



**DOĞRUSAL OLMAYAN YÜKLERE UYGUN YAĞLI TİP
TRANSFORMATÖRÜN TASARIMININ GELİŞTİRİLMESİ VE
STANDARTLARDAKİ KABULLERLE TEORİK VE DENEYSEL
KARŞILAŞTIRILMASI**

Ali MAMIZADEH

**DOKTORA TEZİ
ELEKTRİK ELEKTRONİK MÜHENDİSLİĞİ ANABİLİM DALI**

**GAZİ ÜNİVERSİTESİ
FEN BİLİMLERİ ENSTİTÜSÜ**

AĞUSTOS 2016

Ali MAMIZADEH tarafından hazırlanan “DOĞRUSAL OLMAYAN YÜKLERE UYGUN YAĞLI TİP TRANSFORMATÖRÜN TASARIMININ GELİŞTİRİLMESİ VE STANDARTLARDAKİ KABULLERLE TEORİK VE DENEYSEL KARŞILAŞTIRILMASI” adlı tez çalışması aşağıdaki jüri tarafından OY BİRLİĞİ ile Gazi Üniversitesi Elektrik ve Elektronik Mühendisliği Anabilim Dalında DOKTORA TEZİ olarak kabul edilmiştir.

Danışman: Prof. Dr. İres İSKENDER

Elektrik-Elektronik Mühendisliği Anabilim Dalı, Gazi Üniversitesi
Bu tezin, kapsam ve kalite olarak Doktora Tezi olduğunu onaylıyorum

.....

Başkan: Prof. Dr. Mecit SİVRİOĞLU

Makine Mühendisliği Anabilim Dalı, Gazi Üniversitesi
Bu tezin, kapsam ve kalite olarak Doktora Tezi olduğunu onaylıyorum

.....

Üye: Prof. Dr. M. Cengiz TAPLAMACIOĞLU

Elektrik-Elektronik Mühendisliği Anabilim Dalı, Gazi Üniversitesi
Bu tezin, kapsam ve kalite olarak Doktora Tezi olduğunu onaylıyorum

.....

Üye : Doç. Dr. Hamit ERDEM

Elektrik-Elektronik Mühendisliği Anabilim Dalı, Başkent Üniversitesi
Bu tezin, kapsam ve kalite olarak Doktora Tezi olduğunu onaylıyorum

.....

Üye : Doç. Dr. Ahmet KARAARSLAN

Elektrik Mühendisliği Anabilim Dalı, Afyon Kocatepe Üniversitesi
Bu tezin, kapsam ve kalite olarak Doktora Tezi olduğunu onaylıyorum

.....

Tez Savunma Tarihi: 11/08/2016

Jüri tarafından kabul edilen bu tezin Doktora Tezi olması için gerekli şartları yerine getirdiğini onaylıyorum.

.....

Prof. Dr. Hadi GÖKÇEN
Fen Bilimleri Enstitüsü Müdürü

ETİK BEYAN

Gazi Üniversitesi Fen Bilimleri Enstitüsü Tez Yazım Kurallarına uygun olarak hazırladığım bu tez çalışmada;

- Tez içinde sunduğum verileri, bilgileri ve dokümanları akademik ve etik kurallar çerçevesinde elde ettiğimi,
- Tüm bilgi, belge, değerlendirme ve sonuçları bilimsel etik ve ahlak kurallarına uygun olarak sunduğumu,
- Tez çalışmada yararlandığım eserlerin tümüne uygun atıfta bulunarak kaynak gösterdiğimi,
- Kullanılan verilerde herhangi bir değişiklik yapmadığımı,
- Bu tezde sunduğum çalışmanın özgün olduğunu,

bildirir, aksi bir durumda aleyhime doğabilecek tüm hak kayıplarını kabullendiğimi beyan ederim.

Ali MAMIZADEH

11 / 08 / 2016

DOĞRUSAL OLMAYAN YÜKLERE UYGUN YAĞLI TİP TRANSFORMATÖRÜN
TASARIMININ GELİŞTİRİLMESİ VE STANDARTLARDAKİ KABULLERLE
TEORİK VE DENEYSEL KARŞILAŞTIRILMASI
(Doktora Tezi)

Ali MAMIZADEH

GAZİ ÜNİVERSİTESİ
FEN BİLİMLERİ ENSTİTÜSÜ
Ağustos 2016

ÖZET

Günümüzde elektrik enerjisine olan talebin hızla artması, elektrik alıcılarının çok çeşitlilik göstermesi, doğrusal olmayan yarı iletken güç elemanlarının sık kullanılması, şebekeden doğrusal olmayan akımların çekilmesine, dolayısıyla harmoniklerin üretilmesine yol açmaktadır. Bu harmonikler şebekede çalışmakta olan transformatörleri olumsuz yönde etkilemektedir. Transformatörler elektrik şebekesinin çeşitli yerlerinde çeşitli amaçlarla kullanılmaktadır. Transformatörlerde meydana gelen herhangi bir sorundan dolayı elektrik kesintileri meydana gelerek ekonomiye ciddi zararlar verebilmektedir. Bu gerçekler dikkate alındığında, elektrik sistemlerindeki transformatörlerin daha güvenilir ve ekonomik çalıştırılması büyük önem kazanmaktadır. Harmonikli akımlardan dolayı transformatör kayıpları artarak sargıların çalışma sıcaklığını yükseltmektedir. Sıcaklık artışı sargı yalıtımını hızla yaşlandırarak transformatörün faydalı ömrünün azalmasına sebep olmaktadır. 1980'lerden bu yana harmoniklerden dolayı sargılarda meydana gelen ek kayıplar incelenmiş ve üzerinde çeşitli çalışmalar yapılmıştır. Harmonikli durumlarla ilgili standartların kayıp faktörünün hesaplanmasıyla ilgili sunduğu yöntemlerin ve bu yöntemlerin düzeltilmesiyle ilgili sunulan çalışmaların eksik yönleri bulunmaktadır. Tez çalışmaları ile bu hata kaynakları tespit edilmiştir ve yapılan çalışmalar ile literatürdeki bu etkilerin boşluğu giderilmiştir. Sonlu elemanlar yöntemi ile sargıların analizi harmonikli akımlar durumunda gerçekleştirilmiştir. Çalışmalar frekans tanım bölgesinde ve zaman tanım bölgesinde gerçekleştirilmiştir. Analiz çalışmalar sonucunda harmonik kayıp faktör eğrileri elde edilmiştir. Tezin beşinci bölümünde transformatörlerin termal modellemesi ve termal hususlar incelenmiştir. Geliştirilen kayıp faktörü ve termal modele dayanarak, doğrusal olmayan yükler için optimal transformatör tasarımı gerçekleştirilmiştir. Dört farklı tasarımın imalatı yapıp, deneysel doğrulama faaliyetleri gerçekleştirilmiştir. Yapılan deneyler ile tasarlanan transformatörlerin standart kabul koşulları sağladığı saptanmıştır.

Bilim Kodu : 90514

Anahtar Kelimeler : Harmonikli yükler, güç transformatörü, düzeltilmiş harmonic kayıp faktörü, sonlu elemanlar yöntemi

Sayfa Adedi : 123

Danışman : Prof. Dr. İres İSKENDER

DEVELOPING THE DESIGN OF OIL IMMERSSED TRANSFORMERS FOR
NONLINEAR LOADS AND COMPARISON OF THEIR THEORETICAL AND
EXPERIMENTAL RESULTS WITH STANDARD ASSUMPTIONS

(Ph. D. Thesis)

Ali MAMIZADEH

GAZİ UNIVERSITY

GRADUATE SCHOOL OF NATURAL AND APPLIED SCIENCES

August 2016

ABSTRACT

The rapid increase in the demand for electrical energy, increasingly diverse usage of electric and the frequent use of non-linear semiconductor power elements, lead to the production of harmonics in the network due to withdrawal of the non-linear currents. These harmonics negatively affect the transformers that are used on networks. These transformers are used in different parts of the electrical grid for various purposes. Any fault occurring in these transformers results in power outages with serious economic waste as a consequence. Therefore, the reliable and economic operation of transformers in power systems has received more attention. Non sinusoidal currents increase power losses in transformers and lead to increase in winding temperature. Increase in temperature accelerates the aging of insulation of the transformer and decreases the life expectancy. Since the 1980s, several studies have investigated the additional losses of transformers that occur because of harmonics. The offered methods for the calculation of harmonic loss factor, related standards and correction studies have deficiencies. In this study the source of errors are determined, and in the framework of this study the ignorance of these effects are resolved and removed. For removing these gaps, the analysis of windings and finite elements are done for non-sinusoidal situations in both frequency and time domain. Using the finite element method, the curves of harmonic loss factors were obtained. In the fifth section of the thesis the thermal modelling and thermal related issues were analyzed. An optimal design approach was actualized based on improved harmonic loss factors and thermal modelling. Production of four different designs were materialized and the experimental verification of these transformers were carried out. These experiments verified that the designed transformers complied with standard assumptions.

Science Code : 90514

Key Words : Harmonically loads, power transformers, corrected harmonic losses factor, finite element method

Page Number : 123

Supervisor : Prof. Dr. İres İSKENDER

TEŞEKKÜR

Çalışmalarım boyunca değerli yardım ve katkılarıyla beni yönlendiren ve araştırmamın uygulama aşamasında yardımlarını esirgemeyen danışmanım Prof. Dr. İres İSKENDER' e ve katkılarıyla manevi destekleriyle beni hiçbir zaman yalnız bırakmayan çok değerli aileme şükranlarımı bir borç bilirim.



İÇİNDEKİLER

	Sayfa
ÖZET	iv
ABSTRACT.....	v
TEŞEKKÜR.....	vi
İÇİNDEKİLER	vii
ÇİZELGELERİN LİSTESİ.....	x
ŞEKİLLERİN LİSTESİ.....	xii
RESİMLERİN LİSTESİ	xvii
SİMGELER VE KISALTMALAR.....	xviii
1. GİRİŞ.....	1
2. HARMONİKLERİN TRANSFORMATÖR ÜZERİNDEKİ ETKİ İLE İLGİLİ LİTERATÜRDEKİ ÇALIŞMALAR.....	11
2.1. Harmonik Akımlarının I^2R Kaybına Etkisi.....	12
2.2. K-faktör Yöntemi	12
2.3. Harmonik Kayıp Faktör Yöntemi, F_{HL}	13
2.4. AA Direnç Hesaplama Yöntemleri	15
2.5. Düzeltilmiş Kayıp Faktörü Hesaplamaları	16
3. ELEKTRİK ŞEBEKESİNDEKİ HARMONİKLİ AKIMLARI ÜREten YÜK ÖRNEKLERİ	21
4. SONLUELEMANLAR YÖNTEMİ İLE KAYIP FAKTÖR HESAPLAMALARI	27
4.1. Sonlu Elemanlar Yöntemi ile Manyetik Alan Analizi ve Kayıp Hesaplaması...	29
4.2. Girdap Akım Kayıpları	30
4.3. Deri Ekisi (Skin Effect) Kayıpları.....	36
4.4. Yakınlık Etkisi (Proximity Effect) Kayıpları	38

	Sayfa
4.5. Nüveli Yapıya Sahip Sargılar Üzerinde Yakınlık Etkisi Analizi	43
4.6. Transformatör Üzerinde Analizler	46
5. HARMONİKLİ YÜKLERİ BESLEYEN TRANSFORMATÖRÜN TERMAL MODELLEMESİ, FAYDALI ÖMÜR HESABI VE YÜKLENEBİLİRLİLİĞİ	51
5.1. Elektrik-Termal Benzerlik Teorisinin Esasları	51
5.2. Transformatörün Üst-Yağ Sıcaklığının Termal Modellemesi	52
5.3. Doğrusal Olmayan Termal Özellikleri Dikkate Alarak Transformatörün Üst-Yağ Sıcaklığının Termal Direnç Hesabı	56
5.4. Doğrusal Olmayan Termal Model	60
5.5. Sıcak-Nokta Sıcaklığının Modellenmesi	65
5.6. İzolasyon Yaşlanma Hesabı	68
5.7. Transformatörlerin Faydalı Ömrü	69
5.8. Yüklenebilirlik Hesabı	71
6. HARMONİKLİ YÜKLERİ BESLEYEN TRANSFORMATÖRLERİN OPTİMAL TASARIMI	75
7. DENEYSEL ÇALIŞMALAR VE DOĞRULAMA FAALİYETLERİ..	85
7.1. 630 kVA Transformatörlerin Sıcaklık Artış Deneyleri	91
7.1.1. 630 kVA Rev01 transformatörün harmoniksiz durumda deneyleri	91
7.1.2. 630 kVA Rev01 transformatörün harmonikli durumda deneyleri	93
7.1.3. 630 kVA Rev02 transformatörün harmoniksiz durumda deneyleri	95
7.1.4. 630 kVA Rev02 transformatörün harmonikli durumda deneyleri	97
7.2. 1600 kVA Transformatörlerinin Sıcaklık Artış Deneyleri	99
7.2.1. 1600 kVA Rev01 transformatörün harmoniksiz durumda deneyleri	100
7.2.2. 1600 kVA Rev01 transformatörün harmonikli durumda deneyleri	102
7.2.3. 1600 kVA Rev02 transformatörün harmoniksiz durumda deneyleri	104

Sayfa

7.2.4. 1600 kVA Rev02 transformatörün harmonikli durumda deneyleri.....	106
8. SONUÇ VE ÖNERİLER.....	109
KAYNAKLAR.....	115
ÖZGEÇMİŞ.....	121



ÇİZELGELERİN LİSTESİ

Çizelge	Sayfa
Çizelge 5.1. Termal-Elektrik benzerliğin niceliği	52
Çizelge 5.2. Alüminyum ve bakırın termal kapasitans değerleri	55
Çizelge 5.3. C ve n sabitleri için deneysel değerler	57
Çizelge 6.1. 630 kVA Rev01 transformatörün tasarım bilgileri	77
Çizelge 6.2. 630 kVA Rev02 transformatörün tasarım bilgileri	78
Çizelge 6.3. 1600 kVA Rev01 transformatörün tasarım bilgileri	79
Çizelge 6.4. 1600 kVA Rev02 (CTC) transformatörün tasarım bilgileri	80
Çizelge 6.5. 630 kVA derating transformatörün harmoniksiz anma güç hesap ve harmonik bilgileri	81
Çizelge 6.6. 1600 kVA derating transformatörün harmoniksiz anma güç hesap ve harmonik bilgileri.....	82
Çizelge 6.7. 630 kVA gücü ile ilgili tasarlanan transformatörlerin mali karşılaştırılması	83
Çizelge 6.8. 1600 kVA gücü ile ilgili tasarlanan transformatörlerin mali karşılaştırılması	83
Çizelge 7.1. Rev01 630 kVA'lık transformatörün (TR1'in) özellikleri	86
Çizelge 7.2. Rev02 630 kVA'lık transformatörün (TR2'in) özellikleri	86
Çizelge 7.3. Rev01 1600 kVA'lık transformatörün (TR3'in) özellikleri	87
Çizelge 7.4. Rev02 1600 kVA'lık transformatörün (TR4'in) özellikleri	87
Çizelge 7.5. 630 kVA Rev01 transformatörün harmoniksiz kalıcı durum yağ sıcaklık değerleri	93
Çizelge 7.6. 630 kVA Rev01 transformatörün harmoniksiz durumdaki sıcaklık performansı	93
Çizelge 7.7. 630 kVA Rev01 transformatörün harmoniksiz durumdaki sıcaklık performansı	95
Çizelge 7.8. 630 kVA Rev02 transformatörün harmonikli durumdaki sıcaklık performansı	95

Çizelge	Sayfa
Çizelge 7.9. 630 kVA Rev02 transformatörün harmoniksiz kalıcı durum yağ sıcaklık değerleri.....	97
Çizelge 7.10. 630 kVA Rev02 transformatörün harmoniksiz durumdaki sıcaklık performansı	97
Çizelge 7.11. 630 kVA Rev02 transformatörün harmoniksiz durumdaki sıcaklık performansı	99
Çizelge 7.12. 630 kVA Rev02 transformatörün harmonikli durumdaki sıcaklık performansı	99
Çizelge 7.13. 1600 kVA Rev01 transformatörün harmoniksiz kalıcı durum yağ sıcaklık değerleri.....	101
Çizelge 7.14. 1600 kVA Rev01 transformatörün harmoniksiz durumdaki sıcaklık performansı	101
Çizelge 7.15. 1600 kVA Rev01 transformatörün harmonikli durumdaki sıcaklık performansı	103
Çizelge 7.16. 1600 kVA Rev01 transformatörün harmonikli durumdaki sıcaklık performansı	103
Çizelge 7.17. 1600 kVA Rev02 transformatörün harmoniksiz kalıcı durum yağ sıcaklık değerleri.....	105
Çizelge 7.18. 1600 kVA Rev02 transformatörün harmoniksiz durumdaki sıcaklık performansı	105
Çizelge 7.19. 1600 kVA Rev02 transformatörün harmoniksiz durumdaki sıcaklık performansı	107
Çizelge 7.20. 1600 kVA Rev02 transformatörün harmonikli durumdaki sıcaklık performansı	107

ŞEKİLLERİN LİSTESİ

Şekil	Sayfa
Şekil 2.1. Transformatör sargılarının kayıp ölçüm devresinin şeması. a) güç yükseltici yöntemi b) doğrusal olmayan yük yöntemi.....	15
Şekil 2.2. Harmonikli durumlarda sargıların girdap akım kayıplarının hatalarının azaltılmasına yönelik matematiksel çalışma sonuçları	17
Şekil 2.3. Harmonikli durumlarda sargıların girdap akım kayıplarının hatalarının azaltılmasına yönelik deneysel çalışma	18
Şekil 3.1. Üç fazlı köprü doğrultucu, a) altı darbeli tristörlü köprü doğrultucu b) giriş akımın dalga şekli ve akımın harmonik spektrumu.....	21
Şekil 3.2. Bir bilgisayarın şebekeden çektiği akım, a) akımın dalga şekli b) akımın harmonik spektrumu	22
Şekil 3.3. Tasarruflu bir ampulün (CFL) şebekeden çektiği akım a) akımın dalga şekli, b) akımın harmonik spektrumu	22
Şekil 3.4. Bir ark ocağının akımı ve akım harmonikleri, a) arkın akım-gerilim eğrisi, b) arkın akım dalga şekli, c) akımın harmonik spektrumu	23
Şekil 3.5. Modern bir endüksiyon ocağı a) devre şeması, b)akımın dalga şekli, c)akımın harmonik spektrumu	24
Şekil 3.6. Transformatör, a) nüvesinin B-H eğrisi b) boştaki akımı, c) boştaki akımın harmonik spektrumu	25
Şekil 3.7. Örnek bir transformatörün akım harmoniği.....	26
Şekil 4.1. Elektromanyetik problemlerinin çözüm yöntemleri.....	29
Şekil 4.2. Ansys Maxwell yazılımı ortamında Maxwell bobini ve ortasındakiiletken ...	30
Şekil 4.3. 50 Hz frekansta Maxwell bobini merkezinde konuşlandırılan iletkenin çevreleyen manyetik alan dağılımı	31
Şekil 4.4. 250 Hz frekansta Maxwell bobini merkezinde konuşlandırılan iletkenin çevreleyen manyetik alan dağılımı	31
Şekil 4.5. 1650 Hz frekansta Maxwell bobini merkezinde konuşlandırılan iletkenin çevreleyen manyetik alan dağılımı	32
Şekil 4.6. Farklı çaplarda yuvarlak iletkenlerin frekansa göre girdap akım kayıp faktör değerleri.....	32

Şekil	Sayfa
Şekil 4.7. Farklı kesite sahip dikdörtgen iletkenlerin girdap akım kayıp faktör değerleri	33
Şekil 4.8. Yatay dikdörtgen iletkenin girdap akım kaybından kaynaklanan kayıp dağılımı	33
Şekil 4.9. Dikey dikdörtgen iletkenin girdap akım kaybından kaynaklanan kayıp dağılımı	34
Şekil 4.10. Kare iletkenin girdap akım kaybından kaynaklanan kayıp dağılımı	34
Şekil 4.11. Yatay, dikey ve kare durumunda dikdörtgen iletken üzerinde girdap kaybının frekansa göre değişimi	35
Şekil 4.12. Yatay, dikey ve kare durumunda dikdörtgen iletken üzerinde girdap kayıp faktörünün frekansa göre değişimi.....	35
Şekil 4.13. Deri etkisinden dolayı yuvarlak kesite sahip iletkende a) akım ve b) kayıp dağılımı	36
Şekil 4.14. Deri etkisinden dolayı dikdörtgen iletkende a) akım ve b) kayıp dağılımı ..	37
Şekil 4.15. Yuvarlak iletkenlerde deri etkisinin harmonik kayıp faktör değişimi	37
Şekil 4.16. Dikdörtgen iletkenlerde deri etkisinin harmonik kayıp faktör değişimi.....	38
Şekil 4.17. Yuvarlak iletkenlerde yakınlık etkisinden dolayı akım yoğunluğunun dağılımı	39
Şekil 4.18. Yuvarlak iletkenlerde yakınlık etkisinden dolayı kayıp yoğunluğunun dağılımı	39
Şekil 4.19. dikdörtgen iletkenlerde yakınlık etkisinden dolayı akım yoğunluğunun dağılımı	39
Şekil 4.20. dikdörtgen iletkenlerde yakınlık etkisinden dolayı kayıp dağılımı	40
Şekil 4.21. Yuvarlak iletkenlerde yakınlık etkisinin harmonik kayıp faktörü	40
Şekil 4.22. Yuvarlak iletkenlerde yakınlık etkisinin harmonik kayıp faktörü	41
Şekil 4.23. 2 mm yarıçapa sahip yuvarlak iletkenlerde, girdap akım, deri etkisi ve yakınlık etkisinden dolayı harmonik kayıp faktörlerinin karşılaştırılması ...	42
Şekil 4.24. 5 mm yarıçapa sahip yuvarlak iletkenlerde, girdap akım, deri etkisi ve yakınlık etkisinden dolayı harmonik kayıp faktörlerinin karşılaştırılması ...	42

Şekil	Sayfa
Şekil 4.25. Dikdörtgen bakır iletkenler ve transformatör nüvesi.....	43
Şekil 4.26. Nüveli sargı yapıda (a) akım yoğunluğu (b) kayıp yoğunluğu dağılımı	43
Şekil 4.27. İletkenler üzerindeki harmonik kayıp faktörlerinin frekansa göre değişimi.....	44
Şekil 4.28. Minimum, maksimum ve ortalama harmonik kayıp faktör artışı eğrileri	45
Şekil 4.29. Nüve malzemesinin (M5 sac) frekans ve akı yoğunluğuna göre manyetik geçirgenlik parametresinin (μ) değişimi	46
Şekil 4.30. Transformatörün benzetim ortamında çizimi ve mesh görünümü.....	46
Şekil 4.31. Transformatörün benzetim ortamında çizimi ve mesh görünümü.....	47
Şekil 4.32. 55 paralel CTC iletkenin üzerinde ve çevresinde manyetik alan dağılımı ...	48
Şekil 4.33. 55 paralel CTC iletkenin üzerinde akım dağılımı.....	49
Şekil 4.34. 55 paralel CTC iletkenin üzerinde Kayıp dağılımı.....	49
Şekil 5.1. Elektrik ve termal-elektrik benzer devreleri; (a) RC elektrik devresi, (b) termal elektrik benzer devresi	52
Şekil 5.2. Yağlı tip bir güç transformatörünün üst-yağ sıcaklığının termal modeli	53
Şekil 5.3. Transformatörün üst-yağ sıcaklığının termal modelleri; (a) detaylı termal model, (b) basitleştirilmiş termal model	54
Şekil 5.4. Transformatör yağının fiziksel özelliklerinin sıcaklığa göre değişimi	59
Şekil 5.5. Yağlı tip transformatörün basitleştirilmiş üst-yağ sıcaklığının doğrusal olmayan	61
Şekil 5.6. Serbest ortamda çalışan transformatörün üst-yağ sıcaklık artış modelinin benzetim şeması termal modeli.....	62
Şekil 5.7. Matlab/Simulink ortamındaki yük kayıplarının benzetim şeması	64
Şekil 5.8. Detaylı Sıcak-nokta sıcaklık modeli.....	65
Şekil 5.9. Sıcak-nokta sıcaklık modeli.....	65
Şekil 5.10. Basitleştirilmiş sıcak-nokta sıcaklık modeli	66
Şekil 5.11. Transformatörün sıcak-nokta sıcaklık artış modelinin benzetim şeması.....	68

Şekil	Sayfa
Şekil 5.12. Yağlı tip dağıtım transformatörlerin faydalı ömrü ile sıcak-nokta sıcaklığı arasındaki ilişki	70
Şekil 5.13. Yağlı tip dağıtım transformatörlerinde katı yalıtım malzemesinin yaşlanma faktörü ile sıcak-nokta sıcaklığı arasındaki ilişkisi.....	71
Şekil 5.14. Anma frekansda çalışan transformatörlerin IEEE yöntemi ve sıcak-nokta sıcaklık modelinden hesaplanan yüklenebilirlik eğrileri.....	72
Şekil 5.15. Transformatör içindeki farklı noktaların sıcaklık artışı	73
Şekil 5.16. ONAF ve ODAF transformatörlerin içindeki farklı noktaların sıcaklık artışı.....	73
Şekil 5.17. Harmonikli durumlarda transformatörün yüklenebilme kapasitesinin hesaplanması için kullanılan benzetim programının şeması.....	74
Şekil 6.1. Doğrultucu yükünü besleyen transformatörün benzetimi.....	75
Şekil 7.1. Serbest ortamda sıcaklık-artış deneyinin bağlantı şeması	88
Şekil 7.2. 630 kVA Rev01 transformatörün harmoniksiz durumdaki üst yağ sıcaklık artışı	91
Şekil 7.3. 630 kVA Rev01 transformatörün harmoniksiz durumdaki YG direnç ölçümü.....	92
Şekil 7.4. 630 kVA Rev01 transformatörün harmoniksiz durumdaki AG direnç ölçümü.....	92
Şekil 7.5. 630 kVA Rev01 transformatörün harmonikli durumdaki üst yağ sıcaklık artışı.....	93
Şekil 7.6. 630 kVA Rev01 transformatörün harmonikli durumdaki YG direnç ölçümü.....	94
Şekil 7.7. 630 kVA Rev01 transformatörün harmoniksiz durumdaki AG direnç ölçümü.....	94
Şekil 7.8. 630 kVA Rev02 transformatörün harmoniksiz durumdaki üst yağ sıcaklık artışı.....	95
Şekil 7.9. 630 kVA Rev02 transformatörün harmoniksiz durumdaki YG direnç ölçümü.....	96
Şekil 7.10. 630 kVA Rev02 transformatörün harmoniksiz durumdaki AG direnç ölçümü.....	96

Şekil	Sayfa
Şekil 7.11. 630 kVA Rev02 transformatörün harmonikli durumdaki üst yağ sıcaklık artışı.....	97
Şekil 7.12. 630 kVA Rev02 transformatörün harmonikli durumdaki YG direnç ölçümü.....	98
Şekil 7.13. 630 kVA Rev02 transformatörün harmoniksiz durumdaki AG direnç ölçümü.....	98
Şekil 7.14. 1600 kVA Rev01 transformatörün harmoniksiz durumdaki üst yağ sıcaklık artışı	100
Şekil 7.15. 1600 kVA Rev01 transformatörün harmoniksiz durumdaki YG direnç ölçümü.....	100
Şekil 7.16. 1600 kVA Rev01 transformatörün harmoniksiz durumdaki AG direnç ölçümü.....	101
Şekil 7.17. 1600 kVA Rev01 transformatörün harmonikli durumdaki üst yağ sıcaklık artışı	102
Şekil 7.18. 1600 kVA Rev01 transformatörün harmonikli durumdaki YG direnç ölçümü.....	102
Şekil 7.19. 1600 kVA Rev01 transformatörün harmoniksiz durumdaki AG direnç ölçümü.....	103
Şekil 7.20. 1600 kVA Rev02 transformatörün harmoniksiz durumdaki üst yağ sıcaklık artışı	104
Şekil 7.21. 1600 kVA Rev02 transformatörün harmoniksiz durumdaki YG direnç ölçümü.....	104
Şekil 7.22. 1600 kVA Rev02 transformatörün harmoniksiz durumdaki AG direnç ölçümü.....	105
Şekil 7.23. 1600 kVA Rev02 transformatörün harmonikli durumdaki üst yağ sıcaklık artışı	106
Şekil 7.24. 1600 kVA Rev02 transformatörün harmonikli durumdaki YG direnç ölçümü.....	106
Şekil 7.25. 1600 kVA Rev02 transformatörün harmoniksiz durumdaki AG direnç ölçümü.....	107

RESİMLERİN LİSTESİ

Resim	Sayfa
Resim 7.1. Serbest ortamda yapılan sıcaklık artışı deneleriyle ilgili örnekler.....	89
Resim 1.2. TTS 150 transformatör deney seti	89
Resim 3.1. Deneylerde ölçüm ve kayıt işlemleri için kullanılan cihazlar	90



SİMGELER VE KISALTMALAR

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

Simgeler	Açıklamalar
m^3	Açıklamalar bir satırdan uzun olmamalıdır
db	Desibel
hz	Hertz
m^2	Metrekare
θ	Sıcaklık °C
θ_i	Başlangıç üst-yağ sıcaklığı, °C
θ_{oil}	Transformatörün üst-yağ sıcaklığı, °C
θ_{amb}	Ortam sıcaklığı °C
θ_{tor}	Üst-yağ sıcaklık artışı °C
θ_u	Son üst-yağ sıcaklığı °C
θ_0	sargının malzemesinin süper iletkenlik sıcaklığı
θ_{aex}	Giriş ve çıkış panjurlarının hava sıcaklık farkı
$\theta_{air-room}$	Kapalı ortamdaki havanın sıcaklığı
θ_{hs}	Sıcak-Nokta sıcaklığı
$\Delta\theta_{oil}$	Üst-yağ sıcaklık artışı °C
$\Delta\theta_{tor}$	Üst-yağ sıcaklık artışı anma gücünde, °C
τ_{to}	Üst-yağ sıcaklık artışının zaman sabiti, dakika
C_{el}	Elektrik kondansatörü, farad
C_{th}	Termal kondansatör
C_{tm}	Transformatörün metal aksamın termal kondansatörü
C_{pri}	Primer sargılarının termal kondansatörü
C_{sec}	Sekonder sargılarının termal kondansatörü
C_{th-oil}	Transformatör eşdeğer termal kondansatörü
C_{oil}	Transformatör yağının termal kondansatörü
i	Elektrik akım, amper
v	Elektrik gerilim, volt
q	Güç, w

Simgeler**Açıklamalar**

Q_{fe}	Transformatör demir kaybı
Q_l	Transformatör yük kaybı
Q_{pri}	Transformatör primer sargısının rezistif kayıp
Q_{sec}	Transformatör sekonder sargısının rezistif kayıp
Q_s	Transformatör stray kayıplar
Q_{tot}	Transformatörün toplam kayıpları
$Q_{cu-load}$	Transformatör sargılarının rezistif ve kayıpları
$Q_{st-load}$	Transformatör Sargıların stray kayıpları
Q_{cu-ref}	referans sıcaklığında transformatörün bakır kayıpları
Q_{st-ref}	transformatörün referans sıcaklıkta anma stray kaybı
Q_{cabin}	Kabin bileşenlerinin güç kayıpları
Q_{tot}	Anma güçteki toplam kayıplar
R_{o-a}	Transformatör-ortam arası termal direnç
R_{tm-o}	Transformatör metal aksam yağ arası termal direnç
R_{fe-o}	Transformatör nüve yağ arası termal direnç
R_{w-o}	Transformatör sargı yağ arası termal direnç
R_{el}	Elektrik direnç, ohm
R_{th}	Termal direnç
$R_{th-oil-room}$	Transformatör ile prefabrik merkez arasındaki ortam termal direnç
$R_{room-amb}$	Prefabrik merkezin ortamı ile dış ortam arası termal direnç
R_{vent}	Hava akış panjurunun termal direnci
R_{th-wdg}	Transformatör sargının termal direncini
R_{th-ins}	Transformatör katı yalıtımın termal direncini
$R_{th-ins-oil}$	Transformatör katı yalıtım malzemesiyle yağ arası termal direnci
A	Transformatörün soğutma yüzeyi, m^2
C	Transformatörün Nusselt sayısı hesabındaki deneysel sabit
β_{oil}	Yağın genleşme katsayısı
ρ_{oil}	Yağın yoğunluğu

Simgeler**Açıklamalar**

μ	Yağın akışkanlığı
Coil	Transformatör yağının özel termal kondansatörü
n	Yağın katsayısı
g	Yerçekimi sabiti
h	Isı transfer katsayısı
k	Yağın öz termal iletkenliği
K	K-Faktör
L	Boyut özelliği
G_r	Grashof sayısı
N_u	Nusselt sayısı
P_r	Prantl sayısı
R_a	Rayleigh sayısı
P_l	Doğal havalandırma yoluyla transfer edilen ısı
H	Prefabrik merkezinin gövdesinin yüksekliği
S	Hava akış panjurlarının giriş ve çıkış alanı
R_A	Transformatörün faydalı ömür kayıp oranı
LOL	Transformatörün toplam faydalı ömür kaybı
B_L	Transformatör ömür kaybında boyutsuz sabit sayı
C_L	Transformatör ömür kaybında boyutsuz sabit sayı
F_{hl}	Harmonik kayıp faktörü
F	Frekans

Kısaltmalar**Açıklamalar**

AG	Alçak gerilim
CTC	Continuously transposed conductors
IEC	International Electrotechnical Commission
IEEE	Institute of Electrical and Electronics Engineers
ODAF	Oil Directed, Air Forced (Yönlendirilmiş yağ, Zorlamalı hava) soğutma
OFAF	Oil Forced, Air Forced (Zorlamalı yağ, Zorlamalı hava) soğutma

Kısaltmalar**Açıklamalar****OG**

Orta gerilim

ONAFOil Nature, Air Forced (Doğal yağ, Zorlamalı hava)
soğutma**ONAN**Oil Nature, Air Nature (Doğal yağ, doğal hava)
soğutma**THB**

Toplam harmonik bozulumu

YG

Yüksek gerilim



1. GİRİŞ

Günümüzde elektrik enerjisine olan talebin hızla artması, elektrik alıcılarının çok çeşitlilik göstermesi ve doğrusal olmayan yarı iletken güç elemanlarının sık kullanılması şebekeden çekilen akımın bozulmasına (sinüs şeklinden çıkmasına) dolayısıyla akım harmoniklerinin üretilmesine yol açmaktadır.

Teknolojinin hızla gelişim ve değişimi sonucunda ortaya çıkan yeni yöntemler, çözümler, devre ve kontrol teknikleri, günden güne tüketicilerin evlerde ve işyerlerinde kullandıkları cihazların (bilgisayar, TV, fotokopi makinesi, motor sürücüleri, kaynak makineleri, endüksiyon ve ark fırınları, flüoresan lambalar, DA sarj aletleri, elektrikli arabalar v.b.) artması nedeniyle istenmeyen harmonikli akım ve gerilimlerin artması kaçınılmaz hale gelmiştir [28, 29].

Elektrik şebekesinde çeşitli amaçlarla iletkenler kullanılmaktadır. Bu iletkenler elektrik üretiminden son tüketim noktasına kadar elektrik şebekesinin ana unsurlarını oluşturmaktadır.

Bu iletkenler üretim noktasında jeneratörlerde sargılar şeklinde, üretim şebekesinin taşıma şebekesine bağlamak amacıyla taşıma ve iletim hatlarıjenerasyon şebekesinin iletim şebekesine bağlamak için yükseltici transformatörlerinde sargılar halinde, YG/OG indirici transformatörlerde sargısı şeklinde, dağıtım şebekesinde OG/AG dağıtım transformatörlerinde, modern iletim ve dağıtım şebekelerinde YG, OG ve AG indüktörü şeklinde, tüketici tarafında motor sargıları gibi çeşitli şekillerde kullanılmaktadır.

İletkenlerin elektrik şebekesinde ve cihazlarında kullanım amacı yüksek iletkenlik özelliğinden dolayı elektrik gücünü en az kayıpla iletmesi veya elektrik gücü manyetik alana çevirmesi veya bunun tersidir.

İletkenlerde kayıpların oluşumu istenmeyen bir olaydır. Bu yüzden iletkenler belli bir akımı taşımak için belirli kriterler göz önünde bulundurarak tasarlanırlar (Bu kriterler çalışma sıcaklığı, kayıp miktarı, gerilim düşümü ve benzeri kriterlerdir). Uzun senelerdir elektrik iletkenleri sargılar halinde hayatımızda rol oynamaktadır, bu yüzden uzun senelerdir bilimsel araştırmalar ve akademik çalışmalar sayesinde hemen hemen optimal bir biçimde

tasarlanıp kullanılmaktadırlar. Bu optimal tasarımlar standart ürünlere dönüşmüştür. Mevcut çalışmalar şebekenin anma frekansına göre yapılmıştır.

Fakat günümüzde doğrusal olmayan yarı iletken güç elemanlarının sık kullanılması, şebekeden çekilen akımın harmonikli olmasına yol açmaktadır. Harmonikli akım çekilmesi durumunda sargılarda meydana gelen kayıplar anma frekansındaki kayıplarla aynı olmadığından bu optimal tasarımlar tekrar gözden geçirilmelidir. Harmonikli akımlar ile ilgili çalışmalar literatürde mevcuttur ve bu konudaki çalışmalar sürmektedir. Bu çalışmaların büyük bir kısmı k-faktör yöntemine dayanarak yapılmış olup sadece girdap akımı kayıpları dikkate alınmıştır.

Elektrik üretiminin çeşitli aşamalarında güç transformatörleri kullanılmaktadır. Transformatör, güç iletim ve dağıtım zinciri içerisinde, büyük yatırım maliyeti ve tedarik süresinin uzun olması açısından en önemli elemandır. Elektrik şebekelerinin en önemli elemanlarından olan transformatörlerde kayıpların oluşturdukları sıcaklık, sargı yüksekliği boyunca oluşmaktadır. Söz konusu sıcaklığın kullanılan yalıtım malzemesi üzerindeki etkisi transformatörün ömrünü belirleyeceğinden, izolasyon malzemelerinin doğru bir şekilde seçilmesi gerekmektedir. Yalıtımın yaşlanması, yalıtım sıcaklığı, nem seviyesi ve içerdiği oksijenin, zamana bağlı bir fonksiyonu olarak ifade edilmektedir [1].

Yeni tasarlanan yağlı tip transformatörlerde nem düzeyi ve oksijen miktarı kontrol altına alınabilmektedir [bizim çalışma]. Bu nedenle, geriye kalan ve kontrol altına alınması gereken en önemli parametre transformatörün çalışma sıcaklığı olarak ifade edilebilir. Bu amaca ulaşmak için transformatörün termal model çalışması daha da önem kazanmaktadır. Güç transformatörünün yüklenebilirlik profilini yönetmek, transformatörü verimli ve ekonomik çalıştırmak için termal modelinin önemi daha da artmaktadır [3, 5].

Günümüzde elektrik enerjisine olan talebin hızla artması, elektrik alıcılarının çok çeşitlilik göstermesi, doğrusal olmayan yarı iletken güç elemanlarının sık kullanılması, şebekeden doğrusal olmayan akımların çekilmesine, dolayısıyla harmoniklerin üretilmesine yol açmaktadır. Bu harmonikler şebekede çalışmakta olan Transformatörleri olumsuz yönde etkilemektedir. Transformatörlerde meydana gelen herhangi bir problemten dolayı elektrik kesintileri meydana gelerek ekonomiye ciddi zararlar verebilmektedir. Bu gerçekler dikkate alındığında, elektrik sistemlerindeki transformatörler daha güvenilir ve ekonomik

çalıştırılması büyük önem kazanmaktadır. Harmonikli akımlardan dolayı transformatör sargılarının kayıpları artarak sargıların çalışma sıcaklığını yükseltmektedir. Sıcaklık artışı sargı yalıtımını hızla yaşlandırarak sargının faydalı ömrünün azalmasına sebep olmaktadır.

1980'lerden bu yana harmoniklerden dolayı sargılarda meydana gelen ek kayıplar incelenmiş ve üzerinde çeşitli çalışmalar yapılmıştır. Harmonikli durumlarla ilgili standartların kayıp faktörünün hesaplanmasıyla ilgili sunduğu yöntemlerin ve bu yöntemlerin düzeltilmesiyle ilgili sunulan çalışmaların eksik yönleri bulunmaktadır. Bu çalışmalar sadece girdap akım kayıplarını dikkate almaktadırlar. Yapılan çalışmalarda kayıpları ciddi şekilde etkileyen deri etkisi, yakınlık etkisi, nüve malzemesinin doğrusal olmayan özelliklerinden kaynaklanan etkileri göz ardı etmişlerdir. Halbuki bu etkilerin kayıpların net miktarı üzerindeki etkinliği göz ardı edilemeyecek miktardadır. Kayıpların net miktarının yanı sıra, söz konusu kayıpların sargı boyunca dağılım profili ve iletken üzerinde iletken dış yüzeyinde ve dolayısıyla izolasyon ile iletkenin temas noktasında yoğunlanmış olması ciddi önem kazanmaktadır. Literatürdeki düzeltilmiş harmonik kayıp faktörü yöntemlerinde iletkenin manyetik alan yönünden bağımsız incelenmesi ve iletkenin ebadının birbirine oranını göz ardı ederek hesaplandığından bu yöntemin hatalı olduğu tespit edilmiştir. Ayrıca literatürde mevcut olan çalışmalarda, kayıp faktörünün sargı boyunca homojen olduğu varsayıp sargının değişik bölgelerindeki kayıp ve kayıp artışının farkı ortaya konamamaktadır. Literatürdeki mevcut AA direnç hesabından yola çıkan çalışmalarda ise sargılar birbirinden ayırt edilmeyip basitleştirilmiş eşdeğer devredeki toplam sargı direnci hesaplanmıştır (primer ve sekonder sargıları ayırmamaktadır). Halbuki sargılar kesit farkından ve manyetik alanda konumu itibari ile farklı yakınlık etkisine sahip olduğundan dolayı, primer ve sekonder frekans tanım bölgesinde farklı davranışlara sahiptirler. Bu çalışmalarda da sargı boyunca kayıpların yoğunluğu ve kayıp dağılım profili sunulmamıştır. Bu çalışmalarda önerilen kayıp ölçüm yöntemleri yüksek akım ve gerilimler için elverişli değildir ve sadece düşük güçte ve düşük gerilimde olan sargılara uygulanabilmektedir. Ayrıca sunulan eğri ve denklemler sadece deneyi yapılan sargılar için geçerli olup genel bir denklem veya eğri sunmamaktadır.

Literatürdeki mevcut çalışmaların yetersizliği transformatör sargılarının kayıp hesabında ciddi hatalara neden olmuştur. Bu çalışmada söz konusu hata kaynakları tespit edilmiştir. Bu hataların temel kaynağı hesaplamalarda sadece girdap akım kayıplarından yola çıkıp iletkenlerin kayıplarında etken rol oynayan deri etkisi ve yakınlık etkisinin göz ardı

edilemeyecek kadar etkili olduğu tespit edilip tez çerçevesinde yapılan çalışmalar ile literatürdeki bu etkilerin boşluğu giderilmiştir. Bu boşlukların giderilmesi için sonlu elemanlar ile sargıların analizi harmonikli akımlar durumunda gerçekleştirilmiştir. Bu durumlarda sonlu elemanların analizi hem frekans tanım bölgesinde hem de zaman tanım bölgesinde (geçici- transient) gerçekleştirilmiştir. Sonlu eleman analiz çalışmaları Maxwell yazılımı ortamında gerçekleştirilmiştir. Bu ortamda çözümü yapılacak problemler detaylı biçimde yazılımda tanımlanmıştır. Sonlu elemanlar yöntemi ile yapılan Analizlerde kullanılan materyallerin özellikleri, doğrusal olmayan ve frekans ile değişecek şekilde tanımlanmıştır. Sonlu eleman çalışmaları sonucunda harmonik kayıp faktörü eğrileri (farklı iletken ve farklı sargı yapısına sahip) elde edilmiştir. Bu eğriler sayesinde sargıların harmoniklerden dolayı kayıpları hesaplanmıştır. Ayrıca her sargı için iletkenlerin sargıdaki konumuna göre ayrı ayrı eğrileri, dolayısıyla kayıpların sargı boyunca dağılımı elde edilmiştir.

Tezin çerçevesinde elde edilen sonuçlar sayesinde yüksek frekans veya harmonikli akımlar içeren transformatör sargılarının tasarımında kullanmak üzere güvenilir, optimal ve ekonomik bir tasarım alt yapısı geliştirilmiştir. Optimal tasarım yaklaşımı dikkate alınarak 4 farklı transformatör tasarımı gerçekleştirilmiştir. Tasarımı gerçekleştirilen transformatörlerin imalatı gerçekleştirilmiştir. İlgili transformatörlerin rutin deneyleri IEC standardında uygun olarak uygulanmıştır. Uygulanan deneyleri sayesinde tasarım doğrulaması sağlanmıştır. Deneyden elde edilen sonuçlara dayanarak, ve IEC 60076-3 ve IEEE C57.110 standartlarına [64] uygun olarak sıcaklık artış testleri harmonikli ve harmoniksiz durumlarda gerçekleştirilip karşılaştırılmıştır. Sıcaklık artış deney sonuçlarına dayanarak transformatör performans ve faydalı ömür hesaplamaları yapıp, ilgili transformatörlerin optimal tasarım doğrulamaları gerçekleştirilmiştir.

Yağlı tip güç transformatörlerinin termal performansında “transformatörün üst-yağ sıcaklık analizi” önemli bir çalışma alanı oluşturmaktadır. Termal modelleme konusuyla ilgili yayınlanan birçok çalışmada, transformatörün üst-yağ sıcaklık analizi sadece matematiksel olarak incelenmektedir [1, 2, 3, 4, 12, 21, 26]. Son zamanlarda yayınlanan makalelerde termal analiz çalışmaları, termal-elektrik benzerlik yöntemini kullanarak yapılmaktadır. Bu yöntemde, termal analiz çalışmaları elektrik devre analiz yöntemlerinden yararlanarak yürütülmektedir. Bu yöntemin kullanımı, konunun incelenip anlaşılmasında elektrik-

elektronik mühendisliği açısından oldukça kolaylık sağlamaktadır [5, 6, 9, 10, 11, 14, 18, 27].

Tez çalışmaları kapsamında yapılan modelleme çalışmalarında da, transformatörün üst-yağ ve sıcak-nokta sıcaklığı analizi, termal-elektrik benzerlik yöntemine dayanarak yapılmaktadır. Literatürde konuyla ilgili yer alan yayınların olumlu ve olumsuz yönleri aşağıda verilmektedir:

Transformatörün üst-yağ sıcaklığının termal direnci, [27]'de önerilen termal-elektrik benzerlik modelinde sabit olarak dikkate alınmaktadır. Referans [5]'te üst-yağ termal direnci sabit olarak alınmakta ve ortam sıcaklığı modele dahil edilmemektedir.

[6] ve [14] nolu referanslarda sunulan çalışmalarda üst-yağ termal direnci sabit alınmamaktadır, fakat bu çalışmalarda termal modelin parametreleri transformatörden elde edilen üç aylık verilerden tahmin edilmektedir. Bu nedenle, önerilen termal model, genel bir model olmayıp belirli bir transformatör için geçerlidir. Referans [9]'da verilen termal model, [5]'te sunulan modelin basitleştirilmiş hali olup ilgili modelin dezavantajlarını taşımaktadır.

Referans [11]'de termal direnç, doğrusal olmayan bir parametre olarak dikkate alınmakta ve ortam sıcaklığı önerilen modele dahil edilmektedir. Bu çalışmada [11], termal kapasitans hesaplamalarında sadece transformatörünün yağ miktarı dikkate alınmakta ancak nüve, tank, sargılar ve diğer metal parçaları dikkate alınmamaktadır [22].

Genel olarak, yağlı tip dağıtım transformatörlerinin termal model çalışmalarıyla ilgili yapılan çalışmalarda, transformatörün anma frekansta (harmoniksiz) çalışma durumu dikkate alınmaktadır.

Literatürde transformatörlerin harmonikli yükleri beslemekte olduğu çalışma durumları ile ilgili yeterli ve detaylı termal modelleme çalışması bulunmamaktadır. Konuyla ilgili literatürdeki eksiklikler, tez kapsamında yürütülen çalışma sonucunda elde edilen sonuçlarla giderilecektir.

Bu tezin temel amacı akım harmoniklerinin girdap, deri etkisi ve yakınlık etkisinden dolayı iletken sargıları kayıpları üzerinde artışının sonlu elemanlar yöntemi ile incelenmesi ve bu

kayıpların ölçümü için güç elektroniği yöntemlerine dayanarak deney yöntemi ve düzeneğinin geliştirilmesidir.

Temel amaç doğrultusunda tezin farklı aşamalarında ulaşılan ve ulaşılmaması beklenen sonuçlar aşağıda özetle verilmektedir:

1. Sargılarda meydana gelen stray kayıpların kaynağı (girdap akım, deri etkisi ve yakınlık etkisi başlıklar altında) ve miktarı, ayrıca bu kaynakların etkinliği sonlu elemanlar yöntemi ile araştırılıp incelenmiştir.
2. Sonlu Elemanlar Yöntemiyle (FEM) harmonikli ve harmoniksiz (anma frekansta) durumlarıyla ilgili değişik sargı kombinasyonlarında sargının toplam ve stray kayıplarının miktarı ve dağılımının incelenmesi, sargı boyunca kayıpların yoğunluk ve miktarının hesaplanması yapılmıştır.
3. Harmoniksiz ve harmonikli durum sonuçlarının karşılaştırılması ve harmonik numarası ve miktarına göre kayıpların artış faktörünün elde edilmiştir.
4. Kayıpların sargı boyunca ortalaması ve yoğun olduğu bölgelerin belirlenmesi, kayıpların ortalama ve en çok olan yerlerinde kayıp artış faktörünün geliştirilmiştir ve bu faktöre ait eğriler elde edilmiştir.
5. Elde edilen eğrilere dayanarak standart yöntemlerin sunduğu harmonik kayıp faktörü hesaplamalarının düzeltilmesi yapılmıştır.
6. Farklı iletken şekline (yuvarlak veya dikdörtgen) ve iletkenin kesitinin miktarına ve kesit ebadına göre sargıların kayıp faktörlerinin (ortalama ve en yüksek) elde edilmiştir.
7. Elde edilen kayıp faktörlerinin kullanarak transformatörün termal modelleri geliştirilip harmonikli durumlara uyumlu olması sağlanmıştır.
8. Tez çerçevesinde geliştirilecek modellere dayanarak transformatörün izolasyon malzemesinin yaşlanma modeli çıkartılacaktır ve transformatörün faydalı ömrü hesaplanmıştır.
9. Faydalı ömür hesaplarına göre optimal yükleme eğrileri elde edilmiştir.
10. Optimal yükleme, K- faktörü hesabına göre ve bunları dikkate almadan anma güçte yüklemeye göre ekonomik hesaplamaları yapılacaktır 3 durum birbiri ile karşılaştırılmıştır.
11. Tez çalışmaları çerçevesinde geliştirilen yöntemler ve sonuçlara dayanarak tasarımları gözden geçirilmesi ile ilgili çalışmalar yapılmıştır.
12. Yeni tasarım yaklaşımı ve standart de rating hesabı karşılaştırılıp ekonomik ve teknik avantaj ve dezavantajları karşılaştırılmıştır.

Tezin konusu, doğrusal olmayan yüklerde meydana gelen harmonikli akımların sargılarda neden olduğu ek kayıpların analizi ve bu kayıpların ölçümüdür. Sargılar belirli bir güç (akım ve gerilim), frekans ve koşullara uygun tasarlanmaktadır. Söz konusu sargıların faydalı ömrü kullandıkları yalıtımının yaşlanma hızına bağlıdır. Bu sargıların kayıplarından dolayı meydana gelen sıcaklığın yalıtım malzemeleri üzerindeki etkisi dikkate alınmalıdır. Meydana gelen sıcaklık ve sıcaklık artışı sargı yalıtım malzemelerini yaşlandırarak (aging) sargının ve dolayısıyla sargının kullanıldığı cihazın (transformatör, indüktör, motor v.b) faydalı ömrünün azalmasına neden olmaktadır. Belirli bir güç ve çalışma sıcaklığına göre tasarlanan bir sargının faydalı ömrü çalışma koşullarına bağlıdır. Doğrusal olmayan yükler, ürettikleri akım harmoniklerinden dolayı sargı kayıplarının artmasına ve dolayısıyla çalışma sıcaklık artışına neden olmaktadır. Buna göre doğrusal olmayan yükler doğrusal yüklere göre sargılarda daha yüksek sıcaklık artışına sebep olarak bu sargıların faydalı ömrünü azaltmaktadır.

Tezin temel amacı harmonikli akımları geçirmekte olan sargılarda, bu harmonikli akımlardan dolayı artan kayıpların detaylı ve dikkatli bir biçimde hesaplanmasıdır. Bu hesaplama yöntemleri ve değişik çaplardaki iletkenler için hesaplama eğrisinin elde edilmesi tezin kapsamında bulunmaktadır. Teorik ve sonlu elemanlar yöntemine dayalı sonuçlarının doğrulanması için deneysel çalışmalar yapılacaktır. Farklı sargıların kayıp ölçümü değişik harmonikli akımlarda gerçekleştirilecektir. Harmonikli akımları üretmek amacıyla bir deney düzeneği geliştirilecektir. Geliştirilecek düzenek sayesinde değişik harmonikli akımlarda sargı kayıpları ölçülecektir. Teorik ve deneysel sonuçlar karşılaştırılıp bilimsel olarak değerlendirilecektir.

Tez kapsamında aşağıda verilen konular gerçekleştirilmiştir.

- 1- Konuyla ilgili literatür araştırması yapılmıştır ve sürekli olarak literatür takip edilmiştir.
- 2- Sonlu Elemanlar Yöntemiyle (FEM) harmonikli durumlarda sargı kayıp hesaplamaları yapılmıştır.
- 3- İncelenen sargıların, transformatör ve indüktör sargılarına ait olması dikkate alınmıştır (Manyetik devreye sahip olması).
- 4- Literatürde harmonikli durumlarla ilgili güç kayıp hesaplamalarında sargı nüvesinin doğrusal olmayan özelliği dikkate alınmamıştır. Tez çalışmalarında nüvenin doğrusal olmayan özellikleri dikkate alınarak kayıp hesaplamaları yapılmıştır.

- 5- Yapılan incelemelerin sadece girdap akım kaybını değil deri etkisini ve yakınlık etkisini içermesi ile sonuçlar elde edilmiştir.
- 6- Kayıp hesaplama ve ölçümlerin sargı boyunca hem ortalama hem de dağılımın ve kritik bölgelerin belirlenmesi yapılmıştır

Yukarıda bahsedilen hususlar dikkate alınarak tez çalışmaları yapıp bu çerçevede yapılan çalışmalar yedi bölümde anlatılmıştır.

Birinci bölüm “Giriş” başlığı altında, harmonikli yüklerin şebekedeki artışı ve bu harmonikli yüklerden dolayı transformatörlerde meydana gelen aşırı ısınma hususu ile ilgili yapılan çalışmaların özeti aktarılıp

İkinci bölümde “Harmoniklerin transformatör üzerindeki etki ile ilgili literatürdeki çalışmalar” başlık altında, harmonikli yükleri beslemekte olan transformatörler ile ilgili ve bu harmoniklerin transformatör üzerinde etkilerinin inceleyen çalışmaların özeti verilmiş olup, çalışmaların avantaj ve dezavantajları üzerinde çalışmalar yapılmıştır.

Üçüncü bölümde ise harmonik üreten yüklerin en önemlileri olan enformatik ve endüstriyel yüklerin harmonik dağılımı ve bu harmoniklerin spektrumu incelenmiştir.

Dördüncü bölümde sonlu elemanlar yöntemi ile harmonik kayıp faktör hesaplamaları ve değişik iletken üzerinde farklı analizler yapılmıştır. Girdap akım kayıp analizleri ve frekans dağılımına göre, yapılan analizler gerçek manyetik devreye sahip sargılarda incelenmiştir.

Beşinci bölümde Transformatörün termal modelleri elde edilerek benzetim çalışmaları yapılmıştır. Elde edilen modeli kullanarak tezin temel amacı olan harmonikli yükleri besleyen yağlı-tip dağıtım transformatörleriyle ilgili optimal yüklenebilirlik yönetimi geliştirilmiştir.

Altıncı bölümde harmonikli yükleri besleyen transformatörlerin optimal tasarımı çalışmaları anlatılıp, dört farklı transformatör tasarımı gerçekleştirilmiştir. Tasarımı gerçekleştirilen transformatörlerin yapımı gerçekleştirilmiştir. Prototip transformatörlerin rutin testleri yapıp, sıcaklık artış deneyleri harmoniksiz ve harmonikli koşullarda gerçekleştirilmiştir.

Yedinci bölümde tez kapsamında elde edilen sonuçlar tartışılıp, elde edilen deneysel ve tasarım çalışmaları karşılaştırılmıştır. Çalışmanın avantaj ve dezavantajları üzerinde tartışmalar yapılp, bir sonraki çalışma alanlarına yol tutulması hakkında fikirler üretilmiştir.





2. HARMONİKLERİN TRANSFORMATÖR ÜZERİNDEKİ ETKİ İLE İLGİLİ LİTERATÜRDEKİ ÇALIŞMALAR

Bu bölümde, tez konu ve kapsamı ile ilgili literatür araştırması sunulmaktadır. Konu ile ilgili çalışmalar farklı başlıklar altında kategorize edilmiş olup, çalışmaların ilgili kategori içerisinde tartışmaları gerçekleştirilmiştir. Harmonikli yüklerin transformatör üzerinde etkisi ile ilgili temel kavramlar açıklanmıştır.

Dalga şeklinin bozulmasını tanımlayan harmonik terimi, elektrik sistemlerinin kalitesi alanında bilinen en popüler terimlerden biridir [7, 10, 11, 17]. 1970'lerin sonlarından itibaren elektronik güç dönüştürücülerinin yaygınlaşmasıyla, güç sistemlerindeki bozulmalar ve harmonikler, elektrik mühendisliği alanın sorunları kapsamına girmiştir. 1973'te petrol ambargosu sonrasında, enerji fiyatlarının hızla yükselişi güç dönüştürücüler üzerine yapılan çalışmalar için dönüm noktasıdır [10]. 1980'lerden itibaren harmoniklerin elektrik şebekesi üzerindeki olumsuz etkileri ve bu etkilere karşı alınan tedbirler literatürün popüler araştırma alanlarından olmuştur[8, 10, 11]. Ancak şebekeye bağlı doğrusal olmayan yüklerin az olmasından dolayı, 21. yüzyılın başlangıcına kadar söz konusu akım dalga şeklindeki bozulmalar elektrik şebekesinin genelini çok etkilememektedir [7, 11]. Örneğin 2000' li yılların başında sadece Amerika'nın kuzeyindeki fiderlerde bu bozulmalar rapor edilmiştir [11].

21. yüzyılın başlangıcıyla doğrusal olmayan yüklerin ev, ofis ve endüstriyel uygulamalarda kullanımının artışıyla, elektrik şebekesi ile ilgili 1980' lerde düşünülen endişeler tekrar gündeme gelmişlerdir. Önceden bölgesel olarak görülen harmonik sorunları şebekenin tümünde görülmeye başlanmıştır. Bu yüklerin gün geçtikçe artması (bilgisayar, TV, fotokopi makinesi, motor sürücüler, kaynak makineleri, endüksiyon ve ark fırınları, flüoresan lambalar, v.b.) güç kalitesini şebekede daha da fazla etkilemektedir [11, 14, 16]. Gün geçtikçe artmakta olan akım harmonikleri, transformatörler üzerinde de etkilerini göstermeye başlamıştır.

Ofis ve ev tipi küçük yüklerin yanı sıra büyük sanayi ve güç sistem ekipmanları da harmoniklerin kaynağı olarak sayılabilirler. Örneğin HVDC iletim sistemleri, FACTS, STATCOM v.b. etkinlik ve kontrol açısından büyük avantajlara sahip olmasından ötürü, güç elektroniği yükleri hızla çoğalmakta ve alçak gerilim uygulamalarından yüksek gerilim çevirgeçlerine kadar güç kademelerinin bütününde bulunabilmektedir [7, 11].

Güç sistemlerinde harmonikler güç faktörü düzenleyiciler ile düzeltilse de bu düzenleyicilerden önceki sargılardan geçen akımlar hala harmoniklidir. Ayrıca düzenleyiciler THB kriterinin üzerinde karar verir ve harmonikleri tamamen yok etmeyip belli bir THB değerine kadar düşürür. Bu düzeltmeler genelde düşük sayı numaralı harmoniklerin (3, 5, 7, 9, 11 ve 13 gibi) azaltılmasına yönelik olup yüksek numaradaki harmoniklerin elenmesini gerçekleştirmemektedir. Halbuki harmonik numarası değişince kayıplar daha büyük bir çarpan ile (harmonik numarasının birden fazla kuvveti ile) artmaktadır. Yani büyük numaralı harmonikler THB parametresinde göz ardı edilebilir olsa da kayıplar açısından göz ardı edilemeyecek büyüklüklerde güç kaybına yol açabilirler.

Elektrik makinelerinde (transformatör, indüktör, jeneratör veya motorlar) kullanılan sargılar anma frekansa göre (50 veya 60 Hz) tasarlanmaktadır. Fakat bu sargılar harmonik içeren akımları geçirdiklerinde anma frekanstan farklı bir şekilde sargıda stray kayıplar meydana gelmektedir.

2.1. Harmonik Akımlarının I^2R Kaybına Etkisi

Eğer yük akımının rms değeri harmonik bileşenlerden dolayı arttırılırsa, I^2R kaybı da aynı doğrultuda artacaktır.

Literatürde sargılardaki girdap akım kayıplarının incelenmesi 3 başlık altında özetlenebilir; a- K-faktör ve FHL yöntemlerini baz alan çalışmalar, b- Düzeltilmiş kayıp faktörü çalışmaları, c- AA direnç artışı hesaplamaları ve ölçümleri.

2.2. K-Faktör Yöntemi

K-Faktörü yöntemi, IEEE 1100-2005 standart yönetmenliğinde açıklanmıştır [62]. Bu standartta “K-Faktörü” ile ilgili bilgi yer almaktadır. Bu parametre (K-Faktör) ilk olarak ABD’de transformatör imalatçıları tarafından harmonikli durumlarla ilgili olarak tanımlanmıştır [9, 14, 18]. K-faktörü, harmonikli durumlarda girdap akım kayıplarının artışıyla ilgili bir parametredir. K-faktörü Eş. 2.1’den elde edilmektedir. Burada I_h ’nın değeri “birim başına (per-unit)” olarak dikkate alınmaktadır. Harmonikli durumdaki girdap akım kayıpları anma frekansındaki girdap akım kayıplarının “K” katıdır [2, 4, 8, 9, 14, 17, 18]. Harmoniksiz durumda K faktör değeri 1 olacaktır.

$$K = \sum_{h=1}^{h=h_{\max}} h^2 I_h^2 \quad (2.1)$$

$$P_{EC-h} = K_{PEC-anma} \quad (2.2)$$

2.3. Harmonik Kayıp Faktör Yöntemi, F_{HL}

F_{HL} ile gösterilen sargı girdap akımları kaybı için harmonik kayıp faktörü, harmoniklerden kaynaklanan toplam sargı girdap akımları kaybının (P_{EC}), harmonik olmadığı durumda anma frekansındaki sargı girdap akımları kaybına (P_{EC-O}) oranıdır [1, 3,5, 6, 11, 19]. Eş. 2.3'teki gibi ifade edilir:

$$F_{HL} = \frac{P_{EC}}{P_{EC-O}} = \frac{\sum_{h=1}^{h=h_{\max}} I_h^2 h^2}{\sum_{h=1}^{h=h_{\max}} I_h^2} \quad (2.3)$$

K-faktörü ile F_{HL} arasındaki ilişki Eş. 2.4'te gösterilmektedir. K-faktörü sargının anma akımından bağımsız bir parametre olduğundan Eş. 4'teki bağıntı ortaya çıkmıştır [10, 11, 18].

$$K - \text{faktörü} = \left[\frac{\sum_{h=1}^{h=h_{\max}} I_h^2}{I_R^2} \right] F_{HL} \quad (2.4)$$

Literatürde birçok çalışmada k-faktörü veya FHL değerleri kullanılmıştır [1, 2, 3, 4, 9, 14,17]. Bu değerler girdap akım kayıplarını difüzyon denklemlerinin çözümünde bazı varsayımları kullanarak elde edilmiştir.

İletkeni kesen manyetik alanın değişimi, iletken üzerinde girdap akımlar oluşturarak kayıplara yol açmaktadır.

Düşük frekanslarda kayıpların hesaplanması için difüzyon denklemleri kullanılmaktadır. Bu denklemlerin hesabı için Amper Yasası'ndan yola çıkabiliriz. Amper Yasası Eş. 2.5'te

gösterilmiştir. Eş. 2.5'in iki tarafının rotasyoneli (curl) alındığında Eş. 2.6'daki hale dönüşür. Gauss Yasası'na göre $\nabla \cdot H = 0$ olduğundan Eş. 2.6, Eş. 2.7'deki şekle dönüşür.

$$\nabla \times H = J \quad (2.5)$$

$$\nabla(\nabla \cdot H) - \nabla^2 H = \nabla \times J \quad (2.6)$$

$$-\nabla^2 H = \nabla \times J \quad (2.7)$$

İletken üzerinde girdap kayıplarının hesaplanması için difüzyon denkleminde (Eş. 5.7) akım hesaplanıp iletken hacminde ve bir periyotta J^2 / σ integrali alınmakla toplam girdap kayıpları Eş. 5.8'den elde edilir. Akım yoğunluğu periyodik olarak değiştiğinde akım yoğunluğu yerine akım fazörü yazılır ve Eş. 5.8, Eş. 5.9'a dönüştürülebilir.

$$P_{eddy} = \int_V \int_{t1}^{t2} \frac{J^2(t)}{\sigma} dt dV \quad (2.8)$$

$$P_{eddy} = \int_V \frac{|J|^2}{\sigma} dV \quad (2.9)$$

İletken ve iletkeni kesen manyetik alan homojen varsayıldığında, iletken üzerinde oluşan girdap akım kayıpları Eş. 5.10'dan hesaplanabilir.

$$P_{eddy} = \frac{\pi^2 B_p^2 d^2 f^2}{6k\rho D_c} \quad (2.10)$$

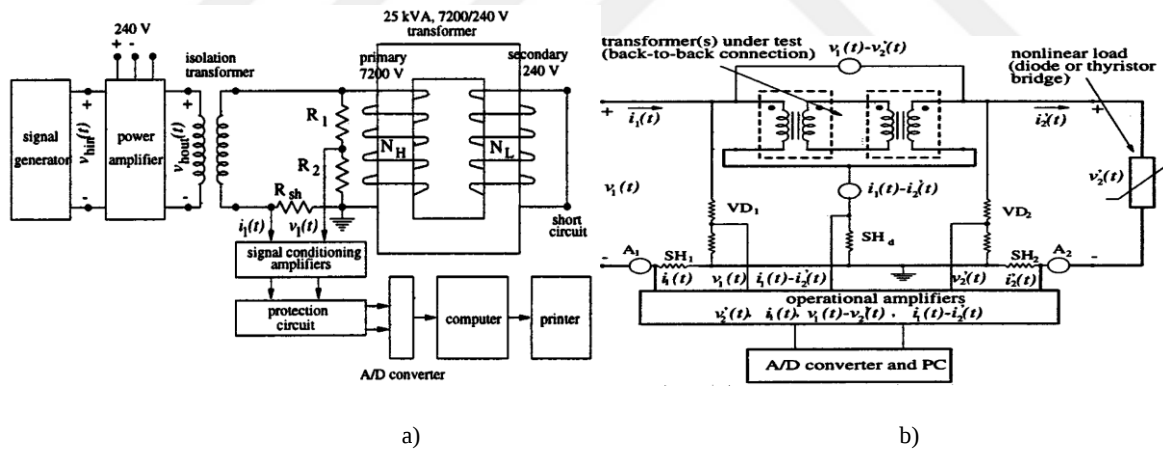
Eş. 5.10'daki f^2 , anma frekansa göre hesaplanan kayıp artış faktörleri, K-faktör ve FHL kayıp faktörlerinde, h^2 ortaya çıkmıştır. Bâİ olduğundan B^2 de I^2 şeklini almıştır.

Fakat bu varsayımlar iletkenlerde geçerli değildir. O yüzden bu faktörlerden elde edilen sonuçlar ile gerçek kayıplar arasında farklılıklar olacaktır. Bu iki standart yöntemin kayıp

hesaplamaadaki farkı akım rms değerinin hesaplamasındaki farkı olup, k faktör yöntemi rms değerini akımın tepe değerinden hesaplarken, harmonik kayıp faktörü yöntemi akım harmoniklerinin değerinden hesaplamaktadır. O yüzden IEEE yöntemi [1] (FHL) k- faktörü yönteminden farklı olabilir.

2.4. AA Direnç Hesaplama Yöntemleri

K-faktörü ve F_{HL} yöntemindeki hataları ortaya çıkaran çalışmalar literatürde mevcuttur [12,13, 15]. [12]'de E. F. Fuchs, D. Yıldırım, bir 25 kVA 7200/240 V transformatörün kayıplarını, transformatörün sekonder tarafını kısa devre yapıp primer tarafından değişik frekansta gerilim uygulayarak ölçmüşlerdir. Bu çalışmada değişik frekanslarda sinüs dalga şekli üretilip güç yükseltici devresi kullanılarak yüksek güç ve genliğe çevrilmiştir (Şekil 2.1-a). Bu çalışmada ayrıca transformatörün çıkışına doğrudan doğrusal olmayan yük bağlayıp primer tarafından anma gerilim uygulanmıştır (Şekil 2.1-b). Böylece değişik THB' ye sahip harmonikli akımlar sargılara uygulanıp gereken ölçümler yapılmıştır.



Şekil 2.1. Transformatör sargılarının kayıp ölçüm devresinin şeması a) güç yükseltici yöntemi b) doğrusal olmayan yük yöntemi

[13]'teki çalışma da [12]' nolu çalışmanın benzeridir. Bu çalışmalarda yazarlar elde ettikleri sonuçları F_{HL} yöntemi ile karşılaştırmışlardır.

[15]'te Jian Zheng de bir 10 kVA 7200/120-240 V bir transformatör üzerinde efektif AA direnci hesaplaması çalışmalarını yürütmüştür. Bu çalışmalar [2, 13, 15] ve benzerleri K-

Faktör yönteminin ve F_{HL} yönteminin hatasını ortaya çıkarmışlar, fakat bu hataları düzeltmek için yeni bir yöntem veya mevcut yöntemleri düzeltme çalışması yapmamışlardır. Bu çalışmalarda ve benzerlerinde alternatif akım durumunda RAC'nin harmonik ile değişimi araştırılmıştır. Bu çalışmalarda; i-sargıların gerçek değerleri ortaya konmuştur. ii-harmoniklerde ve doğrusal olmayan yüklerde sargıların kayıplarının hesaplanması için yöntem sunulmuştur. iii-K-faktör ve F_{HL} yöntemlerinin yetersizliği ortaya konmuştur iv-Harmoniklerin etkisi, bilinen ve kullanımı yaygın olan IEEE eşdeğer devrelerin üzerinde geliştirmeler yapılmıştır.

Bu çalışmaların eksik yönleri ise; i-Primer ve sekonder dirençleri ayrı ayrı incelenmemiş ve her bir direnç artışının ayrı ayrı incelenmesi yapılmamıştır (IEEE'nin basitleştirilmiş eşdeğer devresi kullanılmıştır). ii-Deney için kullanılan sargıların iletken çapı ve akım miktarı kısıtlı olup, düşük kesit iletkenine sahip sargılar incelenmemiştir (25 kVA). Ayrıca bu çalışmalar tüm sargı tiplerini ve sargı kesitlerini kapsamamaktadır. iii-Geliştirilen direnç hesaplamalar eğri ayarlama (curve fitting) yöntemine dayanmıştır ve sadece ölçümlerden elde edilen değerleri kapsamaktadır. Ayrıca kayıpları ölçmeden hesaplamak için bir yöntem sunulmamıştır. Yöntemler mevcut sargıların ölçümünde işe yaramaktadır. Bu yüzden elde edilen eğriler ve denklemler, tasarımlarda güvenilir değildir ve kullanılamaz. iv- Sunulan yöntem tüm sargılarda meydana gelen kayıpların ölçümünü yapabilir, kayıp artışının yoğun olduğu veya düşük olduğu bölgeleri ortaya koyamaz. v-Sunulan ölçüm yöntemleri güç yükselticisi ve tipik doğrusal olmayan yükleri kullanıma dayandığından anma gücü ve anma gerilimi düşük sargıların ölçümünde kullanılabilir (örneğin 1000 kVA'lık bir güç yükselticisi veya doğrusal olmayan yükü üretilen 1MVA'lık bir sargıyı bu yöntemle ölçmek mümkün değildir).

2.5. Düzeltilmiş Kayıp Faktörü Hesaplamaları

Literatürde a bölümünde özetlenen kayıp faktör hesaplamalarının dezavantajlarını, b bölümündeki çalışmalar ve bazı teorik gerçekler ortaya konmuştur, bu dezavantajları gidermeye yönelik düzeltilmiş kayıp faktörü başlıklı çalışmalar bulunmaktadır [5, 6]. Teorik olarak harmonikli durumlardaki sargının girdap akım kayıpları h^2 oranıyla (h: harmonik sayısı) değişmektedir. Bu yöntemin eksik yönleri hatalarıyla ilgili literatürde bazı çalışmalar mevcuttur [5, 6, 12, 13, 15]. Bu çalışmalarda hataların giderilmesiyle ilgili farklı yöntemler sunulmaktadır. Ancak [5]'teki çalışma, teorik ve analitik bir çalışma olup deneysel

incelemelerden yoksundur. [5] nolu çalışmada Kayıp faktör hesaplaması ile ilgili Eş. 2.11-2.15'ten kayıp hesaplaması yapılmıştır.

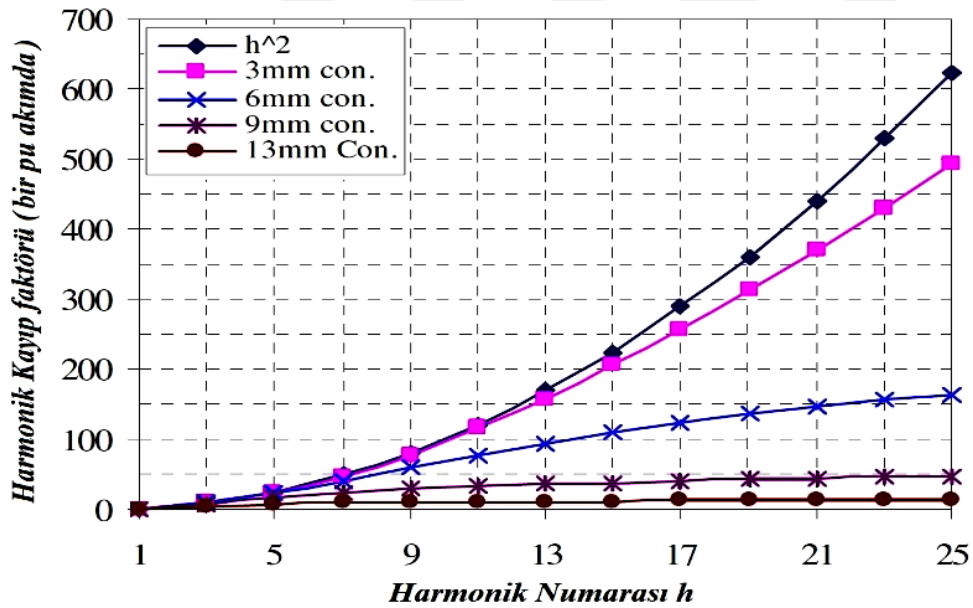
$$P_{EC} \approx \omega B^2 p \quad (2.11)$$

$$p = \frac{1}{\xi} \left[\frac{\sinh \xi - \sin \xi}{\cosh \xi + \cos \xi} \right] \quad (2.12)$$

$$\xi = \frac{T}{\delta} \quad (2.13)$$

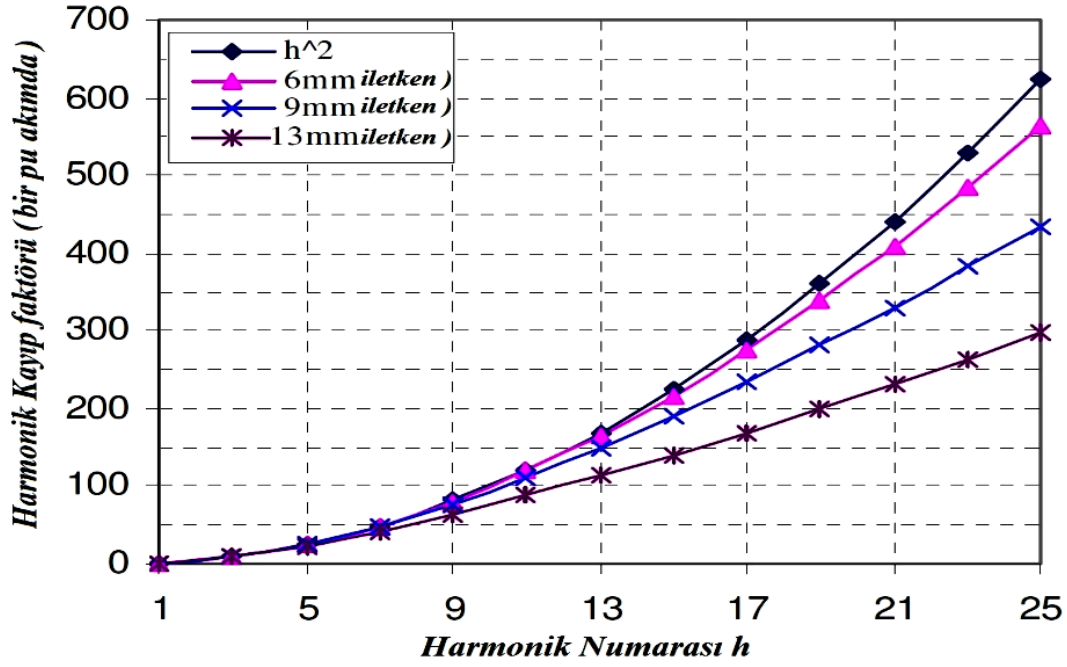
$$\delta_R = \sqrt{\rho / \mu \pi f} \quad (2.14)$$

$$\delta = \sqrt{\frac{\rho}{\mu \pi f h}} = \frac{\delta_R}{\sqrt{h}} \quad (2.15)$$



Şekil 2.2. Harmonikli durumlarda sargıların girdap akım kayıplarının hatalarının azaltılmasına yönelik matematiksel çalışma sonuçları

[6]'daki çalışmanın ölçüm yönteminin hata payı çok yüksektir ve ölçüm çözünürlüğü ve dolayısıyla güvenilirliği düşüktür. Ayrıca her iki çalışmada da, sadece girdap akım kayıpları incelenmiştir.



Şekil 2.3. Harmonikli durumlarda sargıların girdap akım kayıplarının hatalarının azaltılmasına yönelik deneysel çalışma

Harmonikli durumlarla ilgili standartların kayıp faktörünün hesaplanmasıyla ilgili sunduğu yöntemlerin ve bu yöntemlerin düzeltilmesiyle ilgili sunulan çalışmaların eksik yönleri aşağıda verilmektedir.

- Çalışmalar sadece girdap akım kayıplarını dikkate almaktadırlar.
- Çalışmalarda iletkenin deri etkisi ve ayrıca iletkenlerin birbirine yakınlığı ve doğrusal olmayan özelliklere sahip nüveye yakınlığı göz ardı edilmiştir.
- Çalışmalarda göz ardı edilemeyecek etkenler yok sayılmış, geçersiz varsayımlara dayanılmıştır. Bu da sunulan yöntemlerin hatalı olması ve yetersizliğine sebebiyet vermiştir.
- Düzeltilmiş harmonik kayıp faktörü yöntemlerinde iletkenin (özellikle dikdörtgen iletkenlerin) manyetik alan yönünden bağımsız incelenmesi ve iletkenin ebadının birbirine oranını göz ardı ederek hesaplandığından dikdörtgen iletkenler için bu yöntemin hatalı olduğu kanıtlanmıştır (yöntem bölümünde).
- Hesaplamalarda sunulan faktörler sargının tümüne aynı değeri verdiği için kayıp ve kayıp faktörünün sargı boyunca homojen olduğu varsayıldığından sargının değişik bölgelerindeki kayıp ve kayıp artışının farkı ortaya konamamaktadır.

Bu yetersizlikler AA direnç hesabı için ise:

- a- Ölçümler sargıları birbirinde ayırt etmeyip, basitleştirilmiş eşdeğer devredeki toplam sargı direncini ölçmektedir (primer ve sekonder sargılarını ayırmamaktadır).
- b- Sargı boyunca kayıpların yoğunluğunu ve kayıp dağılım profilini sunmamaktadır.
- c- Önerilen yöntemler büyük akım ve gerilimler için elverişli değildir ve sadece düşük güçte ve düşük gerilimde uygulanabilmektedir.
- d- Sunulan eğri ve denklemler sadece deneyi yapılan sargılar için geçerli olup genel bir denklem veya eğri sunmamaktadır.
- e- Ölçümler ve sunulan eğriler ve denklemler ortalama kayıp hesabı için kullanılabilir.



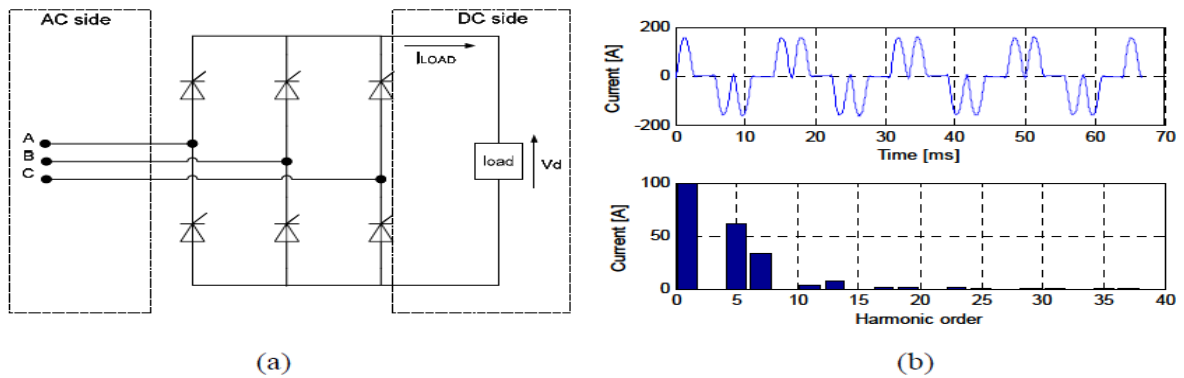


3. ELEKTRİK ŞEBEKESİNDEKİ HARMONİKLİ AKIMLARI ÜRETEN YÜK ÖRNEKLERİ

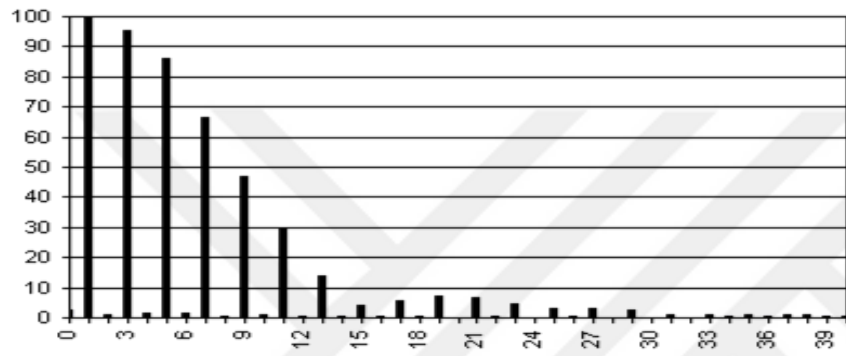
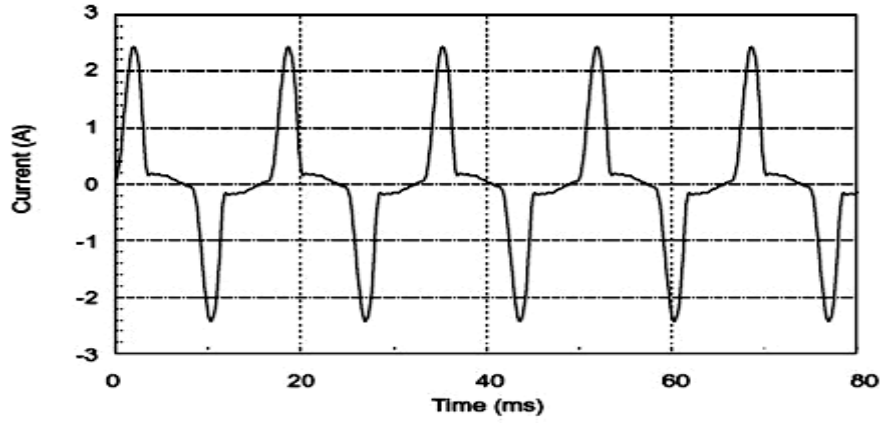
Teknolojinin hızla gelişim ve değişimi sonucunda ortaya çıkan yeni devre ve kontrol teknikleri ve günden güne tüketicilerin evlerde veya işyerlerinde kullandıkları cihazların (ark fırınları, endüksiyon fırınları, farklı amaçla kullanılan motor sürücüler, şehir taşıma raylı sistemler, elektrikli trenler, elektrikli arabalar, aydınlatma sistemleri, kesintisiz güç kaynakları, bilgisayar, TV, kamera, fotokopi makinesi, kaynak makineleri, flüoresan lambalar, v.b.) artması istenmeyen harmonikli akım ve gerilimlerin artmasına neden olmaktadır [28, 29, 34]. Bunların yanı sıra, modern elektrik şebekelerinde kullanılan yüksek gerilimli DA enerji taşıma (HVDC) sistemleri, esnek alternatif akım iletim sistemleri (Flexible AC transmission systems, FACTS), statik var kompanzatörü (SVC) ve benzeri güç elektroniği kullanan sistemler şebekeye harmonikli akımlar enjekte etmektedirler [28].

Bu cihazların bir çoğunun girişinde doğrultucu kullanılmaktadır. Üç-fazlı, tam-denetimli bir köprü doğrultucunun devre şeması, ürettiği akım dalga şekli ve harmonik spektrumu Şekil 3.1' de verilmektedir [29].

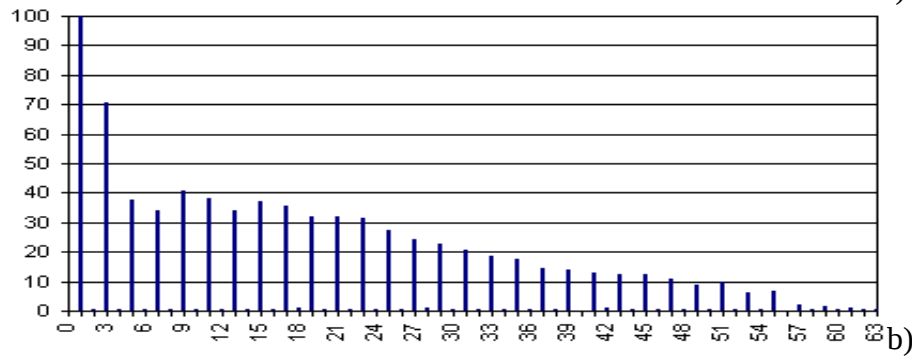
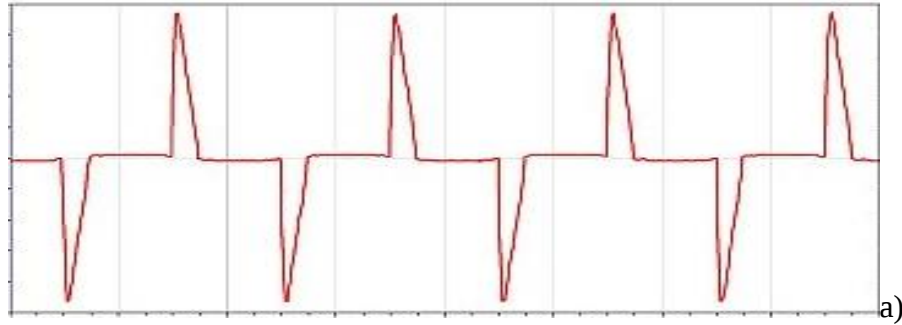
Şekil 3.2-3.5'te sırasıyla bir bilgisayarın, tasarruflu bir ampulün (CFL), ark ocağının, endüksiyon ocağının şebekeden çektiği akımların dalga şekilleri ve harmonik spektrumları verilmektedir.



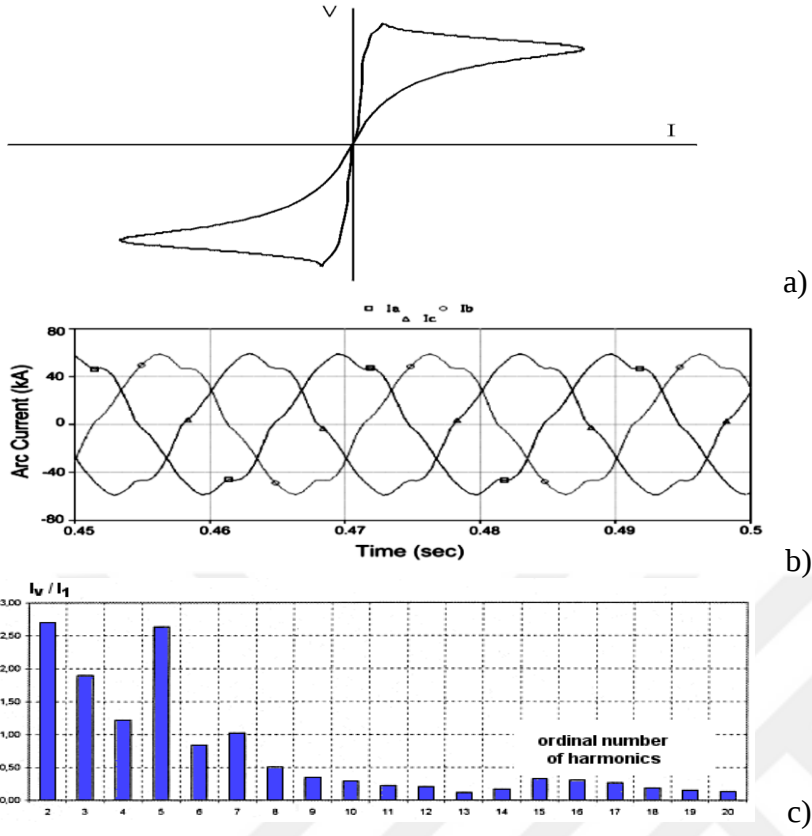
Şekil 3.1. Üç fazlı köprü doğrultucu, a) Altı darbeli tristörlü köprü doğrultucu, b) giriş akımının dalga şekli ve akımın harmonik spektrumu



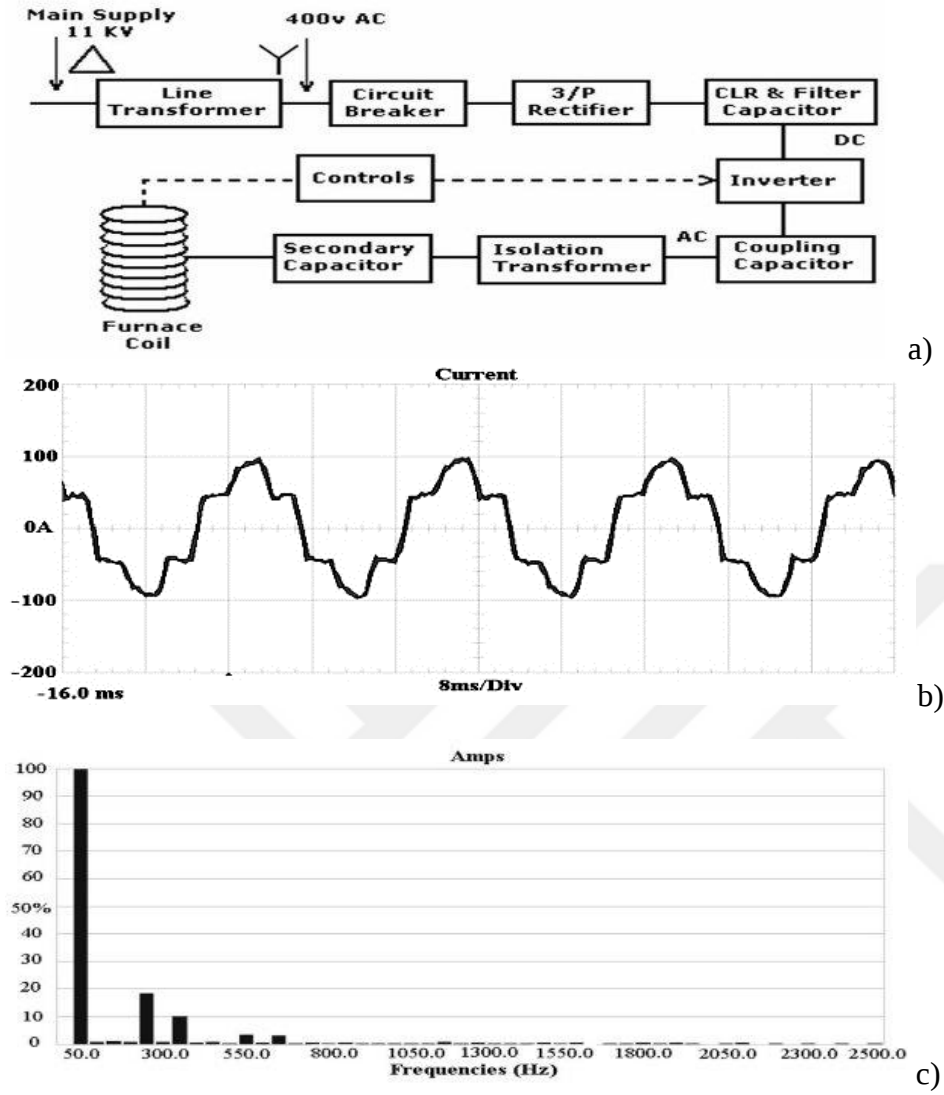
Şekil 3.2. Bir bilgisayarın şebekeden çektiği akım, a) akımın dalga şekli, b) akımın harmonik spektrumu



Şekil 3.3. Tasarruflu bir ampulün (CFL) şebekeden çektiği akım, a) akımın dalga şekli, b) akımın harmonik spektrumu

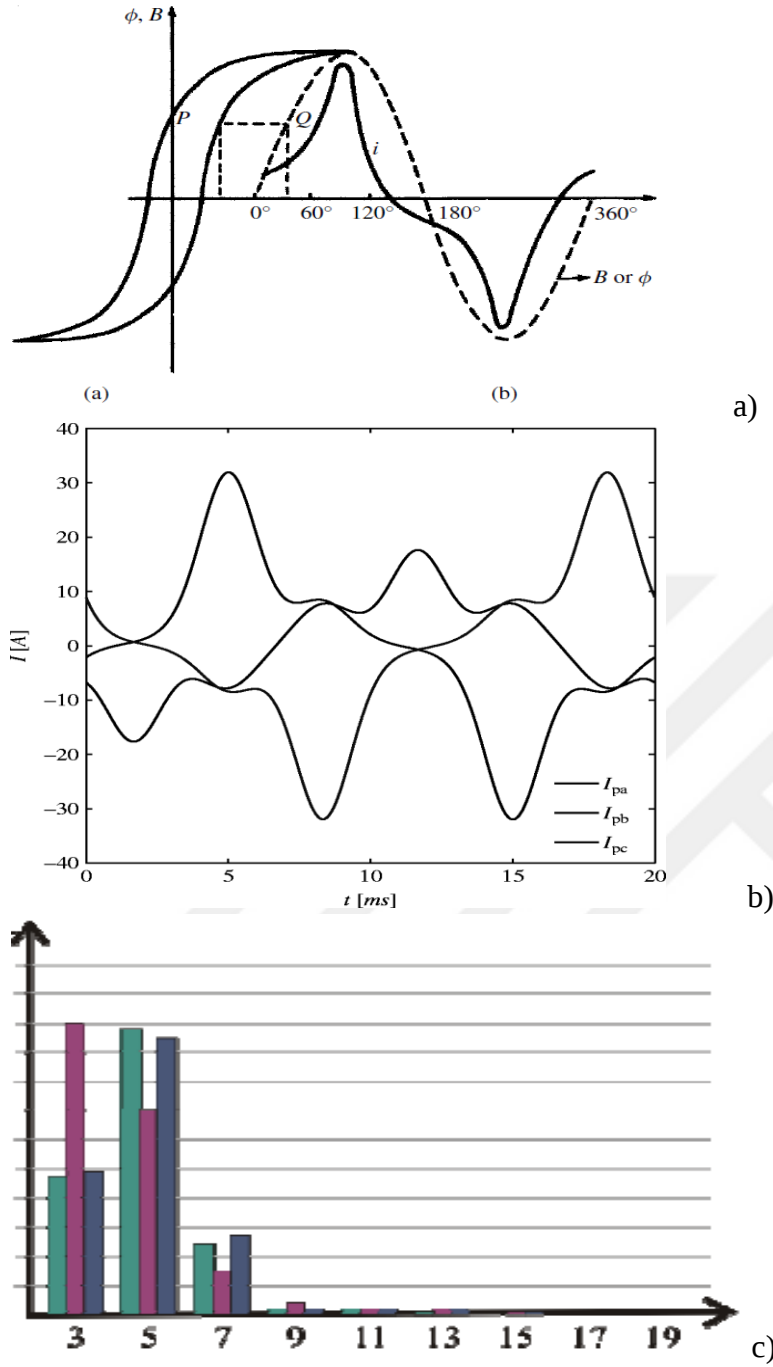


Şekil 3.4. Bir ark ocağının akımı ve akım harmonikleri, a) arkın akım-gerilim eğrisi, b) arkın akım dalga şekli, c) akımın harmonik sektrumu



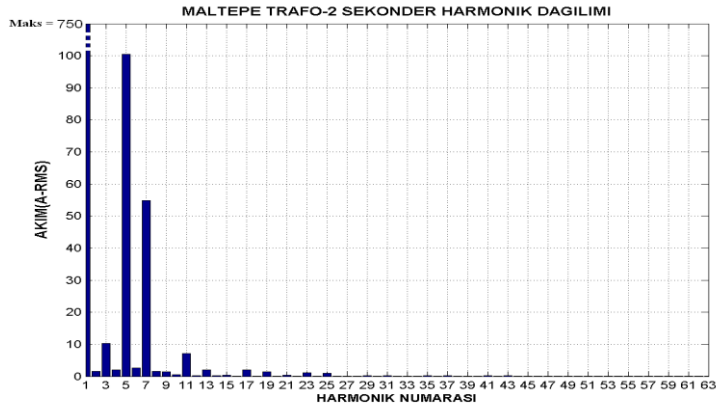
Şekil 3.5. Modern bir endüksiyon ocağı a) devre şeması, b)akımın dalga şekli, c)akımın harmonik spektrumu

Elektromanyetik makineler (motorlar, transformatörler, endüktör v.b.) manyetik alt birime sahip olduklarından, manyetik malzemenin doğrusal olmayan özellikleri de akım harmoniklerinin üretimine yol açmaktadır. Bir elektromanyetik devreye sahip B-H eğrisinin lineer olmaması veya devrenin doyumda çalışması harmonikli akım üretmektedir. Transformatörler, elektrik motorlar ve indüktörler elektromanyetik cihazların örnekleridir. Bir transformatörün boştaki çektiği akım ve bu akımın harmonik spektrumu Şekil 3.6’da verilmektedir. Transformatörlerin boşdaki akımları da şebekede doğrusal olmayan yük sayılıp şebeke akımının bozulmasına yol açmaktadır.

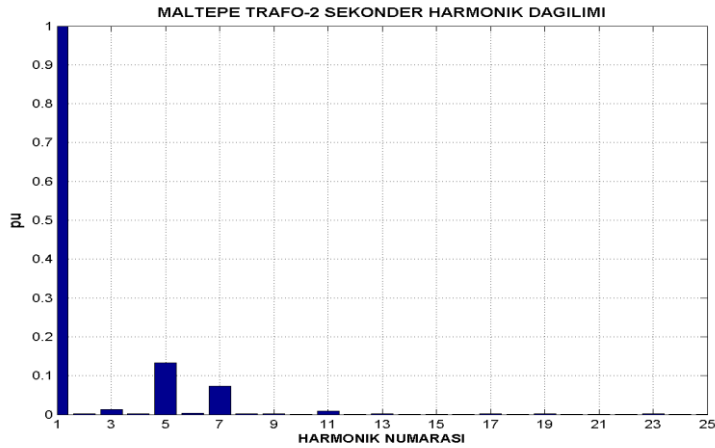


Şekil 3.6. Transformatör, a) nüvesinin B-H eğrisi b) boştaki akımı, c) boştaki akımın harmonik spektrumu

Lineer olmayan yük yoğunlukları bölgeden bölgeye farklıdır [32, 60]. Ankara'nın Maltepe bölgesinde indirici bir güç trafosundan çekilen akımın harmonik spektrumu Şekil 3.7'de verilmektedir [1, 32].



a)



b)

Şekil 3.7. Örnek bir transformatörün akım harmoniği

Günümüzde güç elektroniğini kullanan güç sistemlerinin ve güç aygıtlarının ekonomik ve teknik avantajları ve getirileri göz önüne alındığında, bu cihazların kullanımı ve müteakibi ürettikleri akım harmonikleri kaçınılmazdır.

Bu harmoniklerden etkilenen güç aygıtları ve özellikle güç transformatörlerinin sağlıklı bir şekilde şebekede çalışıp, faydalı ömürleri boyunca servis vermeleri gerekmektedir. Bu konuları ele alma amacı ile aşağıdaki amaç, konu kapsam ve hedeflerden oluşan tez çalışmaları planlanıp yürütülmüştür.

4. SONLUELEMANLAR YÖNTEMİ İLE KAYIP FAKTÖR HESAPLAMALARI

Tez kapsamında hedeflenen amaçlara ulaşmak için uygulanacak yöntemlerin başlık ve açıklamaları aşağıda verilmektedir. 1- Harmoniklerden dolayı sargılarda artan kayıpların incelenmesi, 2- Deneysel çalışmalarla ilgili bir güç elektroniği devresinin tasarım ve gerçekleştirilmesi (ilgili düzenek yardımıyla sargılara harmonikli akım enjekte edilip sargıların güç kaybı ölçüm deneyleri yapılacaktır), 3- Harmonikli durumlarla ilgili sargıların kayıp dağılım profilinin geliştirilmesi, 4- Geliştirilen teorik ve sonlu elemanlara dayalı kayıp hesaplama eğrilerinin deneysel doğrulama çalışmaları.

Bu doğrultuda kayıp artış hesaplamaları için sonlu elemanlar yöntemi kullanılacaktır. Bu çalışmalar iki boyutlu ve üç boyutlu olarak yapılacaktır. Bunun için ilk önce manyetik alan ve kayıpların diferansiyel denklemleri kurulacaktır. Çözülmesi gereken meseleler ortaya konulacaktır. Maxwell 2D ve Maxwell 3D yazılım paketi kullanılarak sonlu elemanlar yöntemi ile manyetik alan sorunlarının numerik çözümleri gerçekleştirilecektir. Bu doğrultuda literatürde tespit edilen boşluklar için bilimsel çözümler geliştirilecektir.

Literatürdeki çalışmaların hemen hemen hepsi sargılarda girdap akım kayıplarının etken olduğunu varsayarak sadece girdap akım kayıplarını incelemişlerdir. Halbuki bildiğimiz gibi sargılarda meydana gelen stray kayıplarının kaynağı aşağıdaki gibi sıralanmaktadır.

Düşük frekanslarda kayıpların hesaplanması için problemi bulunduran ortamın tamamında Maxwell denklemleri çözülecektir. Yeterli mesh sayısı, basamak boyutu, malzeme özellikleri, yazılım ortamına meselenin detaylı şekilde tanıtılması, iterasyon sayısının yeterli seçilmesi, çözümün hızlılığını sağlamak için mevcut simetrilerin doğru kullanılması, meselenin sınır şartlarının detaylıca tanıtılması v.b teknikleri kullanarak meselenin çözümü dikkatli bir şekilde sağlanacaktır. Manyetik alan çözümü yapıp B ve H hesaplamaları problemi bulunduran tüm noktalarda hesaplandıktan sonra, Eş. 4.19'dan iletkende akım yoğunluğunun miktarı sargı üzerinde hesaplanıp akım yoğunluğu J elde edilecektir (Eş.5.19). İletken hacminde ve bir periyotta J^2 / σ integrali alınmakla toplam kayıplar elde edilecektir (Eş. 5.20).

$$\nabla \times E = \frac{-\partial B}{\partial t} \quad (4.1)$$

$$\nabla \times H = J + \frac{\partial B}{\partial t} \quad (4.2)$$

$$\nabla \cdot B = 0 \quad (4.3)$$

$$B = \mu H = \mu_0 \mu_r H \quad (4.4)$$

$$J = \sigma E \quad (4.5)$$

$$D = \varepsilon E = \varepsilon_0 \varepsilon_r E \quad (4.6)$$

$$\nabla \times H = J \quad (4.7)$$

$$-\nabla^2 H = \nabla \times J \quad (4.8)$$

$$P_{tot} = \int_V \frac{|J|^2}{\sigma} dV \quad (4.9)$$

Elde edilen toplam kayıplar aynı durumun DA ($f=0$) halindeki kayıpları ile (DA kayıpları ile) karşılaştırılıp aradaki fark (stray kayıplar) elde edilecektir (Eş. 5.21). Sargının değişik frekanslardaki stray kaybının anma frekanstaki (ülkemizde 50 Hz) stray kayba oranı kayıp artış faktörü olarak hesaplanacaktır.

$$P_{str}(f) = P_{tot}(f) - P_{tot}(0) \quad (4.10)$$

$$F_{HL-C}(f) = \frac{P_{str}(f)}{P_{str}(50)} \quad (4.11)$$

Konu ile ilgili çalışmalar iki boyutlu (2D) ortamda gerçekleştirilmiştir. İki boyutlu ortamda yapılan çalışmaların sonuçları beş farklı şekilde incelenmiştir.

a-Girdap akım (eddy current) kayıpları

b-Deri Etkisinden (skin effect) dolayı kayıpların artışı

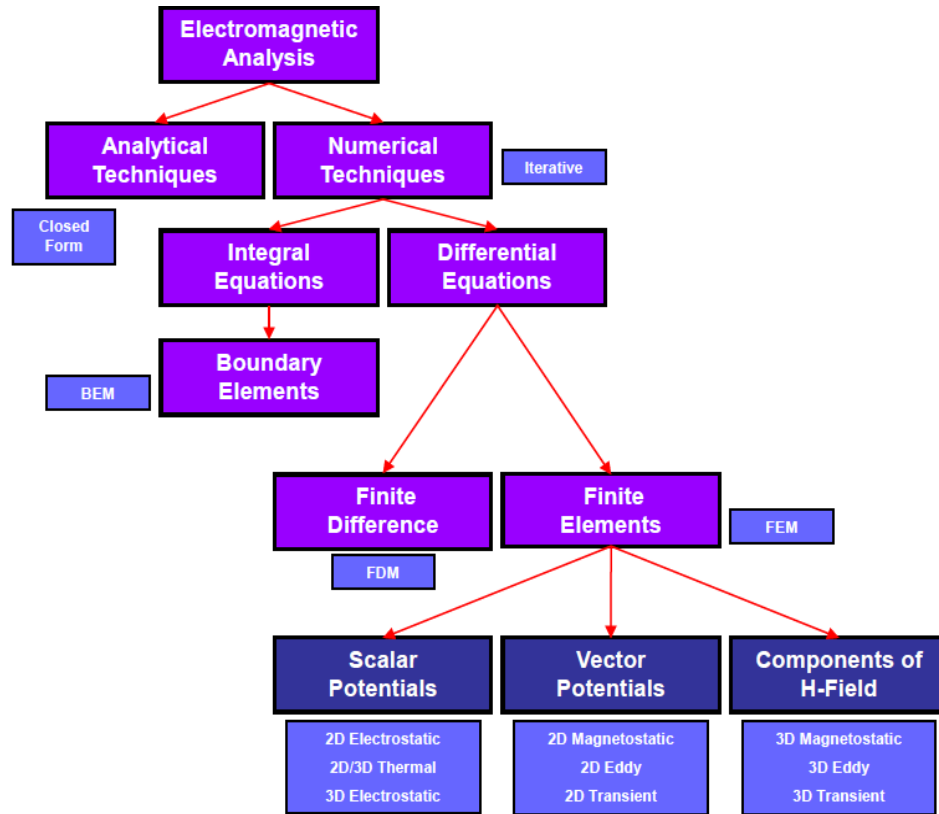
c-Yakınlık Etkisinden (proximity effect) Dolaylı kayıpların artışı

d-Nüveli yapıya sahip sargıların kayıp incelemesi

e- Transformatör üzerinde

4.1. Sonlu Elemanlar Yöntemi ile Manyetik Alan Analizi ve Kayıp Hesaplaması

Elektromanyetik denklemlerinin çözümü için analitik ve sayısal yöntemler kullanılmaktadır (Şekil 4.1). bu denklemlerin karmaşık yapılarda numerik yöntemler ile çözmek mümkündür. Sayısal yöntemlerden birisi olan sonlu elemanlar yöntemi en sık kullanılan yöntemlerdendir.



Şekil 4.1. Elektromanyetik problemlerinin çözüm yöntemleri

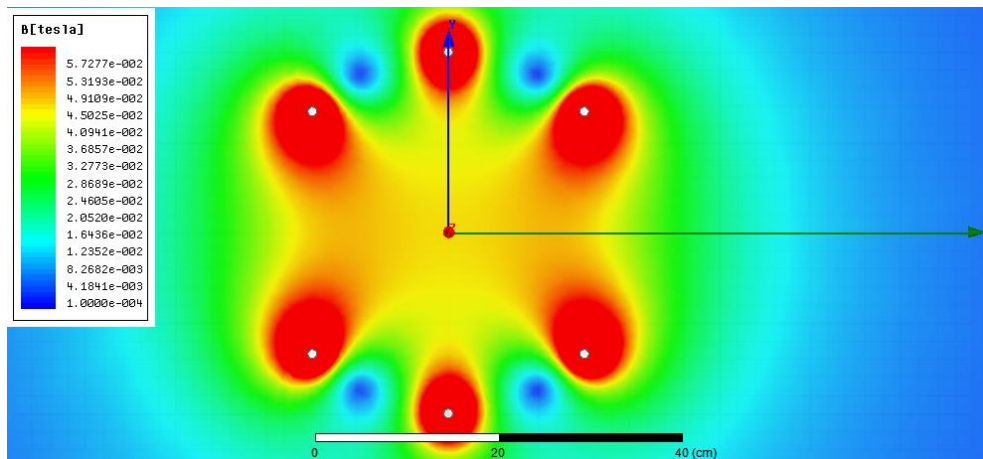
Sonlu Elemanlar Yöntemi, çeşitli mühendislik problemlerine kabul edilebilir bir yaklaşımla çözüm arayan bir sayısal çözüm yöntemidir. Sonlu Elemanlar Yöntemi, geometrisi karmaşık şekillerin incelenmesine olanak sağlar. Çözüm bölgesi alt bölgelere ayrılabilir ve değişik sonlu elemanlar kullanılabilir. Gerekğinde bazı alt bölgelerde daha hassas hesaplamalar yapılabilir. Değişik ve karmaşık malzeme özellikleri olan sistemlerde kolaylıkla uygulanabilir. Örneğin, anizotropi, doğrusal olmayan, zamana bağlı malzeme özellikleri gibi malzeme özellikleri dikkate alınabilir. Ayrıca parçanın geometrisinde basitleştirme yapma ihtiyacı duyulmaz. Bu yöntemde sınır koşulları, sistemin temel denklemleri kurulduktan sonra, oldukça basit satır sütun işlemleriyle denklem sistemine dahil edilebilir.

Sonlu elemanlar yöntemi matematiksel olarak genelleştirilebilir ve çok sayıda problemi çözmek için aynı model kullanılabilir. Ayrıca yöntemin hem fiziksel anlamı hem de matematiksel temeli mevcuttur.

Yukarıda bahsedilen avantajların yanı sıra, sonlu elemanlar yönteminde aşağıdaki dezavantajlarda mevcuttur. i- Bazı problemlere uygulanmasında zorluklar (sınır koşulları, ayrıklaştırılma vs.) yaşanabilmektedir. ii-Elde edilen sonucun doğruluğu verilerin ve uygulanan yöntemin doğruluğuna bağlıdır. iii- Kabul edilebilir doğru sonucun elde edilmesi için bölgenin ayrıklaştırılması (mesh) deneyim gerektirir. iv- Diğer yaklaşık yöntemlerde olduğu gibi, Sonlu Elemanlar Yöntemi ile elde edilen sonucu doğruluğu üzerinde dikkat edilmeli ve fiziksel problem iyi incelenmelidir. v-Çıkabilecek sonuç önceden kestirilmeli ve sonuç ona göre test edilmeli ve yorumlanmalıdır.

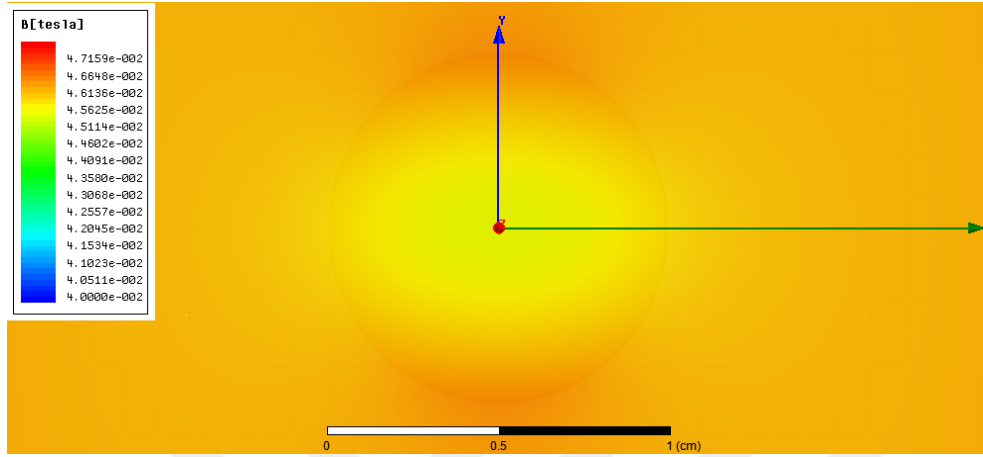
4.2. Girdap Akım Kayıpları

Girdap Akım kayıplarını incelemek için iletkenin bulunduğu yerde konuma göre homojen manyetik alan üretmek amacıyla Maxwell bobini kullanılıp manyetik alanın homojen olduğu yerde yarı dairesel iletken modellenmiştir. Aşağıdaki şekilde Ansys Maxwell yazılımında modellenen Maxwell bobini ve bu bobinin ortasına yerleştirilen iletken iki boyutlu analiz ortamında gösterilmiştir. Sayısal manyetik alan hesaplamalarını yapabilmek için FEM analizi yöntemine dayalı Ansys Maxwell yazılımı kullanılıp sayısal hesaplamalarla iletkende oluşan girdap akım kayıpları hesaplanmıştır. Girdap akım kayıp hesaplaması için Maxwell sargısı modellenip analizlerde homojen manyetik alan üretimi için kullanılmıştır (Şekil4.2).

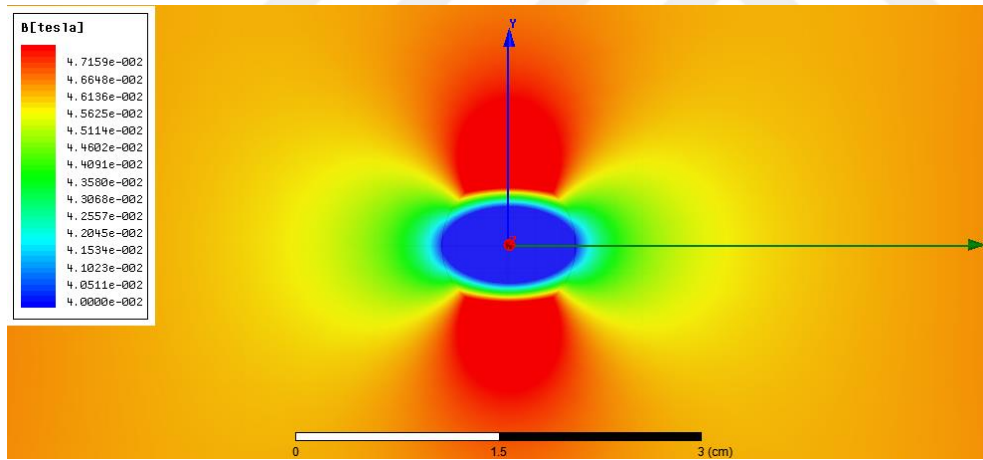


Şekil 4.2. Ansys Maxwell yazılımı ortamında Maxwell bobini ve ortasındaki iletken

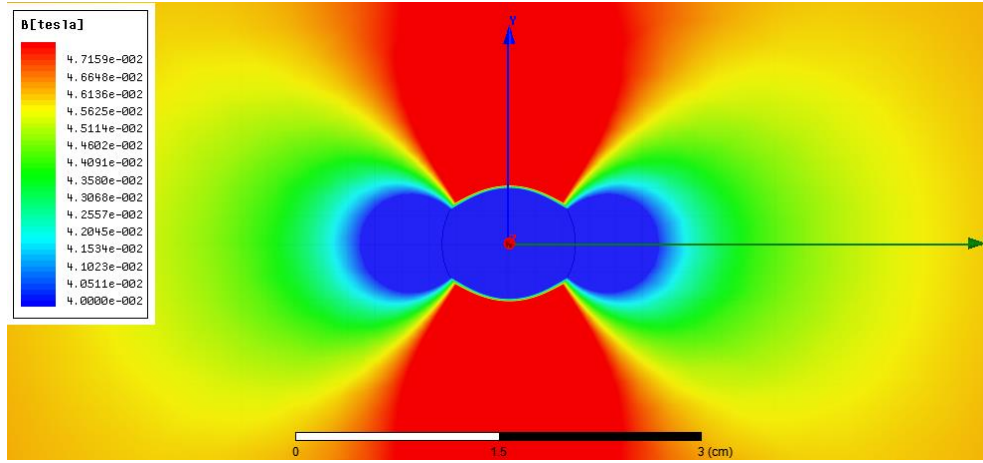
Şekil 4.3-4.5'te manyetik alanın iletken içine nüfuzunun değişimini frekans değişimine göre gösterilmiştir. Bu şekillerde sırasıyla soldan sağa 50 Hz, 250 Hz ve 1650 Hz'in manyetik alanlarının iletken çevresinde verilmiştir.



Şekil 4.3. 50 Hz frekansta Maxwell bobini merkezinde konuçlandırılan iletkenin çevreleyen manyetik alan dağılımı

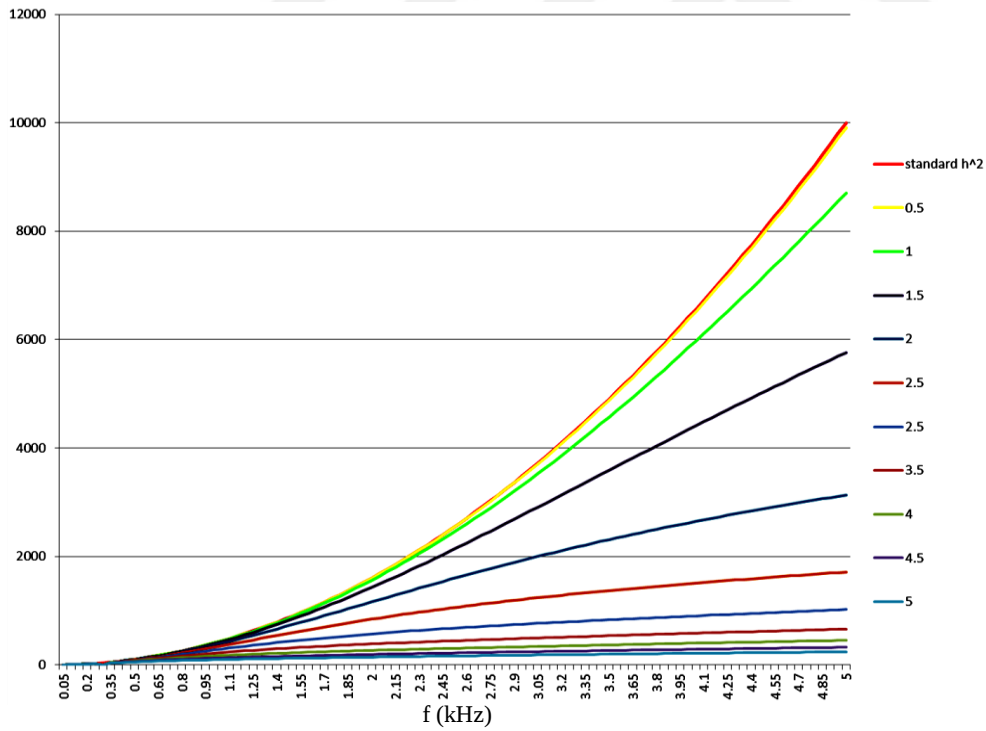


Şekil 4.4. 250 Hz frekansta Maxwell bobini merkezinde konuçlandırılan iletkenin çevreleyen manyetik alan dağılımı

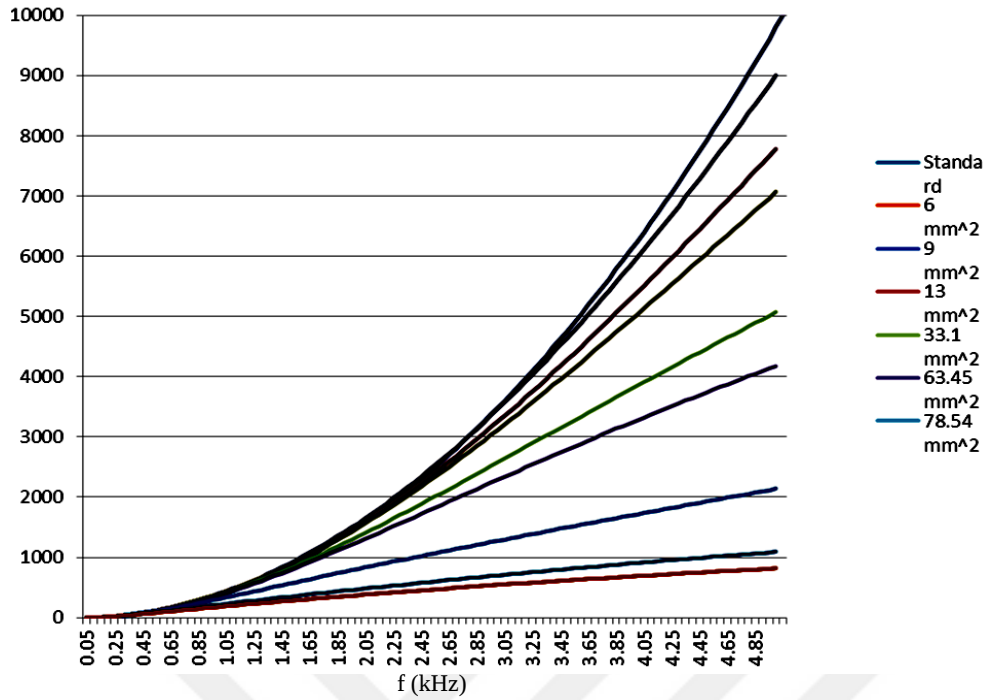


Şekil 4.5. 1650 Hz frekansta Maxwell bobini merkezinde konuşturılan iletkenin çevreleyen manyetik alan dağılımı

Farklı yarıçaplara sahip yuvarlak iletkenlerin girdap akım kayıp faktörünün (50 Hz frekans referans alınarak) frekansa göre değişimi, Şekil 4.6'da ve farklı iletken kesitine sahip dikdörtgen iletkenler için sonuçlar Şekil 4.7.'de sunulmuştur.

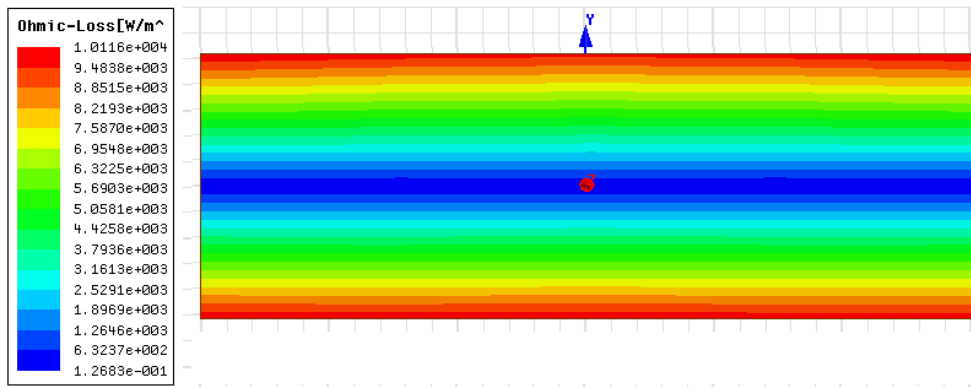


Şekil 4.6. Farklı çaplarda yuvarlak iletkenlerin frekansa göre girdap akım kayıp faktör değerleri

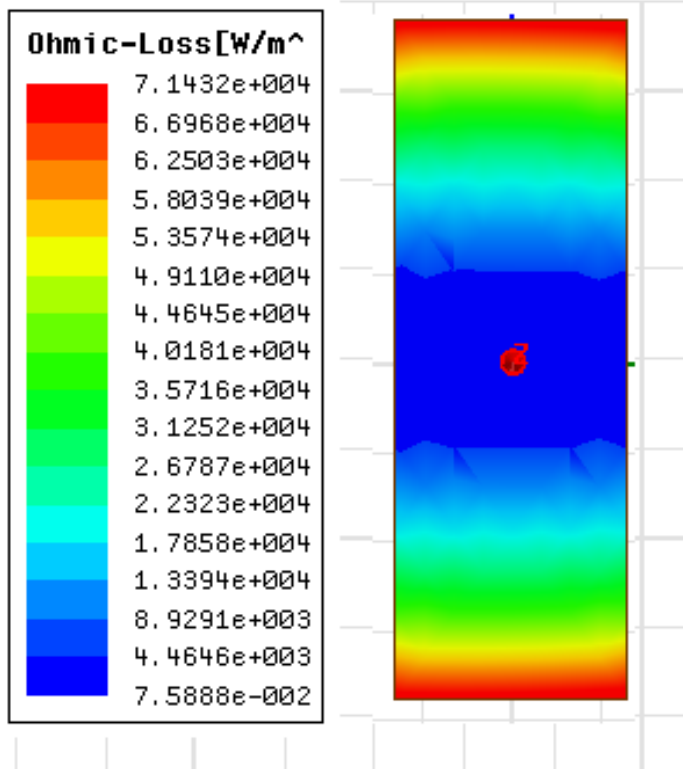


Şekil 4.7. Farklı kesite sahip dikdörtgen iletkenlerin girdap akım kayıp faktör değerleri

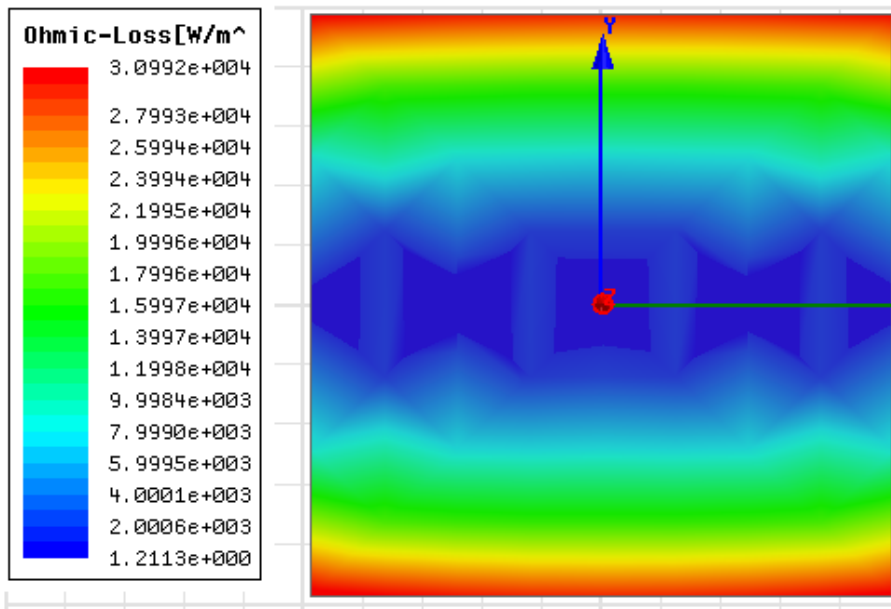
Fakat girdap kayıp artışları dikdörtgen iletkenlerin manyetik alana maruz kalma yönüne ve kenarlarının birbirine oranı ile değişiklik göstermektedir. Örneğin 95,2 mm² kesitinde bir iletken Şekil 4.8 -4.10 'daki gibi sırasıyla yatay, dikey ve kare şekillerde manyetik alana maruz kaldığında kayıp dağılımı gösterilmiştir.



Şekil 4.8. Yatay dikdörtgen iletkenin girdap akım kayıbından kaynaklanan kayıp dağılımı

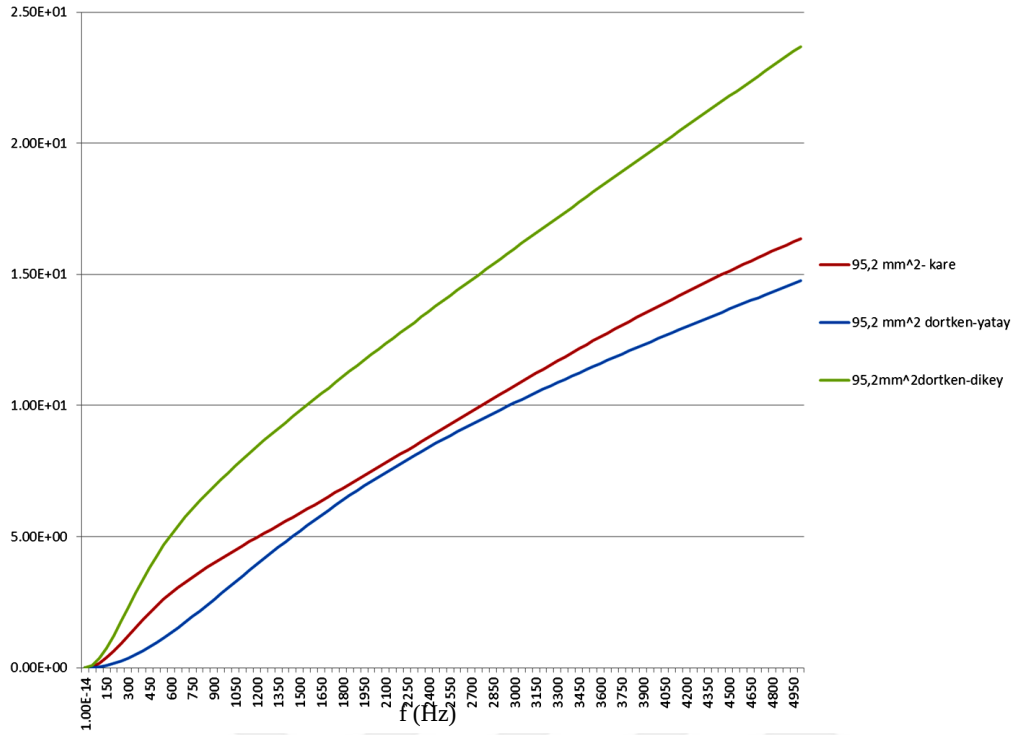


Şekil 4.9. Dikey dikdörtgen iletkenin girdap akım kaybindan kaynaklanan kayıp dağılımı

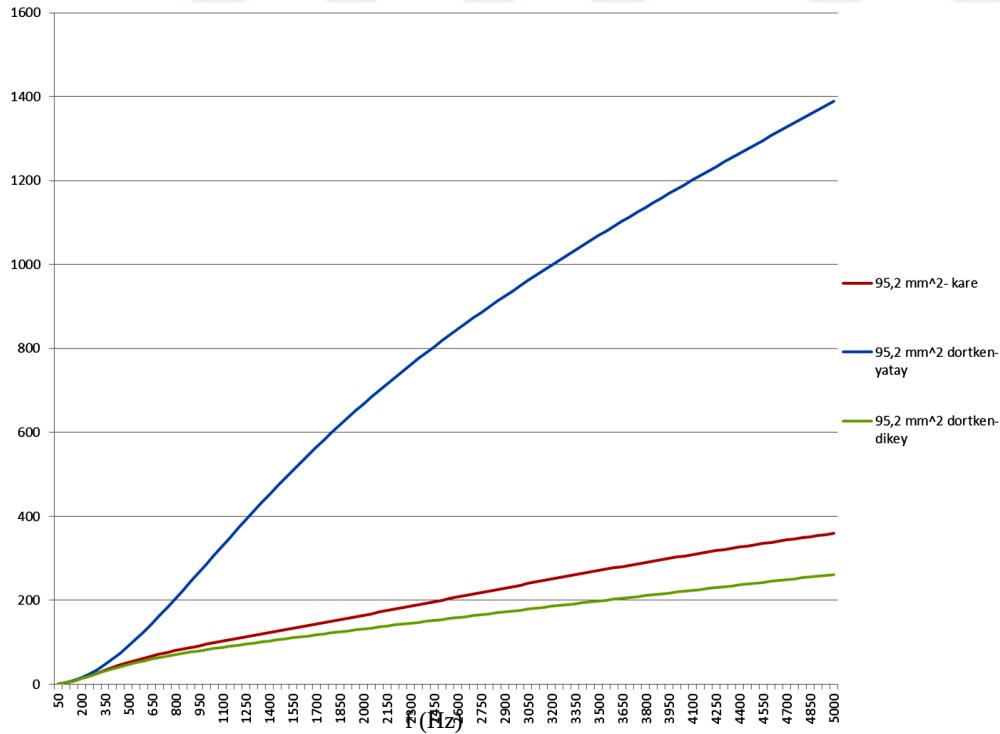


Şekil 4.10. Kare iletkenin girdap akım kaybindan kaynaklanan kayıp dağılımı

Bu üç durum için kayıp miktarları frekans değişimine göre aşağıdaki şekilde gösterilmiştir. (Şekil 4.11)



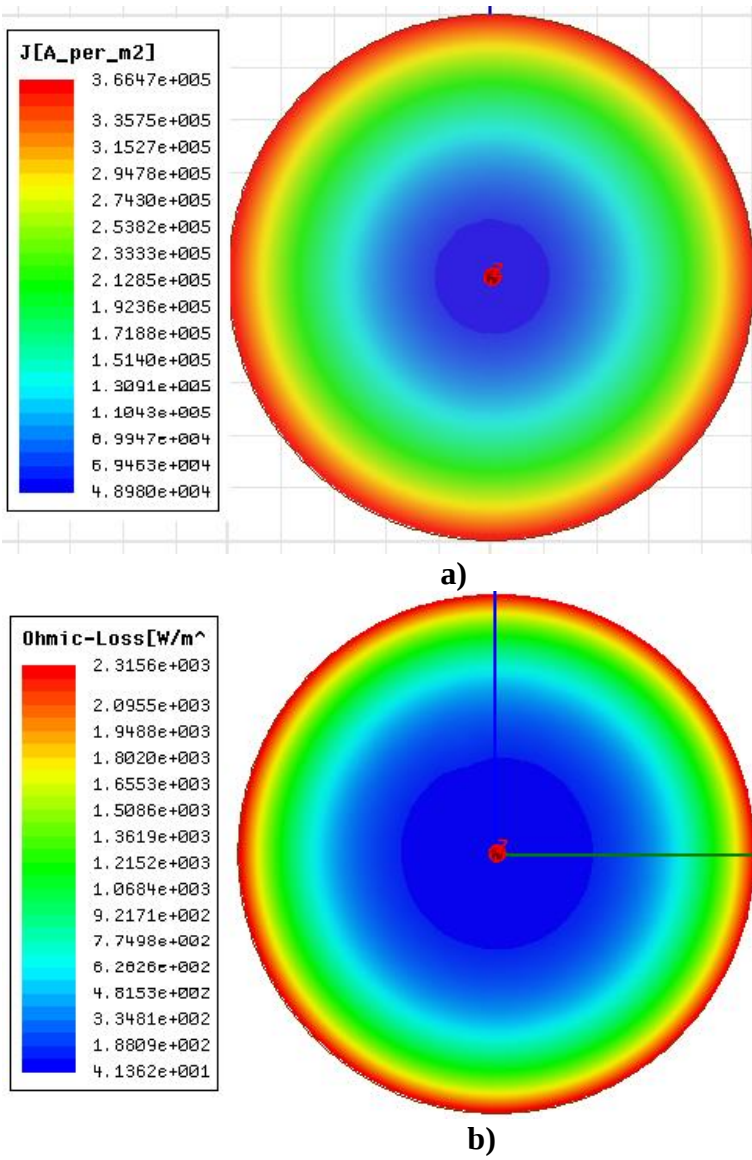
Şekil 4.8. Yatay, dikey ve kare durumunda dikdörtgen iletken üzerinde girdap kaybının frekansa göre değişimi



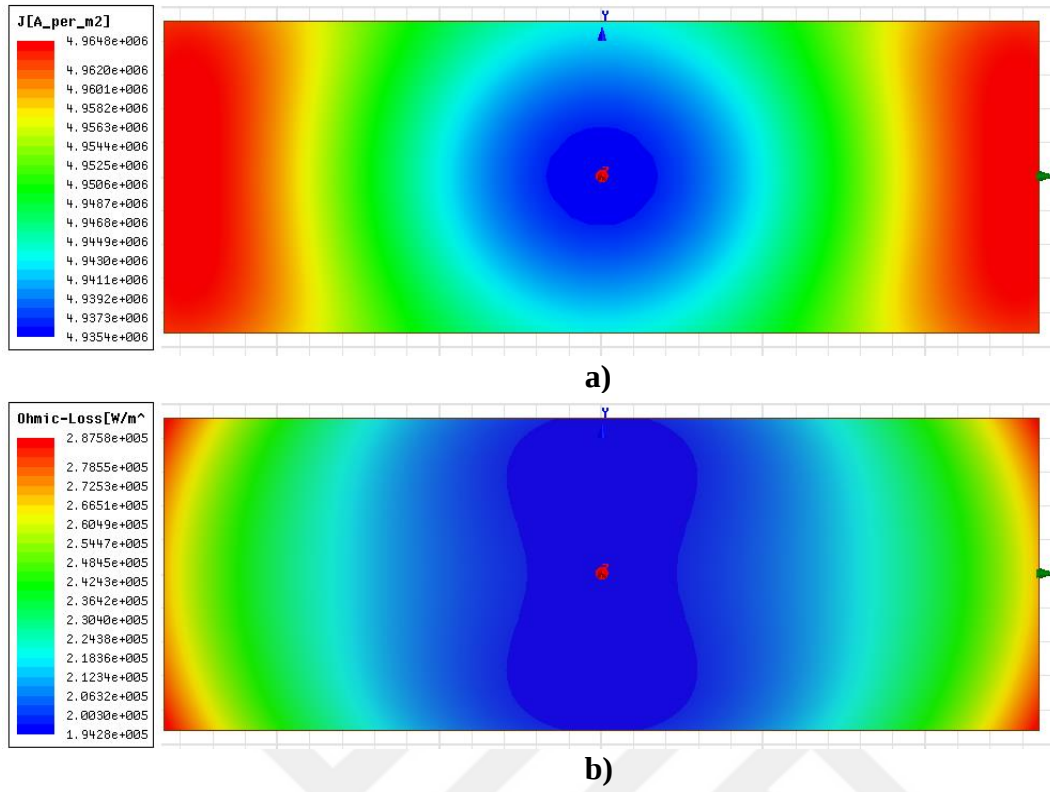
Şekil 4.9. Yatay, dikey ve kare durumunda dikdörtgen iletken üzerinde girdap kayıp faktörünün frekansa göre değişimi

4.3. Deri Etkisi (Skin Effect)

Bir iletkenin akım geçtiğinde, akım iletkenin kesiti boyunca homojen olarak dağılmayıp frekans değiştiğinde iç indüktansından dolayı iletkenin yüzeyinden yoğunlaşır. Böylece iletkenin etkin kesiti düşüp direnci artış gösterecektir. Bu olay deri etkisi olarak bilinmektedir. Deri etkisi, Maxwell yazılımında Şekil 4.13'te görüldüğü gibi yuvarlak ve Şekil 4.14'te dikdörtgen kesite sahip iletkenlerde incelenip, değişik frekans ve değişik kesitlere sahip iletkenlerde incelenmiştir. Çalışmalar sonucu değişik frekanslarda deri etkisinden dolayı deri etkisinden kaynaklanan harmonik kayıp faktörleri elde edilmiştir.

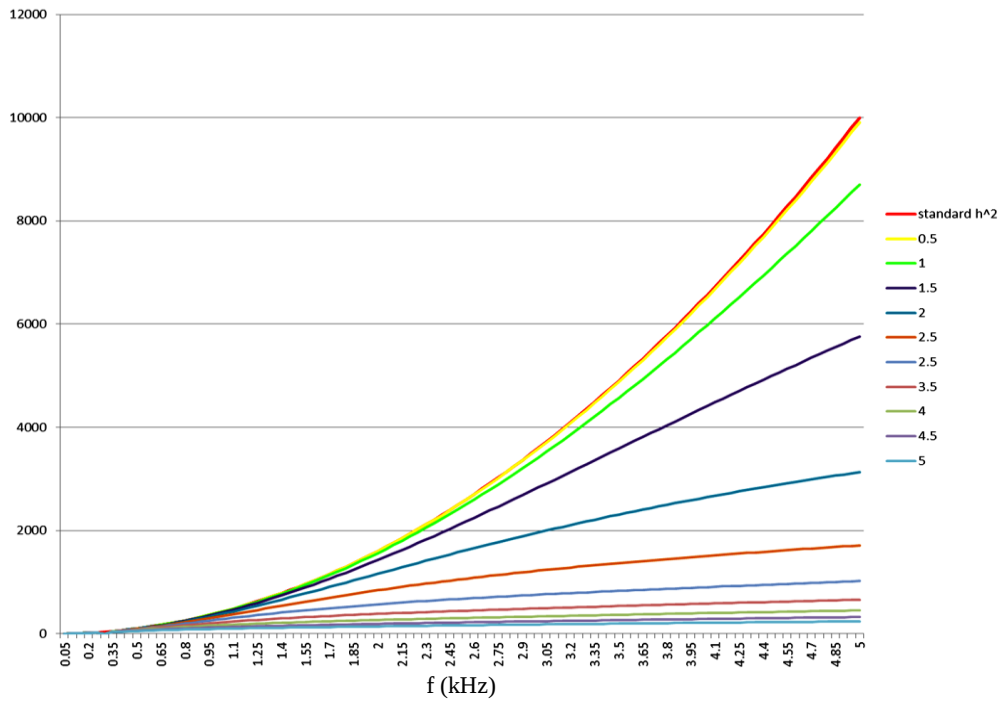


Şekil 4.13. Deri etkisinden dolayı yuvarlak kesite sahip iletkenin a) akım ve b) kayıp dağılımı



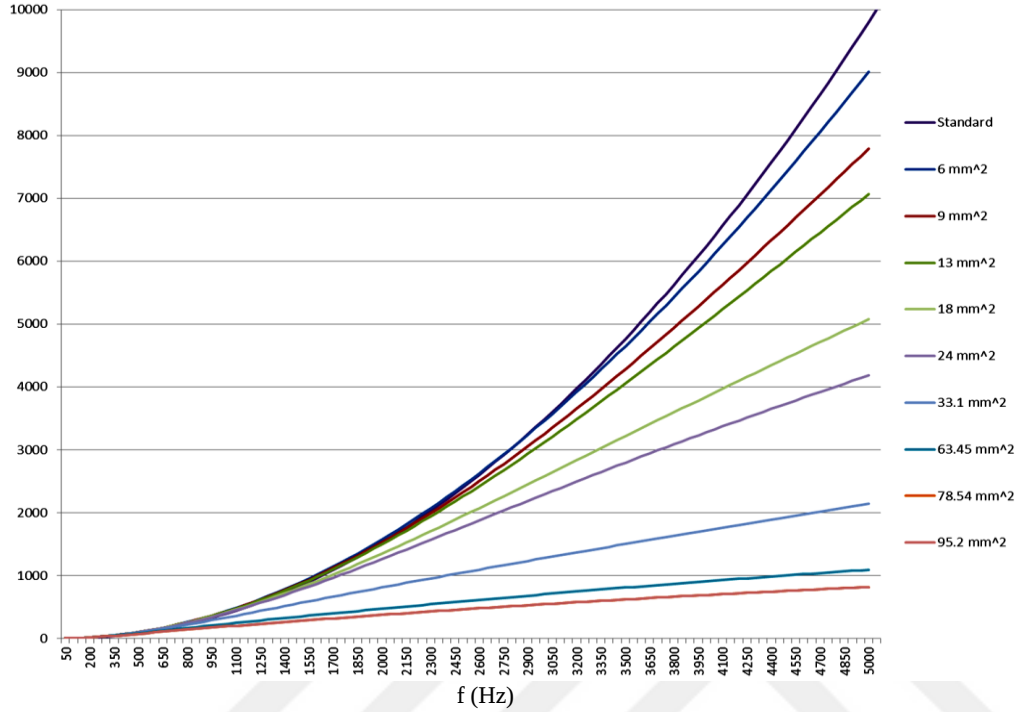
Şekil 4.14. Deri etkisinden dolayı dikdörtgen iletkende a) akım ve b) kayıp dağılımı

Yuvarlak iletkenlerde deri etkisinin harmonik kayıp faktör sonuçları Şekil 4.15 gibi elde edilmiştir.



Şekil 4.15. Yuvarlak iletkenlerde deri etkisinin harmonik kayıp faktör değişimi

Dikdörtgen iletkenlerde deri etkisinin harmonik kayıp faktör sonuçları Şekil 4.16 gibi elde edilmiştir.

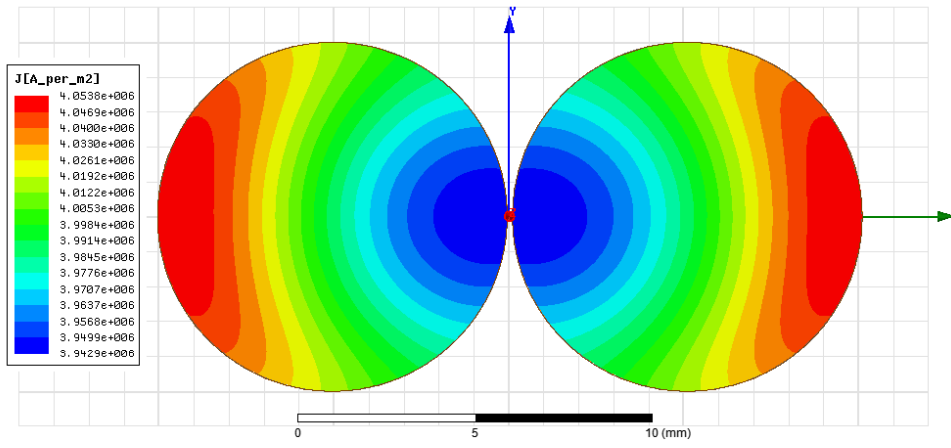


Şekil 4.16. Dikdörtgen iletkenlerde deri etkisinin harmonik kayıp faktör değişimi

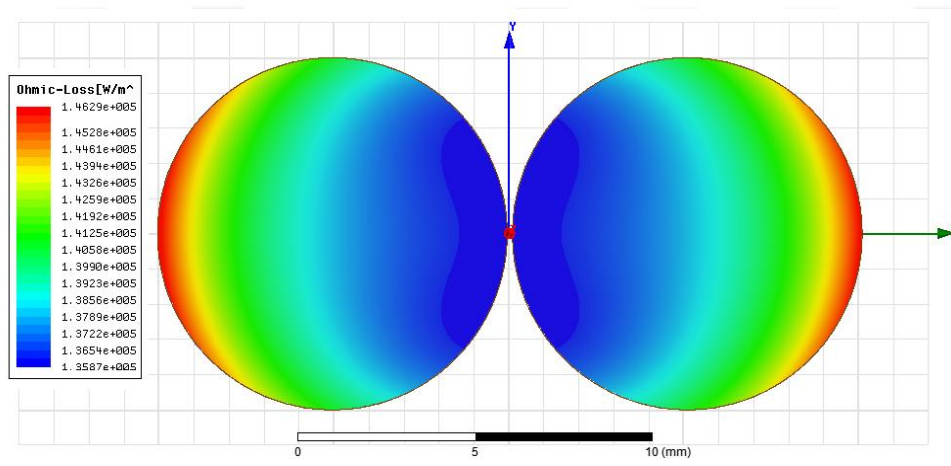
4.4. Yakınlık Etkisi (Proximity Effect) Kayıpları

İletkenler birbirine yakın konumda olduğu zaman ve iletkenlerden akım geçtiğinde akımların ürettiği manyetik alan diğer iletkenleri kesi, girdap kayıplarına yol açmanın yanı sıra, yakınlıklarından dolayı iletkenlerinin indüktans değerinin değişiminden dolayı akım dağılımı ve dolayısıyla kayıp dağılımının değişimi ortaya çıkmaktadır. Bu durumun kayıplar üzerinde etkisini incelemek için Şekil 4.18'deki gibi yuvarlak ve dikdörtgen iletkenler üzerinde yakınlık etkisi analiz edilmiştir. Yuvarlak iletkenler için sonlu elemanlar yöntemi ile değişik harmoniklerde yapılan analiz sonuçları Şekil 4.17'de akım yoğunluğunun dağılımı ve Şekil 4.18'de kayıpların dağılımı gösterilmiştir.

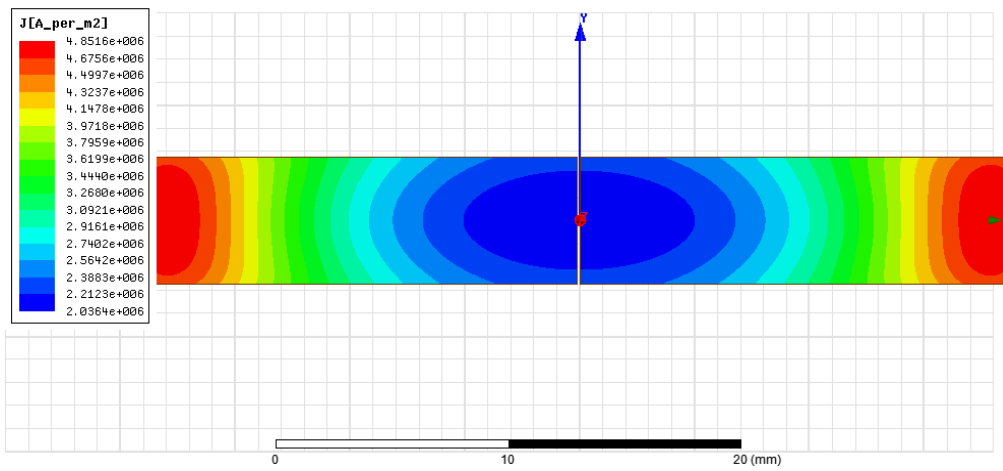
Dikdörtgen iletkenler için sonlu elemanlar yöntemi ile değişik harmoniklerde yapılan analiz sonuçları Şekil 4.19'de akım yoğunluğunun dağılımı ve Şekil 4.20'de kayıpların dağılımı gösterilmiştir.



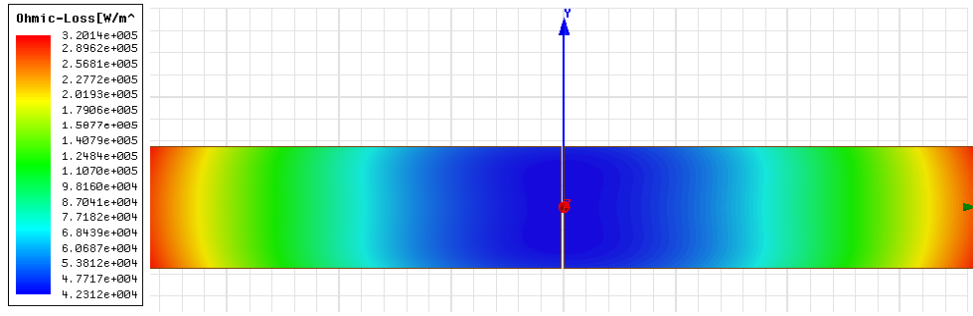
Şekil 4.17. Yuvarlak iletkenlerde yakınlık etkisinden dolayı akım yoğunluğunun dağılımı



Şekil 4.18. Yuvarlak iletkenlerde yakınlık etkisinden dolayı kayıp yoğunluğunun dağılımı



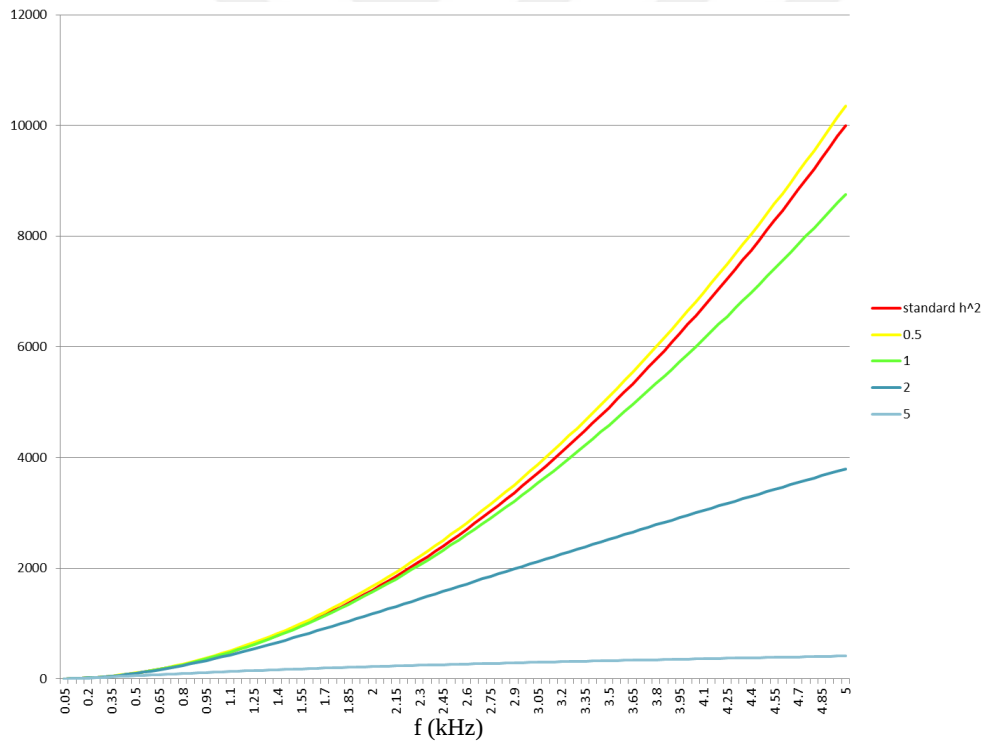
Şekil 4.19. Dikdörtgen iletkenlerde yakınlık etkisinden dolayı akım yoğunluğunun dağılımı



Şekil 4.20. Dikdörtgen iletkenlerde yakınlık etkisinden dolayı kayıp dağılımı

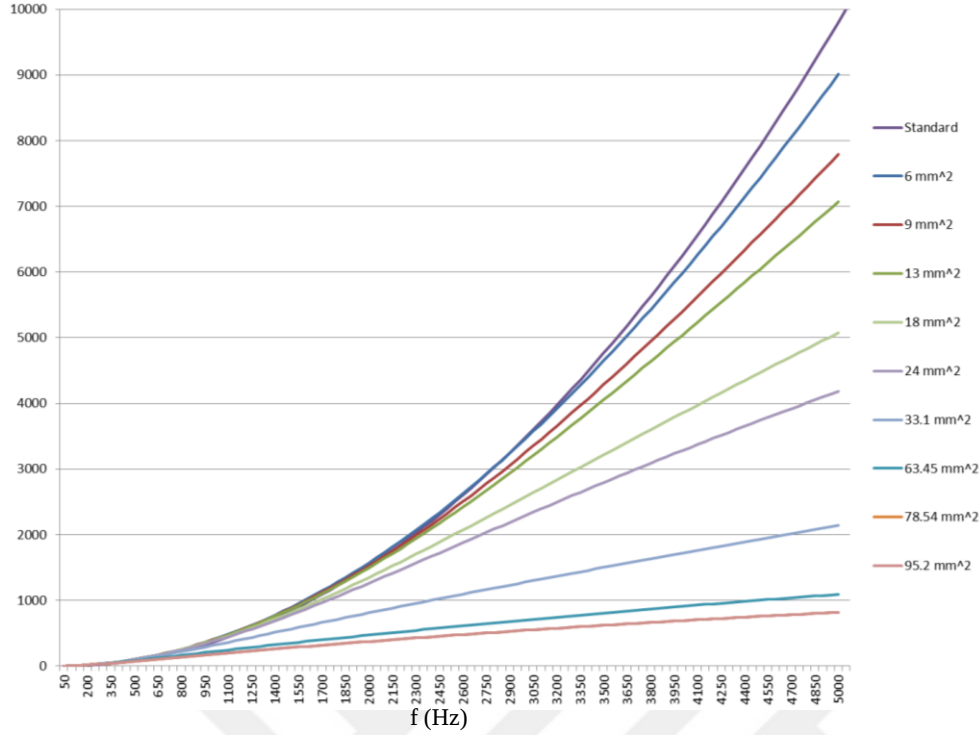
Yakınlık etkisinin harmonik kayıp faktör hesaplamaları yapılmıştır.

Yuvarlak iletkenler için yakınlık etkisinden dolayı harmonik kayıp faktör değerleri Şekil 4.21’de gösterilmiştir.



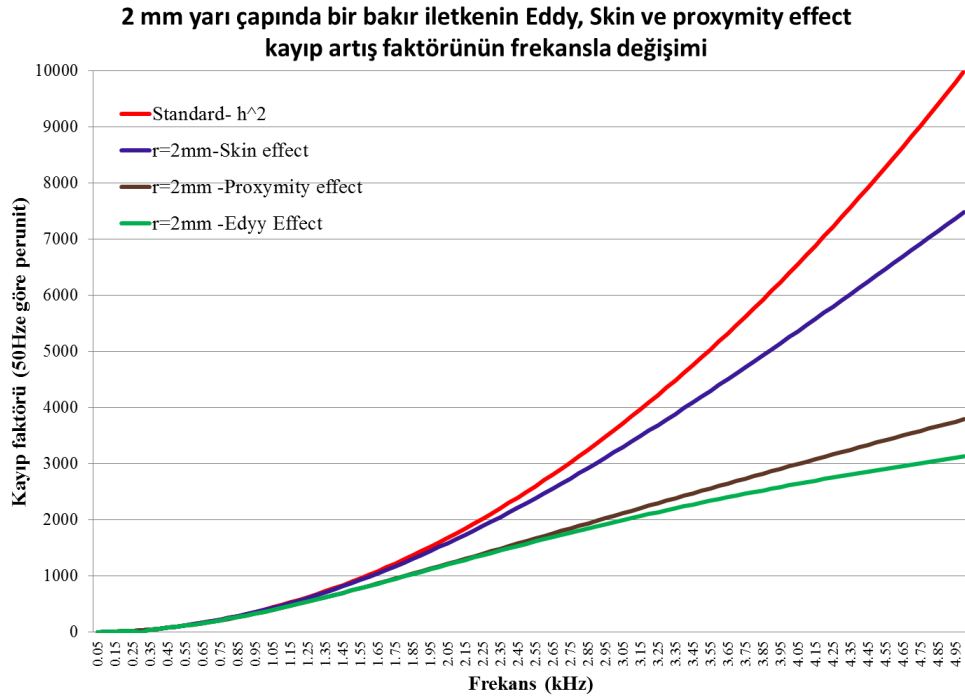
Şekil 4.21. Yuvarlak iletkenlerde yakınlık etkisinin harmonik kayıp faktörü

Yuvarlak iletkenler için yakınlık etkisinden dolayı harmonik kayıp faktör değerleri Şekil 4.22’de gösterilmiştir.

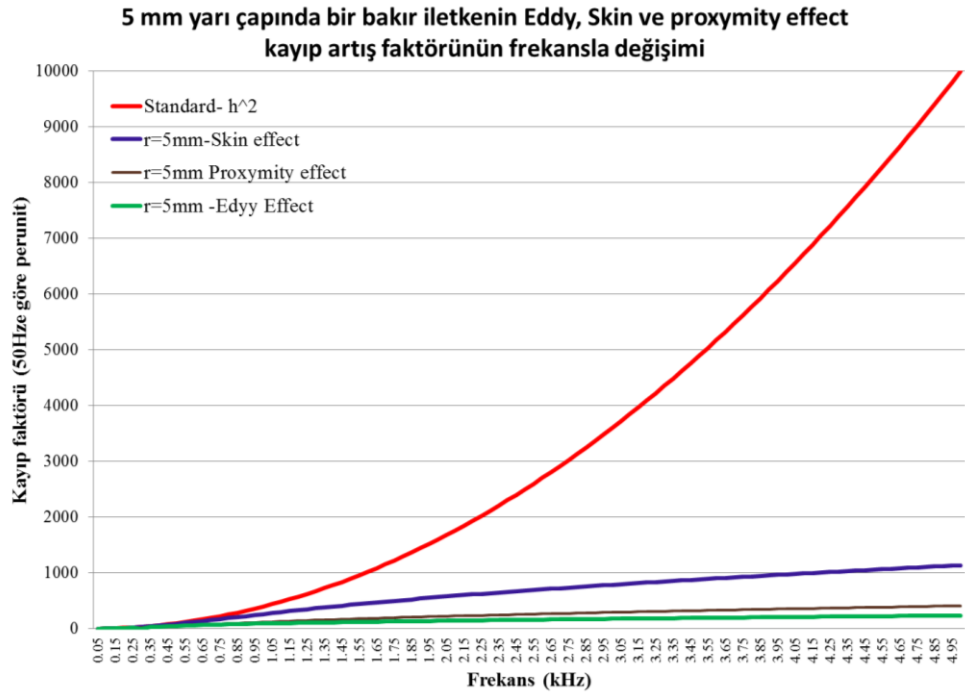


Şekil 4.22. Dikdörtgen iletkenlerde yakınlık etkisinin harmonik kayıp faktörü

Bildiğimiz gibi iki iletken arasındaki yakınlık etkisi deri etkisinden ve girdap akımının aynı anda olmasından kaynaklanmaktadır. İki farklı kesitte yuvarlak iletkenin girdap akım, deri etkisi ve yakınlık etkisinden dolayı harmonik kayıp faktörleri Şekil 4.23 ve Şekil 4.24'te sunulmuştur. Bu şekilden de görüldüğü gibi iki iletkenin harmonik kayıp faktörü deri etkisi ile girdap akım kayıp faktörünün arasında olup, yakınlık etkisinin kullanımı akım geçiren sargılarda için daha dikkatli ve doğru olacaktır.



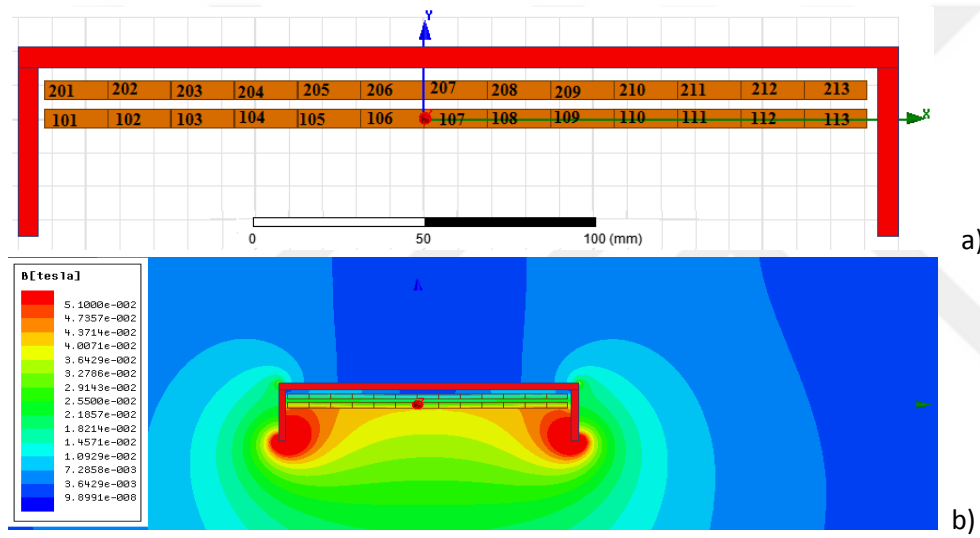
Şekil 4.23. 2 mm yarıçapa sahip yuvarlak iletkenlerde, girdap akım, deri etkisi ve yakınlık etkisinden dolayı harmonik kayıp faktörlerinin karşılaştırılması



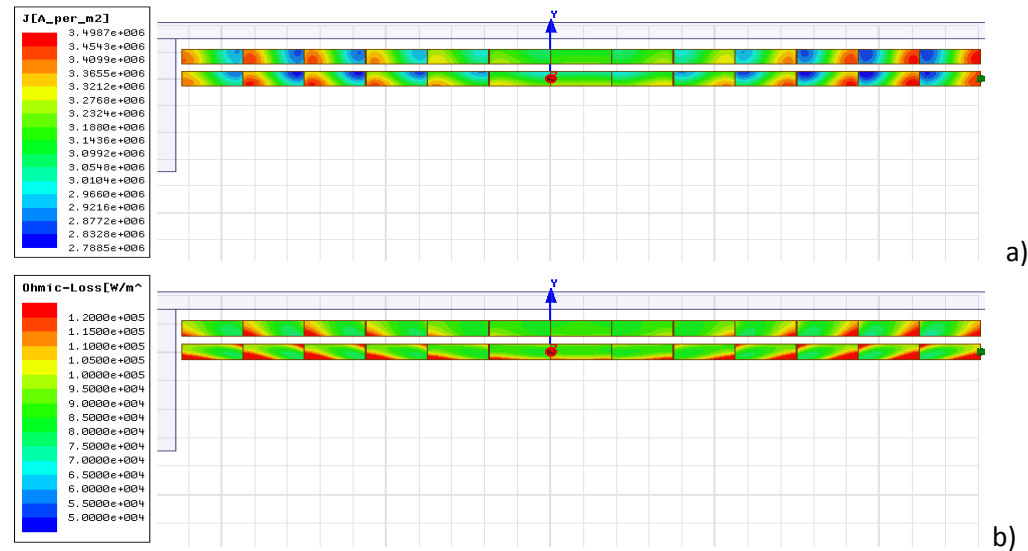
Şekil 4.24. 5 mm yarıçapa sahip yuvarlak iletkenlerde, girdap akım, deri etkisi ve yakınlık etkisinden dolayı harmonik kayıp faktörlerinin karşılaştırılması

4.5. Nüveli Yapıya Sahip Sargılar Üzerinde Yakınlık Etkisi Analizi

Başıboş (Stray) kayıpları transformatöre benzer bir yapıda incelemek için Şekil 4.24'te verilen model kullanılmıştır. Bu yapıda $95,2 \text{ mm}^2$ dikdörtgen iletken ve M5 nüve malzemesi kullanılmıştır. Nüve malzemesi gerçek bir transformatörün çalışma noktasına göre (B-H açısından) modellenmiştir. Aynı zamanda iletkenin akım yoğunluğu da 100 kVA'lık, 240 volt tek faz bir sargının değerlerinde seçilmiştir. Bu yapıda iletkenler Şekil 4.24-a gibi numaralanmıştır. İki boyutlu olarak analizi yapılan yapının manyetik alan dağılımı Şekil 4.24-b'de, akım yoğunluğu dağılımı Şekil 4.25-a'da ve kayıp yoğunluğunun dağılımı Şekil 4.25-b'de gösterilmiştir.

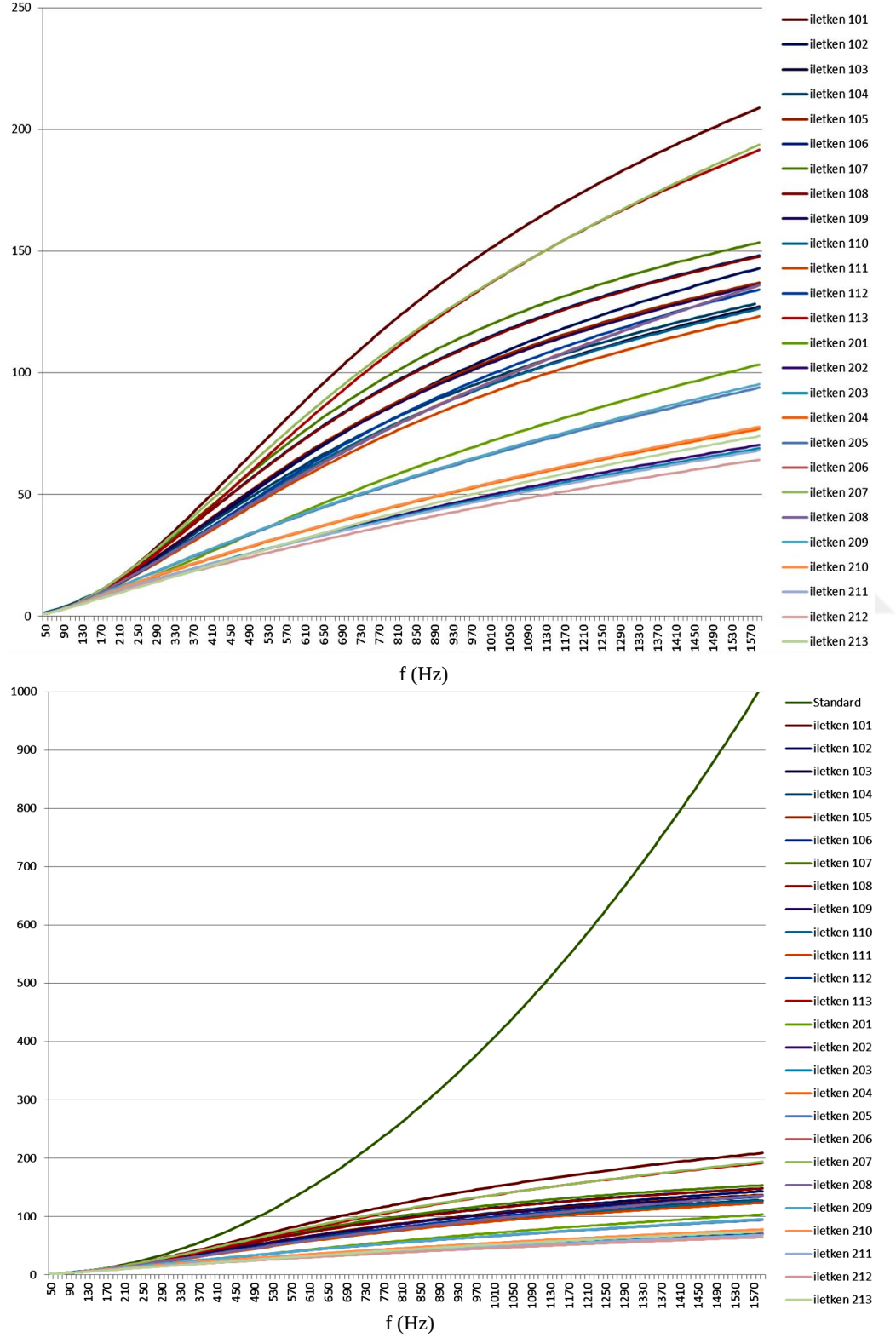


Şekil 4.25. Dikdörtgen bakır iletkenler ve transformatör nüvesi



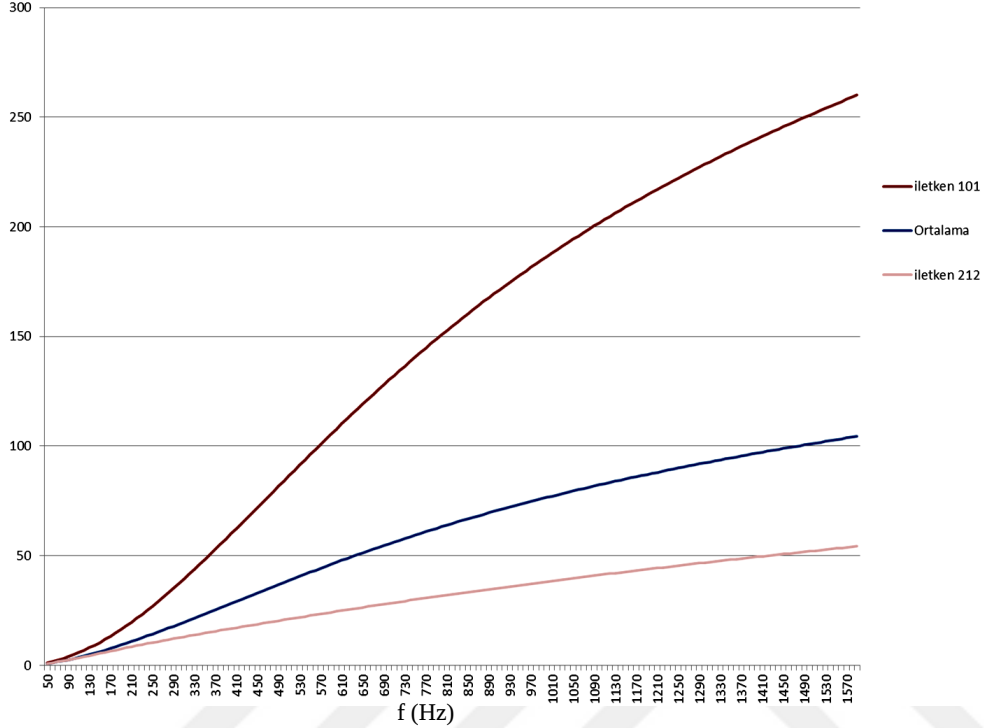
Şekil 4.26. Nüveli sargı yapıda (a) akım yoğunluğu (b) kayıp yoğunluğu dağılımı

Her iletken üzerinde kayıp yoğunluğunun integrali alındığında o iletkenin kayıpları hesaplanmaktadır. Şekil 4.26'da her bir iletkende harmonik kayıp faktörünü ve bu faktörlerin standart yönteme (h^2) göre farkını göstermektedir.



Şekil 4.27. İletkenler üzerindeki harmonik kayıp faktörlerinin frekansa göre değişimi

Şekil 4.27'deki eğrilerin minimum, maksimum ve ortalama değerleri Şekil 4.28'de gösterilmiştir.



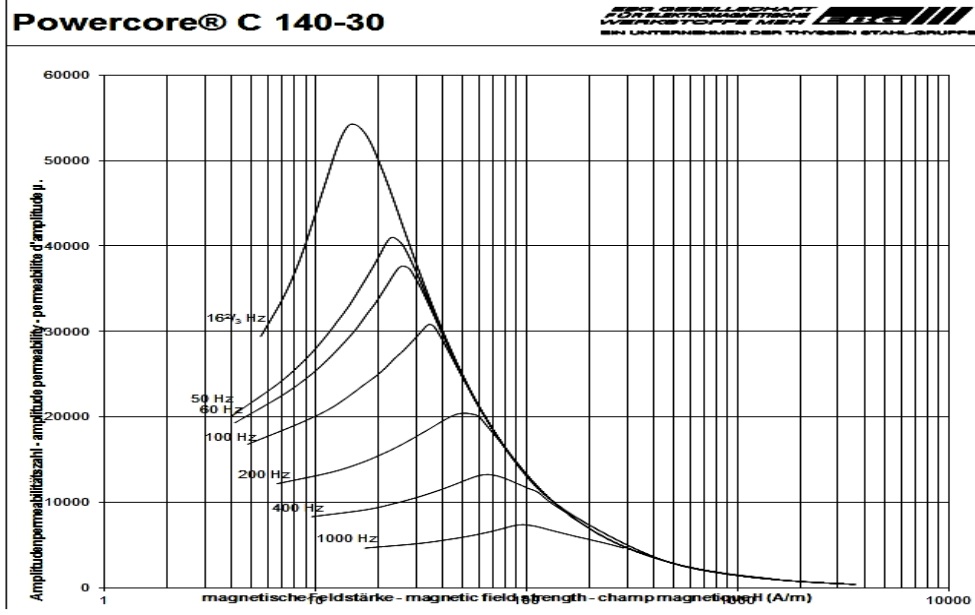
Şekil 4.28. Minimum, Maksimum ve ortalama harmonik kayıp faktör artışı eğrileri

Tez çerçevesinde iki boyutlu ve farklı sargı tiplerine, farklı sargı iletken kesit kombinasyon ve belli aralıklarla sargı iletken kesitlerine sahip durumlar için sonlu elemanlar yöntemi ile incelemeler yapıldı, toplam kayıp, anma frekans ve DA kaybı hesaplanıp, harmonikler için harmonik kayıp faktörü geliştirilmiştir. Bu analizler frekans tanım bölgesinde (domain) yapılmıştır.

Analizler yapılırken aşağıdaki hususlara dikkat edilmiştir.

- Modellenen ve çizilen problemler gerçek sargılara ait olacak şekilde incelenmiştir.
- Kullanılan materyallerin özellikleri gerçek materyal özellikleri şeklinde tanımlanmıştır.
- Farklı akım ve güce sahip transformatörler üzerinde incelemeler yapılmıştır.

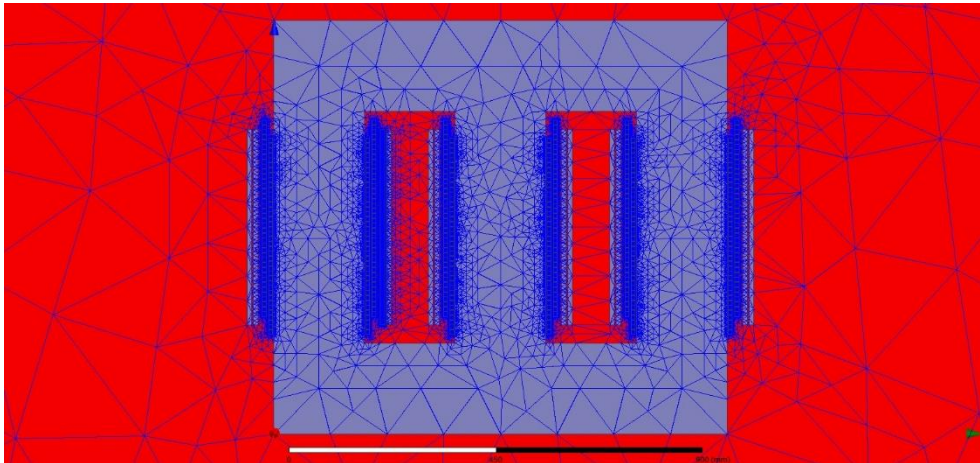
Sonlu elemanlar yöntemi ile yapılan çalışmalarda frekansa göre değişen nüve geçirgenlik özelliğinin değişimi de yazılımda dikkate alınmıştır. Bu özellik örneğin kullanımı yaygın olan M5 nüve malzemesi için Şekil 4.29'da verilmiştir.



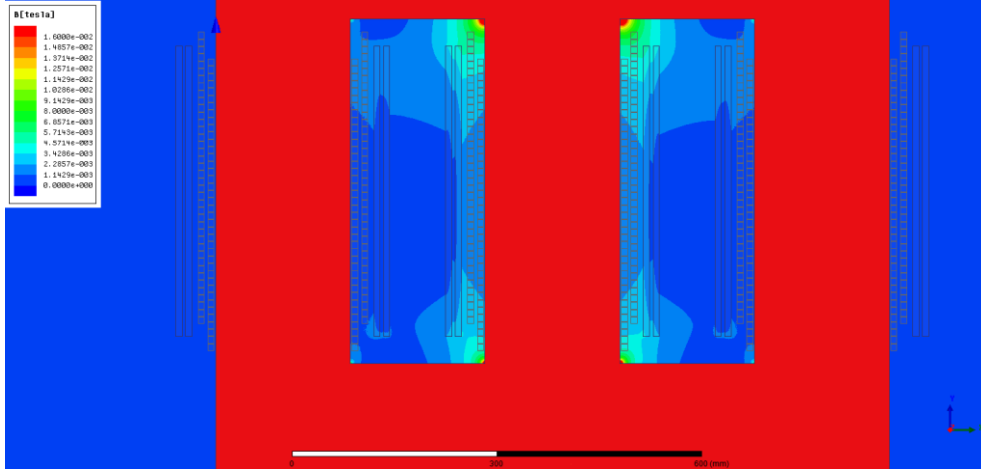
Şekil 4.29. Nüve malzemesinin (M5 sac) frekans ve akı yoğunluğuna göre manyetik geçirgenlik parametresinin (μ) değişimi

4.6. Transformatör Üzerinde Analizler

Tez çerçevesinde dağıtım güçlerini temsilen iki Farklı Güçte (1600 kVA ve 630 kVA) ve 33000/400 Volt 3 faz yağlı tip dağıtım transformatörü üzerinde analizler gerçekleştirilmiştir. Yapılan analizler sonucunda Transformatörlerin sargı ve diğer stray kayıplarının harmonike göre artış faktörlerinin düzeltilmiş eğrileri hesaplaması amacı doğrultusunda sonlu elemanlar yöntemine dayalı incelemeler yapılmıştır. İnceleme ve analiz ortamının şeması Şekil 4.30'da gösterilmiştir. Şekil 4.30 Sonlu elemanlar yönteminde yapılan incelemelerin mesh işlemi ile ilgi bir görüntü ortaya koymaktadır.

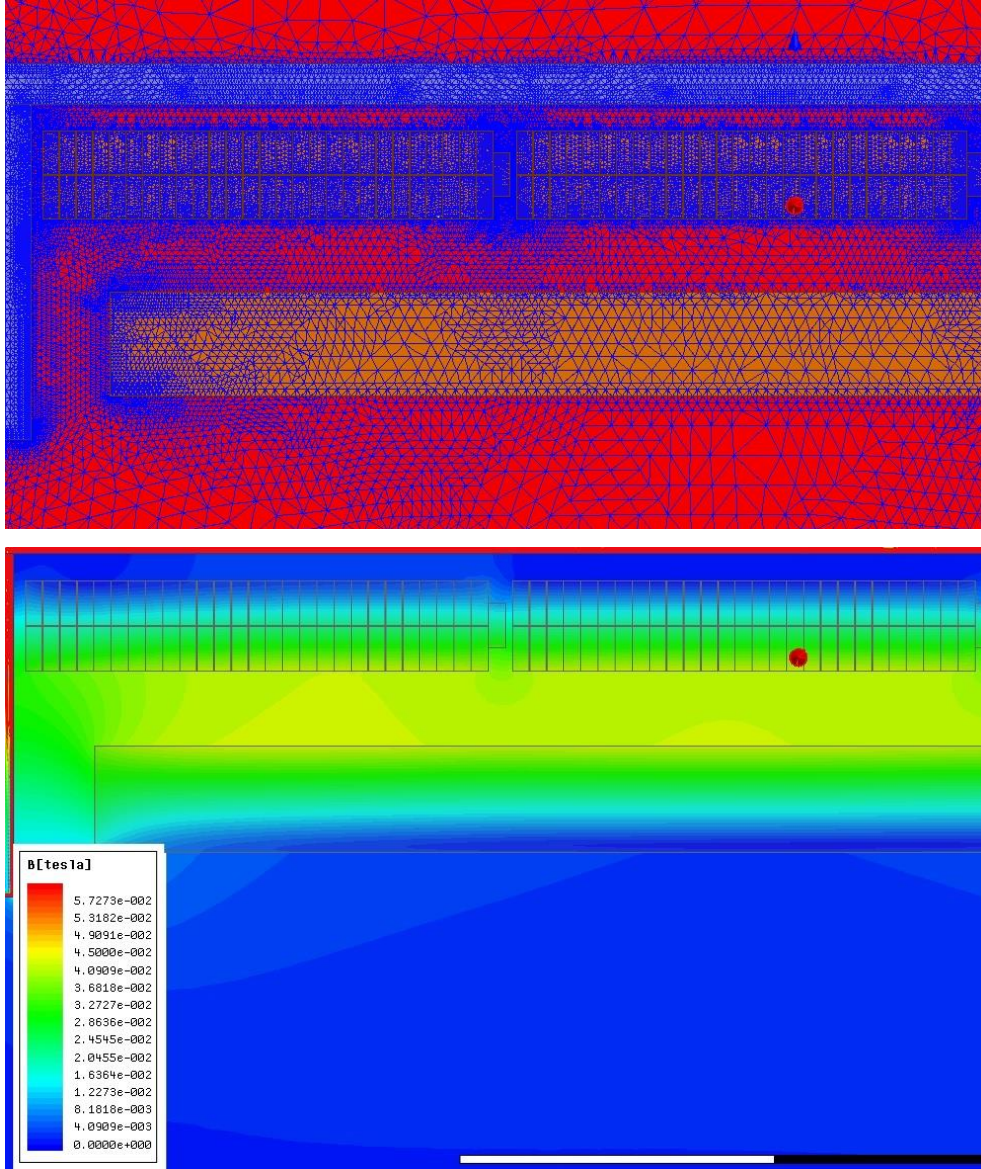


Şekil 4.30. Transformatörün benzetim ortamında çizimi ve mesh görünümü

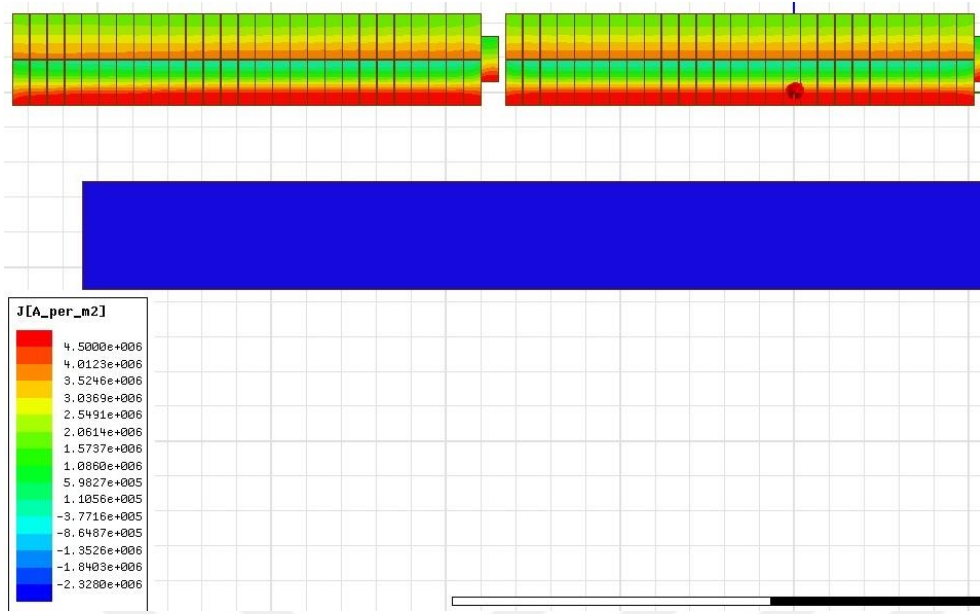


Şekil 4.31. Transformatörün benzetim ortamında çizimi ve mesh görünümü

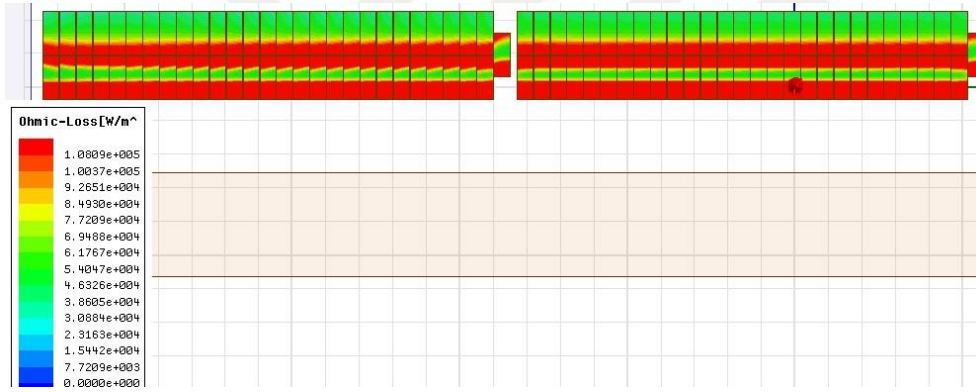
Şekil 4.32’de sargıları kesmekte olan manyetik alan gösterilmiştir. Bu analizde 55 paralel bakır iletken dizinine (sürekli transpoze olan iletken CTC) sahip bir tasarımın sonuçlarını ve manyetik alan dağılımını ve söz konusu manyetik alanın bakır iletkenleri kesişimi gösterilmiştir.



Şekil 4.32. 55 paralel CTC iletkenin üzerinde ve çevresinde manyetik alan dağılımı



Şekil 4.33. 55 paralel CTC iletkenin üzerinde akım dağılımı



Şekil 4.34. 55 paralel CTC iletkenin üzerinde Kayıp dağılımı



5. HARMONİKLİ YÜKLERİ BESLEYEN TRANSFORMATÖRÜN TERMAL MODELLEMESİ, FAYDALI ÖMÜR HESABI VE YÜKLENEBİLİRLİLİĞİ

Harmonikli yükleri besleyen transformatörlerin termal modelleme çalışmaları bu bölüm çerçevesinde yapılmıştır. Termal modellemede elektrik-termal benzerlik yöntemi kullanılmıştır. Bu bölümün ilk kısmında elektrik-termal benzerlik yönteminin teorisi anlatılmıştır. İkinci aşamada, üst yağ sıcaklık termal modellemesi anlatılmıştır. Bu kısımda termal modelinin bileşenleri açıklanmıştır. Üçüncü kısımda termal dirençlerin sıcaklığa bağlı değişimi açıklanmıştır.

5.1. Elektrik-Termal Benzerlik Teorisinin Esasları

Tez kapsamında, harmonikli yükleri besleyen transformatörlerin termal analiz çalışmaları yürütülmüştür. Bu analizde termal elektrik benzerliği kullanılmıştır.

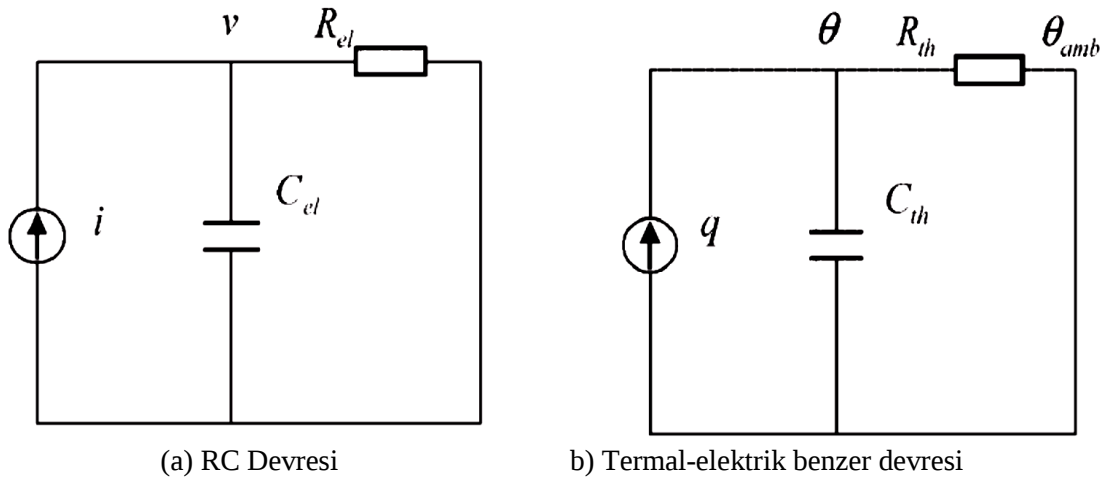
Güç transformatörünün termal analizinde kullanılan model ile elektrik devre analizi arasındaki benzerlik aşağıda kısaca açıklanmaktadır. Termal analiz çalışmalarında, ısı transferi, enerji denge denklemi ile açıklanmaktadır [5, 6, 10, 27].

$$q = C_{th} \frac{d\theta}{dt} + \frac{\theta - \theta_{amb}}{R_{th}} \quad (5.1)$$

Bir RC elektrik devresinde akım ve gerilim arasındaki ilişki Eş. 5.2’de verilmektedir.

$$i = C_{el} \frac{dv}{dt} + \frac{v}{R_{el}} \quad (5.2)$$

Eş. 5.1 ve 5.2’ye uygun devre bağlantıları Şekil 5.1’de verilmektedir [5, 6, 10, 27].



Şekil 5.1. Elektrik ve termal-elektrik benzer devreleri; (a) RC elektrik devresi, (b) termal elektrik benzer devresi

Şekil 5.1-a ve 5.1-b’de verilen elektrik ve termal-elektrik benzer devrelerin parametreleri arasındaki benzerlikler Çizelge 5.1’de verilmektedir.

Çizelge 5.1. Termal-Elektrik benzerliğin niceliği.

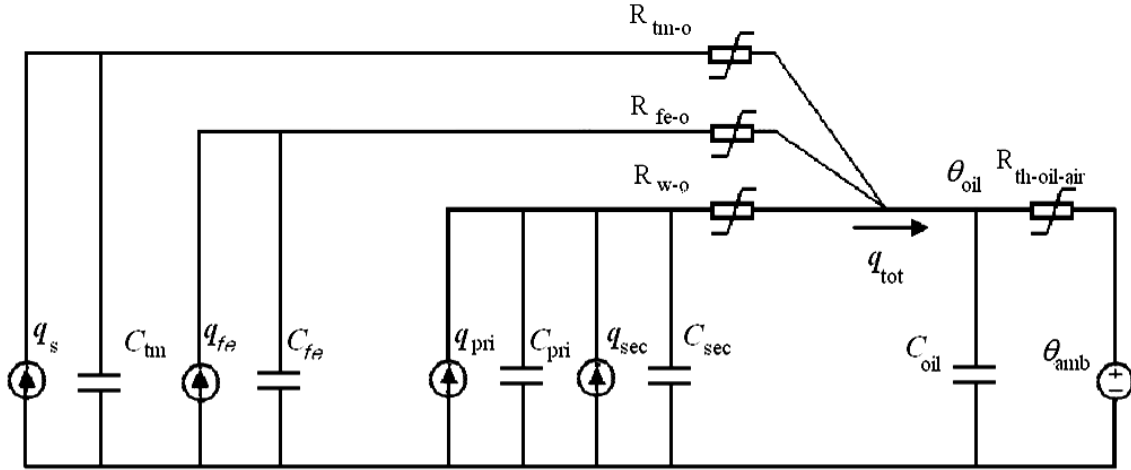
Değişken	Termal model	Elektriksel devre
Termal değişken	Isı transferi, q, w	Akım, i , amper
Çapraz değişken	Sıcaklık, $\theta, ^\circ\text{C}$	Gerilim, v , volt
Tüketen parametre	Termal direnç, $R_{th}, ^\circ\text{C} / w$	Elektriksel direnç, R_{el}, Ω
Depolayan parametre	Termal kondansatör, $C_{th}, J/^\circ\text{C}$	Elektriksel kondansatör, C_{el}, f

Termal-elektrik benzerliğin kullanımı, termal olayların analizinde ve anlaşılmasında elektrik-elektronik mühendisliği konuları açısından kolaylık getirmektedir [5, 10].

5.2. Transformatörün Üst-Yağ Sıcaklığının Termal Modellemesi

Bir transformatörün içinde meydana gelen güç kayıpları ısıya dönüşmektedir. Bu kayıplar, nüve ve bobin sargılarının kayıplarından oluşmaktadır. Transformatör içerisinde meydana gelen ısı, soğutma yağı ve soğutma yüzeyi vasıtasıyla dış ortama aktarılır. Isı transferi, gibi üç ayrı yoldan gerçekleştirilir [1, 2, 4, 5, 10, 14]. Transformatör ısı transferinde önem sırası ile i-taşıma ii-iletim ve iii-Işınım yolu ile gerçekleştirilmektedir.

Bir ONAN /OFAF (Oil Natural-Air Natural/Oil Forced-Air Forced) transformatörün eşdeğer termal devresi doğrusal olmayan bir termal direnç, bir termal kondansatör ve bir ısı kaynağından oluşmaktadır. Şekil 5.2, bir güç transformatörünün üst-yağ sıcaklığının termal modelini göstermektedir [10, 31, 40].

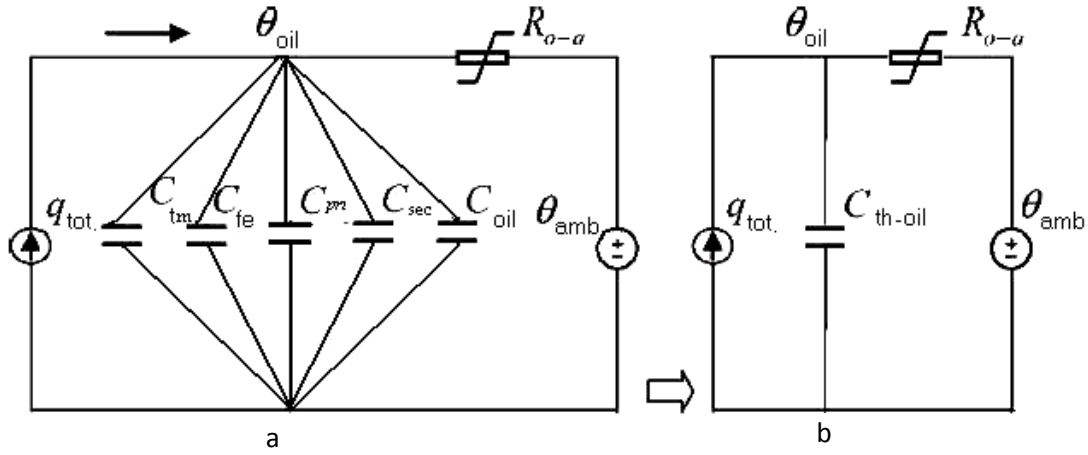


Şekil 5.2. Yağlı tip bir güç transformatörünün üst-yağ sıcaklığının termal modeli

Bu şekilde, q_s , q_{fe} , q_{pri} , q_{se} sırasıyla stray kayıpları (the stray losses), nüve, primer ve sekonder sargıların kayıplarıdır. C_{tm} , C_{fe} , C_{pr} , C_{se} sırasıyla kazan (kazan ve diğer metal bileşenler), nüve, primer ve sekonder sargı iletkenlerin termal kondansatörlerdir. R_{tm-o} , R_{fe-o} , R_{w-o} , R_{o-a} , sırasıyla kazanla yağ, nüve ile yağ, sargılarla yağ ve yağla dış ortam arasındaki doğrusal olmayan termal dirençlerdir. θ_{oil} , yağın üst sıcaklığını ve θ_{amb} ise ortam sıcaklığını göstermektedir. Transformörde meydana gelen toplam kayıp $q_{tot}=q_s+q_{fe}+q_{pri}+q_{sec}$ olarak ifade edilmektedir [10, 31].

R_{tm-o} , R_{fe-o} ve R_{w-o} termal dirençleri, R_{o-a} 'ya göre çok küçük (5×10^{-5} K/W aralığında) olduklarından ihmal edilebilir. Bunun sonucu olarak transformatörün üst-yağ sıcaklığının termal modeli Şekil 5.3-a ve 5.3-b'de görüldüğü gibi basitleştirilebilir. Güç transformatörünün basitleştirilmiş üst-yağ sıcaklığının eşdeğer termal modelinde, toplam termal kondansatör değeri (C_{th-oil}) Eş. 5.3'ten elde edilir [5, 9, 10, 34, 35].

$$C_{th-oil} = C_{tm} + C_{fe} + C_{pri} + C_{sec} + C_{oil} \quad (5.3)$$



Şekil 5.3. Transformatörün üst-yağ sıcaklığının termal modelleri; (a) detaylı termal model, (b) basitleştirilmiş termal model

IEEE Standardına (IEEE Std. C57.91) göre transformatörün üst-yağ sıcaklık artışı, birinci dereceden bir diferansiyel denklem ile ifade edilir [1, 9, 26, 31, 40]. Bu standarda göre transformatörün üst-yağ sıcaklığının termal modeli transformatörün anma gücünde tanımlanmıştır. Bu standartta ayrıca, termal modelde kullanılan termal direnç, termal kondansatör ve ortam sıcaklığı sabit olarak alınmıştır [5, 6, 9, 10, 11, 36, 37].

$$\tau_{to} \frac{d\theta_{tor}}{dt} = -\theta_{tor} + \theta_u \quad (5.4)$$

Eş. 5.4'ün çözümü aşağıdaki denklemde (Eş. 5.5) verilmektedir.

$$\theta_{tor} = (\theta_u - \theta_i)(1 - e^{-(t/\tau_{to})}) + \theta_i \quad (5.5)$$

Transformatörün üst-yağ sıcaklığının zaman sabiti Eş. 5.6'dan elde edilir [1, 31].

$$\tau_{to} = C_{th-oil} R_{o-a} \quad (5.6)$$

Güç transformatörleriyle ilgili IEEE standardının önerdiği termal kapasitör hesaplama yöntemi Eş. 5.7'de sunulmaktadır [1, 21, 42].

$$\begin{aligned}
C_{th-oil} = & 0.1323 \text{ (nüve ve sargıların ağırlığı, kg olarak)} \\
& + 0.0882 \text{ (kazan ve metal bağlantıların ağırlığı, kg olarak)} \\
& + 0.3513 \text{ (yağ, litre olarak)}
\end{aligned}
\tag{5.7}$$

Transformatörlerin primer ve sekonder sargılarında genel olarak bakır iletkeni kullanılmaktadır. Bazı uygulamalarda, transformatörün maliyetini düşürmek amacıyla bakır iletken yerine alüminyum iletken tercih edilmektedir. Buna göre transformatörlerin hem primer hem de sekonder sargıları bakır, alüminyum veya herhangi biri bakır ve diğeri alüminyum olabilmektedir. Farklı sıcaklıklardaki alüminyum ve bakır iletkenlerinin özel termal kapasitans değerleri Çizelge 5.2’de verilmektedir [42].

Çizelge 5.2. Alüminyum ve bakırın termal kapasitans değerleri

Sıcaklık (K)	İletken malzeme		Termal kapasitans oranı (Al/CU)
	Alüminyum	Bakır	
298.15	897 J/kg-K	385 J/kg-K	2.5055
350	930.6 J/kg-K	392.6 J/kg-K	2.3703
400	955.5 J/kg-K	398.6 J/kg-K	2.3971

Çizelge 3’te görüldüğü gibi alüminyum iletkenin termal kapasitansı bakır iletkenin termal kapasitansının en az iki mislidir. Eş. 5.7, bakır iletkenli transformatörler için geçerlidir. Projede, alüminyum iletkenli veya bakır-alüminyum iletkenli transformatörler için IEEE’nin sunduğu denklem (Eş. 5.7) geliştirilerek Eş. 5.8 elde edilmiştir [22, 42].

$$\begin{aligned}
C_{th-oil} = & 0.1323 \text{ (nüvenin ağırlığı, kg olarak)} \\
& + 0.1323 \text{ (bakır iletkenin ağırlığı, kg olarak)} \\
& + 0.3162 \text{ (alüminyum iletkenin ağırlığı, kg olarak)} \\
& + 0.0882 \text{ (kazan ve metlall bağlantıların ağırlığı, kg olarak)} \\
& + 0.3513 \text{ (yağ hacmi, litre olarak)}
\end{aligned}
\tag{5.8}$$

Eş. 5.6’da işaret edilen R_{o-a} (termal direnç) aşağıdaki denklemden elde edilmektedir.

$$R_{o-a} = \frac{\Delta\theta_{tor}}{q_{tot}} \quad (5.9)$$

IEEE tarafından önerilen transformatörün üst-yağ sıcaklığının termal modeli Eş. 5.10`da verilmektedir [1, 18, 36, 37].

$$\left[\frac{k^2\beta+1}{\beta+1} \right]^n \cdot \Delta\theta_{tor} = \tau_{to} \cdot \frac{d\Delta\theta_{tor}}{dt} + \Delta\theta_{tor} \quad (5.10)$$

5.3. Doğrusal Olmayan Termal Özellikleri Dikkate Alarak Transformatörün Üst-Yağ Sıcaklığının Termal Direnç Hesabı

IEEE tarafından sunulan termal modelin parametreleri yukarıda bahsedildiği gibi sabit olarak alınmaktadır [5, 10, 11, 18, 34]. Ancak, bu parametreler gerçekten sabit olmayıp sıcaklığa bağlı olarak değişmektedir. Bu değişim (termal direnç ve termal kondansatörün sıcaklığa göre değişimi) doğrusal olmayan bir değişimdir. Buna göre IEEE tarafından önerilen modelde, doğrusal parametrelerin yerine doğrusal olmayan parametrelerin kullanılmasıyla (doğrusal olmayan termal direnç ve kondansatör), ilgili modelin geliştirilmesi mümkün olmaktadır. Sunulan modelin doğrusal olmayan parametrelerinin hesaplamalarıyla ilgili işlemler aşağıda verilmektedir.

Transformatörün üst-yağ sıcaklığının termal direnci, R_{o-a} ısı transferi teorisine göre Eş. 5.9`da verilmektedir. Isı transfer teorisine göre, eğimli dikey ve yatay tabakalar ve silindirik sargıların etrafında doğal yağ konveksiyonu deneysel çalışmalardan elde edilir [10, 11]. Bu çalışmaların sonucu Eş. 5.11`de verilmektedir [6, 10, 11, 31, 40].

$$N_u = C \times [G_r \times P_r]^n \quad (5.11)$$

Bu denklemde C ve n deneysel sabitler olup yağın sirkülasyonunun laminar veya türbülanslı olduğuna bağlıdır. C ve n ile ilgili değerler, Çizelge 5.3`te verilmektedir [11, 40].

Çizelge 5.3. C ve n sabitleri için deneysel değerler

Yağın sirkülasyon tipi	C	n
Laminar	0.59	0.25
Türbülanslı	0.1	0.33

Nusselt sayısı (N_u), taşınım ısı transfer katsayısıyla, iletim ısı transfer katsayısının arasındaki ilişkiyi ifade eden boyutsuz bir sayıdır. Bu sayı Eş. 5.12’de verilmektedir [10, 11, 31].

$$N_u = \frac{h \times L}{k} \quad (5.12)$$

Prandtl sayısı (P_r), bir akışkan tabakasında taşınım yoluyla meydana gelen ısı transferinin, iletim yoluyla meydana gelen ısı transferine oranı olarak tanımlanır [6, 10, 11, 31]. Bir güç transformatörü ile ilgili Prandtl sayısı, Eş. 5.13’te verilmektedir [6, 10, 31, 40].

$$P_r = \frac{c_{oil} \times \mu}{k} \quad (5.13)$$

Grashof sayısı (G_r), akışkanların dinamiği ve ısı transferinde kullanılan boyutsuz bir sayıdır. Grashof sayısı Eş. 5.14’ten elde edilmektedir [10, 11, 40].

$$G_r = \frac{L^3 \times p_{oil}^2 \times g \times \beta \times (\Delta\theta_{oil})}{\mu^2} \quad (5.14)$$

Grashof ve Prandtl sayısının çarpımı, ısı transferinde taşınım yoluyla yapılan ısı transferini karakterize eden boyutsuz Rayleigh sayısını verir [10].

$$R_a = G_r P_r \quad (5.15)$$

Eş. 5.12, 5.13 ve 5.14’ü, Eş. 5.11’de yerine koyarsak Eş. 5.16’yı elde edebiliriz [10, 31, 40].

$$\frac{h \times L}{k} = C \times \left[\left(\frac{c_{oil} \times \mu}{k} \right) \times \left(\frac{L^3 \times p_{oil}^2 \times g \times \beta \times (\Delta\theta_{oil})}{\mu^2} \right) \right]^n \quad (5.16)$$

Transformatör yağının yoğunluğu ile sıcaklık arasındaki ilişki Eş. 5.17’de verilmektedir [10, 31, 40].

$$\rho_{oil}(\theta) = 1098.72 - 0.712\theta \quad (5.17)$$

Yağın termal iletkenliği ile sıcaklık arasındaki ilişki Eş. 5.18’de verilmektedir [10, 31, 40].

$$k_{oil}(\theta) = 0.1509 - 7.101E - 0.5\theta \quad (5.18)$$

Yağın termal kapasitesi ile sıcaklık arasındaki ilişki Eş. 5.19’da verilmektedir [10, 31, 40].

$$c_{oil}(\theta) = 807.163 + 3.5\theta \quad (5.19)$$

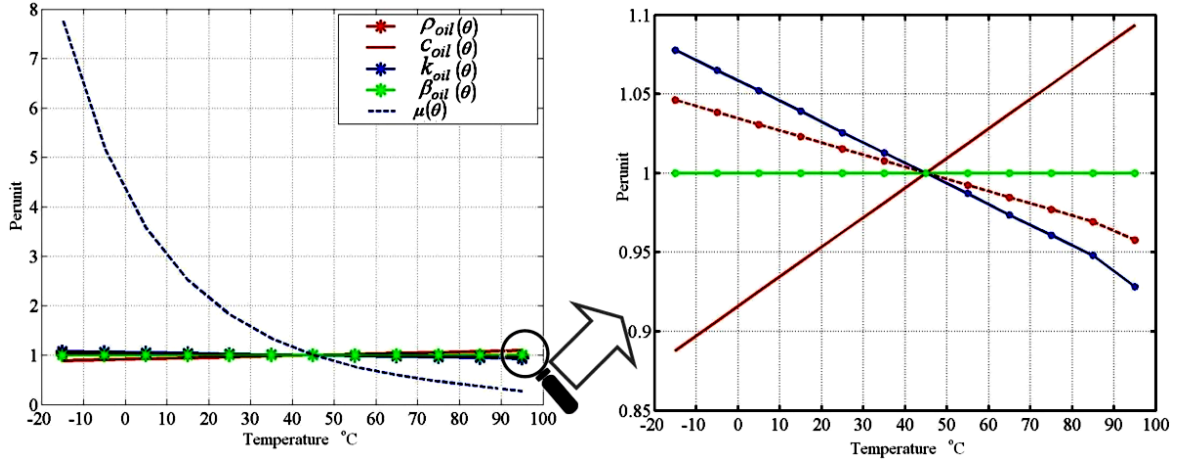
Yağın termal genleşme katsayısı ile sıcaklık arasındaki ilişki Eş. 5.20’de verilmektedir [10, 40].

$$\beta_{oil}(\theta) = 8.6 \times 10^{-4} \quad (5.20)$$

Yağın viskozitesi ile sıcaklık arasındaki ilişki Eş. 5.21’de verilmektedir [10, 31, 40].

$$\mu(\theta) = 0.08467 - 0.0004\theta + 5E - 7\theta^2 \quad (5.21)$$

Transformatör yağının özelliklerinin sıcaklığa göre değişimleri Şekil 5.4’te gösterilmektedir [10, 11, 40].



Şekil 5.4. Transformatör yağının fiziksel özelliklerinin sıcaklığa göre değişimi

Şekil 5.4'te görüldüğü gibi transformatör yağının akışkanlık değeri yağın diğer parametrelerine (ρ_{oil} , c_{oil} , k , β_{oil}) göre yağın sıcaklığından daha çok etkilenmektedir. Buna göre bu parametreler, sabit olarak kabul edilebilirler. Bu husus dikkate alındığında, Eş. 5.17-5.21, Eş. 15'te yerlerine yazılırsa Eş. 5.22, elde edilir [10, 11, 40].

$$h = C_1 \times \left(\frac{\Delta\theta_{oil}}{\mu(\theta)} \right)^n \quad (5.22)$$

C1 katsayısı Eş. 5.23'te verilmektedir.

$$C_1 = C \times \left[\rho_{oil}^2 \times g \times \beta_{oil} \times k^{\left(\frac{1-n}{n}\right)} \times L^{\left(\frac{3n-1}{n}\right)} \times c_{oil} \right]^{(n)} \quad (5.23)$$

Termal elektrik benzerlik devresinde kullanılan termal direnç R_{o-a} , Eş. 5.24'ten elde edilir.

$$R_{o-a} = \frac{\Delta\theta_{tor}}{q_{tot}} = \frac{1}{h \times A} \quad (5.24)$$

Eş. 5.22-5.24 nolu denklemler Eş. 5.24'de kullanılırsa Eş. 5.25 elde edilir [10, 40].

$$R_{o-a} = \frac{1}{C_1 \left(\frac{\Delta \theta_{oil}}{\mu(\theta)} \right)^n \times A} = \frac{\mu(\theta)^n}{C_1 \Delta \theta_{oil}^n \times A} \quad (5.25)$$

Eş. 5.24'te görüldüğü gibi transformatörün termal direnci, yağın akışkanlığına, sıcaklığa ve soğutma yüzeyine bağlı olarak değişmektedir. Elde edilen termal modelde, termal kondansatörün değişimi, termal direncin değişimine göre çok küçük olduğundan genel olarak sabit alınmaktadır.

5.4. Doğrusal Olmayan Termal Model

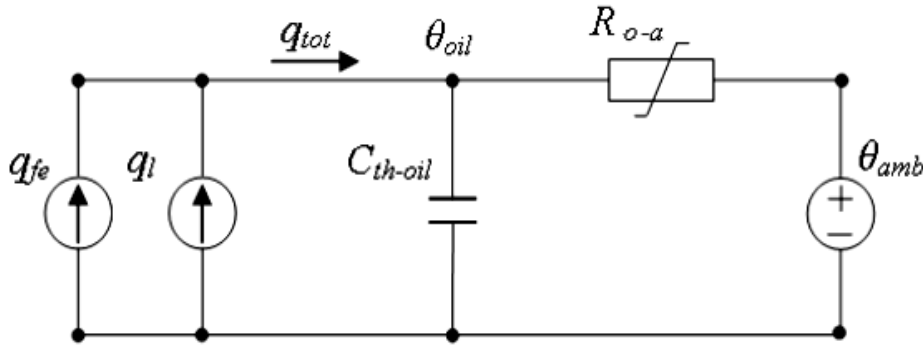
Şekil 4.5'te transformatörün üst-yağ termal modeli verilmektedir. Bu model, termal-elektrik benzerlik ve ısı transferi teorisi kullanılarak üretilmiştir. Bu modelin diferansiyel denklem karşılığı, Eş. 5.26'da verilmektedir [10, 11, 40].

$$q_{fe} + q_l = C_{th-oil} \times \frac{d\theta_{oil}}{dt} + \frac{(\theta_{oil} - \theta_{amb})}{\frac{1}{h \times A}} \quad (5.26)$$

Eş. 5.22-5.23'te ifade edilen ısı transfer katsayısı (h), Eş. 5.26'da yerine konulduğunda Eş. 5.27 elde edilir.

$$(q_{fe} + q_l) \times \left(\frac{\mu^n}{C_1 \times A} \right) = \left(\frac{\mu^n}{C_1 \times A} \right) \times C_{th-oil} \times \frac{d\theta_{oil}}{dt} + (\theta_{oil} - \theta_{amb})^{1+n} \quad (5.27)$$

Yağlı tip dağıtım transformatörünün basitleştirilmiş doğrusal olmayan üst-yağ termal modeli Şekil 5.5'te verilmektedir [10, 11, 40].



Şekil 5.5. Yağlı tip transformatörün basitleştirilmiş üst-yağ sıcaklığının doğrusal olmayan termal modeli

Bu modelde, R_{o-a} , transformatörün üst-yağ sıcaklığının doğrusal olmayan termal direncidir.

R_{o-a} 'nın değeri Eş. 5.28'de verilmektedir.

$$R_{o-a} = \frac{1}{C_1 \times A} \times \left(\frac{\mu(\theta)}{\Delta\theta_{oil}} \right)^n \quad (5.28)$$

Transformatörün üst-yağ sıcaklığının, anma gücündeki doğrusal olmayan termal direnci ise Eş. 5.29'da görülmektedir [40].

$$R_{o-a, rated} = \frac{1}{C_1 \times A} \times \left(\frac{\mu(\theta)_{rated}}{\Delta\theta_{oil, rated}} \right)^n \quad (5.29)$$

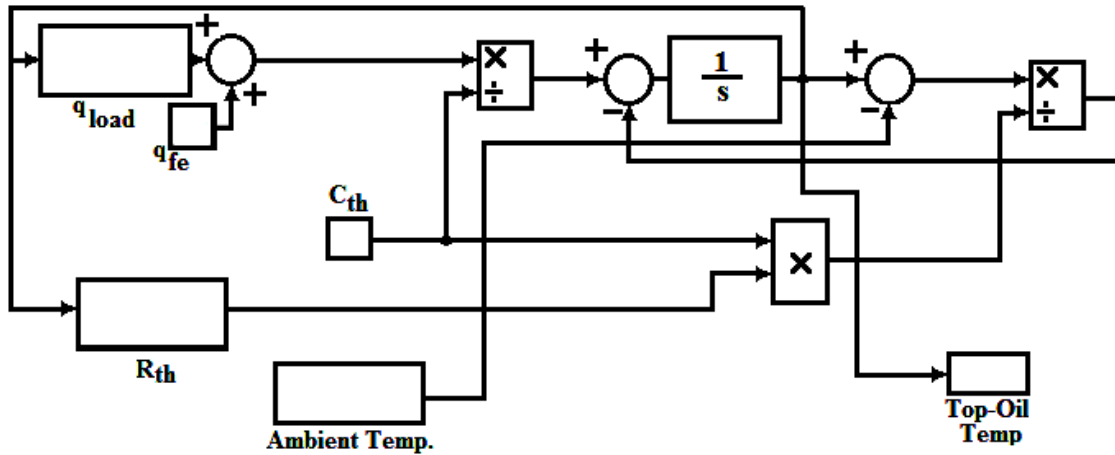
Transformatörün termal zaman sabiti değişken olup sıcaklıktan etkilenmektedir. Eş. 5.30, transformatörün termal zaman sabitini sıcaklığa bağlı olarak vermektedir [31, 40].

$$\tau_{to} = C_{th-oil} \times \frac{\mu(\theta)^n}{C_1 \Delta\theta_{oil}^n \times A} = \frac{C_{th-oil}}{C_1 \times A} \times \left(\frac{\mu(\theta)}{\Delta\theta_{oil}} \right)^n \quad (5.30)$$

Şekil 5.5'te gösterilen termal modelde, zaman sabitinin sabit değil de sıcaklığa bağlı olarak doğrusal olmayan bir değişken olarak alınması, sunulan modelin IEEE modeline göre daha dikkatli ve gelişmiş olmasını göstermektedir.

Önerilen modelde (Şekil 5.5), kullanılan termal direnç ve termal kondansatör, transformatörün tüm bileşenlerinin kendine has termal özellikleri dikkate alınarak ayrıntılı bir biçimde hesaplanmıştır. Bu modelde ayrıca, transformatör yağının sıcaklığa bağlı doğrusal olmayan özellikleri de dikkate alınmıştır. Bu çalışmalar sonucunda elde edilen termal model, sistemin dinamik davranışını daha dikkatli ve gerçeğe yakın bir biçimde ifade etmektedir.

Önerilen modelin hem serbest hem de kapalı ortamda benzetim çalışmaları Matlab/Simulink programı kullanılarak yapılmıştır. Serbest ortamda çalışan transformatörün üst-yağ sıcaklık artış modelinin (Şekil 5.5) benzetim çalışması Şekil 5.6'da görülmektedir.



Şekil 5.6. Serbest ortamda çalışan transformatörün üst-yağ sıcaklık artış modelinin benzetim şeması

Transformatör kayıpları iki ayrı bölümden oluşmaktadır. Boştaki kayıpların hemen hemen hepsi manyetik akı yoğunluğuna bağlı olan nüve kayıplarından oluşmaktadır.

Yük kayıplarının bileşenleri aşağıda verilmektedir:

- Rezistif kayıplar (RI^2)
- Stray kayıplar, bu kayıplarda iki ayrı bileşenden oluşur:
 - Sargılardaki girdap akım kayıpları

- Transformatörün metal aksamalarında oluşan stray kayıplar

Bu kayıpların toplamı yük kayıplarını oluşturmaktadır (Eş. 5.31).

$$q_{load} = q_{cu-load} + q_{st-load} \quad (5.31)$$

Bu denklemde, $q_{cu-load}$, transformatör sargılarının rezistif kayıplarını ve $q_{st-load}$, transformatör sargılarının girdap akım kayıpları ile transformatörün metal aksamında (kazan, kapak, başlıklar, bağlantı saplamaları v.b) oluşan stray kayıplarının toplamını ifade etmektedir. Rezistif kayıplar sargı kayıplarının ana kısmını oluşturmakta ve yük durumuna göre değişmektedir (RI^2). Denklemdeki R, transformatör sargılarının doğru akım (DA) direncidir. Bu direncin değeri sargıların sıcaklığıyla değişmektedir.

Sargı direncinin değişimi yağ sıcaklığına (θ_{oil}) bağlı olarak Eş. 5.32’de verilmektedir.

$$R_{\theta_{oil}} = \frac{(\theta_{oil} + \theta_0)}{(\theta_{ref} + \theta_0)} \times R_{ref} \quad (5.32)$$

Bu denklemde, θ_0 sargı malzemesinin süper iletkenlik sıcaklığı olup bakır için 234.5 °C, elektrik amaçlı alüminyum (alüminyum EC) için 225 °C, elektriksel alüminyum alışımlı için 227 °C’dir. θ_{oil} sıcaklığında, transformatörün rezistif kayıpları Eş. 5.34’ten hesaplanmaktadır.

$$I_{pu} = \frac{I_{load}}{I_{rated}} \quad (5.33)$$

$$q_{cu-load} = \frac{(\theta_{oil} + \theta_0)}{(\theta_{ref} + \theta_0)} \times q_{cu-ref} \times I_{pu}^2 \quad (5.34)$$

Bu denklemde, q_{cu-ref} , transformatörün referans sıcaklığındaki anma bakır (rezistif) kayıplarıdır.

Transformatörün stray kayıpları da sargının sıcaklığıyla değişmektedir. Bu değişim Eş. 5.35'te gösterilmektedir.

$$q_{st-load} = \frac{(\theta_{ref} + \theta_0)}{(\theta_{oil} + \theta_0)} \times q_{st-ref} \times I_{pu}^2 \quad (5.35)$$

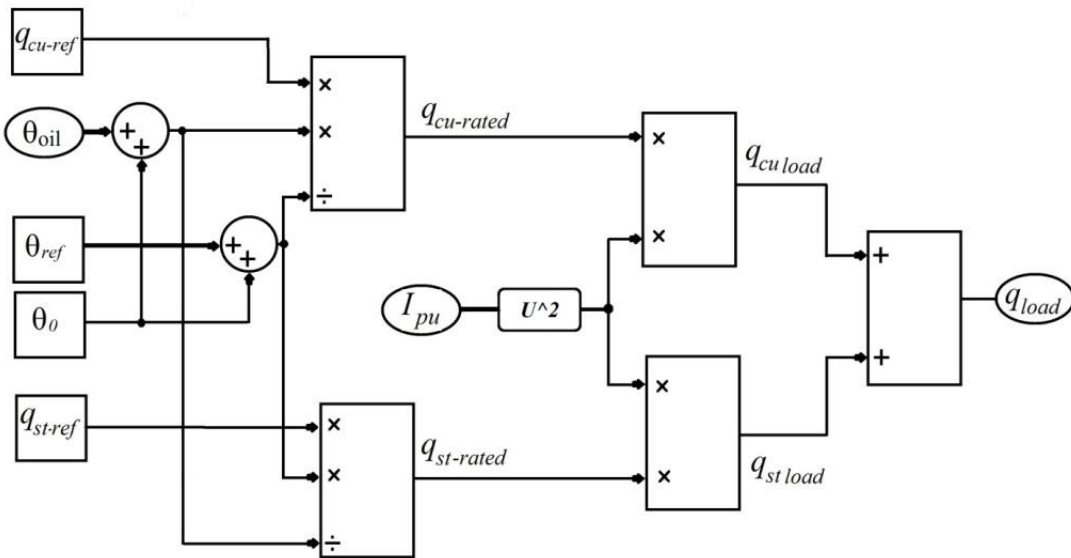
Bu denklemde, q_{st-ref} , transformatörün referans sıcaklıktaki anma stray kaybıdır.

Transformatörün yük kayıplarının sıcaklıkla değişimi Eş. 5.36'da sunulmaktadır.

$$q_{load} = \left(q_{cu-load} = \frac{(\theta_{oil} + \theta_0)}{(\theta_{ref} + \theta_0)} \times q_{cu-ref} + \frac{(\theta_{ref} + \theta_0)}{(\theta_{oil} + \theta_0)} \times q_{st-ref} \right) \times I_{pu}^2 \quad (5.36)$$

Şekil 5.7 transformatör kayıplarının benzetim şemasını Matlab/ Simulink programı ortamında göstermektedir.

Bu modül, transformatörün üst-yağ ve sıcak-nokta sıcaklık benzetim çalışmalarında yük kayıp işlemlerinin alt bölümü (subsystem) olarak kullanılmaktadır.

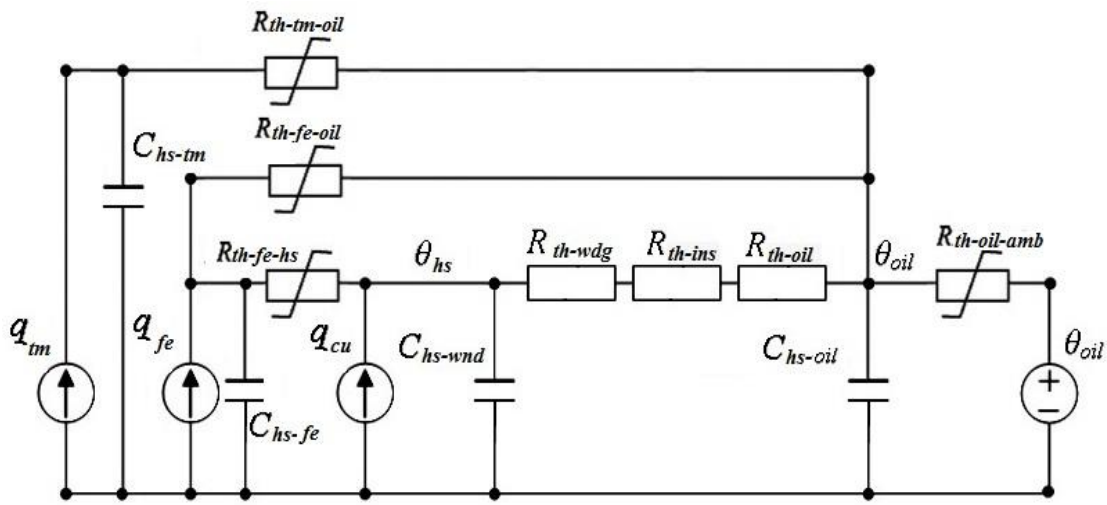


Şekil 5.7. Matlab/Simulink ortamındaki yük kayıplarının benzetim şeması

5.5. Sıcak-Nokta Sıcaklığının Modellenmesi

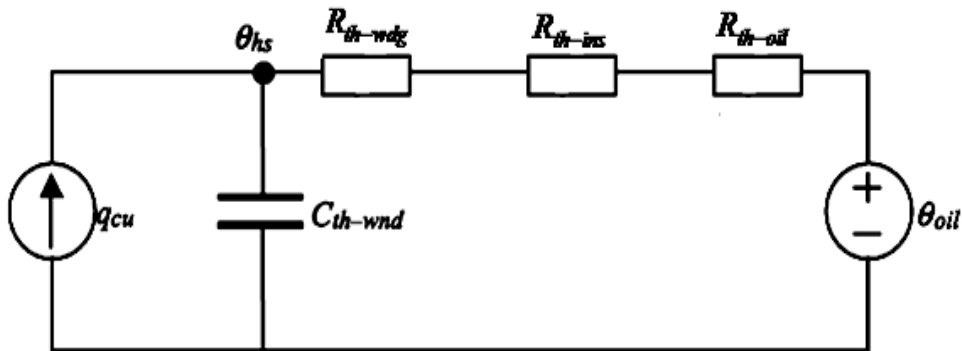
Sıcak-nokta sıcaklığı, yaşlanma hızını belirleyen ve yükleme kapasitesinin hesaplanmasında kullanılan önemli bir parametredir [11, 33, 41,43].

Sıcak-nokta sıcaklığın modeli de üst-yağ sıcaklık modeline benzer bir biçimde elde edilir. Geliştirilen sıcak-nokta sıcaklık modelinin termal-elektrik benzerlik devresi Şekil 5.8’ de görülmektedir [43].



Şekil 5.8. Detaylı Sıcak-nokta sıcaklık modeli

Elektrik devre analiz yöntemlerinden faydalanarak (Thevenin, Norton, v.b.) Şekil 5.8’de sunulan eşdeğer devre, Şekil 5.9’da gösterilen devreye dönüştürülmektedir.



Şekil 5.9. Sıcak-nokta sıcaklık modeli

Sıcak-nokta sıcaklık modelinde, yük akımından dolayı transformatör sargılarının üzerinde oluşan sıcaklık, üst-yağ sıcaklığına göre elde edilmektedir. Üst-yağ sıcaklığı bir ısı kaynağı

olarak değerlendirilmekte olup, sıcak-nokta sıcaklığı bu ısı kaynağına göre hesaplanmaktadır [11]. Sargı ile üst-yag sıcaklığı arasındaki doğrusal olmayan termal dirençler aşağıda açıklanmaktadır [43].

$$R_{th-hs-oil} = R_{th-wdg} + R_{th-ins} + R_{th-ins-oil} \quad (5.37)$$

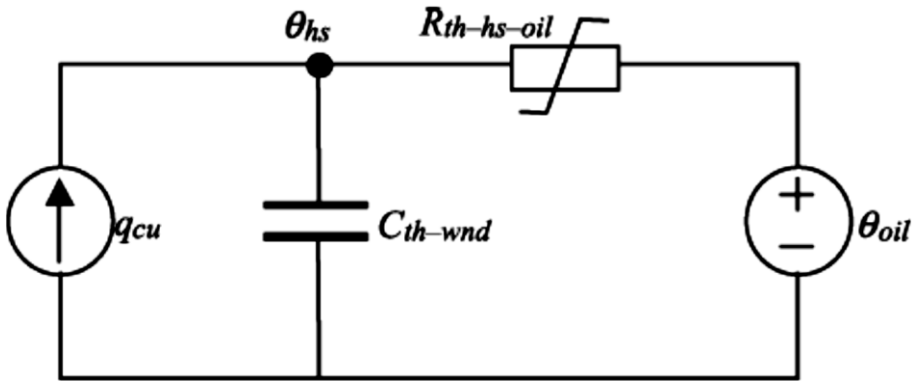
Burada, R_{th-wdg} parametresi, sargının termal direncini, R_{th-ins} , yalıtımın termal direncini ve R_{th-oil} , transformatör yağının termal direncini ifade etmektedir.

Eş. 5.37’de yer alan termal dirençlerin karşılaştırılmasından, aşağıda verilen eşitsizlikler yazılabilmektedir [43].

$$R_{th-oil} \gg R_{th-wdg} \quad (5.38)$$

$$R_{th-oil} \gg R_{th-ins} \quad (5.39)$$

Eş. 5.38, 5.39’dan, sıcak-nokta sıcaklık modelinin termal-elektrik devresi basitleştirilerek Şekil 5.10’da verilen termal model elde edilmektedir.



Şekil 5.10. Basitleştirilmiş sıcak-nokta sıcaklık modeli

$$R_{o-a,rated} = \frac{1}{C_1 \times A} \times \left(\frac{\mu(\theta)_{rated}}{\Delta\theta_{oil,rated}} \right)^n \quad (5.40)$$

Yukarıda verilen modelde, termal direnç Eş. 5.41'den elde edilmektedir.

$$R_{th-hs-oil} = R_{th-oil} = \frac{1}{h \cdot A} \quad (5.41)$$

Daha önce işaret edildiği gibi transformatör yağının akışkanlık değeri, yağın diğer parametrelerine (ρ_{oil} , c_{oil} , k , β_{oil}) göre yağın sıcaklığına daha çok etkilenmektedir. Diğer parametreler, sıcaklıktan daha az etkilendiklerinden sabit olarak kabul edilebilmektedir. Bu husus, dikkate alınarak Eş. 5.22-5.25'i, Eş. 5.41'de kullanarak, Eş. 5.42 elde edilir. Eş. 5.42 ile elde edilen parametre, Eş. 5.28'de üst-yag sıcaklığı için verilen termal direncin benzeridir.

$$h = C_1 \times \left(\frac{\Delta\theta_{hs}}{\mu(\theta)} \right)^n \quad (5.42)$$

Bu denklemin diğer denklemlerden farkı üst-yag sıcaklığının yerine, sıcak-nokta sıcaklığının kullanılmasıdır. Şekil 5.10'da gösterilen devrenin çözümü Eş. 5.43'te verilmekte olup yağın sıcaklığa göre akışkanlık değişiminin dikkate alınmasıyla Eş. 5.44 ve 5.45 elde edilmektedir.

$$q_{cu} = C_{th-wdg} \times \frac{d\theta_{hs}}{dt} + \frac{(\theta_{hs} - \theta_{oil})}{R_{th-hs-oil}} \quad (5.43)$$

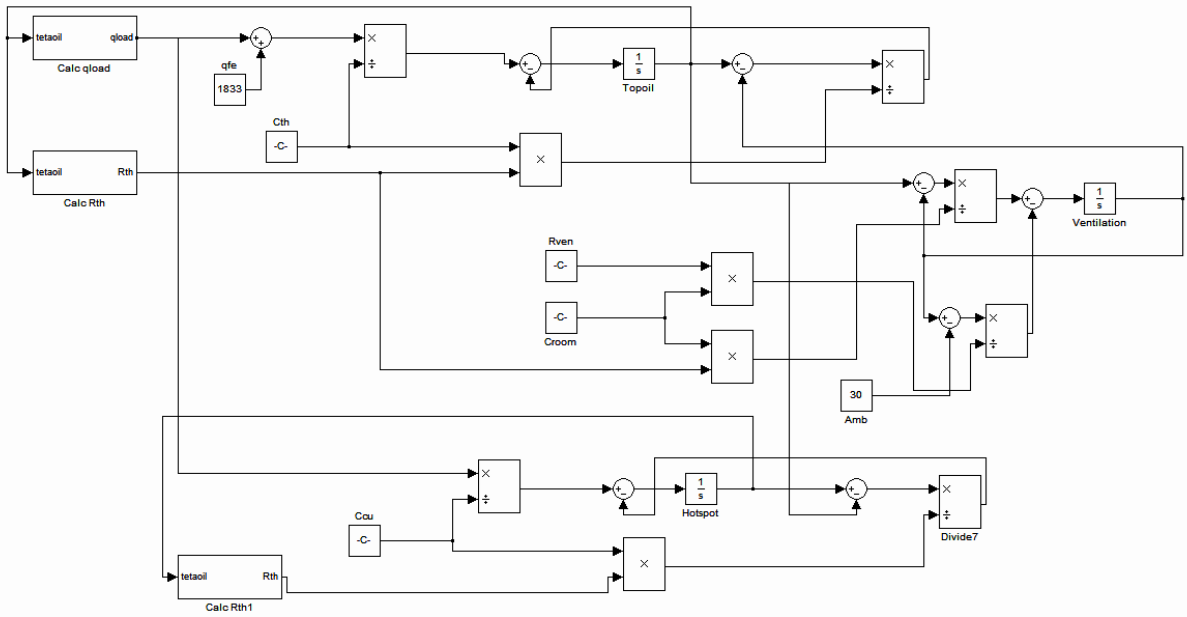
$$q_{cu} = C_{th-wdg} \times \frac{d\theta_{hs}}{dt} + \frac{(\theta_{hs} - \theta_{oil})}{\frac{1}{h \cdot A}} \quad (5.44)$$

$$q_{cu} \cdot \left(\frac{\mu^n}{C_1 \cdot A} \right) = \left(\frac{\mu^n}{C_1 \cdot A} \right) C_{th-wdg} \times \frac{d\theta_{hs}}{dt} + (\theta_{hs} - \theta_{oil})^{1+n} \quad (5.45)$$

C1 katsayısı Eş. 5.23'den elde edilmektedir. Önerilen sıcak-nokta sıcaklığı modelinde (Şekil 5.10) kullanılan termal direnç ve termal kondansatör, transformatör bileşenlerinin termal

özellikleri dikkate alınarak ayrıntılı bir biçimde hesaplanmışlardır. Bu modelde ayrıca, transformatör yağının sıcaklığa bağlı doğrusal olmayan özellikleri de dikkate alınmıştır. Bu çalışmalar sonucu, elde edilen termal model, sistemin dinamik davranışını daha dikkatli ve gerçeğe yakın bir biçimde ifade etmektedir.

Geliştirilen sıcak-nokta modellerinin benzetim çalışmaları Matlab/Simulink programı ortamında yapılmıştır. Serbest ortamda çalışan transformatörün sıcak-nokta sıcaklık artış modelinin (Şekil 5.10) benzetim çalışması Şekil 5.11’ de gösterilmektedir.



Şekil 5.11. Transformatörün sıcak-nokta sıcaklık artış modelinin benzetim şeması

5.6. İzolasyon Yaşlanma Hesabı

1930 yılında Montsinger tarafından yalıtım malzemesinin yetersizliği, yalıtım malzemesinin elektriksel dayanımı olarak ele alınmıştır. Transformatörün çalıştığı sıcaklık ile faydalı ömrünün arasında bir ilişki bulunmaktadır. Sıcaklık, transformatörün faydalı ömrünü azaltmaktadır. Buna göre çalışmalarda, izolasyonun faydalı ömrünü yarıya indirecek sıcaklık seviyesi dikkate alınmaktadır. Uluslararası Elektroteknik Komisyonun (IEC) yükleme kılavuzuna göre bu sıcaklık seviyesi 6 °C olarak kabul edilmektedir [16]. Yalıtım malzemesinin yaşlanma hızı, her 6 °C sıcaklık artışı için iki kat yükselir. Bu değer (6 °C) baz olarak dikkate alındığında faydalı ömür kaybı katsayısı Eş. 5.46’ dan elde edilir [7, 29, 30, 32].

$$R_A = 2^{\left(\frac{\theta_{hst}-110}{6}\right)} \quad (5.46)$$

“Faydalı ömür kaybı” yüzde olarak Eş. 5.47’den hesaplanır [1, 32].

$$LOL = \frac{\sum_{i=1}^N R_A(i) \Delta t_i}{\sum_{i=1}^N \Delta t_i} \quad (5.47)$$

5.7. Transformatörlerin Faydalı Ömrü

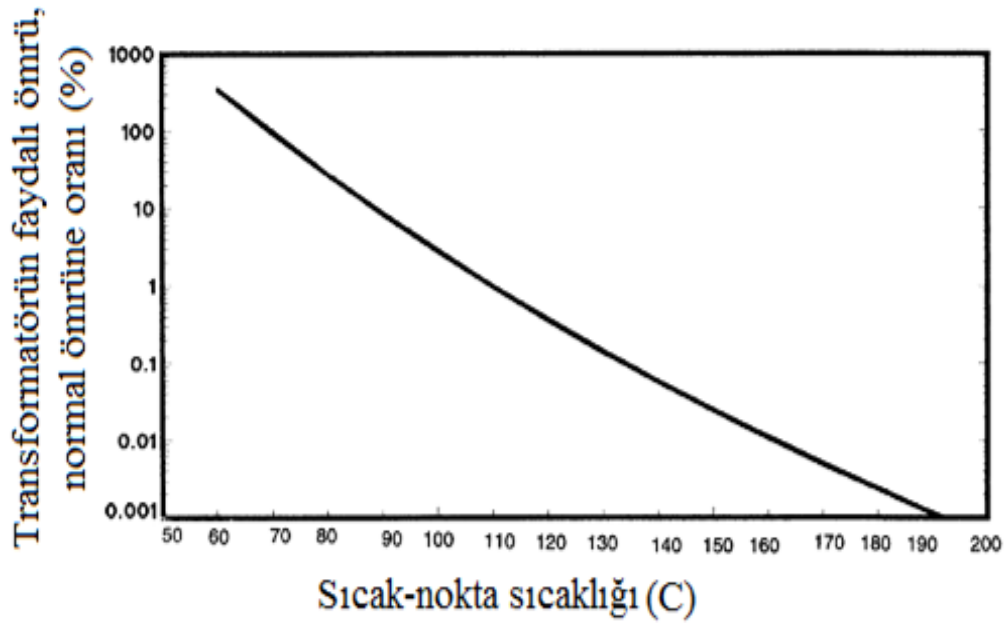
Yağlı tip transformatörlerin faydalı ömründe en önemli faktör, sargılarda kullanılan katı yalıtım malzemesinin (yalıtım kağıdı) yaşlanmasıdır. Katı yalıtımın yaşlanmasıyla yalıtımın sıcak-nokta sıcaklığı arasında üstel bir ilişki bulunmaktadır. Bu ilişki IEEE Std. C57.91-1995, 12 June 2003 standardında verilmektedir [1, 9, 8, 13, 41].

Bu yönetmelikte, yağlı tip transformatörlerle ilgili; a- faydalı ömür, b- çalıştıkları güç, c- faydalı ömrü ile çalıştığı güç arasındaki ilişki, d- termal model (sunulan model lineer bir modelden oluşur) ve benzer konularla ilgili açıklamalar bulunmaktadır. Bu standartta, transformatörün faydalı ömrü ile sıcaklık arasındaki ilişki Eş. 5.48’de verilmektedir. Bu denkleme göre, transformatör yalıtımının faydalı ömrü, transformatörün çalıştığı sıcaklıkla, dolayısıyla transformatörün kayıpları ile ters orantılıdır [1, 8, 13, 16, 30].

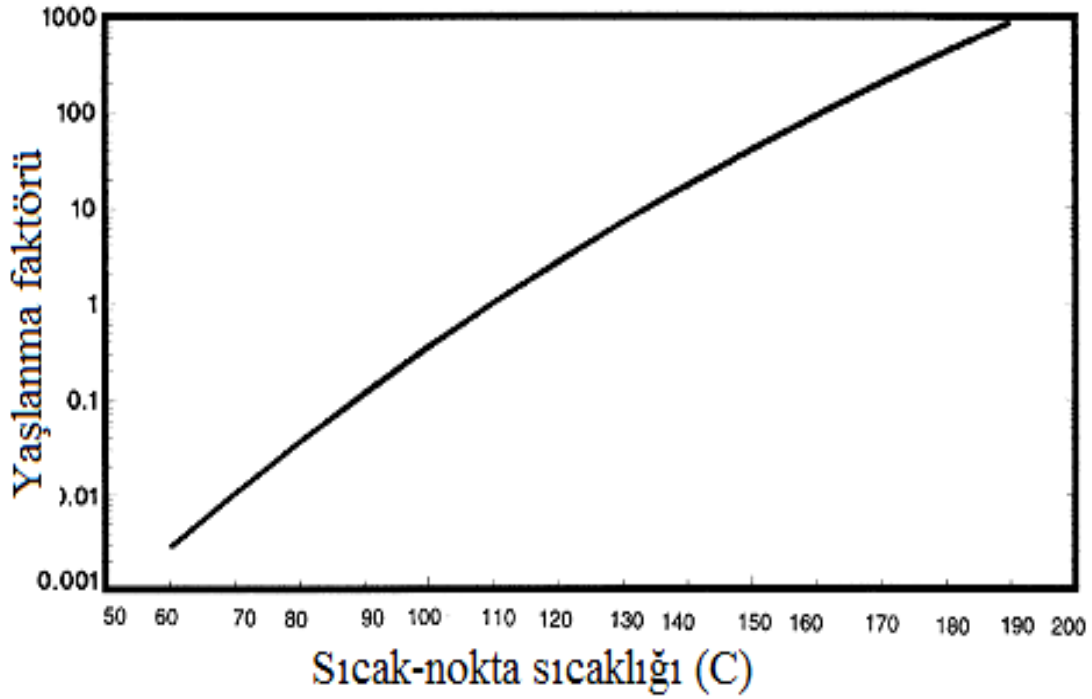
$$Faydalı\ ömür\ (\%) = B \times e^{\left(\frac{C}{\theta_H + 273}\right)} \times 100 \quad (5.48)$$

Bu denklemde; B ve C sabit sayılar olup θ_H sıcak-nokta sıcaklığı (°C) olarak ifade edilmektedir. Transformatörün içindeki sıcaklık her yerde aynı olmadığından, yalıtımın yaşlanması en sıcak bölgelerde daha da önem kazanmaktadır. Buna göre, yalıtımın yaşlanma araştırmasında en sıcak bölgenin (hottest-spot) sıcaklığı dikkate alınmalıdır. Bu standarda göre transformatör tasarımında sıcak-nokta sıcaklığı 110 °C olarak dikkate alındığında (normal koşullarda çalıştığında) transformatörün faydalı ömrü 180.000 saat (yaklaşık 20 yıl) olacaktır. [1, 30, 41].

Standartta, ayrıca sıcak-nokta sıcaklığı ile transformatör yağının üst-yağ sıcaklığı (top-oil temperature) arasındaki ilişkiye de işaret edilmektedir [1, 30]. Transformatör yalıtımının faydalı ömrü ile sıcak-nokta sıcaklığı arasındaki bağıntı Şekil 5.12’de verilmektedir. Dağıtım ve güç transformatörlerinde aynı yalıtım kağıdı kullanıldığından (cellulose conductor insulation) bu bağıntı her iki tür transformatör için de geçerlidir. İzolasyonun yaşlanma faktörü ile sıcak-nokta sıcaklığı arasındaki ilişki Şekil 5.13’te verilmektedir [1, 30].



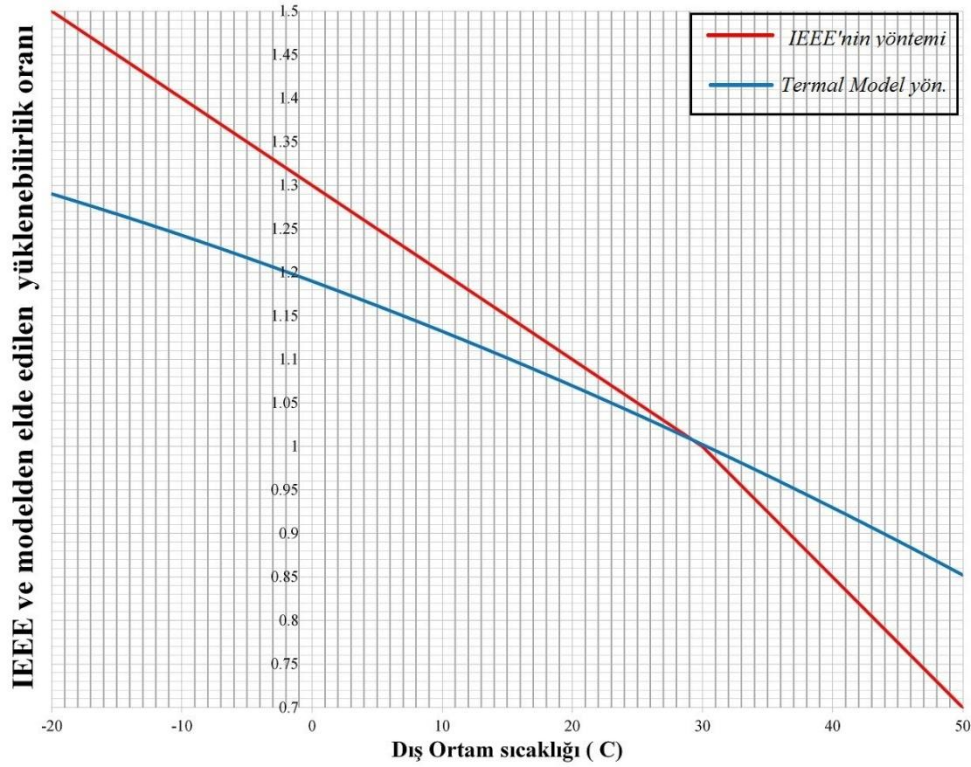
Şekil 5.12. Yağlı tip dağıtım transformatörlerinin faydalı ömrü ile sıcak-nokta sıcaklığı arasındaki ilişki



Şekil 5.13. Yağlı tip dağıtım transformatörlerinde katı yalıtım malzemesinin yaşlanma faktörü ile sıcak-nokta sıcaklığı arasındaki ilişkisi

5.8. Yüklenebilirlik Hesabı

Transformatörlerin yükleme yöntemi, sıcak-nokta sıcaklık hesabına dayanarak yapılmaktadır. Sıcak-nokta sıcaklığı, katı yalıtım malzemesinin normal koşullar altında beklenen faydalı ömrünü sağlayacak şekilde hesaplanır. Bu konuda, anma frekansda çalışan transformatörler için IEC ve IEEE standartlarının sunduğu yöntemler temel alınmaktadır. Bu yöntemlerde, transformatörlerin yüklenebilme kapasitelerinin hesaplanmasıyla ilgili açıklamalar bulunmaktadır. Literatürdeki çalışmalar IEEE ve IEC yöntemini baz almaktadır. Bu yöntemlerin dezavantajları 1- sadece yük kayıplarını hesaba katmaktalar ve diğer stray kayıpları ve boştaki kayıpları göz ardı etmişler. 2- kayıp hesaplama dezavantajların taşımaktalar. 3-kayıp miktarını baz alarak hesaplama yapmaktalar, halbuki yüklenebilirlik miktarını sıcak-nokta sıcaklık değeri belirlemektedir. Bu konuyla ilgili farklar Şekil 5.14'te gösterilmiştir. Şekil 5.14 anma frekanstaki transformatörün sıcak-nokta sıcaklık modeline göre ve IEEE standardına göre yüklenebilirlik farkını göstermektedir.

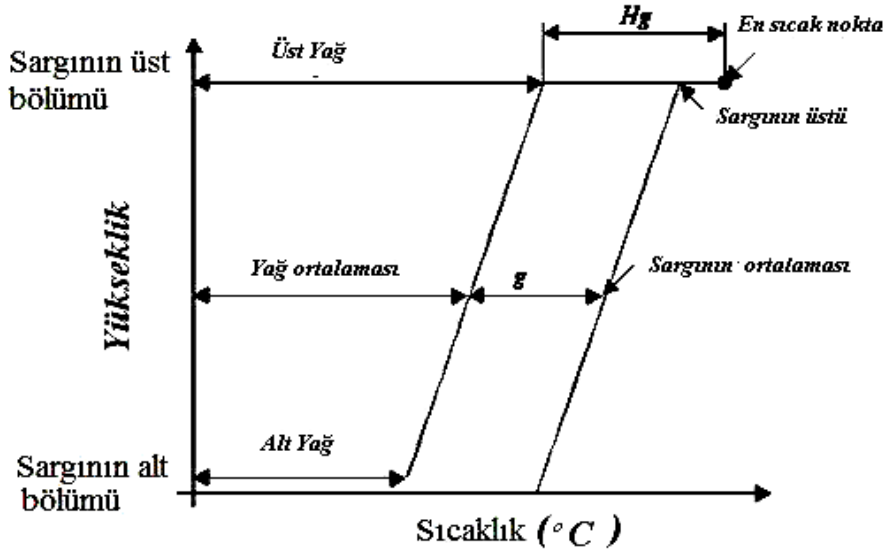


Şekil 5.14. Anma frekansda çalışan transformatörlerin IEEE yöntemi ve sıcak-nokta sıcaklık modelinden hesaplanan yüklenebilirlik eğrileri

Transformatörlerin yükleme yöntemi, sıcak-nokta sıcaklık hesabına dayanarak yapılmaktadır. Sıcak-nokta sıcaklığı, katı yalıtım malzemesinin normal koşullar altında beklenen faydalı ömrünü sağlayacak şekilde hesaplanır. Bu konuda, serbest ortamda çalışan transformatörler için IEC ve IEEE standartlarının sunduğu yöntemler temel alınmaktadır. Bu yöntemlerde, transformatörlerin yüklenebilme kapasitelerinin hesaplanmasıyla ilgili açıklamalar bulunmaktadır.

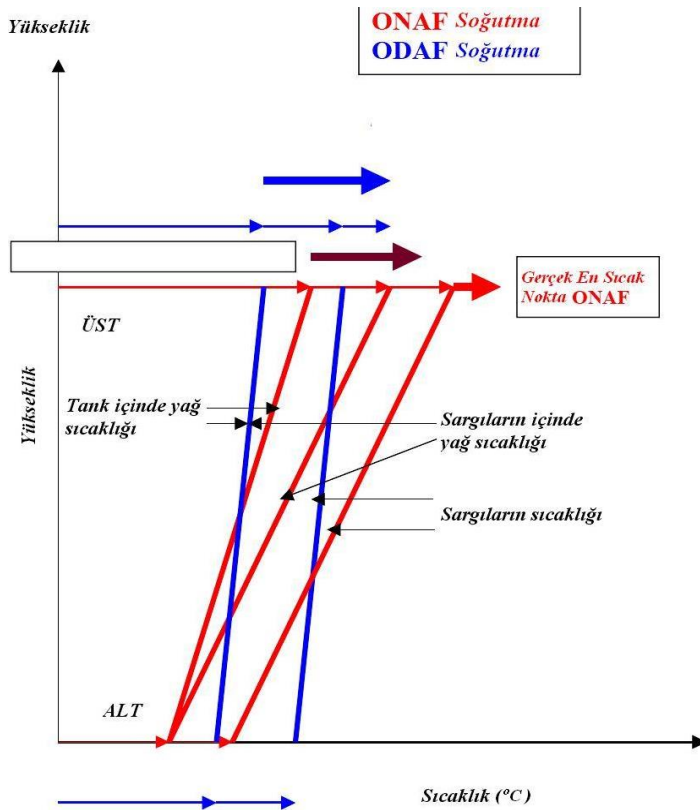
IEEE Std. C57.12.00' e göre 60-65° C'lık bir transformatörün (60° C üst-yağ sıcaklık artışı- 65° C sargının ortalama sıcaklık artışı), 30 °C lik bir ortamda anma gücünde çalıştığında sıcak-nokta sıcaklığı 110° C'dir. Bu standarda göre normal koşullarda (anma gücü, anma gerilimi, anma frekansı, deniz seviyesinden en fazla 1800 metre yükseklikte v.b. koşullar) sıcak-nokta sıcaklığı, transformatörün üst-yağ sıcaklığından 20° C fazladır. [1, 15, 20, 39, 43].

Yukarıda belirtilen standartta, sıcak-nokta sıcaklığı ile üst-yağ ve sargı sıcaklığı arasındaki ilişki Şekil 5.15'te gösterilmektedir [1, 13, 15, 31, 40].



Şekil 5.15. Transformator içindeki farklı noktaların sıcaklık artışı

Standardın sunduğu bağıntı ONAN (Oil Natural-Air Natural) transformatörler için geçerlidir. ONAF (Oil Natural-Air Forced) ve ODAF (Oil Directed- Air Forced) transformatörler için IEEE'nin Güç Transformatörler Komitesinin önerdiği ilişki kullanılmaktadır (Şekil 5.16) [1, 13].

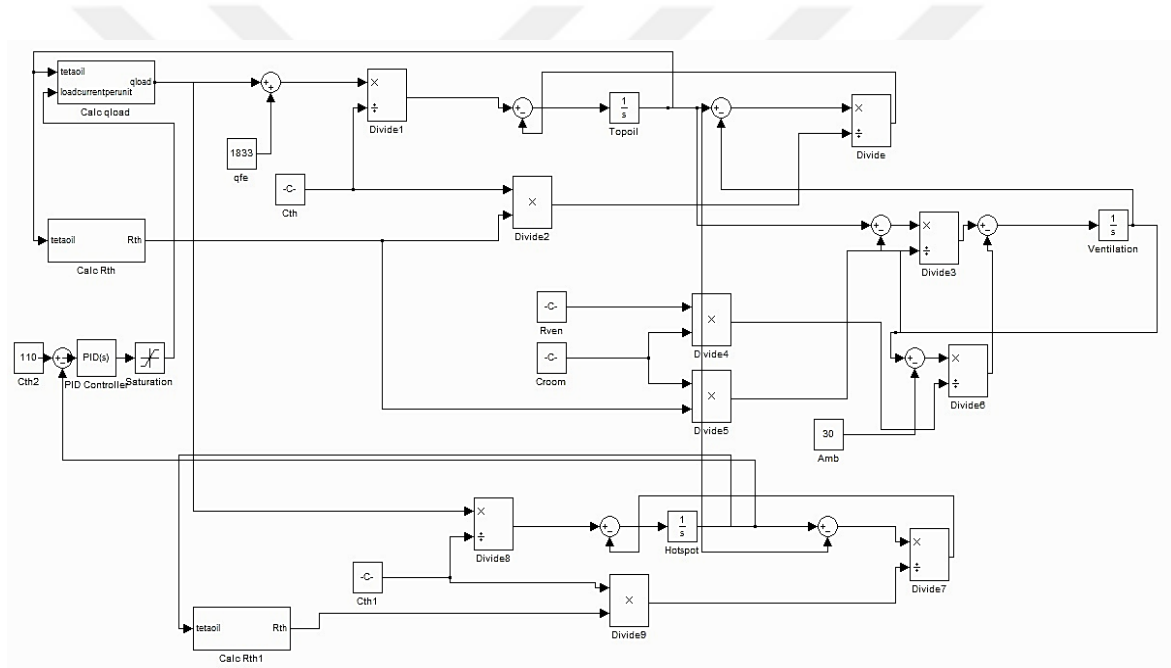


Şekil 5.16. ONAF ve ODAF transformatörlerinin içindeki farklı noktaların sıcaklık artışı

Şekil 5.15 ve 5.16’da verilen bağıntılar kullanılarak, tüm hesaplamalarda, sıcak-nokta sıcaklığı yerine üst-yağ sıcaklığı kullanılır.

IEEE ve birçok çalışmaya göre üst-yağ sıcaklık artışı üstel (exponential) bir denklem şeklinde gösterilmektedir. Standardın sunduğu model, doğrusal bir modeldir. Bu standart, ortam sıcaklığının değişimini de dikkate almamaktadır.

Transformatörün yüklenebilirlik kapasitesi ortam sıcaklığına göre değişmektedir. Bu değişimin hesaplama şeması Simulink/Matlab programı ortamında Şekil 5.17’de verilmektedir.



Şekil 5.17. Harmonikli durumlarda transformatörün yüklenebilme kapasitesinin hesaplanması için kullanılan benzetim programının şeması

Tez kapsamında geliştirilen termal modellerden faydalanarak, sıcak-nokta sıcaklığı 110 °C’yi aşmayacak şekilde (IEEE’nin koşulu), harmonikli durumda çalışan transformatörün yüklenebilme kapasitesi elde edilerek, Şekil 5.14’te verilmektedir. Bu eğri, yüklenebilme kapasitesi ile ortam sıcaklığı arasındaki ilişkiyi göstermektedir.

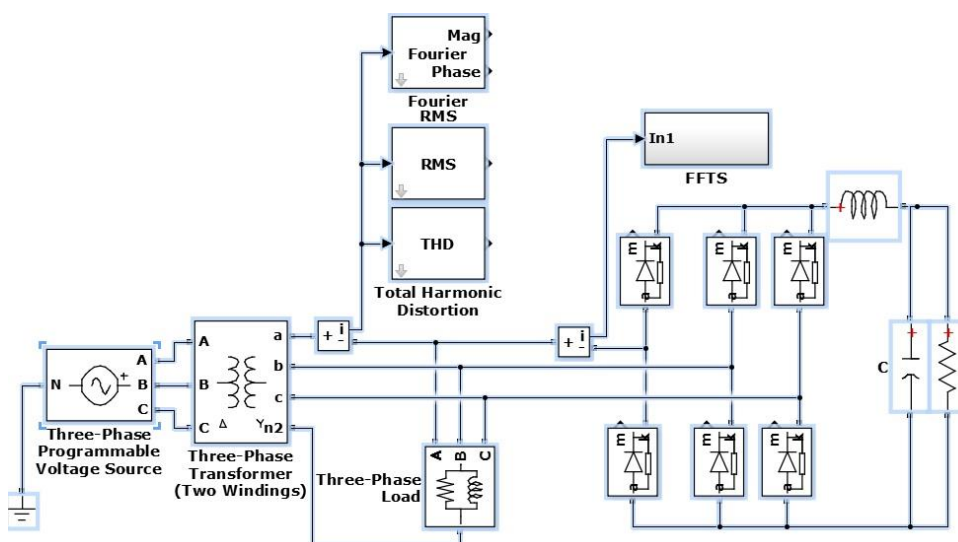
Transformatörün faydalı ömrü, transformatör bu eğriye göre yüklendiğinde normal koşullardaki ömrüne (180.000 saat) eşit olmaktadır.

6. HARMONİKLİ YÜKLERİ BESLEYEN TRANSFORMATÖRLERİN OPTİMAL TASARIMI

Tezin bu bölümünde doğrusal olmayan yüklere uygun transformatörlerin tasarımı yapılmıştır. Transformatörlerde kullanılan malzemelerin özellikleriyle ilgili elde edilen bilgiler dikkate alınarak transformatörlerin en uygun tasarımı gerçekleştirilmiştir. Transformatörlerin tasarımında hazır yazılım paket programları kullanılmıştır. Tasarım aşamasında, transformatörün elektriksel değerleri, sargıların sarım oranları, nüve kalınlığı, diğer tüm bilgiler elde edilmiştir. Daha sonra transformatörün manyetik analizi yapılmış, bu analizde transformatörün nüvesinde, kazanı üzerinde ve etrafa yayılan manyetik alan dağılımı incelenerek histerisis ve girdap akım kayıpları (hystresis and eddy current losses) hesaplanmıştır. Daha sonra transformatörün termal analizi yapılmıştır. Bu analizde transformatörün içinde kayıplardan dolayı meydana gelen sıcaklık ve sıcaklık dağılımı incelenerek sıcak nokta analizi (hot spot analysis) gerçekleştirilmiştir.

Nüve, sargılar, kazan ve diğer elemanlar üzerindeki manyetik alan şiddeti ve manyetik akı yoğunluğu incelenmiştir. Tasarım sonunda tüm incelemelerden olumlu sonuçlar alınmıştır. Tasarımda elde edilen sonuçlar doğrultusunda malzeme siparişleri verilmiştir.

İlk olarak tasarlanan transformatörün gücü, giriş ve çıkış gerilim seviyeleri belirlenmiştir. Lineer olmayan yükün akım dalga şekli ve THD'si en kötü seviye olması açısından doğrultucu bir devreninki alınmıştır ve benzetimden harmonikleri elde edilmiştir (Şekil 6.1).



Şekil 6.1. Doğrultucu yükünü besleyen transformatörün benzetimi

Tasarım yaparken nüvenin özellikleri ve B-H karakteristiği dikkate alınmış, manyetik akı yoğunluğu doyum bölgesine girmemesi için belirli bir sınırın altında tutulmuştur. Ayrıca, nüve kaybını (transformatörün boştaki kaybının) istenilen seviyede tutabilmesi için manyetik akı yoğunluğu belirli bir aralıkta seçilmiştir.

Sargılardan geçen akım yoğunluğu için mali açıdan en uygun olması gözetilmiştir. Çünkü düşük akım yoğunluğu ekonomik olmayıp yüksek akım yoğunluğu ise iletken kaybının artmasına neden olur.

Yöntemlerin belirlenmesinde aşağıda verilen diğer önemli parametreler de dikkate alınmış ve bu doğrultuda tasarım yapılmıştır. Daha sonra transformatörün manyetik analizi gerçekleştirilmiştir. Bu analizde transformatörün çalışmasından oluşan manyetik alan ve bu manyetik alanın dağılımı dikkatli bir şekilde incelenmiştir. Akım harmoniklerinden dolayı meydana gelen stray kayıplar (kazan, kapak ve diğer metal aksamındaki kayıplar, iletkenlerde meydana gelen girdap akım kayıpları) araştırılmıştır. Bu doğrultuda transformatörün termal analizi gerçekleştirilmiştir, nüve ve iletkenlerde oluşan sıcaklık ve bu sıcaklığın yağ yardımıyla ortama atılması incelenmiştir. Ayrıca, "Sıcak Nokta" (Hot Spot Point) analizi de yapılmıştır.

Tasarımda dikkate alınan diğer önemli parametreler:

- 1-Nüvenin kesiti
- 2-İletkenlerin kesiti
- 3-Nüvenin manyetik akı yoğunluğu
- 4-Transformatörün soğutulması için kazanın dalga duvar tasarımı
- 5-Nüve ile sekonder sargılar arası, sekonder ve primer sargıları arası, farklı fazlara ait primer sargıları arası ve primer sargıları ile kazan arası izolasyon için gereken minimum mesafe... (bu parametreler yalıtım derecesiyle ilgilidir)
- 6-Kısa devre empedansı (Uk) ...(TSE EN 60076-1, standartları göre)

Dikkate alınarak 2 adet 630 kVA ve 2 adet 1600 kVA transformatör tasarlanmıştır.

Bu tasarımlarla alakalı proje bilgileri Çizelge 6.1 – 6.4'te sunulmuştur. Çizelge 6.1 630 kVA Rev01 (TR1) transformatörün tasarım bilgilerini vermektedir. Çizelge 6.2 630 kVA Rev02 (TR1) transformatörün tasarım bilgilerini sunmaktadır. Çizelge 6.3 1600 kVA Rev01 (TR1

) transformatörün tasarım bilgilerini vermektedir. Çizelge 6.4 1600 kVA Rev02 (TR1)
transformatörün tasarım bilgilerini sunmaktadır.

Çizelge 6.1. 630 kVA Rev01 transformatörün tasarım bilgileri

TRANSFORMATÖR BİLGİLERİ					
Güç	630	kVA	Transformatör tipi	630 KVA 33/0,4KV-H-AoAk-REV01	
Gerilim	33/0.400		Hermetik		
Uk	4.71		Kapak altı mesafesi (AC / AD)	160/300	mm
Po	1.00		Contalama Şekli	YASSI CONTA	
Pk	5.35		AG İletkeni - YG İletkeni	Cu	Cu
			Soğutma Türü	ONAN	
			Boya Alanı	22.08	m2
			Kazan Yağ Ağırlığı	489.85	kg
İşletmede Oluşan Alt Basınç	-0.24		Emilen Yağ	17	kg
Maksimum Dalgaduvar Alt Basıncı	0.45		VB	16.74	
Müsaade Edilen Üst Basınç	0.33		min / max	-10/40	
Dalgaduvar Basınç Değişimi	0.36		TOELM	42	
TRANSFORMATÖR ÖLÇÜLERİ					
Bitmiş Transformatör Genişliği	840	mm	Tekerlek Ölçüleri	670/125	mm
Bitmiş Transformatör Uzunluğu	1446	mm	Genleşme Kabı	0/0	mm
Bitmiş Transformatör Yüksekliği	1749	mm			mm
Bitmiş Transformatör Kapak-Üstü	1264	mm	Üst Kısım - Çerçeve Ölçüleri	50x50x5	mm
Transformatör Kanca Yüksekliği	3650	mm	Alt Kısım Saç Kalınlığı	6	mm
AKTİF KISIM BİLGİLERİ			KAZAN BİLGİLERİ		
Çekirdek Çapı	216	mm	Kazan İç Genişliği	480	mm
Pencere Yüksekliği	505	mm	Kazan İç Uzunluğu	1320	mm
Bacak Arası	419	mm	Uzun Taraf çıkarılmış Dalgaduvar Ölçüsü		mm
		mm	Kazan İç Yüksekliği	1095	mm
		mm	DalgaDuvarlar	29C160*35.0-1.2*800	2 Ad
Y.G. Buşingleri	30 NF 250		Dalgaduvarlar	10C50*42.5-1.2*800	2 Ad
A.G. Buşingleri	DT1/1000		Bitmiş Kazan Genişliği	840	mm
Hesap Isı Değeri	5.77	kW	Bitmiş Kazan Uzunluğu	1446	mm
Kazan Atılan Isı	7.50	kW	Bitmiş Kazan Yüksekliği	1259	mm
A Ğ I R L I K L A R					
AG İletken Ağırlığı	163.7	kg	Kazan Ağırlığı	306.8	kg
YG İletken Ağırlığı	259.2	kg	Alt Kısım Ağırlığı	107.0	kg
Çekirdek Ağırlığı	910/968	kg	Üst Kısım Ağırlığı	7.5	kg
Sıkıştırma Ağacı Ağırlığı	13	kg	Toplam Dalga Duvar Ağırlığı	180	kg
Sıkıştırma Demiri Ağırlığı	35	kg	Kapak Ağırlığı	45.1	kg
İzolasyon Kağıdı Ağırlığı	7.3	kg	Genleşme Deposu Ağırlığı	0	kg
Presspan Ağırlığı	10.5	kg	Genleşme Deposu Yağ Ağırlığı	0	kg
KP Ağırlığı	12.6	kg	Düz Duvar Kalınlığı	0	mm
HP Ağırlığı	0	kg	Düz Duvar Ağırlığı	0	kg
Ağaç Ağırlığı	0.6	kg	Tekerlek Taşıyıcı - U	16.8	kg
AG Bağlantı İletken Ağırlığı	0	kg	Tekerlekler	16.2	kg
YG Bağlantı İletken Ağırlığı	1.6	kg	Aktif Kısım Ağırlığı	1530	kg
Dalga Duvar Ağırlığı	158.6	kg	Yağ Ağırlığı	490	kg
Dalga Duvar Ağırlığı (Kısa Kenar)	22.1	kg	Toplam Ağırlık	2346	kg
Nakil Ağırlığı				2330	kg

Çizelge 6.2. 630 kVA Rev02 transformatörün tasarım bilgileri

TRANSFORMATÖR BİLGİLERİ					
Güç	630	kVA	Transformatör tipi	630 KVA 33/0,4KV-H-AoAk-REV 02	
Gerilim	33/0.400		Hermetik		
Uk	4.80		Kapak altı mesafesi (AC / AD)	160/288	mm
Po	1.24		Contalama Şekli	YASSI CONTA	
Pk	4.95		AG İletkeni - YG İletkeni	Cu	Cu
			Soğutma Türü	ONAN	
			Boya Alanı	22.29	m²
			Kazan Yağ Ağırlığı	507.15	kg
İşletmede Oluşan Alt Basınç	-0.25		Emilen Yağ	19	kg
Maks. Dalgaduvar Alt Basıncı	0.47		VB	17.68	
Müsaade Edilen Üst Basınç	0.33		min / max	-10/40	
Dalgaduvar Basınç Değişimi	0.37		TOELM	42	
TRANSFORMATÖR ÖLÇÜLERİ					
Bitmiş Transformatör Genişliği	840	mm	Tekerlek Ölçüleri	670/125	mm
Bitmiş Transformatör Uzunluğu	1456	mm	Genleşme Kabı	0/0	mm
Bitmiş Transformatör Yüksekliği	1744	mm			mm
Bitmiş Transformatör Kapak-Üstü	1259	mm	Üst Kısım - Çerçeve Ölçüleri	50x50x5	mm
Transformatör Kanca Yüksekliği	3640	mm	Alt Kısım Saç Kalınlığı	6	mm
AKTİF KISIM BİLGİLERİ			KAZAN BİLGİLERİ		
Çekirdek Çapı	206	mm	Kazan İç Genişliği	490	mm
Pencere Yüksekliği	522	mm	Kazan İç Uzunluğu	1330	mm
Bacak Arası	421	mm	Uzun Taraf çıkarılmış Dalgaduvar Ölçüsü		mm
		mm	Kazan İç Yüksekliği	1090	mm
		mm	DalgaDuvarlar	29C160*40.0-1.2*800	2 Ad
Y.G. Buşingleri	30 NF 250		Dalgaduvarlar	11C50*25.0-1.2*800	2 Ad
A.G. Buşingleri	DT1/1000		Bitmiş Kazan Genişliği	840	mm
Hesap Isı Değeri	5.69	kW	Bitmiş Kazan Uzunluğu	1456	mm
Kazan Atılan Isı	7.59	kW	Bitmiş Kazan Yüksekliği	1254	mm
A Ğ I R L I K L A R					
AG İletken Ağırlığı	174.6	kg	Kazan Ağırlığı	309.3	kg
YG İletken Ağırlığı	271.4	kg	Alt Kısım Ağırlığı	107.6	kg
Çekirdek Ağırlığı	837/888	kg	Üst Kısım Ağırlığı	7.5	kg
Sıkıştırma Ağacı Ağırlığı	14	kg	Toplam Dalga Duvar Ağırlığı	182	kg
Sıkıştırma Demiri Ağırlığı	36	kg	Kapak Ağırlığı	45.8	kg
İzolasyon Kağıdı Ağırlığı	9.2	kg	Genleşme Deposu Ağırlığı	0	kg
Presspan Ağırlığı	11.2	kg	Genleşme Deposu Yağ Ağırlığı	0	kg
KP Ağırlığı	13.6	kg	Düz Duvar Kalınlığı	0	mm
HP Ağırlığı	0	kg	Düz Duvar Ağırlığı	0	kg
Ağaç Ağırlığı	0.6	kg	Tekerlek Taşıyıcı - U	16.8	kg
AG Bağlantı İletken Ağırlığı	0	kg	Tekerlekler	16.2	kg
YG Bağlantı İletken Ağırlığı	1.6	kg	Aktif Kısım Ağırlığı	1490	kg
Dalga Duvar Ağırlığı (Uzun Kenar)	158.8	kg	Yağ Ağırlığı	508	kg
Dalga Duvar Ağırlığı (Kısa Kenar)	23.7	kg	Toplam Ağırlık	2326	kg
Nakil Ağırlığı				2310 kg	

Çizelge 6.3. 1600 kVA Rev01 transformatörün tasarım bilgileri

TRANSFORMATÖR BİLGİLERİ					
Güç	1600	kVA	Transformatör tipi	HERMETİK-HARMONİKLİ	
Gerilim	33/0.400		Hermetik		
Uk	6.71		Kapak altı mesafesi (AC / AD)	200/371	mm
Po	1.88		Contalama Şekli	YASSI CONTA	
Pk	12.85		AG İletkeni - YG İletkeni	Cu	Cu
			Soğutma Türü	ONAN	
			Boya Alanı	58.96	m2
			Kazan Yağ Ağırlığı	917.10	kg
İşletmede Oluşan Alt Basınç	-0.05		Emilen Yağ	38	kg
Maksimum Dalgaduvvar Alt Basıncı	0.16		VB	2.05	
Müsaade Edilen Üst Basınç	0.23		min / max	-20/40	
Dalgaduvvar Basınç Değişimi	0.07		TOELM	45	
TRANSFORMATÖR ÖLÇÜLERİ					
Bitmiş Transformatör Genişliği	1090	mm	Tekerlek Ölçüleri	820/160	mm
Bitmiş Transformatör Uzunluğu	2150	mm	Genleşme Kabı	0/0	mm
Bitmiş Transformatör Yüksekliği	2094	mm			mm
Bitmiş Transformatör Kapak-Üstü	1609	mm	Üst Kısım - Çerçeve Ölçüleri	65x65x7	mm
Transformatör Kanca Yüksekliği	4290	mm	Alt Kısım Saç Kalınlığı	5	mm
AKTİF KISIM BİLGİLERİ			KAZAN BİLGİLERİ		
Çekirdek Çapı	255	mm	Kazan İç Genişliği	560	mm
Pencere Yüksekliği	701	mm	Kazan İç Uzunluğu	1560	mm
Bacak Arası	498	mm	Uzun Taraf çıkarılmış Dalgaduvvar Ölçüsü		mm
		mm	Kazan İç Yüksekliği	1395	mm
		mm	DalgaDuvvarlar	34D250*44.5-1.2*1100	Ad
Y.G. Buşingleri	30 NF 250		Dalgaduvvarlar	11D280*62.0-1.2*1100	Ad
A.G. Buşingleri	DT1/1000		Bitmiş Kazan Genişliği	1090	mm
Hesap Isı Değeri	17.15	kW	Bitmiş Kazan Uzunluğu	2150	mm
Kazan Atılan Isı	17.20	kW	Bitmiş Kazan Yüksekliği	1601	mm
AĞIRLIKLAR					
AG İletken Ağırlığı	333.3	kg	Kazan Ağırlığı	706.6	kg
YG İletken Ağırlığı	508.0	kg	Alt Kısım Ağırlığı	148.7	kg
Çekirdek Ağırlığı	1615/1711	kg	Üst Kısım Ağırlığı	16.1	kg
Sıkıştırma Ağacı Ağırlığı	18	kg	Toplam Dalga Duvar Ağırlığı	520	kg
Sıkıştırma Demiri Ağırlığı	48	kg	Kapak Ağırlığı	87.0	kg
İzolasyon Kağıdı Ağırlığı	22.9	kg	Genleşme Deposu Ağırlığı	0	kg
Presspan Ağırlığı	20.3	kg	Genleşme Deposu Yağ Ağırlığı	0	kg
KP Ağırlığı	17.9	kg	Düz Duvar Kalınlığı	0	mm
HP Ağırlığı	1	kg	Düz Duvar Ağırlığı	0	kg
Ağaç Ağırlığı	1.7	kg	Tekerlek Taşıyıcı - U	51.6	kg
AG Bağlantı İletken Ağırlığı	17.7	kg	Tekerlekler	30.4	kg
YG Bağlantı İletken Ağırlığı	2.0	kg	Aktif Kısım Ağırlığı	2840	kg
Dalga Duvar Ağırlığı (Uzun Kenar)	381.8	kg	Yağ Ağırlığı	918	kg
Dalga Duvar Ağırlığı (Kısa Kenar)	138.6	kg	Toplam Ağırlık	4500	kg
			Nakil Ağırlığı	4470	kg

Çizelge 6.4. 1600 kVA Rev02 (CTC) transformatörün tasarım bilgileri

TRANSFORMATÖR BİLGİLERİ					
Güç	1600	kVA	Transformatör tipi	HERMETİK-HARMONİKLİ-CTC	
Gerilim	33/0.400		Hermetik		
Uk	6.19		Kapak altı mesafesi (AC / AD)	200/372	mm
Po	1.90		Contalama Şekli	YASSI CONTA	
Pk	14.10		AG İletkeni - YG İletkeni	Cu	Cu
			Soğutma Türü	ONAN	
			Boya Alanı	66.65	m2
			Kazan Yağ Ağırlığı	1006.10	kg
İşletmede Oluşan Alt Basınç	-0.07		Emilen Yağ	-2	kg
Maksimum Dalgaduvvar Alt Basıncı	0.18		VB	10.65	
Müsaade Edilen Üst Basınç	0.24		min / max	-20/40	
Dalgaduvvar Basınç Değişimi	0.08		TOELM	42	
TRANSFORMATÖR ÖLÇÜLERİ					
Bitmiş Transformatör Genişliği	1140	mm	Tekerlek Ölçüleri	820/160	mm
Bitmiş Transformatör Uzunluğu	2200	mm	Genleşme Kabı	0/0	mm
Bitmiş Transformatör Yüksekliği	2109	mm			mm
Bitmiş Transformatör Kapak-Üstü	1624	mm	Üst Kısım - Çerçeve Ölçüleri	65x65x7	mm
Transformatör Kanca Yüksekliği	4320	mm	Alt Kısım Saç Kalınlığı	5	mm
AKTİF KISIM BİLGİLERİ			KAZAN BİLGİLERİ		
Çekirdek Çapı	255	mm	Kazan İç Genişliği	550	mm
Pencere Yüksekliği	715	mm	Kazan İç Uzunluğu	1530	mm
Bacak Arası	488	mm	Uzun Taraf Dalgaduvvar Ölçüsü		mm
		mm	Kazan İç Yüksekliği	1410	mm
		mm	DalgaDuvarlar	34D280*29.5-1.5*1100	2 Ad
Y.G. Buşingleri	30 NF 250		Dalgaduvvarlar	12D320*34.5-1.5*1100	2 Ad
A.G. Buşingleri	DT1/1000		Bitmiş Kazan Genişliği	1140	mm
Hesap Isı Değeri	18.91	kW	Bitmiş Kazan Uzunluğu	2200	mm
Kazan Atılan Isı	18.98	kW	Bitmiş Kazan Yüksekliği	1616	mm
AĞIRLIKLAR					
AG İletken Ağırlığı	278.3	kg	Kazan Ağırlığı	927.9	kg
YG İletken Ağırlığı	500.7	kg	Alt Kısım Ağırlığı	149.0	kg
Çekirdek Ağırlığı	1616/1711	kg	Üst Kısım Ağırlığı	15.8	kg
Sıkıştırma Ağacı Ağırlığı	17	kg	Toplam Dalga Duvar Ağırlığı	740	kg
Sıkıştırma Demiri Ağırlığı	47	kg	Kapak Ağırlığı	84.9	kg
İzolasyon Kağıdı Ağırlığı	19.8	kg	Genleşme Deposu Ağırlığı	0	kg
Presspan Ağırlığı	19.6	kg	Genleşme Deposu Yağ Ağırlığı	0	kg
KP Ağırlığı	16.7	kg	Düz Duvar Kalınlığı	0	mm
HP Ağırlığı	1	kg	Düz Duvar Ağırlığı	0	kg
Ağaç Ağırlığı	1.8	kg	Tekerlek Taşıyıcı - U	51.6	kg
AG Bağlantı İletken Ağırlığı	17.5	kg	Tekerlekler	30.4	kg
YG Bağlantı İletken Ağırlığı	2.0	kg	Aktif Kısım Ağırlığı	2666	kg
Dalga Duvar Ağırlığı (Uzun Kenar)	528.5	kg	Yağ Ağırlığı	1007	kg
Dalga Duvar Ağırlığı (Kısa Kenar)	212.0	kg	Toplam Ağırlık	4636	kg
			Nakil Ağırlığı	4605	kg

Ayrıca tasarımı yapılan transformatörlere benzer harmonikli yükleri besleme kapasitesine sahip standart derating transformatör tasarımı da gerçekleştirilmiştir. 630 kVA harmonikli yükü beslemek için derating transformatör hesabı ve ilgili akım harmonik bilgileri Çizelge 6.5'te verilmiştir.

Çizelge 6.5. 630 kVA derating transformatörün harmoniksiz anma güç hesap ve harmonik bilgileri

IEC 61378-1:2011 Yöntemine göre Harmoniklerin Trafonun güç düşümünde Hesabı (Derating)			
$S_N =$	630	kVA	
$I_N =$	909,33	Amper	
Harmonikler	I _{rms}	(%)	
I_1	951,4	104,63	S_N (kVA) : Transformatörün Anma Gücü
I_3	0	0	I_N : Transformatörün Anma Akımı (AG)
I_5	251,3	27,636	S_T (kVA) : Transformatörün Tip Gücü
I_7	107,55	11,827	R_f (1) : Harmoniklerin Anma Güce indirme faktörü
I_9	0	0	
I_{11}	85,84	9,4399	
I_{13}	61,28	6,739	
I_{15}	0	0	
I_{17}	53,38	5,8703	
I_{19}	42,67	4,6925	
I_{21}	0	0	
I_{23}	38,55	4,2394	
I_{25}	32,58	3,5829	
I_{27}	0	0	
I_{29}	30,03	3,3024	
I_{31}	26,216	2,883	
I_{33}	0	0	
I_{35}	0	0	
I_{37}	0	0	
I_{39}	0	0	
I_{41}	0	0	
I_{43}	0	0	
I_{45}	0	0	
I_{47}	0	0	
I_{49}	0	0	
$R_f =$	0,83		
$S_T =$	$S_N * 1/R_f$		
$S_T =$	761	kVA	

630 kVA harmonikli yükü beslemek için derating transformatör hesabı ve ilgili akım harmonik bilgileri Çizelge 6.6'da verilmiştir.

Çizelge 6.6. 1600 kVA derating transformatörün harmoniksiz anma güç hesap ve harmonik bilgileri

IEC 61378-1:2011 Yöntemine göre Harmoniklerin Trafonun güç düşümünde Hesabı (Derating)			
$S_N =$	1600	kVA	
$I_N =$	2309,4	Amper	
Harmonikler	Irms	(%)	
I_1	2871	124,32	S_N (kVA) : Transformatörün Anma Gücü
I_3	0	0	I_N : Transformatörün Anma Akımı (AG)
I_5	650,3	28,159	S_T (kVA) : Transformatörün Tip Gücü
I_7	323,47	14,007	R_f (1) : Harmoniklerin Anma Güce indirme faktörü
I_9	0	0	
I_{11}	259,4	11,232	
I_{13}	183,73	7,9557	
I_{15}	0	0	
I_{17}	161,3	6,9845	
I_{19}	127,46	5,5192	
I_{21}	0	0	
I_{23}	116,4	5,0403	
I_{25}	96,9	4,1959	
I_{27}	0	0	
I_{29}	90,43	3,9157	
I_{31}	77,6	3,3602	
I_{33}	0	0	
I_{35}	0	0	
I_{37}	0	0	
I_{39}	0	0	
I_{41}	0	0	
I_{43}	0	0	
I_{45}	0	0	
I_{47}	0	0	
I_{49}	0	0	
$R_f =$	0,79		
$S_T =$	$S_N * 1/R_f$		
$S_T =$	2029	kVA	

630 kVA Transformatörler için tasarım çalışmaları ve farklı durumlar ile ilgili mali karşılaştırma sonuçları Çizelge 6.7’de karşılaştırılmıştır.

Çizelge 6.7. 630 gücü ile ilgili tasarlanan transformatörlerin mali karşılaştırılması

	Standart Güç	Derating Güç	Harmonik faktör Hesabı 1	Harmonik faktör Hesabı 2
Anma Güç	630	760	630	630
Harmonikli durumda besleyebileceği güç	522 kVA	630 kVA	630 kVA	630 kVA
Boştaki Kayıp	1,21 kW	1,43 kW	1,24 kW	1 kW
Yükteki kayıp (630 kVA için)	5,67 kW	5,72	5,51	5,53
Maliyet oranı	1	1,1933	1,11	1,097
Yıllık boştaki kayıp maliyeti TL	2332 TL	2756 TL	2389 TL	1927 TL
Yıllık Tam yük kayıp maliyeti	13259 TL	13779 TL	13008 TL	12585 TL
Harmonikli yüklerde deratinge göre ömür kayıp maliyeti	630 kVA olarak kullanılamaz	275580 TL % 100	260160 TL % 94.42	251700 TL % 91.33

Harmonik faktör hesabı 1 : Nüvenin akı yoğunluğu standart güçteki trafolar ile aynı tutulup ekstra kayıplar iletken akım yoğunluğu azaltılarak kompanze edilmiştir. Harmonik faktör hesabı 2 : Nüvenin akı yoğunluğu ve iletken akım yoğunluğu arasında mali açıdan en uygun ayarlama yapılarak kompanze edilmiştir. Sonuç olarak her iki faktör hesabıyla yapılan tasarımda, piyasada yaygın olarak kullanılan De-rating metoduna göre; hem malzeme maliyeti hem de kullanım ömrüne (ortalama 20 yıl) göre hesaplanan kayıp maliyeti açısından daha avantajlıdır.

1600 kVA Transformatörler için tasarım çalışmaları ve farklı durumlar ile ilgili mali karşılaştırma sonuçları Çizelge 6.7’de karşılaştırılmıştır.

Çizelge 6.8. 1600 kVA gücü ile ilgili tasarlanan transformatörlerin mali karşılaştırılması

	Standart güç	Derating Güç	Harmonik faktör Hesabı 1 (CTC)	Harmonik faktör Hesabı 1
Anma Güç	1600 kVA	2030 kVA	1600 kVA	1600 kVA
Harmonikli durumda besleyebileceği güç	1265 kVA	1600 kVA	1600 kVA	1600 kVA
Boştaki Kayıp	2,2 kW	2,6 kW	1,9 kW	1,88 kW
Yükteki kayıp (1600 kVA için)	13,7 kW	13,78	13,8	13,52
Maliyet oranı	1	1,2356	1,09	1,083
Yıllık boştaki kayıp maliyeti TL	4240 TL	5010 TL	3661 TL	3623 TL
Yıllık Tam yük kayıp maliyeti	30642 TL	31566 TL	30256 TL	29678 TL
Harmonikli yüklerde deratinge göre ömür kayıp maliyeti	1600 kVA olarak kullanılamaz	631336 TL % 100	605120 TL % 95.84	593560 TL % 94.01

1600 kVA için harmonikten kaynaklanan ekstra kayıplar;

Harmonik faktör hesabı 1 (ctc): Nüvenin akı yoğunluğu standart güçteki trafolar ile aynı tutulup ekstra kayıplar iletkenin paralel sayısının arttırılıp devamlı transpoze işlemine tabi tutulması ile kompanze edilmiştir.

Harmonik faktör hesabı 2 : Nüvenin akı yoğunluğu ve iletken akım yoğunluğu arasında mali açıdan en uygun ayarlama yapılarak kompanze edilmiştir.

Sonuç olarak her iki faktör hesabıyla yapılan tasarımda, piyasada yaygın olarak kullanılan De-rating metoduna göre; hem malzeme maliyeti hem de kullanım ömrüne (ortalama 20 yıl) göre hesaplanan kayıp maliyeti açısından daha avantajlıdır.

7. DENEYSEL ÇALIŞMALAR VE DOĞRULAMA FAALİYETLERİ

Geliştirilen modellerin ve optimal tasarım yaklaşımının doğrulanması amacı ile sıcaklık-artış deney çalışmaları yürütülmüştür. Bu çalışmalar, hem serbest hem de prefabrik kapalı ortamda çalışmakta olan yağlı-tip dağıtım transformatörlerini kapsamaktadır.

Deneysel çalışmalar, IEEE Std. C57.12.00.2006, IEEE Std C57.12.90 ve IEEE Std C57.119 standartlarına uygun olarak yapılmıştır [20, 38, 39, 41, 43, 53]. İlk olarak çalışmalarda kullanılacak transformatörlerin yükte ve boştaki kayıp deneyleri gerçekleştirilmiş ve ilgili kayıplar ölçülmüştür. Bu deneyler (kısa-devre ve açık-devre deneyleri) ilgili transformatörlerin anma akım ve anma gerilim kademelerinde, IEEE C57.12.00.2006 ve IEC 60076–1 standartlarına uygun olarak yapılmıştır [20, 43].

Ayrıca ilgili transformatörlere rutin testler uygulanmış ve ölçülen kayıplar referans sıcaklığa göre düzeltilmiştir (IEC standardına göre referans sıcaklık 75°C dir). Daha sonra, sıcaklık-artış deneyleri, IEC 60076-5 ve IEEE Std. C57.12.90 standartlarına [43] uygun bir şekilde ilgili transformatörlere uygulanmıştır. Bu standartlarda belirtilen kriterler dikkate alınarak, sıcaklık değerleri ölçülüp kayıt edilmiştir.

Söz konusu standartlara göre, sıcaklık artış deneylerinde (serbest veya prefabrik kapalı ortamda) transformatöre uygulanan güç, transformatörün toplam kayıplarına (transformatörün yük ve boştaki kayıpları) eşit olacak şekilde ayarlanır.

Transformatörün üst-yağ sıcaklığı kalıcı duruma ulaştığında transformatöre uygulanan güç düşürülerek yükteki kayıplara eşitlenir.

Tez çalışmaları kapsamında yapılan deneyler bu kurallara uygun yapılmıştır. Buna göre, denelerin son bir saatinde transformatörlere uygulanan güç düşürülüp yük kayıplarına eşitlenmiştir. Sıcaklık-artış deneylerinde kullanılan transformatörlerin teknik özellikleri Çizelge 7.1-7.4'te verilmektedir.

Çizelge 7.1. Rev01 630 kVA'lık transformatörün (TR1'in) özellikleri

Modeli	TSR-630-33-0.4-TR-REV01
Anma Gücü	630kVA
Seri No	14156-1
Gerilim	33000/400 volt
Bağlantı vektörü	Dyn11
Soğutma tipi	ONAN
Boştaki kayıpları	1086 watt
Yük kayıpları $q_{lm} + q_{pri} + q_{sec}$	5763 watt
Toplam kayıplar (Harmoniksiz Durumda)	6849 watt
Toplam kayıplar (Harmonikli Durumda)	8204 watt
Zaman-Sabiti (IEEE modeli)	139 min
Termal kapasitansı (IEEE modeli)	1298116ws/°k
Termal direnci (IEEE modeli)	0.00693531°k/w
Geliştirilen modelin zaman sabitinin baz değeri (Harmoniksiz Durumda)	146 min
Termal kapasitansı (Harmoniksiz Durumda)	1373072ws/°k
Termal direncin baz değeri (Harmoniksiz Durumda)	0.006401766 °k/w
Geliştirilen modelin zaman-sabitinin baz değeri (Harmonikli Durumda)	135 min
Termal kapasitansı (Harmonikli Durumda)	1373072ws/°k
Termal Direncin baz değeri (Harmonikli Durumda)	0.00681131°k/w

Çizelge 7.2. Rev02 630 kVA'lık transformatörün (TR2'in) özellikleri

Modeli	TSR-630-33-0.4-TR-REV02
Anma Gücü	630kVA
Seri No	14156-2
Gerilim	33000/400 volt
Bağlantı vektörü	Dyn11
Soğutma tipi	ONAN
Boştaki kayıpları	1241 watt
Yük kayıpları $q_{lm} + q_{pri} + q_{sec}$	5563 watt
Toplam kayıplar (Harmoniksiz Durumda)	6804 watt
Toplam kayıplar (Harmonikli Durumda)	8301 watt
Zaman-Sabiti (IEEE modeli)	139 min
Termal kapasitansı (IEEE modeli)	1298116ws/°k
Termal direnci (IEEE modeli)	0.00693531°k/w
Geliştirilen modelin zaman sabitinin baz değeri (Harmoniksiz Durumda)	146 min

Çizelge 7.2. (Devam) Rev02 630 kVA'lık transformatörün (TR2'in) özellikleri

Termal kapasitansı (Harmoniksiz Durumda)	1373072ws/°k
Termal direncin baz değeri (Harmoniksiz Durumda)	0.006401766 °k/w
Geliştirilen modelin zaman-sabitinin baz değeri (Harmonikli Durumda)	135 min
Termal kapasitansı (Harmonikli Durumda)	1373072ws/°k
Termal Direncin baz değeri (Harmonikli Durumda)	0.00681131°k/w

Çizelge 7.3. Rev01 1600 kVA'lık transformatörün (TR1'in) özellikleri

Modeli	TSR-630-33-0.4-TR-REV01
Anma Gücü	630kVA
Seri No	14156-1
Gerilim	33000/400 volt
Bağlantı vektörü	Dyn11
Soğutma tipi	ONAN
Boştaki kayıpları	1086 watt
Yük kayıpları $q_{lm} + q_{pri} + q_{sec}$	5763 watt
Toplam kayıplar (Harmoniksiz Durumda)	6849 watt
Toplam kayıplar (Harmonikli Durumda)	8204 watt
Zaman-Sabiti (IEEE modeli)	124 min
Termal kapasitansı (IEEE modeli)	2018972ws/°k
Termal direnci (IEEE modeli)	0.006401766 °k/w
Geliştirilen modelin zaman sabitinin baz değeri (Harmoniksiz Durumda)	114 min
Termal kapasitansı (Harmoniksiz Durumda)	2018972ws/°k
Termal direncin baz değeri (Harmoniksiz Durumda)	0.006401766 °k/w
Geliştirilen modelin zaman-sabitinin baz değeri (Harmonikli Durumda)	113 min
Termal kapasitansı (Harmonikli Durumda)	1373072ws/°k
Termal Direncin baz değeri (Harmonikli Durumda)	0.00681131°k/w

Çizelge 7.4. Rev02 1600 kVA'lık transformatörün (TR4'in) özellikleri

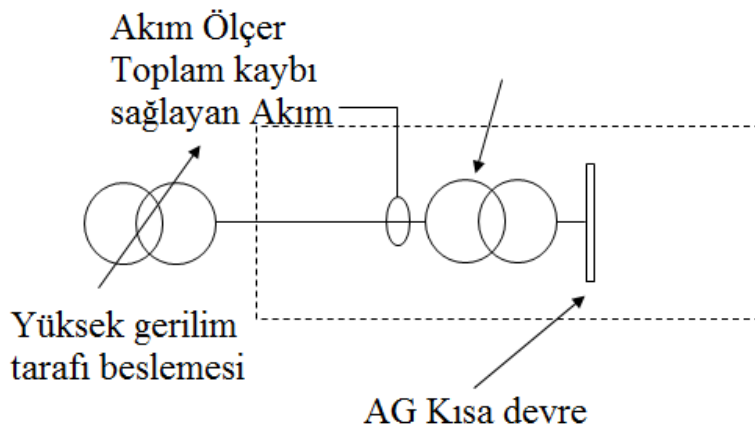
Modeli	TSR-630-33-0.4-TR-REV02
Anma Gücü	630kVA
Seri No	14156-2
Gerilim	33000/400 volt
Bağlantı vektörü	Dyn11
Soğutma tipi	ONAN

Çizelge 7.4. (Devam) Rev02 1600 kVA'lık transformatörün (TR4'in) özellikleri

Boştaki kayıpları	1241 watt
Yük kayıpları $q_{lm} + q_{pri} + q_{sec}$	5563 watt
Toplam kayıplar (Harmoniksiz Durumda)	6804 watt
Toplam kayıplar (Harmonikli Durumda)	8301 watt
Zaman-Sabiti (IEEE modeli)	139 min
Termal kapasitansı (IEEE modeli)	1298116ws/°k
Termal direnci (IEEE modeli)	0.00693531°k/w
Geliştirilen modelin zaman sabitinin baz değeri (Harmoniksiz Durumda)	146 min
Termal kapasitansı (Harmoniksiz Durumda)	1373072ws/°k
Termal direncin baz değeri (Harmoniksiz Durumda)	0.006401766 °k/w
Geliştirilen modelin zaman-sabitinin baz değeri (Harmonikli Durumda)	135 min
Termal kapasitansı (Harmonikli Durumda)	1373072ws/°k
Termal Direncin baz değeri (Harmonikli Durumda)	0.00681131°k/w

Sıcaklık-artış deneyi sırasında transformatörler, sekonder tarafından kısa devre edilmiş ve enerji primer tarafından uygulanmıştır.

Sıcaklık artış deneyinde, transformatöre uygulanan gerilim, transformatörün güç kaybı, yükteki ve boştaki kayıpların toplamına eşit oluncaya kadar yükseltilmiştir. Bu deneyde, transformatöre enjekte olan enerji transformatörün boştaki ve yükteki kayıpların toplamına eşittir. Sıcaklık-artış deneyinin şeması Şekil 7.1'de verilmektedir [7, 17, 23, 30]. Deney çalışmaları ile ilgili birkaç örnek Resim 7.1'de verilmektedir.



Şekil 7.1. Serbest ortamda sıcaklık-artış deneyinin bağlantı şeması



Resim 7.1. Serbest ortamda yapılan sıcaklık artışı deneleriyle ilgili örnekler

Sıcaklık-artış deneyleri, transformatör fabrikasında (EREN ELEKTRİK A. Ş.) yapılmıştır. Deneyler, laboratuvarında bulunan Hipotronics TTS 150 model transformatör deney setinden faydalanarak gerçekleştirilmiştir. Bu setin kalibrasyonu TSE tarafından yapılmıştır. Söz konusu deney seti Resim 7.2’de gösterilmektedir.

Sıcaklık-artış deneyinde sıcaklığın ölçüm ve kayıt işlemlerinde Hioki Highlogger LR8400 model veri kaydedicisi kullanılmıştır. Veriler 1 dakika aralıklarla kaydedilmiştir. Serbest ortam deneylerinde 8 prob, prefabrik kapalı ortam deneylerinde ise 20 prob kullanılmıştır. Transformatörün güç değerlerinin ölçüm ve kayıt işlemleri için Hioki 3196 power quality analyzer kullanılmıştır. Güç değerlerinin ölçüm ve kayıt işlemleri güç kalitesi analizörü (Hioki 3196) yardımı ile gerçekleştirilmiştir. Bu cihazlar, Resim 7.3’te gösterilmektedir.



Resim 7.2. TTS 150 transformatör deney seti



Resim 7.3. Deneylerde ölçüm ve kayıt işlemleri için kullanılan cihazlar

Deneysel çalışmalarda, iki farklı güçte (630 ve 1600 kVA) ve 4 adet farklı yağlı-tip dağıtım transformatörü (2 adet 630 ve 2 adet 1600 kVA) kullanılmıştır. IEC 60076-2 [22] ve C57.119-2001 standartlarına uygun olarak sıcaklık artış deneyleri gerçekleştirilmiştir [53]. Gerçekleştirilen deneylerde il aşamada transformatörün toplam kayıpları uygulanmıştır. Anma kayıplar transformatörün üst yağ artışı kalıcı duruma geldiğine kadar uygulanıp, üst yağ sıcaklığı kalıcı değere geldiğinde anma akım bir saat boyunca transformatöre uygulanmış olup, ardından sargı sıcaklık ölçümleri gerçekleştirilmiştir. Yapılan ölçüm sonuçlarına dayanarak transformatörlerin standart koşulları sağlayıp sağlamadığı neticesinde beklenen performansı sağlayabilip sağlamadığı incelenmiştir.

Yapılan deneyler aşağıdaki başlıklar altında gerçekleştirilmiştir.

- a- 630 kVA Rev01 transformatörün harmoniksiz durumda sıcaklık artış deneyleri
- b- 630 kVA Rev01 transformatörün harmonikli durumda sıcaklık artış deneyleri
- c- 630 kVA Rev02 transformatörün harmoniksiz durumda sıcaklık artış deneyleri
- d- 630 kVA Rev02 transformatörün harmonikli durumda sıcaklık artış deneyleri
- e- 1600 kVA Rev01 transformatörün harmoniksiz durumda sıcaklık artış deneyleri
- f- 1600 kVA Rev01 transformatörün harmonikli durumda sıcaklık artış deneyleri
- g- 1600 kVA Rev02 transformatörün harmoniksiz durumda sıcaklık artış deneyleri
- h- 1600 kVA Rev02 transformatörün harmonikli durumda sıcaklık artış deneyleri

7.1. 630 kVA Transformatörlerin Sıcaklık Artış Deneyleri

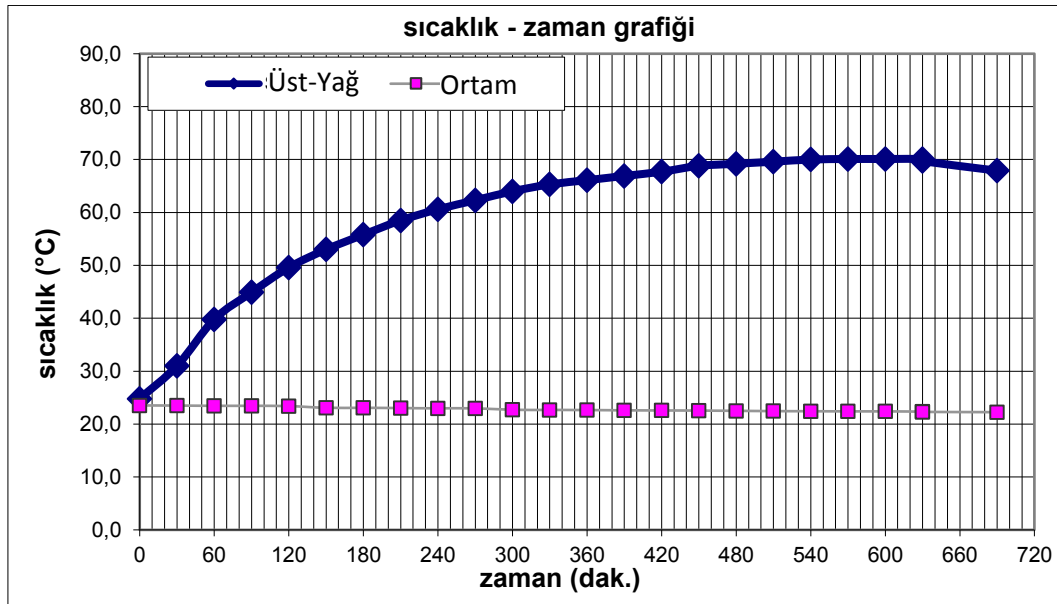
630 kVA güçte ve Rev01, TR1 transformatörün harmonikli ve harmoniksiz durumda performansının analiz ve karşılaştırması amacı ile sıcaklık artış deneyleri gerçekleştirilip elde edilen sonuçlar standart kriterleri ile karşılaştırılmıştır. Aynı analiz ve deneyler 630 kVA Rev02 nolu transformatör içinde yapılmıştır.

Harmonikli durumda yapılan deneylerde IEEE C57.110 [64] Standardına uygun olarak, üst yağ sıcaklığı kalıcı değere ulaşanadək, toplam harmonikli durumdaki kayıplar transformatöre enjekte edilmiştir. Kalıcı değere ulaştıktan sonra 1 saat boyunca harmonikli durumdaki toplam yük kaybı transformatöre enjekte edilmiştir.

Harmonikli ve harmoniksiz durumlarda yapılan deneylerden 630 kVA Rev01 ve Rev02 transformatörlerinin harmoniksiz durumları ile tasarlanan ilgili harmonikler için yükleri sorunsuz besleyebileceği tespit edilmiştir.

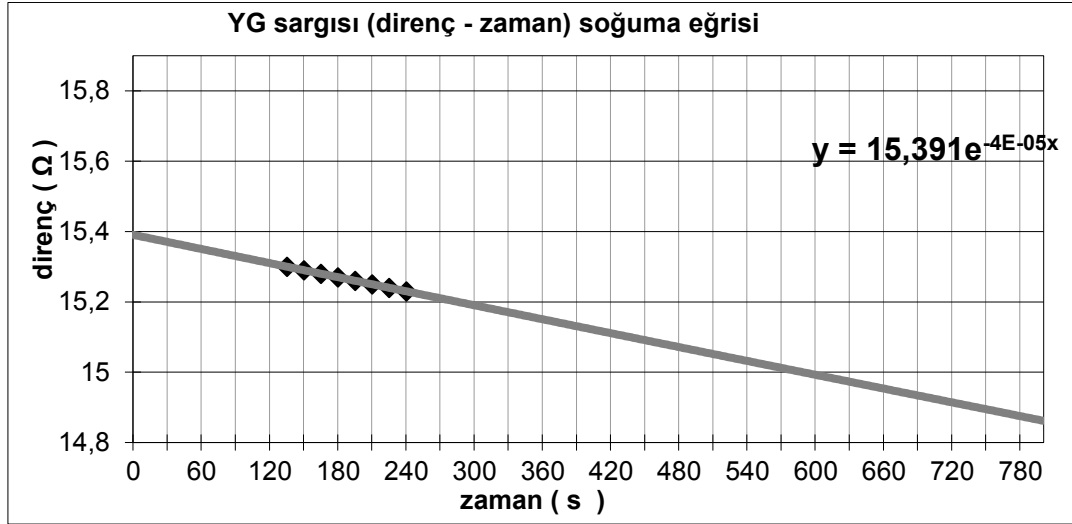
7.1.1. 630 kVA Rev01 transformatörün harmoniksiz durumda deneyleri

630 kVA gücüne sahip transformatörün harmoniksiz durumdaki sıcaklık artış deneyi gerçekleştirilip, elde edilen üst yağ sıcaklık artış sonucu Şekil 7.2’de sunulmuştur.



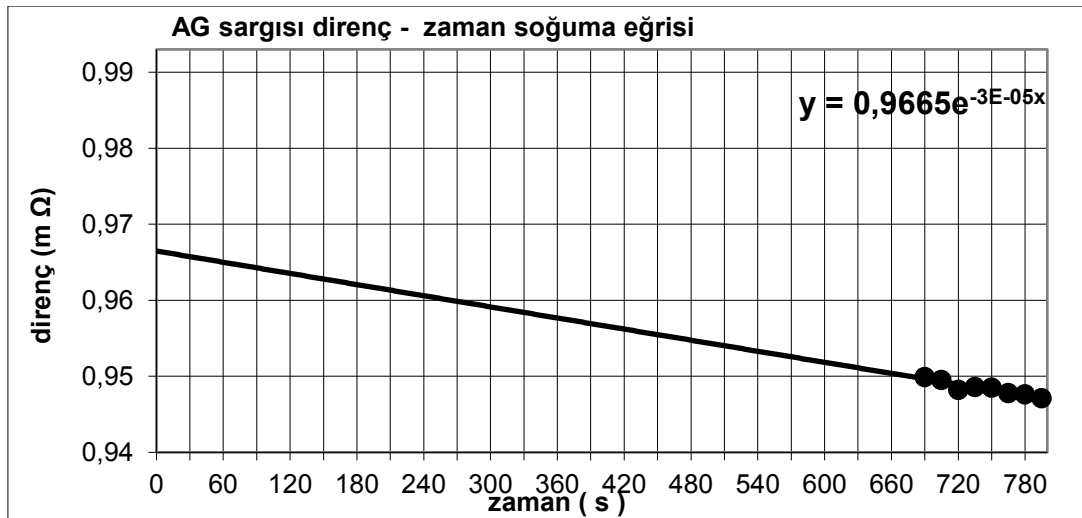
Şekil 7.2. 630 kVA Rev01 transformatörün harmoniksiz durumdaki üst yağ sıcaklık artışı

Sıcaklık artış deneyi bittikten sonra enerji kesilip, kablolar sokulup ve YG sargı sıcaklığını ölçmek amacı ile sargı direnci ölçülmüştür ölçüm sonucu Şekil 7.3'te verilmiştir.



Şekil 7.3. 630 kVA Rev01 transformatörün harmoniksiz durumdaki YG direnc ölçümü

YG dirençlerinin ölçümünden sonra AG sargı sıcaklığını ölçmek amacı ile sargı direnci ölçülmüştür ölçüm sonucu Şekil 7.4'te verilmiştir.



Şekil 7.4. 630 kVA Rev01 transformatörün harmoniksiz durumdaki AG direnc ölçümü

Gerçekleştirilen deneylerden üst yağın kalıcı durumdaki sıcaklık değeri, üst yağın ortam sıcaklığına göre artış değeri, kalıcı durumda ortalama yağ sıcaklığının değeri ve ortalama yağ sıcaklığının ortam sıcaklığına göre artış değerleri Çizelge 7.5'te verilmiştir.

Çizelge 7.5. 630 kVA Rev01 transformatörün harmoniksiz kalıcı durum yağ sıcaklık değerleri

Kalıcı durumda üst yağ sıcaklığı	70,10 °C
Üst yağ sıcaklık artışı	47,75 °C
Kalıcı durumda ortalama yağ sıcaklığı	61,10 °C
Ortalama yağ sıcaklık artışı	38,75 °C

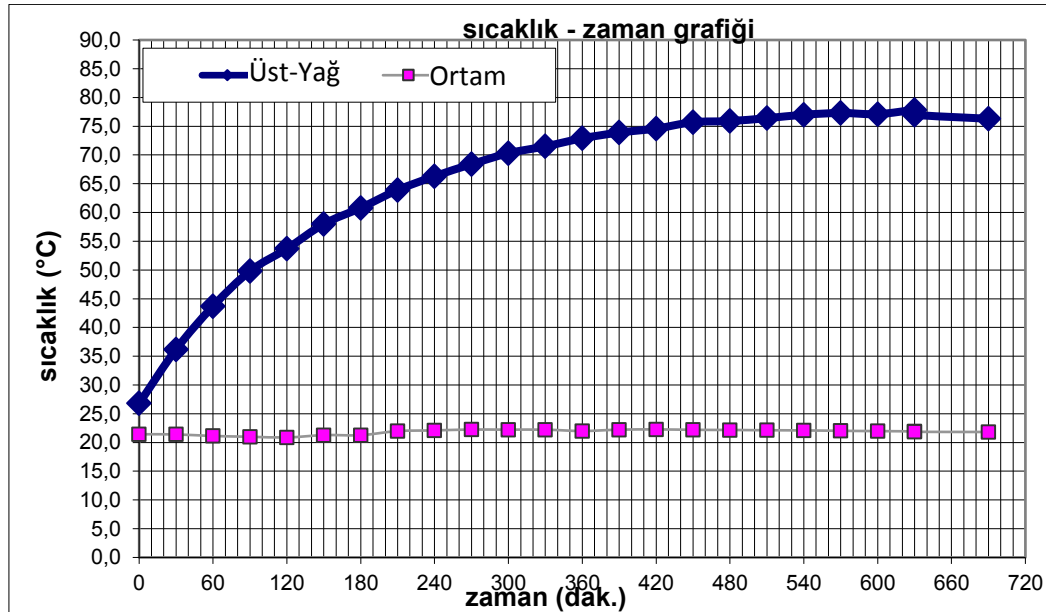
Yapılan AG ve YG direnç ölçümlerinden YG ve AG sargılarının ortalama artış değerleri elde edilmiştir. Ortalama artış değerleri, bu değerlerin IEC 60046-3 standardının kriterleri ile karşılaştırılması Çizelge 7.6’da verilmiştir.

Çizelge 7.6. 630 kVA Rev01 transformatörün harmoniksiz durumdaki sıcaklık performansı

Ölçümü yapılan Bölge	Ölçülen	Standart Değer	Durumu
Yağ maksimum sıcaklık artışı	47,75°C	60 °C	Geçerli
YG sargısı maksimum sıcaklık artışı	41,86°C	65 °C	Geçerli
AG sargısı maksimum sıcaklık artışı	58,27°C	65 °C	Geçerli

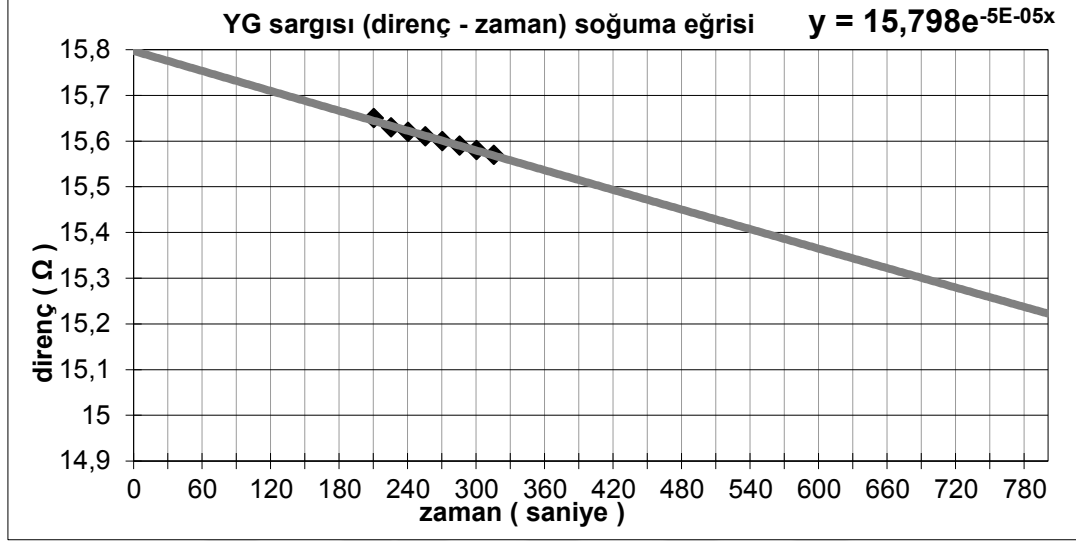
7.1.2. 630 kVA Rev01 transformatörün harmonikli durumda deneyleri

630 kVA gücüne sahip transformatörün harmonikli durumdaki sıcaklık artış deneyi gerçekleştirilip, elde edilen üst yağ sıcaklık artış sonucu Şekil 7.5’te sunulmuştur.



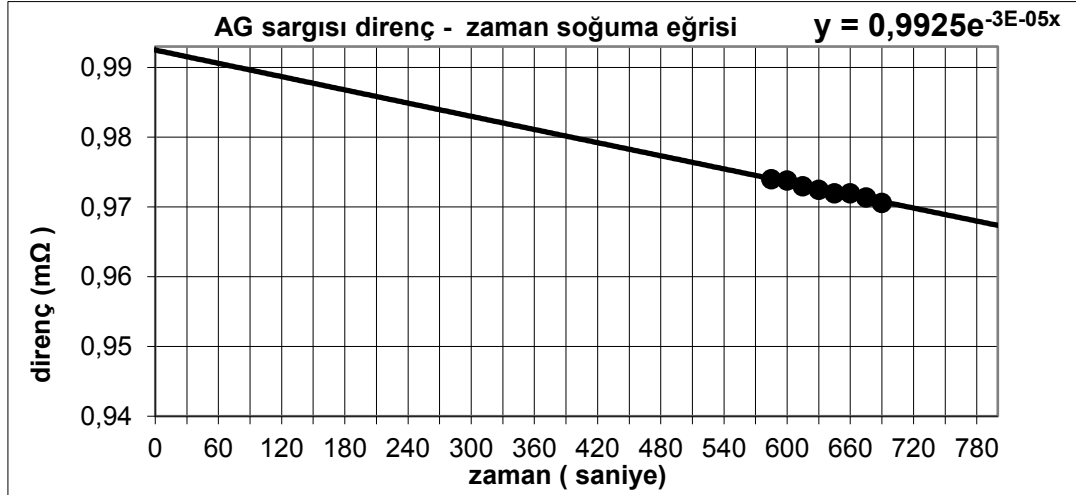
Şekil 7.5. 630 kVA Rev01 transformatörün harmonikli durumdaki üst yağ sıcaklık artışı

Sıcaklık artış deneyi bittikten sonra enerji kesilip, kablolar sokulup ve YG sargı sıcaklığını ölçmek amacı ile sargı direnci ölçülmüştür ölçüm sonucu Şekil 7.6’da verilmiştir.



Şekil 7.6. 630 kVA Rev01 transformatörün harmonikli durumdaki YG direnç ölçümü

YG dirençlerinin ölçümünden sonra AG sargı sıcaklığını ölçmek amacı ile sargı direnci ölçülmüştür ölçüm sonucu Şekil 7.7’de verilmiştir.



Şekil 7.7. 630 kVA Rev01 transformatörün harmoniksiz durumdaki AG direnç ölçümü

Gerçekleştirilen deneylerden üst yağın kalıcı durumdaki sıcaklık değeri, üst yağın ortam sıcaklığına göre artış değeri, kalıcı durumda ortalama yağ sıcaklığının değeri ve ortalama yağ sıcaklığının ortam sıcaklığına göre artış değerleri Çizelge 7.7’de verilmiştir.

Çizelge 7.7. 630 kVA Rev01 transformatörün harmoniksiz durumdaki sıcaklık performansı

Kalıcı durumda üst yağ sıcaklığı	79,30 °C
Üst yağ sıcaklık artışı °C	56,23 °C
Kalıcı durumda ortalama yağ sıcaklığı	69,95 °C
Ortalama yağ sıcaklık artışı	46,88 °C

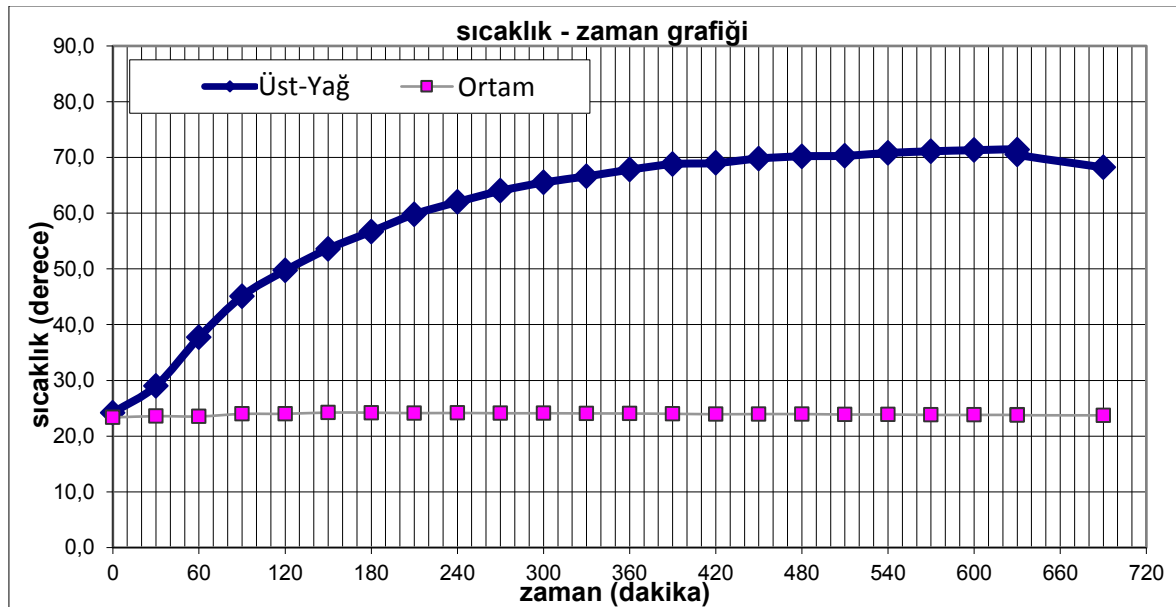
Yapılan AG ve YG direnç ölçümlerinden YG ve AG sargılarının ortalama artış değerleri elde edilmiştir. Ortalama artış değerleri, bu değerlerin IEC 60046-3 standardının kriterleri ile karşılaştırılması Çizelge 7.8’de verilmiştir.

Çizelge 7.8. 630 kVA transformatörün harmonikli durumdaki sıcaklık performansı

Ölçümü yapılan Bölge	Ölçülen	Standart Değer	Durumu
Yağ maksimum sıcaklık artışı	56,23°C	60 °C	Geçerli
YG sargısı maksimum sıcaklık artışı	54,40°C	65 °C	Geçerli
AG sargısı maksimum sıcaklık artışı	62,68°C	65 °C	Geçerli

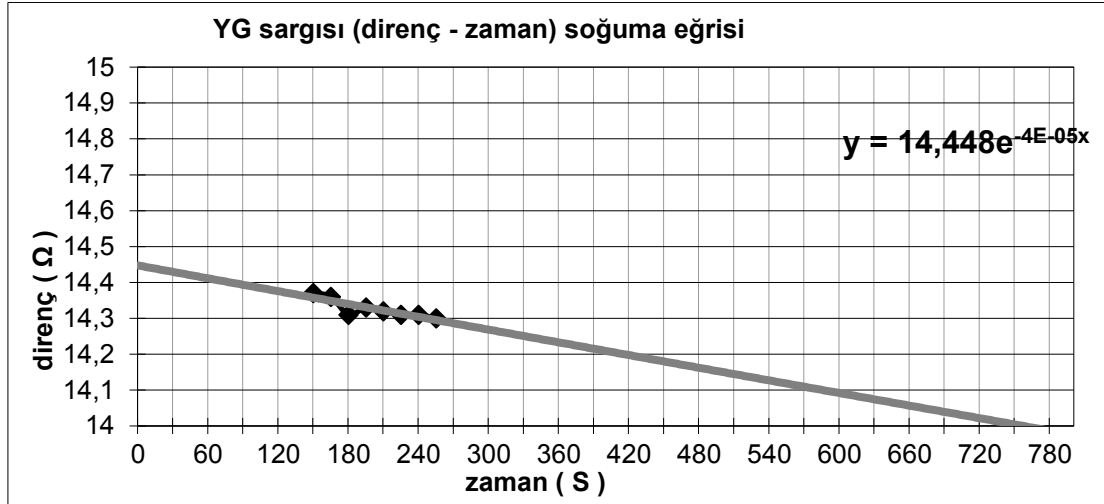
7.1.3. 630 kVA Rev02 transformatörün harmoniksiz durumda deneyleri

630 kVA gücüne sahip transformatörün harmoniksiz durumdaki sıcaklık artış deneyi gerçekleştirilip, elde edilen üst yağ sıcaklık artış sonucu Şekil 7.8’de sunulmuştur.



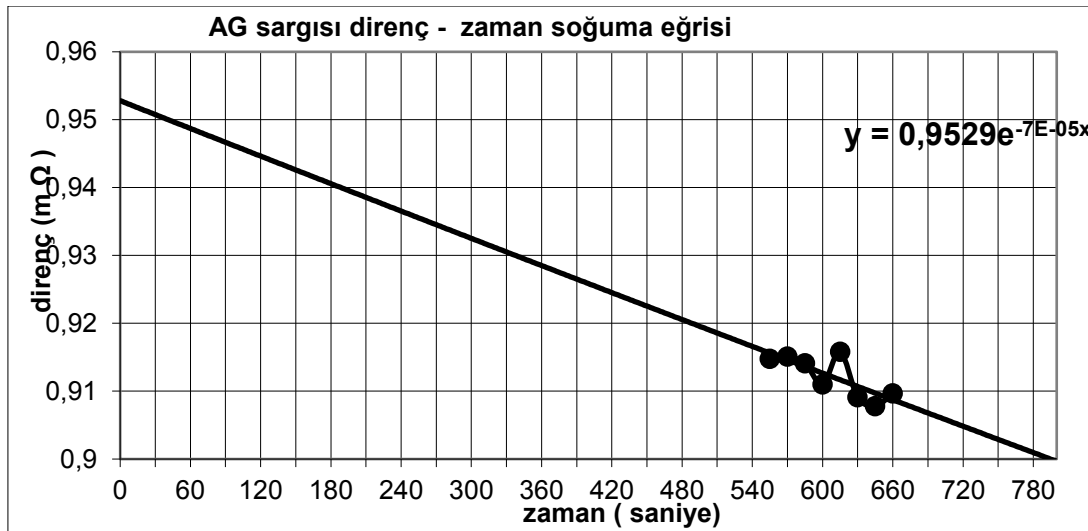
Şekil 7.8. 630 kVA Rev02 transformatörün harmoniksiz durumdaki üst yağ sıcaklık artışı

Sıcaklık artış deneyi bittikten sonra enerji kesilip, kablolar sokulup ve YG sargı sıcaklığını ölçmek amacı ile sargı direnci ölçülmüştür ölçüm sonucu Şekil 7.9’da verilmiştir.



Şekil 7.9. 630 kVA Rev02 transformatörün harmoniksiz durumdaki YG direnç ölçümü

YG dirençlerinin ölçümünden sonra AG sargı sıcaklığını ölçmek amacı ile sargı direnci ölçülmüştür ölçüm sonucu Şekil 7.10’da verilmiştir.



Şekil 7.10. 630 kVA Rev02 transformatörün harmoniksiz durumdaki AG direnç ölçümü

Gerçekleştirilen deneylerden üst yağın kalıcı durumdaki sıcaklık değeri, üst yağın ortam sıcaklığına göre artış değeri, kalıcı durumda ortalama yağ sıcaklığının değeri ve ortalama yağ sıcaklığının ortam sıcaklığına göre artış değerleri Çizelge 7.9’da verilmiştir.

Çizelge 7.9. 630 kVA Rev02 transformatörün harmoniksiz kalıcı durum yağ sıcaklık değerleri

Kalıcı durumda üst yağ sıcaklığı	71,40 °C
Üst yağ sıcaklık artışı	47,60 °C
Kalıcı durumda ortalama yağ sıcaklığı	60,50 °C
Ortalama yağ sıcaklık artışı	36,70 °C

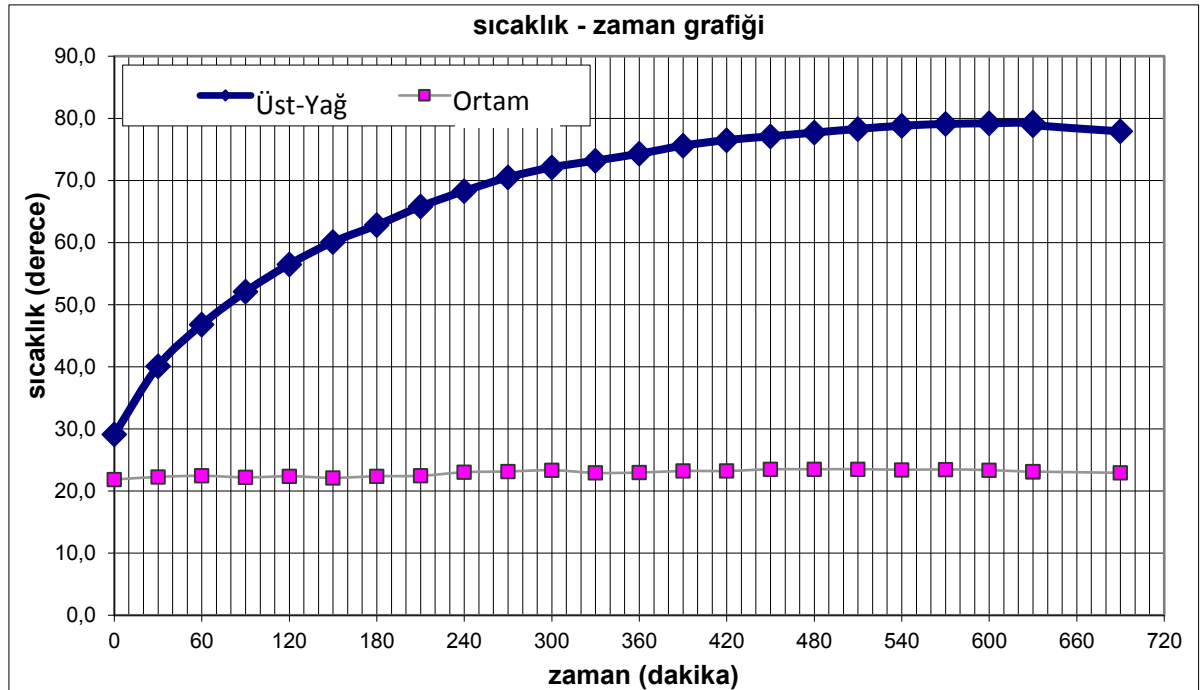
Yapılan AG ve YG direnç ölçümlerinden YG ve AG sargılarının ortalama artış değerleri elde edilmiştir. Ortalama artış değerleri, bu değerlerin IEC 60046-3 standardının kriterleri ile karşılaştırılması Çizelge 7.10’da verilmiştir.

Çizelge 7.10. 630 kVA Rev02 transformatörün harmoniksiz durumdaki sıcaklık performansı

Ölçümü yapılan Bölge	Ölçülen	Standart Değer	Durumu
Yağ maksimum sıcaklık artışı	47,60°C	60 °C	Geçerli
YG sargısı maksimum sıcaklık artışı	46,86°C	65 °C	Geçerli
AG sargısı maksimum sıcaklık artışı	51,92°C	65 °C	Geçerli

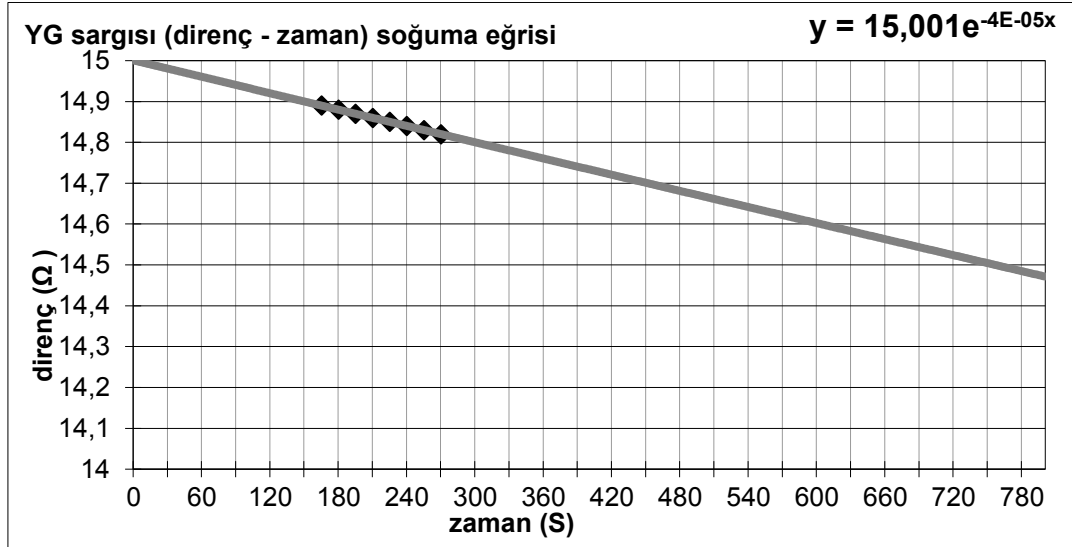
7.1.4. 630 kVA Rev02 transformatörün harmonikli durumda deneyleri

630 kVA gücüne sahip transformatörün harmonikli durumdaki sıcaklık artış deneyi gerçekleştirilip, elde edilen üst yağ sıcaklık artış sonucu Şekil 7.11’de sunulmuştur.



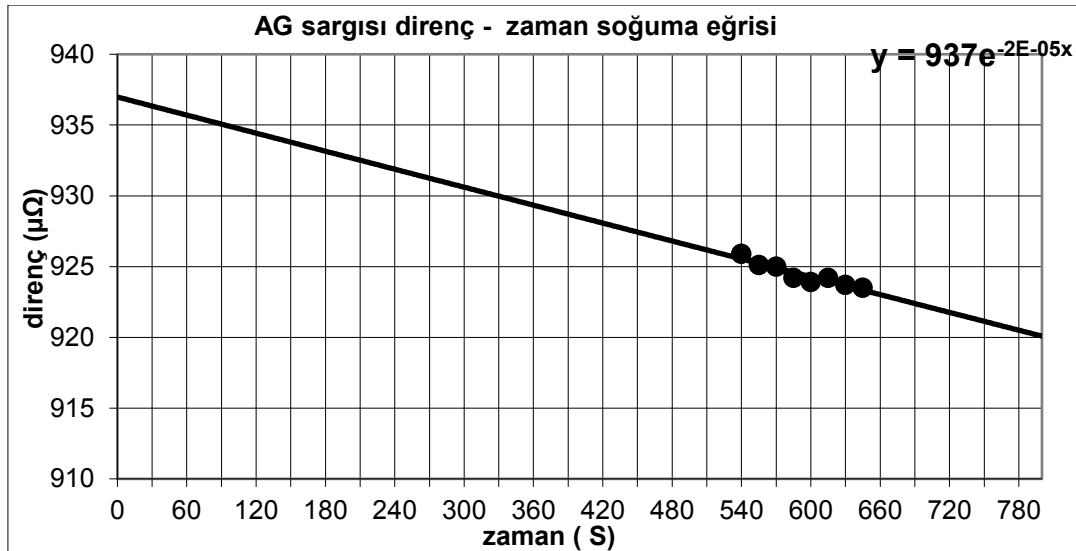
Şekil 7.11. 630 kVA Rev02 transformatörün harmonikli durumdaki üst yağ sıcaklık artışı

Sıcaklık artış deneyi bittikten sonra enerji kesilip, kablolar sokulup ve YG sargı sıcaklığını ölçmek amacı ile sargı direnci ölçülmüştür ölçüm sonucu Şekil 7.12’de verilmiştir.



Şekil 7.12. 630 kVA Rev02 transformatörün harmonikli durumdaki YG direnç ölçümü

YG dirençlerinin ölçümünden sonra AG sargı sıcaklığını ölçmek amacı ile sargı direnci ölçülmüştür ölçüm sonucu Şekil 7.13’te verilmiştir.



Şekil 7.13. 630 kVA Rev02 transformatörün harmoniksiz durumdaki AG direnç ölçümü

Gerçekleştirilen deneylerden üst yağın kalıcı durumdaki sıcaklık değeri, üst yağın ortam sıcaklığına göre artış değeri, kalıcı durumda ortalama yağ sıcaklığının değeri ve ortalama yağ sıcaklığının ortam sıcaklığına göre artış değerleri Çizelge 7.11’de verilmiştir.

Çizelge 7.11. 630 kVA Rev02 transformatörün harmoniksiz durumdaki sıcaklık performansı

Kalıcı durumda üst yağ sıcaklığı	80,10 °C
Üst yağ sıcaklık artışı °C	57,03 °C
Kalıcı durumda ortalama yağ sıcaklığı	70,60 °C
Ortalama yağ sıcaklık artışı	47,53 °C

Yapılan AG ve YG direnç ölçümlerinden YG ve AG sargılarının ortalama artış değerleri elde edilmiştir. Ortalama artış değerleri, bu değerlerin IEC 60046-3 standardının kriterleri ile karşılaştırılması Çizelge 7.12’de verilmiştir.

Çizelge 7.12. 630 kVA transformatörün harmonikli durumdaki sıcaklık performansı

Ölçümü yapılan Bölge	Ölçülen	Standart Değer	Durumu
Yağ maksimum sıcaklık artışı	57,03°C	60 °C	Geçerli
YG sargısı maksimum sıcaklık artışı	55,62°C	65 °C	Geçerli
AG sargısı maksimum sıcaklık artışı	63,12°C	65 °C	Geçerli

7.2. 1600 kVA Transformatörlerinin Sıcaklık Artış Deneyleri

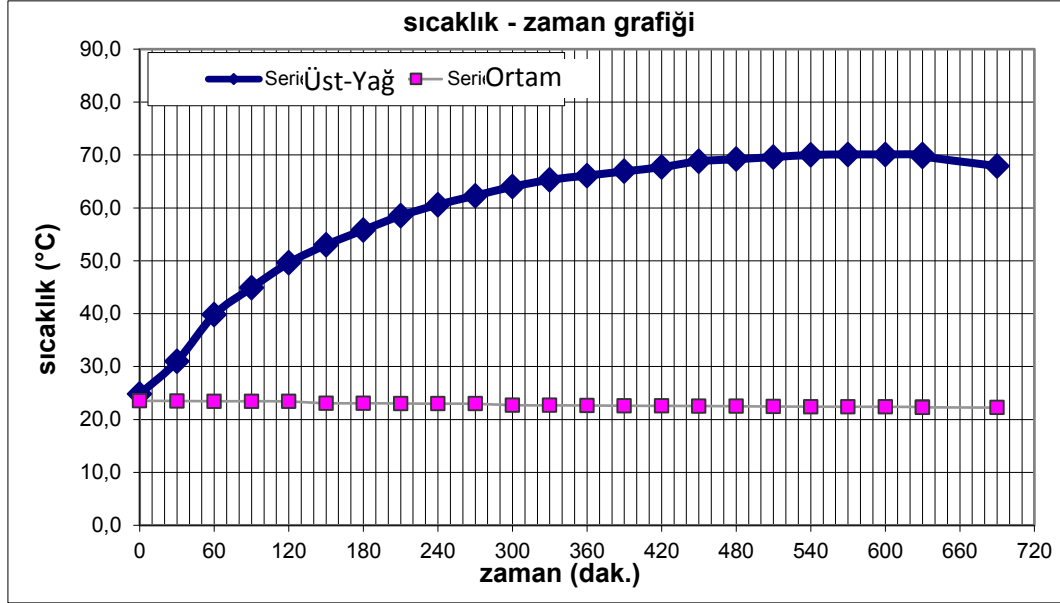
1600 kVA güçte ve Rev01, TR3 ve 1600 kVA Rev02 (TR4) transformatörlerinin harmonikli ve harmoniksiz durumlarda performans analiz ve karşılaştırması amacı ile sıcaklık artış deneyleri gerçekleştirilip elde edilen sonuçlar standart kriterleri ile karşılaştırılmıştır.

Harmonikli durumda yapılan deneylerde IEEE C57.110 [64] Standardına uygun olarak, üst yağ sıcaklığı kalıcı değere ulaşanadək, toplam harmonikli durumdaki kayıplar transformatöre enjekte edilmiştir. Kalıcı değere ulaştıktan sonra 1 saat boyunca harmonikli durumdaki toplam yük kaybı transformatöre enjekte edilmiştir.

Harmonikli ve harmoniksiz durumlarda yapılan deneylerden 16000 kVA Rev01 ve 1600 kVA Rev02 transformatörler harmoniksiz durumlar ile tasarlanan ilgili harmonikler için yükleri sorunsuz besleyebileceği tespit edilmiştir.

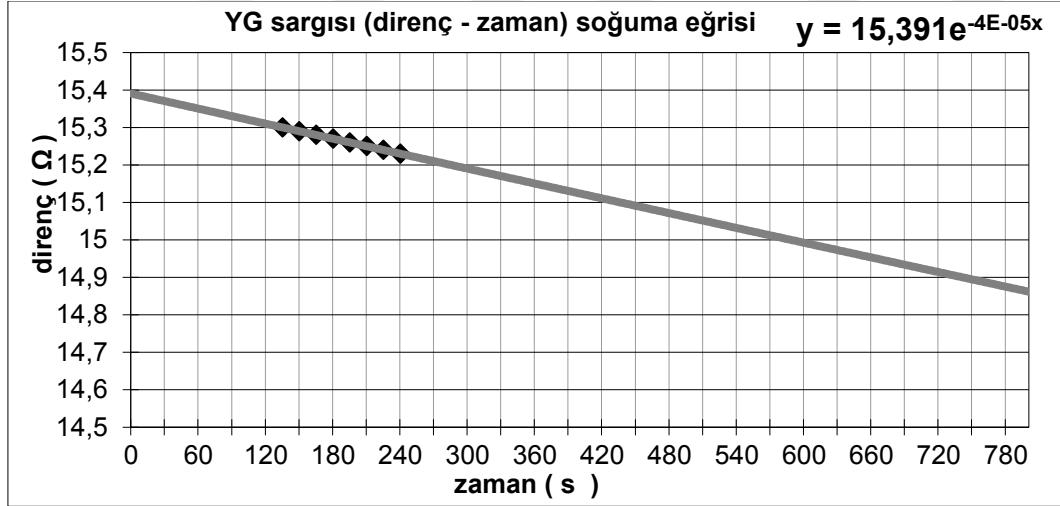
7.2.1. 1600 kVA Rev01 transformatörün harmoniksiz durumda deneyleri

1600 kVA gücüne sahip transformatörün harmoniksiz durumdaki sıcaklık artış deneyi gerçekleştirilip, elde edilen üst yağ sıcaklık artış sonucu Şekil 7.14’te sunulmuştur.



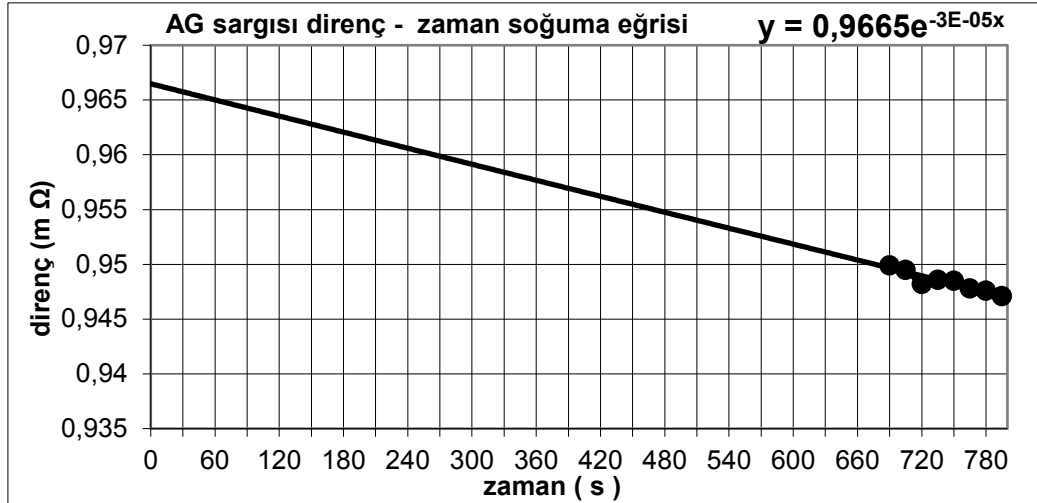
Şekil 7.14. 1600 kVA Rev01 transformatörün harmoniksiz durumdaki üst yağ sıcaklık artışı

Sıcaklık artış deneyi bittikten sonra enerji kesilip, kablolar sokulup ve YG sargı sıcaklığını ölçmek amacı ile sargı direnci ölçülmüştür ölçüm sonucu Şekil 7.15'te verilmiştir.



Şekil 7.15. 1600 kVA Rev01 transformatörün harmoniksiz durumdaki YG direnç ölçümü

YG dirençlerinin ölçümünden sonra AG sargı sıcaklığını ölçmek amacı ile sargı direnci ölçülmüştür ölçüm sonucu Şekil 7.16'da verilmiştir.



Şekil 7.16. 1600 kVA Rev01 transformatörün harmoniksiz durumdaki AG direnç ölçümü

Gerçekleştirilen deneylerden üst yağ kalıcı durumdaki sıcaklık değeri, üst yağın ortam sıcaklığına göre artış değeri, kalıcı durumda ortalama yağ sıcaklığının değeri ve ortalama yağ sıcaklığının ortam sıcaklığına göre artış değerleri Çizelge 7.13'te verilmiştir.

Çizelge 7.13. 1600 kVA Rev01 transformatörün harmoniksiz kalıcı durum yağ sıcaklık değerleri

Kalıcı durumda üst yağ sıcaklığı	70,10 °C
Üst yağ sıcaklık artışı	47,75 °C
Kalıcı durumda ortalama yağ sıcaklığı	61,10 °C
Ortalama yağ sıcaklık artışı	38,75 °C

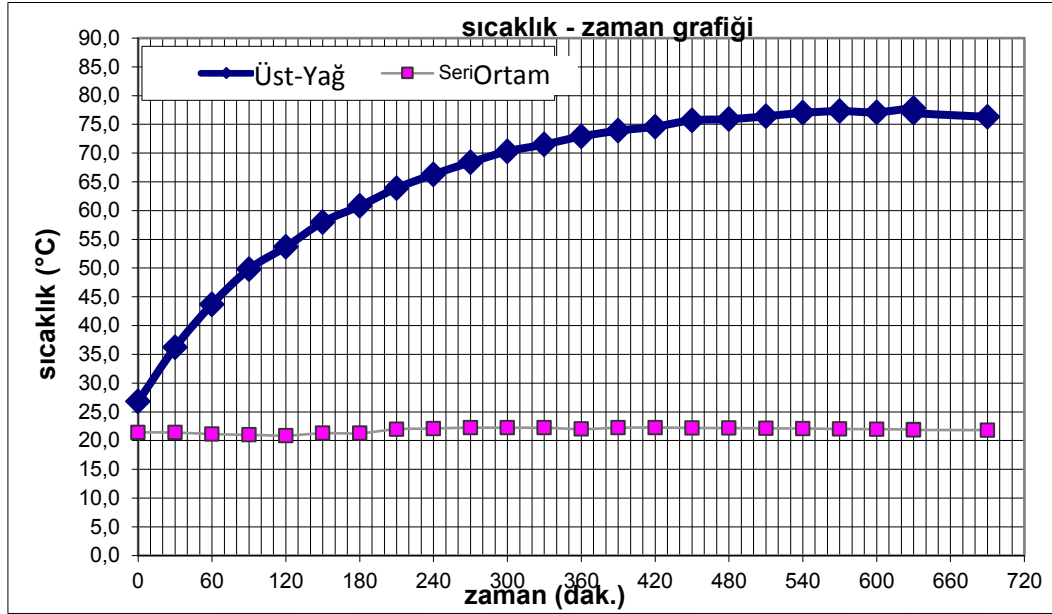
Yapılan AG ve YG direnç ölçümlerinden YG ve AG sargılarının ortalama artış değerleri elde edilmiştir. Ortalama artış değerleri, bu değerlerin IEC 60046-3 standardının kriterleri ile karşılaştırılması Çizelge 7.14'te verilmiştir.

Çizelge 7.14. 1600 kVA Rev01 transformatörün harmoniksiz durumdaki sıcaklık performansı

Ölçümü yapılan Bölge	Ölçülen	Standart Değer	Durumu
Yağ maksimum sıcaklık artışı	47,75°C	60 °C	Geçerli
YG sargısı maksimum sıcaklık artışı	41,86°C	65 °C	Geçerli
AG sargısı maksimum sıcaklık artışı	58,27°C	65 °C	Geçerli

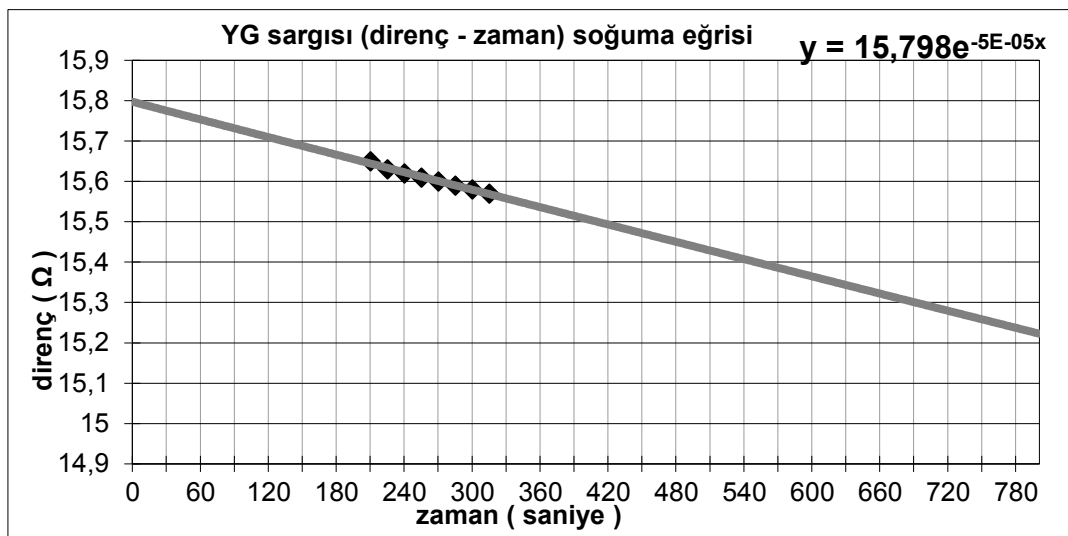
7.2.2. 1600 kVA Rev01 transformatörün harmonikli durumda deneyleri

1600 kVA gücüne sahip transformatörün harmonikli durumdaki sıcaklık artış deneyi gerçekleştirilip, elde edilen üst yağ sıcaklık artış sonucu Şekil 7.17’de sunulmuştur.



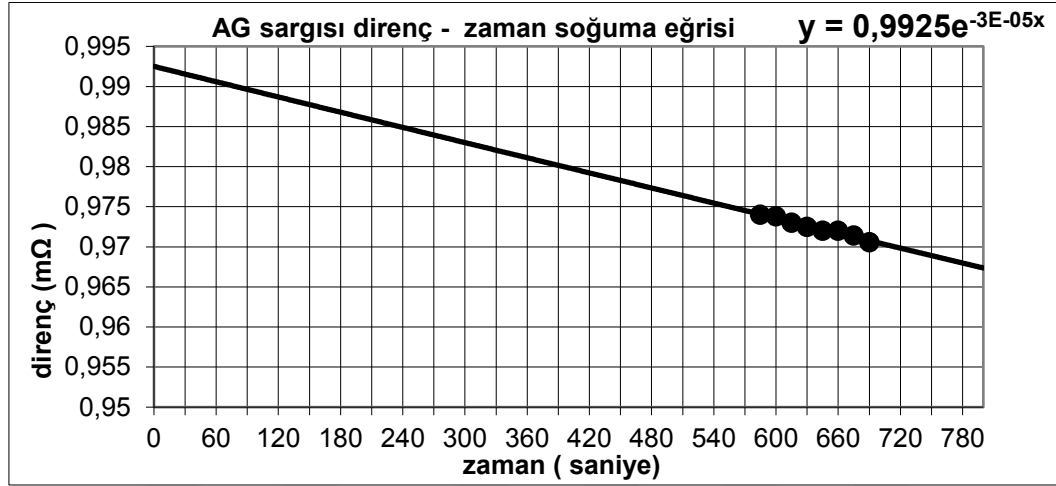
Şekil 7.17. 1600 kVA Rev01 transformatörün harmonikli durumdaki üst yağ sıcaklık artışı

Sıcaklık artış deneyi bittikten sonra enerji kesilip, kablolar sokulup ve YG sargı sıcaklığını ölçmek amacı ile sargı direnci ölçülmüştür ölçüm sonucu Şekil 7.18’de verilmiştir.



Şekil 7.18. 1600 kVA Rev01 transformatörün harmonikli durumdaki YG direnç ölçümü

YG dirençlerinin ölçümünden sonra AG sargı sıcaklığını ölçmek amacı ile sargı direnci ölçülmüştür ölçüm sonucu Şekil 7.19’da verilmiştir.



Şekil 7.19. 1600 kVA Rev01 transformatörün harmoniksiz durumdaki AG direnç ölçümü

Gerçekleştirilen deneylerden üst yağ kalıcı durumdaki sıcaklık değeri, üst yağın ortam sıcaklığına göre artış değeri, kalıcı durumda ortalama yağ sıcaklığının değeri ve ortalama yağ sıcaklığının ortam sıcaklığına göre artış değerleri Çizelge 7.15’te verilmiştir.

Çizelge 7.15. 1600 kVA Rev01 transformatörün harmonikli durumdaki sıcaklık performansı

Kalıcı durumda üst yağ sıcaklığı	79,30 °C
Üst yağ sıcaklık artışı °C	56,23 °C
Kalıcı durumda ortalama yağ sıcaklığı	69,95 °C
Ortalama yağ sıcaklık artışı	46,88 °C

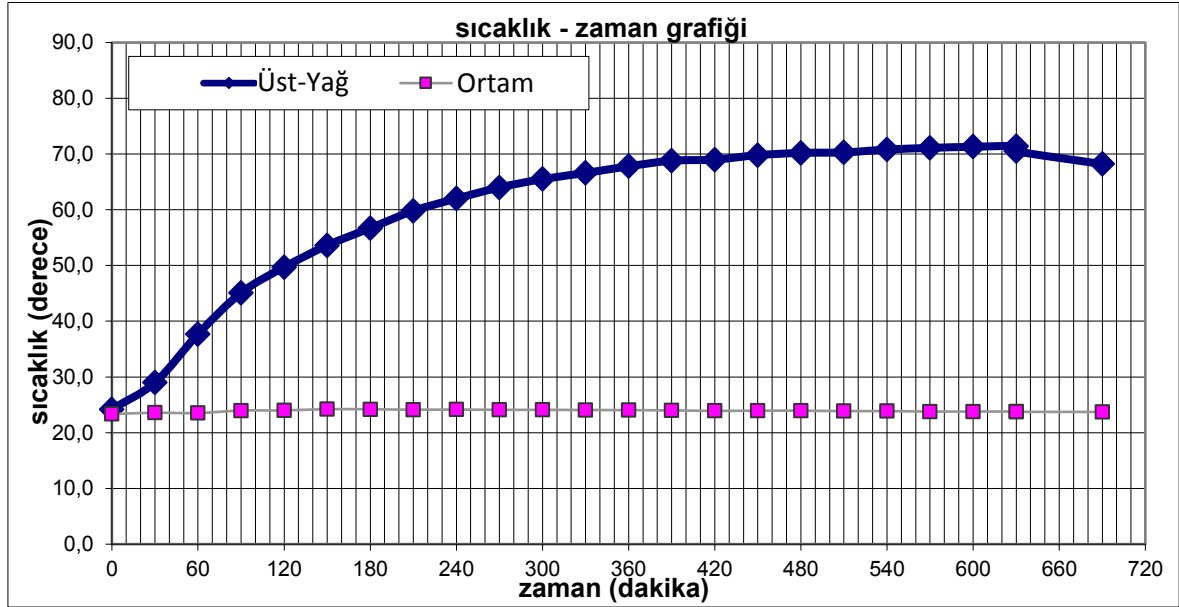
Yapılan AG ve YG direnç ölçümlerinden YG ve AG sargılarının ortalama artış değerleri elde edilmiştir. Ortalama artış değerleri, bu değerlerin IEC 60046-3 standardının kriterleri ile karşılaştırılması Çizelge 7.16’da verilmiştir.

Çizelge 7.16. 1600 kVA Rev01 transformatörün harmonikli durumdaki sıcaklık performansı

Ölçümü yapılan Bölge	Ölçülen	Standart Değer	Durumu
Yağ maksimum sıcaklık artışı	56,23°C	60 °C	Geçerli
YG sargısı maksimum sıcaklık artışı	54,40°C	65 °C	Geçerli
AG sargısı maksimum sıcaklık artışı	62,68°C	65 °C	Geçerli

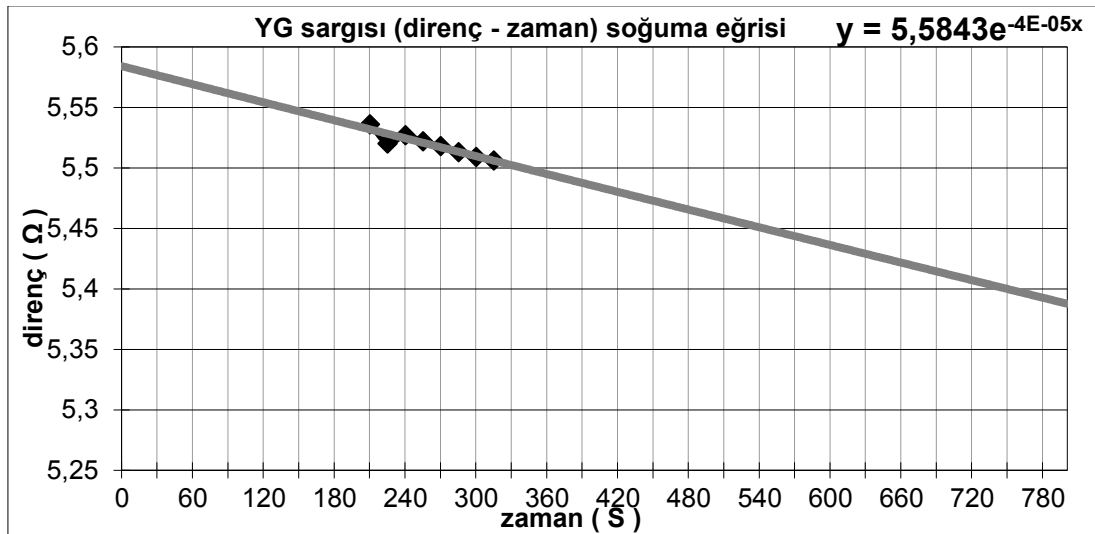
7.2.3. 1600 kVA Rev02 transformatörün harmoniksiz durumda deneyleri

1600 kVA gücüne sahip transformatörün harmoniksiz durumdaki sıcaklık artış deneyi gerçekleştirilip, elde edilen üst yağ sıcaklık artış sonucu Şekil 7.20’de sunulmuştur.



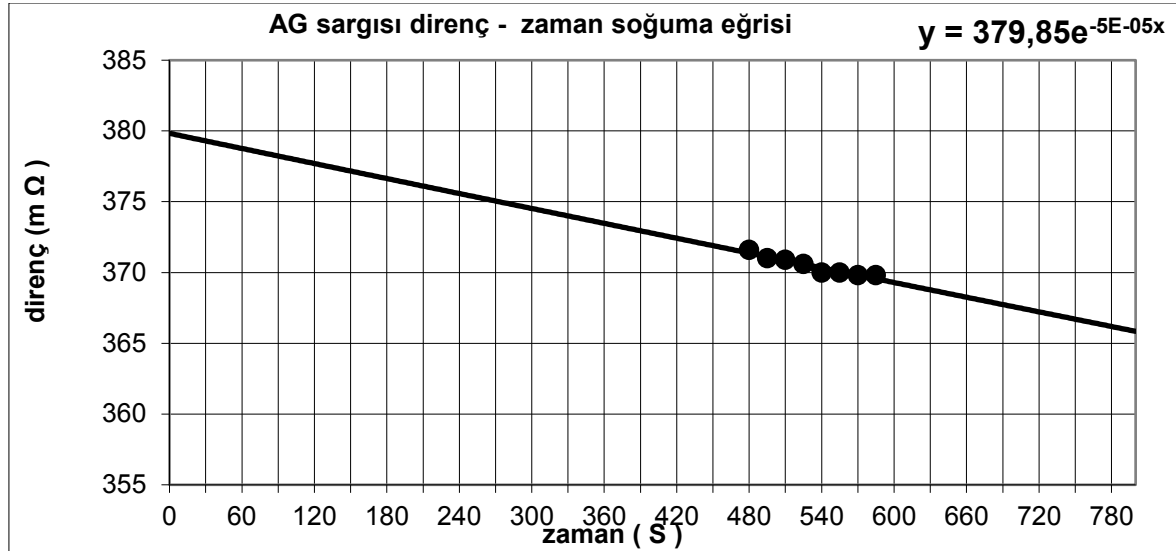
Şekil 7.20. 1600 kVA Rev02 transformatörün harmoniksiz durumdaki üst yağ sıcaklık artışı

Sıcaklık artış deneyi bittikten sonra enerji kesilip, kablolar sokulup ve YG sargı sıcaklığını ölçmek amacı ile sargı direnci ölçülmüştür ölçüm sonucu Şekil 7.21’de verilmiştir.



Şekil 7.21. 1600 kVA Rev02 transformatörün harmoniksiz durumdaki YG direnç ölçümü

YG dirençlerinin ölçümünden sonra AG sargı sıcaklığını ölçmek amacı ile sargı direnci ölçülmüştür ölçüm sonucu Şekil 7.22’de verilmiştir.



Şekil 7.22. 1600 kVA Rev02 transformatörün harmoniksiz durumdaki AG direnç ölçümü

Gerçekleştirilen deneylerden üst yağın kalıcı durumdaki sıcaklık değeri, üst yağın ortam sıcaklığına göre artış değeri, kalıcı durumda ortalama yağ sıcaklığının değeri ve ortalama yağ sıcaklığının ortam sıcaklığına göre artış değerleri Çizelge 7.17’de verilmiştir.

Çizelge 7.17. 1600 kVA Rev02 transformatörün harmoniksiz kalıcı durum yağ sıcaklık değerleri

Kalıcı durumda üst yağ sıcaklığı	71,40 °C
Üst yağ sıcaklık artışı	47,60 °C
Kalıcı durumda ortalama yağ sıcaklığı	60,50 °C
Ortalama yağ sıcaklık artışı	36,70 °C

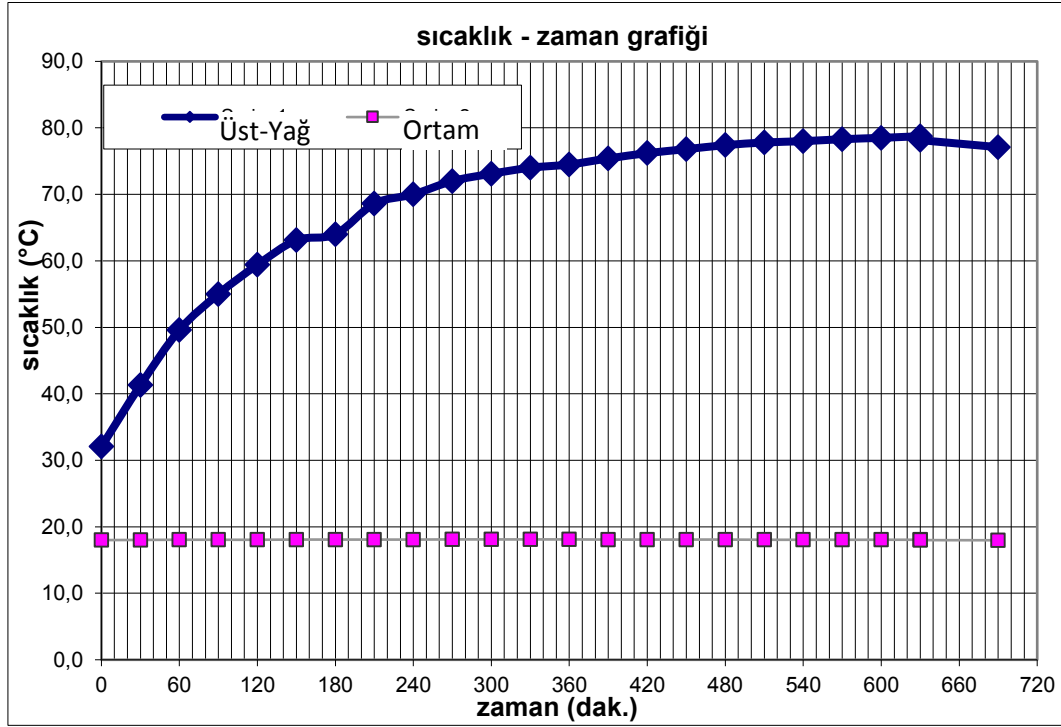
Yapılan AG ve YG direnç ölçümlerinden YG ve AG sargılarının ortalama artış değerleri elde edilmiştir. Ortalama artış değerleri, bu değerlerin IEC 60046-3 standardının kriterleri ile karşılaştırılması Çizelge 7.18’de verilmiştir.

Çizelge 7.18. 1600 kVA Rev02 transformatörün harmoniksiz durumdaki sıcaklık performansı

Ölçümü yapılan Bölge	Ölçülen	Standart Değer	Durumu
Yağ maksimum sıcaklık artışı	47,60°C	60 °C	Geçerli
YG sargısı maksimum sıcaklık artışı	41,86°C	65 °C	Geçerli
AG sargısı maksimum sıcaklık artışı	58,27°C	65 °C	Geçerli

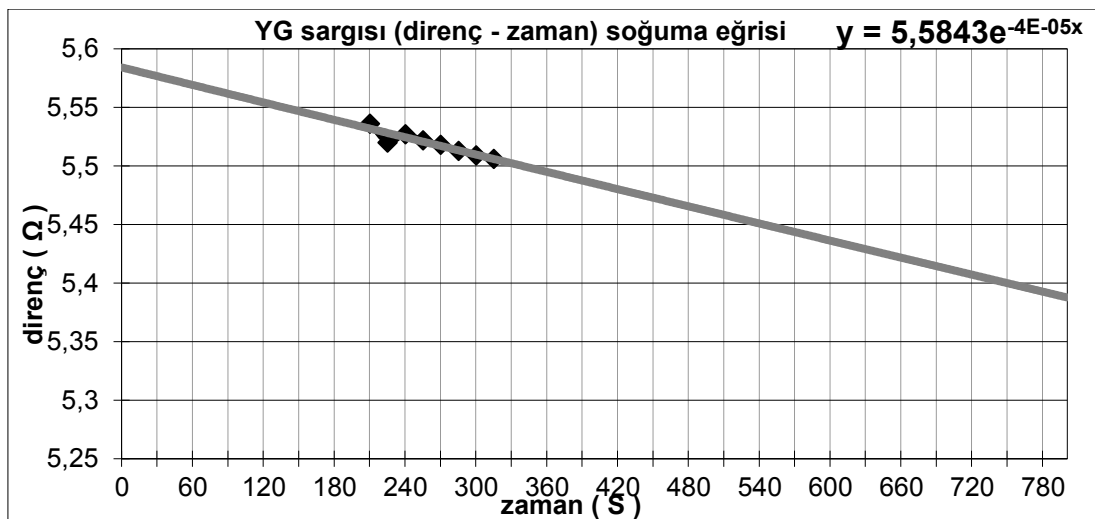
7.2.4. 1600 kVA Rev02 transformatörün harmonikli durumda deneyleri

1600 kVA gücüne sahip transformatörün harmonikli durumdaki sıcaklık artış deneyi gerçekleştirilip, elde edilen üst yağ sıcaklık artış sonucu Şekil 7.23'te sunulmuştur.



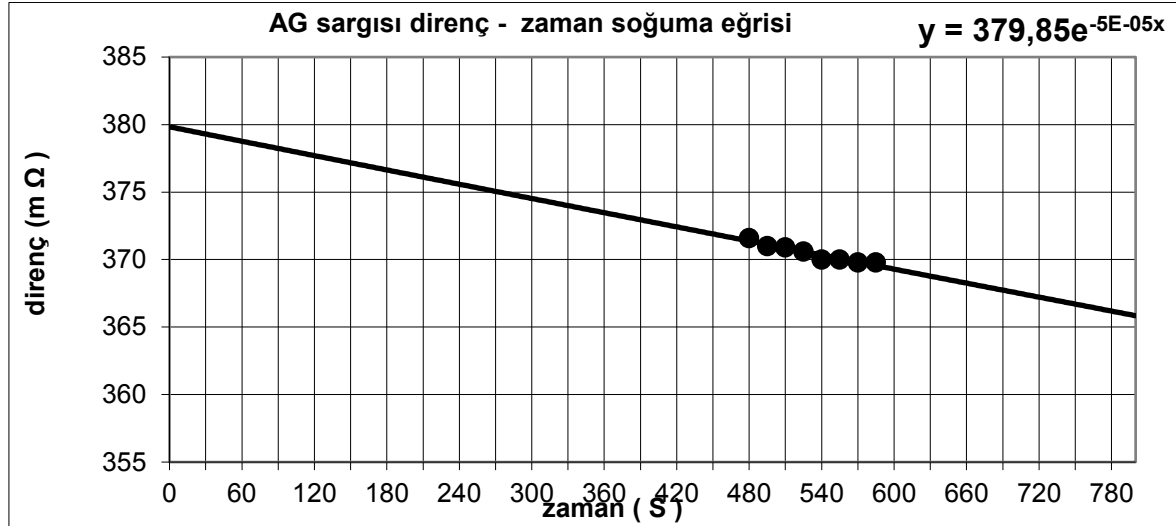
Şekil 7.23. 630 kVA Rev02 transformatörün harmonikli durumdaki üst yağ sıcaklık artışı

Sıcaklık artış deneyi bittikten sonra enerji kesilip, kablolar sokulup ve YG sargı sıcaklığını ölçmek amacı ile sargı direnci ölçülmüştür ölçüm sonucu Şekil 7.24'te verilmiştir.



Şekil 7.24. 1600 kVA Rev02 transformatörün harmonikli durumdaki YG direnç ölçümü

YG dirençlerinin ölçümünden sonra AG sargı sıcaklığını ölçmek amacı ile sargı direnci ölçülmüştür ölçüm sonucu Şekil 7.25’de verilmiştir.



Şekil 7.25. 1600 kVA Rev02 transformatörün harmoniksiz durumdaki AG direnç ölçümü

Gerçekleştirilen deneylerden üst yağın kalıcı durumdaki sıcaklık değeri, üst yağın ortam sıcaklığına göre artış değeri, kalıcı durumda ortalama yağ sıcaklığının değeri ve ortalama yağ sıcaklığının ortam sıcaklığına göre artış değerleri Çizelge 7.19’da verilmiştir.

Çizelge 7.19. 1600 kVA Rev02 transformatörün harmoniksiz durumdaki sıcaklık performansı

Kalıcı durumda üst yağ sıcaklığı	79,30 °C
Üst yağ sıcaklık artışı °C	59,93 °C
Kalıcı durumda ortalama yağ sıcaklığı	69,95 °C
Ortalama yağ sıcaklık artışı	46,88 °C

Yapılan AG ve YG direnç ölçümlerinden YG ve AG sargılarının ortalama artış değerleri elde edilmiştir. Ortalama artış değerleri, bu değerlerin IEC 60046-3 standardının kriterleri ile karşılaştırılması Çizelge 7.20’de verilmiştir.

Çizelge 7.20. 1600 kVA transformatörün harmonikli durumdaki sıcaklık performansı

Ölçümü yapılan Bölge	Ölçülen	Standart Değer	Durumu
Yağ maksimum sıcaklık artışı	59,33°C	60 °C	Geçerli
YG sargısı maksimum sıcaklık artışı	64,40°C	65 °C	Geçerli
AG sargısı maksimum sıcaklık artışı	65,13°C	65 °C	Geçerli



8. SONUÇ VE ÖNERİLER

Elektrik şebekesindeki doğrusal olmayan yüklerin artmasıyla şebekeye enjekte olan harmonikli akımların olumsuz etkileri şebeke üzerinde artmaktadır. Harmonikli akımlardan dolayı transformatör kayıpları artarak transformatörün çalışma sıcaklığını yükseltmektedir. Transformatör sıcaklığının artışı yalıtım malzemesinin faydalı ömrünü ve dolayısıyla transformatörün faydalı ömrünü azaltarak, serviste kalma süresini kısıtlamaktadır.

Harmonikli akımların transformatör kayıplarının üzerindeki etkisinin analizinde mevcut çalışmalarda eksiklikler aşağıdaki gibi özetlenebilir.

- 1- Literatürde mevcut tüm çalışmalarda sadece girdap akım kayıpları incelenmiştir, halbuki girdap akımı kaybının yanı sıra deri etkisi ve yakınlık etkisi de incelenmelidir. Tez çerçevesinde yapılan çalışmalarda girdap akım kaybının yanı sıra, deri etkisi ve yakınlık etkisi de dikkate alınıp incelenmiştir. inceleme sonuçları karşılaştırılmıştır.
- 2- K-faktör ve harmonik kayıp faktörü hesaplamalarında (F_{HL}) manyetik alanın değeri ve sargıda derinlemesi homojen varsayılmıştır halbuki iletkenin geçen akımdan dolayı iletken boyunca manyetik alan değişiklik göstermektedir.
- 3- F_{HL} ve K-faktör hesaplamalarında düzeltme yapan çalışmalarda sadece girdap akım kaybı dikkate alınmıştır.
- 4- Düzeltilmiş kayıp faktörü çalışmalarda dikdörtgen iletkenin oluşan sargıların manyetik alanın hangi yönden iletkeni kestiği göz ardı edilmiştir.
- 5- Dikdörtgen iletken çalışmalarda ayrıca iletkenin birbirine oranı göz ardı edilmiştir.

Daha önce de işaret edildiği gibi tezin temel amacı doğrusal olmayan akımları geçirmekte olan sargıların harmoniklerden dolayı meydana gelen kayıplarının hesaplanmasıdır. Bu hesaplama stray kayıplarına neden olan yakınlık etkisi dikkate alınarak yapılmıştır. Böylece literatürde mevcut açıklar ve yetersizlikler giderilmiştir.

Tezin özgün değerleri maddeler halinde aşağıda verilmektedir:

- 1- Harmonikli akımlara maruz kalan transformatör sargılarının kayıp hesaplaması yöntemi ile ilgili literatürde bulunan yöntemlerle bu tezde sunulan yöntem arasında önemli farklılıklar bulunmaktadır. Literatürde mevcut yöntemlerde sadece girdap akım kayıpları dikkate alınmıştır, bu tez çalışmalarda girdap akımının yanı sıra deri etkisi ve yakınlık etkisi de hesaplamalara dahil edilmiştir.

- 2- Yapılan çalışmalar sargı üzerinde kayıpların yoğun olduğu bölgenin tespitinde faydalı olacaktır. Sargı üzerinde harmonikli durumlarda yoğun bölgenin tespiti, o sargının en sıcak noktasının tespitine ışık tutacaktır.
- 3- Sıcak nokta bölgesinin tespiti ve o bölgede kayıpların hesaplanması, sargının harmonikli durumlarda termal modellenmesinin temellerinden birinin oluşumunu sağlayacaktır.
- 4- Çalışmaların sonucunda yuvarlak ve dikdörtgen kesitlere sahip iletkenler için harmonik kayıp faktörleri eğrileri elde edilmiştir.
- 5- Farklı kesit alanına sahip olan iletkenlerin (hem yuvarlak hem de dikdörtgen iletkenlerin) harmonik kayıp faktörleri elde edilmiştir.
- 6- Nüvenin manyetik geçirgenlik katsayısı (μ) veya B-H karakteristiği sabit olmayıp hem frekansa hem de manyetik akı yoğunluğuna bağlıdır (Şekil 4.29). Bu konu harmonik kayıp faktörünün nüve yapısına yakınlığından çok etkilenecektir. Çünkü frekans değişimi ile manyetik alan şiddeti ve yönü değiştiğinden stray kayıpların değeri ve dağılımı değişiklik göstermektedir. Tez kapsamında yapılan çalışmalar nüvenin doğrusal olmayan özelliklerini kapsadığından, yapılan çalışmalar bu konunun ortaya konmasında özgünlüğe sahiptir.
- 7- Nüvenin harmonik kayıp faktörü ve harmonik kayıp hesaplamasının incelenmesine dahil edilmesi ile basamaklı manyetik devreye sahip yapılarda hesaplanan kayıp ve kayıp faktörleri daha doğru bir şekilde elde edilmiş olup. Bu sargıların en iyi örneği hava aralıklı indüktörlerdir. Bu sargılarda hava aralığı ile nüvenin keskin biçimde birbirinden ayrıldığı yerde olan iletkenlerde şiddetli biçimde manyetik alan değişimi ve manyetik alan yönlerinin değişmesi ile sargılarda daha etkili bir yakınlık etkisi beklenmektedir.
- 8- Nüvenin ve sargı yapısının doğrusal olmayan özelliklerinden dolayı harmonik kayıp ve kayıp faktörü hesaplamalarında kullanılan süperpozisyon yönteminin kullanımının hatalı miktarı hesaplanmıştır. Tez kapsamında harmoniklerin kayıp hesaplaması için süperpozisyon yönteminin doğruluk payı incelenmiştir. Bu incelemelerin yapılması için iki analiz gerçekleştirilmiştir. Birinci aşamada harmonikli akımların kombine halı sargıda analizi yapılarak kayıplar hesaplanmıştır. Sonra harmonik bileşenlerinin ayrı ayrı uygulaması ile kayıplar hesaplanıp bileşenlerin toplam stray kaybı ile kombine durumundaki stray kayıplar karşılaştırılıp bilimsel yorumlar yapılmıştır. Bu konu da dikkate alındığında süperpozisyon yönteminin uygulanmasının bilimsel olarak doğruluğu incelenmiştir.

- 9- tez çerçevesinde harmonikli durumlarla ilgili elde edilen sonuçlar özel tip sargıların (harmonikli yükleri beslemek amacıyla tasarlanan transformatörler ve indüktörler, yüksek frekans çalışmaları için tasarlanan indüktörler ve transformatörler v.b.) tasarımında kullanılabilir. Bu da konuyla ilgili işletmelere fayda sağlayacaktır.
- 10- Tez çerçevesinde 4 farklı transformatörün tasarımı gerçekleştirilmiştir. Söz konusu tasarımlarda imalat maliyeti ve ömür boyu kayıp maliyeti açısından optimal olması göz önünde bulundurulmuştur. Yapılan tasarım çalışmaları sonucunda önerilen tasarım yaklaşımları, hem ilk yatırım maliyeti hem ömür boyu kayıp maliyeti açısından standart derating yöntemine göre avantajlı olduğu kanıtlanmıştır.
- 11-Yapılan tasarımların imalatı gerçekleştirilmiştir. İmalatı gerçekleştirilen transformatörlerin sıcaklık artış deneyleri uygulanıp ve transformatörlerin termal performansının, standart kriterler ve koşulları sağladığı saptanmıştır.
- 12- Tez çerçevesinde sargıların paralel iletkenlerinde transpozisyon yönteminin harmonikli durumlarda incelenmiş olup, optimal transpozisyon olan sürekli transpozisyon iletkenleri (CTC) üzerinde de incelemeler yapılmıştır. Tasarlanıp üretimi yapılan transformatörlerin birinde 55 paralel CTC iletken transformatörün AG sargısında kullanılmıştır.
- 13- Tez sonuçları yeni projelerin ve yeni tez çalışmaların ortaya çıkmasına ışık tutabilecektir. Bu yeni çalışmalara örnek olarak; a-harmonik kayıp miktarını azaltma yöntemleri ve çalışmaları b- paralel iletkenlerin kullanımında optimal iletken sayısı ve optimal paralel iletkenlerin kombinasyonu, c- harmoniklerin akım geçirmeyen yapılar (kazan, kapak, muhafaza v.b) üzerinde etkilerinin analizi.

Tezin gerçekleştirilmesi sonucunda ulusal ekonomiye, toplumsal refaha ve bilimsel alana yapacağı faydalar aşağıda verilmektedir:

1. Tez sonucu sargıların harmoniklerden dolayı kayıpların artışı detaylı bir biçimde hesaplanabilecektir.
2. Yüksek frekanslı veya doğrusal olmayan akımlarda çalışan transformatörlerin tasarımı için kayıp hesaplama yöntemi ortaya konulmuştur.
3. Tez sonucu geliştirilen yöntemlerin, sargıların tasarımında kullanımı ile sargılardaki kayıplar azalacak, dolayısıyla şebeke kayıpları azalarak enerji şebekesinin verimi ve maliyeti azalacaktır.
4. Günden güne enerji konusunda artan enerji kirliliği sorununa çözüm geliştirme temellerinin alt yapı oluşumuna yardımcı olacaktır.

5. Referans harmonik kayıp faktörü hesaplama yöntemi geliştirilip sunulmuştur. Bu yöntem termal analizlerde ve yüklenebilirlik hesaplarında güvenilir bir hesaplama olarak kullanılabilecektir.
6. Tez ile geliştirilen kayıp hesaplama yöntemi sayesinde harmonikli durumlar için sargıya sahip elektrik makinelerinin (transformatör, indüktör v.b) kayıplarının artışı ve en önemlisi harmonikli durumlarda kayıpların sargı boyunca en yoğun olduğu bölgenin tespiti ile bu sargılarda optimal yüklenebilirliği tespit için altyapı geliştirilecektir. Bu durum sargıların hızlı yaşlanması önüne geçebilmek ve dolayısıyla sargıların faydalı ömürlerinin artırılmasına faydalı olacaktır. Bu fayda sayesinde ülkemizde kullanılmakta olan transformatör, indüktör v.b. cihazların en verimli şekilde kullanılmasına ışık tutulacaktır.
7. Bu kayıp hesaplamalarının transformatör yüklenebilirliği ile ilgili kullanımı ile transformatörlerde harmonikli akım kaynaklı arızalarından meydana gelen kesintiler azalarak güvenilir ve kesintisiz enerji imkânı doğacaktır. Kesintisiz enerjinin sağlanması hem ekonomi hem de toplumsal açıdan refaha katkı sağlamaktadır (Dünyada refah seviyesinin kriterlerinden biri yıllık elektrik kesintisinin ortalama süresidir).
8. Harmonikli yüklerin yoğun olduğu bölgeleri (ağır ve ileri sanayi bölgeleri) kullanılmakta olan transformatörlerde meydana gelen arıza, kesinti ve bozulmalar yüksek maliyetli olup ekonomik hasar, zarar ve ziyanlara yol açmaktadır. Aynı durum bilişim ve ileri teknolojilerinin sıkça kullanıldığı yerlerde de (bankalar, hastaneler, idareler, üniversiteler, iş merkezleri v.b.) geçerlidir. Tez kapsamında geliştirilen kayıp hesaplama yöntemine dayanarak yapılan yüklenebilirlik yönteminin kullanılmasıyla transformatörün daha verimli ve tam faydalı ömründe çalıştırılması mümkün olup istenmeyen tamir, değişim ve kesintilerden kaçınılır. Elde edilen sonuçlar toplumsal refaha doğrudan katkı sağlamaktadır.
9. Tez çerçevesinde geliştirilen harmonikli durumlarla ilgili sargı kayıp hesaplanması, harmonikli yükler için üretilen özel sargılar (transformatör, indüktör v.b) tasarımında kullanılabilir.
10. Proje çerçevesinde sargı tasarımı yapan işletmelere, örneğin transformatör üretici firmalarla, indüktif reaktör üreticilerine, motor üreticilerine v.b işletmelerin karşılaşacağı sorun ve tasarım çözümlerinde bilimsel destek verebilme yeteneğine sahip olunacak ve böylece üniversite sanayi işbirliğinin gelişmesine teknolojik alt yapı sağlanacaktır.

11. Bu tez sayesinde, ülkemizde giderek önemi artan güç kalitesi çalışmalarıyla (“Güç Kalitesi Milli Projesi” gibi çalışmalar) ilgili karşılaşılabilecek problemlere çözüm bularak konu ile ilgili ciddi araştırmalar içerisine girip yeni projelerin oluşmasına katkı sağlanacaktır.





KAYNAKLAR

1. Haliloğlu, A. B., Mamizadeh, A., İskender, İ. (2011). *Yük harmoniklerinin Yağlı Tip Güç Transformatörlerindeki Sıcak Nokta Sıcaklığına Dinamik Termal Model Üzerindeki Etkisi*. 2. Elektrik Tesisat Ulusal Kongresi, İzmir, 1-7.
2. Elmoudi, A. A. (2006). *Evaluation of power system harmonic effects on transformers: Hot spot calculation and loss of life estimation*. Doctoral Dissertation, Helsinki University of Technology, Helsinki, 1-136.
3. Boyrazoğlu, B., Ünsar, Ö., Polat, B. (2007). *Elektrik İletim Sisteminde Akım ve Gerilimdeki Harmonik Bileşenlerin Gerçek Zamanlı Ölçülmesi*. II. Enerji Verimliliği ve Kalitesi Sempozyumu, Kocaeli/Türkiye, Mayıs, 1-8.
4. Wagner, V. E., Balda, J. C., Griffith, D. C., McEachern, A., Barnes, T. M., Hartmann, D. P., Phileggi, D. J., Emmanuel, A. E., Horton, W. F., Reid, W. E., Ferraro, R. J., and Jewell, W. T. (1993). Effects of harmonics on equipment. *IEEE Transactions on Power Delivery*, 8(2), 672-680.
5. Adak, S. (2003). *Enerji sistemlerinde harmonik distorsiyonunun azaltılması*. Doktora Tezi, Yıldız Teknik Üniversitesi Fen Bilimleri Enstitüsü, İstanbul, 2-33.
6. Demirbaş, Ş. Bayhan, S. (2009). Güç Sistemlerinde Harmoniklerin Gerçek Zamanlı Ölçüm ve Analizi. *Gazi Üniversitesi Mühendislik-Mimarlık Fakültesi Dergisi*, 24(3), 1-8.
7. Pierce, L. W. (1995). *Transformer design and application considerations for nonsinusoidal load currents*. Cement Industry Technical Conference, 1995. XXXVII Conference Record, IEEE, 35-47.
8. IEC. (2005). 60076-7: *loading guide for oil-immersed power transformers*. IEC standard, 60076-7, 1-80.
9. IEEE (2012). *IEEE Guide for Loading Mineral-Oil-Immersed Transformers and Step-Voltage Regulators*. IEEE Std C57.91-2011 (Revision of IEEE Std C57.91-1995), 1-123.
10. Makarov, S. N. and Emanuel, A. E. (2000). *Corrected harmonic loss factor for transformers supplying nonsinusoidal load currents*. Harmonics and Quality of Power, 2000. Proceedings. Ninth International Conference on, 87-90.
11. Elmoudi, A., Lehtonen, M., and Nordman, H. (2005). *Corrected winding eddy-current harmonic loss factor for transformers subject to nonsinusoidal load currents*. Power Tech, 2005 IEEE Russia, 1-6.
12. Ram, B. S., Forrest, J. A. C., and Swift, G. W. (1988). Effects of harmonics on converter transformer load losses. *IEEE Transactions on Power Delivery*, 3(3), 1059-1066.
13. Crepaz, S. (1970). Eddy-Current Losses in Rectifier Transformers. *IEEE Transactions on Power Apparatus and Systems*, PAS-89(7), 1651-1656.

14. Hwang, M.-S. D. (1985). *Assessment of harmonic current effects in power system transformers*. Doctoral Dissertation, Texas Univ., Austin (USA), 32-38.
15. Zheng, J. (2000). *Transformer ac winding resistance and derating when supplying harmonic-rich current*. Masters Thesis, Michigan Technological University, Michigan, 1-73.
16. Lesieutre, B. C., Hagman, W. H., and Kirtley, J. (1997). An improved transformer top oil temperature model for use in an on-line monitoring and diagnostic system. *IEEE Transactions on Power Delivery*, 12(1), 249-256.
17. Swift, G., Molinski, T. S., and Lehn, W. (2001). A fundamental approach to transformer thermal modeling. I. Theory and equivalent circuit. *IEEE Transactions on Power Delivery*, 16(2), 171-175.
18. He, S., Wu, Q., Wen, J., Saunders, J., and Paton, R. (2004). A particle swarm optimizer with passive congregation. *Biosystems*, 78(1), 135-147.
19. Tang, W., He, S., Prempan, E., Wu, Q., and Fitch, J. (2005). *A particle swarm optimiser with passive congregation approach to thermal modelling for power transformers*. 2005 IEEE Congress on Evolutionary Computation, 3(2745-2751).
20. Tang, W. H., Wu, Q. H., and Richardson, Z. J. (2002). *Equivalent heat circuit based power transformer thermal model*. IEE Proceedings - Electric Power Applications, 149(2), 87-92.
21. Weigen, C., Chong, P., and Yuxin, Y. (2009). Power transformer top-oil temperature model based on thermal-electric analogy theory. *European Transactions on Electrical Power*, 19(3), 341-354.
22. IEC. (2011). *IEC 60076-2 power transformer part 2 temperature rise*. IEC standard 60076-2, 22-35.
23. Jayaram, S. and Wu, H. (1994). *Heat transfer of transformer oil in Plexiglas pipe and paper-pressboard annular duct models*. Conference Record of the 1994 IEEE International Symposium on Electrical Insulation, 541-545.
24. Tang, W., Wu, Q., and Richardson, Z. (2004). A simplified transformer thermal model based on thermal-electric analogy. *IEEE Transactions on Power Delivery*, 19(3), 1112-1119.
25. Iskender, I. and Mamizadeh, A. (2009). *Nonlinear thermal modeling of top oil temperature rise for oil-immersed distribution transformers*. 14th scientific conference on computer application in electrical engineering, ZKwE, 227-228.
26. Susa, D., Lehtonen, M., and Nordman, H. (2005). Dynamic thermal modelling of power transformers. *IEEE transactions on Power Delivery*, 20(1), 197-204.
27. Thomson, J. (1892). On the heat produced by eddy currents in an iron plate exposed to an alternating magnetic field. *The Electrician*, 28(1), 599-600.

28. Davies, J. (1990). *Conduction and induction heating*. (11). London: Peter Peregrinus Ltd., 88-92.
29. Moses, P. S. and Masoum, M. A. (2012). Three-phase asymmetric transformer aging considering voltage-current harmonic interactions, unbalanced nonlinear loading, magnetic couplings, and hysteresis. *IEEE Transactions on Energy Conversion*, 27(2), 318-327.
30. Fuchs, E. and Masoum, M. A. (2011). *Power quality in power systems and electrical machines*. Burlington: Academic press, 25-36.
31. Acha, E. and Madrigal, M. (2001). *Power system harmonics: Computer Modeling and Analysis*. New York: Wiley, 18-45.
32. Sadati, S., Tahani, A., Darvishi, B., and Dargahi, M. (2008). *Comparison of distribution transformer losses and capacity under linear and harmonic loads*. IEEE 2nd International Conference on Power and Energy, 1265-1269.
33. Zhu, Z., Xie, D., Wang, G., Zhang, Y., and Yan, X. (2012). Computation of 3-D magnetic leakage field and stray losses in large power transformer, *IEEE Transactions on Magnetics*, 48(2), 739-742.
34. Haliloğlu A. B. (2012). *Güç Transformatörlerin Standartlara Göre Termal Analizi*. Yüksek Lisans Tezi, Gazi Üniversitesi Fen Bilimleri Enstitüsü, Ankara, 45-68.
35. Ram, B. (1998). Loss and current distribution in foil windings of transformers. *IEE Proceedings, Generation, Transmission and Distribution*, 145(6), 709-716.
36. Küçük, D., Salor, Ö., Güder, M., Demirci, T., Akkaya, Y., Çadircı, I., and Ermiş, M. (2009). *Türkiye Elektrik İletim Sisteminde Harmonik Bozulma ve Kırpışma Parametrelerinin Oluşturulan Güç Kalitesi Veritabanı Yapısıyla Değerlendirilmesi*. III. Enerji Verimliliği Ve Kalitesi Sempozyumu, EVK 2009, 211-216.
37. Elmoudi, A., Lehtonen, M., and Nordman, H. (2006). *Effect of harmonics on transformers loss of life*. Conference Record of the 2006 IEEE International Symposium on Electrical Insulation, 408-411.
38. Masoum, M. A., Moses, P. S., & Masoum, A. S. (2008). Derating of asymmetric three-phase transformers serving unbalanced nonlinear loads. *IEEE Transactions on Power Delivery*, 23(4), 2033-2041.
39. Bishop, M. T., Baranowski, J. F., Heath, D., & Benna, S. J. (1996). Evaluating harmonic-induced transformer heating. *IEEE transactions on power delivery*, 11(1), 305-311.
40. Kelley, A. W., Edwards, S. W., Rhode, J. P., & Baran, M. E. (1999). Transformer derating for harmonic currents: a wide-band measurement approach for energized transformers. *IEEE Transactions on industry applications*, 35(6), 1450-1457.
41. Iskender, I. and Mamizadeh, A. (2009). *Nonlinear thermal modeling of top oil temperature rise for oil-immersed distribution transformers*. 14th scientific conference on computer application in electrical engineering, ZKwE, 227-228.

42. Tripathy, S. C. and Lakervi, E. (2005). Evaluation of transformer overloading capability. *European transactions on electrical power*, 15(5), 455-464.
43. IEEE. (2016). *IEEE Standard for General Requirements for Liquid-Immersed Distribution, Power, and Regulating Transformers*. IEEE Std C57.12.00-2015 (Revision of IEEE Std C57.12.00-2010), 1-74.
44. Iskender, I. and Mamizadeh, A. (2009). Thermal capacitance calculation of top-oil temperature for power transformers. *International Review Of Electrical Engineering*, 4(5), 882-886.
45. Pierce, L. W. (1992). An investigation of the thermal performance of an oil filled transformer winding. *IEEE Transactions on Power Delivery*, 7(3), 1347-1358.
46. Alegi, G. L. and Black, W. Z. (1990). Real-time thermal model for an oil-immersed, forced-air cooled transformer. *IEEE Transactions on Power Delivery*, 5(2), 991-999.
47. Pierce, L. W. (1992). *Predicting liquid filled transformer loading capability*. *Petroleum and Chemical Industry Conference*. Record of Conference Papers., Industry Applications Society 39th Annual, 197-207.
48. Mamizadeh, A. (2010). *Yağlı Tip Transformatörlerin Doğrusal Olmayan Dinamik Termal Modellemesi*. Yüksek Lisans Tezi, Gazi Üniversitesi Fen Bilimleri Enstitüsü, Ankara, 8-34.
49. Jauregui-Rivera, L. and Tylavsky, D. J. (2008). Acceptability of Four Transformer Top-Oil Thermal Models-Part I: Defining Metrics. *IEEE Transactions on Power Delivery*, 23(2), 860-865
50. Jauregui-Rivera, L. and Tylavsky, D. J. (2008). Acceptability of Four Transformer Top-Oil Thermal Models-Part II: Comparing Metrics. *IEEE Transactions on Power Delivery*, 23(2), 866-872
51. Liang, Y.(2001). *Simulation of Top Oil Temperature for Transformers*. Masters Thesis and Final Project Report, PSERC Publication, New York, 1-88
52. IEEE. (2016). *IEEE Standard Test Code for Liquid-Immersed Distribution. Power, and Regulating Transformers*, IEEE Std C57.12.90-2015 (Revision of IEEE Std C57.12.90-2010), 1-120
53. IEEE. (2002). *IEEE Recommended Practice for Performing Temperature Rise Tests on Oil-Immersed Power Transformers at Loads Beyond Nameplate Ratings*. IEEE Std C57.119-2001, 1-100
54. Edstrom, F., Rosenlind, J., Hilber, P., and Soder, L. (2012). Modeling impact of cold load pickup on transformer aging using ornstein-uhlenbeck process. *IEEE Transactions on Power Delivery*, 27(2), 590-595
55. Perez, J. (2010). *Fundamental principles of transformer thermal loading and protection*. 2010 63rd Annual Conference for Protective Relay Engineers, 1-14.

56. Gómez, J. M. A., Córdova, R. A. A., & Salinas, Y. A. I. (2016). Estimación del factor K en transformadores de distribución usando modelos de regresión lineal. *Revista Tecnura*, 20(48), 29-40.
57. Sadati, S., Moshtagh, J., & Rastgou, A. (2016). Load and Harmonic Forecasting for Optimal Transformer Loading and Life Time by Artificial Neural Network. *Journal of Advances in Computer Research*, 7(1), 101-116.
58. Chidurala, A., Saha, T. K., & Mithulananthan, N. (2016). Harmonic impact of high penetration photovoltaic system on unbalanced distribution networks—learning from an urban photovoltaic network. *IET Renewable Power Generation*, 10(4), 485-494
59. Mariprasath, T., & Kirubakaran, V. (2016). Real Time Harmonic Analysis on Rural Industries. *Indian Journal of Science and Technology*, 9(2), 1-6.
60. McBee, K. D. and Simões, M. G. (2014). General smart meter guidelines to accurately assess the aging of distribution transformers. *IEEE Transactions on Smart Grid*, 5(6), 2967-2979.
61. Kaczmarek, M. (2014). Estimation of the inductive current transformer derating for operation with distorted currents. *Bulletin of the Polish Academy of Sciences Technical Sciences*, 62(2), 363-366.
62. Solanics, P., Kozminski, K., Bajpai, M., Esztergalyos, J., Fennell, E., Gardell, J., Mozina, C., Patel, S., Pierce, A., and Skendzic, V. (2000). The impact of large steel mill loads on power generating units. *IEEE Transactions on Power Delivery*, 15(1), 24-30.
63. IEEE. (2006). *IEEE Recommended Practice for Powering and Grounding Electronic Equipment*. IEEE Std 1100-2005 (Revision of IEEE Std 1100-1999), 1-703.
64. IEEE. (2008). *IEEE Recommended Practice for Establishing Liquid-Filled and Dry-Type Power and Distribution Transformer Capability When Supplying Nonsinusoidal Load Currents*. IEEE Std C57.110-2008 (Revision of IEEE Std C57.110-1998), 1-52



ÖZGEÇMİŞ

Kişisel Bilgiler

Soyadı, adı : MAMIZADEH, Ali
 Uyuğu : İRAN.
 Doğum tarihi ve yeri : 9.4.1980, Tebriz
 Medeni hali : Bekar
 Telefon : 0 (312) 5823301
 Faks : 0 (312) 582 3301
 e-mail : mamizadeh@gazi.edu.tr



Eğitim

Derece	Eğitim Birimi	Mezuniyet tarihi
Doktora	Gazi Üniversitesi /Elektrik Elektronik Müh	Devam ediyor
Yüklesk Lisans	Gazi Üniversitesi /Elektrik Elektronik Müh	2010
Lisans	Sahand Teknik Üniversitesi/ Kontrol Müh.	2006

İş Deneyimi

Yıl	Yer	Görev
2014-Halen	Elektrotech Mühendislik Ltd. Şti.	Genel Müdür
2013-2016	Gazi Üniversitesi	Araştırmacı, TÜBİTAK 1003
2010-2012	Gazi Üniversitesi	Araştırmacı, TÜBİTAK 1001
2007-2010	Eren Trafo San. Tic. Ltd. Şti.	Test ve Kalite Kontrol Müd.
2004-2007	Tebriz Kablo Fab., Simcat	Kablo Üretim Müdürü.
2002-2004	Tebriz Kablo Fab., Simcat	Ar.Ge. Mühendisi

Yabancı Dil

İngilizce

Yayınlar

- SCI, SSCI, AHCI indekslerine giren dergilerde yayınlanan makaleler

- 1- Iskender, I. and Mamizadeh, A. (2011). An improved nonlinear thermal model for MV/LV prefabricated oil-immersed power transformer substations. *Electrical Engineering*, 93(1), 9-22.
- 2- Mamizadeh, I. I. A. (2009). Nonlinear thermal modeling of indoor and outdoor oil-immersed power transformers. *Journal of Electrical Engineering*, 60(6), 321-327.
- 3- Aşkın, D., İskender, İ., and Mamizadeh, A. (2011). Farklı Yapay Sinir Ağları Yöntemlerini Kullanarak Kuru Tip Transformatör Sargısının Termal Analizi. *Gazi Üniversitesi Mühendislik-Mimarlık Fakültesi Dergisi*, 26(4),905-913.
- 4- Iskender, I. and Mamizadeh, A. (2009). Thermal capacitance calculation of top-oil temperature for power transformers. *International Review Of Electrical Engineering*, 4(5), 882- 886.
- 5- Mamizadeh, A. and Iskender, I. (2009). *Analyzing and comparing thermal models of indoor and outdoor oil-immersed power transformers*. PowerTech, 2009 IEEE Bucharest, 1-8.

Uluslararası hakemli diğer dergilerde yayınlanan makaleler

- 6- Iskender, I. and Mamizadeh, A. (2009). *Dynamic thermal modeling of top oil temperature rise for power transformers*. Poznan University of Technology Academic Journals. *Electrical Engineering*, 103-114.
- 7- Iskender, I., Ghasemi, M., Mamizadeh, A., and Genc, N. Soft Switching Analysis in Dc-Dc Boost Converters. *International Journal on Technical and Physical Problems of Engineering, IJTPE*, 14(5), 132-137.
- 8- Iskender, I. and Mamizadeh, A. (2009). Improving IEEE Calculation Method for Thermal Capacitance of Oil-Immersed Power Transformers. *International Journal for Knowledge, Science and Technology*, 1(1), 72-78.
- 9- Mamizadeh, A. and Iskender, I. (2010). Winding Thermal Analyzing Of Dry Type Transformers. *International Journal on Technical and Physical Problems of Engineering (IJTPE)*, 2(4), 80-84.
- 10- Mamizadeh, A. and Iskender, I. (2012). Analyzing and Comparing the Hot-spot Thermal Models of HV/LV Prefabricated and Outdoor Oil-Immersed Power Transformers. *World Academy of Science, Engineering and Technology, International Journal of Electrical, Computer, Energetic, Electronic and Communication Engineering*, 6(1), 1-6

Hakemli konferans/sempozyumların bildiri kitaplarında yer alan yayınlar

- 11- Iskender, I. and Mamizadeh, A. (2009). *Nonlinear thermal modeling of top oil temperature rise for oil-immersed distribution transformers*. 14th scientific conference on computer application in electrical engineering, ZKwE, 227-228.

- 12- Iskender, I. and Mamizadeh, A. (2009). *Improving Ieee Calculation Method For Thermal Capacitance Of Oil-Immersed Distribution Transformers*. 5th International Conference on Technical and Physical Problems of Power Engineering, TPE,1-5.
- 13- Mamizadeh, A. and Iskender, I. (2009). *Evaluation of permissible loading for indoor oil-immersed distribution transformers*. Electrical and Electronics Engineering, 2009. ELECO 2009. International Conference on, I-216-I-220.
- 14- Mamizadeh, A. and Iskender, I. (2010). *Dynamic Thermal Modeling of Winding Temperature Rise For Dry Type Transformers*. 6th International Conference on Technical and Physical Problems of Power Engineering, 79-82.
- 15- Mamizadeh, A. and İskender, İ. (2011). Evaluation and comparing the loss of life for outdoor and MV/LV prefabricated oil immersed power transformer based on nonlinear thermal models. *Electrical and Electronics Engineering (ELECO), 2011 7th International Conference on*, I-183-I-187.
- 16- Haliloğlu, A. B., Mamizadeh,A. and İskende, İ. (2011). *Yük Harmoniklerinin Yağlı Tip Güç Transformatörlerindeki Sıcak Nokta Sıcaklığına Dinamik Termal Model Üzerindeki Etkisi*. II. Elektrik Tesisat Ulusal Kongresi, 1-7.
- 17- Mamizadeh, A. and İskender, İ. (2011). *Evaluation and comparing the loss of life for outdoor and MV/LV prefabricated oil immersed power transformer based on nonlinear thermal models*. Electrical and Electronics Engineering (ELECO), 2011 7th International Conference on, I-183-I-187.
- 18- Mamizadeh, A. and Iskender, I. (2012). *Analyzing and Comparing the Hot-spot Thermal Models of HV/LV Prefabricated and Outdoor Oil-Immersed Power Transformers*. Waset 2012 Zurich Conference, Zurich, Switzerland, 34-39.
- 19- Iskender, I., Ghasemi, M., Mamizadeh, A., and Genc, N. *Soft Switching Analysis in Dc-Dc Boost Converters*. 8th International Conference on Technical and Physical Problems of Power Engineering ICTPE, 369-374.
- 20- Ghasemi, M., Iskender, I., Mamizadeh, A. (2013). *Analyzing and Implementation of a ZVT Boost Converter used in PV applications*. 5th International Conference on Electronics, Computers and Artificial Intelligence, 1-5.
- 21- Eskandarzadeh, I., and Mamizadeh, A. (2010). *Dynamic Thermal Modeling of Top Oil Temperature Rise for Power Transformers*. the scientific conference of Iranian academics in turkey, 94-101.

Hobiler

Dağcılık, Güreş, Yüzme, Osmanlıca Kitaplar, Tarih



GAZİ GELECEKTİR..