

**YAĞLI DAĞITIM TRANSFORMETÖRLERDE KAYIPLARIN
HESAPLANMASI**

Sabhan K. MAHMOUD

**YÜKSEK LİSANS TEZİ
ELEKTRİK- ELEKTRONİK MÜHENDİSLİĞİ**

**GAZİ ÜNİVERSİTESİ
FEN BİLİMLERİ ENİSTİTÜSÜ**

TEMMUZ 2008

ANKARA

Sabhan K. MAHMOUD tarafından hazırlanan YAĞLI DAĞITIM TRANSFORMATÖRLERİNDE KAYIPLARIN HESAPLANMASI adlı bu tezin Yüksek Lisans tezi olarak uygun olduğunu onaylarım.

DOÇ. Dr. İres İSKENDER
Tez Danışmanı, Elektrik- Elektronik Mühendisliği Anabilim Dalı

Bu çalışma, jürimiz tarafından oy birliğiyle Elektrik- Elektronik Mühendisliği Anabilim Dalında Yüksek Lisans tezi olarak kabul edilmiştir.

Prof. Dr. Sezai DİNÇER
Elektrik- Elektronik Mühendisliği Anabilim Dalı, Gazi üniversitesi

Doç. Dr. İres İSKENDER
Elektrik- Elektronik Mühendisliği Anabilim Dalı, Gazi üniversitesi

Doç. Dr. Timur AYDEMİR
Elektrik- Elektronik Mühendisliği Anabilim Dalı, Gazi üniversitesi

Tarih: 10 / 07 / 2008

Bu tez ile G.Ü. Fen Bilimleri Enstitüsü Yönetim Kurulu Yüksek Lisans derecesini onamıştır.

Prof. Dr. Nermin ERTAN
Fen Bilimleri Enstitüsü Müdürü

TEZ BİLDİRİMİ

Tez içindeki bütün bilgilerin etik davranış ve akademik kurallar çerçevesinde elde edilerek sunulduğunu, ayrıca tez yazım kurallarına uygun olarak hazırlanan bu çalışmada orijinal olmayan her türlü kaynağa eksiksiz atıf yapıldığını bildiririm.

Sabhan K. Mahmoud

**YAĞLI DAĞITIM TRANSFORMETÖRLERDE KAYIPLARIN
HESAPLANMASI
(Yüksek Lisans Tezi)**

Sabhan K. MAHMOUD

**GAZİ ÜNİVERSİTESİ
FEN BİLİMLERİ ENSTİTÜSÜ
Temmuz 2008**

ÖZET

Yapılan bu çalışmada, yağlı dağıtım transformatörlerin kayıpları üzerinde çalışma yapılmaktadır. Bu doğrultuda, üç farklı güçte olan (100kVA, 160kVA, 250 kVA) üç fazlı yağlı dağıtım transformatörlerin teorik ve pratik kayıpları incelenmiş ve elde edilen sonuçlar karşılaştırılmıştır. Teorik ve pratik sonuçların farkları ve bu farkların nedenleri üzerinde çalışma yapılmaktadır. Farkı oluşturan nedenlerden bir kısmı kaçak kayıplar ve transformatörlerin nüve ve iletkenlerinde harmoniklerden dolayı meydana gelen kayıplardır.

Bilim Kodu : 905.1.033
Anahtar Kelimeler : Boştaki kayıplar, Yükteki kayıplar, Harmonik Kayıpları
Sayfa Adedi : 109
Tez Yöneticisi : Doç. Dr. İres İSKENDER

**LOSSES CALCULATION IN OIL IMMERSED DISTRIBUTION
TRANSFORMERS**

(Master Thesis)

Sabhan K. MAHMOUD

**GAZI UNIVERSITY
NATURAL SCIENCES INSTITUTION**

July 2008

ABSTRACT

In this study, the losses of oil immersed distribution transformers are studied. For this purpose theoretical and practical losses of three different three-phase distribution transformers with different power ratings (100kVA, 160kVA, 250 kVA) are analyzed and the results obtained from these analysis are compared. The difference between the results and the reasons of these errors are studied. In theoretical study the effect of harmonics on transformer losses has not been considered. The error of theoretical and practical results is small. Leakage losses and the effect of harmonics on the core and conductors losses make some of these reasons.

Science Code : 905.1.033

Key Words : No-load losses, Loaded losses, Harmonik losses

Page Number : 109

Adviser :Asst. Prof. Dr. İres İSKENDER

TEŐKKÜR

Bu alıőmanın hazırlanması sırasında gsterdiği yakın ilgi ve yardımdan dolayı özellikle tez danıőmanım hocam sayın Doç. Dr. İres İSKENDER' e sonsuz teşekkür ederim. Ayrıca alıőma sırasında desteğini esirgemeyen sayın Ali MAMIZADEH arkadaőıma ve her zaman yanımda olan ve manevi destekleriyle beni hiçbir zaman yalnız bırakmayan aileme teőekkürü borç bilirim. Ayrıca, ERENTRAFO, transformatör fabrikası yöneticisi ve çalıőanlarına özellikle sayın Ender YKRK' e verdiği destek ve yardımlarından dolayı çok teşekkür ederim.

İÇİNDEKİLER

	Sayfa
ÖZET	iv
ABSTRACT.....	v
TEŞEKKÜR.....	vi
İÇİNDEKİLER	vii
ÇİZELGELERİN LİSTESİ.....	x
ŞEKİLLERİN LİSTESİ	xi
RESİMLER LİSTESİ	xiii
SİMGELER VE KISALTMALAR.....	xiv
1. GİRİŞ	1
2. YAĞLI DAĞITIM TRANSFORMATÖRLERİ	5
2.1. Çalışma Prensipleri	8
2.2. Üç Fazlı transformatörün Genel Yapısı	8
2.3. Nüve Yapısı	8
2.4. Nüve Çeşitleri	9
2.4.1. Çekirdek tipi transformatör	9
2.4.2. Mantel tipi transformatör	11
2.5. Sargılar	12
2.5.1. Sargı çeşitleri	12
2.6. Transformatörlerin Soğutulması	14
2.6.1. Soğutan ortama göre soğutma türleri	15
2.6.2. Transformatörlerde soğutma türleri	17
2.7. Transformatörlerin Eş Değer Devresi	19
2.7.1. Tek fazlı transformatörün eş değer devresi	19
2.8. Bağlantı Kümeleri	24

	Sayfa
3. YAĞLI DAĞITIM TRANSFORMATÖRDEKİ KAYIPLAR	27
3.1. Boşta Çalışma Durumunda Kayıplar	27
3.2. Demir Kayıpları	29
3.2.1. Histerezis kayıpları.....	31
3.2.2. Eddy (Girdap) akım kayıpları	37
3.3. Çekirdek Demir Kayıplarının Azaltılması	41
4. TRANSFORMATÖRDE YÜKTE ÇALIŞMA DURUMUNDA KAYIPLAR (On- Load Loss)	48
4.1. Bakır Kayıpları	51
4.2. Dielektrik kayıpları	52
4.3. Kaçak Alanlardan İletkenlerde İleri Gelen Eddy Akım Kayıpları	52
4.4. Bakır Sargılarda Deri Etkisi	53
4.5. Transformatördeki Kaçak Kayıplar	54
4.6. Kaçak Manyetik Akılar	55
4.7. Kaçak Kayıpların Kontrolü	61
4.7.1. Manyetik çatal kalkanları (yoke shield)	61
4.7.2. Manyetik şöntler	62
4.7.3. Elektromanyetik ekranlar	62
4.7.4. Sıkıştırma levhaları ve çekirdek paketlerdeki kayıplar	63
4.7.5. Sarımlardaki Kayıplar	63
4.7.6. Bobin iletkenlerinden kaynaklanan kayıplar	64
5. HARMONİKLERİN TRANSFORMATÖR KAYIPLARI ÜZERİNDE ETKİSİ	65
5.1. Harmonik Tanımı	66
5.2. Harmoniklerin Analiz Yöntemleri	66
5.2.1. Analitik yöntem	67

	Sayfa
5.2.2. Grafik yöntem	69
5.2.3. Hızlı fourier dönüşümü (FFT)	70
5.2.4. Ölçme yöntemi	70
5.3. Transformatörlerde Harmonik Oluşumu	70
5.4. Harmoniklerin Transformatörler Üzerindeki Etkileri	74
5.5. Harmoniklerin Transformatör Kayıpları Üzerinde Etkileri	76
5.5.1. Boştaki kayıpların üzerindeki etkileri	76
5.5.2. Yükteki kayıpların üzerindeki etkileri	79
6. DAĞITIM TRANSFORMATÖRLERDE KAYIPLARIN HESAPLANMASI.....	82
7. SONUÇ VE ÖNERİLER.....	98
KAYNAKLAR	100
EKLER	102
EK-1 Miknatıslanma Eğrileri	103
EK-2 Üç Fazlı Transformatörlerin Bağlantı Kümeleri	104
EK-3 Çalışmada Kullanılan Transformatörlerin ve Test Cihazların Resimleri.....	106
ÖZGEÇMİŞ	109

ÇİZELGELERİN LİSTESİ

Çizelge	Sayfa
Çizelge 2.1. Transformatörlerde soğutucu ortam ve soğutma şekillerinin simgeleri	19
Çizelge 2.2. En çok kullanılan bağlantı kümeleri	26
Çizelge 5.1 Çeşitli simetri durumlarında Fourier katsayıları	69
Çizelge 5.2. Mıknatıslanma akımının oranı.....	72
Çizelge 5.3. Sicakta haddelenmiş sacların özellikleri	73
Çizelge 6.1. 100 kVA transformatör tasarım bilgileri	82
Çizelge 6.1. Alınan sonuçların karşılaştırma tablosu	87
Çizelge 6.2. 160 kVA transformatör tasarım bilgileri	88
Çizelge 6.2. Alınan sonuçların karşılaştırma tablosu	92
Çizelge 6.3. 250 kVA transformatör tasarım bilgileri	93
Çizelge 6.3. Alınan sonuçların karşılaştırma tablosu	97

ŞEKİLLERİN LİSTESİ

Şekil	Sayfa
Şekil 2.1. Transformatorün manyetik devresini ve bobinlerini gösteren diyagram.....	5
Şekil 2.2. Çekirdek Tipi Transformator.....	10
Şekil 2.3. Mantel tipi transformator.....	11
Şekil 2.4. Disk sargının bacağa yerleştirilmesi.....	13
Şekil 2.5. Silindirik Sargılar.....	14
Şekil 2.6. Tabii soğutmalı yağlı tip transformator	17
Şekil 2.7. Yağlı transformatorün zorlanmış soğutması	18
Şekil 2.9. Sarımlarda kaçak akıların oluşumu.....	21
Şekil 2.10. Primer ve sekonder sargıların doğal ortamlarında kendi parametreleri, akımları ve gerilimleri ile oluşturdukları ikili devre.....	22
Şekil 2.11. Genel olarak yükseltici ve indirici transformatorlerin kullanıldığı yerler ..	24
Şekil 2.12. Bağlantı kümelerini belirleyen şekiller, a) Dyn5, b) Dzn 1 1.....	25
Şekil 3.1. Transformator boşta çalışma devre şekli	27
Şekil 3.2. Sadece çekirdek kayıpları olan ideal bir transformatorün yüksüz akımı... ..	28
Şekil 3.3. demir kayıplarının a) uygulanan gerilime değişimi b) uygulanan gerilimin karesi ile değişimi	31
Şekil 3.4. Enerjinin biriktirildiği bölge	32
Şekil 3.5. Histerezis Çevrimi.....	33
Şekil 3.6. Histerezis Çevrimi ve çalışma bölgesi	34
Şekil 3.7. Kalıcı mıknatıslıkta moleküllerin durumu a) Mıknatıslığı olmayan demir b) Manyetik alan içindeki mıknatıslık c) Kalıcı mıknatıslık.....	35
Şekil 3.8. Mıknatıslıkta Moleküllerin Durumu.....	36
Şekil 3.9. B-H eğrisi	36
Şekil 3.10. Saç plakanın üzerine dik açı ile gelen manyetik alan vektörü	38
Şekil 3.11 a) Demir gövdede meydana gelen manyetik akımın ve fuko akımının yönleri b) saçların transformatorün demir gövdesinde dizilişi	38
Şekil 3.12. a) Girdap(Eddy ya da Fuko) akımı b) saç levhası	40

Şekil	Sayfa
Şekil 3.13. Sırasıyla dökme demir, silisyum alaşımlı demir için histerezis eğriler.....	42
Şekil 3.14. Çekirdekdeki magnetik akı	43
Şekil 3.15. Birbirinden yalıtılmamış levhalar	44
Şekil 3.16. Akı çizgileri deliklerle ayrılmış bölgeye girmez	45
Şekil 3.17. Magnetik akı çizgileri dar hava aralığına doğru sıklaşır	45
Şekil 3.18. Köşelerde ve üst üste bindirme durumunda akı dağılımı	46
Şekil 3.19. Çekirdeğin 45° ve 90° açıyla istiflemesi.....	47
Şekil 4.1. Transformatorün yükte çalışma durumu	48
Şekil 4.2. Transformatorün yükteki hali	49
Şekil 4.3. İdeal bir transformatorün vektör diyagramı	50
Şekil 4.4. Yalıtılmış bakır iletken taşıyıcıda akım, girdap akım kayıpları ve deri olay etkisinin sonuçları	54
Şekil 4.5. Kaçak manyetik alan	56
Şekil 4.6. Simule edilmiş kısa devre testinin nihai manyetik alan çözümünün gerçek kısmı.....	57
Şekil 4.7. Kaçak manyetik alanın başlıca izlediği yol	58
Şekil 4.8. Manyetik çatal kalkanları	61
Şekil 4.9. Üç-fazlı transformatorlerde manyetik şöntlerin sabitlenmesi	62
Şekil 4.8. Kaçak manyetik alan	61
Şekil 5.1. Yarı periyotta harmonik bileşenleri	65
Şekil 5.2. Transformatorün Eşdeğer Devresi	74
Şekil 5.3. Transformatorün Harmonik Bağımlı Modellenmesi	76

RESİMLERİN LİSTESİ

Resim	Sayfa
Resim EK-3 Dağıtım transformatörü test alanında	106
Resim EK-3 Labrutvarda kullanılan test cihazları	107
Resim EK-3 Dağıtım transformatörü kısa devre test altında	107
Resim EK-3 Transformatörün bilgisayarlı analiz ve testi cihazı	108
Resim EK-3 Test cihazından yansıyan üç faz dalga şekli.....	108

SİMGELER VE KISALTMALAR

Bu çalışmada kullanılmış bazı simgeler ve kısaltmalar, açıklamaları ile birlikte aşağıda sunulmuştur.

Simgeler	Açıklama
aa	Alternatif akım(Alternative current)
B	Akı yoğunluğu (Flux)
B_m	Maksimum akı yoğunluğu (maximum flux density)
e	İndüklenen EMK (Voltage)
E	İndüklenen EMK' nin RMS değeri (Voltage)
F	Frekans (Frequency)
G_n	Nüve ağırlığı
G_i	İletken ağırlığı
h	Bir sac levhası kalınlığı
H	Manyetik akı şiddeti
I	Akım (Current)
I₁	Primer akımı (Primery current)
I₂	Sekonder akımı (Secondary current)
I_d	Demir kaybının akımı
I_m	Mıknatıslanma akımı(Magnetizing current)
I_{rms}	Sargıdaki akımın etkin değeri(rms)
J	İletkendeki akım yoğunluğu (Current density)
K	Çevirme oranı (Turn ratio)
K_h	Histerisiz kat sayısı
K_g	Girdap (Eddy) akım kat sayısı
N	Sarım sayısı
N₁	Primer sarım sayısı (Primery turns)

Simgeler	Açıklama
P	Güç (Power)
P_H	Histerisiz kaybı
P_g	Girdap(Eddy) akım kaybı
P_{cu1}	Primer bakır kaybı
P_{cu2}	Sekonder bakır kaybı
P_T	Toplam güç kaybı
R	Direnç
V₁	Transformatörün girişine uygulanan gerilim
V₂	Transformatörün çıkışına uygulanan gerilim
V	Çekirdek hacmi
Ø	Akı
Ø_m	Maksimum akı değeri
ρ	Bakırın özgül direnci

1. GİRİŞ

Transformatörler elektrik enerjisini bir elektrik devresinden diğerine frekansı değiştirmeden elektromanyetik indüksiyon yoluyla transfer eden statik cihazlardır. Elektrik makineleri arasında hareket etmeyen makine gurubunda olan transformatörler, girişlerine uygulanan enerjinin büyük kısmını niteliğini değiştirmeden yine elektrik enerjisi olarak çıkış tarafına iletirler. Yani transformatörlerde enerji dönüşümü olmaz. Elektrik enerjisinin dağıtımında ve iletiminde alternatif akım sisteminin evrensel kullanımını sağlamak için bir araçtır[18].

Transformatörlerin temel çalışma ilkesi, Michael Faraday tarafından 1831'de keşfedildi. Faraday, demir halkaya iki yalıtkan tel sardı ve sargılardan birinin uçlarını güçlü bir bataryaya, ötekinin uçlarını da elektrik akımının algılanmasında kullanılan galvanometreye bağladı. Faraday ne zaman bataryayı devreye alsa ya da devreden çıkarsa galvanometrenin hafifçe oynadığını gördü, yani ikinci sargıdan anlık bir akım endüklemediğini gözlemledi. Ayrıca, ikinci sargıdaki akım ancak birinci sargıdaki akımın değişmesi durumunda endüklemediğini ortaya koydu. Faraday'ın belirlediği bu olgu bütün trafoların dayandığı ana ilkedir. Elektromanyetik endükleme olarak adlandırılan bu olgu şöyle açıklanabilir; batarya devreye alındığı zaman birinci sargının çevresinde bir manyetik alan oluşur ve bu alan ikinci sargıyı da etkiler. Eğer değişim halindeki bu manyetik alanın yakınında bir tel varsa, bu değişim telden bir elektrik akımının akmasına neden olur. İşte bu nedenle, birinci sargıda bir elektrik akımı oluşur. Tıpkı bunun gibi, transformatörün bir bobini bir alternatif akım kaynağına bağlandığı zaman, akımdaki hızlı yön değişimleri sürekli olarak değişken bir manyetik alan ve böylece ikinci bobinin uçları arasında değişken bir gerilim oluşturur.

Michael Faraday'ın transformatörlerin en temel elemanları olan iki bağımsız sargı ve bir kapalı demir nüveyi kapsayan elektromanyetik indüksiyonu icat etmesini sağlayan Michael Faraday cihazı 1831 yılında yapılmıştır. Bununla birlikte, transformatörlerin ve günümüzde kullanılan transformatör enerji dağıtım

sistemlerinin görülmesine kadar 54 yıl geçti. Bu yarım yüzyıl boyunca, yüksek akım transformatörleri ve benzer çeşitli indüksiyon cihazları yapıldı ama yapım ve işletme metotları bakımından farklıydılar. Bu farklılıklar temelinde, transformatör bağımsız bir buluş olarak kabul edilmelidir.

Faraday'ın çalışmaları 1820'de bir iletken den geçen elektrik akımının, iletken etrafında manyetik alan yarattığını göstermiş olan Danimarkalı fizikçi Hans Cristian Oersted için ilham kaynağı olmuştur. Oersted'in bu keşfi o zaman için çok önemlidir. Çünkü bu olaya kadar elektrik ve manyetizma birbirleriyle ilgisiz kuvvetler olarak bilinmekteydi. Elektrik akımı manyetik alan üretebiliyorsa, bir manyetik alan da elektrik akımına yol açabilirdi [8].

Edison 1882'de Newyok'da inşa ettiği elektrik sistemi ile geniş- saha güç tedarikinin sadece sürekli voltaj şebekesiyle, cihazlarının paralel bağlantısıyla ve düzenlenmesiyle gerçekleştirebileceğini kanıtladı. Aynı zamanda o büyük alanların sadece yüksek voltaj AC ve trafo dağıtımları ile sağlanabildiğini kanıtladı. Ayrıca, Macar Ganz fabrikasının üç genç mühendisi, Karoly Zipernowsky, Otto Blathy ve Miksa Deri enerji sistemlerinin akım yolu geçiş hattına ve kapalı çelik çekirdekli dağıtım transformatörlerine eriştiler. Bu önemli adımın ilk tanıtımı 1885'te başarılı bir şekilde Budapeşte endüstriyel sergisinde gerçekleşti [9].

Güç sisteminin bazı kısımlarındaki iletim voltajı daha yüksek seviyeye çıkarıldığında, transformatör, sistemin farklı voltaj seviyelerindeki bağlantılarında yine kilit bir rol oynar. Transformatörlerin üretim istasyonları ve kullanım noktaları arasında çok önemli bağlar oluşturmasından dolayı, güç sistemlerinde mühim pozisyonlar tutarlar.

Bir transformatör karşılıklı endüktansa sahip giriş ve çıkış sargılarından (bobinler) oluşur. Giriş tarafındaki sargıya Primer, çıkış tarafındaki sargıya ise Sekonder adı verilir. Bobinler manyetik materyalden yapılmış ince tabakalı bir çekirdek üzerine sarılırlar. Transformatörün primer sargısına uygulanan alternatif gerilim bu sargının

etrafında bir manyetik alan meydana getirir. Bu manyetik alanın yönü ve şiddeti, primerdeki alternatif gerilimin yönü ve şiddetine bağlı olarak değişir. Değişen manyetik alan sekonder tarafındaki sargıları keser ve darbe tesiri yaparak iletkendeki elektronları yörüngelerinden koparır. Yörüngelerinden kopan bu elektronlar sekonder uçlarında bir alternatif gerilim endüklemesine yol açar. Transformatörlerin primerlerine uygulanan gerilimlerle, sekonderinden alınan gerilim arasında 180 derece faz farkı bulunur [8]. Böylece iki bobin arasındaki elektrik akımının, farklı bobinler üzerinde meydana getirdiği manyetik akılardan dolayı, manyetik bağlaç medyana gelir. Diğer bir deyişle, iki bobin birbirine manyetik olarak bağlanmış olur. Bu nedenle, birincil ve ikincil bobinler elektriksel olarak birbirine bağlı değildir, fakat manyetiksel olarak bağlanmışlardır.

Bir transformatörün ikincil bobin voltajının birincil bobinin voltajından yüksek ya da düşük olmasına dayanarak, sırasıyla gerilim yükseltici ya da gerilim düşürücü transformatör olarak adlandırılır. Transformatörler ihtiyaç ve uygulamalara bağlı olarak gerilim yükseltici ya da gerilim düşürücü olarak kullanılabilirler. Dolayısıyla, bobinleri birincil ve ikincil bobin yerine yüksek-voltaj/alçak-voltaj ya da yüksek-gerilim/alçak-gerilim olarak geçer [18].

Transformatörde gerilim değişikliği, iki bobindeki sarım sayılarının farklı olmasıyla sağlanır. Gerilim yükseltici transformatörde, ikincil sargının sarım sayısı birincil sargının sarım sayısından fazladır ve çıkış gerilimi giriş geriliminden daha yüksektir. Gerilim düşürücü transformatörde ise, ikincil sargını sarım sayısı daha azdır ve çıkış gerilimi de giriş geriliminden daha küçüktür. Eğer ikincinin sarım sayısı birincinin sarım sayısının 40 katıysa, çıkış gerilimi de giriş geriliminin 40 katı olur.

Eğer alternatif akım gerilimi yükseltirse, akımın amper cinsinden ölçülen miktarı aynı oranda düşer. Transformatörün çıkış gücü giriş gücünden yüksek olamaz (elektrik gücü, akım ile gerilimin çarpımına eşit). İki bobin için kullanılan tel farklı kalınlıklardadır ve daha yüksek amperli akımı taşıyan bobinin teli daha kalındır [8,4].

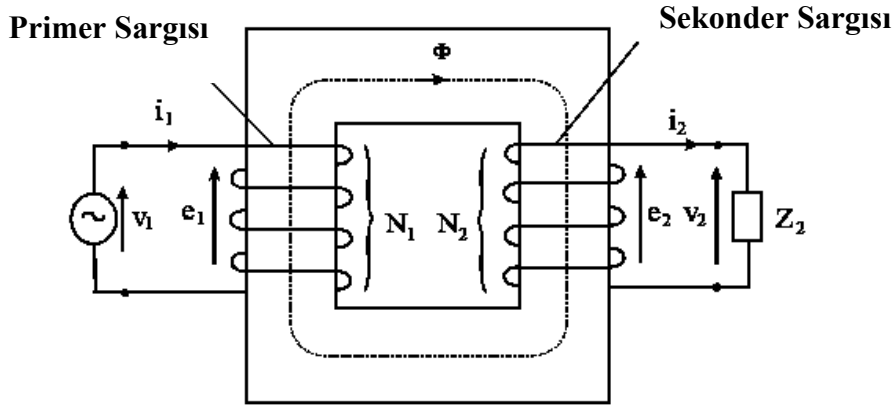
Enerji santrallerindeki üreteçlerin ürettiği elektrik akımının şiddeti yüksek, gerilimi düşüktür. Eğer elde edilen enerji, bu değerleriyle doğrudan evlere ve sanayi kuruluşlarına iletilseydi, bunu taşıyacak tellerin kalın olması gerekirdi ve buda pahalı olurdu. Elektrik enerjisi uzun mesafelere yüksek gerilim ve düşük akım şiddetinde gönderilirse, enerji iletim hatlarındaki dirençten kaynaklanan ısınma etkilerinin yolacağı enerji kaybı daha az olur. Bu nedenle enerji santrallerinde elde edilen elektrik akımı, enerji iletim hatlarına verilmeden önce yükseltici transformatörlerden geçirilerek gerilimi yüz binlerce volt düzeyine çıkarılır ve böylece akım şiddeti çok aşağılara düşürülür.

Enerji iletim hatları boyunca yer alan elektrik dağıtım istasyonlarındaki gerilim düşürücü transformatörlerde, gerilim ağır sanayi, elektrikli demir yolları, hafif sanayi, hastaneler, mağazalar ve evlerce istenen çeşitli düzeylere göre bir kaç kez düşürülür. Büyük bir transformatör genellikle çelik bir Kazan içine konur ve kazana ısınan bobinleri soğutmaya yarayan yalıtkan bir yağ konulur. Büyük trafolarında soğutma yağı, pompa yardımıyla radyatörlerde dolaştırılarak soğutulur. Binaların dışında tel örgü ile çevrili beton bir platform üzerine oturtulmuş bu tip büyük trafolarına sık rastlanır [4].

2. YAĞLI DAĞITIM TRANSFORMETÖRLER

Hareketsiz elektrik makinelerinden olup, belirli bir gerilim seviyesinde olan elektrik enerjisini diğer bir gerilimdeki elektrik enerjisine çevirmeye yararlar. İki sargı ile üzerinde sargıları taşıyan demir çekirdekten oluşurlar. Enerji iletimindeki rolleri çok büyüktür. Tek veya üç fazlı olarak kullanılırlar. Hareketsiz makineler olmasından dolayı sürtünme kayıplarının olmayışı sebebi ile verimleri çok yüksektir (kullanılan malzemelere ve tasarıma bağlı olarak verimi %99,5 civarında tutmak mümkündür). Uyarılan sargıya “primer” ve diğerine “sekonder” denir. Trafonun yükseltici veya alçaltıcı olmasına göre primer gerilimi sekonder gerilimden küçük veya büyük olabilir.

Transformatörün fiziksel çalışma prensibi, Şekil 2.1’de de gösterildiği gibi, düşük manyetik direnci (reluktans) olan bir yolda oluşan ortak bir manyetik akı aracılığıyla bağlanmış iki devrenin karşılıklı manyetiksel bağı olarak ifade edilir.



Şekil 2.1. Transformatörün manyetik devresini ve bobinlerini gösteren diyagram

Transformatörün iki bobini karşılıklı yüksek endüktansa sahiptir. Eğer bir bobin alternatif voltaj kaynağına bağlı ise (aşağıda belirtilen Faraday’ın Elektromanyetik Endüksiyon Yasası’na göre) karşılıklı endüklenmiş elektromotor kuvveti (emk) üreten diğer bobinle bağlantılı olan ince tabakalı çekirdekte alternatif bir manyetik akı oluşur.

$$e = M \frac{d i}{d t}$$

e: endüklenmiş emk, M: karşılıklı indüktans

Eğer ikinci devre kapalı olursa, içinden akım geçer ve dolayısıyla elektrik enerjisi birinci bobinden (primer) ikinci bobine (sekonder)(tamamen manyetik olarak)aktarılır [8].

Eğer transformatör yüksüz halde (çıkış uçları açık ise) ve primer bobini, frekansı f Hz olan alternatif voltaj kaynağına bağlanır ise, primer sargısına uygulanan alternatif gerilim yardımı ile nüvede magnetik alan meydana gelir. Bu manyetik alanın tamamının nüvede aktığını kabul edersek, primerde endüklenen emk, manyetik akıya göre Eş. 2.1' deki gibi olur,

$$e_1 = N_1 \frac{d\phi}{dt} \quad (2.1)$$

burada N_1 primer sarım sayısıdır. Lenz kanuna göre, "Elektromanyetik endüksiyonun var olan her durumda, endüklenen emk' leri üreten akılar kendilerini meydana getiren nedene karşıdır" [4], bu nedenle Eş. 2.1, Eş. 2.2'deki gibi olur,

$$e_1 = -N_1 \frac{d\phi}{dt} \quad (2.2)$$

bobinlerin direncinin sıfıra eşit olduğu kabul edilirse, bu durumda, $v_1 = e_1$ olur.

Bu durumda v_1 (primere uygulanan anlık değer) sinüzoidal bir şekilde değiştiği için, ϕ_m değeri de v_1 frekansına göre değişken olur,

$$\phi_m = \phi_{mp} \sin \omega t \quad (2.3)$$

Burada Φ_{mp} toplam manyetik akının tepe değeridir ve $w = 2\pi f$ rad/ sec. Φ_m değerini Eş. 2.1' de yerine koyarak,

$$e_1 = N_1 w \Phi_{mp} \cos wt \quad (2.4)$$

primerde endüklenen emk' nin Rms değeri olan E_1 , Eş. 2.4' te tepe değerini $\sqrt{2}$ bölerek elde edilir,

$$E_1 = 4.44 N_1 f \Phi_{mp} \quad (2.5)$$

Eş. 2.5' e transformatörde emk eşitliği denir [18].

Sekonder sarımında endüklenen emk ise değişken manyetik akıya göre yazılırsa Eş. 2.6' daki gibi olur,

$$e_2 = N_2 \frac{d\phi}{dt} \quad (2.6)$$

ikili endüklenen gerilim dönüştürme oranının türevi Eş. 2.1 ve 2.6' nın birleştirilmesiyle elde edilir,

$$\frac{e_1}{e_2} = \frac{N_1}{N_2} = a \quad (2.7)$$

Burada a transformatörün dönüştürme oranıdır. Benzer şekilde sekonder sargısının rms değeri Eş. 2.8' deki gibi yazılır,

$$E_2 = 4.44 N_2 f \Phi_{mp} \quad (2.8)$$

2.1. Çalışma Prensibi

Transformatörün primer sargısına alternatif bir gerilim uygulandığında, bu sargı değişken bir manyetik alan oluşturur. Bu alan, üzerinde sekonder sargısının da bulunduğu manyetik demir nüve üzerinde devresini tamamlar. Primere uygulanan alternatif gerilimin zamana bağlı olarak her an yön ve şiddeti değiştiğinden oluşturduğu manyetik alanında her an yönü ve şiddeti değişir. Bu alanın sekonder sargılarını kesmesi ile sargılarda alternatif bir gerilim endüklenir.

Transformatörlerin primer sargılarına doğru gerilim uygulandığında gene bir manyetik alan meydana gelir. Ancak bu manyetik alan, sabit bir alandır. Bu alanın yönü ve şiddeti değişmeyeceğinden sekonder sargılarında bir (elektro motor kuvveti) emk indüklemesi söz konusu olmaz.

2.2. Üç Fazlı Transformatörlerin Genel Yapısı

Üç fazlı alternatif akım sistemi aralarında 120^0 faz farkı bulunan üç ayrı fazdan oluşur. Bu sistem üç adet ayrı bir fazlı transformatörlerin yıldız veya üçgen bağlanarak oluşmasıdır. Bunun için primer ve sekonder sargıları aynı ayakta olan çekirdek tipi transformatörlerden üçünün sargısız ayakları yan yana getirilir. Sargısız üç ayağın oluşturduğu orta ayak her üç transformatörün manyetik akılarını bir araya getirir. Bilindiği gibi üç fazlı yıldız bağlı sistemlerde faz akımlarının yıldız noktasındaki toplamları her an için sıfır olmaktadır. Bu düzenlemede orta ayaktaki manyetik akı her an için sıfır olduğundan bu ayaklar kaldırılabilir. Böylece üç adet bir fazlı transformatörden oluşan bir adet üç fazlı transformatör elde edilir. Bu düzenlemede transformatör özellikleri aynı olmalıdır.

2.3. Nüve Yapısı

Transformatörlerin nüveleri, Silisyum alaşımlı özel saçlardan yapılır. Silisyum saç levhaların eklenmesinin önemi; Silisyumun özgül direnci çok yüksek olduğundan oluşan eddy akımının akmasını engellemiş olur, yani eddy akımının düşümüne yardımcı

olur. Bunun yanı sıra, manyetik geçirgenliği artırır. Kayıplar, işçilik ve ekonomik nedenlerden dolayı nüve 0,35- 0,5 mm kalınlıktaki saçlardan yapılır. Çekirdek; soğuk haddelenmiş, kristalleri yönlendirilmiş, yaşlanmayan, yüksek manyetik geçirgenliğe sahip, yüzeyleri pürüzsüz silisli sacdan imal edilir. Levhalar basınç altında veya sıcak yağ içerisinde bozulmayacak izolasyona sahiptir. Nüve kesiti transformatörün gücüne göre yapılır. Bir düzlem üzerine üç bacak ve bunları birbirleriyle irtibatlandırılan alt ve üst boyunduruktan meydana gelmiştir (3. bölümde detaylı anlatılacaktır).

Nüveyi oluşturan saç paketi, kayıpları azaltmak amacıyla saf selülozdan yapılmış ince kağıt levhalarla, küçük paketlere ayrılmıştır. Nüve sıkıştırma plakaları ile sıkıştırıldıktan sonra, epoksit yatay reçine ile emdirilmiş cam elyafı bantlarla iyice sarılır. Daha sonra bu bantlar cıvatalı kilitlerle gerdirilir.

2.4. Nüve Çeşitleri

2.4.1. Çekirdek tipi transformatör

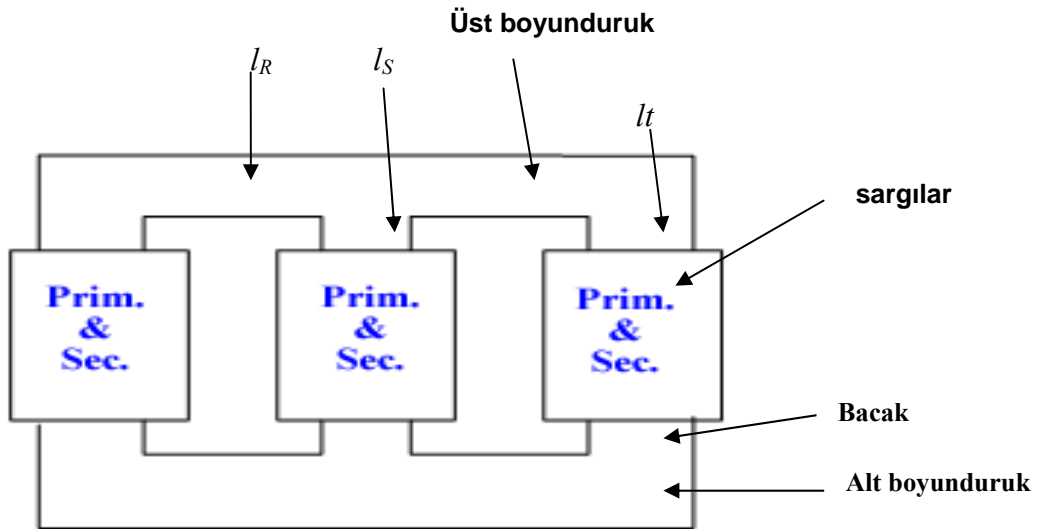
Çekirdek tipi transformatörler yaygın olarak 1 ve 3 fazlı olarak imal edilir. Üç fazlı çekirdek tipini incelersek, transformatörün demir konstrüksiyonunda her faz bir bacakla temsil edilmiş olduğundan iki adet pencereden ve iki adet boyunduruktan oluşmaktadır. Çekirdek tipi transformatörde orta bağca ait fazın demir boyu, diğer iki yan bacaklara göre daha kısadır (Şekil 2.2). Bu nedenle yan bacaklardan çıkan akımın geçtiği yol orta bacadan geçtiği yola göre daha uzundur. Bunda dolayı bacaklarda oluşan manyetik dirençler farklıdır. Fazlara uygulanan gerilimlerin ve endüklenen emk'ların eşit olması gerektiğine göre, bu gerilimleri üretecek manyetik akılar da eşit demektir. Ancak relüktansların farklı olması ile bacaklardaki amper-sarım eşitliği bozulur (orta bacağın relüktansı küçük olduğundan amper-sarım da küçük olacak ve sonuç olarak bu değeri veren bacak akımı da diğerlerine göre küçük olacaktır). Bu durum aşağıdaki formülden yararlanılarak kolaylıkla hesaplanabilir. Amper –sarım,

$$F = \oint R_m$$

olduğundan orta bacak daha az akım çeker. Ayrıca Şekil 2.2' de görüldüğü gibi akı yolları arasındaki ilişki,

$$I_S < I_R = I_T$$

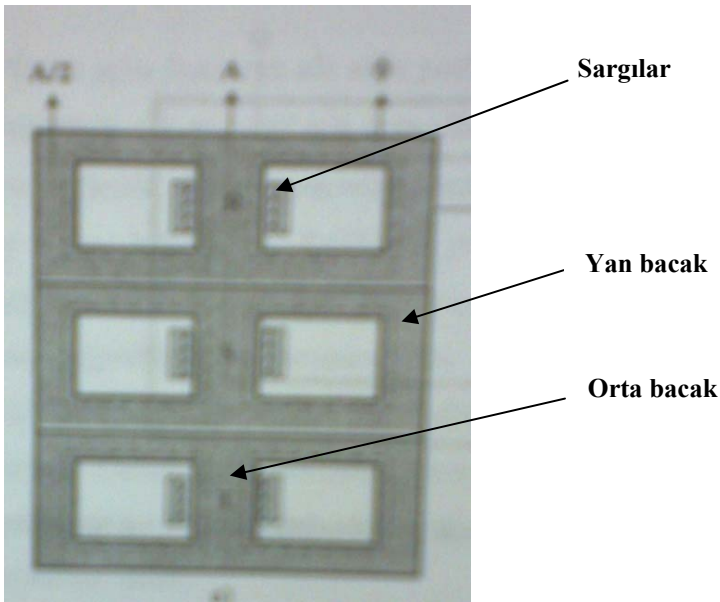
şeklindedir. Bu durumun sakıncalı olduğunu göz önüne almak lazım. Çünkü üç fazlı simetrik sistemlerde akım ve gerilimlerin eşit olması ve ayrıca eğer yıldız bağlı bir sistem varsa nötr noktasının mutlaka sıfır potansiyelinde olması arzu edilir. Çekirdek tipi demir gövdeye sahip bu transformatörlerde nötr noktasını sıfır yapmak bu açıdan mümkün değildir. Eğer yıldız noktası topraklanacak olursa, nötr hattından bu üç akımın vektörel toplamı kadar bir akım akar. Diğer bir sakıncalı tarafı ise, fazlardan bir tanesinin işletme sırasında yapacağı arızanın diğer üç fazı da etkilemesi ve transformatörü tamamen devre dışı bırakmasıdır. Ancak bu tip transformatörlerde kullanılan demir miktarı mantel tipine göre daha az olduğundan, daha hafif ve ekonomiktir[4].



Şekil 2.2. Çekirdek Tipi Transformatör

2.4.2. Mantel tipi transformatör

Mantel tipi transformatörlerde faz başına iki pencere, iki boyunduruk ve üç adet bacak bulunur. Orta bacak alçak ve yüksek gerilim sargılarını taşıdığından üretilen bütün akı bu bacadan yan bacaklara eşit olarak paylaşılır. Bu nedenle yan bacakların demir kesitleri orta bacağa göre %50 kadar küçüktür. Aynı durum alt ve üst boyunduruklar için geçerlidir. Bu tip transformatörlerde çekirdek tipi transformatörlerden daha fazla demir kullandığından daha ağırdır. Bu tip transformatörlerde her faza ait demir çekirdek birbirinin aynısı olduğundan, manyetik devreleri tamamen birbirilerine eşittir. Bu bakımdan çektikleri akım da aynıdır. Diğer bir deyişle çekirdek tipi transformatörde meydana gelen sorunlar bu tiplerde ortaya çıkmaz. Bu tip demir gövdeler tasarım olarak çekirdek tipe göre daha dar ve yüksektir. Ancak transformatörün tasarım sırasında fazların yerleştirme düzeninin değiştirilmesi ile daha geniş ve yüksekliği daha az imal edilebilir. Çekirdek ve mantel tip transformatörler orta ve büyük güçler için imal edilir[4].



Şekil 2.3. Mantel tipi transformatör

2.5. Sargılar

Sargı iletkenleri elektrolitik bakır ve alüminyumdan yapılırlar. Kesitleri dikdörtgen ve yuvarlak olarak kullanılır. Transformatör nüvesi hangi tipte olursa olsun sargı şekli bu iki sargı şeklinden birisidir. Hangi sargı tipinin uygun olacağı transformatörlerin tipine, gerilimine, akım şiddetine, yalıtma ve soğutma durumlarına göre değişir. Sargıların siper sayıları, iletken kesitleri ve yalıtkanları belirlendikten sonra, sargıların nüveden yalıtılmaları için ya makaralar veya başka yalıtma yöntemleri kullanılır. Kullanılan izolasyon malzemeleri (kağıt, psp vs.) trafo yağına ve ısıya dayanıklı olup yüksek bir delinme ve alan şiddetine sahiptirler. Bu izolasyon kağıtlarının mekanik mukavemetleri ve yağ emme kabiliyetleri normal kağıtlara nazaran yüksektirler. Y.G. sargılarını özel sarım uygulamaları ve yalıtım arttırılmaları ile giriş bobinlerine gelen gerilim darbelerinin düzgün dağılımını sağlanmakta ve giriş sarımlarının fazla zorlanmasını önlemektedirler. Ayrıca bu bobinlerin sarım ve kat arası izolasyonları da normal bobinlere nazaran arttırılmıştır. Bobinlerde tiplerine göre soğutmalarının sağlanması için aksial veya radyal kanallar bulunmakta olup bu kanallar aksialda dikdörtgen çıtalar, radyalda bobin çevresine düzgün dağılmış ara parçalarının uygun düzenlemeleri ile meydana getirilirler.

2.5.1. Sargı çeşitleri

Üç fazlı transformatörlerde 2 çeşit sargı vardır:

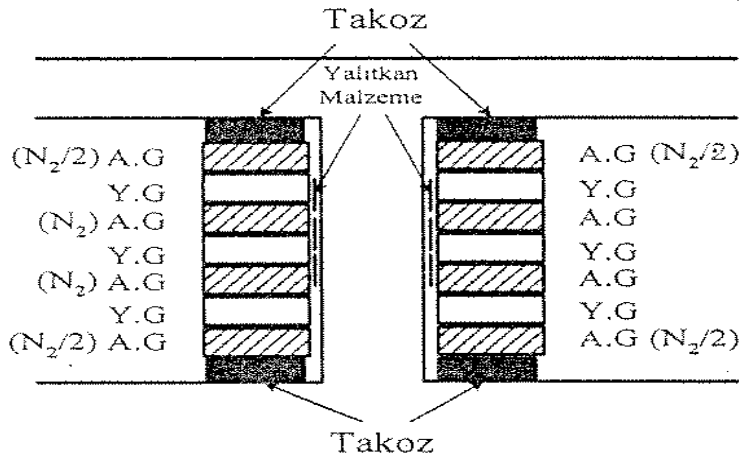
1. Dilimli Sargılar.
2. Silindirik Sargılar.

1. Dilimli sargılar

Dilimli sargılarda birinci ve ikinci devre sargıları dilim şeklinde kısımlara ayrılır. Bu dilimler birinci devre sargısını ve ikinci devre sargısını izleyecek şekilde sıra ile üst üste yerleştirilir. Ancak gerek yalıtkanlığı sağlamak gerekse kaçak akıların etkisini azaltmak için alçak gerilim sargısının bir dilimi ikiye ayrılır ve bobin takımının en alt

ve en üstüne konur. Bu tip sarım daha ziyade yüksek gerilim transformatörlerde uygulanır.

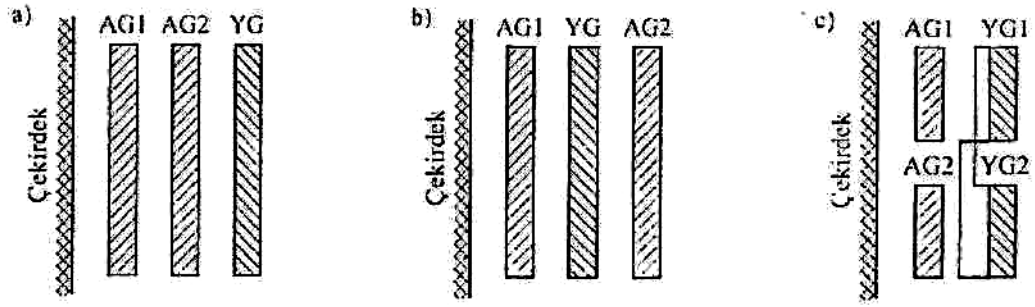
Dilimli sargılarda önce çift bobinli dilimler sarılır. Her dilim için çok katlı iki ayrı bobin bulunur. Bu bobinler içeride birbirleri ile bağlantılıdır. Bu yüzden dilim dışında yalnız iki uç bulunur. Her iki bobinin sarım yönleri manyetik alan ile aynı olacak yönde olmalıdır[7]. Büyük akımlı transformatörlerde silindirik sargıların kullanılması akımın dinamik etkileri ve soğutma zorlukları bakımından sakıncalıdır.



Şekil 2.4. Disk sargının bacağı yerleştirilmesi

2. Silindirik sargılar

Silindirik sargılar, yüksek gerilim sargısı alçak gerilim sargısı üzerine sarılarak nüve üzerine yerleştirilir. Küçük güçlü ve alçak gerilimli transformatörlerde uygulanan sarım tipi genellikle silindirik sargıdır. İletkenler, presbanttan, fiberden, mika ve plastikten yapılmış karkas makaralara her kat arası yalıtılarak sarılır. Bunlar tek katlı veya çok katlı olmak üzere transformatör ayağı boyunca sarılır[7].



Şekil 2.5. a) AG1 /AG2/YG üç sargılı, b) AG1 /YG/ AG2 üç sargılı,
c) AG1/AG2/YG1 YG2 iki sıralı dört sargılı AG ve YG sargılar

2.6. Transformatörlerin Soğutulması

Transformatörün çalışmasında demir gövdede oluşan histerisis ve fuko kayıpları ile sargılarda meydana gelen joule kayıpları, sargıların ve demir çekirdeğin sıcaklıklarını belli bir zaman içinde yükseltir. Isı enerjisinin transferi iki ayrı yöntemle gerçekleşir.

Transformatörleri soğutma ortamına göre üç gruba ayrılır. Bütün makaralarda olduğu gibi transformatörlerde sargı ve demir kayıpları meydana gelir. Bu kayıplar vasıtası ile sargı ve çekirdek sıcaklıklarının daha fazla yükselmesini önlemek için buralarda açığa çıkan ısının en uygun şekilde çevreye iletilmesi gerekir. Bu ısının açığa çıktığı yerden çevreye iletilmesinde soğutucu ortam olarak yağ ve hava kullanılır.

1- Radyasyon Yöntemi

Isınmış olan her malzemenin yaydığı gözle görülebilen veya görülemeyen bir ışımaya vardır. Enerji bunun sayesinde bulunduğu ortamdan dışarıya atılır. Yağlı transformatörlerin çalışma sıcaklıkları 60°C dir. Bu sıcaklıkta radyasyon ile yayılan ışımaya enerjisi sıcaklığın çok düşük olmasından dolayı ihmal edilecek seviyelerde bir değere sahiptir (%1).

2- Konveksiyon Yöntemi

Bu yöntemde farklı sıcaklıklara sahip ve biri akışkan olan bu ortamlar birbiri ile temas ederek ısı transferini gerçekleştirirler (%99). Isı enerjisi sıcaklığı yüksek olan ortamdan, sıcaklığı daha düşük olan ortama doğru yayılır. Dolayısıyla ısı enerjisini verene “soğutulan” ve enerjiyi alana ise “soğutan” adı verilir. Transformatörde soğutulan esas itibariyle demir çekirdek ve sargılardır. Soğutan ise bu iki eleman ile temas halinde olan ortamdır Bu ortamın iyi yalıtkan, ısı transfer katsayısı yüksek olan, bol miktarda bulunan ucuz bir malzeme olması gereklidir. Soğutanın cinsine göre soğutma sınıflara, ayılabildiği gibi, soğutanın soğutulanla olan temas sıklığına göre de sınıflama yapmak mümkündür.

2.6.1. Soğutan ortama göre soğutma türleri

Soğutma sınıflandırılmasını ilk olarak soğutan ortama göre yapalım. Burada önemli olan demir çekirdek ve sargıların temas ettiği soğutan malzemenin cinsidir. Bu durumda iki seçenekle karşılaşılır:

1- Hava ile soğutma (Kuru tip transformatör)

Soğutan havadır ve iyi izolasyon malzemesidir (delinme dayanımı $30kV/cm$). Isı transfer katsayısı kabul edilebilir büyüklükte olduğunda soğutma için elverişli bir ortam sağlar. Hava, bobinleri ve demir çekirdeği yalayarak soğutma işlemini yapar. Isınan hava yükselir ve yerini soğuk havaya bırakır. Böylece soğutma işlemi gerçekleşir. Bu konveksiyon yönteminin en güzel örneğidir.

2. Yağ ile Soğutma

Transformatörün demir gövde ve bobinleri konveksiyon yöntemi kullanılarak yağ ile soğutulur Yağ, “transformatör yağı” olarak bilinen, özel kimyasal yapıya sahiptir. İyi ısı iletir ve iyi yalıtandır. Yalıtkanlığı havaya göre 5–7 kat fazladır (delinme dayanımı 150-250 kV/cm arasındadır)[7].

Bu nedenle yüksek gerilimli transformatörlerde yağ ile soğutma tercih edilir. Bu soğutma türünün sakıncalı yanı fazlasıyla higroskopik olması rutubet kapan bir yapıya sahip olmasıdır. Bu sorun gerekli önlemlerin alınması halinde yağın kullanılmasına engel olabilecek bir duruma yol açmaz. Transformatörün emniyetli çalışması açısından, transformatör yağının delinme dayanımı belirgin aralıklarla kontrol edilmelidir. Soğutma yağ olan transformatörün yağının muhafazası için mutlaka bir tanka yerleştirilmesi gereklidir. Bu durumda yağ çevre etkilerden ve rutubet kıpaktan korunur, bobinlerden ve demir gövdeden aldığı ısı enerjisini konveksiyon yolu ile kendini muhafaza eden tankın çelik gövdesine iletir ve onun ısınmasını sağlar. Tankın dışında bulunan soğutucu hava konveksiyonla tank yüzeylerini yalar, ısı enerjisini alıp, yüzeylerin soğumasına neden olur, bu çevrimin devamı ile transformatörün soğutulması sağlanır.

Yağlı transformatör çalışma süresince muhtelif yük değişimleri ile karşılaşır. Bunlar bobin sıcaklığını arttırdığı gibi, büyük kuvvetler meydana getirerek iletkeni saran izolasyonun zaman içinde yıpranmasına neden olur, izolasyondaki bu yıpranma sebebiyle, izolasyondan kopan mikroskobik parçacıklar, transformatör kazanı içerisinde transformatör yağının hareketi dolayısıyla bir süre yağ içerisinde asılı kalır. Çok küçük oldukları için hemen tankın dibine çökmezler, aradan zaman geçmesi gereklidir. Fakat neticede bu parçalar çoğalarak, kendi aralarında birbirine yapışırlar. Daha büyük kütleler haline dönüşüp, tankın dibine çökerler. Sonuç olarak zaman içinde dipte çamur tabakası oluştururlar.

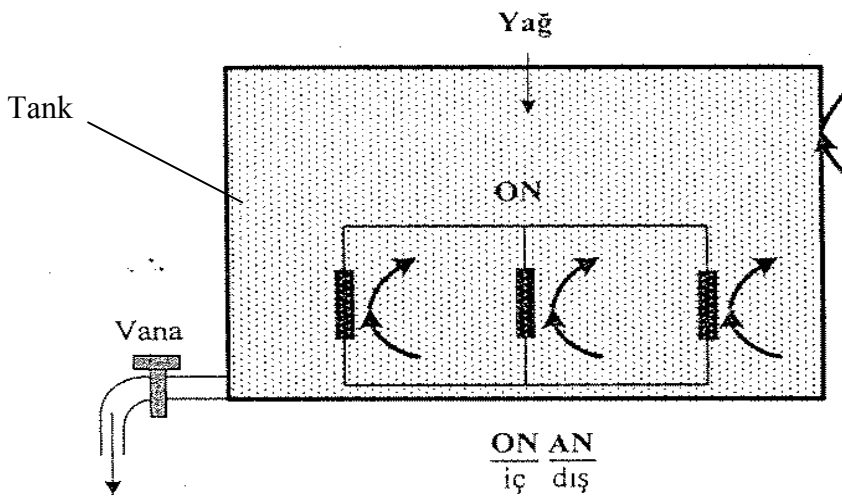
Uzun süre yağı analiz edilmemiş, kendi haline bırakılmış bir transformatör kazanında bu olaya şahit olmak mümkündür. Transformatör yağı eskidikçe, oksilenmeye ve parçalanarak alhaditler ve proksitler oluşturmaya başlar[7]. Rutubetin yağa karışma olasılığını dikkate almak şarttır. Çünkü transformatör yağı nem absorbe edebilir ve yağın delinme dayanımını oldukça düşürür.

2.6.2. Transformatörlerde soğutma türleri

Yağlı tip transformatörler temel olarak orta ve büyük güçlerde imal edilirler. Soğutma tipi ya 'Tabii soğutma' ya da 'Zorlanmış soğutma' olabilir.

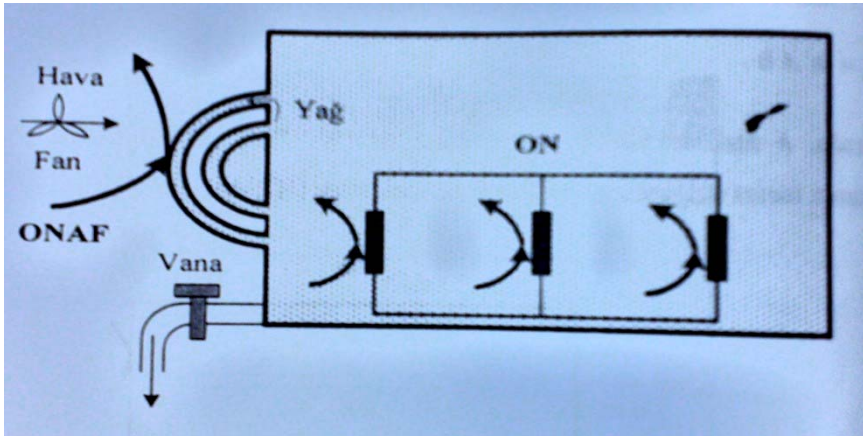
Şekil 2.6' da görüldüğü gibi transformatörün dış yüzeyi havanın tabii hareketiyle soğuduğu için, dış yüzeyin soğuma şekli hava ile tabii soğutmadır. Ayrıca transformatör tankı içindeki sıcak yağın tank yüzeyine çarparak soğuması, yağ ile tabii soğutma sınıfına girmektedir.

Eğer sistemde iki değişik soğutulan varsa, önce birinci soğutulanın harfleri, daha sonra ikinci soğutulanın harfleri verilir. Burada ilk olarak soğutulan transformatör, soğutma yağ ve soğutma türü tabii olduğundan harfleri ON (Oil- Natural)' dir. İkinci soğutulan ise yağ ve kazan yüzeyi, bunları soğutan hava, soğutma türü tabii olduğundan AN (Air-Natural) olarak verilmektedir. İki harf gurubunu birleştirilerek transformatörün soğutma yöntemi (ONAN) olarak saptanır. Gücü 5- 20 MVA kadar olan transformatörlerde soğutma gücünü artırmak için radyatör kullanılır [7]. Böylece yüzey genişletilmiş ve tabii soğutma sağlanmış olur.



Şekil 2.6. Tabii soğutmalı yağlı tip transformatör

Transformatörde ikinci tür soğutma olan *zorlanmış soğutma* türüdür. Eğer tabii soğutma gücü yetersiz kalırsa, bu tür soğutma yöntemi kullanılır. Tabii soğutmada kullanılan radyatörler yetersiz olursa radyatöre temas eden havanın miktarını arttırmak için vantilatör kullanılır ve bu durumda soğutma zorlanmış olduğundan (ONAF) olarak yazılır. Şekil 2.7' de görülmektedir.



Şekil 2.7. Yağlı transformatörün zorlanmış soğutması

Eğer transformatör çok büyükse, su ile zorlanmış soğutma sağlanabilir. Burada ısınan yağ bir pompa yardımıyla bakırdan yapılmış serpantine basılır, serpantin içi soğuk su dolu bir havuzun içindedir. Isınmış yağ ısı enerjisini havuzun soğuk sularına terk ettikten sonra tekrar transformatör kazanına dönerek transformatörü soğutmaya devam eder. Fakat transformatörden havuza verilen ısı enerjisi kapalı havuz suyunu ısıtır. Havuz suyunun da soğutulmaya ihtiyacı duyulur. Bu nedenle havuz suyu bir başka su pompası ile soğutma kulesine basılır. Burada sıcak su küçük damlalar haline dönüştürülür. Kevgire benzeyen su eleğinden geçer ve milyonlarca su damlasına dönüşür. Bu dönüşümde her damla yüzeyi çok küçük olmasına rağmen, milyonlarcasının meydana getirdiği çok büyük yüzeyden yararlanılarak suyun soğuması sağlanır. Bu işlem sırasında soğuyan su buharlaşarak kütlesinin bir kısmını kaybeder ve soğutma kulesinde su seviyesi azalmaya başlar. Bunun için su kulesine arada sırada su seviyesinin durumuna göre, su takviyesi yapmak gerekir. Bu tip soğutma sistemini temsil için (OFWF) harfleri kullanılır[7,9].

Adı geçen soğutma sistemlerinin belirlenmesi için simgeler Çizelge 2.1. kullanmak sureti ile açıklanmaktadır.

Çizelge 2.1. Transformatörlerde soğutucu ortam ve soğutma şekillerinin simgeleri

1.HARF	2.HARF	3.HARF	4.HARF
Sargılara değen soğutma ortamı ile ilgilidir.		Dış soğutma sistemine değen soğutma ortamı ile ilgilidir.	
Soğutma ortamı türü	Dolaşım türü	Soğutma ortamı türü	Dolaşım türü
O ↓ Yağ	N ↓ Tabii	A ↓ Hava	N ↓ Tabii
O ↓ Yağ	N ↓ Tabii	A ↓ Hava	F ↓ Cebri (vantilatörler fanlar)
O ↓ Yağ	F ↓ Cebri	W ↓ Su	F ↓ Cebri

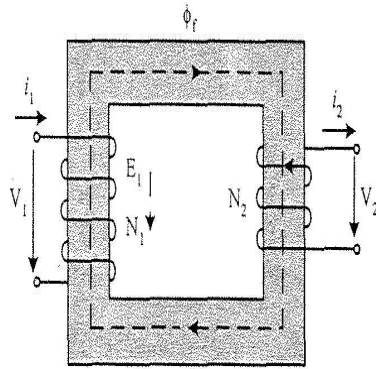
2.7. Transformatörün Eş Değer Devresi

2.7.1. Tek fazlı transformatörün eş değer devresi

Transformatörlerin bir faz eşdeğer devrelerinin incelenmesine geçmeden önce, aşığıda şekil 2.8' de verilen bir fazlı transformatörün nasıl çalıştığını tekrar açıklayalım. Primer sargıya uygulanan zamana göre değişen (alternatif) V_1 gerilimi, Ohm kanununa göre bu sargıda I_1 akımının akmasına neden olur ve sargıda hemen $I_1 N_1$ amper sarımı meydana gelir. Bunun ürettiği manyetik akı demir gövdede akmaya başlar. Lenz yasasına göre bu bobinde E_1 emk meydana gelir ve akımın azalmasına sebep olur. Demirde akan akı sekonder bobinin düzlemlerinden 90° lik açı ile geçer ve bu bobinde endüksiyon yasasına göre E_1 emk alternatif olarak endüklenir. Eğer bobinin uçları bir empedans üzerinde bağlı ise, bobinden I_2 akımı akar ve bu akıma da “yük akımı” denir. Yükn uçlarındaki gerilime V_2 “yük gerilimi” adı verilir. V_2 gerilimi E_2 'den biraz daha küçüktür çünkü I_2 akımının bobinden geçişi sırasında bobinin iç direnci ve kaçak reaktansında bir gerilim düşümü oluşur. Böylece enerji

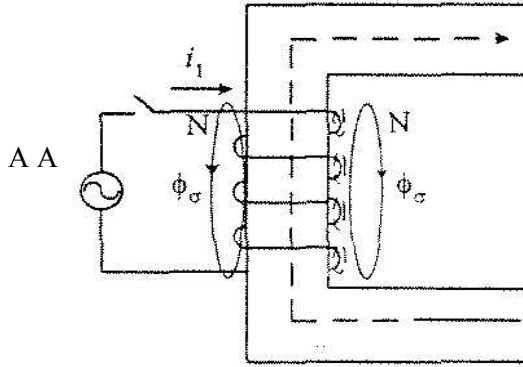
akışının şebekenin bulunduğu V_1 geriliminden E_1 'e, sonra E_2 'ye ve en sonunda V_2 'ye vardığı görülmektedir.

Transformatörler birden fazla faz sayısına sahip olabilirler, Bu durumda hesapların kolaylaşması açısından hepsi birbirine eşit olan fazların bir tanesi dikkate alınarak, o fazın eşdeğer elektrik devre modeli çıkartılır. Bu model tüm çalışma koşullarını, kayıpları, giren ve çıkan güçleri, akımları, gerilimleri kapsmalıdır. Bir faz için yapılan hesapların (giren, çıkan güçler, kayıplar vs.) daha sonra bütün transformatörü temsil etmesi için, güçler bazında bulunan değerlerin faz sayısı ile çarpılması gereklidir. Bunların dışında, bulunan gerilimler, akımlar, faz farkları vb değerler, diğer fazlarda da aynen tekrar eder. Bunlar ayrıca faz sayısı ile çarpılmazlar. Şekil 2.8' de verilen bir fazlı çekirdek tipi transformatörün eşdeğer devresini elde etmek için, bobinlerin devre parametreleri ile temsil edilmeleri gerekir [7].



Şekil 2.8. Çekirdek tipi demir gövdeye yerleştirilmiş iki sargıdan oluşan bir fazlı transformatör

Aşağıda Şekil 2.9' da, transformatörün bacağındaki sargının açık şekli gösterilmektedir. Malzeme demir olduğundan akı havaya gitmeyip demir malzemeden geçer, ama bazıları demire girmeyip, dışarıda akar. Böylece şekilde gösterildiği gibi kaçak akı oluşur. Sarımın her bir teli çevresinde \emptyset akısı mevcuttur, yani kaçaklar vardır. Kaçaklar büyüyüp diğer telleri çevreleyebilir.



Şekil 2.9. Sarımlarda kaçak akıların oluşumu

Akı ve akım arasındaki ilişki 2.9 eşitliğinde verildiği gibidir

$$\Phi_T = I_1 L_T \quad (2.9)$$

Bobinde üretilen toplam akı ise Eş. 2.10'da verilmiştir

$$\Phi_T = \Phi_f + \Phi_\sigma \quad (2.10)$$

Burada T ve f indisleri toplam ve faydalı akıları, σ indisi ise kaçığı temsil eder. Bobin tarafından üretilen toplam akıyı yaratan I_1 akımıdır. Haliyle bu akının bir kısmı faydalı, yani demirden giden, diğer kısmı ise kaçak, yani havadan giden akıdır. Her ikisi de I_1 akımı tarafından meydana getirilmiştir. Dolayısıyla Eş. 2.10 ile akı kavraması hesaplarını ve daha sonra da endüktans hesaplarını yapabilmek için Eş. 2.11 kullanılır.

$$I_1 L_T = I_1 L_f + I_1 L_\sigma \quad (2.11)$$

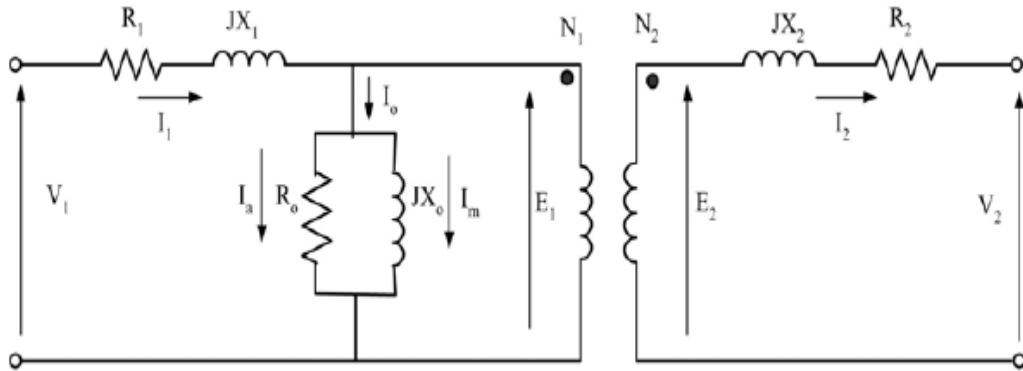
Bobinde üretilen toplam akının faydalı akı ve kaçak akıların toplamı olarak yazılmasından yararlanarak, endüktanslar arasındaki ilişki aşağıda Eş. 1.12'de verildiği gibi ortaya çıkar.

$$L_T = L_f + L_\sigma \quad (2.12)$$

Endüktansların açısal frekans ile çarpımları olan reaktanslar ise Eş. 2.13'deki gibi elde edilir.

$$x_T = x_f + x_\sigma \quad (2.13)$$

Aşağıdaki şekil 2.10'da bu transformatöre ait iki bobinin (primer ve sekonder) iç direnç ve kaçak reaktanslarını temsil eden fakat arada elektriksel bağlantısı olmayan devresi verilmiştir. Bu iki devreyi birbirine bağlayan manyetik akıdır. Gerilimleri ve parametreleri birbirinden farklı olan bu iki devrede çözüme ulaşabilmek için iki devre için ayrı ayrı hesap yapmak gerekir. Hâlbuki eğer devreler endüklenen emk'ların uçlarında birleştirilebilirlerse, meydana gelecek tek devre ile istenilen çözüme ulaşmak mümkün olur. Bunun için bu iki noktada, iki önemli eşitliğin sağlanması gereklidir. Yani her iki devrede frekans ve gelim Eş.lerinin sağlanmasıdır. Frekansların eşitliği, sekonderdeki emk E_2 frekansını manyetik akıdan, manyetik akı da frekansını primer akımdan aldığından sağlanır (ikinci Eş. olan gerilim eşitliğinin sağlanması konusu ise daha sonra eşdeğer devre incelenirken açıklanacaktır).



Şekil 2.10. Primer ve sekonder sargıların doğal ortamlarında kendi parametreleri, akımları ve gerilimleri ile oluşturdukları ikili devre

Şekil 2.10 'daki gibi transformatörün bobinlerini ayrı ayrı düşünelim ve bu devreler için akım ve gerilim ifadelerini yazalım. Her devrede bobinin iç direnci ve kaçak reaktansından dolayı %1,5–2,5 arasında bir gerilim düşümü olur. Bunlar ihmal edilecek olursa, primer ve sekonderde endüklenen emk'lar kendi devrelerindeki V_1

ve V_2 gerilimlerine eşit olur. Bunun anlamı transformatörde kayıp yok demektir. Kayıp yok ise, giren ve çıkan güçler eşit olurlar[7].

Primer bobindeki gerilim ifadesi aşağıdaki Eş. ile ifade edilir.

$$V_1 = E_1 + \underbrace{I_1(R_1 + jX_1)}_{\Delta V_1} \quad (2.14)$$

Primer devresindeki gerilim düşümü, anma geriliminin yüzdesi olarak $\frac{\Delta V_1}{V_1}$ %1,5 - 2,5 V olarak hesaplanır. Sekonder bobindeki gerilim ifadesi ise Eş. 2.15'deki gibidir.

$$E_2 = V_2 + \underbrace{I_2(R_2 + jX_2)}_{\Delta V_2} \quad (2.15)$$

Burada da aynı koşulda gerilim düşümü ihmal edilirse $E_2 = V_2$ olur. Toplam kayıplar $P_k = P_{fe} + P_{cu}$ olduğundan ve kayıpların ihmal edilmesi halinde, $P \approx 0$ olduğundan, $P_g = P_\phi$ olur. Bu güçleri görünür güç cinsinden yazmak gerekir, çünkü akım ve gerilimler alternatiftir.

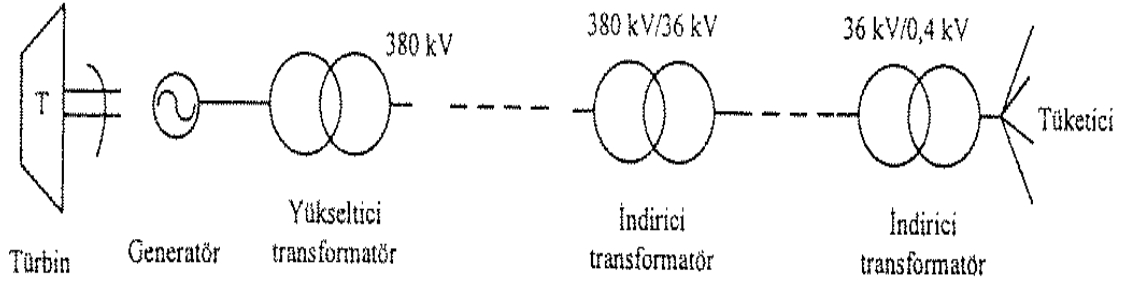
$$V_1 I_1 = V_2 I_2 \quad (2.16)$$

2.16 eşitliği $S_g = S_\phi$ olarak gösterilir. Böylece Eş. 2.17' de verildiği gibi, gerilimlerin oranı akımların oranına ters olarak bulunur.

$$\frac{V_1}{V_2} = \frac{I_2}{I_1} \quad (2.17)$$

Transformatörlerin üretimden dağıtıma kadar nasıl kullanıldığını gösteren şekil 2.11'de, jeneratöre yakın olan transformatör yükseltici transformatördür. Enerjinin 380kV ile nakledilmesinden sonra tüketici bölgelerde gerilimin düşürülmesi için 380/36kV ile indirici transformatör kullanılmıştır. Daha sonra orta gerilim şebekesi (36kV) yayılmış ve yerleşim alanlarına girmiştir. Burada ikinci bir indirici

transformatör kullanılarak gerilim 400V'a düşürülmüştür. Sonuç olarak 400V ile alçak gerilim şebekesi tüketicilere ulaştırılmıştır.

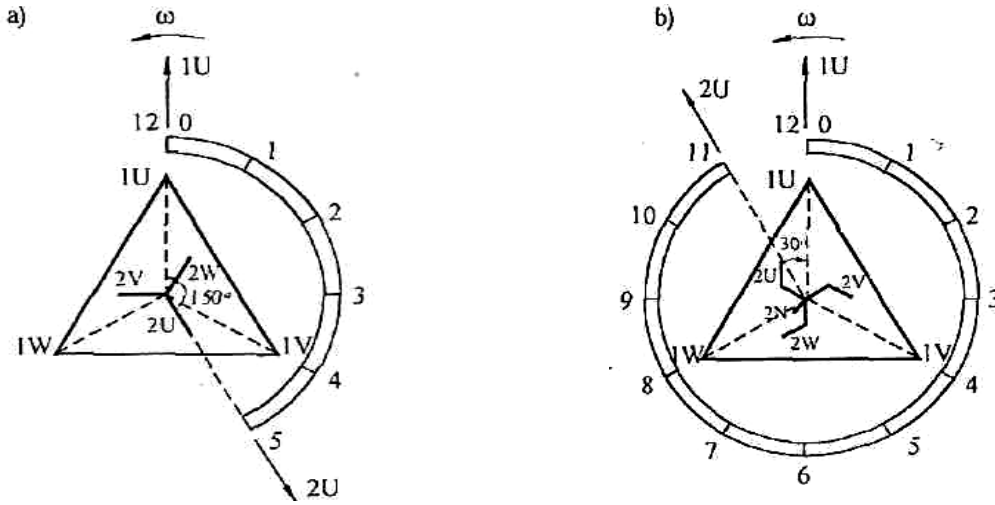


Şekil 2.11. Genel olarak yükseltici ve indirici transformatörlerin kullanıldığı yerler

2.8. Bağlantı Kümeleri

Üç fazlı transformatörlerin faz sargıları üçgen, yıldız veya zigzag bağlanır. Bağlantılar sırasıyla, üst gerilim sargılarında D, Y, Z büyük harfleriyle ve alt gerilim sargılarında d, y, z küçük harfleriyle gösterilir. Yıldız veya zigzag sargıların Nötür noktası dışarıya çıkarılmışsa bu harflere ayrıca, üst gerilimde N, alt gerilimde n harfi eklenir.

Üst ve alt gerilim döner yöneyleri arasındaki kayma açısını belirlemek için s kadrından yararlanır. Saat sayılarının arası kayma açısının 30° olduğunu gösterir. Gerilimde 1. faz sargısına ilişkin döner yöne saat kadranda 12 sayısının üzerine oturtulduğunda, alt gerilimde aynı 1. faz sargısına ilişkin döner yönün gösteren sayıya *tanıma sayısı* denir. Tanıma sayısı 30° ile çarpılarak üst ve alt gerilim döner yöneyleri arasındaki kayma açısı belirlenir. Tanıma sayısı, bağlantıyı belirten harf simgeden sonra yazılır. Şekil 2.12' de bağlantı kümelerini belirleyen şekiller verilmiştir[3,7].



Şekil 2.12. Bağlantı kümelerini belirleyen şekiller, a) Dyn5, b) Dzn 1 1

Ek-2` de Üç fazlı transformatörlerin bağlantı grupları verilmiştir.

Çoğunlukla dört tanıma sayısı kullanıldığından, bağlantılar dört kümeden oluşmaktadır:

- Küme I : Tanıma sayısı 0, kayma açısı 0°
- Küme II Tanıma sayısı 6, kayma açısı 180°
- Küme III: Tanıma sayısı 5, kayma açısı 150°
- Küme IV: Tanıma sayısı 11, kayma açısı $330^\circ (-30^\circ)$

I. kümede kayma olmadığından üst ve alt gerilim sargıları aynı yönde bağlanmıştır. II. kümede ise kayma açısı 180° olduğundan alt gerilim sargılarının giriş-çıkış uçları yer değiştirilmiştir. III. ve IV. kümelerde de durum aynıdır. I. kümeden II. kümeye III. kümeden IV. kümeye geçişte kayma açıları 180° olduğundan, üst ve alt gerilim sargılarının A/A veya Y/Y bağlanmaları gerekir. Kayma açısının 150° veya 330° olabilmesi için üst ve alt gerilim sargıları A/Y veya Y/A bağlanmak zorundadırlar.

Bağlantı kümelerinin seçimini paralel çalışma, nötür noktasının olması ve nötür noktasının yüklenmesi gereği gibi işletme koşulları ve transformatörün tasarımı ile yapımında en az malzemenin kullanılması belirler.

Çoğunlukla üç fazlı dağıtım transformatörleri 40-160 kVA'a kadar Yznll, 200-2500 kVA' a kadar Dyn 11 bağlantı kümesinde yapılmaktadır. En çok kullanılan bağlantı kümeleri aşağıdaki çizelgede verilmiştir.

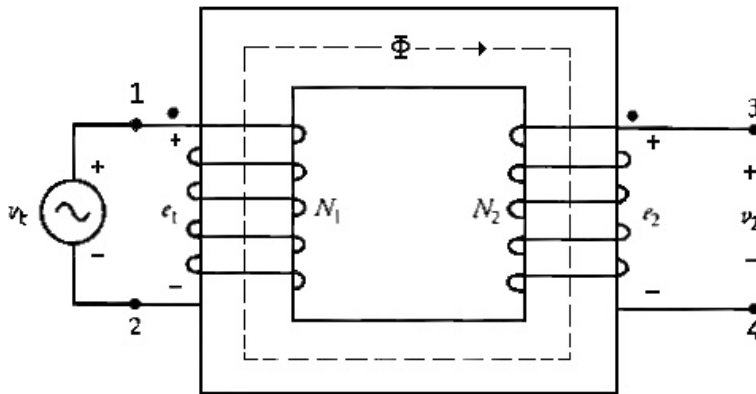
Çizelge 2.2. En çok kullanılan bağlantı kümeleri

Tanıma sayısı	Bağlantı kümeleri	
	Nötür dışarı çıkarılmamış	Nötür dışarı çıkarılmış
0	Yy0	Yyn0
5	Dy5 , Yd5 , Yz5	Dyn5 , Yzn5
11	Dy11 , Yd11 , Yz11	Dyn11 , Yzn11

3. YAĞLI DAĞITIM TRANSFORMETÖRLERDEKİ KAYIPLAR

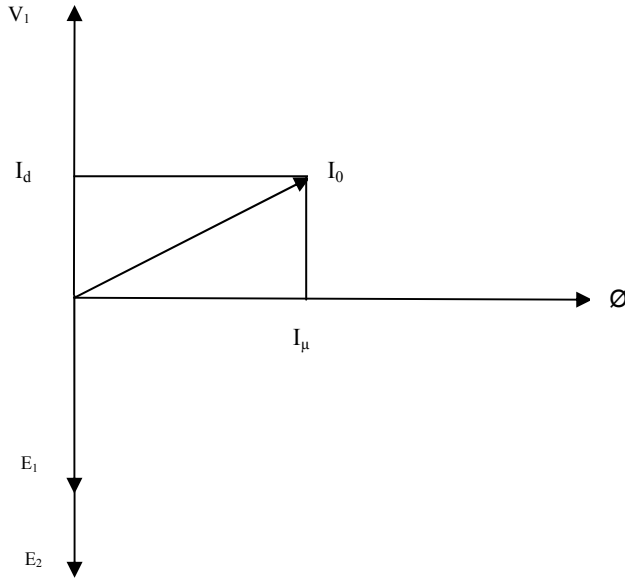
3.1. Boşta Çalışma Durumunda Kayıplar (No-Load Loss)

Transformatörün boşta çalışması, primer sargı şebekeye bağlı iken sekonder sargının uçlarının açık olma durumudur. Yani sekonder yüke bağlı değildir, bu durumda sekonder devreden bir akım akmayacaktır ($I_2=0$). Sekonderi yüksüz olan bir transformatörün primerine U_1 gerilimi uygulandığında, primerden çok küçük bir akım geçer. Bu akıma boşta çalışma akımı denir ($I_{01}=I_0$). Yüksüz primer akımı I_0 , tam-yüklü primer akımla karşılaştırıldığında çok küçüktür. Nominal yük akımının %1-2 civarındadır. Bu değer büyük transformatörlerde % 0,2'lere kadar düşmektedir. I_0 çok küçük olduğu için yüksüz primerdeki bakır kaybı da önemsenmeyecek miktarda küçüktür[22]. Bu da yüksüz primer girişinin pratik olarak bir transformatördeki demir kaybına eşit olması anlamına gelmektedir.



Şekil 3.1. Transformatör boşta çalışma devre şekli

Primer girişteki akım boşta iken (i) çekirdekdeki demir kaybını, örneğin histerisis kaybı ve Feko(Girdap) akım kaybı, (ii) primerdeki çok küçük bir miktardaki bakır kaybını beslemek zorundadır. Dolayısıyla, yüksüz primer girişindeki akım I_0 , v_1 'in 90° 'lik açıda değil fakat 90° 'den küçük bir açıyla θ_0 ile gerisindedir. Yüksüz primer girişindeki güç $W_0 = v_1 I_0 \cos \theta_0$ ile ifade edilir. Gerçek bir transformatörün yüksüz durumu vektörel olarak Şekil 3.2' de gösterilmiştir.



Şekil 3.2. Sadece çekirdek kayıpları olan ideal bir transformatörün yüksüz akımı

Şekil 3.2'den de görüldüğü gibi I_0 primer akımı iki bileşene sahiptir.

i) Birincisi v_1 ile aynı doğrultudadır. Bu bileşen, aktif ya da demir kaybı bileşeni I_d olarak bilinir çünkü demir kaybının yanında küçük bir miktar primer bakır kaybını da beslemektedir.

$$I_d = I_0 \cos \theta_0 \quad (3.1)$$

ii) Diğer bileşenise v_1 ile dik konumdadır ve mıknatıslayan bileşen olarak bilinir. Çünkü görevi çekirdekteki alternatif akımı sağlamaktır. Watsız (elektrik gücü olmayan) akımdır;

$$I_\mu = I_0 \sin \theta_0 \quad (3.2)$$

I_0 için I_d ve I_μ vektörlerinin toplamıdır diyebiliriz, dolayısıyla;

$$I_0 = \sqrt{(I_\mu^2 + I_d^2)} \quad (3.3)$$

3.2. Demir Kayıpları

Demir kayıpları alternatif akımda meydana gelir. Alternatif akımın bir devir içinde iki defa yön değiştirmesi, aslında iletken malzeme üzerinde manyetik ve elektrik olarak iki türlü etki meydana getirir. Bunlardan birincisi olan manyetik etki, akımın ani değerinin değişmesine bağlı olarak, amper-sarımın ani değerinin ve dolayısıyla B manyetik alan yoğunluğunun değişmesi olarak kendisini gösterir ki, buna “histerisis kaybı” denir. İkincisi ise, demirin elektrik akımına gösterdiği elektriksel dirençten kaynaklanır. Bu durumda malzeme bir iletken gibi davranır ve değişken akımın etkisi ile demirde gerilim endüklenir. Bu gerilim malzemenin içinde akımların akmasına neden olur ki bu akımlara Foucault (fuko-girdap) akımları adı verilir. Bunların demir içinde serbest olarak akması ile demirde “Joule kayıpları” şeklinde hesaplanan ve ısı enerjisi olarak ortaya çıkar.

Histerisis kaybı, Eş. 3.4’ de verilmiştir.

$$P_H = K_h f B_m^x \quad (\text{W/kg}) \quad (3.4)$$

Burada K_h malzemenin histerezis kayıp katsayısıdır, birimi W/kg’dir. B_m de manyetik alan maksimum yoğunluğudur, birimi Wb/m², f manyetik akı değişimi frekansını. Eş. 3.4’ te verilen x faktörü ise, malzemeden malzemeye göre değişen faktördür ve değeri 0,5-2,3 arasındadır. Fakat genellikle elektrik makinelerinde bu değer 1,5-2,0 arasında alınır.

Fuko kaybı. Eş. 3.5’ de verildiği gibidir;

$$P_g = K_f f^2 B_m^2 \quad (\text{W/kg}) \quad (3.5)$$

Buradaki K_f fuko kayıp katsayısıdır, birimi W/kg dır. Yukarıda verilen eşitliklerden görüldüğü gibi, her iki kayıp da manyetik alan yoğunluğu B_m ile orantılıdır.

Eş. 3.3 ve 3.7' de endüklenen emk'nın B ile orantılı olduğu verildiğinden, yukarıda manyetik alan yoğunluğu B'ye göre yazılmış kayıp ifadeleri, endüklenen gerilim E'ye göre düzenlenebilir. Bu durum dikkate alınır ve histerisiz kayıplarında kullanılan "x" üstel faktörü de 2 kabul edilirse, toplam demir kayıpları;

$$P_{fe} = f (B^2)$$

şeklinde yazılabilir Burada P_{fe} , B^2 ile orantılı olduğundan, E_1^2 ile orantılı olarak yazılabilir. Yani kayıplar, endüklenen gerilimin karesi ile doğru orantılı olur. Buna bağlı olarak toplam demir kayıpları aşağıdaki gibi verilir.

$$P_{fe} = \frac{E_1^2}{r_{fe}} \quad (3.6)$$

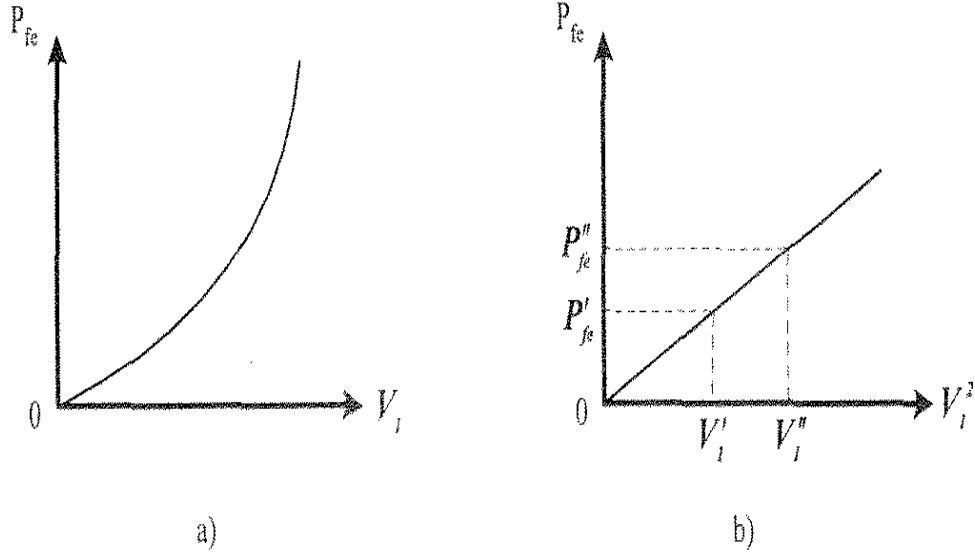
E_1 , gerilimi esas alınarak hayali bir demir direnci ve demir akımı arasındaki ilişki Ohm yasasından yararlanarak, Eş. 3.7 deki gibi tanımlanabilir.

$$I_{fe} = \frac{E_1}{r_{fe}} \quad (3.7)$$

Endüklenen gerilim ile primer sargıya uygulanan gerilim, aradaki gerilim düşümü ihmal edilerek eşit kabul edilirse, demir kayıpları Eş. 3.8'deki gibi olur.

$$P_{fe} = \frac{V_1^2}{e_{fe}} \quad (3.8)$$

Eş. 3.8'den görüleceği üzere, gerilimin değiştirilmesi ile demir kayıplarının değişimi parabolik olur. Bu durum şekil 3.3a'da verilmiştir. Ayrıca demir kayıplarının gerilimin karesi ile değişimi de şekil 3.3b' de gösterilmiştir. Şekil 3.3b'dekinin elde edilmesi şekil 3.8a'dekine göre daha kolaydır çünkü değişim doğru şeklindedir. Bu doğru üzerinde iki nokta tespit etmek doğrunun matematiksel ifadesini elde etmek için yeterlidir.



Şekil 3.3. demir kayıplarının a) uygulanan gerilime değişimi b) uygulanan gerilimin karesi ile değişimi

3.2.1. Histerisiz kayıpları

Akı yoğunluğu, B_1' den B_2' ye değişmesi halinde birim hacimde cisimde bırakılan enerji,

$$W = \frac{1}{4\pi} \int_{B_1}^{B_2} \vec{H} \cdot d\vec{B} \quad (3.9)$$

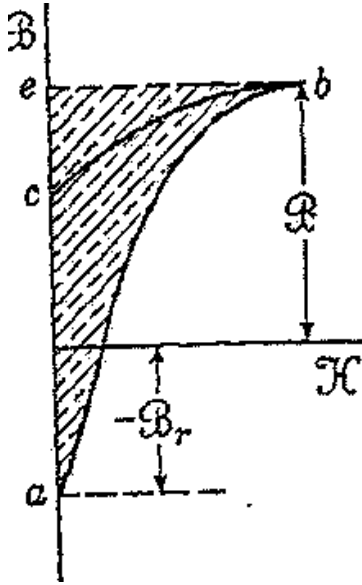
bağıntısıyla verilir [27]. Uyarıma alternatif bir gerilim taşıdığından alan şiddeti $+H$ ile $-H$ arasında değişir. Demirin b noktasına kadar mıknatıslanması için sarfedilen enerji

$$W_1 = \frac{1}{4\pi} \int_{-B_r}^{B_{max}} \vec{H} \cdot d\vec{B} = \frac{1}{4\pi} [\text{altea yüzeyi}] \quad (3.10)$$

olacaktır (şekil 3.4'e bakınız). Bu enerji mıknatıslanma eğrisinin çıkışında elementer mıknatısların düzene girmesi için harcanan enerjidir. b-c eğrisi boyunca birim hacimde biriken enerji,

$$W_2 = \frac{1}{4\pi} \int_{B_{\max}}^{B_r} \vec{H} \overline{d\vec{B}} = -\frac{1}{4\pi} \text{ [bceb alanı]} \quad (3.11)$$

olarak yazılabilir. B_r , B_{\max} ' dan küçük olduğu için ve H pozitif olduğu için integral negatiftir yani enerji geri verilmektedir[27].



Şekil 3.4. Enerjinin biriktirildiği bölge

Aynı işlem histerisiz çeviriminin $-B$ trafı içinde yapılabilir şekil 3.5. Bu durumda negatif mıknatılanma için sarfedilen enerji

$$W_3 = \frac{1}{4\pi} \text{ [cdfc alanı]} \quad (3.12)$$

olacaktır. d - a eğrisi boyunca birim hacimde biriktirilen enerji ise

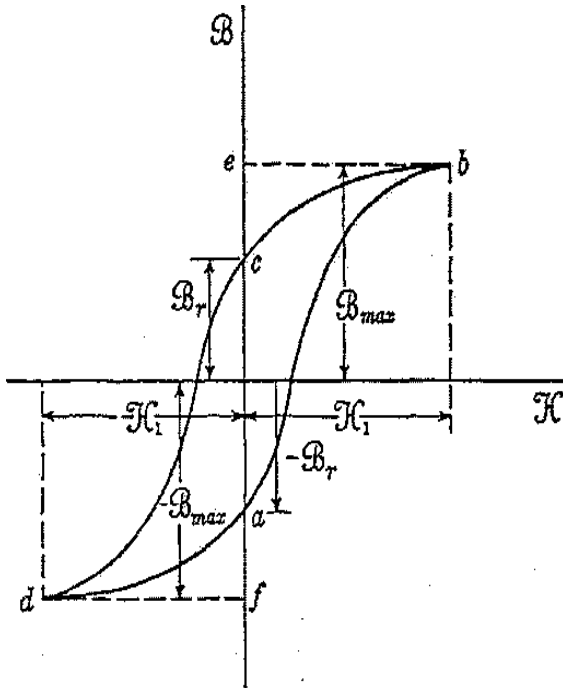
$$W_4 = -\frac{1}{4\pi} \text{ [dafd alanı]} \quad (3.13)$$

olarak elde edilir. Tüm eğri boyunca magnetik alan birim hacimde biriktirdiği enerji

$$W_h = W_1 + W_2 + W_3 + W_4 = \frac{1}{4\pi} [\text{abcda histeresiz bukle alanı}] \quad (3.14)$$

olur. Buradan görülüyor ki ısıya karşılık düşen enerji histeresiz çevriminin bütün yüzeyi ile orantılıdır.

Magnetik enerjinin bir kısmı cisimde geride bırakma olayına histerisiz denildiğine göre, bu kayıplara da demirin histeresiz kayıpları denir.



Şekil 3.5. Histeresiz çevrimi

Histeresiz çevriminin verdiği yüzey ya grafik integrasyon yoluyla ya Planimetri kurallarına göre ya da Simpson kuralına göre belirlenebilir. Fakat bu oldukça zordur [27]. Bu nedenle deneylere dayanan amprik formüller kullanılır. Steinmetz, çeşitli demir ve çelik malzemeler için yaptığı ölçümlerle kaybı, en büyük akı yoğunluğunun 1,6 katı olarak bulmuştur [24]. Amprik formül,

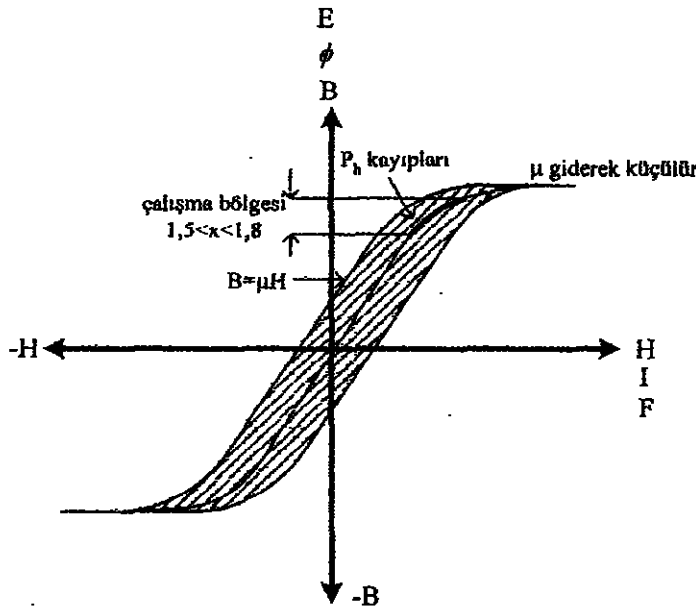
$$F_H = k_h B_{max}^n \quad (3.15)$$

şeklinde ifade edilir. Eşitlikte geçen k_h ; histerisiz kayıp faktörüdür ve n ; malzemedan malzemeye göre değişen bir sabittir. Genelde elektrik malzemelerde 1,5- 2,5 arasında alınır. Akı yoğunluğunun uniform dağıldığı ve f frekansıyla değiştiği (yani dalganın f defa tekerür etmesi) düşünülürse bu durumda birim hacimdeki toplam histerisiz kayıp değeri

$$P_H = k_h f B_{max}^n \quad (3.16)$$

olur. Akı yoğunluğu Tesla T ve f frekans Hz olarak alınırsa, histerisiz kaybı W/m^3 olarak bulunur.

Aşağıda şekil 3.6'da yine histerisiz çevrim eğrisi verilmiştir. Histerisiz eğrisinin elde edilmesinde dikkat edilecek husus, bobin akımının pozitif yönde doymaya kadar sürekli arttırılıp, negatif yönde sürekli azaltılarak eğrinin tamamlanmasını sağlamaktır. Histerisiz eğrisindeki bu iki eğrinin farklı yollardan apsis ve ordinat eksenlerini kesmesi ile ortaya çıkan fark alan, demire verilen ve demirden alınan enerji farkını, yani kayıp enerjiyi ortaya koyar.

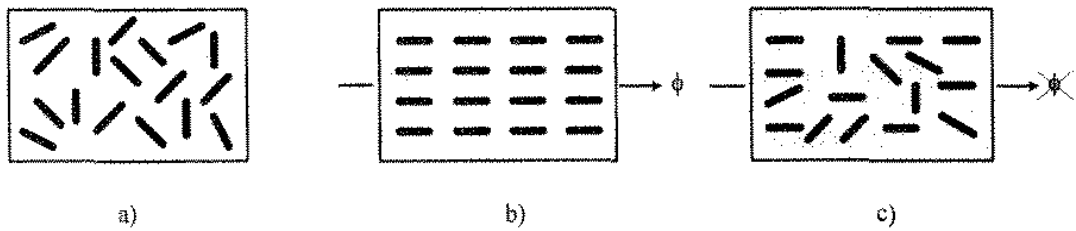


Şekil 3.6. Histerisiz Çevrimi ve çalışma bölgesi

Alternatif akımda bir saniyedeki devir sayısı (frekans) içi taralı alanı bu süre içinde sürekli taradığı için histerisiz kaybı frekansla doğru orantılı olarak artar. Histerisiz kayıplarının küçük olması için, histerisiz eğrisinin kapladığı alanın ve uygulanan frekansın küçük olması gerekmektedir. Çünkü histerisiz eğrisinde ortada bulunan içi taralı bölgenin genişlemesi histerisiz kayıplarının arttığının işaretidir.

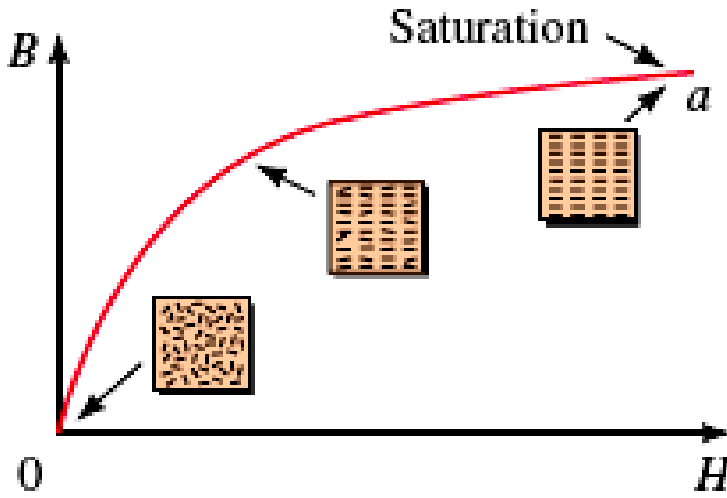
Şekil 3.6'da görüldüğü gibi histerisiz eğrisinde çalışma bölgesi olarak gösterilen kısım yani dirsek bölgesi, malzemenin yavaş yavaş doymaya başladığını gösterir. Histerisiz eğrisinin elde edilmişinde bobine verilen doğru akımın tek yönlü arttırılarak malzemenin akı olarak doymasını temin etmek esastır. Doyma elde edildikten sonra akım azaltılması ile B endüksiyonunun aynı eğri üzerinden dönmediği gözlemlenir. Bu durum manyetik olarak demir malzemeye verilen gücün geri kazanılmadığının göstergesidir.

Malzeme mıknatıslanmadan önce yapıda düzensiz olarak bulunan moleküller akımın artması ile enerji kazanarak manyetik alan yönünde dizilirler, Bu durum şekil 3.7' de gösterilmiştir.



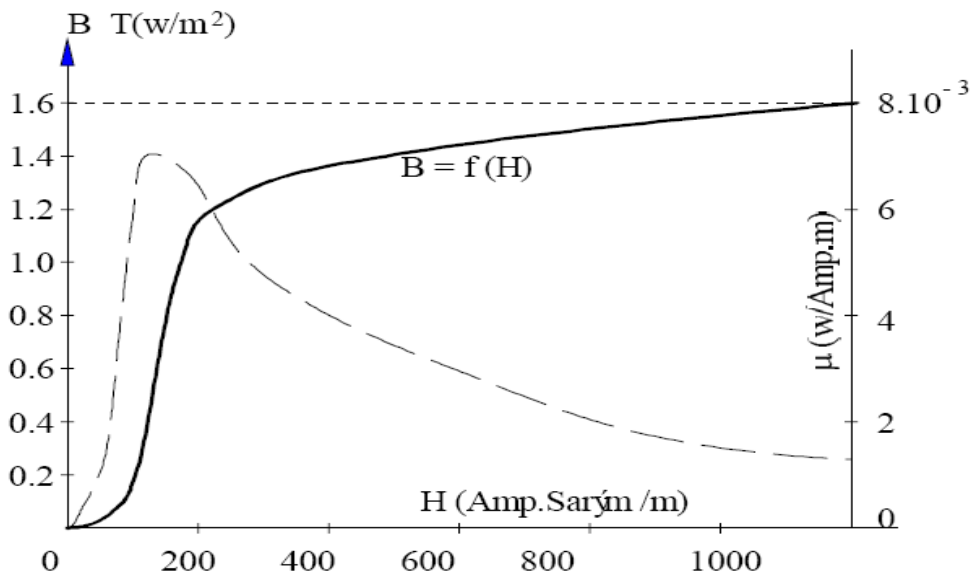
Şekil 3.7. Kalıcı mıknatıslıkta moleküllerin durumu

- a) Mıknatıslığı olmayan demir
- b) Manyetik alan içindeki mıknatıslık
- c) Kalıcı mıknatıslık



Şekil 3.8. Mıknatıslıkta Moleküllerin Durumu

Daha sonra bu alanın zayıflaması ve nihayet yok olması halinde moleküllerin çoğunluğu yapıda eski konumlarına döner. Geriye kalan küçük bir bölümünde ise dışarıdan uygulanan mıknatıslayıcı enerji kaldırıldığı halde bu enerjinin yok olmadığı görülür. Bu nedenle B manyetik endüksiyonu, akım sıfır olduğu halde sıfıra gitmeyerek belli bir değerde kalır. Çünkü arka arkaya dizilmiş olan moleküllerden bazıları eski haline dönmezler. Buna “kalıcı mıknatıslık” adı verilir ve malzemede kalıcı mıknatıslığın var olduğunu gösterir.



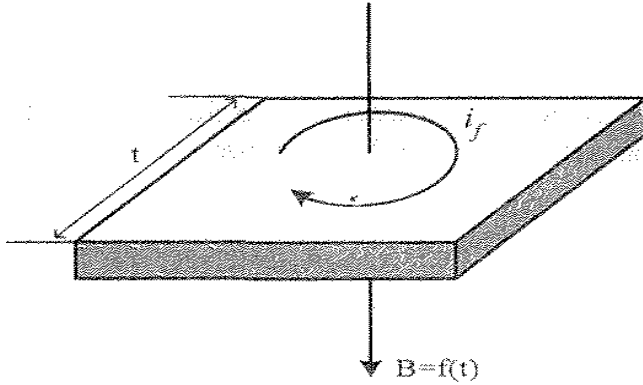
Şekil 3.9. B-H eğrisi

3.2.2. Eddy (Girdap) akım kayıpları

Zamanla değişen bir alan içinde bulunan malzeme üzerinde gerilimler endüklenir. Bu endüklenen gerilimler manyetik malzeme içerisinde girdap akımları ismini verdiğimiz akımların dolaşmasına neden olur. Bu akım bir direnç üzerinden yola devam ettiği için bir omik kayba sebep olur. Bu kayıplar transformatörün verimini düşürür [21].

Genliğinin değeri zamana göre değişen bir manyetik alan içinde bulunan malzemeden yapılmış bir plaka sac düşünelim. Kalınlığı t olsun, Bu sac parçanın üzerine manyetik alan vektörünün 90° lik dik açı ile geldiğini varsayalım Bu durumda sacım üzerinde şekil 3.10'da gösterilen yönde gerilim ve akım endüklenecektir. Gerilimin sacın elektriksel direnci ile orantılı olarak akıtacağı akım sacın t kalınlığındaki kısmında tıkacak ve burada Joule kaybı meydana getirecektir. Buna “fuko kaybı” adı verilir. Sacın kalınlığı olan t arttığında, levhanın direnci azalacağından, fuko akımı da büyüyecek ve Joule kaybı da akımın karesi ile orantılı olarak artacaktır. Bunun sonucunda, sac aşırı derecede ısınacak ve üzerinde taşıdığı bobine ve onun izolasyonuna zarar verebilecek seviyeye ulaşarak, makinenin sağlıklı çalışmasını riske sokacaktır, Bu nedenle demir malzemenin ısınması dikkate alınarak, makine içinde gerekli soğutma tedbirleri alınmalı ve makinenin çalışmasına zarar verecek ısı değerlerine ulaşması engellenmelidir.

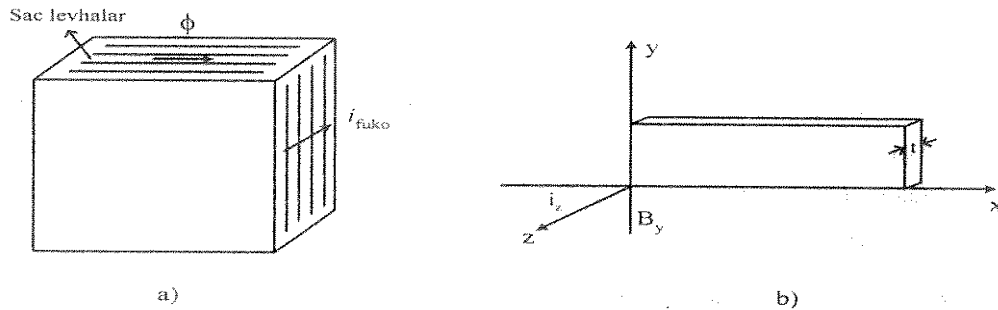
Fuko kayıplarının, Steinmetz formüllerinden faydalanılarak B yerine E yazılması suretiyle, bobine uygulanan gerilimin ve frekansının karesi ile değişen bir büyüklük olduğu Eş. 3.5 ve 3.7'den açıkça görölmektedir.



Şekil 3.10. Saç plakasının üzerine dik açı ile gelen manyetik alan vektörü

Fuko akımlarını küçük tutmanın yolu sacın kalınlığının mümkün olduğu kadar ince yapılması ve direncinin artırılmasıdır. Fakat bazı durumlarda bu bile yeterli değildir. Akıma karşı gösterilen direncin artırılması için sacları yalıtılarak arka arkaya dizilirler. Bu suretle akımın sacdan saca geçmesine engel olunmuş olur.

Eğer bu izolasyon tabakası olmaz ise saclar top yekun bir kütle oluşturacağından içinde endüklenen gerilim büyük bir Fuko akımının akmasına yol açar. Artan fuko akımları etkisiyle sac fazlasıyla ısınır ve bazı noktalarda akkor hale bile gelebilir. Bu bakımdan sacların yalıtılması şarttır.



Şekil 3.11 a) Demir gövdede meydana gelen manyetik akımın ve fuko akımının yönleri b) sacların transformatörün Demir gövdesinde z yönünde dizilişi

Faraday yasasına göre zamanla değişen bir alan içinde bulunan iletkenlerde bir gerilim endüklenir. Yine yukarıdaki ayrıtlarda açıklanan nedenlerle malzemelerin moleküllerinde de bir gerilim endüklenir. Endüklenen bu gerilimler sonucu oluşan akımlar moleküller arasında çevrimini tamamlamaya çalışır ve böylece ferromagnetik malzeme, birçok kısa devre olmuş sargılar gibi davranır. Meydana gelen girdap akımları magnetik alan frekansında olacağından, elektronların birbirine sürtünmeleri neticesinde moleküller ve moleküllerin teşkil ettiği kısımlar ısınır. (Şekil 3.12.a). Isı kaynağı teşkil eden bu kısımlardan cidarlara doğru bir ısı akışı meydana gelir ve cisim ısınır dolayısıyla ısı kayıpları ortaya çıkar. Meydana gelen girdap akımları, magnetik alanın frekansı yanında malzeme cinsi, yapısı ve boyutlarına bağlıdır. Girdap akımlarının izledikleri yolları tam olarak belirlemek mümkün olmadığı gibi izledikleri yol da düzgün değildir. Girdap akımları sadece malzemenin ısınmasına değil, aynı zamanda kendisini oluşturan alana ters yönde olacağından magnetik alanın da zayıflamasına neden olurlar. Girdap akımlarına dolayısıyla girdap kayıplarına etkileyen büyüklükleri görme amacıyla Şekil 3.12.b'de verilen kalınlığı h , uzunluğu l olan ferromagnetik malzemedan oluşan levhayı göz önüne alalım.

Levhanın pozitif yönü şekilde \mathbf{B} ile gösterilen doğrultuda olan değişken bir magnetik alanın içinde bulunduğu varsayalım, bu değişken magnetik alan sonucunda oluşan girdap akımının devresini genişliği dy ve uzunluğu l olan kesitte tamamladığı düşüncesi ile bu devre tarafından halkalanan akı için, eğer $h < b$ ise;

$$\Phi = B S = 2 y b B \quad (3.17)$$

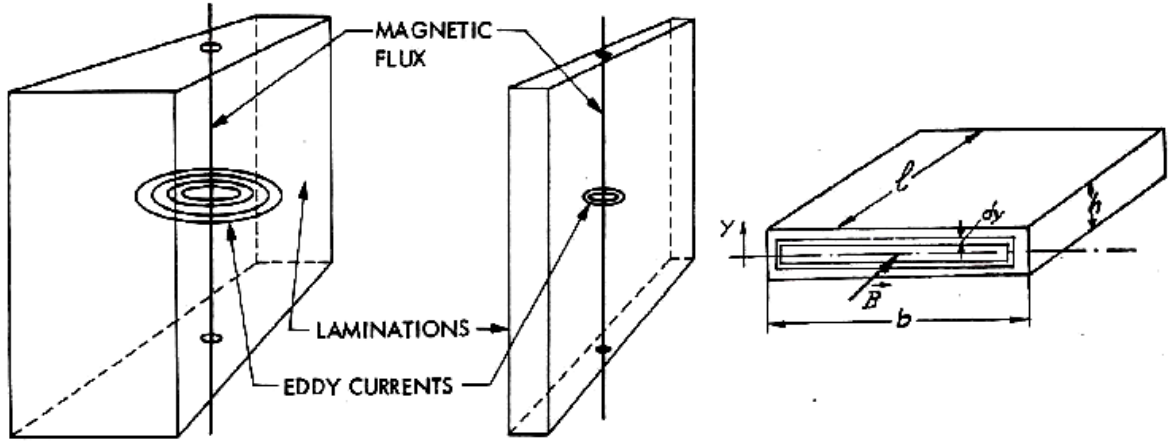
yazılır. Değişken magnetik alanın $B = B_m \sin\omega t$ şeklinde zamanla sinüzoidal olarak değiştiği varsayılırsa,

$$\Phi = 2 y b B_m \sin\omega t \quad (3.18)$$

elde edilir. Faraday yasasına göre endüklenen gerilim,

$$e = -\left(\frac{d\Phi}{dt}\right) = -2 y b w B_m \cos \omega t \quad (3.19)$$

olarak belirlenir.



Şekil 3.12. a) Girdap(Eddy ya da Fuko) akımı b) saç levhası

Levha malzemesinin öz direnci(resistivity) ρ ile gösterilirse, $2y$ uzunluğunu, b genişliği yanında ihmal ederek girdap akım devresi direnci için,

$$R = \frac{\rho \cdot b}{1 \cdot dy} \quad (3.20)$$

yazılır. Endüklenen gerilimin etkin (efektif) değeri,

$$E = \frac{2 y b \omega B_m}{\sqrt{2}} \quad (3.21)$$

olduğundan girdap akımının R direncinde meydana getirdiği güç kaybı,

$$dP_g = \frac{E^2}{R} = \left(\frac{\omega^2 b l B_m^2}{\rho} \right) y^2 dy \quad (3.22)$$

olacağından, tüm levhadaki güç kaybı, bunun $y = 0$ ile $y = h/2$ arasında integre ederek,

$$P_g = \frac{\omega^2 b l B m^2 h^3}{24 \rho} \quad (3.23)$$

ya da $\omega = 2\pi f$ olduğundan,

$$P_g = \frac{\pi^2 f^2 b l B m^2 h^3}{6 \rho} \quad (3.24)$$

elde edilir. Levhanın hacmi $V = b h l$ olduğundan Eş. 3.24

$$P_g = \frac{\pi^2 f^2 B m^2 h^2 V}{6 \rho} \quad (3.25)$$

olur.

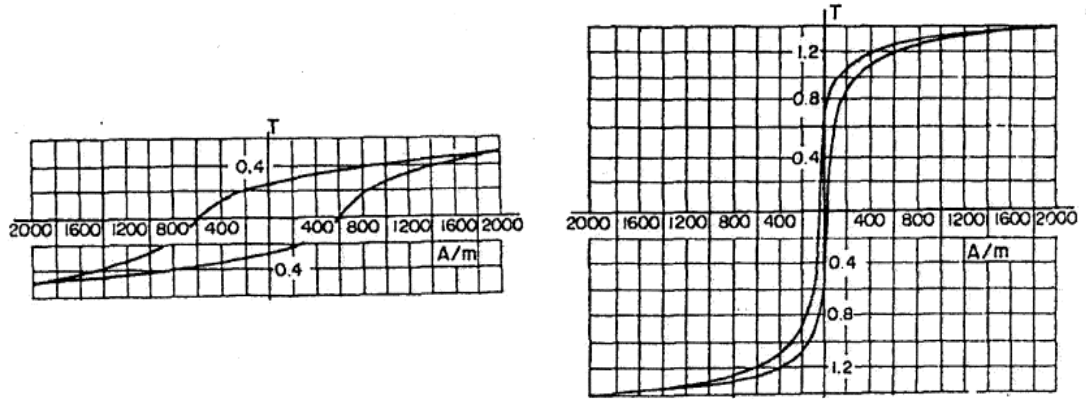
Eş.3.24 ya da Eş. 3.25 ile verilen girdap akımı kayıpları, göz önüne alınan levhada kesitin aynı olduğu varsayımı ile elde edilmiştir. Hâlbuki girdap akımları nedeni ile kesit her yerde aynı değildir. Bunun yanında girdap akımlarının levhadaki dağılımı da aynı genlikte değildir. Bununla beraber $h < b$ almakla yapılan hata pek büyük değildir.

3.3. Çekirdek Demir Kayıplarının Azaltılması

Histerisiz kayıpları, özel demir alaşımlarının kullanılmasıyla ve demirin haddelenmesiyle azaltılabilir. Demirde Si kullanımı malzemenin magnetik permeabilitesinde ve dolayısıyla histerisiz kaybında büyük rol oynar. Bilindiği gibi histerisiz kaybı histerisiz çevriminin (bukle) alanıyla orantılıdır. Magnetik yumuşak demirin dar, magnetik sert malzemenin ise geniş bir histerisiz çevrimi vardır Şekil 3.13.

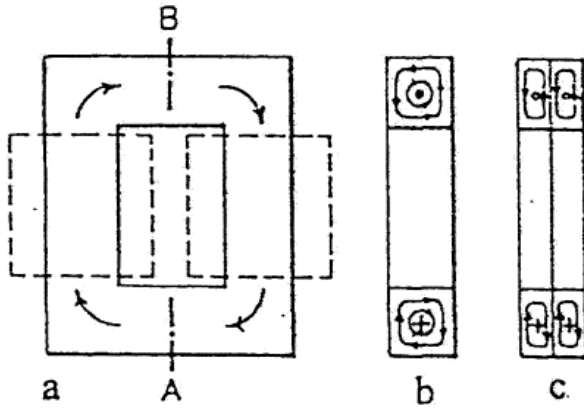
Soğukta haddelenmiş ve kristalleri magnetik yönlendirilmiş transformatör saçlarında demir kayıpları, sıcakta haddelenenlere göre daha küçüktür (yaklaşık yarısı). Bu nedenle soğukta haddelenmiş saçlar tercih edilir. Soğukta haddelenen saçlarda

malzemenin mıknatıslanma karakteristiği ve kayıplar mıknatıslanma yönüne bağlıdır. Yönün 30° lik değişimi/ kayıpların iki katına çıkmasına neden olur. Mekanik zorlamalar bu tip saçlarda kayıpları artırır [27].



Şekil 3.13. Sırasıyla dökme demir, silisyum alaşımlı demir için histerezis eğrileri

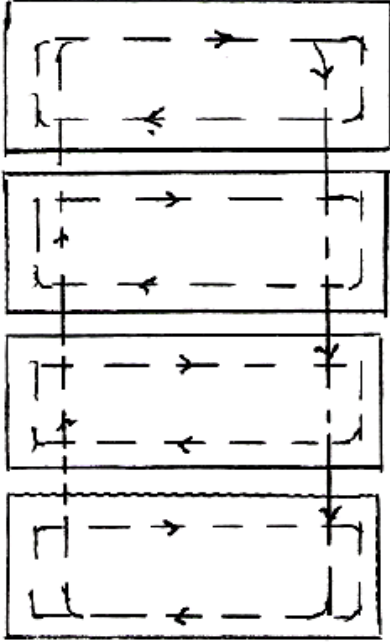
Foucault kayıplarının değeri 3.25 bağıntısından görüldüğü gibi yalnız B^2 ve f^2 ile orantılı olmayıp bir de (h^2) yani levha kalınlığının karesiyle orantılıdır. Bu kayıpları küçültmek için foucault akım yollarını kesmek ve yekpare aktif kısmı demir levhalardan yapmak gerekir. Levhalar birbirine karşı elektriki olarak izole edilir. Böylece foucault akımları, bir levhadan diğerine geçemez, levhalar içinde akım devrelerini kaparlar [7]. Şekil 3.14a'da, 2 tabakaya ayrılmış bir çekirdekdeki foucault akımlarının tesiri incelenmiştir. Şekil 3.14b'de tek tabakalı kısımda çekirdeğin AB kesiti gösterilmiştir. (+) işaret akının yönünü ve etrafındaki halkalar ise foucault akımlarını göstermektedir. İki kısma ayrılmış levhanın her bir bölümündeki yarı akımlar sirkülasyon akımları oluşturur. Şekil 3.14c. Bu durumda foucault akım yolu direnci yaklaşık iki katı (yolun genişliği $1/2$ olduğu için) olur. Kesitteki akı ve gerilim $1/2$ ' sine, akım (E/R) $1/4$ ' üne inerken kesitteki kayıp $1/8$ ' ine ve toplam kayıp $1/4$ ' üne düşer.



Şekil 3.14. Çekirdekteki magnetik akı

Akı dağılımı, çekirdek malzemesinin özelliklerine, çekirdeğin tasarımına, montaj şekline, işletim akı yoğunluğuna, magnetik devrenin kusurlarına ve var olan gerilmelere bağlı olarak değişir. Bu nedenlerden dolayı çekirdekte ek kayıplar oluşur. Ayrıca, malzeme kalitesi iyileştirildikçe şekil değiştirme ve vurma gibi magnetik zorlanmalara karşı malzemenin hassasiyeti artar ve bu etkiler altında magnetik özellikleri bozulur[27].

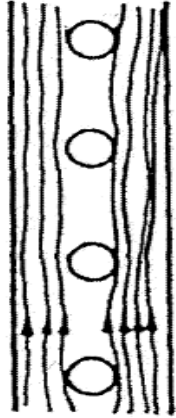
Yüzeylerde meydana gelen girdap akımları, Lenz kuralının gereği esas alanı zayıflatacak yönde etki eder. Öyle ki girdap akımlarınca oluşturulan alan, cismin ortalarında alanın kuvvet çizgilerinin akmasını önleyecek şekilde davranırlar. Bu nedenle cismin ortası aktif olmaz. Şekil 3.15'te birbirinden yalıtılmamış (izole edilmemiş) levha paketlerindeki girdap akımlarınca oluşturulan alan ve esas alan şekli verilmiştir. Bu şekilde her bir paketteki girdap akımı kesik çizgilerle gösterilmiştir. Komşu olan levhalardaki akım yönleri göz önüne alındığında bunların birbirlerini yok ettikleri Şekil 3.15'ten görülmektedir. Herne kadar komşu levhalardaki akım yönleri göz önüne alındığında birbirlerini yok etmeleri söz konusu ise de bir saç paketi göz önüne alındığında paket çevresinde bütün girdap akımlarının vereceği bir bileşke magnetik etki vardır. Bu bileşke etki nedeniyle esas alan levhanın iç kısmında etkin olmaz. İşte yukarıda belirtildiği gibi levhalar birbirinden izole edilirler [15].



Şekil 3.15. Birbirinden yalıtılmamış levhalar

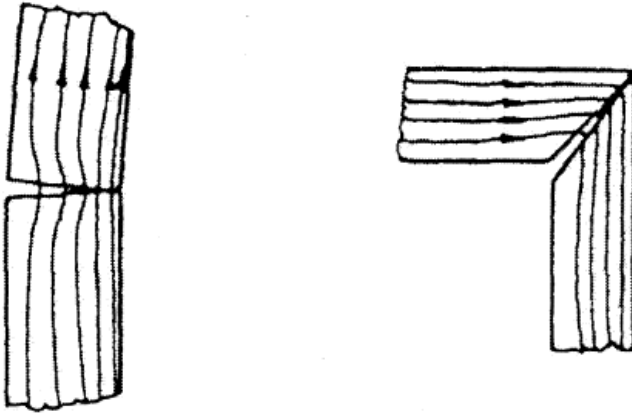
Saçların bükülmesi, zımbalanması ve sıkıştırılması gibi mekanik zorlanmalar kayıplar üzerinde etkilidir. Saçların sıkıştırılması ve çekirdek rijitliğinin sağlanması için saçlara delikler açılıp buradan civatalar geçirilir. Bu durumda, magnetik akı çizgileri delik kenarlarındaki dar bölgelerden geçer, delikler arasındaki bölgelerden geçmez. Dolayısıyla kayıplar oluşur.

Bu kayıpları önlemek için delik çapları küçültülme veya saçlara delik açılmamalıdır. Saçları sıkıştırmak için uygun bir yapışkanın transformatör saç kenarlarına sürülmesi veya spreyleneşmesi yolu seçilebilir. Başka bir yol da saçların cam elyaf şeritle sıkıştırılmasıdır. Ayrıca, ek kayıpların engellenmesi için civatalar saçlara karşı yalıtılmış olmalı veya antimagnetik civata kullanılmalıdır.



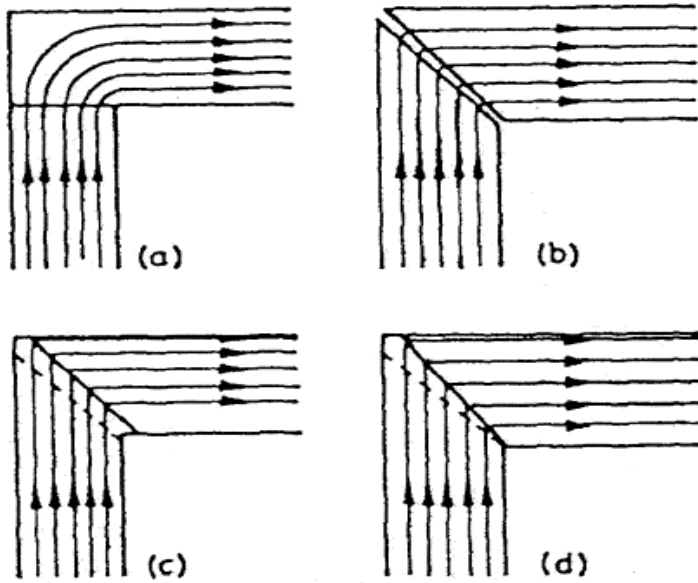
Şekil 3.16. Akı çizgileri deliklerle ayrılmış bölgeye girmez

Transformatör saçlarının birleştirilmesi sırasında hava aralığı oluşumu kayıpları artırır. Şekil 3.17'de iki saç levha arasındaki hava aralığının değişiminin akı dağılımına etkisi gösterilmiştir. Magnetik akı çizgileri dar hava aralığına doğru sıkışmış ve bunun sonucu olarak malzemedan yararlanılan bölge küçülmüştür.



Şekil 3.17. Magnetik akı çizgileri dar hava aralığına doğru sıklaşır

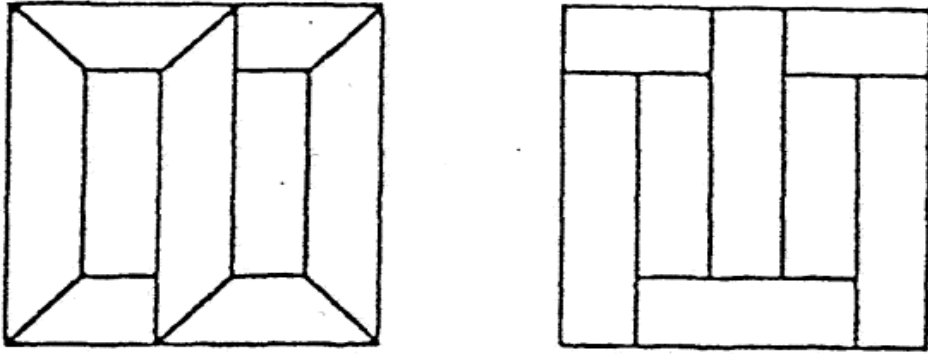
Bir çekirdek yapısı ve akı çizgilerinin uyumunun sağlanması için saçlar üst üste bindirilerek dizilir. Saçlar ya 50° lik farkla ya da birbirini 90° ye tamamlayacak şekilde kesilip dizilirler (Şekil 3.18c-d). Bağlantı kısımlarındaki ek kayıp akı yönündeki değişime, oluşan döner akıya ve akı harmonik bileşenlerine bağlı olarak artar. Üst üste bindirme adımı artarsa kayıplar da artar.



Şekil 3.18. Köşelerde ve üst üste bindirme durumunda akı dağılımı

Orta bacağın T şeklinde bağlanması durumunda da döner akı artacağından kayıplar büyür [12,27]. Tanecikleri yönlendirilmiş Si-Fe çekirdekte 45° - 90° T bağlantısı yerine V bağlantısı oluşturulursa olunacak döner kayıp %50-%75'e kadar sınırlandırılabilir. Köşelerin birleştirilme şekilleri de akı çizgileri ve dolaylı olarak kayıplar üzerinde etkilidir. Saçların 45° açılı yapacak şekilde istiflenmesinde kayıplar küçülmektedir.

İç sargılarla çekirdek arasındaki boşluktan en iyi şekilde yararlanmak için, haçlı çekirdek yapısı kullanılır. Sargılar için en iyi aksiyal dengenin sağlanması, boyunduruk yüzeyinin büyük yapılmasıyla elde edilir. Bunun için boyunduruk haç adımı sayısı daha az olmalıdır. Bacaktaki haç sayısı boyunduruktakinden farklı olursa, kesit alanları farklı olacak ve dolayısıyla burada ek kayıplar oluşacaktır. Kesit alanının değişmesi sonucu oluşan kayıplar çekirdek kayıplarının %5'ine ulaşabilir. Bu kayıpları önlemek için bacak ve boyunduruk haç adımları eşit olmalıdır.



Şekil 3.19. Çekirdeğin 45° ve 90° açıyla istiflemesi

Transformatör saçlarının kesilmesi ve işlenmesi sırasında pürüzler meydana gelir. Bu da Foucault akımları için bir kısa devre oluşturur. Bunun için levhalar izole edilmemiş tarafa doğru kesilmeli ve pürüzler giderilmelidir.

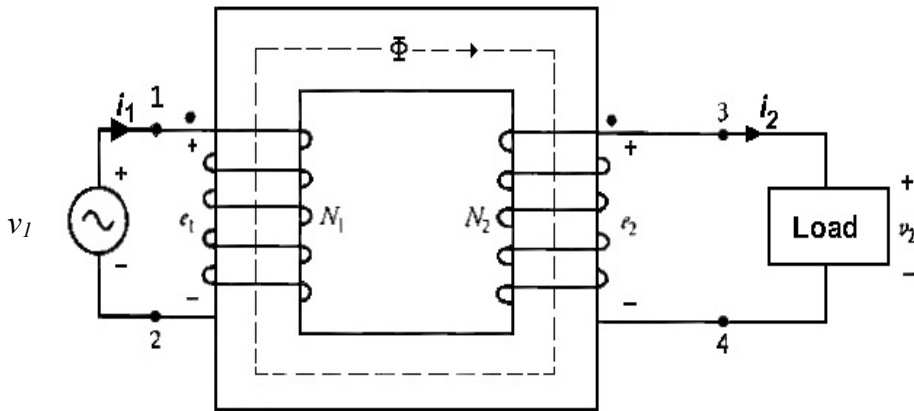
Levhalar birbirleri üzerine sürtünmeden yerleştirilmeli, yani levhalar birbirleri üzerinde kaydırılmamalıdır. Saçların titreşerek aralarındaki yalıtkan maddeyi tahrip etmemesi için saçlar belirli bir kuvvetle sıkıştırılırlar. Ancak sıkıştırma basıncı; akı dağılımı ve de ek kayıpların oluşumu üzerinde etkili olduğu unutulmamalıdır, Boyunduruk ve orta bacak arasındaki bölgede, basınç döner akıyı artırır [27].

4. TRANSFORMATÖRDE YÜKTEKİ KAYIPLAR (On- Load Loss)

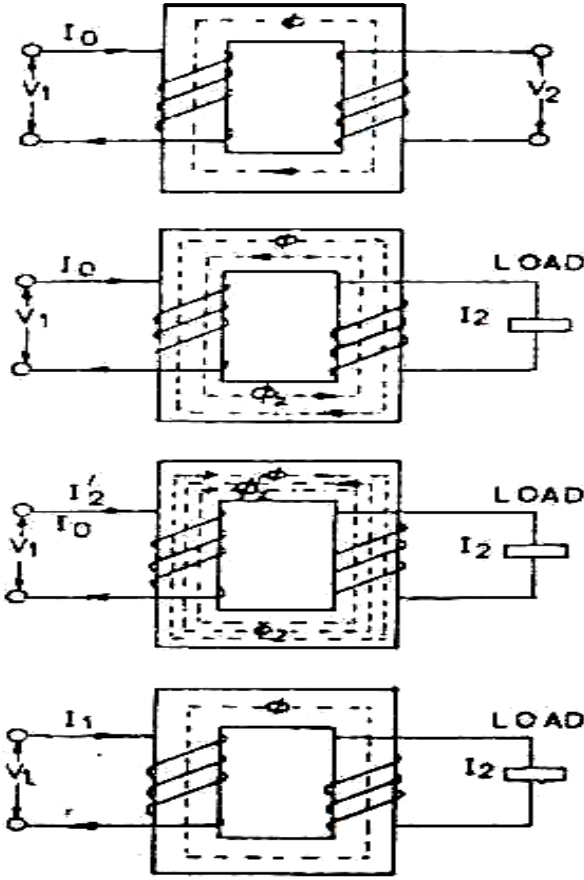
Transformatörün yükte çalışması sekonder sargısının bir şebekeyi veya tüketicileri beslediği, yani sekonder sargıdan da bir akımın geçtiği durumdur. Sekonder akımın transformatörde yeni bir amper-sarım ve yeni kayıplar oluşturur. Şekil 4.1'de bağlantı şekli gösterilmiştir [19].

Sekonder yüklü olduğu zaman, sekonder akımı I_2 hazır durumundadır. I_2 'nin büyüklüğü yükün özelliğiyle belirlenir. Sekonder akımı kendi mmf'ini ($N_2 I_2$) oluşturur ve dolayısıyla I_0 nedeniyle ana primer akışa Φ , ters olan kendi manyetik akısını Φ_2 'yi oluşturur. Karşı sekonder manyetik akısı Φ_2 primer manyetik akısını bir an için zayıflatır ve primer geri emk E_1 azalmaya eğilim kazanır. Bir anda, v_1 , E_1 üzerinden yukarı kolun akımını kazanır ve dolayısıyla primerden daha fazla I_2' akımın geçmesine neden olur. I_2' akımı primerdeki akımın yük bileşeni olarak bilinir. Bu akım I_2 akımına karşı doğrultudadır. Ek primer mmf $N_1 I_2'$, Φ_2 'ye ters (fakat Φ ile aynı yönde) ve eşit büyüklükte Φ_2 ' manyetik akımını oluşturur.

Böylece sekonderdeki akımın I_2 manyetik etkileri ek primerdeki akım I_2' ile hemen hemen nötür hale gelir. Tüm bu süreç Şekil 4.2'de gösterilmiştir [9].



Şekil 4.1. Transformatörün yükte çalışma durumu



Şekil 4.2. Transformatörün yükteki hali

Dolayısıyla, yük koşulları ne olursa olsun çekirdekten geçen net manyetik akı yüksüz durumdaki ile hemen hemen aynıdır. Bu nedenle, çekirdek-kayı pratikte tüm koşullar altında aynıdır.

$\Phi_2 = \Phi_2'$ iken,

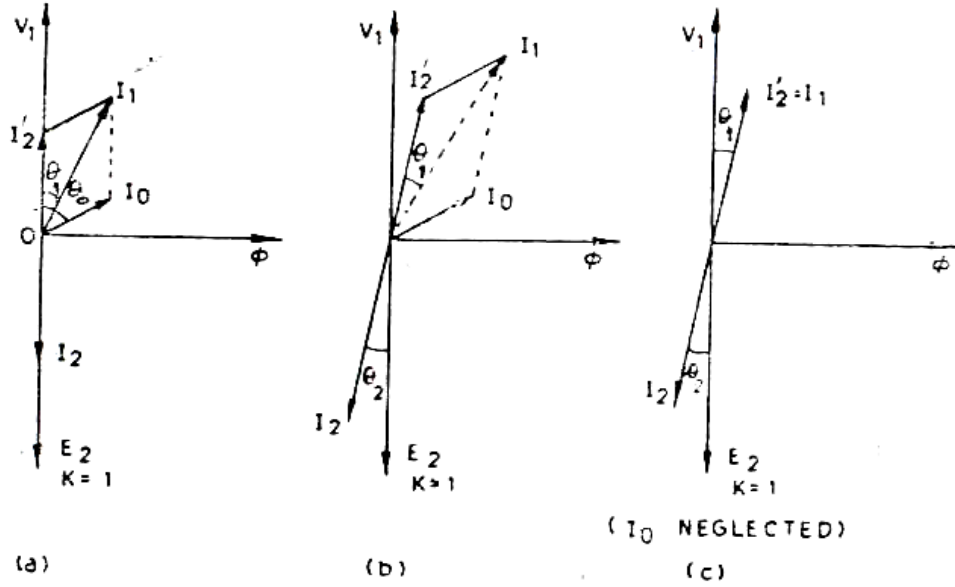
$$N_2 I_2 = N_1 I_2' \quad (4.1)$$

olur, yukarıdaki eşitlikten,

$$I_2' = \frac{N_2}{N_1} I_2 = K I_2 \quad (4.2)$$

yazılır.

Transformatör yüklendiği zaman, primer sarım I_0 ve I_2' (I_2 ile zıt yönde ve K katı büyüklükte) olmak üzere iki akımı vardır. Primerdeki toplam akım I_0 ve I_2' 'nin vektörel toplamıdır. Şekil 4.3'de gösterilen vektör diyagramları yüklü bir transformatör içindir.



Şekil 4.3. İdeal bir transformatörün vektör diyagramı

Şekil 4.3a'da I_2' akımını E_2 ile aynı doğrultudadır (endüktif olmayan yükler için). Şekil 4.3b'de ise I_2' akımını E_2 'nin gerisinde olmalıdır (endüktif yükler için).

Şekil 4.3' de gösterildiği gibi I_2' 'ye göre I_0 akımını ihmal edersek, $\theta_1 = \theta_2$ diyebiliriz. Dolayısıyla;

$$N_1 I_2' = N_1 I_1 = N_2 I_2$$

$$\frac{I_1}{I_2} = \frac{N_2}{N_1} = K \quad (4.3)$$

elde edilir.

Bu durumda, yük koşulları altında primer ve sekonderdeki akımların birbirine oranının sabit olduğu görülmektedir.

Genel olarak ifade edilirse, yükteki transformatörün kayıplarının büyük kısmını bakır kayıpları teşkil eder ve bunun yanı sıra kaçak akı kayıpları da meydana gelmektedir [22]. Bu nedenle bu bölümde bakır kayıpları ile kaçak akı kayıplarını ele alacağız.

4.1. Bakır Kayıpları

Bu kayıplar da demir kayıplarında olduğu gibi iki kısma ayrılır. Birincisi doğru akımın sargı üzerinde meydana getirebileceği bakır kaybı (iletken direncinden dolayı meydana gelen kayıp) ve ikincisi de alternatif akımdan dolayı bakırda meydana gelen Foucault akımlarının sebebiyet verdiği kayıplardır.

Doğru akımda bunlardan yalnızca birinci ve ikinci alternatif akımda ise her ikisi aynı zamanda meydana gelir. Foucault akımlarının sebebiyet verdiği kayıplar iletkenin şekli ile frekansa bağlıdır. Pratikte transformatörün bu kayıplarının toplamı önemli olduğundan, kısa devre deneyinden tesbit olunan bakır kayıplarının nominal akıma düşeni nominal bakır kayıplarını vermektedir.

Bir transformatörün yüksek verime sahip olabilmesi için bütün kayıpların bir minimuma indirilmesi gerekir. Bu nedenle ilk olarak kayıp büyüklüklerinin tayin eden özellikler, ikincisi olarak bunları minimuma indirmek için alınacak tedbirler incelenecektir.

Yük akımlarından dolayı meydana gelen bakır kayıpları I^2R dir. Akım değerleri sabit olduğundan, bakır kaybını azaltmak için dizaynı yapan tarafından değiştirebilecek faktör sargı direnci olacaktır [16]. Dirençleri minimuma indirmek için iletkenlerin toplam kesitleri mümkün olduğu kadar büyük, ya da toplam uzunluklarını mümkün olduğu kadar kısa tutmak gerekmektedir. Kesit artışı, direncin küçülmesini, I^2R kaybının kesinlikle azalmasını sağlar. Ancak boyut büyümesine ve bu nedenle manyetik devredeki kayıpları artırmaya da neden olacaktır. Bu bakımdan makul suretle değiştirilebilecek faktör sargıların toplam uzunluğudur ve boyutlarla uygun

oranlanarak indirilmeleri mümkündür. İyi dizayn edilen bir transformatörde, belirli bir frekans, gerilim oranı ve ısınma için verilen belirli güçteki toplam kayıplar neredeyse sabittir. Bakır kaybı yüksek tutulup, demir kaybının mümkün mertebede düşük tutulması doğaldır. Zira demir kaybı 24 saatlik bir yük olarak ifade edilebilir. Yağlı tabii soğutmalı transformatörlerde aşırı yüklenmeye müsaade edilmez. Tam yükte ve maksimum bir çevre sıcaklığında yağdaki ısınma (60°C)dir. Bu nedenle böyle transformatörlerde bakır kayıplarının, demir kaybına oranı oldukça yüksek olabilir. Bu oran güç, gerilim ve frekansa göre 4/1 den 7/1 e kadar düzenlenebilir. Şayet çevre sıcaklığı maksimum altında ise belirli aşırı yüklenmelere izin verilebilir. Yukarıda verilen oranlar sargılarda aşırı ısınma olmaksızın, belirli aşırı yüklemelere daha düşük çevre sıcaklarında ulaşılmasına müsaade edilecek şekildedir. Transformatör sürekli aşırı yükleme için dizayn edilirse, normal tam yükte bakırın, demir kaybına oranı düşmektedir [18].

4.2. Dielektrik kayıpları

Sarım yalıtımındaki dielektrik kayıpları, yüksüz (boştaki) kayıp bileşenlerine, histerisiz kayıpları ve farklı endüksiyon akımlarından oluşan demir kayıplarına göre genellikle ihmal edilir. Fakat büyük dağıtım transformatörleri için yapılan doğru ölçümler, %1-2'lik boştaki kayıpları temsilen birkaç onluk watt değerinde dielektrik kaybının bulunabileceğini göstermektedir. Bu durum, birleştirmenin farklı seviyelerinde boştaki kayıtlı kayıplar arasındaki farklara bakıldıktan sonra sonuçlandırılır. Bu sıranın önemli bir farkı, yalıtım malzemesinin dielektrik kaybı açısının sonuçlarıyla birlikte, ancak sarım yalıtımının dehidrasyonu (su kaybıyla) açıklanabilir [8].

4.3. Kaçak Alanlardan İletkenlerde İleri Gelen Eddy Akım Kayıpları

Manyetik alanlardaki dağılımlardan ileri gelen bu kayıplar iletkenlerdeki Girdap akımlarına sebep olur. Bu kayıplar belirli bir doğruluk seviyesinde hesaplanması en zor olan kayıplardır. Dizaynda gerekli itina gösterilmezse çok önemli büyüklüklere ulaşabilirler. Bu kaybı hesaplamak için çok zaman zaman çeşitli formüller ileri

sürülmüştür. Ancak hesaba etkisi olan pek çok faktör vardır. Bu nedenle formüller vasıtası ile hesaplamak yerine bakır kayıplarına belirli bir yüzde ilave etmek daha pratiktir. İlave edilecek yüzdeler belirli transformatör tiplerinin tecrübeleri ile belirlenmeye çalışılır. Bu kaybın minimuma indirilmesi için artma veya eksilmesine neden olan çeşitli faktörleri göz önünde tutmak gerekir. Genel olarak kaçak akı yoğunluğunun karesiyle, transformatör toplam bakır ağırlığıyla ve kaçak akı yoluna dik gelen iletkenlerin boyutlarının karesiyle orantılı olduğu söylenebilir. Bu faktörlerin kaçak akı yoğunluğu ile toplam bakır ağırlığı çoğunlukla sabittir. Bu nedenle değiştirilebilecek faktör, kaçak akı yoluna dik gelen münferit iletkenlerin boyutlarıdır. Bu boyut; iletkenleri bölümlere ayırarak (kesiti küçülterek) ve çeşitli kısımları biri birinden yalıtarak, mümkün olduğu kadar küçük tutulmalıdır [22].

Çoğunlukla girdap akım kaybının içinde farz edilen bir kayıp daha mevcuttur. Aslında bu kayıp girdap kaybı değildir. Bölümlere ayrılmış bir iletkenin çeşitli kısımlarının veya katlarının yükü eşit olarak bölüşmemesinden ileri gelen bir kayıptır. İletken uzunluklarının eşit olmaması, kaçak akıya nazaran homojen, simetrik, dengeli yerleştirilmelerinin mümkün olmamasından ortaya çıkar.

4.4. Bakır Sargılarda Deri Etkisi

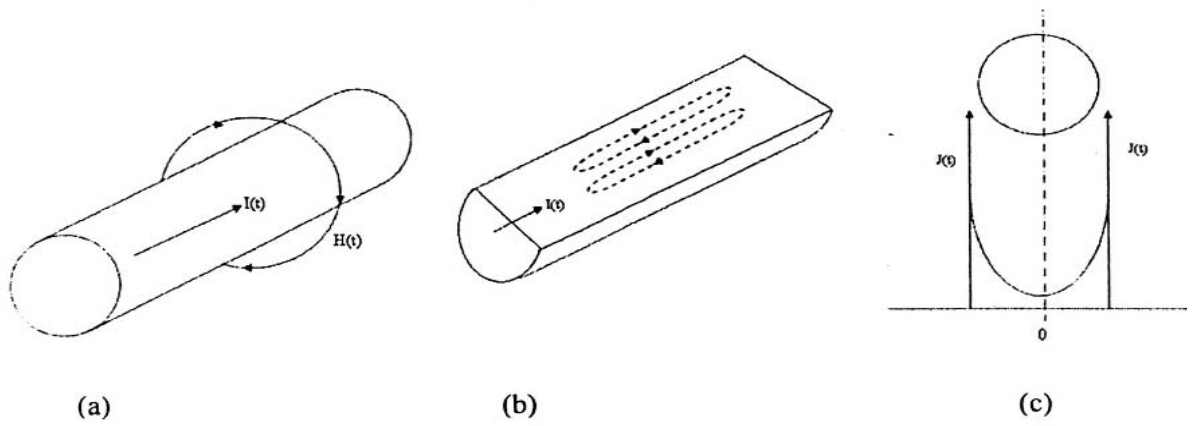
Tıpkı çekirdekte olduğu gibi bakır iletkenlerde de deri etkisi oluşur. Sekil 4.4a'da gösterildiği gibi zamanla değişim $i(t)$ akımını taşıyan bir bakır iletkeni ele alalım. Bu akım şekil 4.4a'da gösterilen manyetik alanı oluşturur ve bu manyetik alan Sekil 4.4b'de gösterilen girdap akım kayıplarını üretir. Bu girdap akımları, telin iç kısmında uygulanan $i(t)$ akımına ters yönünde akar ve böylece iletkenin iç kısmından akan akıma ve sonuç olarak ortaya çıkan manyetik alanı engelleme eğilimindedir.

Sonuç olarak toplam akı yoğunluğu İletkenin yüzeyinde en büyüktür ve Sekil 3.3c'de gösterildiği gibi, iletkenin iç kısmına doğru olan mesafe ile üstel olarak azalır.

Karakteristiğin azalma uzunluğu, $\delta = \sqrt{\frac{2}{w\mu\sigma}}$ Eş.iyle verilen deri kalınlığıdır.

Sargıda kullanılan iletken kesidinin boyutları deri kalınlığından belirgin olarak

büyükse, iletken tarafından taşınan akimin büyük bir kısmı yüzeyde, Sekil 4.4c'de gösterildiği gibi yaklaşık bir deri kalınlığında, bağlı olarak ince bir tabakayla sınırlanacaktır. Bunun sonucu olarak akim akışı için olan etkin kesit alanı, iletkenin geometrik kesidiyle kıyaslandığında küçük olduğundan, iletkenin etkin direnci d.a direncinden çok daha büyük olacaktır. Bu durumda sargılara d.a uygulanması durumuna göre daha büyük bir sargı kaybı olacağını göstermektedir.



Sekil 4.4. Yalıtılmış bakir iletken taşıyıcıda akim, girdap akim kayıpları ve deri olayı etkisinin sonuçları

Bu probleme çözüm boyut olarak deri kalınlığında kesidi olan iletkenler kullanılmaktadır. d yuvarlak bir iletkenin çapı veya dikdörtgen bir iletkenin kalınlığı ise hesaplamalar, $d \leq 2\delta$ durumunda deri etkisi sonuçlarının ihmal edilebileceğini göstermiştir. Üzerinde durulması gereken bu noktalar yüksek frekanslı uygulamalar için özel iletken düzenlemelerinin gelişmesine yol açmıştır.

4.5. Transformatorlerde Kaçak Kayıplar

Transformatorlerdeki yük kaybı sarımların ohm direnci ve kaçak manyetik alan kayıplarından kaynaklanan kayıplar nedeniyle oluşur. Bu kaçak kayıpları yüklü ve yüksüz sarımlarda, sıkıştırma levhalarında ve transformator tanklarında görülür ve kaçak manyetik alan ve bobin iletkenlerini saran manyetik alana bağlıdır [18]. Transformatorlerdeki toplam kaçak kaybı genellikle şu elemanlardan oluşur:

- (a) Sarımlardaki kaçak manyetik alandan kaynaklanan transformatör tankındaki kaçak kayıp.
- (b) Tanktaki bobin iletkenlerinden kaynaklanan kaçak kayıp.
- (c) Sarımlardaki kaçak manyetik alandan kaynaklanan sıkıştırma çatısındaki kaçak kayıp.
- (d) Sıkıştırma levhasındaki bobin iletkenlerinden kaynaklanan kaçak kayıp.
- (e) Yüklü sarımlardaki kaçak kayıp.
- (f) Yüksüz sarımlardaki kaçak kayıp.

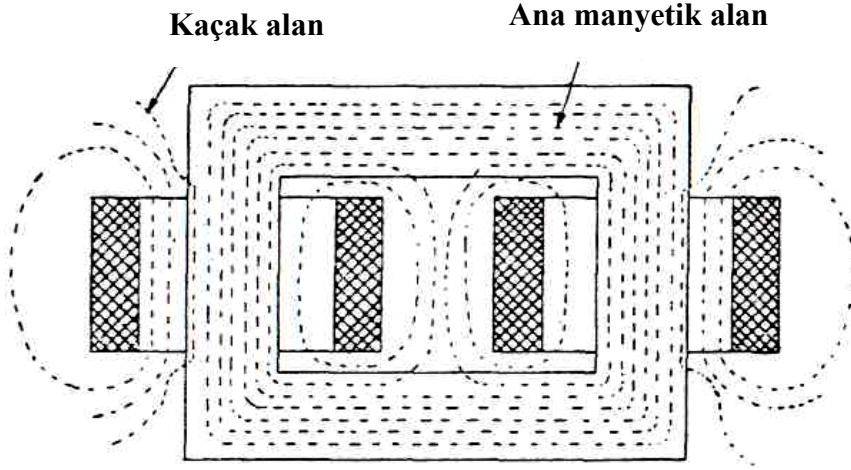
4.6. Kaçak Manyetik Akılar

Bir transformatörün primerine alternatif bir gerilim uygulandığında, bu sargıdan geçen akımın oluşturduğu manyetik akının tamamı ikinci devre iletkenlerini kesmez. Akımın küçük bir kısmı devresini havadan tamamlar. Devresini havadan tamamlayan bu akıların tamamına “ Kaçak akılar ”denir. Kaçak akı ne kadar çok olursa faydalı akı o kadar azalır. Bunun sonucunda ikinci devrede siper başına endüklenen gerilim birinci devrede endüklenen gerilimden çok daha az olur. Bunun sonucunda sekonderde emk azalır. Boş çalıtma durumunda kaçak akı faydalı akımın % 5’i kadardır [11]

Kaçak manyetik alanın bir kısmı tüm transformatör çeşitlerinde daima bulunur. Toplam kaçak manyetik alanı transformatörün MVA değerinin kareköküne yakın bir miktarda artar. Dolayısıyla, artan transformatör kapasitesi daha büyük değerdeki kaçak manyetik alan ile sonuçlanır ve kaçak kaybı artışına neden olur. bu kaçak manyetik alan bazen bölgesel aşırı ısınmalara neden olabilir. Kaçak manyetik alan alan çizgilerinin izlediği yolların kontrolüyle, kaçak kayıpları bir ölçüde azaltılabilir ve böylece bölgesel ısınmaların azaltılması sağlanabilir.

İdeal koşullarda tüm manyetik alan kuvvet hatları (çizgileri) primer sarım ve sekonder sarım ile bağlantılı olduğu kabul edilir. Fakat, pratikte bu durumu gerçekleştirmek manyetik alan kuvvet hatları sınırlandırılmadığı için imkansızdır. Sarımlardan biri veya diğerine ama ikisine birden bağlı olmayan kaçak manyetik alan

çizgileri denilen küçük bir miktar manyetik akım varken, manyetik akımın büyük bir kısmı (örneğin iki taraflı manyetik akım) çekirdekten akmaktadır Şekil 4.8.



Şekil 4.5. Kaçak manyetik alan

Kaçak manyetik akım nedeniyle hem primer hem de sekonder sarımları kaçak reaktansa sahiptir. Yani her biri ana manyetik akımdan kaynaklanan küçük miktardaki emk'ya eşit büyüklükteki kendi kendine endüklenmiş olan emk'nın yerine olacaktır. Dolayısıyla, primere uygulanan son gerilim v_1 , primer kaçak emk'sını dengelemek için $I_1 X_1$ (X_1 , primerin kaçak reaktansıdır) bileşeni olmak zorundadır. Benzer şekilde, sekonderde, $I_2 X_2$ (X_2 , sekonderin kaçak reaktansıdır) kendi kendine indüklenmiş olan emk oluşur. Şekil 2.9'deki primer ve sekonder bobinleri ayrı kollarda ve istisnai büyük bir kaçığa neden olacak şekilde bir düzenlemeyle gösterilmiştir.

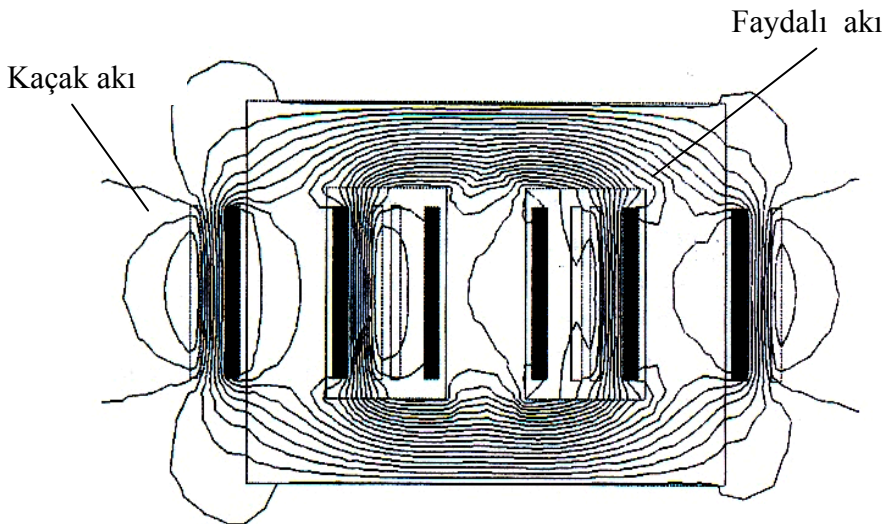
Eğer sarımlar aynı alana sahip olacak şekilde yapabilselerdi, primer ve sekonderdeki kaçak ortadan kaldırılabilirdi. Bu elbette fiziksel olarak imkansız, fakat; eğer primer ve sekonder bobinleri merkezleri ortak olacak şekilde yerleştirilirse, buna yakın bir sonuç elde edilebilir. Böyle bir düzenleme kaçak reaktansta gözle görülür bir azalmaya neden olur. Diğer taraftan, primer ve sekonder ayrı ve birbirinden hayli uzakta tutulursa da kaçak manyetik akım için fazlasıyla yer olacak ve kaçak reaktans daha büyük olacaktır [13].

Kaçak akıyı azaltıcı önlemler:

- 1- Primer ve sekonder sargılarının uygun bir şekilde sarılmış olmaları.
- 2- Nüve için kullanılan saçların manyetik gerginliğe ve havaya göre çok yüksek olması.
- 3- Transformatör primer ve sekonder sargılarının üst üste ve aynı ayağa sarılması kaçak akıyı azaltır.

Primer ve sekonder sargılardan geçen akımların oluşturdukları kaçak akılar, faydalı akıyı azalttıklarından, primer ve sekonder iç gerilimlerinin düşmelerine neden olmaktadır. Bunun sonucunda sekonder çıkışında gerilim azalması görülür. kaçak akıların oluşturdukları gerilim düşümleri tam indüktif özellikte olup, akımdan 90^0 ileridedir. Kaçak akıları transformatör devresine seri bağlanmış reaktanslar şeklinde gösterebiliriz. Bu reaktanslar primer ve sekonder için ayrı ayrı gösterilir ve “*Kaçak Akı Reaktansı*” adını alırlar. Bazı özel transformatörlerde kaçak akılar istenir.

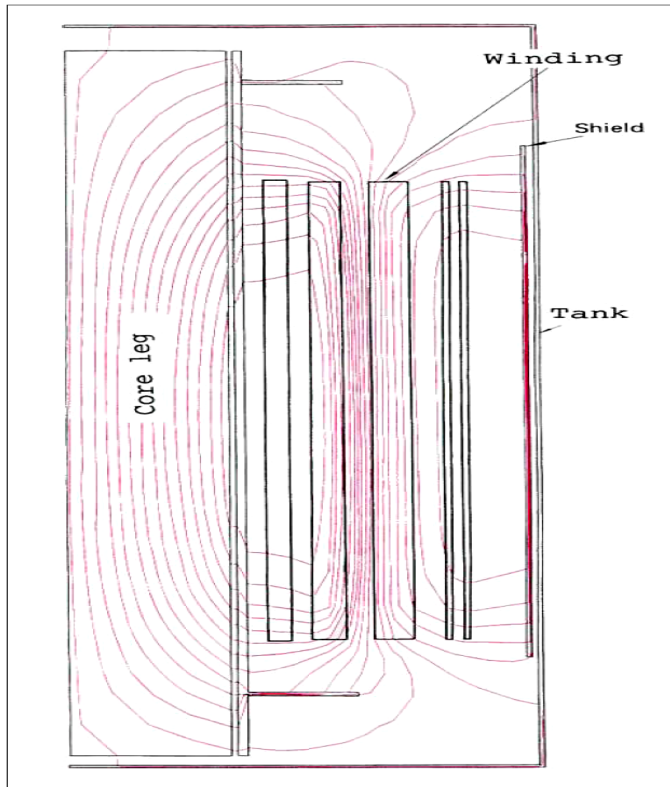
Şekil 4.6’da simule edilmiş üç fazlı bir transformatörde meydana gelen (Faydalı ve kaçak) manyetik akıyı göstermektedir.



Şekil 4.6. Simule edilmiş kısa devre testinin nihai manyetik alan çözümünün gerçek kısmı

4.6.1. Kaçak manyetik alanın hesaplanması

Kaçak manyetik alan sarım (bobin) yoluyla akım taşınırken ortaya çıkar ve sarımları saran alan sonucunda oluşur. Oluşan kaçak manyetik alan YG ve AG sarımları arasındaki boşlukta taşınır. Boşluktaki kaçak alanı sarımlar boyunca hemen hemen sabittir, fakat sarımların uçlarındaki manyetik alan saçakları yer alır. Kaçak manyetik alanın izlediği çeşitli yollar Şekil 4.7’de gösterilmiştir.



Şekil 4.7. Kaçak manyetik alanın başlıca izlediği yol

Manyetik alanın sarım eksenine paralel olan bileşeni aksenal manyetik alan, sarım eksenine dik olan bileşenise radyal manyetik alan olarak geçer. Değişik bölgelerdeki aksenal ve radyal manyetik alan yoğunlukları görüntü metodu, Roth metodu, Robins metodu gibi çeşitli metotlarla hesaplanabilir.

4.6.2. Metalik kısımlardaki kaçak alan kaynaklı kayıplar

Şekil 4.7’de de görüldüğü gibi kaçak manyetik alanı, tank duvarları, çekirdek sıkıştırma levhaları, vb. çeşitli metalik kısımları buralarda girdap alan kayıplarına neden olarak kesmektedir. Bu girdap alan kayıpları ve yüksek gerilim bölgesindeki kayıplar aşırı bölgesel ısınmalara neden olabilir. Bu kayıpların ve aşırı ısınmanın gözlemlendiği bölgeler şunlardır; sarımların uçlarına yakın kısımlardaki tank duvarları, sarım uçlarındaki çekirdek sıkıştırma levhaları, çekirdek dış kenarları üzerindeki sıkıştırma levhaları, vs. Çekirdeğe geri dönen kaçak manyetik alan önemli kayıplara ya da sıcaklık artışına neden olmaz. Fakat, manyetik alanın levha kaplamasını dik olarak kestiği çekirdeğin düz yüzeyini etkileyerek bölgesel sıcaklık artışlarına neden olabilir.

Sarımlardan ortaya çıkan kaçak alandan doğan kayıplar, manyetik alan miktarı ve yoğunluğuna, metalik malzemelerin geçirgenliğine ve direncine bağlıdır. Düşük dirence sahip malzemeler daha yüksek girdap alanlara ve daha büyük kayıplara neden olacaktır. Kayıplar, manyetik alanın artan mesafesi, miktarı ve yoğunluğu azaltıldıkça, aynı zamanda metalik kısımların kaçak manyetik alan kaynağından uzaklığına da bağlıdır.

4.6.3. Bobin sarımındaki kaçak kayıplar

Kaçak kayıpların büyük bir kısmı sarımlarda gerçekleşir. Bu da girdap alan dolaşım akım kaybından oluşur. Girdap akım kaybı, sarım iletkeninin bulunduğu yerdeki manyetik alan alanının karesi ile, manyetik alan yönüne dik olan iletkenin kalınlığının dördüncü kuvveti ile ve sarımdaki radyal iletkenin toplamının karesi ile orantılıdır.

Büyük transformatörlerde bobindeki bir sarım çok sayıda iletken içerir. Bu tarz düzeneklerde düzensiz gerilimler, radyal yöndeki değişen kaçak alan ve her bir iletkenin uzunluğundaki değişim nedeniyle farklı iletkenlerde endüklenir. Paralel tellerdeki (iletkenler) eşit olmayan gerilimler dolaşım alanlarına yola açarlar. Sarımın

birkaç telindeki dolaşan alandan kaynaklanan kayıp toplam kaybı çok fazla etkilemeyebilir, fakat hala tellerde aşırı ısınmaya neden olabilir.

Girdap ve dolaşım akım kayıpları yüklü devreye bağlı olmayan ama kaçak alanda bulunan boş sarımlarda gerçekleşebilir.

4.6.4. Alan geçen tellerden (sarımlardan) kaynaklanan kaçak kayıplar

Üzerinden alan geçen bobin iletkenleri, iletkenlerin etrafındaki manyetik alanı endükler. Eğer manyetik alan güçlüyse ve metalik kısımların yakın çevresinde ise girdap alanlar ve kayıplar oluşturur. Yoğun alan bölgesel sıcak noktalara neden olabilir. Ortaya çıkan kayıplar çok önemli olmasa da, sıcak noktalar yağın buharlaşmasına ya da yalıtımın bozulmasına neden olabilir. Tellerdeki alanın etkisi alanın büyüklüğüne, bobin iletkenlerinin metalik kısımlardan uzaklığına ve malzemenin direncine bağlıdır.

4.6.5. Çekirdek klemplerinde ve saplamalarda, dağılan kaçak akılardan dolayı oluşan girdap akım kayıpları

Bu kaybın önceden tayini çok zordur. Bu kayıp iletkenlerdeki girdap kayıplarında olduğu gibi tecrübelerle dayanarak belirtilir. Çekirdek saç eğirlerinden hesaplanan manyetik devre kayıplarına belirli bir yüzde (%) ilavesi ile hesaplara katılır. Bu kayıpları minimumda tutabilmek için klempe (Boyunduruk) tasarımına çok dikkat edilmesi gerekir veya iletken olmayan malzeme kullanılır.

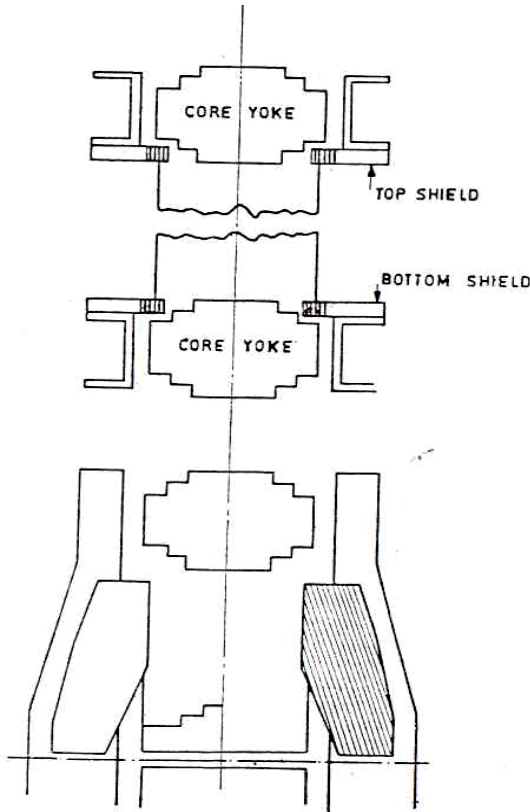
4.6.6. Tanka dağılan kaçak manyetik akı kaybı

Bu kayıp tankı kesen kaçak akı dağılımından meydana gelir. Yükleme şartlarında, özellikle sekonder akımı büyükse, oldukça yüksek oranlara çıkabilir. Sekonder çıkışlarda yapılacak uygun tasarım bu kaybı azaltacaktır. Büyük akım taşıyan buşingler (izolatörler), kapak veya tankın yan yüzlerinde aynı etkiyi yaratırlar ve bu

kayıpları artırır. İzolatör flanşları civarında amanyetik malzeme kullanılarak kaçak akı kayıplarını uygun oranlar içinde tutulabilir[14].

4.7. Kaçak Kayıp Kontrolü

Minimum kaçak kaybı tasarımı, sistematik bir şekilde kaçan manyetik alan kaynağını ve izlediği yolu analiz ederek yapılabilir. Transformatörlerde daima bir ana kaçak alan vardır ve bundan kaynaklanan kayıplar aşağıda verilen çeşitli metotlarla azaltılabilir:



Şekil 4.8. Manyetik çatal kalkanları

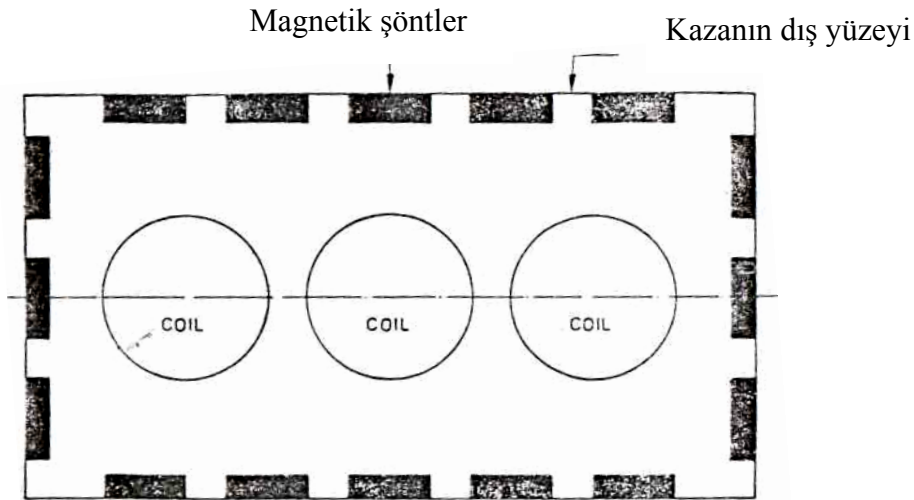
3.7.1. Manyetik çatal kalkanları (yoke shield)

Çekirdek levha kaplamadan yapılan manyetik kalkanlar Şekil 4.8.'de gösterildiği gibi çatallar (yoke) altında kullanılır. Eksenel kaçak manyetik alanın büyük bir kısmı

kalkanlar içinde geri beslenir. Kalkan sıkıştırma ünitesi korunur ve tank tarafındaki radyal manyetik alanın azaltılması sağlanır. Manyetik şöntler üç-fazlı, beş kenarlı ve tek-fazlı üç kenarlı transformatörler için uygun şekilde kullanılır. Üç-fazlı ve üç kenarlı transformatörlerde manyetik alanın dış kenarlardan toplanması ve kalkanlara geri beslemesi zordur ve özel transfer tekniğine ihtiyaç vardır. Kaçak kaybın azaltılması büyük transformatörlerde önemlidir.

4.7.2. Manyetik şöntler

Çekirdek levha kaplama paketlerinden manyetik şöntler kaçak manyetik alanını absorbe etmek için tank içerisine sabitlenmiştir. Levha kaplama paketlerinin kalınlığı kullanılan manyetik alanın yoğunluğuna göre karar verilir. Manyetik şöntlerin tipik düzenlemesi Şekil 4.9’de gösterilmektedir. Kaçak kaybın azaltılması büyük transformatörlerde önemlidir.



Şekil 4.9. Üç-fazlı transformatörlerde manyetik şöntlerin sabitlenmesi

4.7.3. Elektromanyetik ekranlar

Alüminyum ve bakır gibi iletkenliği yüksek maddeler tank duvarlarının üzerindeki ekranlar olarak kullanılırlar. Kaçak manyetik alanı, orjinal alanı yok edip tank duvarlarının kaçak manyetik alandan kurtaran bu ekranlarda girdap akımları

endükler. Ekranlar kritik bir mesafenin ötesinde etkilidir ve ekranların kritik mesafe içerisinde yerleştirilmesi kayıp artışları ile sonuçlanabilir.

4.7.4. Sıkıştırma levhaları ve çekirdek paketlerdeki kayıplar

Çekirdek kenar sıkıştırma levhaları kaçak alanı bölgesine çok yakındır ve sarım uçlarında yoğun radyal (ışınsal) alana maruz kalmaktadır. Bu durum, sıkıştırma levhalarının uçlarında girdap kayıplara neden olur ve bölgesel sıcak noktalar oluşturulabilir. Kaçak kaybı ve ısınma, sarım bobin iletkenleri içerisindeki yüksek alan nedeniyle daha fazla bir artışa neden olur. Çekirdek üzerindeki levha kaplamanın dış paketi de ayrıca benzer koşullara maruz kalmaktadır. Paslanmaz çelik gibi manyetik olmayan malzemedeki yapılan sıkıştırma levhaları kullanarak sıcaklık artışı ve kayıpların kontrolü gerçekleştirilebilir. Girdap kayıplarında ve sıcaklık artışındaki büyük ölçüde azalma sıkıştırma levhası üzerine delikler açılarak sağlanabilir.

İnce levha kaplama yığınlarından yapılan ve yanlamasına yerleştirilen sıkıştırma levhaları büyük transformatörler için ideal olanıdır. Çekirdeğin dış paketleri de bazen büyük boy transformatörlerde çekirdek levhalar üzerindeki sıcaklık artışını azaltmak için bir kez daha bölünür.

4.7.5. Sarımlardaki kayıplar

İletkenlerin radyal olarak bir kez daha bölünmesi eksensel kaçak alandan dolayı girdap akım kaybını azaltır. Benzer şekilde, iletkenlerin eksensel olarak bölünmesi kaçak alanın radyal bileşeninden dolayı girdap akım kaybını azaltır. Kaçak alan çizgilerinin radyal bileşenini azaltmak için azalan kaçak manyetik alan radyal bileşeninden kaynaklanan alan kaybını sırayla YG ve AG sarımlarının amper-sarımı mükemmel bir şekilde dengelemesi gerekir. Burada bir şeyi daha vurgulamak gerekir ki, amper-sarımlarındaki büyük dengesizlik çok yüksek kaçak kayıplarına neden olabilir. Bir sarımın paralel telleri (iletkenler) arasındaki dolaşan alanı yok etmek için, çaprazlama gerekmektedir. Bu durum bir sarımın bobin iletkenlerinin

konumuna yol açar, öyle ki, manyetik alan bağlantısı aynı, dolayısıyla her bir teldeki indüklenmiş emk'nın eşitlenmesine neden olur.

Yüksek akıma sahip sarımlarda çaprazlanabilir kabloların kullanımı kaçak kayıplarında önemli ölçüde azalmayı sağlar. İki ya da üç paralel iletken gerektiren orta alanlı yüksek gerilme sahip sarımlarda, yığın halindeki iletkenler sarım alanını iyileştirmek ve iletkenlerin bir kez daha bölünmesini sağlamak için kullanılabilir.

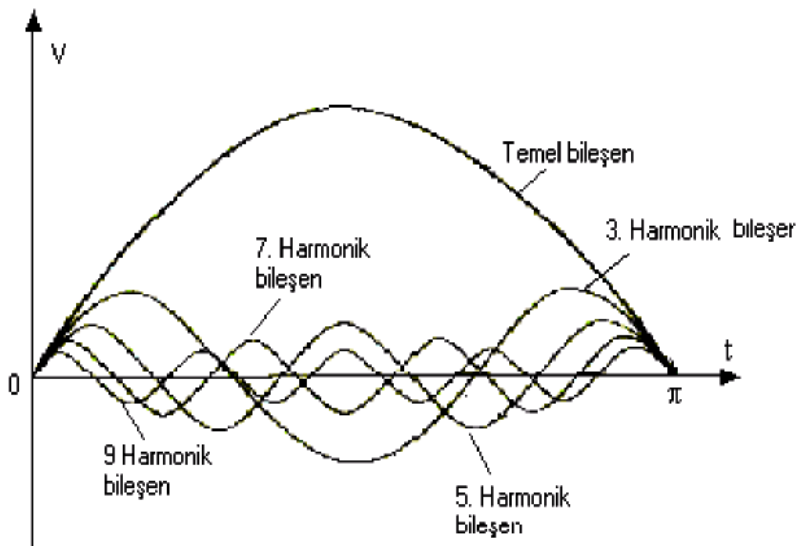
4.7.6. Bobin iletkenlerinden kaynaklanan kayıplar

Yüksek akım geçen iletkenlerden kaynaklanan kayıplar iletkenlerin metalik yapılarına uygun şekilde uzaklaştırılmasıyla azaltılabilir. Bobin iletkenlerinin manyetik alan etkileri zıt yöndeki alan taşıyan bobin iletkenlerini birlikte konularak yok edilebilir (git-gel düzenlemesi).

Üç fazlı bağlamada, üç fazın tamamının bobin iletkenleri birlikte gruplandırılabilir, böylece alanın net vektörel etkisi minimum olur. Bobin iletkenlerinden kaynaklanan kayıplar yakın yüzeylerin alüminyum gibi manyetik olmayan maddelerle kaplanması ile azaltılabilir. Yüksek akımlı yatak montajı levhası yüksek girdap akım kaybına sahiptir. Bu girdap akım yolunu kesmek için manyetik olmayan yalıtkanlar koyarak ya da yatakların üzerine alüminyum ya da paslanmaz çelik gibi manyetik olmayan malzemedan yapılan levhalar kullanılarak azaltılabilir.

5. HARMONİKLERİN TRANSFORMATÖR KAYIPLARI ÜZERİNDE ETKİSİ

Bilindiği gibi elektrik enerjisi üç aşamadan geçerek alıcılara ya da yüklerle ulaşmaktadır. Elektrik enerjisinin üretimi, iletimi ve dağıtım aşamalarında akım ve gerilim büyüklüklerinin sinüsoidal biçimli olması gereklidir. Fakat bu her zaman gerçekleşmeyebilir. Çeşitli nonlinear yükler nedeniyle sistemde çeşitli frekansta sinüsoidal dalgalar görülebilir.



Şekil 5.1. Yarı periyotta harmonik bileşenleri

Şekil 5.1'de yarı periyotta harmoniklerin durumu gösterilmiştir. Elektrik enerji sistemlerinde manyetik ve elektrik devre lineersizlikleri, harmoniklerin ortaya çıkmasında en önemli etkenlerdir. Harmoniklerin meydana gelmesi ile de sinüzoidal dalga şeklinden uzaklaşılacak yani dalga şeklinde bir bozulma (distorsiyon) görülecektir. Akım ve gerilimde oluşan bu bozulma elektrik tesisleri ve bu tesislere bağlı güç sistemlerine zarar vermekte ve hatta bazen sistemleri çalışamaz hale getirmektedir.

Manyetik devre lineersizliği, demir çekirdekli bobin, transformator, generetör gibi elemanların doymaya giderek manyetik bakımdan lineer olmayan bir olayın meydana gelmesidir. Elektrik devre lineersizliği ise, akımı ile gerilimi arasında ilişkisi doğrusal olmayan bir elemanda arka çalışın işletme araçlarında yarı iletken elemanlar kullanılarak sinüsoidal dalğanın bazı kısımlarının kırılması sonucunda meydana gelir. Bu lineersizlikler şebekenin akım ve gerilim dalga şeklinin sinüzoidalikten uzaklaşmasına sebep olmaktadır [1].

5.1. Harmonik Tanımı

Harmonikler genel olarak devredeki elemanın özelliğine ve kaynağın durumuna göre ortaya çıkarlar. Eğer devrede nonlineer elemanlar veya nonsinüsoidal kaynaklar bulunacak olursa veya bunların her ikisinin de olması durumunda meydana gelirler. Bu şekilde çeşitli elemanlar veya olaylar sonucunda enerji sistemindeki sinüsoidal dalga biçimi bozulur. Bu bozuk dalgalar "nonsinüsoidal dalga" olarak adlandırılır. Nonsinüsoidal dalga biçimleri, periyodik olmakla birlikte sinüsoidal dalga ile frekans ve genliği farklı diğer sinüsoidal dalgaların toplamından oluşmaktadır. Temel dalga dışındaki sinüzoidal dalgalara "harmonik bileşen" adı verilir. Güç sistemindeki sinüsoidal dalğanın simetrisinden dolayı 3., 5., 7., 11,... gibi tek harmonik bileşenleri bulunur. Çift harmonikli bileşenler bulunmaz. Şekil 5.1'de bir yarı periyottaki temel bileşen ve harmonik bileşenler gösterilmiştir.

5.2. Harmoniklerin Analiz Yöntemleri

Harmoniklerin analizinde, periyodik dalğanın bir doğru bileşenini ile bir temel frekanslı saf sinüs dalgası ve frekansları farklı saf sinüs dalgalarının toplamından oluştuğu gösterilir. Böylece nonsinüsoidal dalgaların "harmonik spektrumu" elde edilmeye çalışılır.

5.2.1. Analitik yöntem

Periyodik bir nonsinüsoidal dalganın değişik genlik ve faz açılara sahip sinüsoidal dalgaların toplamı olarak yazılabileceği veya çeşitli genlik ve faz açılara sahip sinüsoidal dalgaların toplamı ile nonsinüsoidal dalganın meydana geldiği J. Fourier tarafından kanıtlanmıştır. Böyle bir fonksiyon,

$$F(t) = A_0 + A_1 \sin(2\pi f_1 t + \phi_1) + A_2 \sin(2\pi f_2 t + \phi_2) + \dots + A_n \sin(2\pi f_n t + \phi_n) \quad (5.1)$$

şeklinde ifade edilir. Burada A_0 , ORTALAMA değeri, 1 indisi ile gösterilen terim ise "Temel bileşen" olarak adlandırılır. 2., 3., 4.,...,n indisleri gösterilen bileşenlere ise "harmonik bileşen" adı verilmektedir. A_2, A_3, \dots, A_n Harmoniklerin genliklerini, f_1 temel bileşen frekansını, f_2, f_n harmonik bileşenlerin frekansını ifade etmektedir. Harmoniklerin açısal frekansları ve ϕ_1 temel bileşen faz açısının ϕ_2, \dots, ϕ_n harmonik bileşenlerin faz açılarını göstermektedir. Temel bileşen ile n. harmonik frekansı arasında,

$$f_n = n.f_1 \quad (5.2)$$

bağıntısı vardır. Eş. (5.1) gibi ifade edilen seriye "Fourier serisi", bu seri elemanlarına da "Fourier bileşenleri" adı verilir. Herhangi bir periyodik dalganın fourier serisine açılabilmesi için Dirichfet koşulları olarak bilinen koşulların sağlanması gerekir. Bu koşullar,

- a) Fonksiyonun sonlu sayıda süreksizlik noktasının bulunması
- b) Fonksiyonun ortalama değerinin bulunması
- c) Fonksiyonun sonlu sayıda negatif ve pozitif tepe değerlerinin bulunmasıdır.

Bir nonsinüsoidal dalga Eş. 5.1' deki sinüsoidal bileşenlerle ifade edildiği gibi,

$$F(t) = A_0 + A_1 \text{Sincot} + \dots + A_n \text{sinco}_n t + B_1 \text{cos cot} + \dots + B_n \text{cosco}_n t$$

şeklinde ifade edilir. Bu ifadedeki katsayılar şu şekilde bulunur.

$$\left. \begin{aligned} A_0 &= \frac{1}{2\pi} \int_0^{2\pi} f(\omega t) d\omega t \\ A_n &= \frac{1}{\pi} \int_0^{2\pi} f(\omega t) \sin(n\omega t) d\omega t \\ B_n &= \frac{1}{\pi} \int_0^{2\pi} f(\omega t) \cos(n\omega t) d\omega t \end{aligned} \right\} \quad (5.3)$$

Nonsinüsoidal dalganın özelliğine göre bu katsayılardan bazıları bulunacak bazıları ise sıfır olacaktır. Çizelge 5.1' de bu durum özetlenmiş bulunmaktadır.

Çizelge 5.1. Çeşitli simetri durumlarında Fourier katsayıları

Fonksiyonun özelliği	Matematiksel ifadesi	Fourier katsayıları
Çift fonksiyon	$f(-t) = f(t)$	$B_n = \frac{1}{\pi} \int_0^{2\pi} f(t) \cos(n\omega t) d\omega t$ $A_n = 0$
Tek fonksiyon	$f(-t) = -f(t)$	$B_n = 0$ $A_n = \frac{1}{\pi} \int_0^{2\pi} f(t) \sin(n\omega t) d\omega t$
Yarım dalga Simetrisi	$f(t) = -f(t+T/2)$	$A_n = B_n = 0$ (n'nin çift değerlerinde.) $B_n = \frac{1}{\pi} \int_0^{2\pi} f(t) \cos n\omega t d(\omega t)$ (n'nin çift değ.) $B_n = \frac{1}{\pi} \int_0^{2\pi} f(t) \sin n\omega t d(\omega t)$ (n'nin tek değ..)

5.2.2. Grafik yöntem

Fonksiyonun matematiksel olarak ifade edilmediği durumlarda kullanılır. Nonsinüsoidal dalgalar için osiloskoptan alınan veya deney yoluyla elde edilen dalga formu bir periyot için s eşit parçaya bölünür. Formüller yardımı ile fourier katsayıları hesaplanır.

$$A_0 = \frac{2}{s} \sum_{k=1}^{\infty} f_k \quad (5.4)$$

$$A_n = \frac{2}{s} \sum_{k=1}^{\infty} f_k \text{Sink} \frac{2\pi.k}{s} \quad (5.5)$$

$$B_n = \frac{2}{s} \sum_{k=1}^{\infty} f_k \text{Cosk} \frac{2\pi.k}{s} \quad (5.6)$$

Bu eşitliklerdeki, f_k değeri fonsiyonun her k değerine karşılık elde edilen değeridir. s ne kadar büyük olursa hesaptaki doğruluk o oranda artacaktır.

5.2.3. Hızlı fourier dönüşümü (FFT)

Bilgisayar desteği ile yapılan Fourier analizidir. Pratikte hızlı Fourier transformu çözümü için matematiğe dayalı algoritmalar kullanılır. Bu algoritmalarda sıra önemlidir. Yapılan işlemlere "Kelebek" adı verilir. Özel entegre devrelere bu işlemler uygulanır. z transformundan, Nyquist frekansından ve pencere (window) fonksiyonlarından yararlanılarak örnekleme ve dönüşümler yapılır. Son yıllarda hızlı fourier dönüşümüne konularında paket programlar geliştirilmiştir [1].

5.2.4. Ölçme yöntemi

Bu konuda üretilmiş olan ölçme aletleri ile bir akım ya da gerilime ait harmonik bileşenler direkt olarak tespit edilir. "Harmonik Analizatörü" olarak adlandırılan bu cihazlar ölçme kapasitelerine bağlı olarak yüksek dereceli (örneğin 40 harmonikli) harmonik bileşenleri belirleyebilmektedir.

5.3. Transformatörlerde Harmonik Oluşumu

Güç sistemlerindeki en önemli eleman olan transformatörler, demir çekirdeği bulunan bobinden oluştuğu için harmoniklere yol açmaktadır[23]. Demir çekirdeğinin mıknatıslama karakteristiği lineer olmadığından transformatör doyuma gitmekte ve harmonikler üretmektedir.

Transformatorler sinüsoidal gerilimle çalışma altında lineer mıknatıslama karakteristiği bölgesinde sinüzoidal çıkış büyüklüğü verecek şekilde tasarlanırlar. Transformatörlerin nominal değerlerinin dışında çalışması nüvede daha çok doymaya ve harmonik akımları seviyesinde hızla artmaya sebep olabilir [1]. Mıknatıslama akımı harmonikleri günün erken saatlerinde en yüksek seviyeye ulaşır.

Çünkü sistem yükü az olup, gerilim yükselerek aşırı uyarma meydana gelir, aşırı uyarımayla oluşan akım harmoniklerinde 3., 5. ve 7. harmonikler etkili olur. Akım şiddeti bakımından en önemli harmonik 3. harmoniktir. 3 ve 3' ün katı harmonikler arasında 360 derecenin tam katları kadar faz farkı olduğundan hepsi aynı fazdadır.

Harmonik akımları transformatörün primer reaktansı, hattın reaktansı ve generatörün kaçak reaktansı üzerinden geçerek harmonik gerilim düşümü meydana getirir. Bununla beraber mıknatıslama akımlarının şebekeye geçip geçmemesi transformatörün bağlantı grubu, primerin yıldız bağlı olması halinde yıldız noktasının şebekenin nötrüne bağlı olup olmaması ve transformatördeki manyetik devrenin geometrik yapısına bağlı olarak değişmektedir.

Akım devresinde akan yüksek harmoniklerden dolayı ilave joule (I^2R) kayıpları oluşur. Çekirdek demir kayıpları artar. Transformatörün endüktansı ile transformatöre bağlı tüketicilerin kapasitesi arasında rezonans oluşmasına sebep olur. Bu etkiler istenmeyen etkilerdir.

Üç fazlı transformatörlerde mıknatıslanma akımı transformatörün bağlama şekline ve magnetik devresinin yapısına bağlı olarak değişir. Üç ve üçün katı harmonikler çeşitli bağlantı grupları ile yok edilebilirler. 5., ve 7., harmoniklerin etkileri soğukta haddelenmiş ve kristalleri yönlendirilmiş saclar kullanılarak azaltılabilir.

Transformatörlerde mıknatıslanma akımının 3 ve 3' ün katı harmoniklerin şebekede bulunmasını önlemek için primer yıldız bağlı transformatörlerin yıldız noktası, şebekenin nötr hattına bağlanmaz veya sargıların biri üçgen bağlanır veya büyük güçlü transformatörlerde olduğu gibi üçgen bağlı tersiyer sargı kullanılır.

Transformatörlerde kristalleri magnetik yönlendirilmiş saçlar kullanarak harmoniklerin etkileri azatalabilir. 1700 Gauss'ta kristalleri magnetik yonlendirilmiş saclardan oluşan transformatör çekirdeklerinde muhtelif harmoniklerin etkin değeri ile toplam mıknatıslanma akımının etkin değeri arasındaki oranlar çizelge 5.2' de verilmiştir [5].

Çizelge 5.2. Mıknatıslanma akımının oranı

Harmonik bileşenler n	1	3	5	7	9
$I_{\mu n} / I_{\mu}$	0.86	0.40	0.23	0.12	0.07

Mıknatıslanma akımlarının harmoniklerinin tepe değerleri, temel mıknatıslanma akımının tepe değerinden oldukça küçüktür. Transformatörlerin mıknatıslanma akımları nominal akımlarının %0.5 ile %2 'i kadardır. Buna rağmen seri bağlı generatör, hat ve transformatör reaktansları frekansla orantılı arttıklarından, özellikle düşük yüklerde yüksek harmonik akımlarının bunlar üzerinde sebep oldukları reaktif gerilim düşümleri büyük değerler alır. Mıknatıslanma akımlarının şebekeye geçişleri aşağıdaki faktörlere bağlıdır [5].

- a) Transformatör sargılarının bağlantı şekline (bağlama grubu)
- b) Primlerdeki yıldız bağlı sargılarda, yıldız noktasının şebekenin nötr hattına bağlanıp bağlanmamasına.
- c) Transformatörlerde mıknatıslanmanın serbest veya zorunlu olmasına.

Buna rağmen şebekeden 5. ve 7. harmonikler geçmeye devam eder. Bu tür harmonikler rezonansa sebep olabilir. Bunu önlemek için transformatörlerde konstrüktif tedbirlere başvurulabilir.

Şebekedeki mıknatıslanma akımını düşürmek için en uygun tedbir magnetik endüksiyonu düşük tutmaktır. Transformatörlerde soğukta haddelenmiş ve kristalleri yönlendirilmiş sac kullanmakla bu sonuca ulaşılmaktadır. Bu tür sacları kullanmakla harmonikler değerlerinin 1/5' ne kadar düşmektedirler. Böylece harmoniklerin tehlikesi büyük çapta önlenmiş olur.

Çizelge 5.3'de sıcakta haddelenmiş yüksek alaşımli saclardan imal edilmiş bir transformatörde mıknatıslanma akımının harmoniklerinin temel harmoniğe oranları gösterilmiştir.

Çizelge 5.3. Sıcakta haddelenmiş sacların özellikleri

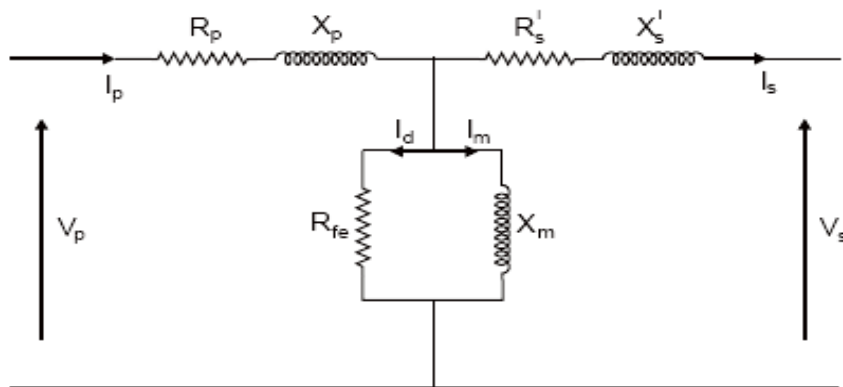
Çekirdek endüksiyonu (Gaus)	I_3/I_1	I_5/I_1	I_7/I_1	I_9/I_1
10000	-0.162	0.05	0.011	0.009
12000	-0.287	0.095	-0.013	0.01
14000	-0.528	0.267	-0.013	0.062
16000	-0.658	0.331	-0.121	0.031
18000	-0.658	0.275	-0.053	-0.018

5.4. Harmoniklerin Transformatör Üzerindeki Etkileri

Transformatörlerde meydana gelen akım ve gerilim harmoniklerinin neden olduğu problemler şöyle sıralanabilir, Akım harmonikleri; sargı bakır kayıplarında (I^2R) ve kaçak akı kayıplarında artışa, çekirdek kaybının artmasına neden olur. Gerilim harmonikleri ise fuko histerezis akımlarından dolayı demir kayıplarında artışa ve yalıtımın zorlanmasına neden olur [23].

Transformatör endüktansı ve transformatörlere bağlı bir tüketicinin kapasitansı arasında rezonans meydana gelebilir. Akım ve gerilim harmonikleri transformatörlerde ek ısınmalar oluşturur. Harmonik akım ve gerilimlerinin oluşturduğu transformatör kayıpları frekansa bağlıdır. Manyetik çekirdekteki alternatif manyetik alanın yön değiştirmesi, yüksek frekanslarda daha hızlı olduğundan manyetik çekirdekteki histerezis kayıpları artar. Ayrıca zamanla değişen manyetik akı, iletkenleri kestikçe değişken manyetik alan çekirdek dilimlerinde eddy ve fuko akımları oluşturur. Buda ek kayıplara neden olur. Yani frekans arttıkça transformatör kayıpları artar. Bu yüzden transformatörün ısınmasında yüksek frekanslı harmonikli bileşenler, düşük frekanslı harmonikli bileşenlerden daha önemlidir.

Transformatörün bir faz sargısına ait eşdeğer devre Şekil 5.2' de verilmiştir.



Şekil 5.2. Tek faz Transformatörün Eşdeğer Devresi

Burada;

R_p : Primer sargısı iç direnci (Ω),

X_p : Primer sargısı endüktif reaktansı (Ω),

R_s : Primere indirgenmiş sekonder sargısı iç direnci (Ω),'

X_s : Primere indirgenmiş sekonder sargısı endüktif reaktansı (Ω),

R_{fe} : Demir nüve kayıp direnci (Ω),

X_m : Mıknatıslanma reaktansı (Ω),

I_p : Primer devre akımı (A),

I_s : Sekonder devre akımı (A),

I_d : Nüve kayıp akımı (A),

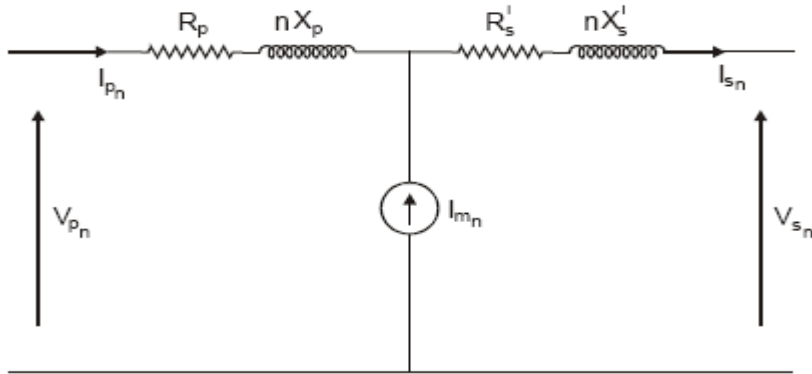
I_m : Mıknatıslanma akımı (A),

V_p : Primer devre gerilimi (V),

V_s : Sekonder devre gerilimidir (V).

Transformatörlerin harmonik bağımlı modellenmesinde, demir nüve kayıp direncinin (R_{fe}) oluşturduğu nüve kayıp akımı (I_d) mıknatıslanma akımı (I_m) yanında çok küçük olması nedeniyle ihmal edilebilir. Transformatör mıknatıslanma eğrisinin nonlineerliği nedeniyle harmonikli bir gerilimle çalışan transformatörde doyma meydana gelir [23].

Bu durumda mıknatıslanma reaktansı (X_m) nonlineer bir eleman olarak davranır ve harmoniklere sebep olur. Bu sebepten dolayı, harmonik üreten bir elamanın modellendiğinde mıknatıslanma reaktansı da (X_m) sabit bir akım kaynağı ile modellenir. Ayrıca harmoniklerin direnç üzerinde deri etkisinden dolayı bir etkisi vardır. Ancak bu etkinin çok çok küçük olmasından dolayı ihmal edilebileceğinden daha sonra bahsedeceğiz, bu sebepten transformatör eşdeğer devresindeki direnç elemanlarına harmoniklerin etkisi yok sayılmıştır. Transformatör eşdeğer devresindeki endüktif reaktanslarda oluşan harmonik etkisi yukarıda anlatıldığı gibi transformatör eşdeğer devresine uygulandığında transformatörün harmonik bağımlı devresi Şekil 5.3' teki gibi olmaktadır.



Şekil 5.3. Transformatörün Harmonik Bağımlı devresi

Burada;

n : Harmonik mertebesi,

V_{pn} : n 'inci harmonik mertebesindeki primer gerilimi (V),

I_{pn} : n 'inci harmonik mertebesindeki primer akımı (A),

I_{mn} : n 'inci harmonik mertebesindeki mıknatıslanma akımıdır (A).

V_{sn} : n 'inci harmonik mertebesindeki sekonder gerilimi (V),

I_{sn} : n 'inci harmonik mertebesindeki sekonder akımıdır (A).

5.5. Harmoniklerin Kayıplar Üzerinde Etkileri

5.5.1. Boştaki kayıpların üzerindeki etkisi

Demir kayıpları üzerinde etkisi

Demir çekirdeğinin mıknatıslama karakteristiği lineer olmadığından, transformatör doyuma gitmekte ve harmonikler üretmektedir. Mıknatıslanma akımında oluşan harmoniklerden dolayı eddy akım kayıplarının üzerindeki etkisini Eş. 5.6' dan hesaplayabiliriz [26],

$$P_{gh} = P_g \sum_{n=1}^{n=n_{\max}} I_n^2 n^2 \quad (5.6)$$

Burada,

P_{gh} : eddy akımın toplam değeri, ($P_g + P_h$)

P_g : eddy akımın kaybının nominal frekanstaki değeri

n : harmonik mertebesi

I_n : harmonik akımın RMS değeri h akım harmonik değerlerinden

Çizelge 5.2 de verilmiş olan transformatör çekirdeklerinde muhtelif harmoniklerin etkin değeri ile toplam mıknatıslanma akımının etkin değeri arasındaki oranları verilmiştir ve bu değerlere göre mıknatıslanma akım üzerinde oluşan etkin harmonik değerlerini hesablıyabiliriz.

$I_0 = \sqrt{(I_d + I_{\mu})^2}$ olduğundan,

$$I_{\mu} = I_0 \sin \omega t$$

$$I_d = I_0 \cos \omega t$$

ve bu değerleri elde edilen pratik değerler yoluyla hesaplamış olursak;

$$\begin{aligned} I_{\mu} &= ((mmk / N_2) / 2) * 1,1 \\ &= (438 / 56) / 2 * 1,1 = 4.3017 \text{ A} \end{aligned}$$

$$\begin{aligned} I_d &= (P_{fe} / (V_2 / \sqrt{3}) * 3 * \sqrt{3}) * 1,1 \\ &= (323.72 / (230.940 * 3 * \sqrt{3})) * 1,1 = 0.2697 \text{ A} \end{aligned}$$

$$I_0 = \sqrt{(I_d + I_{\mu})^2} = \sqrt{(4.3017 + 0.2697)^2} = 4.57146 \text{ A}$$

Burada transformatörün boştaki akımını hesaplamış bulunuyoruz.

Mıknatıslanma akımını değerini yukarıda hesaplamış olduk ve sıra içine oluşan harmonik değerlerini bulmaya çalışacağız ve burada mıknatıslanma akım harmoniklerinin sadece etkili olan değerleri buraya yansıttık.

$$I_{\mu 1} = 3.996 \text{ A}$$

$$I_{\mu 3} = 1.9787 \text{ A}$$

$$I_{\mu 5} = 0.9893 \text{ A}$$

$$I_{\mu 7} = 0.5162 \text{ A}$$

$$I_{\mu 9} = 0.3011 \text{ A}$$

Toplam harmonik akım değeri eddy akım kaybı üzerine olan etkisi ise aşağıdaki Eş. ten elde ederiz. Burada P_g ' nin değeri 6. Bölümde hesaplanmıştır.

$$P_{gh} = P_g \sum_{n=1}^{n=n_{\max}} I_n^2 n^2$$

$$P_{gh} = 34,2079 * 1.2674 = 43.3550 \text{ W}$$

Bu hesaplama diğer iki transformatör için yapılır ve hesap sonucuna eklenmiş olur.

Demirde (nüve) diğer kayıplar ise,

$$P_{Fe} \cong C_m V^2 \tag{5.7}$$

şeklinde ifade edilebilir. Burada,

P_{Fe} : Demir kaybı (W),

C_m : Makinenin yapısına bağlı bir sabit (F),

V : Makineye uygulanan gerilimin etkin değeridir (V).

Manyetik çekirdekli bir elmana etkin değeri,

$$V = \sqrt{\sum_{n=1}^n V_n^2} \quad (5.8)$$

olan n . mertebeden gerilim harmoniğine sahip bir gerilim uygulandığında bu durumda ki demir kayıpları,

$$P_{Fe_n} \cong \sum_{n=1}^N C_{mn} V_n^2 \quad (5.9)$$

şeklini alacaktır.

Burada,

P_{Fe_n} : n . mertebeden harmonikli gerilim içeren sistemde oluşan demir kayıpları (W),

C_{mn} : n . mertebeden harmonikli gerilim içeren sistemde makinenin yapısına bağlı bir sabit (F),

V_n : n . mertebedeki harmonikli gerilimin etkin değeridir (V).

Eş.4.9' da görüldüğü gibi sistemdeki gerilim harmoniği arttıkça sistemde oluşan demir kayıpları da artmaktadır.

5.5.2. Yükteki kayıpların üzerindeki etkisi

Harmoniklerin bakır direnc üzerine etkisi

Elektrik enerji sistemlerinde kayıplar, sistem büyüklüklerinin (akım, gerilim) sinüsoidal olduğu kabul edilerek hesaplanmaktadır. Enerji sistemlerinde nonsinüsoidal akım veya gerilimin bulunması durumunda, bu kayıplar değişecektir. Omik direnci R olan bir iletkenin sinüsoidal bir akım aktığında bu iletkenin [23].

$$P_k = I^2 R \quad (5.10)$$

kadar bir bakır kaybı oluşacaktır. 3 fazlı sistemlerde bu kayıp,

$$P_k = 3I^2 R \quad (5.11)$$

değerini alır. Bu akım iletkenden etkin değeri,

$$I = \sqrt{\sum_{n=1}^n I_n^2} \quad (5.12)$$

olan n . mertebeden akım harmoniğine sahip bir akım akitildiğinde bu durumda iletkendeki bakır kayıpları,

$$P_{k_n} = 3R_n I^2 = 3 \sum_{n=1}^n R_n I_n^2 \quad (5.13)$$

şeklini alır. Harmoniklerin deri etkisinden dolayı direnç üzerinde oluşturduğu etki yok denecek kadar az olduğundan ihmal edilebileceğinden bakır kayıpları,

$$P_{k_n} = 3RI^2 = 3R \sum_{n=1}^n I_n^2 \quad (5.14)$$

şeklini alır. Burada,

P_k : Bakır kaybı (W),

P_{kn} : n . mertebeden harmonikli akımın oluşturduğu bakır kaybıdır (W).

Eş. 5.14' te görüldüğü gibi akım harmoniği attıkça bakır kayıpları da artmaktadır.

Harmoniklerin deri etkisinin üzerine etkisi

Harmoniklerin frekansının artması ile deri etkisi (skin effect) sonucu iletkenin kullanılan kesiti azalmaktadır. İletkenin DC omik direnci değerine harmoniklerden dolayı R_h direnci ilave olmaktadır. Harmonikli akıma gösterilen omik direnç değeri $R = R_{DC} + R_h$ olmaktadır. Deri etkisi ile oluşan direnç değeri literatürde yaygın olarak kabul gören ampirik bir bağıntıyla hesap edilebilir.

$$x = 1,585 \cdot 10^{-4} \sqrt{\frac{f}{R_{DC}}}$$

olmak üzere,

$$\begin{array}{ll} 0 \leq x \leq 3 & \text{için} \quad R = R_{DC} K_1 \\ x > 3 & \text{için} \quad R = R_{DC} K_2 \end{array}$$

dir. Burada

$$K_1 = \frac{1}{2} \left[\sqrt{1 + \frac{x^4}{48}} + 1 \right]$$

$$K_2 = \left[\frac{x}{2,828} + 0,26 \right]$$

dir. Burada

f : frekans (Hz),

R_{DC} : Doğru akım direnci (Ω),

R : Deri etkisi dahil direnç (Ω),

R_h : Harmoniklerden dolayı ilave olunan direnç (Ω),

x : İletkenin DC direncine ve frekansa bağımlı olarak hesaplanan sabit sayı,

K_1 : x sabit sayısına bağımlı olarak hesaplanan sabit sayı,

K_2 : x sabit sayısına bağımlı olarak hesaplanan sabit sayı, olarak tanımlanmıştır.

6. DAĞITIM TRANSFORMATÖRLERİNDE KAYIPLARININ HESAPLANMASI

Pratik ve teorik hesapların karşılaştırılması için farklı güçlerde olan üç tane örnek transformatör seçilmiştir. Bu transformatörlerin önce test yoluyla kayıpları ölçülmüştür ve sonra aynı gücte olan transformatörlerin teorik olarak hesaplanmaya çalışılmıştır. Örnek olarak ele alınan transformatörlerin güçleri 100kVA, 160kVA ve 250kVA şeklindedir.

100 kVA:

Bağlantı grubu Yzn 11 olan 100 kVA transformatörün demir, bakır kayıpları ve diğer kayıplar hesaplanmaktadır. Elde edilen sonuçlar tablo halinde verilmektedir.

a) Demir Kayıpları:

- 1- Histerezis Kayıpları,
- 2- Girdap(fuko) akım kayıpları,

Örnek transformatörün bilgileri Çizelge 6.1' de verilmiştir.

Çizelge 6.1. 100 kVA transformatör tasarım bilgileri

GÜÇ(VA)	V ₁ (V)	V ₂ (V)	N ₁	N ₂	Pri. Faz Akım (A)	Sek. Faz Akım (A)
100.000	36.000	400	4365	56	1,6038	144,338
F (Hz)	AKI(wb)	B(Tesla)	H(A/m)	UK%	Nüve Ağırlığı(kg)	Nüve hacmi(m ³)
50	0.0214	1,747	308.73	4,2295	222,0	0,028060

Histerisiz Kayıp Hesabı:

Bu kayıpları hesaplamak için Eş. 3.16' yı kullanabiliriz,

$$P_H = k_h * B_m^x * f \quad (W/kg)$$

veya,

$$P_H = k_h * B_m^x * f * G_n \quad (W)$$

K_h: histerisiz kat sayısı ve alaşımlı sac için (0.01-0.015) arasındır, **f**: manyetik akı değişme frekansı, **B_m**: maksimum akı yoğunluğu, **x**: malzemedden malzemeye göre değişen bir katsayıdır. Genelde elektrik malzemelerde 1.5- 2.5 arasındadır. Ferrit malzeme için 2 seçilir, **G_n**: nüve ağırlığıdır.

Manyetik alan yoğunluğunu hesaplamak için endüksiyon eşitliğinden yararlanabiliriz;

$$E_1 = 4.44 * \phi_m * f * N_1$$

$$36000 / \sqrt{3} = 4.44 * \phi_m * 50 * 4365$$

$$\phi_m = 0.0214 \text{ Wb}$$

$$\phi_m = B_m * A$$

$$B_m = 0.0214 / 0,012280 = 1.747 \text{ T}$$

$$P_{\text{giriş}} = \sqrt{3} I_1 * V_1 \longrightarrow I_1 = 100\,000 / \sqrt{3} \cdot 36000 = 1.603 \text{ A}$$

$$\longrightarrow I_2 = 100\,000 / \sqrt{3} \cdot 400 = 144.338 \text{ A}$$

$$P_H = k_h * (B_m)^{1.6} * f * G_n \quad (W)$$

$$P_H = 0.01 * (1.747)^{1.6} * 50 * 222,0 = 271,10 \text{ W}$$

Girdap (Fuko) Akım kayıp Hesabı:

Bu kayıpları hesaplamak için Eş. 3.25' ten yararlanabiliriz.

$$P_g = k_g * B_m^2 * f^2 * h^2 \quad (\text{W/kg})$$

$$K_g = \pi^2 / 6\rho$$

$$P_g = \left(\frac{\pi^2 f^2 B_m^2 h^2 V}{6 \rho} \right) = \frac{(3.14)^2 * (50)^2 * (1.747)^2 * (0.30)^2 * (0.028060)}{34.6296}$$

$$= 0,15409 \quad \text{W/kg}$$

$$= 0,15409 * 222 \text{ kg} = 34,2079 \text{ W}$$

Toplam demir kaybı (P_{fe}),

$$P_{fe} = P_H + P_g$$

$$P_{fe} = 271.10 + 34.2079 = 305.30 \text{ W}$$

Ayrıca demirde oluşan harmonik kayıplarından dolayı (eddy akım kayıpları üzerinde olan etkisi) burada eddy akımın nominal frakansta ve harmonik etkisinden dolayı toplam akım değerini hesaba yansıtacağız ($P_g + P_h$). Demirin toplan kaybı şöyle ifade edilir.

$$P_{fe} = P_H + P_{gh}$$

$$P_{fe} = 271.10 + 43.3550 = 314.445 \text{ W}$$

b) Bakır Kayıpları:

Primer ve sekonder iletken direnci (75°) için hesaplanmaktadır.

Bakırın(75 C°) deki özgül direnci;

$$\rho_{75^\circ} = \frac{234.5 + 75^\circ}{234.5 + 20^\circ} * \rho_{20}$$

Bakır (20C°) özgül direnci($\rho_{20} = 0.01786 \Omega \cdot \text{mm}^2/\text{m}$)

$$\rho_{75^\circ} = 1.2156 * 0.01786 = 0.02171 \Omega \cdot \text{mm}^2/\text{m}$$

Primer iletken(75 C°) direnci ($R_p 75^\circ$);

$$R_{175} = \frac{234.5 + 75^\circ}{234.5 + 20^\circ} * R_{20}$$

$$R_{175} = \frac{l}{A} * \frac{234.5 + 75^\circ}{234.5 + 20^\circ} * \rho_{20}$$

l : iletken uzunluğu , A : iletken kesiti.

$$R_{175} = \frac{3175}{0.636} * \frac{310}{255} * 0.01786 = 104.62 \Omega$$

Veya

$$R_1 = \rho \frac{l}{q} \longrightarrow l = \frac{G}{d * q}$$

$$R_1 = \rho \frac{G}{d * q^2}$$

G (iletken ağırlığı toplam 3 faz için) = 86.03 kg

$$d = 8,9 * 10^{-3} \text{ kg/m}^3$$

$$J^2 (\text{ akım yoğunluğu}) = \frac{I^2}{q^2} (\text{ A/ mm}^2)$$

$$J_1 = 2.8 (\text{ A/ mm}^2)$$

$$R_{175^\circ} = \rho \frac{G}{d * q^2} = 104,62 \Omega$$

Transformatörün bağlantı gurubu Yzn olduğuna göre, Primer tarafında hat akımı ile faz akımı aynı değerdedirler, Primer bakır kaybını hesaplamak için aşağıdaki Eş.ten elde ederiz;

$$P_{cu1} = 3 (I_1)^2 * R_1$$

$$= 3(1,603)^2 * 104,60 = 3(268.78) = 806,343 \text{ W}$$

Sekonder bakır kaybını hesaplamak için;

Sekonder iletken(75 C°) direnci (R_{2 75°});

$$J_2 = 3.2 \text{ (A/ mm}^2\text{)}$$

$$R_{2 75^\circ} = \frac{27.42}{44.5} * \frac{310}{255} * 0.01786 = 0,01456 \Omega$$

$$P_{cu2} = 3 (I_2)^2 * R_2$$

$$= 3 (144,338)^2 * 0,01456 = 3(303,33) = 910,054 \text{ W}$$

Toplam Bakır kaybı P_T = (P_{cu1} + P_{cu2}) + P_{ac}

$$P_{ac} = 0.05 R_{dc}$$

$$P_{ac} = 0.05 * (P_{cu1} + P_{cu2})$$

$$= 85,817 \text{ W}$$

Transformatör toplam Bakır kaybı;

$$P_{cuT} = (P_{cu1} + P_{cu2}) + P_{ac}$$

$$P_{cuT} = 806.343 + 910.054 + 85.817 = 1802,2 \text{ W}$$

Transformatörüm Toplam Kayıp hesabı (P_T)

$$P_T = P_{fe} + P_{cuT}$$

$$= 314.445 + 1802.2 = 2116.645 \text{ W}$$

Kayıpların Yüzdesinin Hesabı (% P_T)

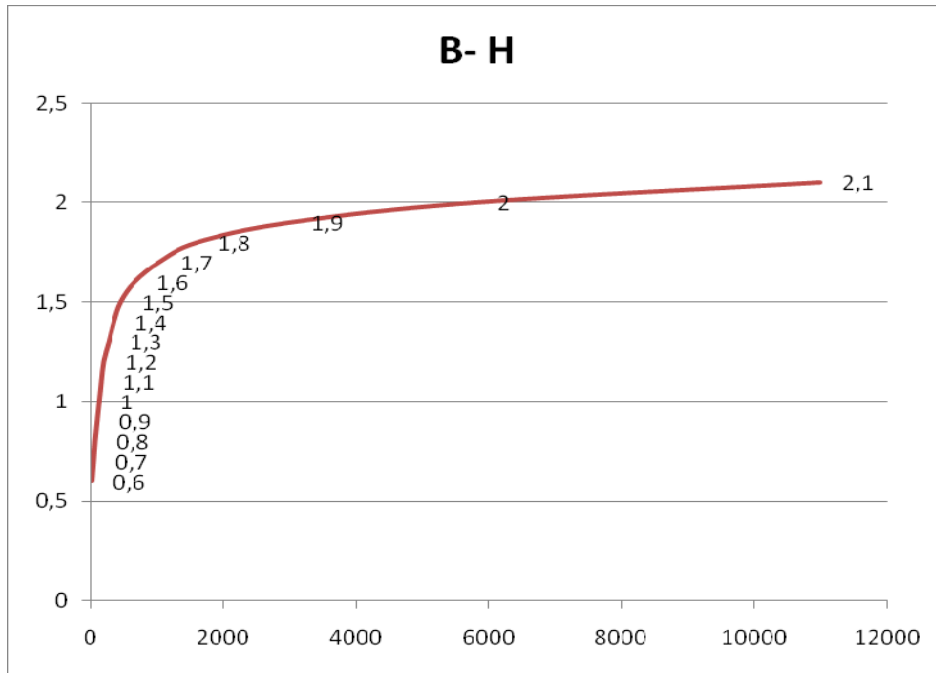
$$\% P_T = (\text{toplam kayıp/ giriş güç}) \times 100$$

$$\% P_T = (2136,44 / 100000) \times 100 = 2.1364 \text{ W}$$

Çizelge 6.2. Alınan sonuçların karşılaştırma tablosu

Güç (KVA) -100 kVA	Pratik değerler	Teorik değerler	Hata oranı %
Demir kaybı (W)	323.10	314.445	2.787
Bakır Kaybı (W)	1813.1	1802.2	0.601
Kaçak kayıplar (W)	—	19.795	—
Toplam Kayıp (W)	2136.44	2116.645	0.9260

Sonuçlarda görüldüğü gibi 100 kVA örnek transformatörde ölçüm sonucu ile ve yapılan sayısal (Teorik) hesaplamalarda elde edilen sonuçlar birbirilerine çok yakındır. Arada olan farkın transformatörün kayıpların ölçüm cihazlarından, ölçüm esnasında elamanların ısınması ve bu ısınmanın kayıp değerine yansımaları sonucu oluşan değer farklarıdır.



Şekil 6.1. 100kVA trafonun pratik değerlere göre elde edilen B-H eğrisi

160 kVA :

Bağlantı grubu Dyn 11 olan 160 kVA tranformatörün demir, bakır kayıpları ve diğer kayıplar hesaplanmaktadır. Elde edilen sonuçlar tablo halinde verilmektedir.

Çizelge 6.3. 160 kVA tranformatör tasarım bilgileri

GÜÇ(VA)	V ₁ (V)	V ₂ (V)	N ₁	N ₂	Pri. Faz Akım (A)	Sek. Faz Akım (A)
160.000	36.000	400	5924	38	1,4815	230,940
F (Hz)	AKI(wb)	B(Tesla)	H(A/m)	UK%	Nüve Ağırlığı(kg)	Nüve hacmi(m ³)
50	0,0274	1,686	131,02	4,5743	318,0	0,040107

Histerisiz Kayıp Hesabı:

Bu kayıpları hesaplamak için Eş. 3.16' yı kullanabiliriz,

$$P_H = k_h * B_m^x * f * G_n \quad (W)$$

$$E_1 = 4.44 * \phi_m * f * N_1$$

$$36000 = 4.44 * \phi_m * 50 * 5924 \longrightarrow \phi_m = 0.0274 \text{ Wb}$$

$$\phi_m = B_m * A \longrightarrow B_m = 0.0274 / 0,016238 = 1.686 \text{ T}$$

$$P_{\text{giriş}} = \sqrt{3} I_1 * V_1 \longrightarrow I_1 = 160\,000 / \sqrt{3} \cdot 36000 = 2.566 \text{ A}$$

$$\longrightarrow I_2 = 160\,000 / \sqrt{3} \cdot 400 = 230.940 \text{ A}$$

$$P_H = k_h * (B_m)^{1.6} * f * G_n \quad (W)$$

$$P_H = 0.01 * (1.686)^{1.6} * 50 * 318,0 = 366.749 \text{ W}$$

Girdap (Fuko) Akım kayıp Hesabı:

Bu kayıpları hesaplamak için Eş. 3.25' ten genel ifadesinden yararlanabiliriz.

$$P_g = k_g * B_m^2 * f^2 \quad (W/kg)$$

$$K_g = \pi^2 / 6\rho$$

$$P_g = k_g * B_m^2 * f^2 * G_n * h^2 \quad (W)$$

$$P_g = \left(\frac{\pi^2 f^2 B_m^2 h^2 V}{6 \rho} \right) = \frac{(3.14)^2 * (50)^2 * (1.686)^2 * (0.30)^2 * (0.040107)}{34.6296}$$

$$= 0.29292 \text{ W/kg}$$

$$= 0.29292 * 318,0 \text{ kg} = 93.148 \text{ W}$$

Eş. 5.6 dan 160 kVA transformatöründe eddy akım üzerinde oluşan harmonik etkisini demir kayıp hesabına yansıtılırsa, burada

$$P_{gh} = P_g \sum_{n=1}^{n=n_{\max}} I_n^2 n^2$$

$$P_{gh} = 93.148 * 1.322 = 123.1416 \text{ W}$$

Toplam demir Kaybı (P_{fe}),

$$P_{fe} = P_H + P_{gh}$$

$$P_{fe} = 366.749 + 123.1416 = 490.8906 \text{ W}$$

b) Bakır Kayıpları:

Primer ve Sekonder iletken direnci (75°) için hesaplanmaktadır.

Bakırın (75 C°) deki özgül direnci;

$$\rho_{75^\circ} = \frac{234.5 + 75^\circ}{234.5 + 20^\circ} * \rho_{20}$$

Bakır (20C°) özgül direnci($\rho_{20} = 0.01786 \Omega \cdot \text{mm}^2/\text{m}$)

$$\rho_{75^\circ} = 1.2156 * 0.01786 = 0.02171 \Omega \cdot \text{mm}^2/\text{m}$$

Primer iletken (75C°)direnci (R_{175°)

$$R_{175^\circ} = \frac{234.5 + 75^\circ}{234.5 + 20^\circ} * R_{20}$$

$$R_{175^\circ} = \frac{l}{A} * \frac{234.5 + 75^\circ}{234.5 + 20^\circ} * \rho_{20}$$

l : iletken uzunluğu , A : iletken kesiti.

$$R_{175^\circ} = \frac{4659}{0.636} * \frac{310}{255} * 0.01786 = 194.27 \Omega$$

Bağlantı gurubu Dyn olduğuna göre, yani primer tarafı Delta bağlı olduğuna göre için geçecek olan akım şöyle hesaplanır;

$$I_1 = 160\,000 / \sqrt{3} \cdot 36000 = 2.51 \text{ A}$$

$$I_f = 2.51 / \sqrt{3} = 1.481 \text{ A}$$

$$\text{Primer bakır kaybı} = 3 (I_f)^2 * R_1$$

$$P_{cu1} = 3 (I_1)^2 * R_1$$

$$= 3 (1.481)^2 * 194.27 = 3 (426.10) = 1278.31 \text{ W}$$

Sekonder tarafı Yıldız bağlı olduğuna göre bobinden geçecek olan akım hat akımıyla aynı değerde yani(faz akım ile hat akımı aynıdır), bu akımın değeri şöyledir;

$$I_1 = I_f = 160\,000 / \sqrt{3} \cdot 400 = 230.94 \text{ A}$$

Sekonder iletken (75C°) direnci (R₂ 75°)

$$J_2 = 3.088 \text{ (A/ mm}^2\text{)}$$

$$R_{2\,75^\circ} = \frac{l}{A} * \frac{234.5+75^\circ}{234.5+20^\circ} * \rho_{20} = 0.00655 \, \Omega$$

$$\text{Sekonder bakır kaybı} = 3 (I_1)^2 * R_2$$

$$\begin{aligned} P_{cu2} &= 3(I_2)^2 * R_2 \\ &= 3(230.940)^2 * 0.00655 = 3 (349.333) = 1047.99 \text{ W} \end{aligned}$$

$$\text{Toplam Bakır kaybı } P_T = (P_{cu1} + P_{cu2}) + P_{ac}$$

$$\begin{aligned} P_{ac} &= (P_{cu1} + P_{cu2}) * 0.05 \\ &= 116.24 \text{ W} \end{aligned}$$

Transformatör toplam Bakır kaybı;

$$\begin{aligned} P_{cuT} &= P_{cu1} + P_{cu2} + P_{ac} \\ P_{cuT} &= 1278.31 + 1047.99 + 116.24 = 2442.54 \text{ W} \end{aligned}$$

Transformatörüm Toplam Kayıp hesabı (P_T)

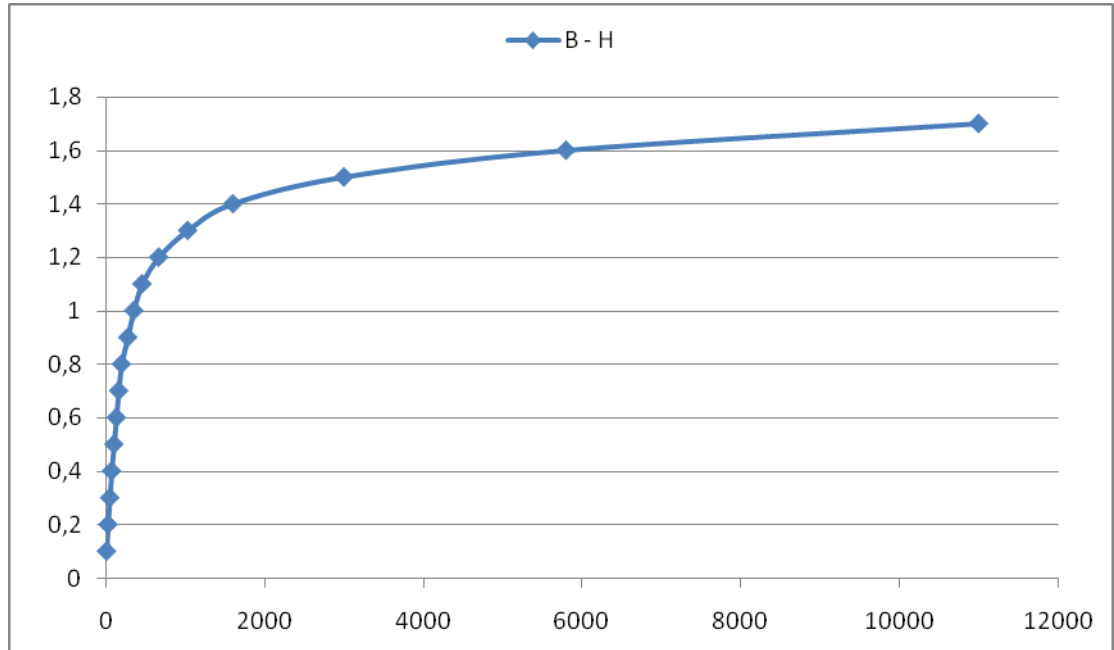
$$\begin{aligned} P_T &= P_{fe} + P_{cuT} \\ &= 490.8906 + 2442.54 = 2933.4306 \text{ W} \end{aligned}$$

Kayıpların Yüzdesinin Hesabı (% P_T)

$$\begin{aligned} \% P_T &= (\text{toplam kayıp/ giriş güç}) \times 100 \\ &= (2949,9 / 160000) \times 100 = 1.8436 \text{ W} \end{aligned}$$

Çizelge 6.4. Alınan sonuçların karşılaştırma tablosu

Güç (KVA) -160 kVA	Pratik değerler	Teorik değerler	Hata oranı %
Demir kaybı (W)	507.05	490.890	3.187
Bakır Kaybı (W)	2442.8	2442.54	0.0106
Kaçak kayıplar (W)	—	16.47	—
Toplam Kayıp (W)	2949.9	2933.43	0.5580



Şekil 6.2. 160kVA trafonun pratik değerlere göre elde edilen B-H eğrisi

250 kVA: Bağlantı grubu Dyn 11.

Çizelge 6.5. 250 kVA transformatör tasarım bilgileri

GÜÇ(VA)	V ₁ (V)	V ₂ (V)	N ₁	N ₂	Pri. Faz Akım (A)	Sek. Faz Akım (A)
250.000	36.000	400	4832	31	2,3148	360,844
F (Hz)	AKI(wb)	B(Tesla)	H(A/m)	UK%	Nüve Ağırlığı(kg)	Nüve hacmi(m ³)
50	0,336	1,694	137,53	4,7129	428,0	0,053970

Histerisiz Kayıp Hesabı:

Bu kayıpları hesaplamak için Eş. 3.16' yı kullanabiliriz,

$$P_H = k_h * B_m^x * f * G_n \quad (W)$$

$$E_1 = 4.44 * \phi_m * f * N_1$$

$$36000 = 4.44 * \phi_m * 50 * 4832 \longrightarrow \phi_m = 0.0336 \text{ Wb}$$

$$\phi_m = B_m * A \longrightarrow B_m = 0.0336 / 0,019805 = 1.694 \text{ T}$$

$$P_{\text{giriş}} = \sqrt{3} I_2 * V_2 \longrightarrow I_1 = 250\,000 / \sqrt{3} \cdot 36000 = 4.00 \text{ A}$$

$$\longrightarrow I_2 = 250\,000 / \sqrt{3} \cdot 400 = 360.844 \text{ A}$$

$$P_H = k_h * (B_m)^{1.6} * f * G_n \quad (W)$$

$$P_H = 0.01 * (1.694)^{1.6} * 50 * 428.0 = 497.365 \text{ W}$$

Girdap (Fuko) Akım kayıp Hesabı:

Bu kayıpları hesaplamak için Eş. 3.25' ten yararlanabiliriz.

$$P_g = k_g * B_m^2 * f^2 \quad (\text{W/kg})$$

$$K_g = \pi^2 / 6\rho$$

$$P_g = k_g * B_m^2 * f^2 * G_n * h^2 \quad (\text{W})$$

$$P_g = \left(\frac{\pi^2 f^2 B_m^2 h^2 V}{6 \rho} \right) = \frac{(3.14)^2 * (50)^2 * (1.094)^2 * (0.30)^2 * (0.053970)}{34.6296}$$

$$= 0.28689 \text{ W/kg}$$

$$= 0.28689 * 428,0 \text{ kg} = 122.791 \text{ W}$$

Eş. 5.6'dan 250 kVA transformatöründe eddy akım üzerinde oluşan harmonik etkisini demir kayıp hesabına yansılırsa, burada

$$P_{gh} = P_g \sum_{n=1}^{n=n_{\max}} I_n^2 n^2$$

$$P_{gh} = 122.791 * 1.365 = 167.609 \text{ W}$$

Toplam demir kaybı (P_{fe}),

$$P_{fe} = P_H + P_{gh}$$

$$P_{fe} = 497.365 + 167.609 = 664.974 \text{ W}$$

b) Bakır Kayıpları:

Primer ve sekonder iletken direnci (75°) için hesaplanmaktadır.

Bakırın(75 C°) deki özgül direnci;

$$\rho_{75^\circ} = \frac{234.5 + 75^\circ}{234.5 + 20^\circ} * \rho_{20}$$

Bakır (20C°) özgül direnci($\rho_{20} = 0.01786 \Omega \cdot \text{mm}^2/\text{m}$)

$$\rho_{75^\circ} = 1.2156 * 0.01786 = 0.02171 \Omega \cdot \text{mm}^2/\text{m}$$

Primer iletken(75 C°) direnci ($R_1 75^\circ$);

$$R_{1 75} = \frac{234.5 + 75^\circ}{234.5 + 20^\circ} * R_{20}$$

$$R_{1 75} = \frac{l}{A} * \frac{234.5 + 75^\circ}{234.5 + 20^\circ} * \rho_{20}$$

l : iletken uzunluğu , A : iletken kesiti.

$$R_{1 75} = \frac{4075}{0.636} * \frac{310}{255} * 0.01786 = 98.63 \Omega$$

Bağlantı gurubu Dyn olduğuna göre, yani primer tarafı Delta bağlı olduğuna göre için geçecek olan akım şöyle hesaplanır;

$$I_1 = 250\,000 / \sqrt{3} \cdot 36000 = 4.01 \text{ A}$$

$$I_f = 4.01 / \sqrt{3} = 2.314 \text{ A}$$

$$\begin{aligned} P_{cu1} &= 3 (I_1)^2 * R_1 \\ &= 3 (2.314)^2 * 98.63 = 3(528.12) = 1584.37 \text{ W} \end{aligned}$$

Sekonder iletken (75C°) direnci ($R_2 75^\circ$)

$$J_2 = 3.4 \text{ (A/ mm}^2 \text{)}$$

$$R_{2 75^\circ} = \frac{l}{A} * \frac{234.5 + 75^\circ}{234.5 + 20^\circ} * \rho_{20} = 0.00410 \Omega$$

Sekonder tarafı Yıldız bağlı olduğuna göre bobinden geçecek olan akım hat akımıyla aynı değerdedir yani (faz akım ile hat akımı aynıdır), bu akımın değeri şöyledir;

$$I_1 = I_f = 250\,000 / \sqrt{3} \cdot 400 = 360.844 \text{ A}$$

$$\begin{aligned} P_{cu2} &= 3 (I_2)^2 * R_2 \\ &= 3 (360.844)^2 * 0.00410 = 3 (533.85) = 1601.56 \text{ W} \end{aligned}$$

$$\text{Toplam Bakır kaybı } P_T = (P_{cu1} + P_{cu2}) + P_{ac}$$

$$\begin{aligned} P_{ac} &= (P_{cu1} + P_{cu2}) * 0.05 \\ &= 159.29 \text{ W} \end{aligned}$$

Transformatör toplam Bakır kaybı ;

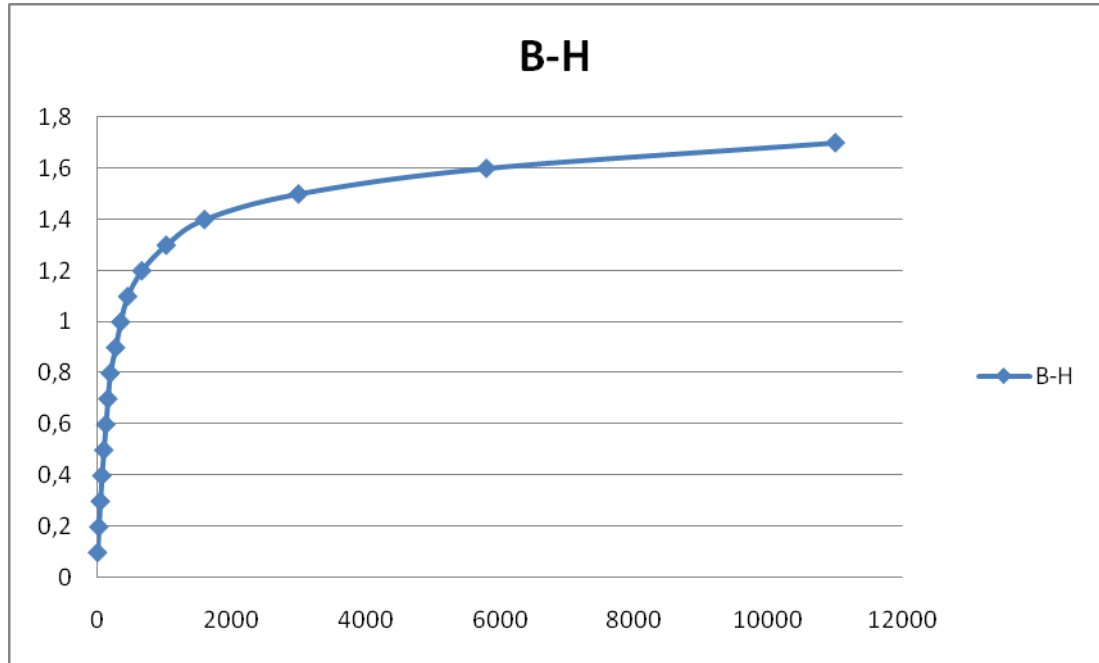
$$\begin{aligned} P_T &= P_{cu1} + P_{cu2} + P_{ac} \\ P_T &= 1584.37 + 1601.56 + 159.29 = 3345.22 \text{ W} \end{aligned}$$

Transformatörüm Toplam Kayıp hesabı (P_T)

$$\begin{aligned} P_T &= P_{fe} + P_{cuT} \\ P_T &= 664.974 + 3345.22 = 4010.194 \text{ W} \end{aligned}$$

Çizelge 6.6. Alınan sonuçların karşılaştırma tablosu

Güç (KVA) -250 kVA	Pratik değerler	Teorik değerler	Hata oranı %
Demir kaybı (W)	691,74	664.974	3.869
Bakır Kaybı (W)	3348,4	3345.22	0.0949
açak kayıplar (W)	—	30.006	—
Toplam Kayıp (W)	4040.2	4010.194	0.7426



Şekil 6.3. 250kVA trafonun pratik değerlere göre elde edilen B-H eğrisi

7. SONUÇ VE ÖNERİLER

Bu tezde, bir transformatörde kayıpları hesaplamak için kullanılan çeşitli yöntemler özetlenmiştir. Elde edilen başlıca sonuçlar aşağıda maddeler halinde aktarılmıştır.

1) Örnek olarak ele alınan (100 kVA, 160kVA, 250 kVA) transformatörlerin kayıpları pratik olarak ölçülmüş ve bu güçteki transformatörlerin teorik olarak kayıpları hesaplanmıştır. Sonuçları 6. bölümde ayrı ayrı tablolar halinde verilmiştir.

2) Sonuçlardan da görüldüğü gibi yapılan pratik kayıp ölçümleri ve teorik kayıp hesapları arasında biraz fark vardır. Bu farkın sebebi ise transformatörün bazı kaçak kayıpları ile transformatörün nüve ve bobin üzerinde oluşan bazı karmaşık kayıplar hesaba katılmamıştır (örneğin dielektrik kayıpları).

3) Çekirdek kayıplarının içeriğini oluşturan Histerisiz ve Eddy (Girdap) akım kayıplarının üzerinde durulmuştur. Silisli saçlar kullanılan bu transformatörlerde histerisiz kayıpları oranı Eddy akım kayıp oranına göre daha büyüktür.

4) Histerisiz kayıpları demirin özel alaşımlarının kullanılmasıyla ve özel haddeleme ile küçültülebilir. Foucault kayıpları ise çekirdeği tabakalara ayırarak azaltılabilir. Böylece transformatörün demir kayıplarını azaltmış oluruz.

5) Bakır kaybı akımın karesi ile orantılı olarak değiştiğinden (I^2R), bakır kaybı demir kaybına göre büyük olan transformatörler, iki kaybın birbirine yaklaştığı transformatörlere göre daha düşük bir yükleme kapasitesine sahiptir. Bakır kaybına göre demir kayıpları büyüdükçe, maksimum verim elde etmek için transformatörün yüksek güçlere sahip olacağına dikkat edilmelidir. Sonuç olarak; düşük yüklerde çalıştırılan bir transformatörde, bakır kayıplarını biraz daha artırılrsa bile, demir kayıplarının minimuma indirilmesi gerektiği anlaşılmalıdır.

6) Uygulamada akım ve manyetik akı yoğunluğu yaklaşık olarak sabittir. Bu nedenle esas iki kayıp, kullanılan aktif malzeme ağırlıkları ile genellikle orantılı olacaktır. Bakır kaybının demir kaybına oranının yüksek olduğu transformatörlerde, bakır ağırlığının demir ağırlığına oranı da yüksek olacaktır.

7) Transformatörlerin harmonik üretme özelliği, demir çekirdeğin mıknatıslanma karakteristiğinin lineer olmayışından ileri gelir. Transformatörler doyuma gitmekte ve harmonikler üretmektedirler. Transformatörlerin nominal değerlerin dışında çalışması nüvede daha çok doymaya sebep olur. Doyma harmonik akımların seviyesinde hızlı artmaya sebep olur.

8) Büyük transformatörlerde magnetik endüksiyon değerinin büyük tutulması ile demir çekirdekten en büyük yarar sağlanır. Ancak büyük endüksiyon değerinde, doyma nedeniyle mıknatıslanma akımında harmonikli bileşenler artar. Mıknatıslanma akımının harmonik bileşenlerini azaltmak için alınabilecek en iyi tedbir, manyetik endüksiyonu düşük tutmaktır.

KAYNAKLAR

1. Adak, S., “ Enerji Sistemlerinde Harmonik Distorsiyon Azaltılması”, Doktora Tezi, *Yıldız Teknik Üniversitesi Fen Bilimleri Enstitüsü*, İstanbul, 2-8, 10-13 (2003).
2. Adak, S., “Elektrik Tesislerindeki Kirlilik, Harmonikler”, *Kaynak Elektrik*, 162(11), 116-121 (2002).
3. Akhunlar, Ahmet, “Elektrotekniğin Esasları I Doğru Akım ve Magnetik Alan”, *Kutulmuş matbaası, İ.T.Ü*, İstanbul, 490-504, 619-621, 656-657 (1961).
3. Bernard Hochart, editor, “Power Transformer Handbook”, *Butterworths & Co. Ltd.*, London, 145-148 (1987).
4. Bharat Heavy Electricals Limited, “Transformers, *Mc Graw Hill*, New York, 12-16 (2005).
5. Boduroğlu, Turgut, , “Elektrik Makinaları Dersleri–Transformatorlar”, *Beta Basım Yayın Dağıtım A.Ş.*, İstanbul, 58-60,295-305 (1988).
6. Bossche Alex Van dan, Valchev V. Cekov, “Inductors and Transformers for Power Electronics”, *McGraw-Hill*, New York, Singapore. 6-16, 37-40,42-58 (2004).
7. Cylan. Hasan, “Elektrik Atelyesi- bobnaj”, *Yüce Yayın evleri*, İstanbul, 217-222 (1998).
8. Coltman, W. John, “Transformer”, Cilt 258,No:1, *Scientific American*, 394-395, 398-399 (1998).
9. Çapanoğlu N. E., “Ferit Çekirdekli Trafo Tasarımı ve Uygulaması”, Yüksek Lisans Tezi, *Gazi Üniversitesi Fen bilimleri enstitüsü*, Ankara, 6-10, 32-38 (2006).
10. Driesen J., Olivares J.Carlos, Parasitic Loss Identification Techniques For Distribution Transformer, *IEEE Transactions on Magnetics*, 2-6 (2002).
11. Dunlap, C. H., Siefert, W.A., Austin, F. E., “Transformers, principles and applications”, *American Technical Society*, Chicago, 145-146, 255-257 (1947).
12. Fitzgerald A.E., Kingsley Charles Jr., Umans Stephen D.,“Electric Machinery”, *McGraw-Hill*, New York, 50-58 (1990).
13. Guru S. B., Hizirolu H., R.,“ Elektric Machinery and Transformer”, *Kettering, Oxford*, 13-15 (2001).

14. Gibbs, J. B., "Transformer Principles & Practice", **Mc Graw Hill**, New York, 45-48 (1950).
15. Grigsby L.L., "Electric Power Engineering Handbook", **CRC Press LLC, IEEE Press**, 52-63 (2001).
16. John J., Winders Jr., "Power Transformers Principles and Applications", **Marcel Dekker, Inc.**, New York, 46-49 (2002).
18. Kulkarni, S. V., Khaparde, S. A. "Transformer Engineering Design & Practice", **Marcel Dekker, Inc.**, New York, 42-44,137-166,184-218 (2004).
19. Martin H., A. C. Franklin, D. P. Franklin, "J & P Transformer Book", **Butterworth-Heinemann Ltd.** Great Britain, 5-10 (1998).
20. Mergen A. Faik , Zorlu S., "Elektrik Makineleri I –Transformatörler , **Birsen Yayınevi**, İstanbul, 37-43, 105-110 (2005).
21. Nasar S. A, "Elektrik Machines and Transformer", **Kentucky**, New York, 35-38, 52-53 (1984).
22. Pekin H., "Transformatör Arızaları ve Sebepleri", **Elektrik Mühendisliği dergisi**, 117: 183-185,187-192 (1995).
23. Sucu, M., " Elektrik Enerji Sistemlerinde Oluşan Harmoniklerin Filtrelenmesinin Bilgisayar Dstekli Modellenmesi ve Simülasyonu", Yüksek lisans Tezi, **Marmara Üniversitesi Fen Bilimleri Enstitüsü**, İstanbul, 8-15 (2003).
24. internet: "Confederation of indian Industry " www.greenbusinesscentre.org/3920/Rajasekhar_Vijay.pdf (2007).
25. William H. Kersting, Mohamed E. El-Hawary, " Electric power Transformer Engineering" , **Pittsburgh, Pennsylvania**, U.S.A., 30-53 (2004).
26. internet: "Copper Development Association" [www.cda.org.uk/ K Rating of Transformers supplying Harmonic Loads](http://www.cda.org.uk/K_Rating_of_Transformers_supplying_Harmonic_Loads) (2007).
27. Kömürgöz, G., " Güç Transformatörlerinde Kazan Kayıpların Azaltılması", Yüksek lisans Tezi, **İstanbul Teknik Üniversitesi Fen Bilimleri Enstitüsü**, İstanbul, 5-8, 12-17 (1993).

EKLER

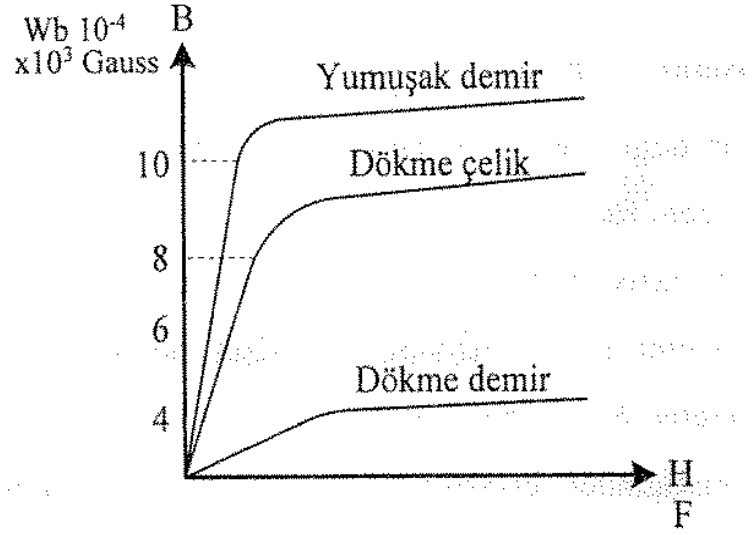
EK-1 Mıknatıslanma Eğrileri

Transformatörün demir çekirdeğinde kullanılan manyetik malzemenin en yaygın ve ucuz olanı demirdir. Metaurolojik olarak muhtelif elementlerin yapıya ilave edilmesi ile B-H eğrisi olarak bilinen değişik mıknatıslanma eğrileri elde edilir. Farklı mıknatıslanma eğrilerine sahip, yumuşak demir, dökme çelik ve dökme demir malzemelerin B-H eğrileri şekil 1,1'de verilmiştir. Bu eğriler histerisiz çevrim karakteristiğinden çıkartılırlar ve çevrimi elde etmek için yapılan ilk amper artışını veren eğrilerdir. Seçilen bir H değeri için en yüksek B manyetik alan yoğunluğunu veren yumuşak demir ile yapılacak demir gövde, aynı güç ve gerilim değerleri için, diğer iki malzemeyle yapılacak transformatörlere göre, daha küçük kesit kullanacağından, daha küçük, daha hafif ve daha ucuz olur. Bu yararın yanı sıra eğer ağırlık ve maliyet dikkate alınmaz ise yumuşak demirden imal edilecek transformatör diğerlerine göre daha büyük güce sahip olacak demektir. Çünkü B 'nin artması ile akı ve gücün çarpanı olan E de büyümüş olacaktır.

Mıknatıslanma eğrisinde transformatörün tasarımında kullanılması gereken B değeri ne manyetik doyma bölgesinde ne de lineer bölgede seçilmelidir. Lineer bölgede yapılan seçimler B 'nin küçük olmasından dolayı demir çekirdek kesitinin büyümesine ve gücün küçülmesine yol açar. Ayrıca demir ağırlığının artmasıyla demir kayıpları artarak verimin küçülmesine sebep olur. Aynı şekilde B 'nin doyma bölgesinde seçilmesi bobinlerin aşırı amper-sarımla yüklenmesine neden olacağından ısınma ile soğutma problemleri oldukça önem kazanır. Transformatörün verimi de fazla bakır kayıplarından dolayı düşer.

Bu nedenlerden dolayı manyetik endüksiyon (B), genelde dirsek bölgesi diye tarif edilen eğrinin lineerlikten ayrılıp doyma bölgesine girdiği ara bölgede seçilir. Ancak bu durumda optimum demir gövde ölçülerine, demir kayıplarına ve bakır kayıplarına erişildiği için verim de varabileceği en yüksek noktaya ulaşır.

EK-1 (Devam) Mıknatıslanma Eğrileri



Şekil 1.1. Demir yapısında üç değişik malzemenin mıknatıslanma eğrileri

EK-2 Üç Fazlı Transformatörlerin Bağlantı Kümeleri

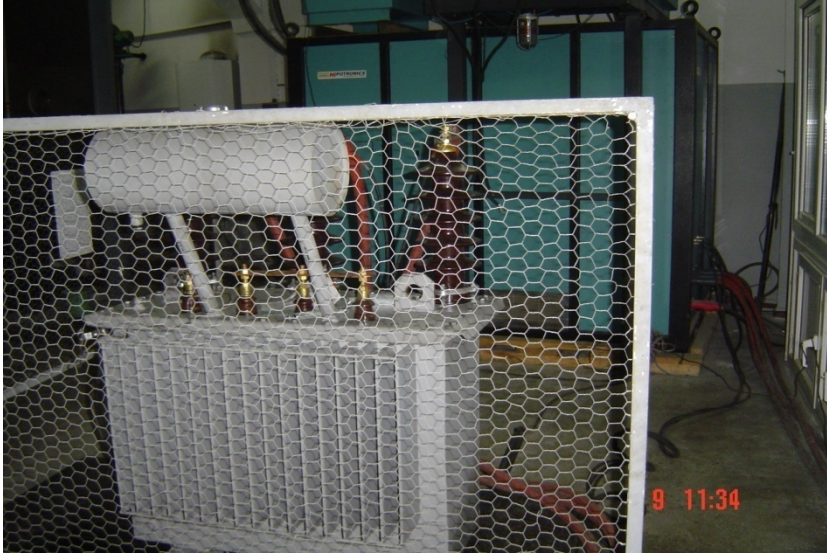
Üç fazlı transformatörlerin bağlantı kümeleri.

Faz kayması	Tanıma sayısı	Tanıma kümesi	Bağlantı simgesi	Döner yöney çizgesi		Bağlantı şeması	
				Üst gerilim	Alt gerilim	Üst gerilim	Alt gerilim
0°	0	I	Dd0				
			Yy0				
			Dz0				
180°	6	II	Dd6				
			Yy6				
			Dz6				
150°	5	III	Dy5				
			Yd5				
			Yz5				
330° (-30°)	11	IV	Dy11				
			Yd11				
			Yz11				

EK-3 Çalışmada Kullanılan Transformatörlerin ve Test Cihazların Resimleri



Şekil 3.1 Yağlı dağıtım transformatörün konsitraksiyonu

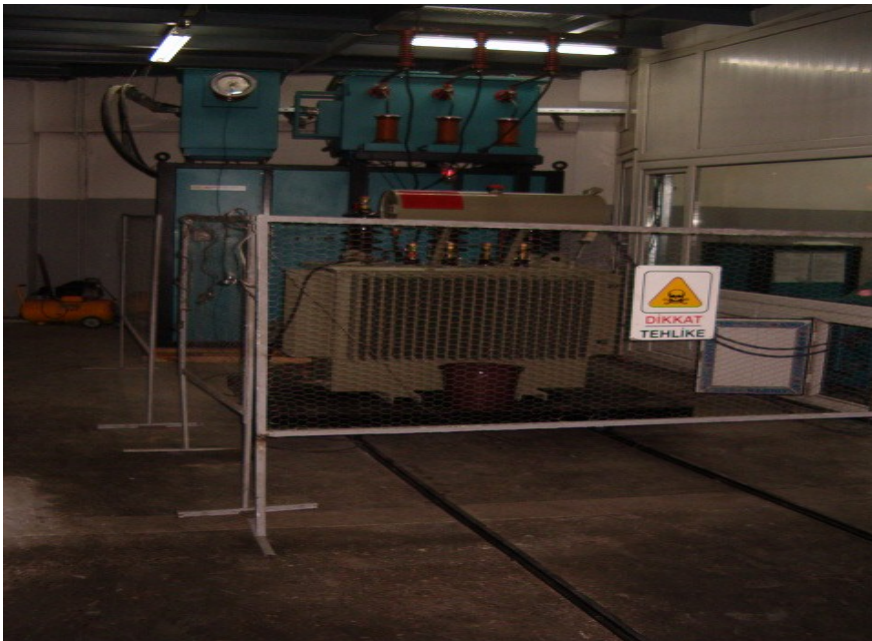


Resim 3.2. Dağıtım transformatörü test alanında

EK-3 Çalışmada Kullanılan Transformatörlerin ve Test Cihazlarının Resimleri



Resim 3.3. Labrutvarda kullanılan test cihazları

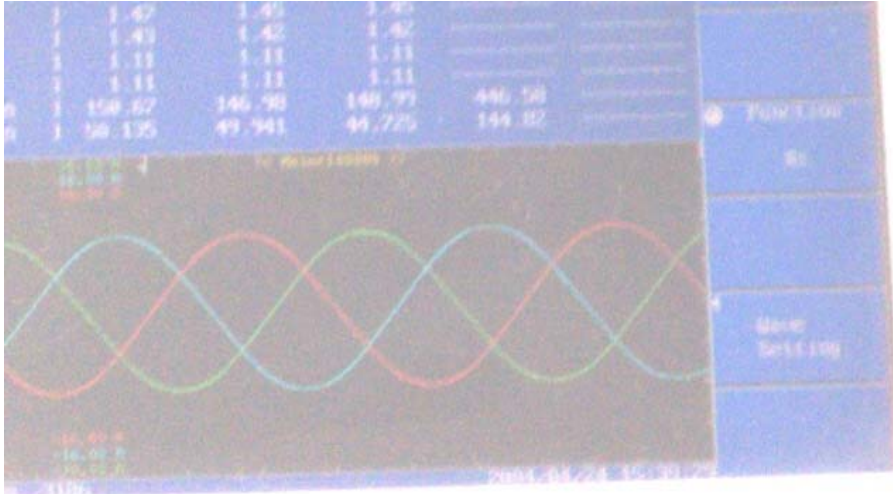


Resim 3.4. Dağıtım transformatörü kısa devre test altında

EK-3 Çalışmada Kullanılan Transformatörlerin ve Test Cihazların Resimleri



Resim 3.5. Transformatörün bilgisayarlı analiz ve testi cihazı



Resim 3.6. Test cihazından yansıyan üç faz dalga şekli

ÖZGEÇMİŞ

Kişisel Bilgiler

Soyadı, adı : MAHMOUD, Sabhan K.
Uyruğu : Irak
Doğum tarihi ve yeri : 07.07.1981 Musul
Medeni hali : Bekar
Telefon : 0555 722 26 43
e-mail : Sabhan_1981@hotmail.com

Eğitim

Derece	Eğitim Birimi	Mezuniyet tarihi
Lisans	Musul Üniversitesi/ Elektrik Bölümü	2004
Lise	Al Gafiki Lisesi	2000

Yabancı Dil

Arapça , İngilizce

Hobiler

Masa tensi, Bilgisayar teknolojileri, Satranç,