), "Discussion on Electrification of Twain Main Line Railway from Keelung to Kaohsiung", IEE Proceedings, vol. 131 Pt. B, no. 5, 226-230.

IEEE Std.-519, (1992): "IEEE Recommended Practices and Requirements for Harmonic Control in Electric Power Systems" (final draft).

IEEE Working Group, (1983), on Power System Harmonics, " Power System Harmonics: an Overview", IEEE Transactions on Power Apparatus and Systems, Vol. PAS-102, No. 8, 2455-2459.

IEE Working Group System, (1983) , "Harmonics, Power System Harmonics: an Overview", IEEE Trans., PAS-102, 2455-2460.

IEEE Recommended Practices for Power Systems Analysis, (1993),. New York: IEEE, 1002.

IEEE PES Transformer Commitee, (1985), "Recommended Practice for Estabilishing Transformer Capability When Supplying Nonsinusoidal Load Currents", IEEE Publ. 116. C57. I10.

IEEE PES Working Group, (1983), " On Power System Harmonics, Power system harmonics: an overview", IEEE Trans., PAS-102,2455-2460.

IEEE PES Working Group, (1985), " On Power System Harmonics, The Effects of Power System Harmonics, on Power System Equipment and Loads", IEEE Trans. PAS-104, 2555-2563.

IEEE-PES Transformer Commities, (1983), " Recommended Practice for Estabilishing Transformer Capability When Supplying Nonsinusoidal Load Currents." C57.110/D2.

Inagaki, K. (1987), "Digital Protection Method of Power Transformers Based on An Equipvalent Circuit Composed Inverse Inductance", IEEE PES Summer Meeting, San Fransisco, Claifornia.

Inagaki, K. (1988), "Digital Protection Method of Power Transformers Based on An Equivalent Circuit Composed of Inverse Inductance", IEEE Transactions on Power Delivery, Vol.3, 1501-1510.

Ino, T., Mathuz, R. M., Iravani, M. R. And Sasaki, S., (1985), "Validation of Digital Simulation of DC Links-PartII", IEEE paper 85 WM 214-2, PES Winter Meeting, New York.

Johnson, N. B. ve Girgis, A. A., (1987), "Measurement and Characterization of Actual Current and Voltage Harmonics and Distortation in Power Systems", Proceedings of the 19th Southeastern-Symposium on System Theory, SSST, 390-393.

Juan W. D., Gustavo V., Luis A. M., (1997), "A Series Active Power filter Based on a Sinusoidal Current-Controlled Voltage-Source Inverter", IEEE Transactions On Industrial Electronics, Vol:44, No:5, 612-620

Kappenman, J. G., Albertson, V. D., (1990), "Bracing for the Geomagnetic Storms", IEEE Spectrum, 27-33.

- Kappenman, J. G., (1990), "Transformer Dc Excitation Field Test & Results", IEEE Special Panel Session Report, 1-5.
- Katherine P., Thornton ve Makram, Elham, B., (1988), " Study of Power System Harmonics in an Unbalanced System Using the Three-Phase Bus Impedance Matrix", Proceedings of the Twentieth Southeastern on System Theorh Annual Conference, 30-34.
- Kenneth Scot Smith ve Li Ran, (1996), "Input Current Harmonic Analiiysis of Pseudo 12-Pulse 3-Phase to 6-Phase Cycloconverters", IEEE Transactions On Power Electronics, Vol:11, No:4, 629-640.
- Kettleluborough, J., Ganthome, B., (1982), "Simulation of a Transformer/Rectifier Unit for Aircraft Power Supply Systems", IEE Proceedings, Vol. 129 part B No. 6, 323-329.
- Keyhani, A. ve Miri, S.M., (1988), "Nonlinear Modelling of Magnetic Saturation", Electr. Power Syst. Res., 15-24.
- Kiffer, L. P., Dutil, A., Granger, M. ve Bui Van, Q., (1990), " Currents and Harmonics Generated in Power Transformers by DC Polarization", CEA Transactions on Engineering & Operation, Vol. 29, Part 1.
- Konrad , A., Chari, M.V.K, Csendes, Z.J., (1982), " New Finite Element Techniques for Skin Effect Problems", IEEE Transactions on Magnetics, Vol. MAG-18, No.2, 450-455.
- Li, Q. Z., Zhang, J. S. ve Qian, Q. Q., (1989), "Optimization Design on Series Tuning Filtering and Reactive Compensation Used in Traction System", IEE Conference on Main Line Railway Electrification, 222-226.
- Lin, C. E., Cheng, J. B., Huang, C. L., (1982), "Hysteresis Characteristic Analysis of Transformers Under Non-Sinusoidal Excitations Using Real Time Measurement", IEEE T C. Wm. T. McLyman, Magnetic Core Selection for Transformers and Inductors. New York : Marcel Dekker.
- Lin , C. E., Wei, J. B., . Huang, C. L ve Huang, C. J., (1989), " A New Model for Transformer Saturation Charecteristics by Including Hysteresis Loop", IEEE Trans. on Magnetics, Vol. 25, No. 3, 2706-2712.
- Lin, C. E., Cheng, C. L., Huang, C. L. ve Yeh, J. C., (1992), " A Simple Model for Transformer Inrush Electric Calculation and Harmonic Analysis", Electric Power System Research, Vol. 24, No. 2, 153-163.
- Lin, C. E., Wei, J. B., Huang, C. L. Ve Huang, C. J., (1993), " A New Model for Representation of Hysteresis Loops", IEEE Trans. on PWRD, Vol. 4, No. 1, 413-420.
- Lin, C. E., Wei, J. B., Huang , C. L. and Yeh, J. C., (1993), " Investigation of Magnetizing Inrush Current in Transformer Part I-Numerical Simulation", IEEE Trans. on PWRD. Vol. 8, No. 1, 246-254

- Lin, C. E., (1993). "Investigation of Magnetizing Inrush Current In Transformers. Part II – Harmonic Analysis", IEEE Transaction on Power Delivery, Vol:8, No:1, 255-263
- Lin, C. E., Cheng, C. L., Huang, C. L. Ve Yeh, J. C. (1993), " Invesgation of Magnetizing Inrush Current in Transformers, Part II. Harmonic Analysis", IEEE Trans. Power Delivery, 255-263.
- Linders, J. R., (1979), 'Electric Wave Distortions: Their Hidden Costs and Containment', IEEE Trans., IA-15 458-471.
- Liu, P., Malik, O.P., Chen, D. And Hope, G.S., (1989), "Study of Non-Operation for Internal Faults of Second-Harmonic Restraint Differential Protection of Power Transformers", Transactions of the Engineering and Operating Division of the Canadian Electrical Association, Vol .28, Part 3, 1-23.
- Ludeman, L.C., (1986), 'Fundemental of Digital Signal-Processing'', Harper and Row, New York.
- Mahmoud, A., (1984), "Power System Harmonics: An Assessment", in Power System Harmonics, IEEE tutorial Course Text 84 Eh0221-2PWR, 1094, 1-8.
- Mahmoud, A., Shultz R. D., (1982), " A method for Analyzing Harmonics Distirbution in A.C. Power Systems", IEEE Transactions on Power Systems, Vol. PAS-101, No. 6, 1815-1824.
- Mancini, R., (1996), "An Area Substation Load Model in the Prensence of Harmonics", IEEE Transactions On Power Delivery, Vol:11, No:4, 2013-2019.
- Medina, A., Arrillaga, J. ve Acha, E., (1990), "Sparsity-Oriented Hybrid Formulation of Linear Multiports and its Application to Harmonic Analysis", IEEE Trans. on Power Delivery, vol. 5, no. 3, 1453-1458..
- Medina, A., (1992), "Generalised Modelling of Power Transformers in the Harmonic Domain", IEEE transactions on power delivery, vol 7, no.3, 1458-1465
- Medina, A. ve Arrillaga, J., (1992), " Simulation of Multilimb Power Transformers in the Harmonic Domain', IEE Proc. C., 139,269-276.
- Medina, A.,(1994), " Analysis of Transformer-Genarator Interaction in the Harmonic Domain",IEE PROC-Gener transm .Distrib .,Vol.141.No.1,38-46
- Member, Chi-Jui Wu, (1997), "Developing a Harmonics Education Facility in a Power system Simulator for Power Engineering Education", IEEE Transactions On Power Systems, Vol:12, No:1, 22-29.
- McLyman, C. Wm. T., (1982), "Magnetic Core Selection for Transformers and Inductors", New York, Marcel Dekker.

- Mielczarski, Wladyslaw, (1997), "Harmonic Current Reduction in Three-Phase Bridge-Rectifier Circuits Using Controlled Current Injection", IEEE Transactions on Industrial electronics, Vol:44, No:5, 604-611.
- Mochigana, Y., Koyama, Y. ve Takeuchi, T.(1990), "Insulation Level Reduction of Shinkansen at Feeder Circuit", T.IEE Japan, vol. 110-d, no 5, 570-579.
- Mochinaga, Y., Akasuka, Y., Arai, K. ve Ono, M., (1991), "Development of Three-Winding Transformer for Shinkansen Auto-Transformer Feeding System Receiving Extra-High Voltage", T. IEE Japan, Vol.111-d, No.3, 237-244.
- Nakata, T., (1984), "Numerical Analysis of Flux and Loss Distribution in Electrical Machinery", IEEE Trans. On Magnetics, Vol. Mag-20, No. 5.
- Neves, W. L. A., Dommel, H. W., (1993), "On Modelling Iron Core Nonlinearities", IEEE Transactions on Power Systems, vol. PWRS-8,417-425.
- Nims,L.W., (1996), "Application of a Generic Algorithm to Power Transformer Design", Electric Machines and Power Systems, Taylor & Francis, 669-680.
- Nonuo T., Tetsuo O., Fumihiko M., Samau S., (1994), " An Experimental Analysis of DC Excitation of Transformers by Geomagnetically Induced Currents", IEEE Transactions on Power Delivery Vol. 9, No. 2 , 1173-1179.
- O'Dell, (1981), T. H. Ferromagnetodynamics, Chapters 1 and 5, Mcmillan Press Ltd, London.
- Oliver, G., (1993), " Novel Transformer Connection to Improve Current Sharing in High Current DC Rectifiers, " in IEEE IAS'93 Conf. Proc., 986-992.
- Papadias, B. C., Hatziargyriou, N. D., Bakopoulos, J. A., Prousalidis, J. M., (1993), " Three-Phase Transformer Modelling for Fast Electromagnetic Transients", paper No 93 SM-PWRD presented at 1993 IEEE PES Summer Meeting Vancouver(Canada).
- Pasco, W., Norton, E. T., Nilson, S. L., (1985), " High Voltage Direct Current Converter Transformer Magnetics", EPRI Report EL-4340, Research Project 1424-3.
- Pierce, L.W., (1994), " Predicting Liquid Filled Transformer Loading Capability" , IEEE Transactions on Industry Applications, Vol. 30, No. 1, 170-178.
- Pierce, L W., (1994), "Thermal Considerations in Specifying Dry-Type Transformers", IEEE Transactions on Industry Applications, Vol. 30, No. 4, 1090-1098.
- Pierce, L.W., (1996), "Transformer Design and Application Considerations for Nonsinusoidal Load Currents ", IEEE Transactions on Industry Applications, Vol. 32, No. 3, 633-645.
- Poloujadoff, M., Findlay, R.D., (1993)," A Procedure for Illustrating the Effect of Various of Parameters on Optimal Transformer Design ", IEEE Transactions on Power Systems, Vol. PWRS-1, No.4, 202-205

Prusty, S., (1984), "A Novel Approach for Predetermination of Magnetization Characteristics of Transformers Including Hysteresis", IEEE Transactions on Magnetics, Vol. Mag-20, No:4, 607-612.

Prousalidis, J. M., Hatziaargyriou, N. D., Papadias, B. C., (1993): " The Effect of Mutual Phase Coupling on Three-Phase Transformer Models", EPST '93, Lisbon(Potugal).

Prousalidis, J.M., B.C., (1996), " Representation of Hysteresis in Three-Phase Transformer Models for Electromagnetic Transient ", IEE Proc-Elect. Power Appl. Vol. 143. No. 4, 331-338.

Puent, H.R., Burgers. M. L., L. Larsen. E. V. ve Elahi H., (1989), "Energization of Large Shunt Reactors Near Static Ven Compensators and HVDC Converters", IEEE Trans on Power Delivery Vol. 4, No 2, 629-635.

Purkayastha, L, Sayoie P.J., (1994), " Effect of Harmonics on Power Measurement ", IEEE Transactions on Industry Applications, Vol. 26, No. 5, 944-946.

Rahman, M. A. ve Gangopadhyay, (1993), " A Digital Simulation of Magnetizing Inrush Currents in Three Phase Transformers, IEEE Trans. Power Delivery, PWRD-I (235-242).

Rajakovic, N. ve Semlyen, A., (1989), "Investigation of the Inrush Phenomenon. A Quasistationary Approach in the Harmonic Domain", IEEE Trans., PD-4, (4), 2114-2120.

Ray, R., (1988), " Digital Similation of B/H Excursions for Power System Studies", IEE Proceedings-C. Vol. 135, No.3, 229-235.

Reason, J. (1994), " Power Transformers: Performance Improves in Many Small Steps", Electrical World, 48-62.

Reeve, J., Chen, S. P., (1984), " Digital Simulation of Multiterminal HVDC Transmission System", IEEE paper 84 WM 199-6, PES Winter Meeting.

Reference Manual for Electromagnetic Transient Program (EMTP) developed by Bonneville Power Administration, Portlan, Oregon.

Reid, W.E., (1996), " Power Quality Issues-Standarts and Guidilines ", IEEE Transactions on Industry Applications, Vol. 32, No. 3, 625-632.

Roussel, H., (1989) "Power Suply for the Atlantic TGV High Speed Line", IEE Conference on Main Line Railway Electrification, 388-392.

Rubaai, A, (1994),"Computer-Aided-Instnaction of Power-Transformer Design in the Undergratuete Power Engineering Class ", IEEE Transactions on Power Systems, Vol. 9, No. 3, 1174-1181.

Rusch, R.J., Good, M.L., (1993), "Wyes and Wye Nots of Three-Phase Distrubution Transformer Connections", IEEE Transactions on Industry Applications Vol. 26, No. 4, 683-688.

Sachdev M.S., (1989), "A Digital Relaying Algorithm For Detecting Transformer Winding Faults", *IEEE Transactions on Power Delivery*, vol 4, no.3, 1638-1648

Seguier, G.,(1986), 'Power Electronic Converters AC/DC Conversion', New York, McGraw-Hill.

Semlyen, A., (1986), "Steady-State Analysis of Nonlinear Dynamic Systems with Periodic Excitation Based on Linearization in Harmonic Space", *Canadian Electrical Engineering Journal*, Vol.11, No.3, 114-117.

Semlyen, A., Acha, E. ve Arrillaga, J., (1987), "Newton-Type Algorithms for the Harmonic Phasor Analysis of Non-Linear Power Circuits in Periodical Steady State with Special Reference to Magnetic Non-Linearities", *IEEE Paper No. 87 Wm 170-4*, presented at the 1987 Power Engineering Society Winter Meeting, New Orleans, Louisiana, USA

Semlyen, A., Acha, E. ve Arrillaga, J., (1988), "Newton-Type Algorithms for the Harmonic Phasor Analysis of Non-Linear Power Circuits in Periodical Steady State with Special Reference to Magnetic Non-Linearities", *IEEE Trans. on Power Delivery*, Vol. 3. No. 3, 1090-1098.

Semlyen, A. ve Arrillaga, J., (1987), "Harmonic Norton Equivalent for the Magnetising Branch of a Transformer", *IEE Proc. Vol. 134, Pt. C, No. 2*, 162-169

Sidhu, T.S., (1992), "Design, Implementation and Testing of a Microprocessor-Based High-Speed Relay For Detecting Transformer Winding Faults", *Transactions On Power Delivery*, Vol:7, No:1, 108-117.

Sidhu, T., (1992), "Model Representing the Nonlinear Behaviour of Three-Phase Transformers", *Archiv für Elektrotechnik*, Vol.77, No.1, 143-150

Simpson, R.H., (1998), "Instrumentation, Measurement Techniques, and Analytical Tools in Power Quality Studies", *Distortion, IEEE Transactions on Industry Applications*, Vol.-34, No. 3, 534-548

Smith, B., (1996), "A Newton Solution for the Harmonic Phasor Analysis of AC/DC Converters", *IEEE transactions on power delivery*, vol 11, no.2, 965-971

Shu, Lu., (1993), "Harmonics Generated from ADC Biased Transformer", *IEEE Transactions on Power Delivery*, vol 8, no.2, 725-731

Stensland, T., (1997), " Modeling of Magnetizing and Core-Loss Currents in Single Phase Transformers with Voltage Harmonics for use in Power Flow.", *IEEE Transactions On Power Delivery*, Vol:12, No:2, 768-774.

Stenzel, J., (1994) " Model Representing the Nonlinear Behaviour of Three-Phase Transformers", *Archiv für Elektrotechnik*, Vol.77, No.1, 143-150

Strembler, F. G., (1982), "Introduction to Communication Systems", Addison-Wesley, Reading, MA, 2nd edn., 43.

Sybille, G., Gavrilovic, M., Belanger, J., (1985), "Transformer Saturation Effects on EHV System Overvoltages", IEEE Transactions on Power Apparatus and Systems, Vol. PAS-104 No. 3, 671-680.

Takach, D. S. ve Boggavarappu R. L., (1985), "Distribution Transformer No Load Losses", IEEE Trans. Power A Syst., vol. 104. no .1, 181-193.

Tanneau, Gerard, (1996), "Surface Impedance for 3D Non-Linear Eddy Current Problems-Application to Loss Computation in Transformers", IEEE Transactions On magnetics, Vol:32, No:3, 808-811

Tay, H. C., Swift, G. S., (1985), " On the Problem of Transformer Overheating due to Geomagneticallcally Incuded Currents", IEEE Trans., Vol. PAS-104, No. 1, 212-219.

Tiipana, E., (1989), "Supply of Electricity for Electrified Lines in Finland", IEE Conference on Main Line Railway Elecktrification, 174-177.

Tomczuk., Bronislaw, (1992), "Tree-Dimensional Leakage Reactance Calculation and Magnetic Field Analylsis for Unbounded Problems", IEEE Transactions On Magnetics, Vol:28, No:4, 1935-1940.

Thorp, J.S. ve Phadke, A.G., (1993), "A Microprocessor Based Three Phase Transformer Differential Relay", IEEE Trans. on Power Apparatus and Systems, Vol. PAS-102, no. 11,3624-3628

Thomas, M., (1991), "Uncertainties in Compliance with Harmonic Current Distortion Limits in Electric Power System", IEEE Transactions on Industry Applications, Vol. 27, No 4, 680-685

TMS320C25 Compiler, (1989), Reference Guide, Texas Instruments, Houston, Tx, USA.

Vovos, N., Galanos, G., Giannakopoulos, G., (1983), "A Mathematical Model for Dynamic Simulation of HVDC Systems", IEEE Transactions on Power Apparatus and Systems, Vol. PAS-102 No. 6, 1755-1763,.

Westing House, (1986), Distribution Transformer Guide, Athens, GA.

Willing, R. A., Khan, A. H., (1991), " Characteristics of Transformer Exciting-Current During Geomagnetic Disturbances", IEEE/PES, 91 WM 095-0 PWRD.

Williment, P. T., (1989), "East Coast Main Line Electrification 25 kV AC system design", IEE Conference Publication No. 312, International Conference on Main Line Railway Electrification, 306-310.

Wilkins, F.J. ve Drake, A. E., (1965), "Measurement and Interpetation of Power Losses in Elecktrical Sheet Steell", Proc .IEE Vol. 112, No. 4, 771-785.

Wilson Xu, (1991), Multiphase Harmonic Load Flow Program (MHLF) Reference Manual, Powertech, Labs,Inc.

Woodford, D. A., Gole, A. M., Menzies, R. W., (1983), "Digital Simulation of DC Links and AC Machines", IEEE Transactions on Power Apparatus and Systems, Vol. PAS-102, 1616-1623.

Woodford, D. A., (1985), "Validation of Digital Simulation of DC Link", IEEE paper 85 WM 213-4, PES Winter Meeting, New York.

Wood, H.C., Sidhu, T.S., Sachev, M.S. ve Nagpal, M., (1989), "A General-Purpose Hardware for Microprocessor Based Relays", Proceedings of the International Conference on Power System Protection '89, Singapore, 13-14, 43-59.

Wu, C.J., Chang, W.N., (1997), "Developing a Harmonics Education Facility in a Power System Simulator for Power Engineering Education", IEEE Transactions on Power Systems Vol. 12, No. 1, 22-29.

Xu, W. ve Dommel, H. W., (1993), "Computation of Steady State Harmonics of Static Var Compensator."

Xu, W., Marti, J.R. ve Dommel, H. W., (1991) "A Multiphase Harmonic Load Flow Solution Technique", IEEE Trans. on Power Systems, PS vol.6, 174-182.

Xu, W.W., Dommel, H.W., ve Marti, J.R., (1991), "A Synchronous Machine Model for Three-Phase Harmonic Analysis and EMTP Initialization", IEEE Trans., PWRD-6,(4), 1530-1538.

Xu, W., (1994), "Harmonics from SVC Transformer Saturation with Direct Current Offset", IEEE Transactions on Power Delivery, vol 9, no.3, 1502-1509

Yacamini, R. ve Abu Nasser, A., (1986), "Transformer Inrush Current and Their Associated Overvoltages in HVDC Schemes", IEE Proc. Vol. 133, Pt. C, No. 6, 353-358.

Yacamini, R. ve Abu Nasser, A., (1986), "Numerical Calculation of Inrush Current in Single-Phase Transformers", IEE Proc. Vol. 133, Pt. B, No. 1, 31-40.

Yacamini, R. ve Abu Nasser, (1986), "The Calculation of Inrush Current in Three-phase Transformers", IEE Proc. B, Vol:133, 31-40.

Yousef-Zai, F.Q., (1996), "Solid-State on Load Transformer Tap Changer", IEEE Proc-Electr. Power Appl., Vol.143, No.6, (481-491).

EKLER

- Ek 1** **Üç Faz Spice Program ile Üç Faz Transformatörlerin Farklı Bağlantı Şekillerinde Harmonik Analiz**
- Ek 2** **Deneyde Kullanılan Cihazlar**
- Ek 3** **Muhtelif Üç Faz Transformatörler**



Ek 1. Üç Faz Spice Program ile Üç Faz Transformatörlerin Farklı Bağlantı Şekillerinde Harmonik Analiz

Lineer Yük Simülasyonu

```

vsource 1 0 sin(0 120 50 0 0)
rsource 1 2 1
rline 2 3 1
rload 3 0 1k
.options itl5=0
.tran 0.5m 30m 0 1u
.plot tran v(2,3)
.four 60 v(2,3)
.end

```

Geçici cevabın v(2,3)fourier bileşimleri

dc bileşen = 4.028E-12

harmonik no	frekans (hz)	fourier bileşen	bağlı bileşen	phase (derece)	bağlı faz(derece)
1	5.000E+01	1.198E-01	1.000000	-72.000	0.000
2	1.000E+02	5.793E-12	0.000000	51.122	123.122
3	1.500E+02	7.407E-12	0.000000	-34.624	37.376
4	2.000E+02	9.056E-12	0.000000	4.267	76.267
5	2.500E+02	1.651E-11	0.000000	-83.461	-11.461
6	3.000E+02	3.931E-11	0.000000	36.399	108.399
7	3.500E+02	2.338E-11	0.000000	-41.343	30.657
8	4.000E+02	4.716E-11	0.000000	53.324	125.324
9	4.500E+02	3.453E-11	0.000000	21.691	93.691

toplam harmonik distorsiyon = 0.000000 %

Lineer Olmayan Yük Simülasyonu

```

vsource 1 0 sin(0 120 50 0 0)
rsource 1 2 1
rline 2 3 1
rload 3 0 1k
i3har 3 0 sin(0 50m 180 0 0)
.options itl5=0
.tran 0.5m 30m 0 1u
.plot tran v(2,3)
.four 60 v(2,3)
.end

```

time v(2,3)

```

-----
0.000E+00 0.000E+00 . . . * . .
5.000E-04 4.918E-02 . . . * . .
1.000E-03 8.924E-02 . . . * . .
1.500E-03 1.137E-01 . . . * . .
2.000E-03 1.204E-01 . . . * . .
2.500E-03 1.123E-01 . . . * .

```

3.000E-03	9.595E-02	.	.	*	.
3.500E-03	7.962E-02	.	.	*	.
4.000E-03	7.051E-02	.	.	*	.
4.500E-03	7.242E-02	.	.	*	.
5.000E-03	8.457E-02	.	.	*	.
5.500E-03	1.018E-01	.	.	*	.
6.000E-03	1.163E-01	.	.	*	.
6.500E-03	1.201E-01	.	.	*	.
7.000E-03	1.075E-01	.	.	*	.
7.500E-03	7.738E-02	.	.	*	.
8.000E-03	3.338E-02	.	*	.	.
8.500E-03	-1.687E-02	.	*	.	.
9.000E-03	-6.394E-02	.	*	.	.
9.500E-03	-9.932E-02	*	.	.	.
1.000E-02	-1.179E-01	*	.	.	.
1.050E-02	-1.191E-01	*	.	.	.
1.100E-02	-1.074E-01	*	.	.	.
1.150E-02	-9.010E-02	*	.	.	.
1.200E-02	-7.551E-02	*	.	.	.
1.250E-02	-6.986E-02	*	.	.	.
1.300E-02	-7.551E-02	*	.	.	.
1.350E-02	-9.010E-02	*	.	.	.
1.400E-02	-1.074E-01	*	.	.	.
1.450E-02	-1.191E-01	*	.	.	.
1.500E-02	-1.179E-01	*	.	.	.
1.550E-02	-9.932E-02	*	.	.	.
1.600E-02	-6.394E-02	.	*	.	.
1.650E-02	-1.687E-02	.	*	.	.

Geçici cevabın v(2,3)fourier bileşimleri

dc bileşen = 1.349E-11

harmonik no	frekans (hz)	fourier bileşen	bağlı bileşen	phase (derece)	bağlı faz (derece)
1	5.000E+01	1.198E-01	1.000000	-72.000	0.000
2	1.000E+02	1.609E-11	0.000000	67.570	139.570
3	1.500E+02	4.990E-02	0.416667	144.000	216.000
4	2.000E+02	1.074E-10	0.000000	-169.546	-97.546
5	2.500E+02	3.871E-11	0.000000	169.582	241.582
6	3.000E+02	5.736E-11	0.000000	140.845	212.845
7	3.500E+02	8.407E-11	0.000000	177.071	249.071
8	4.000E+02	1.329E-10	0.000000	156.772	228.772
9	4.500E+02	2.619E-10	0.000000	160.498	232.498

toplam harmonik distorsiyonu = 41.666663 %

Lineer Olmayan Yük Simülasyonu

vsourc 1 0 sin(0 120 50 0 0)

rsourc 1 2 1

rline 2 3 1

rload 3 0 1k

```

i3har 3 0 sin(0 50m 180 0 0)
i5har 3 0 sin(0 50m 300 0 0)
i7har 3 0 sin(0 50m 420 0 0)
i9har 3 0 sin(0 50m 540 0 0)
.options itl5=0
.tran 0.5m 30m 0 1u
.plot tran v(2,3)
.four 60 v(2,3)
.end

```

Geçici cevabın v(2,3)fourier bileşimleri
dc bileşen = 6.299E-11

harmonik no	frekans (hz)	fourier bileşen	bağlı bileşen	phase (derece)	bağlı faz (derece)
1	5.000E+01	1.198E-01	1.000000	-72.000	0.000
2	1.000E+02	1.900E-09	0.000000	-93.908	-21.908
3	1.500E+02	4.990E-02	0.416667	144.000	216.000
4	2.000E+02	5.469E-09	0.000000	-116.873	-44.873
5	2.500E+02	4.990E-02	0.416667	0.000	72.000
6	3.000E+02	6.271E-09	0.000000	85.062	157.062
7	3.500E+02	4.990E-02	0.416666	-144.000	-72.000
8	4.000E+02	2.742E-09	0.000000	-38.781	33.219
9	4.500E+02	4.990E-02	0.416666	72.000	144.000

toplam harmonik distorsiyon = 83.333296 %

Harmonikli Y-Y bağlantılı 4 iletkenli sistem

```

*
* faz1 gerilim kaynağı ve r (120 v / _ 0 derece)
vsource1 1 0 sin(0 120 50 0 0)
rsource1 1 2 1
*
* faz2 gerilim kaynağı ve r (120 v / _ 120 derece)
vsource2 3 0 sin(0 120 60 5.55555m 0)
rsource2 3 4 1
*
* faz3 gerilim kaynağı ve r (120 v / _ 240 derece)
vsource3 5 0 sin(0 120 60 11.1111m 0)
rsource3 5 6 1
*
* hat ve nötr iletken dirençleri
rline1 2 8 1
rline2 4 9 1
rline3 6 10 1
rneutral 0 7 1
*
* yük faz1
rload1 8 7 1k
i3har1 8 7 sin(0 50m 180 0 0)
i5har1 8 7 sin(0 50m 300 0 0)
i7har1 8 7 sin(0 50m 420 0 0)

```

i9har1 8 7 sin(0 50m 540 0 0)

*

* yük faz2

rload2 9 7 1k

i3har2 9 7 sin(0 50m 180 5.55555m 0)

i5har2 9 7 sin(0 50m 300 5.55555m 0)

i7har2 9 7 sin(0 50m 420 5.55555m 0)

i9har2 9 7 sin(0 50m 540 5.55555m 0)

*

* yük faz3

rload3 10 7 1k

i3har3 10 7 sin(0 50m 180 11.1111m 0)

i5har3 10 7 sin(0 50m 300 11.1111m 0)

i7har3 10 7 sin(0 50m 420 11.1111m 0)

i9har3 10 7 sin(0 50m 540 11.1111m 0)

*

* esasın analizi

.options itl5=0

.tran 0.5m 100m 12m 1u

.plot tran v(2,8)

.four 60 v(2,8)

.plot tran v(0,7)

.four 60 v(0,7)

.end

Hat akımının fourier analizi:

Geçici cevabın v(2,8)fourier bileşimleri

dc bileşen = -6.404E-12

harmonik no	frekans (hz)	fourier bileşen	bağlı bileşen	phase (derece)	bağlı faz (derece)
1	5.000E+01	1.198E-01	1.000000	0.000	0.000
2	1.000E+02	2.218E-10	0.000000	172.985	172.985
3	1.500E+02	4.975E-02	0.415423	0.000	0.000
4	2.000E+02	4.236E-10	0.000000	166.990	166.990
5	2.500E+02	4.990E-02	0.416667	0.000	0.000
6	3.000E+02	1.877E-10	0.000000	-147.146	-147.146
7	3.500E+02	4.990E-02	0.416666	0.000	0.000
8	4.000E+02	2.784E-10	0.000000	-148.811	-148.811
9	4.500E+02	4.975E-02	0.415422	0.000	0.000

toplam harmonik distorsiyon = 83.209009 %

Nötr akımının fourier analizi:

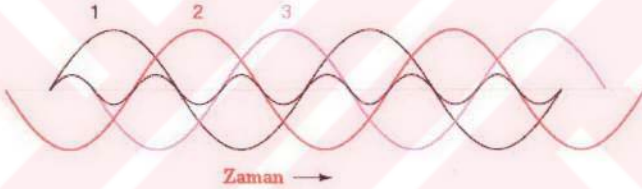
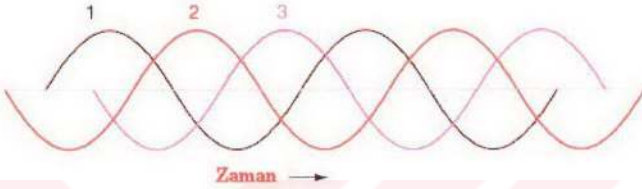
Geçici cevabın v(0,7)fourier bileşimleri

dc bileşen = 1.819E-10

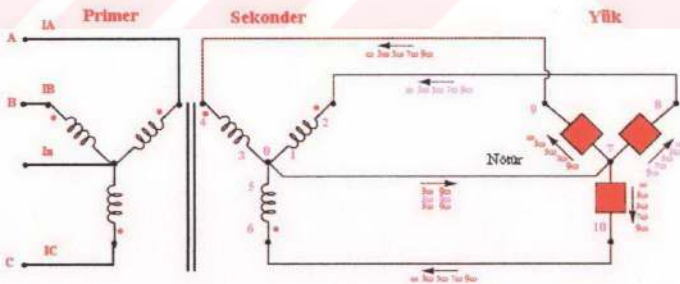
harmonik no	frekans (hz)	fourier bileşen	bağlı bileşen	phase (derece)	bağlı faz (derece)
1	5.000E+01	4.337E-07	1.000000	60.018	0.000
2	1.000E+02	1.869E-10	0.000431	91.206	31.188

3	1.500E+02	1.493E-01	344147.7638	-180.000	-240.018
4	2.000E+02	1.257E-09	0.002898	-21.103	-81.121
5	2.500E+02	9.023E-07	2.080596	119.981	59.963
6	3.000E+02	3.396E-10	0.000783	15.882	-44.136
7	3.500E+02	1.264E-06	2.913955	59.993	-0.025
8	4.000E+02	5.975E-10	0.001378	35.584	-24.434
9	4.500E+02	1.493E-01	344147.4889	-179.999	-240.017

Faz sırası 1 - 2 - 3 - 1 - 2 - 3 - 1 - 2 - 3



Şekil Ek 1.1 Faz sırası



Şekil Ek 1.2 Y-Y bağlı trafo ve Y yük

Harmonikli nütürsüz Y-Y bağlantı

*

* faz1 gerilim kaynağı ve r (120 v / _ 0 derece)
vsourcel 1 0 sin(0 120 50 0 0)

```

rsource1 1 2 1
*
* faz2 gerilim kaynağı ve r (120 v / _ 120 derece)
vsource2 3 0 sin(0 120 60 5.55555m 0)
rsource2 3 4 1
*
* faz3 gerilim kaynağı ve r (120 v / _ 240 derece)
vsource3 5 0 sin(0 120 60 11.1111m 0)
rsource3 5 6 1
*
* hat dirençleri
rline1 2 8 1
rline2 4 9 1
rline3 6 10 1
*
* yük faz1
rload1 8 7 1k
i3har1 8 7 sin(0 50m 180 0 0)
i5har1 8 7 sin(0 50m 300 0 0)
i7har1 8 7 sin(0 50m 420 0 0)
i9har1 8 7 sin(0 50m 540 0 0)
*
* yük faz2
rload2 9 7 1k
i3har2 9 7 sin(0 50m 180 5.55555m 0)
i5har2 9 7 sin(0 50m 300 5.55555m 0)
i7har2 9 7 sin(0 50m 420 5.55555m 0)
i9har2 9 7 sin(0 50m 540 5.55555m 0)
*
* yük faz3
rload3 10 7 1k
i3har3 10 7 sin(0 50m 180 11.1111m 0)
i5har3 10 7 sin(0 50m 300 11.1111m 0)
i7har3 10 7 sin(0 50m 420 11.1111m 0)
i9har3 10 7 sin(0 50m 540 11.1111m 0)
*
* esasın analizi
.options itl5=0
.tran 0.5m 100m 12m 1u
.plot tran v(2,8)
.four 60 v(2,8)
.plot tran v(0,7)
.four 60 v(0,7)
.plot tran v(8,7)
.four 60 v(8,7)
.end

```

Hat akımının fourier analizi:

Geçici cevabın v(2,8)fourier bileşimleri
dc bileşen = 5.423E-11

harmonik frekansı no	fourier (hz)	bağlı bileşen	phase (derece)	bağlı faz (derece)
1	5.000E+01	1.198E-01	1.000000	0.000
2	1.000E+02	2.388E-10	0.000000	158.016
3	1.500E+02	3.136E-07	0.000003	-90.009
4	2.000E+02	5.963E-11	0.000000	-111.510
5	2.500E+02	4.990E-02	0.416665	0.000
6	3.000E+02	8.606E-11	0.000000	-124.565
7	3.500E+02	4.990E-02	0.416668	0.000
8	4.000E+02	8.126E-11	0.000000	-159.638
9	4.500E+02	9.406E-07	0.000008	-90.005
toplam harmonik distorsiyon = 58.925539 %				

İki yıldız merkez noktaları arasındaki gerilimin fourier analizi:

Geçici cevabın v(0,7)fourier bileşimleri

dc bileşen = 6.093E-08

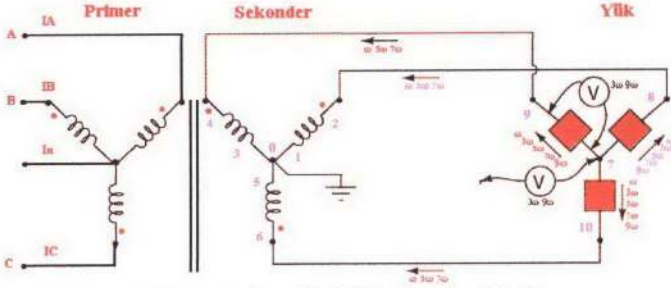
harmonik frekansı no	fourier (hz)	bağlı bileşen	phase (derece)	bağlı faz (derece)
1	5.000E+01	1.453E-04	1.000000	60.018
2	1.000E+02	6.263E-08	0.000431	91.206
3	1.500E+02	5.000E+01	344147.7879	-180.000
4	2.000E+02	4.210E-07	0.002898	-21.103
5	2.500E+02	3.023E-04	2.080596	119.981
6	3.000E+02	1.138E-07	0.000783	15.882
7	3.500E+02	4.234E-04	2.913955	59.993
8	4.000E+02	2.001E-07	0.001378	35.584
9	4.500E+02	5.000E+01	344147.4728	-179.999
toplam harmonik distorsiyon = ***** %				

Yük faz geriliminin fourier analizi:

Geçici cevabın v(8,7)fourier bileşimleri

dc bileşen = 6.070E-08

harmonik frekansı no	fourier (hz)	bağlı bileşen	phase (derece)	bağlı faz (derece)
1	5.000E+01	1.198E+02	1.000000	0.000
2	1.000E+02	6.231E-08	0.000000	90.473
3	1.500E+02	5.000E+01	0.417500	-180.000
4	2.000E+02	4.278E-07	0.000000	-19.747
5	2.500E+02	9.995E-02	0.000835	179.850
6	3.000E+02	1.023E-07	0.000000	13.485
7	3.500E+02	9.959E-02	0.000832	179.790
8	4.000E+02	1.991E-07	0.000000	35.462
9	4.500E+02	5.000E+01	0.417499	-179.999
toplam harmonik distorsiyon = 59.043467 %				



Şekil Ek 1.3 Topraklı Y-Y bağlı trafo ve Y yük

Harmonikli Üçgen-yıldız bağlantı

*

* faz1 gerilim kaynağı ve r (120 v / _ 0 derece)

vsourcel 1 0 sin(0 207.846 60 0 0)

rsourcel 1 2 1

*

* faz2 gerilim kaynağı ve r (120 v / _ derece)

vsourcel 2 3 2 sin(0 207.846 60 5.55555m 0)

rsourcel 2 3 4 1

*

* faz3 gerilim kaynağı ve r (120 v / _ 240 derece)

vsourcel 3 5 4 sin(0 207.846 60 11.1111m 0)

rsourcel 3 5 0 1

*

* hat dirençleri

rline1 0 8 1

rline2 2 9 1

rline3 4 10 1

*

* yük faz1

rload1 8 7 1k

i3har1 8 7 sin(0 50m 180 9.72222m 0)

i5har1 8 7 sin(0 50m 300 9.72222m 0)

i7har1 8 7 sin(0 50m 420 9.72222m 0)

i9har1 8 7 sin(0 50m 540 9.72222m 0)

*

* yük faz2

rload2 9 7 1k

i3har2 9 7 sin(0 50m 180 15.2777m 0)

i5har2 9 7 sin(0 50m 300 15.2777m 0)

i7har2 9 7 sin(0 50m 420 15.2777m 0)

i9har2 9 7 sin(0 50m 540 15.2777m 0)

*

* yük faz3

```

rload3 10 7 1k
i3har3 10 7 sin(0 50m 180 4.16666m 0)
i5har3 10 7 sin(0 50m 300 4.16666m 0)
i7har3 10 7 sin(0 50m 420 4.16666m 0)
i9har3 10 7 sin(0 50m 540 4.16666m 0)

```

```

*
* esasın analizi
.options itl5=0
.tran 0.5m 100m 16m 1u
.plot tran v(0,8) v(8,7) v(1,2)
.four 60 v(0,8) v(8,7) v(1,2)
.end

```

Hat akımının fourier analizi:

Geçici cevabın v(0,8)fourier bileşimleri

dc bileşen = -6.850E-11

harmonik no	frekans (hz)	fourier bileşen	bağıl bileşen	phase (derece)	bağıl faz (derece)
1	5.000E+01	1.198E-01	1.000000	150.000	0.000
2	1.000E+02	2.491E-11	0.000000	159.723	9.722
3	1.500E+02	1.506E-06	0.000013	0.005	-149.996
4	2.000E+02	2.033E-11	0.000000	52.772	-97.228
5	2.500E+02	4.994E-02	0.416682	30.002	-119.998
6	3.000E+02	1.234E-11	0.000000	57.802	-92.198
7	3.500E+02	4.993E-02	0.416644	-29.998	-179.998
8	4.000E+02	8.024E-11	0.000000	-174.200	-324.200
9	4.500E+02	4.518E-06	0.000038	-179.995	-329.995
toplam harmonik distorsiyon =			58.925038 %		

Yük faz geriliminin fourier analizi:

Geçici cevabın v(8,7)fourier bileşimleri

dc bileşen = 1.259E-08

harmonik no	frekans (hz)	fourier bileşen	bağıl bileşen	phase (derece)	bağıl faz (derece)
1	5.000E+01	1.198E+02	1.000000	150.000	0.000
2	1.000E+02	1.941E-07	0.000000	49.693	-100.307
3	1.500E+02	5.000E+01	0.417222	-89.998	-239.998
4	2.000E+02	1.519E-07	0.000000	66.397	-83.603
5	2.500E+02	6.466E-02	0.000540	-151.112	-301.112
6	3.000E+02	2.433E-07	0.000000	68.162	-81.838
7	3.500E+02	6.931E-02	0.000578	148.548	-1.453
8	4.000E+02	2.398E-07	0.000000	-174.897	-324.897
9	4.500E+02	5.000E+01	0.417221	90.006	-59.995
toplam harmonik distorsiyon =			59.004109 %		

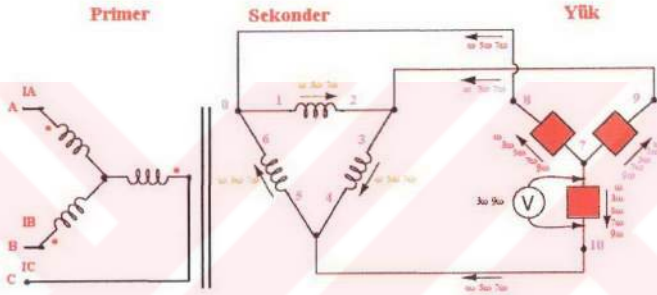
Kaynak faz geriliminin fourier analizi:

Geçici cevabın v(1,2)fourier bileşimleri

dc bileşen = 3.564E-11

no	harmonik frekansı (hz)	fourier bileşen	bağıl bileşen	phase (derece)	bağıl faz (derece)
1	5.000E+01	6.906E-02	1.000000	-0.181	0.000
2	1.000E+02	1.525E-11	0.000000	-156.674	-156.493
3	1.500E+02	1.422E-06	0.000021	-179.996	-179.815
4	2.000E+02	2.949E-11	0.000000	-110.570	-110.390
5	2.500E+02	2.883E-02	0.417440	-179.996	-179.815
6	3.000E+02	2.324E-11	0.000000	-91.926	-91.745
7	3.500E+02	2.883E-02	0.417398	-179.994	-179.813
8	4.000E+02	4.140E-11	0.000000	-39.875	-39.694
9	4.500E+02	4.267E-06	0.000062	0.006	0.186

toplam harmonik distorsiyon = 59.031969 %



Şekil Ek 1.4 Yıldız-üçgen bağlı trafo ve Y yük

Harmonikli üçgen-üçgen bağlantı

*

* faz1 gerilim kaynağı ve r (120 v / _ 0 derece)

vsourcel 1 0 sin(0 120 60 0 0)

rsourcel 1 2 1

*

* faz2 gerilim kaynağı ve r (120 v / _ 120 derece)

vsourcel 2 2 sin(0 120 60 5.55555m 0)

rsourcel 2 3 4 1

*

* faz3 gerilim kaynağı ve r (120 v / _ 240 derece)

vsourcel 3 5 4 sin(0 120 60 11.1111m 0)

rsourcel 3 5 0 1

*

* hat dirençleri

rline1 0 6 1

rline2 2 7 1

rline3 4 8 1

*

```

* yük faz1
rload1 7 6 1k
i3har1 7 6 sin(0 50m 180 0 0)
i5har1 7 6 sin(0 50m 300 0 0)
i7har1 7 6 sin(0 50m 420 0 0)
i9har1 7 6 sin(0 50m 540 0 0)
*
* yük faz2
rload2 8 7 1k
i3har2 8 7 sin(0 50m 180 5.55555m 0)
i5har2 8 7 sin(0 50m 300 5.55555m 0)
i7har2 8 7 sin(0 50m 420 5.55555m 0)
i9har2 8 7 sin(0 50m 540 5.55555m 0)
*
* yük faz3
rload3 6 8 1k
i3har3 6 8 sin(0 50m 180 11.1111m 0)
i5har3 6 8 sin(0 50m 300 11.1111m 0)
i7har3 6 8 sin(0 50m 420 11.1111m 0)
i9har3 6 8 sin(0 50m 540 11.1111m 0)
*
* esasın analizi
.options itl5=0
.tran 0.5m 100m 16m 1u
.plot tran v(0,6) v(7,6) v(2,1) i(3har1)
.four 60 v(0,6) v(7,6) v(2,1)
.end

```

Hat akımının fourier analizi:

Geçici cevabın v(0,6)fourier bileşimleri
dc bileşen = -6.007E-11

no	harmonik frekansı (hz)	fourier bileşen	bağıl bileşen	phase (derece)	bağıl faz (derece)
1	5.000E+01	2.070E-01	1.000000	150.000	0.000
2	1.000E+02	5.480E-11	0.000000	156.666	6.666
3	1.500E+02	6.257E-07	0.000003	89.990	-60.010
4	2.000E+02	4.911E-11	0.000000	8.187	-141.813
5	2.500E+02	8.626E-02	0.416664	-149.999	-300.000
6	3.000E+02	1.089E-10	0.000000	-31.997	-181.997
7	3.500E+02	8.626E-02	0.416669	150.001	0.001
8	4.000E+02	1.578E-10	0.000000	-63.940	-213.940
9	4.500E+02	1.877E-06	0.000009	89.987	-60.013
toplam harmonik distorsiyon =			58.925538 %		

Yük faz geriliminin fourier analizi:

Geçici cevabın v(7,6)fourier bileşimleri
dc bileşen = -5.680E-10

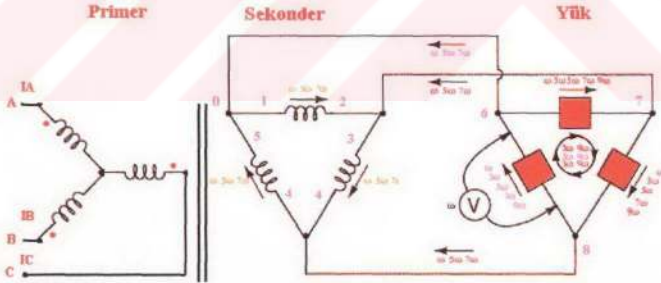
no	harmonik frekansı (hz)	fourier bileşen	bağıl bileşen	phase (derece)	bağıl faz (derece)
1	5.000E+01	1.195E+02	1.000000	0.000	0.000

2	1.000E+02	1.039E-09	0.000000	144.749	144.749
3	1.500E+02	1.251E-06	0.000000	89.974	89.974
4	2.000E+02	4.215E-10	0.000000	36.127	36.127
5	2.500E+02	1.992E-01	0.001667	-180.000	-180.000
6	3.000E+02	2.499E-09	0.000000	-4.760	-4.760
7	3.500E+02	1.992E-01	0.001667	-180.000	-180.000
8	4.000E+02	2.951E-09	0.000000	-151.385	-151.385
9	4.500E+02	3.752E-06	0.000000	89.905	89.905
toplam harmonik distorsiyon = 0.235702 %					

Kaynak faz akımının fourier analizi:

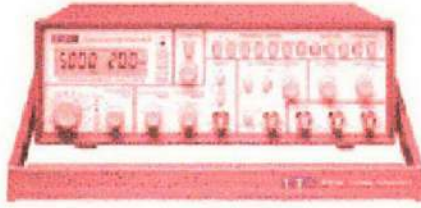
Geçici cevabın $v(2,1)$ fourier bileşimleri
dc bileşen = -1.923E-12

no	harmonik frekansı (hz)	fourier bileşen	bağıl bileşen	phase (derece)	bağıl faz (derece)
1	5.000E+01	1.194E-01	1.000000	179.940	0.000
2	1.000E+02	2.569E-11	0.000000	133.491	-46.449
3	1.500E+02	3.129E-07	0.000003	89.985	-89.955
4	2.000E+02	2.657E-11	0.000000	23.368	-156.571
5	2.500E+02	4.980E-02	0.416918	-180.000	-359.939
6	3.000E+02	4.595E-11	0.000000	-22.475	-202.415
7	3.500E+02	4.980E-02	0.416921	-180.000	-359.939
8	4.000E+02	7.385E-11	0.000000	-63.759	-243.699
9	4.500E+02	9.385E-07	0.000008	89.991	-89.949
toplam harmonik distorsiyon = 58.961298 %					



Şekil Ek 1.5 Yıldız-üçgen bağlı trafo ve üçgen yük

Ek 2 Deneyde Kullanılan Cihazlar



Şekil Ek 2.1 Sinyal jeneratörü



Şekil Ek 2.2 Frekansmetre



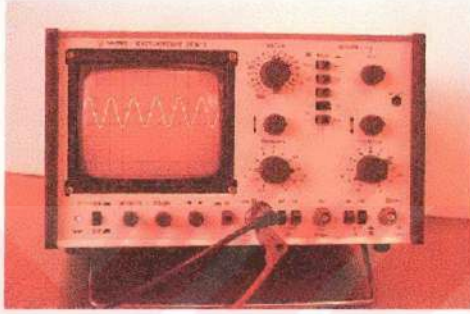
Şekil Ek 2.3 Harmonik analizör



Şekil Ek 2.4 Fonksiyon generatör



Şekil Ek 2.5 Spektrum analizör



Şekil Ek 2.6 Osilaskop 1



Şekil Ek 2.7 Osilaskop2



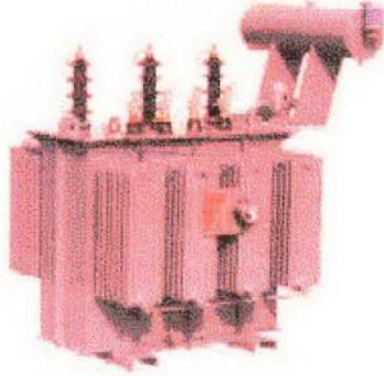
Şekil Ek 2.8 Multimetre

Ek 3 Muhtelif Üç Faz Transformatörler

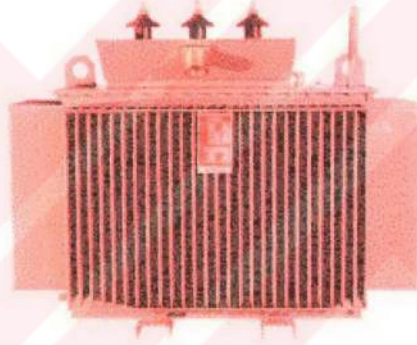
Şekil Ek 3.1 Üç faz güç transformatörü



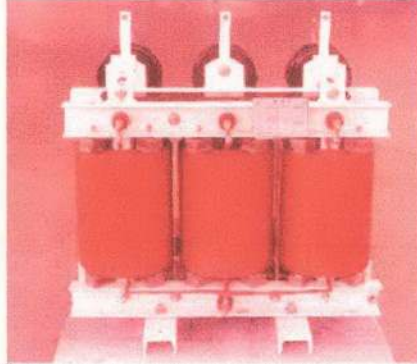
Şekil Ek 3.2 Trafo testi



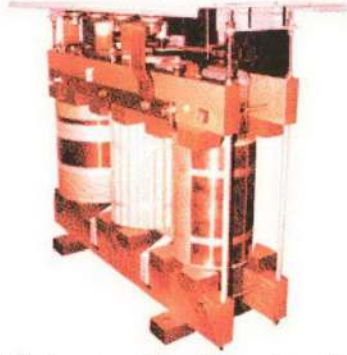
Şekil Ek 3.3 500 VA dan 500 kVA arası Üç faz transformatör



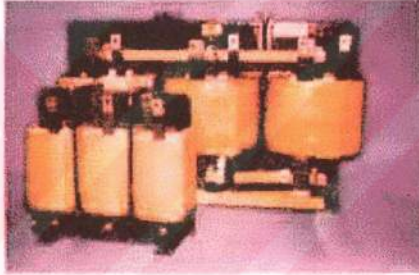
Şekil Ek 3.4 500 VA dan 500 kVA arası üç faz transformatör



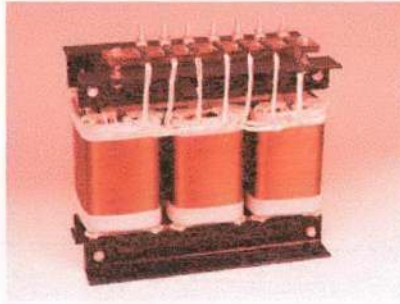
Şekil Ek 3.5 Üç faz kuru tip güç transformatör (10 kV ve yukarı/400 V)



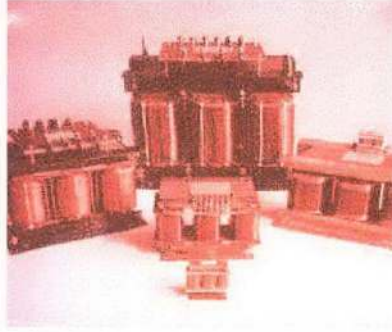
Şekil Ek 3.6 Üç faz orta gerilim yağlı transformatör için aktif kısım



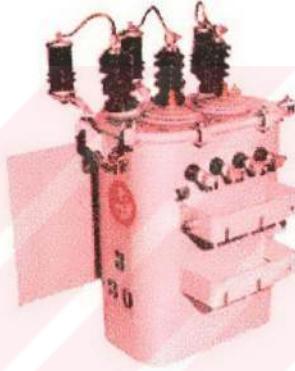
Şekil Ek 3.7 3UI tipi üç fazlı transformatörler



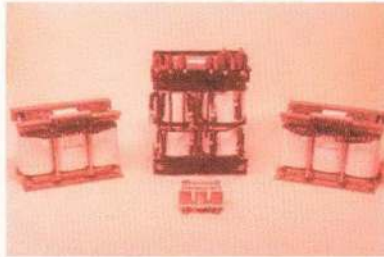
Şekil Ek 3.8 3UI tipi üç fazlı transformatörle



Şekil Ek 3.9 3UI tipi üç fazlı transformatör



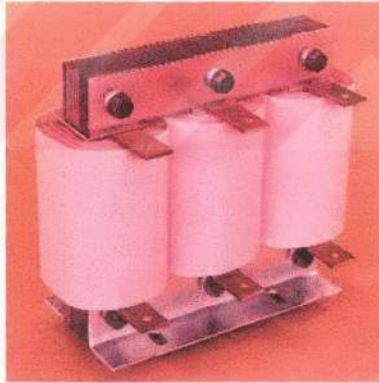
Şekil Ek 3.10 Toshiba üç faz transformatör



Şekil Ek 3.11 Bilgisayar destekli tasarımlarda kul.0,30mm M5 saçlarının kul.transformatör



Şekil Ek 3.12 Yağlı dağıtım transformatörleri-100 kVA to 10 MVA/36 kV.



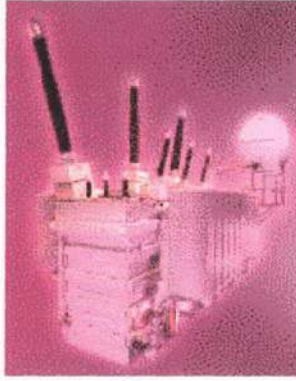
Şekil Ek 3.13 Harmonik filtre reaktörleri (400 V kuru tip 100 kVAr yukarı)



Şekil Ek 3.14 Reçine tip transformatör (10 MVA/36 kV yukarısı)



Şekil Ek 3.15 Güç transformatörleri-5 MVA to 500 MVA/500 kV.



Şekil Ek 3.16 Oto transformatörler 400 MVA/500 kV yukarısı



Şekil Ek 3.17 Trafo testi



Şekil Ek 3.18 Üç faz akım transformatörü

ÖZGEÇMİŞ

Doğum tarihi	01.10.1970	
Doğum yeri	Ankara	
Lise	1984-1988	Yenimahalle Teknik Lisesi Elektrik Bölümü
Lisans	1988-1992	Yıldız Üniversitesi Mühendislik Fak. Elektrik Mühendisliği Bölümü
Dil Eğitimi	1993-1994	Stevens Institute of Technology Amerika Birleşik Devletleri
Yüksek Lisans	1994-1996	Bradford University, Department of Electrical Engineering, İngiltere
Yüksek Lisans	1996-1999	Gazi Üniversitesi Fen Bilimleri Enstitüsü Elektrik & Elektronik Müh. Ana bilim Dalı

Çalıştığı kurumlar

1992-1993	Madeni Taahhüt Anonim Şirketi Elektrik & Elektronik Mühendisliği
1993-2000	Niğde Üniversitesi Aksaray Mühendislik Fakültesi Elektrik & Elektronik Müh. Araştırma Görevlisi
2000-2001	Evren Holding Kontrol Mühendisliği
2001-Devam ediyor	Mersin Üniversitesi, Öğretim Görevlisi