

T.C.
BALIKESİR ÜNİVERSİTESİ
FEN BİLİMLERİ ENSTİTÜSÜ
ELEKTRİK-ELEKTRONİK MÜHENDİSLİĞİ ANABİLİM DALI



DOĞRU AKIM UYARTIM ALTINDA GÜÇ
TRANSFORMATÖRLERİNİN YENİDEN BOYUTLANDIRILMASI

ŞEVKET CANTÜRK

DOKTORA

Jüri Üyeleri : Prof. Dr. Murat Erhan BALCI (Tez Danışmanı)

Prof. Dr. Mehmet Hakan HOCAOĞLU

Prof. Dr. Metin DEMİRTAŞ

Prof. Dr. Bora ALBOYACI

Dr. Öğr. Üyesi Mehmet Kubilay EKER

BALIKESİR, OCAK – 2023

ETİK BEYAN

Balıkesir Üniversitesi Fen Bilimleri Enstitüsü Tez Yazım Kurallarına uygun olarak tarafımda hazırlanan “**DOĞRU AKIM UYARTIM ALTINDA GÜÇ TRANSFORMATÖRLERİNİN YENİDEN BOYUTLANDIRILMASI**” başlıklı tezde;

- Tüm bilgi ve belgeleri akademik kurallar çerçevesinde elde ettiğimi,
- Kullanılan veriler ve sonuçlarda herhangi bir değişiklik yapmadığımı,
- Tüm bilgi ve sonuçları bilimsel araştırma ve etik ilkelere uygun şekilde sunduğumu,
- Yararlandığım eserlere atıfta bulunarak kaynak gösterdiğimi,

beyan eder, aksinin ortaya çıkması durumunda her türlü yasal sonucu kabul ederim.

Şevket CANTÜRK

(imza)

Bu tez çalışması Balıkesir Elektromekanik Sanayi Tesisleri A.Ş. tarafından (JIRA Proje No: 755 – Ar-Ge Proje No: 212) nolu proje ile BESTTEZ kapsamında desteklenmiştir.

ÖZET

**DOĞRU AKIM UYARTIM ALTINDA GÜÇ TRANSFORMATÖRLERİNİN
YENİDEN BOYUTLANDIRILMASI
DOKTORA TEZİ
ŞEVKET CANTÜRK
BALIKESİR ÜNİVERSİTESİ FEN BİLİMLERİ ENSTİTÜSÜ
ELEKTRİK-ELEKTRONİK MÜHENDİSLİĞİ ANABİLİM DALI
(TEZ DANIŞMANI: PROF. DR. MURAT ERHAN BALCI)
BALIKESİR, OCAK - 2023**

Bu tez çalışmasında ilk olarak, doğru akım (DA) uyartım koşullarının tek fazlı kabuk tipi nüveli ve üç fazlı beş bacaklı çekirdek tipi nüveli güç transformatörleri üzerindeki etkilerini zaman verimli ve hassas bir şekilde analiz etmek için relüktans tabanlı modeller geliştirilmiştir. Geliştirilen modellerde literatürdeki diğer relüktans tabanlı transformatör modellerinden farklı olarak sargı kayıplarının frekansa bağımlılığı dikkate alınmıştır. İkinci olarak, sonlu elemanlar yöntemi analizi ile elde edilen sonuçlar referans alınarak, geliştirilen modellerin geçerlilikleri saf sinüzoidal ve DA bileşenli gerilim durumları için doğrulanmıştır. Daha sonra, DA uyartımın dikkate alınan transformatör tipleri üzerindeki etkileri geliştirilen modeller kullanılarak analiz edilmiştir. Bu analizlerden, DA uyartımın transformatörlerde doymaya yol açabileceği ve bu doymaya bağlı olarak transformatör kayıplarının, reaktif güç talebinin ve uyartım akımı harmonik bozulmasının önemli derece artacağı görülmüştür. Bununla birlikte, DA uyartım altında transformatörlerin yeniden boyutlandırılması için anma primer akım etkin değeri, anma toplam kaybı ve anma primer sargı kaybı sınırlamalarına dayanan üç farklı azami yüklenme oranı (AYO) belirleme yöntemi karşılaştırmalı olarak analiz edilmiştir. Bu analizden, anma primer sargı kaybı tabanlı yaklaşımın, DA uyartım koşulları altında transformatörlerin aşırı ısınmadan çalışması için diğer iki yaklaşıma kıyasla daha güvenilir olduğu sonucuna varılmıştır. Son olarak, manyetik nüve malzemesi cinsi ve nüve kesit alanı boyutlandırma, tasarım seçeneklerinin DA uyartım altında AYO iyileştirmesine etkileri analiz edilmiştir.

ANAHTAR KELİMELER: Güç transformatörleri, azami yüklenme oranı, doğru akım uyartım, jeomanyetik olarak indüklenen akımlar, elektrik-manyetik eşdeğer devre modeli, relüktans tabanlı model.

ABSTRACT

DERATING OF POWER TRANSFORMERS UNDER DC EXCITATION

PH.D THESIS

ŞEVKET CANTÜRK

BALIKESİR UNIVERSITY INSTITUTE OF SCIENCE

ELECTRICAL AND ELECTRONICS ENGINEERING

(SUPERVISOR: PROF. DR. MURAT ERHAN BALCI)

BALIKESİR, JANUARY – 2023

In this thesis, firstly, to time efficiently and sensitively analyze the direct current (DC) excitation conditions' effects on single-phase shell type and three-phase five-leg core type power transformers, their reluctance-based models are developed. In the developed models, unlike other reluctance-based transformer models in the literature, the frequency-dependent nature of the winding losses has been taken into consideration. Secondly, for pure sinusoidal and DC biased voltage cases, the validity of the developed models has been verified by using the results of the finite element method as a reference. Then, the effects of DC excitation on the considered transformer types are analyzed with using the developed models. It is seen from the analysis results that DC excitation can cause saturation in transformers, and depending on the saturation, their losses, reactive power demand, and harmonic distortion of the excitation current can increase significantly. In addition, three different maximum loading ratio (MLR) determination methods, which are based on the rated primary current effective value, rated total loss, and rated primary winding loss limitations, are comparatively analyzed for the derating of transformers under the DC excitation conditions. From the analysis, it is concluded that the rated primary winding loss-based approach is more reliable than the other two approaches for transformers to operate without overheating under DC excitation conditions. Finally, under DC excitation, the effects of design choices such as magnetic core material type and core cross-sectional area sizing on the improvement of the MLR are analyzed.

KEYWORDS: Power transformers, maximum loading ratio, direct current excitation, geomagnetically induced currents, electric-magnetic equivalent circuit model, reluctance-based model.

İÇİNDEKİLER

Sayfa

ÖZET	i
ABSTRACT	ii
İÇİNDEKİLER	iii
ŞEKİL LİSTESİ	v
TABLO LİSTESİ	viii
SEMBOL LİSTESİ	ix
ÖNSÖZ	xi
1. GİRİŞ	1
1.1 Arka Plan	5
1.2 Tezin Amacı	12
1.3 Tezin Sınırları	12
1.4 Tezin İçeriği	13
2. TRANSFORMATÖRLERİN DA UYARTIM ALTINDA MODELLENMESİ ...	14
2.1 Transformatör kayıpları	15
2.1.1 Sinüzoidal Olmayan Gerilimler Altında Nüve kayıpları	17
2.1.2 Sargı Kayıpları	20
2.2 Tek Fazlı Kabuk Tipi Nüveli ve Üç Fazlı Beş Bacaklı Çekirdek Tipi Nüveli Transformatörler için Geliştirilen Modeller.....	22
2.2.1 Geliştirilen Modellerin Elektrik Eşdeğer Devre Kısmı.....	22
2.2.2 Geliştirilen Modellerin Manyetik Eşdeğer Devre Kısmı	27
2.3 Geliştirilen Modellerin Geçerlilik Analizi	30
2.3.1 Tek Fazlı Kabuk Tipi Nüveli Transformatör İçin Sonuçlar.....	34
2.3.2 Üç Fazlı Beş Bacaklı Çekirdek Tipi Nüveli Transformatör İçin Geliştirilen Modelin Geçerlilik Analizi Sonuçları.....	36
2.4 Sonuç.....	41
3. DA UYARTIMIN TRANSFORMATÖRLERE ETKİLERİNİN ANALİZİ	42
3.1 Tek Fazlı Kabuk Tipi Nüveli Transformatör için DA Hassasiyet Analizleri	43
3.2 Üç Fazlı Beş Bacaklı Çekirdek Tipi Nüveli Transformatör İçin DA Hassasiyet Analizleri.....	46
3.3 Sonuç	52
4. DA UYARTIM ALTINDA AZAMI YÜKLENME ORANI TESPİT YÖNTEMLERİNİN KARŞILAŞTIRMALI ANALİZİ	53
4.1 Azami Yüklenme Oranı Tespit Yaklaşımları	54
4.2 Tek Fazlı Kabuk Tipi Nüveli Transformatör için AYO Analizleri	56
4.3 Üç Fazlı Beş Bacaklı Çekirdek Tipi Nüveli Transformatör için AYO Analizleri.....	58
4.4 Sonuç.....	60
5. DA UYARTIM ALTINDA AZAMI YÜKLENME ORANININ İYİLEŞTİRİLMESİ	62
5.1 Tek Fazlı Kabuk Tipi Nüveli Transformatör için Parametrik Analiz.....	62
5.2 Üç Fazlı Beş Bacaklı Çekirdek Tipi Nüveli Transformatör için Parametrik Analiz	64
5.3 Sonuç.....	66

6. SONUÇLAR VE GELECEK ÇALIŞMALAR	68
KAYNAKLAR.....	73
EKLER	85
EK A: Çalışılan transformatörlerin geometrik yapıları	85
EK B: Çalışılan transformatörlerin diğer özellikleri	87
EK C: Çalışmada tercih edilen nüve malzemelerinin özellikleri	88
ÖZGEÇMİŞ	89

ŞEKİL LİSTESİ

Sayfa

Şekil 1.1: Enerji iletim hatlarında JİA oluşumu ve akışı [13].	2
Şekil 1.2: DA uyarım altında transformatörün B-I eğrisi [15].	3
Şekil 1.3: YGDA sistemler sebebiyle AA şebekelerinde doğru akımların dolanımı [31].	4
Şekil 1.4: Fotovoltaik dağıtık üretim birimleri sebebiyle AA şebekelerinde doğru akımların dolanımı [32].	5
Şekil 1.5: Moses ve Masoum'un [58]'de önerdiği elektrik-manyetik eşdeğer devre.	6
Şekil 1.6: Elektrik eşdeğer devre [62].	6
Şekil 1.7: Alt harmonik gerilimleri altında transformatör analizleri için önerilen melez model [65] [66].	7
Şekil 1.8: Farklı tip transformatörlerin DA uyarım altında uyarım akımlarının değişimi [28].	8
Şekil 1.9: Farklı tip transformatörlerin DA uyarım altında boşa çalışma akımlarının tepe değerlerinin değişimi [4].	9
Şekil 1.10: DA uyarım altında transformatör azami yüklenme oranının değişimi [18].	11
Şekil 2.1: Tek fazlı kabuk tipi nüveli transformatör.	14
Şekil 2.2: Üç fazlı beş bacaklı çekirdek tipi nüveli transformatör.	15
Şekil 2.3: İki sargılı transformatörler için elektrik eşdeğer devre.	15
Şekil 2.4: Transformatör kayıpları.	16
Şekil 2.5: Çeşitli manyetik manyetik akı yoğunluğu (B) seviyeleri için Histerezis (B-H) döngüleri [90].	18
Şekil 2.6: Çeşitli frekanslar için Histerezis (B-H) döngüleri [91].	18
Şekil 2.7: Girdap akımları (a) yek pare malzeme ve (b) lamine malzeme [92].	19
Şekil 2.8: Tek fazlı kabuk tipi nüveli transformatörler için geliştirilen modelin devre şeması.	23
Şekil 2.9: Üç fazlı beş bacaklı çekirdek tipi nüveli transformatörler için geliştirilen modelin devre şeması.	24
Şekil 2.10: Dikkate alınan (a) tek fazlı ve (b) üç fazlı transformatörlere ait modellerdeki manyetik ve elektrik eşdeğer devreler arasına bağlanan dönüştürücü blokları.	25
Şekil 2.11: \mathcal{R}_A , \mathcal{R}_B , \mathcal{R}_C , \mathcal{R}_E ve \mathcal{R}_Y relüktans bloklarının modellenmesi.	29
Şekil 2.12: Geliştirilen tek fazlı kabuk tipi nüveli transformatör modelinin geçerlilik analizi için Matlab/SIMULINK ortamında oluşturulan test sistemi.	31
Şekil 2.13: Geliştirilen üç fazlı beş bacaklı çekirdek tipi nüveli transformatör modelinin geçerlilik analizi için Matlab/SIMULINK ortamında oluşturulan test sistemi.	31
Şekil 2.14: Tek fazlı kabuk tipi nüveli transformatörün $t=9,95$. saniyedeki, (a) saf sinüzoidal besleme ($V_{DC}=0$ V/km) ve (b) $V_{Dctotal}=1$ kV DA uyarım şartları ($V_{DC}=10$ V/km) altında akı yoğunluğu dağılımı.	32
Şekil 2.15: Üç fazlı beş bacaklı çekirdek tipi nüveli transformatörün $t=9,95$. saniyedeki, (a) saf sinüzoidal besleme ($V_{DC}=0$ V/km) ve (b) $V_{Dctotal}=1$ kV DA uyarım şartları ($V_{DC}=10$ V/km) altında akı yoğunluğu dağılımı.	33
Şekil 2.16: Tek fazlı kabuk tipi nüveli transformatörün sinüzoidal besleme ve %50 yüklenme altında SEY ve geliştirilen modelle elde edilen (a) primer ve sekonder taraf gerilimleri ile (b) primer ve sekonder taraf akımlarının dalga şekilleri. ($V_{DC}=0$ V/km).	34
Şekil 2.17: Tek fazlı kabuk tipi nüveli transformatörün DA uyarımlı besleme gerilimi ve %50 yüklenme altında SEY ve geliştirilen modelle elde edilen (a) primer ve	

	sekonder taraf gerilimleri ile (b) primer ve sekonder taraf akımlarının dalga şekilleri ($V_{DC}=10$ V/km).....	35
Şekil 2.18:	Tek fazlı kabuk tipi nüveli transformatörün boşta çalışma durumunda (a) saf sinüzoidal besleme ($V_{DC}=0$ V/km) ve (b) DA uyarım bileşenli besleme ($V_{DC}=10$ V/km) gerilimleri altında SEY ve geliştirilen modelle elde edilen primer taraf akımlarının dalga şekilleri.	35
Şekil 2.19:	Üç fazlı beş bacaklı çekirdek tipi nüveli transformatörün sinüzoidal gerilim ($V_{DC}=0$ V/km) altında boşta çalışma durumu için SEY ve geliştirilen modelle elde edilen primer taraf akımlarının dalga şekilleri.....	37
Şekil 2.20:	Üç fazlı beş bacaklı çekirdek tipi nüveli transformatörün DA uyarımlı besleme gerilimi ($V_{DC}=10$ V/km) altında boşta çalışma durumu için SEY ve geliştirilen modelle elde edilen primer taraf akımlarının dalga şekilleri.	38
Şekil 2.21:	Üç fazlı beş bacaklı çekirdek tipi nüveli transformatörün sinüzoidal gerilim ($V_{DC}=0$ V/km) altında %50 yükleme durumu için SEY ve geliştirilen modelle elde edilen primer taraf akımlarının dalga şekilleri.....	39
Şekil 2.22:	Üç fazlı beş bacaklı çekirdek tipi nüveli transformatörün DA uyarımlı besleme gerilimi ($V_{DC}=10$ V/km) altında %50 yükleme durumu için SEY ve geliştirilen modelle elde edilen primer taraf akımlarının dalga şekilleri.	40
Şekil 2.23:	Üç fazlı beş bacaklı çekirdek tipi nüveli transformatörün %50 yükleme durumu için (a) sinüzoidal ($V_{DC}=0$ V/km) ve (b) DA uyarımlı besleme gerilimi koşulları altında SEY ve geliştirilen modelle elde edilen sekonder taraf gerilimleri.	41
Şekil 3.1:	Tek fazlı kabuk tipi nüveli transformatörün ana bacağından akan $\Phi(t)$ manyetik akısının boşta çalışma durumunda $V_{DA}=0$ ve 10 V/km için dalga formları.	43
Şekil 3.2:	Tek fazlı kabuk tipi nüveli transformatör için boşta çalışma durumunda I_p ve $TDDI_p$ değerlerinin V_{DA} ile değişimi.	44
Şekil 3.3:	Tek fazlı kabuk tipi nüveli transformatörün boşta çalışma durumunda farklı V_{DA} seviyeleri için primer faz akımının DA ve harmonik bileşenleri.	45
Şekil 3.4:	Tek fazlı kabuk tipi nüveli transformatörün boşta çalışma durumunda kayıplarının ve temel harmonik reaktif güç talebinin V_{DA} ile değişimi.	46
Şekil 3.5:	Üç fazlı beş bacaklı çekirdek tipi nüveli transformatörün nüvesinde dolanan $\Phi_A(t)$, $\Phi_B(t)$ ve $\Phi_C(t)$ manyetik akılarının boşta çalışma durumunda $V_{DA}=0$ V/km için dalga şekilleri.....	47
Şekil 3.6:	Üç fazlı beş bacaklı çekirdek tipi nüveli transformatörün nüvesinde dolanan $\Phi_A(t)$, $\Phi_B(t)$ ve $\Phi_C(t)$ manyetik akılarının boşta çalışma durumunda $V_{DA}=10$ V/km için dalga şekilleri.....	48
Şekil 3.7:	Üç fazlı beş bacaklı çekirdek tipi nüveli transformatörün boşta çalışma durumunda I_{pa} , I_{pb} ve I_{pc} değerlerinin V_{DA} ile değişimi.	49
Şekil 3.8:	Üç fazlı beş bacaklı çekirdek tipi nüveli transformatörün $TDDI_{pa}$, $TDDI_{pb}$ ve $TDDI_{pc}$ değerlerinin V_{DA} ile değişimi.	50
Şekil 3.9:	Üç fazlı beş bacaklı çekirdek tipi nüveli transformatörün boşta çalışma durumunda farklı V_{DA} seviyeleri için primer sargı akımlarının harmonik bileşenleri.....	51
Şekil 3.10:	Üç fazlı beş bacaklı çekirdek tipi nüveli transformatörün boşta çalışma durumunda kayıplarının ve temel harmonik reaktif güç talebinin V_{DA} ile değişimi.....	52
Şekil 4.1:	Azami yüklenme oranı tespit yaklaşımlarına ait algoritma akış diyagramları. ..	55
Şekil 4.2:	Tek fazlı kabuk tipi nüveli transformatörün $V_{DA}=10$ V/km DA uyarım için P_{TL}/P_{TLR} , I_p/I_{PR} ve P_{PL}/P_{PLR} oranlarının YO ile değişimi.	56

Şekil 4.3: Tek fazlı kabuk tipi nüveli transformatörün $V_{DA}=10$ V/km DA uyartım için P_{PL} ve P_{SL} değerlerinin YO ile değişimi.	57
Şekil 4.4: Üç fazlı beş bacaklı çekirdek tipi nüveli transformatörün $V_{DA}=10$ V/km DA uyartım için P_{TL}/P_{TLR} , I_P/I_{PR} ve P_{PL}/P_{PLR} oranlarının YO ile değişimi.	58
Şekil 4.5: Üç fazlı beş bacaklı çekirdek tipi nüveli transformatörün $V_{DA}=10$ V/km DA uyartım için P_{PL} ve P_{SL} değerlerinin YO ile değişimi.....	59
Şekil 5.1: 10 V/km DA uyartım altında, tek fazlı kabuk tipi nüveli transformatörün 4 farklı nüve malzemesi için nüve kesit alanının artışıyla I_{P1} değerlerinin değişimi. ...	63
Şekil 5.2: 10 V/km DA uyartım altında, tek fazlı kabuk tipi nüveli transformatörün 4 farklı nüve malzemesi için nüve kesit alanının artışıyla AYO değerlerinin değişimi.	64
Şekil 5.3: 10 V/km DA uyartım altında, üç fazlı beş bacaklı çekirdek tipi nüveli transformatörün 4 farklı nüve malzemesi için nüve kesit alanının artışıyla I_{P1} değerlerinin değişimi.	65
Şekil 5.4: 10 V/km DA uyartım altında, üç fazlı beş bacaklı çekirdek tipi nüveli transformatörün 4 farklı nüve malzemesi için nüve kesit alanının artışıyla AYO değerlerinin değişimi.	65
Şekil A.1: Tek fazlı kabuk tipi nüveli transformatörün çekirdek yapısı.	85
Şekil A.2: Tek fazlı kabuk tipi nüveli transformatörün sargı yapısı.	85
Şekil A.3: Üç fazlı beş bacaklı çekirdek tipi nüveli transformatörün çekirdek ve sargı yapısı.....	86
Şekil A.4: Transformatörlerin bobin ölçüleri.....	86

TABLO LİSTESİ

	<u>Sayfa</u>
Tablo 2.1: RMSE değerleri.....	36
Tablo 2.2: RMSE değerleri.....	36
Tablo B.1: Tek fazlı kabuk tipi nüveli transformatörün özellikleri.....	87
Tablo B.2: Üç fazlı beş bacaklı çekirdek tipi nüveli transformatörün özellikleri	87
Tablo C.1: Çekirdek malzemelerin B-H VE P-B verileri.....	88

SEMBOL LİSTESİ

AA	: Alternatif akım
AC	: Transformatörün ana bacakları hariç diğer nüve parçalarının kesit alanı
ACN	: Transformatörün nominal (orijinal) kesit alanı
AYO	: Azami yüklenme oranı
B	: Manyetik akı yoğunluğu
bd	: Birim değer
CTC	: Transpoze edilmiş emaye kaplı bakır iletken
DA	: DOĞRU akım
ex(t)	: Transformatör nüve dirençleri üzerindeki gerilim düşümleri
f	: Frekans
F_x(t)	: Primer ve sekonder taraflardaki anlık manyetomotor kuvvetleri
F_{HL}	: Harmonik kayıp faktör indisi
F_{HL-STR}	: Diğer kaçak kayıplar için harmonik kayıp faktör indisi
H	: Transformatör nüve malzemesinin manyetik alan şiddeti
h	: harmonik numarası
I_S	: Transformatör sekonder sargı akımını toplam etkin değeri
I_P	: Transformatör primer sargı akımını toplam etkin değeri
I_{PDA}	: Primer sargı akımının DA bileşeni
I_{ph}	: Primer sargı akımının h. Harmonik bileşeni
I_{sh}	: Sekonder sargı akımının h. Harmonik bileşeni
i_{cx}(t)	: Transformatör nüvesinin çektiği akımların anlık değeri
i_s(t)	: Transformatör sekonder sargı akımını anlık değeri
i_p(t)	: Transformatör primer sargı akımını anlık değeri
J_{IA}	: Jeomanyetik olarak indüklenen akımlar
N_x	: x=p (primer) veya s (sekonder) sargı sipir sayısı
l	: İlgili nüve parçasının uzunluğu
P_{DC}	: Transformatör ohmik sargı kaybı
P_{EC}	: Transformatör sargı girdap akım kaybı
P_F	: Transformatör nüvesi girdap akımını kaybı
P_{Fe}	: Transformatör toplam demir kaybı
P_{Feh}	: Transformatör h. Harmonik demir kaybı
P_H	: Transformatör nüvesi histerezis kaybı
P_{LL}	: Transformatör toplam sargı kaybı
P_{OSL}	: Transformatör yapısal parçalarında oluşan diğer kaçak kayıplar
P_{TSL}	: Transformatör toplam kaçak kaybı
Q_{m1}	: a, b, c fazlarına ait temel frekans reaktif güç
R_{Ecs1}	: Girdap akım kayıpları ile ilişkili temel harmonik sekonder sargı
R_{EcsH}	: Girdap akım kayıpları ile ilişkili h. Harmonik sekonder sargı

R_{Ecp}	: Girdap akım kayıpları ile ilişkili h. Harmonik primer sargı
R_{Ecp1}	: Girdap akım kayıpları ile ilişkili temel harmonik primer sargı
R_{Fe}	: Transformatör nüve direnci
$RMSE$: Ortalama karekök hata
R_{OSLs1}	: Diğer kaçak kayıpları ile ilişkili temel harmonik sekonder sargı
R_{OSLsh}	: Diğer kaçak kayıpları ile ilişkili h. Harmonik sekonder sargı
R_{OSLp1}	: Diğer kaçak kayıpları ile ilişkili temel harmonik primer sargı
R_{OSLph}	: Diğer kaçak kayıpları ile ilişkili h. Harmonik primer sargı
R_{Sdc}	: Sekonder sargı DA direnci
R_{Pc}	: Primere ayrılmış nüve direnci
R_{Sc}	: Primere ayrılmış nüve direnci
R_{Pdc}	: Primer sargı DA direnci
R_1	: Primer sargı direnci
R_2'	: Sekonder sargının primer taraftan görünen direnci
SEY	: Sonlu elemanlar yöntemi
SM	: Transformatörün azami gücü
SPR	: Transformatörün anma gücü
T	: Periyot
TDD	: Toplam talep bozulma faktörü
THD	: Toplam harmonik bozulma faktörü
$v_s(t)$: Sekonder sargı uçlarındaki anlık gerilim düşümü
$v_p(t)$: Primer sargı uçlarındaki anlık gerilim düşümü
X_M	: Transformatör nüvesinin mıknatıslanma reaktansı
X_1	: Primer sargı kaçak reaktansı
X_2'	: Primer taraftan görülen sekonder sargı kaçak reaktansı
$YGDA$: Yüksek gerilim DOĞRU akım
$\mathfrak{R}_A, \mathfrak{R}_B, \mathfrak{R}_C$: Nüve ana bacaklarının relüktansı
\mathfrak{R}_E	: Nüve dış bacaklarının relüktansı
\mathfrak{R}_{Ls}	: Sekonder sargı kaçak akısının aktığı hava aralığının relüktansı
\mathfrak{R}_{Lp}	: Primer sargı kaçak akısının aktığı hava aralığının relüktansı
\mathfrak{R}_Y	: Nüve boyunduruklarının relüktansı
\mathfrak{R}_0	: Nüve ile tank arası hava aralığı relüktansı
$\Phi_x(t)$: $x=p$ (primer) veya $x=s$ (sekonder) taraflarda indüklenen anlık manyetik
ω_0	: Temel açısız frekans
φ_{sh}	: Sekonder sargı akımlarının h. Harmonik bileşenlerinin faz açısı
φ_{ph}	: Primer sargı akımlarının h. Harmonik bileşenlerinin faz açısı
σ_H	: Transformatör nüve malzemesi sabiti
$2B$: İki boyutlu

ÖNSÖZ

Bu tezde, doğru akım bileşene sahip şebeke gerilimi koşulları altında çalışan, tek fazlı kabuk tipi nüveli ve üç fazlı beş bacaklı çekirdek tipi nüveli güç transformatörlerinin analizi için sargı kayıplarının frekansa bağımlılığını dikkate alan relüktans tabanlı modeller geliştirilmiştir. Geliştirilen modeller kullanılarak, doğru akım uyarım koşulları altında transformatörlerin performans parametreleri analiz edilmiş ve yeniden boyutlandırma çalışmaları gerçekleştirilmiştir.

Tez kapsamında gerçekleştirilen çalışmalardan türetilen; SCI indekste yer alan 2 dergi makalesi, 1 uluslararası hakemli konferans bildirisi ve 1 ulusal hakemli konferans bildirisi yayımlanmıştır.

Başta Doktora tez çalışmamın her aşamasında bilgi, tecrübe ve fedakarlığı ile bana yol gösteren, öğrencisi olmaktan daima gurur duyacağım tez danışmanım Sayın Prof. Dr. Murat Erhan BALCI'ya teşekkür ederim.

Fikir ve görüşleri ile çalışmama değer katan Tez İzleme Komitesinde bulunan hocalarım Sayın Prof. Dr. Mehmet Hakan HOCAOĞLU ve Sayın Dr. Öğr. Üyesi Mehmet Kubilay EKER'e; BESTTEZ projesi kapsamında tezime teknik destek veren ve bilgi paylaşımında bulunan BEST Elektromekanik Sanayi A.Ş. ARGE birimine teşekkürlerimi sunarım.

Hayatım boyunca yanımda olduklarını hissettiğim haklarını asla ödeyemeyeceğim annem Dudu CANTÜRK, babam Ali CANTÜRK, kardeşim Serdar CANTÜRK'e; uzun çalışmalarım boyunca desteğini hiçbir zaman esirgemeyen eşim Gülşah CANTÜRK ile motivasyon kaynağım biricik oğlum Oğuz Kağanıma teşekkür ederim.

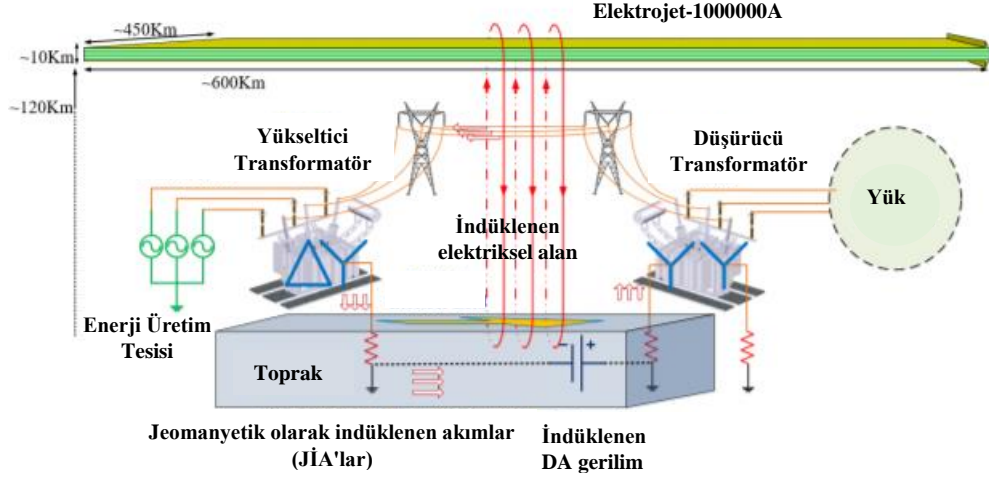
Bahkesir, 2023

Şevket CANTÜRK

1. GİRİŞ

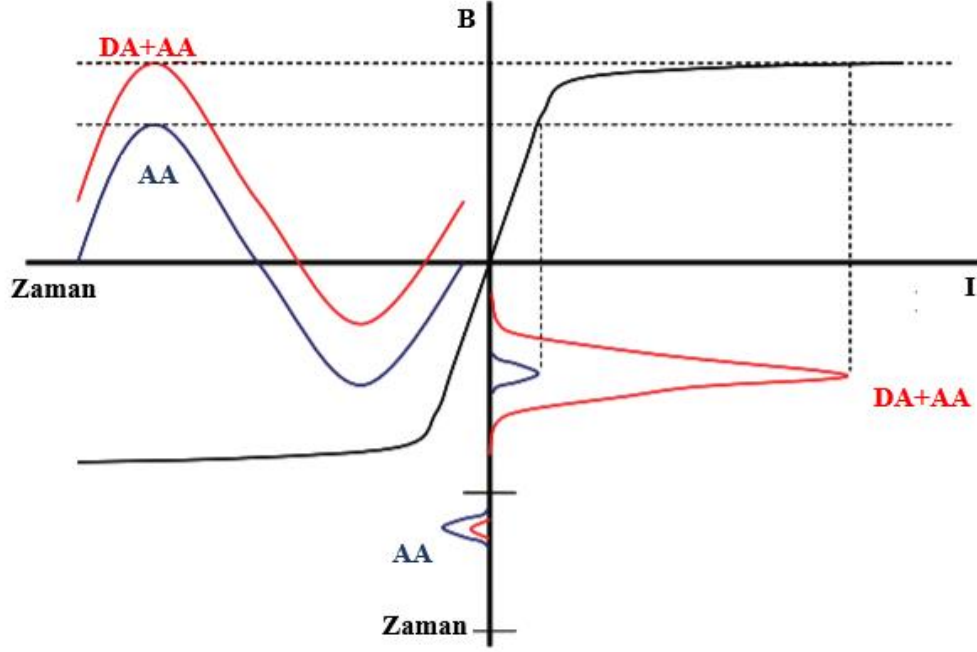
Güç transformatörleri, şebeke frekansına sahip sinüzoidal dalga şeklinde gerilimler ve akımlar altında çalışmak üzere tasarlanan, primer ve sekonder sargılar ile bu sargıların sarıldığı manyetik nüveden oluşan, elektrik enerjisini elektrik enerjisine dönüştüren durağan elektrik makineleridir. Alternatif akım (AA) veya gerilimi frekansın sabit kalması şartıyla, sargıların sarım sayılarının oranına (dönüştürme oranına) bağlı olarak yükseltir veya düşürürler. Transformatör kayıpları, sargı ve nüve kayıpları olmak üzere iki ana gruba ayrılır. Bu makinelerde, motorlar ve generatörlerin sahip olduğu sürtünme ve rüzgâr kayıpları meydana gelmez. Dolayısıyla, verimleri hareketli elektrik makinelerine kıyasla yüksek olup genellikle %95-99 aralığındadır [1]-[3].

Transformatörlerin, AA üzerine binmiş doğru akıma (DA) maruz kalması durumu, DA uyarım (DC excitation) altında çalışma [4]-[6] veya DA ön gerilim (DC biased voltage) altında çalışma [7]-[10] olarak literatürde adlandırılmıştır. AA güç sistemlerinde transformatörlerin DA uyarıma maruz kalma sebeplerinden biri, Güneş fırtınalarına bağlı Dünya'nın jeomanyetik alanında meydana gelen değişimlerdir. Bu değişimler, enerji nakil hatlarında pratikte DA kabul edilebilecek kadar düşük frekanslı (0,001'den 0,1 Hz'e kadar frekanslarda) gerilimler indükler. Hatlarda indüklenen düşük frekanslı bu gerilimler, Şekil 1.1'den görüldüğü üzere başlangıç ve bitişinde nötr noktası topraklanmış yıldız bağlı sargılara sahip transformatörlerin bulunduğu iletim hatlarında dolanırlar. Bu dolanan akımlar, literatürde jeomanyetik olarak indüklenen akımlar (JİA'lar) olarak isimlendirilmiştir [11], [12]. Ancak, yaklaşık DA kabul edilen JİA'lar, transformatörlerin iletim hattı tarafındaki sargıları, üçgen bağlı veya yıldız noktası topraksız olduğu takdirde, akış yolu bulamazlar.



Şekil 1.1: Enerji iletim hatlarında JIA oluşumu ve akışı [13].

Transformatörler, anma sinüzoidal gerilim altında, nüve malzemesinin B-H eğrisinin dirsek noktasında çalışmak üzere tasarlanırlar. Diğer bir ifadeyle, anma sinüzoidal gerilimin tepe değerine karşılık gelen maksimum manyetik akı yoğunluğu (B) nüve malzemesinin B-H eğrisinin dirsek noktasındaki B değeridir. Anma şartlarında, B-H eğrisinin dirsek noktasında çalışan transformatörlerin sürekli hal uyarım akımları anma akım değerlerine göre önemli derecede küçüktür. Bununla birlikte, JIA veya DA'lar sistemdeki akış yönlerine bağlı olarak, şebeke geriliminin pozitif ya da negatif çevrimlerinden (alternanslarından) birinde, şebeke gerilimini sırasıyla pozitif veya negatif tarafa doğru öteleyebilir. Bu ötelemeye bağlı olarak, ilgili çevrimde nüvedeki maksimum B değeri saf sinüzoidal anma uyarım şartlarındaki maksimum B değerinden büyük olur. Böylece, ilgili çevrimde transformatörler doymaya girerler ve uyarım akımları önemli derecede büyür [6], [14]. DA uyarıma bağlı olarak manyetik akı yoğunluğunda ve uyarım akımında meydana gelen artışı izah eden grafik Şekil 1.2'de verilmiştir.



Şekil 1.2: DA uyarım altında transformatörün B-I eğrisi [15].

Yukarıda izah edilen DA'ya bağlı doyma durumu sonucunda transformatörlerin,

- reaktif güç taleplerinde [7], [8], [16], [17] ,
- uyarım akımı harmonik bozulmasında [7], [8], [15],
- kayıplarında [7], [8], [18], [19],

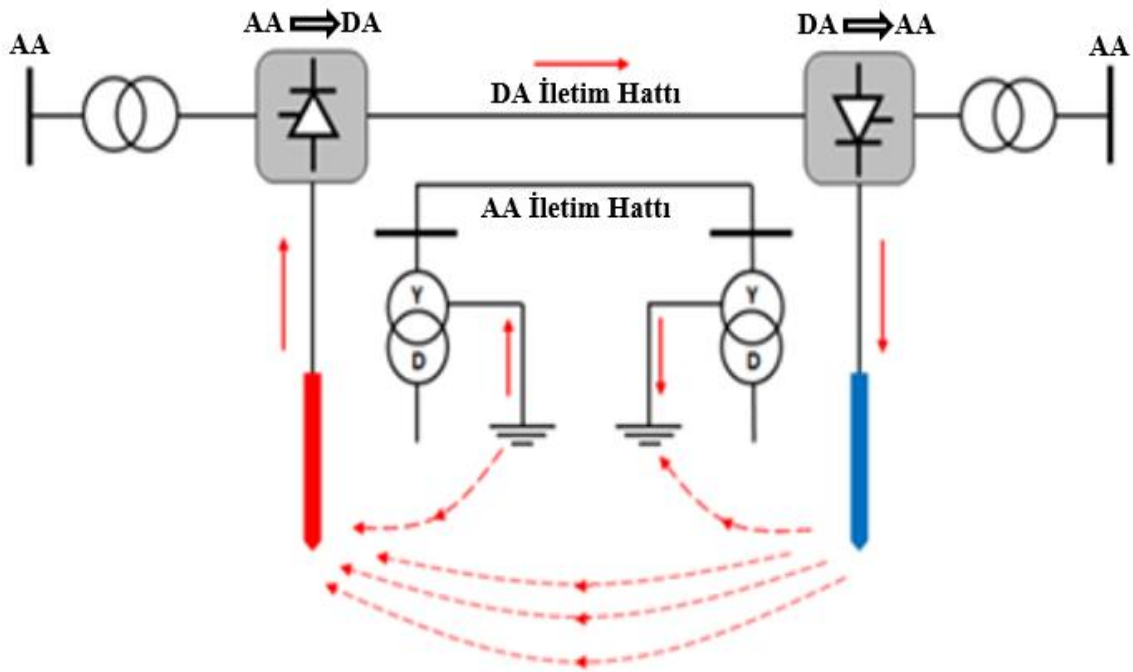
artış meydana geldiği literatürdeki çalışmalarda belirtilmiştir.

DA uyarım altında çalışan transformatörlerin kayıp artışına bağlı olarak aşırı ısınmaları sebebiyle beklenen ömürlerinin önemli ölçüde azaldığı yine literatürdeki [6], [18], [20] çalışmalardan ifade edilebilir. Bununla birlikte, DA uyarımın transformatörlerde yalıtım sorunlarına ve kısmi deşarjlara yol açtığı [21]'de işaret edilmiştir. Ayrıca, DA uyarıma bağlı ömür kaybının önlenmesi için DA şartlarında transformatörlerin azami yüklenme seviyelerinin düşürülmesi, diğer bir deyişle transformatörlerin yeniden boyutlandırılması gerekliliği [18], [22]'den söylenebilir.

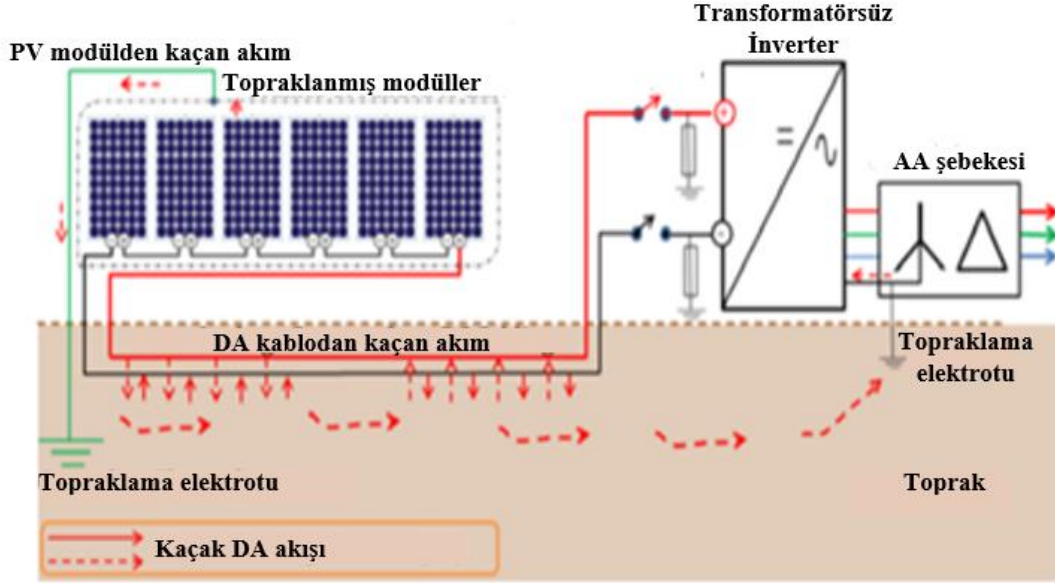
Öte yandan, DA uyarım sebebiyle transformatörlerin reaktif güç talebinde ve akım harmonik bozulmasında meydana gelen artışlar, şebeke tarafında önemli sorunlara yol açabilir. Bu sorunlar, hat kayıplarının artışı [23], [24], gerilim dalga şeklinin bozulması [15],

[25], [26], gerilim seviyesinin düşmesi [27], [28] ve güç sistem koruma/ölçme elemanlarının hatalı çalışması [15], [29], [30] olarak sıralanabilir.

JİA'lar dışında, yüksek gerilim DA iletim sistemlerinin (YGDA) veya transformatörsüz fotovoltaiik dağıtık üretim birimlerinin topraklama elektrotlarının, AA sistemlerin topraklama elektrotlarına yakın mesafelerde olması durumunda AA sistemlere DA akışı meydana gelebilir [31], [32]. Bu durumu izah eden şematikler, Şekil 1.3 ve 1.4'de sunulmuştur. Dolayısıyla, transformatörler için DA uyarım, genellikle Dünya'nın kutuplarına yakın ülkelerinin güç sistemlerinde karşılaşılan bir güç kalitesi olayı olmayıp YGDA iletimin kullanıldığı güç sistemlerinde ve özellikle de transformatörsüz fotovoltaiik dağıtık üretimin yaygın olduğu dağıtım sistemlerinde de dikkate alınması gereken bir sorundur.



Şekil 1.3: YGDA sistemler sebebiyle AA şebekelerinde doğru akımların dolanımı [31].



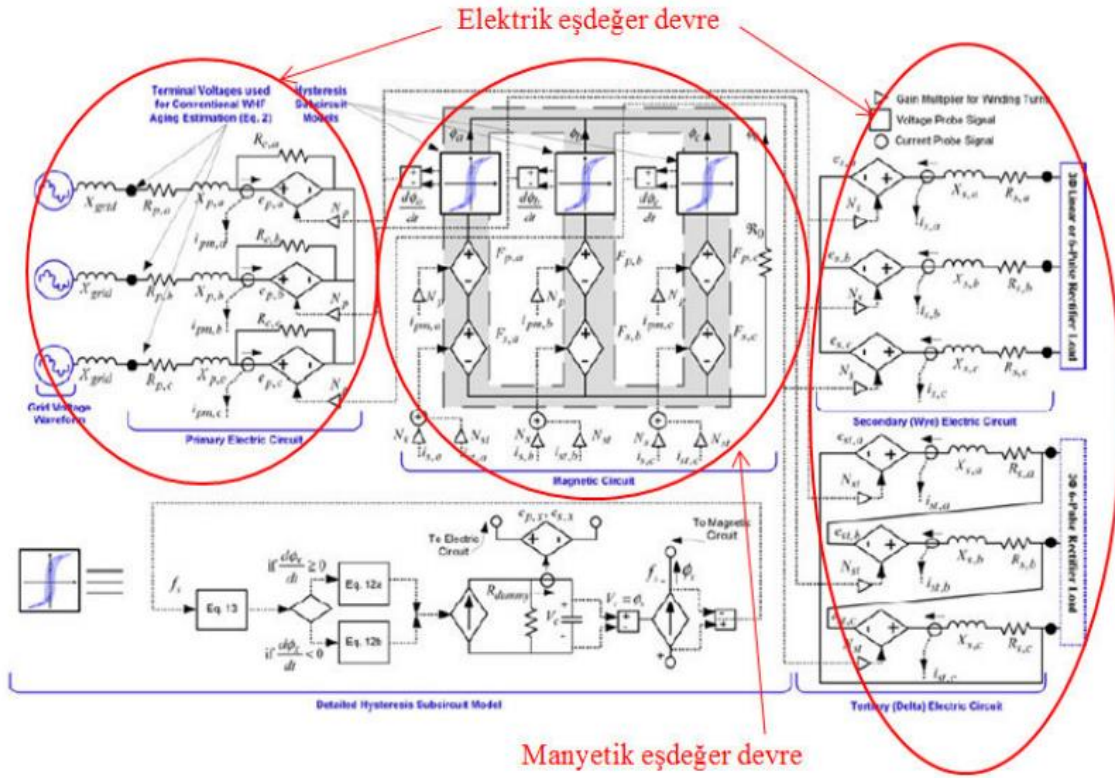
Şekil 1.4: Fotovoltaik dağıtık üretim birimleri sebebiyle AA şebekelerinde doğru akımların dolanımı [32].

1.1 Arka Plan

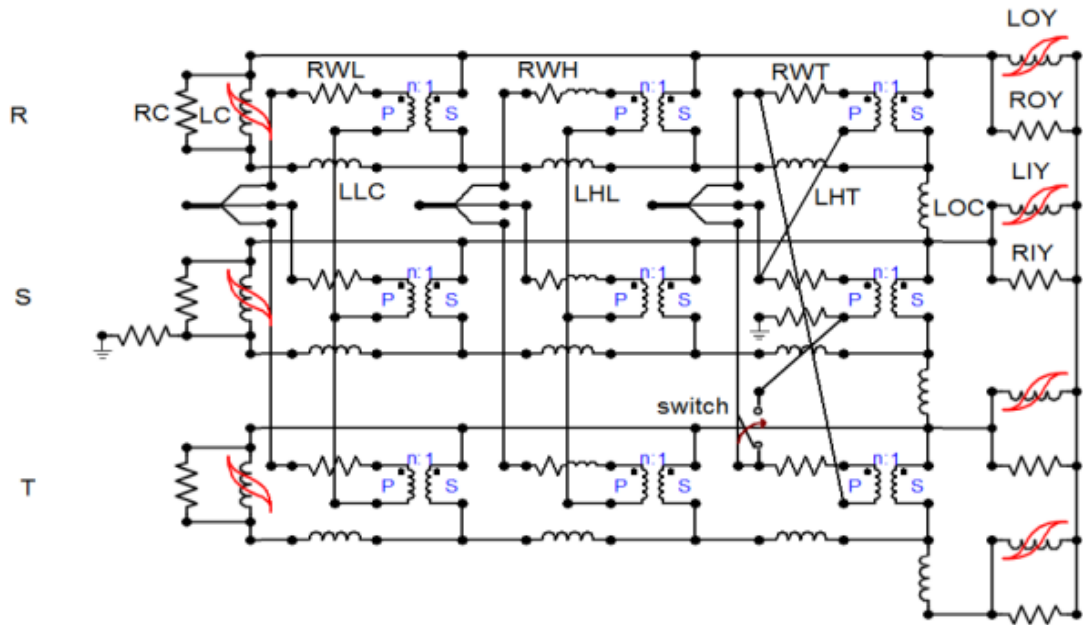
Buraya kadar kısaca tanıtilen DA uyarım akımlarının AA güç sistemlerinde akışının sınırlanması veya önlenmesi için transformatörlerin yıldız noktası ile toprak arasına yerleştirilen direnç, bobin, kapasite [33]-[36] ve kontrollü yarı iletken anahtarların [37]-[39] kullanımı çeşitli çalışmalarda ele alınmıştır. Bu DA engelleyici elemanların (DC blocking devices) tasarımı veya boyutlandırması [40]-[44] ile güç sistemlerine optimal yerleştirilmesi [45]-[48] konuları araştırmacılar tarafından büyük ilgi görmüştür.

Diğer taraftan, DA uyarımının transformatörlere etkilerinin analizi ve DA uyarıma bağışık transformatör tasarımı ise ilgili literatürde ulaşılan diğer alt çalışma konularıdır. Bu çalışmalarda araç olarak, sonlu elemanlar yöntemi (SEY) temelli analiz yazılımları yaygın bir şekilde kullanılmıştır [9], [49]-[56]. Bu yazılımların yanı sıra ölçüm sonuçları da çalışmalarda dikkate alınmıştır [4], [15], [20], [26], [37], [57].

Ancak, hem SEY temelli hem de ölçüm temelli analizler, zaman ve maliyet bakımından dezavantajlıdır. Bu sebeple, son yıllarda transformatörlerin DA uyarım altında analizi için elektrik-manyetik (relüktans tabanlı) eşdeğer devre [25], [58]-[61] ve elektrik eşdeğer devre [62] modelleri literatürde önerilmiştir. Şekil 1.5 ve 1.6'da her iki modelleme yaklaşımı için birer örnek sunulmuştur.



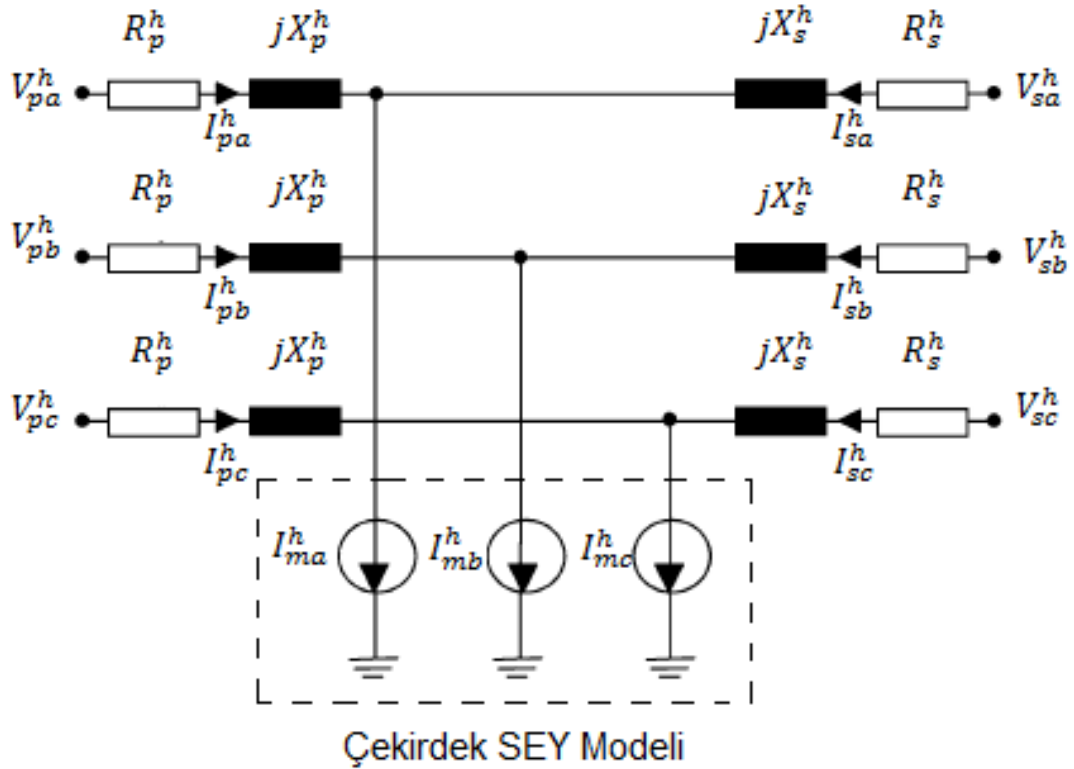
Şekil 1.5: Moses ve Masoum'un [58]'de önerdiği elektrik-manyetik eşdeğer devre.



Şekil 1.6: Elektrik eşdeğer devre [62].

Şekil 1.5’de sunulan elektrik-manyetik eşdeğer devre modeli, (i) sargı ve nüve kayıplarını temsil eden dirençler ile kaçak reaktans elemanlarının bulunduğu elektriksel eşdeğer devre kısmı ve (ii) relüktans ve manyetomotor kaynaklarının bulunduğu manyetik eşdeğer devre kısmı olmak üzere iki parçadan oluşur. Her iki modelde, sargı kayıplarının frekansa bağımlılığı ihmal edilmiştir. Modellerdeki bu ihmal, DA uyartım altında transformatörlerin yüksek harmonik bozulmaya sahip uyartım akımları çektiği göz önüne alındığında, kayıp analizleri ve yeniden boyutlandırma çalışmalarında hassasiyeti azaltmaktadır.

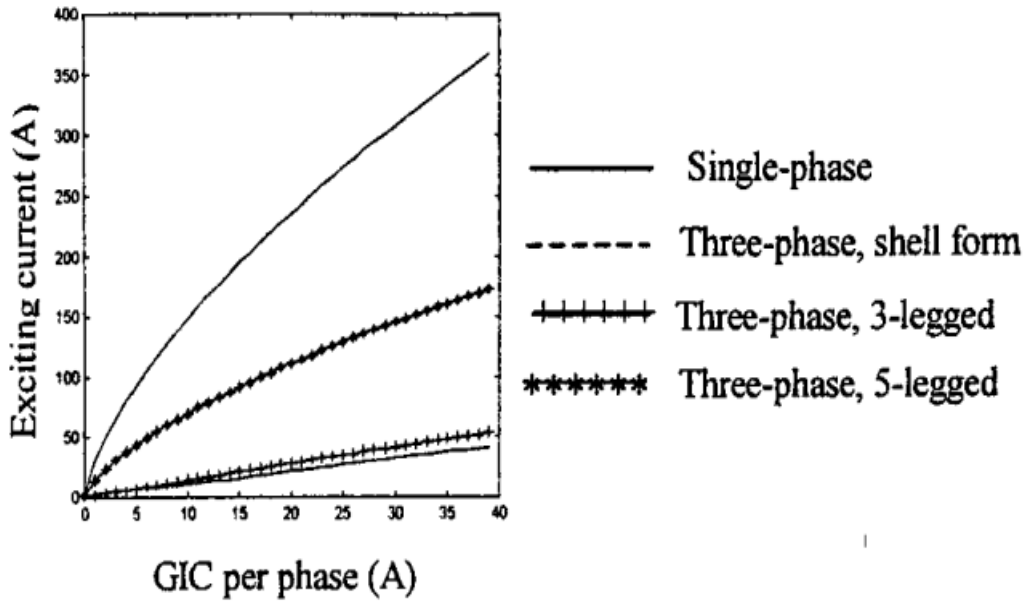
Yukarıda belirtilen modeller dışında, harmonik bozulmaya sahip gerilim ve akım şartlarında, transformatör analizleri için [63] ve [64]’de melez bir model önerilmiştir. Şekil 1.7’de şematiği verilen bu melez modelde, transformatörün nüvesi SEY yöntemiyle hesaplanan uyartım akım kaynaklarıyla, sargıları ise frekans bağımlı direnç ve reaktans devre elemanlarıyla temsil edilmiştir.



Şekil 1.7: Alt harmonik gerilimleri altında transformatör analizleri için önerilen melez model [65] [66].

Böylece, SEY modele kıyasla zaman verimli bir model ortaya konması amaçlanmıştır. Modelin elektriksel eşdeğer devre kısmında, sargıların frekans bağımlılığı IEEE C.57.110 standardı dikkate alınarak ifade edilmiştir. Ancak modelin kısmen de olsa SEY analize ihtiyaç duyması, bu modeli elektrik-manyetik eşdeğer devre ve elektrik eşdeğer devre modellerine kıyasla işlem yükü ve hız bakımından dezavantajlı hale getirmektedir.

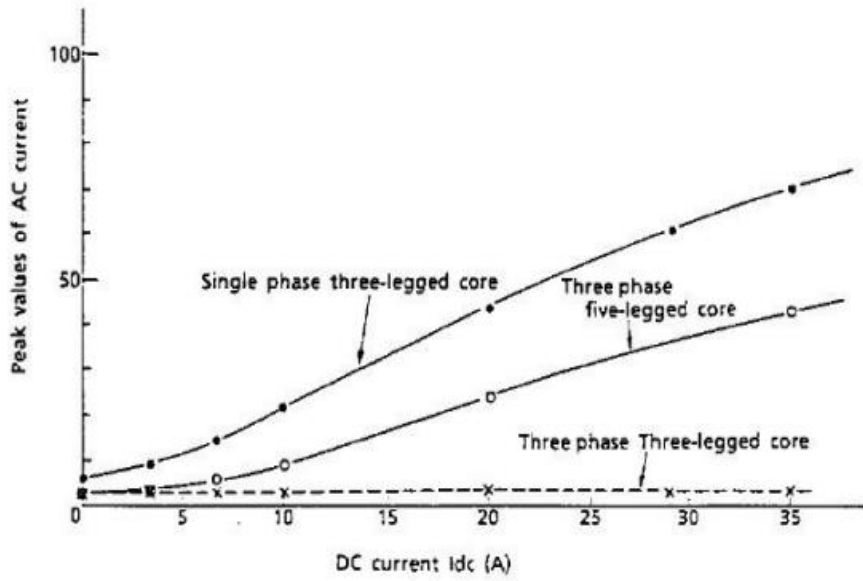
Bu modelleme çalışmalarına ilaveten DA uyarımın transformatörler üzerindeki etkilerini analiz eden çeşitli çalışmalar literatürde mevcuttur. Bunlardan [28]'de yapılan model temelli analizlerden, aynı DA uyarım seviyesi için uyarım akımı büyüklüğünün, tek fazlı transformatörlerde, üç fazlı transformatörlere kıyasla daha yüksek olduğu ortaya konmuştur. Ayrıca, bu çalışmada, aynı DA uyarım şartları altında uyarım akımının genliğinin üç fazlı transformatörler için büyükten küçüğe doğru sırasıyla beş bacaklı ve üç bacaklı tasarımlarda gözlemlendiği belirtilmiştir.



Şekil 1.8: Farklı tip transformatörlerin DA uyarım altında uyarım akımlarının değişimi [28].

[28]'de sunulan sonuçları destekler bir şekilde, [55]'de model temelli analizlerden, üç fazlı üç bacaklı transformatörlerde çekirdek tipi nüveli olanların kabuk tipi nüveli olanlara kıyasla DA uyarıma karşı daha hassas olduğu, ayrıca her iki nüve yapısı için de bacak sayısı arttıkça DA uyarıma hassasiyetin arttığı görülmektedir.

Yine bir diğer çalışma [4]'de, ölçüm temelli analizler neticesinde, tek fazlı üç bacaklı, üç fazlı üç bacaklı ve üç fazlı beş bacaklı transformatörler arasında DA uyarıtma hassasiyet karşılaştırması yapılmıştır. [28] ve [55]'e paralel sonuçlar elde edilmiştir. Elde edilen sonuçları işaret eden, tek fazlı üç bacaklı, üç fazlı üç bacaklı ve üç fazlı beş bacaklı transformatörlerin DA uyarıtım ile boşa çalışma akımlarının tepe değerlerinin değişimini gösteren grafik Şekil 1.9'da sunulmuştur.



Şekil 1.9: Farklı tip transformatörlerin DA uyarıtım altında boşa çalışma akımlarının tepe değerlerinin değişimi [4].

Girgis ve Vedante çalışma [15]'de, DA uyarıtımdaki artışın, transformatörün uyarıtım akımının 2. Harmonik bileşeninde artışa sebep olduğunu, bu durumun ise diferansiyel rölelerin hatalı çalışmasına yol açtığını belirtmiştir.

[67]'de geliştirilen model kullanılarak elde edilen analiz sonuçlarıyla kaynak [68]'da, tank ve nüve arasındaki hava aralığının büyüklüğünün transformatörün sıfır sıra endüktansına etki ettiği ve sıfır sıra endüktansı düştükçe üç fazlı üç bacaklı transformatörlerin DA uyarıtma hassasiyetinin arttığı sonucuna ulaşılmıştır.

Çalışma [69]'de ise ölçüm temelli analizlerden, DA uyarıtma bağlı transformatör doyma durumunun tespitinde uyarıtım akımının 2. harmonik bileşeninin bir gösterge olarak

kullanılabileceği, ayrıca yüksek DA uyarım seviyelerinde, DA uyarım ile 2. harmonik akımı arasındaki ilişkinin 3. dereceden polinom olarak ifade edilebileceği belirtilmiştir.

Zhang ve arkadaşları çalışmalarında [70], iki boyutlu SEY analizleri neticesinde, DA uyarım altında çalışan transformatörlerin tank kayıplarının, yüklenme oranı ile ters orantılı, transformatörün güç faktörüyle ise doğru orantılı değiştiği görülmüştür.

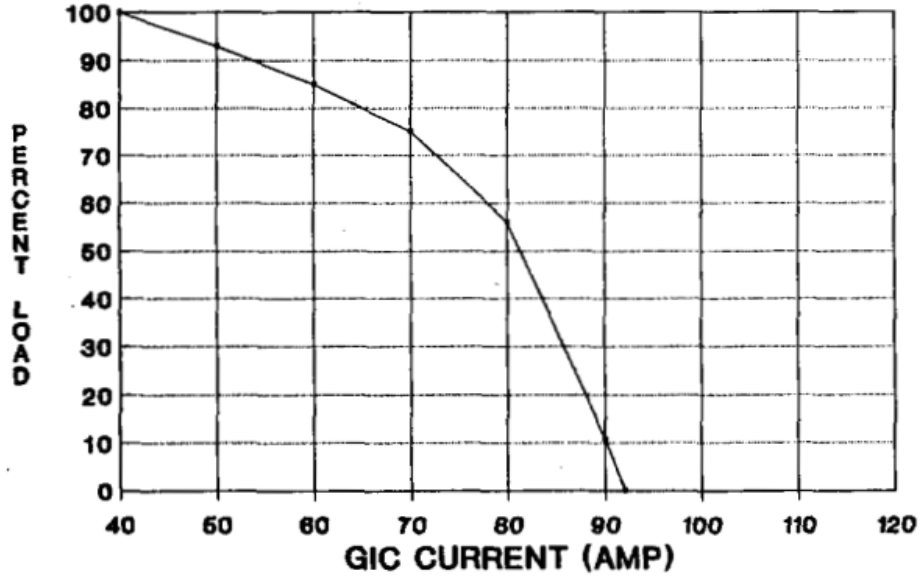
Bununla birlikte, Bolduca, Gaudreaux, ve Dutilleul [5], transformatörlerin DA gerilim altında doyuma ulaşma sürelerini analiz etmişler ve analizlerden bu sürenin DA gerilimin genliği ile ters orantılı olduğu, transformatörün X/R oranı ile doğru orantılı olduğu sonucuna varmışlardır.

Berge, Varma ve Marti tarafından yapılan çalışmada [16], ölçüm ve simülasyon temelli analizler neticesinde; transformatörün çektiği reaktif gücün DA uyarımın genliğiyle doğrusal arttığı; bununla birlikte, yüklenme oranının DA uyarım altında çalışan transformatörlerin reaktif güç ihtiyacına dikkate değer bir etkisinin olmadığı görülmüştür.

Mulasalihovic ve arkadaşları çalışmalarında [71], üç fazlı transformatörlerde hatlardaki dengesiz (eşit olmayan) DA uyarıma göre daha fazla kayba sebep olduğu sonucuna ulaşmıştır.

Çalışma [35]'de, DA uyarımın transformatörlere olumsuz etkilerini önlemek amacıyla bir metot önermiştir. Bu metot, transformatörün yıldız noktası ile toprak arasına seri bağlı kompanzasyon sargısıdır. Matlab-simulink analizleri metodun, transformatörün yüklenme oranı ve DA uyarım seviyesine bağlı olmaksızın başarılı bir şekilde çalıştığını göstermiştir. Bir başka ifade ile DA uyarıma bağlı transformatör çekirdeğindeki doymanın önlendiği anlaşılmıştır.

Girgis ve Ko tarafından yapılan çalışmada [18], kabuk tipi transformatörlerin farklı JİA seviyeleri için azami yüklenme oranı analiz edilmiştir. Bu analizlerden elde edilen azami yüklenme oranı eğrisi Şekil 1.10'da sunulmuştur. Ayrıca, analiz sonuçlarından çok sayıda katmandan oluşan transpoze edilmiş emaye kaplı bakır iletken (CTC) kullanımının transformatörlerde DA uyarıma olan dayanıklılığı arttırdığı görülmüştür.



Şekil 1.10: DA uyarım altında transformatör azami yüklenme oranının değişimi [18].

Buraya kadar özetlenen çalışmalardan,

- Tek fazlı transformatörlerin üç fazlı transformatörlere göre DA uyarıma daha hassas olduğu bir başka ifadeyle daha fazla olumsuz etkilendiği,
- DA uyarımın uygulandığı tarafta nötr noktası topraksız yıldız bağlı veya üçgen bağlı sargı bulunan üç fazlı transformatörlerin dengeli DA uyarımdan etkilenmediği,
- Aynı faz sayısı için kabuk tipi nüveli transformatörlerin çekirdek tipi nüvelilere göre DA uyarıma daha hassas olduğu,
- Bacak sayısı arttıkça transformatörlerin DA uyarıma hassasiyetinin arttığı,
- DA uyarımın transformatörler üzerindeki en önemli etkilerinden birinin azami yüklenme kapasitesindeki düşüş olduğu,
- Dolayısıyla transformatörlerin, DA uyarım altında erken yaşlanmasına ve zarar görmesine mani olmak için azami yüklenme oranının (AYO'nun) belirlenmesi gerektiği [65], [66], [72]-[80]
- Literatürde ulaşılabilen elektrik-manyetik ve elektrik eşdeğer devre transformatör modellerinde, sargıların frekans bağımlılığının dikkate alınmadığı, bunun ise DA uyarım altında transformatör davranışının analizinde ve AYO değerinin belirlenmesinde önemli hatalara yol açabileceği,

ifade edilebilir.

1.2 Tezin Amacı

Bu tez çalışmasında,

- DA uyarım şartlarına hassasiyeti yüksek olan tek fazlı kabuk tipi nüveli ve üç fazlı beş bacaklı çekirdek tipi nüveli transformatörlerin analizi ve tasarımında kullanılmak üzere, sargıların frekans bağımlılığını dikkate alan elektrik-manyetik eşdeğer devre modellerinin geliştirilmesi,
- Geliştirilen modellerin, sinüzoidal anma gerilim ve DA uyarım bileşenli gerilim şartları için verdikleri sonuçların, Ansys Maxwell ortamında elde edilen 2 boyutlu analiz sonuçlarıyla karşılaştırılarak, geçerliliklerinin gösterilmesi,
- Geliştirilen modeller kullanarak, DA uyarımın her iki transformatörün kayıplarına, reaktif güç talebine, boşa çalışma akımının etkin değerine ve harmonik bozulmasına etkilerinin analizi,
- Yine geliştirilen modeller kullanılarak, her iki transformatör tipinin, anma toplam kaybı, primer sargı anma akımı ve primer sargı anma kaybı sınırlamalarına (yaklaşımlarına) göre DA uyarım altında transformatörün azami yüklenme oranının (AYO) analizi,
- Manyetik malzeme tipi ve nüve kesiti tasarım parametrelerinin DA uyarım altında transformatör AYO değerinin iyileştirilmesine etkisinin analizi,

amaçlanmıştır.

1.3 Tezin Sınırları

Bu tez çalışmasının sınırları;

- Gerilim, akım ve DA uyarım koşullarının dengeli kabul edilmesi,
- Geliştirilen modellerde, transformatör nüve kayıplarının frekans bağımlılığının ihmal edilmesi,
- Geliştirilen modellerde, sargı girdap akımı kayıpları ve diğer kaçak kayıpların frekans bağımlılığı tanımlanırken IEEE C.57.110 standardında [81] verilen kayıp ifadelerinin dikkate alınması,
- Analizlerde saf rezistif yük kullanılması,

olarak sıralanabilir.

1.4 Tezin İçeriği

Bu tez çalışması, giriş bölümünün devamında aşağıda kısaca özetlenen altı bölümden oluşmaktadır:

İkinci bölümde, DA uyarımın tek fazlı kabuk tipi nüveli ve üç fazlı beş bacaklı çekirdek tipi nüveli transformatörlere etkilerini analiz etmek amacıyla MATLAB/Simulink ortamında geliştirilen ve sargıların frekans bağımlılığını dikkate alan elektrik-manyetik eşdeğer devre modelleri tanıtılmıştır. Bu bağlamda ilk olarak, modellemeye temel oluşturan IEEE Standartları olan C57.12.90 ve C57.110'da tanımlı kayıp ifadeleri sunulmuştur. Daha sonra DA uyarım analizleri için tez çalışmaları kapsamında geliştirilen tek fazlı kabuk tipi nüveli ve üç fazlı beş bacaklı çekirdek tipi nüveli transformatör modellerine ait devre şematikleri ve ifadeler verilmiştir. Son olarak, geliştirilen ve iki boyutlu (2B) SEY modellerinin sonuçları karşılaştırmalı olarak değerlendirilerek, geliştirilen modellerin geçerliliği sinüzoidal anma gerilim ve DA uyarım bileşenli gerilim şartları için gösterilmiştir.

nc bölümde, geliştirilen modeller kullanılarak DA uyarımın, tek fazlı kabul tipi nüveli ve üç fazlı beş bacaklı çekirdek tipi nüveli transformatörlerin boşta çalışma durumunda, akım harmonik bozulma seviyeleri, akım etkin değerleri, kayıpları ve reaktif güç taleplerine etkileri analiz edilmiştir.

Dördüncü bölümde, DA uyarım koşulları altında transformatörün ömür kaybına uğramadan çalışması için üç farklı AYO veya deretasyon faktörü belirleme yaklaşımı, geliştirilen modeller yardımıyla tek fazlı kabuk tipi ve üç fazlı beş bacaklı çekirdek tipi nüveli transformatörler için niceliksel olarak değerlendirilmiştir. Bu yaklaşımlar; (i) transformatörün anma primer sargı akım etkin değerleri, (ii) anma toplam kaybı ve (iii) anma primer sargı kaybı sınırlamalarına dayanmaktadır.

Beşinci bölümde, dikkate alınan transformatör tipleri için (i) manyetik nüve malzemesi cinsi ve (ii) nüve kesit alanı artırımı tasarım seçeneklerinin DA uyarım altında AYO iyileştirmesine etkileri analiz edilmiştir.

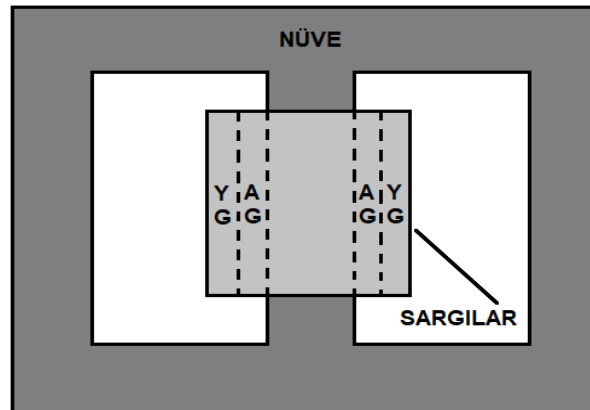
Son bölümde ise, daha önceki bölümlerde elde edilen sonuçlar özetlenmiş ve tezin devamı niteliğindeki gelecek çalışmalar tartışılmıştır.

2. TRANSFORMATÖRLERİN DA UYARTIM ALTINDA MODELLENMESİ

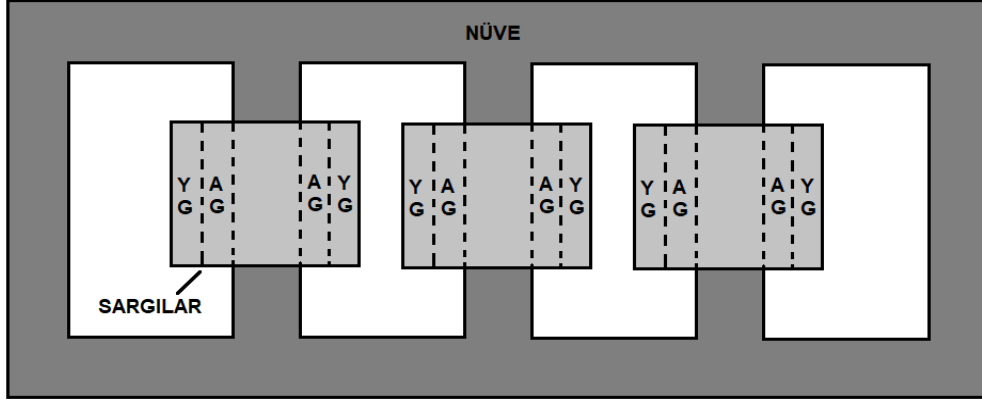
Bu bölümde, öncelikle, tez çalışması kapsamında DA uyartım altında tek fazlı kabuk tipi nüveli ve üç fazlı beş bacaklı çekirdek tipi nüveli transformatörlerin analizi için geliştirilen modeller tanıtılmıştır. Daha sonra, DA uyartım analizlerinin gerçekleştirildiği test sistemi üzerine bilgi verilmiştir. Geliştirilen model ve test sistemi, güç sistem analizlerinde son yıllarda yaygın bir şekilde kullanılan Matlab/SIMULINK yazılımı kullanılarak oluşturulmuştur.

Bununla birlikte, dikkate alınan transformatör tipleri için Maxwell Ansys yazılım ortamında oluşturulan 2B SEY modelleri ve geliştirilen modellerin sonuçları sinüzoidal anma ve çeşitli seviyelerde DA uyartım şartlarında karşılaştırmalı olarak analiz edilmiştir. Böylece, bu modellerin her iki analiz şartlarında geçerliliği gösterilmiştir. Geçerlilik analizinde, SEY model sonuçlarının referans olarak dikkate alınmasının sebebi, bu modelleme tekniğinin transformatör tasarımı ve analizi için literatürde yaygın olarak kullanılması ve hassasiyetinin yüksek olmasıdır [19], [82]-[84].

Önceki bölümde verilen literatür taramasından görüldüğü üzere, transformatörlerin DA uyartım hassasiyeti, özellikle faz sayılarına, nüve tiplerine ve nüve bacak sayılarına bağlıdır. Bu doğrultuda, DA uyartıma hassasiyeti yüksek olan tek fazlı kabuk tipi nüveli ve üç fazlı beş bacaklı çekirdek tipi nüveli transformatörler tez kapsamında yapılan modelleme ve analiz çalışmalarında dikkate alınmıştır. Bu iki transformatöre ait nüve ve sargı yapıları Şekil 2.1 ve Şekil 2.2’de sunulmuştur.



Şekil 2.1: Tek fazlı kabuk tipi nüveli transformatör.

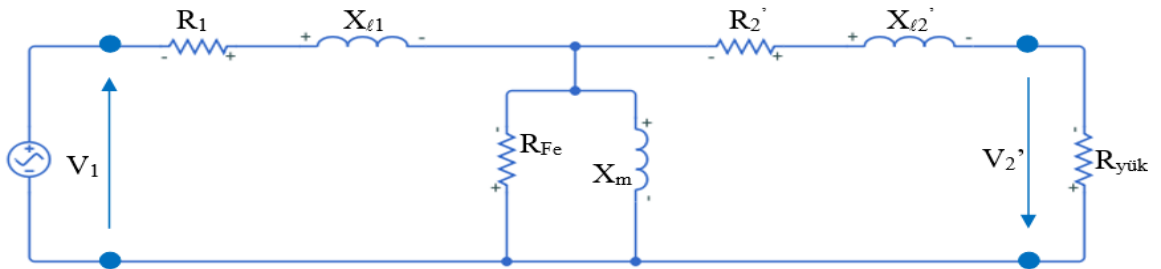


Şekil 2.2: Üç fazlı beş bacaklı çekirdek tipi nüveli transformatör.

2.1 Transformatör kayıpları

Literatürde iyi bilinen iki sargılı bir transformatöre ait elektrik eşdeğer devre Şekil 2.3'den görülmektedir. Bu eşdeğer devrede bulunan devre parametreleri, kısa devre ve boşa çalışma deney sonuçları kullanılarak belirlenir [85], [86]. Bu parametreler, sırasıyla, R_1 ve $X_{\ell 1}$ primer sargının direnci ve kaçak reaktansı, R_2' ve $X_{\ell 2}'$ sekonder sargının primer taraftan görünen direnci ve kaçak reaktansı, R_{Fe} ve X_m ise nüvenin direnci ve mıknatıslanma reaktansıdır.

Bu eşdeğer devrede, transformatörün sinüzoidal anma gerilim koşullarında çalıştığı durumlarda, nüvenin doyma karakteristiği diğer bir deyişle X_m parametresinin manyetik akı yoğunluğuna bağlı değişimi dikkate alınmaz. Ayrıca, modelde sargı dirençlerinin ve nüve direncinin frekans bağımlılığı ihmal edilir.



Şekil 2.3: İki sargılı transformatörler için elektrik eşdeğer devre.

Bu eşdeğer devre ışığında, transformatör kayıpları, sargı ve nüve kayıpları olmak üzere iki ana parçaya ayrılır. Sinüzoidal anma besleme gerilimi altında, boşa çalışma durumu için sargı kayıpları nüve kayıplarına göre ihmal edilebilir seviyededir. Diğer taraftan, özellikle güç transformatörleri için anma gücünde yüklenme durumunda kaybın büyük bir kısmı

sargılar kaynaklıdır. Dolayısıyla, literatürde nüve kayıpları ve sargı kayıpları, sırasıyla boşta ve yükte kayıplar olarak da isimlendirilir [81], [87], [88].

Boşta kayıplar,

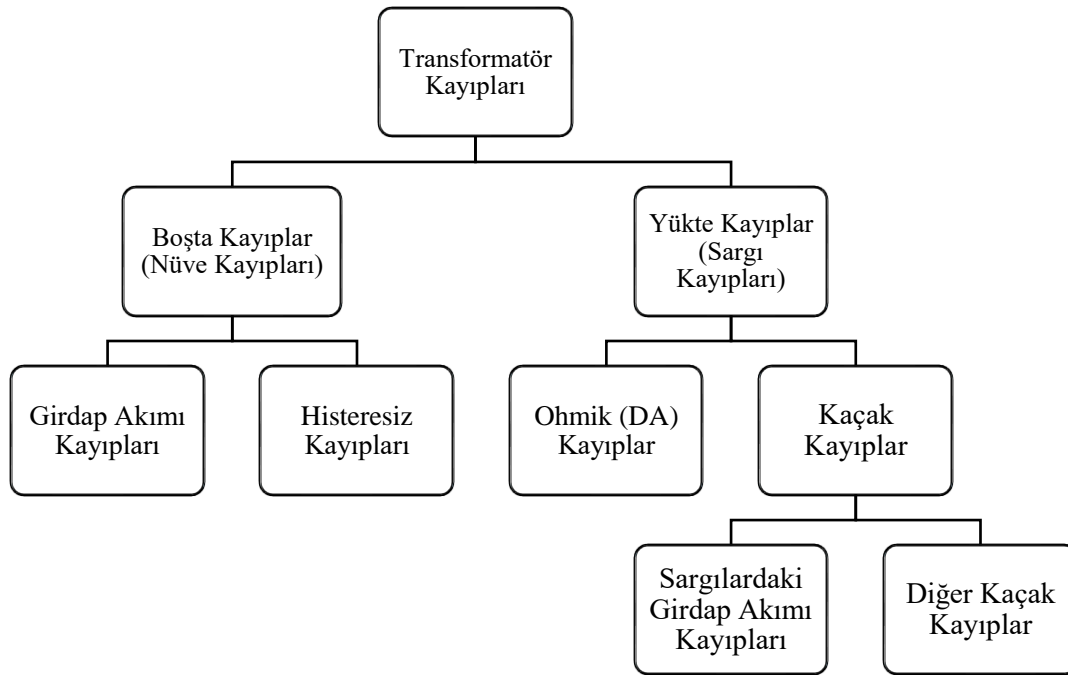
- Girdap akımı kaybı,
- Histeresiz kaybı,

olmak üzere ikiye ayrılır.

Yükteki kayıplar ise,

- Ohmik kayıp,
- Kaçak kayıplar

olmak üzere iki ana kısma ayrılır. Kaçak kayıplar, sargılardaki girdap akımı kayıpları ile diğer kaçak kayıplar olmak üzere iki parçadan oluşur. Transformatör kayıplarının sınıflandırmasını izah eden grafik Şekil 2.4’de sunulmuştur.



Şekil 2.4: Transformatör kayıpları.

2.1.1 Sinüzoidal Olmayan Gerilimler Altında Nüve kayıpları

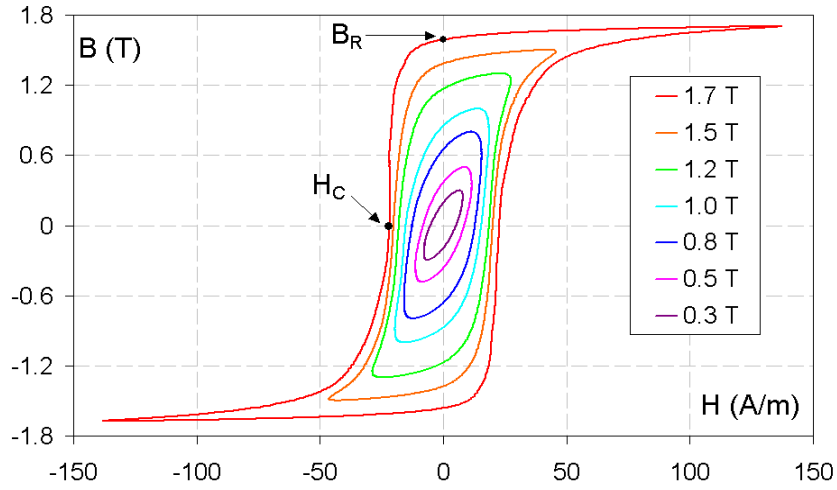
Nüve kayıplarının bir parçası olan histeresiz kaybı, transformatöre alternatif akım uyartım gerilimi uygulandığında, nüve malzemesi içindeki domen adı verilen mikroskobik yapıların uygulanan alanın yönüne ve genliğine bağlı olarak yönelimlerini değiştirmelerine bağlı olarak meydana gelen kayıplardır. Bu kayıp, ismini B-H döngüleri yani Histerezis döngülerinden alır. Histerezis döngüleri dolayısıyla ilgili kayıplar, malzeme cinsine ve malzemeye uygulanan manyetik akı yoğunluğunun genliği ile frekansına diğer bir deyişle uygulanan uyartım geriliminin genliğine ve frekansına bağlıdır [89].

Bu durumu izah için çeşitli manyetik akı yoğunluğu genlik seviyeleri ve çeşitli frekans seviyelerinde örnek Histerezis döngüleri sırasıyla, Şekil 2.5 [90] ve Şekil 2.6 [91]'da sunulmuştur.

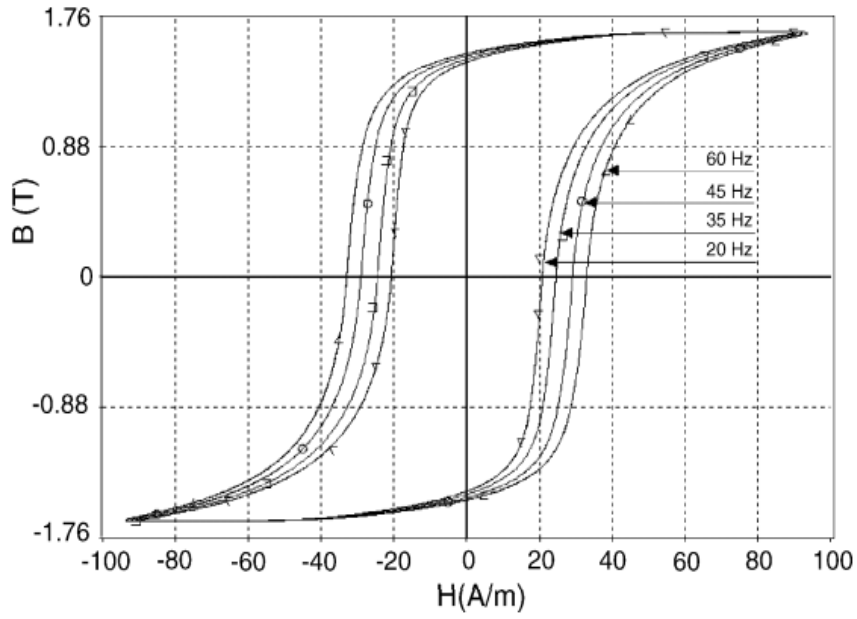
Bu Histerezis döngülerinin alanı, Histerezis kaybının büyüklüğünü verir. Buna göre, Histeresiz kaybının (P_H , Watt/Kg), uyartım geriliminin frekansı (f , Hz) ve nüvede meydana getirdiği manyetik akı yoğunluğu (B , Tesla) ile nüve malzemesi sabiti (σ_H) cinsinden ifadesi, Denklem (2.1)'de olduğu biçimde yazılabilir [89]:

$$P_H = \sigma_H \frac{f}{100} \left(\frac{B}{10000} \right)^2 \text{ (Watt/Kg)} \quad (2.1)$$

Denklem (2.1)'den Histerezis kaybının, malzemenin cinsine (σ_H) bağlı olduğu, ayrıca B 'nin karesi ve f ile doğru orantılı bir ilişkiye sahip olduğu görülmektedir.

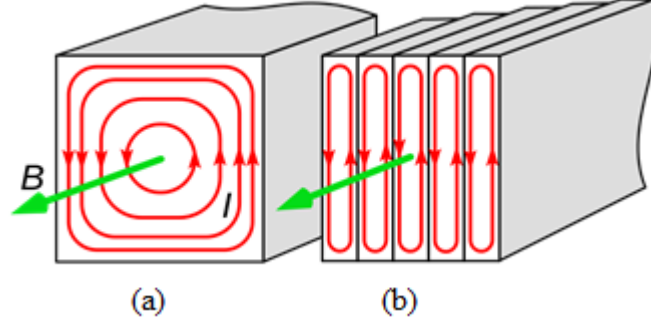


Şekil 2.5: Çeşitli manyetik manyetik akı yoğunluğu (B) seviyeleri için Histerezis (B-H) döngüleri [90].



Şekil 2.6: Çeşitli frekanslar için Histerezis (B-H) döngüleri [91].

Diğer bir nüve kaybı ise nüvede indüklenen gerilimler sebebiyle Şekil 2.7 [92]'de görüldüğü şekilde girdaba benzer akan akımların sebep olduğu ve girdap akımı (Fuko) kayıpları olarak isimlendirilen kayıplardır. Bu kayıplar, Histerezis kayıpları gibi nüve malzemesinin cinsine ve malzemeye uygulanan manyetik akı yoğunluğunun genliği ile frekansına bağlıdır.



Şekil 2.7: Girdap akımları (a) yek pare malzeme ve (b) lamine malzeme [92].

Kuvvet çizgilerinin dengeli yayıldığı ortamlar için Girdap akımı kayıplarının (P_F), f , B ve malzeme sabiti (σ_F) cinsinden ifadesi ise;

$$P_F = \sigma_F \left(\frac{f}{100} \right)^2 \left(\frac{B}{10000} \right)^2 \text{ (Watt/Kg)} \quad (2.2)$$

olarak yazılabilir [89]. Denklem (2.2)'den Girdap akımı kaybının, f 'nin ve B 'nin kareleriyle orantılı olduğu, dolayısıyla bu kaybın Histerezis kaybına göre frekansın değişiminden daha fazla etkilendiği ifade edilebilir.

Nihayetinde, buraya kadar sunulan h. harmonik için girdap akımı ve histerezis kayıp ifadeleri dikkate alınarak, bozulmuş gerilimler altında h. Harmonik demir kaybı (P_{Feh}) ve harmoniklerin tümü için toplam demir kaybı (P_{Fe}), sırasıyla

$$P_{Feh} = \left[\sigma_H \frac{f_h}{100} + \sigma_F \left(\frac{f_h}{100} \right)^2 \right] \left(\frac{B_h}{10000} \right)^2 \text{ (Watt/Kg)} \quad (2.3)$$

$$P_{Fe} = \sum_h P_{Feh} \quad (2.4)$$

biçiminde yazılabilir [89].

Yukarıda sunulan kayıp eşitliklerinden, transformatör nüve kaybının besleme geriliminin frekansı ile arttığı göz önüne alındığı takdirde, geliştirilen modellerde nüve kayıplarının frekans bağımlılığının ihmal edilmesinin, DA uyarım altında transformatör toplam kayıp hesabında önemli bir hataya yol açmayacağı ifade edilebilir.

2.1.2 Sargı Kayıpları

Daha önce bahsedildiği üzere, DA uyarım, transformatörlerin doyuma girmesine ve önemli derecede bozulmuş dalga formuna sahip uyarma akımları çekmelerine sebep olabilir [7], [8], [15]. Bundan dolayı, DA uyarım koşulları altında transformatörlerin davranışlarının, kayıplarının ve yeniden boyutlandırma çalışmalarının daha hassas gerçekleştirilebilmesi için kullanılan modellerde sargı dirençlerinin frekansa bağımlılığının dikkate alınması gereklidir. Bu tez kapsamında geliştirilen modellerde, sargı dirençlerinin frekansa bağımlılığı ifade edilirken IEEE Std. C57.12.90 [93] ve IEEE Std. C57.110 [81]'de verilen kayıp tanımları göz önüne alınmıştır.

Bu standartlara göre, yükteki kayıplar veya sargı kayıpları (P_{LL}), ohmik sargı kayıpları (P_{DC}) ve toplam kaçak kayıpların (P_{TSL}) toplamı olarak ifade edilebilir:

$$P_{LL} = P_{DC} + P_{TSL} \quad (2.5)$$

P_{TSL} , sargı girdap akımı kayıpları (P_{EC}) ve tank gibi transformatörün yapısal parçalarında oluşan diğer kaçak kayıpların (P_{OSL}) toplamı olarak yazılabilir:

$$P_{TSL} = P_{EC} + P_{OSL} \quad (2.6)$$

P_{DC} ise primer ve sekonder sargı akımlarının etkin değerleri (I_P ve I_S) ile primer ve sekonder sargıların DA dirençleri (R_{DCp} ve R_{DCs}) cinsinden hesaplanır:

$$P_{DC} = I_P^2 R_{DCp} + I_S^2 R_{DCs} \quad (2.7)$$

Bu ifadedeki I_P ve I_S sırasıyla Denklem (2.8) ve (2.9)'dan bulunabilir:

$$I_P = \sqrt{\frac{1}{T} \int_0^T i_P(t)^2 dt} = \sqrt{I_{PDC}^2 + \sum_{h=1}^{hmax} I_{Ph}^2} \quad (2.8)$$

$$I_S = \sqrt{\frac{1}{T} \int_0^T i_S(t)^2 dt} = \sqrt{\sum_{h=1}^{hmax} I_{Sh}^2} \quad (2.9)$$

Bu iki denklemde yer alan $i_P(t)$ ve $i_S(t)$ primer ve sekonder akımlarının anlık değerleri olup aşağıda verilen şekilde ifade edilebilirler:

$$i_p(t) = I_{PDC} + \sum_{h=1}^{hmax} \sqrt{2} I_{ph} \sin(h\omega_0 t + \varphi_{ph}) \quad (2.10)$$

$$i_s(t) = \sum_{h=1}^{hmax} \sqrt{2} I_{sh} \sin(h\omega_0 t + \varphi_{sh}) \quad (2.11)$$

Denklem (2.8)-(2.11)'de, T periyot, ω_0 temel açısal frekans, h harmonik numarası, I_{PDC} ve I_{ph} primer sargı akımının DA ve h. harmonik bileşenleri, I_{sh} sekonder sargı akımının h. harmonik bileşeni, φ_{ph} ve φ_{sh} primer ve sekonder sargı akımlarının h. harmonik bileşenlerinin faz açılarıdır.

Bunlara ek olarak, yüksek güç değerine sahip (güç değeri > 3000 kVA olan) yağlı tip transformatörler için IEEE Std. C57.110'a göre, P_{EC} ve P_{OSL} 'nin nominal değerleri Denklem (2.12) kullanılarak yaklaşık olarak hesap edilebilir:

$$P_{EC}=0.40P_{TSL}, P_{OSL}=0.60P_{TSL} \quad (2.12)$$

Aynı standarda göre harmonikli akım şartlarında, P_{EC} ve P_{OSL} aşağıda verilen ifadelerle bulunabilir:

$$P_{EC} = \sum_{h=1}^{hmax} R_{ECp1} I_{ph}^2 h^2 + \sum_{h=1}^{hmax} R_{ECs1} I_{sh}^2 h^2 \quad (2.13)$$

$$P_{OSL} = \sum_{h=1}^{hmax} R_{OSLp1} I_{ph}^2 h^{0.8} + \sum_{h=1}^{hmax} R_{OSLs1} I_{sh}^2 h^{0.8} \quad (2.14)$$

Denklemler (2.13) ve (2.14)'de R_{ECp1} ve R_{OSLp1} temel frekans girdap akımı ve diğer kaçak kayıplarla ilişkili primer sargı dirençlerini, R_{ECs1} ve R_{OSLs1} temel frekans girdap akımı ve diğer kaçak kayıplarla ilişkili sekonder sargı dirençlerini temsil etmektedir.

Böylece, IEEE Std. C57.12.90 ve IEEE Std. C57.110'da yer alan kayıp ifadeleri dikkate alınarak, primer ve sekonder sargıların h. harmonik numarası için dirençleri, (2.15) ve (2.16)'da verilen eşitliklerle modellenebilir. Bu eşitlikler göz önüne alınarak geliştirilen modelde sargı dirençlerinin frekans bağımlılığı tanımlanmıştır:

$$R_{Acph} = R_{DCp} + h^2 R_{Ecp1} + h^{0.8} R_{OSLp1} \quad (2.15)$$

$$R_{Acsh} = R_{DCs} + h^2 R_{Ecs1} + h^{0.8} R_{OSLs1} \quad (2.16)$$

2.2 Tek Fazlı Kabuk Tipi Nüveli ve Üç Fazlı Beş Bacaklı Çekirdek Tipi Nüveli

Transformatörler için Geliştirilen Modeller

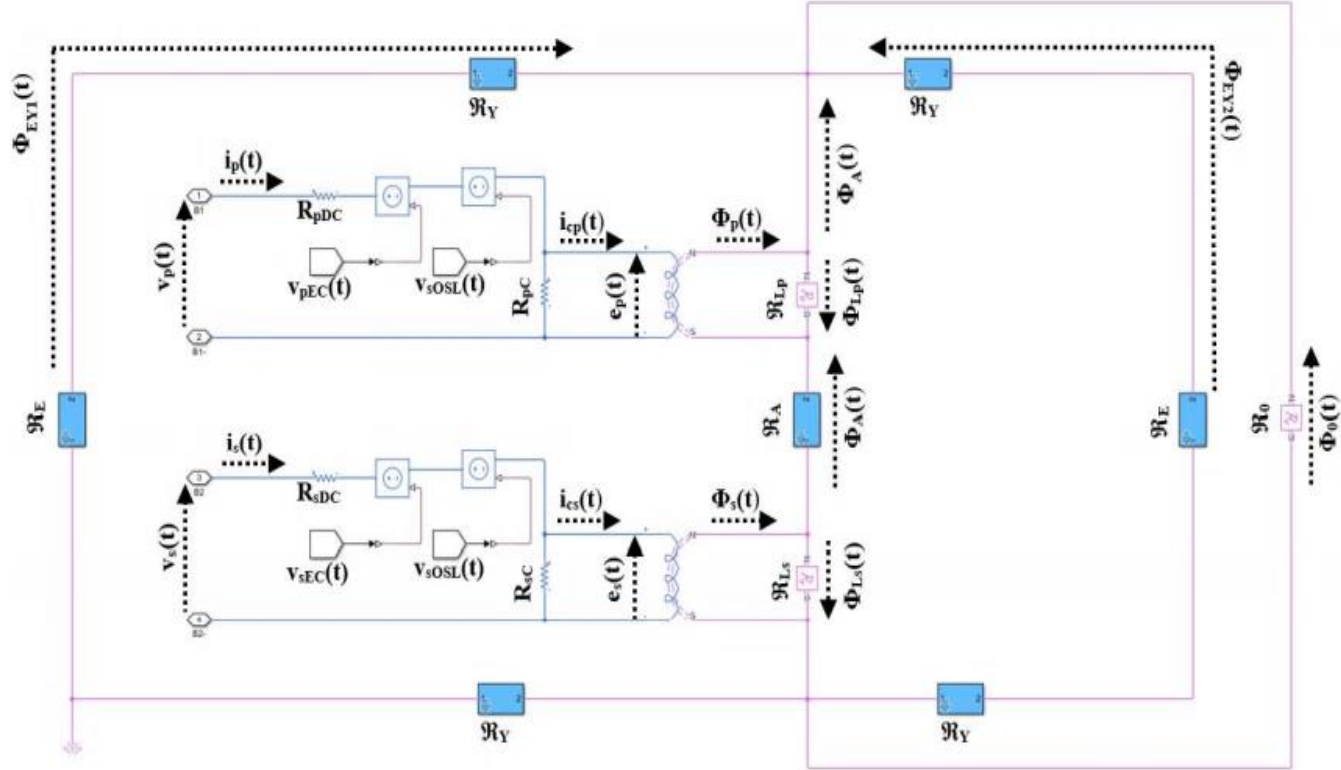
Matlab/SIMULINK ortamında tek fazlı kabuk tipi ve üç fazlı beş bacaklı çekirdek tipi nüveli transformatörler için geliştirilen elektrik-manyetik eşdeğer devre (relüktans tabanlı) modellerin blok diyagramları Şekil 2.8 ve Şekil 2.9’da verilmiştir. Geliştirilen modeller, diğer relüktans tabanlı modellerde olduğu gibi manyetik ve elektrik eşdeğer devre olmak üzere iki ana kısımdan oluşmaktadır. Geliştirilen modellere ait bu devre parçaları aşağıda detaylı biçimde tanıtılmıştır:

2.2.1 Geliştirilen Modellerin Elektrik Eşdeğer Devre Kısımı

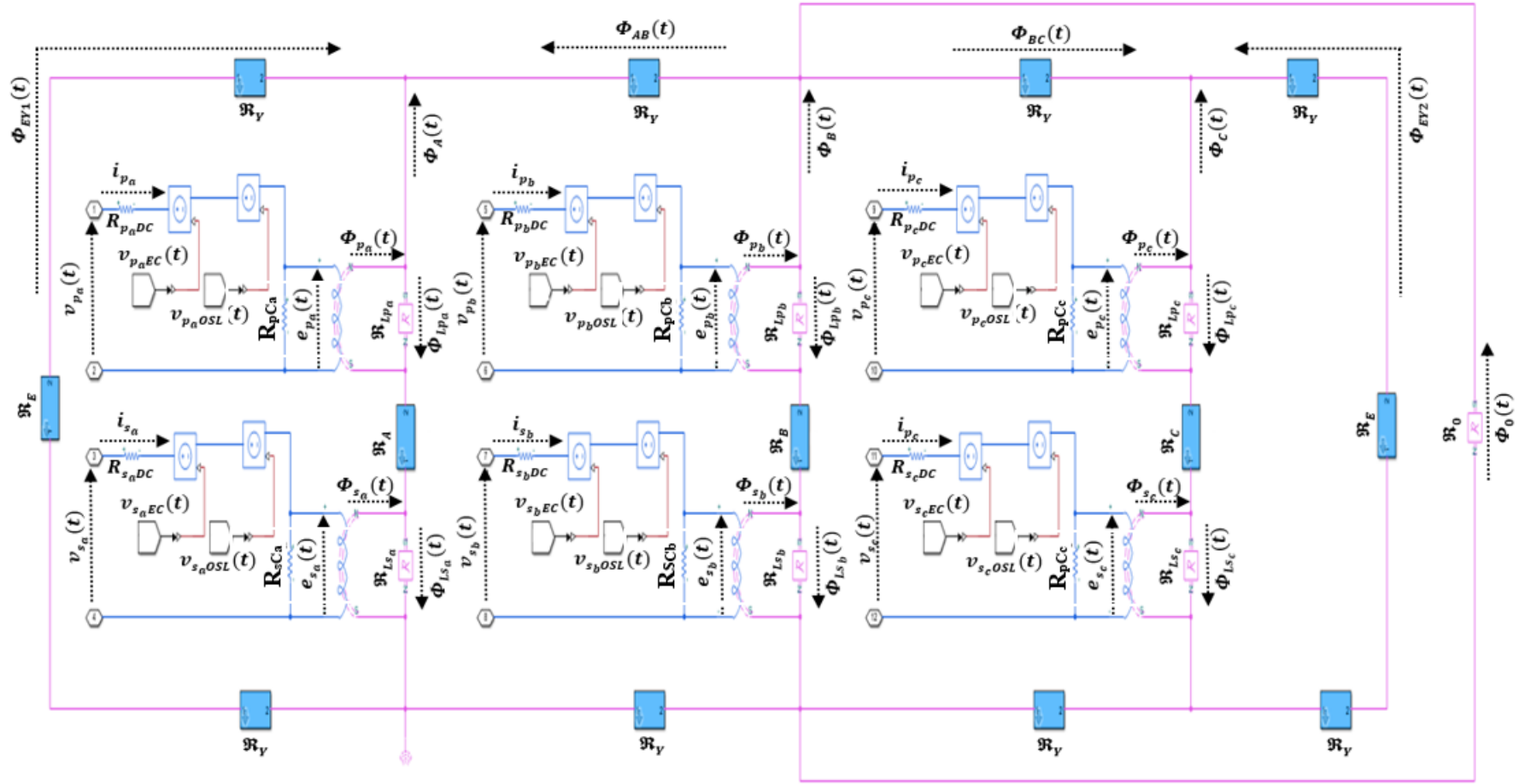
Şekil 2.8 ve Şekil 2.9’dan görüldüğü üzere, geliştirilen modellerin elektrik eşdeğer devresi her bir faz için direnç ve kontrollü gerilim kaynaklarından oluşmaktadır. Bu elemanlar,

- Primer ve sekonder sargıların DA dirençleri (tek fazlı transformatör için R_{pDC} ve R_{sDC} , üç fazlı transformatör için $m=a,b,c$ fazlarına ait R_{pmDC} ve R_{smDC}),
- Tek fazlı transformatör eşdeğer devresinde girdap akımı kayıplarıyla ilişkili h. harmonik primer ve sekonder sargı dirençlerini ($R_{ECph}=h^2R_{ECp1}$ ve $R_{ECsh}=h^2R_{ECs1}$) modele dahil etmek için tanımlanan $v_{pEC}(t)$ ve $v_{sEC}(t)$ kontrollü gerilim kaynakları,
- Üç fazlı transformatör eşdeğer devresinde girdap akımı kayıplarıyla ilişkili h. harmonik primer ve sekonder sargı dirençlerini ($m=a,b,c$ fazlarına ait $R_{ECpmh}=h^2R_{ECpm1}$ ve $R_{ECsmh}=h^2R_{ECsm1}$) modele dahil etmek için tanımlanan $m=a,b,c$ fazları için $v_{pEC}(t)$ ve $v_{smEC}(t)$ kontrollü gerilim kaynakları,
- Tek fazlı transformatör eşdeğer devresinde diğer kaçak kayıplarla ilişkili h. harmonik primer ve sekonder sargı dirençlerini ($R_{OSLph}=h^{0.8}R_{OSLp1}$ ve $R_{OSLsh}=h^{0.8}R_{OSLs1}$) modele dahil etmek için tanımlanan $v_{pOSL}(t)$ ve $v_{sOSL}(t)$ kontrollü gerilim kaynakları,
- Üç fazlı transformatör eşdeğer devresinde diğer kaçak kayıplarla ilişkili h. harmonik primer ve sekonder sargı dirençlerini ($m=a,b,c$ fazlarına ait $R_{OSLpmh}=h^{0.8}R_{OSLpm1}$ ve $R_{OSLsmh}=h^{0.8}R_{OSLsm1}$) modele dahil etmek için tanımlanan $v_{pOSL}(t)$ ve $v_{smOSL}(t)$ kontrollü gerilim kaynakları,
- Primer ve sekonder taraflara paylaştırılmış nüve kayıplarını temsil eden dirençler (tek fazlı transformatör için R_{pC} ve R_{sC} , üç fazlı transformatör için $m=a,b,c$ fazlarına ait R_{pCm} ve R_{sCm}),

olarak sıralanabilir.

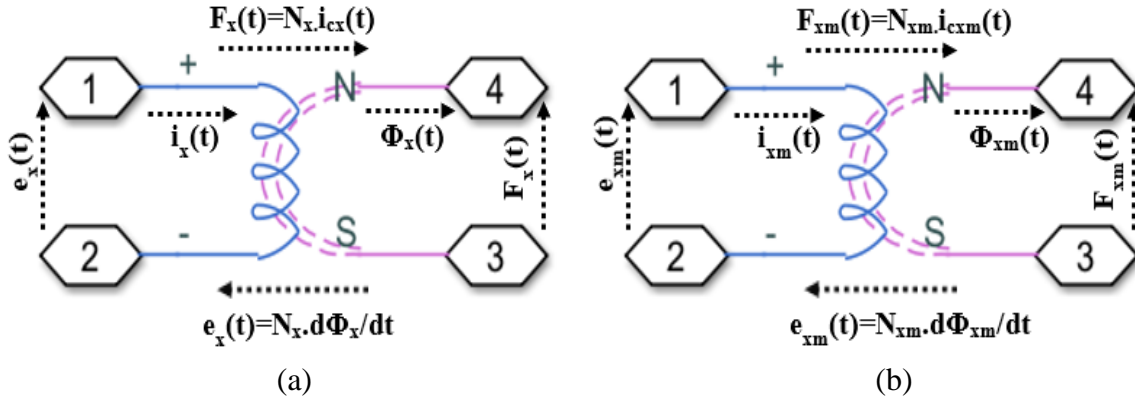


Şekil 2.8: Tek fazlı kabuk tipi nüveli transformatörler için geliştirilen modelin devre şeması.



Şekil 2.9: Üç fazlı beş bacaklı çekirdek tipi nüveli transformatörler için geliştirilen modelin devre şeması.

Matlab/Simulink ortamında, tek fazlı kabuk tipi nüveli ve üç fazlı beş bacaklı çekirdek tipi nüveli transformatör modellerinde, sargıların elektrik eşdeğer devreleri, Şekil 2.10'da gösterilen dönüştürücü blokları vasıtasıyla manyetik eşdeğer devrelere bağlanır.



Şekil 2.10: Dikkate alınan (a) tek fazlı ve (b) üç fazlı transformatörlere ait modellerdeki manyetik ve elektrik eşdeğer devreleri arasında bağlanan dönüştürücü blokları.

Şekil 2.10 (a)'da tek fazlı transformatörün modeline ait blok, Denklem (2.17)'de verilen ifadeye göre elektriksel ve manyetik büyüklükler arasında dönüşümü sağlar [58], [94]. Bu denklemde, primer ve sekonder taraflar ($x=p, s$) için $e_x(t)$ ve $i_{cx}(t)$, sırasıyla çekirdek dirençleri üzerindeki gerilim düşümleri ve çekirdeğin çektiği akımların anlık değerleridir. $F_x(t)$ ve $\Phi_x(t)$, sırasıyla primer ve sekonder taraflardaki anlık manyetomotor kuvvetleri ve anlık toplam manyetik akıları temsil eder. N_x , $x=p, s$ için primer ve sekonder sargı sipir sayısını gösterir:

$$\begin{bmatrix} F_x(t) \\ e_x(t) \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} N_x & 0 \\ 0 & N_x d/dt \end{bmatrix} \begin{bmatrix} i_{cx}(t) \\ \Phi_x(t) \end{bmatrix} \quad x = p, s \text{ için} \quad (2.17)$$

Üç fazlı transformatörün modelinde yer alan $m=a,b,c$ fazlarına ait dönüştürücü blokları için elektrik ve manyetik büyükler arasındaki eşitlik ise;

$$\begin{bmatrix} F_{xm}(t) \\ e_{xm}(t) \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} N_{xm} & 0 \\ 0 & N_{xm} d/dt \end{bmatrix} \begin{bmatrix} i_{cxm}(t) \\ \Phi_{xm}(t) \end{bmatrix} \quad x = p,s \text{ ve } m=a,b,c \text{ için} \quad (2.18)$$

olarak yazılabilir.

Matlab/SIMULINK ortamında, elektrik devresinde bilinmeyen gerilimler ve akımlar, geçici hal analiziyle, tek faz transformatör modeli için denklem (2.19) ve (2.20)'de verilen diferansiyel durum denklemleri çözülerek bulunur:

$$v_p(t) = R_{pDC}i_p(t) + v_{pEC}(t) + v_{pOSL}(t) + N_p \frac{d\Phi_p}{dt} \quad (2.19)$$

$$v_s(t) = R_{sDC}i_s(t) + v_{sEC}(t) + v_{sOSL}(t) + N_s \frac{d\Phi_s}{dt} \quad (2.20)$$

Bu denklemlerde, $i_p(t)$ ve $i_s(t)$ 'nin ifadeleri aşağıda verilen şekilde yazılabilir:

$$i_p(t) = \frac{e_p(t)}{R_{pC}} + i_{Cp}(t) \quad (2.21)$$

$$i_s(t) = \frac{e_s(t)}{R_{sC}} + i_{Cs}(t) \quad (2.22)$$

Ayrıca, denklem (2.19) ve (2.20)'de yer alan kontrollü kaynak gerilimleri,

$$v_{PEC}(t) = \sum_{h=1}^{hmax} \sqrt{2} I_{Ph} \sin(h\omega_0 t + \varphi_{ph}) R_{ECp1} h^2 \quad (2.23)$$

$$v_{SEC}(t) = \sum_{h=1}^{hmax} \sqrt{2} I_{Sh} \sin(h\omega_0 t + \varphi_{sh}) R_{ECs1} h^2 \quad (2.24)$$

$$v_{POS�}(t) = \sum_{h=1}^{hmax} \sqrt{2} I_{Ph} \sin(h\omega_0 t + \varphi_{ph}) R_{OSLp1} h^{0.8} \quad (2.25)$$

$$v_{SOSL}(t) = \sum_{h=1}^{hmax} \sqrt{2} I_{Sh} \sin(h\omega_0 t + \varphi_{sh}) R_{OSLs1} h^{0.8} \quad (2.26)$$

olarak ifade edilebilir.

Üç fazlı transformatör modelinin elektrik devresinde, bilinmeyen akımları ve gerilimleri bulmak için, m=a, b, c fazları olmak üzere denklem (2.27) ve (2.28)'de ifade edilen diferansiyel durum denklemleri kullanılarak Matlab/SIMULINK'te geçici durum analizi yapılır:

$$v_{pm}(t) = R_{pmDC}i_{pm}(t) + v_{pmEC}(t) + v_{pmOSL}(t) + N_{pm} \frac{d\Phi_{pm}}{dt} \quad (2.27)$$

$$v_{sm}(t) = R_{smDC}i_{sm}(t) + v_{smEC}(t) + v_{smOSL}(t) + N_{sm} \frac{d\phi_{sm}}{dt} \quad (2.28)$$

Burada, $i_{pm}(t)$ and $i_{sm}(t)$ şu şekilde ifade edilebilir:

$$i_{pm}(t) = \frac{e_{pm}(t)}{R_{pmC}} + i_{cpm}(t) \quad (2.29)$$

$$i_{sm}(t) = \frac{e_{sm}(t)}{R_{smC}} + i_{csm}(t) \quad (2.30)$$

Bununla birlikte; $v_{pmEC}(t)$, $v_{smEC}(t)$, $v_{pmOSL}(t)$ ve $v_{smOSL}(t)$ aşağıda verilen ifadelerle tanımlanabilir:

$$v_{pmEC}(t) = \sum_{h=1}^{hmax} \sqrt{2} I_{pmh} \sin(h\omega_0 t + \varphi_{pmh}) R_{ECpm1} h^2 \quad (2.31)$$

$$v_{smEC}(t) = \sum_{h=1}^{hmax} \sqrt{2} I_{smh} \sin(h\omega_0 t + \varphi_{smh}) R_{ECsm1} h^2 \quad (2.32)$$

$$v_{pmOSL}(t) = \sum_{h=1}^{hmax} \sqrt{2} I_{pmh} \sin(h\omega_0 t + \varphi_{pmh}) R_{OSLpm1} h^{0.8} \quad (2.33)$$

$$v_{smOSL}(t) = \sum_{h=1}^{hmax} \sqrt{2} I_{smh} \sin(h\omega_0 t + \varphi_{smh}) R_{OSLsm1} h^{0.8} \quad (2.34)$$

2.2.2 Geliştirilen Modellerin Manyetik Eşdeğer Devre Kısmı

Geliştirilen modelin manyetik eşdeğer devre kısmı, DA uyartım koşulları altında transformatörün doyma etkisini analiz edebilmek için nüve malzemelerinin B-H eğrisine ve manyetik nüve geometrisine ihtiyaç duyar. Bu veriler transformatör üretim firmasının test raporlarından ve nüve malzemesinin üreticisinin sunduğu ölçüm verilerinden elde edilebilir.

Modellerin manyetik eşdeğer devrelerinde, ana bacaklara ait “ \mathcal{R}_A , \mathcal{R}_B ve \mathcal{R}_C ” relüktansları, dış bacaklara ait “ \mathcal{R}_E ” relüktansları ve bacakları birbirine bağlayan “ \mathcal{R}_Y ” relüktansları bulunur. Devredeki diğer relüktanslar ise,

- Primer sargı kaçak akısının aktığı hava aralığının relüktansı; tek fazlı transformatör modeli için \mathfrak{R}_{Lp} ve üç fazlı transformatör modelinin m=a,b,c fazları için \mathfrak{R}_{Lpm} ,
- Sekonder sargı kaçak akısının aktığı hava aralığının relüktansı; tek fazlı transformatör modeli için \mathfrak{R}_{Ls} ve üç fazlı transformatör modelinin m=a,b,c fazları için \mathfrak{R}_{Lsm} ,
- Nüveden tanka akan kaçak akı relüktansı olan \mathfrak{R}_0 'dır.

\mathfrak{R}_0 transformatörün boшта testlerinden belirlenebilir. Kaçak relüktansların değerleri, tek fazlı ve üç fazlı transformatörler için ilgili sargının endüktans (L_{Cx} , L_{Cxm}) ve sipir sayısı (N_x , N_{xm}) cinsinden yazılabilir:

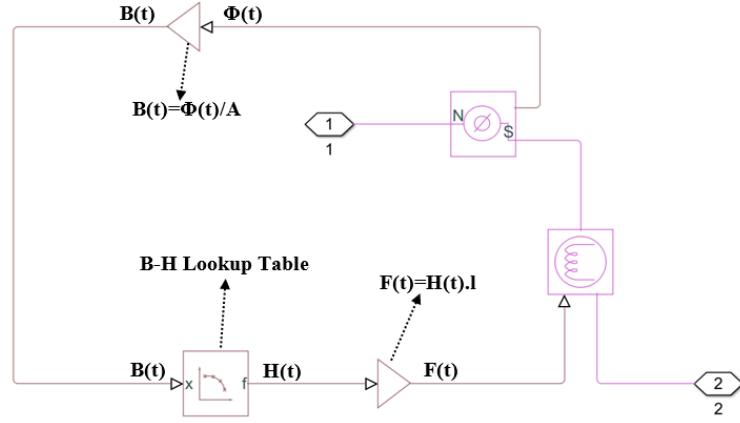
$$\mathfrak{R}_{Lx} = N_x^2 / L_{Cx} \quad x=p, s \quad (2.35)$$

$$\mathfrak{R}_{Lxm} = N_{xm}^2 / L_{Cxm} \quad x=p, s \text{ ve } m=a,b,c \text{ için} \quad (2.36)$$

\mathfrak{R}_A , \mathfrak{R}_B , \mathfrak{R}_C , \mathfrak{R}_E ve \mathfrak{R}_Y relüktansları ise, üzerlerine düşen manyetomotor kuvvetleri [$F_A(t)$, $F_B(t)$, $F_C(t)$, $F_E(t)$ ve $F_Y(t)$] ile manyetik eşdeğer devreye dahil edilmiştir. Şekil 2.11'de gösterilen blok, $F_A(t)$, $F_B(t)$, $F_C(t)$, $F_E(t)$ ve $F_Y(t)$ 'nin iteratif hesabı için oluşturulmuştur.

Bu iteratif hesaplamada,

- İlk olarak, ana bacak, dış bacaklar ve boyunduruklar için ölçülen manyetik akılar (Φ), bu parçalardaki manyetik akı yoğunluklarını (B) bulmak için ilgili nüve parçasının kesit alanına (A) bölünür,
- İkinci olarak, nüve malzemesinin B-H eğrisine ait döngü tablosu (Lookup Table) bloğu ile B değerine karşılık gelen manyetik alan şiddeti (H) belirlenir,
- Son olarak, nüve parçaları üzerindeki manyetomotor kuvvetler, manyetik alan şiddeti ile bacak veya boyunduruğun uzunluğunun (l) çarpılmasıyla ($F(t)=H(t)*l$) bulunur.



Şekil 2.11: \mathcal{R}_A , \mathcal{R}_B , \mathcal{R}_C , \mathcal{R}_E ve \mathcal{R}_Y relüktans bloklarının modellenmesi.

Buraya kadar tanıtilan manyetik eşdeğer devreye ait manyetik akı eşitlikleri, tek fazlı kabuk tipi nüveli transformatör modeli için Denklem (2.37)-(2.41)'de verilmiştir:

$$\Phi_{EY1}(t) + \Phi_{EY2}(t) + \Phi_A(t) + \Phi_0(t) = 0 \quad (2.37)$$

$$\Phi_p(t) = \Phi_A(t) + \Phi_{Lp}(t) \quad (2.38)$$

$$\Phi_s(t) = \Phi_A(t) + \Phi_{Ls}(t) \quad (2.39)$$

$$\Phi_{Lp}(t) = \frac{F_p(t)}{\mathcal{R}_{Lp}} \quad (2.40)$$

$$\Phi_{Ls}(t) = \frac{F_s(t)}{\mathcal{R}_{Ls}} \quad (2.41)$$

Üç fazlı beş bacaklı çekirdek tipi nüveli transformatörün manyetik eşdeğer devresine ait manyetik akı eşitlikleri ise,

$$\Phi_{EY1}(t) + \Phi_A(t) + \Phi_{AB}(t) = 0 \quad (2.42)$$

$$\Phi_B(t) + \Phi_0(t) = \Phi_{AB}(t) + \Phi_{BC}(t) \quad (2.43)$$

$$\Phi_{EY2}(t) + \Phi_C(t) + \Phi_{BC}(t) = 0 \quad (2.44)$$

$$\left. \begin{aligned} \Phi_{x_m}(t) &= \Phi_j(t) + \Phi_{Lx_m}(t) \\ \Phi_{Lx_m}(t) &= \frac{F_{x_m}(t)}{\mathfrak{R}_{Lx_m}} \end{aligned} \right\} \begin{aligned} &j=A, B, C \text{ ana bacaklar} \\ &m=a,b,c \text{ fazları} \\ &x=p,s \end{aligned} \quad \begin{aligned} &(2.45) \\ &(2.46) \end{aligned}$$

olarak ifade edilebilir.

Bu eşitliklerde, $\Phi_{EY1}(t)$, $\Phi_{EY2}(t)$, $\Phi_A(t)$, $\Phi_B(t)$, ve $\Phi_C(t)$ sırasıyla çekirdeğin sol, sağ ve ana bacaklarından geçen akıları, $\Phi_{AB}(t)$ ve $\Phi_{BC}(t)$ bacaklar arası akan akıları, diğer akılar ise kaçak akıları temsil etmektedir.

Geliştirilen modelin tek fazlı kabuk tipi nüveli ve üç fazlı beş bacaklı çekirdek tipi nüveli transformatörler için uygulanmasında, elektrik devresine ait diferansiyel durum denklemleri ile akı ifadeleri zaman tanım bölgesinde birlikte çözülür.

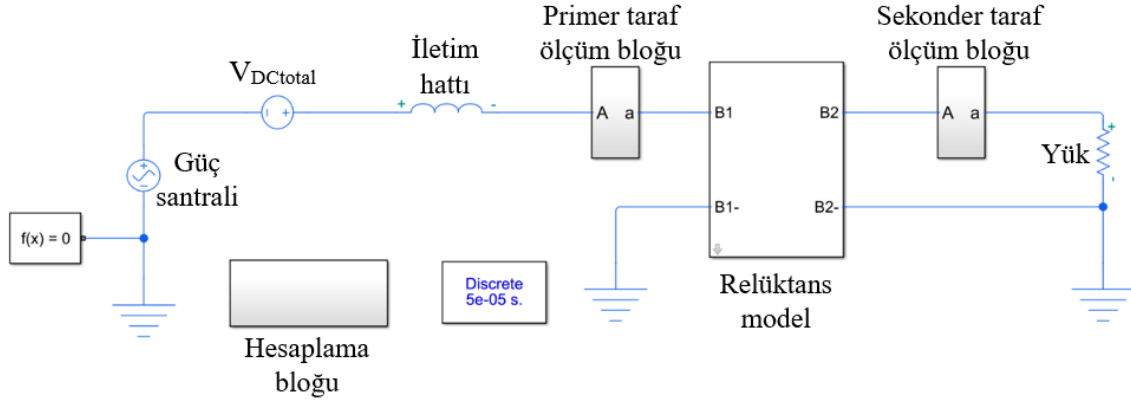
2.3 Geliştirilen Modellerin Geçerlilik Analizi

Geliştirilen elektrik-manyetik eşdeğer devre (relüktans tabanlı) modellerin, sinüzoidal ve DA uyartım bindirilmiş besleme gerilimi durumları altında tek fazlı kabuk tipi nüveli ve üç fazlı beş bacaklı çekirdek tipi nüveli transformatörler için geçerliliğini göstermek amacıyla 2B SEY modeliyle karşılaştırmalı analizine ilişkin sonuçlar burada sunulmuştur.

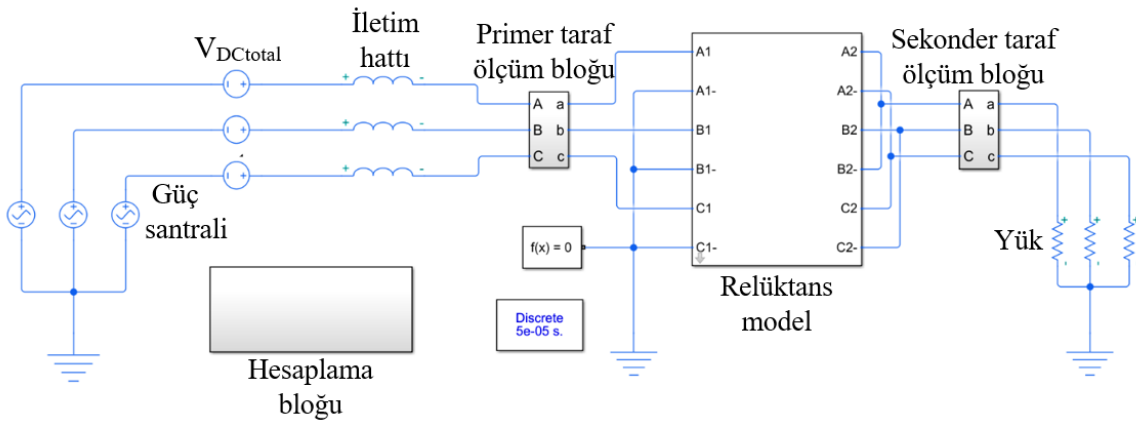
Analizlerde kullanılan test sistemlerinin, tek fazlı ve üç fazlı transformatörler için şemaları sırasıyla Şekil 2.12 ve 2.13’de verilmiştir. Bu test sistemlerinde, jeomanyetik fırtınalar sebebiyle iletim hattı üzerinde indüklenen DA gerilimlerini ($V_{Dc\text{total}}$) temsil etmek için DA gerilim kaynakları kullanılmıştır. Analizlerde, makul seviyede DA uyartım koşullarını oluştururken [36], [95]- [96]’da rapor edilen, jeomanyetik fırtınalar sırasında iletim hattında km başına düşen DA gerilim düşümü değerleri (V_{DC}) dikkate alınmıştır. Buna göre benzetim temelli analizlerde azami V_{DC} değeri 10 V/km olarak belirlenmiştir.

Analizlerde simüle edilen tek fazlı kabuk tipi nüveli transformatör 23.5 MVA ve 89/34.5 kV anma değerlerine, üç fazlı beş bacaklı çekirdek tipi nüveli transformatör ise 70 MVA ve 154/34.5 kV anma değerlerine sahiptir. Bu iki transformatör sargı gerilimleri ve faz başı görünür güçleri bakımından özdeştir. Her iki transformatörün nüveleri M5-0.30mm manyetik malzemedan üretilmiştir.

Test sisteminde iletim hattının gerilim seviyesi ve uzunluğu 89 Kv ve 100 km'dir. Yük olarak saf rezistif (ohmik) yük dikkate alınmıştır. Modellenen transformatörlerin ve iletim hattının diğer özellikleri ile parametreleri ekler kısmında sunulmuştur.

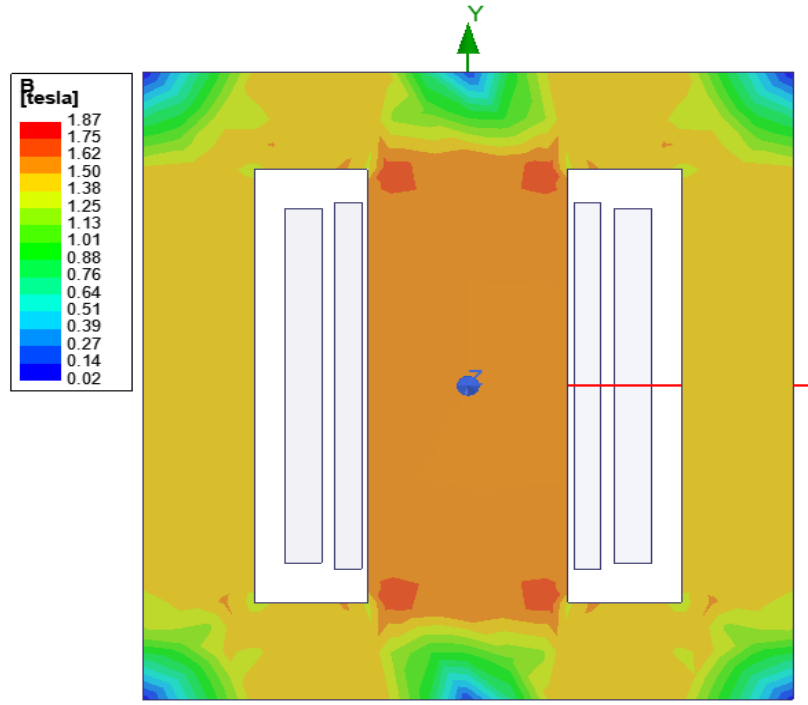


Şekil 2.12: Geliştirilen tek fazlı kabuk tipi nüveli transformatör modelinin geçerlilik analizi için Matlab/SIMULINK ortamında oluşturulan test sistemi.

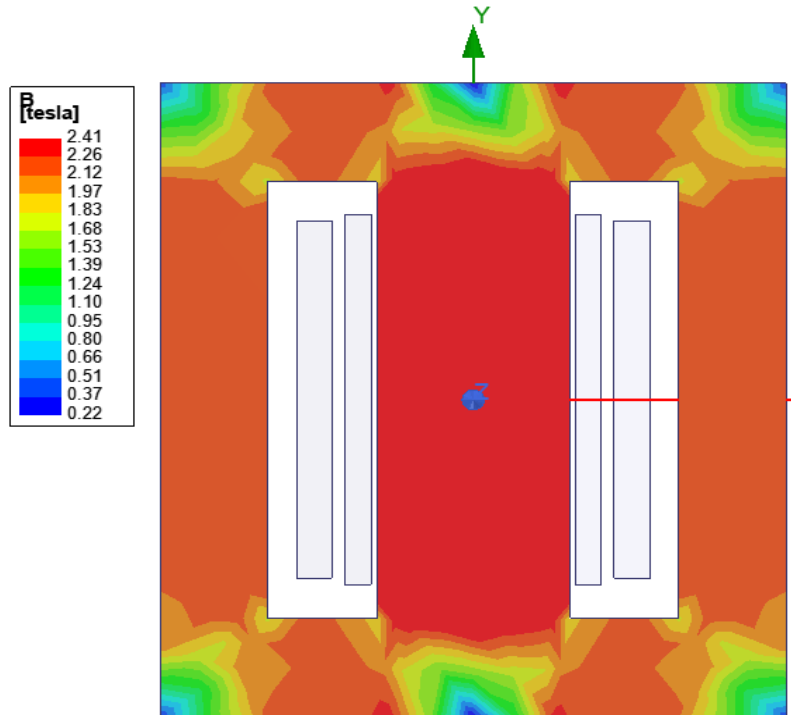


Şekil 2.13: Geliştirilen üç fazlı beş bacaklı çekirdek tipi nüveli transformatör modelinin geçerlilik analizi için Matlab/SIMULINK ortamında oluşturulan test sistemi.

Geçerlilik analizinde dikkate alınan referans sonuçlar, ANSYS Maxwell ortamında oluşturulan ve geometrileri Şekil 2.14-2.17'de verilen 2B SEY modelleri kullanılarak elde edilmiştir. Bu şekillerden, sinüzoidal ve sinüzoidal anma gerilimleri üzerine bindirilmiş $V_{Dctotal}=1$ kV DA uyartım şartları ($V_{DC}=10$ V/km) için akı yoğunluğu dağılımları görülmektedir. Ayrıca, aynı şekiller test edilen DA uyartım seviyesinin nüvedeki manyetik akı yoğunluğunu önemli ölçüde artırdığını göstermektedir.

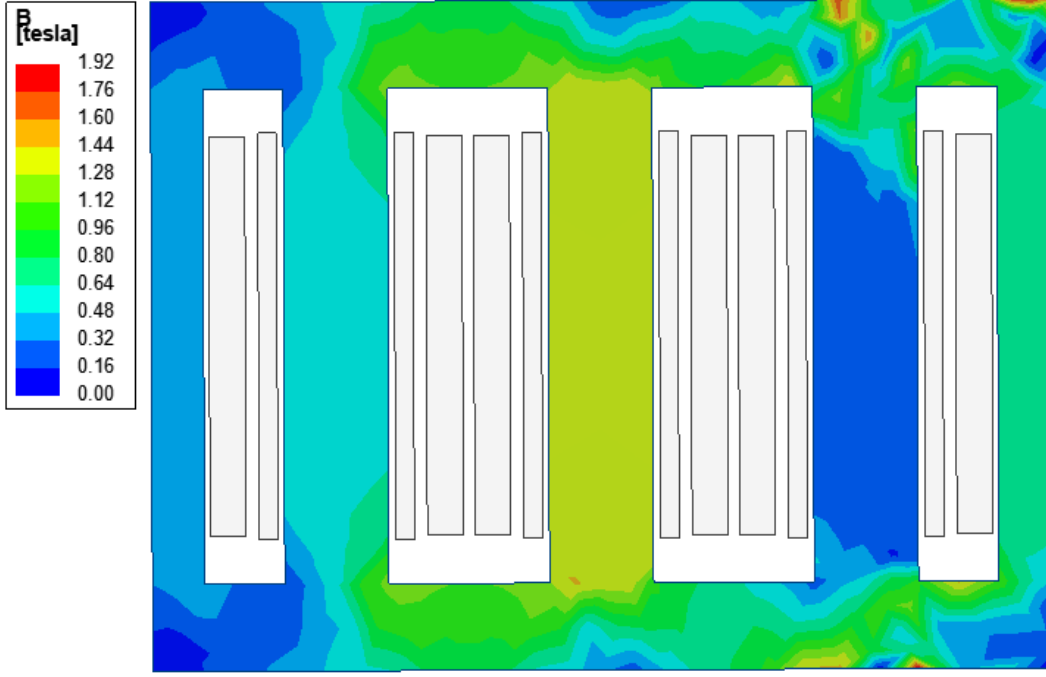


(a)

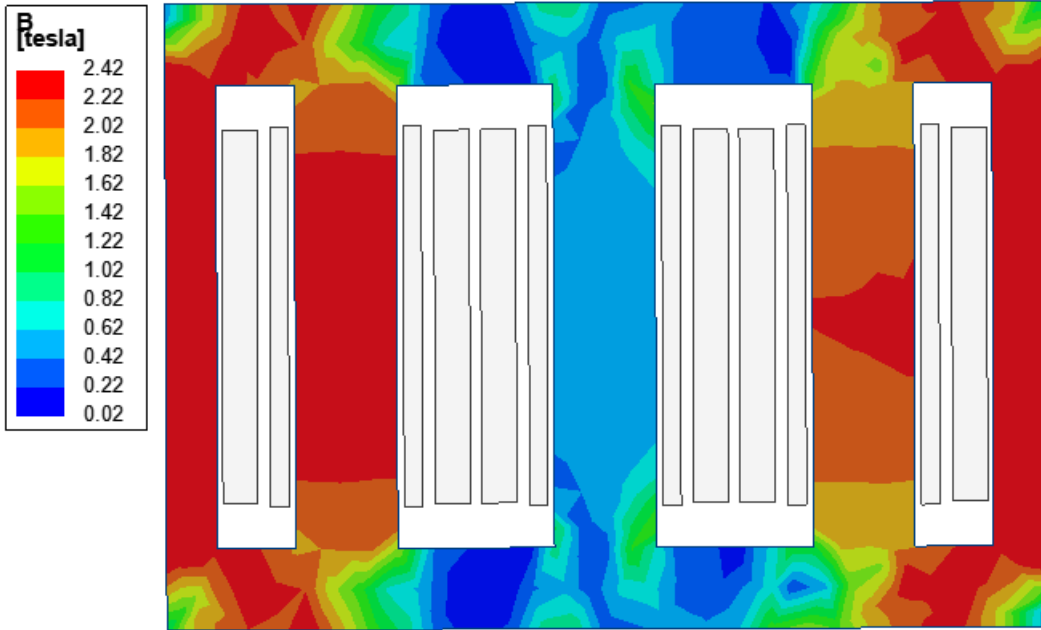


(b)

Şekil 2.14: Tek fazlı kabuk tipi nüveli transformatörün $t=9,95$. saniyedeki, (a) saf sinüzoidal besleme ($V_{DC}=0$ V/km) ve (b) $V_{DCtotal}=1$ kV DA uyartım şartları ($V_{DC}=10$ V/km) altında akı yoğunluğu dağılımı.



(a)



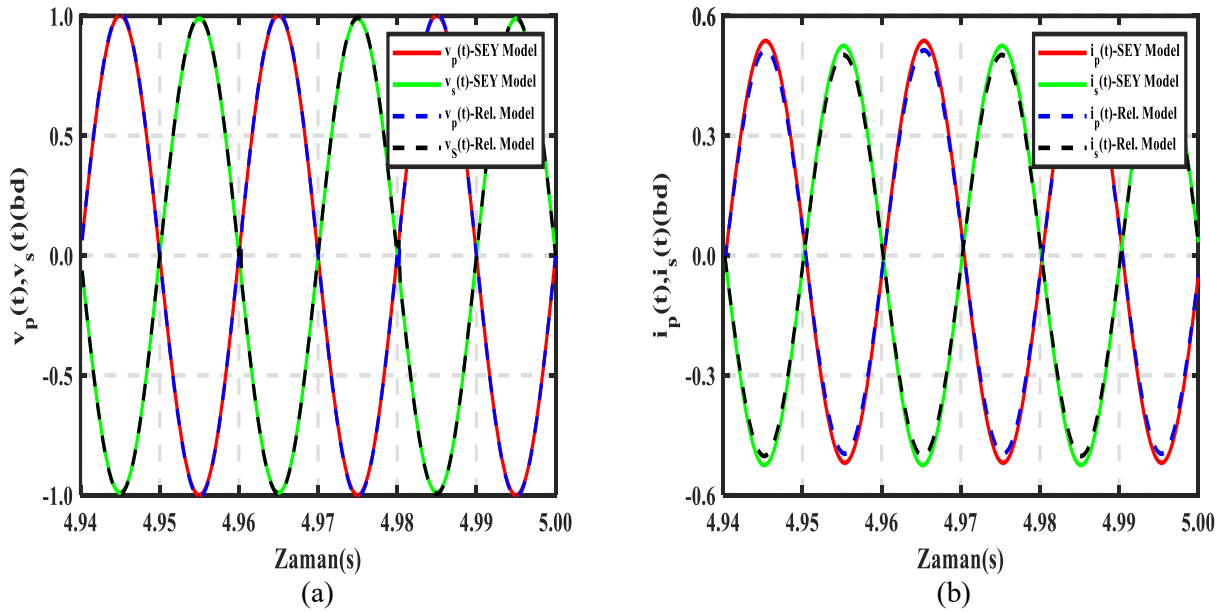
(b)

Şekil 2.15: Üç fazlı beş bacaklı çekirdek tipi nüveli transformatörün $t=9,95$. saniyedeki, (a) saf sinüzoidal besleme ($V_{DC}=0$ V/km) ve (b) $V_{Dctotal}=1$ kV DA uyartım şartları ($V_{DC}=10$ V/km) altında akı yoğunluğu dağılımı.

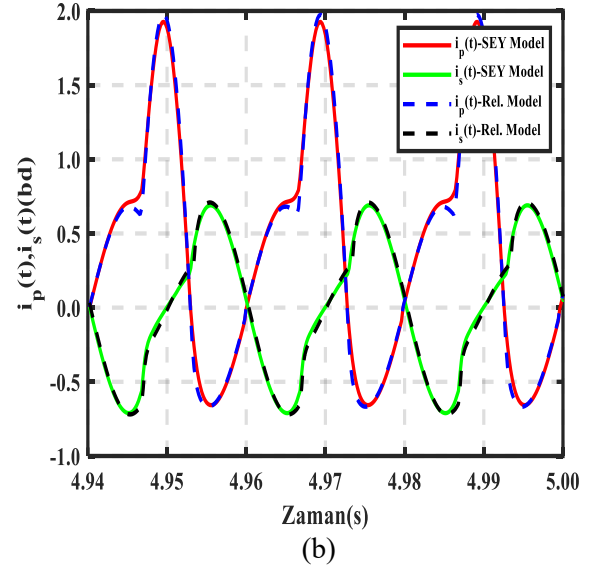
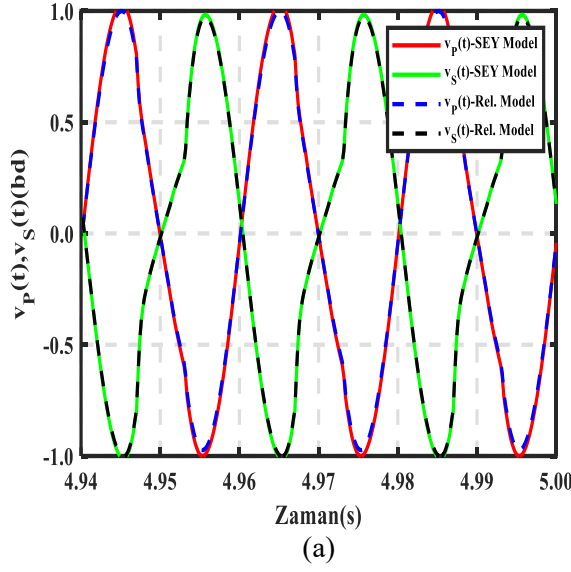
SEY modellerin çözüm ağı (mesh) işlemi, ANSYS Maxwell'in uyarlanabilir (adaptif) ağ iyileştirme özelliği sayesinde uzunluğa dayalı ve otomatik olarak yapılmıştır. Simülasyon tipi geçici (transient) analiz olarak seçilmiş ve analizde girdap akımı kayıpları dikkate alınmıştır. Transformatörlerde manyetik nüve malzemesi olarak M5-0.30 mm tercih edilmiş olup, bu malzemenin B-H ve P-B eğrileri ANSYS Maxwell'e tanıtılmıştır. ANSYS Maxwell'e tanıtılan malzeme bilgileri ekler kısmında sunulmuştur.

2.3.1 Tek Fazlı Kabuk Tipi Nüveli Transformatör İçin Sonuçlar

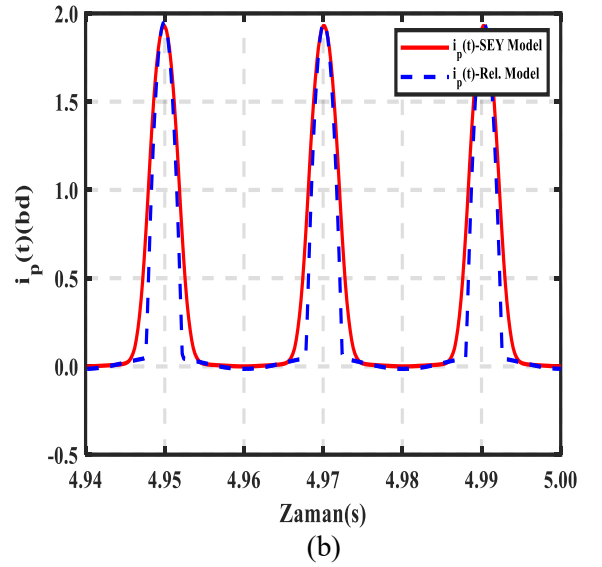
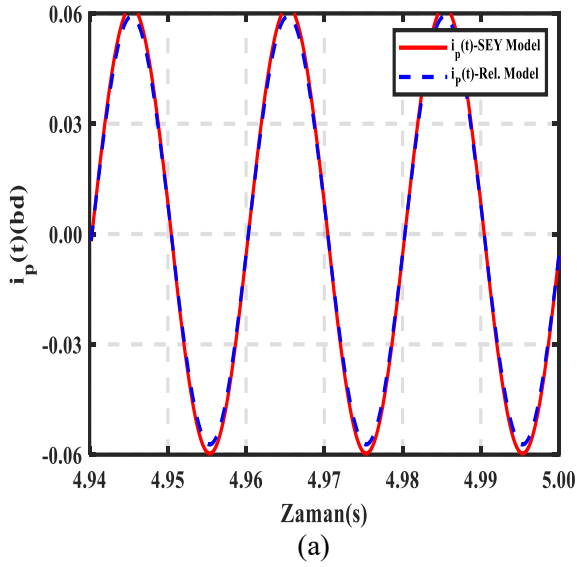
2B SEY model ve geliştirilen model kullanılarak, saf sinüzoidal ve DA uyarım bileşeni üzerine bindirilmiş besleme gerilim durumları için, tek fazlı kabuk tipi nüveli transformatöre ait akımlar ve gerilimlerin birim değer (bd) cinsinden dalga şekilleri Şekil 2.16-2.18'de çizdirilmiştir. Analizlerde, transformatörün boştta ve %50 yüklenme koşulları dikkate alınmıştır.



Şekil 2.16: Tek fazlı kabuk tipi nüveli transformatörün sinüzoidal besleme ve %50 yüklenme altında SEY ve geliştirilen modelle elde edilen (a) primer ve sekonder taraf gerilimleri ile (b) primer ve sekonder taraf akımlarının dalga şekilleri. ($V_{DC}=0$ V/km).



Şekil 2.17: Tek fazlı kabuk tipi nüveli transformatörün DA uyartımlı besleme gerilimi ve %50 yüklenme altında SEY ve geliştirilen modelle elde edilen (a) primer ve sekonder taraf gerilimleri ile (b) primer ve sekonder taraf akımlarının dalga şekilleri ($V_{DC}=10$ V/km).



Şekil 2.18: Tek fazlı kabuk tipi nüveli transformatörün boşta çalışma durumunda (a) saf sinüzoidal besleme ($V_{DC}=0$ V/km) ve (b) DA uyartım bileşenli besleme ($V_{DC}=10$ V/km) gerilimleri altında SEY ve geliştirilen modelle elde edilen primer taraf akımlarının dalga şekilleri.

Bu şekillerden, saf sinüzoidal ve DA uyartım bileşenli besleme gerilimi durumları için SEY ve geliştirilen modelle elde edilen gerilim ve akım dalga şekillerinin örtüştüğü görülmektedir. Ayrıca, şekillerden, her iki modelin de DA uyartım altında transformatörün

doymaya girdiğini işaret ettiği ifade edilebilir. Bununla birlikte, saf sinüzoidal ($V_{DC}=0$ V/km ve $I_{PDC}=0$ pu) ve DA uyarım bileşenli ($V_{DC}=10$ V/km ve $I_{PDC}=0.45$ pu) besleme gerilimi koşulları için modellerle elde edilen dalga formları arasındaki ortalama karekök hata (RMSE) değerleri Tablo 1.1’de verilmiştir. RMSE değerlerinin oldukça küçük olması, modellerin birbiriyle örtüşen sonuçlar verdiğini işaret etmektedir.

Tablo 2.1: RMSE değerleri.

	%50 yüklü durum		Boşta durum	
	0.0	10.0	0.0	10.0
V_{DC} (V/km)	0.0	10.0	0.0	10.0
I_{PDC} (pu)	0.0	0.45	0.0	0.45
I_p (pu)	0.00225	0.00586	0.00113	0.02257
I_s (pu)	0.00187	0.00241	-	-
V_s (pu)	2.86×10^{-4}	5.82×10^{-4}	2.41×10^{-4}	-

2.3.2 Üç Fazlı Beş Bacaklı Çekirdek Tipi Nüveli Transformator İçin Geliştirilen

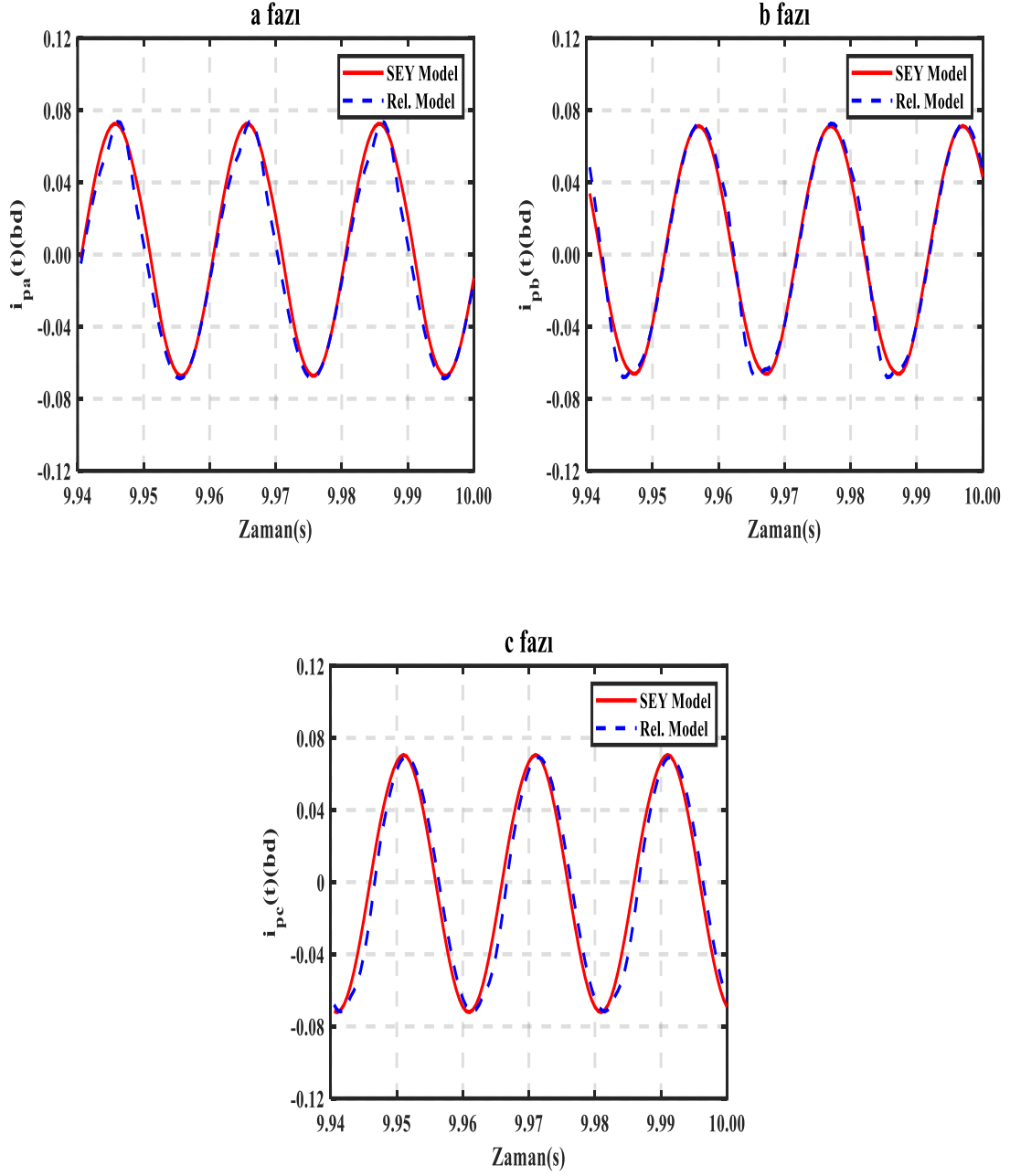
Modelin Geçerlilik Analizi Sonuçları

Saf sinüzoidal ve DA uyarım bileşeni üzerine bindirilmiş besleme gerilimleri altında, SEY ve geliştirilen modelle elde edilen üç fazlı beş bacaklı çekirdek tipi nüveli transformatöre ait akımlar ve gerilimlerin dalga şekilleri Şekil 2.19-2.23’de verilmiştir. Analizlerde, transformatörün boşta ve %50 yüklenme koşulları dikkate alınmıştır. Bu şekillerden her iki modelle elde edilen akım ve gerilim dalga formlarının birbirine çok yakın olduğu görülmektedir.

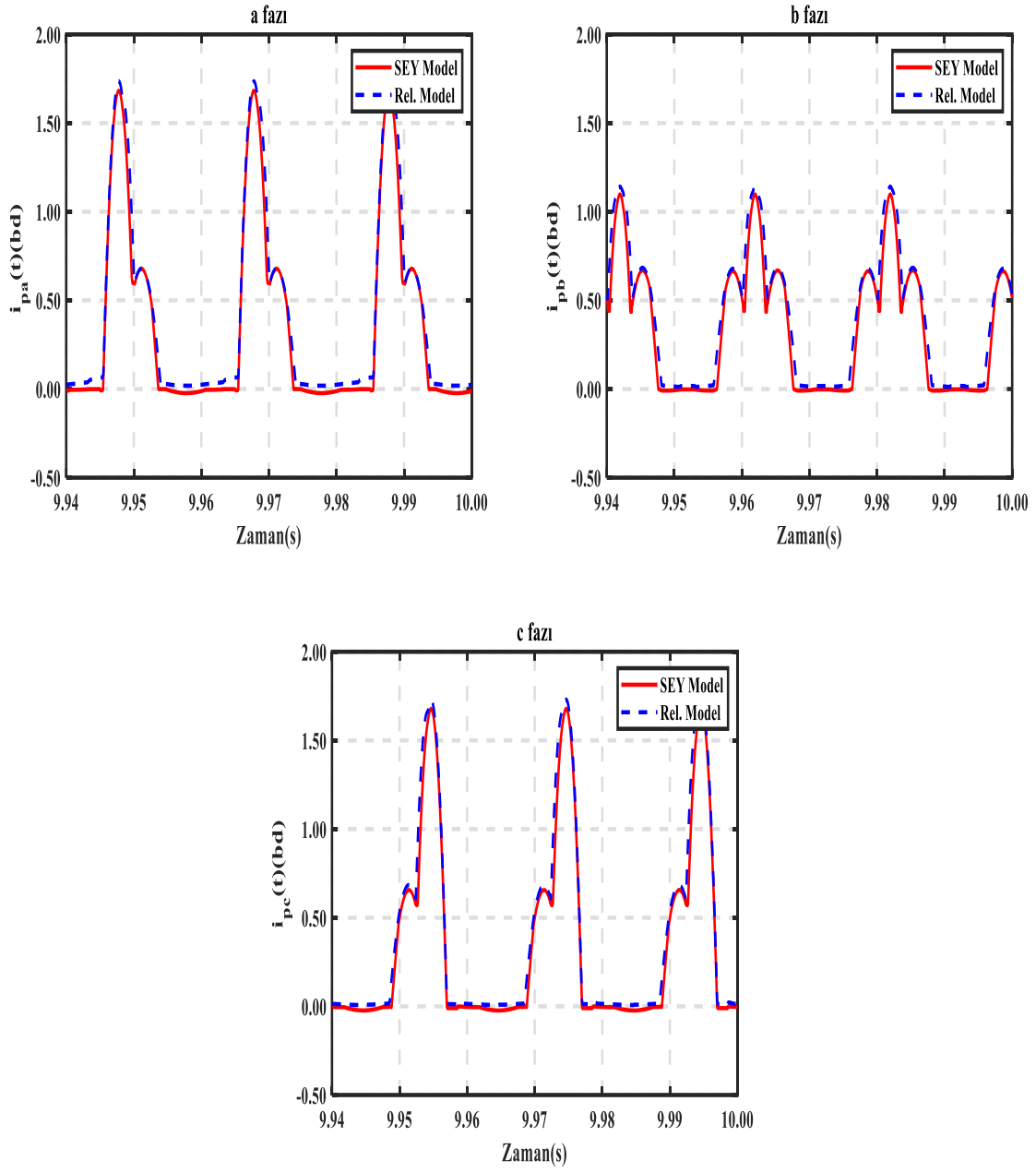
Ek olarak, saf sinusoidal ($V_{DC}=0$ V/km and $I_{PDC}=0$ bd) ve DA uyarımlı ($V_{DC}=10$ V/km ve $I_{PDC}=0.45$ bd) gerilim koşulları altında SEY ve geliştirilen modelle elde edilen gerilim ve akım dalga biçimleri için hesaplanan RMSE değerleri Tablo 1.2’de sunulmuştur. Bu tablodan, her iki modelin de birbirine çok yakın sonuçlar verdiği ifade edilebilir.

Tablo 1.2: RMSE değerleri.

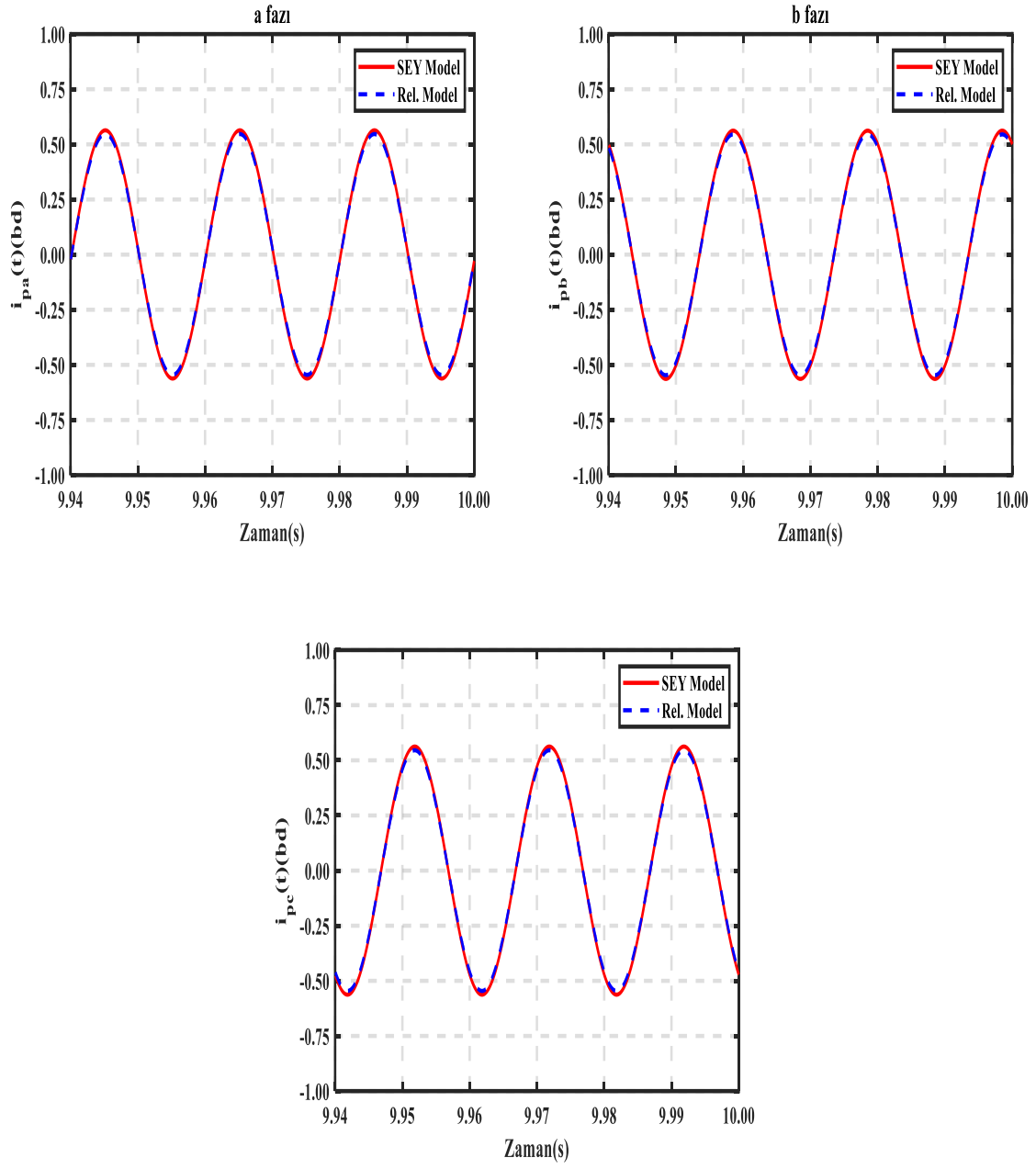
	%50 yüklü durum		Boşta durum	
	0.0	10.0	0.0	10.00
V_{DC} (V/km)	0.0	10.0	0.0	10.00
I_{PDC} (pu)	0.0	0.45	0.0	0.45
I_{pa} (pu)	0.00241	0.00264	0.00194	0.00189
I_{pb} (pu)	0.00252	0.00281	0.00289	0.00125
I_{pc} (pu)	0.00245	0.00251	0.00223	0.00148
V_{sa} (pu)	-	5.93×10^{-4}	-	-
V_{sb} (pu)	-	6.78×10^{-4}	-	-
V_{sc} (pu)	-	6.45×10^{-4}	-	-



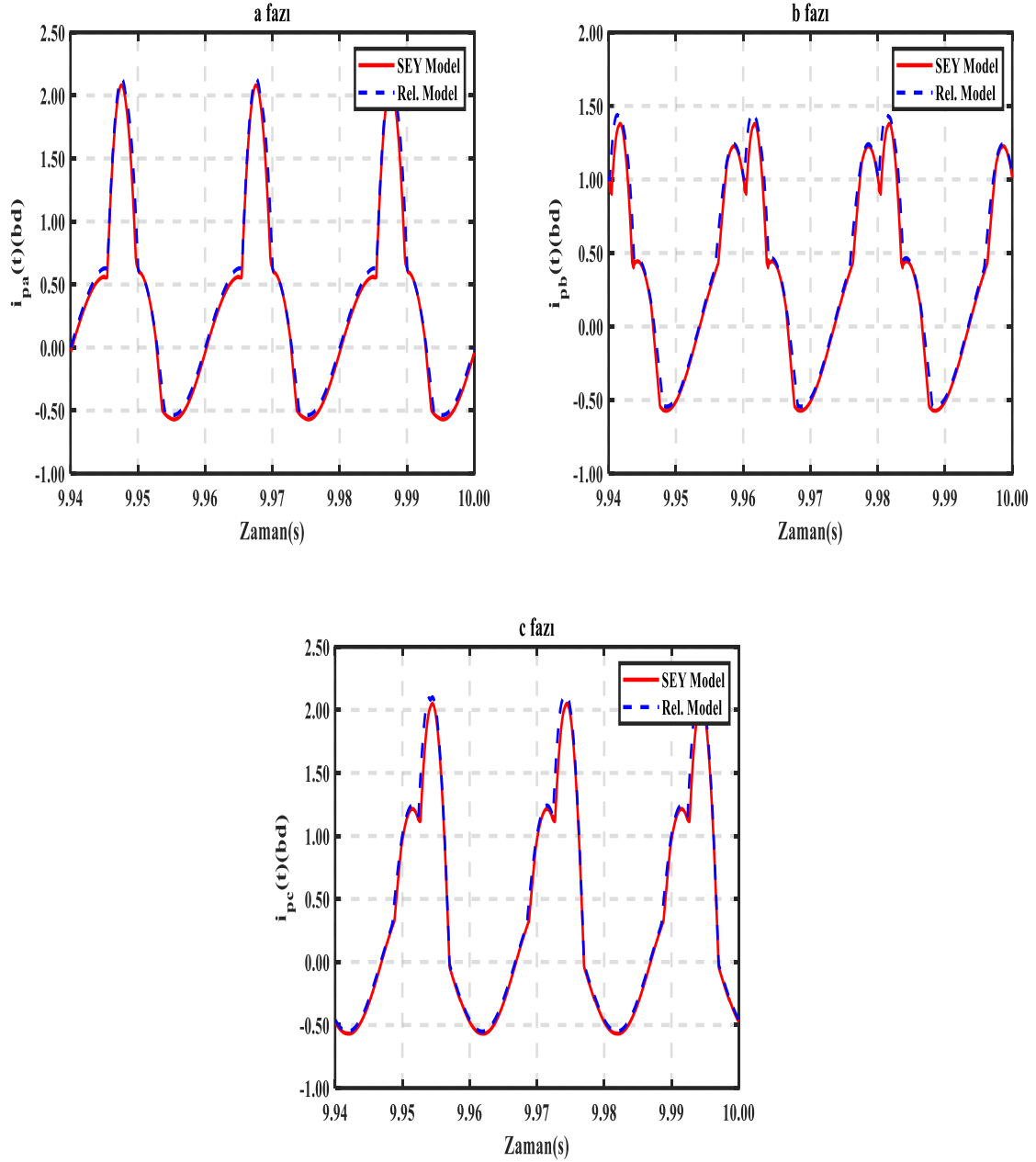
Şekil 2.19: Üç fazlı beş bacaklı çekirdek tipi nüveli transformatörün sinüzoidal gerilim ($V_{DC}=0$ V/km) altında boşta çalışma durumu için SEY ve geliştirilen modelle elde edilen primer taraf akımlarının dalga şekilleri.



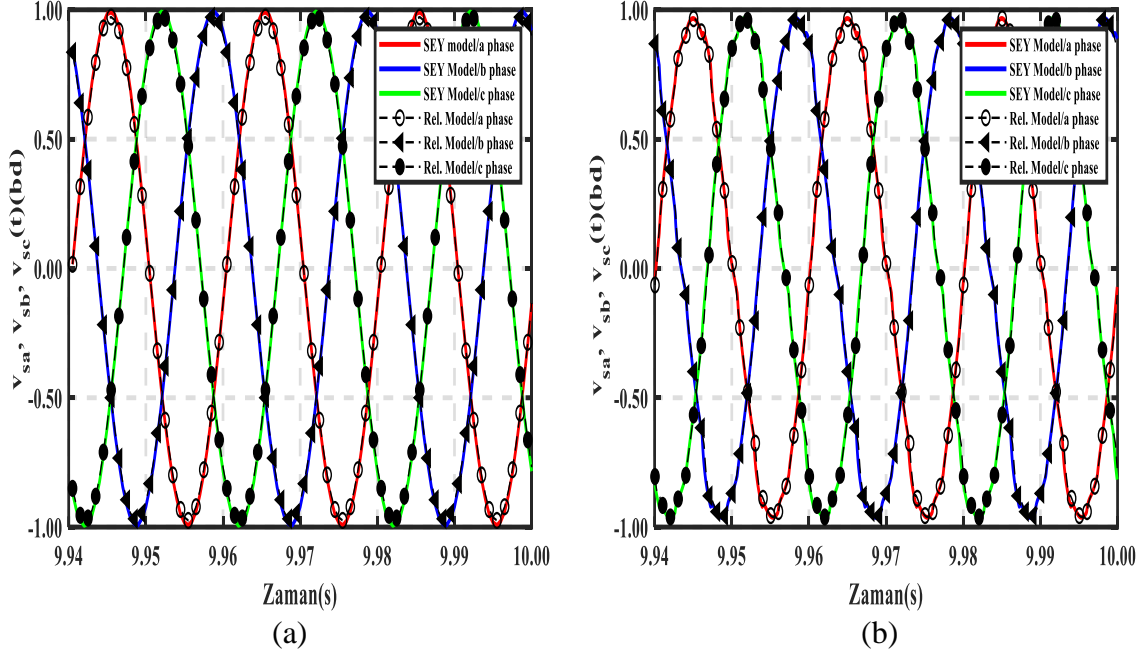
Şekil 2.20: Üç fazlı beş bacaklı çekirdek tipi nüveli transformatörün DA uyarımlı besleme gerilimi ($V_{DC}=10$ V/km) altında boşa çalışma durumu için SEY ve geliştirilen modelle elde edilen primer taraf akımlarının dalga şekilleri.



Şekil 2.21: Üç fazlı beş bacaklı çekirdek tipi nüveli transformatörün sinüzoidal gerilim ($V_{DC}=0$ V/km) altında %50 yükleme durumu için SEY ve geliştirilen modelle elde edilen primer taraf akımlarının dalga şekilleri.



Şekil 2.22: Üç fazlı beş bacaklı çekirdek tipi nüveli transformatörün DA uyarımlı besleme gerilimi ($V_{DC}=10$ V/km) altında %50 yükleme durumu için SEY ve geliştirilen modelle elde edilen primer taraf akımlarının dalga şekilleri.



Şekil 2.23: Üç fazlı beş bacaklı çekirdek tipi nüveli transformatörün %50 yükleme durumu için (a) sinüzoidal ($V_{DC}=0$ V/km) ve (b) DA uyarımlı besleme gerilimi koşulları altında SEY ve geliştirilen modelle elde edilen sekonder taraf gerilimleri.

2.4 Sonuç

Bu bölümde, DA uyarımının tek fazlı kabuk tipi nüveli ve üç fazlı beş bacaklı çekirdek tipi nüveli transformatlara etkilerini analiz etmek amacıyla Matlab/SIMULINK ortamında geliştirilen relüktans tabanlı modeller tanıtılmıştır. Geliştirilen modellerin, literatürdeki relüktans tabanlı modellerden farkı sargı kayıplarının frekans bağımlılığını dikkate almasıdır.

Yine bu bölümde, her iki transformatörün gerilimleri ve akımları, saf sinüzoidal ve DA uyarımlı gerilim koşullarında, boşta ve yük altında, iki boyutlu (2B) SEY ve geliştirilen modelle simüle edilmiştir. Simülasyon sonuçları karşılaştırmalı olarak analiz edilmiştir. Analizlerden her iki modelin verdiği gerilim ve akım dalga şekillerinin birbiriyle örtüştüğü görülmüştür. Böylece geliştirilen modelin sinüzoidal ve DA uyarımlı gerilim şartları için geçerliliği ortaya konmuştur.

3. DA UYARTIMIN TRANSFORMATÖRLERE ETKİLERİNİN ANALİZİ

Bu bölümde, tez çalışması kapsamında geliştirilen modeller kullanılarak, DA uyarım koşullarının tek fazlı kabuk tipi nüveli ve üç fazlı beş bacaklı çekirdek tipi nüveli transformatörlerin performansına etkisi analiz edilmiştir. Analizlerde, transformatör performans parametreleri olarak, akım harmonik bozulma seviyeleri, akım etkin değerleri, kayıplar ve reaktif güç talebi dikkate alınmıştır.

Analizlerde, boşa çalışma durumunda transformatörlere DA uyarım uygulanmıştır. DA uyarım seviyesi, bir önceki bölümde sunulan test sistemlerinde, hatta km başına indüklenen DA gerilimi (V_{DA}) değeri 0 V/km'den 10 V/km'ye yükseltilecek şekilde ayarlanmıştır. Böylece, farklı DA uyarım seviyeleri test edilen transformatörlere uygulanmıştır.

Diğer taraftan, analizlerde transformatörün talep ettiği temel frekans toplam reaktif gücü, denklem (3.1) kullanılarak hesaplanmıştır:

$$Q_1 = \sum_{m=a,b,c} V_{Pm1} I_{Pm1} \sin \theta_{pm1} \quad (3.1)$$

Burada V_{Pm1} ve I_{Pm1} primer tarafın m fazına ait temel frekans geriliminin ve akımının etkin değerlerini, θ_{Pm1} ise m fazına ait temel frekans gerilimi ve akımı arasındaki faz farkını gösterir.

Primer taraf faz akımlarının harmonik bozulması analiz edilirken, IEEE 519 standardında tanımlı temel olmayan harmonik akımlarının toplam etkin değerinin, hattan tam yüklenme durumunda akan transformatörün primer anma akımına (I_{PR}) oranı olan toplam talep bozulma faktörü (TDD) dikkate alınmıştır. Bu indisin ifadesi, Denklem (3.2)'de verilmiştir:

$$TDDI_{Pm}(\%) = 100 \sqrt{\frac{\sum_{h=2}^{h_{maks}} I_{Pmh}^2}{I_{PR}^2}} \quad (3.2)$$

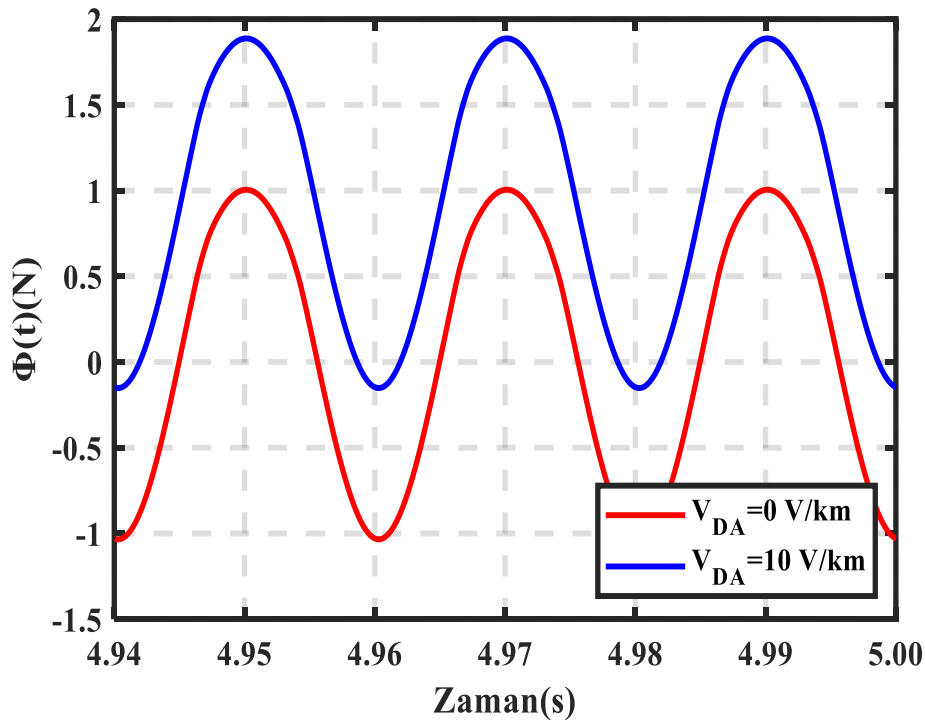
Bu yaklaşımın sebebi, THDI indisinin özellikle transformatörün boşa çalıştığı veya düşük yüklendiği durumlarda gözlemlenen ve sistem için ihmal edilebilir değerlerdeki akım harmoniklerini, yanıltıcı bir şekilde önemli seviyelerde bozulma olarak derecelendirmesidir.

Bu yaklaşıma paralel olarak analizlerde, transformatörlerin bireysel akım harmoniklerinin, tam yüklenme durumuna (anma akım değerine) göre bağlı değerleri dikkate alınmıştır.

3.1 Tek Fazlı Kabuk Tipi Nüveli Transformatör için DA Hassasiyet Analizleri

Bu kısımda, geliştirilen model kullanılarak, DA uyarım durumunun tek fazlı kabuk tipi nüveli transformatörün performans parametrelerine etkileri analiz edilmiştir.

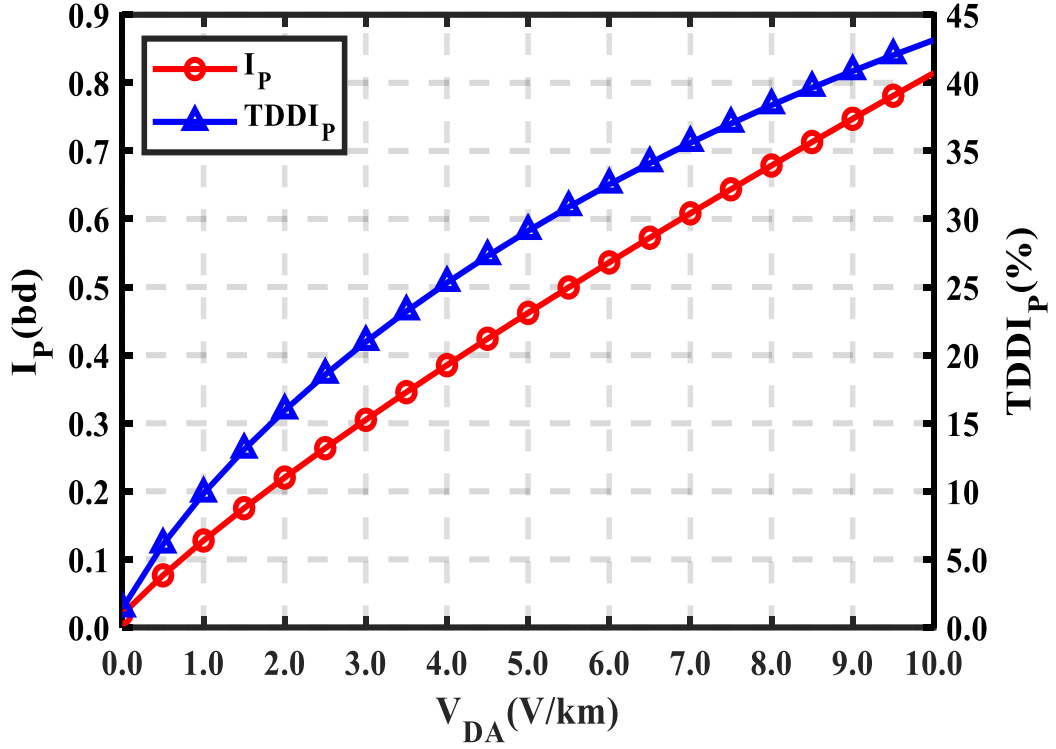
Buna göre ilk olarak, boştta çalışma durumunda saf sinüzoidal ($V_{DA}=0$ V/km) ve DA uyarımlı ($V_{DA}=10$ V/km) besleme gerilimlerinde, sargıların sarılı olduğu nüve ana bacağından ölçülen manyetik akının normalize edilmiş değerinin ($\Phi(t)(N)$) değişimi Şekil 3.1’de çizdirilmiştir.



Şekil 3.1: Tek fazlı kabuk tipi nüveli transformatörün ana bacağından akan $\Phi(t)$ manyetik akısının boştta çalışma durumunda $V_{DA}=0$ ve 10 V/km için dalga formları.

Bu şekilden test edilen DA uyarım değeri için $\Phi(t)$ 'nin normalize edilmiş tepe değerinin 1.9 olduğu böylece transformatör nüvesinin DA'nın yönüne bağlı olarak pozitif alternansta doyuma girdiği görülmektedir. Transformatörün doyuma girmesi ise transformatörün mıknatıslanma akımının artışına yol açacak bir durumdur.

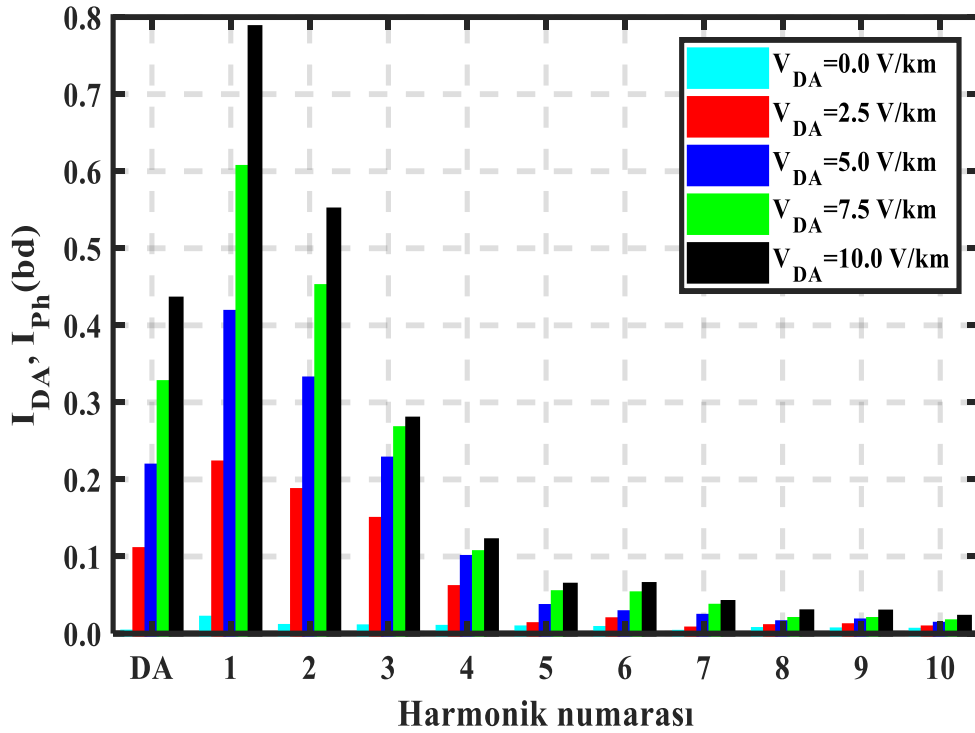
Bu durumu izah etmek amacıyla Şekil 3.2’de DA uyarım artışı (V_{DA}) ile primer faz akımının toplam etkin değerinin (I_P) değişimi çizdirilmiştir. Ayrıca, DA uyarımın transformatörün mıknatıslanma akımının harmonik bozulma seviyesine etkisini göstermek için primer faz akımının toplam talep bozulması değerinin ($TDDI_P$) V_{DA} ile değişimi de aynı şekilde sunulmuştur.



Şekil 3.2: Tek fazlı kabuk tipi nüveli transformatör için boşta çalışma durumunda I_P ve $TDDI_P$ değerlerinin V_{DA} ile değişimi.

Şekil 3.2’den, DA uyarım olmadığı bir başka deyişle V_{DA} ’nın sıfır olduğu durum için I_P ve $TDDI_P$ değerlerinin ihmal edilebilir seviyelerde olduğu, uyarımın 5 V/km olduğu durum için bu büyüklüklerin yaklaşık olarak 0.5 pu ve %30 olduğu, uyarımın 10 V/km olduğu durumda ise aynı büyüklüklerin yaklaşık olarak 0.82 pu ve %45 değerlerine ulaştıkları görülmektedir. Bu sonuçlar, çekilen primer faz akımının toplam etkin değerinin ve toplam talep bozulmasının DA uyarım seviyesi ile önemli oranda arttığını işaret etmektedir.

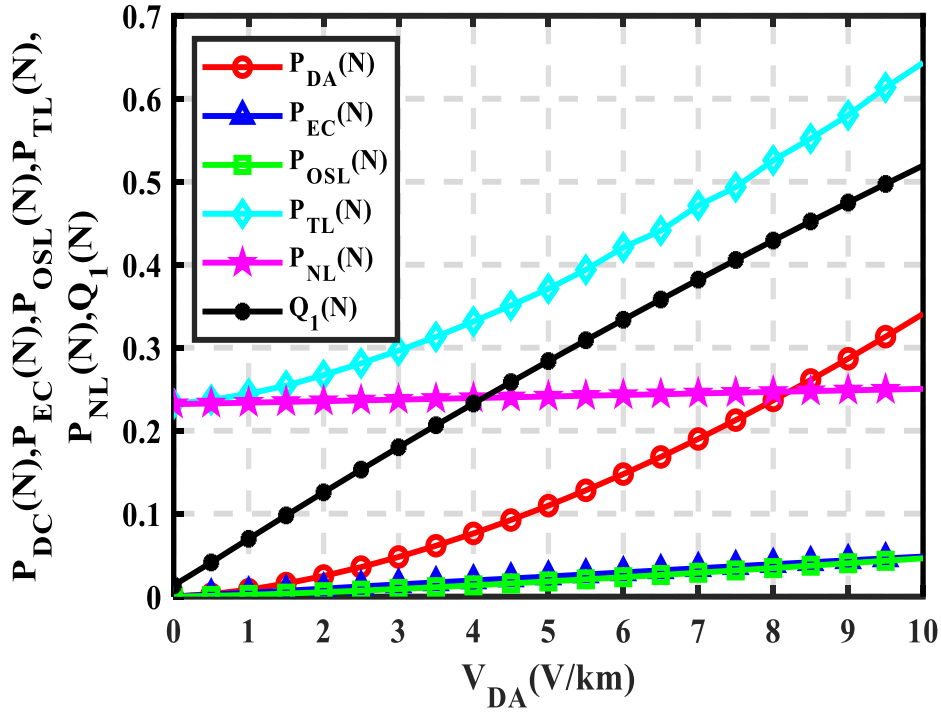
Diğer taraftan, primer sargı akımının DA ve harmonik bileşenlerinin (I_{PDA} ve I_{Ph}) V_{DA} ile değişimleri Şekil 3.3’de sunulmuştur.



Şekil 3.3: Tek fazlı kabuk tipi nüveli transformatörün boşa çalışma durumunda farklı V_{DA} seviyeleri için primer faz akımının DA ve harmonik bileşenleri.

Bu şekil incelendiğinde, $V_{DA}=0$ yani DA uyartım olmadığı durumda, primer faz akımının temel ve temel olmayan harmonik bileşenlerinin çok küçük değerlerde olduğu ve DA bileşeni içermediği ifade edilebilir. Buna ilaveten, DA uyartımın artışıyla beraber, I_{PDA} ve tüm harmonik bileşenlerin arttığı, özellikle ilk dört harmonik bileşeninde bu artışın daha fazla olduğu görülmektedir.

Şekil 3.4’de ise transformatörün sargı omik (P_{DC}), sargı girdap akımı (P_{EC}), diğer kaçak (P_{OSL}), nüve (P_{NL}) ve toplam (P_{TL}) kayıpları ile transformatör reaktif güç talebinin (Q_1) test edilen DA uyartım aralığındaki değişimleri verilmiştir. Bu büyüklükler şekilde verilirken normalize edilmiştir. Normalize edilmiş değerler hesaplanırken kayıplar (P_{DC} , P_{EC} , P_{OSL} , P_{TL} , P_{NL}) transformatörün nominal toplam kaybına ve Q_1 ise transformatörün anma gücüne oranlanmıştır.



Şekil 3.4: Tek fazlı kabuk tipi nüveli transformatörün boşa çalışma durumunda kayplarının ve temel harmonik reaktif güç talebinin V_{DA} ile değişimi.

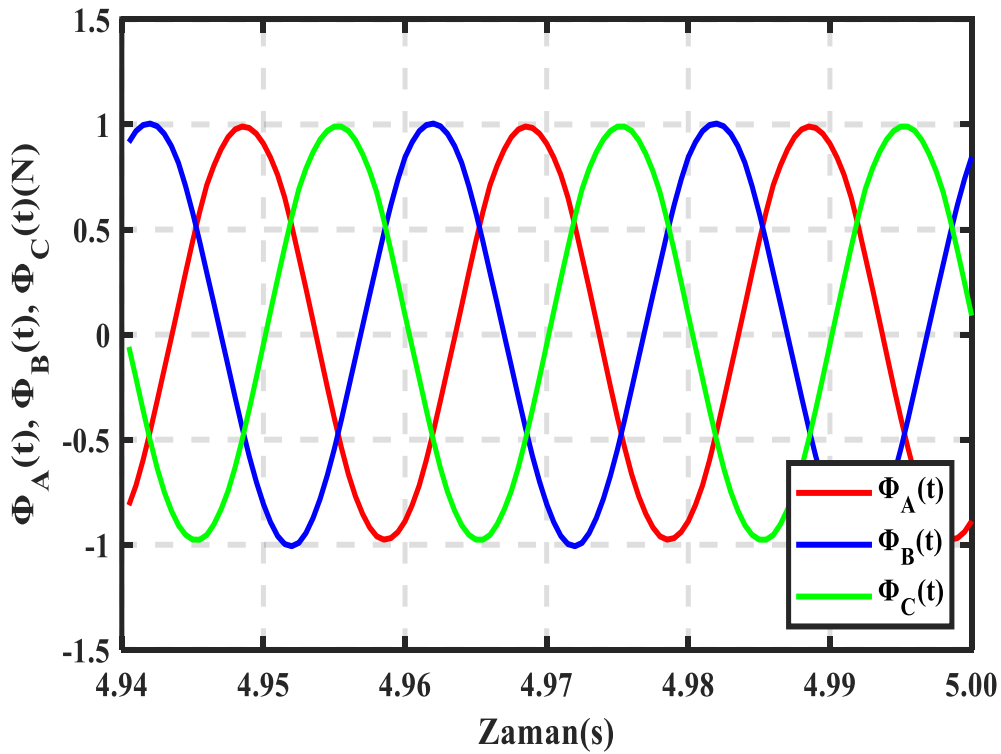
Şekil 3.4'den görüldüğü üzere DA uyartımın olmadığı durum için sargı kayıpları (P_{DC} , P_{EC} ve P_{OSL}) toplam kayba (P_{TL}) kıyasla ihmal edilebilir büyüklüklerdedir, dolayısıyla P_{NL} ile P_{TL} yaklaşık olarak aynı değerdedir. DA uyartımın olmadığı durumda Q_1 'de transformatörün güç kapasitesine göre ihmal edilebilir seviyededir.

Diğer taraftan, uygulanan azami V_{DA} değeri olan 10 V/km için P_{DA} , P_{TL} ve Q_1 değerleri sırasıyla 0.32 N, 0.65 N ve 0.51 N değerlerinde hesap edilmiştir. Buradan, DA uyartım artışına bağlı olarak sargı kayıpları ve reaktif güç talebinin önemli derecede arttığı sonucuna varılabilir. Ayrıca, DA uyartımdaki artışa bağlı olarak P_{DA} , diğer iki sargı kaybı olan P_{EC} ve P_{OSL} ile karşılaştırıldığında daha fazla artış göstermiştir. Son olarak, aynı şekilden, Q_1 ile V_{DA} arasındaki ilişkinin ise doğrusal olduğu ifade edilebilir.

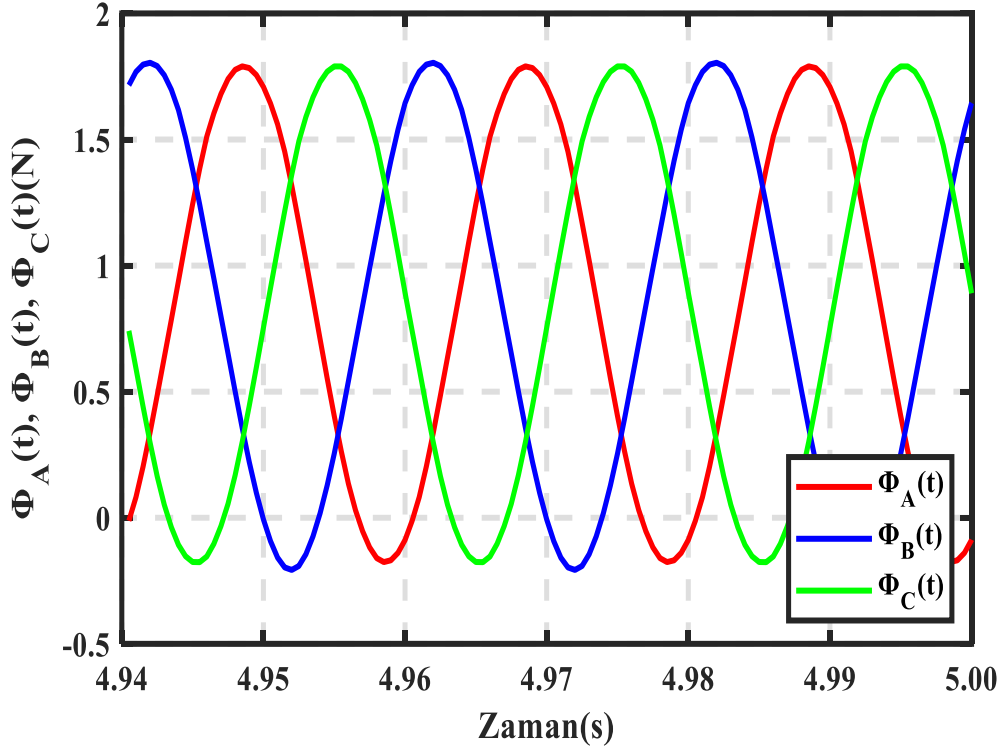
3.2 Üç Fazlı Beş Bacaklı Çekirdek Tipi Nüveli Transformatör İçin DA Hassasiyet Analizleri

Bu kısımda, geliştirilen model kullanılarak, DA uyartım durumunun üç fazlı beş bacaklı çekirdek tipi nüveli transformatörün performans parametrelerine etkileri analiz edilmiştir.

Nüve ana bacaklarından ölçülen manyetik akılara ait ($\Phi_A(t)$, $\Phi_B(t)$, $\Phi_C(t)$) dalga şekilleri, DA uyartımının (V_{DA}) 0 V/km ve 10 V/km olduğu durumlar için sırasıyla, Şekil 3.5 ve 3.6'dan görülmektedir. Bu şekiller ve Şekil 3.1 beraber değerlendirildiğinde, uygulanan $V_{DA}=10$ V/km için bu tip transformatörün tek fazlı transformatöre benzer şekilde, DA uyartımının yönüne bağlı olarak pozitif yarım periyotta doyuma girdiği ve manyetik akıların yukarı doğru ötelendiği belirtilebilir. Bununla birlikte, üç fazlı beş bacaklı çekirdek tipi nüveli transformatörün nüvesinde dolanan manyetik akıların normalize edilmiş tepe değeri $V_{DA}=10$ V/km için 1.75 civarındadır. Bu değer ise tek fazlı kabuk tipi nüveli transformatör nüvesinde dolanan manyetik akıların normalize edilmiş tepe değerine (1.9) göre daha küçüktür.



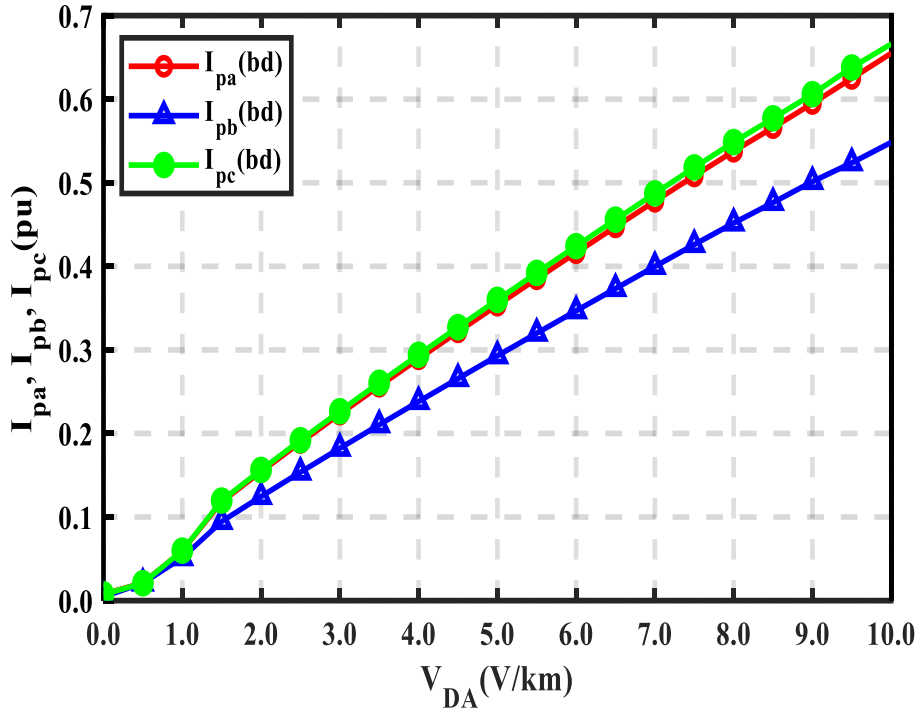
Şekil 3.5: Üç fazlı beş bacaklı çekirdek tipi nüveli transformatörün nüvesinde dolanan $\Phi_A(t)$, $\Phi_B(t)$ ve $\Phi_C(t)$ manyetik akılarının boştaki çalışma durumunda $V_{DA}=0$ V/km için dalga şekilleri.



Şekil 3.6: Üç fazlı beş bacaklı çekirdek tipi nüveli transformatörün nüvesinde dolanan $\Phi_A(t)$, $\Phi_B(t)$ ve $\Phi_C(t)$ manyetik akıların boşa çalışma durumunda $V_{DA}=10$ V/km için dalga şekilleri.

Şekil 3.7’de, üç fazlı beş bacaklı çekirdek tipi nüveli transformatörün boşa çalışma durumunda, V_{DA} ’nın farklı seviyeleri için a, b ve c faz akımlarının etkin değerleri (I_{Pa} , I_{Pb} ve I_{Pc}) verilmiştir. V_{DA} seviyesinin 1 V/km olduğu durumda, akımlar eşit ve 0.05 bd değerinde iken, V_{DA} seviyesinin 5 V/km olduğu durumda $I_{Pa}=0.35$ bd, $I_{Pb}=0.30$ bd, $I_{Pc}=0.36$ bd’ye ulaşmıştır. V_{DA} seviyesinin 10 V/km olduğu durumda ise bu akımların sırasıyla 0.64 bd, 0.53 bd ve 0.66 bd’ye kadar arttığı görülmüştür.

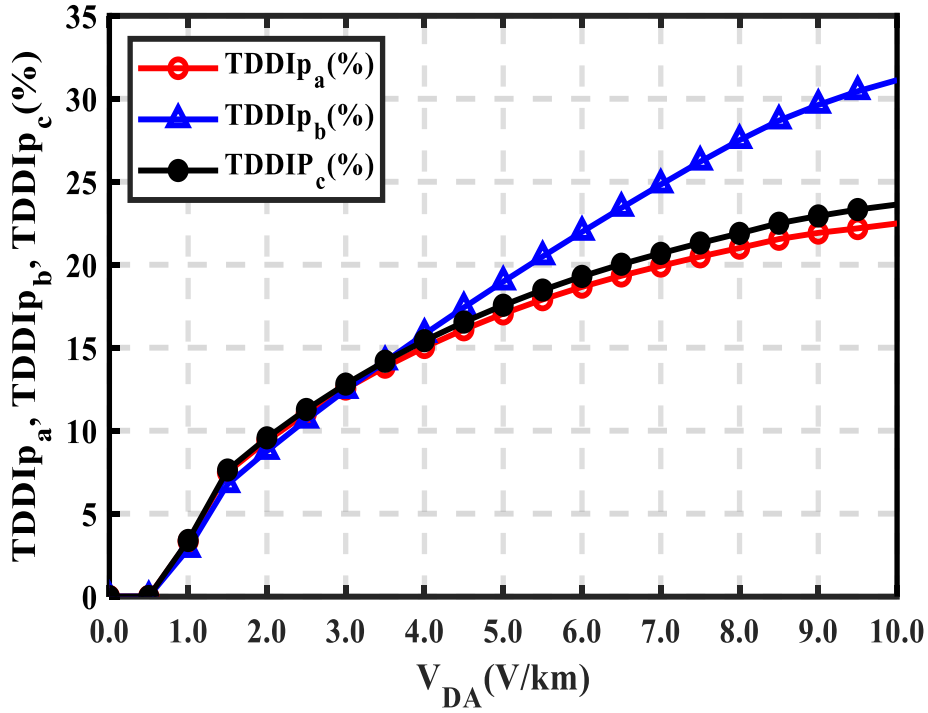
Bu durum, tek fazlı transformatörde olduğu gibi çekilen primer faz akımlarının DA uyarım seviyesi ile önemli ölçüde artış gösterdiğine işaret etmektedir. Ancak, aynı DA seviyesi için bu transformatörde tek fazlı kabuk tipi nüveli transformatöre kıyasla daha küçük akım değerleri gözlemlenmiştir. Ayrıca, üç fazlı transformatörde DA uyarımının artışıyla artan faz akımları arasında dengesizlik sorunu ortaya çıkmıştır. Bunun sebebi olarak, nüvenin asimetrik yapısından dolayı b fazı sargılarının sarılı olduğu bacağın a ve c fazı sargılarının sarılı olduğu bacaklara göre DA uyarımdan farklı derecede etkilenmesi şeklinde yorumlanmıştır.



Şekil 3.7: Üç fazlı beş bacaklı çekirdek tipi nüveli transformatörün boşa çalışma durumunda I_{pa} , I_{pb} ve I_{pc} değerlerinin V_{DA} ile değişimi.

Şekil 3.8’de, V_{DA} artışı ile primer tarafı faz akımlarının toplam talep bozulma seviyesindeki ($TDDI_{Pa}$, $TDDI_{Pb}$, $TDDI_{Pc}$) değişim verilmiştir. Bu şekilden görüldüğü üzere, DA uyarım olmadığı durumda harmonik bozulma ihmal edilebilir değerlerdedir. Ancak, V_{DA} seviyesinin 5 V/km olduğu durumda $TDDI_{Pa}$ ve $TDDI_{Pc}$ %17 civarında ve $TDDI_{Pb}$ %19 değerindedir. V_{DA} seviyesinin 10 V/km olduğu durumda ise $TDDI_{Pa}$ ve $TDDI_{Pc}$ yaklaşık olarak %23 ve $TDDI_{Pb}$ %32 değerine ulaşmıştır.

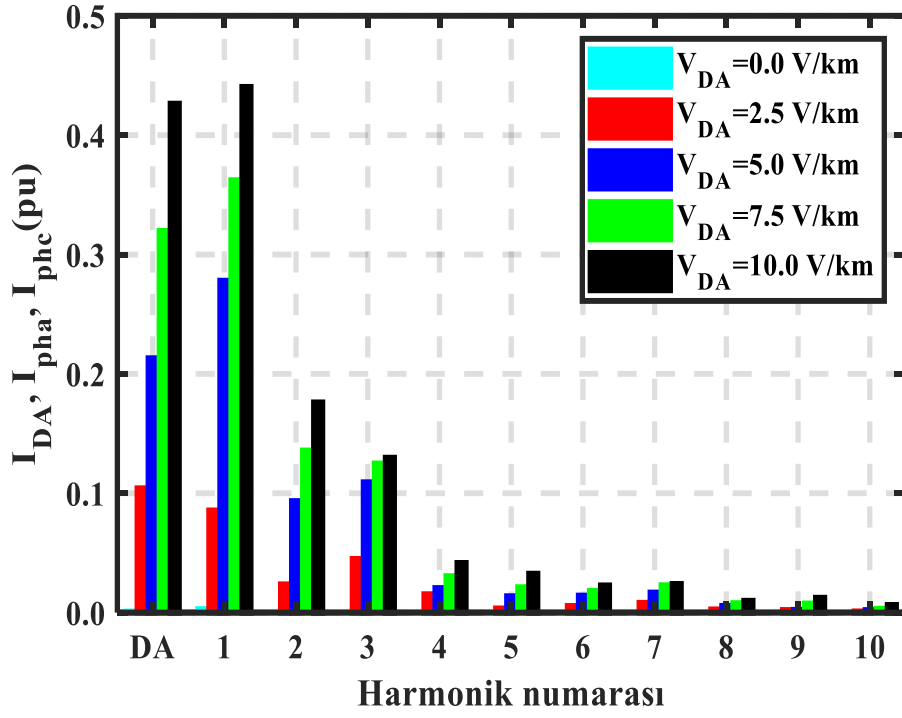
Bu sonuçlardan, akımların etkin değerlerindeki dengesizliğin, harmonik bozulma değerlerine de etki ettiği ifade edilebilir. Diğer taraftan akım etkin değerlerindeki karşılaştırmaya paralel olarak, üç fazlı beş bacaklı çekirdek nüveli transformatörün tek fazlı kabuk tipi nüveli transformatöre nazaran aynı DA uyarım durumunda daha düşük harmonik bozulmaya sahip olduğu belirtilebilir.



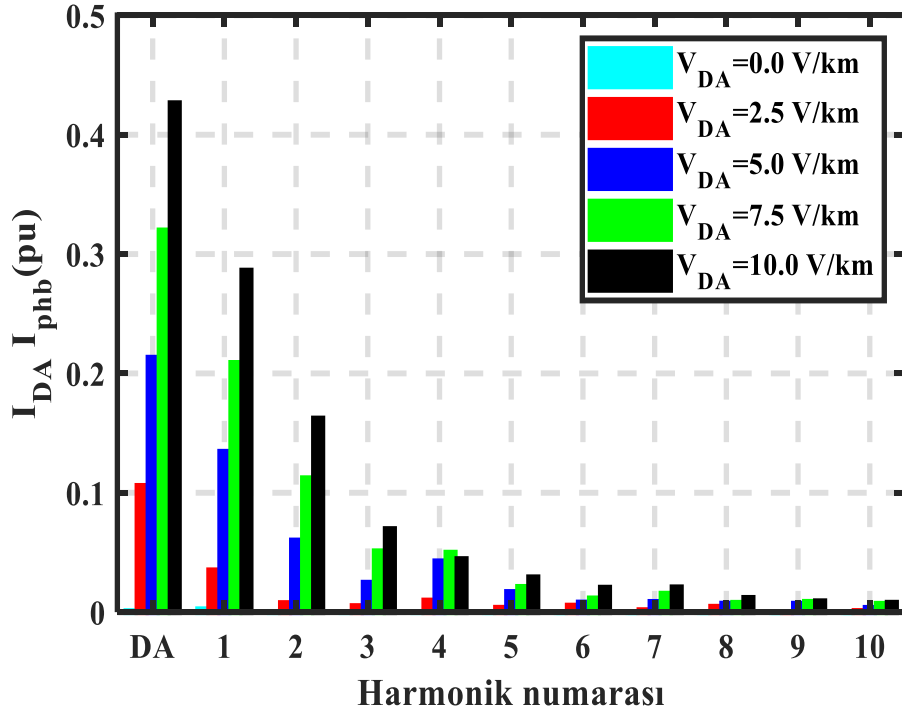
Şekil 3.8: Üç fazlı beş bacaklı çekirdek tipi nüveli transformatörün TDDIP_a, TDDIP_b ve TDDIP_c değerlerinin V_{DA} ile değişimi.

Öte yandan, primer taraf $m=a, b, c$ faz akımlarının DA (I_{pDA}) ve harmonik bileşenlerinin (I_{pHm}) dikkate alınan DA uyartım aralığında değişimi Şekil 3.9’da sunulmuştur. Bu şekilden yola çıkarak, V_{DA} değerindeki artışın, tek fazlı transformatör tipinde olduğu gibi faz akımlarının DA ve temel frekans harmonik bileşenleri yanı sıra özellikle düşük frekanslı harmonik bileşenlerinde önemli derecede artışa sebep olduğunun altı çizilmelidir.

Şekil 3.10’da ise transformatörde oluşan P_{DA} , P_{EC} , P_{OSL} , P_{TL} , P_{NL} kayıplarının ve Q_1 ’in normalize edilmiş değerlerinin farklı V_{DA} seviyeleri için değişimleri verilmiştir. Bu şekilden, P_{DA} , P_{TL} ve Q_1 ’in V_{DA} seviyesindeki artışa bağlı olarak önemli ölçüde arttığı belirtilebilir. Bu değerler V_{DA} ’nın 10 V/km olduğu durumda sırasıyla 0.19, 0.43 ve 0.32 N’ye ulaşmıştır. Burada, DA uyartım altında üç fazlı beş bacaklı çekirdek tipi nüveli transformatördeki kayıp ve reaktif güç talebi artışının tek fazlı kabuk tipi nüveli transformatördekine kıyasla daha az olduğunun altı çizilmelidir.

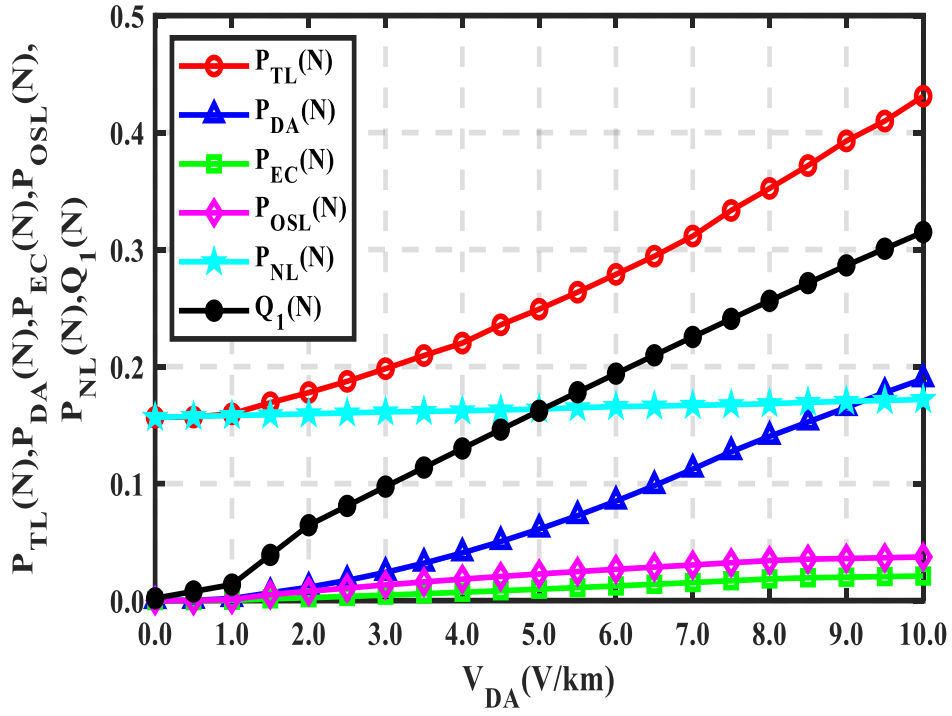


(a) a ve c fazları



(b) b fazı

Şekil 3.9: Üç fazlı beş bacaklı çekirdek tipi nüveli transformatörün boşa çalışma durumunda farklı V_{DA} seviyeleri için primer sargı akımlarının harmonik bileşenleri.



Şekil 3.10: Üç fazlı beş bacaklı çekirdek tipi nüveli transformatörün boшта çalışma durumunda kayıplarının ve temel harmonik reaktif güç talebinin V_{DA} ile değişimi.

3.3 Sonuç

Bu bölümde elde edilen analiz çıktılarından, tek fazlı kabuk tipi nüveli ve üç fazlı beş bacaklı çekirdek tipi nüveli transformatörlerde DA uyarımın,

- Nüvede dolanan manyetik akıların bir yarım periyotta aşırı artışına ve buna bağlı olarak nüvenin doymasına,
- Boшта çekilen akımların etkin değerlerinin ve harmonik bozulma seviyelerinin önemli derecede artmasına,
- Kayıpların ve reaktif güç talebinin yükselmesine,

yol açtığı sonuçlarına varılmıştır.

Bu sonuçlara ilaveten, tek fazlı kabuk tipi nüveli transformatörün üç fazlı beş bacaklı çekirdek tipi nüveli transformatöre göre DA uyarıtma daha fazla hassas olduğu ifade edilebilir. Ayrıca, dikkate alınan üç fazlı transformatör tipinde nüvenin asimetrik yapıya sahip olması dolayısıyla var olan boшта çalışma akımlarının dengesizliği DA uyarıtım altında artmıştır.

4. DA UYARTIM ALTINDA AZAMI YÜKLENME ORANI TESPİT YÖNTEMLERİNİN KARŞILAŞTIRMALI ANALİZİ

Literatürde, transformatörlerin anma güçlerine eşit güçte doğrusal olmayan yükleri beslerken anma kayıplarının üzerinde kayıplara sahip olduğu iyi bilinen bir durumdur. Bu durumun sebebi, doğrusal olmayan yüklerin çektiği sinüzoidal olmayan akımların içerdiği yüksek frekanslı bileşenlerin özellikle frekansa bağlı sargı kayıplarını önemli derecede artırmasıdır. Kayıplardaki aşırı artışlar ise transformatörlerin doğrusal olmayan yükler altında aşırı ısınması dolayısıyla ömür kaybı yaşamasına yol açmaktadır. Bu ömür kayıplarını önlemek amacıyla, “deratasyon (derating)” olarak isimlendirilen bir metot uygulanmıştır [65] [66].

Deratasyon metodu, “bir transformatörün sinüzoidal olmayan yük akımı altında kaybının anma kaybını geçmeyecek şekilde besleyebileceği azami yük gücünün tespiti” biçiminde kısaca açıklanabilir. Bu azami gücün (S_M) anma gücüne (S_{Tr}) oranı ise azami yüklenme oranı veya deratasyon faktörü olarak tanımlanmıştır [64]:

$$(\%)AYO = 100 \frac{S_M}{S_{Tr}} \quad (4.1)$$

Yukarıda sunulan literatür özetinden yola çıkılarak, bu bölümde, DA uyartım altında, tek fazlı kabuk tipi nüveli ve üç fazlı beş bacaklı çekirdek tipi nüveli transformatörler için çeşitli AYO tespit yaklaşımları karşılaştırmalı olarak analiz edilecektir. Analizlerde, geliştirilen modellerle sonuçlar elde edilecektir. Standartlarda, transformatörlerin harmonik bozulmaya sahip şebeke koşulları altında azami yüklenme oranlarının doğrudan tespiti için üç farklı yaklaşım önerilmiştir. Bu yaklaşımlar sırasıyla; (i) IEEE C.57.110 standardında tanımlı harmonik kayıp faktörü indisine (F_{HL}) dayalı metot (ii) UL 1562 standardında tanımlı K-faktör indisine dayalı metot [97] ve (iii) EN/CENELEC 50464-3 standardında tanımlı Faktör-K indisine dayalı olan metottur [98]. Bunlar, nüve kayıplarının ihmal edilebilir derecede değiştiği gerilim harmonik bozulması olan sistemler için oluşturulmuştur. Bir başka ifadeyle, bu metotlar oluşturulurken sadece akım harmoniklerinin sargı kayıplarına etkisi dikkate alınmıştır. Dolayısıyla, yük akımının harmonik spektrumu ve üretici tarafından sunulan transformatör kayıp bilgileriyle pratik bir şekilde uygulanabilirler. Ancak, bu pratik metotlar DA uyartım altında azami yüklenme oranı tespiti için uygun değildirler.

Bunlara ilaveten ölçüm veya model temelli bazı çalışmalarda, transformatörlerin sinüzoidal olmayan test şartlarındaki kayıpları anma kayıp değerleriyle karşılaştırılmış ve “anma kayıp değerinin aşılmadığı en yüksek yüklenme oranı”, azami yüklenme oranı olarak belirlenmiştir [78].

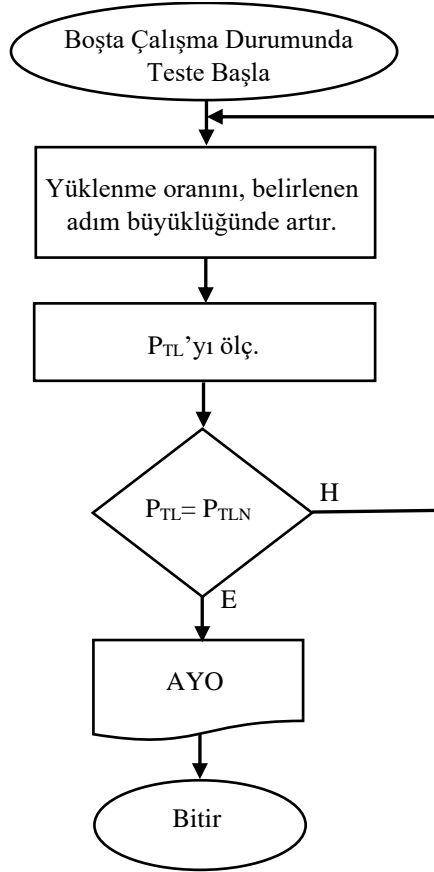
Diğer taraftan, doğrusal olmayan yükler altında çalışma durumuna benzer şekilde DA uyartım altında transformatör sargıları harmonik kirliliğe sahip akımlara maruz kalırlar. Ancak, ilk durumda harmonik kirliliğin ana kaynağı doğrusal olmayan yükler iken ikinci durumda harmonik akımları DA uyartıma bağlı nüve doyması neticesinde transformatör tarafından üretilir. Önceki bölümde sunulan analiz sonuçlarından, DA uyartımın transformatör boşa çalışma akımında önemli derecede harmonik kirliliğe sebep olduğu açıkça görülmüştür. DA uyartım altında harmonik kirliliğin yanı sıra sargılardan akan doğru akımlar, azami yüklenme oranını düşüren bir diğer etkidir.

4.1 Azami Yüklenme Oranı Tespit Yaklaşımları

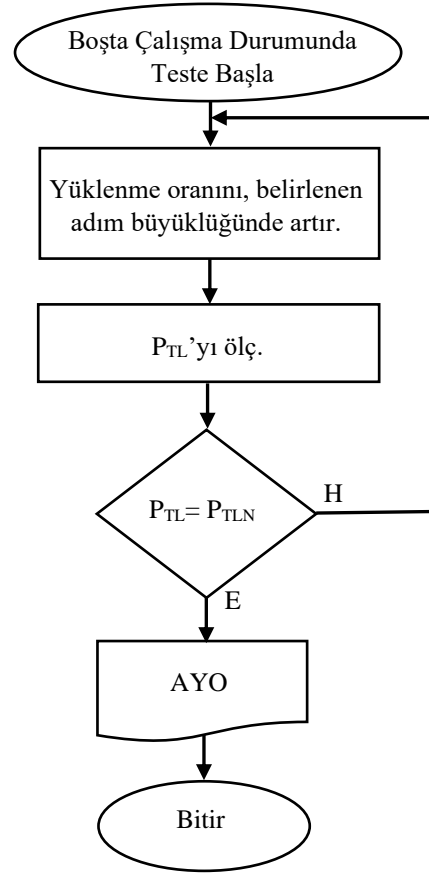
Bu tez kapsamında, DA uyartım şartları için üç farklı AYO tespit yaklaşımı dikkate alınmıştır. Bu üç yaklaşımda, AYO sırasıyla;

- Yaklaşım 1: Toplam kaybın (P_{TL}), anma toplam kayıp değerini aşmadığı en yüksek yüklenme oranı değeri,
- Yaklaşım 2: Primer faz akımı etkin değerinin, (I_p) primer anma akım değerini aşmadığı en yüksek yüklenme oranı değeri,
- Yaklaşım 3: Primer sargı kaybının (P_{PL}), anma primer kaybını aşmadığı en yüksek yüklenme oranı değeri,

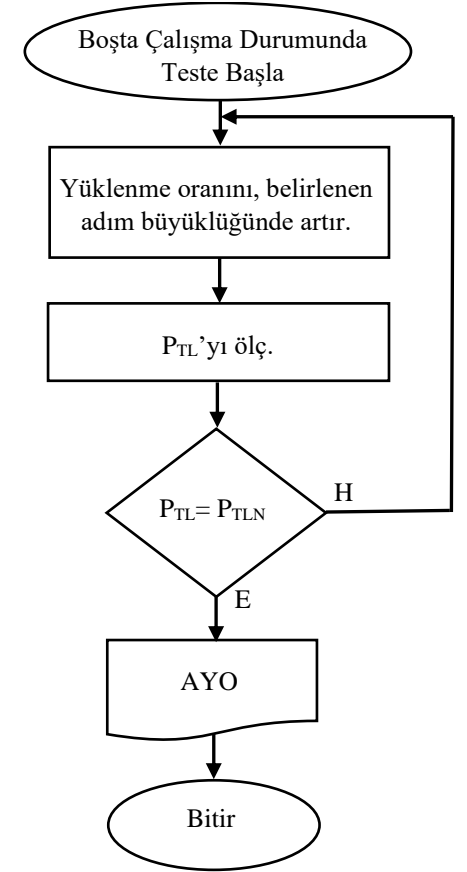
olarak belirlenmiştir.



(a)



(b)



(c)

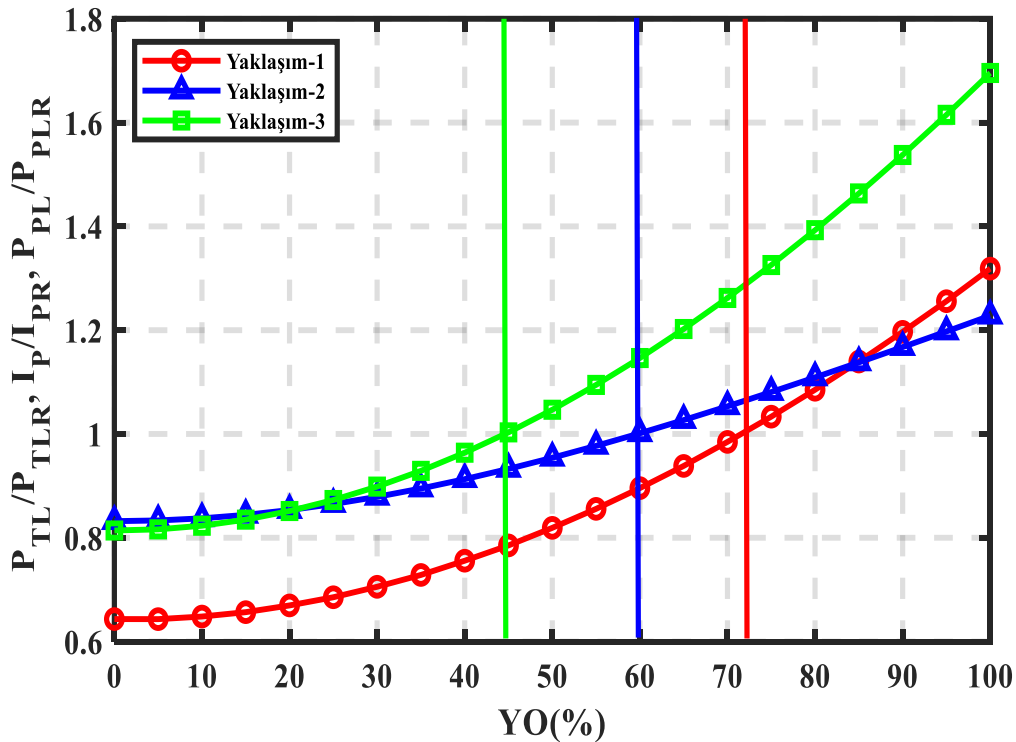
Şekil 4.1: Azami yüklenme oranı tespit yaklaşımlarına ait algoritma akış diyagramları.

Burada üç fazlı transformatörlerde DA uyartım altında nüvenin asimetrik durumundan dolayı faz akımlarının dengesiz olabileceğinin altı çizilmelidir. Dolayısıyla, bunlardan ikinci yaklaşım, üç fazlı beş bacaklı transformatör için uygulanırken en yüksek faz akımı etkin değeri dikkate alınmıştır.

4.2 Tek Fazlı Kabuk Tipi Nüveli Transformatör için AYO Analizleri

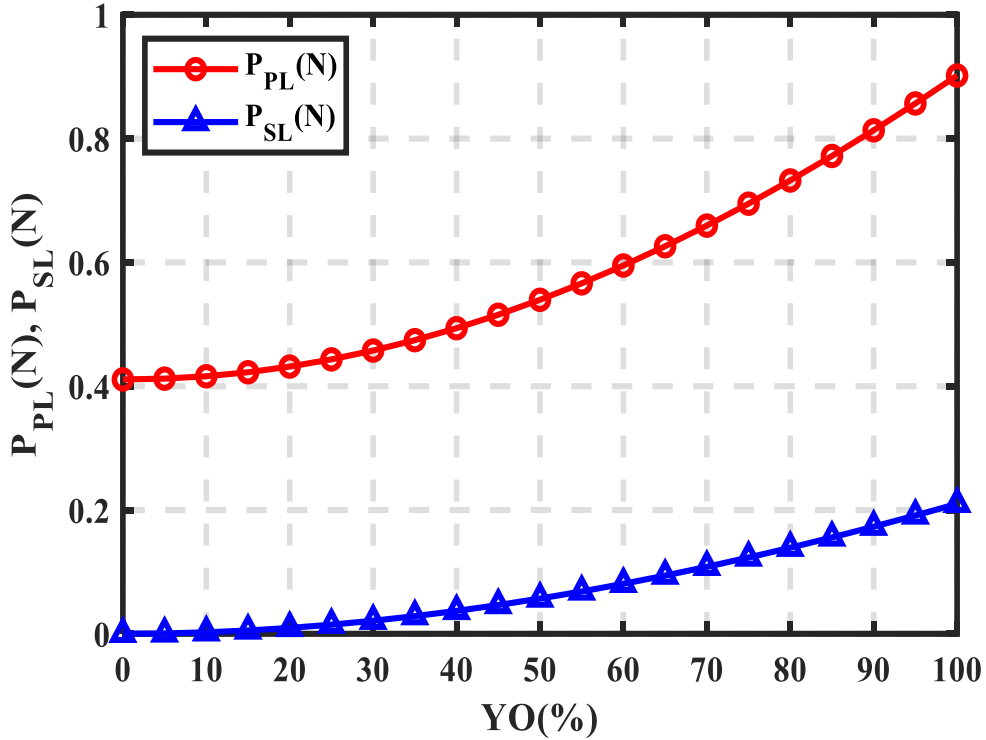
Bu kısımda, DA uyartım şartlarında, toplam kayıp, primer sargı akım etkin değeri ve primer sargı kaybı temelli AYO yaklaşımlarının (sırasıyla Yaklaşım 1, 2 ve 3'ün); tek fazlı kabuk tipi nüveli transformatör için sonuçları karşılaştırılmalı olarak analiz edilmiştir.

Analiz sisteminde daha önce belirtildiği üzere yük saf rezistif olup DA uyartım seviyesi 10 V/km olarak ayarlanmıştır. Bu DA uyartım seviyesi için $I_{PDA}=0.45$ bd'dir. Buna göre, test edilen DA uyartım şartlarında transformatörün yüklenme oranına (YO) bağlı olarak Yaklaşım 1, 2 ve 3'e ait kriter büyüklüklerinin anma değerlerine göre oranlarının (P_{TL}/P_{TLR} , I_P/I_{PR} ve P_{PL}/P_{PLR}) değişimleri Şekil 4.2'de sunulmuştur.



Şekil 4.2: Tek fazlı kabuk tipi nüveli transformatörün $V_{DA}=10$ V/km DA uyartım için P_{TL}/P_{TLR} , I_P/I_{PR} ve P_{PL}/P_{PLR} oranlarının YO ile değişimi.

Bu şekilde, kırmızı renkli dikey çizgi Yaklaşım 1, mavi renkli dikey çizgi Yaklaşım 2 ve yeşil renkli dikey çizgi ise Yaklaşım 3'e göre belirlenen AYO değerleridir. Aynı DA uyartım koşulu için, primer ve sekonder sargı kayıplarının anma sargı kaybına oranlanarak normalize edilmiş değerlerinin YO artışıyla değişimi Şekil 4.3'te çizdirilmiştir.



Şekil 4.3: Tek fazlı kabuk tipi nüveli transformatörün $V_{DA}=10$ V/km DA uyartım için P_{PL} ve P_{SL} değerlerinin YO ile değişimi.

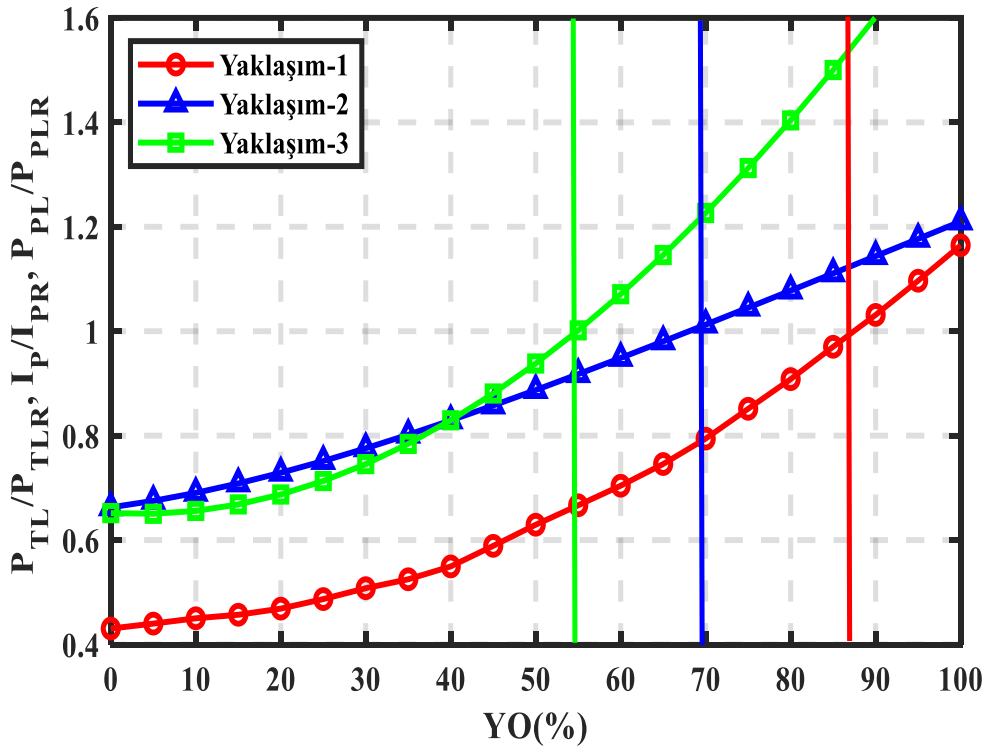
Şekil 4.2 incelendiğinde, Yaklaşım 1, 2 ve 3'e göre AYO'nun sırasıyla %72, %60 ve %44 olduğu görülmektedir. Yaklaşım 1 ve 3 arasındaki farkın ortaya çıkma sebebi ise Şekil 4.3'den izah edilebilir. Bu şekilde, DA uyartım koşullarının transformatörün sekonder sargısını ihmal edilebilir derecede etkilediği ve $V_{DA}=10$ V/km uyartım için primer sargı kaybının, sekonder sargı kaybından önemli ölçüde daha yüksek olduğu görülmektedir.

Öte yandan, Yaklaşım 2 ve 3 arasındaki farkın sebebi ise Yaklaşım 2'de frekans bilgisi ihmal edilirken, Yaklaşım 3'de primer sargının frekansa bağlı kayıplarının dikkate alınmış olmasıdır. Buna göre, ilk iki yaklaşıma göre transformatörün azami yüklenmesi sınırlandırıldığı takdirde, primer sargıda anma değerinin üzerinde kayıplara sebep olacağı açıkça ifade edilebilir. Bir başka deyişle, Yaklaşım 1 ve 2'ye uygun deretasyon yapıldığı takdirde transformatörün primer sargısı aşırı ısınacaktır.

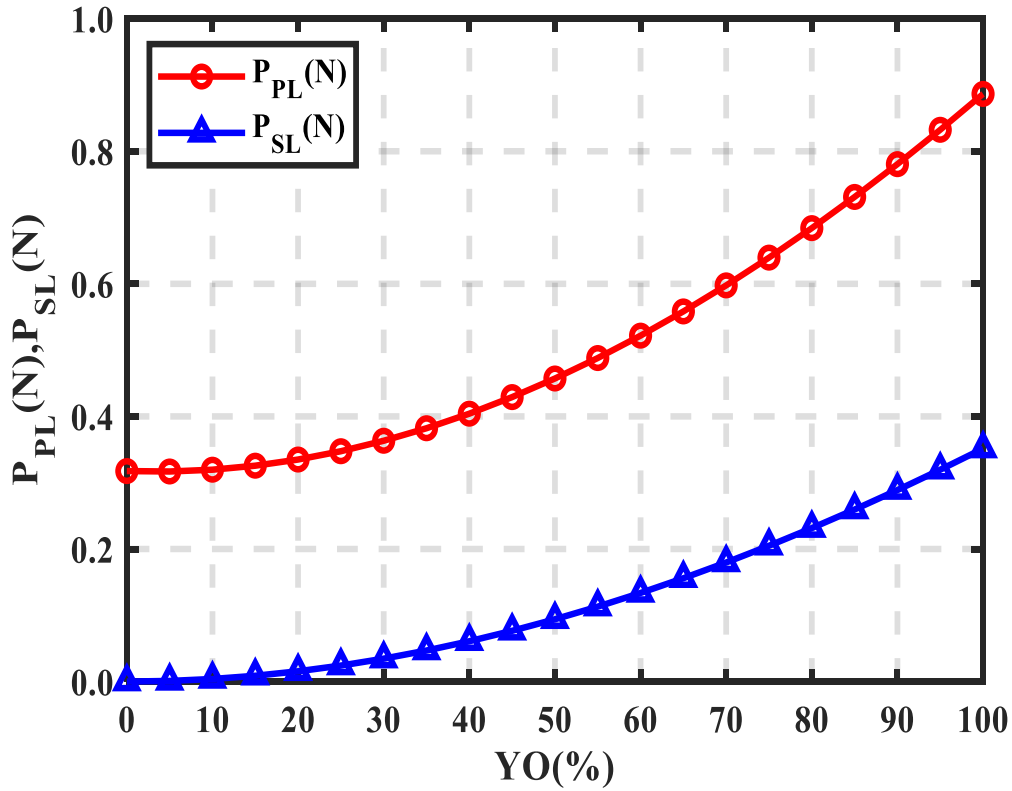
4.3 Üç Fazlı Beş Bacaklı Çekirdek Tipi Nüveli Transformator için AYO Analizleri

Bu kısımda, üç fazlı beş bacaklı çekirdek tipi nüveli transformatorün DA uyartım altında, Yaklaşım 1, 2 ve 3'e göre AYO'ları karşılaştırılmalı olarak analiz edilmiştir. Test sisteminde tek fazlı kabuk tipi transformatorün AYO analizi için uygulanan DA uyartım seviyesi ve yük tipi dikkate alınmıştır.

Buna göre, test edilen DA uyartım şartlarında transformatorün yüklenme oranına (YO) bağlı olarak Yaklaşım 1, 2 ve 3'e ait kriter büyüklüklerinin anma değerlerine göre oranlarının (P_{TL}/P_{TLR} , I_P/I_{PR} ve P_{PL}/P_{PLR}) değişimleri Şekil 4.4'de sunulmuştur. Bu şekilde, kırmızı renkli dikey çizgi Yaklaşım 1, mavi renkli dikey çizgi Yaklaşım 2 ve yeşil renkli dikey çizgi ise Yaklaşım 3'e göre hesaplanan AYO değerlerini göstermektedir. Aynı DA uyartım şartları altında, primer ve sekonder sargı kayıplarının anma sargı kaybına oranlanarak normalize edilmiş değerlerinin YO'ya bağlı değişimleri Şekil 4.5'te çizdirilmiştir.



Şekil 4.4: Üç fazlı beş bacaklı çekirdek tipi nüveli transformatorün $V_{DA}=10$ V/km DA uyartım için P_{TL}/P_{TLR} , I_P/I_{PR} ve P_{PL}/P_{PLR} oranlarının YO ile değişimi.



Şekil 4.5: Üç fazlı beş bacaklı çekirdek tipi nüveli transformatörün $V_{DA}=10$ V/km DA uyarım için P_{PL} ve P_{SL} değerlerinin YO ile değişimi.

Şekil 4.4'den, üç fazlı beş bacaklı çekirdek tipi nüveli transformatörün YO değerlerinin, Yaklaşım 1'e göre %88, Yaklaşım 2'ye göre %70 ve Yaklaşım 3'e göre %54 olduğu görülmektedir. Şekil 4.5'den ise tek fazlı kabuk tipi nüveli transformatörde gözlemlendiği gibi bu transformatör tipi için de sargı kaybının büyük bir kısmının primer sargılarda meydana geldiği ifade edilmelidir.

Böylece, bu sonuçlar daha önce sunulan sonuçlarla beraber yorumlanırsa, tek fazlı kabuk tipi nüveli transformatörle benzer şekilde, üç fazlı beş bacaklı çekirdek tipi nüveli transformatör için de Yaklaşım 1 ve 2'ye göre yapılan azami yüklenme oranı sınırlandırmasının aşırı ısınmaya engel olmamaktadır. Yaklaşım 3'ün her iki transformatör tipi için AYO tespitinde ömür kaybı dikkate alındığında en uygun yol olduğu ayrıca belirtilmelidir. Bunlara ilaveten, analizlerde uygulanan DA uyarım seviyesi, dikkate alınan tek fazlı transformatör tipinde üç fazlı transformatör tipine kıyasla AYO'yu önemli ölçüde daha fazla düşürmüştür.

4.4 Sonuç

DA uyarım altında, sargılardan akan doğru akım bileşeni ve doymaya bağlı harmonik kirlilik düzeyi artmış uyarım akımı sebebiyle transformatörlerin kayıpları artar. Bu durumda, transformatörlerin kayıp artışına bağlı aşırı ısınmaya maruz kalarak zarar görmemeleri için azami yüklenme oranları tespit edilmeli ve bu oranı aşmayacak şekilde çalıştırılmaları gerekir.

Bu bölümde, azami yüklenme oranı veya deretasyon faktörü hesabı için üç farklı yaklaşım ele alınmıştır. Bu yaklaşımlarda, izin verilen azami yüklenme oranları sırasıyla,

- Toplam kaybın anma kaybına (Yaklaşım 1),
- Primer faz akımı etkin değerinin anma primer akımına (Yaklaşım 2),
- Primer sargı toplam kaybının anma primer sargı kaybına (Yaklaşım 3),

eşit olduğu yüklenme oranı olarak belirlenmiştir.

Bu yaklaşımlardan ikincisi uygulanırken, üç fazlı transformatörlerde DA uyarım altında nüvenin asimetrik durumundan dolayı faz akımlarının dengesizliğinin yüksek değerde olabileceği göz önünde tutulmuştur. Dolayısıyla, Yaklaşım 2, üç fazlı transformatör için uygulanırken en yüksek faz akımı etkin değeri dikkate alınmıştır.

Geliştirilen model kullanılarak, $V_{DA}=10$ V/km ($I_{PDA}=0.45$ bd) DA uyarım ve rezistif yüklenme için yukarıda verilen AYO tespit yaklaşımlarının karşılaştırmalı analizi yapılmıştır. Analizlerden aşağıda sıralanan sonuçlara ulaşılmıştır:

- İlk iki yaklaşıma dayalı olarak hesaplanan AYO'lar, her iki transformatör tipi için de anma primer sargı kaybının üzerinde primer sargı kayıplarına sebep olmaktadır. Diğer bir deyişle, ilk iki yaklaşıma göre yapılan azami yüklenme sınırlandırması, DA uyarım altında transformatörlerin primer sargı aşırı ısınmasını ve ömür kaybını önlemez.
- DA uyarım altındaki transformatörlerde AYO sınırlandırmasının, üçüncü yaklaşıma göre yapılması, ömür kaybı bakımından diğer yaklaşımlara göre daha güvenlidir.

- Transformatörün azami yüklenme oranının doğru bir şekilde belirlenmesi için relüktans tabanlı modellerde sargı dirençlerinin frekans bağımlılığının dikkate alınması gereklidir.
- Tüm bunlara ek olarak, üç fazlı beş bacaklı çekirdek tipi nüveli transformatörün, tek fazlı kabuk tipi nüveli olana kıyasla aynı DA seviyesi için daha yüksek azami yüklenme oranına sahiptir.

5. DA UYARTIM ALTINDA AZAMI YÜKLENME ORANININ İYİLEŞTİRİLMESİ

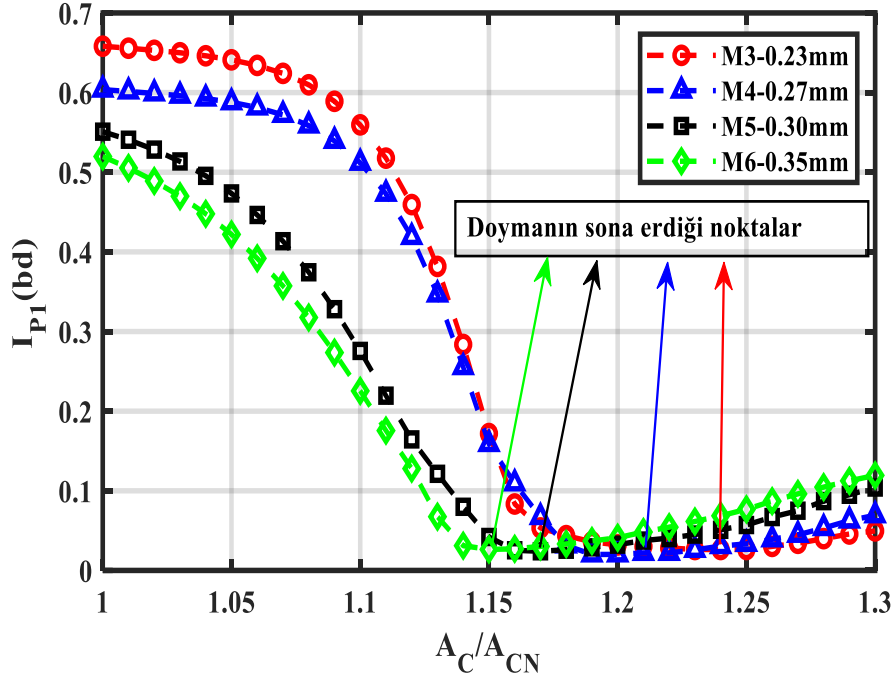
Bu bölümde, geliştirilen modeller kullanılarak DA uyartım altında AYO iyileştirmesi için transformatör tasarımı üzerine parametrik analizler yapılmıştır. Analizlerde, transformatörün nüve malzemesinin manyetik geçirgenliği veya malzeme cinsi (Tasarım Parametresi-1) ve nüve kesit alanı (Tasarım Parametresi-2) ele alınmıştır.

Tasarımlarda dikkate alınan nüve malzemeleri manyetik geçirgenlikleri büyükten küçüğe olacak şekilde sırasıyla; M3-0.23mm, M4-0.27mm, M5-0.30mm ve M6-0.35mm'dir. Analizlerde, her malzeme için B-H eğrileri ve nüve kaybını temsil eden dirençleri modele tanıtılmıştır. Tanıtılan malzeme verileri ekler kısmında sunulmuştur.

Farklı nüve manyetik malzeme seçimlerine ek olarak, analizlerde transformatörün boyunduruklarının ve dış ayaklarının kesit alanları değiştirilmiştir. Sargıların bulunduğu ana bacakların kesit alanları, sargıların boyutunu ve empedansını etkileyecek olması sebebiyle analizlerde sabit tutulmuştur.

5.1 Tek Fazlı Kabuk Tipi Nüveli Transformatör için Parametrik Analiz

Bu kısımda, $V_{DA}=10$ V/km DA uyartım altında, yukarıda belirtilen 4 çeşit nüve malzemesine sahip ancak özdeş sargıları olan 4 farklı tek fazlı kabuk tipi nüveli transformatörün AYO'larının nüve kesit alanı artışı ile değişimi incelenmiştir. Bu transformatörlerin boşa çalışma durumunda ve belirlenen DA uyartım altında, temel frekans akım etkin (I_{P1}) değerlerinin, sargıların bulunduğu ana bacak hariç diğer nüve parçalarının kesit alanlarının (A_C), nominal (orjinal) nüve kesit alanına (A_{CN}) oranına göre değişimi Şekil 5.1'de sunulmuştur. Şekil 5.1'den, dört manyetik nüve malzemesinin tümü için I_{P1} 'in doymanın sona erdiği A_C/A_{CN} oranına kadar azaldığı ve M3-0.23mm, M4-0.27mm, M5-0.30mm ve M6-0.35mm malzemeleri için bu A_C/A_{CN} oranının sırasıyla yaklaşık 1.24, 1.21, 1.18 ve 1.15 olduğu belirtilebilir.

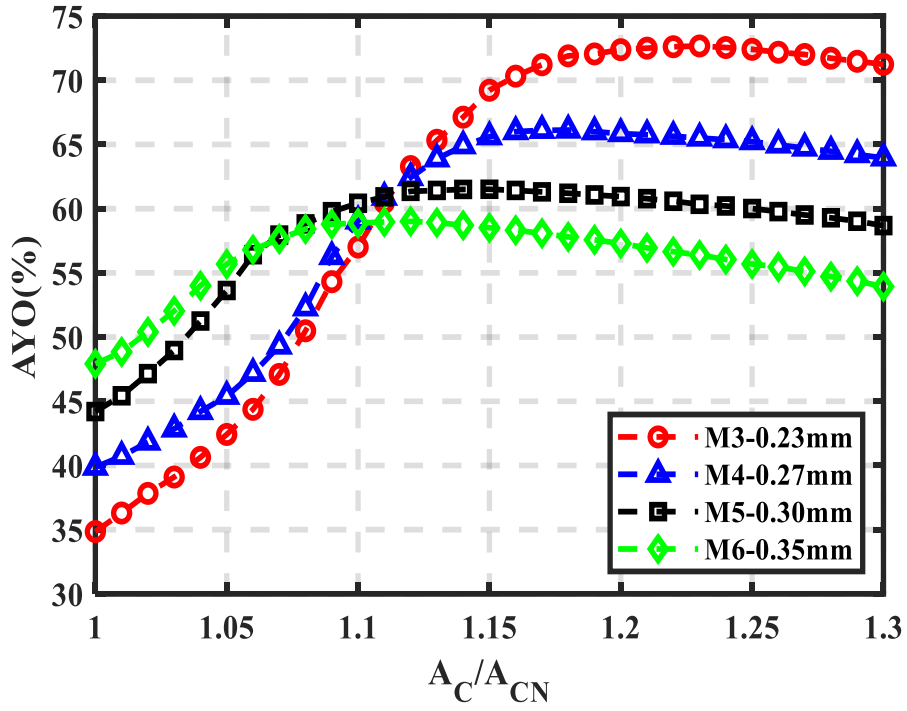


Şekil 5.1: 10 V/km DA uyartım altında, tek fazlı kabuk tipi nüveli transformatörün 4 farklı nüve malzemesi için nüve kesit alanının artışıyla I_{P1} değerlerinin değişimi.

Yine aynı şekilden, doymanın olmadığı A_C/A_{CN} aralığında ise kesit artışıyla I_{P1} arttığı görülmektedir. Bunun sebebi olarak, bu aralıkta kesit artışıyla, nüve manyetik akı yoğunluğunun (B) ilgili malzemenin B-H eğrisinin dirsek noktasının altına inmesi olarak yorumlanmıştır.

Ayrıca, doymanın var olduğu A_C/A_{CN} aralığında, daha düşük manyetik geçirgenliğe bir başka ifadeyle daha yüksek relüktansa sahip nüve malzemeli transformatörler, daha düşük uyartım akımı çekmektedir. Ancak doymanın söz konusu olmadığı A_C/A_{CN} aralığında ise bu durumun tam tersi olduğu görülmektedir.

Buraya kadar söylenenlere ilaveten, A_C/A_{CN} oranının artmasıyla, nüve manyetik malzemeleri birbirinden farklı dört farklı transformatör için AYO değerlerinin önce arttığı ve daha sonra azaldığı Şekil 5.2'den görülmektedir. Aynı şekil, doymanın ortadan kalktığı en küçük A_C/A_{CN} değerlerinde, bu transformatörlere ait AYO'ların en yüksek değerlerine ulaştığını göstermektedir. Doyma koşulları altında, orijinal kesit alanı değerinde ($A_C/A_{CN}=1$), AYO değerleri M3-0.23mm, M4-0.27mm, M5-0.30mm ve M6-0.35 mm malzemeden nüveler için sırasıyla yaklaşık %35, %39, %44 ve %47'dir. Gözlemlenen en yüksek AYO değerleri ise M3-0.23mm, M4-0.27mm, M5-0.30mm ve M6-0.35mm malzemeden nüveler için sırasıyla yaklaşık %72, %67, %61 ve %59'dur.

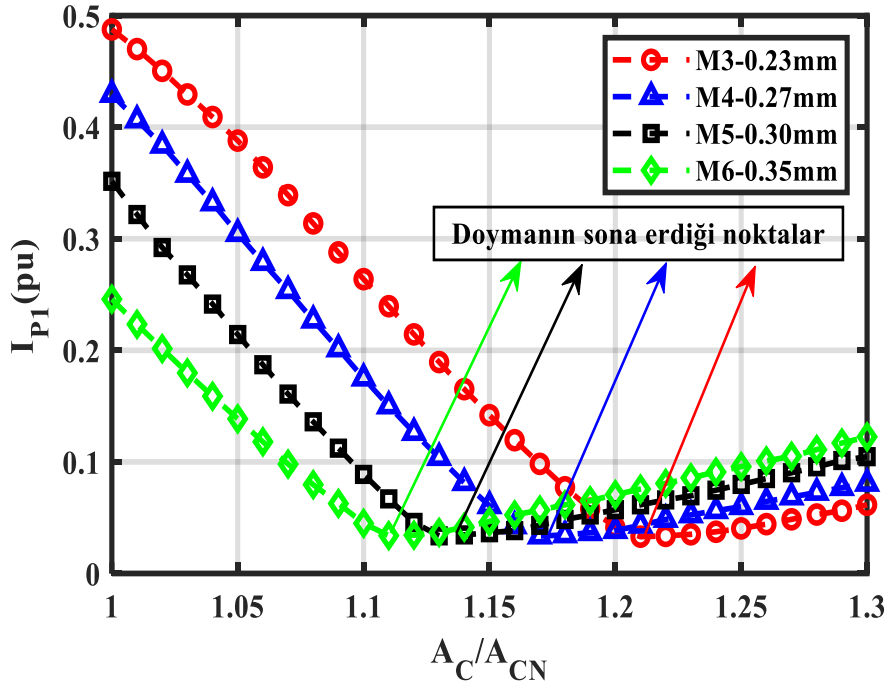


Şekil 5.2: 10 V/km DA uyarım altında, tek fazlı kabuk tipi nüveli transformatörün 4 farklı nüve malzemesi için nüve kesit alanının artışıyla AYO değerlerinin değişimi.

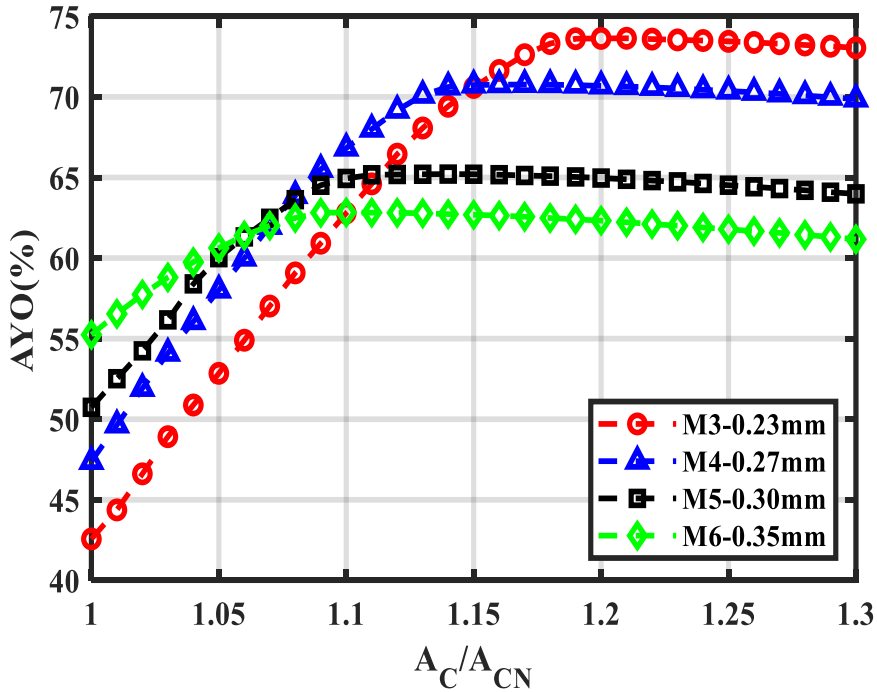
5.2 Üç Fazlı Beş Bacaklı Çekirdek Tipi Nüveli Transformatör için Parametrik Analiz

Bu kısımda, 10 V/km DA uyarım altında, üç fazlı beş bacaklı çekirdek tipi nüveli transformatörün Tasarım Parametresi 1 ve 2'nin değişimine bağlı olarak elde edilecek AYO değerleri incelenmiştir.

Böylece, ilgili transformatöre ait nüvenin dış bacak ve boyunduruklarının kesit alanları artırılarak, M3-0.23mm, M4-0.27mm, M5-0.30mm ve M6-0.35mm nüve malzemeleri için yüksüz durumda hesaplanan temel frekans akım etkin (I_{P1}) değerlerinin değişimi Şekil 5.3'de verilmiştir. Ayrıca, nüve kesit alanının artmasıyla, aynı manyetik malzemeler için transformatörün AYO değerlerinin değişimi Şekil 5.4'de sunulmuştur.



Şekil 5.3: 10 V/km DA uyartım altında, üç fazlı beş bacaklı çekirdek tipi nüveli transformatörün 4 farklı nüve malzemesi için nüve kesit alanının artışıyla I_{P1} değerlerinin değişimi.



Şekil 5.4: 10 V/km DA uyartım altında, üç fazlı beş bacaklı çekirdek tipi nüveli transformatörün 4 farklı nüve malzemesi için nüve kesit alanının artışıyla AYO değerlerinin değişimi.

Şekil 5.3 ve Şekil 5.4, Şekil 5.1 ve Şekil 5.2 ile karşılaştırmalı olarak değerlendirildiğinde, üç fazlı beş bacaklı çekirdek tipi nüveli transformatörde malzeme cinsi ve bacak kesit alanı tasarım parametrelerinin değişimiyle I_{P1} ve AYO değerlerinin değişiminin, tek fazlı kabuk tipi nüveli transformatördeki ilgili değişimle benzer eğilimde olduğu sonucuna ulaşılmıştır.

Ayrıca aynı değerlendirmeden, üç fazlı beş bacaklı çekirdek tipi nüveli transformatörde, M3-0.23mm, M4-0.27mm, M5-0.30mm ve M6-0.35mm malzemeleri için A_C/A_{CN} oranının sırasıyla yaklaşık olarak 1.21, 1.17, 1.14 ve 1.12 değerlerinde doygunluğun ortadan kalktığı görülmektedir. Buna ek olarak, bu noktalarda elde edilen, en yüksek AYO değerleri M3-0.23mm, M4-0.27mm, M5-0.30mm ve M6-0.35mm için sırasıyla yaklaşık %74, %70, %65 ve %63'dür. Böylece, üç fazlı beş bacaklı çekirdek tipi nüveli transformatörün tek fazlı kabuk tipi nüveli transformatöre kıyasla, doymanın ortadan kaldırılması ve en yüksek AYO değerine ulaşmak için ihtiyaç duyduğu kesit alanı artışının daha küçük olduğu ifade edilebilir. Ayrıca, üç fazlı transformatör tipinde tek fazlı transformatör tipine kıyasla en iyilenen AYO değerleri daha yüksektir.

5.3 Sonuç

Bu kısımda, DA uyartım koşulları altında, AYO üzerinde manyetik malzeme seçimi ve nüve kesit artışıyla AYO'nun en iyilenmesi analiz edilmiştir. Analiz için, nüve malzemesi olarak, manyetik geçirgenlikleri büyükten küçüğe olacak şekilde sırasıyla; M3-0.23mm, M4-0.27mm, M5-0.30mm, M6-0.35mm malzemeleri seçilmiştir. Analizde, boyundurukların ve transformatörün dış bacaklarının kesit alanları değiştirilmiştir. Sargıların bulunduğu ana bacakların kesit alanları değiştirilmemiştir. Bunun sebebi, nüve kesit alanındaki değişimin sargıların boyutu ve empedansında değişime yol açmadan gerçekleştirilmesinin amaçlanmasıdır.

Analizden elde edilen sonuçlar aşağıda sıralanmıştır:

- Doyma bölgesinde, nüve malzemesi daha yüksek manyetik geçirgenlikli olan transformatörler, daha düşük manyetik geçirgenlikli nüveye malzemesine sahip olanlara göre daha yüksek uyartım akımına ve daha düşük AYO oranına sahiptir.
- Ancak DA uyartım altında çalışan doymamış transformatörlerde durum, ilk maddedekinin (doyma bölgesinde çalışan transformatörlerin) tersidir.

- Yüksek geçirgenlikli nüve manyetik malzemesine sahip transformatörler, düşük geçirgenlikli nüve manyetik malzemesine sahip transformatörlere kıyasla DA uyarıtıma bağlı doymadan çıkmak için daha fazla kesit alanı artışına ihtiyaç duyar.
- DA uyarıtım koşulları için, kesit alanının AYO oranı üzerindeki etkisi, geçirgenliği yüksek manyetik nüve malzemeli transformatörlerde düşük geçirgenlikli manyetik nüve malzemeli transformatörlere göre çok daha fazladır.
- Üç fazlı beş bacaklı çekirdek tipi nüveli transformatörün tek fazlı kabuk tipi nüveli transformatöre kıyasla, doymanın ortadan kaldırılması ve en yüksek AYO değerine ulaşmak için ihtiyaç duyduğu kesit alanı artışı daha küçüktür.
- Ayrıca, üç fazlı transformatör tipinde tek fazlı transformatör tipine kıyasla en iyilenen AYO değerleri daha yüksektir.

6. SONUÇLAR VE GELECEK ÇALIŞMALAR

Güç transformatörleri, AA enerji iletimi ve dağıtımında, gerilimi düşürmek veya yükseltmek amacıyla kullanılan bir başka ifadeyle elektrik enerjisini elektrik enerjisine dönüştüren anma sinüzoidal besleme şartları altında çalışmak için tasarlanan alternatif akım (AA) makineleridir.

Ancak, AA sistemler, Güneş patlamaları sırasında Dünya'nın kutuplara yakın bölgelerinde jeomanyetik alandaki bozulmalar sebebiyle enerji nakil hatlarında indüklenen çok düşük frekanslı ve pratikte DA kabul edilen akımlara maruz kalabilmektedir. Bununla birlikte, yüksek gerilim doğru akım (YGDA) iletim sistemlerinden veya transformatörsüz fotovoltaik dağıtık üretim birimlerinden, AA enerji şebekelerine DA akımlar akabilmektedir.

Bu DA akımlar sebebiyle, transformatörler DA uyarıtıma maruz kalırlar ve DA uyarıtımın yönüne bağlı olarak pozitif veya negatif çevrimde doyuma girerler. Doyma durumu ise transformatörlerde, kayıp, reaktif güç talebi, boşa çalışma akımının etkin değeri ve akım harmonik bozulmasında artışa yol açar. Ayrıca, kayıplardaki artış transformatörün yüklenme kapasitesinin düşmesine sebep olur.

Doymaya bağlı meydana gelen yukarıda belirtilen olumsuz etkileri önlemek amacıyla, literatürdeki birçok çalışmada, direnç, bobin veya kondansatör içeren pasif devreler ve güç elektroniği temelli aktif devreler, DA akışını engelleyici cihaz (DC blocking device) olarak çalışılmıştır. Bununla birlikte, DA akış engelleyici cihazların kullanımı yüksek maliyetlere ve güç sistemlerine olumsuz etkilere sebep olabileceğinden, bunların boyutlandırılması ve güç sistemlerine yerleştirilmesi, literatürde bir en iyileme problemi olarak ta ele alınmıştır.

DA uyarıtımın transformatörler üzerindeki etkilerinin analizinde, literatürde genellikle ölçüm sonuçları ve Sonlu Elemanlar Yöntemi (SEY) ile elde edilen sonuçlar kullanılmıştır. Ancak, son yıllarda, gerek DA uyarıtım bileşenli gerekse harmonik bozulmaya sahip gerilimlerin transformatörlere etkilerinin analizinde, elektrik-manyetik eşdeğer devre (relüktans tabanlı) modeller de kullanılmaya başlanmıştır. Bunun sebebi, ölçüm tabanlı çalışmaların yüksek maliyetli ekipmanlar gerektirmesi ve SEY tabanlı modellerin ise analiz sürelerinin uzun olması ile birlikte yüksek performanslı bilgisayarlara ihtiyaç duymalarıdır. Dolayısıyla, sargıların elektrik eşdeğer devre ve nüvenin manyetik eşdeğer devre olarak temsil edildiği

elektrik-manyetik eşdeğer devre modelleri, zaman tanım bölgesinde hesaplama verimliliği ile ön plana çıkmıştır. Bu simülasyon ve ölçüm temelli analiz çalışmalarından,

- Tek fazlı transformatörlerin üç fazlı transformatörlere göre DA uyarıtma daha hassas olduğu bir başka deyişle daha fazla olumsuz etkilendiği,
- Aynı faz sayısı için kabuk tipi nüveli transformatörlerin çekirdek tipi nüvelilere göre DA uyarıtma daha hassas olduğu,
- Bacak sayısı arttıkça transformatörlerin DA uyarıtma hassasiyetinin arttığı,
- DA uyarıtımın transformatörler üzerindeki en önemli etkilerinden birinin azami yüklenme kapasitesinin azalması olduğu,
- Dolayısıyla transformatörlerin, DA uyarıtım altında erken yaşlanmasına ve zarar görmesine mani olmak için azami yüklenme oranlarının (AYO değerlerinin) belirlenmesi gerektiği,

ifade edilebilir.

Öte yandan, erişilebilir literatürde elektrik-manyetik eşdeğer devre modellerinin sargı kayıplarının frekansa bağımlılığını dikkate almadığı görülmektedir. Bu ihmalin, DA uyarıtım durumlarında, transformatör uyarıtım akımlarının önemli derecede harmonik bileşen içermesi göz önüne alındığında, özellikle kayıp hesaplamaları ve azami yüklenme kapasitesinin belirlenmesinde önemli hatalara yol açabileceği açıktır.

Bu tez çalışmasında, tek fazlı kabuk tipi nüveli ve üç fazlı beş bacaklı çekirdek tipi nüveli transformatörlerin DA uyarıtım koşullarında zaman verimli simülasyonu için, sargı kayıplarının frekansa bağımlı doğası dikkate alınarak elektrik-manyetik eşdeğer devre modelleri geliştirilmiştir. Geliştirilen modeller Matlab/SIMULINK ortamında uygulanmıştır.

Buna göre ilk olarak, geliştirilen ve iki boyutlu (2B) SEY modellerinin, anma sinüzoidal gerilim ve DA bileşene sahip gerilim koşulları için sonuçları karşılaştırmalı olarak değerlendirilmiştir. Böylece, geliştirilen modellerin geçerliliği gösterilmiştir.

İkinci olarak, geliştirilen modeller kullanılarak DA uyarımın, dikkate alınan iki farklı transformatör tipine etkileri boşa çalışma durumunda analiz edilmiştir. Bu analizlerden DA uyarım seviyesinin artışıyla,

- Dikkate alınan transformatörlerde nüvelerin doyuma ulaştığı, buna bağlı olarak temel ve temel olmayan frekanslarda uyarım akımlarının genliklerinin dolayısıyla uyarım akımının etkin değerinin ve harmonik bozulma miktarının arttığı,
- Bunun neticesinde, transformatörlerin sargı kayıpları ile reaktif güç taleplerinin arttığı,
- Tek fazlı kabuk tipi nüveli transformatörün, üç fazlı beş bacaklı çekirdek tipi nüveli transformatöre kıyasla DA uyarıma karşı daha hassas olduğu,

sonuçlarına ulaşılmıştır.

Üçüncü olarak, her iki transformatör tipinin DA uyarım altında azami yüklenme oranları (AYO'ları) geliştirilen modeller kullanılarak üç farklı yaklaşıma göre analiz edilmiştir. Bu yaklaşımlar sırasıyla; toplam kaybın (Yaklaşım-1), primer faz akımı etkin değerinin (Yaklaşım-2) ve primer sargı kaybının (Yaklaşım-3) kriter olarak kabul edildiği yaklaşımlardır. DA uyarım altında Yaklaşım 1, 2 ve 3'e göre yapılan AYO analizlerinden,

- Yaklaşım 1 ve 2'den hesaplanan AYO değerlerinin, transformatörlerin anma değerinin üzerinde primer sargı kayıplarına sebep olduğu, ancak aynı tespitin Yaklaşım 3 için geçerli olmadığı,
- Dolayısıyla, DA uyarım altındaki transformatörler için AYO hesabında, üçüncü yaklaşımın diğer iki yaklaşımla karşılaştırıldığında aşırı ısınmayı önleme bakımından daha güvenilir olduğu,
- Transformatörün azami yüklenme oranının doğru bir şekilde belirlenmesi için relüktans tabanlı modellerde sargı dirençlerinin frekans bağımlılığının dikkate alınması gerektiği,
- Tüm bunlara ek olarak, DA uyarım altında üç faz beş bacaklı çekirdek tipi nüveli transformatörün tek fazlı kabuk tipi nüveli transformatöre göre daha yüksek azami yüklenme oranına sahip olduğu,

görülmüştür.

Son olarak, yine geliştirilen modeller kullanılarak, DA uyartım altında AYO iyileştirmesi için transformatör tasarımı üzerine parametrik analizler yapılmıştır. Analizlerde, transformatörün iki tasarım parametresi, nüve malzemesinin manyetik geçirgenliği veya malzeme cinsi (Tasarım Parametresi-1) ve nüve kesit alanı (Tasarım Parametresi-2) dikkate alınmıştır. Dikkate alınan nüve malzemeleri manyetik geçirgenlikleri büyükten küçüğe olacak şekilde sırasıyla; M3-0.23mm, M4-0.27mm, M5-0.30mm, M6-0.35mm'dir. Analizde, boyundurukların ve transformatörün dış bacaklarının kesit alanları değiştirilmiştir. Sargıların bulunduğu ana bacakların kesit alanları değiştirilmemiştir. Bunun sebebi, ana bacaklardaki kesit artışının sargıların uzunluğunu ve empedansını değiştirmesidir. Bu analizden elde edilen ana çıktılar ise;

- Doyma koşullarında, nüve malzemesi daha yüksek manyetik geçirgenlikli veya daha düşük relüktanslı olan transformatörlerin, daha düşük manyetik geçirgenlikli veya daha yüksek relüktanslı nüve malzemesine sahip olanlara göre daha yüksek uyartım akımı çektiği ve daha düşük AYO'ya sahip olduğu,
- Ancak, DA uyartım altında çalışan doymamış transformatörler için durumun doyma koşullarındakinin tersi olduğu,
- Yüksek manyetik geçirgenlikli nüve malzemesine sahip transformatörlerin, düşük manyetik geçirgenlikli nüve malzemesine sahip transformatörlere kıyasla, DA uyartıma bağlı doygunluktan kurtulmak için daha fazla nüve bacak kesit alanı artışına ihtiyaç duyduğu,
- DA uyartım koşulları için, kesit alanı artışının AYO üzerindeki etkisinin, manyetik geçirgenliği yüksek malzemedan yapılmış nüveli transformatörlerde düşük manyetik geçirgenlikli malzemedan yapılmış nüveli transformatörlere göre çok daha fazla olduğu,

sonuçlarına varılmıştır.

Gelecek çalışmalarda, bu tez kapsamında geliştirilen modeller kullanılarak, ev tipi tek fazlı transformatörsüz fotovoltaik dağıtık üretim birimlerinin yoğun kullanıldığı ve dengesizliğin var olduğu dağıtım sistemlerinde, dağıtım transformatörlerinin azami yüklenme kapasitesinin analizinin yapılması planlanmaktadır. Ayrıca, yine bu tez kapsamında geliştirilen modelleme yaklaşımı dikkate alınarak, gelecek çalışmalarda, üç fazlı üç bacaklı

çekirdek tipi nüveli ve üç fazlı yedi bacaklı çekirdek tipi nüveli güç transformatörlerinin DA uyartım altında analizi için sargı kayıplarının frekans bağımlı doğası ihmal edilmemiş elektrik-manyetik eşdeğer devre modelleri önerilecektir.

KAYNAKLAR

- [1] S. J. Chapman, *Elektrik Makinalarının Temelleri*, İstanbul: Çağlayan Kitabevi, 2012.
- [2] M. Pustu, *Güç Transformatörleri Saha Testleri*, Ankara: TMMOB Elektrik Mühendisleri Odası, 2013.
- [3] S. V. Kulkarni, S. A. Khaparde, *Transformer Engineering Design and Practice*, New York: Marcel Dekker Inc., 2004.
- [4] N. Takasu, T. Oshi, F. Miyawaki, S. Saito ve Y. Fujiwara, “An experimental analysis of DC excitation of transformers by geomagnetically induced currents”, *IEEE Transactions on Power Delivery*, vol. 9, no. 2, pp. 1173-1182, 1994.
- [5] L. Bolduca, A. Gaudreaux ve A. Dutilleul, “Saturation time of transformers under dc excitation”, *Electric power Systems Research*, vol. 56, no. 2, pp. 95-102, 2000.
- [6] Ş. Cantürk ve M. E. Balci, “Doğru akım uyarım şartlarında güç transformatörlerinin analizi”, *Elektrik-Elektronik ve Biyomedikal Mühendisliği Konferansı (ELECO)*, Bursa, Türkiye, 2018.
- [7] S. Canturk, M. E. Balci, M. H. Hocaoglu ve A. K. Koseoglu, “Investigation of the effects of dc bias on single-phase shell type transformers using frequency-dependent reluctance-based mode”, *IEEE Transactions on Magnetics*, vol. 57, no. 9, pp. 1-10, 2021.
- [8] S. Canturk, M. E. Balci, M. H. Hocaoglu ve A. K. Koseoglu, “Performance analysis of three-phase five-leg transformers under DC bias using a new frequency-dependent reluctance-based model”, *IET Generation, Transmission & Distribution*, vol. 16, no. 12, pp. 2455-2465, 2022.
- [9] S. Lu, Y. Liu ve J. De La Ree, “Harmonics generated from a DC biased transformer”, *IEEE Transactions on Power Delivery*, vol. 8, no. 2, pp. 725-731, 1993.
- [10] Y. You, E. F. Fuchs, D. Lin ve P. R. Barnes, “Reactive power demand of transformers with DC bias”, *IEEE Industry Applications Magazine*, vol. 2, no. 4, pp. 45-52, 1996.

- [11] R. Girgis, K. Vedante ve G. Burden, “A process for evaluating the degree of susceptibility of a fleet of power transformers to effects of GIC”, *IEEE PES T&D Conference and Exposition*, Chicago, IL, USA, 2014.
- [12] D. H. Boteler ve R. J. Pirjola, “Comparison of methods for modelling geomagnetically induced currents”, *Annales Geophysicae*, vol. 32, no. 9, p. 1177–1187, 2014.
- [13] S. A. Mousavi, “Electromagnetic Modelling of power transformers for study and mitigation of effects of GICs”, Doctoral Thesis, Royal Institute of Technology (KTH), Stockholm, Sweden, 2015.
- [14] P. Price, “Geomagnetically induced current effects on transformers”, *IEEE Transactions on Power Delivery*, vol. 17, no. 4, pp. 1002-1008, 2002.
- [15] R. Girgis ve K. Vedante, “Effects of GIC on power transformers and power systems”, *IEEE PES T&D Conference and Exp.*, Orlando, FL, USA, 2012.
- [16] J. Berge, R. K. Varma ve L. Marti, “Laboratory validation of the relationship between Geomagnetically Induced Current (GIC) and transformer absorbed reactive power”, *IEEE Electrical Power and Energy Conference (EPEC)*, Winnipeg, MB, Canada, 2011.
- [17] A. Rezaei-Zare, “Reactive power loss versus GIC characteristic of single-phase transformers”, *IEEE Transactions on Power Delivery*, vol. 30, no. 3, pp. 1639-1640, 2015.
- [18] R. S. Girgis ve C. D. Ko, “Calculation techniques and results of effects of GIC currents as applied to large power transformers”, *IEEE Transactions on Power Delivery*, vol. 7, no. 2, pp. 699-705, 1992.
- [19] B. Zhang, L. Liu, Y. Liu, M. McVey ve R. Gardner, “Effect of geomagnetically induced current on the loss of transformer tank”, *IET Electric Power Applications*, vol. 4, no. 5, pp. 373-379, 2010.
- [20] R. Girgis ve K. Vedante, “Methodology for evaluating the impact of GIC and GIC capability of power transformer designs”, *IEEE Power & Energy Society General Meeting*, Vancouver, BC, Canada, 2013.

- [21] M. Heindl, M. Belte, M. Reuter, D. Schneide, D. Tenbohlen, D. T. Oyedokun ve C. T. Gaunt, "Investigation of GIC related effects on power transformers using modern diagnostic methods", *XVII International Symposium on High Voltage Engineering*, Hannover, Germany, 2011.
- [22] R. Girgis ve K. Vedante, "Methodology for evaluating the impact of GIC and GIC capability of power transformer designs", *IEEE PES T&D Conf. and Exp.*, Vancouver, BC, Canada, 2013.
- [23] R. Piccinelli ve E. Krausmann, «Space Weather Impact on the Scandinavian Interconnected Power Transmission System,» European Commission, Lüksemburg, 2015.
- [24] Y. F. Ni, Z. D. Wang ve P. Jarman, "GIC simulation study for part of UK transmission system by ATP/EMTP", *IEEE Power & Energy Society General Meeting*, Chicago, USA, 2017.
- [25] F. Aboura ve O. Touhami, "Effect of the GICs on magnetic saturation of asymmetric three-phase transformer", *IET Electric Power Applications*, vol. 11, no. 7, pp. 1306-1314, 2017.
- [26] M. Lahtinen ve J. Elovaara, "GIC occurrences and GIC test for 400 kV system transformer", *IEEE Transactions on Power Delivery*, vol. 17, no. 2, pp. 555-561, 2002.
- [27] V. D. Albertson, J. G. Kappenman, N. Mohan ve G. A. Skarbakka, "Load-Flow studies in the presence of Geomagnetically-Induced Currents", *IEEE Transactions on Power Apparatus and Systems*, vol. 100, no. 2, pp. 594-607, 1981.
- [28] X. Dong, Y. Liu ve J. G. Kappenman, "Comparative analysis of exciting current harmonics and reactive power consumption from GIC saturated transformers", *IEEE Power Engineering Society Winter Meeting*, Columbus, OH, USA, 2001.
- [29] B. Bozoki, S. Chano, L. Dvorak, W. Feero, G. Fenne, C. Henville, J. Ingleson, S. Mazumdar, P. McLaren, K. Mustaphi, F. Phillips, R. Rebbapragada ve G. Rockefeller, "The effects of GIC on protective relaying", *IEEE Transactions on Power Delivery*, vol. 11, no. 2, pp. 725-739, 1996.

- [30] B. Ahmadzadeh-Shooshtari ve A. Rezaei-Zare, “Advanced transformer differential protection under GIC conditions”, *IEEE Transactions on Power Delivery*, vol. 37, no. 3, pp. 1433-1444, 2022.
- [31] H. Hamzehbahmani, H. Griffiths, A. Haddad ve D. Guo, “Earthing requirements for HVDC systems”, *50th International Universities Power Engineering Conference (UPEC)*, Stoke on Trent, UK, 2015.
- [32] A. Demetriou, D. Buxton ve C. A. Charalambous, “Stray current dc corrosion blind spots inherent to large PV systems fault detection mechanisms: elaboration of a novel concept”, *IEEE Transactions on Power Delivery*, vol. 33, no. 1, pp. 3-11, 2018.
- [33] A. H. Etemadi ve A. Rezaei-Zare, “Optimal placement of GIC blocking devices for geomagnetic disturbance mitigation”, *IEEE Transactions on Power Systems*, vol. 29, no. 6, pp. 2753-2762, 2014.
- [34] H. Nie, X. Liu ve P. Zheng, “Optimal governance of GIC in power grid based on the sensitivity analysis method”, *Asia-Pacific Power and Energy Engineering Conference*, Shanghai, China, 2012.
- [35] O. Samuelsson, “Power transformer immune to geomagnetically induced currents”, *IEEE Power and Energy Society General Meeting (PES)*, Vancouver, BC, Canada, 2013.
- [36] A. A. Hussein ve M. H. Ali, “Suppression of geomagnetic induced current using controlled ground resistance of transformer”, *Electric Power Systems Research*, vol. 140, no. 1, pp. 9-19, 2016.
- [37] L. Bolduc, M. Granger, G. Pare, J. Saintonge ve L. Brophy, “Development of a DC current-blocking device for transformer neutrals”, *IEEE Transactions on Power Delivery*, vol. 20, no. 1, pp. 163-168, 2005.
- [38] A. Ghalayini, F. P. Dawson, G. R. Slemon, E. P. Dick, M. Hajagos ve S. Yamada, “Mitigating GIC saturation in power transformers”, *Journal of the Magnetics Society of Japan*, vol. 19, no. 2, pp. 545-548, 1995.

- [39] R. J. Micaleff, S. Young ve F. P. Dawson, “Transformer design considerations for mitigating geomagnetic induced saturation”, *IEEE Transactions on Magnetics*, vol. 35, no. 5, pp. 3532-3534, 1999.
- [40] B. Kovan ve F. de León, “Mitigation of geomagnetically induced currents by neutral switching”, *IEEE Transactions on Power Delivery*, vol. 30, no. 4, pp. 1999-2006, 2015.
- [41] B. Bai, Z. Chen ve D. Chen, “DC bias elimination and integrated magnetic technology in power transformer”, *IEEE Transactions on Magnetics*, vol. 51, no. 11, pp. 1-4, 2015.
- [42] J. G. Kappenman, S. R. Norr, G. A. Sweezy, D. L. Carlson, V. D. Albertson, J. E. Harder ve B. L. Damsky, “GIC mitigation: a neutral blocking/bypass device to prevent the flow of GIC in power systems”, *IEEE Transactions on Power Delivery*, vol. 6, no. 3, pp. 1271 - 1281, 1991.
- [43] E. C. Piescorovsky ve A. G. Tarditi, “Modeling the impact of GIC neutral blocking devices on distance protection relay operations for transmission lines”, *Electric Power Systems Research*, vol. 180, no. 1, pp. 1-11, 2020.
- [44] A. A. Hussein ve M. H. Ali, “Fuzzy logic controlled variable resistor for suppressing GIC in transformers”, *IET Generation, Transmission & Distribution*, vol. 11, no. 6, pp. 2017, 1494-1501.
- [45] A. Rezaei-Zare ve A. H. Etemadi, “Optimal placement of GIC blocking devices considering equipment thermal limits and power system operation constraints”, *IEEE Transactions on Power Delivery*, vol. 33, no. 1, pp. 200-208, 2018.
- [46] H. Zhu ve T. J. Overbye, “Blocking device placement for mitigating the effects of Geomagnetically Induced Currents”, *IEEE Transactions on Power Systems*, vol. 30, no. 4, pp. 2081-2089, 2015.
- [47] Y. Liang, D. He, H. Zhu ve D. Chen, “Optimal blocking device placement for geomagnetic disturbance mitigation”, *IEEE Transactions on Power Delivery*, vol. 34, no. 6, pp. 2219-2231, 2019.

- [48] Z. Xie, X. Lin, Z. Zhang, Z. Li, W. Xiong, H. Hu, M. S. Khalid ve O. S. Adio, “advanced DC bias suppression strategy based on finite dc blocking devices”, *IEEE Transactions on Power Delivery*, vol. 32, no. 6, pp. 2500-2559, 2017.
- [49] O. Bíró, G. Koczka, G. Leber, K. Preis ve B. Wag, “Finite element analysis of three-phase three-limb power transformers under DC bias”, *IEEE Transactions on Magnetics*, vol. 50, no. 2, pp. 565-568, 2014.
- [50] Y. Ohdachi, Y. Kawase, T. Tainaka ve T. Yamaguchi, “Load characteristics analysis of coupling transformer using 3-D finite element method with edge elements”, *Transactions on Magnetics*, vol. 30, no. 5, pp. 3721-3724, 1994.
- [51] H. K. Chisepo, C. T. Gaunt ve L. D. Borrill, “Measurement and FEM analysis of DC/GIC effects on transformer magnetization parameters”, *IEEE Milan PowerTech*, Milan, Italy, 2019.
- [52] X. Zhao, J. Lu, L. Li, Z. Cheng ve T. Lu, “Analysis of the DC Bias phenomenon by the harmonic balance finite-element method”, *IEEE Transactions on Power Delivery*, vol. 26, no. 1, pp. 475-485, 2011.
- [53] S. Yadav, G. K. Suman ve R. K. Mehta, “Finite element based modelling of the Thermal behaviour of converter transformers influenced by DC bias”, *3rd International Conference on Energy, Power and Environment: Towards Clean Energy Technologies*, Shillong, Meghalaya, India, 2020.
- [54] R. Plasser, G. Koczka ve O. Bíró, “Improvement of the finite-element analysis of 3-D, nonlinear, periodic eddy current problems involving voltage-driven coils under DC bias”, *IEEE Transactions on Magnetics*, vol. 54, no. 3, pp. 1-4, 2017.
- [55] S. Lu ve Y. Liu, “FEM analysis of DC saturation to assess transformer susceptibility to geomagnetically induced currents”, *IEEE Transactions on Power Delivery*, vol. 8, no. 3, pp. 1367-1376, 1993.
- [56] X. Zhang, X. Liu, F. Guo, G. Xiao ve P. Wang, “Calculation of DC bias reactive Power loss of converter transformer via finite element analysis”, *IEEE Transactions on Power Delivery*, vol. 36, no. 2, pp. 751-759, 2021.

- [57] P. Picher, L. Bolduc ve A. Dutil, “Study of the acceptable DC current limit in core-form power transformers”, *IEEE Transactions on Power Delivery*, vol. 12, no. 1, pp. 257-265, 1997.
- [58] P. S. Moses, M. A. S. Masoum ve H. A. Toliyat, “Dynamic modeling of three-phase asymmetric power transformers with magnetic hysteresis: no-load and inrush conditions”, *IEEE Transactions on Energy Conversion*, vol. 25, no. 4, pp. 1040-1047, 2010.
- [59] P. S. Moses ve M. A. S. Masoum, “Three-phase asymmetric transformer aging considering voltage-current harmonic interactions, unbalanced nonlinear loading, magnetic couplings, and hysteresis”, *IEEE Transactions on Energy Conversion*, vol. 27, no. 2, p. 318–327, 2012.
- [60] M. A. S. Masoum ve P. S. Moses, “Impact of balanced and unbalanced direct current bias on harmonic distortion generated by asymmetric three-phase three-leg transformers”, *IET Electric Power Applications*, vol. 4, no. 7, p. 507–515, 2010.
- [61] W. Chandrasena, P. McLaren ve U. Annakkage, “An improved low-frequency transformer model for use in GIC studies”, *IEEE Transactions on Power Delivery*, vol. 19, no. 2, pp. 643-651, 2004.
- [62] B. Røen, “Geomagnetic induced current effects on power transformers”, Doktora tezi, Department of Electric Power Engineering, Norwegian University of Science and Technology, Norway, 2016.
- [63] E. Arslan, S. Sakar ve M. E. Balci, “On the no-load loss of power transformers under voltages with sub-harmonics”, *IEEE International Energy Conference (ENERGYCON)*, Cavtat, Croatia, 2014.
- [64] E. Arslan, “Sinüsoidal Olmayan Sistemler İçin Güç Transformatörü Tasarımı”, Yüksek Lisans Tezi, Balıkesir Üniversitesi Fen Bilimleri Enstitüsü, Balıkesir, 2014.
- [65] E. Arslan, Ş. Cantürk ve M. E. Balci, “Transformatörlerin Sinüzoidal Olmayan Şartlarda Azami Yüklenme Oranı Hesabı Kısım 1 Geliştirilen Algoritma”, *Elektrik ve Elektronik Mühendisliği Konferansı (EEMKON)*, İstanbul, Türkiye, 2015.

- [66] E. Arslan, Ş. Cantürk ve M. E. Balcı, “Transformatörlerin Sinüzoidal Olmayan Şartlarda Azami Yüklenme Oranı Hesabı Kısım 2 Analiz Sonuçları”, *Elektrik ve Elektronik Mühendisliği Konferansı (EEMKON)*, İstanbul, 2015.
- [67] A. Rezaei-Zare, “Enhanced transformer model for low and mid-frequency Transients- Part I: model development”, *IEEE Transactions on Power Delivery*, vol. 30, no. 1, pp. 307-315, 2015.
- [68] A. Rezaei-Zare, “Enhanced transformer model for low and mid-frequency transients- Part II: validation and simulation results”, *IEEE Transactions on Power Delivery*, vol. 30, no. 1, pp. 316-325, 2015.
- [69] E. E. Bernabeu, “Single-Phase transformer harmonics produced during geomagnetic disturbances: theory, modeling, and monitoring”, *IEEE Transactions on Power Delivery*, vol. 30, no. 3, pp. 1323-1330, 2015.
- [70] B. Zhang, Y. Liu, L. Liu, M. McVey, R. M. Gardner ve X. Xiao, “Effect of load current on leakage flux of transformer with geomagnetically induced current”, *European Transactions on Electrical Power*, vol. 21, no. 1, pp. 165-173, 2011.
- [71] E. Mulasalihovic, H. Pfützner, S. Traxler ve H. Yamaguchi, “Effects of geomagnetically induced currents on the magnetic performance of transformer cores”, *Journal of Magnetism and Magnetic Materials*, vol. 320, no. 20, pp. 920-924, 2008.
- [72] E. F. Fuchs, D. Yildirim ve T. Batan, “Innovative procedure for measurement of losses of transformers supplying nonsinusoidal loads”, *Proc. Inst. Elect. Eng. Gen. Transm. Distrib.*, vol. 14, no. 6, pp. 617-625, 1999.
- [73] E. F. Fuchs, D. Lin ve J. Martynaitis, “Measurement of three-phase transformer derating and reactive power demand under nonlinear loading conditions”, *IEEE Transactions on Power Delivery* vol. 21, no. 2, pp. 665 -672, 2006.
- [74] M. B. B. Sharifian, J. Faiz, S. A. Fakhri ve A. Zraatparvar, “Derating of distribution transformers for non-sinusoidal load currents using finite element method”, *10th IEEE Int. Conf. Electronics, Circuits and Syst.*, Sharjah, United Arab Emirates, 2003.

- [75] M. B. B. Sharifian, M. B. B., ve J. Faiz, “Derating of distribution transformer for on-linear loads”, *Eur. Trans. Elect. Power*, vol. 16, no. 2, pp. 189-203, 2006.
- [76] J. Faiz, B. M. Ebrahimi ve M. Ghofrani, “Mixed derating of distribution transformers under unbalanced supply voltage and nonlinear load conditions using TSFEM”, *IEEE Transactions on Power Delivery*, vol. 25, no. 2, pp. 780-789, 2010.
- [77] A. Njafi, I. Iskender ve N. Genc, “Evaluating and derating of three-phase distribution transformer under unbalanced voltage and unbalance load using finite element method”, *IEEE 8th International Power Engineering and Optimization Conference*, Langkawi, Malaysia, 2014.
- [78] M. A. S. Masoum, M. A. S., P. S. Moses ve A. S. Masoum, “Derating of asymmetric three-phase transformers serving unbalanced nonlinear loads”, *IEEE Transactions on Power Delivery*, vol. 23, no. 4, pp. 2033-2041, 2008.
- [79] D. Yildirim ve E. F. Fuchs, “Measured transformer derating and comparison with Harmonic Loss factor (FHL) approach”, *IEEE Transactions on Power Delivery*, vol. 15, no. 1, pp. 186-191, 2000.
- [80] E. F. Fuchs, D. Yildirim ve W. M. Grady, “Measurement of eddycurrent loss coefficient PEC-R, derating of single-phase transformers, and comparison with K-factor approach”, *IEEE Transactions on Power Delivery*, vol. 15, no. 1, pp. 148-154, 2000.
- [81] IEEE C57.110-2018, “IEEE recommended practice for establishing liquid immersed and dry-type power and distribution transformer capability when supplying nonsinusoidal load currents”, *IEEE Standards*, 2018.
- [82] E. I. Amoiralis, M. .. A. Tsili ve A. G. Kladas, “Transformer design and optimization: A literature survey”, *IEEE Transactions on Power Delivery*, vol. 24, no. 4, p. 1999–2024, 2009.
- [83] S. .Wang, L. Li, X. Zhao, Y. Xie ve L. Cai, “Asymmetrical DC bias analysis of the no-load series transformer by using the TPFEM”, *IET Electric Power Applications*, vol. 11, no. 2, pp. 169-177, 2017.

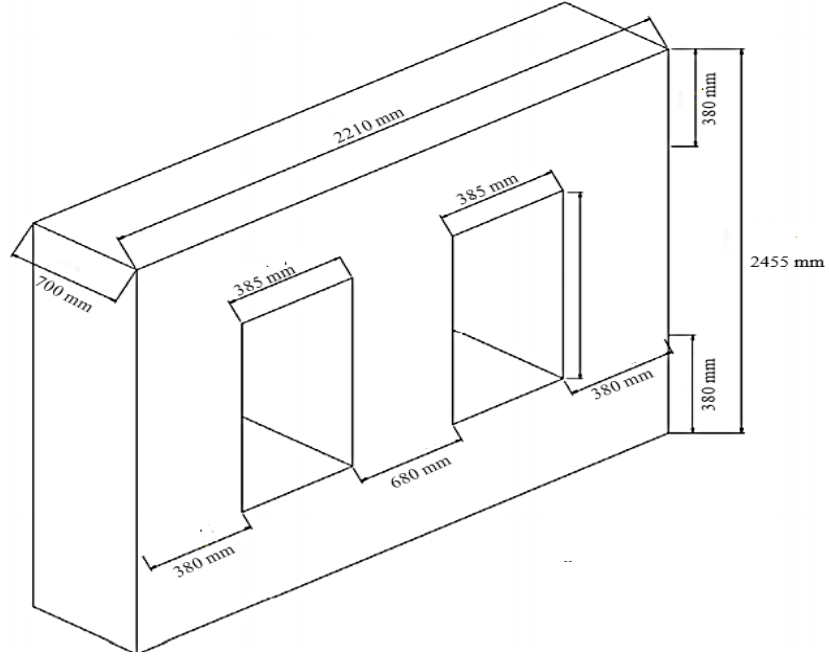
- [84] M. Mikhak-Beyranvand, J. Faiz ve B. Rezaeealam, “Thermal analysis and derating of a power transformer with harmonic loads”, *IET Generation, Transmission & Distribution*, vol. 14, no. 7, p. 1233–1241, 2020.
- [85] A. E. Fitzgerald, C. Kingsley ve S. D. Umans, *Electric Machinery*, Newyork: McGraw-Hill, 2003.
- [86] G. Bal, *Transformatörler*, Ankara: Seçkin Yayıncılık, 2012.
- [87] P. S. Georgilakis, *Spotlight on Modern Transformer Design*, London: Springer, 2009.
- [88] F. Mergen ve S. Zorlu, *Elektrik Makinaları-I Transformatörler*, İstanbul: Birsen Yayınevi, 2005.
- [89] C. Kocatepe, M. Uzunoğlu, R. Yumurtacı, A. Karakaş ve O. Arıkan, *Elektrik Tesislerinde Harmonikler*, İstanbul: Birsen Yayınevi, 2003.
- [90] Coercivity. (8 Mayıs 2022). Wikipedia, the free encyclopedia. [Online] Erişim adresi: <https://en.wikipedia.org/wiki/Coercivity>. Erişim tarihi: 07 Ekim 2022.
- [91] W. Chandrasena, P. G. McLaren, U. D. Annakkage, R. P. Jayasinghe, D. Muthumuni ve E. Dirks, “Simulation of hysteresis and eddy current effects in a power transformer”, *Electric Power Systems Research*, vol. 76, no. 8, pp. 634-641, 2006.
- [92] Eddy current. (11 Nisan 2022). Wikipedia, the free encyclopedia. [Online] Erişim adresi: https://en.wikipedia.org/wiki/Eddy_current. Erişim tarihi: 07 Ekim 2022.
- [93] IEEE C57.12.90-2015, “Test code for liquid-immersed distribution, power, and regulating transformers”, *IEEE Standards*, 2015.
- [94] D. A. Brown , J. N. Ross ve K. G. Nichols, “Time-Domain simulation of mixed nonlinear magnetic and electronic systems”, *IEEE Transactions on Magnetics*, vol. 37, no. 1, pp. 522-532, 2001.
- [95] D. H. Boteler ve R. J. Pirjola, “Modeling geomagnetically induced”, *Space Weather*, vol. 15, no. 1, pp. 258-276, 2017.

- [96] D. H. Boteler, R. Pirjola, C. Blais ve A. Foss, “Development of a GIC simulator”, *IEEE PES General Meeting Conference & Exposition*, National Harbor, MD, USA, 2014.
- [97] UL 1562 Standard, Dry-Type general purpose and power transformer”, *Underwriters Laboratory standards*,1994.
- [98] CENELEC-EN, “Three-phase oil-immersed distribution transformers 50 Hz, from 50 kVA to 2500 kVA with highest voltage for equipment not exceeding 36 kV; Determination of the power rating of a transformer loaded with nonsinusoidal currents”, BS EN 50464-3:2007, 2007.

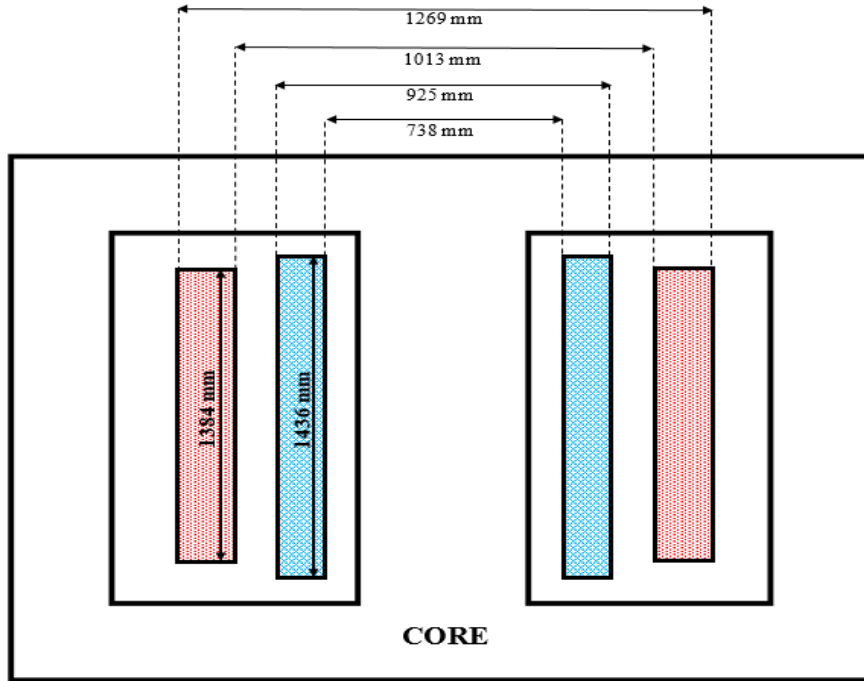
EKLER

EKLER

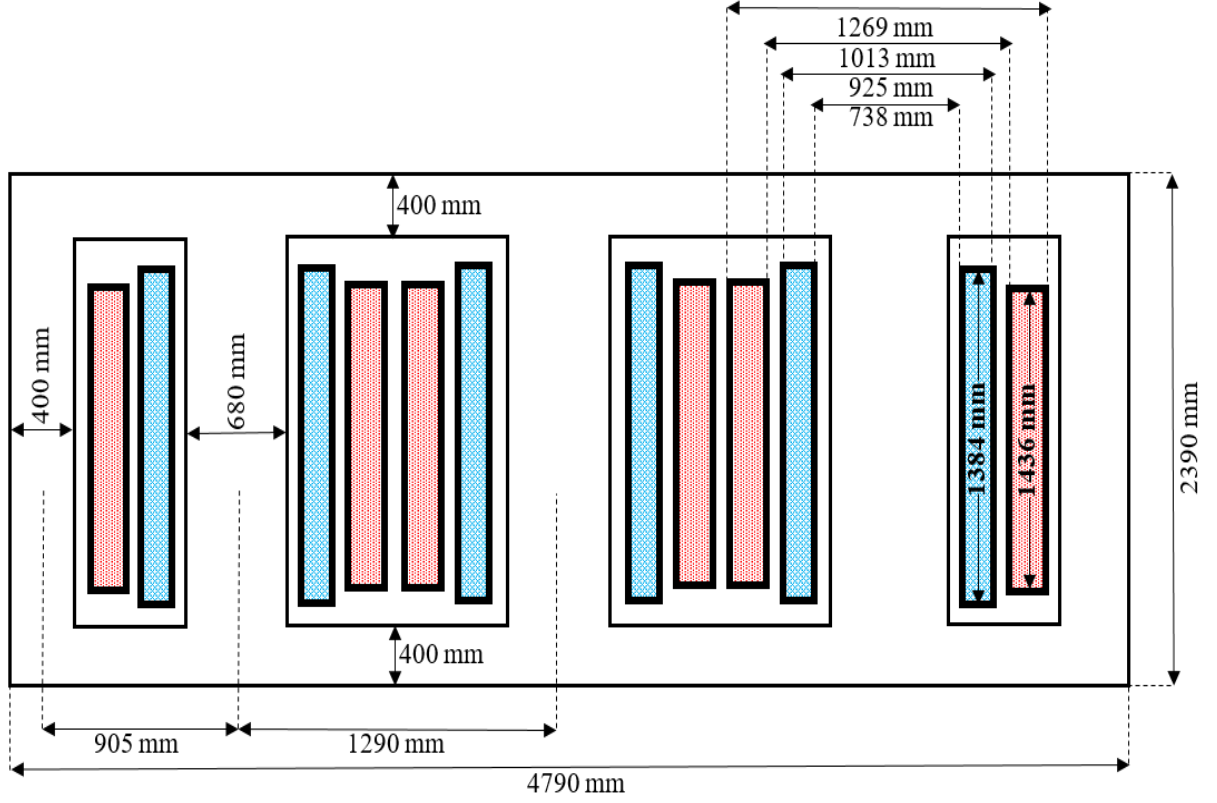
EK A: Çalışılan transformatörlerin geometrik yapıları



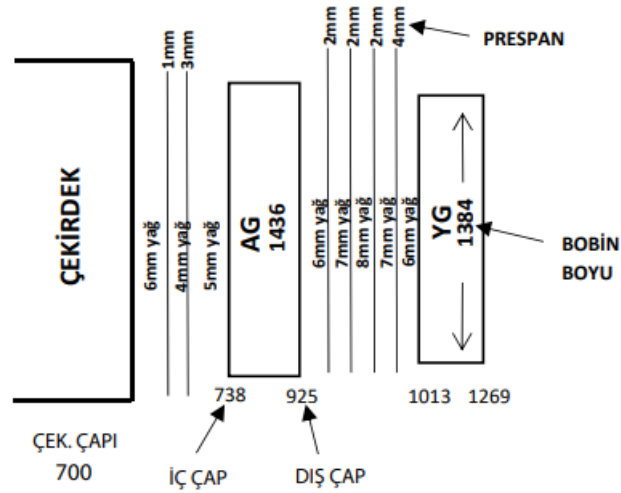
Şekil A.1: Tek fazlı kabuk tipi nüveli transformatörün çekirdek yapısı.



Şekil A.2: Tek fazlı kabuk tipi nüveli transformatörün sargı yapısı.



Şekil A.3: Üç fazlı beş bacaklı çekirdek tipi nüveli transformatörün çekirdek ve sargı yapısı.



Şekil A.4: Transformatörlerin bobin ölçüleri.

EK B: Çalışılan transformatörlerin diğer özellikleri

Tablo B.1: Tek fazlı kabuk tipi nüveli transformatörün özellikleri

Parametre	Değer
Uk(%)	12.43
Primer sargı Rdc (Ω)	0.7322
Primer sargı L (mH)	67.4
Sekonder sargı Rdc (Ω)	0.0597
Sekonder sargı L (mH)	10.15
Transformatörün boştaki kayıpları (kW)	22
Transformatörün yükteki kayıpları (kW)	99

Tablo B.2: Üç fazlı beş bacaklı çekirdek tipi nüveli transformatörün özellikleri

Parametre	Değer
Uk(%)	12.43
Sargı yapısı	YnYn
Primer sargı Rdc (Ω)	0.7322
Primer sargı L (mH)	67.4
Sekonder sargı Rdc (Ω)	0.0597
Sekonder sargı L (mH)	10.15
Transformatörün boştaki kayıpları (kW)	48
Transformatörün yükteki kayıpları (kW)	260

EK C: Çalışmada tercih edilen nüve malzemelerinin özellikleri

Tablo C.1: Çekirdek malzemelerin B-H VE P-B verileri.

B (T)	M3-0.23 mm		M4-0.27 mm		M5-0.30 mm		M6-0.35 mm	
	P (W/kg)	H (A/m)	P (W/kg)	H (A/m)	P (W/kg)	H (A/m)	P (W/kg)	H (A/m)
0.2	0.0128	6.8	0.017	5.3	0.0165	4.9	0.0203	4.2
0.4	0.049	10.2	0.0623	7.9	0.0623	7.1	0.0745	6.1
0.6	0.108	12.1	0.133	10.3	0.135	9.2	0.159	9.2
0.8	0.188	14.9	0.228	12.8	0.235	11.5	0.274	11.5
1.0	0.290	17.7	0.349	16.0	0.364	14.3	0.420	15.2
1.2	0.417	21.4	0.498	19.3	0.523	18.9	0.601	18.4
1.4	0.579	32.9	0.689	28.7	0.725	27.8	0.826	26.3
1.6	0.824	70.2	0.966	67.8	1.01	66.5	1.13	65.5
1.8	1.39	478.8	1.55	467.8	1.56	459.7	1.69	452.7

ÖZGEÇMİŞ

Kişisel Bilgiler

Adı Soyadı: Şevket CANTÜRK

Doğum tarihi ve yeri: **07/11/1981 - ISPARTA**

e-posta: scanturk@balikesir.edu.tr

Öğrenim Bilgileri

Derece	Okul/Program	Yıl
Y. Lisans	Süleyman Demirel Üniversitesi/Makine Eğitimi	2012
Lisans	Marmara Üniversitesi/Elektrik Öğretmenliği	2005
Lise	Isparta Anadolu Meslek Lisesi	2000

Yayın Listesi

- [1] S. Canturk, M. E. Balci, M. H. Hocaoglu ve A. K. Koseoglu, “Investigation of the effects of DC bias on single-phase shell type transformers using frequency-dependent reluctance-based mode”, *IEEE Transactions on Magnetics*, vol. 57, no. 9, pp. 1-10, 2021. **[Tezden türetilmiştir]**
- [2] S. Canturk, M. E. Balci, M. H. Hocaoglu ve A. K. Koseoglu, “Performance analysis of three-phase five-leg transformers under DC bias using a new frequency-dependent reluctance-based model”, *IET Generation, Transmission & Distribution*, vol. 16, no. 12, pp. 2455-2465, 2022. **[Tezden türetilmiştir]**
- [3] Ş. Cantürk ve M. E. Balci, “Doğru akım uyarım şartlarında güç transformatörlerinin analizi”, *Elektrik-Elektronik ve Biyomedikal Mühendisliği Konferansı (ELECO)*, Bursa, Türkiye, 2018. **[Tezden türetilmiştir]**
- [4] S. Canturk, M. E. Balci, M. H. Hocaoglu ve A. K. Koseoglu, “Bir fazlı kabuk tipi transformatörler için sargı kayıplarının frekans bağımlılığını dikkate alan relüktans

- modeli”, 3. Uluslararası Türk Dünyası Mühendislik ve Fen Bilimleri Kongresi, pp. 143-153, 2021. **[Tezden türetilmiştir]**
- [5] S. Canturk, M. E. Balci ve M. H. Hocaoglu, “On the definition of apparent power”, *Electrical Power Quality and Utilisation*, vol. 18, no. 2, pp. 1-9, 2015.
- [6] E. Arslan, Ş. Cantürk ve M. E. Balci, “Transformatörlerin sinüzoidal olmayan şartlarda azami yüklenme oranı hesabı: Kısım-1 geliştirilen algoritma”, *Elektrik Elektronik Mühendisliği Kongresi*, İstanbul, Türkiye, 2015.
- [7] E. Arslan, Ş. Cantürk ve M. E. Balci, “Transformatörlerin sinüzoidal olmayan şartlarda azami yüklenme oranı hesabı: Kısım-2 analiz sonuçları”, *Elektrik Elektronik Mühendisliği Kongresi*, İstanbul, Türkiye, 2015.
- [8] T. Ulfanov, M. E. Balci ve Ş. Cantürk, “Dengesiz doğru akım öngerilimin üç fazlı üç bacaklı çekirdek tipi nüveli güç transformatörlerine etkilerinin incelenmesi”, *Elektrik-Elektronik ve Biyomedikal Mühendisliği Konferansı (ELECO)*, 2022.