

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



**DOĞRU AKIM UYARTIMIN GÜÇ**  
**TRANSFORMATÖRLERİNE ETKİLERİNİN ANALİZİ**

**YÜKSEK LİSANS TEZİ**

**TURAL ULFANOV**

**BALIKESİR, OCAK - 2019**

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



**DOĞRU AKIM UYARTIMIN GÜÇ**  
**TRANSFORMATÖRLERİNE ETKİLERİNİN ANALİZİ**

**YÜKSEK LISANS TEZİ**

**TURAL ULFANOV**

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

**Prof. Dr. Rifat ÇAPAN**

**Dr. Öğr. Üyesi Tuba GÖZEL**

**BALIKESİR, OCAK - 2019**

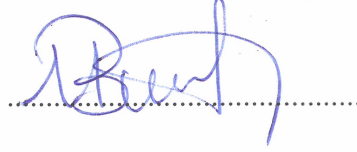
## KABUL VE ONAY SAYFASI

**Tural ULFANOV** tarafından hazırlanan “**DOĞRU AKIM UYARTIMIN GÜÇ TRANSFORMATÖRLERİNE ETKİLERİNİN ANALİZİ**” adlı tez çalışmasının savunma sınavı 23.01.2019 tarihinde yapılmış olup aşağıda verilen jüri tarafından oy birliği / ~~oy çokluğu~~ ile Balıkesir Üniversitesi Fen Bilimleri Enstitüsü Elektrik-Elektronik Mühendisliği Anabilim Dalı Yüksek Lisans Tezi olarak kabul edilmiştir.

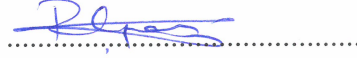
Jüri Üyeleri

İmza


Danışman  
Doç. Dr. Murat Erhan BALCI



Üye  
Prof. Dr. Rifat ÇAPAN



Üye  
Dr. Öğr. Üyesi Tuba GÖZEL



Jüri üyeleri tarafından kabul edilmiş olan bu tez Balıkesir Üniversitesi Fen Bilimleri Enstitüsü Yönetim Kurulunca onanmıştır.

Fen Bilimleri Enstitüsü Müdürü

Prof. Dr. Necati ÖZDEMİR

.....

## ÖZET

**DOĞRU AKIM UYARTIMIN GÜÇ TRANSFORMATÖRLERİNE  
ETKİLERİNİN ANALİZİ  
YÜKSEK LİSANS TEZİ  
TURAL ULFANOV  
BALIKESİR ÜNİVERSİTESİ FEN BİLİMLERİ ENSTİTÜSÜ  
ELEKTRİK-ELEKTRONİK MÜHENDİSLİĞİ ANABİLİM DALI  
(TEZ DANIŞMANI: DOÇ. DR. MURAT ERHAN BALCI)  
BALIKESİR, OCAK - 2019**

Güneş'te meydana gelen patlamaların, Dünya'nın jeomanyetik alanına etkisi neticesinde, iletim hatlarında 0.01 Hz civarında frekanslarda gerilimler indüklenir. Bu gerilimler, çok yüksek gerilimde enerji naklinde tercih edilen yıldız noktası topraklanmış iletim hatlarında literatürde "jeomanyetik indüklenen akımlar" (JİA) olarak adlandırılan yaklaşık doğru akımların dolaşmasına yol açar. Bununla birlikte, yüksek gerilim doğru akım iletimi sistemleri ve transformatörsüz fotovoltaik dağıtık üretim birimleri sebebiyle doğru akımlar (DC) alternatif akım güç sistemlerine akabilir.

Literatürdeki çalışmalardan, JİA veya DC uyartım altında transformatörlerin, doğru akımın yönüne bağlı olarak şebeke geriliminin pozitif veya negatif yarım periyodunda doyuma ulaştıkları bilinmektedir. Doyuma ulaşan transformatörlerin, yüksek harmonik bozulmaya sahip ve aşırı büyüklükte uyartım akımlarına, yüksek reaktif güç taleplerine ve ekstra kayıplara sahip olduğu, ölçüm ve simülasyon temelli analiz çalışmalarında ifade edilmiştir. Ayrıca, bu çalışmalarda, faz sayısı, nüve tipi ve nüvenin bacak sayısı gibi parametrelerin, transformatörün DC uyartıma hassasiyetini etkileyen başlıca unsurlar olduğu gözlenmiştir. Diğer taraftan, DC uyartımın transformatörler üzerindeki etkilerini analiz eden çalışmalar halen devam etmekte olup ilgili literatür gelişim süreci içindedir.

Bu tez çalışmasında, dengeli ve dengesiz DC uyartımın tek fazlı çekirdek tipi nüveli, üç fazlı üç bacaklı çekirdek tipi nüveli, üç fazlı beş bacaklı shell tipi nüveli transformatörlere etkilerinin analiz edilmesi amaçlanmıştır. Analizlerde boşa çalışma durumu için benzetim yoluyla bulunan; manyetik akı tepe değeri, primer taraf akımlarının temel harmonik ve toplam etkin değerleri, primer taraf akımlarının toplam harmonik bozulma ve toplam talep bozulma değerleri, primer taraf akımlarının dengesizlik faktörü, sekonder taraf gerilimlerinin toplam harmonik bozulma, dengesizlik faktörü ve temel harmonik sapma değerleri, kayıplar ile temel harmonik reaktif güç talebi büyüklüklerinin DC uyartım seviyesiyle değişimleri yorumlanmıştır. Son olarak; dikkate alınan transformatör tiplerinin kayıp ve en yüksek akım etkin değerinin kriter olarak kabul edildiği iki farklı yaklaşımına göre DC uyartım altında azami yüklenme oranları incelenmiştir.

**ANAHTAR KELİMELER:** Doğru akım uyartım, güç transformatörleri, jeomanyetik indüklenen akımlar, yüksek gerilim doğru akım iletim, güneş enerjisi dağıtık üretim birimleri.



## **ABSTRACT**

### **ANALYSIS OF THE EFFECTS OF DIRECT CURRENT EXCITATION ON POWER TRANSFORMERS**

**MSC THESIS**

**TURAL ULFANOV**

**BALIKESIR UNIVERSITY INSTITUTE OF SCIENCE**

**ELECTRICAL AND ELECTRONICS ENGINEERING**

**(SUPERVISOR: ASSOC. PROF. DR. MURAT ERHAN BALCI )**

**BALIKESİR, JANUARY 2019**

As a result of the effect of solar bursts on the Earth's geomagnetic field, the voltages with frequencies around 0.01 Hz are induced in the transmission lines. These voltages lead to circulating quasi direct currents (DC), so-called "geomagnetically induced currents" (GIC) in the literature, in the star point earthed very long transmission lines preferred for energy transmission at extra high voltage levels. Furthermore, due to high voltage direct current transmission systems and transformerless photovoltaic distributed generation units, DC currents can flow into alternating current power systems.

From the studies in the literature, it is known that under GIC and DC excitation, transformers can be saturated during the positive or negative half period of utility voltages depending on the polarity of DC excitation. In the measurement and simulation based analysis studies, it is mentioned that the saturated transformers have highly distorted and excessive excitation currents, the high reactive power demands and extra losses. In addition, it is also observed in these studies that the phase numbers, core type and core leg numbers of the transformer affect its sensitivity to the DC excitation. On the other hand, the studies, which analyse the effects of DC excitation on the transformers, are still being continue and the literature on the subject is in the process of development.

In this thesis, it is aimed to analyse the effects of balanced and unbalanced DC excitation on single-phase core-type, three-phase three legs core type, three-phase five legs shell type transformers. In the analysis, by using the simulation results obtained under the no load condition, with the increment of the dc excitation level, the variation of quantities as magnetic flux peak values, fundamental harmonic rms and total rms values of primary side currents, total harmonic distortion and total demand distortion values of primary side currents, unbalance factor of primary side currents, total harmonic distortion, unbalance factor and fundamental harmonic deviation value of the secondary side voltages, losses and fundamental harmonic reactive power demand are interpreted. Finally, according to two different approaches based on the criteria as the loss and highest rms current, the maximum loading ratios of the considered transformer types are examined under the DC excitation.

**KEYWORDS:** Direct current excitation, power transformers, geomagnetic induced currents, high voltage direct current transmission, solar energy distributed production units.

# İÇİNDEKİLER

Sayfa

<b>ÖZET.....</b>	<b>i</b>
<b>ABSTRACT .....</b>	<b>ii</b>
<b>İÇİNDEKİLER .....</b>	<b>iii</b>
<b>ŞEKİL LİSTESİ.....</b>	<b>iv</b>
<b>SEMBOL LİSTESİ .....</b>	<b>vii</b>
<b>ÖNSÖZ.....</b>	<b>ix</b>
<b>1. GİRİŞ.....</b>	<b>1</b>
1.1 Tezin Amacı .....	4
1.2 Tezin Sınırları.....	4
1.3 Tezin İçeriği .....	4
<b>2. DC UYARTIM ALTINDA TRANSFORMATÖRLERİN SIMULINK ORTAMINDA MODELLENMESİ.....</b>	<b>6</b>
2.1 SIMULINK Ortamında Analiz Sisteminin Modellenmesi.....	7
2.2 Kayıp, Reaktif Güç Talebi ve Güç Kalitesi İndislerinin İfadeleri.....	11
2.3 Sonuç .....	14
<b>3. DENGELİ DC UYARTIMIN TRANSFORMATÖRLERE ETKİLERİ...15</b>	
3.1 Tek Fazlı Transformatöre Etkileri .....	15
3.2 Tip 1 Üç Fazlı Transformatöre Etkileri .....	20
3.3 Tip 2 Üç Fazlı Transformatöre Etkileri .....	24
3.4 Sonuç .....	29
<b>4. DENGESİZ DC UYARTIMIN TRANSFORMATÖRLERE ETKİLERİ.30</b>	
4.1 Tip 1 Üç fazlı Transformatöre Etkileri .....	30
4.2 Tip 2 Üç Fazlı Transformatöre Etkileri .....	37
4.3 Tip 3 Üç Fazlı Transformatöre Etkileri .....	43
4.4 Sonuç .....	50
<b>5. DC UYARTIM ALTINDA TRANSFORMATÖRLERİN YENİDEN BOYUTLANDIRILMASI .....</b>	<b>52</b>
5.1 Dengeli DC Uyartım Şartlarında Yeniden Boyutlandırma Analizi.....	52
5.2 Dengesiz DC Uyartım Şartlarında Yeniden Boyutlandırma Analizi .....	54
5.3 Sonuç .....	56
<b>6. SONUÇ VE ÖNERİLER .....</b>	<b>58</b>
<b>7. KAYNAKLAR.....</b>	<b>61</b>

## ŞEKİL LİSTESİ

### Sayfa

Şekil 1.1	: Enerji iletim hatlarında JIA'ların dolaşımı. ....	1
Şekil 1.2	: JIA'nın zamanla değişimi [3].....	2
Şekil 1.3	: HVDC iletim sistemleri sebebiyle alternatif akım güç sistemlerine DC akım akışı. ....	2
Şekil 2.1	: (a) tek fazlı çekirdek biçimi nüveli, (b) üç fazlı üç bacaklı çekirdek biçimi nüveli ve (c) üç fazlı beş bacaklı shell biçimi nüveli transformatör yapıları.....	6
Şekil 2.2	: Tek fazlı transformatör için Matlab/SIMULINK yazılımında oluşturulan sistem.....	7
Şekil 2.3	: Tek fazlı transformatör modeli ara yüzünün konfigürasyon menüsü. ..	7
Şekil 2.4	: Tek fazlı transformatör modeli ara yüzünün parametreler menüsü. ....	8
Şekil 2.5	: Üç fazlı transformatörler için Matlab/SIMULINK yazılımında oluşturulan sistem.....	8
Şekil 2.6	: Üç fazlı üç bacaklı çekirdek biçimi nüveye sahip transformatör model ara yüzünün konfigürasyon menüsü.....	9
Şekil 2.7	: Üç fazlı üç bacaklı çekirdek biçimi nüveye sahip transformatör model ara yüzünün parametreler menüsü.....	9
Şekil 2.8	: Üç fazlı beş bacaklı shell biçimi nüveye sahip transformatör model ara yüzünün konfigürasyon menüsü.....	10
Şekil 2.9	: Üç fazlı beş bacaklı shell biçimi nüveye sahip transformatör model ara yüzünün parametreler menüsü. ....	10
Şekil 3.1	: $V_{DC}/V_{PR}=\%0.5$ olduğu durumda tek fazlı çekirdek biçimi nüveli transformatöre ait $\Phi(t)$ manyetik akısının dalga şekli. ....	16
Şekil 3.2	: $V_{DC}/V_{PR}=\%0.5$ olduğu durumda tek fazlı çekirdek biçimi nüveli transformatöre ait $i_p(t)$ akımının dalga şekli. ....	16
Şekil 3.3	: Tek fazlı çekirdek biçimi nüveli transformatör için $\Phi_M$ değerinin $V_{DC}/V_{PR}$ ile değişim eğrisi. ....	17
Şekil 3.4	: Tek fazlı çekirdek biçimi nüveli transformatör için $\Delta P$ ve $Q_1$ değerlerinin $V_{DC}/V_{PR}$ ile değişim eğrileri. ....	17
Şekil 3.5	: Tek fazlı çekirdek biçimi nüveli transformatör için $I_{PDC}$ , $I_{P1}$ ve $I_P$ değerlerinin $V_{DC}/V_{PR}$ ile değişim eğrileri. ....	18
Şekil 3.6	: Tek fazlı çekirdek biçimi nüveli transformatör için $TDDI_P$ ve $THDI_P$ indislerinin $V_{DC}/V_{PR}$ ile değişim eğrileri.....	19
Şekil 3.7	: Tek fazlı çekirdek biçimi nüveli transformatör için $THDV_S$ ve $VD$ indislerinin $V_{DC}/V_{PR}$ ile değişim eğrileri.....	19
Şekil 3.8	: $V_{DC}/V_{PR}=\%0.5$ olduğu durumda Tip 1 üç fazlı transformatöre ait $\Phi_a(t)$ , $\Phi_b(t)$ ve $\Phi_c(t)$ manyetik akılarının dalga şekilleri. ....	21
Şekil 3.9	: $V_{DC}/V_{PR}=\%0.5$ olduğu durumda Tip 1 üç fazlı transformatöre ait $i_{pa}(t)$ , $i_{pb}(t)$ ve $i_{pc}(t)$ akımlarının dalga şekilleri.....	21
Şekil 3.10	: Tip 1 üç fazlı transformatöre ait $\Phi_{aM}$ , $\Phi_{bM}$ ve $\Phi_{cM}$ değerlerinin $V_{DC}/V_{PR}$ ile değişim eğrileri.....	22
Şekil 3.11	: Tip 1 üç fazlı transformatöre ait $\Delta P$ ve $Q_1$ değerlerinin $V_{DC}/V_{PR}$ ile değişim eğrileri.....	23
Şekil 3.12	: Tip 1 üç fazlı transformatör için $I_{PDC}$ , $I_{P1}$ ve $I_P$ değerlerinin $V_{DC}/V_{PR}$ ile değişim eğrileri.....	23

<b>Şekil 3.13</b>	: $V_{DC}/V_{PR}=\%0.5$ olduğu durumda Tip 2 üç fazlı transformatöre ait $\Phi_a(t)$ , $\Phi_b(t)$ ve $\Phi_c(t)$ manyetik akılarının dalga şekilleri. ....	24
<b>Şekil 3.14</b>	: $V_{DC}/V_{PR}=\%0.5$ olduğu durumda Tip 2 üç fazlı transformatöre ait $i_{Pa}(t)$ , $i_{Pb}(t)$ ve $i_{Pc}(t)$ akımlarının dalga şekilleri. ....	25
<b>Şekil 3.15</b>	: Tip 2 üç fazlı transformatöre ait $\Phi_{aM}$ , $\Phi_{bM}$ ve $\Phi_{cM}$ değerlerinin $V_{DC}/V_{PR}$ ile değişim eğrileri. ....	26
<b>Şekil 3.16</b>	: Tip 2 üç fazlı transformatöre ait $\Delta P$ ve $Q_1$ değerlerinin $V_{DC}/V_{PR}$ ile değişim eğrileri. ....	26
<b>Şekil 3.17</b>	: Tip 2 üç fazlı transformatör için $I_{PDC}$ , $I_{P1}$ ve $I_P$ değerlerinin $V_{DC}/V_{PR}$ ile değişim eğrileri. ....	27
<b>Şekil 3.18</b>	: Tip 2 üç fazlı transformatör için $TDDI_P$ ve $THDI_P$ indislerinin $V_{DC}/V_{PR}$ ile değişim eğrileri. ....	28
<b>Şekil 3.19</b>	: Tip 2 üç fazlı transformatör için $THDV_S$ ve $VD$ indislerinin $V_{DC}/V_{PR}$ ile değişim eğrileri. ....	28
<b>Şekil 4.1</b>	: $V_{DCA}/V_{DCM}=1/3$ olduğu durumda Tip 1 üç fazlı transformatöre ait $\Phi_a(t)$ , $\Phi_b(t)$ ve $\Phi_c(t)$ manyetik akılarının dalga şekilleri. ....	31
<b>Şekil 4.2</b>	: $V_{DCA}/V_{DCM}=1/3$ olduğu durumda Tip 1 üç fazlı transformatöre ait $i_{Pa}(t)$ , $i_{Pb}(t)$ ve $i_{Pc}(t)$ akımlarının dalga şekilleri. ....	31
<b>Şekil 4.3</b>	: Tip 1 üç fazlı transformatöre ait $\Phi_{aM}$ , $\Phi_{bM}$ ve $\Phi_{cM}$ değerlerinin $V_{DCA}/V_{DCM}$ ile değişim eğrileri. ....	32
<b>Şekil 4.4</b>	: Tip 1 üç fazlı transformatöre ait $\Delta P$ ve $Q_1$ değerlerinin $V_{DCA}/V_{DCM}$ ile değişim eğrileri. ....	33
<b>Şekil 4.5</b>	: Tip 1 üç fazlı transformatör için boşta çalışma akımlarının DC bileşen, temel frekans ve toplam etkin değerlerin $V_{DCA}/V_{DCM}$ ile değişim eğrileri. ....	34
<b>Şekil 4.6</b>	: Tip 1 üç fazlı transformatör için boşta çalışma akımlarının toplam talep bozulma ve toplam harmonik bozulma değerlerinin $V_{DCA}/V_{DCM}$ ile değişim eğrileri. ....	35
<b>Şekil 4.7</b>	: Tip 1 üç fazlı transformatör için sekonder taraf faz gerilimlerinin toplam harmonik bozulma ve temel frekans gerilim sapma değerlerinin $V_{DCA}/V_{DCM}$ ile değişim eğrileri. ....	36
<b>Şekil 4.8</b>	: Tip 1 üç fazlı transformatör için $VUF_S$ ve $CUF_P$ indislerinin $V_{DCA}/V_{DCM}$ ile değişim eğrileri. ....	36
<b>Şekil 4.9</b>	: $V_{DCA}/V_{DCM}=1/3$ olduğu durumda Tip 2 üç fazlı transformatöre ait $\Phi_a(t)$ , $\Phi_b(t)$ ve $\Phi_c(t)$ manyetik akılarının dalga şekilleri. ....	37
<b>Şekil 4.10</b>	: $V_{DCA}/V_{DCM}=1/3$ olduğu durumda Tip 2 üç fazlı transformatöre ait $i_{Pa}(t)$ , $i_{Pb}(t)$ ve $i_{Pc}(t)$ akımlarının dalga şekilleri. ....	38
<b>Şekil 4.11</b>	: Tip 2 üç fazlı transformatöre ait $\Phi_{aM}$ , $\Phi_{bM}$ ve $\Phi_{cM}$ değerlerinin $V_{DCA}/V_{DCM}$ ile değişim eğrileri. ....	39
<b>Şekil 4.12</b>	: Tip 2 üç fazlı transformatöre ait $\Delta P$ ve $Q_1$ değerlerinin $V_{DCA}/V_{DCM}$ ile değişim eğrileri. ....	39
<b>Şekil 4.13</b>	: Tip 2 üç fazlı transformatöre ait boşta çalışma akımlarının DC bileşen, temel frekans ve toplam etkin değerlerinin $V_{DCA}/V_{DCM}$ ile değişim eğrileri. ....	40
<b>Şekil 4.14</b>	: Tip 2 üç fazlı transformatör için boşta çalışma akımlarının toplam talep bozulma ve toplam harmonik bozulma indislerinin $V_{DCA}/V_{DCM}$ ile değişim eğrileri. ....	41
<b>Şekil 4.15</b>	: Tip 2 üç fazlı transformatöre ait sekonder taraf faz gerilimlerinin toplam harmonik bozulma ve temel frekans gerilim sapma indislerinin $V_{DCA}/V_{DCM}$ ile değişim eğrileri. ....	42

<b>Şekil 4.16</b>	: Tip 2 üç fazlı transformatöre ait $VUF_S$ ve $CUF_P$ indislerinin $V_{DCA}/V_{DCM}$ ile değişim eğrileri.....	43
<b>Şekil 4.17</b>	: $V_{DCA}/V_{DCM}=1/3$ olduğu durumda Tip 3 üç fazlı transformatöre ait $\Phi_a(t)$ , $\Phi_b(t)$ ve $\Phi_c(t)$ manyetik akılarının dalga şekilleri. ....	44
<b>Şekil 4.18</b>	: $V_{DCA}/V_{DCM}=1/3$ olduğu durumda Tip 3 üç fazlı transformatöre ait $i_{pa}(t)$ , $i_{pb}(t)$ ve $i_{pc}(t)$ akımlarının dalga şekilleri. ....	44
<b>Şekil 4.19</b>	: Tip 3 üç fazlı transformatöre ait $\Phi_{aM}$ , $\Phi_{bM}$ ve $\Phi_{cM}$ değerlerinin $V_{DCA}/V_{DCM}$ ile değişim eğrileri. ....	45
<b>Şekil 4.20</b>	: Tip 3 üç fazlı transformatöre ait $\Delta P$ ve $Q_1$ değerlerinin $V_{DCA}/V_{DCM}$ ile değişim eğrileri.....	46
<b>Şekil 4.21</b>	: Tip 3 üç fazlı transformatöre ait boşta çalışma akımlarının DC bileşen, temel frekans ve toplam etkin değerlerinin $V_{DCA}/V_{DCM}$ ile değişim eğrileri. ....	47
<b>Şekil 4.22</b>	: Tip 3 üç fazlı transformatör için boşta çalışma akımlarının toplam talep bozulma ve toplam harmonik bozulma indislerinin $V_{DCA}/V_{DCM}$ ile değişim eğrileri.....	48
<b>Şekil 4.23</b>	: Tip 3 üç fazlı transformatöre ait sekonder taraf faz gerilimlerinin toplam harmonik bozulma ve temel frekans gerilim sapma indislerinin $V_{DCA}/V_{DCM}$ ile değişim eğrileri. ....	49
<b>Şekil 4.24</b>	: Tip 3 üç fazlı transformatöre ait $VUF_S$ ve $CUF_P$ indislerinin $V_{DCA}/V_{DCM}$ ile değişim eğrileri.....	50
<b>Şekil 5.1</b>	: $V_{DC}/V_{PR}=\%0.25$ olduğu dengeli DC uyartım altında tek fazlı ve Tip 2 üç fazlı transformatörün $\Delta P$ ve $I_P$ değerlerinin LR ile değişim eğrileri.....	53
<b>Şekil 5.2</b>	: $V_{DC}/V_{PR}=\%0.25$ olduğu dengeli DC uyartım altında Tip 1 üç fazlı transformatörün $\Delta P$ ve $I_P$ değerlerinin LR ile değişim eğrisi.....	54
<b>Şekil 5.3</b>	: $V_{Dca}=V_{DCb}=0$ ve $V_{DCc}/V_{PR}=\%0.25$ olduğu dengesiz DC uyartım altında Tip 1 üç fazlı transformatörün $\Delta P$ ve $I_{Pc}$ değerlerinin LR ile değişim eğrileri. ....	55
<b>Şekil 5.4</b>	: $V_{Dca}=V_{DCb}=0$ ve $V_{DCc}/V_{PR}=\%0.25$ olduğu dengesiz DC uyartım altında Tip 2 üç fazlı transformatörün $\Delta P$ ve $I_{Pc}$ değerlerinin LR ile değişim eğrileri. ....	55
<b>Şekil 5.5</b>	: $V_{Dca}=V_{DCb}=0$ ve $V_{DCc}/V_{PR}=\%0.25$ olduğu dengesiz DC uyartım altında Tip 3 üç fazlı transformatörün $\Delta P$ ve $I_{Pc}$ değerlerinin LR ile değişim eğrileri. ....	56

## SEMBOL LİSTESİ

DC	: Doğru akım
$J_A$	: Jeomanyetik indüklenen akım
$P_{Pm}$	: Transformatörün primer tarafının m fazında ölçülen aktif güç
$P_{Sm}$	: Transformatörün sekonder tarafının m fazında ölçülen aktif güç
$P_P$	: Transformatörün primer tarafında ölçülen toplam aktif güç
$P_S$	: Transformatörün sekonder tarafında ölçülen toplam aktif güç
$\Delta P$	: Transformatörün toplam kaybı
$Q_{m1}$	: Transformatörün primer tarafı m fazında ölçülen temel frekans (temel harmonik) reaktif gücü
$Q_1$	: Transformatörün talep ettiği temel frekans (temel harmonik) reaktif gücü
$V_{pm}, V_{sm}$	: Transformatörün sırasıyla primer ve sekonder taraflarında ölçülen m fazı-nötür arası anlık gerilimler
$i_{pm}, i_{sm}$	: Transformatörün sırasıyla primer ve sekonder taraflarında ölçülen m fazı anlık akımları
$\Theta_{Pm1}$	: Transformatörün primer taraf m fazı-nötür temel frekans gerilimi ile primer taraf m fazı temel frekans akımı arasındaki faz farkı
$I_{Pm1}, V_{Sm1}$	: Sırasıyla primer ve sekonder tarafta ölçülen m fazına ait temel harmonik faz akımı ve temel harmonik faz-nötür gerilimi etkin değerleri
$I_{Pmh}, V_{Smh}$	: Sırasıyla primer ve sekonder tarafta ölçülen m fazına ait h harmonik numarası faz akımı ve h harmonik numarası faz-nötür gerilimi etkin değerleri
$I_{Pm}, I_{Sm}$	: Sırasıyla primer ve sekonder taraf m fazında ölçülen akımların toplam etkin değerleri
$THDI_{Pm}, TDDI_{Pm}$	: Primer taraf m faz akımının sırasıyla toplam harmonik bozulma ve toplam talep bozulma indisleri

$\text{THDV}_{\text{PSm}}, \text{VD}_m$	Sekonder taraf m fazı nötür arası gerilimin sırasıyla toplam harmonik bozulma indisi ve temel frekans anma geriliminden sapma miktarı
$\text{CUF}_p, \text{VUF}_s$	: Sırasıyla primer taraf temel frekans akımı dengesizlik faktörü ve sekonder taraf temel frekans gerilimi dengesizlik faktörü indisleri
$I_{p1}^+, I_{p1}^-$	: Sırasıyla primer taraf temel frekans pozitif ve negatif sıra akımlarının genlikleri
$V_{s1}^+, V_{s1}^-$	: Sırasıyla sekonder taraf temel frekans pozitif ve negatif sıra gerilimlerinin genlikleri
$\text{LR}, \text{DF}$	: Sırasıyla yüklenme oranı ve azami yüklenme oranı
$I_{\text{PR}}$	: Primer taraf anma akım değeri
$V_{\text{SNL}}$	: Sekonder taraf boşta çalışma gerilimi
$V_{\text{PR}}$	: Primer taraf faz nötür geriliminin anma değeri

## ÖNSÖZ

Yüksek Lisans safahatım boyunca kıymetli bilgi ve tecrübeleriyle bana yol gösteren danışman hocam sayın Doç. Dr. Murat Erhan BALCI'ya en içten duygularıyla teşekkür ederim.

Bütün eğitim hayatım boyunca benden maddi ve manevi desteklerini esirgemeyen anneme,babama ve lisans ve yüksek lisans eğitim hayatımda manevi desteklerini esirgemen abime sonsuz saygı ve sevgilerimi sunarım.

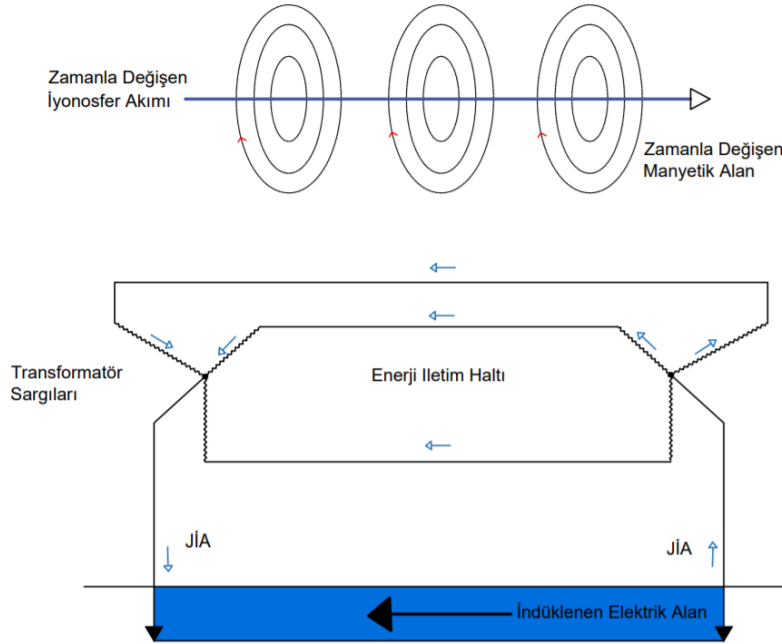




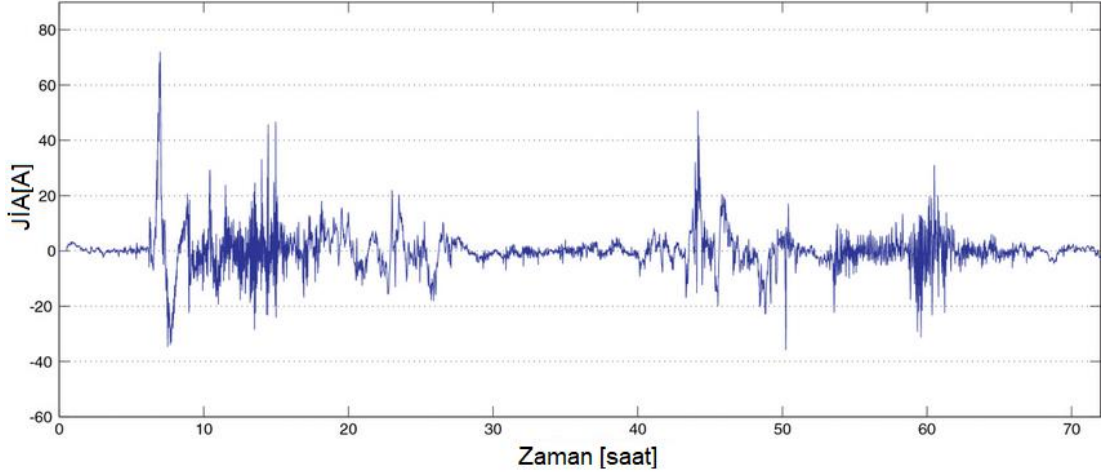
# 1. GİRİŞ

Güneş'te meydana gelen patlamalara bağlı olarak Dünya'nın manyetik alanında oluşan değişimler, elektrik enerjisi iletim hatlarında düşük frekanslarda (tipik olarak 0.01 Hz'den küçük frekanslar) gerilimler indüklenmesine yol açar. Bu düşük frekanslı gerilimler, iletim hatlarında, literatürde "jeomanyetik indüklenen akımlar" (JİA) biçiminde isimlendirilmiş ve yaklaşık doğru akım (DC) kabul edilen akımların akışına sebep olurlar [1]. JİA'ların iletim hatlarında oluşumunu açıklayan şematik ve gözlemlenen bir JİA akımına ait genlik-zaman değişimi grafiği sırasıyla, Şekil 1.1 ve Şekil 1.2'de verilmiştir [2], [3].

Literatürdeki birçok çalışmada [4]-[7] yapılan niteliksel ve niceliksel analizlerle, transformatörlerin, JİA'nın akış yönüne göre pozitif veya negatif alternansta doyuma ulaştıkları, aşırı büyüklükte ve yüksek toplam harmonik bozulmaya sahip uyarım akımı çektikleri, daha fazla reaktif güç talep ettikleri ve kayıplarının arttığı sonuçlarına varılmıştır. Ayrıca, [8] ve [9] çalışmalarında, JİA genliğindeki artışla transformatörlerin azami yüklenme kapasitesinin önemli derecede düştüğü ifade edilmiştir.

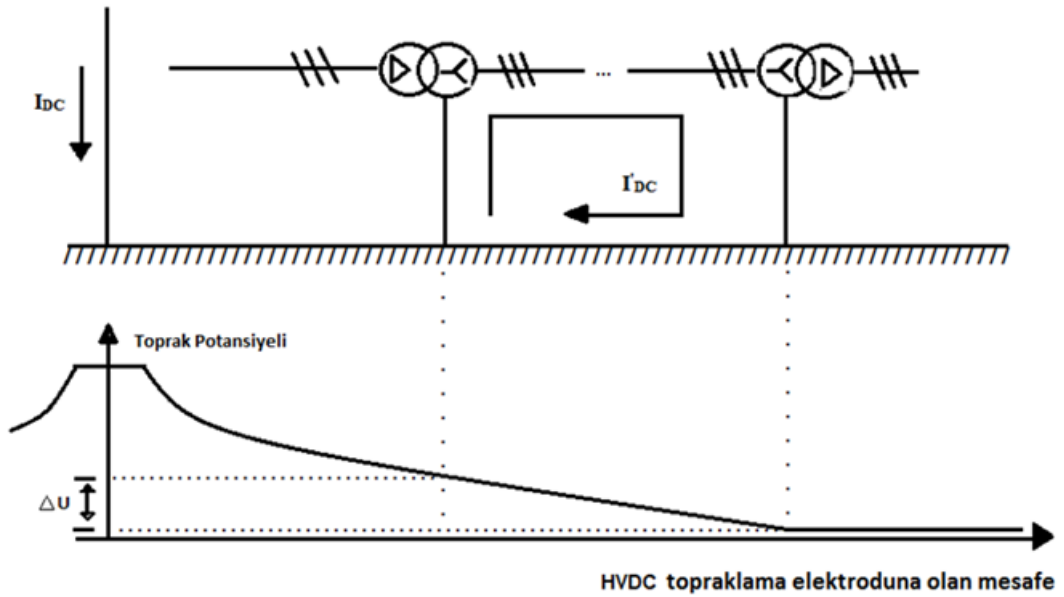


Şekil 1.1: Enerji iletim hatlarında JİA'ların dolaşımı.



Şekil 1.2: JİA'nın zamanla değişimi [3].

Diğer taraftan, jeomanyetik bozulmalara benzer şekilde, yüksek gerilim doğru akım (HVDC) iletimi sistemlerinin ve transformatörsüz fotovoltaik dağıtık üretim birimlerinin, alternatif akım şebekelerine DC akım akışına yol açtıkları, böylece bu sistemlerde bulunan güç transformatörlerinde yukarıda ifade edilen olumsuz etkilerin meydana gelebileceği literatürde bilinmektedir [10], [11]. HVDC iletim sistemlerinin topraklama elektrotları (çubukları) etrafındaki DC potansiyelinin değişimini ve bu potansiyel sebebiyle alternatif akım güç sistemlerinde DC akım dolaşımını gösteren şematik ve grafik Şekil 1.3'de verilmiştir.



Şekil 1.3: HVDC iletim sistemleri sebebiyle alternatif akım güç sistemlerine DC akım akışı.

Literatürde, (i) a.a. güç sistemlerinde DC akım akmasını engelleyen elemanların tasarımları [12]-[14], (ii) bu DC akım engelleyici elemanların güç sistemlerine optimal yerleştirilmesi [15], [16], (iii) DC uyarımın güç transformatörlerine etkilerinin analizi [1]-[9], [17]-[19] ve (iv) DC uyarıma dayanıklı transformatör tasarımı [20], [21] üzerine çalışmalar mevcuttur. (i) ve (ii) gruplarındaki çalışmalar incelendiğinde, DC akımların alternatif akım sistemlerinde akışını engellenmesi amacıyla; kondansatör ve/veya direnç elemanlarının transformatörlerin yıldız noktası ile toprak arasına yerleştirilmesinin geleneksel olarak tercih edildiği, ancak son yıllarda güç elektroniği temelli DC akım engelleyici devrelerin kullanılmaya başlandığı görülmüştür. Bununla birlikte, DC akım engelleme elemanlarının bütün transformatörlere yerleştirilmesinin önemli mali yük getirmesi sebebiyle, [22] çalışmada, sistem için kritik önem arz eden transformatörlere DC akım engelleme elemanlarının yerleştirilmesi, jeomanyetik fırtınalar sırasında sadece bu transformatörlerin enerji altında bırakılması ve diğer transformatörlerin devreden çıkarılması (by-pass edilmesi) önerilmiştir.

(iii) ve (iv) gruplarında yer alan çalışmalarda; genellikle ölçüm sonuçları [4], [6] ve sonlu elemanlar yöntemi (SEY) [1], [7] ile relüktans temelli transformatör modelleri [17]-[19] kullanılarak gerçekleştirilen simülasyon sonuçları sunulmuştur. Bu çalışmalarda;

- Transformatörlerin DC uyarıma (veya JİA'lara) hassasiyetinin, faz sayılarına, sargı biçimine, nüve tipine ve nüve bacak sayısına bağlı olduğu,
- Tek fazlı transformatörlerin, DC uyarıma üç fazlı transformatörlerden daha fazla hassas olduğu,
- Yıldız noktası topraksız veya üçgen bağlı sargılara sahip transformatörlerin dengeli DC uyarımdan etkilenmediği,
- Shell tipi nüveli üç fazlı transformatörlerin çekirdek tipi nüveli üç fazlı transformatörlerle karşılaştırıldığında, DC uyarıma daha fazla hassas olduğu,
- Nüvenin bacak sayısındaki artışın, transformatörlerin DC uyarıma hassasiyetini arttırdığı çıktılarına ulaşılmıştır.

Bu çıktılarına ilaveten, [23] çalışmada, transformatörlerin DC uyarım altında doyuma ulaşma zamanının, DC gerilimin genliğiyle ters orantılı olduğu, transformatörün X/R oranıyla doğru orantılı olduğu ifade edilmiştir.

## 1.1 Tezin Amacı

Bu tez çalışmasında, DC uyarımın tek fazlı çekirdek tipi nüveli, üç fazlı üç bacaklı çekirdek tipi nüveli ve üç fazlı beş bacaklı shell tipi nüveli transformatörlere olan etkilerinin analiz edilmesi amaçlanmıştır.

Yapılan parametrik analizlerde, dengesiz ve dengeli DC uyarımın transformatörün kaybına, reaktif güç talebine, boşta çalışma akımı etkin değerine, boşta çalışma akımı harmonik bozulma ve dengesizlik miktarına, sekonder taraf geriliminin anma değerinden sapma miktarına, sekonder taraf geriliminin harmonik bozulma oranı ve dengesizlik miktarına etkisi göz önüne alınmıştır.

Son olarak, modellenen transformatör tiplerinin toplam kayıp ve azami akım etkin değerinin kriter olarak kabul edildiği iki farklı yaklaşıma göre DC uyarım şartlarında azami yüklenme oranlarının karşılaştırmalı olarak analizi hedeflenmiştir.

## 1.2 Tezin Sınırları

Analizler sırasında Simulink [24] ortamında var olan tek ve üç fazlı transformatörlere ait T eşdeğer devre modelleri kullanılmıştır.

Bu modellerde, sargı direncinin frekans bağımlılığı ihmal edilmiş olup tüm transformatör tipleri için birim değer ( $p_u$ ) cinsinden çekirdeğe ait doyma eğrisi özdeş kabul edilmiştir ve histeresiz döngüsü dikkate alınmamıştır.

## 1.3 Tezin İçeriği

Bu tez çalışmasının, ilk bölümünde ilgili literatür özeti, tezin amacı ve sınırları verilmiştir.

İkinci bölümde, DC uyarım altında transformatörlerin SIMULINK ortamında modellenmesi ve analizler sırasında dikkate alınan güç ve güç kalitesi büyüklüklerinin hesabı hakkında bilgi sunulmuştur.

Üçüncü bölümde, her bir faza eşit büyüklükte (dengeli) DC uyarımın tek fazlı çekirdek biçimi nüveli, üç fazlı üç bacaklı çekirdek biçimi nüveli primer (uyarım uygulanan) sargıları yıldız bağlı ve üç fazlı beş bacaklı shell biçimi nüveli primer (uyarım uygulanan) sargıları yıldız bağlı transformatörlere etkileri incelenmiştir.

Dördüncü bölümde, her bir faza farklı büyüklükte (dengesiz) DC uyarımın üç fazlı üç bacaklı çekirdek biçimi nüveli primer sargıları yıldız bağlı, üç fazlı beş bacaklı shell biçimi nüveli primer sargıları yıldız bağlı ve üç fazlı üç bacaklı çekirdek biçimi nüveli primer sargıları üçgen bağlı transformatörlere etkileri sunulmuştur.

Beşinci bölümde, dengeli ve dengesiz DC uyarım altında, yukarıda belirtilen transformatör tiplerinin toplam kayıp ve azami faz akımı etkin değeri kriter alınarak hesaplanan yeniden boyutlandırma oranları (azami yüklenme oranları) karşılaştırmalı olarak verilmiştir.

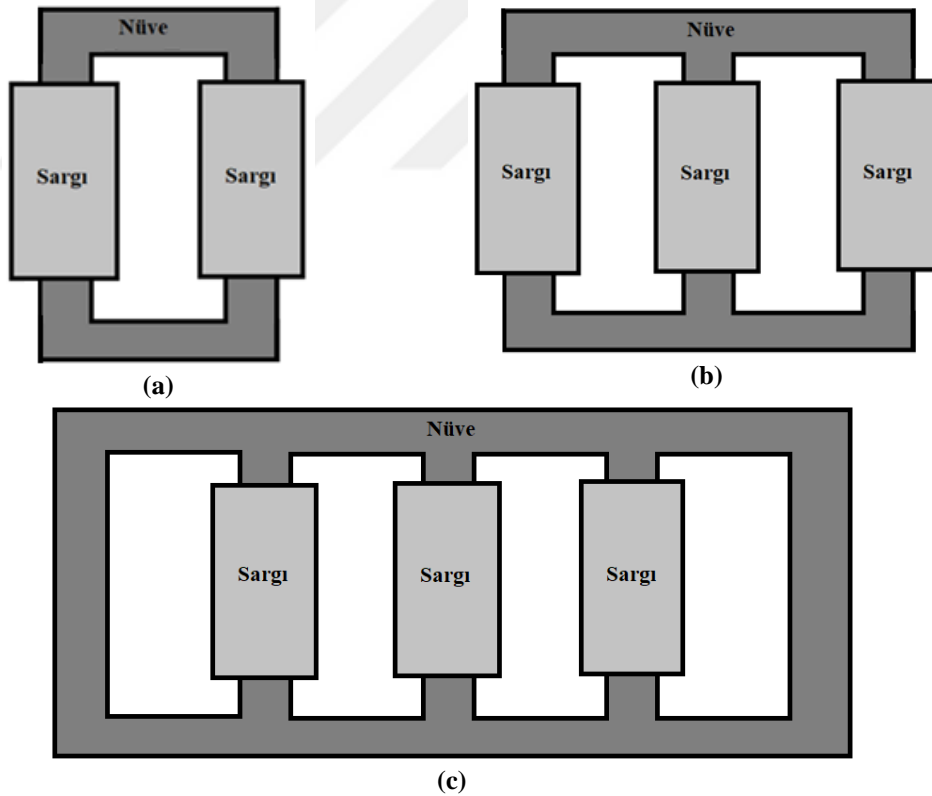
Son bölümde, tez çalışması kapsamında yapılan analizlerden elde edilen çıktılar ana hatlarıyla değerlendirilerek özetlenmiştir.



## 2. DC UYARTIM ALTINDA TRANSFORMATÖRLERİN SIMULINK ORTAMINDA MODELLENMESİ

Bu bölümde, DC uyartımın transformatörler üzerine etkilerinin analizinde dikkate alınan transformatör tiplerinin ve test sisteminin Matlab/SIMULINK yazılımında modellenmesi hakkında bilgi verilecektir. Ayrıca analizlerde yorumlanan güç ve güç kalitesi parametrelerine ilişkin ifadeler sunulacaktır.

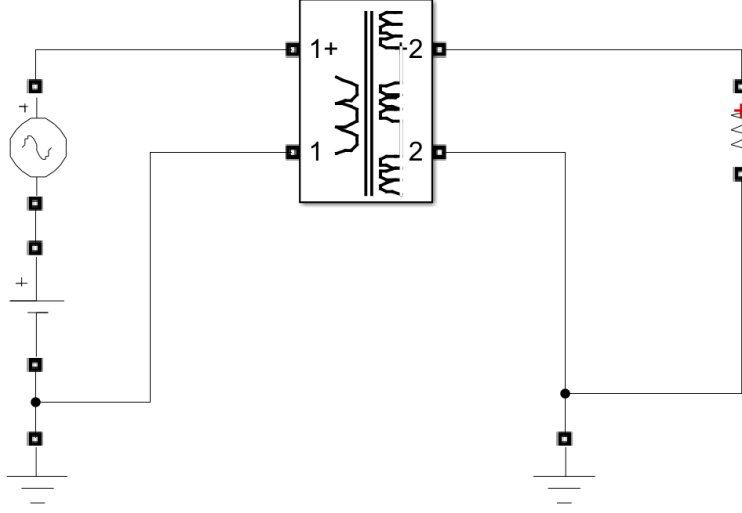
Giriş bölümünde verilen literatür taramasında görüldüğü üzere, transformatörlerin DC uyartım hassasiyeti, faz sayılarına, nüve biçimi ve nüve bacak sayısı gibi parametrelere bağlıdır. Bu sebeple, analizlerde Şekil 2.1’de yapıları verilen; tek fazlı çekirdek biçimi nüveli, üç fazlı üç bacaklı çekirdek biçimi nüveli ve üç fazlı beş bacaklı shell biçimi nüveli transformatörler göz önüne alınmıştır. Ayrıca, üç fazlı transformatörlere, dengeli ve dengesiz DC uyartımın etkileri, transformatörlerin sargı bağlantı şekilleri değiştirilerek incelenmiştir.



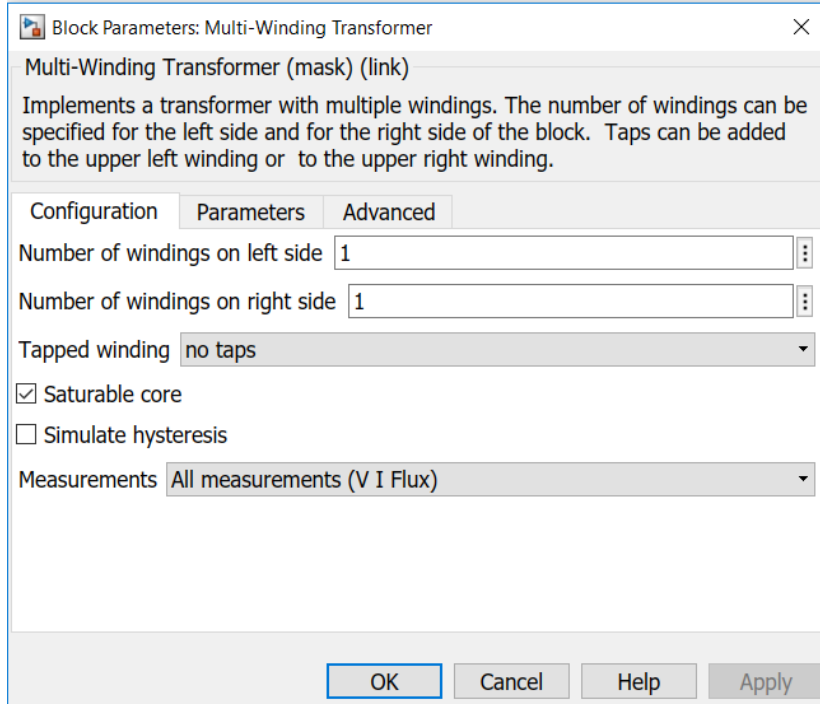
Şekil 2.1: (a) tek fazlı çekirdek biçimi nüveli, (b) üç fazlı üç bacaklı çekirdek biçimi nüveli ve (c) üç fazlı beş bacaklı shell biçimi nüveli transformatör yapıları.

## 2.1 SIMULINK Ortamında Analiz Sisteminin Modellenmesi

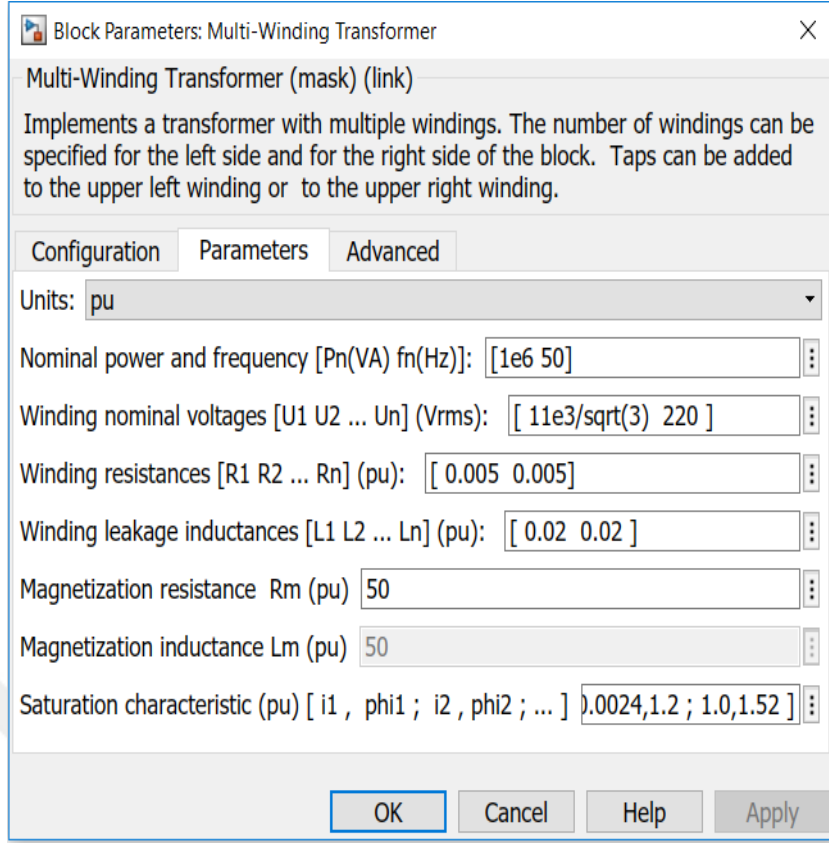
Analizler sırasında Matlab/SIMULINK yazılımında oluşturulan test sistemi ve transformatör modelleri ile SIMULINK kütüphanesinde bulunan transformatör model bloklarının konfigürasyon/parametre menüleri Şekil 2.2-Şekil 2.9’da verilmiştir.



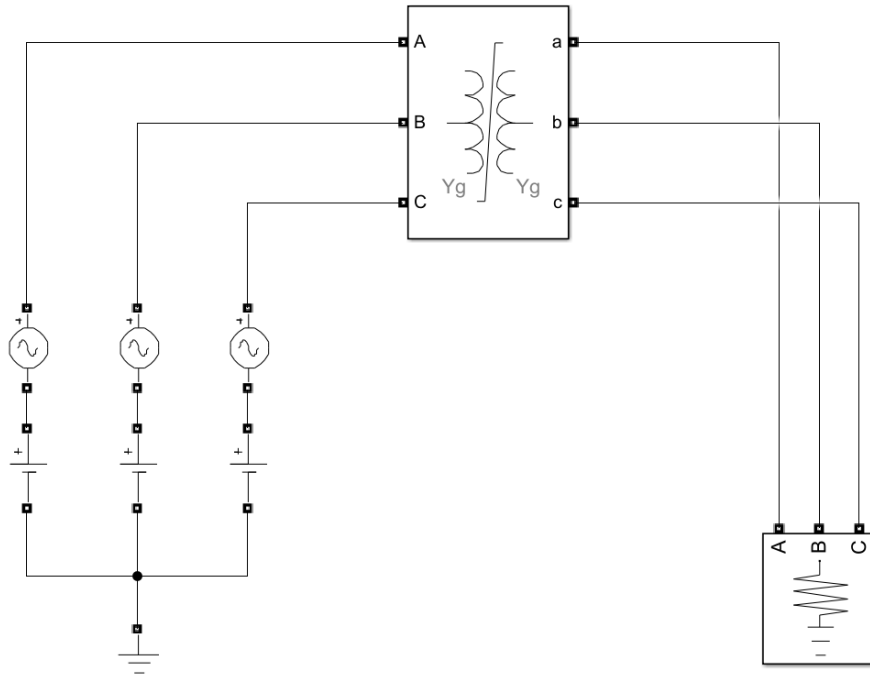
Şekil 2.2: Tek fazlı transformatör için Matlab/SIMULINK yazılımında oluşturulan sistem.



Şekil 2.3: Tek fazlı transformatör modeli ara yüzünün konfigürasyon menüsü.

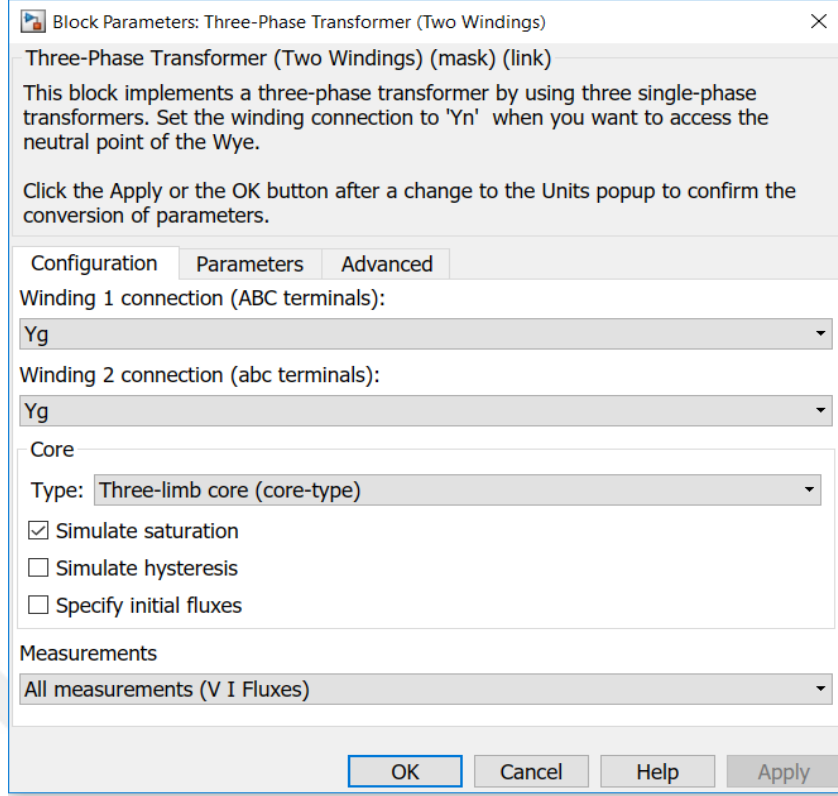


Şekil 2.4: Tek fazlı transformatör modeli ara yüzünün parametreler menüsü.

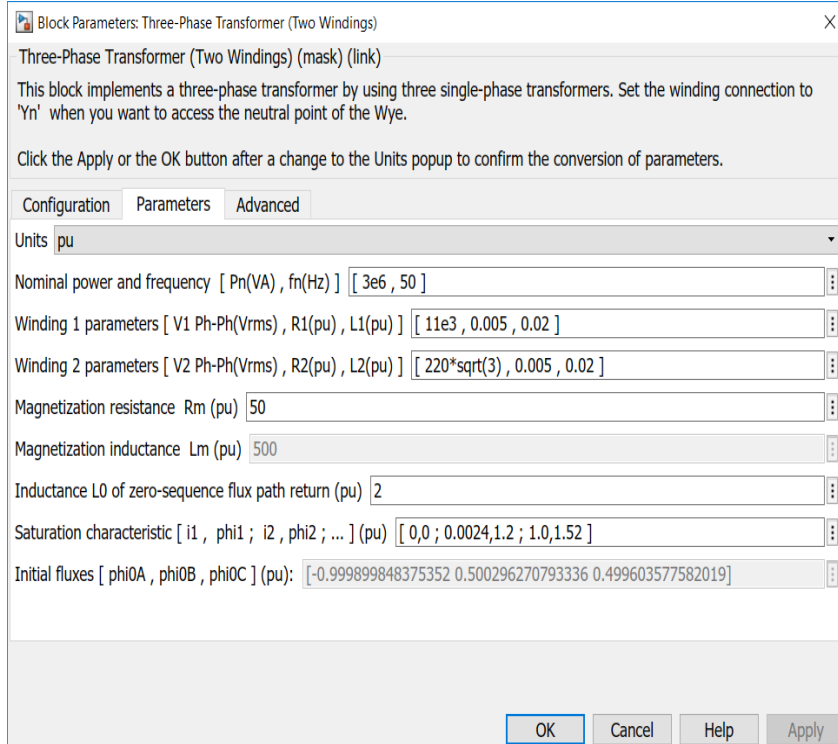


Şekil 2.5: Üç fazlı transformatörler için Matlab/SIMULINK yazılımında oluşturulan sistem.

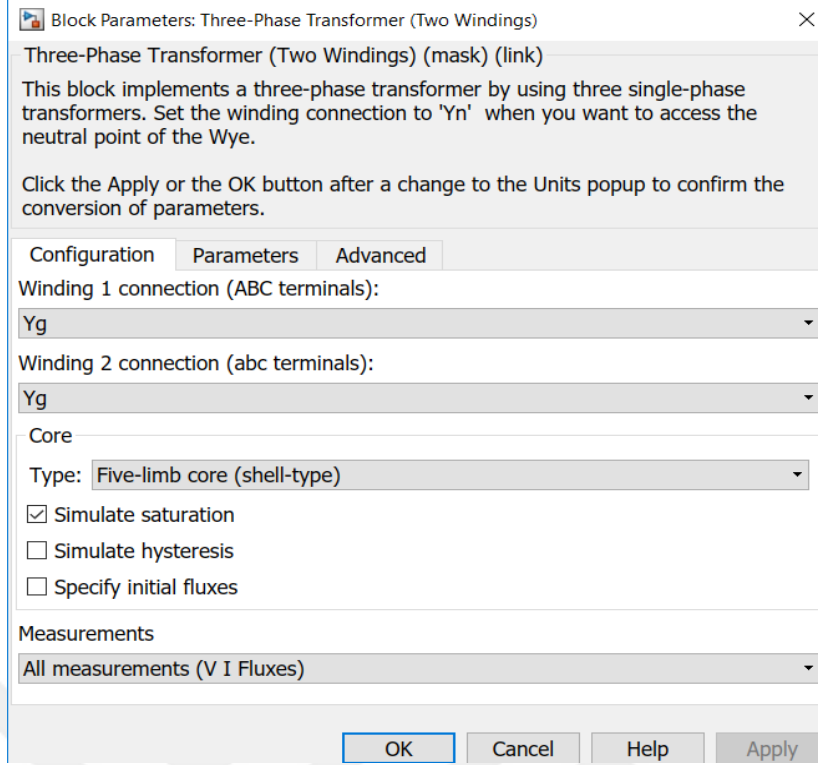




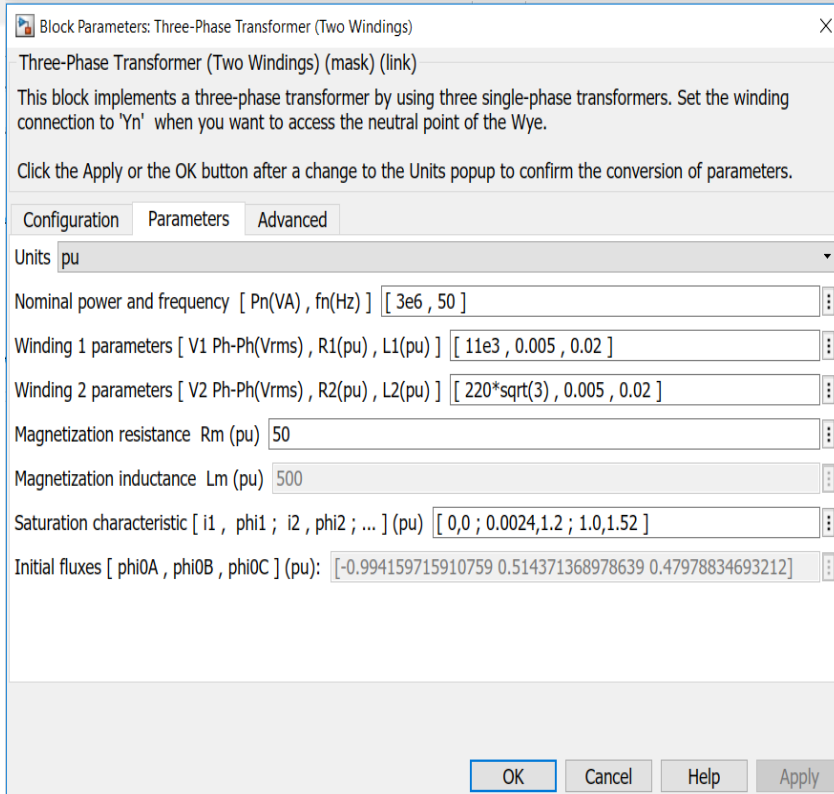
Şekil 2.6: Üç fazlı üç bacaklı çekirdek biçimi nüveye sahip transformatör model ara yüzünün konfigürasyon menüsü.



Şekil 2.7: Üç fazlı üç bacaklı çekirdek biçimi nüveye sahip transformatör model ara yüzünün parametreler menüsü.



Şekil 2.8: Üç fazlı beş bacaklı shell biçimi nüveye sahip transformatör model ara yüzünün konfigürasyon menüsü.



Şekil 2.9: Üç fazlı beş bacaklı shell biçimi nüveye sahip transformatör model ara yüzünün parametreler menüsü.

Şekil 2.2 ve Şekil 2.5’den görüldüğü üzere transformatörlerin primer tarafında transformatör anma frekansı ve anma gerilim değerinde sinüzoidal dengeli gerilim kaynaklarına seri bağlı DC gerilim kaynakları bağlıdır. DC gerilim kaynaklarının genlikleri değiştirilerek transformatörlere uygulanan DC uyarımın seviyesi ayarlanmıştır. Transformatörlerin sekonder taraflarına ise transformatörün anma frekansı ve anma geriliminde çalışan dengeli ve doğrusal saf rezistif yükler bağlanmıştır. Boşta çalışma durumunda yükler devreden çıkarılmıştır.

Şekil 2.3’de tek fazlı çekirdek tipi nüveli transformatör, Şekil 2.56’da üç faz üç bacaklı çekirdek tipi nüveli, Şekil 2.8’de üç faz beş bacaklı shell tipi nüveli transformatörler için sunulan konfigürasyon menülerinde, bu transformatörlerin sargı bağlantı şekilleri, nüve yapıları ve doymanın (saturasyonun) modelde dikkate alınmasına ilişkin seçim durumları görülmektedir. Sırasıyla aynı transformatörler için Şekil 2.4, Şekil 2.67 ve Şekil 2.89’da sunulan parametreler menülerinde, anma gücü, anma frekansı, anma gerilimi, sargı direnci ve kaçak indüktansı, çekirdeğin mıknatıslanma direnci ve nüvenin doyma karakteristiği ( $i-\Phi$  eğrisi) parametreleri mevcuttur. Bu bahsedilen menülerden de görüldüğü üzere, modellenen tek fazlı transformatörün 1 MVA gücüne ve 6.35/0.22 kV dönüştürme oranına, üç fazlı transformatörlerin 3 MVA gücünde ve 11/0.38 kV dönüştürme oranına sahip olduğu, bütün transformatör modellerinin sargı dirençlerinin, sargı kaçak indüktanslarının ve nüve mıknatıslanma dirençlerinin sırasıyla 0.005 pu, 0.02 pu ve 50 pu olduğu ifade edilebilir. Ayrıca, bütün transformatörlerin doyma karakteristikleri pu cinsinden aynı değerde seçilmiştir.

## 2.2 Kayıp, Reaktif Güç Talebi ve Güç Kalitesi İndislerinin İfadeleri

Model üzerinde ölçülen anlık faz-nötür gerilimleri ve anlık faz akımları dikkate alınarak, transformatörlerin primer ve sekonder tarafları için her faza ait aktif güçler (2.1) ve (2.2)’den hesap edilmiştir.

$$P_{Pm} = \frac{1}{T} \int_{\tau}^{\tau+T} v_{Pm} i_{Pm} dt \quad m=a,b,c \text{ fazları} \quad (2.1)$$

$$P_{Sm} = \frac{1}{T} \int_{\tau}^{\tau+T} v_{Sm} i_{Sm} dt \quad m=a,b,c \text{ fazları} \quad (2.2)$$

Burada,  $P_{Pm}$  transformatörün primer taraf m fazına ait aktif gücü,  $P_{Sm}$  ise sekonder taraf m fazına ait aktif gücü temsil etmektedir. Ayrıca,  $v_{Pm}$  primer taraf m fazına ait faz-nötr geriliminin anlık değerini,  $v_{Sm}$  sekonder taraf m fazına ait faz-nötr geriliminin anlık değerini,  $i_{Pm}$  primer taraf m fazına ait akımın anlık değerini,  $i_{Sm}$  sekonder taraf m fazına ait akımın anlık değerini ifade etmektedir.

Transformatörün toplam primer aktif gücü ( $P_P$ ) ve toplam sekonder aktif gücü ( $P_S$ ) ise, Denklem (2.3) ve (2.4)'den bulunmuştur.

$$P_P = \sum_{m=a,b,c} P_{Pm} \quad (2.3)$$

$$P_S = \sum_{m=a,b,c} P_{Sm} \quad (2.4)$$

Transformatörün kaybı ( $\Delta P$ ), hesap edilen primer ve sekonder aktif güçlerinin farkı alınarak hesap edilmiştir:

$$\Delta P = P_P - P_S \quad (2.5)$$

Analizlerde, transformatörün primer tarafında ölçülen temel harmonik faz-nötr gerilimlerinin ve temel harmonik faz akımlarının etkin değerleri ( $V_{Pm1}$  ve  $I_{Pm1}$ ) ile bu gerilim ve akımlar arasındaki faz farkı ( $\theta_{Pm1}$ ), Denklem (2.6)'daki ifadede yerine konularak, transformatörün primer tarafından çektiği m=a,b,c fazlarına ait reaktif güçler bulunmuştur. Transformatörün toplam reaktif güç talebi ise Denklem (2.7)'de verilen ifadeyle hesaplanmıştır.

$$Q_{m1} = V_{Pm1} I_{Pm1} \sin(\theta_{Pm1}) \quad m=a,b,c \text{ fazları} \quad (2.6)$$

$$Q_1 = \sum_{m=a,b,c} Q_{m1} \quad (2.7)$$

Transformatör primer ve sekonder taraf faz akımlarının, temel harmonik ve diğer harmonikler dikkate alınarak hesaplanan toplam etkin değerlerinin ifadeleri ise Denklem (2.8) ve (2.9)'da verilmiştir:

$$I_{Pm} = \sqrt{\frac{1}{T} \int_0^T (i_{Pm})^2 dt} \quad (2.8)$$

$$I_{Sm} = \sqrt{\frac{1}{T} \int_0^T (i_{Sm})^2 dt} \quad (2.9)$$

Literatürde iyi bilinen harmonik bozulma ölçüm indisi olan toplam harmonik bozulma indisi (THD) dikkate alınarak, primer taraf m faz akımı ve sekonder taraf m faz-nötür arası gerilimine ait toplam harmonik bozulma miktarları  $THDI_{Pm}$  ve  $THDV_{Sm}$  ifadeleriyle hesaplanmıştır:

$$THDI_{Pm}(\%) = 100 \sqrt{\frac{\sum_{h=2}^{h_{maks}} I_{Pmh}^2}{I_{Pm1}}} \quad (2.10)$$

$$THDV_{Sm}(\%) = 100 \sqrt{\frac{\sum_{h=2}^{h_{maks}} V_{Smh}^2}{V_{Sm1}}} \quad (2.11)$$

Bu ifadelerde,  $h_{maks}$  maksimum harmonik numarası,  $I_{Pmh}$  ve  $V_{Smh}$  sırasıyla primer ve sekonder tarafa ait h harmonik numarası faz akımlarının ve h harmonik numarası faz-nötür gerilimlerinin etkin değerleridir.

Primer taraf faz akımlarına ait toplam harmonik bozulmanın transformatör anma akımına ( $I_{PR}$ ) oranı, özellikle transformatörün boşa çalıştığı ve düşük yüklendiği durumlarda sebep olduğu harmonik bozulmanın belirlenmesinde daha doğru bir yaklaşım olabilir. Bu sebeple,  $THDI_{Pm}$ 'nin yanı sıra IEEE Standard 519'da tanımlı olan ve ifadesi Denklem (2.12)'de verilen toplam talep bozulma indisi (TDD)'de analizlerde dikkate alınmıştır:

$$TDDI_{Pm}(\%) = 100 \sqrt{\frac{\sum_{h=2}^{h_{maks}} I_{Pmh}^2}{I_{PR}}} \quad (2.12)$$

Literatürde dengesizliğin ölçülmesinde yaygın olarak tercih edilen indis olan ve negatif sıra bileşen genliğinin pozitif sıra bileşen genliğine yüzde oranı biçiminde tanımlanmış, akım ve gerilim dengesizlik faktörü indisleri (CUF ve VUF), analizlerde DC uyartım altında transformatör primer taraf faz akımları ve sekonder taraf faz-nötür gerilimlerinin dengesizlik miktarlarının hesabında kullanılmıştır:

$$CUF_P(\%) = 100 \frac{I_{P1}^-}{I_{P1}^+} \quad (2.13)$$

$$VUF_S(\%) = 100 \frac{V_{S1}^-}{V_{S1}^+} \quad (2.14)$$

Transformatörün sekonder geriliminin anma besleme şartlarında boştaki sekonder faz-nötür gerilimi ( $V_{SNL}$ ) ve DC uyartım şartlarındaki boştaki m faz-nötür temel harmonik gerilimleri ( $V_{Sm1}$ ) arasındaki bağıl mutlak fark göz önünde bulundurularak, temel frekans gerilim sapma değeri analizlerde hesap edilmiştir. Bu indisin ifadesi Denklem (2.15)'de verilmiştir:

$$VD_m(\%) = \left| \frac{V_{SNL} - V_{Sm1}}{V_{SNL}} \right| 100 \quad (2.15)$$

Analizlerde, üç fazlı transformatörler fazlarına dengeli (eşit büyüklükte) ve dengesiz (birbirinden farklı büyüklüklerde) DC uyartım gerilimleri uygulanmıştır. Uygulanan DC uyartım gerilimlerinin dengesizlik miktarı, fazlara uygulanan DC gerilimlerin aritmetik ortalaması ( $V_{DCA}$ ) ile maksimum değerinin ( $V_{DCM}$ ) oranı dikkate alınarak ölçeklendirilmiştir:

$$\frac{V_{DCA}}{V_{DCM}} = \frac{\text{Aritmetik Ortalama}(V_{Dca}, V_{DCb}, V_{DCc})}{\text{Maksimum Değer}(V_{Dca}, V_{DCb}, V_{DCc})} \quad (2.16)$$

Bu oran fazlara uygulanan DC gerilimler dengeli (birbirine eşit) olduğu durumda 1'e eşit, aksi durumda yani dengesiz DC uyartım durumunda 1'den küçük bir değer olmaktadır.

### 2.3 Sonuç

Bu bölümde, tez çalışmasında dikkate alınan transformatör tipleri ve DC uyartımın bu transformatör tiplerine etkilerinin analizi için kullanılacak Matlab/SIMULINK ortamında oluşturulmuş model blokları ve test sistemi tanıtılmıştır.

Ayrıca, analizlerde yorumlanan güç ve güç kalitesi parametrelerine ait ifadeler verilmiştir.

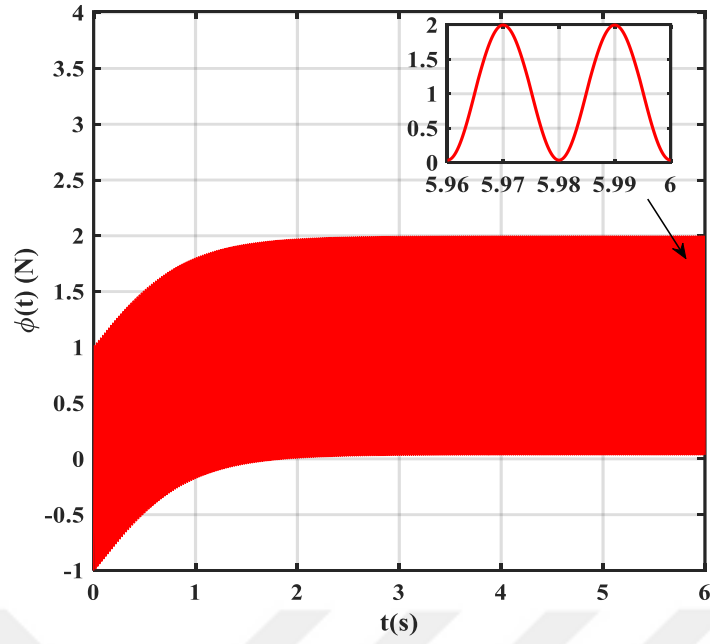
### 3. DENGELİ DC UYARTIMIN TRANSFORMATÖRLERE ETKİLERİ

Bu bölümde, tek fazlı ve farklı nüve biçimine sahip üç fazlı (üç bacaklı çekirdek tipi ve beş bacaklı shell tipi) transformatörlere dengeli doğru akım uyarımının etkilerinin analiz edilmesi amaçlanmıştır. Analizler transformatörün yüksüz (boşta) olduğu durum için gerçekleştirilmiştir.

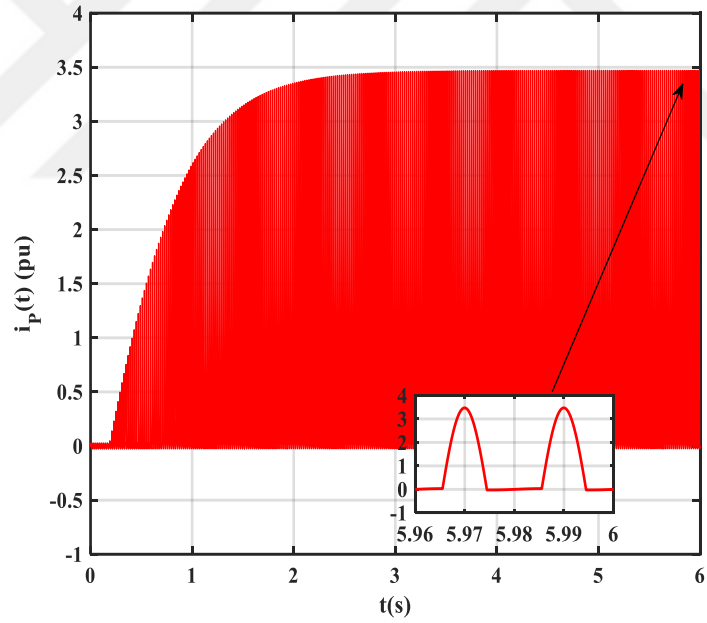
#### 3.1 Tek Fazlı Transformatöre Etkileri

DC uyarımının etkilerinin incelendiği tek fazlı transformatörün anma gücü, gerilimi ve frekansı 1 MVA, 6.35/0.22 kV ve 50 Hz olup bu transformatör çekirdek tipi bir nüveye sahiptir. Analiz sırasında transformatör anma gerilimi üzerine bindirilen DC uyarım geriliminin değeri ( $V_{DC}$ ), sıfırdan başlatılıp anma gerilim etkin değerinin ( $V_{PR}=6.35$  kV) %0.5'ine kadar arttırılmıştır.  $V_{DC}/V_{PR}$  değerinin %0.5 olduğu durumda, nüvede indüklenen manyetik akının ( $\Phi(t)$ ) normalize edilmiş dalga şekli ve boşta çalışma akımının ( $i_P(t)$ ) pu cinsinden dalga şekli sırasıyla Şekil 3.1 ve Şekil 3.2'de verilmiştir. Manyetik akının normalize değeri hesaplanırken, Wb cinsinden ölçülen gerçek değer saf sinüzoidal anma uyarım gerilimi altında gözlemlenen manyetik akının tepe değerine bölünmüştür.

Şekil 3.1'de test edilen DC uyarım gerilimi için transformatörün pozitif alternansta doyuma girdiği,  $\Phi(t)$ 'nin normalize edilmiş maksimum değerinin 2 olduğu bir başka ifadeyle manyetik akının tepe değerinin sinüzoidal anma gerilimi altındaki manyetik akı tepe değerinin 2 katı olduğu görülmektedir. Şekil 3.2'den ise doymaya bağlı olarak, boşta çalışma akımı tepe değerinin 3.5 pu değerine yükseldiği görülmektedir.



Şekil 3.1:  $V_{DC}/V_{PR}=\%0.5$  olduğu durumda tek fazlı çekirdek biçimi nüveli transformatöre ait  $\Phi(t)$  manyetik akısının dalga şekli.

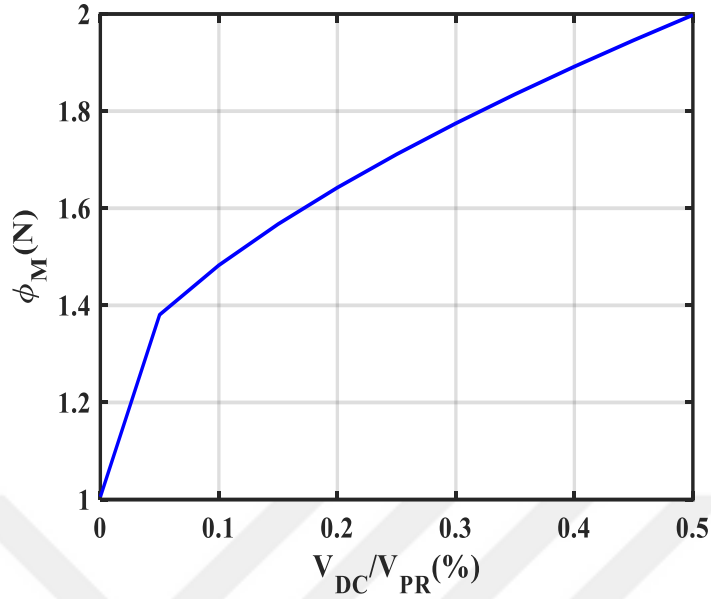


Şekil 3.2:  $V_{DC}/V_{PR}=\%0.5$  olduğu durumda tek fazlı çekirdek biçimi nüveli transformatöre ait  $i_p(t)$  akımının dalga şekli.

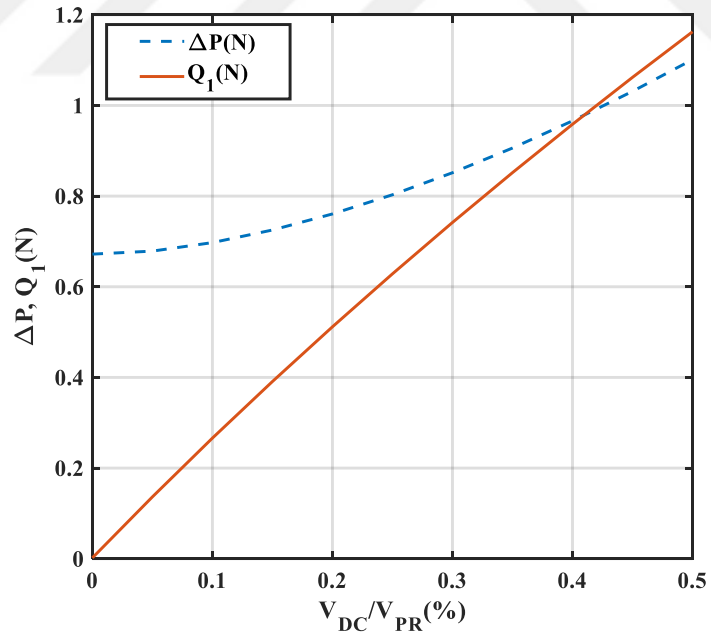
Şekil 3.3’de transformatör nüvesinde dolaşan manyetik akının maksimum değerinin ( $\Phi_M$ ), Şekil 3.4’de ise transformatörün boştaki toplam kaybının ( $\Delta P$ ) ve reaktif güç talebinin ( $Q_1$ ) normalize edilmiş değerlerinin test edilen DC uyarım gerilimi aralığındaki ( $V_{DC}/V_{PR}=\%0-\%0.5$ ) değişimleri verilmiştir. Normalize değerler



hesaplanırken,  $\Delta P$  transformatörün anma kaybına ve  $Q_1$  transformatörün anma gücüne bölünmüştür.



**Şekil 3.3:** Tek fazlı çekirdek biçimi nüveli transformatör için  $\Phi_M$  değerinin  $V_{DC}/V_{PR}$  ile değişim eğrisi.

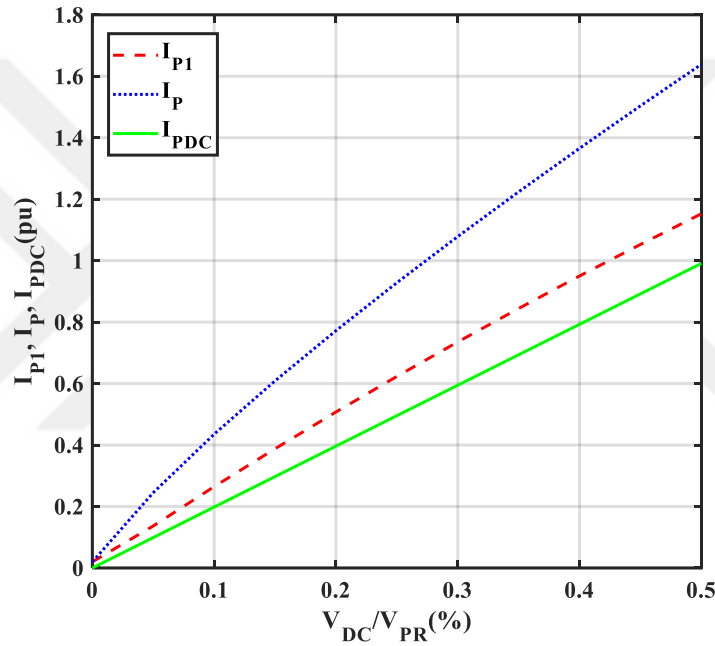


**Şekil 3.4:** Tek fazlı çekirdek biçimi nüveli transformatör için  $\Delta P$  ve  $Q_1$  değerlerinin  $V_{DC}/V_{PR}$  ile değişim eğrileri.

Şekil 3.3'den,  $V_{DC}/V_{PR} (\%)$ 'nin 0 ile 0.5 aralığında artışıyla  $\Phi_M$ 'nin 1'den 2'ye doğrusal olmayan bir şekilde arttığı, ayrıca  $\Phi_M$ - $V_{DC}/V_{PR} (\%)$  eğrisinin  $V_{DC}/V_{PR} = 0.05$  noktasında eğiminin değiştiği görülmektedir. Diğer taraftan, Şekil 3.4'den  $\Delta P$  ve  $Q_1$ 'in

normalize edilmiş değerlerinin;  $V_{DC}/V_{PR}(\%)$  oranının 0.1 olduğu durumda yaklaşık olarak 0.7 ve 0.3 ölçüldüğü,  $V_{DC}/V_{PR}(\%)$  oranının 0.5 olduğu durumda 1.2 civarında ölçüldüğü görülmektedir. Böylece, DC uyartım seviyesindeki artışın kaybı ve reaktif güç talebini dikkate değer miktarda arttırdığı sonucuna varılmıştır. Bununla birlikte, aynı şekilde,  $\Delta P$  ile  $V_{DC}/V_{PR}$  arasındaki ilişkinin eksponansiyel olduğu,  $Q_1$  ile  $V_{DC}/V_{PR}$  arasındaki ilişkinin doğrusal olduğu ifade edilebilir.

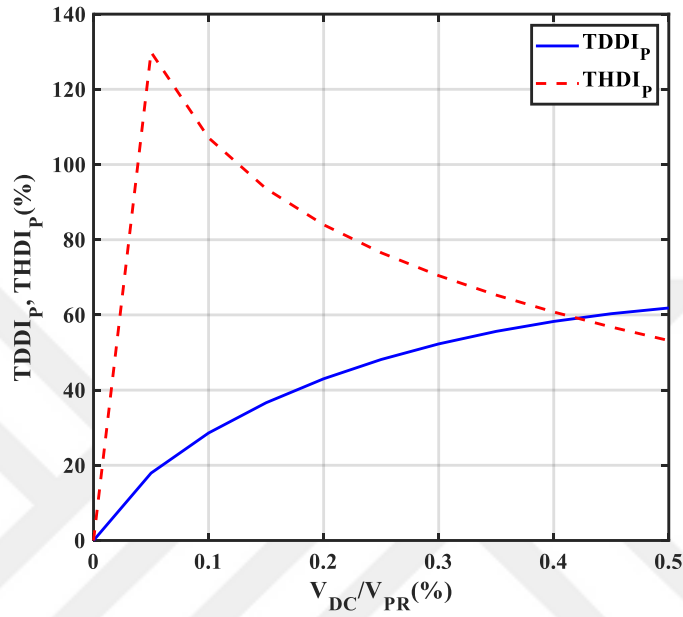
Dikkate alınan  $V_{DC}/V_{PR}(\%)$  aralığı için transformatörün yüksüz durumdaki primer faz akımına ait DC bileşenin ( $I_{PDC}$ ), temel frekans etkin değerinin ( $I_{P1}$ ) ve toplam etkin değerinin ( $I_P$ ) değişim eğrileri Şekil 3.5’de verilmiştir.



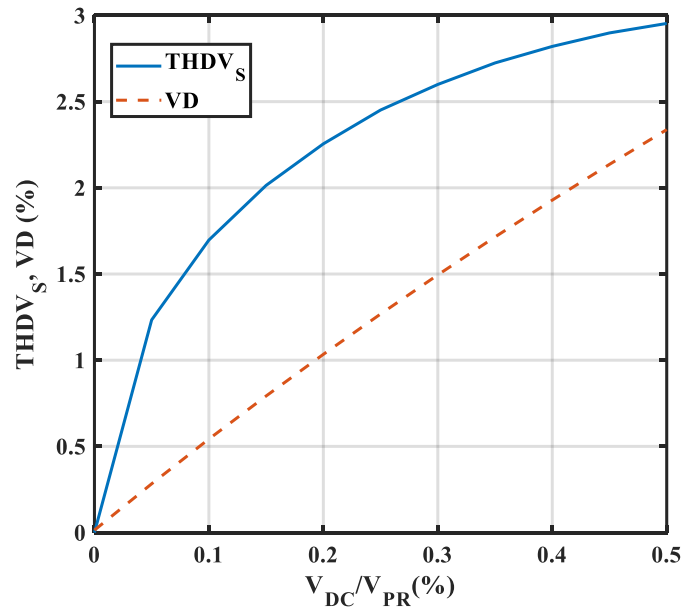
Şekil 3.5: Tek fazlı çekirdek biçimi nüveli transformatör için  $I_{PDC}$ ,  $I_{P1}$  ve  $I_P$  değerlerinin  $V_{DC}/V_{PR}$  ile değişim eğrileri.

Bu şekil DC uyartım olmadığı bir başka deyişle  $V_{DC}/V_{PR}$ 'nin %0 olduğu durumda, transformatörün yüksüz durumda çektiği tüm akım değerlerinin ihmal edilebilir seviyede olduğunu göstermektedir. Diğer taraftan,  $V_{DC}/V_{PR}(\%)$  oranının 0.1 olduğu durum için  $I_{PDC}$ ,  $I_P$ ,  $I_{P1}$  değerleri sırasıyla 0.1, 0.42, 0.23 pu, aynı oranın 0.5 olduğu durumda ise bu akımların yine sırasıyla 0.5, 1.62, 1.18 pu değerlerine ulaştığı görülmektedir. Aynı şekil,  $I_{PDC}$ ,  $I_{P1}$  ve  $I_P$  büyüklükleri ile  $V_{DC}/V_{PR}(\%)$  arasında doğrusal bir ilişki olduğunu göstermektedir. Ayrıca,  $I_{P1}$ 'deki artışın DC uyartıma bağlı olarak transformatörün doyuma girmesinin göstergesi olduğu belirtilmelidir.

DC uyartım artışı ile boşta çalışma akımında meydana gelen toplam talep bozulma değerinin ( $TDDI_p$ ) ve toplam harmonik bozulma değerinin ( $THDI_p$ ) değişimleri Şekil 3.6'da, yine DC uyartım artışı ile sekonder tarafa ait temel frekans gerilim sapma değerinin ( $VD$ ) ve toplam harmonik bozulma değerinin ( $THDV_s$ ) değişimleri ise Şekil 3.7'de verilmiştir.



Şekil 3.6: Tek fazlı çekirdek biçimi nüveli transformatör için  $TDDI_p$  ve  $THDI_p$  indislerinin  $V_{DC}/V_{PR}$  ile değişim eğrileri.



Şekil 3.7: Tek fazlı çekirdek biçimi nüveli transformatör için  $THDV_s$  ve  $VD$  indislerinin  $V_{DC}/V_{PR}$  ile değişim eğrileri.

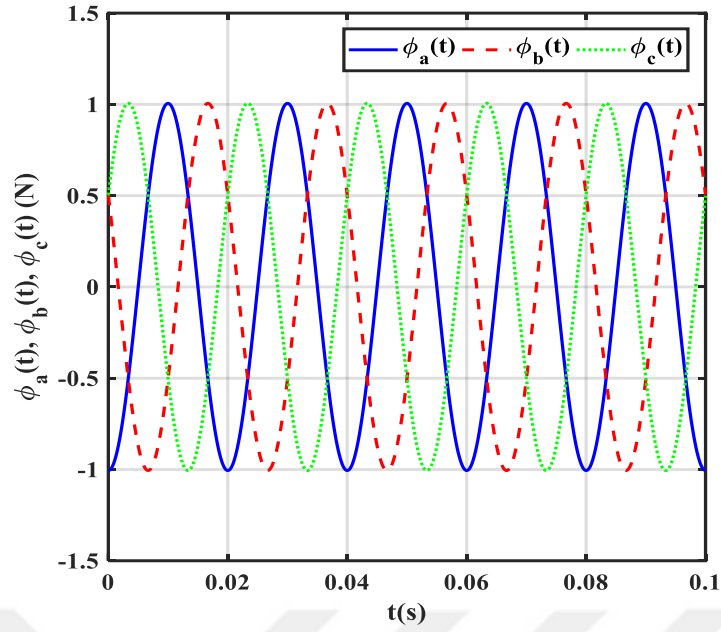
Şekil 3.6'dan  $THDI_P$  indisinin  $V_{DC}/V_{PR}$ 'nin %0 ile %0.05 aralığında %0'dan %130'a yükseldiği, ancak bu uyarım seviyesinden sonra eksponansiyel olarak azalarak  $V_{DC}/V_{PR} = %0.5$  için yaklaşık %50 değerine düştüğü görülmektedir. Aynı şekilde,  $V_{DC}/V_{PR}$ 'nin %0 ile %0.5 aralığı için  $TDDI_P$  indisinin %0'dan %60'a kadar doğrusal olmayan biçimde artış gösterdiği ifade edilebilir. Ayrıca,  $THDI_P$  ve  $TDDI_P$  indisleri,  $V_{DC}/V_{PR} = %0.42$  uyarım seviyesinde aynı değeri almışlardır. Bunun sebebi, bu uyarım seviyesinde, boşta çalışma akımının temel frekans bileşeninin ( $I_{P1}$ ) transformatörün anma akım değerine ulaşmasıdır.

Şekil 3.7,  $V_{DC}/V_{PR}$  oranının %0 ile %0.5 arasında artışı sonucu  $THDV_S$  indisinin doğrusal olmayan bir değişimle %0'dan %3'e kadar arttığını, aynı  $V_{DC}/V_{PR}$  değişim aralığında  $VD$  indisinin doğrusal olarak %0'dan %2.4'e arttığını göstermektedir.

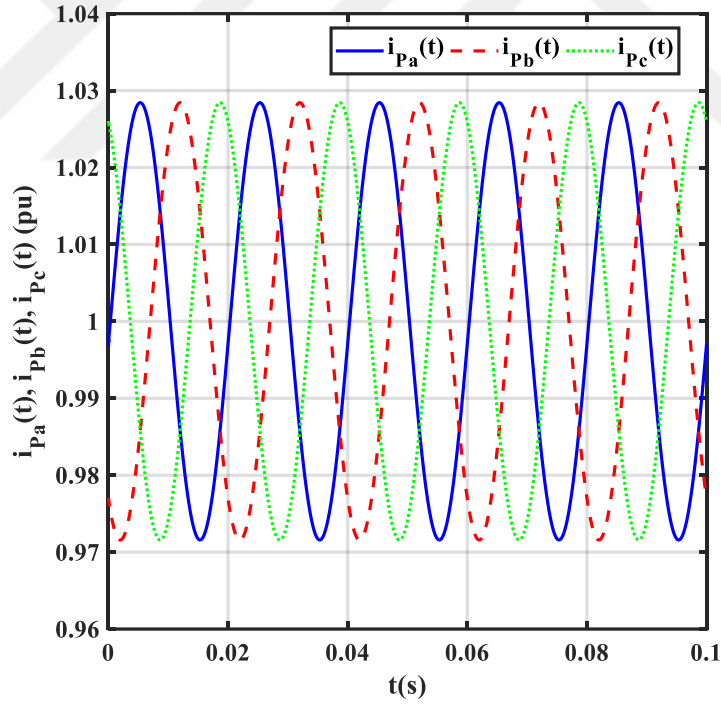
### 3.2 Tip 1 Üç Fazlı Transformatöre Etkileri

Burada, üç fazlı üç bacaklı yıldız-yıldız bağlı nötrü topraklı çekirdek biçimi nüveye sahip transformatöre (Tip 1 üç fazlı transformatöre), dengeli DC uyarımın etkileri analiz edilmiştir. Analizler, 3 MVA, 11/0.38 kV ve 50 Hz anma değerlerine sahip bir transformatör için gerçekleştirilmiştir.

Şekil 3.8 ve Şekil 3.9'dan, fazlara uygulanan DC uyarım geriliminin primer taraf faz-nötrü anma gerilimine oranının ( $V_{DC}/V_{PR}$ ) %0.5 olduğu durumda, faz sargılarına ait manyetik akıların ( $\Phi_a(t)$ ,  $\Phi_b(t)$ ,  $\Phi_c(t)$ ) normalize edilmiş dalga şekilleri ve boşta çalışma akımlarının ( $i_{Pa}(t)$ ,  $i_{Pb}(t)$ ,  $i_{Pc}(t)$ ) pu cinsinden dalga şekilleri görülmektedir. Bu şekillerden uygulanan DC uyarım değeri için manyetik akılara ait normalize edilmiş maksimum değerlerin 1 olduğu, boşta çalışma akımlarının yukarı doğru ötelendiği ancak tepe-tepe arası genliklerinin 0.06 pu civarında olduğu, dolayısıyla Tip 1 üç fazlı transformatörün doyuma girmediği ifade edilebilir.

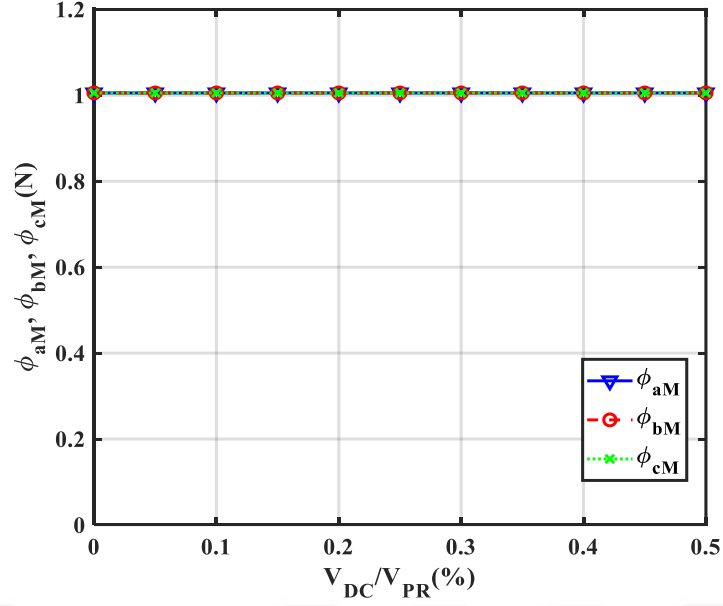


Şekil 3.8:  $V_{DC}/V_{PR}=\%0.5$  olduğu durumda Tip 1 üç fazlı transformatöre ait  $\Phi_a(t)$ ,  $\Phi_b(t)$  ve  $\Phi_c(t)$  manyetik akılarının dalga şekilleri.



Şekil 3.9:  $V_{DC}/V_{PR}=\%0.5$  olduğu durumda Tip 1 üç fazlı transformatöre ait  $i_{Pa}(t)$ ,  $i_{Pb}(t)$  ve  $i_{Pc}(t)$  akımlarının dalga şekilleri.

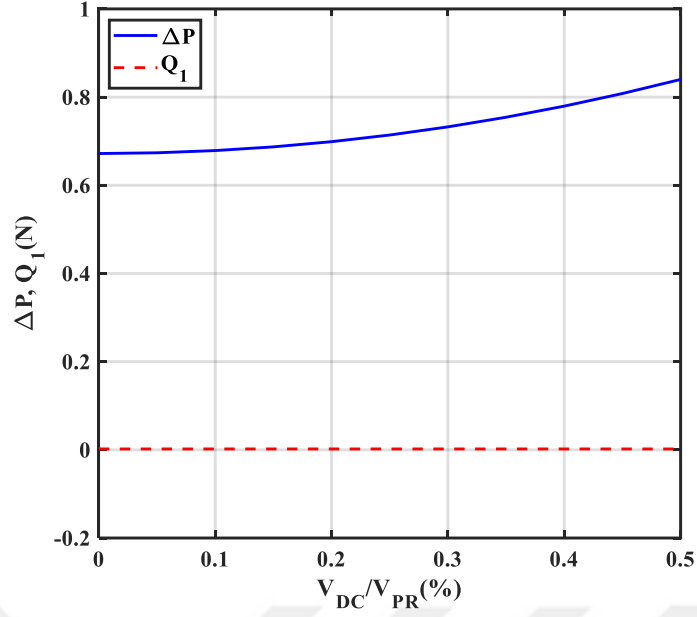
DC uyarım seviyesiyle manyetik akıların normalize edilmiş maksimum değerlerinin ( $\Phi_{aM}$ ,  $\Phi_{bM}$  ve  $\Phi_{cM}$ ) değişim eğrileri Şekil 3.10'da sunulmuştur.



Şekil 3.10: Tip 1 üç fazlı transformatöre ait  $\Phi_{aM}$ ,  $\Phi_{bM}$  ve  $\Phi_{cM}$  değerlerinin  $V_{DC}/V_{PR}$  ile değişim eğrileri.

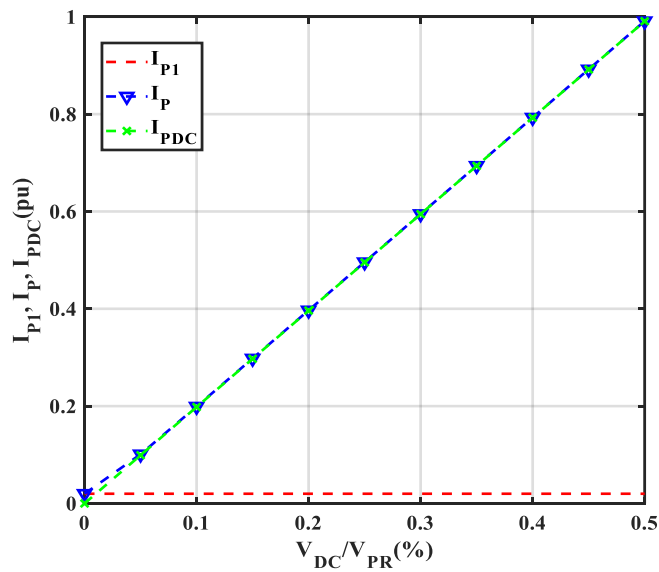
Şekil 3.10'dan görüldüğü üzere tek fazlı transformatörden farklı olarak, Tip 1 üç fazlı transformatörde  $V_{DC}/V_{PR}$  oranının artışı  $\Phi_{aM}$ ,  $\Phi_{bM}$  ve  $\Phi_{cM}$  değerlerine etki etmemiştir bir başka ifadeyle DC uyartım altında Tip 1 üç fazlı transformatör doyuma girmemiştir. Bunun sebebi, bu transformatör tipinin nüvesi ile tankı arasında bulunan boşluğun oluşturduğu relüktansın çok büyük olması yani transformatörün sıfır sıra endüktansının çok küçük olmasıdır.

$\Delta P$  ve  $Q_1$ 'in normalize edilmiş değerleri ise Şekil 3.11'de sunulmuştur. Şekil 3.11'den,  $V_{DC}/V_{PR}$  değerindeki %0 ile %0.5 aralığındaki artışın, Tip 1 üç fazlı transformatörde reaktif güç ( $Q_1$ ) talebinde değişime yol açmadığı, ancak normalize edilmiş toplam kaybı ( $\Delta P$ ) 0.7 değerinden 0.82 değerine yükselttiği görülmektedir. Ayrıca, Tip 1 üç fazlı transformatör ve tek fazlı transformatör karşılaştırıldığında, aynı DC uyartım aralığında Tip 1 üç fazlı transformatörde meydana gelen kayıp artışının daha küçük olduğu açıkça ifade edilebilir.



Şekil 3.11: Tip 1 üç fazlı transformatöre ait  $\Delta P$  ve  $Q_1$  değerlerinin  $V_{DC}/V_{PR}$  ile değişim eğrileri.

Bunlara ek olarak, Şekil 3.12’de Tip 1 üç fazlı transformatör için  $I_{PDC}$ ,  $I_{P1}$  ve  $I_P$  değerlerinin  $V_{DC}/V_{PR}$  ile değişim eğrileri verilmiştir. Bu şekilden görüldüğü üzere, DC uyartımın olmadığı durumda ( $V_{DC}/V_{PR}=\%0.1$ ), bu üç büyüklük ihmal edilebilir değerlerdedir.  $V_{DC}/V_{PR}$  oranının artışıyla  $I_{PDC}$  ve  $I_P$  artış göstermiş ve aynı oranın  $\%0.5$  değeri için 1 pu seviyesine ulaşmışlardır. Ancak, DC uyartımdaki artış Tip 1 üç fazlı transformatörde doyuma yol açmadığı için  $I_{P1}$  değerinde bir değişime yol açmamıştır. Bir başka deyişle, bu tip transformatörler tarafından boşta çekilen primer akımın toplam etkin değerindeki artış DC uyartım akımından kaynaklanmıştır.



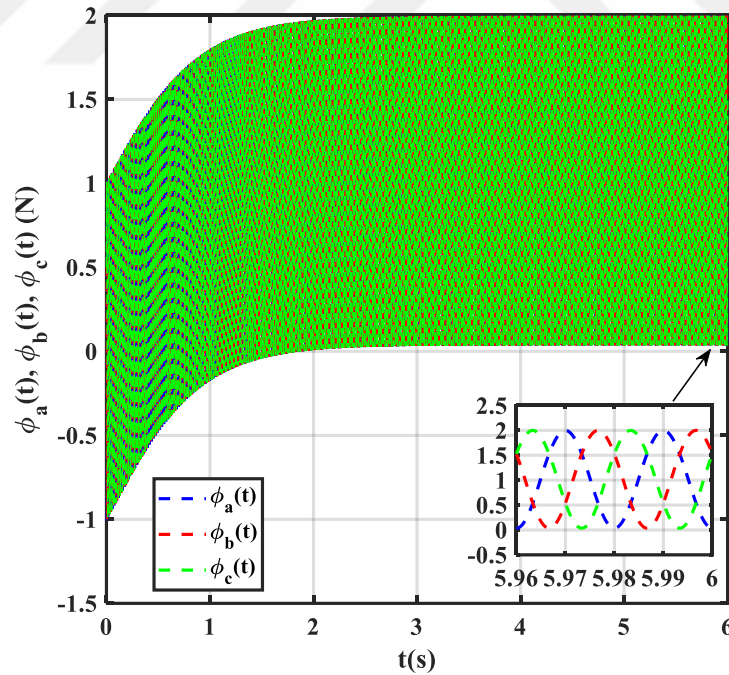
Şekil 3.12: Tip 1 üç fazlı transformatör için  $I_{PDC}$ ,  $I_{P1}$  ve  $I_P$  değerlerinin  $V_{DC}/V_{PR}$  ile değişim eğrileri.

Burada son olarak, Tip 1 transformatör için primer faz akımları ve sekonder faz gerilimlerinin toplam harmonik bozulma değerlerinin ihmal edilebilir seviyelerde olduğu, dolayısıyla bu indislerin şekillerinin ayrıca verilmediği ifade edilmelidir.

### 3.3 Tip 2 Üç Fazlı Transformatöre Etkileri

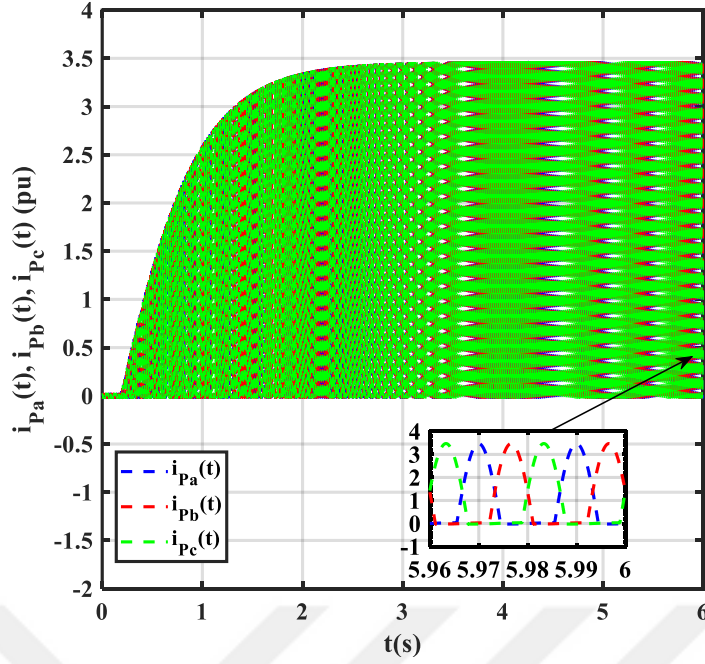
Burada, üç fazlı beş bacaklı yıldız-yıldız bağlı nötürü topraklı çekirdek biçimi nüveye sahip transformatöre (Tip 2 üç fazlı transformatöre), DC uyarımın etkileri analiz edilmiştir. Analizler, 3 MVA, 11/0.38 kV ve 50 Hz anma değerlerine sahip bir transformatör için gerçekleştirilmiştir.

Şekil 3.13 ve Şekil 3.14'den, fazlara uygulanan DC uyarım geriliminin primer taraf faz-nötür anma gerilimine oranının ( $V_{DC}/V_{PR}$ ) %0.5 olduğu durumda, faz sargılarına ait manyetik akıların ( $\Phi_a(t)$ ,  $\Phi_b(t)$ ,  $\Phi_c(t)$ ) normalize edilmiş dalga şekilleri ve boştta çalışma akımlarının ( $i_{Pa}(t)$ ,  $i_{Pb}(t)$ ,  $i_{Pc}(t)$ ) pu cinsinden dalga şekilleri görülmektedir.



Şekil 3.13:  $V_{DC}/V_{PR}=\%0.5$  olduğu durumda Tip 2 üç fazlı transformatöre ait  $\Phi_a(t)$ ,  $\Phi_b(t)$  ve  $\Phi_c(t)$  manyetik akılarının dalga şekilleri.

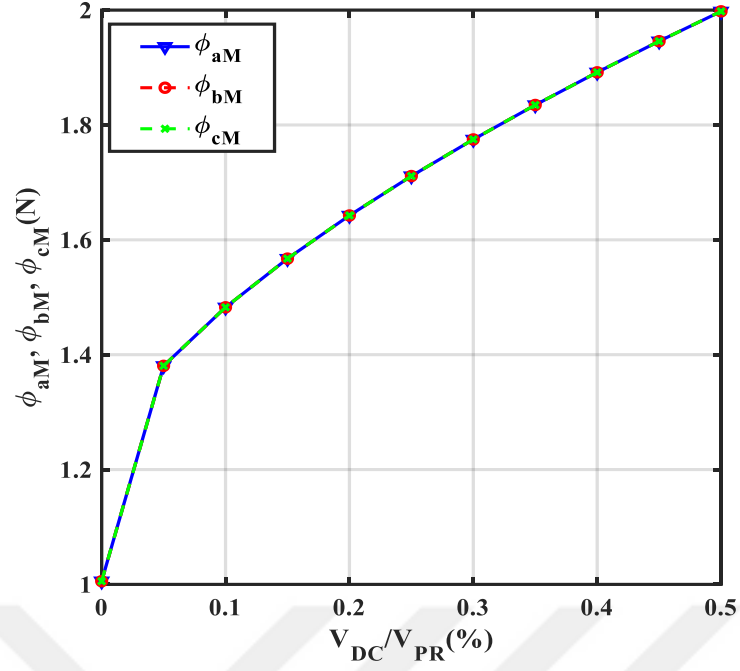




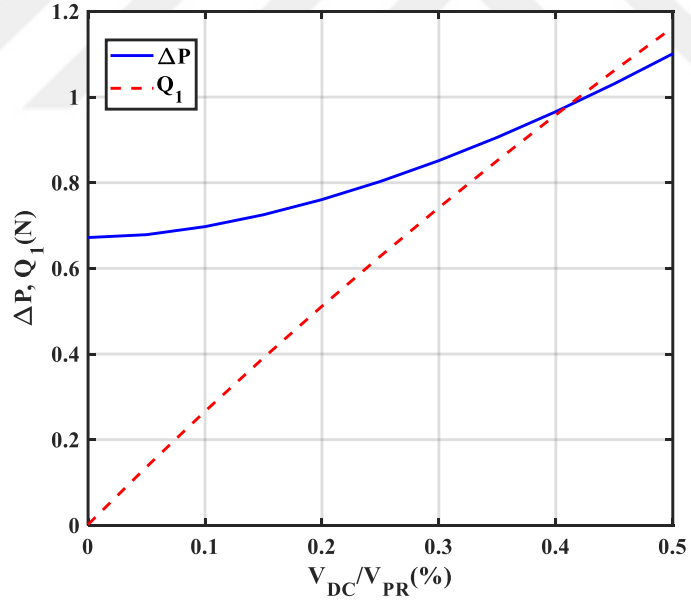
**Şekil 3.14:**  $V_{DC}/V_{PR}=0.5$  olduğu durumda Tip 2 üç fazlı transformatöre ait  $i_{pa}(t)$ ,  $i_{pb}(t)$  ve  $i_{pc}(t)$  akımlarının dalga şekilleri.

Bu grafiklerden, uygulanan DC uyartım değeri için manyetik akıların ve akımların pozitif alternans tarafına ötelendiği, manyetik akılara ait normalize edilmiş maksimum değerlerin 2 olduğu, boşta çalışma akımlarının tepe değerinin 3.5 pu civarında olduğu, dolayısıyla Tip 2 üç fazlı transformatörün doyuma girdiği ve yüksüz iken aşırı akım çektiği ifade edilebilir.

Şekil 3.15'den normalize edilmiş maksimum akı değerlerinin ( $\Phi_{aM}$ ,  $\Phi_{bM}$  ve  $\Phi_{cM}$ ) birbirine eşit olduğu ve DC uyartım etkisiyle arttığı görülmektedir. Tip 2 üç fazlı transformatörde,  $V_{DC}/V_{PR}$  oranının 0.1, 0.3 ve 0.5 değerleri için manyetik akıların normalize edilmiş maksimum değerleri sırasıyla 1.49, 1.78 ve 2 değerlerindedir. Yine,  $V_{DC}/V_{PR}$  oranındaki artış ile  $\Delta P$  ve  $Q_1$ 'in normalize değerlerinin önemli derecede arttığı Şekil 3.16'dan ifade edilebilir.  $V_{DC}/V_{PR}$  oranının 0.1 olduğu durumda,  $\Delta P$  ve  $Q_1$ 'in normalize edilmiş değerleri sırasıyla 0.7 ve 0.22 iken,  $V_{DC}/V_{PR}$  oranının 0.5 olduğu durumda ise, her iki güç büyüklüğünün 1 değerinin üzerine çıktığı görülmektedir.



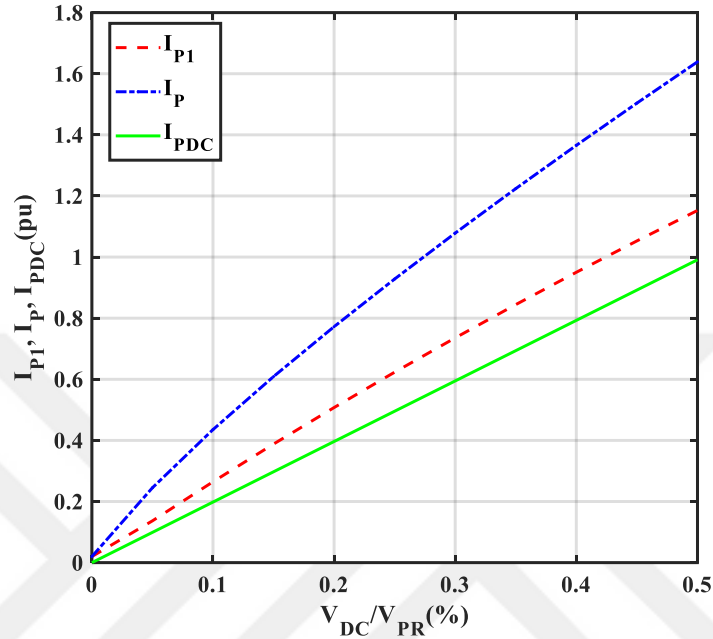
Şekil 3.15: Tip 2 üç fazlı transformatöre ait  $\Phi_{aM}$ ,  $\Phi_{bM}$  ve  $\Phi_{cM}$  değerlerinin  $V_{DC}/V_{PR}$  ile değişim eğrileri.



Şekil 3.16: Tip 2 üç fazlı transformatöre ait  $\Delta P$  ve  $Q_1$  değerlerinin  $V_{DC}/V_{PR}$  ile değişim eğrileri.

Şekil 3.17'de,  $V_{DC}/V_{PR}(\%)$  oranındaki değişime bağlı olarak transformatörün boшта çalışma durumunda çekmiş olduğu  $I_{PDC}$ ,  $I_P$  ve  $I_{P1}$  değerlerine ait eğriler verilmiştir. Bu şekilden görüldüğü üzere;  $V_{DC}/V_{PR}$  oranının %0 olduğu bir başka deyişle DC uyartım olmadığı durumda,  $I_{PDC}$ ,  $I_{P1}$  ve  $I_P$  ihmal edilebilir değerlerde olup

aynı indisin %0.5 olduğu durumda bu akım büyüklükleri sırasıyla 0.5, 1.28 ve 1.63 pu değerlerindedir.  $I_{PDC}$ ,  $I_P$  ve  $I_{P1}$  eğrileri,  $V_{DC}/V_{PR}$  oranının %0 ile %0.5 aralığında değişimiyle doğrusal olarak artış eğilimi göstermiştir. Bununla birlikte,  $I_{P1}$  değerindeki artışın sebebi; transformatör nüvesinin DC uyartım altında doyuma girmesidir.



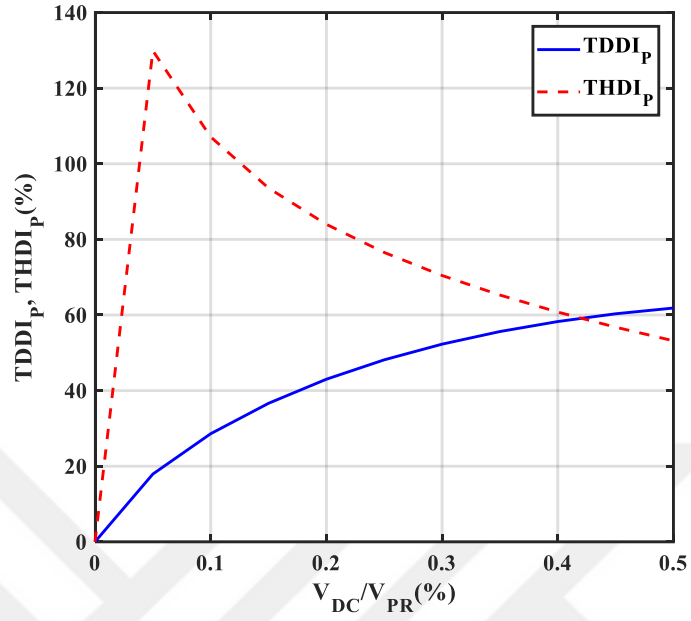
Şekil 3.17: Tip 2 üç fazlı transformatör için  $I_{PDC}$ ,  $I_{P1}$  ve  $I_P$  değerlerinin  $V_{DC}/V_{PR}$  ile değişim eğrileri.

Tip 2 üç fazlı transformatörün dengeli DC uyartım artışı ile boşa çalışma akımında meydana gelen toplam talep bozulma değerinin ( $TDDI_P$ ) ve toplam harmonik bozulma değerinin ( $THDI_P$ ) değişimleri Şekil 3.18'de, yine dengeli DC uyartım artışı ile sekonder tarafa ait temel frekans gerilim sapma değerinin ( $VD$ ) ve toplam harmonik bozulma değerinin ( $THDV_S$ ) değişimleri ise Şekil 3.19'da verilmiştir.

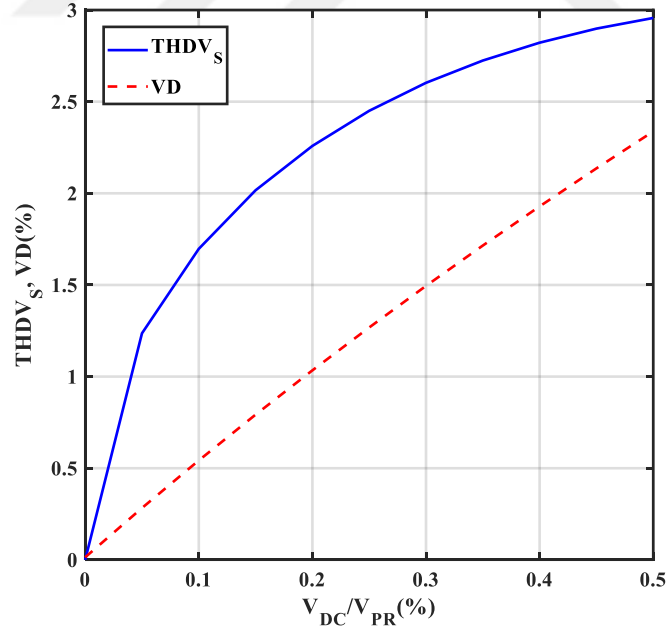
Şekil 3.18'den  $THDI_P$  indisinin  $V_{DC}/V_{PR}$ 'nin %0 ile %0.05 aralığında %0'dan %130'a yükseldiği, ancak bu uyartım seviyesinden sonra eksponansiyel olarak azalarak  $V_{DC}/V_{PR} = %0.5$  için yaklaşık %50 değerine düştüğü görülmektedir. Aynı şekilde,  $V_{DC}/V_{PR}$ 'nin %0 ile %0.5 aralığı için  $TDDI_P$  indisinin %0'dan %60'a kadar doğrusal olmayan biçimde artış gösterdiği ifade edilebilir. Ayrıca,  $THDI_P$  ve  $TDDI_P$  indisleri,  $V_{DC}/V_{PR} = %0.42$  uyartım seviyesinde aynı değeri almışlardır.

Şekil 3.19,  $V_{DC}/V_{PR}$  oranının %0 ile %0.5 arasında artışı sonucu  $THDV_S$  indisinin doğrusal olmayan bir değişimle %0'dan %3'e kadar arttığını, aynı  $V_{DC}/V_{PR}$

değişim aralığında VD indisinin doğrusal olarak %0'dan %2.4'e arttığını göstermektedir.



Şekil 3.18: Tip 2 üç fazlı transformatör için TDDI<sub>P</sub> ve THDI<sub>P</sub> indislerinin  $V_{DC}/V_{PR}$  ile değişim eğrileri.



Şekil 3.19: Tip 2 üç fazlı transformatör için THDV<sub>S</sub> ve VD indislerinin  $V_{DC}/V_{PR}$  ile değişim eğrileri.

### 3.4 Sonuç

Bu bölümde elde edilen analiz çıktıları aşağıdaki gibi özetlenebilir: DC uyartım seviyesinin artışı ile;

- Tek faz ve Tip 2 transformatörlerinin nüvelerinde dolaşan manyetik akı değerleri artarken, bir başka ifadeyle DC uyartım etkisi ile bu iki transformatör nüvesi doyuma ulaşırken, Tip 1 transformatörünün nüvesinde dolaşan manyetik akı değeri değişiklik göstermemiş ve doyuma ulaşmamıştır.
- Toplam kayıp ( $\Delta P$ ) her üç transformatör tipi içinde artış gösterirken, Tip 1 transformatörünün  $\Delta P$  değerindeki artış diğer iki transformatöre göre daha azdır. Buna ek olarak, tek fazlı ve Tip 2 transformatörlerinin reaktif güç talepleri ( $Q_1$ ) artmış fakat Tip 1 transformatörünün  $Q_1$  değeri değişmemiştir.
- Her üç transformatör tipi içinde primer faz akımı toplam etkin değeri ( $I_p$ ) artış gösterirken, primer faz akımının temel frekans etkin değeri ( $I_{p1}$ ) tek fazlı ve Tip 2 transformatör için artmış, Tip 1 transformatörü için ise değişmemiştir. Tip 1 transformatörünün  $I_p$  değerindeki artışın temel sebebinin çekirdekteki doyma olmadığı, verilen DC uyartıma bağlı sargılardan akan DC akım ( $I_{pDC}$ ) olduğu görülmüştür.
- DC uyartımın, tek faz ve Tip 2 transformatörlerinin primer akımlarının harmonik bozulma indisleri ( $TDDI_p$  ve  $THDI_p$ ), temel frekans geriliminin sapma değeri ( $VD$ ) ve sekonder taraf geriliminin toplam harmonik bozulma indisi ( $THDV_s$ ) üzerinde önemli derecede olumsuz etkisi olmuştur. DC uyartım seviyesindeki artış sonucu, iki transformatör tipi için  $THDI_p$  önce artmış daha sonra azalmış,  $TDDI_p$ ,  $VR$  ve  $THDV_s$  indisleri ise sürekli bir artış göstermiştir. Ancak Tip 1 transformatör için böyle bir durum söz konusu olmamıştır.

Bütün bunlar doğrultusunda, Tip 1 transformatörünün DC uyartıma karşı hassasiyetinin diğer iki transformatör tipinden daha az olduğu sonucuna varılmıştır.

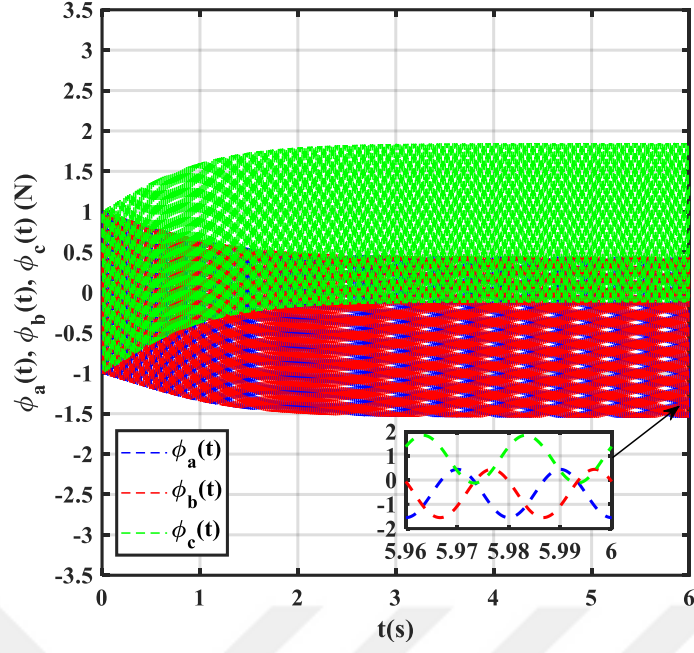
## 4. DENGESİZ DC UYARTIMIN TRANSFORMATÖRLERE ETKİLERİ

Bu bölümde, farklı nüve tipi ve sargı bağlantı şekillerine sahip üç fazlı transformatörlere dengesiz DC uyartımın etkileri incelenmiştir. Analizler transformatörlerin yüksüz (boşta) olduğu durum için gerçekleştirilmiştir. Analizlerde, c fazına  $V_{DC}/V_{PR}=\%0.5$  oranında sabit DC uyartım uygulanmış, ancak a ve b fazlarına uygulanan DC uyartım büyüklüğü ( $V_{DC}/V_{PR}$ ) %0 ile %0.5 arasında değiştirilmiştir. DC uyartımın dengesizlik miktarı Denklem (2.16)'da tanımlanan  $V_{DCA}/V_{DCM}$  oranıyla ölçülmüştür.

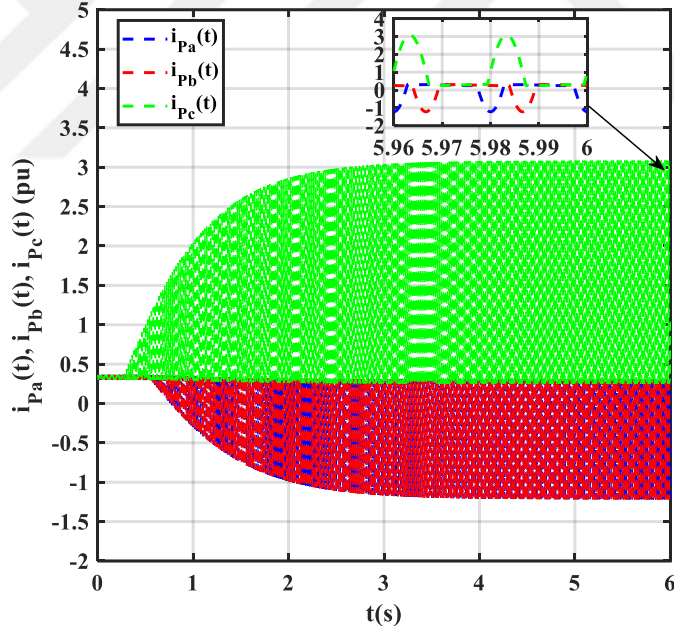
### 4.1 Tip 1 Üç fazlı Transformatöre Etkileri

Burada, üç fazlı üç bacaklı yıldız-yıldız bağlı nötürü topraklı çekirdek biçimi nüveye sahip transformatöre dengesiz DC uyartımın etkileri analiz edilmiştir. Analizler, 3 MVA, 11/0.38 kV ve 50 Hz anma değerlerine sahip bir transformatör için gerçekleştirilmiştir.

Şekil 4.1 ve Şekil 4.2'de, a ve b fazlarına DC uyartım uygulanmadığı, c fazına  $V_{DC}/V_{PR}=\%0.5$  oranında DC uyartım uygulandığı, bir başka deyişle  $V_{DCA}/V_{DCM}$  oranının 1/3 olduğu durum için nüvede dolanan manyetik akıların ( $\Phi_a(t)$ ,  $\Phi_b(t)$ ,  $\Phi_c(t)$ ) dalga şekilleri ve boşta çalışma akımlarının ( $i_{Pa}(t)$ ,  $i_{Pb}(t)$ ,  $i_{Pc}(t)$ ) dalga şekilleri sunulmuştur. Şekil 4.1'den, DC uyartım uygulanmayan a ve b fazlarına ait manyetik akıların ( $\Phi_a(t)$ ,  $\Phi_b(t)$ ) negatif alternans tarafına ötelenerek normalize edilmiş maksimum değerlerinin -1.7 olduğu, DC uyartım uygulanan c fazına ait manyetik akının ise pozitif alternansa ötelenerek normalize edilmiş maksimum değerinin 2 olduğu görülmektedir. Bu şartlarda, Tip 1 üç fazlı transformatör doyuma girmiş ve böylece boşta çalışma akımlarının tepe değerleri a ve b fazları için -1 pu, c fazı için ise 3 pu değerine ulaşmıştır.



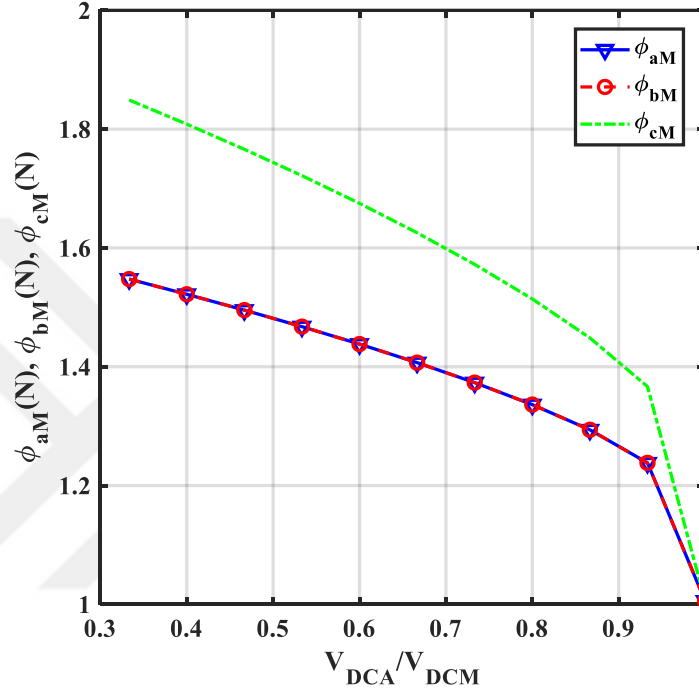
**Şekil 4.1:**  $V_{DCA}/V_{DCM}=1/3$  olduğu durumda Tip 1 üç fazlı transformatöre ait  $\Phi_a(t)$ ,  $\Phi_b(t)$  ve  $\Phi_c(t)$  manyetik akılarının dalga şekilleri.



**Şekil 4.2:**  $V_{DCA}/V_{DCM}=1/3$  olduğu durumda Tip 1 üç fazlı transformatöre ait  $i_{pa}(t)$ ,  $i_{pb}(t)$  ve  $i_{pc}(t)$  akımlarının dalga şekilleri.

Normalize edilmiş maksimum akı değerlerinin ( $\Phi_{aM}$ ,  $\Phi_{bM}$  ve  $\Phi_{cM}$ )  $V_{DCA}/V_{DCM}$  oranıyla değişim eğrileri Şekil 4.3’de verilmiştir. Bu şekilden,  $\Phi_{aM}$  ve  $\Phi_{bM}$  eğrilerinin üst üste çakıştığı,  $\Phi_{cM}$  eğrisinin ise DC uyartım dengesizliği azaldıkça ( $V_{DCA}/V_{DCM}$  oranı 1’e yaklaştıkça) diğer iki eğriye yaklaştığı ifade edilebilir. Bununla birlikte,

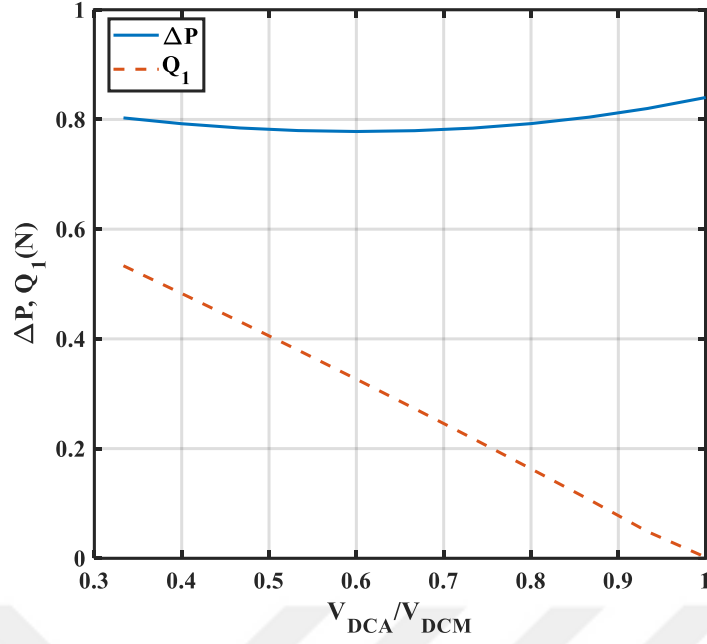
$V_{DCA}/V_{DCM}=0.33$  için  $\Phi_{aM}=\Phi_{bM}=1.57$  ve  $\Phi_{cM}=1.85$ ,  $V_{DCA}/V_{DCM}=0.7$  için  $\Phi_{aM}=\Phi_{bM}=1.39$  ve  $\Phi_{cM}=1.6$ ,  $V_{DCA}/V_{DCM}=1$  (dengeli DC uyartım) için  $\Phi_{aM}=\Phi_{bM}=\Phi_{cM}=1$  değerleri gözlenmiştir. Böylece, Tip 1 transformatörde dengesiz DC uyartım altında indüklenen manyetik akıların tepe değerlerinin, saf sinüzoidal anma gerilimi altında indüklenen manyetik akıların tepe değerine göre önemli derecede arttığı sonucuna varılmıştır.



**Şekil 4.3:** Tip 1 üç fazlı transformatöre ait  $\Phi_{aM}$ ,  $\Phi_{bM}$  ve  $\Phi_{cM}$  değerlerinin  $V_{DCA}/V_{DCM}$  ile değişim eğrileri.

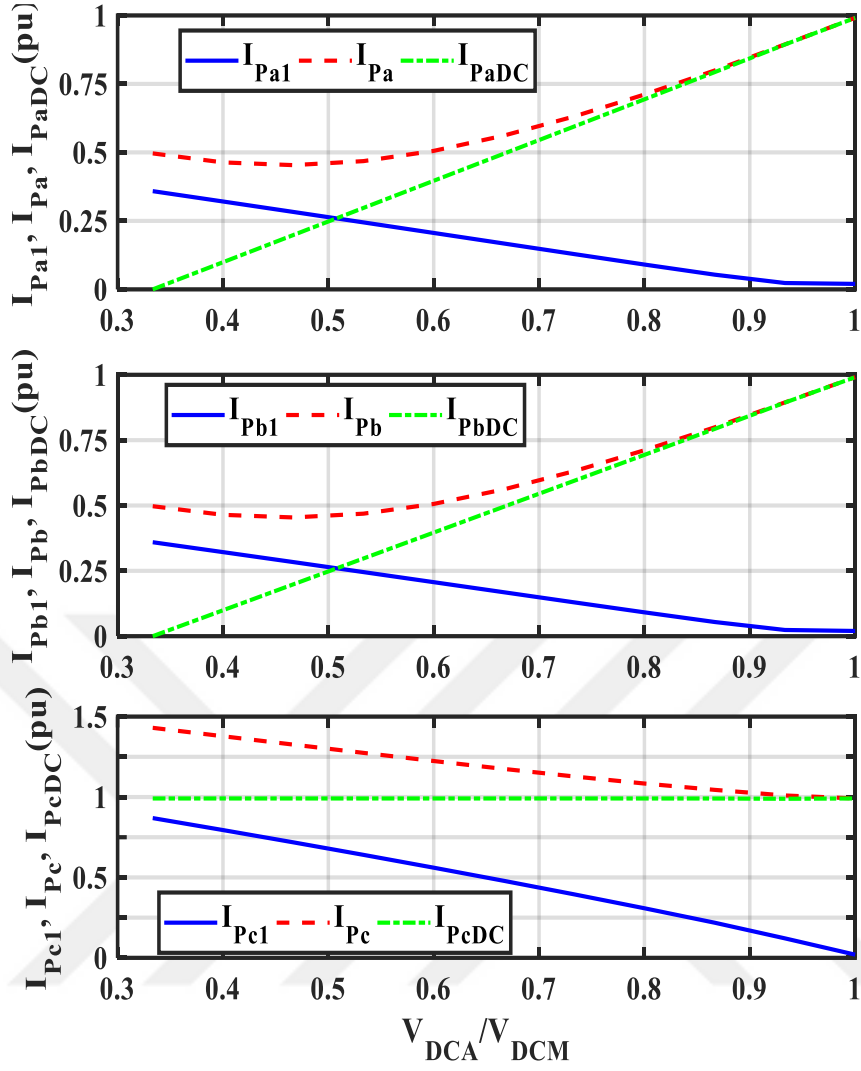
Şekil 4.4'de ise, yüksüz durumdaki Tip 1 üç fazlı transformatör için  $\Delta P$  ve  $Q_1$ 'in  $V_{DCA}/V_{DCM}$  ile değişim eğrileri sunulmuştur. Bu eğrilerden,  $V_{DCA}/V_{DCM}$  oranının 0.33, 0.7 ve 1 değerleri için  $\Delta P$  değerlerinin sırasıyla 0.8, 0.78 ve 0.83 olduğu, ayrıca DC uyartım dengesizliğinden  $\Delta P$ 'nin ihmal edilebilir miktarda etkilendiği görülmektedir.  $Q_1$  eğrisi ise DC uyartımdaki dengesizlik durumu azaldıkça ( $V_{DCA}/V_{DCM}$  değeri arttıkça) düşüş eğilimi göstermiştir.  $V_{DCA}/V_{DCM}$  oranının 0.33, 0.7 ve 1 durumları için  $Q_1$  sırasıyla 0.57, 0.25 ve ihmal edilebilir değerlerde hesaplanmıştır. Bu sonuçlar, DC uyartımın dengesizliğinde meydana gelen artışa bağlı olarak, Tip 1 üç fazlı transformatörün reaktif güç talebinin arttığını işaret etmektedir.





Şekil 4.4: Tip 1 üç fazlı transformatöre ait  $\Delta P$  ve  $Q_1$  değerlerinin  $V_{DCA}/V_{DCM}$  ile değişim eğrileri.

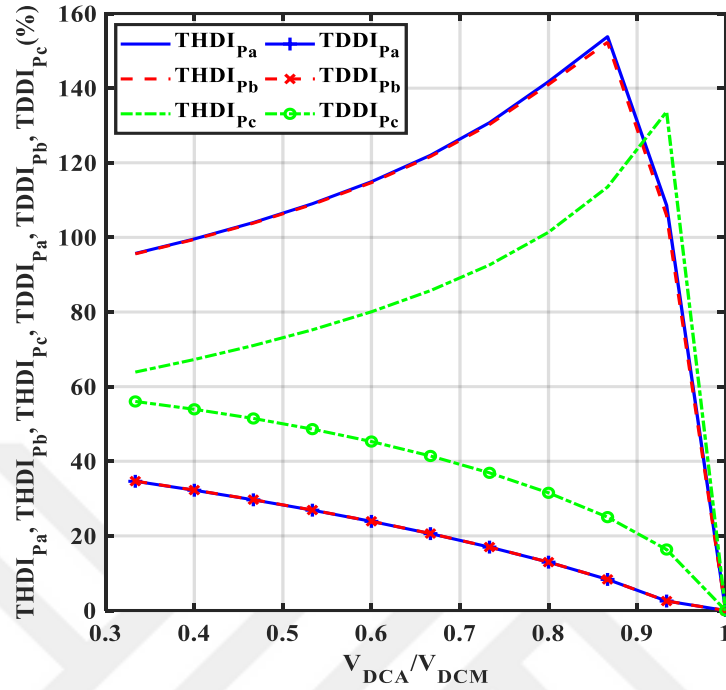
Tip 1 üç fazlı transformatörün dengesiz DC uyartım altında, boşta çalışma durumunda primer akımlarının DC bileşen ( $I_{PaDC}$ ,  $I_{PbDC}$ ,  $I_{PcDC}$ ), temel frekans ( $I_{Pa1}$ ,  $I_{Pb1}$ ,  $I_{Pc1}$ ) ve toplam etkin ( $I_{Pa}$ ,  $I_{Pb}$ ,  $I_{Pc}$ ) değerlerinin,  $V_{DCA}/V_{DCM}$  oranı artışı ile değişimi Şekil 4.5’de sunulmuştur. Bu şekilden görüldüğü üzere, primer faz akımlarının DC bileşen ( $I_{PaDC}$ ,  $I_{PbDC}$ ,  $I_{PcDC}$ ), temel frekans ( $I_{Pa1}$ ,  $I_{Pb1}$ ,  $I_{Pc1}$ ) ve toplam etkin ( $I_{Pa}$ ,  $I_{Pb}$ ,  $I_{Pc}$ ) değerlerinin değişim eğrileri; DC uyartımın aynı oranda artırıldığı a ve b fazları için aynı eğilimleri gösterirken, DC uyartımın sabit olduğu c fazı için farklı eğilimdedir.  $V_{DCA}/V_{DCM}$  oranının başlangıç değeri olan 0.33 için  $I_{PaDC}=I_{PbDC}$  0 pu,  $I_{PcDC}$  1 pu,  $I_{Pa1}=I_{Pb1}$  0.35 pu,  $I_{Pc1}$  0.8 pu,  $I_{Pa}=I_{Pb}$  0.5 pu ve  $I_{Pc}$  1.45 pu değerindedir.  $V_{DCA}/V_{DCM}$  oranının son değeri olan 1 için  $I_{PaDC}=I_{PbDC}=I_{PcDC}$  1 pu,  $I_{Pa1}=I_{Pb1}=I_{Pc1}$  yaklaşık 0 pu,  $I_{Pa}=I_{Pb}=I_{Pc}$  1 pu’dur. Bu sonuçlar, Tip 1 üç fazlı transformatörün DC uyartımın dengesiz olduğu durumda doyuma girdiğini, ayrıca DC uyartımın dengesizliğindeki artışa bağlı olarak primer akımın temel frekans etkin değerinin arttığını göstermektedir.



Şekil 4.5: Tip 1 üç fazlı transformatör için boşa çalışma akımlarının DC bileşen, temel frekans ve toplam etkin değerlerin  $V_{DCA}/V_{DCM}$  ile değişim eğrileri.

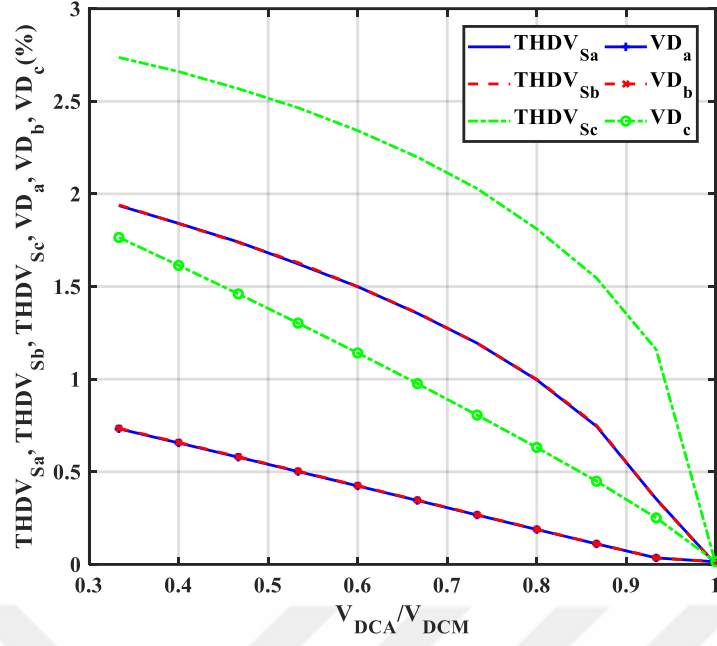
Şekil 4.6'da,  $V_{DCA}/V_{DCM}$  artışı ile primer akımlarında meydana gelen toplam talep bozulma ( $TDDI_{Pa}$ ,  $TDDI_{Pb}$ ,  $TDDI_{Pc}$ ) ve toplam harmonik bozulma değerleri ( $THDI_{Pa}$ ,  $THDI_{Pb}$ ,  $THDI_{Pc}$ ) verilmiştir. Bu şekilden görüldüğü üzere,  $V_{DCA}/V_{DCM}=0.33$  olduğu durumda,  $TDDI_{Pa}=TDDI_{Pb}=\%37$ ,  $TDDI_{Pc}=\%57$ ,  $THDI_{Pa}=THDI_{Pb}=\%95$ ,  $THDI_{Pc}=\%62$  seviyelerindedir.  $V_{DCA}/V_{DCM}=0.85$  durumunda,  $THDI_{Pa}$  ve  $THDI_{Pb}$  indisleri maksimum değerleri olan  $\%152$  seviyesine çıkmıştır.  $THDI_{Pc}$  indisi ise;  $V_{DCA}/V_{DCM}=0.94$  durumunda maksimum değeri olan  $\%135$  seviyesine ulaşmıştır. Bu  $V_{DCA}/V_{DCM}$  oranlarından sonra  $THDI_{Pa}$ ,  $THDI_{Pb}$  ve  $THDI_{Pc}$  değerleri azalmış, nihayetinde dengeli DC uyartım durumu için ihmal edilebilir değerlere düşmüştür.  $TDDI_{Pa}$ ,  $TDDI_{Pb}$  ve  $TDDI_{Pc}$  eğrileri ise  $V_{DCA}/V_{DCM}$  oranının artışı ile süreklilik arz

eden bir azalma eğilimi göstermiş ve dengeli DC uyarım durumunda ihmal edilebilir değerlere düşmüştür.



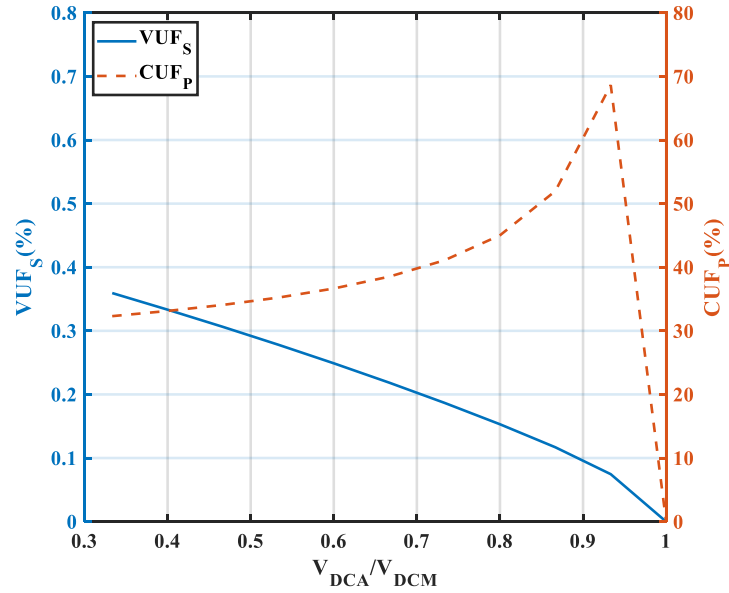
**Şekil 4.6:** Tip 1 üç fazlı transformatör için boştaki çalışma akımlarının toplam talep bozulma ve toplam harmonik bozulma değerlerinin  $V_{DCA}/V_{DCM}$  ile değişim eğrileri.

Şekil 4.7’de ise Tip 1 üç fazlı transformatör için dengesiz DC uyarım altında sekonder tarafa ait faz gerilimlerinin toplam harmonik bozulma (THDV<sub>Sa</sub>, THDV<sub>Sb</sub>, THDV<sub>Sc</sub>) ve temel frekans gerilim sapma değerlerinin ( $VD_a$ ,  $VD_b$ ,  $VD_c$ ),  $V_{DCA}/V_{DCM}$  oranı ile değişim eğrileri sunulmuştur. Bu şekilden,  $V_{DCA}/V_{DCM}$  uyarım seviyesi artırıldıkça bir başka ifadeyle, DC uyarım dengesizliği azaldıkça; gerilim toplam harmonik bozulma ve temel frekans gerilim sapma değerlerinin azaldığı gözlenmektedir. DC uyarım dengesizliğinin en yüksek olduğu durumda ( $V_{DCA}/V_{DCM}=0.33$  olduğu durumda),  $THDV_{Sa}=THDV_{Sb}=\%1.9$  ve  $THDV_{Sc}=\%2.75$ ,  $VD_a=\%0.75$ ,  $VD_b=\%0.75$ ,  $VD_c=\%1.6$  olup dengeli DC uyarım durumunda ( $V_{DCA}/V_{DCM}=1$  olduğu durumda) ölçülen bu indisler ihmal edilebilir değerdedir.



Şekil 4.7: Tip 1 üç fazlı transformatör için sekonder taraf faz gerilimlerinin toplam harmonik bozulma ve temel frekans gerilim sapma değerlerinin  $V_{DCA}/V_{DCM}$  ile değişim eğrileri.

Tip 1 üç fazlı transformatör için sekonder tarafa ait temel frekans gerilim dengesizlik faktörünün ( $VUF_S$ ) ve primer taraf temel frekans akımı dengesizlik faktörünün ( $CUF_P$ ),  $V_{DCA}/V_{DCM}$  oranı ile değişim eğrileri Şekil 4.8’de verilmiştir.



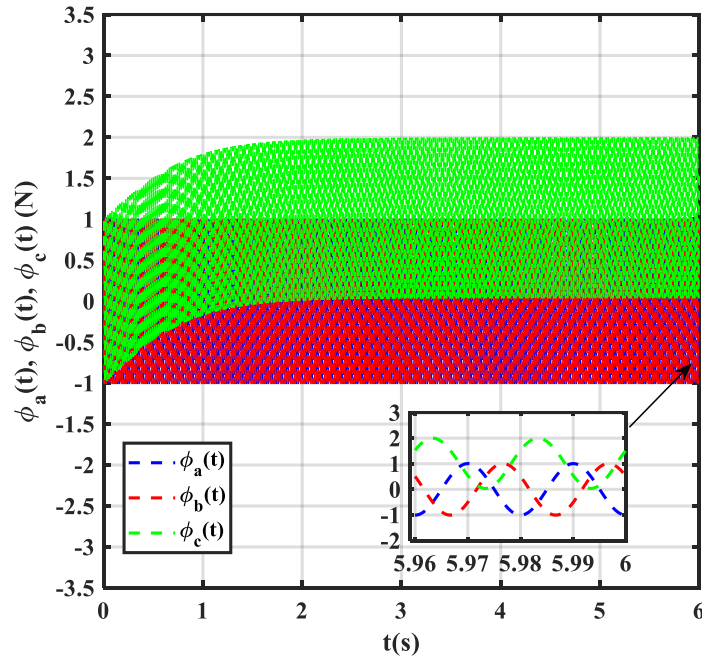
Şekil 4.8: Tip 1 üç fazlı transformatör için  $VUF_S$  ve  $CUF_P$  indislerinin  $V_{DCA}/V_{DCM}$  ile değişim eğrileri.

Bu şekile göre,  $V_{DCA}/V_{DCM}$  oranının 0.33 ve 1 değerleri için  $VUF_S$  sırasıyla %0.38 ve %0 değerlerinde olup DC uyartım dengesizliği azaldıkça  $VUF_S$  değerinin azaldığı ifade edilebilir. Öte yandan,  $V_{DCA}/V_{DCM}$  oranının 0.33 ile 0.94 aralığında artışıyla,  $CUF_P$  indisi %32'den %69'a yükselmiştir. Ancak, aynı indis  $V_{DCA}/V_{DCM}$  oranının 0.94'den 1'e artışı sonucunda dik bir eğimle ihmal edilebilir seviyeye düşmüştür.

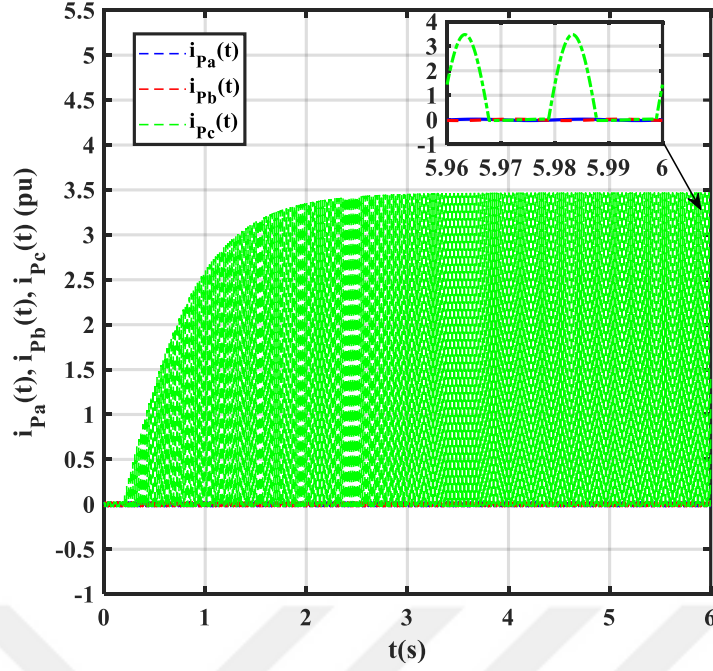
## 4.2 Tip 2 Üç Fazlı Transformatöre Etkileri

Burada, üç fazlı beş bacaklı yıldız-yıldız bağlı nötürü topraklı shell biçimi nüveye sahip transformatöre (Tip 2), dengesiz DC uyartımın etkileri analiz edilmiştir. Analizler, 3 MVA, 11/0.38 kV ve 50 Hz anma değerlerine sahip bir transformatör için gerçekleştirilmiştir.

Şekil 4.9 ve Şekil 4.10'da, a ve b fazlarına DC uyartım uygulanmadığı, c fazına  $V_{DC}/V_{PR}=\%0.5$  oranında DC uyartım uygulandığı ( $V_{DCA}/V_{DCM}$  oranının 1/3 olduğu) durum için nüvede dolanan manyetik akıların ( $\Phi_a(t)$ ,  $\Phi_b(t)$ ,  $\Phi_c(t)$ ) dalga şekilleri ve boşta çalışma akımlarının ( $i_{Pa}(t)$ ,  $i_{Pb}(t)$ ,  $i_{Pc}(t)$ ) dalga şekilleri sunulmuştur.



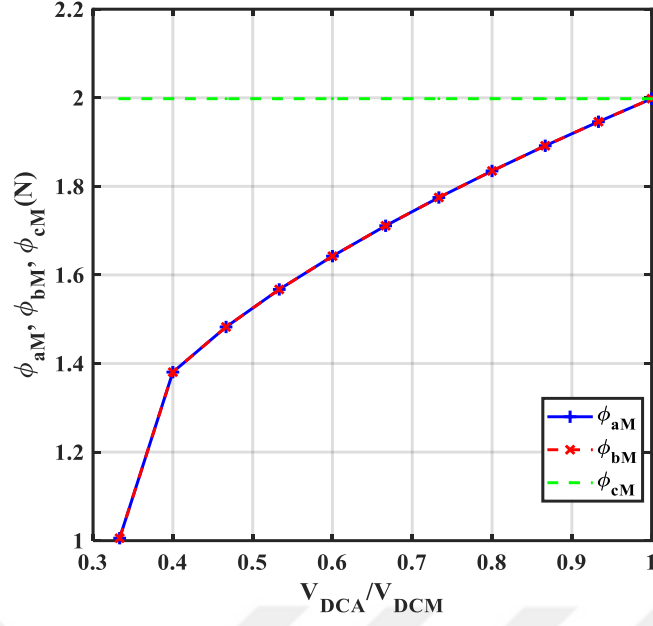
Şekil 4.9:  $V_{DCA}/V_{DCM}=1/3$  olduğu durumda Tip 2 üç fazlı transformatöre ait  $\Phi_a(t)$ ,  $\Phi_b(t)$  ve  $\Phi_c(t)$  manyetik akılarının dalga şekilleri.



**Şekil 4.10:**  $V_{DCA}/V_{DCM}=1/3$  olduğu durumda Tip 2 üç fazlı transformatöre ait  $i_{Pa}(t)$ ,  $i_{Pb}(t)$  ve  $i_{Pc}(t)$  akımlarının dalga şekilleri.

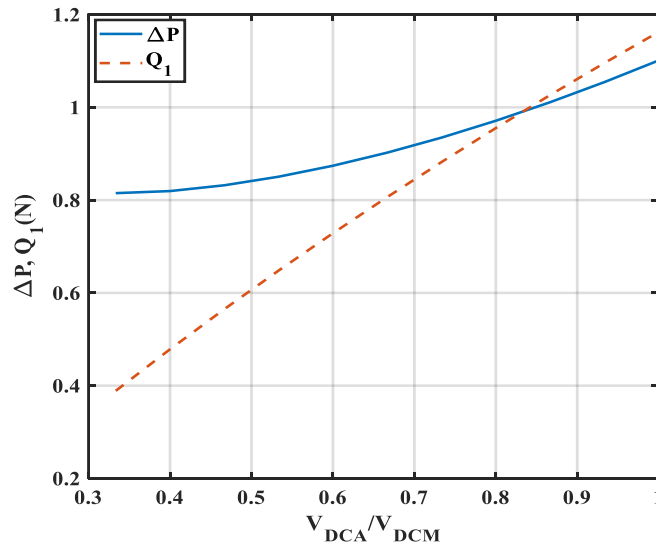
Şekil 4.9'dan DC uyarım uygulanmayan a ve b fazlarına ait manyetik akıların ( $\Phi_a(t)$ ,  $\Phi_b(t)$ ) normalize edilmiş maksimum değerlerinin 1 olduğu, DC uyarım uygulanan c fazına ait manyetik akının ( $\Phi_c(t)$ ) ise pozitif alternans tarafına ötelenerek normalize edilmiş maksimum değerinin 2 değerine ulaştığı görülmektedir. Şekil 4.10 ise boşta çalışma akımlarının maksimum değerlerinin c fazı için 3.5 p.u. olduğu, a ve b fazları için ise ihmal edilebilir bir değerde olduğunu göstermektedir.

Tip 2 üç fazlı transformatöre ait normalize edilmiş maksimum akı değerlerinin ( $\Phi_{aM}$ ,  $\Phi_{bM}$  ve  $\Phi_{cM}$ )  $V_{DCA}/V_{DCM}$  oranıyla değişim eğrileri Şekil 4.11'de verilmiştir. Bu şekilden,  $\Phi_{aM}$  ve  $\Phi_{bM}$  eğrilerinin üst üste çakıştığı, bu iki eğrinin DC uyarım dengesizliği azaldıkça ( $V_{DCA}/V_{DCM}$  oranı 1'e yaklaştıkça) doğrusal olmayan biçimde artış gösterdiği ifade edilebilir. Diğer taraftan, tüm  $V_{DCA}/V_{DCM}$  değer aralıkları için  $\Phi_{cM}$  2 değerinde hesaplanmıştır. Bununla birlikte,  $V_{DCA}/V_{DCM}$  oranının 0.33, 0.7 ve 1 olduğu uyarım durumları için  $\Phi_{aM}$  ve  $\Phi_{bM}$  sırasıyla 1, 1.75 ve 2 değerlerinde gözlemlenmiştir.



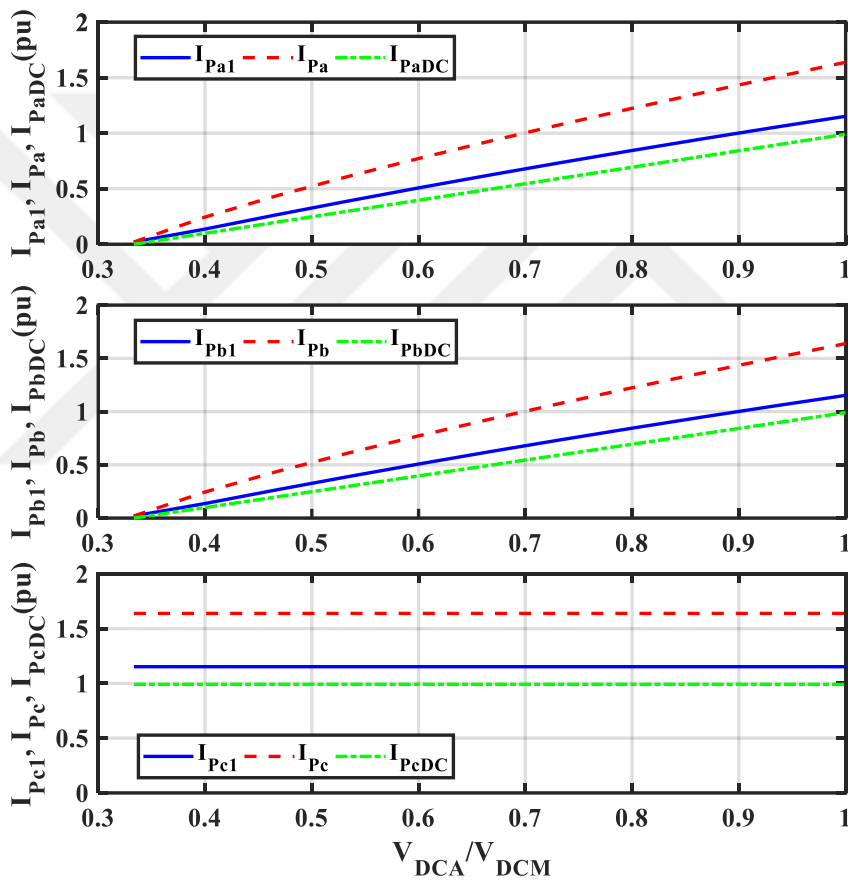
Şekil 4.11: Tip 2 üç fazlı transformatöre ait  $\Phi_{aM}$ ,  $\Phi_{bM}$  ve  $\Phi_{cM}$  değerlerinin  $V_{DCA}/V_{DCM}$  ile değişim eğrileri.

Şekil 4.12'de sunulan Tip 2 üç fazlı transformatöre ait  $\Delta P$  ve  $Q_1$  eğrileri incelendiğinde, her iki güç değerinin DC uyartımın dengesizlik oranının değişiminden önemli ölçüde etkilendiği sonucuna varılmaktadır. Ayrıca,  $V_{DCA}/V_{DCM}$  oranı arttırıldıkça yani DC uyartım dengesizliği azaldıkça  $\Delta P$  ve  $Q_1$  değerlerinin arttığı, ancak  $Q_1$ 'deki artışın  $\Delta P$ 'deki artışa göre daha fazla olduğu belirtilmelidir.  $V_{DCA}/V_{DCM}$  oranının başlangıç değeri olan 0.33 için  $\Delta P$  ve  $Q_1$  değerleri sırasıyla 0.81 ve 0.38 olup,  $V_{DCA}/V_{DCM}$  oranının 1 olduğu durumda  $\Delta P$  ve  $Q_1$  değerleri ise 1.08 ve 1.18'dir.



Şekil 4.12: Tip 2 üç fazlı transformatöre ait  $\Delta P$  ve  $Q_1$  değerlerinin  $V_{DCA}/V_{DCM}$  ile değişim eğrileri.

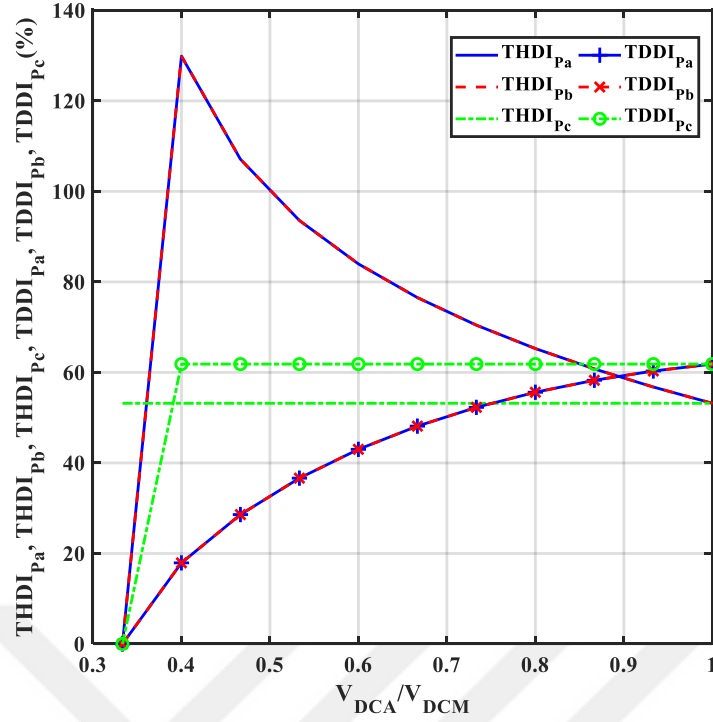
Tip 2 üç fazlı transformatörün dengesiz DC uyarım altında, boşa çalışma durumunda primer faz akımlarının DC bileşen ( $I_{PaDC}$ ,  $I_{PbDC}$ ,  $I_{PcDC}$ ), temel frekans ( $I_{Pa1}$ ,  $I_{Pb1}$ ,  $I_{Pc1}$ ) ve toplam etkin ( $I_{Pa}$ ,  $I_{Pb}$ ,  $I_{Pc}$ ) değerlerinin,  $V_{DCA}/V_{DCM}$  oranı artışı ile değişimi Şekil 4.13’de sunulmuştur. Bu şekil;  $I_{PcDC}$ ,  $I_{Pc1}$  ile  $I_{Pc}$  değerlerinin,  $V_{DCA}/V_{DCM}$  artışından etkilenmediğini ve bütün uyarım koşullarında sırasıyla 1, 1.2 ve 1.7 pu olduğunu göstermektedir.  $I_{PaDC}=I_{PbDC}$ ,  $I_{Pa1}=I_{Pb1}$  ve  $I_{Pa}=I_{Pb}$  değerleri ise;  $V_{DCA}/V_{DCM}=0.33$  için ihmal edilebilir değerlerde,  $V_{DCA}/V_{DCM}=0.7$  için 0.5, 0.55 ve 1 pu,  $V_{DCA}/V_{DCM}=1$  için 1, 1.2 ve 1.7 pu’dur.



Şekil 4.13: Tip 2 üç fazlı transformatöre ait boşa çalışma akımlarının DC bileşen, temel frekans ve toplam etkin değerlerinin  $V_{DCA}/V_{DCM}$  ile değişim eğrileri.

$V_{DCA}/V_{DCM}$  oranındaki artış ile primer faz akımlarının toplam talep bozulması ( $TDDI_{Pa}$ ,  $TDDI_{Pb}$ ,  $TDDI_{Pc}$ ) ve toplam harmonik bozulma ( $THDI_{Pa}$ ,  $THDI_{Pb}$ ,  $THDI_{Pc}$ ) değerleri Şekil 4.14’de verilmiştir.



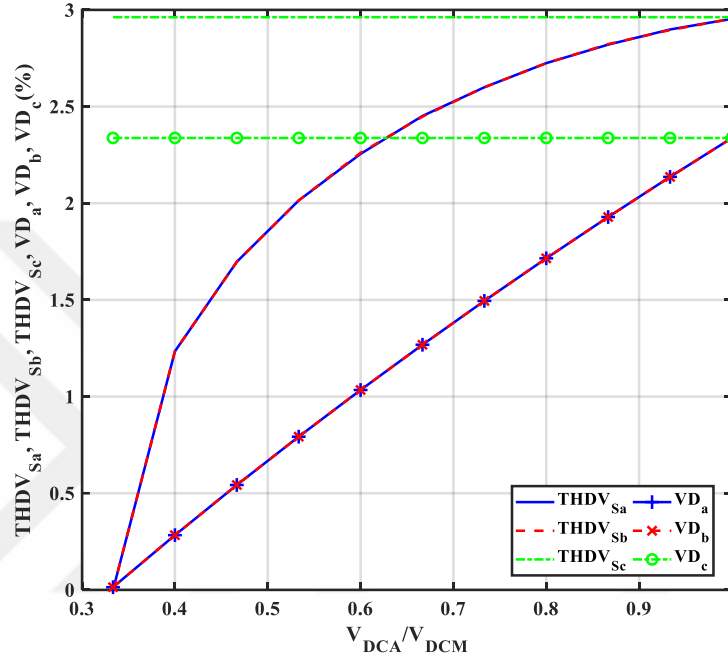


**Şekil 4.14:** Tip 2 üç fazlı transformatör için boştaki çalışma akımlarının toplam talep bozulma ve toplam harmonik bozulma indislerinin  $V_{DCA}/V_{DCM}$  ile değişim eğrileri.

Şekil 4.14'de, sabit DC uyarımının bulunduğu c fazının  $THDI_{Pc}$  değerlerinin,  $V_{DCA}/V_{DCM}$  oranının 0.33 ile 1 arasındaki değişiminden etkilenmediği, bütün uyarım seviyelerinde bu indisin %55 değerinde olduğu görülmektedir. Diğer taraftan,  $THDI_{Pa}$  ve  $THDI_{Pb}$  indisleri; a ve b fazlarına DC uyarımının uygulanmadığı durumda ihmal edilebilir değerde iken,  $V_{DCA}/V_{DCM}$  oranının 0.33 ile 0.4 aralığında artışıyla çok dik bir biçimde yükselerek %130 değerine ulaşmıştır. Aynı uyarım aralığında  $TDDI_{Pc}$  indisi çok dik bir biçimde artarak %62 seviyesine ulaşmış ve bu noktada sabit kalmıştır. Bu uyarım seviyesinde ( $V_{DCA}/V_{DCM}=0.4$ )  $TDDI_{Pa}$   $TDDI_{Pb}$  indisleri %19 seviyesindedir.  $V_{DCA}/V_{DCM}=0.7$  olduğu durumda  $THDI_{Pa}=THDI_{Pb}$  ve  $TDDI_{Pa}=TDDI_{Pb}$  değerleri sırasıyla %72 ve %50, DC uyarımının dengeli olduğu durumda ise toplam harmonik bozulma ve toplam talep bozulma indislerinin değerleri sırasıyla %55 ve %60 civarında hesaplanmıştır.

Bunlara ek olarak, Tip 2 üç fazlı transformatörün sekonder faz gerilimlerine ait toplam harmonik bozulma toplam harmonik bozulma indislerinin ( $THDV_{Sa}$ ,  $THDV_{Sb}$ ,  $THDV_{Sc}$ ) ve temel frekans gerilim sapma değerlerinin ( $VD_a$ ,  $VD_b$ ,  $VD_c$ ),  $V_{DCA}/V_{DCM}$  oranıyla değişimi Şekil 4.15'de sunulmuştur. Bu şekil incelendiğinde, sabit DC uyarımının uygulandığı c fazının sekonder taraf gerilimine ait  $THDV_{Sc}$  ve  $VD_c$

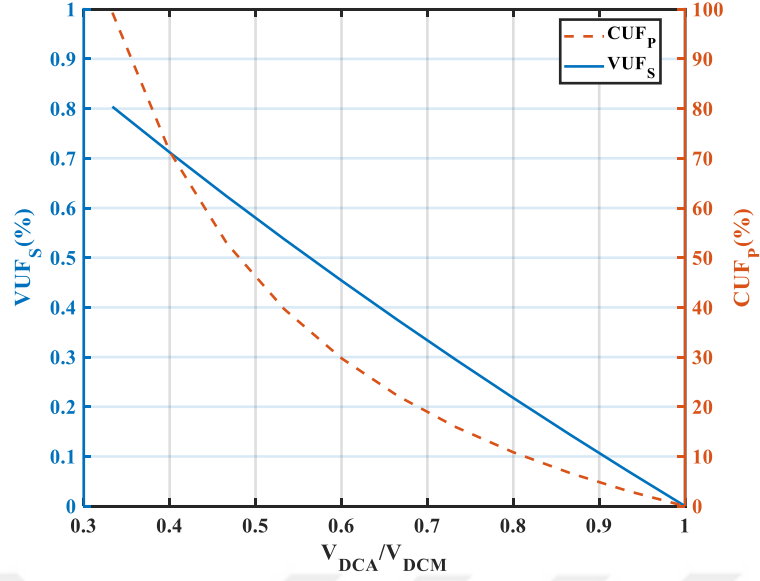
değerlerinin  $V_{DCA}/V_{DCM}$  değişiminden etkilenmeyerek sırasıyla, %2.9 ve %2.35 civarlarında sabit kaldığı ifade edilebilir. Öte yandan,  $V_{DCA}/V_{DCM}$  oranının artışıyla,  $THDV_{Sa}$  ve  $THDV_{Sb}$  indislerinin doğrusal olmayan bir biçimde artış göstermiştir.  $V_{DCA}/V_{DCM}$  oranının 0.33, 0.7 ve 1 değerleri için bu iki indis %0, %2.5 ve %3 değerlerindedir.  $VD_a$  ve  $VD_b$  indisleri ise  $V_{DCA}/V_{DCM}$  oranının 0.33 ile 1 aralığında doğrusal bir artış göstererek %0'dan %2.35 değerine ulaşmıştır.



**Şekil 4.15:** Tip 2 üç fazlı transformatöre ait sekonder taraf faz gerilimlerinin toplam harmonik bozulma ve temel frekans gerilim sapma indislerinin  $V_{DCA}/V_{DCM}$  ile değişim eğrileri.

Tip 1 üç fazlı transformatör için sekonder tarafa ait temel frekans gerilim dengesizlik faktörünün ( $VUF_S$ ) ve primer taraf temel frekans akımı dengesizlik faktörünün ( $CUF_P$ ),  $V_{DCA}/V_{DCM}$  oranı ile değişim eğrileri Şekil 4.16'da verilmiştir.

Bu şekilden, a ve b fazlarındaki DC uyarımın c fazındaki DC uyarım seviyesine yaklaştıkça bir başka ifadeyle DC uyarım dengesizliği azaldıkça,  $VUF_S$  ve  $CUF_P$  oranlarının azaldığı sonucuna varılmıştır.  $VUF_S$  ve  $CUF_P$  indislerinin değerleri;  $V_{DCA}/V_{DCM}=0.33$  için %0.8 ve %100,  $V_{DCA}/V_{DCM}=0.6$  için %0.3 ve %45'dir. Dengeli DC uyarım durumu ( $V_{DCA}/V_{DCM}=1$ ) için sekonder taraf temel frekans gerilimi ve primer taraf temel frekans akımının dengesizliği ortadan kalkmıştır.

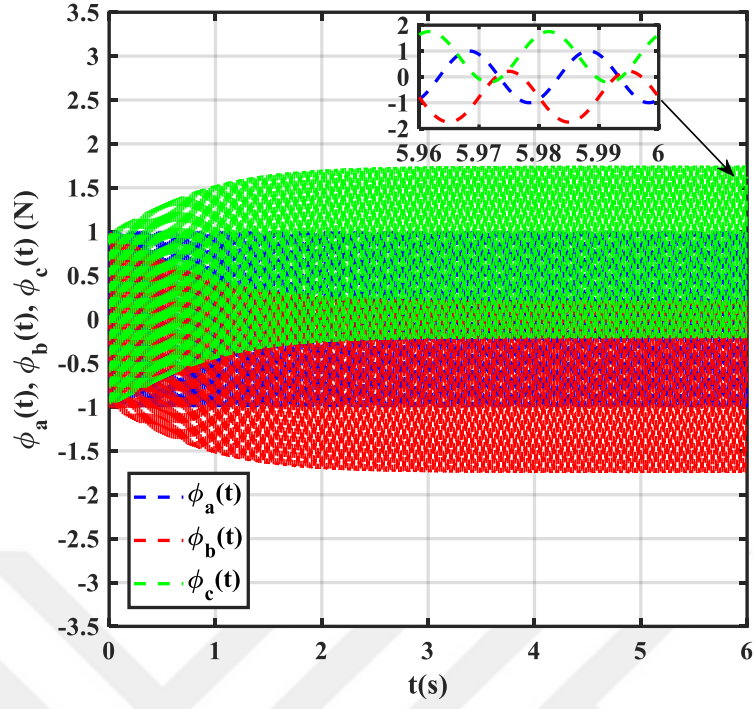


Şekil 4.16: Tip 2 üç fazlı transformatöre ait  $VUF_S$  ve  $CUF_P$  indislerinin  $V_{DCA}/V_{DCM}$  ile değişim eğrileri.

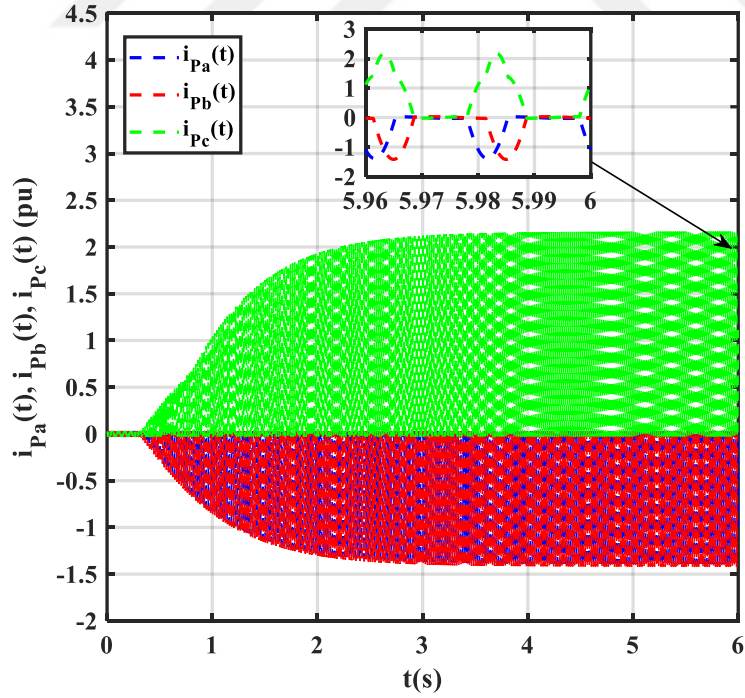
### 4.3 Tip 3 Üç Fazlı Transformatöre Etkileri

Burada, üç fazlı üç bacaklı üçgen-yıldız bağlı nötrü topraklı çekirdek biçimi nüveye sahip transformatöre dengesiz DC uyarımın etkileri analiz edilmiştir. Analizler, 3 MVA, 11/0.38 kV ve 50 Hz anma değerlerine sahip bir transformatör için gerçekleştirilmiştir.

Şekil 4.17 ve Şekil 4.18'de, a ve b fazlarına DC uyarım uygulanmadığı, c fazına  $V_{DC}/V_{PR}=0.5$  oranında DC uyarım uygulandığı ( $V_{DCA}/V_{DCM}$  oranının 1/3 olduğu) durum için nüvede dolanan manyetik akıların ( $\Phi_a(t)$ ,  $\Phi_b(t)$ ,  $\Phi_c(t)$ ) dalga şekilleri ve boşta çalışma akımlarının ( $i_{Pa}(t)$ ,  $i_{Pb}(t)$ ,  $i_{Pc}(t)$ ) dalga şekilleri sunulmuştur. Bu şekillerden DC uyarımın uygulandığı c fazına ait manyetik akının ( $\Phi_c(t)$ ) pozitif alternans tarafına ötelendiği ve normalize edilmiş maksimum değerinin 1.75 olduğu, DC uyarımın uygulanmadığı fazlardan b fazına ait manyetik akının ( $\Phi_b(t)$ ) negatif alternans tarafına ötelendiği ve normalize edilmiş maksimum değerinin -1.75 olduğu, a fazına ait manyetik akının ( $\Phi_a(t)$ ) ise pozitif veya negatif alternans tarafına ötelenmediği ve normalize edilmiş maksimum değerinin 1 olduğu görülmektedir. Ayrıca, boşta çalışma akımlarının ( $i_{Pa}(t)$ ,  $i_{Pb}(t)$ ,  $i_{Pc}(t)$ ) maksimum değerleri; a ve b fazları için -1.3 pu, c fazı için 2.2 pu civarındadır.

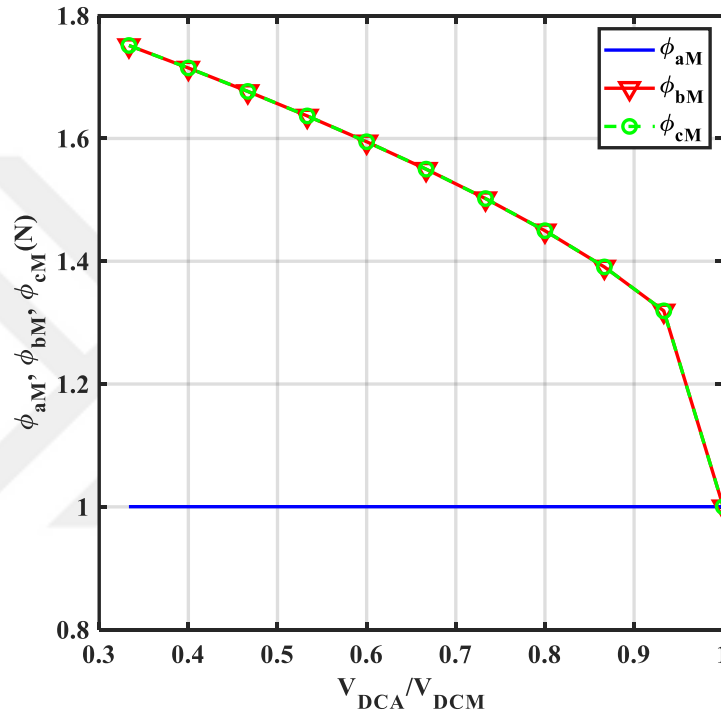


Şekil 4.17:  $V_{DCA}/V_{DCM}=1/3$  olduğu durumda Tip 3 üç fazlı transformatöre ait  $\Phi_a(t)$ ,  $\Phi_b(t)$  ve  $\Phi_c(t)$  manyetik akılarının dalga şekilleri.



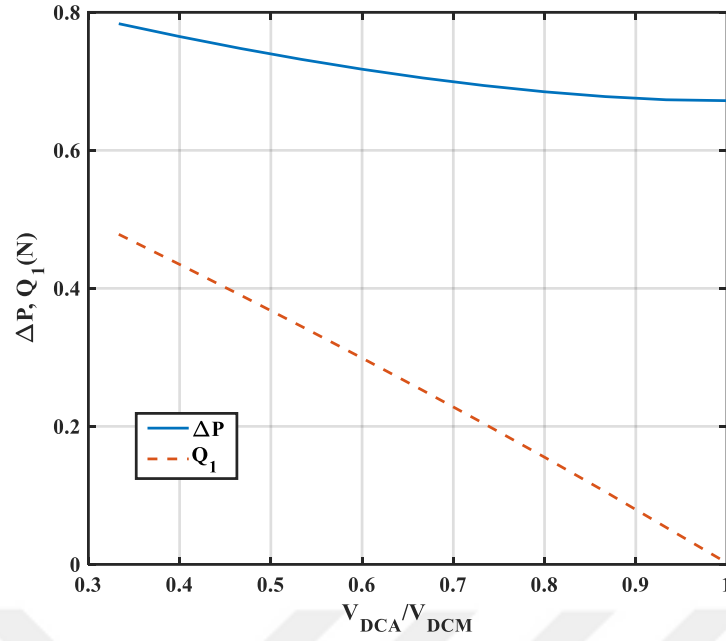
Şekil 4.18:  $V_{DCA}/V_{DCM}=1/3$  olduğu durumda Tip 3 üç fazlı transformatöre ait  $i_{Pa}(t)$ ,  $i_{Pb}(t)$  ve  $i_{Pc}(t)$  akımlarının dalga şekilleri.

Tip 3 üç fazlı transformatöre ait normalize edilmiş maksimum akı değerlerinin ( $\Phi_{aM}$ ,  $\Phi_{bM}$  ve  $\Phi_{cM}$ ),  $V_{DCA}/V_{DCM}$  oranıyla değişim eğrileri Şekil 4.19’da verilmiştir. Bu şekilden,  $\Phi_{bM}$  ve  $\Phi_{cM}$  eğrilerinin üst üste çakıştığı, bu iki eğrinin DC uyarım dengesizliği azaldıkça ( $V_{DCA}/V_{DCM}$  oranı 1’e yaklaştıkça) doğrusal olmayan biçimde azaldığı ifade edilebilir. Ayrıca, tüm  $V_{DCA}/V_{DCM}$  değer aralığı için  $\Phi_{aM}$  1 değerindedir. Bununla birlikte,  $V_{DCA}/V_{DCM}$  oranınının 0.33, 0.7 ve 1 olduğu uyarım durumları için  $\Phi_{bM}$  ve  $\Phi_{cM}$  sırasıyla 1.78, 1.55 ve 1 değerlerinde gözlemlenmiştir.



Şekil 4.19: Tip 3 üç fazlı transformatöre ait  $\Phi_{aM}$ ,  $\Phi_{bM}$  ve  $\Phi_{cM}$  değerlerinin  $V_{DCA}/V_{DCM}$  ile değişim eğrileri.

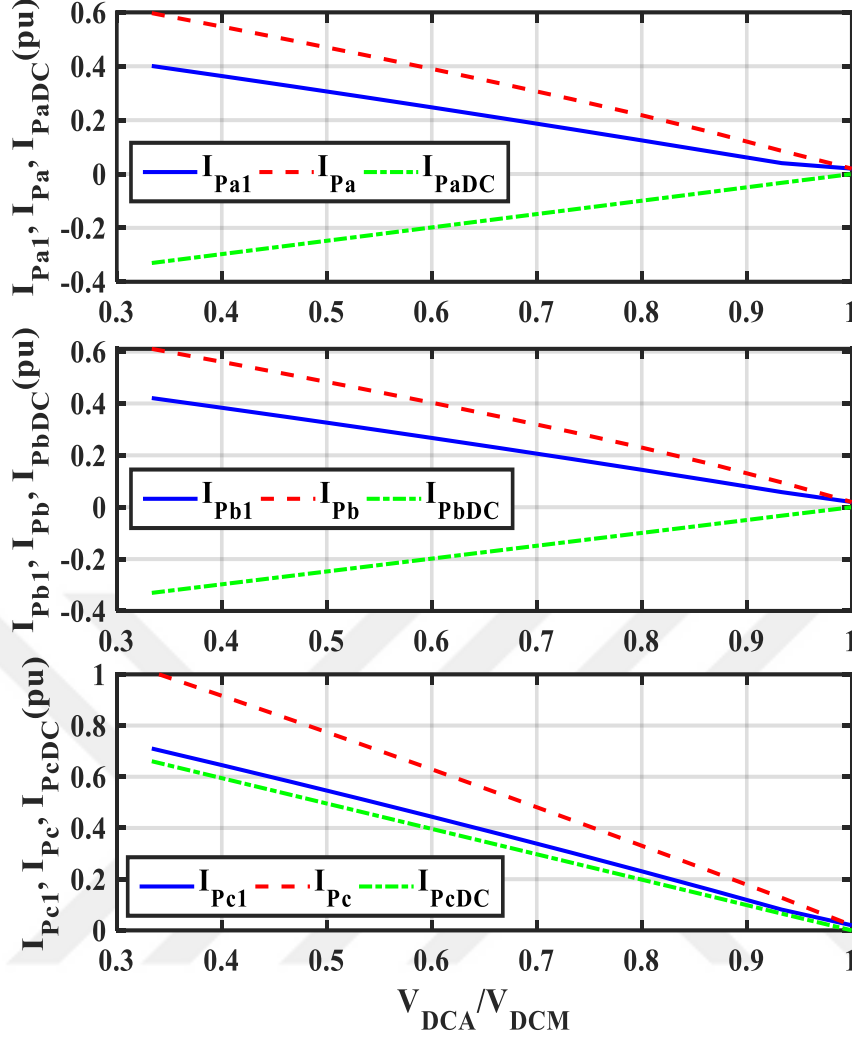
Şekil 4.20’de ise, yüksüz durumdaki Tip 3 üç fazlı transformatör için  $\Delta P$  ve  $Q_1$  değerlerinin  $V_{DCA}/V_{DCM}$  ile değişim eğrileri sunulmuştur. Bu eğrilere göre;  $V_{DCA}/V_{DCM}=0.33$  olduğu durumda  $\Delta P=0.79$  ve  $Q_1=0.47$ ,  $V_{DCA}/V_{DCM}=0.7$  olduğu durumda her iki değer sırasıyla 0.7 ve 0.23’dür. Dengeli DC uyarım gerilimi uygulandığı durumda ise;  $\Delta P$  0.67 değerine ulaşmış ve  $Q_1$  ihmal edilebilir bir değer almıştır. Dolayısıyla, simüle edilen dengesiz DC uyarım aralığında, hem  $\Delta P$  hem de  $Q_1$ ’in kayda değer bir değişim gösterdiği sonucuna varılmıştır.



Şekil 4.20: Tip 3 üç fazlı transformatöre ait  $\Delta P$  ve  $Q_1$  değerlerinin  $V_{DCA}/V_{DCM}$  ile değişim eğrileri.

Tip 3 üç fazlı transformatörün dengesiz DC uyarım altında, boşa çalışma durumunda primer faz akımlarının DC bileşen ( $I_{PaDC}$ ,  $I_{PbDC}$ ,  $I_{PcDC}$ ), temel frekans ( $I_{Pa1}$ ,  $I_{Pb1}$ ,  $I_{Pc1}$ ) ve toplam etkin ( $I_{Pa}$ ,  $I_{Pb}$ ,  $I_{Pc}$ ) değerlerinin,  $V_{DCA}/V_{DCM}$  oranı artışı ile değişimi Şekil 4.21’de sunulmuştur.

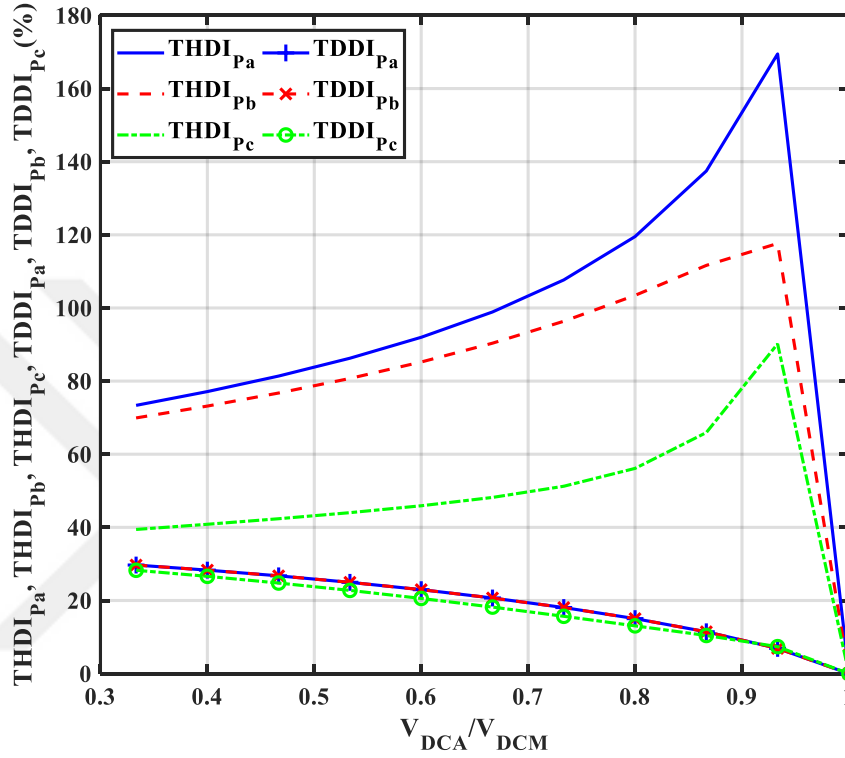
Bu grafikte sunulan sonuçlara göre;  $V_{DCA}/V_{DCM} = 0.33$  için  $I_{PaDC}$ ,  $I_{PbDC}$  ve  $I_{PcDC}$  sırasıyla; -0.34, -0.34 ve 0.68 pu,  $I_{Pa1}$ ,  $I_{Pb1}$  ve  $I_{Pc1}$  sırasıyla; 0.4, 0.4 ve 0.7 pu,  $I_{Pa}$ ,  $I_{Pb}$  ve  $I_{Pc}$  sırasıyla; 0.6, 0.6 ve 1 pu’dur. Dengeli DC uyarım durumunda, primer faz akımlarının DC bileşeni, temel frekans ve toplam etkin değerleri ihmal edilebilir seviyededir. Diğer bir ifadeyle, uyarım uygulanan sargılar üçgen bağlantı olduğu için dengeli DC uyarım durumunda transformatör sargılarında DC akım akmaz ve transformatör doyuma girmez.



Şekil 4.21: Tip 3 üç fazlı transformatöre ait boşa çalışma akımlarının DC bileşen, temel frekans ve toplam etkin değerlerinin  $V_{DCA}/V_{DCM}$  ile değişim eğrileri.

Şekil 4.22’de,  $V_{DCA}/V_{DCM}$  oranının artışı ile primer akımlarda meydana gelen toplam talep bozulma ( $TDDI_{Pa}$ ,  $TDDI_{Pb}$ ,  $TDDI_{Pc}$ ) ve toplam harmonik bozulma değerleri ( $THDI_{Pa}$ ,  $THDI_{Pb}$ ,  $THDI_{Pc}$ ) verilmiştir. Bu grafikten görüldüğü üzere, bütün DC uyarım seviyelerinde,  $TDDI_{Pa}$ ,  $TDDI_{Pb}$  ve  $TDDI_{Pc}$  birbirine çok yakın değerler almıştır. Ancak, bu durum  $THDI_{Pa}$ ,  $THDI_{Pb}$  ve  $THDI_{Pc}$  için geçerli değildir. DC uyarım akımlarının dengeli ( $V_{DCA}/V_{DCM}=1$ ) olduğu durumda, primer akımlarına ait toplam harmonik bozulma ve toplam talep bozulma değerleri ihmal edilebilir seviyededir. Bununla birlikte, a ve b fazlarından uygulanan DC uyarım seviyesindeki artışla (DC uyarım dengesizliği azaldıkça)  $TDDI_{Pa}$ ,  $TDDI_{Pb}$  ve  $TDDI_{Pc}$  değerleri düşmektedir;  $V_{DCA}/V_{DCM}=0.33$  için %30 civarı,  $V_{DCA}/V_{DCM}=0.7$  için %20 civarı değer almışlardır. Aynı şekilden,  $V_{DCA}/V_{DCM}=0.33$  için  $THDI_{Pa}=\%77$ ,  $THDI_{Pb}=\%70$ ,

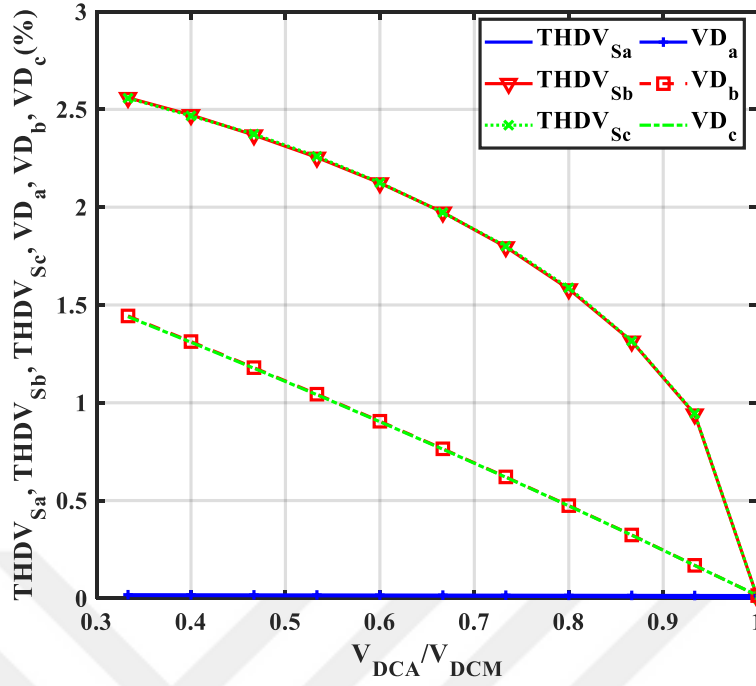
THDI<sub>Pc</sub>=%40 iken,  $V_{DCA}/V_{DCM}=0.7$  için THDI<sub>Pa</sub>=%105, THDI<sub>Pb</sub>=%92, THDI<sub>Pc</sub>=%50 olmuş,  $V_{DCA}/V_{DCM}=0.94$  için THDI<sub>Pa</sub>=%170, THDI<sub>Pb</sub>=%118, THDI<sub>Pc</sub>=%90 değerlerinde maksimum noktalarına ulaşmışlardır. Bu indisler,  $V_{DCA}/V_{DCM}$  oranının 0.94 ile 1 değerleri arasında, ani bir azalış göstererek ihmal edilebilir seviyeye düşmüştür.



Şekil 4.22: Tip 3 üç fazlı transformatör için boşa çalışma akımlarının toplam talep bozulma ve toplam harmonik bozulma indislerinin  $V_{DCA}/V_{DCM}$  ile değişim eğrileri.

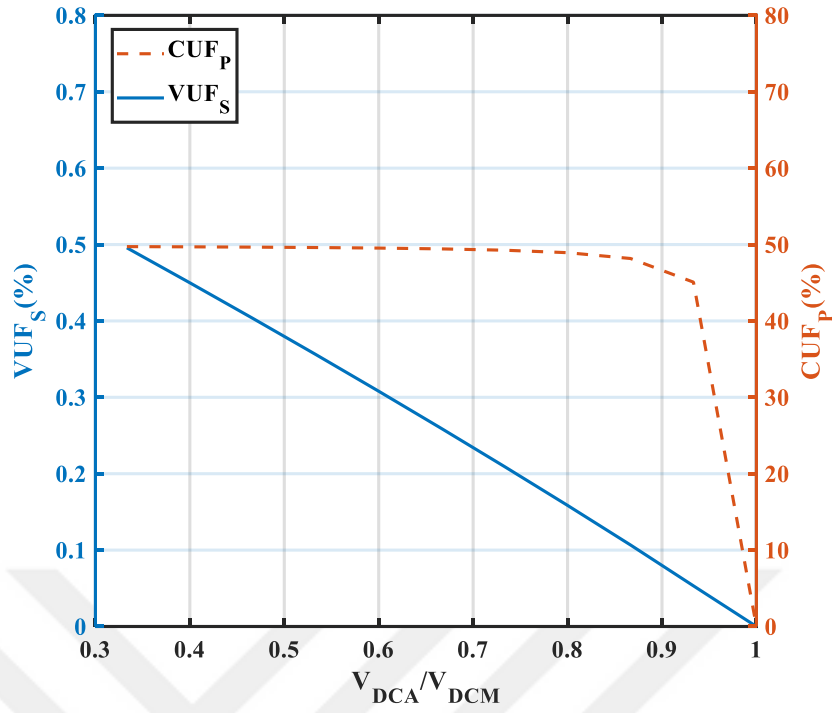
Şekil 4.23'den Tip 3 transformatör için dengesiz DC uyarım altında sekonder taraf faz gerilimlerinin toplam harmonik bozulma (THDV<sub>Sa</sub>, THDV<sub>Sb</sub>, THDV<sub>Sc</sub>) ve temel frekans gerilim sapma değerlerinin ( $VD_a$ ,  $VD_b$ ,  $VD_c$ )  $V_{DCA}/V_{DCM}$  oranı ile değişim eğrileri verilmiştir. Bu eğriler incelendiğinde, simüle edilen DC uyarım seviyeleri için THDV<sub>Sb</sub> ile THDV<sub>Sc</sub> eğrilerinin çakıştığı dolayısıyla aynı değişimi gösterdikleri ancak tüm  $V_{DCA}/V_{DCM}$  oranları için THDV<sub>Sa</sub>'nın ihmal edilebilir değerde olduğu görülmektedir. Aynı durum,  $VD_a$ ,  $VD_b$  ve  $VD_c$  değerleri içinde gözlenmiştir. Bununla birlikte,  $V_{DCA}/V_{DCM}=0.33$  için THDV<sub>Sb</sub>=THDV<sub>Sc</sub>=%2.7 ve  $VD_b=VD_c$ =%1.48,  $V_{DCA}/V_{DCM}=0.7$  için THDV<sub>Sb</sub>=THDV<sub>Sc</sub>=%1.8 ve  $VD_b=VD_c$ =%0.7'dir. Bu indisler, dengeli DC uyarım gerilimlerinin uygulandığı ( $V_{DCA}/V_{DCM}=1$ ) durumunda ise ihmal edilebilir değerdedir.





**Şekil 4.23:** Tip 3 üç fazlı transformatöre ait sekonder taraf faz gerilimlerinin toplam harmonik bozulma ve temel frekans gerilim sapma indislerinin  $V_{DCA}/V_{DCM}$  ile değişim eğrileri.

$V_{DCA}/V_{DCM}$  oranı ile  $VUF_S$  ve  $CUF_P$  indislerinin değişimi Şekil 4.24’de verilmiştir. Bu grafik,  $V_{DCA}/V_{DCM}=1$  durumu için  $VUF_S$  ve  $CUF_P$  indislerinin ihmal edilebilir değerde olduğunu göstermektedir. Ayrıca,  $V_{DCA}/V_{DCM}$  oranının 0.33 ve 0.77 olduğu durumlarda,  $VUF_S$  sırasıyla %0.5 ve %0.23 değerlerini almıştır.  $CUF_P$  indisinin,  $V_{DCA}/V_{DCM}$  oranının 0.33 ile 0.7 aralığında değişmediği ve %50 değerinde sabit kaldığı görülmüştür. Ancak bu indis,  $V_{DCA}/V_{DCM}$  oranının 0.94 olduğu durumda %45’e düşmüş, buradan sonra  $V_{DCA}/V_{DCM}$  oranının 1 olduğu duruma kadar ani bir azalışla ihmal edilebilir bir seviyeye ulaşmıştır.



Şekil 4.24: Tip 3 üç fazlı transformatöre ait  $VUF_S$  ve  $CUF_P$  indislerinin  $V_{DCA}/V_{DCM}$  ile değişim eğrileri.

#### 4.4 Sonuç

Bu bölümde dengesiz DC uyartım durumunun üç fazlı transformatörlere etkileri analiz edilmiştir. Analizlerde dikkate alınan transformatörler farklı bacak sayısı, nüve biçimleri ve sargı şekillerine sahiptir. Analiz çıktılarından,

- Primer sargıları (uyartımın uygulandığı sargılar) üçgen olan transformatörlerin dengeli DC uyartım durumundan etkilenmediği, ancak dengesiz DC uyartım durumundan etkilendiği,
- Üç farklı transformatör tipi için de reaktif güç talebinin, primer akımlarının toplam ve temel harmonik etkin değerlerinin, primer akımlarının toplam talep bozulma değerlerinin, sekonder gerilimlerinin toplam harmonik bozulma değerlerinin, sekonder gerilimlerinin nominal değerden sapma miktarlarının, temel harmonik primer akım ve temel harmonik sekonder gerilim dengesizlik faktörlerinin DC uyartımın dengesizliğine bağlı olarak önemli değişim gösterdiği,

- Tip 1 hariç diğer transformatör için kayıpların DC uyartım dengesizliğiyle önemli bir değişim gösterdiği, sonuçlarına varılmıştır.



## 5. DC UYARTIM ALTINDA TRANSFORMATÖRLERİN YENİDEN BOYUTLANDIRILMASI

Bu bölümde, DC uyartım altında bulunan transformatörlerin yeniden boyutlandırma oranları (azami yüklenme oranları) analiz edilmiştir. Yeniden boyutlandırma işlemi, DC uyartım altında toplam kaybı ve transformatörün beslediği azami akım etkin değeri dikkate alınarak, iki farklı yaklaşıma göre gerçekleştirilmiştir.

Bu yaklaşımlardan birincisine (Yaklaşım 1'e) göre; DC uyartım altında transformatörün toplam kaybının anma kaybını aşmadığı şartlarda ulaşılan azami yük gücünün ( $S_L$ ) transformatörün anma gücüne ( $S_{Tr}$ ) yüzde oranı “azami yüklenme oranı” olarak belirlenmiştir.

İkinci yaklaşıma (Yaklaşım 2'ye) göre; DC uyartım altında transformatörün fazlarında ölçülen en yüksek primer akım etkin değerinin anma akımını aşmadığı şartlarda ulaşılan azami yük gücünün transformatörün anma gücüne yüzde oranı “azami yüklenme oranı” olarak belirlenmiştir.

Böylece; azami yüklenme oranı (DF),

$$DF(\%) = 100 \frac{S_L}{S_{Tr}} \quad (5.1)$$

ifadesiyle hesaplanmıştır.

### 5.1 Dengeli DC Uyartım Şartlarında Yeniden Boyutlandırma Analizi

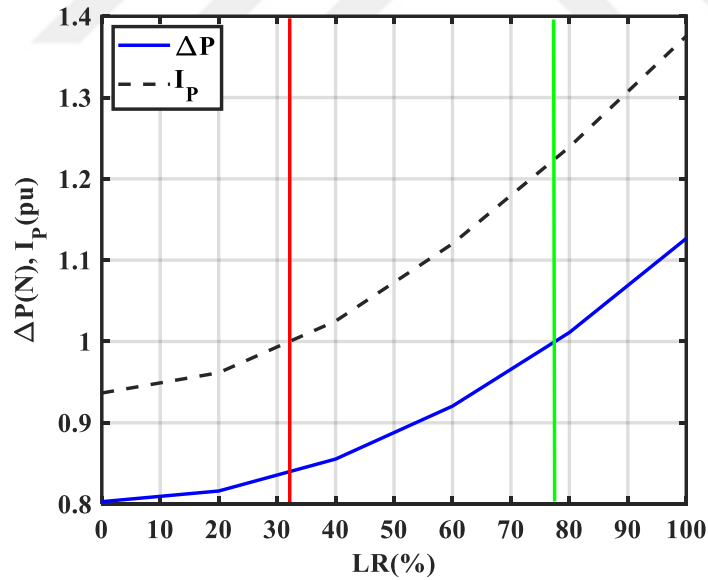
Burada, dengeli DC uyartım şartlarında, kayıp ve akım etkin değeri temelli yeniden boyutlandırma yaklaşımlarının (Yaklaşım 1 ve 2'nin); tek fazlı, Tip 1 ve Tip 2 transformatörler için sonuçları karşılaştırılmıştır. Dengeli DC uyartım şartlarından etkilenmeyen Tip 3 üç fazlı transformatör analize dahil edilmemiştir.

Analiz sisteminde yük saf rezistif olup; DC uyartım gerilimi, anma gerilim etkin değerinin %0.25'i ( $V_{DC}/V_{PR}=\%0.25$ ) olacak şekilde ayarlanmıştır. Buna göre, dikkate alınan DC uyartım şartlarında transformatörün yüklenme oranındaki (LR(%)) artışa bağlı olarak toplam kayıp ( $\Delta P$ ) ve primer akımlarının etkin değerinin ( $I_p$ ) değişimleri tek fazlı ve Tip 2 üç fazlı transformatörler için Şekil 5.1'de Tip 1 üç fazlı

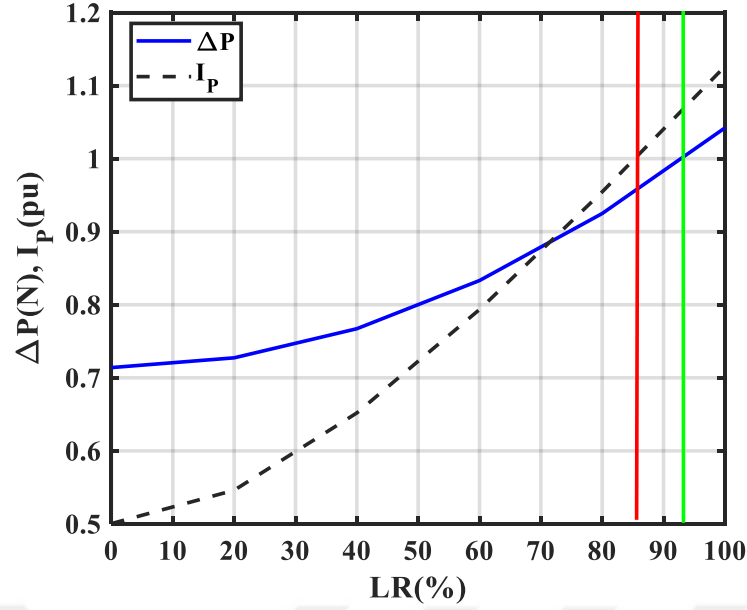
transformatör için Şekil 5.2’de sunulmuştur. Bu şekillerde, yeşil renkli dikey çizgi Yaklaşım 1, kırmızı renkli dikey çizgi Yaklaşım 2’ye göre DF değerlerini göstermektedir.

Şekil 5.1’den, tek fazlı ve Tip 2 transformatörlerin DF değerlerinin Yaklaşım 1’e göre %78, Yaklaşım 2’ye göre %33 olduğu görülmektedir. Diğer taraftan, Şekil 5.2’den görüldüğü gibi Tip 1 için DF değerlerinin Yaklaşım 1’e göre %92, Yaklaşım 2’ye göre %86’dır. Böylece, dengeli DC uyarım altında azami yüklenme oranı bakımından en iyi transformatörün Tip 1 olduğu, Tip 2 ve tek fazlı transformatörlerin aynı azami yüklenme oranına sahip olduğu sonucuna varılmıştır.

Analiz sonuçlarından ayrıca, Yaklaşım 1’in Yaklaşım 2’ye göre daha fazla yüklenme oranına izin verdiği ifade edilebilir. Şekil 5.1’den görüldüğü gibi tek fazlı ve Tip 2 transformatörler Yaklaşım 1’e göre yeniden boyutlandırıldığı takdirde sargılarından 1.2 pu civarında akım çekilmesi, Tip 1 transformatör Yaklaşım 1’e göre yeniden boyutlandırıldığı takdirde sargılarından 1.05 pu civarında akım çekilmesi söz konusudur. Diğer deyişle, Yaklaşım 1’e göre yeniden boyutlandırma yapıldığı takdirde transformatör sargıları aşırı ısınacaktır.



**Şekil 5.1:**  $V_{DC}/V_{PR}=\%0.25$  olduğu dengeli DC uyarım altında tek fazlı ve Tip 2 üç fazlı transformatörün  $\Delta P$  ve  $I_p$  değerlerinin LR ile değişim eğrileri.

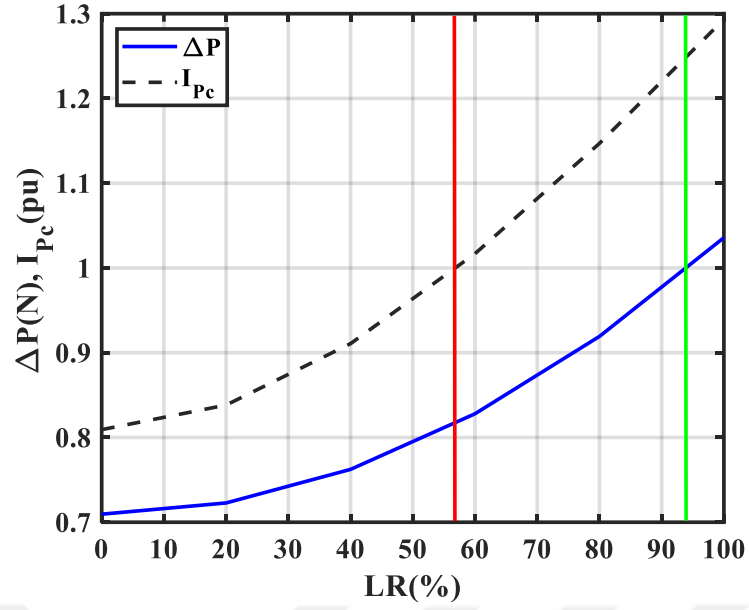


Şekil 5.2:  $V_{DC}/V_{PR}=\%0.25$  olduğu dengeli DC uyartım altında Tip 1 üç fazlı transformatörün  $\Delta P$  ve  $I_P$  değerlerinin LR ile değişim eğrisi.

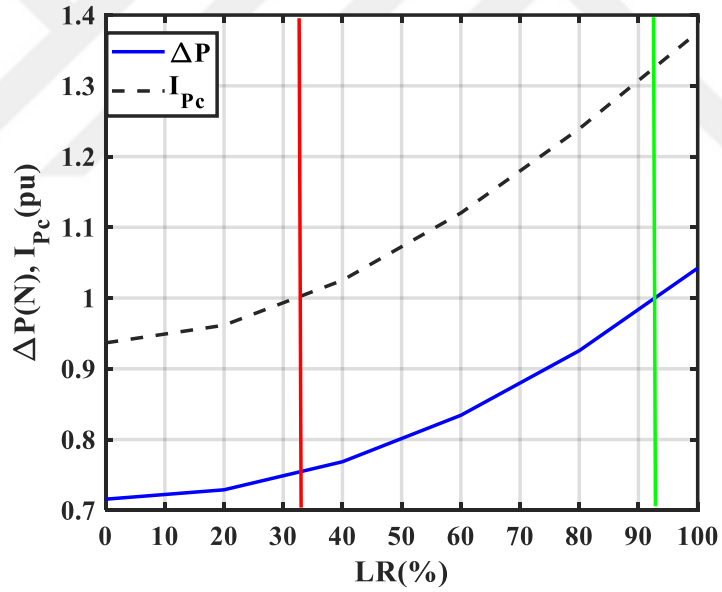
## 5.2 Dengesiz DC Uyartım Şartlarında Yeniden Boyutlandırma Analizi

Burada, dengesiz DC uyartım şartlarında, kayıp ve akım etkin değeri temelli yeniden boyutlandırma yaklaşımlarının (Yaklaşım 1 ve 2'nin); Tip 1, 2 ve 3 üç fazlı transformatörler için sonuçları analiz edilmiştir. Analiz sisteminde yük saf rezistiftir. Dengesizlik durumu, a ve b fazlarına DC uyartım gerilimi uygulanmayarak ( $V_{DCa}=V_{DCb}=0$ ), c fazına ise anma gerilim etkin değerinin ( $V_{PR}$ )  $\%0.25$ 'i kadar DC uyartım gerilimi ( $V_{DCc}$ ) uygulanarak ( $V_{DCc}/V_{PR}=\%0.25$ ) oluşturulmuştur.

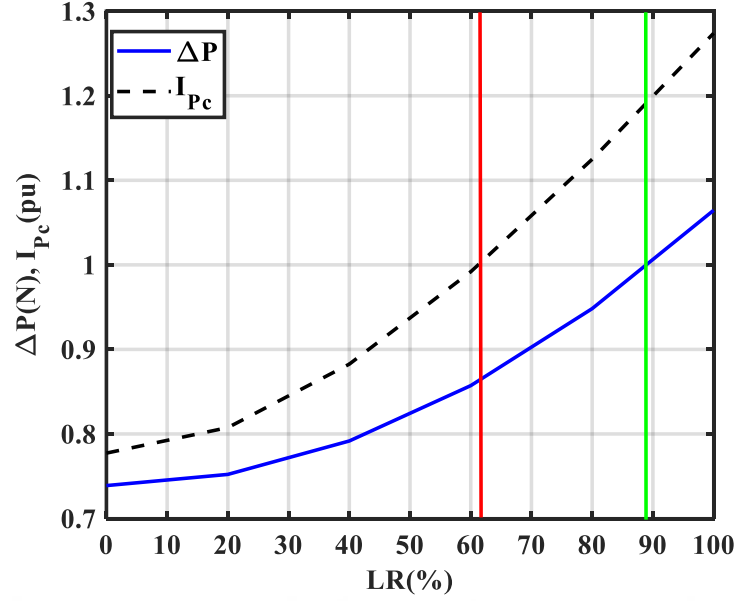
Buna göre, dikkate alınan DC uyartım şartlarında transformatörlerin yüklenme oranına (LR(%)) bağlı olarak, toplam kayıp ve en yüksek primer akımı etkin değeri ( $I_{Pe}$ ) büyüklüklerinin değişimleri Tip 1 üç fazlı transformatör için Şekil 5.3'de, Tip 2 üç fazlı transformatör için Şekil 5.4'de, Tip 3 üç fazlı transformatör için Şekil 5.5'de sunulmuştur. Bu grafiklerde, yeşil renkli dikey çizgi Yaklaşım 1'e, kırmızı renkli dikey çizgi Yaklaşım 2'ye göre DF değerlerini göstermektedir.



Şekil 5.3:  $V_{DCa}=V_{DCb}=0$  ve  $V_{DCc}/V_{PR}=\%0.25$  olduğu dengesiz DC uyarım altında Tip 1 üç fazlı transformatörün  $\Delta P$  ve  $I_{Pc}$  değerlerinin LR ile değişim eğrileri.



Şekil 5.4:  $V_{DCa}=V_{DCb}=0$  ve  $V_{DCc}/V_{PR}=\%0.25$  olduğu dengesiz DC uyarım altında Tip 2 üç fazlı transformatörün  $\Delta P$  ve  $I_{Pc}$  değerlerinin LR ile değişim eğrileri.



**Şekil 5.5:**  $V_{DCa}=V_{DCb}=0$  ve  $V_{DCc}/V_{PR}=\%0.25$  olduğu dengesiz DC uyarım altında Tip 3 üç fazlı transformatörün  $\Delta P$  ve  $I_{Pc}$  değerlerinin LR ile değişim eğrileri.

Bu şekillerden, Tip 1 transformatörün DF değerlerinin Yaklaşım 1'e göre %94, Yaklaşım 2'ye göre %58 olduğu, Tip 2 transformatörün DF değerlerinin Yaklaşım 1'e göre %92, Yaklaşım 2'ye göre %33 olduğu, Tip 3 transformatörün DF değerlerinin Yaklaşım 1'e göre %89, Yaklaşım 2'ye göre %62 olduğu görülmektedir.

Dengeli DC uyarım durumundaki sonuçlarla dengesiz DC uyarım durumunda elde edilen sonuçlar bir arada değerlendirildiğinde, Yaklaşım 1 ve 2 ile hesaplanan DF değerleri arasındaki farkın dengesiz DC uyarım durumunda arttığı ifade edilebilir. Son olarak, Yaklaşım 2 dikkate alındığında, dengesiz DC uyarım altında azami yüklenme oranı bakımından en iyiden en kötüye transformatörlerin Tip 3, Tip 1 ve Tip 2 olarak sıralanabileceği sonucuna varılmıştır.

### 5.3 Sonuç

Bu bölümde, dengeli ve dengesiz DC uyarım durumunun tek fazlı, Tip 1, 2 ve 3 üç fazlı transformatörler için azami yüklenme oranları, toplam kayıp ve en yüksek primer akım etkin değeri temelli yaklaşımlara (Yaklaşım 1 ve 2'ye) göre analiz edilmiştir. Analiz sonuçlarından,



- Dengeli DC uyartım altında azami yüklenme oranı bakımından en iyi transformatörün Tip 1 olduğu, Tip 2 ve tek fazlı transformatörlerin aynı azami yüklenme oranına sahip olduğu,
- Dengesiz DC uyartım altında azami yüklenme oranı bakımından en iyiden en kötüye transformatörlerin Tip 3, Tip 1 ve Tip 2 olarak sıralanabileceği,
- Yaklaşım 1'e göre yeniden boyutlandırma yapıldığı takdirde transformatör sargılarının aşırı ısınacağı,
- DC uyartımın dengesiz olduğu durumda Yaklaşım 1 ve 2 ile hesaplanan DF değerleri arasındaki farkın büyüdüğü,

ifade edilebilir.



## 6. SONUÇ VE ÖNERİLER

Güneşte meydana gelen patlamaların, Dünya'nın jeomanyetik alanına etkisi neticesinde, iletim hatlarında 0.01 Hz civarında frekanslarda gerilimler indüklenir. Bu gerilimler, çok yüksek gerilimde enerji naklinde tercih edilen yıldız noktası topraklanmış iletim hatlarında literatürde "jeomanyetik indüklenen akımlar" olarak adlandırılan yaklaşık doğru akımların dolaşmasına yol açar. Bununla birlikte, yüksek gerilim doğru akım iletimi (HVDC) sistemleri ve transformatörsüz fotovoltaiik dağıtık üretim birimleri sebebiyle DC akımlar alternatif akım güç sistemlerine akabilir.

Literatürde sunulan çalışmalardan, JİA veya DC uyarım altında transformatörlerin, DC akımın yönüne bağlı olarak şebeke geriliminin pozitif veya negatif yarım periyodunda doyuma ulaştıkları bilinmektedir. Doyuma ulaşan transformatörlerin, yüksek harmonik bozulmaya sahip ve aşırı büyüklükte uyarım akımlarına, yüksek reaktif güç taleplerine ve ekstra kayıplara sahip olduğu, literatürdeki ölçüm ve simülasyon temelli analiz çalışmalarında ifade edilmiştir. Ayrıca, bu çalışmalarda, faz sayısı, nüve biçimi ve nüvenin bacak sayısı gibi parametrelerin, transformatörlerin DC uyarıma hassasiyetini etkileyen başlıca unsurlar olduğu gözlenmiştir. Bununla birlikte, DC uyarımın transformatörler üzerindeki etkilerini analiz eden çalışmalar halen devam etmekte olup ilgili literatür gelişim süreci içindedir.

Bu tez çalışmasının amacı, dengeli ve dengesiz DC uyarımın tek fazlı çekirdek biçimi nüveli, üç fazlı üç bacaklı çekirdek biçimi nüveli primer sargıları yıldız bağlı, üç fazlı beş bacaklı shell biçimi nüveli primer sargıları yıldız bağlı ve üç fazlı üç bacaklı çekirdek biçimi nüveli primer sargıları üçgen bağlı transformatörlere etkilerinin analiz edilmesidir. Analizlerde boşta çalışma durumunda ölçülen; manyetik akı tepe değerleri, primer taraf akımlarının temel harmonik ve toplam etkin değerleri, primer taraf akımlarının toplam harmonik bozulma ve toplam talep bozulma değerleri, primer taraf akımlarının dengesizlik faktörü, sekonder taraf gerilimlerinin toplam harmonik bozulma, dengesizlik faktörü ve temel harmonik sapma değerleri, kayıplar ile temel harmonik reaktif güç talebi büyüklüklerinin DC uyarım seviyesiyle değişimleri yorumlandı. Son olarak; dikkate alınan transformatör tiplerinin toplam

kayıp ve primer taraf en yüksek akım etkin değerinin kriter olarak kabul edildiği iki farklı yaklaşımına göre DC uyarım altında azami yüklenme oranları incelendi.

Dengeli DC uyarım altında yapılan analizlerden, uyarım seviyesinin artışıyla,

- Tek fazlı ve Tip 2 üç fazlı transformatörlerin nüvelerinde dolaşan manyetik akı değerlerinin arttığı, bu iki transformatör nüvesinin doyuma ulaştığı, Tip 1 transformatörün nüvesinde dolaşan manyetik akı değerinin değişiklik göstermediği ve bu transformatörün doyuma ulaşmadığı,
- Toplam kaybın ( $\Delta P$ ) her üç transformatör tipi için artış gösterdiği, Tip 1 transformatörünün  $\Delta P$  değerindeki artışın diğer iki transformatöre göre daha az olduğu,
- Tek fazlı ve Tip 2 üç fazlı transformatörlerin reaktif güç taleplerinin ( $Q_1$ ) arttığı fakat Tip 1 transformatörünün  $Q_1$  değerinin değişmediği,
- Her üç transformatör tipi için primer faz akımı toplam etkin değerinin ( $I_P$ ) artış gösterdiği, primer faz akımının temel frekans etkin değerinin ( $I_{P1}$ ) tek fazlı ve Tip 2 üç fazlı transformatör için arttığı, Tip 1 üç fazlı transformatör için değişmediği,
- Tek faz ve Tip 2 üç fazlı transformatörlerin primer akımlarının harmonik bozulma indislerinde ( $TDDI_P$  ve  $THDI_P$ ), temel frekans geriliminin sapma değerinde ( $VD$ ) ve sekonder taraf geriliminin toplam harmonik bozulma indisinde ( $THDV_S$ ) önemli derecede değişim meydana geldiği, bu iki transformatör tipi için  $THDI_P$ 'nin azaldığı,  $TDDI_P$ ,  $VD$  ve  $THDV_S$  değerlerinin arttığı, ancak Tip 1 transformatör için böyle bir durumun söz konusu olmadığı,
- Tip 1 transformatörün DC uyarıma karşı diğer iki transformatör tipinden daha az hassas olduğu,

sonuçlarına varılmıştır.

Dengesiz DC uyarım altında Tip 1, 2 ve 3 üç fazlı transformatörleri için gerçekleştirilen analizlerden,

- Tip 3 transformatörün dengeli DC uyarım durumundan etkilenmediği, ancak dengesiz DC uyarım durumundan etkilendikleri,
- Üç farklı transformatör tipi için de reaktif güç talebinin, primer taraf akımlarının toplam ve temel harmonik etkin değerlerinin, primer taraf akımlarının toplam talep bozulma değerlerinin, sekonder taraf gerilimlerinin toplam harmonik bozulma değerlerinin, sekonder taraf gerilimlerinin nominal

değerden sapma miktarlarının, temel harmonik primer akım ve temel harmonik sekonder gerilim dengesizlik faktörlerinin DC uyarımın dengesizliğine bağlı olarak önemli değişim gösterdiği,

- Tip 1 hariç diğer transformatörler için kayıpların DC uyarım dengesizliğiyle önemli derecede değiştiği, görülmüştür.

Dengeli ve dengesiz DC uyarım altında Yaklaşım 1 ve 2'ye göre yapılan yeniden boyutlandırma analizlerinden,

- Dengeli DC uyarım altında azami yüklenme oranı bakımından en iyi transformatörün Tip 1 üç fazlı transformatör olduğu, tek fazlı ve Tip 2 üç fazlı transformatörlerin aynı azami yüklenme oranına sahip olduğu,
- Dengesiz DC uyarım altında azami yüklenme oranı bakımından en iyiden en kötüye transformatörlerin Tip 3, Tip 1 ve Tip 2 üç fazlı transformatörler olarak sıralanabileceği,
- Yaklaşım 1'e göre yeniden boyutlandırma yapıldığı takdirde, sargılardan aşırı akım akmasının önlenemeyeceği dolayısıyla transformatör sargılarının aşırı ısınacağı,
- DC uyarımın dengesiz olduğu durumda Yaklaşım 1 ve 2 ile hesaplanan DF değerleri arasındaki farkın büyüdüğü, ifade edilmiştir.

Bu tez çalışmasında, kullanılan SIMULINK modellerinde, histeresiz döngüsü ve sargıların frekans bağımlılığı dikkate alınmamıştır. Ayrıca, bu tez çalışması kapsamında, farklı X/R oranlarına ve farklı nüve malzemelerine sahip transformatörlerin DC uyarım altında davranışı çalışılmamıştır. Gelecek çalışmalarda, histeresiz döngüsü ve sargıların frekans bağımlılığı dikkate alınmış modeller kullanılarak, farklı X/R oranlarına ve farklı nüve malzemelerine sahip transformatörlerin DC uyarım altında davranışının analiz edilmesi hedeflenmiştir.

## 7. KAYNAKLAR

- [1] Price, P.R., “Geomagnetically induced current effects on transformers”, *IEEE Trans. Power Deliv.*, 17,1002-1008, doi: 10.1109/TPWRD.2002.803710, (2002).
- [2] Swiss Federal Office of Energy and swissgrid, “Geomagnetically Induced Currents in the Swiss Transmission Network”, Research Centre for Energy Networks, [https://www.swissgrid.ch/dam/swissgrid/current/News/2013/Schlussbericht\\_GIC.pdf](https://www.swissgrid.ch/dam/swissgrid/current/News/2013/Schlussbericht_GIC.pdf), en son erişim tarihi: Ekim 2018.
- [3] Tortal, J. M., Marsal, S., Quintana, M., “Assessing the hazard from geomagnetically induced currents to the entire high-voltage power network in Spain”, *Planets and Space*, 66-87, doi: 10.1186/1880-5981-66-87, (2014).
- [4] Girgis, R., Vedante, K., “Effects of GIC on power transformers and power systems”, *IEEE PES T&D Conf. and Exp.*, FL, USA, doi: 10.1109/TDC.2012.6281595, (2012).
- [5] Samuelsson, O., “Geomagnetic disturbances and their impact on power systems”, *Ind. Elec. Eng. Auto. Status Report 2013*, Lund University, doi: 10.1109/MPE.2013.2256651, (2013).
- [6] Tay, C. H., Swift, W. G., “On the problem of transformer overheating due to geomagnetically induced currents”, *IEEE Trans. on Power App. and Syst.*, PAS-104, 212-219, doi: 10.1109/TPAS.1985.318916, (1985).
- [7] Lu, S., Liu, Y., De La Ree, J., “Harmonics generated from a DC biased transformer”, *IEEE Trans. Power Deliv.*, 8, 725-731, doi: 10.1109/61.216881, (1993).
- [8] Girgis, R. S., Ko, C. D., “Calculation techniques and results of effects of GIC currents as applied to large power transformers”, *IEEE Trans. on Power Deliv.*, 7, 699-705, doi: 10.1109/61.127070, (1992).
- [9] Girgis, R., Vedante, K., “Methodology for evaluating the impact of GIC and GIC capability of power transformer designs”, *IEEE PES T&D Conf. and Exp.*, Vancouver, BC, Canada, doi: 10.1109/PESMG.2013.6672911, (2013).
- [10] Wu, Y. K., Lin, J. H., Lin, H. J., “Standards and guidelines for grid-connected photovoltaic generation systems: a review and comparison”, *IEEE Trans. Indus. Appl.*, 53, 3205–3216, doi: 10.1109/TIA.2017.2680409, (2017).

- [11] Dawalibi, F. P., Li, Y., Li, C., Liu, J., “Mitigation of transformer saturation due to neutral HVDC currents”, *IEEE PES T&D Conf. and Exp.*, Dalian, doi: 10.1109/TDC.2005.1546818, (2005).
- [12] Bolduc, L., Granger, M., Pare, G., Saintonge, J., Brophy, L., “Development of a DC current-blocking device for transformer neutrals”, *IEEE Trans. Power Deliv.*, 20, 163-168, doi: 10.1109/TPWRD.2004.835437, (2005).
- [13] Kovan, B., de León, F., “Mitigation of geomagnetically induced currents by neutral switching”, *IEEE Trans. on Power Deliv.*, 30, 1999-2006, doi: 10.1109/TPWRD.2015.2434411, (2015).
- [14] Hussein, A. A., Ali, M. H., “Suppression of geomagnetic induced current using controlled ground resistance of transformer”, *Electr. Pow. Syst. Res.*, 140, 9-19, doi: 10.1016/j.epsr.2016.07.005, (2016).
- [15] Etemadi, A. H., Rezaei-Zare, A., “Optimal placement of GIC blocking devices for geomagnetic disturbance mitigation”, *IEEE Trans. Power Syst.*, 29, 2753-2762, doi: 10.1109/TPWRS.2014.2309004, (2014).
- [16] Rezaei-Zare, A., Etemadi, A. H., “Optimal placement of GIC blocking devices considering equipment thermal limits and power system operation constraints”, *IEEE Trans. Power Deliv.*, 33, 200-208, doi: 10.1109/TPWRD.2017.2711502, (2018).
- [17] Masoum, M.A.S., Moses, P.S., “Impact of balanced and unbalanced direct current bias on harmonic distortion generated by asymmetric three-phase three-leg transformers”, *IET Electr. Power Appl.*, 4, 507–515, doi: 10.1049/iet-epa.2009.0311, (2010).
- [18] Aboura, F., Touhami, O., “Impact of balanced and unbalanced direct current bias on harmonic distortion generated by asymmetric three-phase three-leg transformers”, *IET Electr. Power Appl.*, 10, 614-622, doi: 10.1049/iet-epa.2009.0311 (2016).
- [19] Aboura, F., Touhami, O., “Effect of the GICs on magnetic saturation of asymmetric three-phase transformer”, *IET Electr. Power Appl.*, 11, 1306-1314, doi: 10.1049/iet-epa.2016.0868, (2017).
- [20] Samuelsson, O., “Power transformer immune to geomagnetically induced current”, *IEEE PES General Meeting*, Vancouver, BC, Canada, doi: 10.1109/PESMG.2013.6672596, (2013).

- [21] Viana, W. C., Micallef, R. J., Young, S., Dawson, F. P., Dick, E. P., “Transformer design considerations for mitigating geomagnetic induced saturation”, *IEEE Trans. on Magnetics*, 35, 3532-3534, doi: 10.1109/20.800580, (1999).
- [22] Hutchins, T.R., Overbye, T.J., “The effect of geomagnetic disturbances on the electric grid and appropriate mitigation strategies”, *IEEE North American Power Symposium (NAPS)*, doi: 10.1109/NAPS.2011.6025162, (2011).
- [23] Bolduca, L., Gaudreaux, A., Dutilb, A., “Saturation time of transformers under dc excitation”, *Electric Power Systems Research*, 56, 95-102, doi: 10.1016/S0378-7796(00)00087-0, doi: (2000).
- [24] Mathworks, “Simulink documentation”, <https://www.mathworks.com/help/physmod/sps/examples/three-phase-core-type-transformer.html>, en son erişim tarihi: Ekim 2018.