

**KARADENİZ TEKNİK ÜNİVERSİTESİ
FEN BİLİMLERİ ENSTİTÜSÜ**

ELEKTRİK-ELEKTRONİK MÜHENDİSLİĞİ ANABİLİM DALI

KAPAMA AÇISININ FERROREZONANS OLAYINA ETKİSİ

DOKTORA TEZİ

Elektrik-Elektronik Müh. Hilmi ZENK

**NİSAN 2014
TRABZON**

KARADENİZ TEKNİK ÜNİVERSİTESİ
FEN BİLİMLERİ ENSTİTÜSÜ

ELEKTRİK-ELEKTRONİK MÜHENDİSLİĞİ ANABİLİM DALI

KAPAMA AÇISININ FERROREZONANS OLAYINA ETKİSİ

Elektrik-Elektronik Müh. Hilmi ZENK

Karadeniz Teknik Üniversitesi Fen Bilimleri Enstitüsünde
"DOKTOR (ELEKTRONİK MÜHENDİSLİĞİ)"
Unvanı Verilmesi İçin Kabul Edilen Tezdir.

Tezin Enstitüye Verildiği Tarih : 08.04.2014
Tezin Savunma Tarihi : 28.04.2014

Tez Danışmanı: Prof. Dr. A. Sefa AKPINAR

Trabzon 2014

**Karadeniz Teknik Üniversitesi Fen Bilimleri Enstitüsü
Elektrik – Elektronik Mühendisliği Ana Bilim Dalında
Hilmi ZENK Tarafından Hazırlanan**

KAPAMA AÇISININ FERROREZONANS OLAYINA ETKİSİ

**başlıklı bu çalışma, Enstitü Yönetim Kurulunun 08 / 04 / 2014 gün ve 1548 sayılı
kararıyla oluşturulan jüri tarafından yapılan sınavda**

**DOKTORA TEZİ
olarak kabul edilmiştir.**

Jüri Üyeleri

Başkan : Prof. Dr. A. Sefa AKPINAR

Üye : Prof. Dr. Mehmet CEBECİ

Üye : Doç. Dr. H. İbrahim OKUMUŞ

Üye : Yrd.Doç. Dr. Hüseyin PEHLİVAN

Üye : Yrd. Doç. Dr. Fatih M. NUROĞLU

Prof. Dr. Sadettin KORKMAZ

Enstitü Müdürü

ÖNSÖZ

Bu çalışmada, anahtar kapama açısının transformatörlerinde oluşan ferreazonans olayına etkisinin yüksek gerilim ölçü transformatörleri özelinde incelenmiştir.

Doktora çalışmam dahil tüm eğitim ve öğretim hayatım boyunca beni yönlendiren ve destekleyen annem Fatma ZENK'e, babam Ahmet ZENK'e, kardeşlerime, doktora çalışmalarım süresince hoşgörüyü eksik etmeyen eşime minnettarım.

Doktora öğrenimim boyunca beni destekleyen ve yönlendiren doktora tez danışmanım Sayın Hocam Prof.Dr. Adem Sefa AKPINAR'a hoşgörüsü, güler yüzü ve çabalarından ötürü teşekkürlerimi saygı ve minnetle sunarım.

Hem ders hem de tez izleme aşamalarında eleştiri ve fikirleri ile bana yardımcı olan, beni yönlendiren Sayın Hocalarım, Doç.Dr. Halil İbrahim OKUMUŞ, ve Yrd.Doç.Dr. Hüseyin PEHLİVAN'a teşekkürlerimi saygıyla sunarım.

Bölüm Hocalarımızdan Sayın Yrd.Doç.Dr. Fatih Mehmet NUROĞLU'na ve Öğr.Gör.Dr. Emre ÖZKOP'a her türlü yardım ve katkıları için müteşekkirim.

Doktora öğrenimim boyunca gösterdikleri yakın ilgiden dolayı abim, Elektronik Yüksek Mühendisi Osman ZENK ve Elektrik Mühendisi Köksal ÇAMALTI'ya Giresun Üniversitesi, Rektör Yardımcısı ve Teknik Bilimler Meslek Yüksekokulu Müdürü Sayın Prof.Dr. Kürşad YAPAR'a hoşgörüsü ve yardımları nedeniyle şükran borçluyum.

Doktora çalışmalarım süresince, Giresun Üniversitesi, Teknik Bilimler Meslek Yüksekokulu, Elektronik laboratuvarında birlikte çalıştığımız Elektrik Teknikeri Sayın Hacı Bayram İPEKÇİ'ye teşekkür ediyorum.

Yine bölümümüz ASOL laboratuvarında birlikte çalıştığımız değerli arkadaşlarım, Araş.Gör. Mehmet EKİCİ'ye, Öğr.Gör.Dr. Hakan KAHVECİ'ye ve Gümüşhane Meslek Yüksekokulu'ndan Yrd.Doç.Dr. Talat ÖZDEN'e her türlü yardım ve katkılarından dolayı teşekkürlerimi sunuyorum.

TEDAŞ, Çoruh Elektrik Dağıtım A.Ş., Giresun İl Müdürlüğü ve GİRISO Ltd. Şti.'ye yaptıkları katkıdan dolayı teşekkür ediyorum.

Hilmi ZENK
Trabzon 2014

TEZ BEYANNAMESİ

Doktora Tezi olarak sunduğum “*KAPAMA AÇISININ FERROREZONANS OLAYINA ETKİSİ*” başlıklı bu çalışmayı baştan sona kadar danışmanım Prof.Dr. A. Sefa AKPINAR’ın sorumluluğunda tamamladığımı, verileri kendim topladığımı, deneyleri ilgili laboratuarlarda yaptığımı, başka kaynaklardan aldığım bilgileri metinde ve kaynakçada eksiksiz olarak gösterdiğimi, çalışma sürecinde bilimsel araştırma ve etik kurallara uygun olarak davrandığımı ve aksinin ortaya çıkması durumunda her türlü yasal sonucu kabul ettiğimi beyan ederim. 08/04/2014

Hilmi ZENK

İÇİNDEKİLER

	<u>Sayfa No</u>
ÖNSÖZ	III
TEZ BEYANNAMESİ.....	IV
İÇİNDEKİLER.....	V
ÖZET.....	X
SUMMARY.....	XI
ŞEKİLLER DİZİNİ.....	XII
TABLolar DİZİNİ.....	XXI
SİMGELER DİZİNİ.....	XXII
1. GENEL BİLGİLER	1
1.1. Giriş.....	1
1.2. Tezin Amacı ve Çözüm Yaklaşımı	3
1.3. Konu ile İlgili Yapılan Çalışmalar	4
1.3.1. Ferromanyetik Olayı Üzerine Yapılan Çalışmalar	4
1.4. Manyetizma	10
1.4.1. Bölgecik Yapısı	10
1.4.2. Anizotropi.....	11
1.4.3. Manyetik Duygunluk	11
1.4.4. Curie Sıcaklığı ve Curie-Weiss yasası	12
1.4.5. Manyetizma Türleri.....	13
1.4.5.1. Diyamanyetizma	13
1.4.5.2. Paramanyetizma.....	14
1.4.5.3. Ferromanyetizma	15
1.4.5.4. Ferrimanyetizma	17
1.4.5.5. Antiferromanyetizma	17
1.4.5.6. Süperparamanyetizma	19
1.5. Manyetik Alan	19
1.5.1. Manyetik Alan Üretimi	20
1.5.2. Manyetik Devreler	22
1.5.3. Ferromanyetik Malzemelerin Manyetik Davranışları.....	25

1.5.3.1.	Histerisiz Çevrimi	26
1.5.5.	Ferromanyetik Nüvedeki Enerji Kayıpları	29
1.5.5.1.	Histerisiz Kayıpları	29
1.5.5.2.	Girdap (Eddy) Akımı Kayıpları	29
2.	TRANSFORMATÖRLER	31
2.1.	Transformatörlerin İç Yapısı	32
2.1.1.	Çekirdek Tipi Yapılı Transformatörler	34
2.1.2.	Mantel (Ceket) Tip Yapılı Transformatörler	34
2.1.3.	Dağıtılmış Tip Yapılı Transformatörler	35
2.1.4.	Ferrit Tip Yapılı Transformatörler	35
2.2.	Transformatör Sargıları	36
2.2.1.	Silindirik Sargıları	36
2.2.2.	Dilimli Sargılar	36
2.2.3.	Transformatörlerin Sargı Polaritesi	37
2.3.	Transformatörlerin Çalışma İlkesi	38
2.4.	İdeal Transformatör	40
2.5.	Transformatör Eşdeğer Devresi	43
2.5.1.	Boşta Çalışma Deneyi	45
2.5.2.	Kısa Devre Deneyi	47
2.6.	Ölçü Transformatörleri	49
2.6.1.	Gerilim Trafosu	49
2.6.2.	Akım Trafosu	50
3.	ELEKTRİK DEVRELERİNDE REZONANS	52
3.1.	Kayıpsız Devre	53
3.2.	Kayıplı Devre	55
3.2.1.	Seri Rezonans Devresi	55
3.2.1.1.	Rezonans Durumu	57
3.2.1.2.	Rezonans Üstü Çalışma Durumu	58
3.2.1.3.	Rezonans Altı Çalışma Durumu	60
3.2.1.4.	Seri Rezonans Devresi Bant Genişliği	61
3.2.2.	Paralel Rezonans Devresi	62
3.2.2.1.	Rezonans Durumu	64
3.2.2.2.	Rezonans Üstü Çalışma Durumu	65

3.2.2.3.	Rezonans Altı Çalışma Durumu	67
4.	FERROREZONANS	69
4.1.	Basit Ferrerezonans Devresi.....	70
4.2.	Ferrerezonans Olayının Meydana Gelmesini Doğuran Durumlar	74
4.3.	Ferrerezonans Türleri ve Belirlenmesi.....	74
4.3.1.	Ferrerezonans Türlerinin Belirlenmesinde Yararlanılan Metotlar	75
4.3.1.1.	Faz Düzleminin Oluşturulması.....	75
4.3.1.2.	Frekans Spektrumu Dağılımı.....	75
4.3.1.3.	Poincaré Bölgesi	75
4.3.2.	Ferrerezonans Türleri ve Belirleyici Özellikleri.....	76
4.3.2.1.	Temel Mod Ferrerezonans	76
4.3.2.2.	Alt Harmonik (Subharmonik) Mod Ferrerezonans	77
4.3.2.3.	Yarı Periyodik Mod Ferrerezonans	79
4.3.2.4.	Kaotik (Karmaşık) Mod Ferrerezonans	80
4.3.3.	Ferrerezonansın Karakteristik Özellikleri	81
4.3.3.1.	Ferrerezonansın Değişen Sistem Parametrelerine Duyarlılığı	82
4.3.3.2.	Ferrerezonansın Sistem Başlangıç Koşullarındaki Değişime Duyarlılığı.....	83
4.4.	Ferrerezonansın Önlenmesi.....	83
4.5.	Ferrerezonans ile Lineer Rezonans Arasındaki Temel Farklar	84
4.6.	Ferrerezonans Olayını Etkileyen Durumlar	85
4.6.1.	Ferrerezonansa Hat Yapısının Tesiri	85
4.6.2.	Ferrerezonansa Sistem Geriliminin Genliğinin Tesiri	85
4.6.3.	Ferrerezonansa Yük Durumunun Tesiri.....	86
4.6.4.	Ferrerezonansa Transformator Çekirdek Yapısının Etkisi.....	87
4.6.5.	Ferrerezonansa Transformator Sargı Bağlantı Şekillerinin Etkisi.....	88
4.6.6.	Ferrerezonansa Transformator Boyutunun Etkisi.....	89
4.6.7.	Ferrerezonansa Kesici Yapısının Etkisi	89
4.6.8.	Ferrerezonansa Düşük Kayıplı Transformatorlerin Etkisi	90
4.6.9.	Gerilim Ölçü Transformatorlerinin ve Diğer Cihazların Etkisi.....	91
4.6.10.	Sistemin Kısa Devre Gücünün Büyüklüğünün Etkisi.....	91
5.	YAPILAN ÇALIŞMALAR.....	92
5.1.	Tasarlanan Sistemin Özeti.....	91
5.2.	Tasarlanan Sistemin Ana Bileşenleri	93

5.2.1.	Ayarlı Alternatif Gerilim Kaynağı.....	94
5.2.2.	Gerilim Trafoları.....	94
5.2.3.	Açma-Kapama Açısı Denetim Sistemi (ADS)	95
5.2.3.1.	Mikrodenetleyicili Açma Kapama Açısı Denetim Sistemi (MADS)	96
5.2.3.1.1.	Mikrodenetleyicili Açısı Denetim Sistemi (MADS) Denetleme Devresi.....	98
5.2.3.1.2.	Mikrodenetleyicili Açma Kapama Açısı Denetim Sistemi Güç Devresi.....	106
5.2.3.2.	Bilgisayar Denetimli Açma Kapama Açısı Denetim Sistemi (BADS).....	110
5.2.3.2.1.	Gerilim Algılama Devresi	111
5.2.3.2.2.	Veri Aktarım Kartı.....	112
5.2.3.2.3.	BADS İçin Matlab/Simulink Yazılımı.....	113
5.2.3.2.4.	Optik Yalıtım ve IGBT Anahtar Sürücü Devresi	114
5.2.4.	Algılama Devreleri.....	115
5.2.5.	Ferrezonans Devresi	116
5.2.6.	Yük Devresi.....	116
5.2.7.	Ölçüm Panosu.....	118
6.	BULGULAR	119
6.1.	Sistem Benzetiminden Elde Edilen Bulgular	119
6.1.1.	Boşta Çalışan Sistemin Matlab/Simulink Benzetimi	123
6.1.1.1.	Boşta Çalışan Sistemde BADS Anahtarların Görev Yapmadığı Durum	124
6.1.1.2.	Boşta Çalışan Sistemde BADS-1 Anahtarının $\alpha_{\text{kapama}}=30^\circ$ ve $\alpha_{\text{açma}}=0^\circ$ 'de Görev Yaptığı Durum	129
6.1.1.3.	Sistemde BADS-1 Anahtarının $\alpha_{\text{kapama}}=120^\circ$ ve $\alpha_{\text{açma}}=45^\circ$ 'de ve BADS-2 Anahtarının $\alpha_{\text{kapama}}=60^\circ$ ve $\alpha_{\text{açma}}=15^\circ$ 'de Görev Yaptığı Durum.....	139
6.1.2.	Yüklü Çalışan Sistemin Benzetimi	147
6.1.2.1.	Yüklü Çalışan Sistemde BADS-1 Anahtarının $\alpha_{\text{kapama}}=120^\circ$ ve $\alpha_{\text{açma}}=45^\circ$ 'de ve BADS-2 Anahtarının $\alpha_{\text{kapama}}=60^\circ$ ve $\alpha_{\text{açma}}=15^\circ$ 'de Görev Yaptığı Durum.....	149
6.2.	Deneysel Sistemdeki Gerilim Transformatörünün İncelenmesi.....	158
6.2.1.	Deneysel Sistemin Boşta Çalışma Durumu.....	159
6.2.1.1.	Boşta Çalışan Sistemde BADS Anahtarların Görev Yapmadığı Durum	161
6.2.1.2.	BADS-1 Anahtarının $\alpha_{\text{kapama}}=30^\circ$ ve $\alpha_{\text{açma}}=0^\circ$ 'de Görev Yaptığı Durum	168
6.2.1.3.	Sistemde BADS-1 Anahtarının $\alpha_{\text{kapama}}=120^\circ$ ve $\alpha_{\text{açma}}=45^\circ$ 'de ve BADS-2 Anahtarının $\alpha_{\text{kapama}}=60^\circ$ ve $\alpha_{\text{açma}}=15^\circ$ 'de Görev Yaptığı Durum.....	178

6.2.2.	Yüklü Çalışan Gerilim Transformatörü	183
6.2.2.1.	Yüklü Çalışan Sistemde BADS-1 Anahtarının $\alpha_{\text{kapama}}=120^\circ$ ve $\alpha_{\text{açma}}=45^\circ$ 'de ve BADS-2 Anahtarının $\alpha_{\text{kapama}}=60^\circ$ ve $\alpha_{\text{açma}}=15^\circ$ 'de Görev Yaptığı Durum.....	183
6.3.	Deneysel Sistem İle Benzetimlerin Karşılaştırılması.....	187
7.	SONUÇLAR.....	188
8.	ÖNERİLER	190
9.	KAYNAKLAR	191
10.	EKLER	198
	ÖZGEÇMİŞ	

Doktora Tezi

ÖZET

KAPAMA AÇISININ FERROREZONANS OLAYINA ETKİSİ

Hilmi ZENK

Karadeniz Teknik Üniversitesi
Fen Bilimleri Enstitüsü
Elektrik-Elektronik Mühendisliği Anabilim Dalı
Danışman: Prof. Dr. A. Sefa AKPINAR
2014, 197 Sayfa, 3 Ek Sayfa

Bu tez çalışmasında, elektrik tesislerinde yaygın olarak kullanılan transformatörlerde meydana gelen ferrerezonans olayında, devre kesici anahtarın kapama ve açma zamanlarının başka bir ifadeyle anahtarın elektriksel açılarının etkileri deneysel ve bilgisayar benzetimi yöntemleriyle incelenmiştir. Deneysel sistemde özel tasarlanmış ayarlı alternatif gerilim kaynağı, gerilim trafoları, iki farklı türde tasarım yapılan açma kontrollü yarı iletken anahtar devreleri, ferrerezonans devresi, gerilim ve akım algılayıcı devreler, sayısal veri aktarım cihazı ve bilgisayar programı kullanılmıştır. İlk bölümde, manyetizma türleri ve manyetik alan ferrerezonans olayı ile ilgili temel bilgiler verilmiştir. İkinci bölümde transformatörlerle ilgili detaylı bilgiler verilmiştir. Üçüncü bölümde elektrik devrelerinde meydana gelen lineer rezonans konusu ele alınmıştır. Dördüncü bölümde ferrerezonans olayı ve etkileri ile ilgili detaylı bilgiler verilmiştir. Beşinci bölümde donanımsal ve yazılımsal çalışmalara yer verilmiştir. Altıncı bölümde tasarlanan sistemin kısımları anlatılmış, tasarlanan Mikrodenetleyicili Açma Kapama Açısı Denetim Sistemi (MADS) ve Bilgisayar Denetimli Açma Kapama Açısı Denetim Sistemi (BADS) ayrı ayrı deneysel sistemde kullanılmış, elde edilen veriler incelenmiştir. Deneysel sisteme uygun olarak kurulan bilgisayar ortamındaki benzetim sonuçları ve deneysel çalışmaların sonuçları ile incelenmiş ve karşılaştırılmıştır. Elde edilen sonuçlar, literatürde sunulan sistemlerle karşılaştırıldığında göstermiştir ki; bu çalışmada sunulan elektronik kontrollü devre kesici anahtar açma denetim sistemi, büyük güçlü enerji sistemlerinde güç kalitesini yükseltmek için, ferrerezonans olayının meydana gelme risklerini ortadan kaldırmak için önemli katkılar sağlamaktadır.

Anahtar Kelimeler: *Ferrerezonans, Güç Kalitesi, Açma Denetim Sistemi (ADS), Mikrodenetleyicili Açma Kapama Açısı Denetim Sistemi (MADS), Bilgisayar Denetimli Açma Kapama Açısı Denetim Sistemi (BADS), Ferrerezonans Devresi, Gerilim Transformatörü (GT), Ferrerezonans Matlab/Simulink Benzetimi*

PhD. Thesis

SUMMARY

THE EFFECT OF TURNING-OFF ANGLE ON FERRORESONANCE EVENT

Hilmi ZENK

Karadeniz Technical University
The Graduate School of Natural and Applied Sciences
Electrical – Electronics Graduate Program
Supervisor: Prof. Dr. A. Sefa AKPINAR
2014, 197 Pages, 3 Appendix Pages

In this thesis study during a ferroresonance event that took place in transformers that are commonly used in all electrical plants, circuit breaker switch's opening/closing times, or in other words, effect of switch's electrical angles on the system parameters are monitored by experimental and computer resembled methods. In this experimental system the following were used: adjustable alternate voltage supply, voltage transformers, angle controlled semi-conductor switch circuits that were designed in two different ways, ferroresonance circuit, voltage and current detection circuits, digital data transfer device, and computer software. Chapter one explains magnetism and its various types, magnetic fields, and electrical conversion. Chapter two provides detailed information about transformers. Chapter three describes linear resonance that occurs in the electrical circuits. Chapter four describes in detail, ferroresonance event and its effects. Chapter five explains the work done on the hardware and software. Chapter six, the designed control system of micro controlled opening/closing angle (DCSMCOCA) and the control system of computer controlled opening/closing angle (CSCCOCA) that are used in the system are described and the results are explained. Results of the experimental study and resembled results on the computer that are suitable for the experiment are compared and investigated. When the results obtained from this experiment are compared with the modern day systems, it shows us that an electronically controlled, circuit breaker switch angle monitoring system such as presented in this study, adds an important addition to avoid the risk of a ferroresonance event taking place at high power energy systems, thus improving power quality.

Key Words: *Ferroresonance, Power Quality, Angle Monitoring System (AMS), Monitoring System of Micro Controlled Opening and Closing Angle (MSMOCA), Monitoring System of Computer Aided Opening and Closing Angle (MSCAOCA), Ferroresonance Circuit, Voltage Transformer (VT), Matlab / Simulink Benzetimi*

ŞEKİLLER DİZİNİ

Sayfa No

Şekil 1.1.	Ferromanyetik bir madde içinde birden çok domainin oluşturduğu spinlerin yönelimi ve manyetik alan altındaki davranışı	10
Şekil 1.2.	Curie-Weiss yasası paramanyetik fazın varlığının gösterilmesi	13
Şekil 1.3.	Diyamanyetik malzemelerin, (a) bir dış manyetik alan etkisi altındaki ve (b) sıcaklık değişimi karşısındaki manyetik duygunluğunun davranışları	14
Şekil 1.4.	Paramanyetik malzemelerin, (a) bir dış manyetik alan etkisi altındaki, (b) sıcaklık değişimi karşısındaki manyetik davranışları	14
Şekil 1.5.	Ferromanyetik düzene sahip spinlerin temsili gösterimi	15
Şekil 1.6.	Malzemelerin ferromanyetik davranış grafiği.....	16
Şekil 1.7.	Ferrimanyetik düzene sahip spinlerin temsili gösterimi	17
Şekil 1.8.	Antiferromanyetik düzene sahip spinlerin temsili gösterimi	18
Şekil 1.9.	Antiferromanyetik sistemde, (a) manyetik duygunluğun sıcaklığa bağlılığı, (b) numunenin antiferromanyetik davranışı.....	18
Şekil 1.10.	Antiferromanyetik düzene sahip spinlerin yöneliminin temsili gösterimi.....	19
Şekil 1.11.	Basit bir manyetik yapıda manyetik akının üretilmesi	20
Şekil 1.12.	Elektrik ve manyetik devrelerin karşılaştırılması.....	23
Şekil 1.13.	Bir manyetik devrede mmk kaynağı polaritesinin belirlenmesi.....	23
Şekil 1.14.	Hava aralığındaki manyetik akının saçak etkisi	25
Şekil 1.15.	Ferromanyetik Malzemenin Mıknatıslanma Eğrisi	26
Şekil 1.16.	Mıknatıslanma eğrisinin akı yoğunluğu.....	26
Şekil 1.17.	Histerisiz çevrimi.....	27
Şekil 1.18.	Harici manyetik alan şiddetinin olmadığı durum için, (a) domeinlerin rastgele yönelmiş hali, (b) harici manyetik alan şiddetinin domeinleri kendi etkilemesi durumu.....	28
Şekil 1.19.	(a) Blok demir nüvedeki eddy akımları, (b) Sac paketlerden yapılmış nüvedeki eddy akımları.....	30
Şekil 2.1.	Bir transformatör çekirdeği ve sembolleri	33
Şekil 2.2.	Bir transformatörün nüvesi ve sembolleri.....	34
Şekil 2.3.	Mantel tipi nüve ve hazırlanışı	34
Şekil 2.4.	Dağıtılmış tip nüve ve hazırlanışı	35
Şekil 2.5.	Ferrit tip yapılı tip nüve ve hazırlanışı.....	35

Şekil 2.6.	Silindirik sargı.....	36
Şekil 2.7.	Dilimli sargı.....	37
Şekil 2.8.	Transformatörlerin polaritesi.....	38
Şekil 2.9.	(a) Sekonderi boшта olan bir transformatör, (b) manyetik akının gerilimle değişimi.....	38
Şekil 2.10.	Yük bağlı ideal transformatör	41
Şekil 2.11.	Yük empedansı primere indirgenmiş ideal transformatör	42
Şekil 2.12.	Sekonderine yük bağlı, (a) ideal bir transformatör, (b) eşdeğer devresi.....	42
Şekil 2.13.	Gerçek bir transformatörün eşdeğer devresi	43
Şekil 2.14.	Boşta alışma eşdeğer devresi.....	44
Şekil 2.15.	Yüklü alışma eşdeğer devresi	44
Şekil 2.16.	Primer tarafına indirgenmiş eşdeğer devre	45
Şekil 2.17.	Boşta alışma deneyi bağlantı şeması.....	46
Şekil 2.18.	Kısa devre deneyi bağlantı şeması.....	48
Şekil 2.19.	Gerilim transformatörünün yapısı	49
Şekil 2.20.	Gerilim transformatörlerinin şematik gösterimi.....	50
Şekil 2.21.	Farklı tiplerdeki gerilim transformatörleri	50
Şekil 2.22.	Akım transformatörlerinin sembolleri	51
Şekil 2.23.	Akım transformatörünün yapısı.....	51
Şekil 2.24.	Farklı tipteki akım transformatörleri	51
Şekil 3.1.	Kayıpsız devre (a) zaman alanı gösterimi, (b) fazör alanı gösterimi.....	53
Şekil 3.2.	Endüktif kayıpsız devrenin fazör diyagramı	54
Şekil 3.3.	Kapasitif kayıpsız devrenin fazör diyagramı	54
Şekil 3.4.	Elemanter L,C devre analizi.....	55
Şekil 3.5.	Kayıplı devrenin zaman alanı gösterimi	56
Şekil 3.6.	Rezonans alışma, (a) gerilim-akım fazör diyagramı, (b) empedans fazör diyagramı	58
Şekil 3.7.	Rezonans üstü çalışma, (a) gerilim-akım fazör diyagramı, (b) empedans fazör diyagramı	59
Şekil 3.8.	Rezonans altı çalışma, (a) gerilim-akım fazör diyagramı, (b) empedans fazör diyagramı	60
Şekil 3.9.	Seri rezonans devresi reaktans-frekans grafiği.....	61
Şekil 3.10.	Seri rezonans devresi akım-frekans grafiği.....	62
Şekil 3.11.	Paralel rezonans devresi.....	63

Şekil 3.12.	Rezonans çalışma, (a) akım fazör diyagramı, (b) empedans fazör diyagramı	64
Şekil 3.13.	Paralel LC devresi rezonans üstü çalışma devre şeması.....	65
Şekil 3.14.	Paralel LC devresi rezonans üstü çalışma durumu akımların vektörel diyagramı	66
Şekil 3.15.	Paralel LC devresi rezonans üstü çalışma grafiği.....	66
Şekil 3.16.	Paralel LC devresi rezonans altı çalışma durumu akımların vektörel diyagramı	67
Şekil 3.17.	Paralel LC devresi rezonans altı çalışma grafiği	68
Şekil 4.1.	Kapalı manyetik devreye sarılmış bir bobinin devreye bağlanması.....	70
Şekil 4.2.	Kapalı manyetik devreye sarılmış bir bobinin basitleştirilmiş manyetik akı-akım karakteristiği.....	71
Şekil 4.3.	Kondansatör gerilimi, seri devre akımı ve demir çekirdekli indüktanstaki manyetik akının zamanla değişim eğrileri	72
Şekil 4.4.	Temel ferreazonans türü için, (a) gerilim-zaman grafiği, (b) temel ferreazonans tipinde gerilim bileşenlerine ait frekans spektrumu	76
Şekil 4.5.	Temel ferreazonans tipi için (a) faz düzlemi, (b) temel ferreazonans hali için Poincaré bölgesini oluşturan tek nokta	77
Şekil 4.6.	Alt-harmonik ferreazonans türü için, (a) gerilim-zaman grafiği, (b) $n=3$ için sürekli hal çalışmasında gerilim bileşenlerine ait spektrum	78
Şekil 4.7.	Alt-harmonik ferreazonans modunda, (a) $n=3$ için faz düzlemi gösterimi, (b) Poincaré bölgesini oluşturan üç nokta	78
Şekil 4.8.	Yarı harmonik ferreazonans türü için, (a) gerilim-zaman grafiği (b) $n=3$ için sürekli hal çalışmasında gerilim bileşenlerine ait spektrum	79
Şekil 4.9.	Yarı periyodik ferreazonans modda oluşan kapalı eğri şeklindeki Poincaré bölgesi	79
Şekil 4.10.	Kaotik mod ferreazonans türü için, (a) gerilim-zaman grafiği, (b) gerilim bileşenlerine ait spektrum	80
Şekil 4.11.	Kaotik ferreazonans modunda oluşan kapalı eğri şeklindeki Poincaré bölgesi.....	80
Şekil 4.12.	Bir ferreazonans devresi	81
Şekil 4.13.	Sıçrama olayı ve sistem parametrelerine hassasiyet.....	82
Şekil 4.14.	Ferreazonans olayının olma ihtimali düşük olan ya da hiç olmayan bağlantılar	88
Şekil 4.15.	Ferreazonans olayının olma ihtimali yüksek olan bağlantılar	89
Şekil 5.1.	Tasarlanan ferreazonans sisteminin ana blok diyagramı.....	92
Şekil 5.2.	Tasarlanan ferreazonans sistemine ayarlı gerilim sağlayan ayarlı alternatif gerilim kaynağı.....	94

Şekil 5.3.	Sistemde kullanılan gerilim trafolarının, (a) bağlantı diyagramı, (b) görüntüsü	95
Şekil 5.4.	ADS bağlı tüm sistemin görsel blok diyagramı (MADS bağlı).....	96
Şekil 5.5.	MADS sisteminin ana blok diyagramı.....	98
Şekil 5.6.	Sistemin kurulduğu ve benzetiminin yapıldığı ISIS/Proteus paket programı ile hazırlanmış devre benzetimi	99
Şekil 5.7.	Sistemin kurulduğu, (a) denetleme devresi açılış ekranı ve tuş takımları, (b) programın çalışması ile LCD ekrandaki anahtarlama açılış giriş ekranı	100
Şekil 5.8.	Güç devresi için IGBT elektronik anahtarına gönderilecek buton ile girilen anahtarlama açılarının girişinin LCD ekrandaki görüntüsü.....	101
Şekil 5.9.	AC işaret sayısallaştırma devresi, (a) devre şeması, (b) tasarlanan devre	101
Şekil 5.10.	Osiloskoptan alınan örnekleme işaretleri.....	102
Şekil 5.11.	Anahtar gecikme zamanlarının düzenleyen algoritma.....	102
Şekil 5.12.	Bağlandığı faz için MADS Anahtar gecikmelerinin osiloskop görüntüsü ...	103
Şekil 5.13.	Elektronik anahtarlara gönderilen işaretler ile ilgili gecikme katsayıları	104
Şekil 5.14.	MADS, LCD ekranında açma açılış girişi için komut beklediği durum.....	104
Şekil 5.15.	Anahtarları OFF konumuna almak için açılış girişi yapıldıktan sonra BAŞLAT butonu ile değişen LCD ekran görüntüleri	105
Şekil 5.16.	MADS, anahtarları OFF konumuna aldıktan sonra yeniden ON konumuna alması için yaptığı yapılandırmalar esnasında değişen LCD ekran görüntüleri	105
Şekil 5.17.	4N25 optokuplör entegresinin, (a) bacak numaraları ve iç bağlantısı, (b)test bağlantı devresi.....	106
Şekil 5.18.	IR2117/IR2118 entegresinin, (a) bacak numaraları, (b) sürücü bağlantı devresi ve (c) entegre iç blok diyagramı.....	107
Şekil 5.19.	Bir IGBT ve dört diyot ile iki yönde de akım geçişine izin verecek devre ..	108
Şekil 5.20.	Bir IGBT ve dört diyot ile iki yönde de akım geçişine izin verecek devre Matlab/Simulink modeli.....	108
Şekil 5.21.	İki yönde akım geçişine izin verecek devredeki parametrelerinin değişimi.....	109
Şekil 5.22.	BADS sistemin ana blok diyagramı	110
Şekil 5.23.	SC2 gerilim sensörünün bağlantı diyagramı	111
Şekil 5.24.	NI PCI 6221 (37 Pin) veri aktarım kartı ve terminal bağlantıları	112
Şekil 5.25.	BADS için Matlab/Simulink benzetim programında hazırlanan giriş ve çıkış bağlantısı.....	113
Şekil 5.26.	BADS için Matlab/Simulink benzetim programında hazırlanan ve mantıksal işlemlerin yapıldığı hesaplama alt bloğu	114

Şekil 5.27.	SC2A-25A akım algılayıcısı bağlantı şeması.....	115
Şekil 5.28.	Sistemde kullanılan ferrozonans devresi	116
Şekil 5.29.	Sisteme bağlanan yüklerin, (a) görüntüsü, (b) ve (c) kumanda devreleri.....	117
Şekil 5.30.	Sistem ölçüm panosu	118
Şekil 6.1.	Simülasyonda kullanılan tüm sistemin Matlab/Simulink genel görüntüsü...	120
Şekil 6.2.	Ana sistemin, (a) OLCUMLER altbloğu, (b) KONTROL altbloğu, (c) OLCUMLER altbloğu içerisindeki TR1_OLCUM altbloğunun detayı	121
Şekil 6.3.	Boşta tasarlanan sistemin alt bloklarının detayları, (a) OLCUMLER altbloğu içerisindeki TR1 FOURIER ANALIZ altbloğu, blok içindeki (b) THD altbloğu ve (c) FFT altbloğunun detaylı Matlab/Simulink görüntüsü	122
Şekil 6.4.	Boşta çalışan sistemin Matlab/Simulink genel görüntüsü	123
Şekil 6.5.	Yükseltici TR1 gerilim transformatörü üzerindeki elektriksel parametrelerinin boşta çalışma durumundaki zamanla değişimleri	124
Şekil 6.6.	TR2 gerilim transformatörünün parametrelerinin boşta çalışma durumundaki zamanla değişimleri	125
Şekil 6.7.	TR1 gerilim transformatörünün boşta çalışma durumundaki, (a) mıknatıslanma akımı (b) manyetik akı değişimini histerisiz çevrimi, TR2 gerilim transformatörünün boşta çalışma durumundaki (c) mıknatıslanma akımı ile (d) manyetik akı değişimini histerisiz çevrimi zamanla değişimleri.....	126
Şekil 6.8.	Detaylı TR2 boşta çalışma durumundaki, (a) mıknatıslanma akımı ile manyetik akı değişimini histerisiz çevrimi, (b) Br ve (c) Hg	127
Şekil 6.9.	Boşta çalışma durumu, TR1 ve TR2 gerilim transformatörleri primer sargı gerilimine ait birim değer (pu) cinsinden fourier analizi (a) TR1-2. Der. Bil. (b) TR1-3. Der. Bil. (c) TR2-2. Der. Bil. (d)TR2-3. Der. Bil.....	128
Şekil 6.10.	Boşta çalışma durumu TR2 gerilim transformatörü sekonder sargı gerilimine ait birim değer cinsinden fourier analizi, (a) 2. Derece bileşeni, (b) 3. Derece bileşeni.....	129
Şekil 6.11.	Boşta çalışma durumu yalnız BADS-1 anahtarlarının aktif olduğu durum ..	130
Şekil 6.12.	(a) BADS-1 anahtarının girişi gelen TR1 gerilim transformatörü primer sargı gerilimi, (b) BADS-1 anahtarının ürettiği kapama ve aşma işaretleri, (c) ve (d) BADS-1 anahtarının girişi gelen ve çıkışında üretilen işaretin kısa bir zaman aralığı için detaylı analizi	131
Şekil 6.13.	TR1 gerilim transformatörünün parametrelerinin boşta çalışma durumundaki zamanla değişimleri	133
Şekil 6.14.	TR2 gerilim transformatörünün parametrelerinin boşta çalışma durumundaki zamanla değişimleri	134

Şekil 6.15.	TR1 gerilim transformatörünün boşa çalışma durumunda, $\alpha_{\text{kapama}} = 30^\circ$ ve $\alpha_{\text{acma}} = 0^\circ$ için mıknatıslanma akımı ile manyetik akı değişimini histerisiz çevrimi	135
Şekil 6.16.	TR2 gerilim transformatörünün boşa çalışma durumundaki mıknatıslanma akımı ile manyetik akı değişimini histerisiz çevrimi	136
Şekil 6.17.	Boşa çalışma durumu, TR1 ve TR2 gerilim transformatörleri primer sargı gerilimine ait birim değer (pu) cinsinden fourier analizi, (a) TR1-2. Der. Bil. (b) TR1-3. Der. Bil., (c) TR2-2. Der. Bil. ve (d)TR2-3. Der. Bil	137
Şekil 6.18.	Boşa çalışma durumu, TR2 gerilim transformatörü sekonder sargı gerilimine ait birim değer cinsinden fourier analizi, (a) 2. Derece bileşeni, (b) 3. Derece bileşeni.....	138
Şekil 6.19.	(a) BADS-1 anahtarının girişi gelen gerilim ve BADS-1 anahtarının ürettiği kapama ve aşma işaretleri, (b) TR1 gerilim transformatörünü sekonder sargı gerilimi olan ve BADS-2 anahtarının girişi gelen gerilim ve anahtar çıkışında üretilen işaretler	139
Şekil 6.20.	TR1 gerilim transformatörünün parametrelerinin boşa çalışma durumundaki zamanla değişimleri	140
Şekil 6.21.	TR1 gerilim transformatörünün birim değer cinsinden bazı parametrelerinin boşa çalışma durumundaki zamanla değişimleri	141
Şekil 6.22.	TR2 gerilim transformatörünün birim değerler cinsinden bazı parametrelerinin boşa çalışma durumundaki zamanla değişimleri	141
Şekil 6.23.	TR2 gerilim transformatörünün parametrelerinin boşa çalışma durumundaki zamanla değişimleri	142
Şekil 6.24.	TR1 gerilim transformatörünün boşa çalışma durumunda primerdeki BADS-1 anahtarı $\alpha_{\text{kapama}} = 120^\circ$ ve $\alpha_{\text{acma}} = 45^\circ$ için ve sekonderdeki BADS-2 anahtarı $\alpha_{\text{kapama}} = 60^\circ$ ve $\alpha_{\text{acma}} = 15^\circ$ için mıknatıslanma akımı ile manyetik akı değişimini histerisiz çevrimi	143
Şekil 6.25.	TR2 gerilim transformatörünün boşa çalışma durumundaki mıknatıslanma akımı ile manyetik akı değişimini histerisiz çevrimi	144
Şekil 6.26.	Boşa çalışma durumu TR1gerilim transformatörü primer sargı gerilimine ait birim değer cinsinden fourier analizi, (a) 2. Derece bileşeni, (b) 3. Derece bileşeni.....	145
Şekil 6.27.	Boşa çalışma durumu TR2gerilim transformatörü primer sargı gerilimine ait birim değer cinsinden fourier analizi, (a) 2. Derece bileşeni, (b) 3. Derece bileşeni.....	146
Şekil 6.28.	Boşa çalışma durumu TR2 gerilim transformatörü sekonder sargı gerilimine ait birim değer cinsinden fourier analizi, (a) 2. Derece bileşeni, (b) 3. Derece bileşeni.....	147
Şekil 6.29.	Yük bağlanmış tam sistemin görüntüsü.....	148
Şekil 6.30.	(a) BADS 1, (b) BADS 2 ve (c) BADS 3 açılı denetim sistemine gelen gerilim ve bunların kesiciler için ürettiği kapama ve açma işaretleri.....	149

Şekil 6.31.	ADS kontrollü kesicilerin bağlı olduğu, TR1 gerilim transformatörünün parametrelerinin yüklü çalışma durumundaki zamanla değişimleri.....	150
Şekil 6.32.	TR1 gerilim transformatörünün birim değer cinsinden manyetik akı, primer ve sekonder gerilimlerinin yüklü çalışma durumundaki zamanla değişimleri.....	151
Şekil 6.33.	TR2 gerilim transformatörünün birim değerler cinsinden bazı parametrelerinin boşa çalışma durumundaki zamanla değişimleri	152
Şekil 6.34.	TR2 gerilim transformatörünün birim değer cinsinden manyetik akı, primer ve sekonder gerilimlerinin yüklü çalışma durumundaki zamanla değişimleri.....	152
Şekil 6.35.	TR1 gerilim transformatörünün yüklü çalışma durumunda primerdeki BADS-1 anahtarı $\alpha_{\text{kapama}} = 120^\circ$ ve $\alpha_{\text{acma}} = 45^\circ$ için ve sekonderdeki BADS-2 anahtarı $\alpha_{\text{kapama}} = 60^\circ$ ve $\alpha_{\text{acma}} = 15^\circ$ için mıknatıslanma akımı ile manyetik akı değişimini histerisiz çevrimi	153
Şekil 6.36.	TR2 gerilim transformatörünün yüklü çalışma durumundaki mıknatıslanma akımı ile manyetik akı değişimini histerisiz çevrimi	154
Şekil 6.37.	Yüklü çalışma durumu TR1 gerilim transformatörü primer sargı gerilimine ait birim değer cinsinden fourier analizi, (a) 2. Derece bileşeni, (b) 3. Derece bileşeni.....	155
Şekil 6.38.	Yüklü çalışma durumu TR2 gerilim transformatörü primer sargı gerilimine ait birim değer cinsinden fourier analizi, (a) 2. Derece bileşeni, (b) 3. Derece bileşeni.....	156
Şekil 6.39.	Yüklü çalışma durumu TR2 gerilim transformatörü sekonder sargı gerilimine ait birim değer cinsinden fourier analizi (a) 2. Derece bileşeni (b) 3. Derece bileşeni.....	157
Şekil 6.40.	Deneysel Sistemin genel görünümü	158
Şekil 6.41.	Deneysel sistemin boşa çalışma durumu için elektriksel parametrelerinin izlenmesi için oluşturulan benzetim bloğu	160
Şekil 6.42.	Rastgele anahtarlama yapılması durumunda yükseltici TR1 gerilim transformatörü üzerindeki P1 sargısından geçen akımın boşa çalışma durumundaki zamanla değişimleri	161
Şekil 6.43.	Rastgele anahtarlama yapılması durumunda, boşa çalışan yükseltici TR1 gerilim transformatörü üzerindeki P1 sargısının gerilim işareti.....	162
Şekil 6.44.	Rastgele anahtarlama yapılması durumunda, boşa çalışan yükseltici TR1 gerilim transformatörü üzerindeki S1 sargısının gerilim işareti.....	163
Şekil 6.45.	Rastgele anahtarlama yapılması durumunda indirici TR2 gerilim transformatörü üzerindeki S1 sargısından geçen akımın boşa çalışma durumundaki zamanla değişimleri	164
Şekil 6.46.	Rastgele anahtarlama yapılması durumunda, boşa çalışan indirici TR2 gerilim transformatörü üzerindeki S1 sargısının gerilim işareti	165

Şekil 6.47.	Rastgele anahtarlama yapılması durumunda, boşta çalışan indirici TR2 gerilim transformatörü üzerindeki S2 sargısının gerilim işareti	166
Şekil 6.48.	Boşta çalışma durumu; TR1 ve TR2 gerilim transformatörleri primer sargı gerilimine ait fourier analizi	167
Şekil 6.49.	TR2 boşta çalışma durumundaki mıknatıslanma akımı ile manyetik akı değişimini histerisiz çevrimi	168
Şekil 6.50.	TR1 boşta çalışma durumunda anahtar kapama anındaki THD değişimi.....	168
Şekil 6.51.	Boşta çalışma durumu yalnız BADS-1 anahtarlarının aktif olduğu durum.....	169
Şekil 6.52.	Boşta çalışma durumu yalnız BADS-1 anahtarlarının aktif olduğu durumda TR1 gerilim trafosu, P1 sargı akımı işaretleri	170
Şekil 6.53.	Boşta çalışma durumu yalnız BADS-1 anahtarlarının aktif olduğu durumda TR1 gerilim trafosu, P1 sargı gerilimi işaretleri.....	171
Şekil 6.54.	Boşta çalışma durumu yalnız BADS-1 anahtarlarının aktif olduğu durumda TR1 gerilim trafosu, P2 sargı gerilimi işaretleri.....	172
Şekil 6.55.	Boşta çalışma durumu yalnız BADS-1 anahtarlarının aktif olduğu durumda TR2 gerilim trafosu, S1 sargı akımı işaretleri	173
Şekil 6.56.	Boşta çalışma durumu yalnız BADS-1 anahtarlarının aktif olduğu durumda TR2 gerilim trafosu, S1 sargı gerilimi işaretleri.....	174
Şekil 6.57.	Boşta çalışma durumu yalnız BADS-1 anahtarlarının aktif olduğu durumda TR2 gerilim trafosu, S2 sargı gerilimi işaretleri.....	175
Şekil 6.58.	TR1 gerilim transformatörünün boşta çalışma durumunda $\alpha_{\text{kapama}} = 30^\circ$ ve $\alpha_{\text{acma}} = 0^\circ$ için mıknatıslanma akımı ile manyetik akı değişimini histerisiz çevrimi	176
Şekil 6.59.	TR1 ve TR2 gerilim transformatörlerinde boşta çalışma durumunda toplam harmonik bozulma işaretleri.....	176
Şekil 6.60.	Boşta çalışma durumu; TR1 ve TR2 gerilim transformatörleri primer sargı gerilimine ait fourier analizi	177
Şekil 6.61.	BADS-1 ve BADS-2 birlikte görev yaptığı durum için Matlab/Simulink bloğu	178
Şekil 6.62.	BADS-1 ve BADS-2 bağlı, TR1 gerilim trafosu için, P1 sargı akımı işaretleri	179
Şekil 6.63.	BADS-1 ve BADS-2 bağlı, TR1 gerilim trafosu için, P1 sargı gerilimi işaretleri	179
Şekil 6.64.	BADS-1 ve BADS-2 bağlı, TR1 gerilim trafosu için, P2 sargı gerilimi işaretleri	180
Şekil 6.65.	BADS-1 ve BADS-2 bağlı, TR2 gerilim trafosu için, S1 sargı akımı işaretleri	180
Şekil 6.66.	BADS-1 ve BADS-2 bağlı, TR2 gerilim trafosu için, S1 sargı gerilimi işaretleri	181

Şekil 6.67.	BADS-1 ve BADS-2 bağlı, TR2 gerilim trafosu için, S2 sargı gerilimi işaretleri	181
Şekil 6.68.	TR1 ve TR2 gerilim transformatörlerinin boşa çalışma durumunda, (a) primerdeki BADS-1, (b) sekonderdeki BADS-2 anahtarları için mıknatıslanma akımı ile manyetik akı değişimini histerisiz çevrimleri	182
Şekil 6.69.	TR1 ve TR2 için verilen durumundaki toplam harmonik bozulma işaretleri	182
Şekil 6.70.	BADS-1 ve BADS-2 bağlı, yük altındaki TR1 gerilim trafosu için, P1 sargı akımı işaretleri	183
Şekil 6.71.	BADS-1 ve BADS-2 bağlı, yük altındaki TR1 gerilim trafosu için, P1 sargı gerilimi işaretleri.....	184
Şekil 6.72.	BADS-1 ve BADS-2 bağlı, yük altındaki TR1 gerilim trafosu için, P2 sargı gerilimi işaretleri.....	184
Şekil 6.73.	BADS-1 ve BADS-2 bağlı, yük altındaki TR2 gerilim trafosu için, P1 sargı akımı işaretleri	185
Şekil 6.74.	BADS-1 ve BADS-2 bağlı, yük altındaki TR2 gerilim trafosu için, P1 sargı gerilimi işaretleri.....	185
Şekil 6.75.	BADS-1 ve BADS-2 bağlı, yük altındaki TR2 gerilim trafosu için, S2 sargı gerilimi işaretleri.....	186
Şekil 6.76.	Yüklü çalışan, TR1 ve TR2 gerilim transformatörünün primerdeki BADS-1 anahtarı $\alpha_{\text{kapama}} = 120^\circ$ ve $\alpha_{\text{acma}} = 45^\circ$ için ve sekonderdeki BADS-2 anahtarı $\alpha_{\text{kapama}} = 60^\circ$ ve $\alpha_{\text{acma}} = 15^\circ$ için mıknatıslanma akımı ile manyetik akı değişimini histerisiz çevrimi	187
Ek Şekil 1.	Güç ünitesi baskı devre şeması görüntüsü	198
Ek Şekil 2.	Güç ünitesi üç boyutlu görüntüsü.....	199
Ek Şekil 3.	Güç devresi resmi	199

TABLolar DİZİNİ

	<u>Sayfa No</u>
Tablo 5.1. Veri aktarım kartına bağlanan sensörlerin türü ve bağlantı portları.....	113
Tablo 5.2. Yük devresindeki elemanlar ve güçleri	117

SEMBOLLER DİZİNİ

ADS	Açma-Kapama Açısı Denetim Sistemi
AEK	Ana Enerji Kaynağı
AGT	Alçaltıcı Gerilim Transformatörü
BADS	Bilgisayar Kontrollü Açma Kapama Açısı Denetim Sistemi
DSP	Sayısal İşaret İşleyici
EYS	Enerji Yönetim Sistemi
HES	Hall Etkili Sensörler
MADS	Mikrodenetleyicili Açma Kapama Açısı Denetim Sistemi
MMK	Manyetomotor Kuvvet
YEK	Yardımcı Enerji Kaynağı
a	Transformatör Dönüştürme Oranı
A	Akının Gördüğü Kesit
B	Manyetik Akı Yoğunluğu
\vec{B}	Manyetik Akı Yoğunluğu Vektörü
B_r	Çekirdekteki Kalıcı Akı yada Artık Mıknatısiyet (Remenans)
C	Her Malzeme İçin Değişen Bir Sabit
dA	Birim Alanındaki Artış
dl	İntegrasyon Yolu Boyunca Uzunluğun Diferansiyel Elemanı
e_i	Bir İletkente İndüklenen Gerilimin Değeri
E_L	İndüktansta Depolanan Elektromanyetik Enerji
E_C	Kondansatörde Oluşan Elektrostatik Enerji
f_r	Rezonans Frekansı
\mathfrak{S}	MMK
\mathfrak{S}_c	Koerzitif Manyetomotor Kuvvet
H	Manyetik Alan Şiddeti
I_H	Hat Akımı
i_ϕ	Uyartım Akımı
I_k	Kısa Devre Akımı

l	Akı Yolu Uzunluğu
\vec{l}	Yörünge Dipol Momenti
L_S	Saturasyon İndüktansı
L_l	Kaçak İndüktans
\vec{l}	İletkenin Doğrultu Vektörü
l_c	Çekirdeğin Ortalama Yol Uzunluğu
μ	Geçirgenlik Katsayısı
N	Bobinin Sarımı
η	Verim
P_h	Histerisiz Kayıpları
P_k	Aktif Güç
\mathfrak{R}	Relüktans
\vec{s}	Spin Manyetik Dipol Momentidir
t_l	Levha Sac Kalınlığı
T	Sıcaklık
T_c	Curie Sıcaklığı
v	Hız Vektörü
V	Nüve Hacmi
$\%VR$	Gerilim Regülasyonu
ω	Açısal Hız
X_l	Kaçak Reaktansı
χ	Manyetik Duygunluk
X_C	Kapasitif Reaktans
X_L	İndüktif Reaktans
Y_E	Uyartım Admitansı
V_k	Kısa Devre Gerilimi
ϕ_m	Ortak Manyetik Akısı
K_e	Manyetik Malzemenin İletkenliğine Bağlı Bir Sabit
λ	İndüklenen Gerilim Sargı Akısı
$\Delta\phi$	Manyetik Akı Değişimi

1. GENEL BİLGİLER

1.1. Giriş

Son yıllarda hızla artan enerji ihtiyacı ve buna paralel olarak yükselen enerji fiyatları ve çevre kirliliği gibi etkenler insanları yenilenebilen enerji kaynaklarına ve özellikle üretilen enerjiyi verimli kullanmaya yöneltmektedir. Yenilenebilir kaynakların sürekli olması ve çevre kirliliğine neden olmaması birçok araştırmacının dikkatini bu alana çekmiştir. Ancak enerji ne şekilde üretilirse üretilsin, kayıpların azaltılması her zaman üzerinde çalışılmaya değer bir alandır [1].

Transformatörler güç sistemlerinde en yaygın kullanılan elemanların başında gelmektedir. Transformatörler lineer bölgede çalışırken elektromanyetik enerji dönüşümünü yüksek oranda bir verim ile sağlamaktadır. Ancak transformatörün ferromanyetik çekirdeğinin doymaya başlamasıyla birlikte enerji dönüşümünün verimi düşmeye başlar dolayısıyla kayıplar artmaya başlar.

Elektrik makinelerinin demir kayıplarının azaltılması, ferromanyetik malzemelerin alternatif mıknatıslanması, dinamo ve transformatör levhalarının demir kayıpları, statik ve simetrik mıknatıslamada histeresiz kayıpları, foucault kayıplarının azaltılması gibi konular araştırmacıların uzun zamandan beri üzerinde çalıştığı ana amaçlar olarak karşımıza çıkmaktadır.

Elektrik şebekeleri pek çok elektrik üretim sistemlerinin de yer aldığı karmaşık bir yapıya sahiptir. Yükteki sürekli değişimler ve doğrusal olmayan yükler hem sistemin karmaşıklığını artırmakta hemde harmoniklere neden olmaktadır. Elektrik enerji sistemlerinde akım, gerilim gibi büyüklüklerin dalga şekli temel frekanslı sinüzoidal bir değişime sahip olmalıdır. Bu değişim için sistemin sinüzoidal kaynakla beslenmesi ve doğrusal yüklerle yüklenmesi gereklidir. Fakat güç sistemlerine bağlanan ve sayıları gittikçe artan çeviriciler, ark fırınları, güç elektroniği elemanları statik VAR kompanzatorleri gibi doğrusal olmayan yükler, sistemdeki akım ve gerilim dalga şekillerinin sinüzoidal olmamasına yani harmonik bileşenler sahip olmasına neden olabilir. Enerji iletim sistemlerinde meydana gelen ferrezonans olayı, sistemde oluşan aşırı gerilim veya akım olarak kendini gösterir. Sistemde bir arıza sonucunda meydana gelen bu

yüksek akım veya gerilimler, dalga formu ve genliğinden dolayı kısa sürede şebekede yıkıcı ve onarılamaz arızalara sebep olarak, büyük maddi ve iş kayıplarına sebep olmaktadır [2].

Ferrorezonans, elektrik güç sistemlerinin en ciddi problemlerinden biridir [3]. Çok uzun yıllardır adından söz edilmesine rağmen bu yıkıcı yüksek genlikli akım ve gerilimlerin önlenmesine yönelik çok fazla bilgi sahibi değiliz [4]. Birçok bilim adamı tarafından ferrorezonans olayı karmaşık bir olay olarak tanımlanmış olup hala gizemini korumaya devam etmektedir [5]. Bu gizemin sebebi güç sistemleri ekipmanlarının; transformatör, doğrusal ve doğrusal olmayan elemanlardan, rezistif, endüktif, kapasitif elemanlara kadar çok fazla elemanı bünyesinde barındırmasından ileri gelmektedir [6]. Ferrorezonansın oluşumunda, özellikle manyetik doğrusal olmayan elemanlar, transformatörün nüvesi ve kapasitansın etkisi büyüktür [7], [8], [9], [10].

Ferrorezonans olayı elektrik enerji sisteminin genişlemesi ile birlikte karmaşık, yüksek gerilimlerde aniden ortaya çıkan ve yüksek seviyeli harmonik distorsiyona neden olan bir elektriksel sorundur. Ferrorezonans doğrusal sistemlerde oluşan rezonanslardan farklıdır. Doğrusal sistemlerdeki rezonans yüksek genlikli sinüzoidal akım ve gerilim dalga şekilleri oluştururken, ferrorezonans ise buna ek olarak yüksek genlikli akım ve gerilim değerlerinde düzensiz ya da karmaşık (kaotik) dalga şekillerinin oluşmasına neden olmaktadır [11].

Ferrorezonans; direnç, kapasitans ve endüktanstan oluşan sistemde kararsız bir çalışmadır. Bu devrede elektriksel öğelerden birinin değerinin değişmesiyle diğer öğelerin uçları arasındaki akım ve gerilim değerlerinde ani bir yükselme olur. Gelecekteki elektrik sistemlerinde ferrorezonansa daha çok rastlanacağı söylenebilir. İletim ve dağıtım gerilimlerinin giderek artırılması, hat kapasitansı ile transformatörlerin manyetik doyma eğrileri arasında bugünkünden daha değişik bir ilişki yaratacaktır. Bu değişiklik ferrorezonans olasılığının artışı yönündedir [12].

Herhangi bir güç sistemini oluşturan elemanlar, ani bir ferrorezonans olayının gerçekleşebilmesi için yeterlidir. Bu elemanları, transformatörün doğrusal olmayan endüktansı ve yükler içindeki direnç ve kapasitans olarak özetleyebiliriz. Bu çalışma ile transformatöre yarıiletken kontrollü güç elektroniği anahtarlama elemanları ile bağlanacak direnç ve kapasitans içeren yüklerin ferrorezonans anında, anahtarlara açma ve kapama yaptırılarak rezonans meydana gelecek elektriksel olayların incelenmesi amaçlanmaktadır.

Ferrorezonansın bir diğ er önemli etkisi de harmonikler üzerindedir. Kapama açısının harmonikler üzerindeki etkisinin incelenmesi güç kalitesi çalışmaları açısından önemli bir adımdır.

1.2. Tezin Amacı ve Çözüm Yaklaşımı

Daha önce bahsedildiği gibi elektrik enerjisinin iletimi ve dağıtımında yaygın olarak kullanılan elemanların başında transformatörler gelmektedir. Bu transformatörlerin yapacağı elektromanyetik güç dönüşümünün seviyesi birçok faktöre bağlı olmakla birlikte bunların en önemlilerinden birisi transformatörün manyetik çekirdeğinin manyetik geçirgenliğinin azalarak doyuma gitmesidir. İşte bu durumda manyetik çekirdek sürekli değeri değ iş en bir indüktans gibi düşünülebilir. Transformatörün çıkışına bağlanan yüklerin direnç, indüktans ve kapasitans gibi elamanlardan oluştuğ u da aşıkârdır. Elektrik devrelerinde görülen rezonans olayı için gerekli şartları böylelikle oluşmaktadır.

Ferrorezonans olayı her türlü transformatör ihtiva eden sistemlerde karşılaşılabilecek bir durumdur. Rezonansa giren elemanlarda elektriksel parametrelerin nasıl bir davranış göstereceğini tahmin etmek güçtür. Ferrorezonans olayında, rezonansın seviyesini artıran ve kaotik durumlara geçmesine sebep olabilecek sisteme ilave yüklerin rastgele bağlanması ya da yüklerin bir kısmının sistemden rastgele alınması bu durumu nasıl etkileyeceğini yüksek olasılıkla önceden tahmin etmek olanaksızdır.

Açma kapama işlemi ile temel olarak iki husus tespit edilmeye çalışılmıştır. Bunlardan ilki anahtarlama işlemi sonrasında trafo çekirdeğindeki artık akının rezonans ve harmonikler üzerine etkisini tespit etmek, diğ eri de anahtarlama açısının rezonansa ve harmoniklere etkisini tespit etmektir.

Bu durum özellikle şalt sahalarındaki güç trafolarında çok ciddi bir şekilde incelenmeye muhtaçtır. Öyleki yapılacak çalışma ile herhangi bir güç transformatörüne bağlı olan fiderlerin herhangi birinin enerjisinin ne zaman kesilmesi gerekeceğini yada sisteme ne zaman bağlanması gerektiği ile ilgili bize çok yararlı bilgiler verecektir.

Bu çalışmada sistemin enerji akışını sağlayan anahtarların kapama ve açma işlevini yapması gerektiği durumlarda en sağlıklı kapama ve açmayı yapacak şekilde anahtarlara gönderilecek uygun gecikme işaretini üreten iki farklı elektronik anahtar tasarımı yapılmıştır. Tasarlanan bu anahtarlar ile istenilen elektriksel hassasiyette anahtarlama

işleminin yapılabilir olması deneysel olarak ferrezonans olayının etkilerinin incelenmesi için temel çalışma olma niteliğini taşımaktadır.

1.3. Konu ile İlgili Yapılan Çalışmalar

Yarıiletken anahtarların gelişim teknolojileri, dağınık ve karmaşık sistemlerden bir çok noktadan veri alınarak bilgisayara aktarılma yöntemlerinin gelişmesi, bilgisayarla matematik analizlerin daha detaylı yapılabilme imkânları, bir çok yeni teknolojinin çok hızlı olarak gelişmesine yol açmıştır. Bu bölümde ferrezonans olayı üzerine yapılmış çalışmalar, anahtar kapama ve açma açısının kontrolü üzerine yapılan çalışmalara değinildikten sonra verilecektir.

1.3.1. Ferrezonans Olayı Üzerine Yapılan Çalışmalar

Literatürde, transformatörler üzerindeki rezonans durumları hakkında yapılan ilk çalışmalar 1907 yılına kadar uzanmaktadır. Ferrezonans terimi, ilk kez 1920 yılında kullanılmıştır. Ferrezonans olayına yönelik pratik ilginin artışı 1930'larda dağıtım sistemlerinde gerilim regülasyonu amacıyla kullanılan seri kondansatörlerin, hasar yaratacak boyutta aşırı gerilimleri ortaya çıkaran ferrezonans hallerine neden olduğunun ortaya konması ile başlamıştır. Benzer şekilde büyük ölçekli enerji iletim sistemlerinde ferrezonans olayı üzerine yapılan ilk çalışmalar 1930'lara kadar uzanmaktadır. Konu ile ilgili ilk analitik çalışma 1940'larda Rudenberg tarafından yapılırken, daha ayrıntılı ve doğru bir çalışma 1950'li yıllarda Hayashi tarafından tamamlanmıştır [13].

Rajesh G. Kavasseri tarafından yapılan bu çalışmada, transformatörler veya reaktörlerde belirli koşullar altında meydana gelen ferrezonans için sisteme kapasite birleştirildiği bir yöntem ile ferrezonansta mevcut olan altharmonik salınımların ortalaması iki boyutlu parametre uzayında hesaplanmıştır. Analiz sonuçlarının doğruluğu sayısal simülasyonları kullanılarak doğrulanmıştır. Önerilen yöntem hızlı bir çekirdek manyetik geçirgenlik kaybının altharmonik rezonansın başlanmasına ve altharmonik salınımlar üzerinde etkili olduğunu göstermiştir [14].

Glenn W. Swift yaptığı çalışmaları sunduğu bildirisi ile, Ferrezonans sonuçlarını tam olarak tahmin edebilmek için hazırlanacak düşük parametrelili seri yada paralel devreler çok yeterli olmayabilir. Tek fazlı durumda ferrezonanstan şüpheleniliyorsa artan

açıklayan fonksiyonu yöntemi ile kabul edilebilir bir şekilde tahmin edilebileceğini ortaya koymaktadır [15].

Yunge Li ve arkadaşları, Ferrerezonans devrelerinde meydana gelen temel ferrerezonansın önlenmesi için yeterli koşulun, devrenin doğrusal parçası ile doğrusal olmayan doymuş kısmın, güç-frekans uyarım karakteristiği ile akım-gerilim karakteristiği arasında bir ilişkinin olabileceğini ifade etmişlerdir. Bu anlayışla, çalışmalarında iki devrenin önemli parametrelerinden oluşan analitik bir ifade şeklinde ferrerezonans olasılığı için bir kriter sunulmuştur. Ferrerezonans sırasında sönümlenme için kritik direnç değeri vererek, açıkça Ferrerezonans olasılığını ve ortadan kaldırılması için de çeşitli yöntemleri göstermiştir. Ferrerezonans olasılığının gerçek değeri ile kritik direnç değeri karşılaştırılarak karar verilebileceği öne sürülmektedir. Ferrerezonansın bastırılması için gerekli parametreleri ayarlanması için önerilerde bulunulmuştur. Simülasyon sonuçları ve gerçek sistem üzerinde yapılan testler ile önerilerini kanıtladıklarını ifade etmişlerdir. Bu kriter ile, ferrerezonans için olasılık ve eliminasyon basit ama etkili bir analitik yöntemle incelenebileceği kaydedilmiştir [16].

Bernard ve arkadaşları yaptığı çalışmaları ile, büyük güç sistemlerindeki trafolarda ferrerezonans analizi yapmak için yeni bir teknik ileri sürülmüştür. Bu teknik temel olarak, harmonik değişkenler açısından doğrusal olmayan sistemlerin modellenmesinde limitli bir döngü davranışını vurgulamaktadır. Ortaya çıkan model ile denge analizi ve çatallanma diyagramlarının göreceli olarak kolay hesaplamasını sağlayan analitik bir açıdan bakıldığında uygundur. Yapılan çalışma tek fazlı transformatör modellerine benzer bir analiz yapmak sureti ile daha önceki çalışmaların önemli bir uzantısı niteliindedir. Ancak, üç fazlı transformatörlerde ferrerezonans çalışmalarına Bu yeni analitik yaklaşım tek fazlı durumda olduğundan daha karmaşık davranışlar ortaya koyuyor [17].

Afshin Rezaei-Zare ve diğerleri, ferrerezonans analizi için yapılan mevcut trafo modelleri ile ya histerisiz etkilerinin göz ardı edildiğinden ya da büyük döngüye dayalı histerisiz ve düşük akım seviyeleri için göreceli bir ölçek temsil edildiğinden bahsederek bu tip bir modelleme yaklaşımı ile ferrerezonansın manyetik çekirdekdeki gerçek fiziksel davranışı yansıtılamamaktadır. Preisach teorisine dayanan bu araştırma, ferrerezonans olayının araştırılması için bir tek fazlı trafo temsili ile doğru bir histeritik indüktör modeli tanıtılmaktadır. Geliştirilen modele dayanarak, zaman domainindeki benzetim çalışmaları gösteriyor ki hiçbir manyetik döngü üç faz arasında var olan bir tek fazlı trafo durumunda bile dahil olmak üzere ferrerezonansın bilinen tüm türleri, temel, alt harmonik, yarı-

periyodik ve kaotik modları, oluşabilir. Ferrerezonans oluşumu ve modunun değişikliğini, histerezis ve başlangıç koşulları, kondansatör sınıflandırma ve trafo sarılma biçimi kapasitans etkilerini de ilgilendirir [18].

Rajesh G. Kavasseri tarafından yapılan bu çalışmada, ferrerezonans için trafo ve doyurulabilir reaktörler gibi güç ekipmanlarında tehlikeli aşırı gerilimlere yol açan bir doğrusal olmayan salınım olgusudur ifadesi kullanılmaktadır. Ferrerezonans bazen tehlikeli sonuçlara yol açabileceği literatürde belgelenmiştir. Prensip olarak, ferrerezonans bir doğrusal olmayan doyurulabilir indüktör, kapasitif bir hat üzerinden bir sinüsoidal kaynaktan beslendiği zaman oluştuğu düşünülmektedir. Doğrusal olmayan indüktör hafif yüklü veya yüksüz koşullar altında bir gerilim trafosu, ya da bir güç trafosunun temelini teşkil etmektedir. Daha sonra, eşdeğer devre ile ferrerezonans salınımlarına anahtarlama elemanlarının etkisi incelenmiştir. Ferrerezonans çalışmaya erken analitik girişimleri bazıları bildirilmiştir. Galerkin yöntemi kullanılarak ise frekans salınımları gösterilmiştir [19].

M. S. Mulad ve M. M. Fahmy tarafından doğrusal olmayan keyfi bir derece ile ferrerezonans devrelerin harmonik denge tekniklerine dayalı analitik bir yaklaşım çalışması sunulmuştur. Bu yaklaşımın ardından ferrerezonans atlamalarının ortaya çıkması üzerine farklı devre parametrelerinin etkisinin ve zorlanma frekansının belirlenmesi amacıyla bazı testler yapılmıştır. Özellikle, ya zorlama frekansı veya kapasite artırarak devre daha ferrerezonans karşı daha duyarlı kaldığı gösterilmiştir. Bu çalışma zayıf yüklenme dönemlerinde dağıtım şebekelerinde meydana gelebilecek ferrerezonans sıklığı hakkında bilgiler vermektedir. Örneğin tekniğin fizibilite göstermek için verilir [20].

Afshin Rezaei-Zare ve arkadaşları tarafından yapılan bir çalışmada, bir transformatörün çekirdek yapısı tanıtılmış ve Preisach teorisi modeli kullanılarak, çekirdek mıknatıslanma karakteristiği temsil edilmiştir. Bu modelleme ile gerçek transformatörün histerezis döngülerine en yakın hassasiyette hesaplanması sağlanmıştır. Ferrerezonans olayı, önerilen model kullanılarak bir gerilim trafosu (VT) üzerinde deneysel sonuçlar sonuçlarla bilgisayar simülasyonlarıyla kıyaslanmıştır. Kullanılan farklı matematiksel modellerinde deneysel sonuçlara yaklaşma durumları da ayrıca ele alınmıştır. Sonuç olarak önerilen bilgisayar simülasyonu, daha yüksek doğrulukla histerezis çevrimini temsil etmiştir [21].

Zahawi ve arkadaşları, ferrerezonans davranışı üzerine trafo çekirdek kayıplarının sönüm etkileri, devre kesici kapasitans üzerinden bir sinüzoidal kaynağını besleyen

transformatörleri, doğrusal olmayan dinamik yöntemler kullanılarak incelenmiştir. Sistemin ferrezonansı temel frekans ferrezonans, alt harmonik ferrezonans ve kaotik ferrezonans olmak üzere üç şekilde gösterilir. Aynı zamanda bu ferrezonans periyodu çatallanma amacı ile iki katına çıkarıldığında bir dizi kaotik davranış içine tahrik olabileceği gösterilmiştir [22].

S. Mozaffari, S. Henschel ve A.C. Soudack tarafından yapılan çalışmada, tipik bir ferrezonans içeren devre için doğrusal olmayan denklemlerin çözümü güç trafosu mıknatıslanma eğrisinin doğru açıklanmalarına bağlı olduğu gösterilmiştir. Birçok benzetim sonuçları ayrıntılı bir analizi gösteriyor ki kayıpları azaltmak ve transformatör mıknatıslanma eğrisi yükselirse nonlineerlik sebebiyle kaos olasılığı artar. Trafo nüve kayıpları ve sistemin kaotik çözüm kaynağının gerilim değeri değişen etkisi incelenmiştir. Kararlı durum kaosu ile geçici kaos kavramı karşılaştırılarak tartışılmıştır [23].

Eung-Bo Shim, Jung-Wook Woo ve Sang-Ok Han çalışmaları ile 154 kV Gaz Yalıtımlı Trafo Merkezine (GIS) ölçme amaçlı bağlı 154 kV'luk bir Gerilim Trafosu (PT) ile için yapılan dijital benzetim çalışmalarında Elektro-Manyetik Geçiş Programı (EMTP) yöntemi kullanılmıştır. PT Modelin doğruluğu alanında test sonuçları ile EMTP benzetim sonuçları karşılaştırılarak doğrulanır. Araştırma ile geliştirilen model doğru PT geçici rezonans, özellikle ferrezonans olayının tahmin edilebileceğini gösteriyor. İncelemeler sonucunda, ferrezonans olayı, işletmeye ve devre parametrelerine çok duyarlıdır [24].

Yaptığı bu araştırma ile S. Mozaffari ve M. Sameti, güç trafosu içeren tipik bir ferrezonans devresi için doğrusal olmayan denklemin çözümü, başlangıç koşullarının ilk değerine bağımlı olduğu gösterilmiştir. Aynı zamanda başlangıç koşullarında küçük bir değişiklik olması ile sistemin uzun vadeli davranışında büyük bir farklılıklara neden olabileceği gösterilmiştir. Bu durum sistemin öngörülemez bir gelecek davranışa gideceğini öne sürmektedir. Birçok benzetim sonuçlarının detaylı analizi ile sistemin farklı kaotik bölgeler için çekim havzaları elde edilmiştir [25].

K. Al-Anbari ve arkadaşları bu çalışmalarında, bir güç trafosu içindeki demir çekirdek kaybı doğrusal olmayan etkisini kaotik ferrezonans ve geçici kaos süresi başlama durumu araştırmaktadır. Araştırma için seçilen trafo verileri Dommel ve arkadaşları tarafından verilen, 635 kV, 50 MVA etiketli bir güç trafosudur. Trafonun mıknatıslanma özelliklerinin tek bir değeri iki farklı polinom tarafından modellenmiştir. Trafonun çekirdek kaybı üçüncü bir gerilim kuvvet serileri ile modellenmiştir. Doğrusal olmayan çekirdek kaybı dâhil bu üç etki açıktır. Çekirdek kaybına nonlineerliğin dâhil

edilmesi çözümleri, doğrusal modeller ile kıyaslandığında sonuçların daha gerçekçi olabileceğini ortaya koymaktadır [26].

H Lamba, S. McKee ve R. Simpson tarafından Preisach model kullanmak suretiyle manyetik tepkinin kolayca ve doğru olarak karşılaştırılması için laboratuvar ortamında ve sayısal olarak bir dizi LCR devre simülasyonu yapılmıştır. Mükemmel bir aralıkta parametrelerin geniş bir yelpazede değiştirilmesi suretiyle deneysel olarak hem rezonansın olmadığı durumu ve hemde ferrezonans davranışının incelendiği bildirilmiştir. Her sistemin böyle üç bağımsız parametresi kullanılarak, çatlama parametrelerini ve ferrezonans problemini çözmek için güçlü bir tahminini yapmak mümkündür [27].

David A. N. Jacobson, büyük ekipman arızaları son doksan yıldan beri giderilmeye çalışılmış olsa bile bugün bu olay ferrezonans nedeniyle yoğun olarak meydana gelmeye devam etmekte olduğu ifade etmiştir. Bu çalışması, yüksek gerilim iletim sisteminde pratik örnekleri ferrezonans anlatan olaylarla ilgilidir. Hafifletici ferrezonans yöntemlerini tartışarak dört örnek devre ile ferrezonans için devre yapılandırılmaları sunulmuştur [28].

Ferrezonans güç transformatörlerinde veya kapasitif reaktörlü komşu fazlardan beslenen hatlarda oluşabilir. Ritz yöntemi temel frekans ferrezonans Harmonik denge sorununa bir analitik çözüm formüle etmek için kullanılır. Doğru ferrezonans bölgede tipik bir yüksek gerilim trafosunun mıknatıslanma özelliği temsil etmek için iki bölgeli polinom kullanılır. Elde edilen kapalı-form çözümler sistem parametrelerinin bir fonksiyonu olarak güvenli ve ferrezonans bölgeler arasındaki sınırları belirleyen bir haritanın inşasına izin verir. J. R. Marti ile A. C. Soudack makalelerinde, transformatör kayıplarını analizlerine dâhil etmişler ve bu durum ferrezonans bölgelerinin çizilmesinde önemli bir faktör olduğunu göstermişlerdir [29].

R. Saravanaselvan arkadaşlarıyla beraber yaptığı çalışma ile üç fazlı transformatörün her bir fazının manyetik doyma karakteristiği birer polinom ile modellenmiştir. Bir topolojik teknikteki fazlalığı ortadan kaldırmak için durum uzay modeli kullanılır. Zaman etki simülasyonlarında Runge-Kutta yöntemi kullanılmıştır. Kararlı hal çözümleri, çatlama diyagramı ferrezonans salınımlar ve çoklu çözümler mümkün modları ortaya çıkarmak için kullanılır. Sonuçlar yüksek doyma düzeyleri ile, kaotik ferrezonans salınımlar ayrı bir olasılık olduğunu paralel çizgiler arasındaki kapasitif kuplaj nedeniyle olduğunu göstermektedir. Enerji hattının uzunluğu ve paralel çizgiler arasındaki yakınlığı ile ilgili çözümler hassasiyetleri analiz edilmiştir [30].

A. S. Abdallah ve M. A. El-Kady bu yayınlarında güç transformatörleri işletme performansı üzerinde ferrezonans olgusunun çeşitli etkilerini değerlendirmek ve bu olayın etkilerini azaltmanın yollarını araştırmıştır. Çalışmalarında üç fazlı çekirdek tipi bir transformatör kullanılmaktadır. Teknik inceleme ve yapılan ilişkili ferrezonans deneysel çalışmanın sonuçları ferrezonans üç fazlı çekirdek tipi transformatörlerde tehlikeli aşırı gerilimlere ve aşırı akımlara neden olabileceğini göstermektedir. Çeşitli tasarım etkilerini ve çalışma parametreleri belirlemek amacıyla yapılan duyarlılık analizi sonuçları da ortaya çıkan aşırı gerilimleri ve aşırı akımları ferrezonanstan kaynaklandığını sunmaktadır [31].

Shott ve Peterson primer tarafı yıldız, sekonder tarafı üçgen bağlı olan transformatörler üzerinde incelemeler yapmıştır [32]. Bu çalışma daha sonra Peterson'un Güç Sistemleri Üzerindeki Geçici Olaylar kitabında da yer almıştır [33].

Brenner sargılar üzerindeki histerezis ile ferrezonans devrelerin alt-harmonik cevabını incelemiştir [34]. Yazar seri RLC devresi kurarak üzerinde analizler yapmıştır. Kaynak ve sarım sayısı ilişkisini belirleyerek harmonik cevaplarını kıyaslamıştır. Plotkin ferrezonans bölgesi ile ferrezonans olayı olmayan bölgeler arasında teorik bir çalışma yapmıştır [35]. Oluşturduğu denklemleri Harmonik denge yöntemini ve Kryloff-Bogoliuboff'un çalışmasına dayanarak her iki ferrezonans devresini de diferansiyel olarak çözmüştür. Harmonik denge üzerine daha sonra Craenenbroeck ve arkadaşları güç sistemlerinde bir model devre oluşturarak matematiksel olarak devre üzerindeki omik ve doğrusal olmayan etkileri harmonik denge yöntemiyle incelemişlerdir [36].

Kelly Ferrezonans Devresi isimli çalışmasıyla 2kVA ve 120-240 volt'luk transformatörler üzerinde hem deneysel hem de teorik analizler yapmıştır [37]. Kelly'nin devresi basitleştirilmiş tek fazlı devre üzerinde açık devre uygulamasıdır. Karlicek ve Taylor güç sistemlerinde transformatörlerin topraklanması ve topraklanmaması sonucunda oluşan ferrezonans etkileri araştırmışlardır [38].

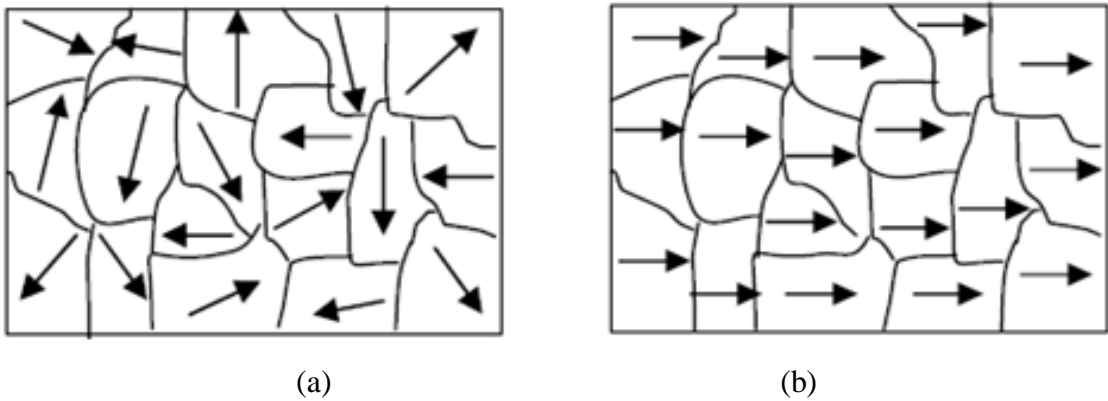
Ferrezonansın meydana geldiği anahtarlama durumları Clerici ve Didriksen tarafından incelenmiştir [39]. Prusty ve Sanyal güç sistemlerinde ferrezonans problemine yeni çözüm önerileri çalışmalarında önceki çalışmalarda yapılan fonksiyon denklemlerini geliştirmiştir [40]. Barbisio ve arkadaşları ferrezonans çalışmalarında sıkça kullanılan RLC parametrelerinin ferrezonans üzerine etkisini araştırmışlardır [41].

1.4. Manyetizma

Manyetizma, mıknatıslanmış maddelere ilişkin özelliklerin tümünü ve mıknatısların özelliklerini, inceleyen bir fizik dalıdır. Manyetizma herhangi bir elektronun izlediği yörüngesel hareketleri, kendi eksenini etrafındaki meydana getirdiği hareketleri ve diğer komşu elektronlar ile aralarındaki etkileri araştırır. Bilindiği gibi atomların manyetik dipol momenti iki kısımdan oluşur. Bunlar birincisi elektronun çekirdek etrafındaki yörünge dipol momenti (\vec{l}) diğeri de elektronun spin hareketinden kaynaklanan spin manyetik dipol momentidir (\vec{s}). Atomların tamamen dolu olan son yörüngelerinde toplam spin ve yörünge momentleri sıfır olup paramanyetik ve ferromanyetik özellik sergilemezlerken, diyamanyetizmaya yörüngesel hareketlerinden dolayı bir katkıları olur. Bu nedenle diyamanyetizma bütün maddelerin ortak özelliğidir ve uygulanan dış bir manyetik alana karşı oluşur ancak çok zayıftır [42].

1.4.1. Bölgecik Yapısı

Weiss tarafından önerilen bir numune içerisinde oluşan ve adına bölgecik yada domain denilen manyetik bölgelerle kendiliğinden mıknatıslanma açıklanmaktadır. Malzeme tüm hacmi üzerinden toplam enerjiyi minimum yapacak biçimde Şekil 1.1.'de görüldüğü üzere mıknatıslanmasını bölgelere ayırır



Şekil 1.1. Ferromanyetik bir madde içinde birden çok domainin oluşturduğu spinlerin yönelimi ve manyetik alan altındaki davranışı. Harici manyetik alan şiddetinin olmadığı durumda, (a) domainler genellikle birbirini yok ederek net mıknatıslanmayı sıfır yaparlar. (b) Uygulanan "→" yönünde dış bir manyetik alan ile spinlerin yönelimi

Her bir domain M_s doyum mıknatıslanmasına kadar kendiliğinden mıknatıslanır. Bu durumda bölgeciklerin içerisindeki spinler birbirlerine paralel olacak şekilde yönelirler. Eğer bölgelerden oluşmuş ferromanyetik madde üzerine bir dış manyetik alan uygulanırsa, spinler dış alana paralel olma eğilimindedirler. Böylece alan yönündeki bölgeler diğer bölgelerin komşu spinlerini kendi doğrultusunda yönlendirecek, enerjiyi minimumda tutacak biçimde büyür. Buna domain duvar hareketi denir.[43]

Ferromanyetik malzemelerdeki atomların manyetik momentlerinin etkileşim Paramanyetik malzemelerin aksine çok şiddetlidir. Bu etkileşimler atomik manyetik momentlerin anti paralel ve paralel yönelimlerinin sonucu olan elektriksel etkileşimlerden kaynaklanır. Bu değiş tokuş etkileşimleri atomik boyutta oldukça kuvvetlidir. Manyetik alanla karşılaştırıldığında 1000 Tesla'lık alanın şiddetine eşittir. Anlaşılması için yaklaşık olarak dünyanın manyetik alanından 100 milyon kez daha kuvvetlidir [44].

Değiş tokuş etkileşmesi (exchange interaction) iki elektronun birbirlerine göre göreceli yönelimlerine bağlı olarak değişen, kuantum mekanik bir olaydır. Fe, Ni ve Co ve bunların birçok bileşiği tipik ferromanyetik malzemelerdir. Ferromanyetik malzemeleri diğer malzemelerden ayıran iki temel fark, kendiliğinden mıknatıslanma özelliklerinin ve manyetik faz geçiş sıcaklığına sahip olmalarıdır.

1.4.2. Anizotropi

Manyetik malzemelerde mıknatıslanma belirli doğrultularda kalma eğilimi gösterir. Bu yön tercihinin sebebi malzemenin toplam serbest enerjisinin mıknatıslanmanın malzeme içindeki yönelimine bağlı olmasıdır. Bu etkiye manyetik anizotropi denir. Manyetik olarak izotropik bir malzeme manyetik alan yok iken manyetik momentinin yöneleceği bir doğrultu olmayacaktır. Buna karşın manyetik alan uygulandığında ise manyetik momentler malzemenin kolay eksenine doğrultusunda yönelecektir.

1.4.3. Manyetik Duygunluk

Manyetik duygunluk, uygulanan bir manyetik alana karşılık herhangi bir malzemenin birim alanındaki mıknatıslanma ifadesidir. Uygulanan manyetik alana karşı verilen tepki olarak da isimlendirilir. Eğer M 'ye mıknatıslanma, H 'ye de uygulanan manyetik alan olarak tanımlanırsa, manyetik duygunluk aşağıdaki denklem (1.1) ile ifade edilir.

$$\chi = \frac{M}{H} \quad (1.1)$$

Mıknatıslanmanın manyetik alana paralel olmadığı durumda χ herhangi bir tensördür. Paralel olduğu durumda ise basit bir sayı ile ifade edilebilir. Kristal yapıya sahip bir malzemede χ manyetik duyunluk, kristal yapıdaki anizotropi etkilerinden dolayı manyetik alanın yönüne bağlıdır.

1.4.2. Curie Sıcaklığı ve Curie-Weiss yasası

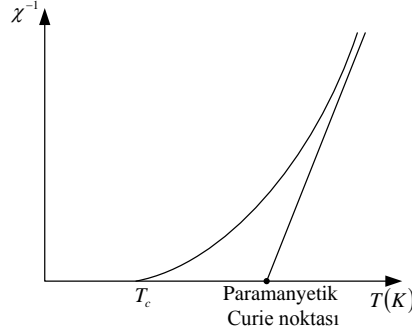
Curie sıcaklığı kendiliğinden mıknatıslanma özelliğinin dış manyetik alan yokluğunda görüldüğü sıcaklıktır. Bu sıcaklığın üzerinde ferromanyetik bir madde paramanyetik olacaktır. Bu durumda Curie-Weiss yasası (1.1) ile ifade edilen manyetik duyunluk ile aynı şekilde ifade edilebilir. Buradan aynı zamanda χ denklem (1.2) ile ifade edilebilir.

$$\chi = \frac{C}{T - T_c} \quad (1.2)$$

Burada C her malzeme için değişen bir sabit, T sıcaklık, T_c Curie sıcaklığını göstermektedir. T_c 'deki C paramanyetik ve ferromanyetik durumlar arasındaki geçişi temsil eden sıcaklık değeri olduğu için böyle gösterilmiştir[45].

Curie sıcaklığının üzerinde ferromanyetik ve antiferromanyetik malzemeler paramanyetik olurlar çünkü termal hareket manyetik dipollerin rastgele yönelimine sebep olacaktır.

Sonuçta, T_c sıcaklığı üzerinde manyetik alan yok iken malzemelerde net bir manyetik moment olmayacaktır. Curie-Weiss yasası T_c sıcaklığının üzerindeki malzemelerin elektriksel ve manyetik davranışlarındaki bilinmeyen yönleri açığa kavuşturmuştur. Curie-Weiss davranışı genellikle en yakın komşudaki atomların manyetik dipollerinin aynı yönde yönelme eğilimi olarak açıklanabilir. Bu nedenle Curie-Weiss yasası manyetik duyunluğun sıcaklığa bağlı davranışını açıklamada son derece önemlidir. T_c sıcaklığının çok üzerindeki bölgelerde sıcaklıkla duyunluk karşılıklı lineer olarak artar. Sıcaklığın duyunluğa bağlı grafiği aşağıdaki Şekil 1.2.'deki gibidir.



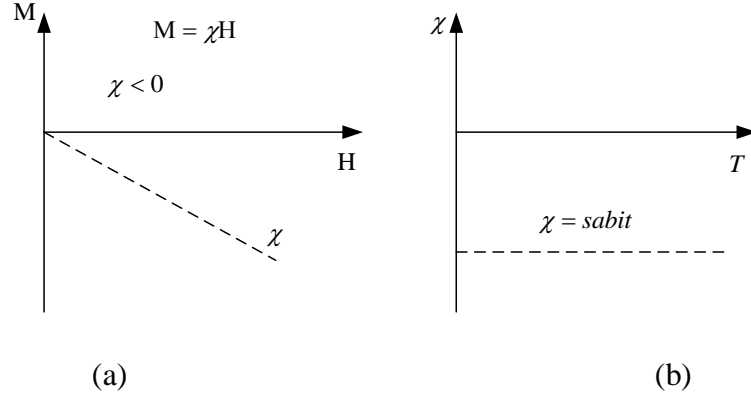
Şekil 1.2. Curie-Weiss yasası paramanyetik fazın varlığı

1.4.2. Manyetizma Türleri

Manyetik malzemeleri sınıflandırmanın en iyi yolu manyetik alanla olan etkileşimlerini incelemektir. Bütün maddeler manyetik özellik sergilerler ama bazı maddeler diğerlerinden daha fazla bu özelliğe sahiptir. Bunun en önemli sebebi bazı malzemelerde atomik manyetik momentler arasında hiçbir etkileşim olmazken bazılarında ise bu etkileşimin çok şiddetli olmasıdır. Manyetik özellik sergileyen maddeler manyetik davranışlarına göre genel olarak altı sınıfa ayrılırlar. Bunlar, Diyamanyetizma, Paramanyetizma, Ferromanyetizma, Ferrimanyetizma, Antiferromanyetizma ve Süperparamanyetizma olarak tanımlanır.

1.4.2.1. Diyamanyetizma

Her ne kadar diyamanyetizma tüm maddelerin ortak özelliği olsada, genellikle çok zayıf bir manyetizma çeşididir. Diyamanyetizma, manyetik alan altında son yörünge elektronlarının ortak bir davranış sergileyememelerinden kaynaklanır. Diyamanyetik maddeler net bir manyetik momentine sahip olmayan atomlardan oluşur. Ancak Şekil 1.3.(a)'da görüldüğü gibi manyetik alana maruz kaldıklarında negatif bir mıknatıslanmaya sahiptirler ve bunun sonucu olarak manyetik duygunlukları negatiftir. Bu durumu şöyle açıklanır; diyamanyetik bir malzeme bir çubuk mıknatıs yakınına konulduğunda mıknatıs tarafından itilecektir. Bu etki Michael Faraday tarafından 1846'da bulunmuştur. Faraday'ın numunesi malzemelerin çoğundan daha güçlü diyamanyetizma gösteren bizmut parçasıydı.

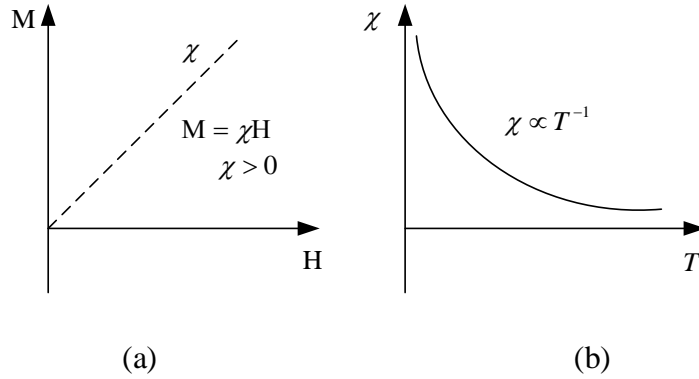


Şekil 1.3. Diyamanyetik malzemelerin, (a) bir dış manyetik alan etkisi altındaki ve (b) sıcaklık değişimi karşısındaki manyetik duygunluğunun davranışları

Şekil 1.3.(b)'de manyetik alan sıfır olduğundaki mıknatıslanmada sıfırdır. Diyamanyetik malzemelerin bu karakteristik özellikleri atomların içyapısıyla ilgili olduğundan sıcaklıktan bağımsızdır [46].

1.4.2.2. Paramanyetizma

Malzeme içerisindeki atom veya iyonların son yörüngelerinde çiftlenmemiş elektronlarında dolayı net bir manyetik momente sahiptirler. En önemli çiftlenmemiş elektrona sahip atomlardan birisi demir atomudur.

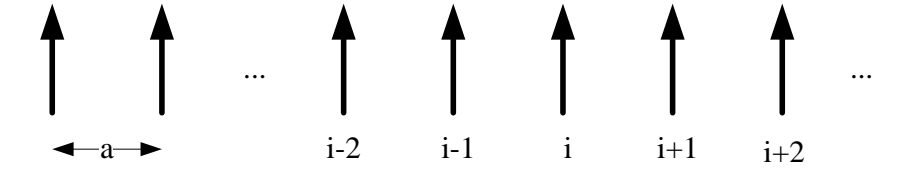


Şekil 1.4. Paramanyetik malzemelerin, (a) bir dış manyetik alan etkisi altındaki ve (b) sıcaklık değişimi karşısındaki manyetik davranışları

Birbirlerinden yeterince uzak net manyetik momente sahip iyonlara sahip malzemelerin sergilediği bu manyetizma tipinde iyonlar birbirleri ile herhangi manyetik etkileşme sergileyemezler. Manyetik alan uygulandığında alanın yönünde bu bireysel manyetik momentlerin yönlendiği gözlenir. Bunun sonucu Şekil 1.4.(a)'da görüldüğü gibi demir atomunun net pozitif mıknatıslanmaya ve duyunluğa sahip olmasıdır. Buna ek olarak Şekil 1.4. (b)'de alanın yokluğunda manyetik momentler sıcaklığa bağlı olarak yönelim değişimlerine uğrayacaktır. Bu sonuç (1.4) ifadesiyle bilinen sıcaklığa bağlı Curie duyunluk yasasıdır. Şekil 1.4. (b)'de görüldüğü gibi oda sıcaklığında ve düşük alanlarda paramanyetik duyunluk küçüktür. Sıcaklık 100K altına düşmediği sürece çok yüksek paramanyetik duyunluk uygulanan alandan bağımsızdır. Bu şartlar altında paramanyetik duyunluk toplam demir atomu sayısına bağlıdır. Çoğu demir katkılı mineral oda sıcaklığında paramanyetiktir.

1.4.2.3. Ferromanyetizma

Periyodik tabloda demire yakın olan bazı atomlar ve periyodik tablonun başka yerlerindeki atomların iç yörüngelerindeki kabuklar tamamen doludur ancak son yörünge kabuklarındaki elektronları çiftlenmemiştir. Kuantum mekaniğinden bilindiği gibi atomun bir özelliği için herhangi bir yön seçilmişse geriye kalan tüm özellikleri de aynı eksen boyunca davranış gösterir. Buna en dış kabuktaki elektronların davranışı örnek verilebilir. Katılarda komşu atomların en dış yörüngelerinde bulunan çiftlenmemiş elektronların aralarındaki değiş-tokuş etkileşmesi nedeniyle spinlerin aynı yönde düzgün yönelmesi Şekil 1.5.'de gösterilmektedir.

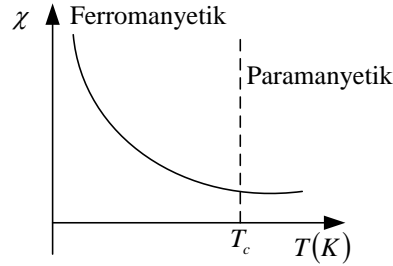


Şekil 1.5 Ferromanyetik düzene sahip spinlerin temsili gösterimi

Ferromanyetik malzemelerdeki spinler arası etkileşimler manyetik kuvvetli olmaktan daha çok elektriksel etkileşimlerin sonucudur. Bu elektriksel etkiden meydana gelen etkileşmeye değiş-tokuş (exchange) etkileşmesi adı verilir. Heisenberg tarafından özdeş spinlerden oluşan ferromanyetik bir sistem için önerilen değiş-tokuş enerjisi denklem (1.3) ile ifade edilebilir.

$$E_{ex} = -2J_{ex} \vec{S}_i \cdot \vec{S}_{i+1} \quad (1.3)$$

Burada J_{ex} değiş tokuş etkileşme sabitidir. Ferromanyetik malzemelerde yakın komşu atomların şiddetli etkileşimleri (exchange) birbirlerini paralel hale getirirler. Antiferromanyetik malzemelerde ise en yakın komşu atomun manyetik momenti diğerine zıt yöndedir. Şekil 1.6.'da bazı kritik sıcaklıkların altında ferromanyetik ve antiferromanyetik malzemelerin paramanyetik malzemelere dönüştükleri ve manyetik uygunluklarının lineer olarak Curie yasasına uyduğu gözlemlenmiştir.



Şekil 1.6. Malzemelerin ferromanyetik davranış grafiği

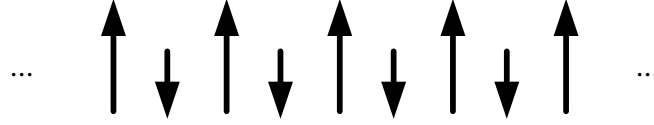
Bu karakteristik sıcaklık ferromanyetik geçiş sıcaklığı veya basitçe Curie sıcaklığı olarak bilinir. Curie sıcaklığının üzerinde manyetik momentler net manyetik momenti sıfır yapacak şekilde yönelmişlerdir. Curie sıcaklığını üzerindeki bölgede malzeme paramanyetiktir. Yüksek sıcaklıklarda ferromanyetik düzen bozulur ve malzeme paramanyetik davranış sergiler, manyetik alınganlık Curie-Weiss yasası ile

$$\chi = \frac{C}{T - T_c} \quad (1.4)$$

şeklinde verilir. Burada; kritik sıcaklık olup bu sıcaklığın üstünde ferromanyetik fazdan paramanyetik faza geçiş olur. Buna demir örnek verilirse, bu sıcaklık değeri demir atomu için, 1000K civarındadır [46].

1.4.2.4. Ferrimanyetizma

İyonik bileşiklerde, örneğin oksitlerde, manyetik yönelimin daha karmaşık bir formu kristal yapılarının bir sonucu olarak ortaya çıkabilir. Kristal içerisindeki iyonların manyetik momentleri antiparalel yönelmiş olup, birbirlerini tam olarak yok etmemiştir ve net manyetik momentlere sahiptir. Ferrimanyetik-oksit bir yapıdaki manyetik spinlerin temsili yönelimi Şekil 1.7.'de olduğu gibi gösterilebilir.



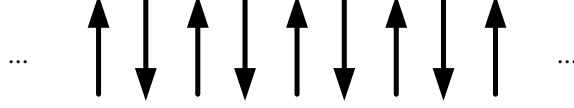
Şekil 1.7. Ferrimanyetik düzene sahip spinlerin temsili gösterimi

Ferrimanyetik malzelerde manyetik yapı aralarında oksijen atomu olan A ve B gibi iki manyetik alt örgüden oluşur. Değiş tokuş etkileşimleri aradaki bu oksijen atomu tarafından olur. Bu olay gerçekleştiğinde bu doğrusal olmayan etkileşme ya da süper değiş tokuş etkileşimi olarak isimlendirilir. En güçlü süper değiş tokuş etkileşmesi spinleri antiparalel olarak yönelmiş olan A ve B alt örgü atomları arasında olur.

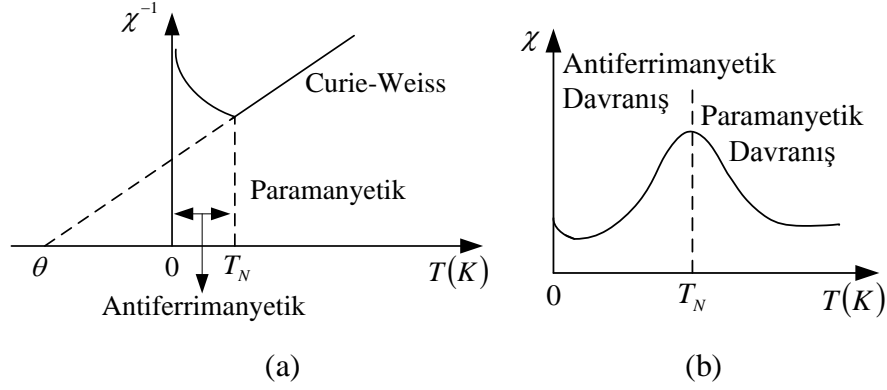
1.4.2.5. Antiferromanyetizma

Antiferromanyetik malzemeler, ferromanyetizmada olduğu gibi kritik bir sıcaklığın altında manyetik momentlerin kendiliğinden yönelimine sahiptir. Ancak, bu yönelim antiferromanyetlerdeki en yakın komşu atomdaki spinlerin birbirlerine antiparalel yönelimleri şeklindedir [43]. Gerçekte antiferromanyetik kristal, iç içe geçmiş A ve B gibi

kendiliğinden mıknatıslanmaya sahip iki alt örgü gibi göz önüne alınabilir. Antiferromanyetik malzemelerde spinlerin yönelimleri sonucu manyetik momentler birbirlerini yok eder, net manyetik moment sıfırdır.



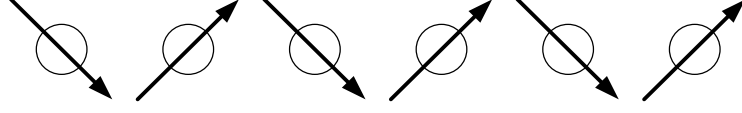
Şekil 1.8. Antiferromanyetik düzene sahip spinlerin temsili gösterimi



Şekil 1.9. (a) Antiferromanyetik sistemde manyetik duygunluğun sıcaklığa bağlılığı, (b) numunenin Antiferromanyetik davranışı

Antiferromanyetik malzemeler Néel sıcaklığı üzerinde paramanyetikler ve lineer olarak, denklem (1.5) ile verilen yasaya uyarlar. Antiferromanyetizma T_N sıcaklığına gelindiğinde manyetik duygunluğa karşı sıcaklığın keskin bir şekilde bir pik yapmasıyla gösterilebilir. Bu sıcaklıkta duygunluk en yüksek değerdedir. Eğer en yakın komşu atomdaki spinler az bir miktarda eğilme yaparsa çok küçük bir mıknatıslanma elde edilebilir. Bu eğilmiş manyetizasyon (canted) olarak isimlendirilir. Eğilmiş antiferromanyetler, ferro ve ferrimanyetlerde gözlenen-görülen histerezis, artık mıknatıslanma, Curie sıcaklığı gibi bütün özellikleri sergilerler.

$$T = f \frac{1}{\chi} \quad (1.5)$$



Şekil 1.10. Antiferromanyetik düzene sahip spinlerin yönelimi

1.4.2.6. Süperparamanyetizma

Süper paramanyetizma manyetizma türlerinden birisidir. Süper paramanyetik bir malzeme küçük ferromanyetik nanokristallerden oluşmaktadır. Bu nano boyutlu kristaller çok küçük olduklarından (1-10 nm) ısısal bir değişim olduğunda rastgele yönelime geçerler. Sonuçta, malzemenin toplam mıknatıslanması dışarıdan manyetik alan uygulanmadığı sürece yoktur. Normalde, ferromanyetik malzemelerdeki etkileşimler en yakın komşu atomdaki momentlerin yönelimine neden olur ve bunun sonucu olarak B_{int} olarak adlandırılan çok büyük bir iç manyetik alan oluşur. Bu ferromanyetik ve paramanyetik malzemeleri birbirinden ayıran temel unsurdur. Curie sıcaklığının üzerinde, ısı enerjisi bu manyetik etkileşimlerin üzerinden gelebilecek kadar yeterlidir. Malzeme içerisinde artık manyetik bir düzen kalmadığı için, iç manyetik alan B_{int} , artık yok olacaktır ve malzeme paramanyetik davranış sergilemeye başlayacaktır. Eğer malzeme homojen olmayan bir kristal yapısına sahipse, hem ferromanyetik hemde paramanyetik kümeciklerin aynı sıcaklıkta varlığı süperparamanyetik durum olarak açıklanmaktadır [43].

1.5. Manyetik Alan

Enerjinin transformatör, Motor ve generatör gibi makinelerde tür değiştirmesini sağlayan temel etken manyetik alandır. Manyetik alan enerji dönüşümünü yapabilmesi için dört ilkeye ihtiyaç duyar [47].

1. Akım taşıyan bir iletken etrafında manyetik alan oluşur.
2. Zamanla değişen bir manyetik alanın etkisinde kalan bobinde bir gerilim oluşur. Bu gerilim transformatörlerin temel çalışma mantığını açıklar.
3. Manyetik alan içinde bulunan ve içinden akım geçen bir iletkende bir kuvvet indüklenir. Bu kuvvet motor hareketinin kaynağıdır.

4. Manyetik alan içinde hareket eden bir sargıda gerilim indüklenir. Bu gerilim generatörün çalışma mantığını açıklar.

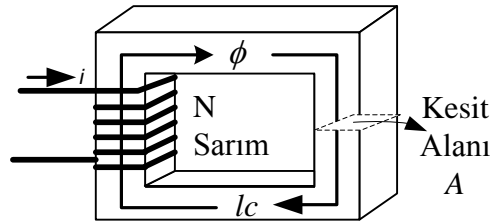
1.5.1. Manyetik Alan Üretimi

Akım taşıyan bir iletkenin bir manyetik alan üretimini ortaya koyan temel kanun Amper kanunu olarak bilinir.

$$\oint \mathbf{H} \cdot d\mathbf{l} = I_{net} \quad (1.6)$$

$$Hl_c = Ni \quad (1.7)$$

Denklem (1.6) ile verilen ifadede H ; I_{net} akımı tarafından üretilen manyetik alan şiddeti ve dl ise integrasyon yolu boyunca uzunluğun diferansiyel elemanıdır. SI birim sisteminde; I amper olarak verilirse; H , metre başına amper-sarım olarak elde edilir. Dikdörtgen bir çekirdeğin bir bacağına sarılmış N sarımlı bir sargıyı göstermektedir. Eğer çekirdek demir yada demirin başka benzer metallere karışımından oluşursa; akım tarafından üretilen manyetik alanın tümü çekirdek içerisinde kalır; böylece amper kanunundaki integrasyonunun yolu, çekirdeğin ortalama yol uzunluğu l_c olur. İntegrasyon yolundan geçen akım I_{net} bu durumda Ni olur. Çünkü i akımı, sargı bobini; integrasyon yolunda N defa keser. Bu durumda Amper kanunu denklem (1.7) ile ifade edilir. H , manyetik alan şiddeti vektörünün genliğidir. Dolayısıyla, uygulanan akımdan dolayı çekirdekteki manyetik alan şiddetinin genliği denklem (1.8) ile tanımlanır.



Şekil 1.11. Basit bir manyetik yapıda manyetik akının üretilmesi

$$H = \frac{Ni}{l_c} \quad (1.8)$$

$$B = \mu H \quad (1.9)$$

Manyetik alan şiddeti H, manyetik akının oluşmasında akımın gösterdiği etkinin bir ölçüsü gibi düşünülebilir. Çekirdekte üretilen manyetik alan akısının şiddeti çekirdek malzemesine de bağlıdır. Bir malzemedeki akı yoğunluğu B ve manyetik alan şiddeti H arasındaki bağıntı Denklem (1.9) ile ifade edilir. Burada; μ : malzemenin manyetik geçirgenliği (H/m), B: manyetik akı yoğunluğu (Wb/m^2), Manyetik geçirgenlik malzeme içerisinde manyetik alanın geçişini kolaylaştırır ve akı yoğunluğu da metre kare başına Weber olup bu değer Tesla (T) olarak bilinir. Boşluğun manyetik geçirgenliği sabit olup, μ_0 ile ifade edilir.

$$\mu_0 = 4\pi 10^{-7} \text{ (H/m)} \quad (1.10)$$

$$\mu_r = \frac{\mu}{\mu_0} \quad (1.11)$$

Herhangi bir malzemenin manyetik geçirgenliğinin havanın manyetik geçirgenliğine oranı bağıl manyetik geçirgenliği verir ve μ_r ile ifade edilir. Bağıl geçirgenlik malzemenin mıknatıslanabilme özelliğini kıyaslayabilmek için bir göstergedir. Elektrik makinelerinde kullanılan çelikler boşluğa göre 2000 ila 6000 kat daha fazla manyetik geçirgenliğe sahiptirler. Hava ile serbest uzay boşluğunun manyetik geçirgenlikler eşit kabul edilir. Demirin geçirgenliği havaya göre çok daha yüksek olduğu için Şekil 1.11.'deki manyetik yapıda akımın büyük çoğunluğu nüve içerisinde kalacaktır. Daha düşük geçirgenliğe sahip hava üzerinden yolunu tamamlayamayacaktır. Şekil 1.11.'deki gibi bir çekirdekte meydana gelen akı yoğunluğunun genliği denklem (1.12) ile ifade edilir.

$$B = \mu H = \frac{\mu Ni}{l_c} \quad (1.12)$$

$$\phi = \int B \cdot dA \quad (1.13)$$

Denklem (1.13) ile verilen bir kesit alanındaki toplam akı Burada dA birim alanındaki artıştır. Akı yoğunluğu vektörü, A alanının düzlemine dik ve bu alandaki akı yoğunluğu sabit olursa akı denklemi (1.14) ile tanımlanır.

$$\phi = BA \quad (1.14)$$

$$\phi = BA = \frac{\mu NiA}{l_c} \quad (1.15)$$

Sonuç olarak Şekil 1.11.'deki devrede sargıdan geçen i akımından dolayı nüvede meydana gelen toplam akı (1.15) ifadesi ile tanımlanır. Burada A nüve kesit alanını temsil eder.

1.5.2. Manyetik Devreler

Denklem (1.15) ile ifade edilen manyetik akı nüveye sarılı sargıdan geçen akım tarafından üretilir. Bu olay elektrik devresinde gerilimin devreden akım geçirmesine benzemektedir. Şekil 1.12.'de basit bir elektrik devresi ve bir manyetik devre verilmiştir. Şekil 12. (a)'daki basit bir elektrik devresinde gerilim ifadesi (1.16)'da verilmiştir.

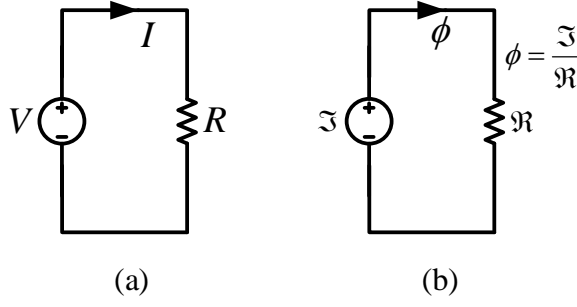
$$V = IR \quad (1.16)$$

Elektrik devresinde gerilim ve ya elektromotor kuvvet (emk) akımın artmasını sağlar. Direnç ise devrede akımı sınırlar. Elektrik devresine benzer olan Şekil 1.12. (b)'deki bir manyetik devrede ise gerilimin yerini manyetomotor kuvvet (mmk) alır. Bir sargıdan geçen akım, mmk (\mathfrak{F}) değerini belirler.

$$\mathfrak{F} = Ni \quad (1.17)$$

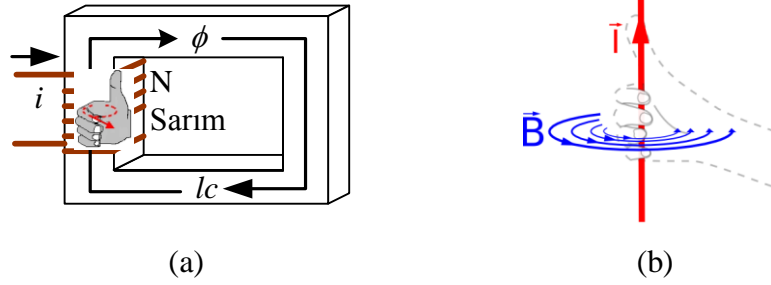
$$\mathfrak{F} = \phi \mathfrak{R} \quad (1.18)$$

Manyetik devrede uygulanan mmk devrede bir akı (ϕ) üretilmesini sağlar. mmk ile akı arasındaki ilişki (1.18) ifadesiyle verilir. Burada \mathfrak{R} relüktansı temsil eder ve birimi At/Wb 'dir. Relüktans akıyı sınırlar.



Şekil 1.12. Elektrik ve manyetik devrelerin karşılaştırılması

Elektrik devresindeki gerilim kaynağına benzer olarak manyetik devrede Mmk'in de bir polaritesi vardır. Mmk kaynağının pozitif ucu manyetik akımın çıktığı uçtur, negatif ucu ise manyetik akımın tekrar kaynağa girdiği uçtur. mmk'in yönü sağ el kuralının bir sargıya uyarlanmış şeklinden elde edilebilir. Şekil 1.13. (a)'da gösterilen manyetik yapıda sağ el parmakları sargıdan geçen akım yönünde sargıyı kavrar ise parmaklara dik tutulan başparmak akımın ve dolayısıyla mmk'in yönünü gösterir.



Şekil 1.13. Bir manyetik devrede mmk kaynağı polaritesinin belirlenmesi

İçinden akım geçen bir iletkenin ürettiği akımın yönünü bulmak için sağ el kuralı uygulanır. Şekil 1.13.(b)'de gösterildiği gibi iletken sağ el ile tutulur ve başparmak akımın yönünü gösterirse diğer parmaklarda akımın yönünü gösterir.

Bir manyetik devrenin relüktansı elektrik devresi direnci karşılığıdır. Elektrik devresinde direncin tersi olarak ifade edilen kondüktansında manyetik devrede bir karşılığı olup relüktansın tersidir ve permeans olarak adlandırılır. Denklem (1.19) ile verilmiştir.

$$P = \frac{1}{\mathfrak{R}} \quad (1.19)$$

MMK ile akı arasındaki ilişki,

$$\phi = \mathfrak{S}P \quad (1.20)$$

olarak da ifade edilebilir. Şekil 1.13.(b) deki manyetik yapının relüktansını bulmak için önce nüve içindeki akı denkleminde yararlanılır.

$$\phi = Ni \frac{\mu A}{l_c} \quad (1.21)$$

$$\phi = \mathfrak{S} \frac{\mu A}{l_c} \quad (1.22)$$

Denklem (1.18 ve 1.19) den nüvenin relüktansı yazılabilir.

$$\mathfrak{R} = \frac{l_c}{\mu A} \quad (1.23)$$

Manyetik devredeki relüktanslar için de elektrik devresindeki dirençlere uygulanan kurallar geçerlidir. Seri manyetik devrenin eşdeğer relüktansı;

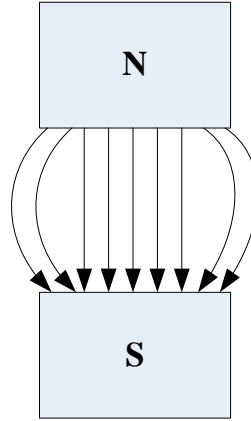
$$\mathfrak{R}_{eş} = \mathfrak{R}_1 + \mathfrak{R}_2 + \mathfrak{R}_3 + \dots \quad (1.24)$$

Paralel manyetik devrenin eşdeğer relüktansı;

$$\frac{1}{\mathfrak{R}_{eş}} = \frac{1}{\mathfrak{R}_1} + \frac{1}{\mathfrak{R}_2} + \frac{1}{\mathfrak{R}_3} + \dots \quad (1.25)$$

Bir nüvede manyetik akının hesaplanması için daima varsayımlara dayanır ve bulunan değerler hep yaklaşık değerler olup % 5 hata ile sonuçlar elde edilir. Hesap sonucunun hassasiyetini etkileyen doğal nedenler vardır.

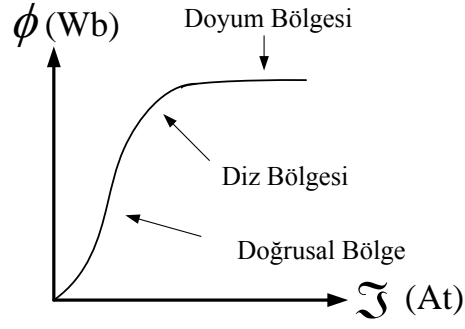
1. Manyetik devrede bütün manyetik akının bir manyetik nüve içinde tutulduğu varsayılır. Bu kabul çok gerçekçi değildir. Akının bir kısmı havadan devresini tamamlar. Bu akıya kaçak akı denir.
2. Relüktansın hesaplanmasında akının nüvenin her yerine dengeli dağıldığı kabul edilir. Nüvenin köşelerinde bu varsayım doğruluğunu yitirir.
3. Ferromanyetik malzemelerde geçirgenlik malzeme içindeki akının artmasıyla değişir. Sabit kabul edilen relüktans değeri hesaplamanın sonucuna etki eder.
4. Nüve içinde hava aralıkları var ise hava aralığının etkin kesit alan değeri nüve kesit alanının her iki tarafından taşarak nüve kesit alanından daha geniş olacaktır. Hava aralığı kesit alanındaki bu fazlalık, hava aralığındaki manyetik alanın saçak etkisi tarafından meydana getirilir. Bu durum Şekil 1.14.'te gösterilmiştir.



Şekil 1.14. Hava aralığındaki manyetik akının saçak etkisi

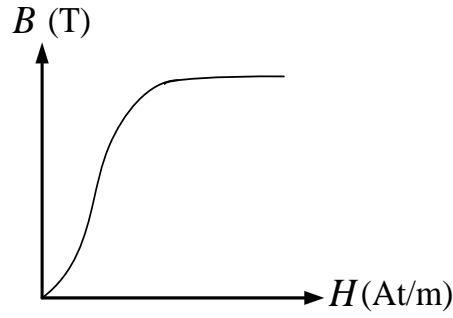
1.5.3. Ferromanyetik Malzemelerin Manyetik Davranışları

Ferromanyetik malzemelerin manyetik geçirgenlik davranışını anlamak için Şekil 1.11.'deki devreye bir doğru akım uygulanır. Devreden geçen akım sıfır değerinden başlayarak yavaş yavaş artırıldığında, nüvede üretilen akının değişimi kendisini üreten mmk değerine karşı çizdirilir ise Şekil 1.15.'deki eğri elde edilir. Bu eğriye mıknatıslanma eğrisi ya da doyum eğrisi denir.



Şekil 1.15. Ferromanyetik Malzemenin Miknatıslanma Eğrisi

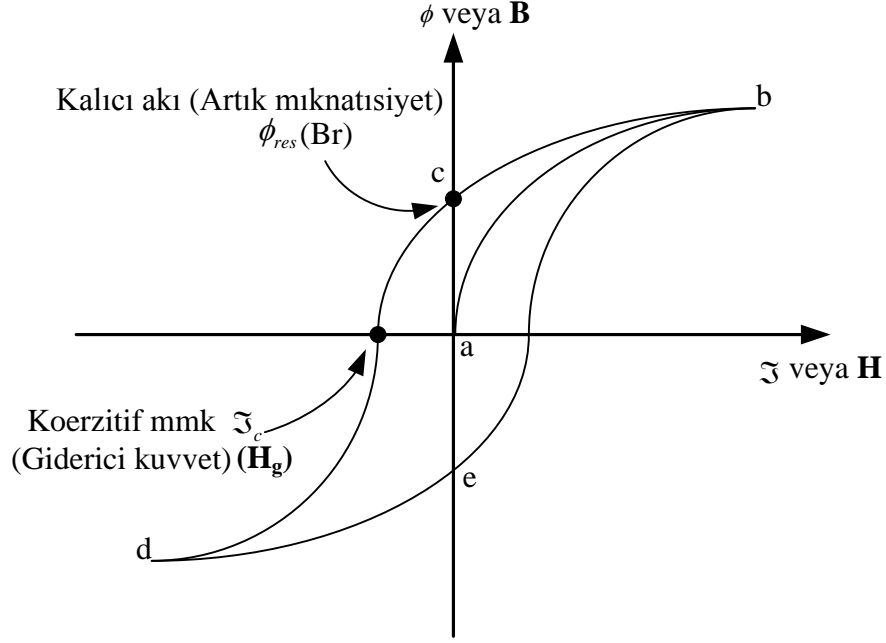
Eğri incelendiğinde ilk başta akımda ve dolaylı olarak mmk'deki az bir değişiklik akıda büyük bir değişime neden olmaktadır. Belirli bir noktaya ulaşıldıktan sonra mmk'deki artışa karşılık akı aynı oranda artmaz ve mmk artırılmaya devam edilir ise akının artmadığı görülür. İşte eğrinin sabit kalan bu bölgesine doyum bölgesi denir ve nüve doymuş durumdadır. Akının mmk ile değiştiği bölgeye ise doymamış doğrusal bölge denir. Her iki bölgenin arasındaki geçiş bölgesine ise diz bölgesi denir.



Şekil 1.16. Miknatıslanma eğrisinin akı yoğunluğu

1.5.3.1. Histerisiz Çevrimi

Nüve üzerine sarılan sargılara alternatif akım uygulanırsa nüvede meydana gelen akı eğrisi Şekil 1.17.'deki gibi olur.

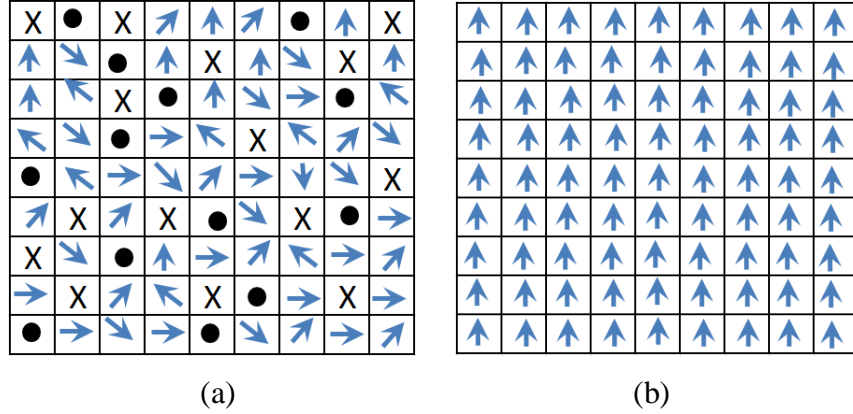


Şekil 1.17. Histerisiz çevrimi

Akımın sinüzoidal olarak değiştiği göz önünde bulundurulur ise akı eğrisi a-b yolunu izler bu yol doyum mıknatıslanma eğrisidir. Ancak akım azalmaya başladığında akı b-c-d yolunu izler. Akım tekrar arttığında ise nüvenin akısı d-e-b yolunu izler. Nüvede oluşan akımın değeri sadece sargılarda uygulanan akıya değil aynı zamanda nüvedeki oluşan akımın daha önceki durumlarına da bağlıdır. İşte akımın önceki durumlardaki değerlerinin yollarını yeniden izleyememesi olayı Histerisiz olarak adlandırılır. Akımın izlediği bu çevrime de histerisiz çevrimi denir.

Eğer büyük bir MMK nüveye daha önce uygulansaydı ve sonrada bu mmk kaldırılırdı nüvedeki akı yolu a-b-c olurdu. Mmk kaldırıldığı an nüvedeki akı sıfıra gitmez. Nüvede bir manyetik alan kalır. Bu manyetik alan çekirdekdeki kalıcı akı yada artık mıknatısiyet (B_r ; remanans) olarak adlandırılır. Kalıcı mıknatıslar tamamen bu olaya göre üretilirler. Akıyı sıfıra götürmek için giderici mmk H_c (koerzitif manyetomotor kuvvet) olarak bilinen bir mmk'in zıt yönde uygulanması gerekir. Histerisizin oluşumunu anlaşılması için ferromanyetik malzemelerin davranışı hakkında bazı bilgilerin verilmesi gerekir. Demirin ve benzeri metallerin (kobalt, nikel ve bunların tozlarının) atomları birbiriyle büyük oranda aynı yönde manyetik alanlara sahip olmaya meyillidirler. Metal içinde birçok küçük bölgeler vardır, bunlara domain denir. Her bir domaindeki bütün atomlar, aynı yönü gösteren manyetik alanlar ile aynı istikamettedirler. Bundan dolayı

metal malzeme içindeki her bir domain iki-kutuplu küçük bir kalıcı mıknatıs gibi davranır. Blok bir demirin herhangi bir akıya sahip olmamasının sebebi çok sayıdaki domainlerin malzeme içinde gelişli güzel dağılmış olmalarındandır.



Şekil 1.18. (a) Harici manyetik alan şiddetinin olmadığı durum için domeinlerin rastgele yönlenmiş hali (b) Harici manyetik alan şiddetinin domeinleri kendi etkilemesi durumu

Bir metal parça içersindeki domain yapısı Şekil 1.18.'de gösterilmiştir. Bu blok demire harici bir manyetik alan uygulandığı zaman manyetik alan, domainlerin manyetik alan kuvvetlendirecek yönde yönlendirilmesine neden olur. Harici manyetik alan şiddeti artırılmaya devam edilirse farklı yönlere yönlenmiş bütün domainler manyetik alan yönünde yönlendirilecektir. İşte bu pozitif etkidir ki demirin geçirgenliğinin havaya göre daha yüksek olmasını sağlar. Bütün domainler aynı hizaya (yöne) getirildiğinde alanı kuvvetlendirecek daha fazla geri besleme etkisi kalmaz. Bu noktada domainler akı ile doyuma uğratılmıştır. Şekil 1.17.'de mıknatıslama eğrisinin doyum bölgesindeki durumu böyledir.

Histerisiz olayında harici manyetik alan kaldığında domainler tekrar tamamen gelişli güzel hale dönmezler. Atomları yönlendirmek için bir enerji gereklidir. Bu enerji harici manyetik alan kaynağı tarafından sağlanmıştır. Harici manyetik alan kaldırıldığı zaman bütün domainlerin yönlerini eski hallerine döndürmek için bir enerji kaynağı kalmamış olur. Artık demir parçası bir kalıcı mıknatıs olmuştur. Domainler bir defa aynı yöne yönlendirildiklerinde harici bir manyetik alan enerji kaynağı sağlanıncaya kadar aynı yönlerini korurlar. Domainler arasındaki sınırlar ve/veya aynı yöndeki domainlerin alan yönlerini değiştirmek için harici enerji kaynaklarına örnekler şöyle olabilir. (1) Zıt yönde

uygulanan manyetomotor kuvvetler (2) büyük bir mekanik şok (3) aşırı ısınma. Bu olayların herhangi birinin oluşması domainlerin alan yönlerini değiştirmeye neden olabilecek enerjiyi ortaya çıkarır. Kalıcı mıknatıs malzemeler düşürüldükleri, çekiç gibi sert bir cisimle vuruldukları zaman veya aşırı ısıtıldıkları takdirde mıknatıs özelliklerini kaybederler.

1.5.5. Ferromanyetik Nüvedeki Enerji Kayıpları

Ferromanyetik nüvede histerisiz ve eddy akımı kayıpları olmak üzere iki çeşit kayıp meydana gelmektedir.

1.5.5.1. Histerisiz Kayıpları

Demir içinde domainlerin yönünü değiştirmek için gerçekte bir enerjiye gerek duyulması, bütün makinelerde ve transformatörlerde ortak olan bir enerji kaybına neden olur. Bir demir nüveye uygulanan alternatif akımın her bir saykılı boyunca domainlerin yön değiştirmesi için harcanan enerjiye histerisiz kayıpları denir. Histerisiz çevrimini nüveye uygulanan alternatif akım şekillendirir ve histerisiz çevriminin alan her bir saykıldaki enerji kayıpları ile orantılıdır. Dar bir aralıktaki histerisiz çevrimi yüksek histerisiz kayıplarını geniş bir aralıktaki histerisiz çevrimi yüksek histerisiz kayıplarını göstermektedir. Şekil 1.17 aynı zamanda histerisiz kayıplarını temsil etmektedir. Histerisiz kayıpları denklem (1.26) ile ifade edilebilir.

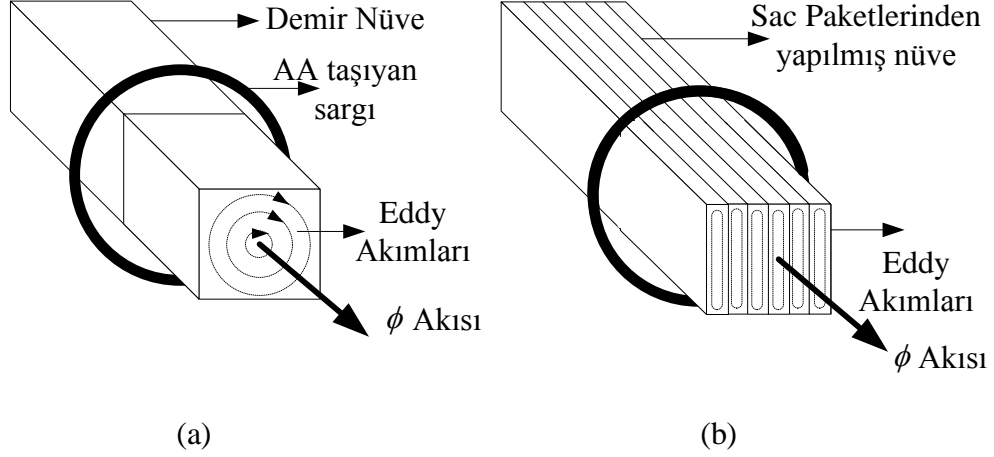
$$P_h = K_h f B_m^n V \quad (1.26)$$

Burada P_h , histerisiz kayıpları (W), K_h bir sabit olup kullanılan manyetik malzemeye bağlıdır, n deneysel olarak bulunur ve 1,5 ila 2,5 arasında alınır, V nüve hacmidir (m³).

1.5.5.2. Girdap (Eddy) Akımı Kayıpları

Nüve içindeki kayıpların diğer bir kaynağı da nüve içinde değişen manyetik alanlar tarafından üretilir ve eddy akımı kayıpları olarak adlandırılır. Faraday kanununa göre, zamanla değişen akı nüve etrafına sarılı sargılarda bir gerilim indüklediği gibi manyetik bir

nüve içerisinde de bir gerilim indükler. Bu gerilimler Şekil 1.19.(a)'da gösterildiği gibi nüve içerisinde akımın bir halka şeklinde dolaşmasına neden olurlar. Bu olay su akıntısındaki girdaplara da benzetilir ve ismini de oradan almıştır.



Şekil 1.19. (a) Blok demir nüvedeki eddy akımları, (b) sac paketlerden yapılmış nüvedeki eddy akımları

Eddy akımları demir nüve gibi rezistif özelliği olan malzemeler içinden akarlar ve enerji nüve içinde harcanır. Kayıp enerji demir nüvenin ısıtılmasına gider. Eddy akımları yüzünden kaybolan enerji miktarı eddy akımlarının nüve içerisinde izledikleri yolların boyutları ile orantılıdır. Bu sebepten dolayı alternatif olarak değişen akıya maruz kalan ferromanyetik nüvenin, Şekil 1.19.(b)'de görüldüğü gibi birçok ince levhalardan yapılması artık klasik bir tekniktir. Levhalar arasında yalıtım için silis kullanılır. Silisli saclardan yapılan nüvede eddy akımlara için akım yolları çok kısaltılmış olur ve böylece eddy akımı kayıpları azaltılır. Birim hacim başına ve nüvenin toplam eddy akımı güç kayıpları;

$$P_e = K_e (fB_m t_1)^2 \quad (\text{W/m}^2) \quad (1.27)$$

$$P_e = K_e (fB_m t_1)^2 V \quad (\text{W}) \quad (1.28)$$

Burada t_1 levha sac kalınlığı, K_e sabit olup manyetik malzemenin iletkenliğine bağlıdır, V m³ cinsinden manyetik nüvenin hacmidir. Hem histerisiz hem de eddy akımları kayıpları nüvenin ısınmasına neden olurlar. Bu iki kayıp makine ve transformatör tasarımında özellikle dikkate alınmalıdır[48].

2. TRANSFORMATÖRLER

Elektrik enerjisinin diğerk enerji türlerine göre en önemli üstünlüklerinden birisi, enerjinin üretim kaynağı ile tüketilecek noktanın arasında mesafe sınırının olmayışıdır. Farklı türdeki enerjiler elektrik üretim santrallerinde elektriğe dönüştürüldükten sonra coğrafi olarak çok uzak mesafelerdeki kullanım alanlarına kolaylıkla iletilebilmektedir. Üretilen birim enerjiden, tüketim noktasında daha çok istifade etmek için enerji iletiminin en yüksek verimle ve en az kayıpla yapılması önemlidir. Bunun sağlanması için iletim sistemindeki temel elektriksel parametrelerin bazı dönüşümlere uğraması yani gerilimin oldukça yüksek değerde akımın da oldukça düşük değerde olması istenir[49].

Elektrik enerjisi doğru veya alternatif akım olarak üretilir. Doğru akımda yüksek gerilimli enerji iletimi (HVDC) son zamanlarda büyük önem kazanmıştır. Ancak bu iletim metodu, özellikle ilk kurulum maliyetlerinin büyük olması sebebiyle istenilen düzeyde yaygınlaşmamıştır. Geleneksel olarak, elektrik enerjisi santrallerde alternatif akım olarak üretilir. Üretilen elektrik enerjisinin gerilimi çok yüksek değildir. Elektrik enerjisini uzak bölgelere enerji iletim ve dağıtım hatlarıyla enaz kayıpla iletilebilmesi için gerilimin yükseltilmesi gerekir. Yüksek gerilimle iletilen elektrik enerjisinin kullanım yerlerinde ihtiyaç duyulan gerilim seviyesine tekrar düşürülmesi gerekir. İşte santrallerde düşük gerilimle üretilen elektrik enerjinin iletilmesi için yüksek gerilime dönüştürülmesi, kullanım yerlerinde de istenilen gerilim seviyesine tekrar düşürülmesi için transformatörler kullanılır.

Gelişen teknoloji ile elektrikle çalışan cihazların büyük kısmında yarıiletken güç elektroniği devre elemanları kullanılmaktadır. Çoğu zaman bu elemanların sağlıklı çalışmaları için ihtiyaç duyduğu akım, gerilim gibi elektriksel parametrelerin değerleri farklılık arz edebilir. Alternatif akımla çalışan birçok elektrikli cihazın besleme ünitelerinde bu farklı seviyelerdeki ihtiyaçları karşılamak için hem gerilim seviyesini değiştirmek hem de elektriksel yalıtımı sağlamak amacıyla transformatörler yaygın olarak kullanılmaktadır. Yüksek gerilimli sistemlerde enerji ölçümü yapmak için ölçülecek büyüklüklerin ölçü aletlerinin ölçebileceği seviyelere düşürülmesi gerekir. Bu amaç için de ölçü transformatörleri kullanılır.

Transformatörler elektrik enerjisini bir gerilim seviyesinden başka bir gerilim seviyesine (frekansını değiştirmeden) elektriksel endüksiyon yoluyla dönüştüren statik (hareket eden parçası olmayan) elektrik makineleridir. Transformatörler statik elektrik

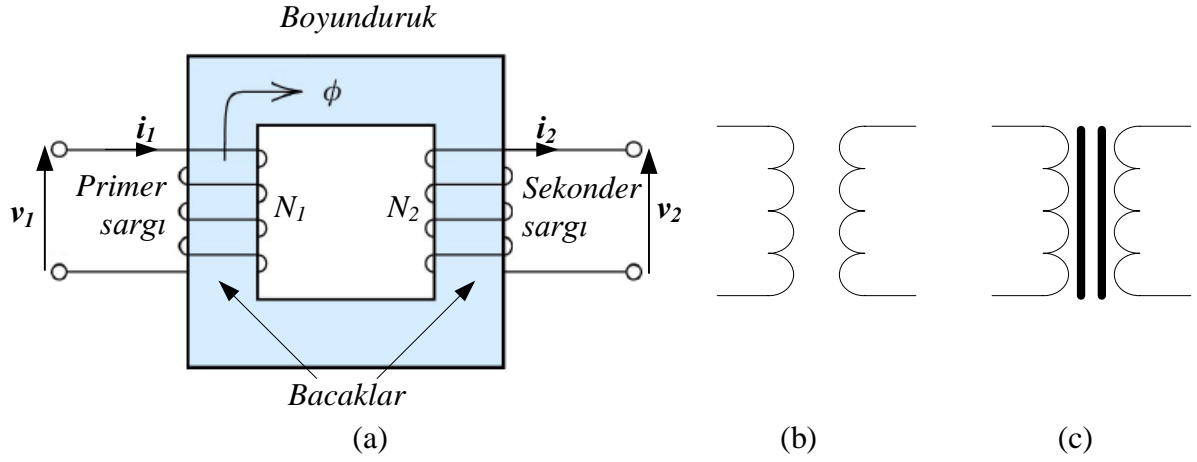
makinaleri olduğu için elektriksel endüksiyonun meydana gelebilmesi için transformatörün alternatif akımda çalışması gerekir. Bir transformatör doğru akım devresine bağlanırsa, manyetik alan sabit olduğu için elektriksel endüksiyon meydana gelmez ve transformatör çalışmaz.

Transformatörlerde genel olarak iki tane sargı bulunmaktadır. Bunlar primer (birincil) ve sekonder (ikincil) sargı olarak adlandırılırlar. Primer sargısı giriş sargısı, sekonder sargısı da çıkış sargısı olarak da adlandırılabilir. Primer sargısı giriş şebekesine, sekonder sargısı da yük tarafına bağlanır. Primer sargı şebekeye bağlandığı için primer sargı gerilimi şebeke gerilimine eşittir. Sekonder sargı gerilimi primer sargı geriliminden yüksek veya düşük olabilir. Sekonder sargı gerilimi primer sargı geriliminden yüksek ise bu tür transformatörlere yükseltici transformatör, sekonder sargı gerilimi primer sargı geriliminden düşük ise bu tür transformatörlere de düşürücü transformatör denir.

Transformatörler çalışırken dönüştürdüğü elektriksel gücün bir kısmı kayıplar için harcanır. Transformatörler statik yani hareketli parçaları olmayan makineler olduğu için kayıpları çok düşük seviyelerdedir. Elektrik makineleri içinde kayıpları en düşük olan makine transformatördür. İdeal bir transformatörün giriş gücünün tamamını çıkışa transfer ettiği kabul edilir. Küçük güçlü transformatörlerde giriş gücünün %80-%90 kadarı çıkışa transfer edilebilmektedir. Yüksek güçlü transformatörlerde ise giriş gücünün %99.5'e kadarını çıkışa aktarabilmek mümkündür. Transformatörlerin kapasitesi görünür güçleri olan volt-amper (VA) cinsinden anılırlar [50].

2.1. Transformatörlerin İç Yapısı

Transformatörler ince saclardan yapılmış ve demir gövde adı verilen kapalı bir manyetik devre ile yalıtılmış iletkenlerden sarılıp demir gövde üzerine yerleştirilmiş iki sargıdan meydana gelmiştir. Oto trafoları dışında bu iki sargı elektriksel olarak birbirinden tamamen yalıtılmıştır. Bu sargılara ilkinde primer (birincil) sargı, diğerine de sekonder (ikincil) sargı denir. Primer sargı transformatörün giriş sargısıdır ve şebekeye bağlanır. Sekonder sargısı da çıkış sargısıdır ve yüke bağlanır. Transformatörlerin sargılarında genel olarak bakır iletken kullanılır. Ancak alüminyum iletken bazı özel uygulamalar için kullanılan transformatörlerde kullanılabilir.



Şekil 2.1. Bir transformatör çekirdeği ve sembolleri

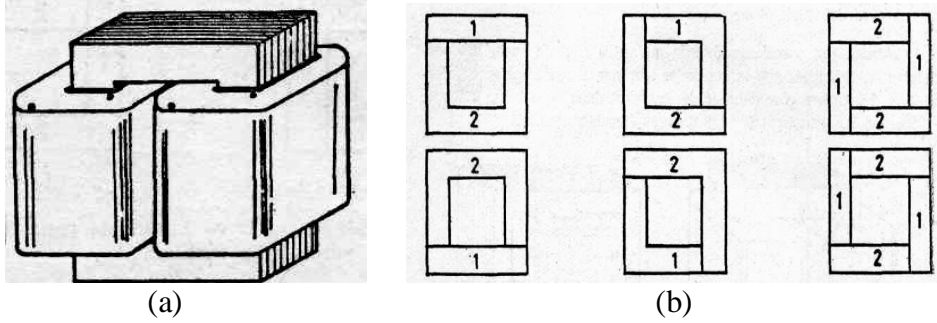
Transformatörlerde sargıların üzerine sarıldığı kapalı manyetik gövdeye nüve denir. Nüve yapımında yumuşak demir, çelik ve hava kullanılır. Yumuşak demir ve çelik nüveler düşük frekanslı şebekelerde çalışan transformatörlerde kullanılır. Hava nüve ise çok yüksek frekanslı şebekelerde çalışan transformatörlerde kullanılır. Şekil 2.1. (a)'da belirtildiği gibi nüvenin sargıların üzerine sarıldığı kısma bacak alt ve üst kısımlarına da boyunduruk denir. Transformatörler elektrik devrelerinde çizilirken nüve şekli yerine semboller kullanılır. Şekil 2.1. (b)'de hava nüveli bir transformatörün sembolü, Şekil 2.1. (c)'de ise demir nüveli bir transformatörün sembolü görülmektedir.

Transformatörün primer sargısına alternatif akım şeklinde bir gerilim uygulandığında bu sargıda uygulanan gerilimin frekansına bağlı olarak değişen bir manyetik akı meydana gelir. Bu manyetik akı nüve üzerinden devresini tamamlar. Nüve üzerinden devresini tamamlayan manyetik akı aynı nüve üzerinde sarılmış hem primer sargıyı hem de sekonder sargıyı kestiği için sekonder sargıda bir gerilim indüklenir.

Transformatörün primer ve sekonder sargıları aynı manyetik akı tarafından kesildiğinden dolayı her iki sargı için de sarım başına indüklenen gerilim aynı değerdedir. Transformatörlerde gücün en verimli bir şekilde primer sargıdan sekonder sargıya manyetik olarak transfer edilebilmesi için nüvede kullanılan malzemenin relüktansının çok düşük olması istenir. Bundan dolayı nüveler bir tarafı yalıtılmış yumuşak demir ve çelik malzemeden yapılmış ince saçların paketlenmesiyle meydana gelir. Saçların bir yüzünün yalıtılmasında vernik, kâğıt, lak ve benzeri yalıtkanlar kullanılır. Bunun nedeni transformatörlerde demir kayıpları olarak adlandırılan ve ısı olarak meydana gelen fuko ve histerisiz kayıplarını azaltmaktır.

2.1.1. Çekirdek Tipi Yapılı Transformatörler

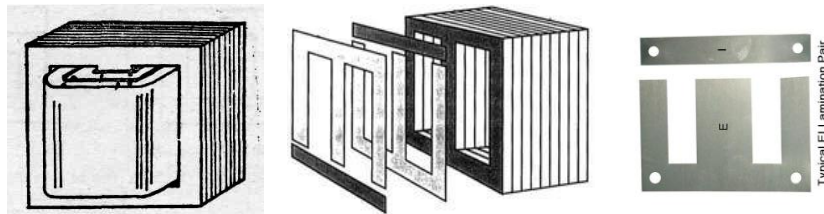
Çekirdek tipi yapıdaki transformatörde sargılar manyetik nüveyi kavrayacak şekilde yan bacaklara sarılırlar. Nüvenin kesiti her yerde aynıdır. Bu tip nüvelerde yalıtım için daha fazla yer bulunduğundan büyük güçlü ve yüksek gerilimde çalışacak transformatörlerde çekirdek tipi nüve kullanılır [51]. Çekirdek tipi nüve saçlar U-I veya L şeklinde kesilip paketlenerek oluşturulur. Şekil 2.2.'de çekirdek tipi bir nüve ve nüveyi oluşturan U-I şeklinde kesilmiş saçlar görülmektedir.



Şekil 2.2. Bir transformatörün, (a) nüvesi, (b) sembolleri

2.1.2. Mantel (Ceket) Tip Yapılı Transformatörler

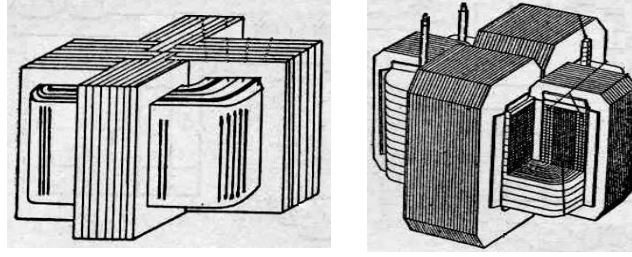
Mantel yada ceket tip yapıdaki transformatörde sargıları kavrayacak şekilde yapılıdır. Bu nüve şekli küçük güçlü transformatörlerde kullanılır. Nüvenin kesiti her yerde aynı değildir. Sargılar orta bacağa sarılır. Orta bacadaki meydana gelen akı yan bacaklarda iki kola ayrılarak devresini tamamlar. Mantel tipi nüve, saçlar E-I şeklinde kesilip paketlenerek oluşturulur. Mantel tipi nüve ve nüveyi oluşturmak için kullanılan saçların şekli ve dizilişi Şekil 2.3.'de verilmektedir.



Şekil 2.3. Mantel tipi nüve ve hazırlanışı

2.1.3. Dağıtılmış Tip Yapılı Transformatörler

Çekirdek ve mantel tipi transformatör nüvelerinden ayrı olarak değişik tipte nüveler mevcuttur. Dağıtılmış tip nüvede üstten bakıldığında artı şekli görülür. Sargılar orta bacağa sarılmış olup dört dış ayak tarafından kuşatılmıştır. Bu tip nüvede kaçak akılar en düşük değerde olduğundan boş çalışma akımı çok az olmaktadır.



Şekil 2.4. Dağıtılmış tip nüve ve hazırlanışı

2.1.4. Ferrit Tip Yapılı Transformatörler

Ferritler başlıca malzeme olarak demir (III) oksit (Fe_2O_3) ile seramik malzemeler içeren kimyasal bileşiklerdir. Çoğu manyetik malzeme ve kalıcı mıknatıs, transformatörler için ferrit nüve yapımı gibi uygulamalarda kullanılırlar. Elektronikte ferrit nüve, transformatör ve bobin gibi diğer sarımlı elemanların sargılarının üzerine sarıldığı demirden yapılmış manyetik nüve tipidir. Fuko akımlarını önlemeye yardımcı düşük elektrik iletkenlik ve yüksek manyetik geçirgenlik özellikleri için kullanılır. Yüksek frekansta nispeten düşük kayba sahip olması nedeniyle anahtarlamalı güç kaynakları RF transformatör nüveleri ve bobinlerde yaygın olarak kullanılır.



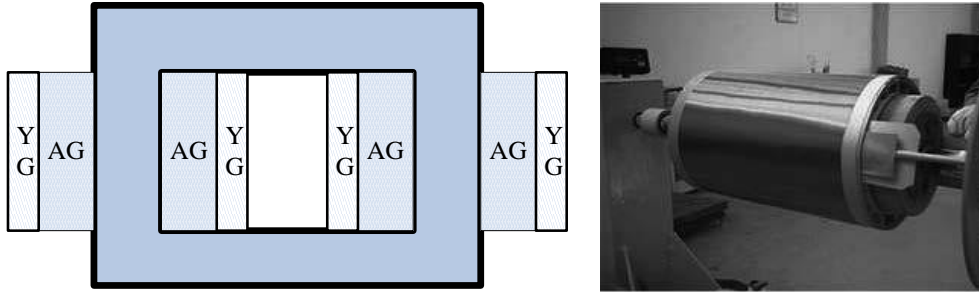
Şekil 2.5. Ferrit tip yapıları

2.2. Transformatör Sargıları

Transformatörlerde kullanılan sargılar silindirik ve dilimli sargı olmak üzere iki farklı sargı şekli kullanılır. Silindirik sargılar küçük güçlü transformatörlerde kullanılır. Makara şeklinde hazırlanıp nüveye yerleştirilir. Alçak gerilim sargısı altta yüksek gerilim sargısı üste gelecek şekilde hazırlanır.

2.2.1. Silindirik Sargıları

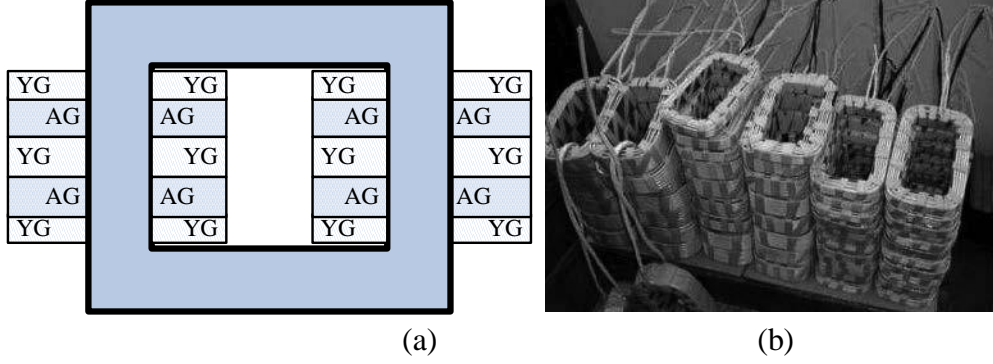
Şekil 2.6. (a)'da silindirik sargı kesiti (b)'de ise sargının hazırlanışı görülmektedir. Dilimli sargılar büyük güçlü transformatörlerde kullanılır. Primer ve sekonder sargılar dilimlere ayrılarak sarılır. Sargı dilimlerinin arası yalıtılarak nüveye yerleştirilirler.



Şekil 2.6. Silindirik sargı

2.2.2. Dilimli Sargıları

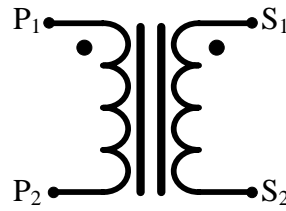
Şekil 2.7.(a)'da dilimli sargı kesiti (b)'de ise hazırlanışı görülmektedir. Alçak gerilim sargıları ile yüksek gerilim sargılarının arası ve sargı ile nüve arası transformatörün çalışma gerilimi göz önünde bulundurularak yalıtılır. Yalıtım malzemesi olarak kâğıt, plastik maddeler, pamuk, mika, pres bant, reçine, pertinaks ve benzeri kullanılır. Sargılarda kullanılan iletken bakır veya alüminyum iletken olur. İletkenlerin üzeri pamuk, kâğıt veya vernikle izoleli olup kesiti yuvarlak veya dikdörtgen şeklindedir. Küçük güçlü transformatörlerde sargılar yuvarlak kesitli iletken yapıldığında büyük güçlü transformatörlerde sargılarda kullanılan iletkenlerin kesiti dikdörtgen şeklindedir. Dikdörtgen kesitli iletkenlerden yapılan sargılarda iletkenler arasındaki hava boşlukları çok küçük olur. Bu da nüvenin daha etkin olarak kullanılmasına yani aynı nüve boşluğuna daha fazla sarım sarılmasına imkân sağlar[52].



Şekil 2.7. Dilimli sargı

2.2.3. Transformatörlerin Sargı Polaritesi

Bilindiği gibi transformatörlerin primer sargısına uygulanan AC gerilimin polaritesi ve sargıda meydana gelen manyetik akının yönü sekonder sargıda indüklenen gerilimin yönünü etkiler. Sargı uçları belli olmayan bir trafodaki indüklenen gerilimin anlık yönlerinin bulunmasına veya sargı uçlarının işaretlerinin belirtilmesine polarite denir. Transformatörlerin paralel bağlanması veya sargıların kendi aralarında bağlanmasında hangi ucun hangi uca bağlanacağı sargı polaritesine göre kararlaştırılır. Polarite şematik olarak noktalama işaretiyle belirlenir. Şekil 2.8.'de bir transformatörün polaritesi noktalama işaretiyle belirtilmiştir.



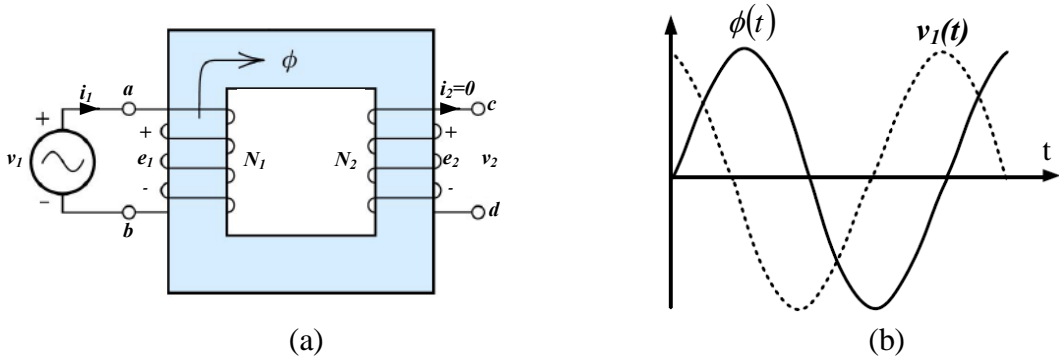
Şekil 2.8. Transformatörlerin polaritesi

P_1 ucu ile S_1 ucu aynı noktalama işaretine sahip olduklarından aynıdır. P_1 ve S_1 uçlarına aynı yönde akım uygulandığında meydana gelen akı aynı yönde olur. Buna göre P_2 ve S_2 uçları aynı yönde akım uygulandığında meydana gelen akı da aynı yönde olur. P_1 ve P_2 uçlarına gerilim uygulandığında (P_1 ucunda pozitif gerilim varsa) S_1 ucu da pozitif bir gerilim indüklenir. Eğer S_1 ve S_2 uçlarına yük bağlanırsa P_1 ucuna akım girerse S_1

ucundan akım çıkar. Polarite sargıların sarım yönüne bağlıdır. Eğer sargılarda herhangi bir işaretleme yoksa polariteleri deneysel olarak bulunabilir.

2.3. Transformatörlerin Çalışma İlkesi

Bilindiği gibi Lenz kanunu ile bir iletkende herhangi bir gerilimin indüklenebilmesi için ya iletkenin değişken bir manyetik alan içinde bulunması yada sabit bir manyetik alan içinde hareket etmesi gerektiği açıklanmıştır. Transformatörler durağan elektrik makineleri olup hareket eden parçaları olmadığı için oluşan manyetik alan hareketli olması gerekir.



Şekil 2.9. (a) Sekonderi boştaki bir transformatör, (b) manyetik akının gerilimle değişimi

Şekil 2.9. (a)'da verilen bir sekonder sargı uçları boştaki transformatörün primer sargısına alternatif bir uygulandığında primer sargıdan küçük değerli bir akım geçer. Primer sargıdan dolaşan bu akım primer sargıda değişken bir ϕ akısı meydana getirir. Bu akı aynı transformatörün nüvesi üzerinden devresini tamamlar. Transformatör nüvesinde meydana gelen bu manyetik akı, Şekil 2.9. (b)'de görüldüğü gibi primer sargıya uygulanan gerilimden 90° geridedir. Nüvedeki değişken akı primer sargısında bir gerilim endükler ve bu gerilim primere uygulanan v_1 gerilimine zıt olan e_1 gerilimidir. Sargı dirençleri ihmal edildiği için zıt EMK e_1 uygulanan gerilim v_1 'e eşit olur.

$$v_1 = e_1 = N_1 \frac{\partial \phi}{\partial t} = \frac{\partial \lambda_1}{\partial t} \quad (2.1)$$

$$v_2 = e_2 = N_2 \frac{\partial \phi}{\partial t} = \frac{\partial \lambda_2}{\partial t} \quad (2.2)$$

Denklem (2.1.)’de N_1 primer sarım sayısını λ_1 primer sargı akısını temsil eder. Nüve üzerinde devresini tamamlayan ϕ akısı sekonder sargıyı da kestiği için sekonder sargıda da bir e_2 EMK’sı indüklenir.

$$\frac{v_1}{v_2} = \frac{e_1}{e_2} = \frac{N_1}{N_2} \quad (2.3)$$

Denklem (2.1) ve (2.2) oranlanırsa, (2.3) ifadesi elde edilir. Bu denklem, primer ve sekonderde indüklenen gerilimler oranının primer ve sekonder sarım sayılarının oranına eşit olduğunu gösterir. Transformatörün primerine alternatif bir gerilim uygulandığında zamana göre değişen bir manyetik alan oluşur. Oluşan manyetik alan da ideal durumda sinüsoidal olacaktır.

$$\phi_t = \phi_{\max} \sin \omega t \quad (2.4)$$

Denklem (2.1) yeniden yazılırsa,

$$e_1(t) = N_1 \phi_{\max} \omega \cos \omega t \quad (2.5)$$

olarak yazılabilir. Burada $\omega=2\pi f$ ve f , frekans (Hertz) ise,

$$e_1(t) = 2\pi f N_1 \phi_{\max} \sin(\omega t + 90^\circ) \quad (2.6)$$

$$e_1(t) = \omega N_1 \phi_{\max} \cos \omega t \quad (2.7)$$

primer zıt EMK ifadesi,

$$e_1(t) = \sqrt{2} E_1 \sin(\omega t + 90^\circ) \quad (2.8)$$

$$e_1(t) = \sqrt{2} E_1 \cos \omega t \quad (2.9)$$

olarak ifade edilebilir. Burada, E_1 , primerde indüklenen EMK’nın etkin değeridir ve

$$E_1 = \frac{2\pi}{\sqrt{2}} N_1 \phi_{\max} f \quad (2.10)$$

yada,

$$E_1 = 4,44 N_1 \phi_{\max} f \quad (2.11)$$

olarak tanımlanır. İndüklenen gerilim böylece sarım sayısına, akı genliğine ve kaynak frekansına bağlı olduğu görülür.

2.4. İdeal Transformatör

Bir giriş ve bir çıkış sargısına sahip kayıpsız transformatörler için kullanılan bir terimdir. Bir trafonun ideal sayılabilmesi için,

1. Nüve kayıplarını oluşturan histerisiz ve girdap akımı kayıpları ihmal edilmiştir.
2. Kaçak akılar ihmal edilmiştir. Yani, tüm akı nüve içinden akarak sargıları keser.
3. Akıyı meydana getirmek için gerekli uyartım akımı ihmal edilmiştir. Yani nüve manyetik geçirgenliği sonsuz kabul edilmiştir.
4. Sargı dirençleri ihmal edilmiştir.

Primer sargıda indüklenen gerilimin sekonder sargıda indüklenen gerilime oranı primer sargıdaki sarım sayısını sekonder sargıdaki sarım sayısına eşit olup bu orana transformatörün dönüştürme oranı denir ve “ a ” ile gösterilir.

$$\frac{V_1}{V_2} = \frac{4,44 \phi_{\max} f N_1}{4,44 \phi_{\max} f N_2} = \frac{N_1}{N_2} = a \quad (2.12)$$

Transformatörün kayıpları sıfır olarak kabul edilirse primer sargıya uygulanana gücün tamamı sekonder sargıya transfer edilir. Primer sargı ve sekonder sargı görünür güçleri,

$$S_1 = V_1 I_1 \quad (2.13)$$

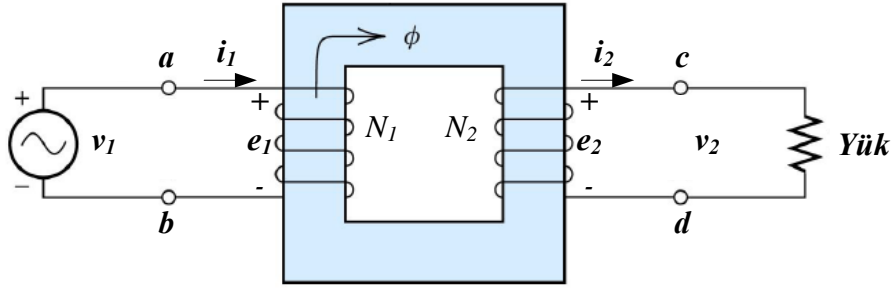
$$S_2 = V_2 I_2 \quad (2.14)$$

olarak yazılabilir. Primer sargı gücü sekonder sargı gücüne eşit olur.

$$S_1 = S_2 = V_1 I_1 = V_2 I_2 \quad (2.15)$$

Denklemler (2.12) ve (2.15) birleştirilirse transformatörün dönüştürme oranı denklem (2.16) ile verildiği gibi yazılabilir.

$$\frac{V_1}{V_2} = \frac{N_1}{N_2} = \frac{I_2}{I_1} = a \quad (2.16)$$



Şekil 2.10. Yük bağlı ideal bir transformatör

Sargı dirençleri, kaçak indüktansları ve uyarım kayıpları ihmal edilmiş ideal bir transformatöre Şekil 2.10.'daki gibi bir yükün bağlandığını varsayalım. Sinüzoidal kararlı durum çalışması için, giriş empedansı,

$$\frac{V_1}{I_1} = Z_1 \quad (2.17)$$

yük empedansı,

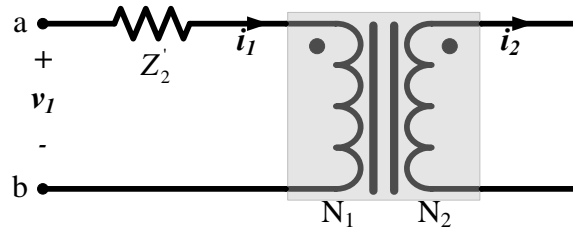
$$\frac{V_2}{I_2} = Z_2 \quad (2.18)$$

buradan,

$$\frac{V_1}{I_1} = \left(\frac{N_1}{N_2} \right)^2 Z_2 \quad (2.19)$$

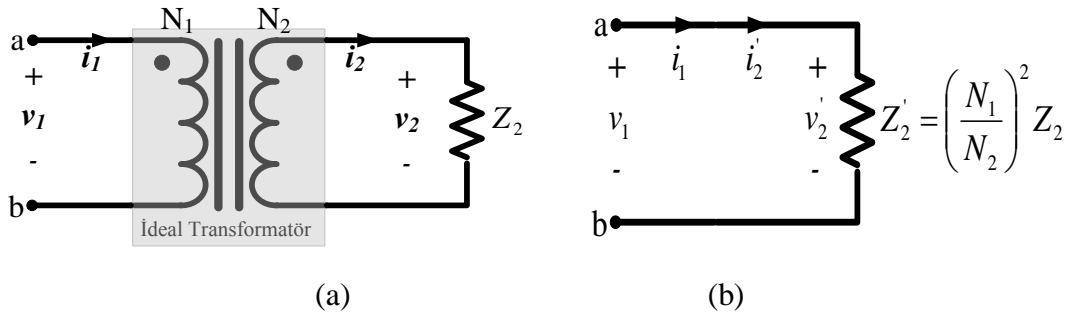
olur. Z_2 empedansının primere olan etkisi dikkate alındığında, Z_2 yerine eşdeğer bir Z_2' empedansı primer devrede gösterilirse, bu durum (2.20) ifadesiyle verilmiş olup, Şekil 2.11.'de gösterilmiştir.

$$Z_2' = \left(\frac{N_1}{N_2} \right)^2 Z_2 \quad (2.20)$$



Şekil 2.11. Yük empedansı primere indirgenmiş ideal bir transformatör

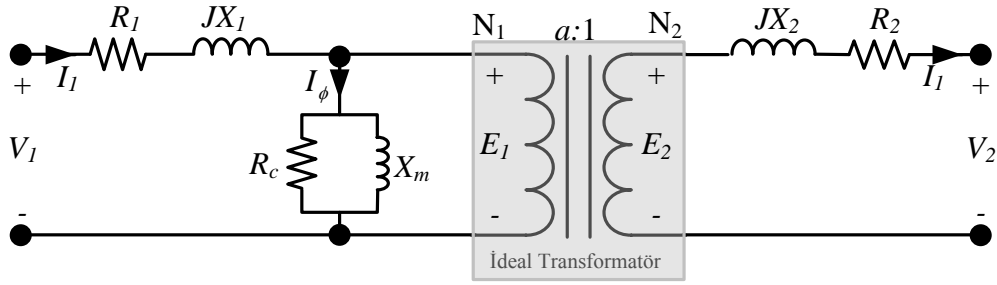
Z_2' empedansı, Z_2 empedansının primer tarafa aktarılmış değeridir. Şekil 2.12.'de sekonderin yük bağlı bir transformatör ve primere göre eşdeğer devresi gösterilmiştir.



Şekil 2.12. (a) Sekonderine yük bağlı ideal bir transformatör, (b) eşdeğer devresi

2.5. Transformator Eşdeğer Devresi

Transformatörlerin devre analizinde ve simülasyonunda gerçek modelinin yerine eşdeğer devreleri kullanılır. Eşdeğer bir devrenin mümkün olduğu kadar gerçek transformatörün bütün parametrelerini yansıtmaması yani bütün özellikleri taşıması gerekir. Eşdeğer devre çıkarılırken transformatörün bütün parametrelerinin hesaba katılması gerekir. Eşdeğer devrenin transformatörün bütün özelliklerini taşıması gerekir. Transformatörün eşdeğer devresinde bakır kayıpları, nüve kayıpları (girdap akım kayıpları ve histerisiz kayıpları) ve kaçak akı kayıplarının göz önünde bulundurulması gerekir. Şekil 2.13.'de gerçek bir transformatörün eşdeğer devresi görülmektedir.

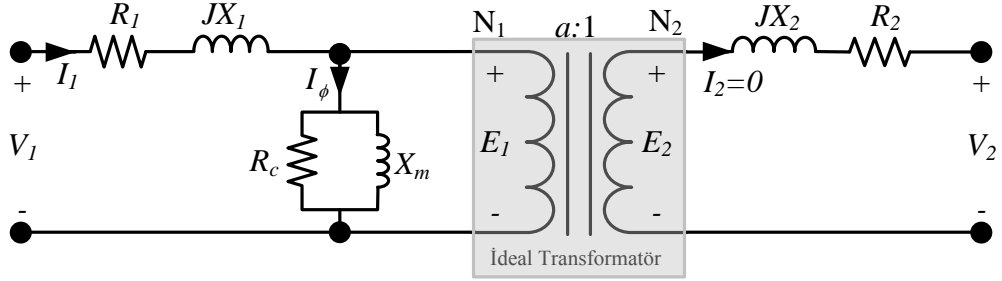


Şekil 2.13. Gerçek bir transformatörün eşdeğer devresi

Primer sargı kaçak akısı ϕ_{11} , X_1 reaktansı ile ifade edilir. Sekonder sargı kaçak akısı ϕ_{12} ise X_2 reaktansı ile ifade edilir. İdeal bir transformatörde kaçak akı değeri sıfır olduğundan X_1 ve X_2 kaçak akı reaktansları da sıfıra eşittir. Primer sargısı kaçak akılarından dolayı meydana gelen gerilim düşümü $V_{1kaçak}=I_1.X_1$ ile ifade edilir. Sekonder sargıda meydana gelen kaçak akısından dolayı meydana gelen gerilim düşümü ise $V_{2kaçak}=I_2.X_2$ ile ifade edilir. Eşdeğer devredeki R_1 ve R_2 dirençleri primer ve sekondere sargılarının dirençleridir. Eşdeğer devredeki “ a ” katsayısı ise transformatörün dönüştürme oranıdır. Bir transformatör sekonder tarafına herhangi bir yük bağlamadan primer tarafı bir gerilim kaynağına bağlanırsa çok az bir akım çeker. Transformatörün çektiği akımın bir kısmı transformatörde meydana gelen nüve kayıplarını karşılar. Geri kalan kısmı ise nüvenin uyarılmasını (mıknatıslanmasını) sağlar. Nüve kayıpları ısı şeklindeki kayıplar olduğundan eşdeğer devrede primere paralel bağlı R_c direnciyle gösterilir. Transformatörün

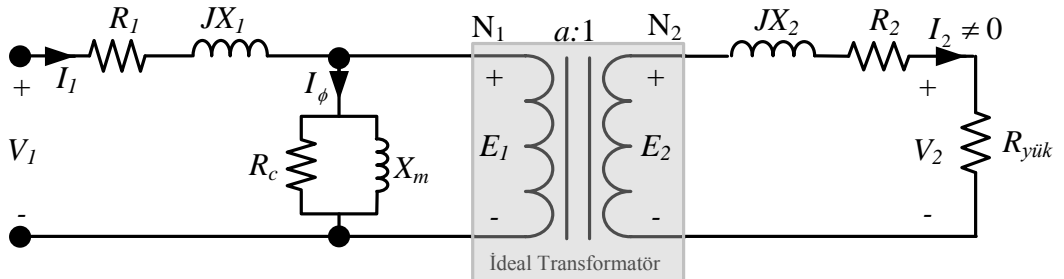
uyartım akımı uygulanan gerilimden 90° geride olduğundan bu akım uygulanan gerilime paralel bağlı X_m reaktansı ile gösterilir. X_m reaktansına mıknatıslanma reaktansı da denir. Eşdeğer devrede birbirine paralel olarak bağlı olarak gösterilen R_c direnci ile X_m reaktansına transformatörün uyartım devresi de denir.

Transformatör boşa (yüksüz) çalışırken sekonder sargıdan herhangi bir akım dolaşmaz. Sekonder sargıda meydana gelen $I_2.R_2$ ve $I_2.X_2$ gerilim düşümleri sıfıra eşit olur. Transformatörün dönüştürme oranı bir olarak kabul edilirse ($a = 1$, primer ve sekonder sargı sarım sayıları birbirine eşit) primer ve sekonder gerilimleri birbirine eşit olur. Şekil 2.14.'te boşa çalışan bir transformatörün eşdeğer devresi görülmektedir.



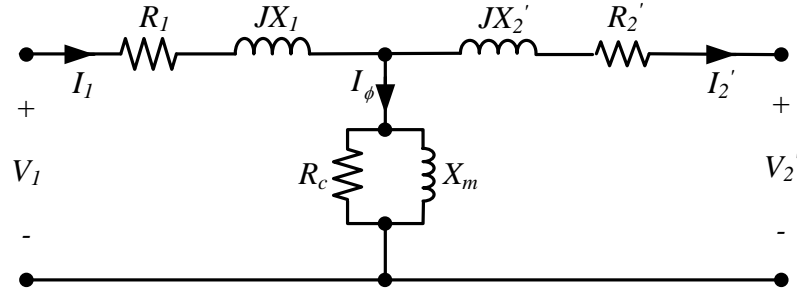
Şekil 2.14. Boşa çalışma eşdeğer devresi.

Transformatör yük altında çalışırken sekonder sargıdan da bir akım geçer. Sekonder sargıdan geçen akımdan dolayı sekonder sargı tarafından $I_2.R_2$ ve $I_2.X_2$ gerilim düşümleri meydana gelir. Şekil 2.15.'de yük altında çalışan bir transformatörün eşdeğer devresi görülmektedir.



Şekil 2.15. Yüklü çalışma eşdeğer devresi.

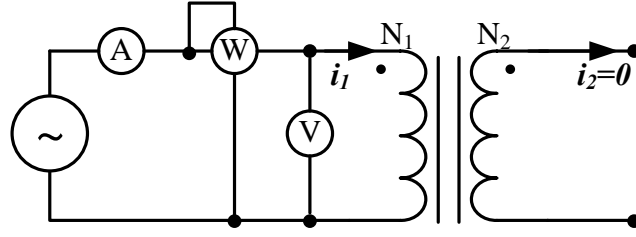
Transformatörlerin eşdeğer devresi, transformatörün a dönüştürme oranından yararlanılarak primer veya sekonder tarafına dönüştürülür. Transformatörün primer tarafında indirgenen eşdeğer devrede, mevcut primer parametreleri olan R_1 , X_1 , R_c , ve X_m değerleri korunur. Sekonder tarafından primer tarafına direnç ve reaktanslar dönüştürülürken " a^2 " ile çarpılır, sekonder akımı primer tarafına dönüştürülürken " a "ya bölünür, sekonder gerilimi ise " a " ile çarpılır. Şekil 2.16.'da primer tarafına indirgenmiş bir eşdeğer devre görülmektedir. Primer tarafından sekonder tarafına dönüştürme yapılırken sekonder tarafa ait R_2 ve X_2 değerleri aynı kalır. Primer tarafına ait direnç ve reaktanslar sekonder tarafına dönüştürülürken " a^2 " ye bölünür, primer gerilim " a "ya bölünür, primer akımı ise " a " ile çarpılır. Gerçek bir transformatörün eşdeğer devre parametreleri boş çalışma ve kısa devre deneyleri yardımıyla bulunur. Eşdeğer devre parametrelerinin deneysel olarak hesaplanması sonraki bölümde açıklanmaktadır[53].



Şekil 2.16. Primer tarafına indirgenmiş eşdeğer devre.

2.5.1. Boşta Çalışma Deneyi

Boşta çalışma deneyi transformatörün demir kayıplarını hesaplamak ve eşdeğer devrede R_c demir kayıplarını temsil eden direnci ile X_m mıknatıslama reaktansı parametreleri hesaplamak için yapılmaktadır. Boşta çalışma deneyi transformatörün sekonder sargısı açık- devre edilerek yani yükün olmadığı durumda primer sargı kaynağa bağlanır. Boşta çalışmada primer gerilimi voltmetre ile, akımı ampermetre ile, ve güçte Wattmetre ile ölçülür. Şekil 2.17.'de transformatörün boş çalışma deney bağlantı şeması görülmektedir. Boşta çalışma deneyinden elde edilen değerler kullanılarak eşdeğer devre parametreleri hesaplanır.



Şekil 2.17. Boşta çalışma deneyi bağlantı şeması

Boşta çalışma deneyinde sekonder sargı açık-devre olduğu için sekonder sargıdan akım geçmez. Transformatorün şebekeden çektiği akımın tamamı, Şekil 2.15. ve Şekil 2.16'a göre, R_c ve X_m devre elemanlarının üzerinden akar. Transformatorün primer sargı direnci R_1 , ve kaçak akı reaktansı X_1 'in değeri R_c ve X_m değerleri ile karşılaştırıldığında çok küçük olduğundan R_1 ve X_1 elemanları üzerindeki gerilim düşümleri ihmal edilebilir. R_c ve X_m elemanları V_1 gerilim kaynağına paralel olarak kabul edilebilir. Bu durumda Wattmetre'de okunan gücün R_c direncinde ısı olarak tüketildiği kabul edilir. R_c direnci gerçek bir direnç olmayıp nüvede meydana gelen kayıpları temsil eden hayali bir dirençtir. R_c ve X_m değerlerini hesaplamak için devrenin admitansından yararlanılır. Sırasıyla nüve kayıp direncinin iletkenliği, mıknatıslanma reaktansının suseptansı ve toplam uyartım admitansı denklemler (2.21), (2.22) ve (2.23) ile bulunur.

$$G_c = \frac{1}{R_c} \quad (2.21)$$

$$B_m = \frac{1}{X_m} \quad (2.22)$$

$$Y_E = G_c + jB_m \quad (2.23)$$

Uyartım admitansının genliği boşta çalışma deneyinde elde edilen akım ve gerilim değerleri kullanılarak hesaplanır.

$$|Y_E| = \frac{I_b}{V_b} \quad (2.24)$$

Bir fazlı devrelerde aktif güç, denklem (2.25) ile hesaplanır. Denklem (2.26) Boşta çalışma deneyinde ölçülen güç kullanılarak admitans açısı da hesaplanır.

$$P = VI \cos \varphi \quad (2.25)$$

$$\cos \varphi = \frac{P_b}{V_b I_b} \quad (2.26)$$

$$\varphi = \cos^{-1} \left(\frac{P_b}{V_b I_b} \right) \quad (2.27)$$

Admitans açısı da denklem (2.27) ile verildiği şekilde hesaplanır. Transformatör endüktif özellikli bir makine olduğundan dolayı boş çalışmada akım her zaman gerilimden φ açısı kadar geride olur. Yüklü çalışmada ise φ açısı yük açısına eşit olur. Y_E admitansı aşağıdaki gibi hesaplanır.

$$Y_E = \frac{I_b}{V_b} \angle -\varphi^\circ \quad (2.28)$$

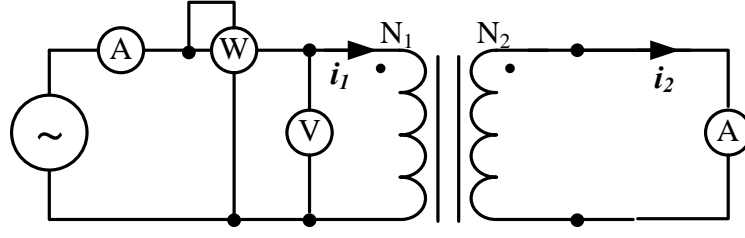
Y_E admitansı kullanılarak nüve kaybı direnci ve mıknatıslanma reaktansı sırasıyla eşitlik 2.29 ve 2.30'deki gibi hesaplanır.

$$R_c = \frac{1}{|Y_E| \cos \varphi} \quad (2.29)$$

$$X_m = \frac{1}{|Y_E| \sin \varphi} \quad (2.30)$$

2.5.2. Kısa Devre Deneyi

Kısa devre deneyi transformatörün önce primer gerilimi sıfıra eşitlenip sekonder uçları bir ampermetre üzerinden kısa devre edilerek gerçekleştirilir. Primer sargı tarafına da boş çalışma deneyinde olduğu gibi ampermetre, voltmetre ve wattmetre bağlanır. Şekil 2.18.'de bir transformatörün kısa devre deneyi bağlantı şeması görülmektedir. Primer sargıya uygulanan gerilim, sekonder sargıdan geçen akım sekonder anma akımına ulaşıncaya kadar, yavaş yavaş artırılır. Primer sargı tarafına bağlanan ölçü aletlerinin ölçtüğü I_k akımı, V_k gerilimi ve P_k aktif güç değerleri kaydedilir. Sargılara zarar vermemek için sekonder sargıdan anma akımından fazla akımın geçmemesi gerekir.



Şekil 2.18. Kısa devre deneyi bağlantı şeması

Kısa devre deneyi kullanarak eşdeğer devre parametrelerini hesaplamak için Şekil 2.16.'deki primer tarafına indirgenmiş eşdeğer devreden yararlanılır. Transformatörün sekonder sargısı kısa-devre iken primer gerilimi çok küçük değerli olacağından dolayı uyartım kolundan geçen akım da çok küçük olduğundan ihmal edilir. Uyartım kolundan geçen akım ihmal edilirse transformatörün boşa çektiği akımın tamamı seri devre elemanları (R_1 , X_1 , a^2R_2 , a^2X_2) üzerinden geçtiği varsayılır. Primer tarafına göre seri empedansın genliği aşağıdaki gibi hesaplanır.

$$|Z_{SE}| = \frac{V_k}{I_k} \quad (2.31)$$

Akımın güç katsayısı ve açısı sırasıyla aşağıdaki gibi hesaplanır.

$$\cos \varphi = \frac{P_k}{V_k I_k} \quad (2.32)$$

$$\varphi = \cos^{-1} \left(\frac{P_k}{V_k I_k} \right) \quad (2.33)$$

$$Z_{SE} = \frac{V_k}{I_k} \angle \varphi^\circ \quad (2.34)$$

$$Z_{SE} = R_1 + a^2 R_2 + j(X_1 + a^2 X_2) \quad (2.35)$$

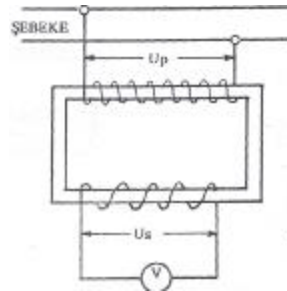
Empedans açısı pozitiftir ve seri empedans denklem (2.34)'de verildiği gibi hesaplanır. Şekil 2.16. kullanılarak seri empedans Z_{SE} , denklem (2.35)'de verildiği gibi hesaplanır.

2.6. Ölçü Transformatörleri

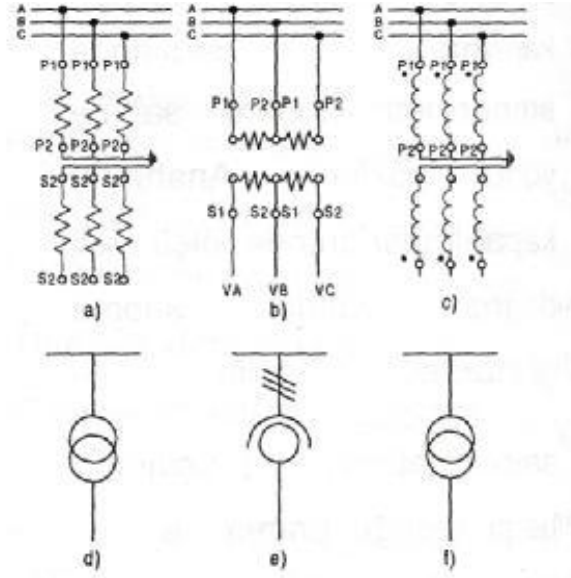
Yüksek değerli akım ve gerilimleri doğrudan ölçü aletleriyle ölçmek hem zor hem de emniyet açısından tehlikelidir. Yüksek akımların ampermetre üzerinden direkt olarak geçirilmesi ampermetrenin fiziksel olarak çok büyük olmasını gerekli kılar. Yine yüksek gerilimleri direkt olarak voltmetre ile ölçülmesi emniyet açısından tehlikeli olabilir. Bu amaçla yüksek gerilim ve büyük akımların ölçülmesi için ölçü transformatörleri kullanılır. Ölçü transformatörleri ölçülecek olan büyük akım ve yüksek gerilimleri ölçü aletleriyle emniyetli bir şekilde ölçülebilecek seviyeye indirirler. Ölçü transformatörlerinin primer devresine ölçülecek yüksek gerilim veya büyük akım devresine bağlanır. Sekonder devrelere de Ampermetre, Voltmetre, Wattmetre, çeşitli röleler veya kontrol devreleri bağlanır. İki çeşit ölçü transformatörü bulunur: akım transformatörleri ve gerilim transformatörleri.

2.6.1. Gerilim Trafosu

Primer devre gerilimini dönüştürme oranı dâhilinde küçülterek sekonder devre elemanlarına aktaran ve primer ile sekonder gerilimler arasındaki faz farkı yaklaşık sıfır derece olan transformatörlerdir. Aynı zamanda ölçü ve koruma cihazlarının yüksek gerilim sisteminden yalıtımını da sağlar. Gerilim transformatörünün primer sargıları, akım transformatörünün primer sargılarının tersine, çok sarımlı ince tellerden oluşmuştur. Sekonder sargı ise, nominal yükte kaybın çok az olmasını temin edecek kalınlıkta tel ile sarılmıştır. Sarım sayısı primer sargıya göre dönüştürme oranı kadar azdır. Manyetik nüve kesiti gerilim transformatörünün yükü ile orantılıdır. Gerilim transformatörleri faz-toprak, faz-faz arası yapılarıdır[56].

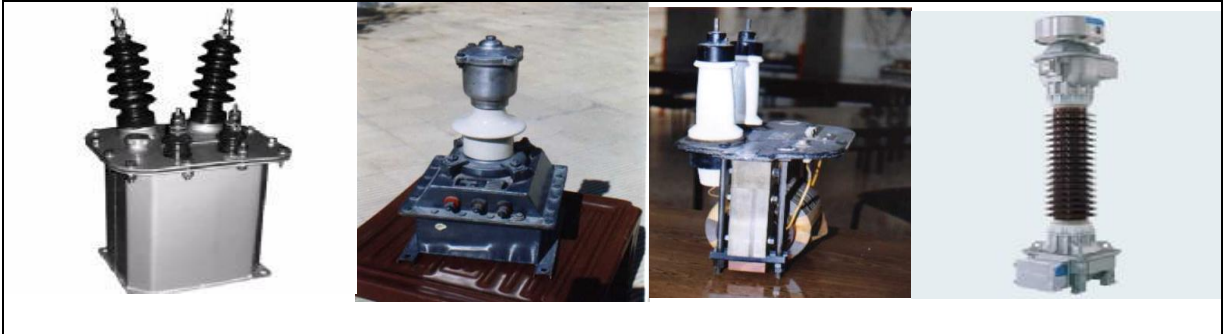


Şekil 2.19. Gerilim transformatörünün yapısı



Şekil 2.20. Gerilim transformatörlerinin şematik gösterimi

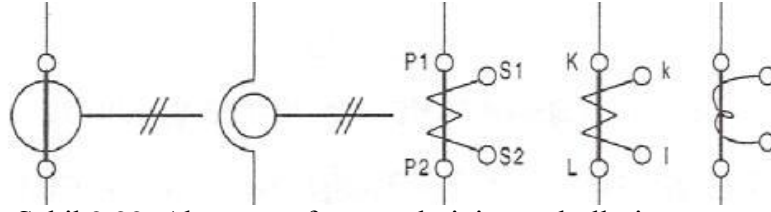
Bir gerilim transformatörü aşağıdaki kısımlardan meydana gelir: primer sargı, sekonder sargı, manyetik nüve, izolatör ve yağ kabından oluşmaktadır. İzolatör ve yağ kapları, yüksek gerilimde kullanılan gerilim transformatörlerinde bulunur.



Şekil 2.21. Farklı tiplerdeki gerilim transformatörleri

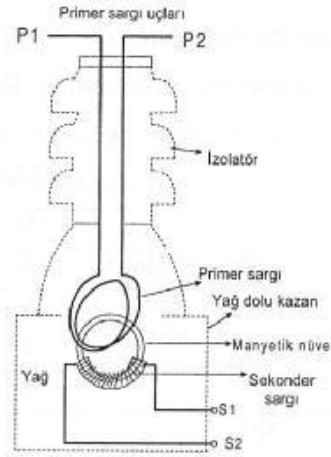
2.6.2. Akım Trafosu

Bağlı oldukları devreden geçen akımı istenen oranda küçülterek, bu akımla sekonder terminallere bağlı aletleri besleyen ve onları yüksek gerilimden izole eden özel trafoları, akım transformatörleri denilir. Akım transformatörü Şekil 2.37.'deki sembollerle gösterilir[57].



Şekil 2.22. Akım transformatörlerinin sembolleri

Akım transformatörleri Primer sargı, sekonder sargı, manyetik nüve, izolator, içi özel yağ ile dolu kazandan oluşur. Primer sargılar kalın kesitli iletken az sarımlı, sekonder sargılar ise primere göre ince kesitli iletken ve çok sarımlı olarak imal edilirler.



Şekil 2.23. Akım transformatörünün yapısı



Şekil 2.24. Farklı tipteki akım transformatörleri

3. ELEKTRİK DEVRELERİNDE REZONANS

Periyodik bir kuvvetin etkisi altındaki bir sistem, salınımlar sergiler ve eğer etkinin frekansı sistemin doğal frekansına eşit ise, bu salınımların genliği sınırsız artma eğilimine girer. Sonuç olarak sistem, belli bir genlikten sonra bütünlüğünü veya bulunduğu durumu koruyamaz dağılır veya bozulur. Bu duruma rezonans denir [58].

Rezonans devreleri bobin ve kondansatörün seri veya paralel bağlanmasıyla elde edilen devrelerdir. Bu devrelerde AC gerilimin belirli bir frekansında endüktif ve kapasitif reaktanslar birbirine eşitlendiğinde özel bir durum ortaya çıkar. Bu özel durum, devre empedansının çok küçük yada çok büyük değerler almasıdır. Bu durumun ortaya çıkmasına neden olan frekans “rezonans frekansı” olarak adlandırılır ve değeri devredeki bobin ve kondansatörün büyüklüğüne bağlıdır. Rezonans frekansı denklem (3.1) ve (3.2.) birbirine eşitlenerek bulunabilir [59], [60].

Rezonans devreleri, radarların verici (transmitter) ve alıcılarının (receiver) çalışma frekanslarını kontrol etmede ve radyo alıcılarında istenilen istasyon frekanslarının ayarlanmasında (tuning) kullanılır[61].

Alternatif akım devrelerinde endüktif reaktansın etkisi, kapasitif reaktansın devreye dahil edilmesiyle giderilebilir. Endüktif ve kapasitif reaktans değerlerinin eşit olması, devrede çok özel bir durumu oluşturur. Birbirine eşit reaktanslardan oluşan devre, sadece bir dirençten oluşan bir devre gibi davranır. Bu duruma devrenin rezonansa girme durumu denir[62].

Alternatif akım devrelerinde indüktif ve kapasitif reaktansın ifadeleri;

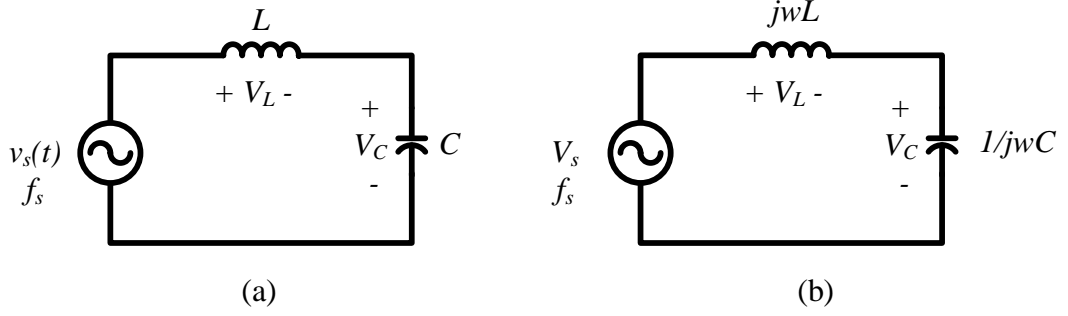
$$X_L = 2\pi fL \quad (3.1)$$

$$X_C = \frac{1}{2\pi fC} \quad (3.2)$$

şeklindedir.

3.1. Kayıpsız Devre

Kayıpsız devre Şekil 3.1’de gösterildiği gibi, devrede direnç elemanı olmadan sadece bir endüktans ve kapasitanstan oluşması durumu ile ifade edilir.



Şekil 3.1. Kayıpsız devre (a) zaman alanı gösterimi, (b) fazör alanı gösterimi

Kararlı işletme koşullarında devre için fazörel olarak aşağıdaki bağıntılar yazılabilir.

$$V_s = IX_L - IX_C \quad (3.3)$$

Yukarıdaki ifadede devredeki faz farkının oluşması X_L ile X_C değerleri ile belirlenir. X_L 'nin değeri X_C değerinden büyük ise devrenin I akımı, V_s geriliminden 90° geride, X_L 'nin değeri X_C değerinden küçük ise devrenin I akımı, V_s geriliminden değerinden 90° ileride bir faz farkına sebep olur. X_L değerinin X_C değerinden büyük olduğu endüktif devre için fazörel ifadeler aşağıdaki gibidir;

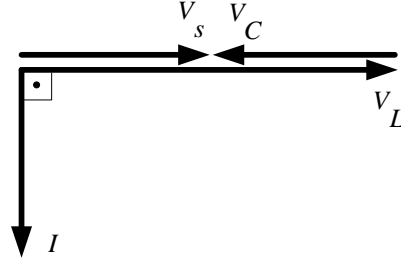
$$V_s = IX_L - IX_C \quad (3.4)$$

$$V_L = IX_L \quad (3.5)$$

$$V_C = IX_C \quad (3.6)$$

$$V_s = V_L - V_C \quad (3.7)$$

$$V_L = V_s - V_C \quad (3.8)$$



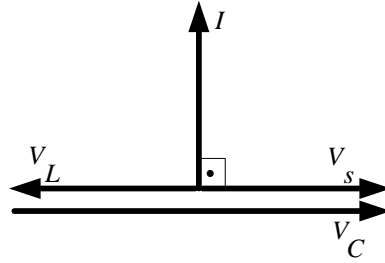
Şekil 3.2. Endüktif kayıpsız devrenin fazör diyagramı

X_C değerinin X_L değerinden büyük olduğu endüktif devre için fazörel ifadeler aşağıdaki gibidir;

$$V_s = IX_C - IX_L \quad (3.9)$$

$$V_s = V_C - V_L \quad (3.10)$$

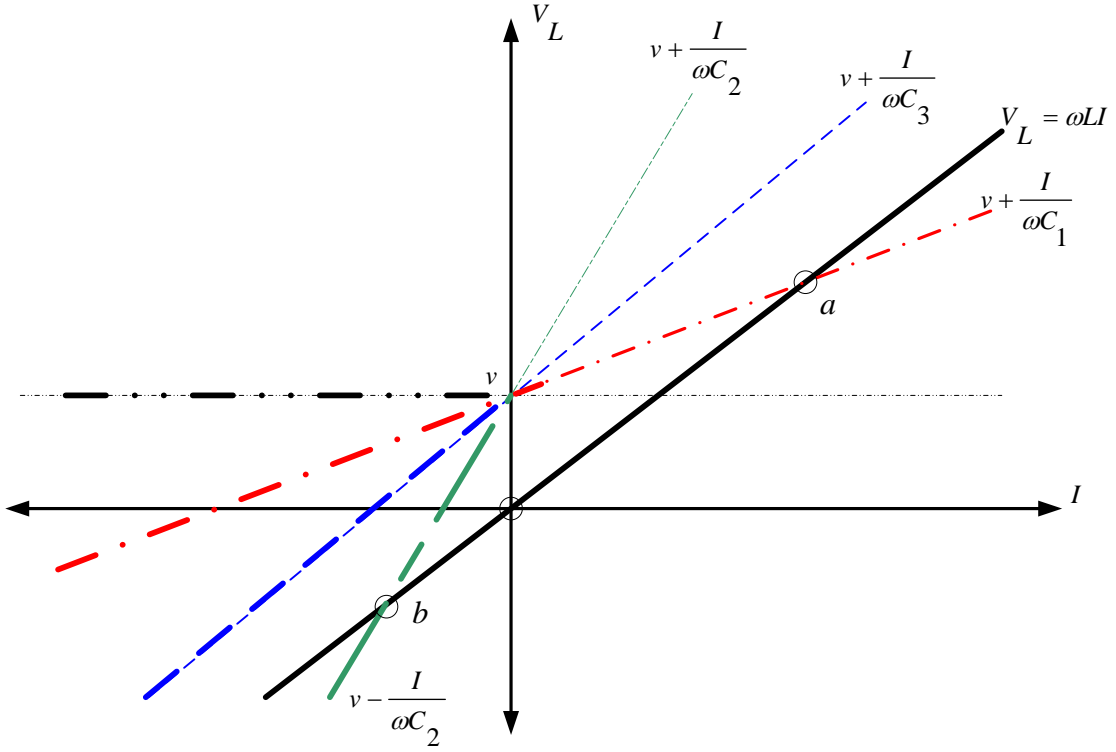
$$-V_L = V_s - V_C \quad (3.11)$$



Şekil 3.3. Kapasitif kayıpsız devrenin fazör diyagramı

Devrenin endüktif olması durumunda Şekil 3.4.'te görüldüğü gibi denge noktası a ile gösterilen kesişme noktası olur iken, devremiz kapasitif özellikte olduğunda denge noktası b ile gösterilen nokta olmaktadır.

$X_C = X_L$ olması durumunda devredeki V ve I sonlu değerleri için bu ifadelerin doğruları kesişmez. Bu durum seri rezonans koşulunu belirler seri rezonans V ve I değerleri sonsuz büyüklüklere ulaşır.



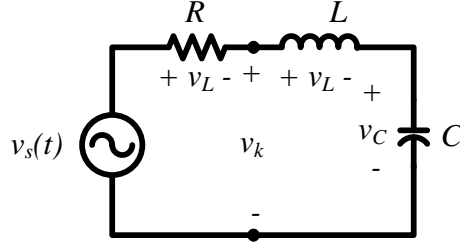
Şekil 3.4. Elemanter L,C devre analizi

3.2. Kayıplı Devre

Kayıpsız devreye ek olarak devrede kapasitif ve endüktif elemanların yanı sıra direnç olması durumunda devre kayıplı devre olarak tanımlanır. Kayıplı devreler seri rezonans devresi ve paralel rezonans devresi olmak üzere iki gruba ayrılır.

3.2.1. Seri Rezonans Devresi

Kayıplı devrede endüktif reaktansın kapasitif reaktansa eşit olduğu duruma seri rezonans ya da gerilimler rezonansı denir. Şekil 3.5.'te seri bir rezonans devresi görülmektedir. Bu devreye doğru gerilim uygulandığında, belli bir zaman sabitesi süresi sonunda, kondansatör doğru gerilimde açık devre özelliği göstereceğinden, devreden herhangi bir akım geçmez ve V_s kaynak gerilimi, V_C kondansatör gerilimine eşit olur.



Şekil 3.5. Kayıplı devrenin zaman alanı gösterimi

Devreye alternatif gerilim uygulandığından devreden geçen akım; devre elemanlarına yani dirence, bobinin endüktif reaktansına ve kondansatörün kapasitif reaktansına göre değişir. Buradaki direnç ve reaktansların vektörel toplamı devrenin Z empedansını verir. Empedans; bir AC devrede saf direnç ve reaktansların gösterdiği toplam zorluğa denir.

Kondansatör ve bobin kullanılan AC devrelerde, bu elemanların gerilim / akım depolama özelliklerinden dolayı akımla gerilim arasında faz farkı oluşmaktadır. Bu husus dikkate alınarak, seri devredeki gerilim düşümleri aşağıdaki gibi yazılır.

$$\vec{V}_s = \vec{V}_R + \vec{V}_C + \vec{V}_L \quad (3.12)$$

Gerilim düşümlerinin vektörel olarak toplanmasının nedeni, bobin ve kondansatörde oluşan akım ve gerilim arasındaki faz farkıdır. Yani V_C ile V_L aynı fazda değildir. Dolayısıyla aritmetiksel toplama yapılamaz. Aralarında faz farkı olduğundan toplam devre, gerilimi vektörel olarak bulunur. Buna göre gerilimler aşağıdaki şekilde yazılır:

$$V_R = IR \quad (3.13)$$

$$V_L = IX_L \quad (3.14)$$

$$V_C = IX_C \quad (3.15)$$

Seri RLC devresinin üç çeşit çalışma şekli vardır: rezonans durumu ($X_L = X_C$), rezonans üstü çalışma durumu ($X_L > X_C$) ve rezonans altı çalışma durumu ($X_C > X_L$) olarak bilinir.

3.2.1.1. Rezonans Durumu

Reaktanslar birbirinin etkisini yok edince devre sadece dirençten oluşan bir devre özelliği gösterir. Rezonans durumunda devreye uygulanan gerilimin frekansı $X_C = X_L$ eşitliğini sağlayacak değerdedir. Reaktanslar eşit olduğunda bobin üzerinde düşen gerilim ile kondansatör üzerinde düşen gerilim birbirine eşit olur. Ancak V_L ve V_C gerilimleri arasında 180° faz farkı olduğundan, birbirini yok eder. Bu durumda devrenin toplam direnci R 'ye, devre gerilimi V_R 'ye eşit olup devre rezistif olarak çalışır. Bu şartlarda devre empedansı, minimum olduğundan devreden geçen akım, maksimum seviyededir. Seri devreden geçen akımın en yüksek seviyeye ulaşması, seri rezonans devresinin önemli özelliklerindedir. Bu eşitliği sağlayan frekans değerine rezonans frekansı denir ve f_r ile gösterilir. Rezonans durumunda aşağıdaki ifadeleri yazabiliriz.

$$X_L = X_C \quad (3.16)$$

$$\frac{1}{\omega C} = \omega L \quad (3.17)$$

$$2\pi f L = \frac{1}{2\pi f C} \quad (3.18)$$

$$f_r = \frac{1}{2\pi\sqrt{LC}} \quad (3.19)$$

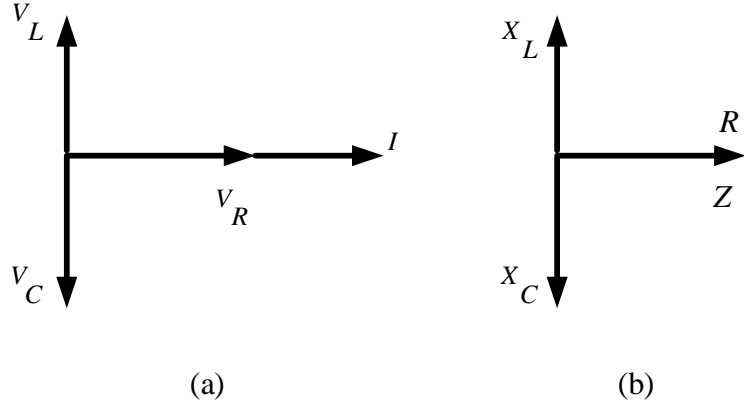
olur. Rezonans frekansı belli olduğu durumlarda indüktansın ve kapasitansın değerleri aşağıdaki gibi yazılır.

$$L = \frac{1}{4\pi^2 f_r^2 C} \quad (3.20)$$

$$C = \frac{1}{4\pi^2 f_r^2 L} \quad (3.21)$$

$$Z = \sqrt{R^2 + (X_L - X_C)^2} \quad (3.22)$$

Denklemler (3.20) ile (3.21)'in eşitliği ile rezonans durumunda empedansın değeri denklem (3.22) elde edilir. Buradan, rezonans koşullarında $Z=R$ sonucuna ulaşılır.



Şekil 3.6. Rezonans çalışma (a) gerilim-akım fazör diyagramı, (b) empedans fazör diyagramı

Şekil 3.6.'daki fazör diyagram incelendiğinde seri devrede tek akımın dolaşması ve X_L 'nin X_C 'ye eşit olması nedeniyle V_L ve V_C 'nin birbirine 180° zıt yönlü ve eşit genlikte olduğu görülür. Dolayısıyla V_L ile V_C birbirini yok edecektir. Bu nedenle devre gerilimi V_R 'ye eşit olacaktır. Aynı zamanda devrenin toplam empedansı Z , devredeki R dirence eşit olur. Devreden geçen akım ise en yüksek değere ulaşır.

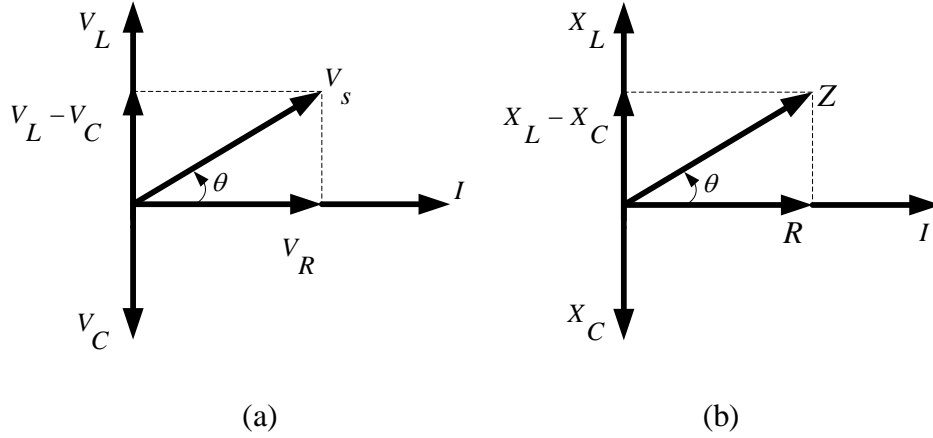
3.2.1.2. Rezonans Üstü Çalışma Durumu

Seri rezonans devresine f_r rezonans frekansı üzerinde bir frekans uygulandığında, X_L endüktif reaktansı frekansla doğru orantılı olarak artarken, X_C kapasitif reaktansı ise frekansla ters orantılı olarak azalacaktır.

$$X_L = 2\pi fL \quad (3.23)$$

$$X_C = \frac{1}{2\pi fC} \quad (3.24)$$

Denklemler (3.23) ve (3.24) incelendiğinde f frekans arttıkça X_L 'nin artacağı, X_C 'nin ise azalacağı görülecektir. Rezonans üstü çalışmada X_L 'nin artmasından dolayı devre endüktif etki kazanmış olacaktır. Başka bir deyişle $X_L > X_C$ durumunda devre endüktif olur. Bu duruma ilişkin vektörel diyagramlar Şekil 3.7.'de verilmiştir.



Şekil 3.7. Rezonans üstü çalışma (a) gerilim-akım fazör diyagramı (b) empedans fazör diyagramı

Şekil 3.7. (a)'da seri RLC devresi gerilim-akım ilişkileri, Şekil 3.7. (b)'de ise seri RLC devresi direnç reaktans-empedans ilişkileri verilmiştir. Burada V_s , devrenin toplam vektörel gerilimini; Z ise devrenin toplam empedansını göstermektedir. Fazör diyagramları incelendiğinde gerilim ve empedans denklemleri aşağıdaki gibi yazılır,

$$V_s^2 = V_R^2 + (V_L - V_C)^2 \quad (3.25)$$

$$V_s = \sqrt{V_R^2 + (V_L - V_C)^2} \quad (3.26)$$

Şekil 3.6. (a)'daki fazör diyagramı incelendiğinde U geriliminin yatay eksenle bir açı yaptığı görülür. Bu açıya devrenin faz açısı denir ve θ ile gösterilir. Faz açısı aşağıdaki şekilde ifade edilir.

$$\theta = \tan^{-1} \left(\frac{V_L - V_C}{V_R} \right) \quad (3.27)$$

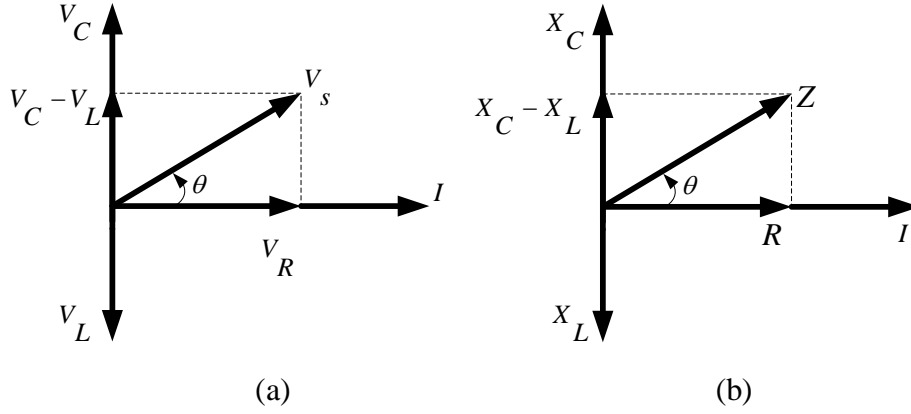
yada Şekil 3.6. (b)'daki fazör diyagramı incelendiğinde,

$$\theta = \tan^{-1} \left(\frac{X_L - X_C}{X_R} \right) \quad (3.28)$$

bulunur.

3.2.1.3. Rezonans Altı Çalışma Durumu

Seri rezonans devresine f_r rezonans frekansı altında bir frekans uygulandığında, X_L endüktif reaktansı frekansla doğru orantılı olarak azalırken, X_C kapasitif reaktansı ise frekansla ters orantılı olarak artacaktır.



Şekil 3.8. Rezonans altı çalışma (a) gerilim-akım fazör diyagramı (b) empedans fazör diyagramı

Rezonans altı çalışmada X_C 'nin artmasından dolayı devre kapasitif etki kazanmış olacaktır. Başka bir deyişle $X_C > X_L$ durumunda devre kapasitif olur. Bu duruma ilişkin vektörel diyagramlar Şekil 3.8.'de verilmiştir. Fazör diyagramları incelendiğinde gerilim ve empedans denklemleri aşağıdaki gibi denklemler (3.29) ve (3.30)'da verildiği gibi yazılır.

$$V_s^2 = V_R^2 + (V_C - V_L)^2 \quad (3.29)$$

$$V_s = \sqrt{V_R^2 + (V_C - V_L)^2} \quad (3.30)$$

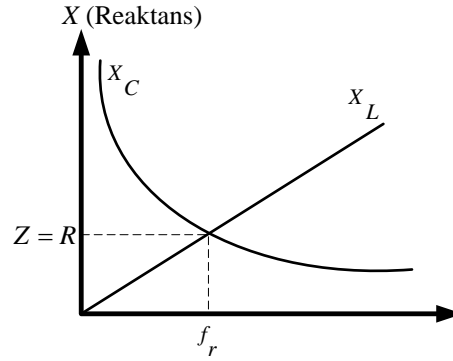
Şekil 3.8. (a)'daki fazör diyagramı incelendiğinde U geriliminin yatay eksenle bir açı yaptığı görülür. Bu açığa devrenin faz açısı denir ve θ ile gösterilir. Faz açısı aşağıdaki şekilde ifade edilir.

$$\theta = \tan^{-1} \left(\frac{V_C - V_L}{V_R} \right) \quad (3.31)$$

yada Şekil 3.8. (a)'daki fazör diyagramı incelendiğinde,

$$\theta = \tan^{-1} \left(\frac{X_C - X_L}{X_R} \right) \quad (3.32)$$

bulunur. Şekil 3.9.'daki grafikte seri rezonans devresinin frekans değişimine göre verdiği reaktif ve rezistif cevaplar görülmektedir. Frekans arttıkça X_C 'nin üstel olarak azaldığı, X_L 'nin ise doğrusal olarak arttığı yani devrenin endüktif olduğu görülmektedir. Rezonans frekansı altına inildikçe X_C 'nin büyüüp X_L 'nin azaldığı, yani devrenin kapasitif olduğu görülmektedir. Rezonans frekansında ise $X_L = X_C$ olduğu ve devre empedansının R 'ye eşit olduğu görülmektedir. Bu durumda devre rezistiftir. Devreden geçen akım en yüksek seviyeye ulaşır.

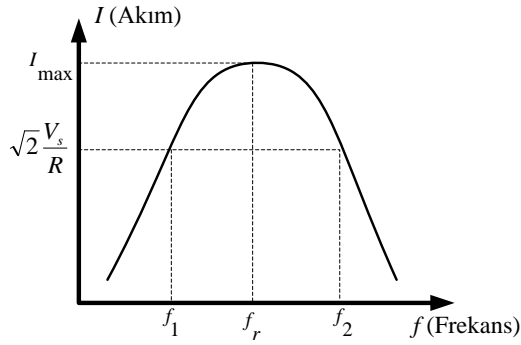


Şekil 3.9. Seri rezonans devresi reaktans-frekans grafiği

3.2.1.4. Seri Rezonans Devresi Bant Genişliği

Şekil 3.10.'da seri rezonans devresinin akım gerilim-empedans ilişkisini veren grafik görülmektedir. Bu grafikte akımın maksimum olduğu nokta esas alınarak akım eğrisinin 0.707'sine karşılık gelen noktalar bulunur. Bu noktalara yarım güç noktaları

denir. Bu noktalardan frekans eksenine dikey olarak inildiğinde f_1 ve f_2 gibi iki frekans bulunur. Rezonans frekansı f_r bu noktaların tam ortasında kalır. f_1 ile f_2 arasında kalan bölge devrenin bant genişliğini (BW) verir. Yani seri rezonans devresinden etkin olarak geçen akımın geçerli olduğu frekans bandı bulunur. Bant genişliği, bir seri veya paralel rezonans devresinin etkin olarak kullanılabilmesi için frekans sınırını belirlemede kullanılır. Bant genişliği matematiksel olarak $BW = f_2 - f_1$ şeklinde ifade edilir. Bu eşitliğin yarısı alındığında rezonans frekansı bulunur.

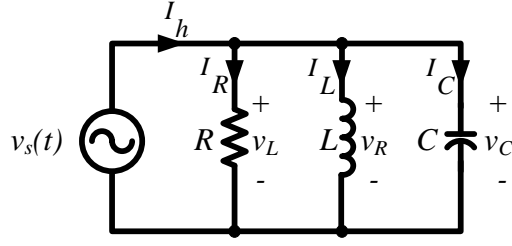


Şekil 3.10. Seri rezonans devresi akım-frekans grafiği

$$f_r = \frac{BW}{2} = \frac{f_1 + f_2}{2} \quad (3.33)$$

3.2.2. Paralel Rezonans Devresi

Şekil 3.11.'de paralel rezonans devresi görülmektedir. Seri devrede rezonans şartı, endüktif reaktans ile kapasitif reaktansın birbiriyle eşit olmasıdır. Bu şart sağlandığında herhangi bir RLC devresi rezonansa gelmektedir. Seri devrede akımın dolaşabileceği tek bir kol bulunmaktadır. Bu nedenle akım sabit alınmaktadır. Buna karşın devre üzerindeki gerilim düşümleri farklı olup eleman sayısına bağlı olarak değişmektedir.



Şekil 3.11. Paralel rezonans devresi

Paralel devrede ise elemanlar üzerindeki gerilim düşümleri ve kaynak gerilimi birbirine eşit olmak zorundadır. Devre akımı I_h ise kol akımlarının toplamına eşittir. Kollardan geçen akımlar elemanların R direnci ve reaktanslara bağlı olarak değişir. Paralel RLC devresinde toplam devre akımı faz farkından dolayı vektörel olarak bulunur.

$$\vec{I}_h = \vec{I}_R + \vec{I}_L + \vec{I}_C \quad (3.34)$$

$$I_h^2 = I_R^2 + (I_L - I_C)^2 \quad (3.35)$$

$$I_h^2 = I_R^2 + (I_C - I_L)^2 \quad (3.36)$$

Endüktif ya da kapasitif reaktansların matematiksel işareti rezonans altı ve üstü frekanslarda devrenin endüktif veya kapasitif olmasına göre değişir. Buradan empedans,

$$\frac{1}{Z^2} = \frac{1}{R^2} + \left(\frac{1}{X_L} - \frac{1}{X_C} \right) \quad (3.37)$$

$$Z = \frac{1}{\sqrt{\frac{1}{R^2} + \left(\frac{1}{X_L} - \frac{1}{X_C} \right)}} \quad (3.38)$$

bulunur. Rezonans anında bobinin endüktif reaktansı ile kondansatörün kapasitif reaktansı birbirine eşit olacağından bu kollardan geçen akımlar da birbirine eşit olacaktır. Rezonans altı ve rezonans üstü çalışma şekline göre geçen akımlar da değişecektir. Paralel devrede rezonans frekansının bulunması seri rezonans devresiyle aynıdır. Yani, (3.39) iadesi ile rezonans frekansı bulunur.

$$f_{r_paralel} = f_{r_seri} = f_r = \frac{1}{2\pi\sqrt{LC}} \quad (3.39)$$

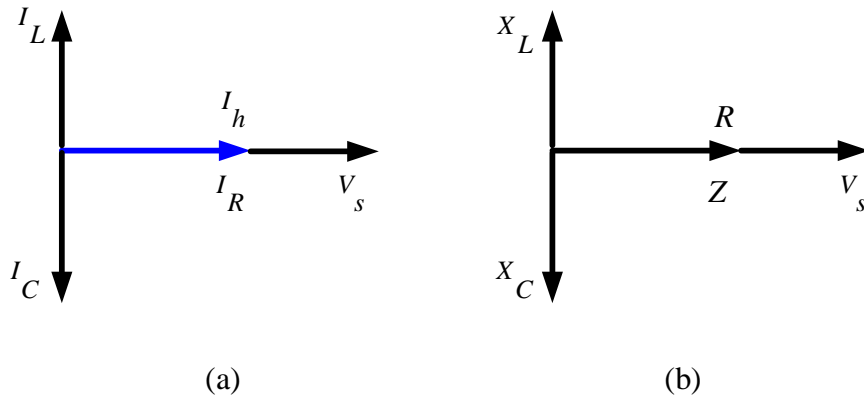
Seri rezonans devresinde olduğu gibi paralel rezonans devresinde de üç çalışma şekli vardır. Bunlar rezonans durumu $X_L = X_C$, rezonans üstü çalışma durumu $X_L > X_C$ ve rezonans altı çalışma durumu $X_C > X_L$ olarak bilinir.

3.2.2.1. Rezonans Durumu

Paralel RLC devresinin rezonansa gelebilmesi için $X_L = X_C$ şartının oluşması gerekir. Bu durumda bobin ve kondansatörden geçen I_L ve I_C akımları eşit olacaktır. Bu akımlar arasında 180° faz farkı bulunur. Bu yüzden bu akımlar birbirini yok eder. Reaktif akımların birbirlerini nötrlemeleri sonucu devreden geçen akım yalnız rezistif I_R olur. Bu durumda devre rezistif olurken, empedans devredeki dirence eşit olur.

$$I_h = \frac{V_s}{R} \quad (3.30)$$

$$Z = \frac{V_s}{I_h} \quad (3.31)$$



Şekil 3.12. Rezonans çalışma (a) akım fazör diyagramı (b) empedans fazör diyagramı

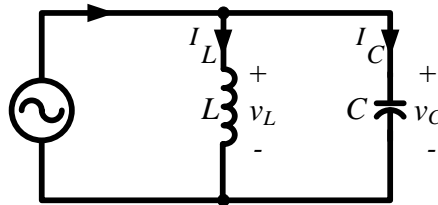
Fazör diyagramlarından da görüleceği üzere, paralel RLC devresinin rezonansa gelmesi durumunda $X_L=X_C$ durumu oluşmaktadır. Bu aşamada aralarında 180° faz farkı olduğundan vektörel toplamları 0 olacaktır. Devre empedansı ise sadece dirence eşit olacaktır. Devredeki kol akımlarından I_L ve I_C birbirine eşit büyüklükte ve 180° zıt yönlü olup vektörel toplamları yine 0 olacaktır. Aynı şekilde devreden geçen akım $I_h=I_R$ olacaktır.

Paralel RLC devresinde, rezonans anında devre akımının minimum değere ulaşması devre empedansının maksimum olmasına neden olmaktadır. Empedansın en yüksek değere ulaşması paralel rezonans devresinin en önemli ve en kullanılır özelliğidir. Bu özellik radyo alıcılarının giriş devrelerinde kullanılmaktadır.

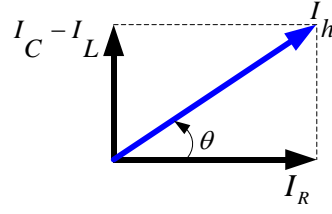
Seri rezonans devrelerinden de hatırlanacağı üzere, rezonans frekansı değiştiğinde devre elemanlarının tepkisi ve devre akımında değişiklikler meydana gelecektir. Frekandaki değişimin rezistif koldan geçen akıma etkisi yoktur. Bu nedenle rezonans üstü ve rezonans altı frekanslardaki çalışmalar anlatılırken paralel RLC devresi yerine paralel LC devresi incelenecektir. Paralel LC devresi tank devresi diye adlandırılır.

3.2.2.2. Rezonans Üstü Çalışma Durumu

Şekil 3.13.'te görülen paralel LC devresine uygulanan AC gerilimin f frekansı arttırıldığında bobinin endüktif reaktansı frekansla doğru orantılı olarak artar, kondansatörün kapasitif reaktansı ise üssel olarak azalır. Bu nedenle bobinden geçen akım azalırken, kondansatörden geçen akım ise yükselecektir. Bu durumda $I_C > I_L$ olacaktır. Sonuçta devre kapasitif olur. Dolayısıyla I_h hat akımı da rezonans anındaki değere oranla yükselir.



Şekil 3.13. Paralel LC devresi rezonans üstü çalışma devre şeması

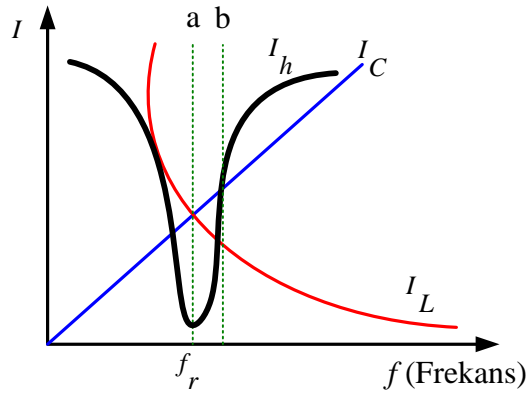


Şekil 3.14. Paralel LC devresi rezonans üstü çalışma durumu akımların vektörel diyagramı

Şekil 3.14.'de verilen paralel LC devresi rezonans üstü çalışma durumu akımlarının vektörel diyagramındaki hat akımı ile direnç akımı arasındaki açı, θ faz açısı olup;

$$\theta = \tan^{-1} \left(\frac{I_L - I_C}{I_R} \right) \quad (3.32)$$

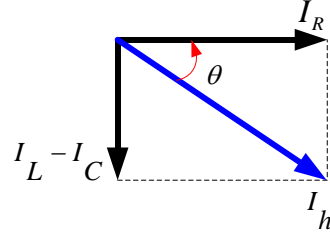
değerindedir. Rezonans üstü çalışmada meydana gelen akım değişimleri, grafiksel olarak, Şekil 3.15.'de verilmiştir.



Şekil 3.15. Paralel LC devresi rezonans üstü çalışma grafiği

3.2.2.3. Rezonans Altı Çalışma Durumu

Şekil 3.13.'te görülen paralel LC devresine rezonans altı çalışma içinde kullanılabilir ancak tek fark burada X_C değeri X_L değerinden daha büyüktür. Devreye uygulanan AC gerilimin frekansı azaltıldığında bobinin endüktif reaktansı frekansla doğru orantılı olarak azalırken, kondansatörün kapasitif reaktansı artar. Bundan dolayı bobinden geçen akım artarken, kondansatörden geçen akım düşecektir. Bu durumda $I_L > I_C$ olacaktır. Bu nedenle devre endüktif olur. Dolayısıyla I_h hat akımı, rezonans anındaki değerinden daha yüksek bir değer alır.

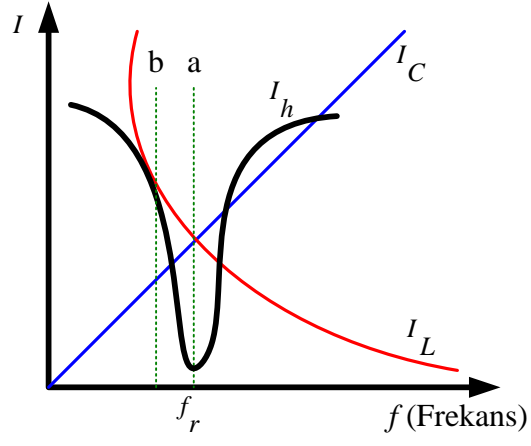


Şekil 3.16. Paralel LC devresi rezonans altı çalışma durumu akımların vektörel diyagramı

Şekil 3.16.'da verilen paralel LC devresi rezonans üstü çalışma durumu akımlarının vektörel diyagramındaki hat akımı ile direnç akımı arasındaki açı, θ faz açısı olup;

$$\theta = \tan^{-1} \left(\frac{I_C - I_L}{I_R} \right) \quad (3.33)$$

Paralel LC devresi rezonans altı çalışmada devre akımlarının grafiksel gösterimi Şekil 3.17.'de verilmiştir. Paralel LC devresine uygulanan AC enerjinin frekansı azaltıldığında I_L 'nin I_C 'den hat akımının da rezonans anındaki akım değerinden daha yüksek fazla olduğu görülecektir.



Şekil 3.17. Paralel LC devresi rezonans altı çalışma grafiği

4. FERROREZONANS

Ferrorezonans, demir çekirdekli endüktif elemanların bulunduğu sistemlerde endüktif ve kapasitif elemanlar arasında oluşan özel bir rezonans çeşidi olarak bilinir. Ferrorozonansın meydana gelmesinin sağlayan bir çok faktör bulunmakla beraber literatürde en çok karşılaşılan ferrorozonans çeşidi transformatörlerde oluşan, manyetik akıyı sağlamaya çalışırken ortaya çıkan ferrorozonans olaylarıdır. Bu özel rezonans çeşidi gerekli kontroller altında kimi zaman yararlı bir şekilde kullanılabilir. Ferrorozonans lineer sistemlerde oluşan rezonanslardan farklıdır. Lineer sistemlerdeki rezonans yüksek genlikli sinüzoidal akım ve gerilim dalga şekillerine neden olmaktadır. Ferrorozonans ise buna ek olarak yüksek akım ve gerilim değerlerinde genellikle düzensiz ya da kaotik dalga şekilleri oluşmasına neden olur[11].

Frekansa bağlılığı yanında gerilime de bağımlılığı ile doğrusal rezonansdan farklı olan ferrorozonans olayı oluşumu itibariyle; kaynak ya da işletme geriliminde herhangi bir nedenle meydana gelen küçük değişimler, anahtarlama açısı, sistemde bulunan demir çekirdeklerin artık mıknatıslığı, kapasitelerin yük durumu, devre parametreleri (R,X,C) gibi etmenlere bağımlıdır. Bir defa ortaya çıktıktan sonra, devre parametrelerine (R,L,C), demir çekirdeklerin demir kayıplarına bağımlıdır[59-60].

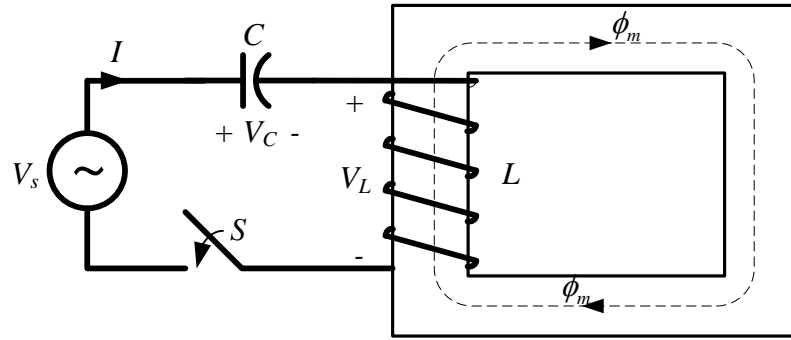
Ferrorezonans karmaşık bir elektriksel olaydır. 1920'lerin başından itibaren farkında olunup, güç sistemleri araştırmalarında en az bilinen olaylar arasında yer almaktadır ve elektrik güç sistemlerinde ferrorozonansın çeşitli kazalar sonucunda meydana geldiği eskiden beri bilinmektedir[63].

Ferrorezonans olayı doyumlu transformatör nüvesinin doğrusal olmayan indüktansı ve kondansatör ile aynı devre içerisinde oluşturduğu osilasyondur[64-65]. Bir güç sisteminde transformatörlerin bulunduğu iletim hattında yük gruplarından bazıları devre dışı kalmasıyla yada çok az yüklenmesiyle ferrorozonans oluşabilir[66].

Ferrorezonansın meydana geldiği sistemlerde ortaya çıkan aşırı gerilim ve aşırı akımlar, yalıtımların sadece gerilim açısından değil, aşırı akımların meydana getireceği ve sisteme dahil olan cihazlar için atanmış anma termal dayanımların üzerine çıkabilen ısınmalar ile de yalıtımların kaybına neden olabilir[78].

4.1. Basit ferrezonans devresi

Manyetik çekirdeği doyuma götürmek için direncinin olmadığı kabul edilen Şekil 4.1.'de verilen devre; V_s gerilim kaynağı, C kondansatörü ve kapalı manyetik devre etrafına sarılı L indüktansından oluşmaktadır.



Şekil 4.1. Kapalı manyetik devreye sarılmış bir bobinin devreye bağlanması

Şekil 4.1.'deki devrede S anahtarının t_0 anında kapatılması ile devrede akım geçmeye başlar ve osilasyon oluşur. Sistemin açılma frekansı,

$$\omega_1 = \frac{1}{\sqrt{LC}} \quad (4.1)$$

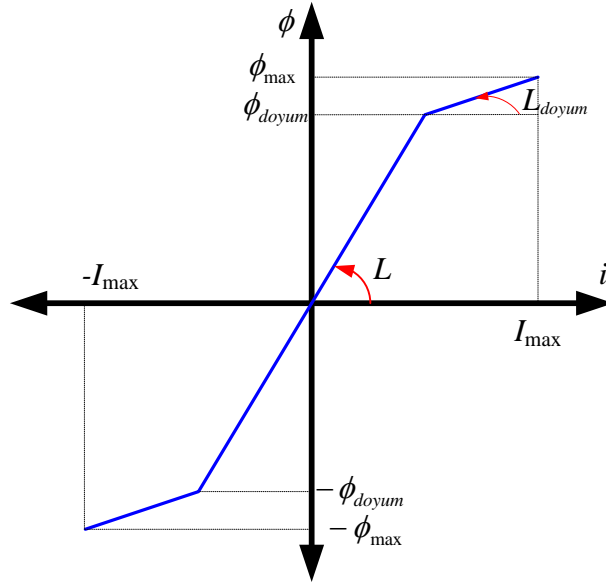
indüktansın manyetik akı ifadesi,

$$\phi = \left(\frac{V_0}{\omega_1} \right) \sin \omega_1 t_1 \quad (4.2)$$

şeklinde bulunur. Kapasite uçlarındaki V_C geriliminin ifadesi;

$$V_C = V_0 \cos \omega_1 t \quad (4.3)$$

olur.



Şekil 4.2. Kapalı manyetik devreye sarılmış bir bobinin basitleştirilmiş manyetik akı-akım karakteristiği

Demir nüveli endüktansın kayıplar ihmal edildikten sonra, basitleştirilmiş ϕ mıknatıslanma eğrisi Şekil 4.2.'de verilmiştir.

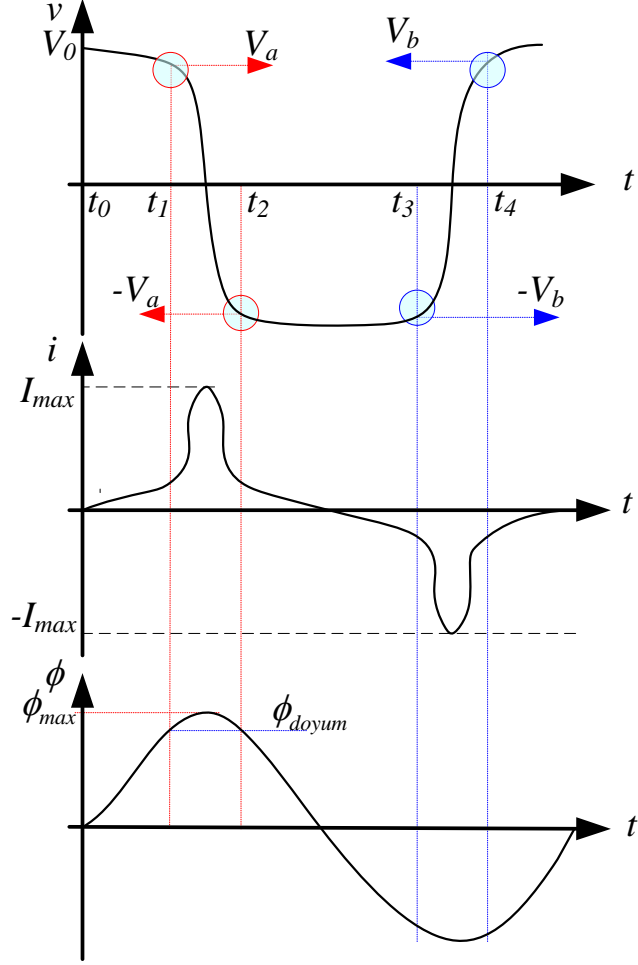
$$\left(\frac{V_0}{\omega_1}\right) > \phi_{sat} \quad (4.4)$$

Şekil 4.3. incelendiğinde, (4.4) ile verilen ifadedeki şartlarda t_1 zamanında ϕ manyetik akısı, ϕ_{doyum} saturasyon akısı değerine ulaşır. Kapasitör uç gerilimi V_a değerine eşit olur ve bu an itibarı ile endüktans doyuma ulaşır, L_s saturasyon endüktansı, başlangıçtaki L değerinden çok küçüktür. C kondansatöründeki enerji birden boşalır L indüktansındaki akım dalga şekli değişir.

$$\omega_2 = \frac{1}{\sqrt{LC}} \quad (4.5)$$

$$E_C = \frac{1}{2CV_a^2} \quad (4.6)$$

E_L indüktansta depolanan elektromanyetik enerji, E_C kondansatörde oluşan elektrostatik enerji olarak tanımlanırsa, $E_L=E_C$ olduğunda akım ve akı maksimum değerlerine ulaşır.



Şekil 4.3. Kondansatör gerilimi, seri devre akımı ve demir çekirdekli indüktanstaki manyetik akının zamanla değişim eğrileri

Şekil 4.3.'deki gerilim, akım ve manyetik akının zamanla değişim eğrileri incelendiğinde şu yorumlar yapılabilir;

1. t_2 anında ϕ manyetik akısı ϕ_{max} değerinden, ϕ_{sat} saturasyon akı değerine geri döner.
2. Endüktans L değerine ulaşır ve kayıpların ihmal edilmesinden dolayı V gerilimi $-V_a$ değerine eşit olur. t_3 anında ϕ akısı, ϕ_{sat} saturasyon değerine ulaşır.

3. Gerilim $-V_b$ değerine eşittir. ω_1 çok az kullanıldığından dolayı $V_a \cong V_b \cong V_0$ olarak alınabilir. Bu durumda T periyodu, salınım aralığı dâhil doymamış durumda;

$$T = 2\pi\sqrt{LC} \quad (4.7)$$

Saturasyon zaman aralığı durumunda ise,

$$t_3 - t_2 \cong \frac{2\phi_{sat}}{V_0} \quad (4.8)$$

$$T = 2\pi\sqrt{L_s C} + 2(t_3 - t_2) \quad (4.9)$$

olur. Frekans için,

$$\frac{1}{2\pi\sqrt{LC}} \langle f \rangle \cong \frac{1}{2\pi\sqrt{L_{sat} C}} \quad (4.10)$$

ifadesine ulaşılır. Bu frekans ifadesi nonlineer durumda, ϕ_{sat} değerine ve gerilimin ilk durumuna V_0 bağlıdır. Gerçek uygulamalar indüktansla birlikte mevcut olan R direnci nedeniyle oluşan kayıplara bağlı olarak V geriliminin genliği azalır ($V_b < V_a < V_0$). Saturasyonun olmadığı $t_3 - t_2$ süresi boyunca oluşan, $\Delta\phi$ manyetik akı değişimi aşağıdaki gibi ifade edilir [67].

$$\Delta\phi = 2\phi_{sat} = \int_{t_2}^{t_3} V dt \quad (4.11)$$

Nüve ve joule kayıpları sebebiyle kondansatör uç geriliminin genliğinin azalması frekansın azalmasına neden olur. Sistemi besleyen gerilim kaynağı V_s tarafından, enerji kayıpları karşılanırsa, frekans değerinde oluşan azalma sistemi besleyen kaynak frekansını (eğer baştaki frekans kaynak frekansından büyükse) veya kaynak frekansının birçok alt frekansını (eğer baştaki frekans kaynak frekansından küçükse) rezonans şartlarını

oluşturabilir. Bu durum ferrezonans olayını, lineer rezonans olayından ayırır. Meydana gelen bu yeni durum lineer rezonansın aksine verilen bir endüktans değeri için çok geniş bir C değer aralığında rezonansın ortaya çıkacağını gösterir.

4.2. Ferrerzonans Olayının Meydana Gelmesini Doğuran Durumlar

Herhangi bir sistemde ferrezonans olayının oluşması için gerekli şartlardan bir kısmı şunlardır,

1. Lineer olmayan indüktanslar ile kondansatör veya içerisinde kapasitans kaynağı olan elemanların elektriksel olarak birbirlerini etkileyecek şekilde arada bulunması,
2. Yalıtılmış nötr noktası, tek fazlı sigortaların çalışması, tek fazlı anahtarlama elemanlarının bulunması gibi devrede potansiyeli sabit olmayan en az bir noktanın bulunması,
3. Boşta çalışan güç transformatörü ya da gerilim ölçü transformatörü gibi elemanların zayıf yüklenme durumlarının olması, ferrezonans olayının vukuu bulması için ön şartlardır [67].

Üzerinde çalışılan olayın sebebinin ferrezonans olup olmadığını anlamak için, bahsedilen bu şartlardan birinin yada daha çoğunun olmaması, bir imkân tanıyabilir. Benzer şekilde, bu şartların varlığı ferrezonansın kesin olarak olacağı anlamına da gelmez. Çünkü ferrezonans, başlangıç koşullarına ve sistem yapısı ile sistemdeki elemanların karakteristiğine de ciddi bir şekilde hassasiyet gösterir.

4.3. Ferrerzonans Türleri ve Belirlenmesi

Bir devrede meydana gelen bir ferrezonans olayı devre elemanları için kısa süreli ama büyük bir risk oluşturur. Yüksüz bir transformatörün sargılarına enerji verilmesi anında olduğu gibi çalışan sistemdeki birçok periyodik olay esnasında veya güç sistemindeki meydana gelen dalgalanmalar sırasında tehlikeli geçici yüksek gerilimler meydana gelebilir [68].

Ferrezonans olayının, ana özelliği aynı topoloji için birden fazla sürekli zaman çalışma cevabı verebilmesidir[69]. Ferracci 1998 yılında yaptığı çalışmada, sistemin ferrezonansını dörte çıkararak sınıflandırmayı tercih etmiştir. Bunlar, temel , alt-

harmonik, yarı-periyodik ve kaotik modlardan oluşur. Ferrerezonans olayının geçici hali ile normal çalışma durumunu ayırmak zor olsa da, ferrerezonansın tiplerine ayrılması geçici durumun etkisi temizlenerek sürekli hale geçtikten sonraki hallerine göre yapılır[67]. Araujo ve arkadaşları tarafından 1993 yılında yayımladıkları çalışmalarında, sistemin ferrerezonans durumunda verdiği cevapları periyodik, yarı-periyodik ve kaotik mod olarak isimlendirerek üç ayrı sınıfta incelemişlerdir[70].

4.3.1. Ferrerezonans Türlerinin Belirlenmesinde Yararlanılan Metotlar

Faz düzleminin oluşturulması, frekans spektrumu ve Poincaré Bölgesi metotları ferrerezonans olayının türünü belirlemede kullanılan yöntemler olarak ifade edilir. Aşağıda bu araçlar kısaca tanıtılmaktadır.

4.3.1.1. Faz Düzleminin Oluşturulması

Herhangi bir sistemin çıkışındaki üretilen cevapları zamana göre simgeleyerek aynı zamanda sistemin değişken parametrelerini de ihtiva eden noktaların belirli bir zaman aralığındaki hareketini, yer değiştirmesini yeterli sayıda örnek ile özetleyen matematiksel düzlemin meydana getirilmesine faz düzleminin oluşturulması denir[71]. Oluşan bu düzlemde tanımlanan herhangi iki parametrenin belirli aralıklarla işaretlenmesi ile oluşan eğriler ferrerezonans tipinin yorumlanarak teşhis edilmesinde çok değerli katkılar sunar.

4.3.1.2. Frekans Spektrumu Dağılımı

Sistemdeki gerilim ve akım dalga şekillerini oluşturan bileşenlerin, toplam işaret büyüklüğüne olan orantısal büyüklüklerinin kendi frekanslarında gösterilmesi metodu olarak açıklanabilir.

4.3.1.3. Poincaré Bölgesi

Poincaré Bölgesi, Faz düzlemindeki sistem cevabına ait eğrinin üzerinde belirlenmiş bir frekans ile ölçüm yapıp düzleme işleyerek (stroboskopik örnekleme) elde edilen noktaların faz düzlemine işlenmesi ve bu noktaların birleştirilmesi ile basitçe çizilen bir

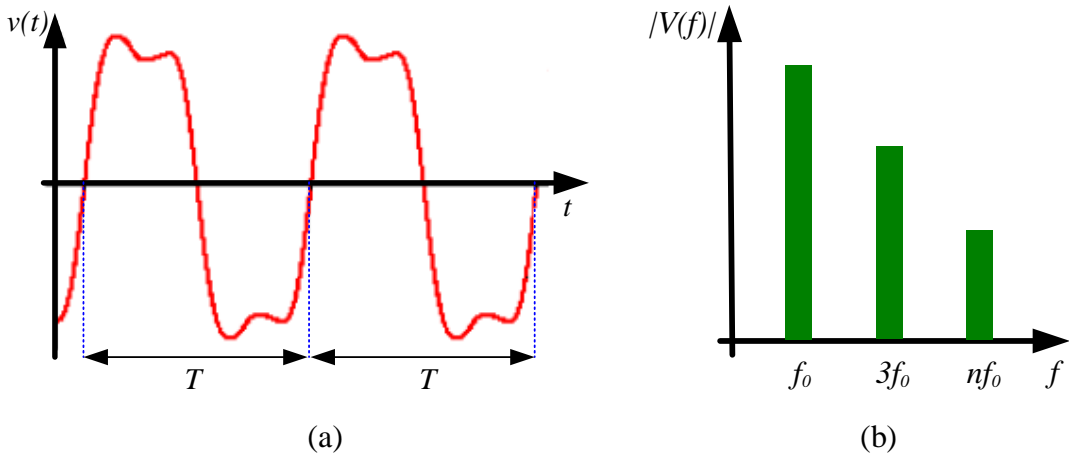
düzlem bölgesidir. Eğer örnekleme frekansı, sistemin besleme geriliminin frekansı gibi zorlayıcı koşullarının frekansında ise, faz düzlemindeki periyodik bir eğrinin Poincaré bölgesi tek bir noktaya tekabül eder [71].

4.3.2. Ferrerezonans Türleri ve Belirleyici Özellikleri

Ferrerezonans olayı kendi içerisinde; ana harmonik rezonans, altharmonik rezonans, simetrik olmayan rezonans diye üç farklı türe sahip olmasına rağmen bu çalışmada sadece Anaharmonik Rezonans ele alınarak bunun oluşumuna yukarıda bahsedilen başlangıç koşullarının etkileri incelenecektir[60]. Analitik bir yöntemle bu tür ferrerezonans olayının kararlılığını incelemekte, sıçrama ve düşme noktalarının kestirimini yapmaktadır. 59 nolu kaynakta ise önerilen sayısal bir yöntemle, histerisiz kayıpları da işlemlere katılarak bütün ferrerezonans türleri incelenmektedir[83-84]. Ferrerezonans türleri bu bölümde dört gruba ayrılarak tanıtılacak ve bu tiplerin bir önceki bölümde belirtilen araçlar ile analizleri sonuçlarında verdikleri tipik sonuçlar, ayırt edici özellikleri olarak sunulacaktır[58].

4.3.2.1. Temel Mod Ferrerezonans

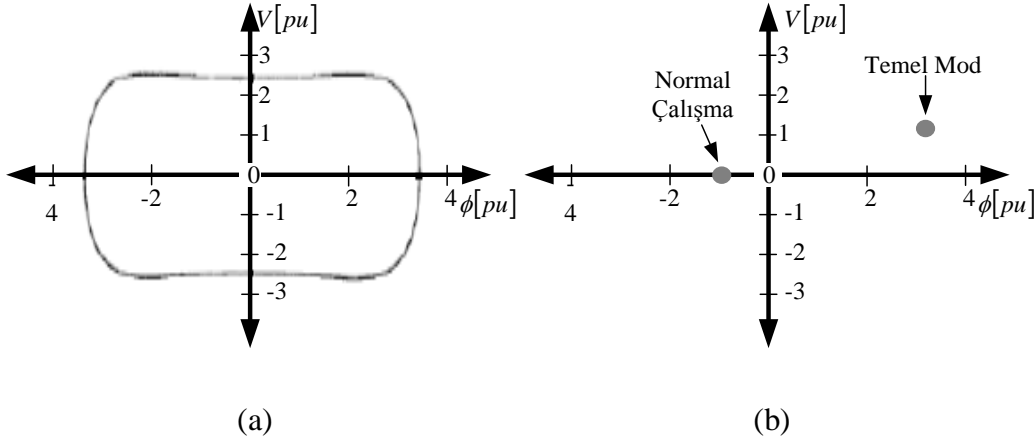
Bu türde, gerilim ve akım işaretlerinin periyotları sistem periyoduna eşittir. Bu durumda gerilim ve akım sinyalleri sistem beslemesine ait frekans ve bu frekansın tam katlarına ait harmonik frekanslarını içerir [67].



Şekil 4.4. Temel ferrerezonans türü için, (a) gerilim-zaman grafiği, (b) temel ferrerezonans tipinde gerilim bileşenlerine ait frekans spektrumu

Sistemin yapısına göre değişiklikler gösterse de Şekil 4.4.(a)'da verilen gerilim-zaman grafiğinde gösterildiği gibi sinüzoidal formdaki işaretin tepe noktalarında bozulmalar meydana gelmiştir. Şekil 4.4.(b)'de verilen çalışmakta olan sistemdeki temel mod ferrorezonansa ait, frekans spektrumu incelenirse, spektrum ayırık ve f_0 besleme frekansı ile kendi alt harmonik frekanslarında işaretler ihtiva ettiği görülür.

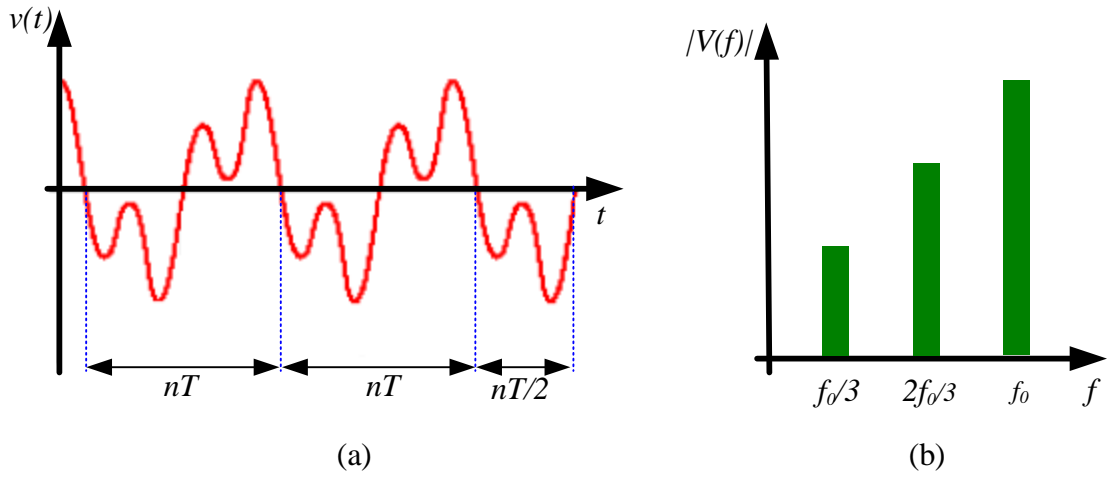
Şekil 4.5.(a)'de temel ferrorezonansın karakteristik transformatör gerilimi ile manyetik akı değişiminin birim değer (p.u.) cinsinden faz düzlemi örneklenmiştir. Şekil 4.5.(b)'de ise Poincaré Bölgesi örneği ile sistemin faz düzlemindeki eğrisinin belirli bir frekansla örneklenmesi neticesinde normal çalışma durumunu simgeleyen tek noktadan belirgin derecede ayırık ancak, yine tek bir noktadan mevcut olduğu anlaşılmaktadır.



Şekil 4.5. Temel ferrorezonans tipi için, (a) faz düzlemi, (b) Temel ferrorezonans hali için Poincaré bölgesini oluşturan tek nokta

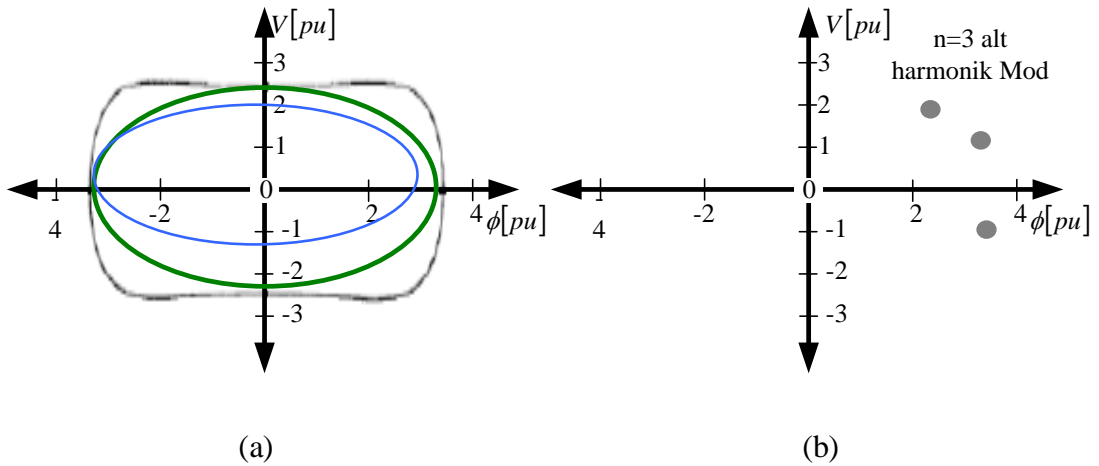
4.3.2.2. Alt Harmonik (Subharmonik) Mod Ferrorezonans

Sistemdeki akım ve gerilim işaretlerinin periyodu, sistem beslemesinin periyodu olan T 'nin n katı olan nT ile ifade edilir. Bu durum alt harmonik n ya da harmonik $1/n$ olarak isimlendirilir. Şekil 4.6.(a)'da verilen gerilim-zaman grafiği görülmektedir. Alt harmonik ferrorezonans durumu normal durumun dışında bir durumdur. Alt-harmonik durumu normalde tekil sayılı orantılara sahip harmonikler içerirken; spektrum, Şekil 4.6.(b)'deki gibi n 'nin bir tamsayı f_0 'ın ise besleme frekansı olduğu durumda temel frekans olarak f_0/n frekansını ve bunun tam sayı katlarını verir.



Şekil 4.6. Alt-harmonik ferreazonans türü için, (a) gerilim-zaman grafiği, (b) $n=3$ için sürekli hal çalışmasında gerilim bileşenlerine ait spektrum

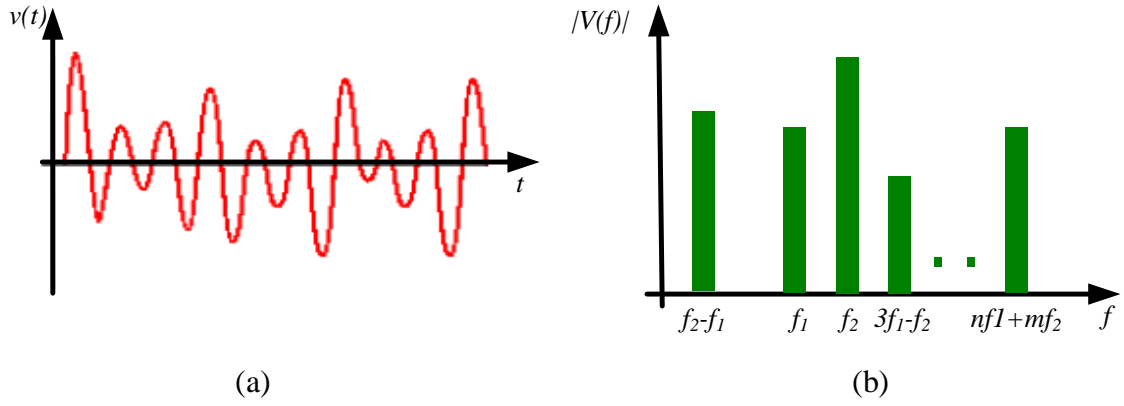
Bu tip ferreazonansın faz düzlemi, Şekil 4.7.(a)'da görüldüğü gibi n adet kapalı eğri içerir. [67]. Poincaré Bölgesi'nde ise, Şekil 4.7.(b)'de örneği verildiği gibi n adet nokta görülür.



Şekil 4.7. Alt-harmonik ferreazonans modunda, (a) $n=3$ için faz düzlemi gösterimi, (b) Poincaré bölgesini oluşturan üç nokta

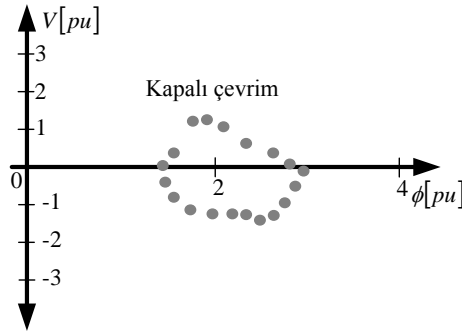
4.3.2.3. Yarı Periyodik Mod Ferrerezonans

Yarı periyodik ferrerezonans modu yalancı periyodik mod ve Quasi-periyodik olarak da tanımlanır. Sistemdeki gerilim ve akım grafikleri periyodik değildir. Şekil 4.8.(a)'da verilen gerilim-zaman grafiği görülmektedir. Yarı periyodik modun frekans spektrumu, sürekli olmayıp aralıklı bir yapıdadır. Spektrum, n ve m tam sayı ve f_1/f_2 irrasyonel reel sayı olmak üzere nf_1+mf_2 , formunda süreksiz bir spektrum gösterir[67].



Şekil 4.8. Yarı harmonik ferrerezonans türü için, (a) gerilim-zaman grafiği, (b) $n=3$ için sürekli hal çalışmasında gerilim bileşenlerine ait spektrum

Poincaré Bölgesinde kapalı bir eğri gözlemlenir. Şekil 4.9.'da yarı-periyodik ferrerezonans durumuna ait Poincaré bölgesi örneklenmiştir. Stroboskopik görüntü kapalı bir eğri meydana getirecek şekilde oluşur [68].

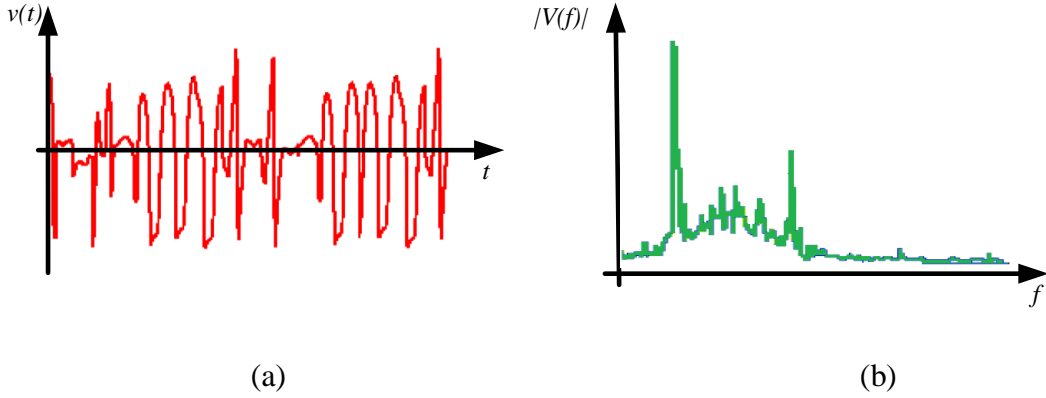


Şekil 4.9. Yarı periyodik ferrerezonans modda oluşan kapalı eğri şeklindeki Poincaré bölgesi

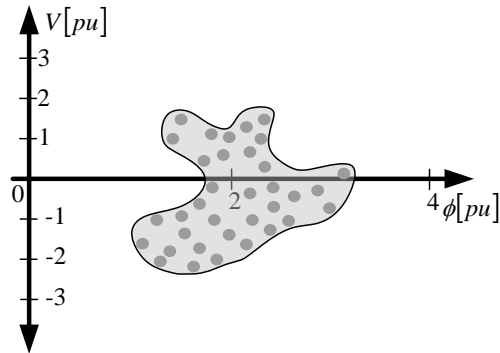
4.3.2.4. Kaotik (Karmaşık) Mod Ferrerezonans

Karmaşık mod olarak da adlandırılan bu durum pratikte beklenmeyen bir sonuçtur[72]. Transformatör çekirdeklerinde var olan kaçınılmaz kayıplar eklendiğinde bu çalışma şeklinin oluşma olasılığını çok zayıflar[70].

Şekil 4.10.(a)'da görüldüğü gibi sistemdeki gerilim ve akım işaretleri diğer modlardan oldukça farklı, düzensiz ve tahmin edilemez davranışların gösteren sürekli bir işarettir. Pratikte yaşanması ihtimali çok düşük olan bu tip ferrerezonanstaki kaynaklı olarak sistemde gözlemlenecek gerilim ve akım parametrelerine ait frekans spektrumu incelendiğinde grafik üzerinde her hangi bir ayırık kısma rastlanamaz, sürekli bir dağılıma ulaşılır. Şekil 4.10.(b)'de tarif edilen şekildeki frekans spektrumunu örneklemektedir.



Şekil 4.10. Kaotik mod ferrerezonans türü için, (a) gerilim-zaman grafiği, (b) gerilim bileşenlerine ait spektrum



Şekil 4.11. Kaotik ferrerezonans modunda oluşan kapalı eğri şeklindeki Poincaré bölgesi

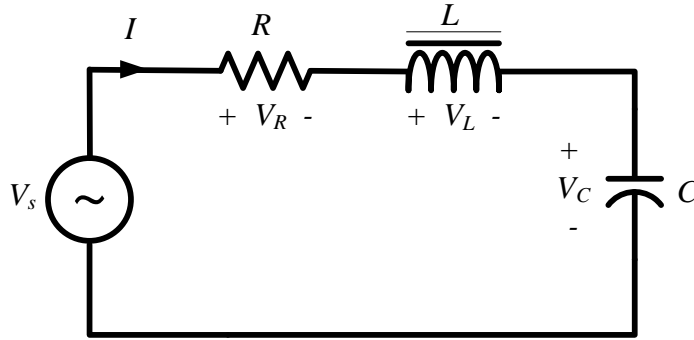
Kaotik sistem cevabında faz düzlemindeki kapalı eğrilerin sayısı ve Poincaré Bölgesindeki noktaların sayısı sonsuza gider. Stroboskopik görüntü farklı birçok nokta bir V düzleminde alan kaplayarak oluşur ve bu alan için tuhaf-ilgi çekici ifadesi kullanılır[68].

4.3.3. Ferrerezonansın Karakteristik Özellikleri

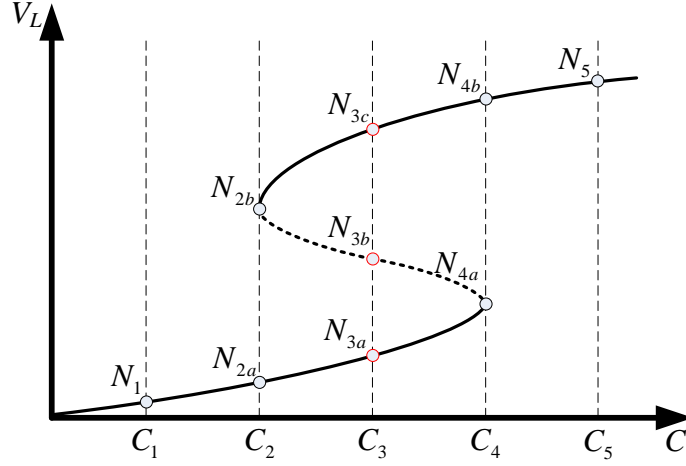
Ferrerezonans olayını diğer enerji sistemi olaylarından bazı temel farkları bulunmaktadır. Bunlar; sistem parametrelerine başlangıç koşullarına karşı sahip olunan aşırı duyarlılıklar, birden fazla sayıda kararlı çalışma noktasının bulunması olarak ifade edilebilir.

4.3.3.1. Ferrerezonansın Değişen Sistem Parametrelerine Duyarlılığı

Ferrerezonansın olayının meydana getirebilmek için lineer olamayan endüktans ve kondansatörün bulunduğu bir ferrerezonans devresi olan Şekil 4.12.'de görülmektedir. Bu devrede bulunan L indüktansına ait V_L gerilim ile C kapasitans değerlerinin değişimi Şekil 4.13.'de verilmiştir.



Şekil 4.12. Bir ferrerezonans devresi



Şekil 4.13. Sıçrama olayı ve sistem parametrelerine hassasiyet

Şekil 4.13.'de verilen grafik incelendiğinde;

1. Kapasitenin değeri C_1 olduğunda, sistem çözümü tek bir noktada olup bu değer N_1 'dir. Bu çözüm lineer varsayım ile elde edilebilecek normal çalışma koşuluna denk düşmektedir.
2. Kapasitenin değeri C_2 iken, sistemin kararlı çalışma noktası olan N_{2a} noktasından N_{2b} noktasına atlar. N_{2a} noktası bir sınır değerdir.
3. Kapasitenin değeri C_3 iken, sistemin üç adet çözüm noktası olup bunlar N_{3a} , N_{3b} ve N_{3c} noktalarıdır. Bu noktalardan N_{3a} normal çalışma durumunda oluşurken, N_{3c} sistemin ferrezonans içerisinde olduğu duruma karşılık gelmektedir. Yine bu iki nokta arasında bulunan ve noktali çizilmiş olarak gösterilen kısımdaki cevap ise, N_{3b} noktası olup pratikte ulaşılamayan bir durumdur.
4. Kapasitenin değeri C_4 iken, ikinci sınır noktası N_{4b} 'den N_{4a} noktasına atlar.
5. Kapasite değeri C_5 iken, sadece ferrezonans hali olan tek bir N_5 çalışma noktası mevcuttur.

Ferrezonans olayının ayırt edici özelliklerinden olan atlama (zıplama yada sıçrama olayı) olayı sistemin yukarıda anlatıldı gibi karmaşık şekildeki çalışmasına neden olur. Şekil 4.13.'te görülen atlama olayının sebebi sistem parametrelerinden biri olan kapasitenin değiştirilmesidir. Kapasitenin değişimi gibi diğer parametrelerin değişmesi ile

atlama olayı meydana gelebilir. Sistemin kaynak geriliminin ve sistemde ferrezonanstan sebebi ile oluşan, olağan dışı akım ve gerilim bileşenlerinin bastırılmasında görevli olan direncin değişen değerleri için sistemin tepki cevabında da büyük değişiklikler olacaktır. Sonuçta bu değişikliklerin kaynağının ferrezonans olayının sistem parametrelerine karşı olan aşırı hassasiyetidir. Sistem parametrelerindeki ya da geçici olaylardan birindeki küçük bir değişiklik bir kararlı çalışma noktasından çok farklı bir kararlı çalışma noktasına ani atlamalar üretebilir[67].

4.3.3.2. Ferrezonansın Sistem Başlangıç Koşullarındaki Değişime Duyarlılığı

Elektrik enerjisi iletim ve dağıtım sistemlerinde ferrezonans olayının meydana gelmesi, başlangıç koşulları çok önemlidir. Başlangıç koşulları, bu geçici olayın yaşanmasından hemen önceki anda sistemin durumunu anlama açısından önemlidir. En önemli parametreler sistem geriliminin genliği, sistemdeki kapasitif elemanların değeri ve sistemde sönümü sağlayabilecek direnç değerleridir. Kaynak gerilimi, sistem kapasitansları ve dirençlerinin boyutları, ferrezonans halindeki sistemin cevabının hangi ferrezonans tipinde olacağını belirler[25].

Sistemdeki kapasitif elemanlarda bulunan enerjinin miktarı, herhangi bir nedenle sistemin bir parçası izole edildiğinde, sistem üzerinde bulunan endüktif bileşenler üzerinden boşalacak ve sistemi yukarıda açıklandığı durumlara sürükler.

Büyük önem taşıyan bir diğer başlangıç koşulu da transformatör çekirdeğindeki akı miktarı da büyük önem taşımaktadır. Akının çekirdekteki yoğunluğu transformatör çekirdeğinin yapısına bağlıdır[67]. Çekirdekteki artık akının büyüklüğü, transformatörün doymaya sürüklenmesinde ya da doymanın derinleşmesinde itici kuvvet oluşturacaktır [73].

4.4.4. Ferrezonansın Önlenmesi

Ferrezonans, transformatör sekonderi üzerindeki yüke, devrenin kesilme tipine ya da anahtarlanmanın tipine, hattın uzunluğuna ve hattın tipine bağlı olarak değişiklik göstermektedir. Ferrezonans aşırı gerilimlerden korunma uzun enerji iletim hatlarının tasarımlarının önemli problemlerinden birisidir[74]. Araştırmalarda, ferrezonansın en çok yüklerin devre dışı kalmasından ortaya çıktığı daha sonra ise iletim hatlarında

anahtarlama benzeri etkiyi oluşturacak arızalardan kaynaklandığı belirlenmiştir. Yapılan çalışmalarla ferrorezonansı önlemek için ileri sürülen başlıca tedbirler aşağıdaki gibi sıralanabilir;

1. Her koşulda topraklamanın muntazam yapılması,
2. Transformatörün nötr noktasının topraklanması,
3. Gerilim Transformatörleri (GT) kullanılması,
4. Primeri üçgen bağlı GT kullanılması,
5. İletim hatlarında, hat-bası ve hat-sonuna reaktörler yerleştirilmesi,
6. Kaza açmalarından oluşan ferrorezonansın önlenmesi için yeni

koruma devrelerinin tasarlanması ve yeni analiz yöntemlerinin geliştirilmesi[75-76].

Literatürde, ferrorezonans üzerine yapılan çalışmaların büyük çoğunluğu ferrorezonansın analizinden çok ya devre modeli üzerinde yada örnek bir güç sistemi modeliyle ferrorezonans esnasında meydana gelen gerilim/akım dalga formları elde edilerek yorumlanması şeklinde olmuştur. Yine literatürde ferrorezonans olayı sonucu meydana gelen etkileri önlemeye yönelik tasarım ve tedbirleri içeren çalışmalar da önemli yer tutmaktadır.

4.5. Ferrorezonans ile Linear Rezonans Arasındaki Temel Farklar

Bu iki rezonans durumu teorik olarak birbirine benzemesi rağmen aşağıda maddeler halinde verilen farklar sebebiyle birbirinden oldukça farklıdır.

1. Rezonans olayının geniş bir alan içerisindeki parametre değerleri ile gerçekleşmesi,
2. Akım ve gerilimin frekans değerinin, sinüzoidal kaynağın frekansından farklı değerlerde olması,
3. Belirli parametre değerleri ve konfigürasyonları için birden fazla kararlı sürekli hal cevaplarının olması,
4. Ferrorezonans tek fazlı olabilir. Ancak fazlar arasında nonlineer manyetik bağlantılar yapılması durumunda üç fazlı olarak tanımlanır. Üç nonlineer faz arasında bağlantı yoksa üç tek faz ferrorezonansı denebilir. Ferrorezonans seri ve paralel olabilir[60].

4.6. Ferrerezonans Olayını Etkileyen Durumlar

Ferrerezonans olayının gerçekleşmesini etkileyen birçok faktör olduğu bilinmektedir. Ferrerezonans olayı üzerinde etkisi olduğu kabul edilen bazı teorik durumlar için deneysel sonuçlarını görmek ve üzerindeki etkinliğini ispat etmek gereklidir. Herhangi bir sistemde oluşan ferrerezonans olayına elektriksel parametrelerin verdiği tepkileri gözlemlemek ve sistemin ferrerezonans durumuna yaklaşp yaklaşmamasını incelemek için aşağıda ifade edilen durumların incelenmesi gerekir.

4.6.1. Ferrerezonansa Hat Yapısının Tesiri

İyi planlanmamış yada zaman içerisinde meydana gelen ihtiyaçlar nedeniyle yapılan değişiklikler sonucunda iletim ve dağıtım sisteminin başlangıç parametreleri değişmektedir [25]. Hatların kapasitansları, hat yapısının parametrelerindeki değişimden öncelikli olarak etkilenecektir. Havai hattın boyunun uzaması ya da kablo şebekenin uzunluğunun artışı sığayı arttıracaktır. Artan sığanın ise ferrerezonans ihtimalini arttıracığı kesin değildir. Ferrerezonans olayının yaşabilmesi için sistem kapasitansının sistem yapısına bağlı olarak alt ve üst sınırı değişecek olan bir aralığa düşmesi gerekmektedir [77]. Her sistem için lineer olmayan yapıya bağlı olarak, artan kapasitans ferrerezonansın oluşması ihtimalinin artacağı anlamına gelmez ve lineer hesaplara bağlı olarak elde edilen çalışma yönergeleri geçerli olmayabilir [72]. Yine de, sığa artışı ferrerezonansın yaşanmasına imkan tanıyan kapasitans değerlerini içeren aralığın içerisinde kalmak şartıyla artış göstermesi halinde, çekirdeğin doymasını desteklemesi açısından oluşacak dalga şekillerinin farketmesine ve ferrerezonans tipinin değişmesine önemli etkide bulunacaktır [70]. Ferrerezonansın oluşmasını sağlayacak bölgedeki kapasitenin artması, sistem tepkisinin daha karmaşık sonuçlar vermesine neden olacağı açıktır.

4.6.2. Ferrerezonansa Sistem Geriliminin Genliğinin Tesiri

Ferrerezonans olayı meydana gelme ihtimali sistem geriliminde görülen genliğinin artışlarıyla paralel olarak artar [77]. Gerilim seviyeleri farklı iki orta gerilim sistemi için yapılan araştırma verilerine göre Amerika Birleşik Devletleri için 34.5kV - 25kV sistemlerinde yaşanan ferrerezonans olayı sayısı, 15kV sistemine göre çok daha fazla

olması bu durumu desteklemektedir.[25]. Gerilim seviyesi olarak 15kV ve daha altının atandığı sistemlerin pratikte ferreazonans durumu olmayan sistemler olarak bilindiği; esasen ferreazonans ihtimalin mutlaka var olduğu ama daha yüksek gerilim seviyelerine oranla daha düşük olduğu 2008 yılında IEEE tarafından son yayımlanan, 3-fazlı dağıtım sistemlerinde transformatör bağlantıları için uygulama kılavuzunda belirtilmiştir. Sistem geriliminin genliğinin büyümesi yalıtkan malzeme miktarının artmasını, dolayısı ile sisteme ait kapasitif yapıların büyümesi sonucunu doğuracaktır.

4.6.3. Ferrerazonansa Yük Durumunun Tesiri

İletim ve dağıtım sistemlerinde ferreazonans üzerinde etkili olan faktörlerin başında yükün durumu gelmektedir. Öteki elektriksel parametreleri değiştirmenin zorluğu düşünüldüğünde sistem bileşenlerinden yük, daha kolay ve etkin değiştirilebilir. Yükün durumu, yani mevcut olup olmaması yada ne miktarda olduğu, ferreazonans araştırmalarında çok önemlidir. Yükteki bazı küçük değişimler, sistem elektriksel parametrelerinde güçlü etkiler meydana getirebilmektedir.

Sürekli olarak tam yükünde çalışan bir elektriksel sistemde bulunan kabul edilebilir bir miktarın üzerindeki saf rezistif bileşenli yük, etkisinde olduğu ferreazonans olayı ile birlikte meydana gelen, yüksek genlikli akım ve gerilim sinyallerinin bastırılmasında çok faydalı olabilir. Kontrollü bir anahtar aracılığıyla yükün, anahtarın kapalı olduğu durumda tam etki gösterip açık olduğu durumda ise hiç etki göstermediği yüklerle pek güvenilemez.

Büyük güçlü kırma motorlarına sahip konkasör tesisleri yada çok uzun hatlı su taşıma sistemlerindeki pompalarını besleyen dağıtım transformatörlerinin sekonder yükünün varlığı ya hep ya da hiç şeklindedir. Başka bir açıdan düşünüldüğünde, enerji sistemini yönetenlerin kontrol etmediği bağımsız yükler için ise, sistemin ferreazonansa karşı korunmasında sönüm sağlamaları noktasında güvenilmesi yanlıştır, burada yük değişimlerini kestirebilmek olanaksızdır[72].

Sönüm için önemli olan yük içindeki rezistif etkinin artmasıdır. Bu durum ferreazonansta sönümü artırır ve ferreazonans olayının yarattığı aşırı akım ve aşırı gerilimlerin genlikleri düşerken; sistemden temizlenme süreleri de kısalmır.

1.10.4. Ferrorezonansa Transformator Çekirdek Yapısının Etkisi

Transformatorlerdeki manyetik doymanın en önemli belirleyicisi transformator çekirdeğinin yapısıdır. 3 fazlı enerji iletim hattının beslediği transformator yapısı, ancak 3 adet tek fazlı transformatörden oluşuyorsa ya da cihaz 3 fazlı üç katlı bir yapıya sahipse manyetik kuplaj yok kabul edilebilir. Bu durumda transformatorü besleyen kablo hattaki her faza ait kablolar ekranlanmış ise hesaba sadece faz-toprak arası kapasitanslar katılır. Çekirdek yapısı sıfır serisi akılarının sirküle edebilmesi için akı yollarına sahip olup olmadıklarına ya da fazlar arası kaçak akının birbirlerinin etkileyip etkilemediklerine göre transformatorün ısınmasının ve gürültü seviyesindeki artışın altındaki asıl neden olan fiziksel zorlanmaların boyutlarına etki eder. Çekirdek yapısı doyma karakteristiği belirleyeceği gibi; çekirdek kayıpları sıfır serisi akılarına etkiyecek sönüm üzerinde etkilidir. Herhangi bir ferrerezonans çalışmasının en kritik kısmı, transformatorün modellenmesidir. Transformator lineer olmayan karaktere sahip birleşenler içerir. Modellemenin doğruluğu, en çok manyetik doymanın ve çekirdek kayıplarının doğru temsiline bağlıdır [72].

Genellikle iletim ve dağıtım sistemleri dâhilindeki tüm transformatorlerin 3 fazlı olması nedeniyle, transformator çekirdeğinin modele 3 adet tek fazlı transformator çekirdeği olarak katılması ülkemiz enerji sistemi için yapılacak çalışmalarda modellenmenin en önemli parçalarından birinde büyük bir yanlışın yapılmasına neden olur [78]. Üç fazlı bir transformatorünün çekirdeğinin manyetik açıdan üç adet tek fazlı transformatöre eşit olduğu doğru değildir. Özellikle, transformator çekirdeklerinin geçici ya da dengesiz hallerdeki cevaplarının incelendiği durumlarda, böyle bir kabul çalışmayı önemli hatalara sürükleyebilir [72].

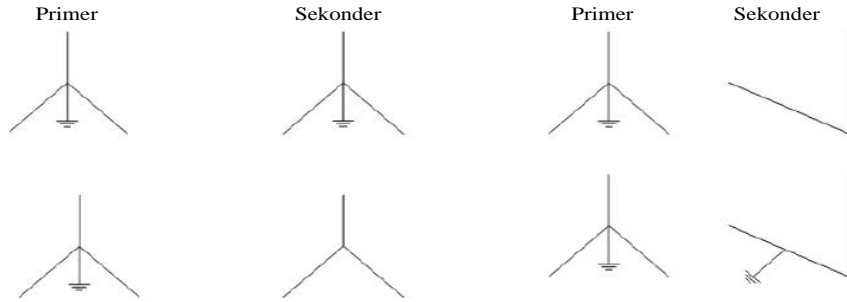
Çekirdek tipi transformatorler, üretim için en az çekirdek malzemesine ihtiyaç duyan ve lamine sacların üst üste yığılması ile hazırlanan tiplerdir. Dengesiz çalışmalar sonucu meydana gelen ve çekirdekte sirküle edemeyen sıfır serisi akılar, kazana kadar itilir ve kazanda Eddy akımlarının akmasına neden olarak, hasar doğurabilecek ısınmaları ortaya çıkarır. Sadece dengeli yüklerin olduğu sistemlerde kullanılması ekonomik faydası ile tercih edilmelidir. Kabuk (shell) tipi çekirdek sıfır serisi akılarının çekirdekte sirküle etmesine imkan verecek akı yoluna sahiptir. Bu yapı dengesiz çalışma için çok daha uygundur. Dört-bacaklı çekirdekler, çok yaygın kullanılmamakla beraber, sıfır serisi akılarının akabilmesi için ek bir manyetik yola sahiptirler. Bu tip çekirdek, çıkış fazlarının

benzer karakterlere sahip olmadığı tek çekirdek çeşididir. Beş bacaklı-yığılı tip transformatör çekirdekleri de sıfır serisi akılarına sirküle etme imkânı tanıyan manyetik yollara sahiptir. 5 adet bacak ortada kalın üçü sargıları taşıdığından dört bacaklılara oranla çok daha simetrik [72]. Beş bacaklı-üst üste sarılmış tip transformatör çekirdekleri dört eşmerkezli, laminasyonlu çekirdeklerden oluşur ve sadece uyumlu fazların birbirleri ile bir magnetik yol üzerinden bağlı olmalarını sağlayan eşsiz bir özelliği vardır. Çekirdekler arasında hiç akı kaçağı olmadığı düşünülerek, dış taraftaki iki sargı grupları arasında magnetik bağ yoktur ve sıfır serisi akılarının sirküle edebilmesi için gerekli yola sahip olması nedeniyle tank ısınmasını minimize eder [72].

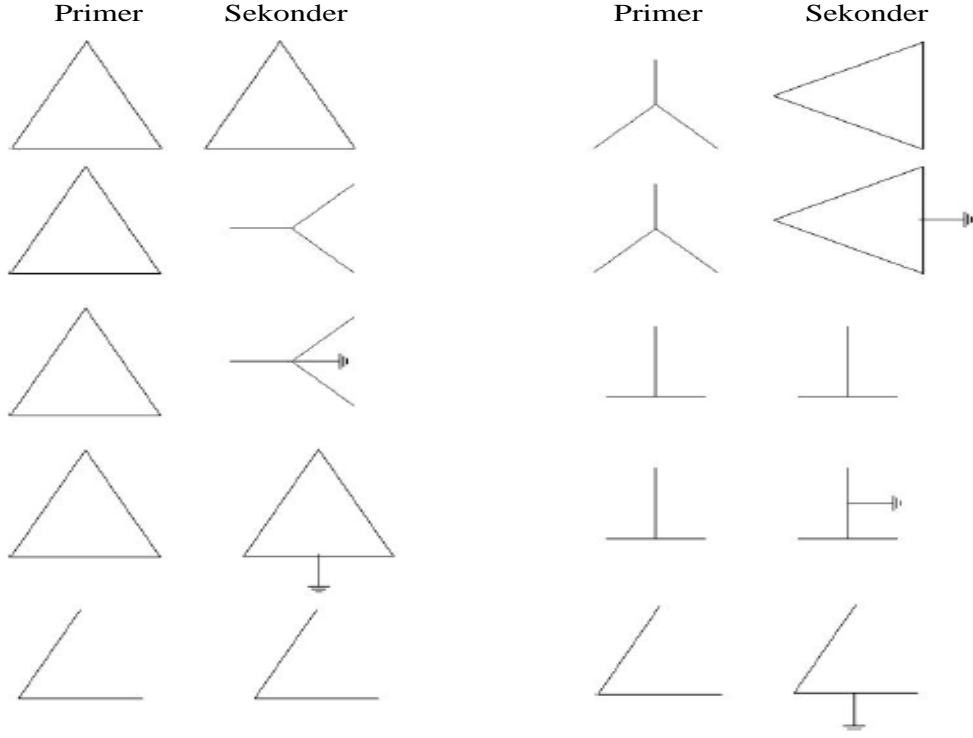
4.6.5. Ferrerezonansa Transformatör Sargı Bağlantı Şekillerinin Etkisi

Tek kutuplu anahtarlamalar esnasında ferrerezonansın oluşup oluşmayacağı üzerinde transformatör sargılarının bağlantı şekilleri önemli etkiye sahiptirler. Verilen bir sisteme ve işletme tarzına göre seçilecek transformatörün bağlantı şekli ferrerezonans ihtimalini en aza indirmelidir [77].

Ferrerezonans olayının meydana gelme ihtimali düşük ya da olmayan bağlantılar Şekil 4.14.'de görülmektedir. Bu durumun tersi olan Şekil 4.15.'de ferrerezonans olayına sürüklenme ihtimali düşük ya da olmayan bağlantıları gösterir. Her ne kadar ferrerezonansa girme ihtimali düşük olan sargı tiplerinden de olsa eğer transformatöre gelen hatta faz arası kapasitans kuplajı mevcutsa, Şekil 4.14.'deki sargı tiplerine sahip transformatörler de ferrerezonansa girebilir [77].



Şekil 4.14. Ferrerezonans olayının olma ihtimali düşük olan ya da hiç olmayan bağlantılar



Şekil 4.15. Ferrerozonans olayının olma ihtimali yüksek olan bağlantılar

4.6.6. Ferrerozonansa Transformator Boyutunun Etkisi

Yapılan çalışmalarda, belirli bir gerilim seviyesinde ve çevirme oranında olan transformatörler arasında çekirdek yapısı ve sargı tipi de aynı tutulduğu halde karşılaştırma yapılırsa anma gücü daha yüksek olan güç transformatörünün ferrerozonansa olan yatkınlığı, gücü düşük olana oranla belirgin şekilde az olduğu görülmüştür. Transformatör anma görünür gücünün artması ile bu transformatörün bulunduğu sistem parçasının ferrerozonansa girme ihtimali düşer [77].

4.6.7. Ferrerozonansa Kesici Yapısının Etkisi

Gelişen teknoloji ile paralel bir şekilde yüksek gerilim devre kesicilerinin yapıları da değişmiş ve ideal özelliklere yaklaşmıştır. Yüksek gerilim kesicilerde beklenen ideal karakteristiklerin başında gecikmesiz açma kapama yapması ve sonsuz açma durumunda sonsuz kapasiteye ulaşmalarıdır. Yeni nesil yüksek gerilim kesicilerinin sahip olduğu kapasitif sğaları, 1950 ile 1980 arasında üretilen kesicilere oranla 2 ile 50 kat arasında değişen büyüklüklere ulaşmıştır [79].

Kesme ortamlarının geliştirilmesi ile çoklu kesme çemberlerine olan ihtiyaç azalmıştır. Örneğin 230kV sisteminde havalı kesiciler 4 ile 6 çembere ihtiyaç duyarken; az yağlı kesiciler 2 ile 4; SF6 kesiciler ise 2 adet çembere ihtiyaç duymaktadır. Bir havalı kesici için her bir kesme çemberine paralel olarak eklenen kondansatörlerin değeri 30 ile 800pF arasında iken; az yağlı kesicilerde 800 ile 1300pF; SF6 kesicilerde 1500 ile 1600pF arasındadır [80].

Ferrorezonans olayı hakkında çalışma boyunca ortaya konan önemli özelliklerden biri ferrorezonansın belirli bir sistemde meydana gelmesi için, sistemdeki toplam kapasitans değerinin sistemin kendine has özellikleri tarafından belirlenen, alt ve üst sınırlara sahip olan bir zarfta kalması gerekmektedir. Sistem dâhilindeki kesicilere ait derecelendirme kondansatörlerinin sığaları da toplam kapasitansa eklenecektir. Ferrorezonansın oluşmayacağı bir değere denk gelinmesi halinde, kesici kapasitansı tek başına, ferrorezonansı başlatılmak için yeterli olmayacaktır. Ancak, artan derecelendirme kapasitanslarından ötürü ferrorezonans olayına girilmesine neden olan sığa değerlerine ait zarfın alt sınırı geçmişe oranla çok daha kolay aşılabilmektedir.

4.6.8. Ferrorezonansa Düşük Kayıplı Transformatörlerin Etkisi

Artan enerji tüketimine karşın çevrenin korunmasına duyulan ihtiyaçtaki artış ve ülkelerin ekonomik yapılarının oluşturduğu zorlayıcı koşullar nedeni ile elektrik enerjisinin üretim, iletim, dağıtım ve tüketim kademelerinin hepsinde verimliliğinin artırılması ve artışın sürekli bir akım halini alması zorunlu olmuştur. Bu trendin bir neticesi olarak düşük kayıplı transformatörlerin kullanımı gittikçe yaygınlaşmaktadır. Pek çok ülkenin elektrik ve dağıtım şebekelerini yöneten şirketler, satın aldıkları yeni transformatörlerin üretim sonundaki kabul testlerinde istenilen verim seviyesini yakalayamaması halinde siparişlerin iptallerine kadar giden kararlılıkla davranmaktadır. Son dönemde buna benzer bir durum TEİAŞ ile büyük üreticilerden biri arasında yaşanan sıkıntılı zamanlara neden olmuştur.

Verim düzeyinin yükseltilmesi eğiliminin yanı sıra, teknolojik ilerlemenin bir diğer getirisi de yüksek verimli transformatörlerin sahip oldukları kapasitans değerlerindeki artıştır. Düşük kayıplı transformatörlerin, verim artışlarının sağlanması amacıyla yapılan geliştirmeler sonucu bu transformatörlerin sürekli kayıplarını oluşturan bakır ve çekirdek kayıplarındaki düşüşlerdir. Bu nedenle yüksek verimli transformatörlerin ferrorezonans açısından bakıldığında sistem sığasındaki artışa katkıda bulunmalarının yanı sıra var olan

diğer bir önemli etkileri de olgunun yaşanması halinde sönüm etkisi yaratacak sekonder yüke, düşük kayıpları nedeniyle katkı sağlayamamaya başlamalarıdır [72].

4.6.9. Gerilim Ölçü Transformatörlerinin ve Diğer Cihazların Etkisi

İletim ve dağıtım sistemlerinde sisteme dâhil olan cihazların kapasiteleri de sistem toplam kapasitansına etki eder. Bunlardan son yıllarda yaygın olarak kullanılan yaygınlaşmakta olan kapasitif kuplajlı gerilim ölçü transformatörleri sistemin toplam kapasitesinin artmasına neden olmaktadır. Ferrerezonansın oluşmasına sebep olan kapasite değerleri sistem yapısına bağlı olarak geniş bir aralık arasında kalan bir bölgede yer alır. Çalışma süresince sistemin anlık yapısına göre bu alt ve üst sınırlar, eğriler üzerinde hareket edecektir. Eğer yükselen kapasitans değeri maksimum eğrisinin üzerine çıkarsa ferrerezonans beklenmeyecektir. Ancak; bu sınırların dışına çıkılamıyorsa artan kapasitif etki, genelde, ferrerezonans halinde sıfır serisi üzerinde taşınacak enerjinin artışı demek olacaktır. Bu da bazı hassas cihazların alabileceği hasarı arttırabilecektir. Ek olarak sınırlar dâhilinde kalarak artan sığa sistem cevabının karmaşıklığını da arttıracaktır. Bu duruma örnek daha önceki kısımlarda verilmiştir.

4.6.10. Sistemin Kısa Devre Gücünün Büyüklüğünün Etkisi

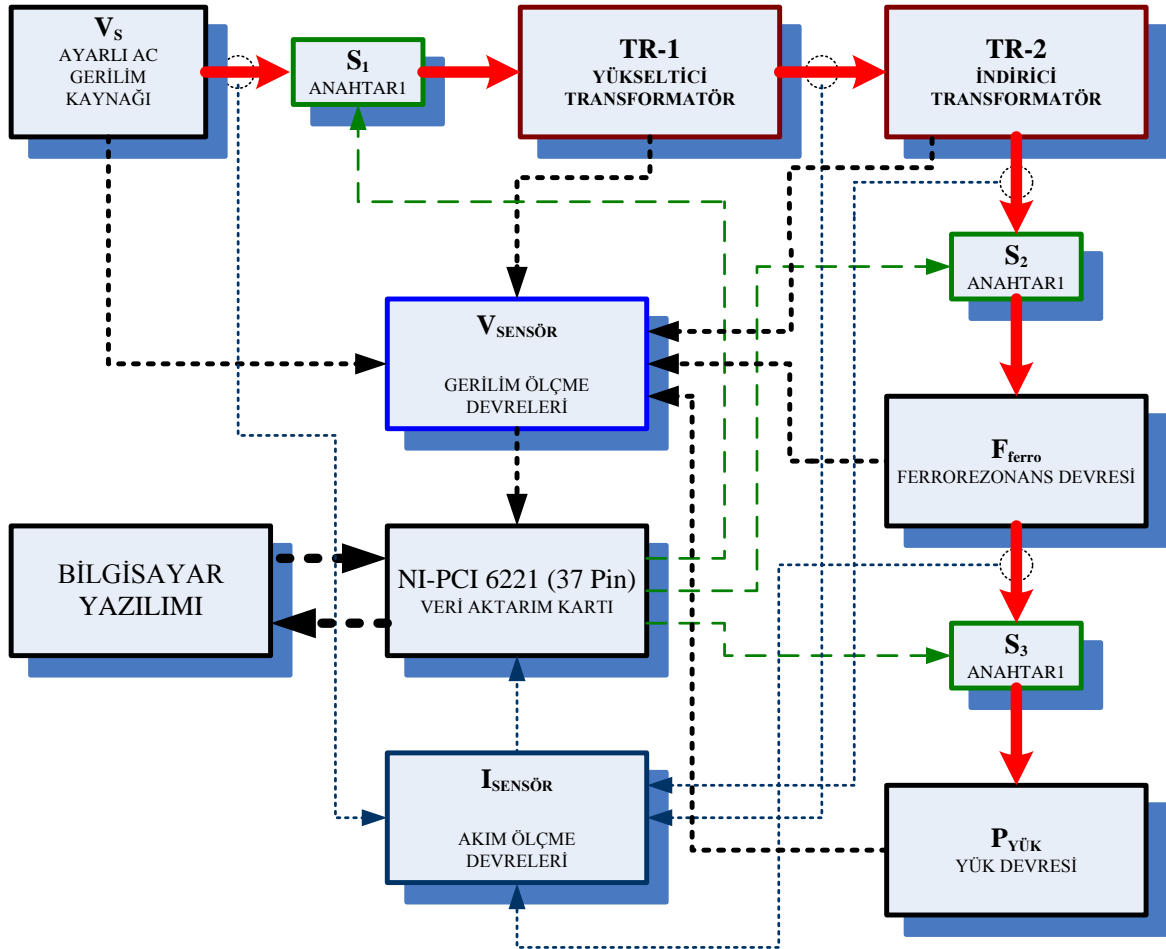
Birçok çalışmada sistemin kısa devre anındaki verdiği tepki incelenmiş ve kısa devre gücü arttıkça, ferrerezonansa girme ihtimali düştüğü görülmüştür. Kara'nın önerdiği sistemde yapılan benzetim neticesinde, sistemin kısa devre gücü arttırılmış, sabit tutulmuş ve azaltılmış olma senaryoları uygulanmış ve anma kısa devre gücünde +%5, ±%0 ve -%5 boyutlarında küçük oynamalar yapılmıştır. Buna rağmen sistemin gerilim dalga şekillerinde aşırı gerilimin boyutunun, sisteme ait anma kısa devre gücünün artışı ile azaldığı görülmüştür [78].

5. YAPILAN ÇALIŞMALAR

Bu bölümde önerilen çalışmanın deneysel tasarımlarına, Matlab/Simulink ortamında programlanmasına ilişkin bilgilere ve veri aktarım kartı ile gerçek ferrezonans şartlarında sistem parametrelerine müdahale edildiğinde, deneysel çalışmalardan elde edilen bulgulara yer verilmiştir.

5.1. Tasarlanan Sistemin Özeti

Tasarımı yapılan sistemin temel bileşenlerinin bulunduğu ana blok diyagramı Şekil 5.1.'de verilmiştir.



Şekil 5.1. Tasarlanan ferrezonans sisteminin ana blok diyagramı

Şekil 5.1.'de blok diyagramı verilen sistem ayarlı alternatif gerilim kaynağı, gerilim trafoları, açılı kontrollü yarı iletken anahtar devreleri, ferrezonans devresi, gerilim ve akım algılayıcı devreler, dijital veri aktarım cihazı, yük devresi ve bilgisayar programından oluşmaktadır. Sistem iki adet yüksek gerilim transformatörünün etrafında kurulmuştur.

Tasarlanan sistemdeki birinci eleman olarak, şebeke giriş geriliminin, sistemin gerilim seviyelerinin değiştirilmesi gerektiği durumlar için ayarlı alternatif gerilim kaynağı devresi hazırlanmıştır. Bu devrenin kullanılma amacı devrenin gerçek gerilim seviyelerinde çalışmasını temin etmek için ikinci gerilim trafosunun primer uçlarına standart gerilimleri vermek üzere birinci trafosu kontrol edebilmektir. Yani birinci trafo, Yükseltici Gerilim Trafosu (YGT) olarak kullanılmıştır. YGT'nin kullanılmasının amacı ferrezonans için incelenen Alçaltıcı Gerilim Transformatörünün (AGT) gerçek sistem geriliminde çalışmasını sağlamak ve devrelerin yalıtımını sağlamaktır.

YGT'de elde edilen yüksek gerilim 31,5 kV Ferrezonans devresine sonrada ikinci gerilim trafosunun primer uçlarına yani A-B uçlarına bağlanacaktır. İkinci gerilim trafosu ferrezonansın test edildiği ana sistem elemanıdır. İkinci gerilim trafosunun sekonder uçlarında yaklaşık olarak 1a-1b uçlarından 110V ve 2a-2b uçlarından da 220V gerilim ölçülmüştür. Yani ikinci gerilim trafosu, alçaltıcı olarak (AGT) kullanılmıştır.

Elektriksel Açılı Denetim Sistemi (ADS) sırasıyla; YGT'den önce, YGT ile AGT arasına, AGT ile Ferrezonans devresi arasına ve son olarak Ferrezonans devresi ile AGT etiket gücünde hazırlanmış yük devresi arasına bağlanmıştır. Sistemin birçok önemli noktasında elektriksel parametrelerin ölçümü için hall-effect akım ve gerilim algılayıcıları kullanılmıştır.

Sensör çıkışındaki veriler DAQ-PCI veri aktarım cihazı vasıtasıyla sistemden toplanacak ve sistemin belli noktalarında bulunan ADS'ler istenilen açıda açma-kapama yapmak üzere kontrol amaçlı olarak veri gönderilecektir.

Bu sistem ile ilk olarak ferrezonans olayının bilgisayar aracılığıyla izlenmesi, verilerin kaydedilmesi daha sonrada kullanıcının istediği her türlü kapama ve açma açısından sistemin nasıl tepki vereceğinin gözlemlenmesi amaçlanmaktadır.

5.2. Tasarlanan Sistemin Ana Bileşenleri

Bu bölümde tasarlanan sistemin ana bileşenleri ayrı ayrı tanımlanacaktır.

5.2.1. Ayarlı Alternatif Gerilim Kaynağı

Sisteme giren şebeke geriliminin ferrerezonansın karakteristikliklerinden biri olan besleme geriliminin genliğinin değiştirilmesi zorunluluğu bulunmaktadır. Sistemin gerilim seviyelerinin değiştirilmesi gerektiği durumlar için ayarlı alternatif gerilim kaynağı devresi hazırlanmıştır. Tasarlanan devrenin resmi Şekil 5.2.'de verilmiştir.

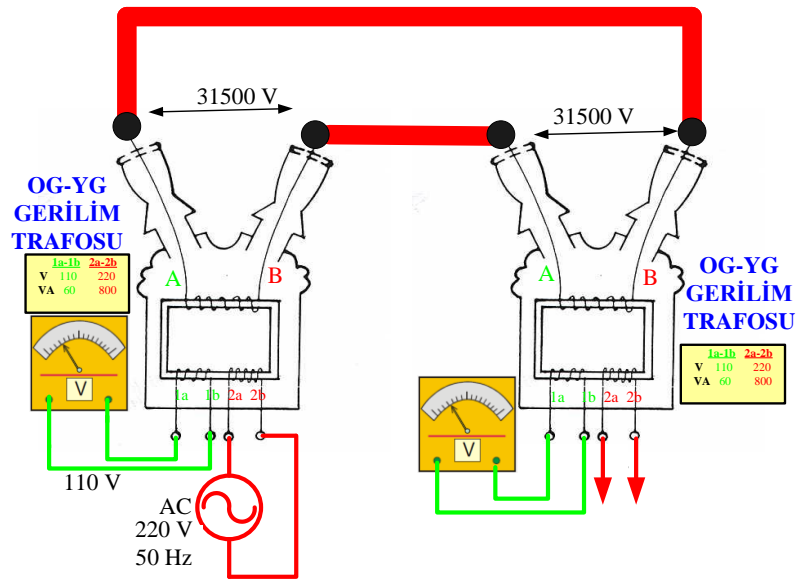


Şekil 5.2. Tasarlanan ferrerezonans sistemine ayarlı gerilim sağlayan ayarlı alternatif gerilim kaynağı

5.2.2. Gerilim Trafoları

Ferrerezonans olayını meydana getirecek olan ve sistemin ana unsuru olan eleman Gerilim Trafosudur. Sistemde iki adet gerilim trafosu kullanılmıştır. Kullanılan bu gerilim trafoları Türkiye'deki dağıtım sisteminde en çok kullanılan gerilim seviyesi dikkate alınarak ve parametrelerinin daha rahat izlenebilmesi için çift sekonderli seçilmiş olup gerilim seviyeleri AB/1a1b – 2a2b biçiminde 31500/100-220V özelliklidir. Birinci gerilim trafosunun A-B uçlarından 31,5 kV ve 1a-1b uçlarından da 110V nominal gerilimleri elde etmektedir.

İlk gerilim trafosu tersten yani sekonderin 2a-2b uçlarından bir AGK tarafından beslenmektedir. Bu iki gerilim trafosunun ayarlı gerilim kaynağına bağlantısı Şekil 5.3. (a)'da verilmiştir. Şekil 5.3. (b)'de sistemde kullanılan gerilim trafoları verilmiştir.



(a)

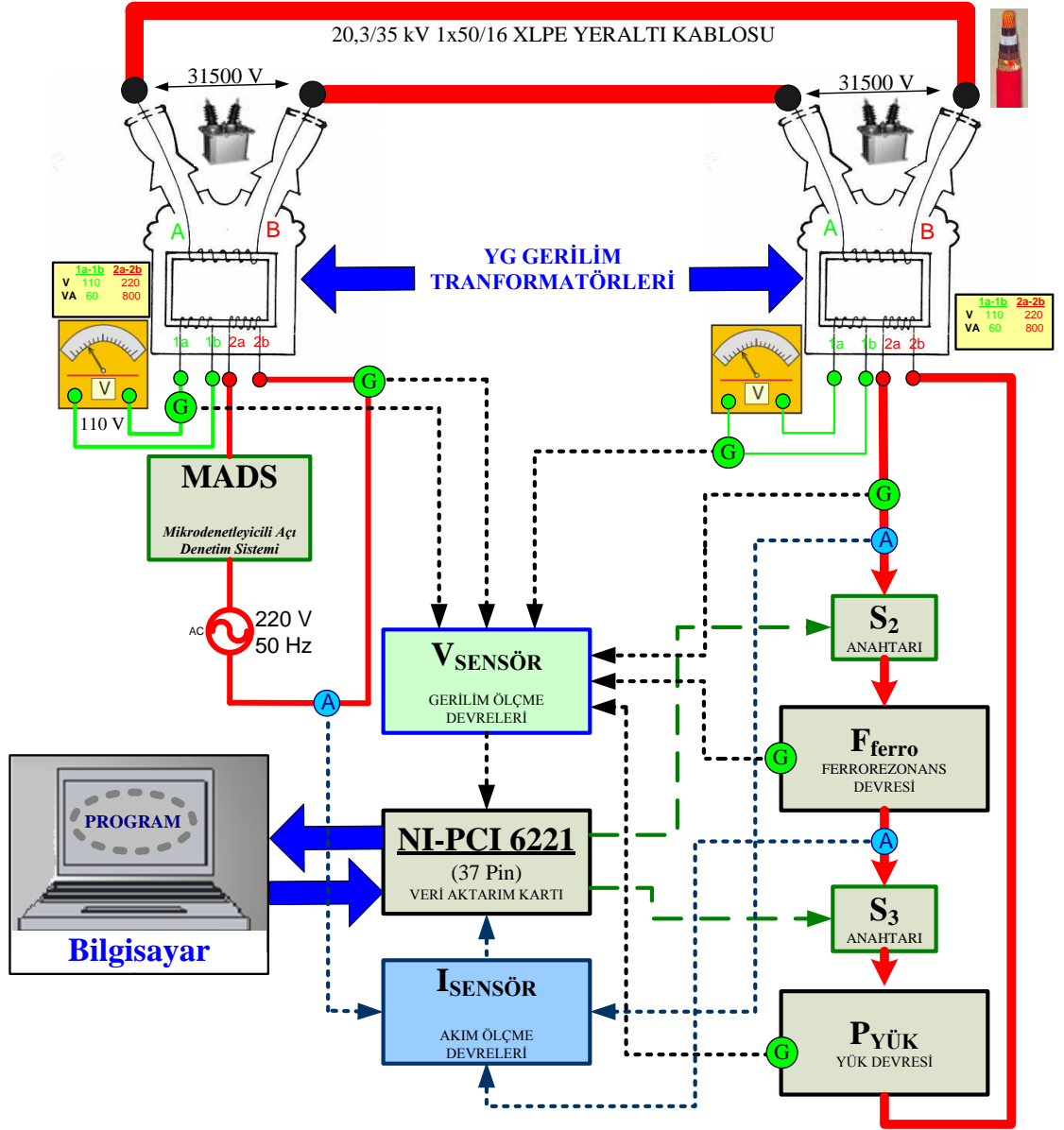


(b)

Şekil 5.3. Sistemde kullanılan gerilim trafolarının, (a) bağlantı diyagramı, (b) görüntüsü

5.2.3. Açı Denetim Sistemi (ADS)

Sistemin açma kapama işlemini yapan anahtar ferrezonansın doğmasında çok önemli görev üstlenir. Tasarlanan anahtar bağlandığı noktadaki gerilim sinyalinin periyoduna bağlı olarak istenilen elektriksel açıda açma (OFF) yada kapama (ON) işlemi yapabilmelidir. Burada tasarlanan Açma kapama denetim sistemi (ADS) iki şekilde tasarlanmıştır. Birincisi mikrodenetleyicili bir devre tarafından kontrol edilen açma kapama açısı denetim sistemi (MADS), diğeri de bilgisayar kontrollü açma kapama açısı denetim sistemi (BADS) olarak tanımlanmıştır. Şekil 5.4.'te ana sisteme MADS'ın bağlandığı durum görülmektedir.



Şekil 5.4. ADS bağlı tüm sistemin görsel blok diyagramı (MADS bağlı)

5.2.3.1. Mikrodenetleyicili Açma Kapama Açısı Denetim Sistemi (MADS)

MADS ile anahtarlama yapılması istenen sinüsoidal formdaki faz gerilim işareti bir karşılaştırıcı devreden geçtikten sonra sayısallaşmış olarak, mikrodenetleyicinin yazılımında tanımlanan giriş ucuna bağlanır ve yazılımda beklenen sinyal değişimini oluşturur. Mikrodenetleyicinin çıkış uçları da açma kapama yapılarak kontrol edilen faz hattına bağlı olan elektronik anahtarın kontrol ucuna bağlıdır. Sistem yazılımı tuş

takımından gelecek elektriksel açı girişleri ile istenilen zaman gecikmesi ile anahtarlama yaparken kullanıcıya LCD ekranından bilgiler vermektedir.

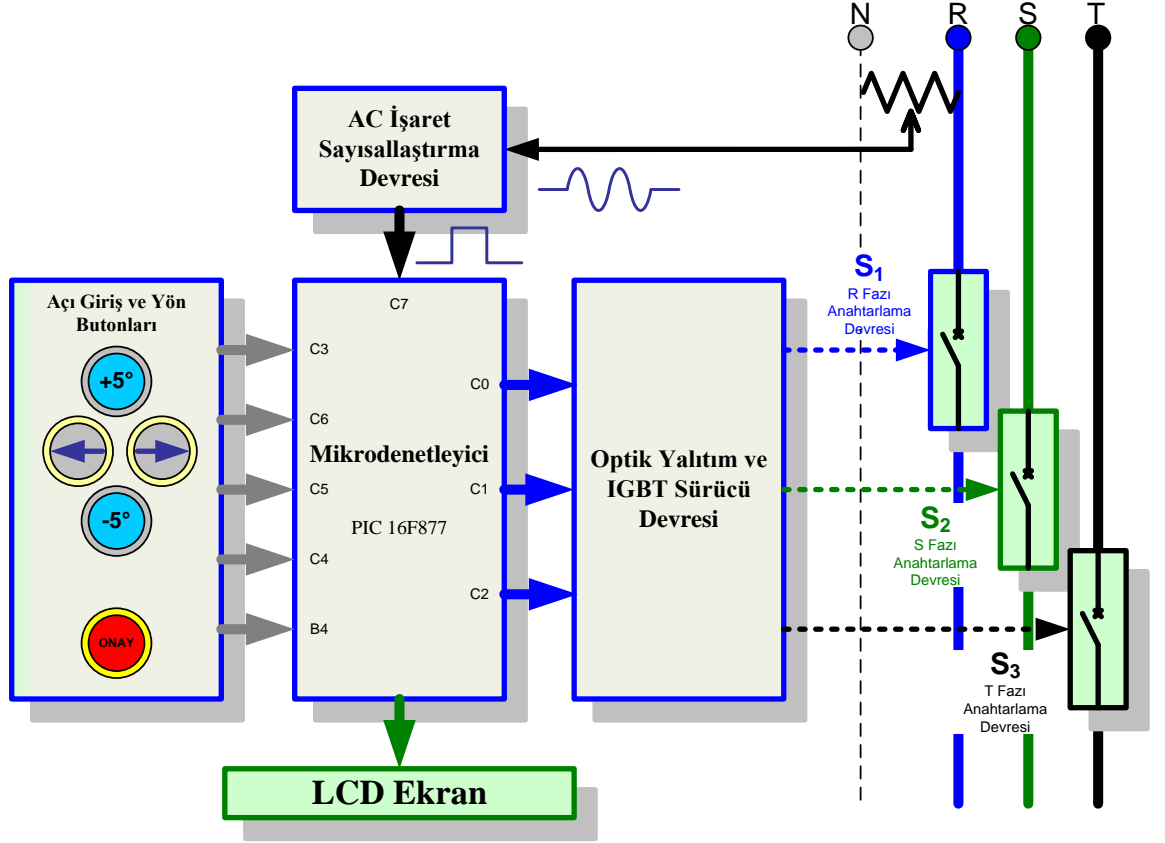
Sistem daha detaylı açıklanacak olursa, Şekil 5.5.'te görüldüğü gibi 2 adet yön, 2 adet açı girişi ve 1 adet onay butonu kullanılarak her fazı bağımsız olarak istenilen elektriksel hassasiyette, yani 0° ile 360° arasında açı girişi sağlanmaktadır. Sisteme girilen veriler ve sistemin çalışma durumu LCD ekrandan takip edilebilmektedir. İstenilen anahtarlama açıları girildiğinde, onay butonuna basılarak sistem çalıştırılır. AC işaret sayısallaştırma devresinin girişine uygulanan alternatif özellikli elektriksel işaret, devre çıkışında sayısal işarete dönüşür. Bu işaretin 0 veya 1 olma durumu, Mikrodenetleyicinin içerisine yüklü olan programda tanımlanan *PORT.C-7* giriş kapısına uygulanır, denetleyici tarafından bu port sürekli denetlenir[81].

Mikrodenetleyicinin *PORT.C-7* giriş kapısına gelen bu sayısal işaretin 1 (bir) kalma süresince bir sayaç ünitesini çalıştırır. Giriş işareti 0'a (sıfır) düştüğü an sayaç durur ve sayacın ürettiği sayı belleğe yazdırılır. Mikrodenetleyiciye yüklenen program bir sonraki adımında bellekteki sayıyı 2 ile çarpır. Elde edilen sayı tasarlanan MADS için istenilen hassasiyet aralığı dikkate alınarak kapama ve açma açısı değişim aralığı için öngörülen sayıya bölünür. Burada 5° 'lik açılarla kapama ve açma işlemleri yaptığından 72° 'ye bölünür. Böylelikle elde edilen katsayı 5° 'lik açığa karşılık gelir. Başlangıçta girilen anahtarlama açı değişkenleri çağrılarak, elde edilen katsayı ile çarpılır. Sonuçların her biri bir değişkene aktarılarak programın başka bir sayaç başlatması sağlanır. Sayaç saymaya devam ederken değişkenlerin içerisindeki sayılara eşit oldukça çıkış işareti olarak *PORT.C-0*, *PORT.C-1* ve *PORT.C-2* kapıları lojik "1" olur. Bu durum darbe genişliği sürekli olan PWM işareti üretimi gibidir.

Mikrodenetleyicinin çıkış işaretleri sürücü devre için tetikleme işaretlerini oluşturur. Sürücü devre her faz için 4N25 entegresi ile optik olarak yalıtım yaptıktan sonra IR2117 tek kanal sürücü entegresine girer. Entegre çıkışındaki kuvvetlendirilmiş işaretler S_1 , S_2 ve S_3 IGBT anahtarlama devrelerini sürmektedir. Sürücü devresinde, PIC ünitesinden gelen işaret ile güç devresini yalıtıp, güç devresindeki IGBT anahtarları tetiklemek üzere gönderilir.

Sistemin kontrollü açma yapması gerektiği durumlarda yine kullanıcının girdiği açma bilgilerine göre aynı işlemleri tekrarlayarak PIC denetimli olarak tetikleme işaretini gecikmeli bir şekilde sıfır seviyesine çeker. Böylece elektronik bir başlatma-durdurma kumanda sistemi görevini de görür. Anahtarlama açı denetim sistemi bağlandığı her faz

için tüm alternansları geçirecek şekilde transistor ve diyot grubundan oluşan iki yönlü anahtarlama yapmalıdır. Böylelikle alternatif akımın her iki yarısında akım sürekliliği sağlanmış olur.

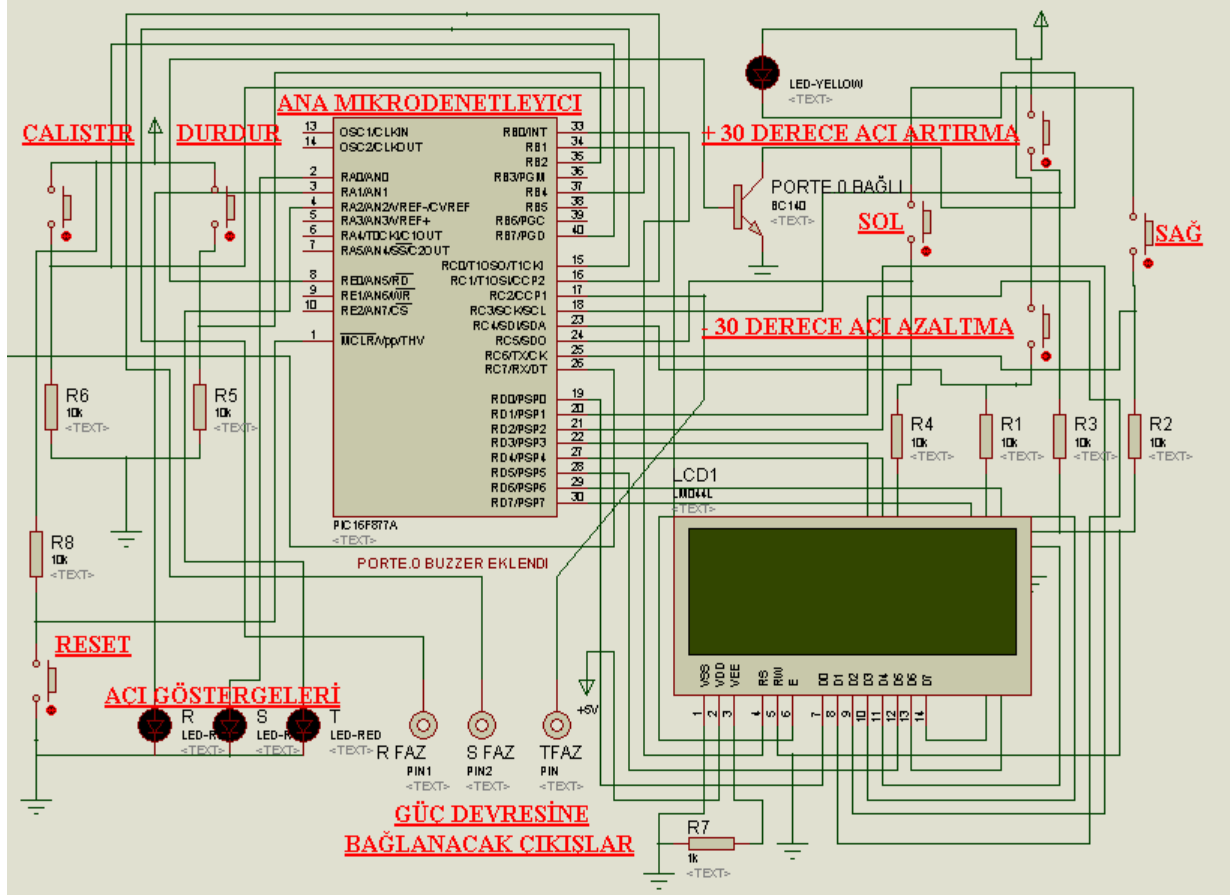


Şekil 5.5. MADS sisteminin ana blok diyagramı

5.2.3.1.1. Mikrodenetleyicili Açma Kapama Açısı Denetim Sistemi (MADS) Denetleme Devresi

MADS için yapılan yazılım kontrolleri Şekil 5.6.'da görülen ISIS/Proteus programında yapılmıştır. Programda MADS için gerekli elemanlar ilgili kütüphanelerden alınmış ve mikrodenetleyicinin giriş-çıkış bağlantıları yapıldıktan sonra sistemde kullanılan PIC 16F877A mikrodenetleyicisinin içerisine gerçek sistemde olduğu gibi hazırlanan yazılım yüklenmiştir. Yazımı biten programın deneme çalışmaları bu yardımcı yazılım ile tamamlandıktan sonra uygulama devresi gerçek elemanlarla kurulmuştur.

Mikrodenetleyiciye gömülü olan programın genel çalışma ilkesi tarama esaslıdır. Yazılım öncelikli olarak kapı girişlerini tarama yöntemi ile denetleyerek, elde ettiği yeni girişlere göre program akışını da göz önünde bulundurarak çıkış üretmektedir.

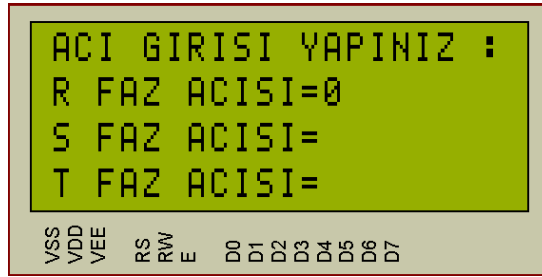


Şekil 5.6. Sistemin kurulduğu ve benzetiminin yapıldığı ISIS/Proteus paket programı ile hazırlanmış devre benzetimi

Şekil 5.7. (a)'da anahtarlama sisteminin bulunduğu panel görülmektedir. Bu panel üzerinde MADS sistemine güç sağlayan otomatik sigorta "1" konumuna getirildiğinde denetleme devresinin tümü ve güç devresi beslemelerine enerji ulaşacaktır. Panel üzerindeki 4x20 LCD ekranda Şekil 5.7.(b)'de görüldüğü gibi her faz için açma girişi için alanları belirir.



(a)



(b)

Şekil 5.7. Sistemin kurulduğu, (a) denetleme devresi açılış ekranı ve tuş takımları, (b) programın çalışması ile LCD ekrandaki anahtarlama açılış ekranı

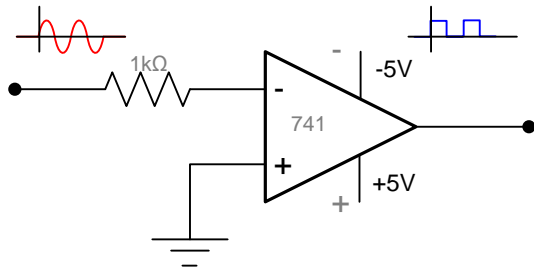
Şekil 5.7.(b)'de görülen dört adet buton ile sisteme veri girişi yapılmaktadır. Burada "+5" ve "-5" işaretleriyle temsil edilen butonlar 5 derecelik hassasiyetle her faz için açılış girişi yapılabilir. Panel üzerinde bu butonlar +5° ve -5° olarak adlandırılmıştır. Butonlara basıldığında oluşan sayısal 1 işaretleri, mikrodenetleyicinin *PORT.C-3* ve *PORT.C-4* kapılarına gitmektedir. Butonlardan herhangi biri sürekli olarak basılı kalırsa, kesintisiz sayısal 1 işareti mikrodenetleyiciye gönderilir ve gömülü program her 250 µs'de bir kez sayısal 1 işareti algılayacaktır. Bu 250 µs'lik değer butonları algılayan giriş kapılarının parazitlerden etkilenmesini engellemek için ilk algılama anından sonra sistemi bekletmek için kullanılan PAUSE komutunun zamanıdır. Her bir faz açılış için gömülü programda bir değişken atanmıştır. Atanan bu değişken değeri, tuşlardan gelen her bir sayısal 1 işareti algılandığında, 0°-360° arasında sınırlanmış, beşer olarak artıran yada azaltan bir sayaç ile kaydedilir. Yeni oluşan değişken değeri de LCD ekrana gönderilir. Herhangi bir fazın açılış girişi tamamlandıktan sonra, Şekil 5.6.'da görülen panel üzerindeki AŞAĞI ve YUKARI OK olarak tanımlanmış butonlar yardımı ile diğer bir fazın açılış girişi için LCD ekrandaki

imleç hareket ettirilir. AŞAĞI ve YUKARI OK butonlarına basıldığında sırası ile *PORT.C-6* ve *PORT.C-5* kapılarına sayısal 1 işareti uygulanmış olur. Böylelikle imlecin ekrandaki konumunu sayısal değerine göre ayarlayan DS sayacının değeri artırılmış ya da azaltılmış olur. DS sayacının değerine göre imleç ekrandaki yeni yerine konumlandırılır. Böylelikle diğer fazın açısı ayarlanabilir.

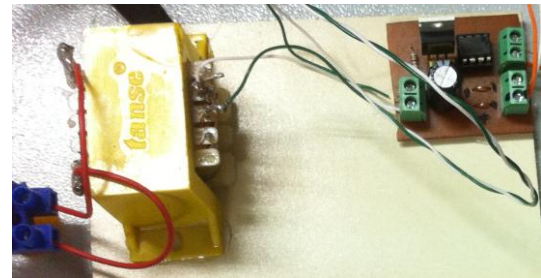


Şekil 5.8. Güç devresi için buton ile girilen IGBT elektronik anahtarına gönderilecek anahtarlama açılarının girişinin LCD ekrandaki görüntüsü

Her fazın anahtarlama açıları Şekil 5.8.'de görüldüğü gibi girilir. İstenilen değerde açma kapama açısı girişleri yapıldıktan sonra, Şekil 5.7.(b)'de görülen ONAY butonuna basılır. Bu durumda anahtarın ürettiği sayısal 1 işareti *PORT.B-4* kapısına aktif eder. Denetleyiciye yüklü program işaret değişimini algıladıktan sonra Şekil 5.9.'da görülen devrenin yardımı ile üretilen örnekleme işareti, mikrodenetleyicinin *PORT.C-7* kapısına gönderilir. AC örnek işareti artık kare dalga biçimindedir ve gömülü program sayısal 1 olma anınca SAYAC değişkenini değerini artırır.



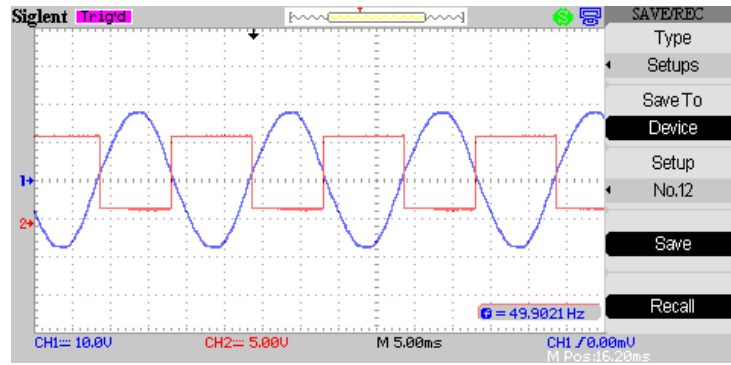
(a)



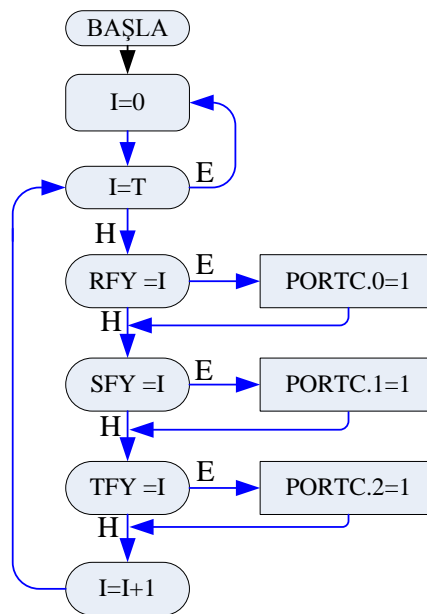
(b)

Şekil 5.9. AC işaret sayısallaştırma devresi, (a) devre şeması, (b) tasarlanan devre

Bağlantısı Şekil 5.9.(a)'da verilen, AC sistemden alınan bir gerilim örneğinin bir referans gerilim ile karşılaştırıldığı opamp devresinin çıkışında örnekleme işaretinin sayısal 1 olmasının bitiminde mikrodenetleyiciye yüklü programdaki SAYAC değişkeninin sayma işlemi durur. Örnekleme işaretini karşılaştırıcı devre yardımı ile elde ettiğimiz için pozitif periyotta sayısal 1, negatif periyotta sayısal 0 elde ederiz. Bu sebepten dolayı SAYAC değişkeninin vardığı rakam ancak yarım periyot süresine karşılık gelmektedir. Yazılım sonraki adımda bir tam periyodun oluşma sayısını bulabilmek için SAYAC değişkenini iki ile çarparak başka bir değişkene sonucunu aktarır. Elde edilen yeni sayı artık tam bir periyotluk örnekleme işaretini temsil etmektedir.

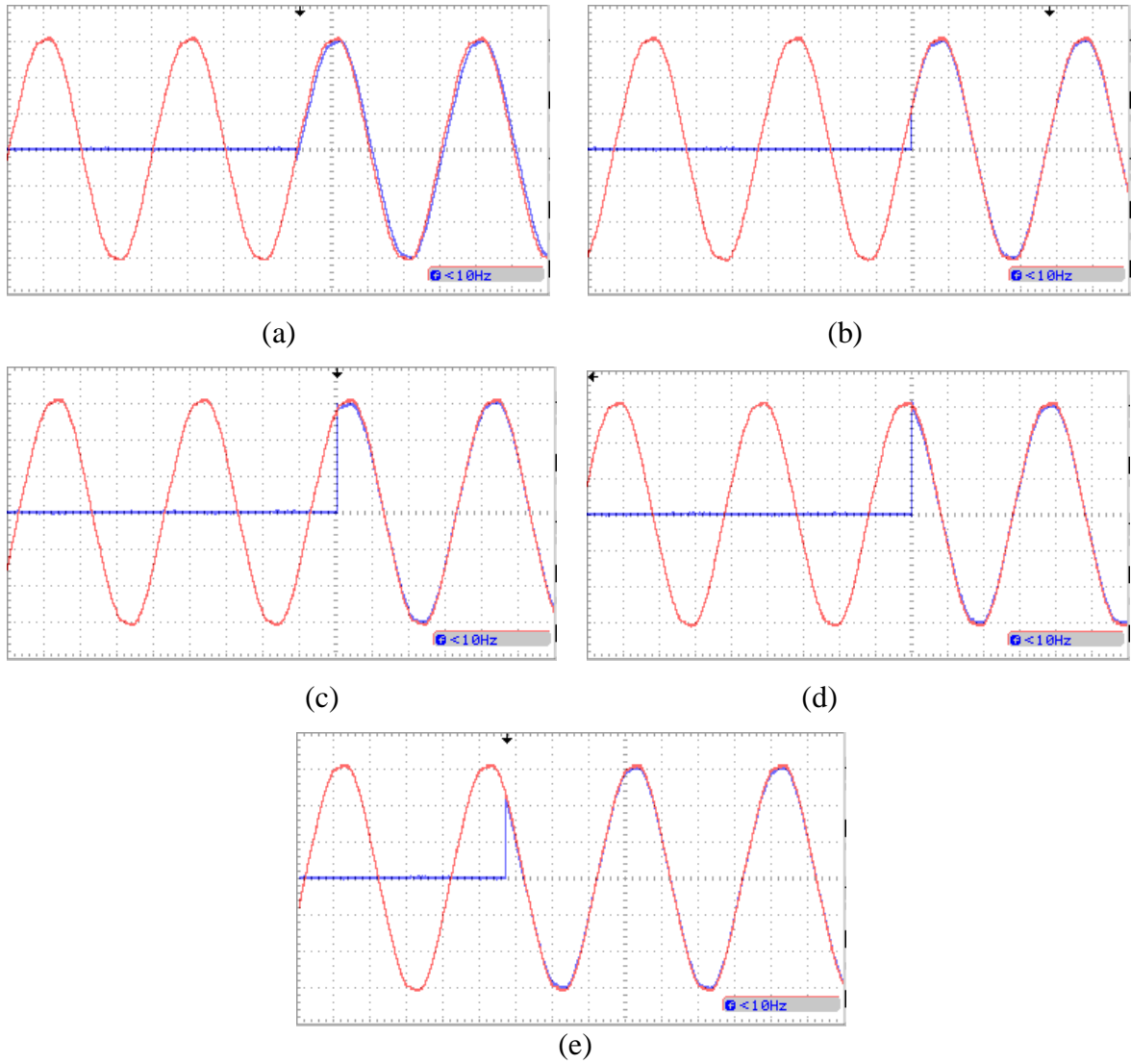


Şekil 5.10. Osiloskoptan alınan örnekleme işaretleri



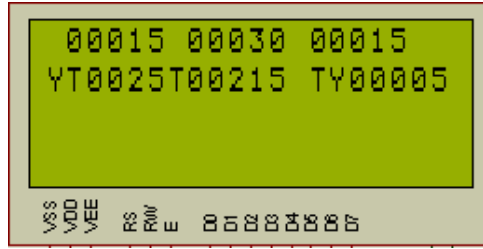
Şekil 5.11. Anahtar gecikme sürelerini düzenleyen algoritma

Yazılımdan elektronik anahtarlara gidecek gecikme sinyalleri için kullanılan algoritma Şekil 5.11.'de verilmiştir. Burada bir periyotluk zamana denk gelen T sayısı, döngünün son sayısını temsil etmek üzere bir döngü kurulur. Bu döngünün arasına her bir fazın anahtarlama açılarını temsil eden rakamlar karşılaştırma komutu yazılır. Döngü ilerledikçe anahtarlama açısının gecikme sayılarına denk gelecek, bu durumu IF komutu yakalayacak ve ilgili kapının çıkışını sayısal 1 işaretine ayarlayacaktır. Bu elde edilen yeni işaretler mikrodenetleyicinin *PORT.C-0*, *PORT.C-1* ve *PORT.C-2* numaralı bacaklarından alınır. Mikrodenetleyicinin bu kapıları sırasıyla R, S ve T fazlarının gecikme açıları kadar kaymış tetikleme işaretlerini üretmiş olurlar.

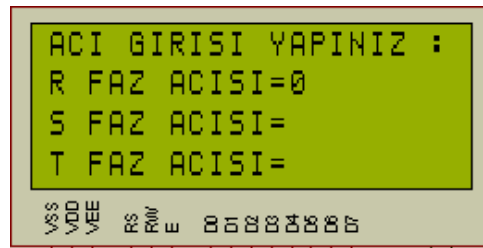


Şekil 5.12. Bağlandığı faz için MADS anahtar gecikmelerinin osiloskop görüntüsü

Şekil 5.12. (a)'da MADS gecikme üretmediği durum görülmektedir. Burada referans alınan işaretin sıfır geçişi ile aynı anda mikrodenetleyicinin ürettiği sayısal 1 işareti aynı anda oluşmuş ve bu sinyal yine optik yalıtım ve IGBT sürücü entegresi aracılığı ile kabul edilebilir bir kapı gecikmesiyle IGBT'ye ulaşmıştır. Şekil 5.12.(a)'da MADS 0°'lik, Şekil 5.12.(b)'de MADS 30°'lik, Şekil 5.12.(c)'de MADS 60°'lik, Şekil 5.12.(d)'de MADS 90°'lik ve Şekil 5.12. (e)'de MADS 120°'lik gecikme üretmiş olup bu anahtarda aynı şekilde görülmektedir. Panel üzerinde açma girişi yapıldıktan sonra onay butonuna basılır, LCD ekranda Şekil 5.13'te görülen her faza ait üretilen sayılar görülmektedir. Tasarlanan baskı devre üzerinde elektronik anahtarlara gönderilen sayısal bir işaretlerinin aynı *PORT.A-0*, *PORT.A-1* ve *PORT.A-2* kapılarından devre üzerinde bulunan LED'lerin yanmasını sağlar.



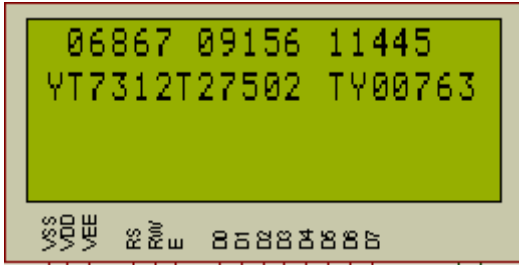
Şekil 5.13. Elektronik anahtarlara gönderilen işaretler ile ilgili gecikme katsayıları



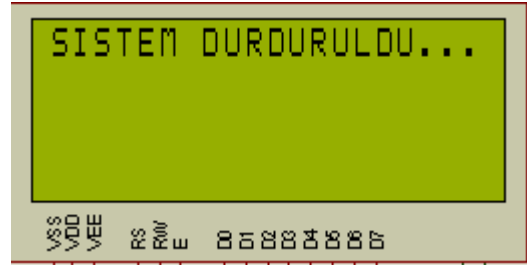
Şekil 5.14. MADS, LCD ekranında açma açısı girişi için komut beklediği durum

Açılan anahtarların yani ON konumundaki OFF konumuna geçişleri yine açma ile yapılmaktadır. Bunun için yazılım otomatik açma moduna geçiş yapar. LCD ekran kesici açma açısı için açma girişi yapınız yazısı belirir. Açma girişi ile MADS sistemi anahtarları ayırmak için mikrodenetleyicinin *PORT.C-0*, *PORT.C-1* ve *PORT.C-2* portlarına sırasıyla gecikmeli lojik sıfır işaretleri gönderir. R, S ve T fazlarının anahtar açma gecikme açıları kadar kaymış tetikleme işaretleri kesilmiş olur. Sistemin açma açısı girişi LCD ekranda Şekil 5.14.'de görüldüğü gibidir. Burada MADS, kullanıcıdan açma girişi beklemektedir.

Panel üzerindeki butonlar aracılığıyla açılış girişi yapıldıktan sonra yine BAŞLAT butonuna basılır. Girilen açılış değerince gecikmeler hesaplanır ve elektronik anahtarlara sayısal 0 işaretleri gönderilir. LCD ekranda Şekil 5.15 (a)'da görülen her faza ait mikrodenetleyici tarafından üretilen sayılar görülmektedir. Tasarlanan baskı devre üzerinde elektronik anahtarlara gönderilen sayısal sıfır işaretlerinin aynısı *PORT.A-0*, *PORT.A-1* ve *PORT.A-2* kapılarında devre üzerindeki yanar halde bulunan LED'lerin sönmeye sağlanır. Sistemin enerji akışı kesilirken LCD ekranda Şekil 5.15 (b)'de verilen uyarı oluşur.

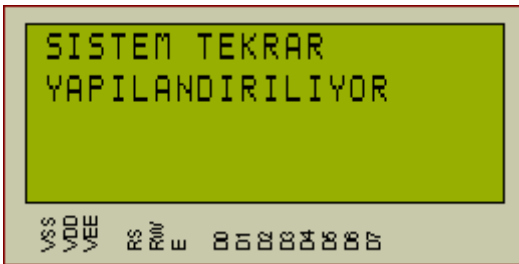


(a)

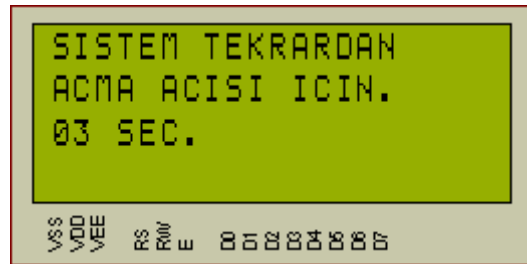


(b)

Şekil 5.15. Anahtarları OFF konumuna almak için açılış girişi yapıldıktan sonra BAŞLAT butonu ile değişen LCD ekran görüntüleri



(a)



(b)

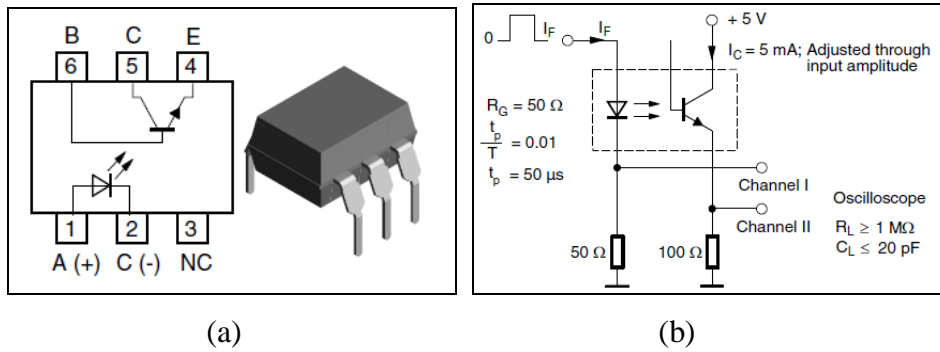
Şekil 5.16. MADS, anahtarları OFF konumuna aldıktan sonra yeniden ON konumuna alması için yaptığı yapılandırmalar esnasında değişen LCD ekran görüntüleri

Sistemin yeniden kapama yapması için yeniden algılama ve ayar işlemleri yapması gerekir. LCD ekranda bu değişiklikler Şekil 5.16'da gösterilen 3 saniyelik uyarı mesajından sonra sistem başlangıç durumuna geri döner. Anlatıldığı gibi tekrar fazların anahtarlama açılış değerleri girilerek sistem kolayca çalıştırılabilir. Kullanılan PIC16F877A

mikrodenetleyicisi 20 MHz hızında çalıştırıldığı 50 Hz'lik şebeke frekansına göre çok hızlı olduğundan sistemin zamansal gecikmesi çok küçüktür. Tasarım yazılımsal bir temele oturduğu için esnekler. Gömülü programda istenilen değişiklikler yapılarak soketli yapıya sahip mikrodenetleyiciye rahatça yüklenebilir ve yeni ihtiyaçlara karşılık verecek şekilde güncellemeler yapılabilir.

5.2.3.1.2. Mikrodenetleyicili Açma Kapama Açısı Denetim Sistemi Güç Devresi

Yalıtım ve sürücü devresi için, mikro denetleyicinin PORTC-0, PORTC-1 ve PORTC-2 numaralı kapılarından gönderilen farklı gecikmelere sahip tetikleme işaretleri sırası ile R, S ve T fazlarının anahtarlama açıları kadar kaydırılmış darbe genişliği sürekli olan PWM'lerdir. İlk olarak mikrodenetleyiciden gelen bu işaretler güç devresi ile yalıtılmıştır. Optik yalıtım için Şekil 5.17.'de gösterilen 4N25 entegresi kullanılmıştır.

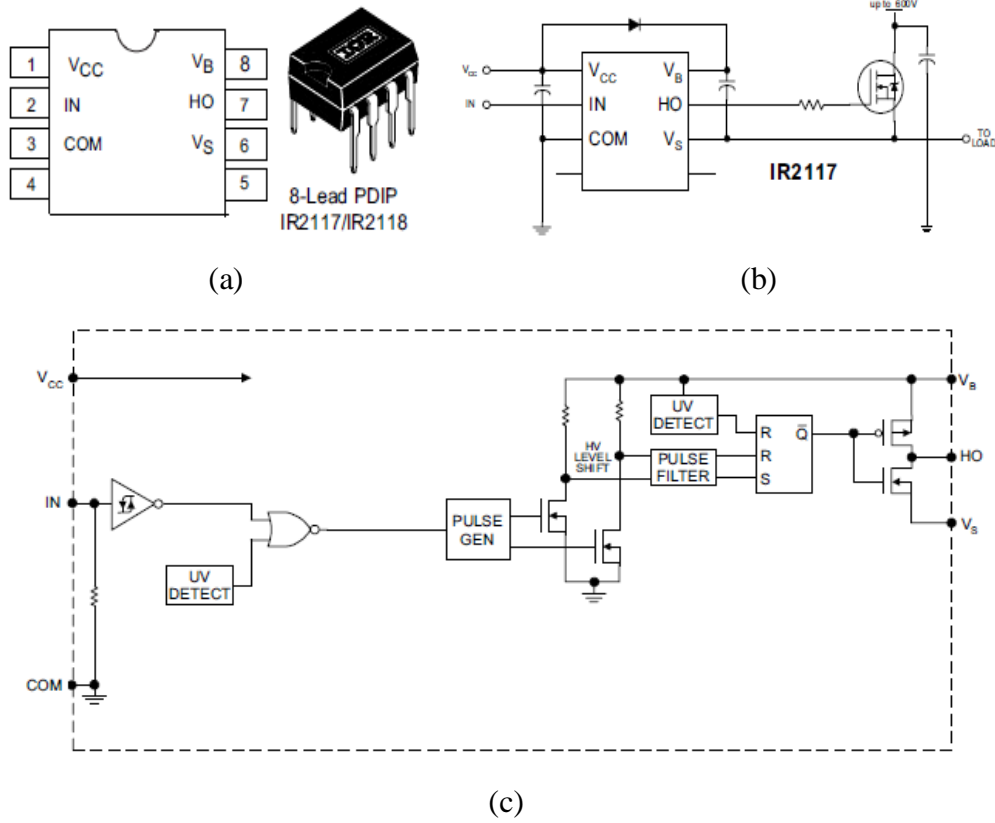


Şekil 5.17. 4N25 optokuplör entegresinin, (a) bacak numaraları ve iç bağlantısı, (b) test bağlantı devresi

Optik yalıtım devresinin çıkışı MOSFET/IGBT sürücü entegresi olarak kullanılan IR2117 entegresine girmiştir. Şekil 5.18.'de iç seması görülebilen bu özellikle IGBT ve MOSFET gibi güç elektroniği devre elemanlarını kararlı bir şekilde sürebilmektedir.

Mikrodenetleyicinin *PORTC-0*, *PORTC-1* ve *PORTC-2* bacağından gelen sayısal bir işaretleri optik yalıtım devresinden geçtiğinde, +15V'luk seviyeye çıkmaktadır. IGBT'nin iletme ve kesime geçmesi kontrol ucu olan Gate katalogta belirtilen gerilimle sürülmelidir. Böylelikle sadece başlangıçtaki anahtarlama açısı kadar sonra IGBT'lere

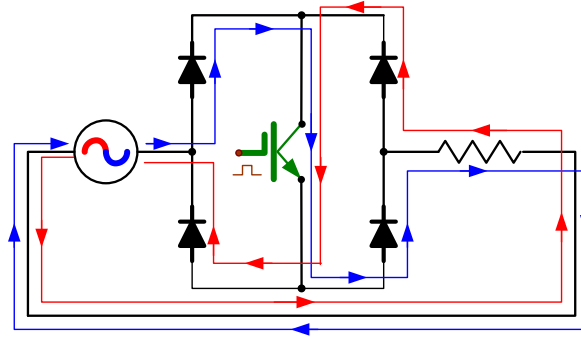
tetikleme gider. Bu tetikleme işaret kesildiğinde IGBT'de kolektörden emiter ucuna akım geçişi durur.



Şekil 5.18. IR2117/IR2118 entegresinin (a) bacak numaraları, (b) sürücü bağlantı devresi ve (c) entegre iç blok diyagramı

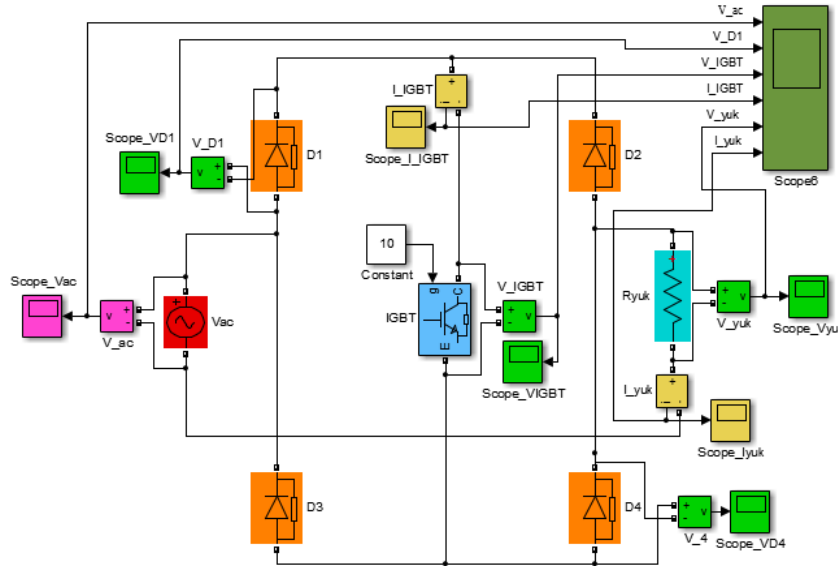
Test edilen gerilim ölçü transformatörleri alternatif gerilimde çalışacak olduklarından, tasarlanacak devrede anahtarlama elemanlarından iki yönlü akım akmalıdır. Bunun için görülen iki yönlü anahtarlama (Bidirectional Switching Mode) güç devresi, her faz için bir adet IGBT ve dört adet diyot kullanılarak yükten iki yönlü akım geçirmek mümkündür. Tristör ve IGBT gibi devre elemanlarında bu anahtarlama yöntemleri alternatif akımın her iki periyodunda da iletim sağlayabilmektedir. Şekil 5.19.'da ayrıntılı olarak gösterildiği gibi, köprü tip diyot grubunun ortasına yerleştirilmiş olan IGBT üzerinden geçen akım, alternatif akımın her iki periyodunda da aynı yöndedir. Bundan dolayı IGBT tek yönlü anahtar olarak sorunsuz bir şekilde alternatif akımda dahi

çalışabilmektedir. Bu anahtarlama modelini bir entegre içinde hazır haldede piyasada bulunabilmektedir.



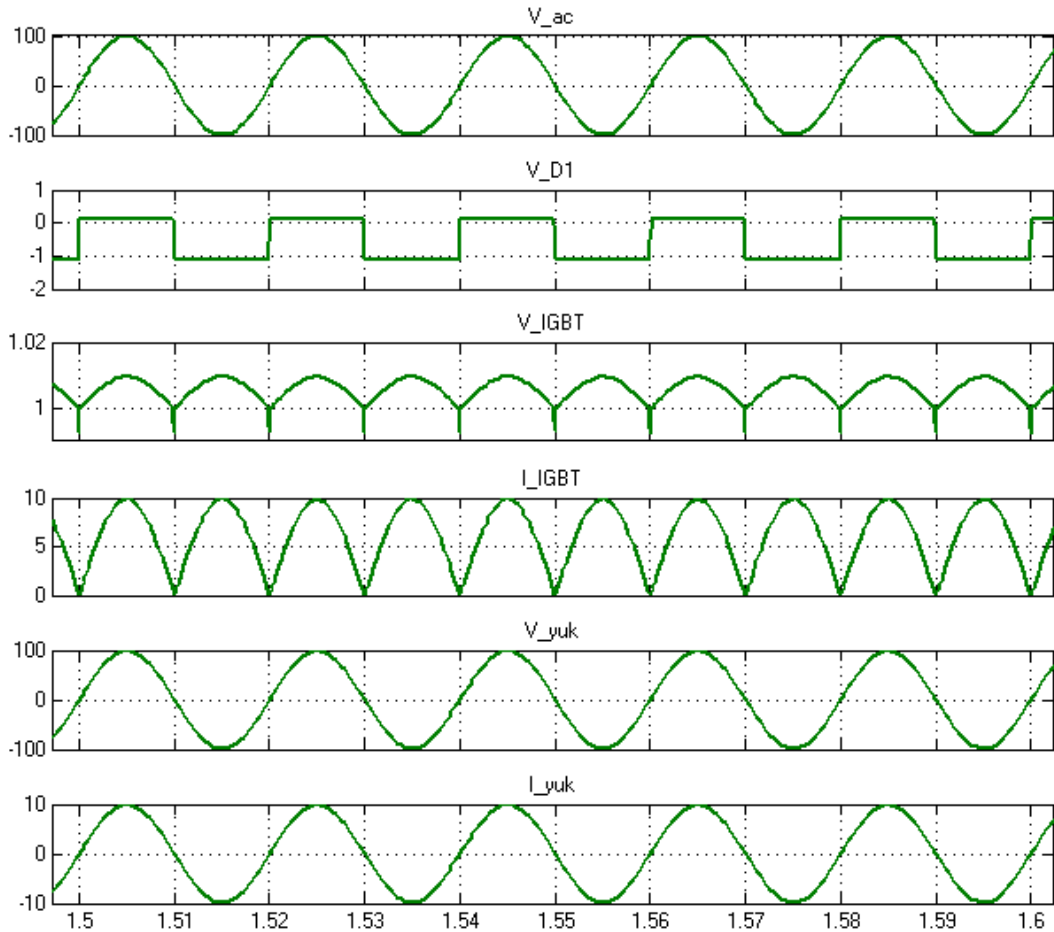
Şekil 5.19. Bir IGBT ve dört diyot ile iki yönde de akım geçişine izin verecek devre

İki yönlü anahtarlama (Bidirectional Switching Mode) güç devresi için hazırlanan devrenin Matlab/Simulink Modeli Şekil 5.20.'de görülmektedir.



Şekil 5.20. Bir IGBT ve dört diyot ile iki yönde de akım geçişine izin verecek devre

Bu devrede alternatif kaynaktan çıkan akımın pozitif alternansta izlediği yol D1 diyotu, IGBT, D4 diyotu ve yük iken IGBT’de akım kollektörden emitere akarken yükede + referans yönünden girecek şekildedir. Negatif alternansta akım yüke – referanstan girer sonra D2, IGBT, D3 ve tekrar kaynağın + ucuna girer. Şekil 5.20.’de verilen devrenin benzetimine ait veriler Şekil 5.21.’de verilmiştir. Grafikte V_{ac} başlığı ile verilen alternatif kaynak gerilimi tepe değeri 100V olup frekansı 50Hz olarak seçilmiştir. Devrede verilen diyotlar aynı karakteristikli seçildiğinden ve ikişerli olarak çalıştıklarından burada yalnızca birisine ait gerilim işaretleri V_{D1} isimli grafikte görülmektedir. D1 diyotundan akım geçerken üzerindeki gerilim grafikten de görüldüğü gibi yaklaşık 0V, akım geçmezken yani kesim durumunda yaklaşık ters yönde 1V seviyesindedir.

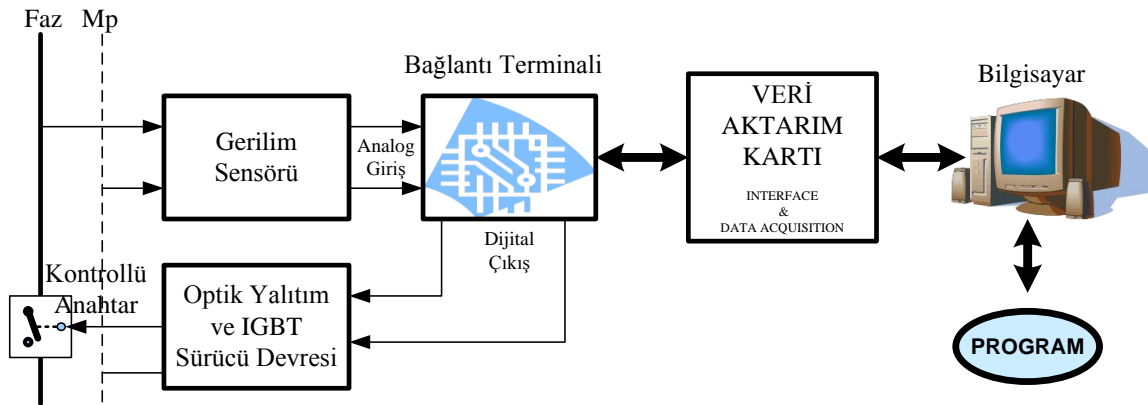


Şekil 5.21. İki yönde akım geçişine izin veren devredeki değişkenlerinin değişimi

Benzer şekilde IGBT üzerinden iki kaynak alternansında da 10Ω olarak verilen yük direnci sebebiyle tepe değeri 10A olan bir akım geçtiği grafikte I_{IGBT} eğrilerinden görülmektedir. Bu akım sürekli devrede olduğu için IGBT gerilim düşümü de V_{IGBT} isimli şekilde görüldüğü üzere yaklaşık 1,01V seviyesinde dalgalanma yapmaktadır. Geriye kalan yük grafiklerinden gerilim için verilen $V_{yük}$ incelendiğinde, hemen hemen kaynak gerilimine eşit seviyede bir eğriye sahip grafik görülmektedir. Akım grafiği $I_{yük}$ 'de pozitif alternansta IGBT akımı ile aynı genlik ve yönde iken negatif alternansta IGBT akımı ile aynı genlikte fakat ters yöndedir. Şekil 5.19.'da verilen iki yönlü anahtarlamalı devresinde tetikleme işaretleri öncelikle IR2117 entegresinin 7 nolu HO kapısından gelen tetikleme işaretleri IGBT'nin kapısına bağlanır. IGBT emiter ucu iki yönlü anahtar devresini sürmek için kullanılan IR2117 entegresini besleyen +15V'luk kaynağın toprağına bağlanır.

5.2.3.2. Bilgisayar Denetimli Açma Kapama Açısı Denetim Sistemi (BADS)

BADS genel olarak gerilim algılama devresi, veri aktarım kartı ve giriş-çıkış bağlantıları, bilgisayar yazılımı, optik yalıtım, sürücü devresi ve IGBT anahtardan oluşmaktadır. Tasarlanan sistem ile anahtarlama yapılması istenen fazdan alınan elektriksel örnek bir gerilim sensörü devresinden geçtikten sonra NI PCI 6221 veri aktarım cihazının analog giriş ucuna bağlanmış ve Matlab / Simulink yazılımda hazırlanan programda işaret görülmüştür. Aynı programda işaretin sıfır geçiş noktası izlenmiş ve hazırlanan mantıksal devre ile açma girişi yapılabilmektedir.



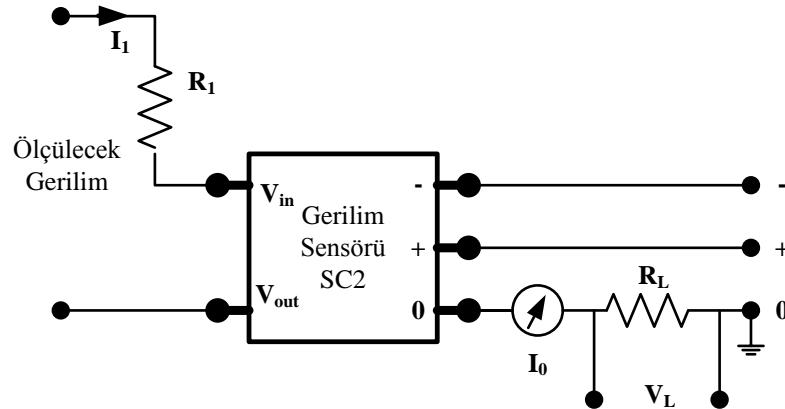
Şekil 5.22. BADS sistemin ana blok diyagramı

Çıkış uçlarından bir tanesi de açma kapama yapılacak faz iletkenine bağlı olan elektronik anahtarı süren sürücü devresine bağlıdır. Sistemin bilgisayar yazılımı klavyeden girilecek elektriksel açılar ile istenilen zaman gecikmesinde anahtarlama yaparken kullanıcıya bilgisayar ekranından bilgiler vermektedir.

BADS daha detaylı açıklanacak olursa, Matlab/Simulink benzetim programında gerçek zamanlı olarak veri aktarım kartı aracılığıyla sistem ile veri alışverişi yapılabilir. Tasarlanacak program ile her faz bağımsız olarak, istenilen elektriksel duyarlılıkla, yani 0° ile 360° arasında açma kapama yaparak kontrol açığı sağlamaktadır. Girişler LCD ekran yardımı ile gözlemlenebilir. İstenilen anahtarlama açıları girildiğinde, Başlat butonuna basılarak sistem çalıştırılır. Ana sistemde birden fazla BADS bulunmaktadır. Şekil 5.22.'te bir BADS anahtarın görüldüğü gibi kare dalgaya çevrilerek mikro denetleyiciye gönderilir [82].

5.2.3.2.1. Gerilim Algılama Devresi

BADS bağlanan fazın gerilimi, hall etkili gerilim algılayıcılarla alınmıştır. Burada BADS için kullanılan alan etkili gerilim sensörler Shenzhen 3e Sensor Co., Ltd. firmasının SC2 gerilim algılayıcısı ile LEM firmasının LV-25P gerilim algılayıcısıdır. Sensör çıkışında elde edilen analog gerilim bilgisi, veri aktarım kartı ile bilgisayara aktarılmaktadır. Şekil 5.23.'te kullanılan gerilim algılayıcılarının devre bağlantısı verilmiştir.

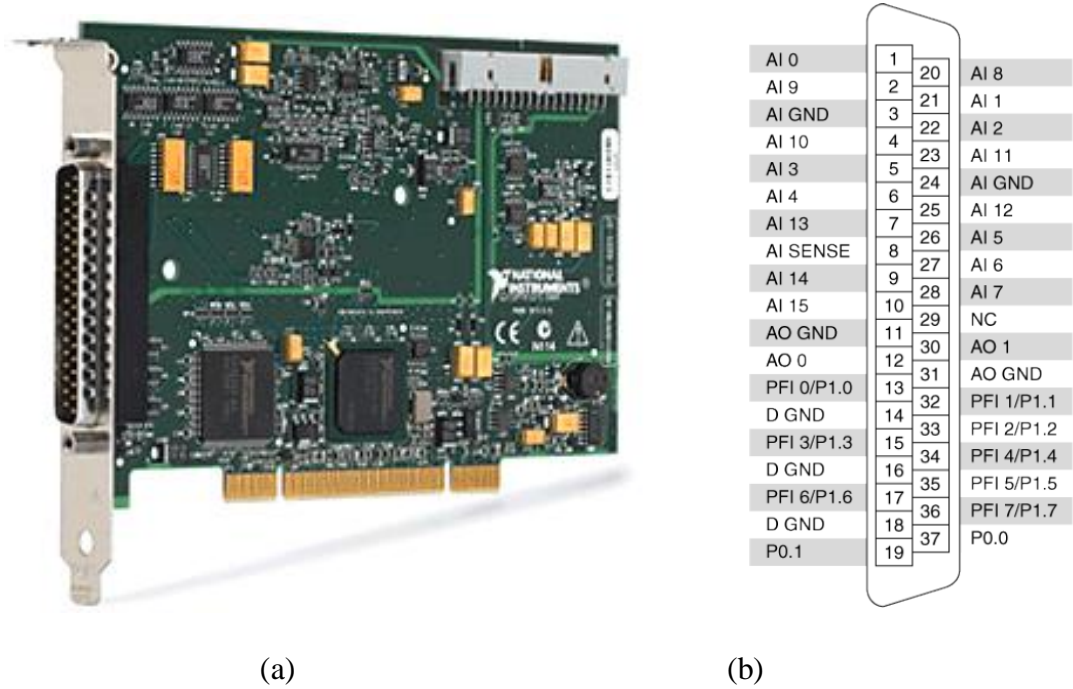


Şekil 5.23. SC2 gerilim sensörünün bağlantı diyagramı

SC2 sensörü, ölçeceği gerilimin değerine göre girişteki R_1 direncinin değeri belirlenir. Nominal durumda ölçülecek sistemden sensöre 10mA değerinde nominal giriş akımı gelmelidir. Transformatör çıkışlarının birisi 220V olduğu için nominal giriş akımını verecek R_1 direnci $5k\Omega/5W$ değerindedir. Sensör çıkışındaki I_0 nominal analog çıkış akımı değeri 25mA olup R_L direncinin değeri 100-200 Ω 'dur. Ölçme gerilimine göre bu direnç değerleri hesaplanmalıdır. Besleme gerilimleri simetrik 12V'dur. Bu devrenin çıkışında elde edilen V_L gerilimi başka bir devreye ihtiyaç duyulmadan bilgisayara aktarılmaktadır.

5.2.3.2.2. Veri Aktarım Kartı

Ferrezonans ölçüm sistemini oluşturan tüm elemanlardan alınan tüm akım ve gerilim bilgilerinin bilgisayar ortamına aktarılabilmesi için National Instruments firmasının ürettiği NI PCI 6221 (37 Pin) veri aktarım kartı kullanılmaktadır. Bilgisayar ana kartı üzerine takılan bu kart ile incelenecek sisteme ait tüm elektriksel büyüklükler MATLAB/Simulink ortamına aktarılmakta ve burada değerlendirilmektedir.



Şekil 5.24. NI PCI 6221 (37 Pin) veri aktarım kartı ve terminal bağlantıları

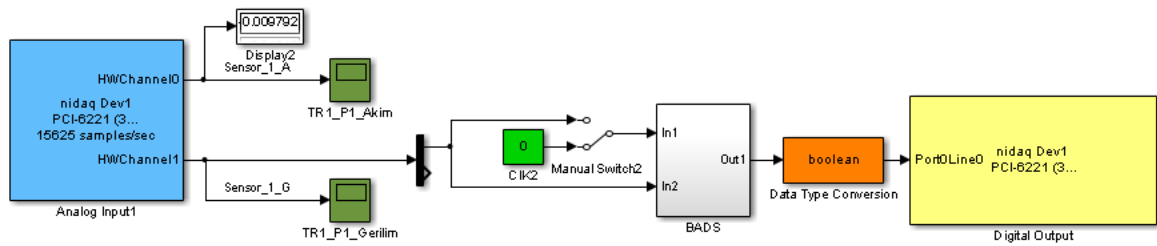
Şekil 5.24.'te NI PCI 6221 (37 Pin) veri aktarım kartı ve terminal bağlantı diyagramı görülmektedir. Bu kart 16 bit, 250kS/s çözünürlüğünde 16 adet analog girişe, 16 bit, 833kS/s çözünürlüğünde 2 adet analog çıkışa ve 32 bitlik 10 adet dijital giriş/çıkışa portuna sahiptir. Üretici firma analog giriş ve çıkış gerilimlerinin tepe değerlerini $\pm 10V$ olarak belirlemiştir.

Tablo 5.1. Veri aktarım kartına bağlanan sensörlerin türü ve bağlantı portları

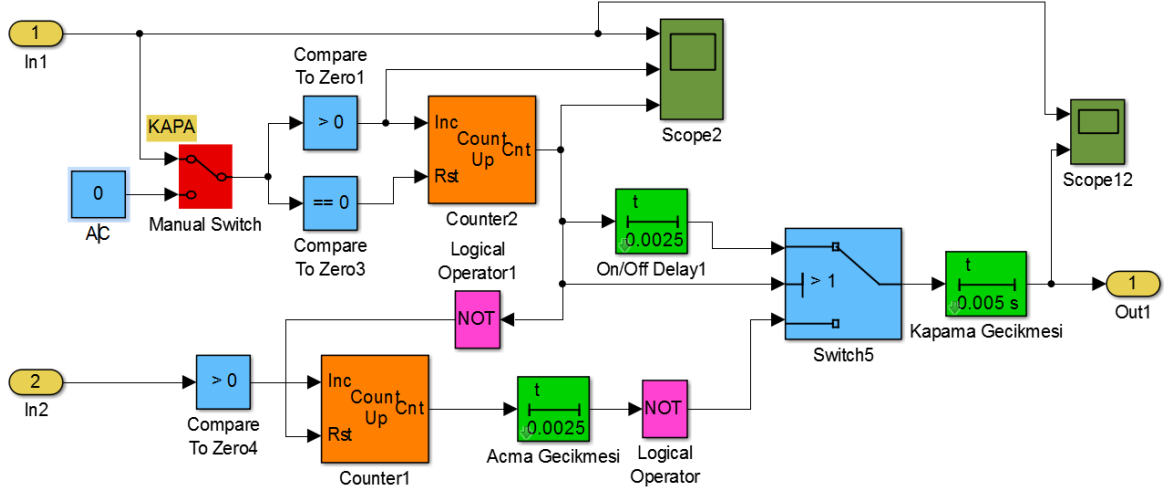
<u>Analog Giriş</u>	<u>Sensör Grubu</u>	<u>Sensör Türü</u>	<u>Port Numarası</u>
aio	1	Akım	1-3
ai1	1	Gerilim	21-24
ai2	2	Akım	22-24
ai3	2	Gerilim	5-3
ai5	3	Gerilim	26-24
ai6	4	Gerilim	27-24
ai8	5	Gerilim	20-24
ai9	6	Gerilim	2-4

5.2.3.2.3. BADS İçin Matlab/Simulink Yazılımı

Bilgisayara tanıtılan NI PCI 6221 (37 Pin) veri aktarım kartı Matlab/Simulink benzetim programının Data Acqusing kütüphanesinden analog giriş ve dijital çıkış blokları alınır. Analog giriş bloğu içinden yapılan ayarlama ile yetkilendirilen giriş portu terminaline, sensör devresi çıkış gerilimi (V_L) bağlandığında dış dünyadan bilgisayara veri girişi yapılmış olur. Bu veri bir scope bloğu ile birebir gerçek zamanlı olarak bilgisayara aktarılır. Bu yapı Şekil 5.25.'te görülmektedir.



Şekil 5.25. BADS için Matlab/Simulink benzetim programında hazırlanan giriş ve çıkış bağlantısı



Şekil 5.26. BADS için Matlab/Simulink benzetim programında hazırlanan hesaplama alt bloğu

Şekil 5.26.'da anahtarlama açısı seçmek için işaretin sıfır geçişini okuyan bir alt devrede oluşturulan bir mantık devresi ile girilen gecikme kadar sinyal bekletilir ve Digital Output bloğuna gönderilir. Bu blok içerisinde de çıkış portu için yetkilendirme yapılmıştır. Son olarak Digital output bloğu çıkış terminaline geciktirilmiş PWM işaretlerini sinyalleri yollar. Kapama için anahtar kapatıldığı anda anahtarlama açısını seçmek için tasarlanan alt bloğa ilgili fazın gerilimini ölçen sensörden analog işaretler gelir. Gelen sinyale daha önceden programa yüklenen gecikme kadar sonra kapama işlemi yaptırılır. Daha sonra bu işaretlerin sıfırdan geçişleri tespit edilerek sayıcı sıfırdan geçtiği anları kaydeder. Açma işareti geldiği anda sayıcı resetlenir gecikme bloğu ne kadar gecikme uygulancaksa o kadar gecikme ile açma yapar. Açma ve kapama gecikmeleri istenirse bir değişkene atanır ve bir mfile dosyası ile programda istenildiği zaman değiştirilebilir.

5.2.3.2.4. Optik Yalıtım ve IGBT Anahtar Sürücü Devresi

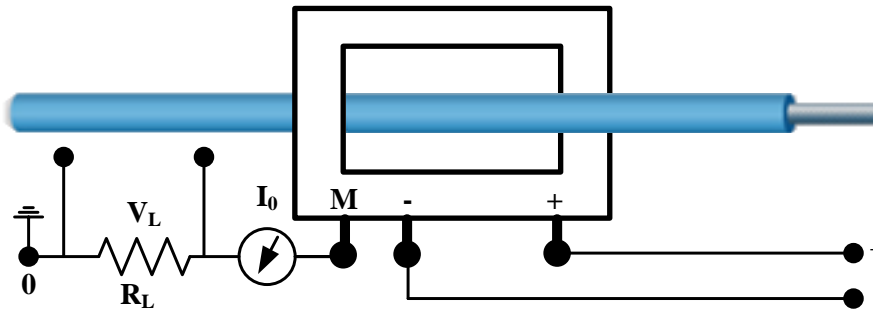
Matlab/Simulink benzetim programının çıkış terminaline yolladığı geciktirilmiş PWM işaretlerini sürücü devre için tetikleme sinyalleri oluşturur. İşaretler öncelikle her faz için 4N25 entegresi ile optik olarak yalıtım yapıldıktan sonra IR2117 tek kanal sürücü entegresine girer. Entegre çıkışındaki kuvvetlendirilmiş işaretler IGBT'yi sürmektedir.

Özetle sürücü devresinde, bilgisayardan gelen işaretler güç devresinden yalıtılıp, IGBT anahtarları tetiklemek üzere güçlendirilerek gönderilir. Aynı sürücü entegre denetlenen faz gerilimini sıfırlanması gerektiği durumlarda yine bilgisayardan denetimli olarak tetikleme işaretini sıfır seviyesine çeker. Böylece bilgisayar kontrollü bir başlatma-durdurma kumanda sistemi görevi görür.

Bilgisayar denetimli anahtarlama açılı denetim sistemi (BADS) bağlandığı her faz için MADS sisteminde olduğu gibi transistor ve diyot grubundan oluşan iki yönlü anahtarlama (Bidirectional Switching Mode) ile yapılır. Bu kısım MADS ile hemen hemen aynı şekildedir.

5.2.4. Algılama Devreleri

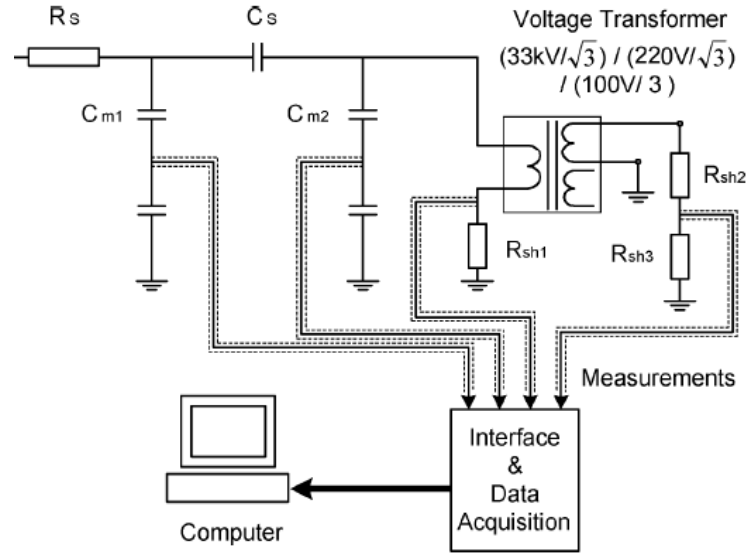
Ana sistem üzerindeki birçok noktadan akım ve gerilim ölçümü yapılmaktadır. Gerilim sensörü için daha önceki bölümde bağlantı şekli anlatıldığı için bu bölümde yalnız akım sensörlerine değinilecektir. Bilgisayar denetimli açılı denetim sistemi bölümünde gerilim algılayıcılar detaylı bir şekilde açıklandığı için burada yalnız akım algılama devreleri üzerinde durulacaktır. Sistemde kullanılan algılayıcı alan etkili gerilim akım sensörü Shenzhen 3e Sensor Co., Ltd. firmasının SC2A-25A akım algılayıcısı ile LEM firmasının LA-55P akım algılayıcısıdır. Sensör çıkışındaki I_0 nominal analog çıkış akımı değeri 25mA olup R_L direncinin değeri 100-200 Ω 'dur. Ölçme gerilimine göre bu direnç değerleri hesaplanmalıdır. Besleme gerilimleri simetrik 12V'dur. Bu devrenin çıkışında elde edilen V_L gerilimi başka bir devreye ihtiyaç duyulmadan bilgisayara aktarılmaktadır. Şekil 5.27.'de kullanılan akım algılayıcılarının devre bağlantısı verilmiştir.



Şekil 5.27. SC2A-25A akım algılayıcısı bağlantı şeması

5.2.5. Ferrerezonans Devresi

Sistem üzerinde oluşacak ferrerezonans olayı için oluşturulan ferrerezonans devresi gerilim trafosunun sargı indüktans değerine göre seçilmiştir. Ferrerezonans devresinde bulunan kondansatör, ayarlı dirençler ve transformatör sargı indüktanslarından akım ve gerilim ölçümleri yapılmaktadır. Alınan bu ölçümler veri aktarım kartı aracılığıyla bilgisayara aktarılmaktadır. Tasarımı yapılan ferrerezonans devresi Şekil 5.29.'da verilmiştir.



Şekil 5.28. Sistemde kullanılan ferrerezonans devresi

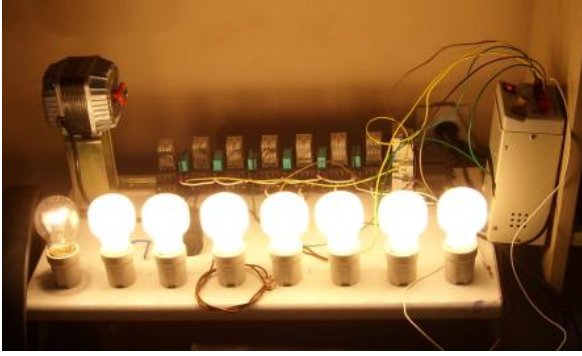
5.2.6. Yük Devresi

Ana sistem üzerinde test edilen ferrerezonans olayına yükün etkisini tespit etmek için sistem ana elemanları olan gerilim transformatörlerinin etiket gücü nispetinde bir yük devresi hazırlanmıştır. Gerilim trafolarına bağlanacak yüklerin gücü trafo gücünün en çok %120'si kadar olmalıdır. Yani bu durumda yük yaklaşık 1000W olmalıdır. Tasarımı yapılan yük devresindeki yükler ve güçleri Tablo 5.2.'de verilmiştir.

Tablo 5.2. Yük devresindeki elemanlar ve güçleri

Yük Adı	Gücü (W)	Miktarı	Toplam
Lamba	100	8	800
Motor	60	1	60
Toplam			860

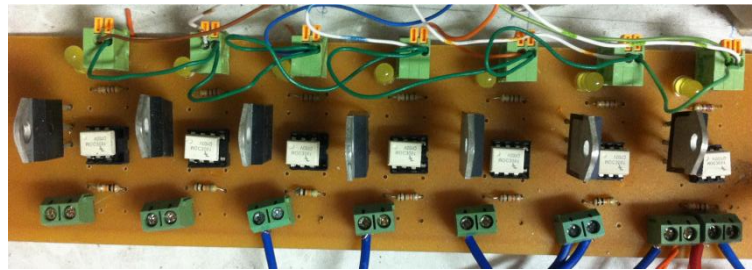
Sistemde kullanılan yüklerin, kontrol devrelerinden gelen işaretler neticesinde devreye girmesi Şekil 5.29.(a)'da gösterilmiştir. Yük devresinin sistem bağlantısı, iki şekilde yapılmıştır. Şekil 5.29.(b)'de gösterilen ikinci bağlantıda tasarlanan bir başka röle devresine RF alıcı anten eklenmiş ve bir PIC 16F84'ün denetlediği bu devre ile RF verici kumanda devresi ile kullanıcı istediğinde sisteme yük ekleyip çıkarabilme rahatlığına sahiptir.



(a)



(b)



(c)

Şekil 5.29. Sisteme bağlanan yüklerin, (a) görüntüsü, (b) ve (c) kumanda devreleri

İkinci bağlantıda, tasarlanan bir ara devredeki iki yönde geçiren güç elektroniği anahtarlarının bilgisayarından kontrolü ile sürülmektedir. Bu ara devre Şekil 5.29.(c)'de görülmektedir. Burada bilgisayardan gönderilen 5V genlikli çıkış işareti ile 4N25 optik yalıtım devresi sürülerek veri aktarım kartı ile sistem arasında yalıtım yapılmaktadır.

Gelen sinyal BC547 transistörünü sürmekte bu transistor de röleyi devreye almaktadır. Bu röle de sıra ile yükleri devreye alıp çıkaran büyük güçlü röleyi sürerek bu sistemleri devreye alıp çıkarmaktadır.

5.2.7. Ölçüm Panosu

Ana sistem üzerindeki birçok noktadan akım ve gerilim ölçümü yapıldığı ve bilgisayara bu bilgilerin sensörler aracılığı ile aktarıldığı önceki bölümlerde ifade edildi. Çalışılan sistemdeki gerilimlerin çok yüksek olması sebebi ile ve sensör bilgilerinin doğruluğunun teyit edilmesi gerektiğinden devredeki birçok noktanın akım, gerilim gibi değişkenleri izlemek için Şekil 5.30.'de gösterilen ölçüm panosu tasarlanmıştır.



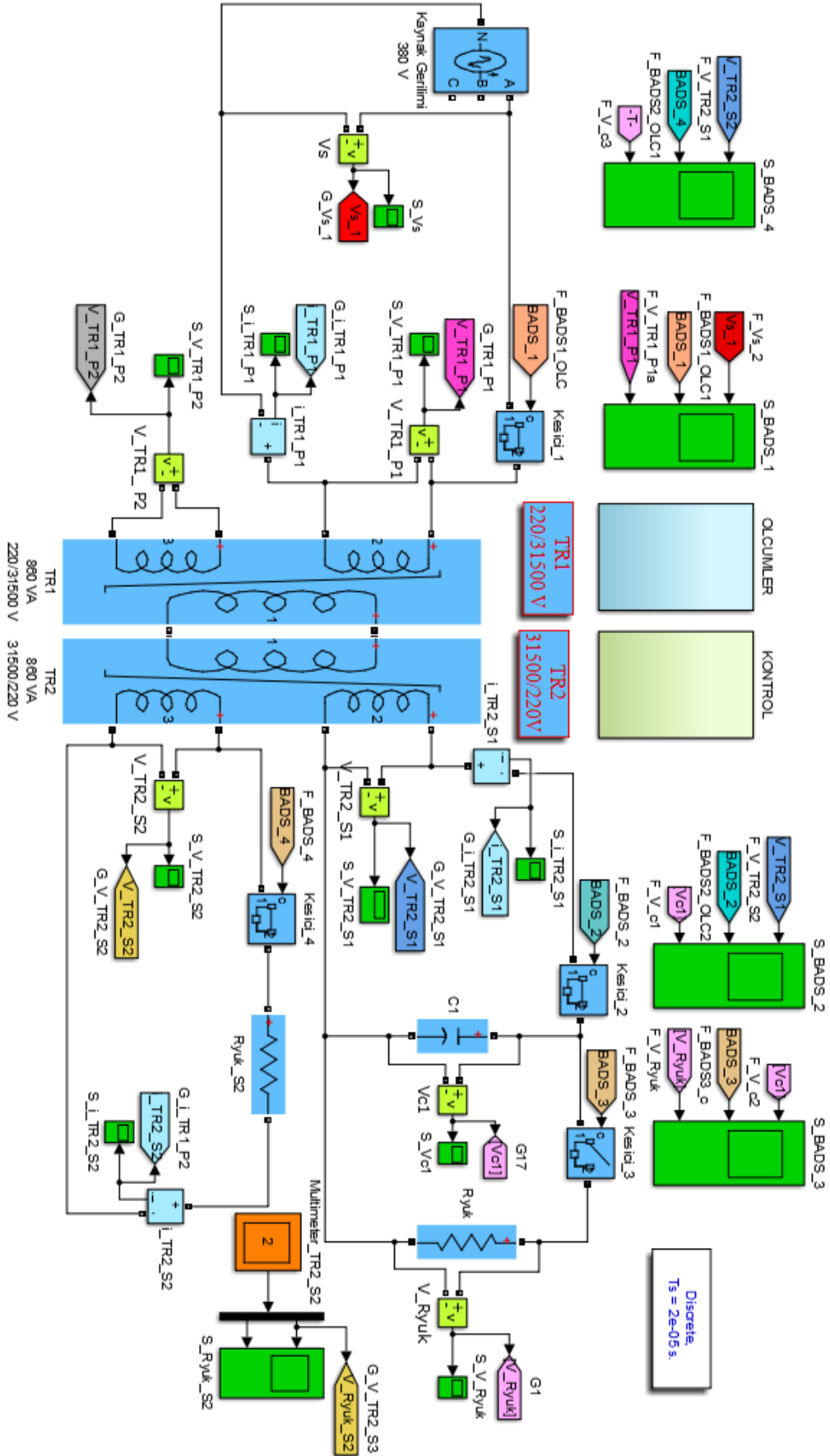
Şekil 5.30. Sistem ölçüm panosu.

6. BULGULAR

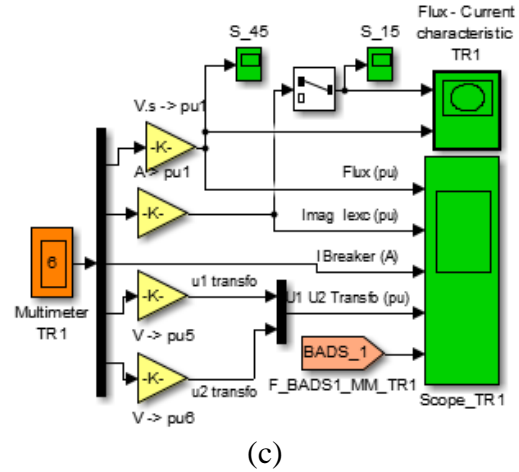
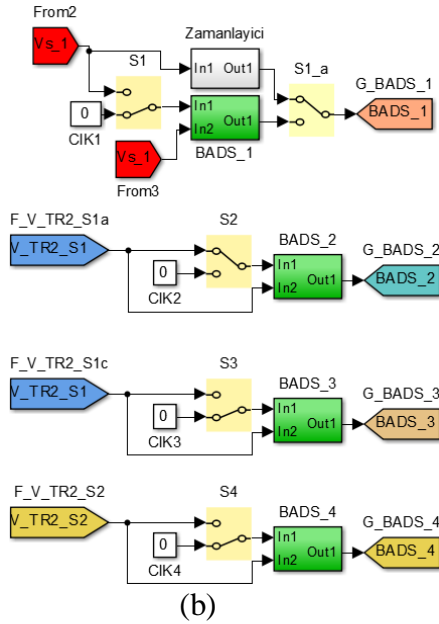
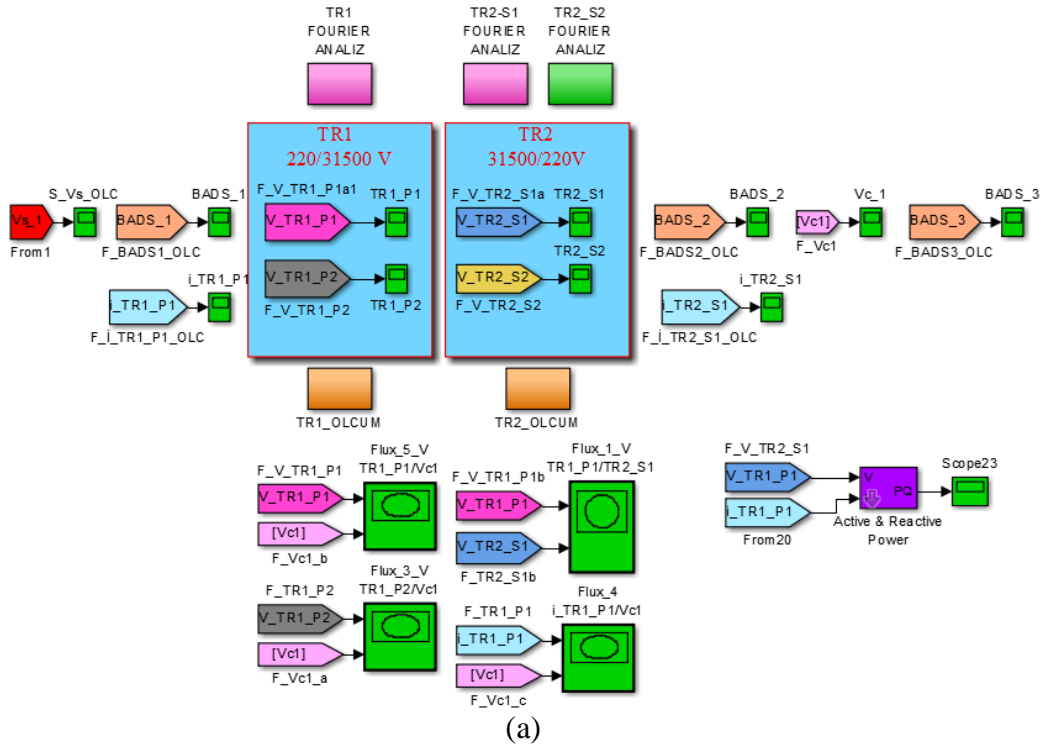
Anahtar kapama açısının yüksek gerilim ölçü transformatörlerinde oluşan ferrezonans olayının incelenmesi üzerinde yapılan benzetim ve deneysel çalışmalar ile bulguları bu başlık altında verilmiştir. Sistemde farklı noktalara yerleştirilmiş iki farklı tipte çalışan anahtar kullanılmıştır. Bu anahtarlardan MADS, bağlandığı faz için kapama ve açma işlemini mikrodenetleyiciye yüklenen programın izin verdiği hassasiyette yani 5°, 10°, 30° ile yapabilirken, diğeri olan BADS, ise çok daha yüksek hassasiyette anahtarlama işlemini yapabilmektedir. Ferrerezonansa etki eden sistem parametreleri değiştirildiğinde ve anahtar açılarının her bir gerilim trafosu için primer ve sekonder akım, gerilim, manyetik akı, histerisiz eğrisi gibi sistem elektriksel değişkenlerin bundan nasıl etkilendiği gözlenmiştir. Bu sistemlere ait hem benzetim hem de deneysel bulgular ortaya konmuştur. Benzetim çalışmaları Matlab/Simulink ortamında gerçekleştirilmiş olup, deneysel çalışmalar için kurulan düzenek, tasarlanan kartlar ve NI PCI 6221 (37 Pin) veri aktarım kartı üzerinden kullanılmıştır.

6.1. Sistem Benzetiminden Elde Edilen Bulgular

Bu bölümde tasarımı yapılan sistemin bilgisayar benzetiminden elde edilen veriler incelenmiştir. Yüksek gerilim sistemlerinde ölçüm amaçlı kullanılan gerilim trafolarının boşa çalışma ve yüklü çalışma durumları tasarımı yapılan elektronik açı denetim sistemi kullanılarak farklı kapama ve açma senaryolarında sistemin tepkileri incelenmiştir. Şekil 6.1.'de simülasyonda kullanılan tüm sistemin Matlab/Simulink genel görüntüsü verilmiştir. Kaynak gerilimi ölçüldükten sonra Kesici1 isimli devre kesiciden sonra ters bağlantı yapılan TR1 gerilim trafosunun P1 sargısına bağlanmıştır. Bu trafonun P1 ve P2 gerilim bilgileri ölçülerek OLCUMLER ve KONTROL alt bloklarına gönderilmiştir. TR1 trafosunun S1 ucu normal bağlanan TR2 trafosunun direk P1 ucuna bağlanmıştır. Ferrerezonans etkisi incelenen TR2 trafosunun etiket güçlerine uygun yükler kullanılarak iki ayrı devre S1 ve S2 uçlarında oluşturulmuştur. Bu iki devredeki tüm elemanların elektriksel parametreleri OLCUMLER altbloğuna gönderilmiştir.



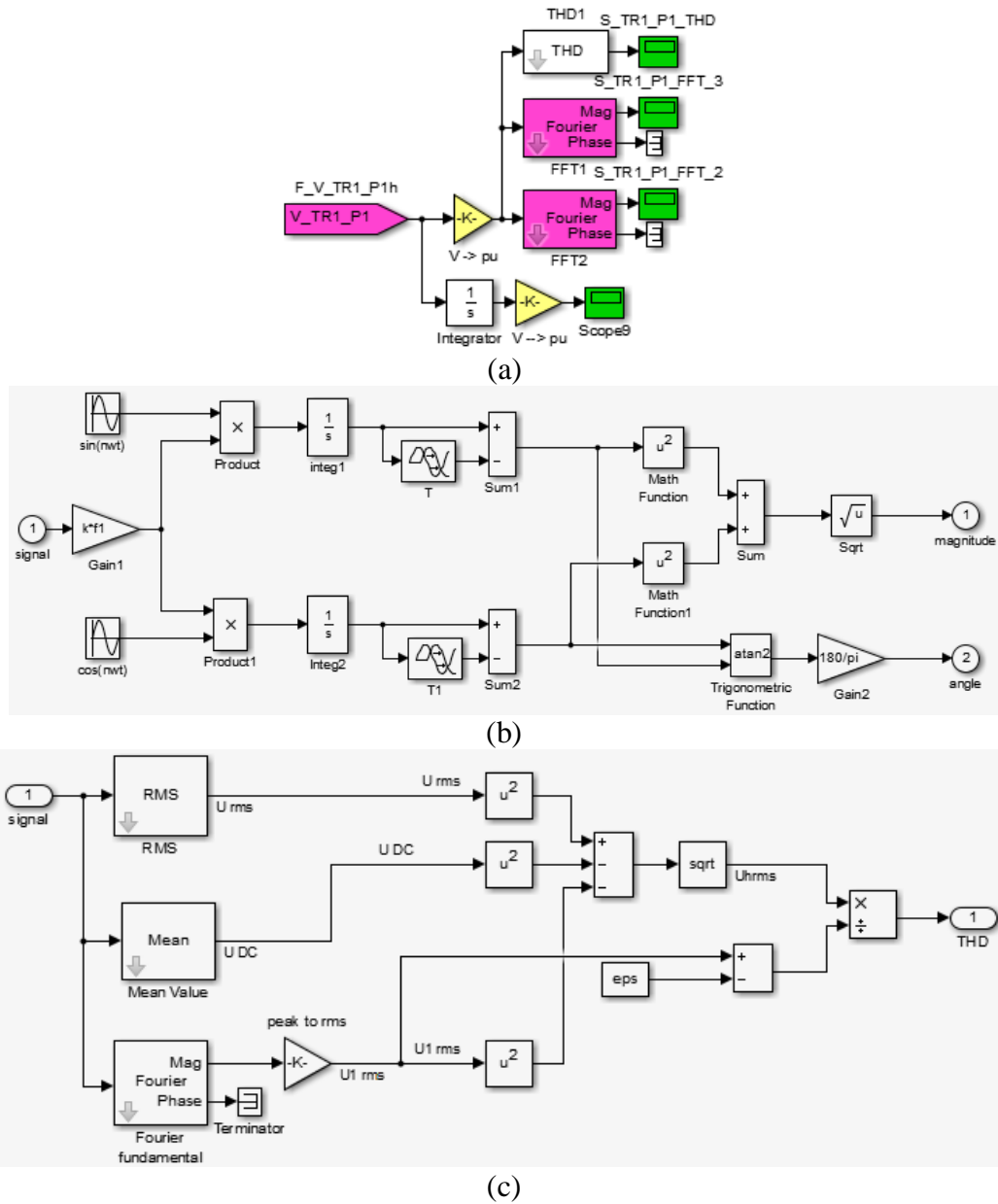
Şekil 6.1. Simülasyonda kullanılan tüm sistemin Matlab/Simulink genel görüntüsü



Şekil 6.2. Ana sistemin, (a) OLCUMLER altbloğu, (b) KONTROL altbloğu, (c) OLCUMLER altbloğu içerisindeki TR1_OLCUM altbloğunun detayı

Şekil 6.2.(a)'da OLCUMLER altbloğu içerisinde, sistemin bütün ölçümlerinin osiloskop fonksiyonu ile izlendiği, kayıtlarının tutulduğu veri tabanları ve matematiksel analiz işlemlerinin yapıldığı başka altblok ve fonksiyonlar yer almaktadır. Sistem üzerinde bulunan bir çok devre kesici anahtarın kontrolünün yapıldığı KONTROL altbloğu Şekil 6.2.(b)'de görülmektedir. Bu alt blok içerisinde kesici anahtarlara bağlı daha önce detaylı olarak anlatılan gecikmeli açma kapama yapan BADS altblokları ile kullanıcı tarafından

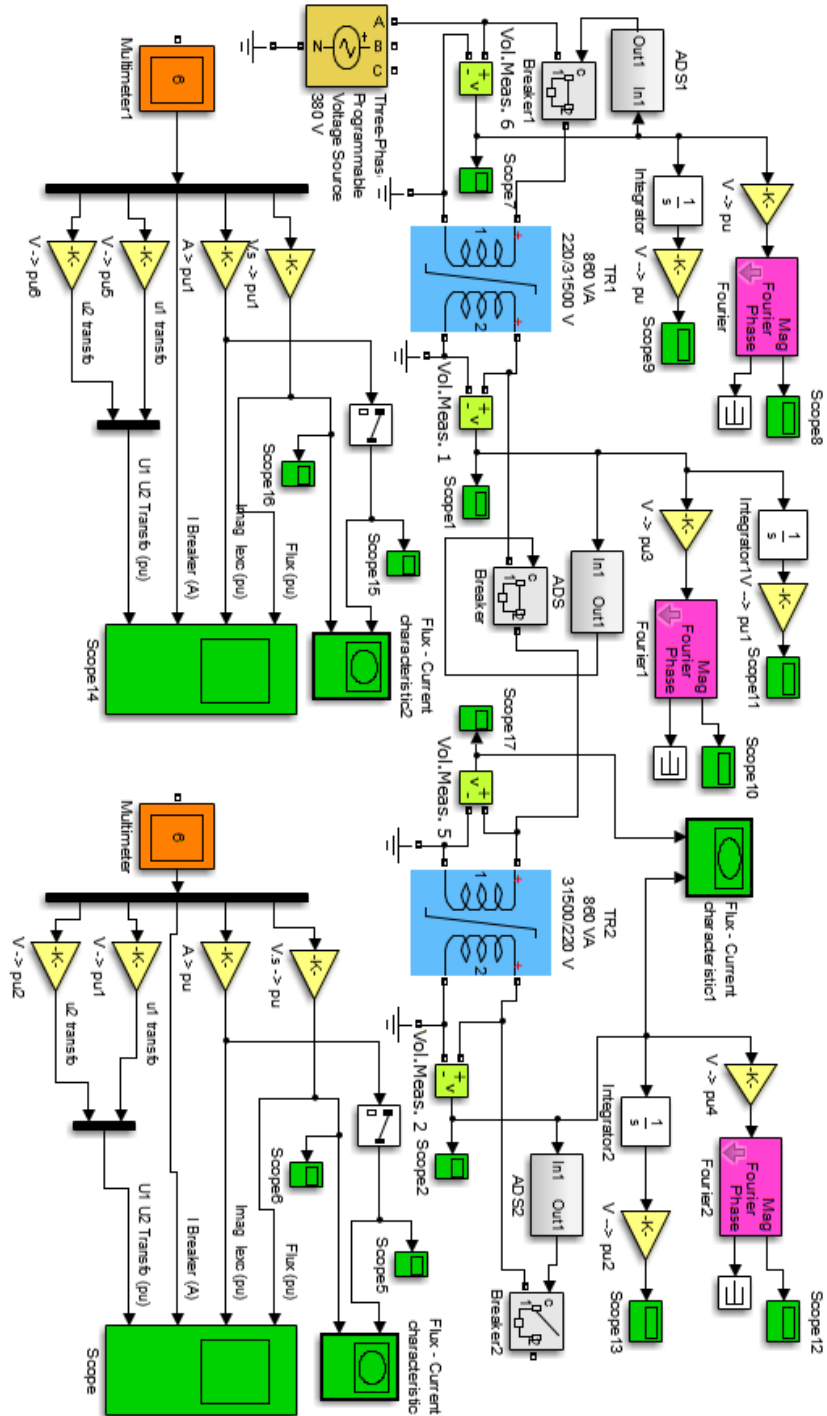
rastgele zamanlarda yapılan anahtarlama temsil eden Zamanlayıcı altbloğu bulunur. Şekil 6.2.(c)'de TR1 OLCUM altbloğu görülmekte olup burada, TR1 trafosunun tüm elektriksel parametreleri hazır histersiz fonksiyonundan alınarak izlenme imkanı bulunmaktadır. OLCUMLER altbloğu içerisindeki TR1 FOURIER ANALIZ altbloğu Şekil 6.3.(a)'da görülmektedir. Bu blok içerisinde, sistemin 2. ve 3. Derece harmonik bileşeninin hesaplandığı hızlı fourier analizi (FFT) bloğu detayı ile Şekil 6.3.(b)'de ve toplam harmonik bozulma (THD) dereceleri de Şekil 6.3.(c)'de tespit edilebilmektedir.



Şekil 6.3. Tasarlanan sistemin alt bloklarının detayları (a) OLCUMLER altbloğu içerisindeki TR1 FOURIER ANALIZ altbloğu, blok içindeki (b) THD altbloğu ve (c) FFT altbloğunun detaylı Matlab/Simulink görüntüsü

6.1.1. Boşta Çalışan Sistemin Matlab/Simulink Benzetimi

Sistemin boşta çalışma durumundaki elektriksel parametrelerin incelenmesi için oluşturulan basitleştirilmiş Matlab/Simulink benzetim modeli Şekil 6.4.'de verilmiştir.

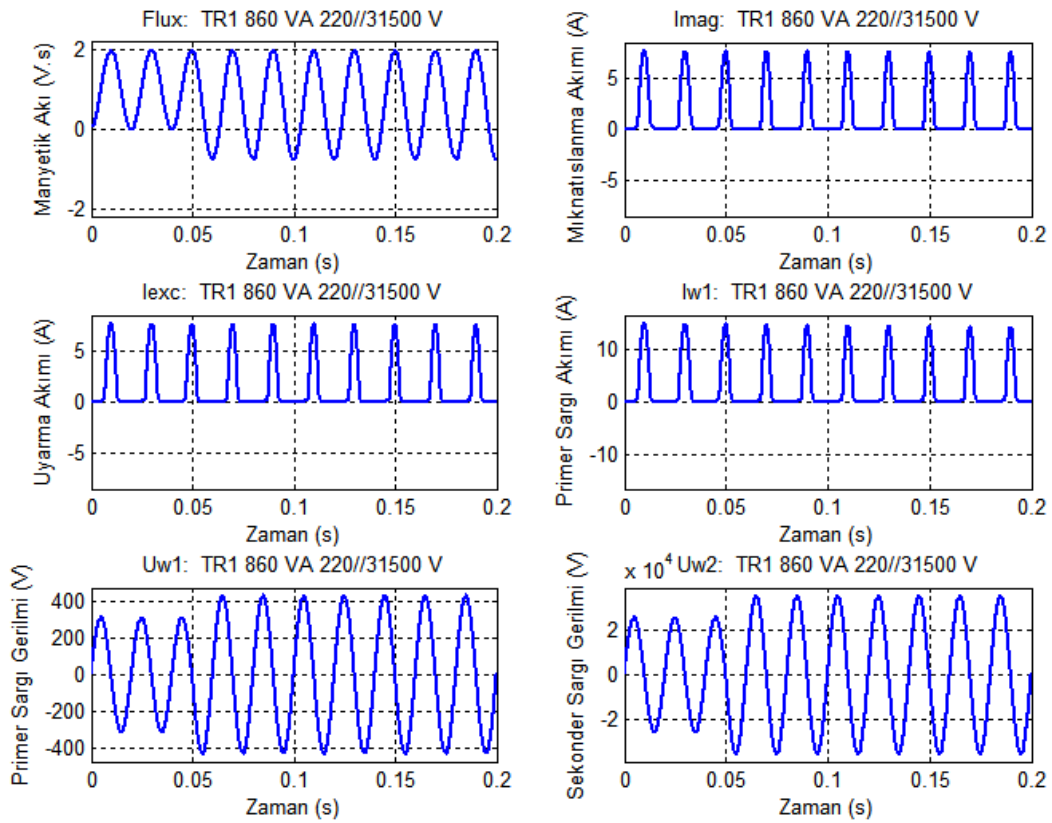


Şekil 6.4. Boşta çalışan sistemin basitleştirilmiş Matlab/Simulink modeli

6.1.1.1. Boşta Çalışan Sistemde BADS Anahtarların Görev Yapmadığı Durumun Matlab/Simulink Benzetimi

Deneysel çalışmalarda kullanılan açılı denetim sistemleri görev yapmadan sistemin boşta çalışma durumu için Şekil 6.5. ile 6.7. arasında verilen grafikler benzetim çalışmalarından elde edilen sonuçlardır.

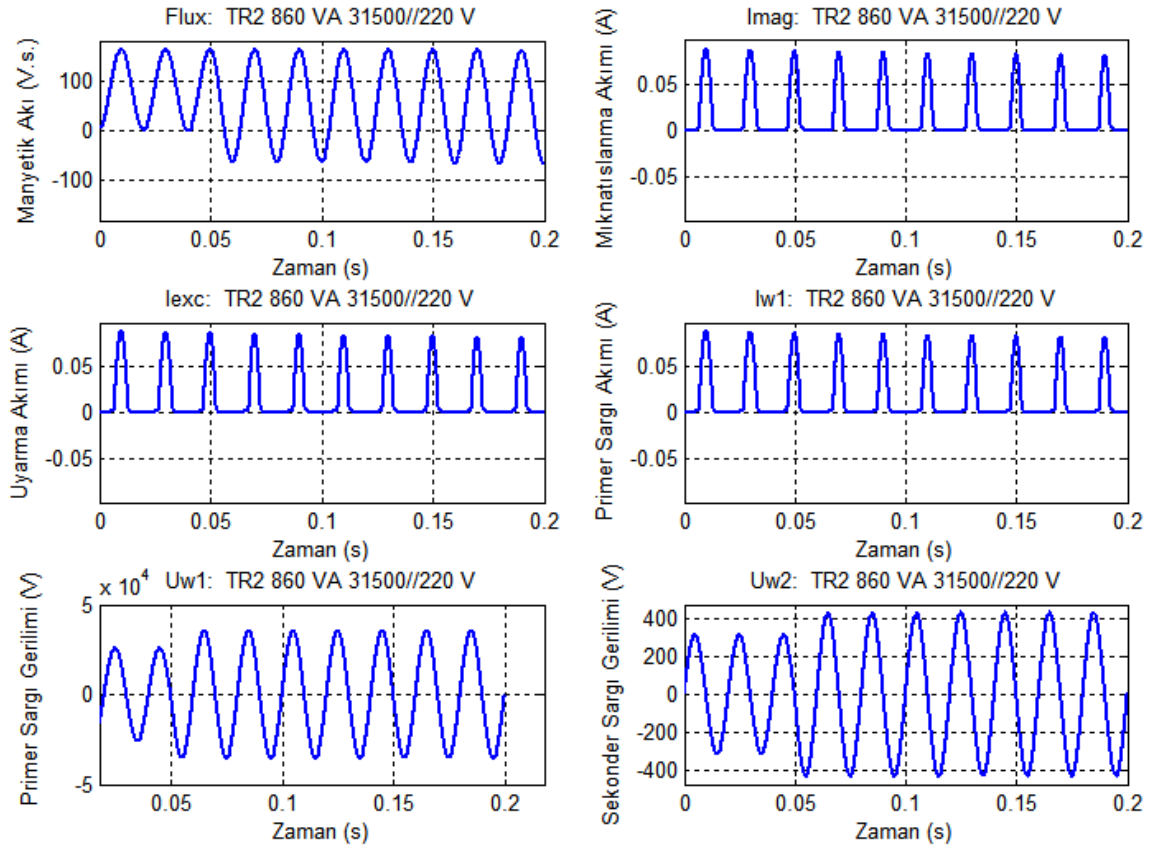
Sistemin benzetiminde kullanılan transformatör parametreleri gerçek sistemde kullanılan transformatörlerin etiket değerleri dikkate alınarak kullanılmıştır. Şekil 6.5. ve 6.6.'de benzetimi yapılan sistemdeki TR1 ve TR2 isimli gerilim transformatörlerinin Manyetik akı, Mıknatıslanma akımı, uyarma akımı, primer sargı akımı ve gerilimi ile sekonder sargı gerilimi görülmektedir.



Şekil 6.5. Yükseltici TR1 gerilim transformatörü üzerindeki elektriksel parametrelerinin boşta çalışma durumundaki zamanla değişimleri

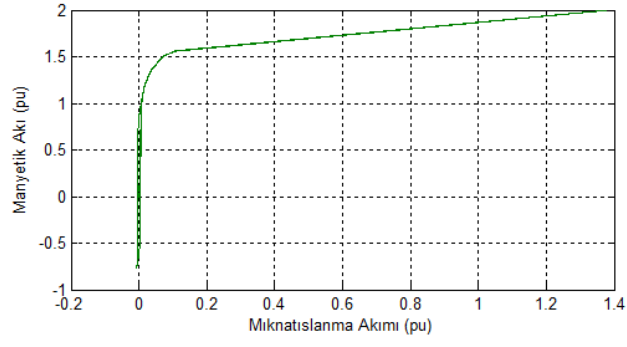
Boşta çalışan TR1 transformatörüne ait Matlab/Simulink benzetimleri Şekil 6.5.'de verilen grafikler incelendiğinde primer sargıya etkin değeri 220V olan şebeke geriliminin

uygulanmasından 1,5 periyot sonra gerilim yaklaşık 300V'a yükselmiştir. Benzer şekilde sekonder sargı gerilimi içinde durum ilk başta 25,7kV iken daha sonra 35,3 kV'a yükselmiştir.

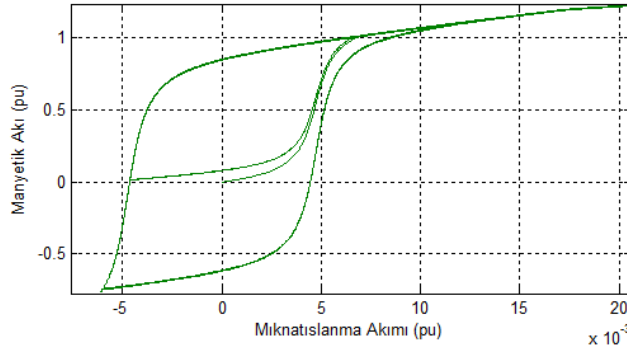


Şekil 6.6. TR2 gerilim transformatörünün parametrelerinin boşa çalışma durumundaki zamanla değişimleri

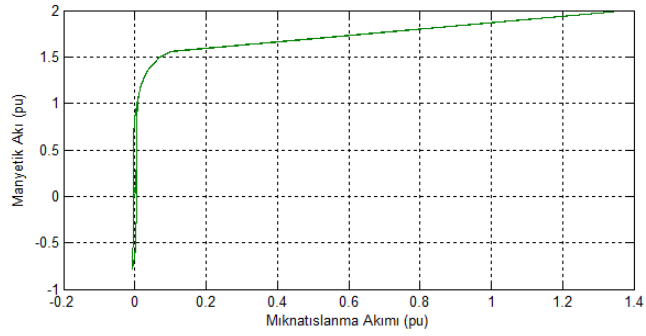
Şekil 6.6.'de verilen grafikler incelendiğinde TR2 gerilim trafosunun primer sargısında ilk başta tepe değeri 25,7kV olan gerilim görülürken 1,5 periyot sonra gerilimin 35,3 kV'a yükseldiği görülmektedir. Benzer şekilde sekonder sargı geriliminin etkin değeri içinde durum ilk başta 220V iken daha sonra yaklaşık 300V olarak ölçülmüştür. Şekil 6.7. (a) ve (b)'de TR1 yükseltici gerilim trafosuna ait mıknatıslanma akımı ile manyetik akı arasındaki değişim iki boyutlu düzlemde çizdirilmiştir.



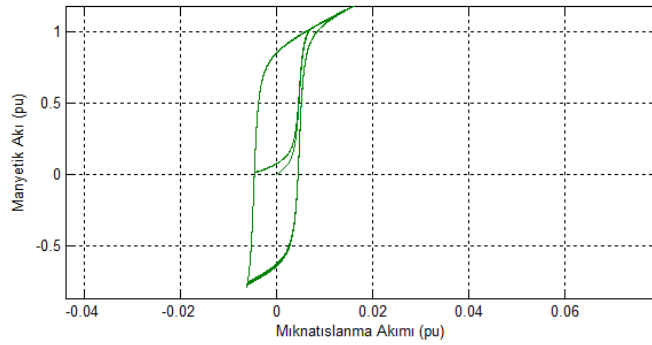
(a)



(b)



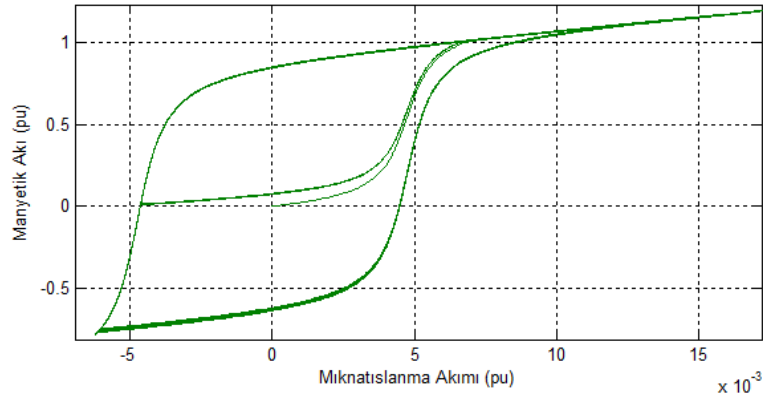
(c)



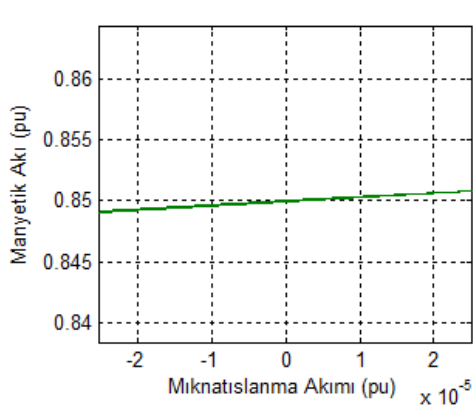
(d)

Şekil 6.7. TR1 ve TR2 gerilim transforlarına ait boşa çalışma durumundaki, mıknatıslanma akımı manyetik akı değişimini histerisiz çevrimi

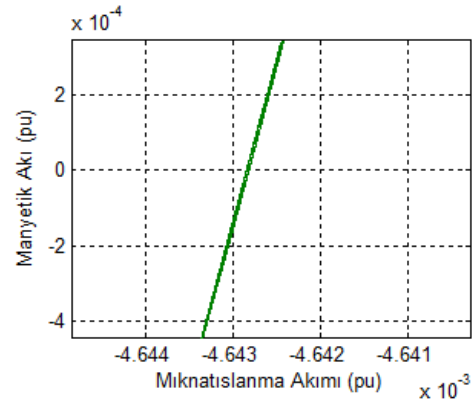
Şekil 6.7. (c) ve (d)'de TR2 indirici gerilim trafosuna ait mıknatıslanma akımı ile manyetik akı arasındaki değişim iki boyutlu düzlemde çizdirilmiştir. Bu grafikler daha detaylı olarak Şekil 6.8.'de verilen grafik ve histerisiz eğrisi incelenirse remenans yani artık mıknatıslık $B_r=0,85\text{pu}$ değerinde olduğu görülür bu kalıcı akıyı yok edecek olan giderici kuvvet $H_g=4,643\text{ pu}$ değerindedir.



(a)

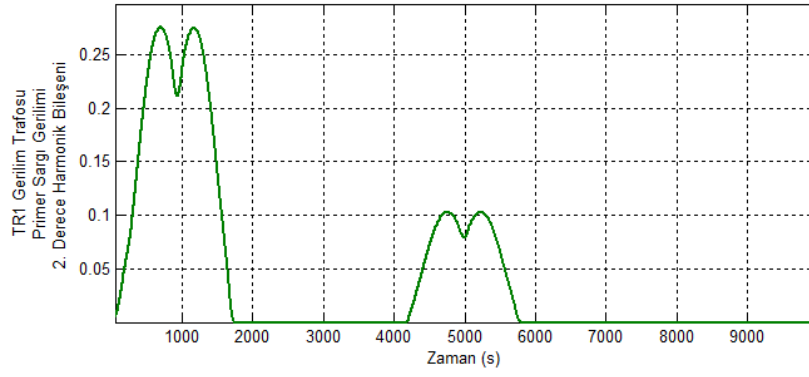


(b)

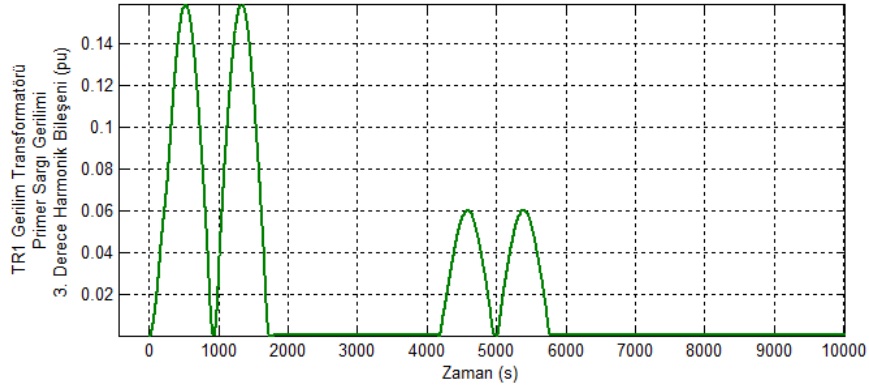


(c)

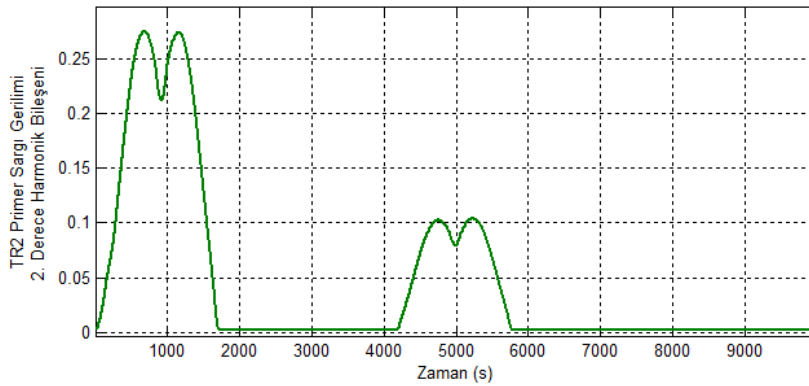
Şekil 6.8. Detaylı TR2 boşa çalışma durumundaki (a) mıknatıslanma akımı ile manyetik akı değişimini histerisiz çevrimi, (b) B_r ve (c) H_g



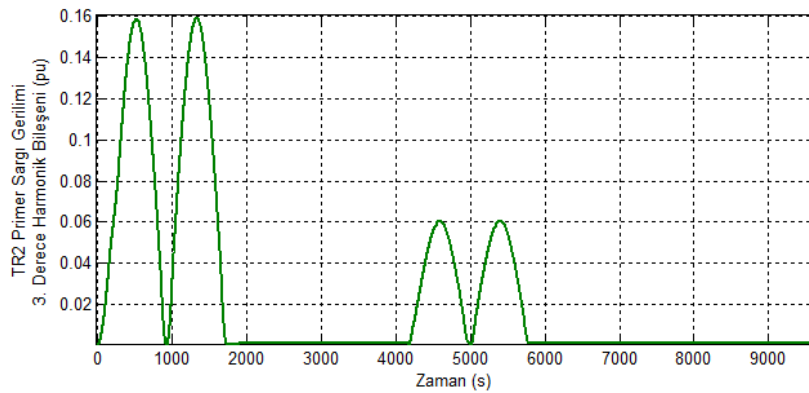
(a)



(b)

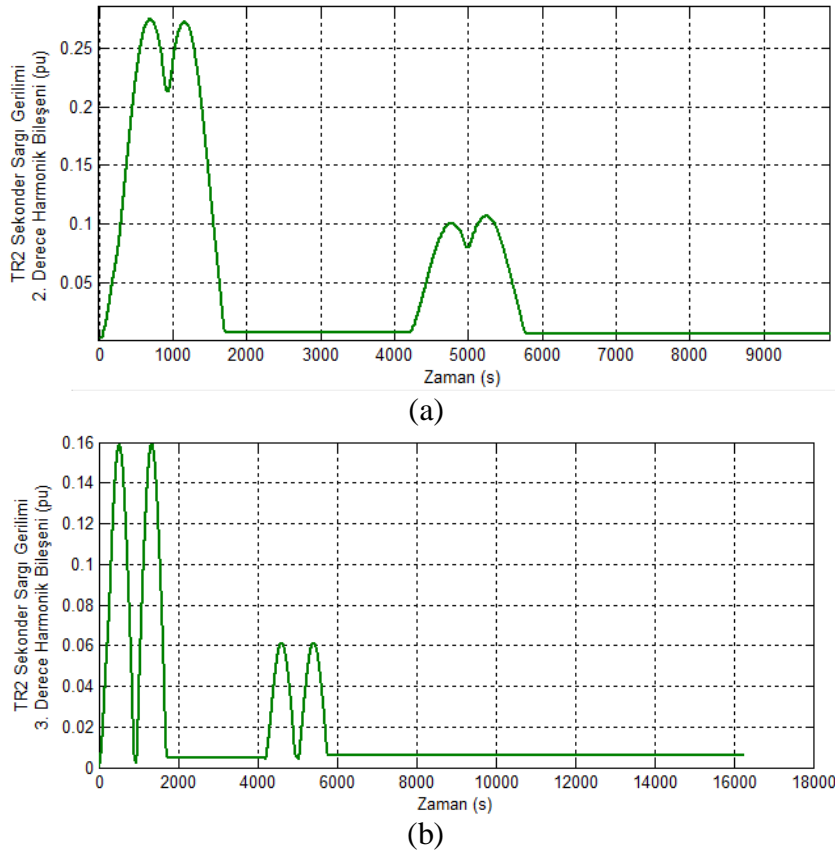


(c)



(d)

Şekil 6.9. Boşta çalışma durumu; TR1 ve TR2 tarafolarının gerilimlerinin birim değer (pu) cinsinden fourier analizi (a) TR1-2. Der. Bil., (b) TR1-3. Der. Bil., (c) TR2-2. Der. Bil., (d) TR2-3. Der. Bil.

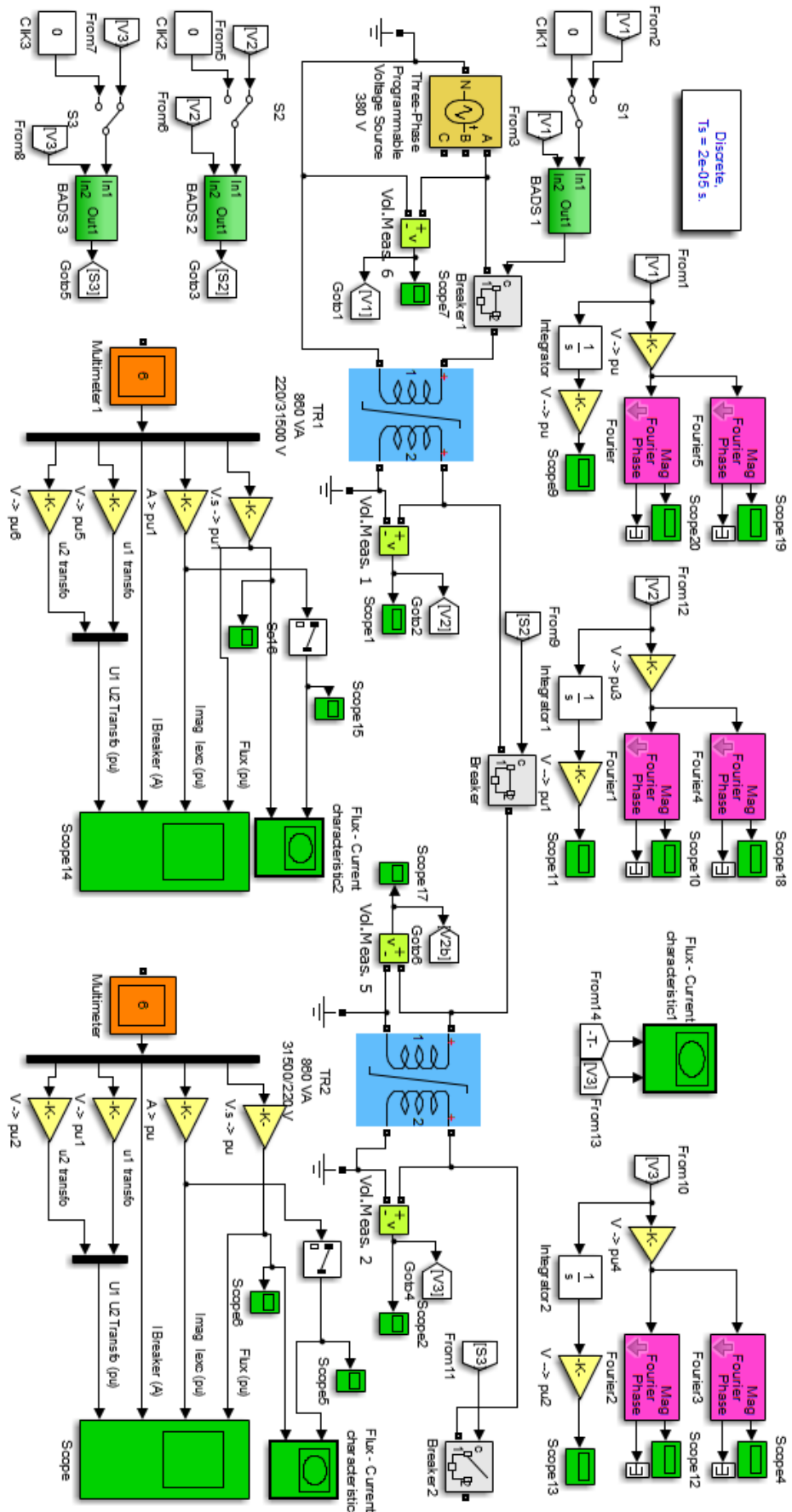


Şekil 6.10. Boşta çalışma durumu TR2 gerilim transformatörü sekonder sargı gerilimine ait birim değer cinsinden fourier analizi (a) 2. Derece bileşeni (b) 3. Derece bileşeni

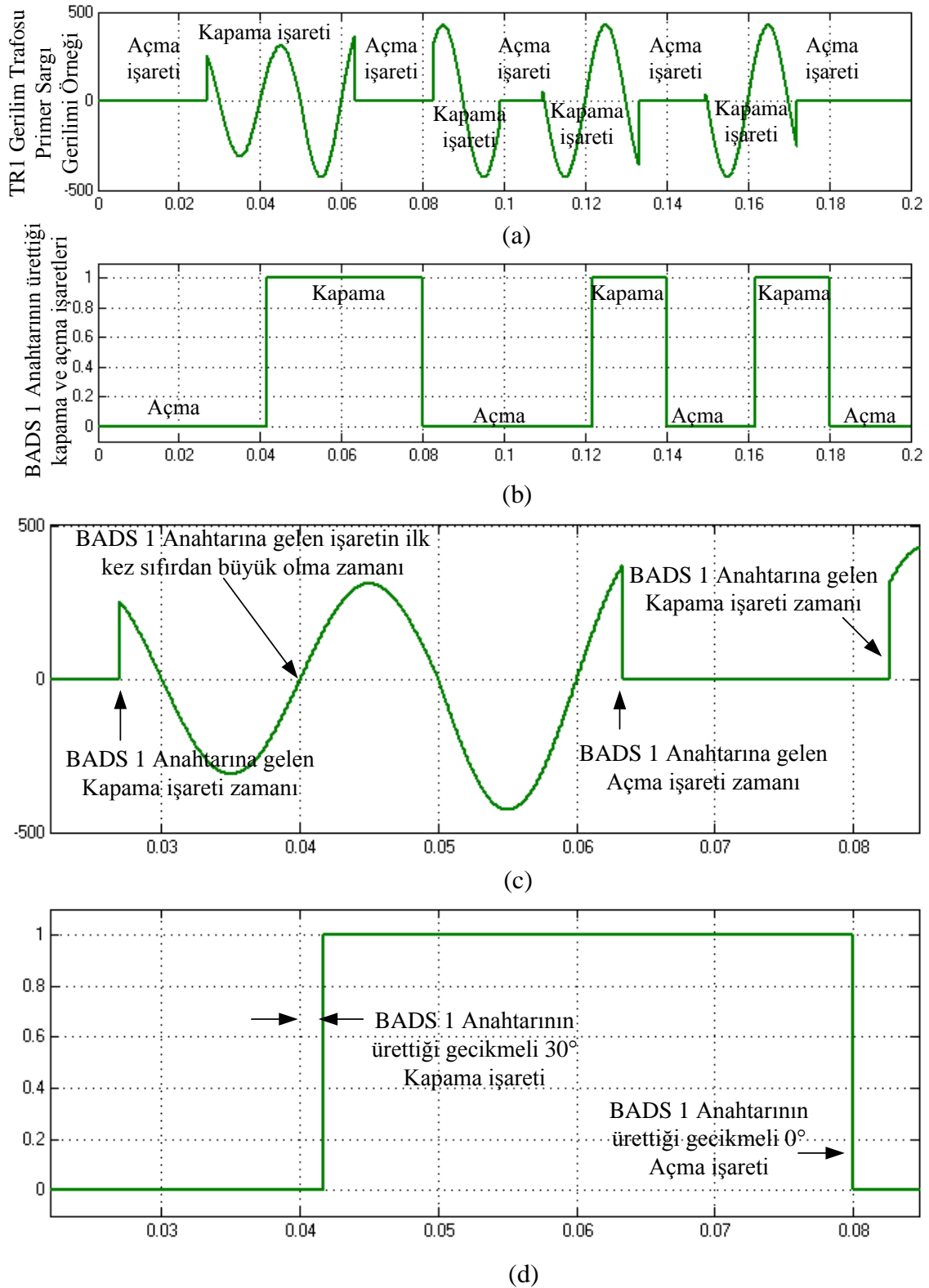
Şekil 6.9. ve Şekil 6.10.'de TR1 ve TR2 gerilim transformatörleri primer ve sekonder sargıların gerilimlerine ait birim değer (pu) cinsinden fourier analizi sonuçları görülmektedir. Burada dikkat edilecek husus eğrilerin genellikle simetrik biçimde olduğudur.

6.1.1.2. Boşta Çalışan Sistemde BADS-1 Anahtarının $\alpha_{\text{kapama}}=30^\circ$ ve $\alpha_{\text{açma}}=0^\circ$ 'de Görev Yaptığı Durum

Sistemin boşta çalışma durumunda, açma denetim sisteminin (ADS) devreye alınması durumu için Şekil 6.11.'de verilen bağlantıda yalnız BADS-1 nolu anahtarın kapama açısının 30° 'deki ve açma açısının 0° 'deki çalışma durumu için BADS-1 nolu anahtarın bağlandığı faz gerilimi ile kapama ve açma geldiği durumlar için üretilen işaretler Şekil 6.12.'de verilmiştir. Ayrıca BADS-1 nolu anahtarın kapama ve açma pozisyonunun TR1 ve TR2 gerilim transformatörleri üzerindeki oluşturduğu Manyetik akı, Mıknatıslanma akımı, uyarma akımı, primer sargı akımı ve gerilimi ile sekonder sargı gerilimi gibi parametrelerin değişimleri Şekil 6.13. ve 6.14.'de görülmektedir.



Şekil 6.11. Boşta çalışma durumu yalnız BADS-1 anahtarlarının aktif olduğu durum



Şekil 6.12. (a) BADS-1 anahtarının girişi gelen TR1 gerilim transformatörü primer sargı gerilimi, (b) BADS-1 anahtarının ürettiği kapama ve açma işaretleri, (c) ve (d) BADS-1 anahtarının girişi gelen ve çıkışında üretilen işaretin kısa bir zaman aralığı için detaylı analizi

Boşta çalışan TR1 transformatörüne ait Matlab/Simulink benzetimleri Şekil 6.12.'de verilen grafikler incelendiğinde, 6.12. (a)'da açıcı konum anahtarına gelen kullanıcı tarafından rastgele yapılan kapama ve açma işlemleri görülmektedir. 6.12. (b)'de ise anahtar çıkışında üretilen kapama ve açma işaretleri, (c) ve (d)'de detaylı incelendiğinde ilk kapama işaretinin geldiği zaman sistemin benzetime başladığı andan 0,027s sonradır buda derece cinsinden tam sinyalin 126° derecesine denk gelmektedir. BADS gelen bu kapama işaretine yeni tam periyot başından yani 0,04. saniyeden itibaren kullanıcının istediği kadar derece cinsinden gecikmeyi eklemiş yani 0,0417s'de kapama işaretini üretmiştir. Burada gecikme,

T : Tam periyot süresi (s),

T_{basla} : Tam periyot başlama zamanı (s),

T_{kapama} : BADS'ın ürettiği gecikmeli kapama zamanı (s),

$T_{gecikme}$: gecikme zamanı (s),

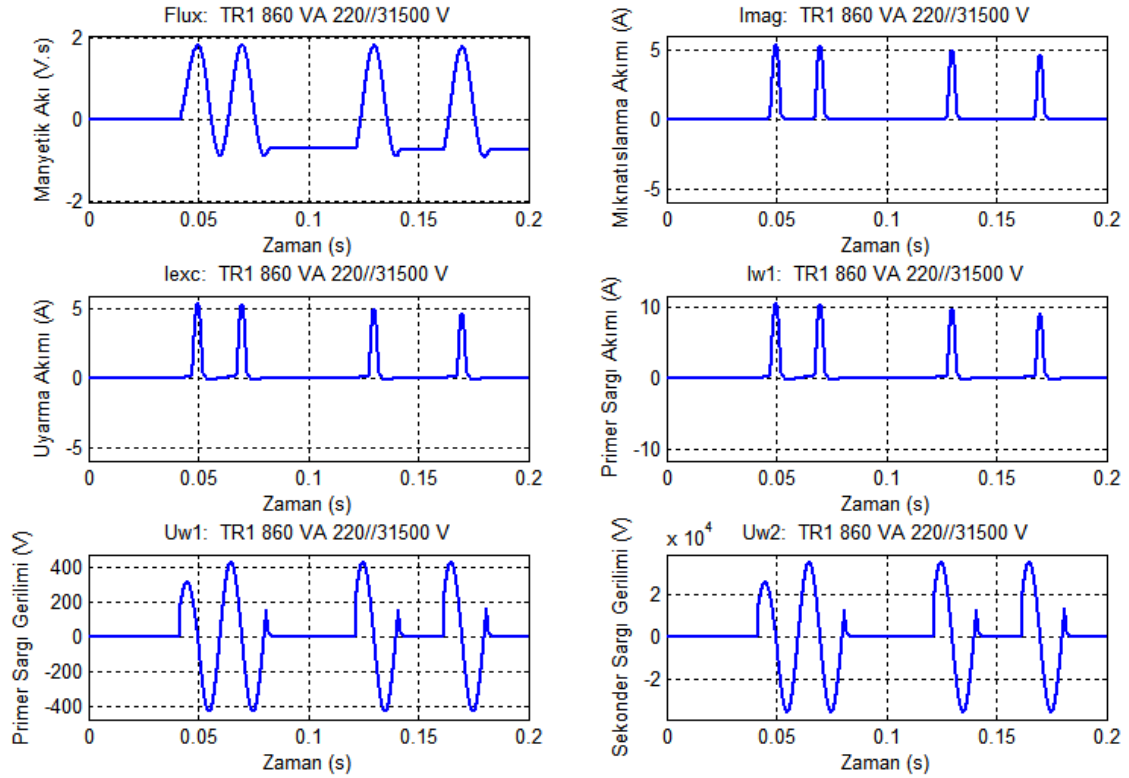
$\alpha_{gecikme}$: derece cinsinden gecikme, (2.1) ve (2.2) denklemleri ile ifade edilir.

$$T_{gecikme} = T_{basla} - T_{kapama} \quad (V) \quad (2.1)$$

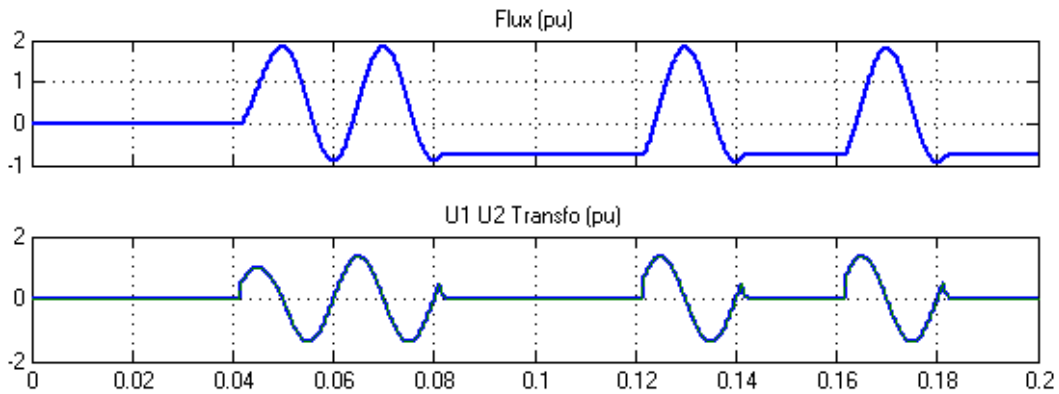
$$\alpha_{gecikme} = \frac{T_{gecikme} \times 360^\circ}{T} \quad (V) \quad (2.2)$$

Bu denklemler kullanıldığında gecikmenin 30° olduğu görülür. Şekil 6.12. (b) incelendiğinde sırasıyla kapama zamanları 0,04.s'de, 0,12.s'de ve 0,16.s'de başlayan periyotları izleyen 30° sonrasında oluşmuş, açma zamanlarında herhangi bir gecikme verilmediği için ise açma işaretinin geldiği periyotların bittiği 0,08.s'de, 0,14.s'de ve 0,18.s'de oluşmuştur. Şekil 6.13. (a) incelendiğinde TR1 gerilim trafosu primer sargısına etkin değeri 220V olan şebeke geriliminin işaretin 30° seviyesinde uygulandığında aynı periyotun 90° durumunda işaret normal seviyesine ulaşmış ancak izleyen tam işarette gerilim yaklaşık 400V'u aşmıştır. Benzer şekilde sekonder sargı gerilimi içinde durum 30° seviyesinde uygulandığında aynı periyotun 90° durumunda işaret normal seviyesine ulaşmış ancak bu periyotu izleyen tam işarette gerilim yaklaşık 40kV seviyesine ulaşmıştır. Manyetik akının zamanla değişimi Şekil 6.13. (b) incelendiğinde anahtarın ilk kapandığı 30° 'de sıfırdan başlayan bir simetrik olmayan, tepe değeri 2 V.s olan cosinüs eğrisi görülmektedir. Manyetik akının birim değer cinsinden tepe değeri pozitif alternansta 1,8575 pu seviyesinde iken negatif alternansta -0,8915 pu seviyesindedir. Ayrıca BADS-1

anahtarı ilk açıldığı anda TR1 trafosundaki kalıcı akı $-0,725$ pu seviyesindedir. İkinci kapama geldiği anda manyetik akı değeri, anahtarın açıldığı $-0,725$ pu seviyesinden başlamıştır. Miknatıslanma ve uyarma akımlarının tepe değerleri $5A$ seviyesindedir.



(a)

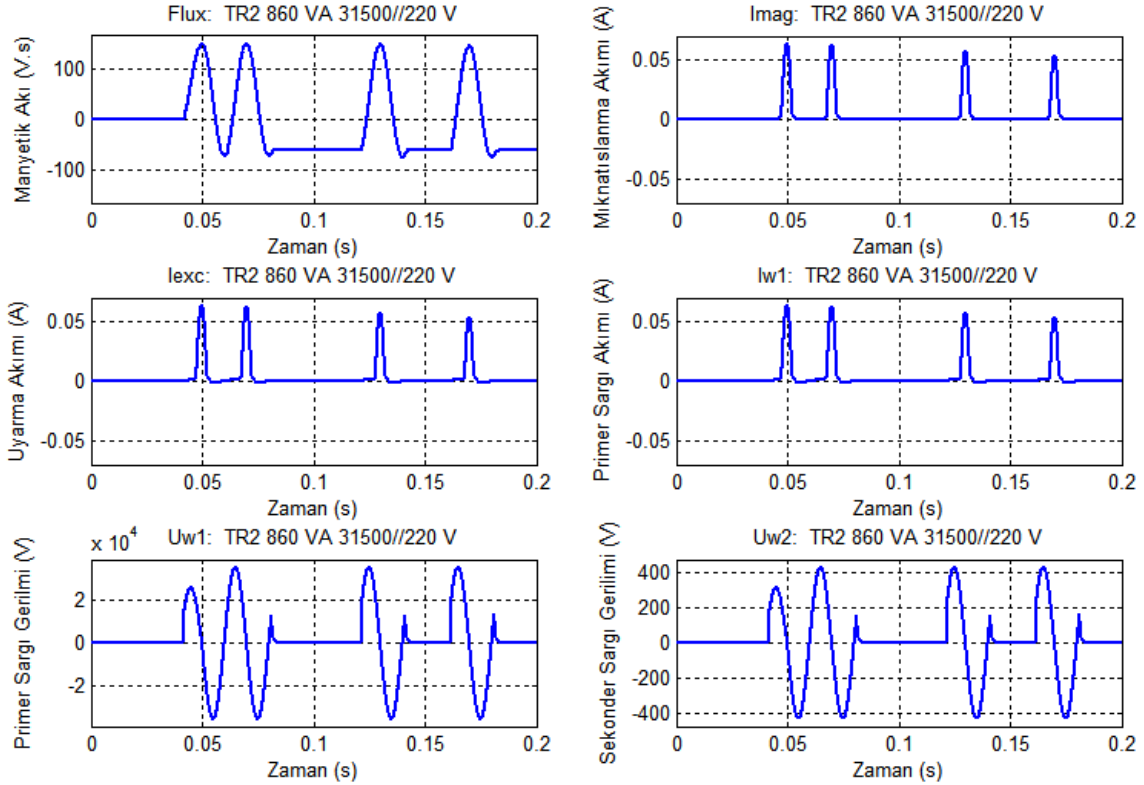


(b)

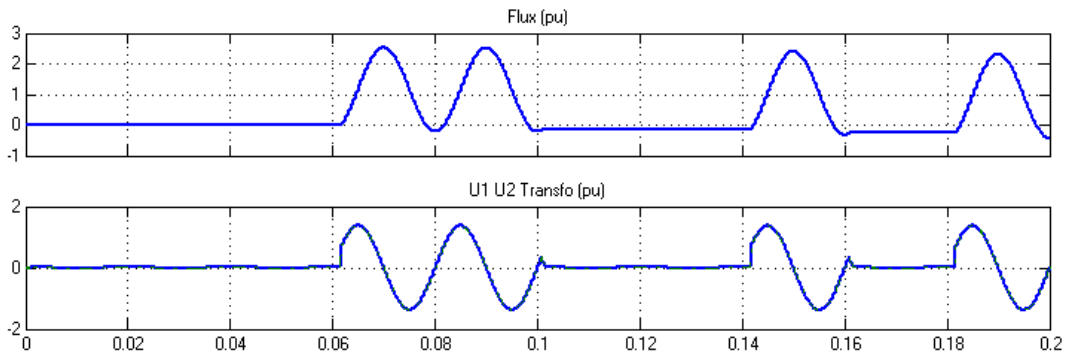
Şekil 6.13. TR1 gerilim transformatörünün parametrelerinin boşa çalışma durumundaki zamanla değişimleri

Şekil 6.14. (a) incelendiğinde TR2 gerilim trafosu primer sargısına tepe değeri $25,72$ kV olan şebeke geriliminin işaretin 30° seviyesinde uygulandığında aynı periyotun

90° durumunda işaret normal seviyesin ulaşmış ancak izleyen tam işarette gerilim yaklaşık 35 kV'u aşmıştır. Benzer şekilde sekonder sargı gerilimi içinde durum 30° seviyesinde uygulandığında aynı periyotun 90° durumunda işaret normal seviyesin ulaşmış ancak bu periyodu izleyen tam işarette gerilim yaklaşık 426,6V'u seviyesine ulaşmıştır.



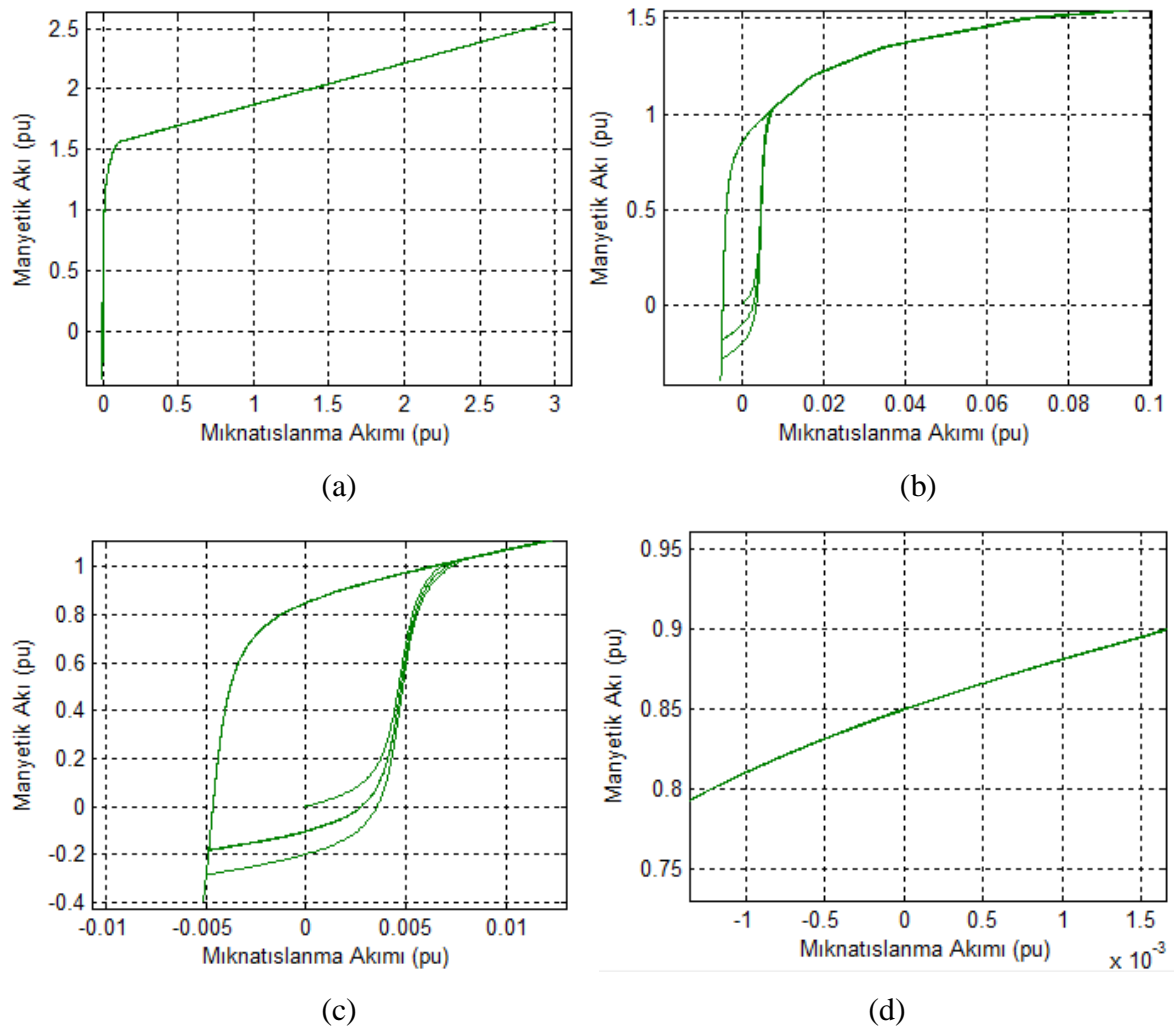
(a)



(b)

Şekil 6.14. TR2 gerilim transformatörünün parametrelerinin boştaki çalışma durumundaki zamanla değişimleri

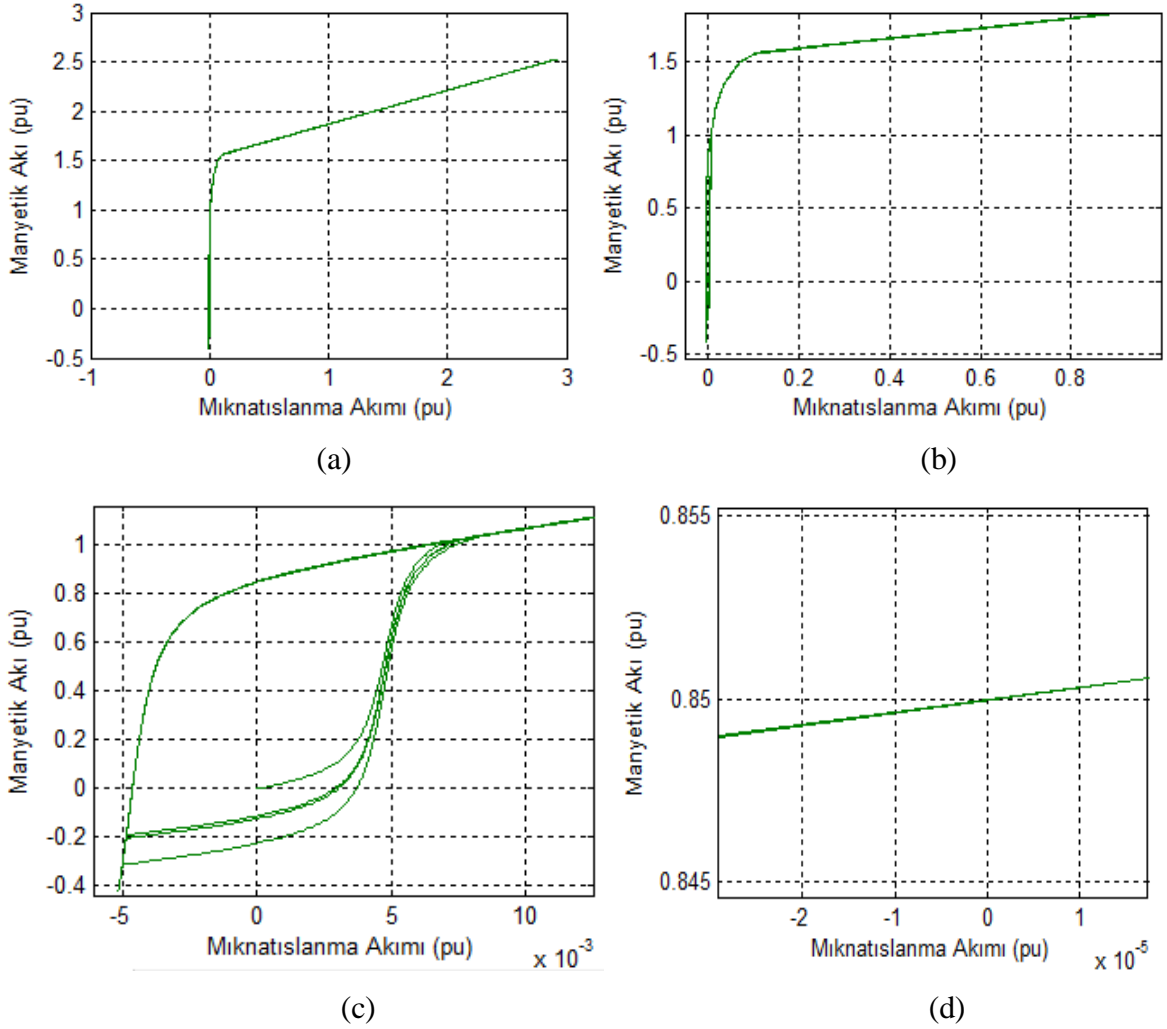
Manyetik akının zamanla değişimi Şekil 6.14. (b) incelendiğinde anahtarın ilk kapandığı 30° 'de sıfırdan başlayan bir simetrik olmayan, tepe değeri 151 V.s olan cosinüs eğrisi görülmektedir. Manyetik akının birim değer cinsinden tepe değeri pozitif alternansta 1,8933 pu seviyesinde iken negatif alternansta -0,8933 pu seviyesindedir. Ayrıca BADS-1 anahtarı ilk açıldığı anda TR1 trafosundaki kalıcı akı -0,73 pu seviyesindedir. İkinci kapama geldiği anda manyetik akı anahtarın açıldığı -0,73 pu seviyesinden değişime başlamıştır. Mıknatıslanma ve uyarma akımlarının tepe değerleri 0,05A seviyesindedir.



Şekil 6.15. TR1 gerilim transformörünün boşa çalışma durumunda $\alpha_{\text{kapama}} = 30^\circ$ ve $\alpha_{\text{acma}} = 0^\circ$ için mıknatıslanma akımı ile manyetik akı değişimi histerisiz çevrimi

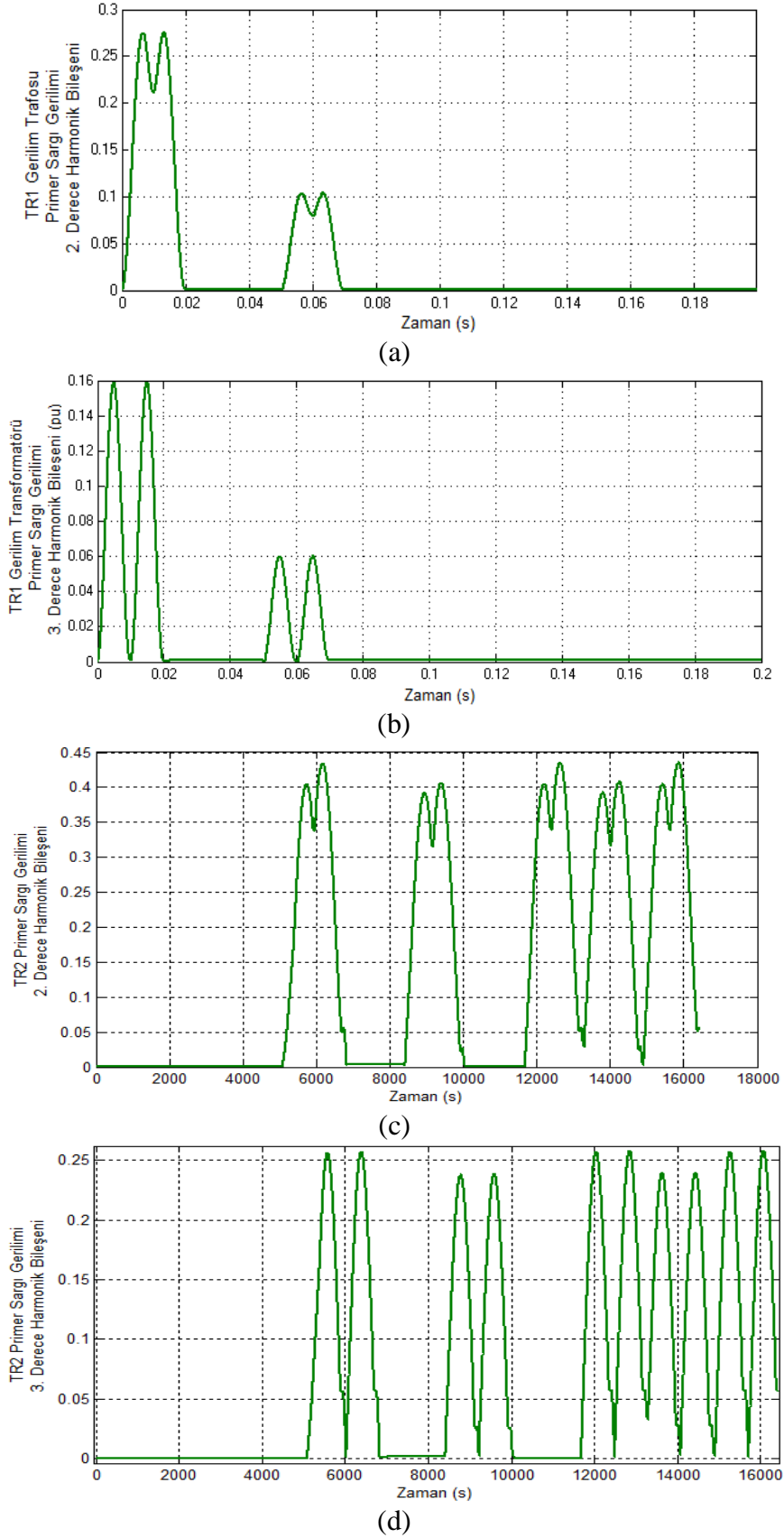
Şekil 6.15.'de TR1 yükseltici gerilim trafosuna ait mıknatıslanma akımı ile manyetik akı arasındaki değişim iki boyutlu düzlemde çizdirilmiştir. Verilen grafikler incelenirse

histerisiz eğrisi incelenirse remenans yani artık mıknatıslık $B_r=0,85\text{pu}$ değerinde olduğu görülür bu kalıcı akıyı yok edecek olan giderici kuvvet $H_g=-4,6329 \times 10^{-3}\text{pu}$ değerindedir.

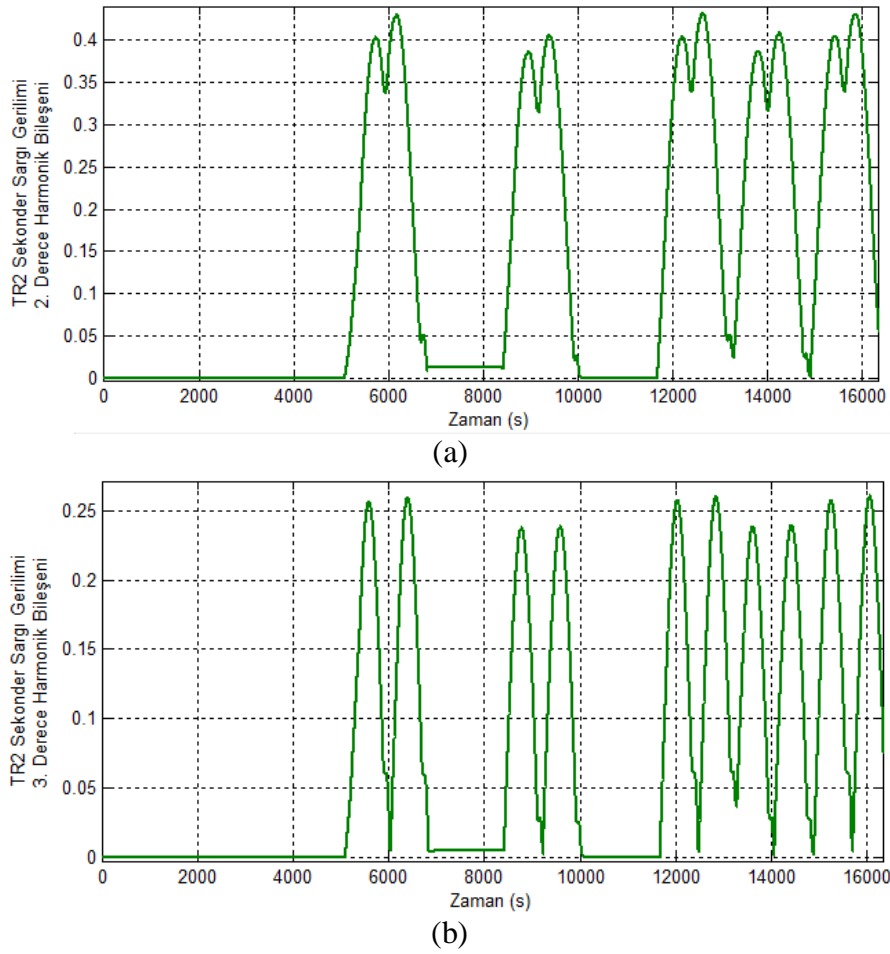


Şekil 6.16. TR2 gerilim transformatörünün boşa çalışma durumunda $\alpha_{\text{kapama}}=30^\circ$ ve $\alpha_{\text{acma}}=0^\circ$ için mıknatıslanma akımı ile manyetik akı değişimi histerisiz çevrimi

Şekil 6.16.'da TR2 indirici gerilim trafosuna ait mıknatıslanma akımı ile manyetik akı arasındaki değişim iki boyutlu düzlemde çizdirilmiştir. Detaylı olarak verilen grafikler incelenirse histerisiz eğri incelenirse remenans yani artık mıknatıslık $B_r=0,85\text{pu}$ ve $-0,2227$ değerinde olduğu görülür bu kalıcı akıyı yok edecek olan giderici kuvvet $H_g = 4,643 \times 10^{-3}\text{pu}$ ve $3,6807 \times 10^{-3}\text{pu}$ değerindedir.



Şekil 6.17. Boşta çalışma durumu $\alpha_{\text{kapama}}=30^\circ$ ve $\alpha_{\text{acma}}=0^\circ$ için; TR1 ve TR2 trafoları (pu) cinsinden fourier analizi (a) TR1-2. Der. Bil. (b) TR1-3. Der. Bil. (c) TR2-2. Der. Bil. (d)TR2-3. Der. Bil.

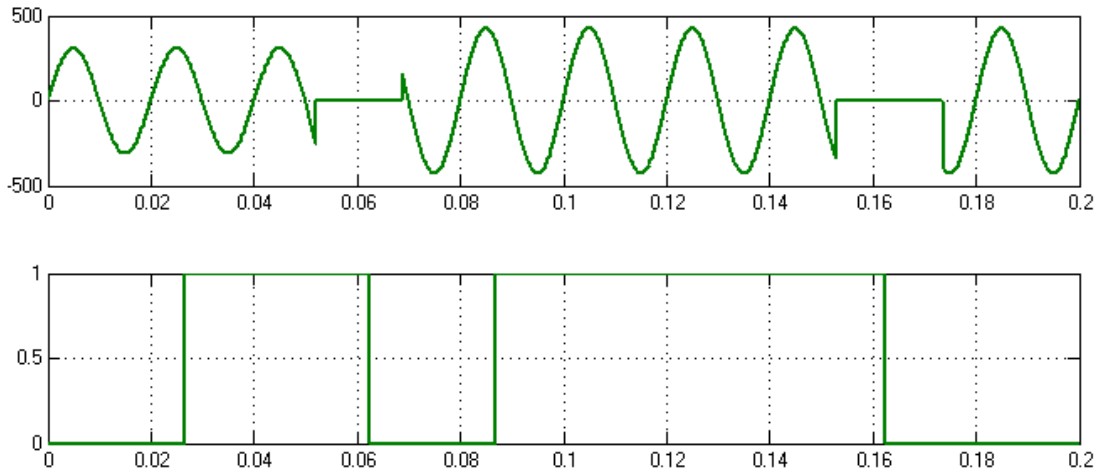


Şekil 6.18. Boşta çalışma durumu $\alpha_{\text{kapama}}=30^\circ$ ve $\alpha_{\text{acma}}=0^\circ$ için, TR2 gerilim transformatörü sekonder sargı gerilimine ait birim değer cinsinden fourier analizi (a) 2. Derece bileşeni (b) 3. Derece bileşeni

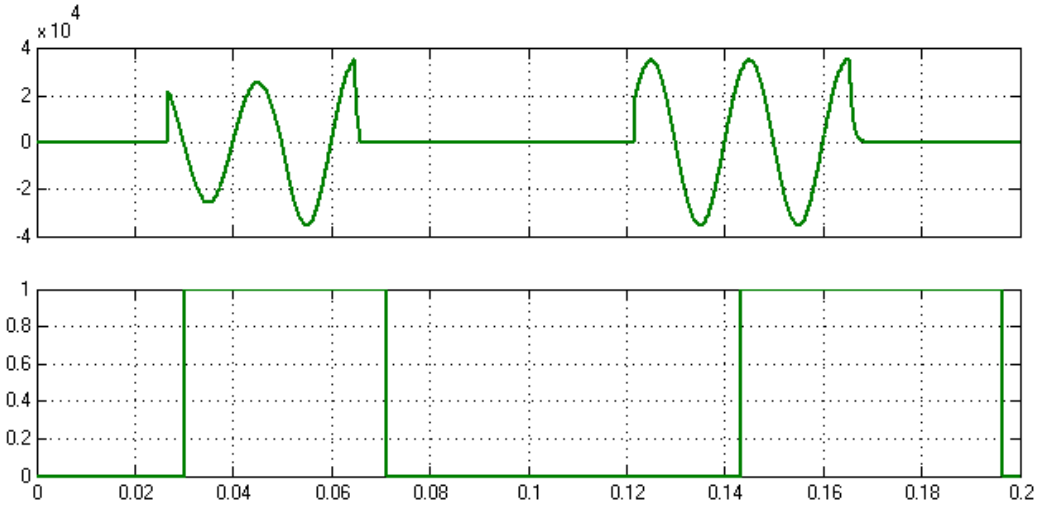
Şekil 6.17. ve Şekil 6.18.'de TR1 ve TR2 gerilim transformatörleri primer ve sekonder sargıların gerilimlerine ait birim değer (pu) cinsinden fourier analizi sonuçları görülmektedir. Burada dikkat edilecek husus eğrilerin genellikle simetrik biçimde olduğudur.

6.1.1.3. Sistemde BADS-1 Anahtarının $\alpha_{kapama}=120^\circ$ ve $\alpha_{açma}=45^\circ$ 'de ve BADS-2 Anahtarının $\alpha_{kapama}=60^\circ$ ve $\alpha_{açma}=15^\circ$ 'de Görev Yaptığı Durumun İncelenmesi

Başka bir uygulama yapılacak olursa boшта çalışan sistemde bağlı olan BADS-1 anahtarı $\alpha_{kapama} = 120^\circ$ ve $\alpha_{açma} = 45^\circ$ seçilerek ve BADS-2 anahtarı da $\alpha_{kapama} = 60^\circ$ ve $\alpha_{açma} = 15^\circ$ seçilerek kullanıcı tarafından rastgele kapama ve açma yaptığı durumlar için Şekil 6.19.'de anahtarlara gelen işaret ve anahtarların ürettiği işaretler görülmektedir.



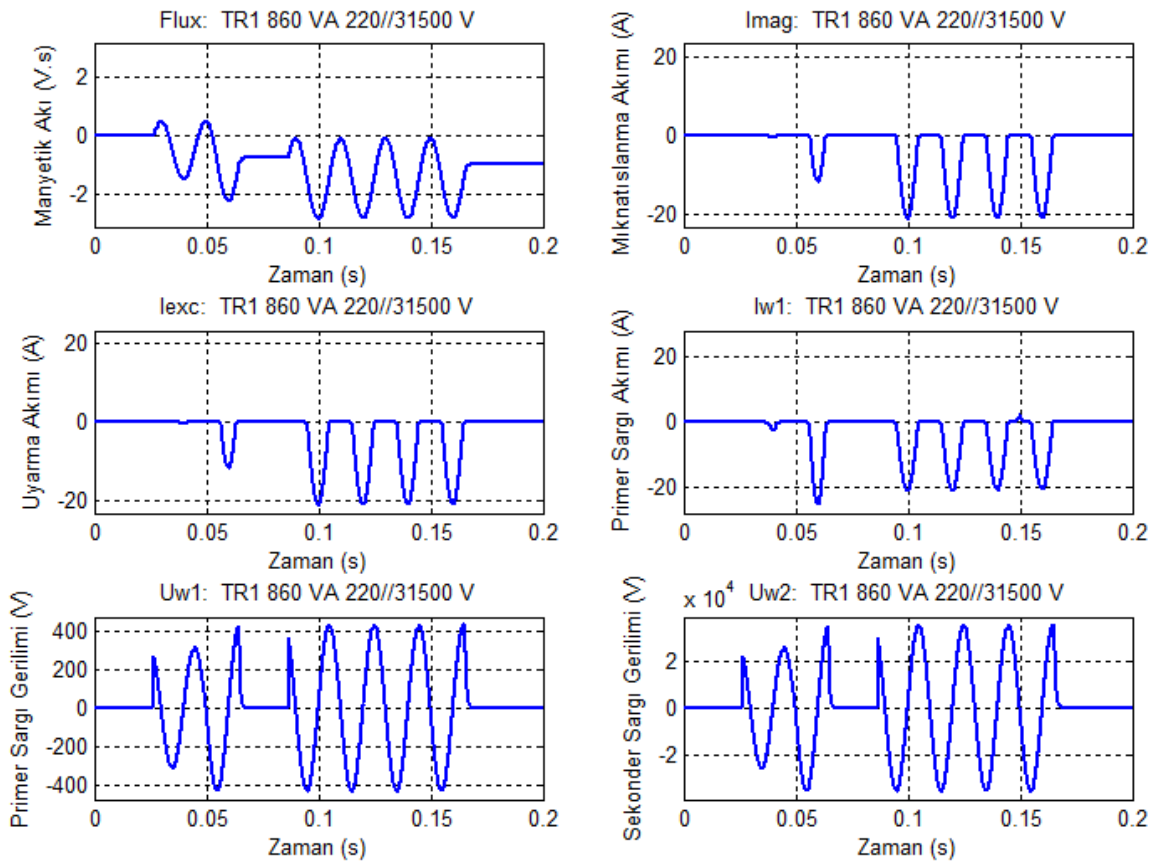
(a)



(b)

Şekil 6.19. (a) BADS-1 anahtarının girişi gelen gerilim ve BADS 1 anahtarının ürettiği kapama ve aşma işaretleri, (b) TR1 gerilim transformatörünü sekonder sargı gerilimi olan ve BADS-2 anahtarının girişi gelen gerilim ve anahtar çıkışında üretilen işaretler

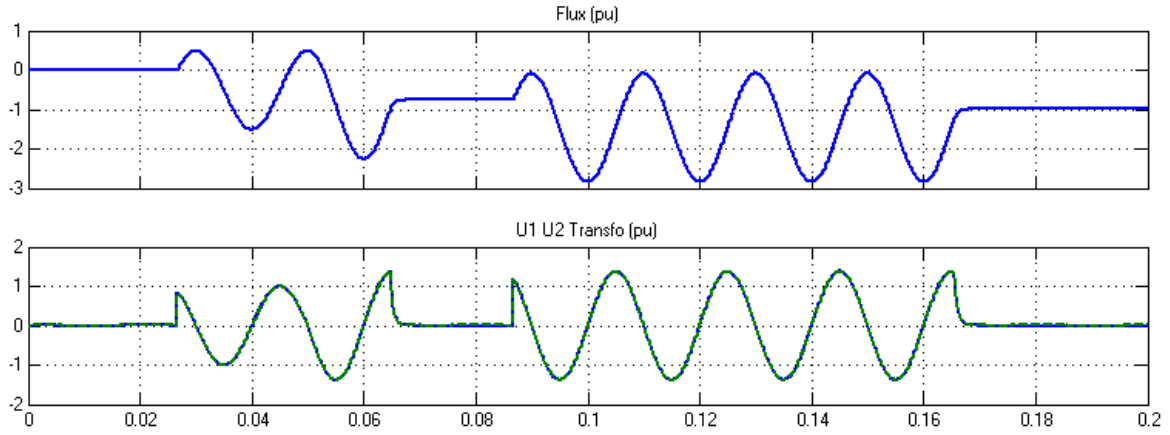
Şekil 6.20. (a) incelendiğinde TR1 gerilim trafosu primer sargısına etkin değeri 220V olan şebeke geriliminin işaretin 0° seviyesinde uygulandığında izleyen periyotun 120° durumunda işaret normal seviyesin ulaşmış ancak izleyen tam işarette gerilim yaklaşık 400V'u aşmıştır. Benzer şekilde sekonder sargı gerilimi içinde durum 120° seviyesinde uygulandığında işaret 20kV seviyesine ulaşmış ancak bu periyodu izleyen tam işarette gerilim 40kV'a seviyesine ulaşmıştır.



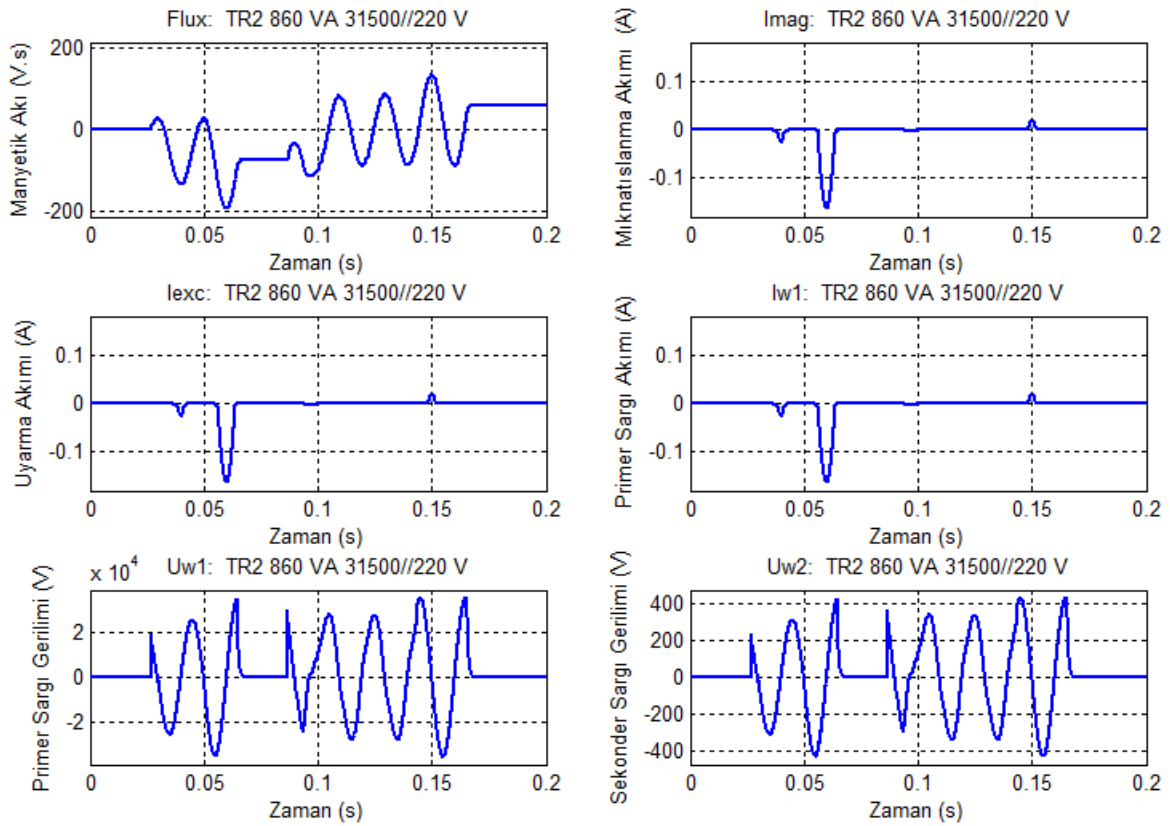
Şekil 6.20. TR1 gerilim transformatörünün parametrelerinin boşa çalışma durumundaki zamanla değişimleri

Manyetik akının zamanla değişimi Şekil 6.20. incelendiğinde anahtarın ilk kapandığı 120° 'de sıfırdan başlayan bir simetrik olmayan, tepe değeri 0,482 V.s olan cosinüs eğrisi görülmektedir. Manyetik akının birim değer cinsinden tepe değeri pozitif alternansta 0,488 pu seviyesinde iken negatif alternansta -0,1,51 pu seviyesindedir. Ayrıca BADS 1 anahtarı ilk açıldığı anda TR1 trafosundaki kalıcı akı -0,76 pu seviyesindedir.

İkinci kapama geldiği anda manyetik akı anahtarın açıldı -0,76 pu seviyesinden değişimi seviyesinden başlamıştır. Miknatıslanma ve uyarma akımlarının tepe değerleri -20 A seviyesindedir.

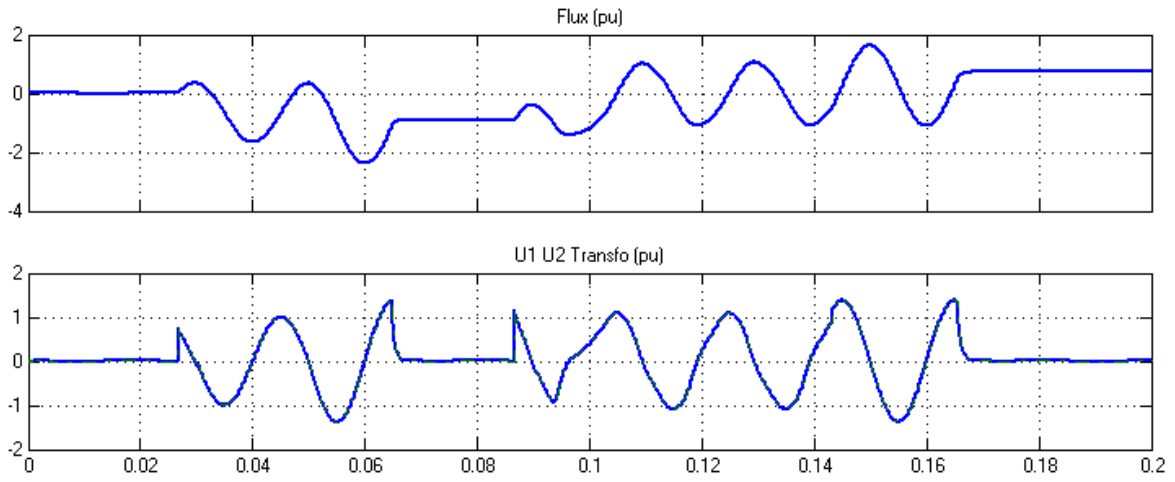


Şekil 6.21. TR1 gerilim transformatörünün birim değer cinsinden bazı parametrelerinin boşa çalışma durumundaki zamanla değişimleri



Şekil 6.22. TR2 gerilim transformatörünün birim değerler cinsinden bazı parametrelerinin boşa çalışma durumundaki zamanla değişimleri

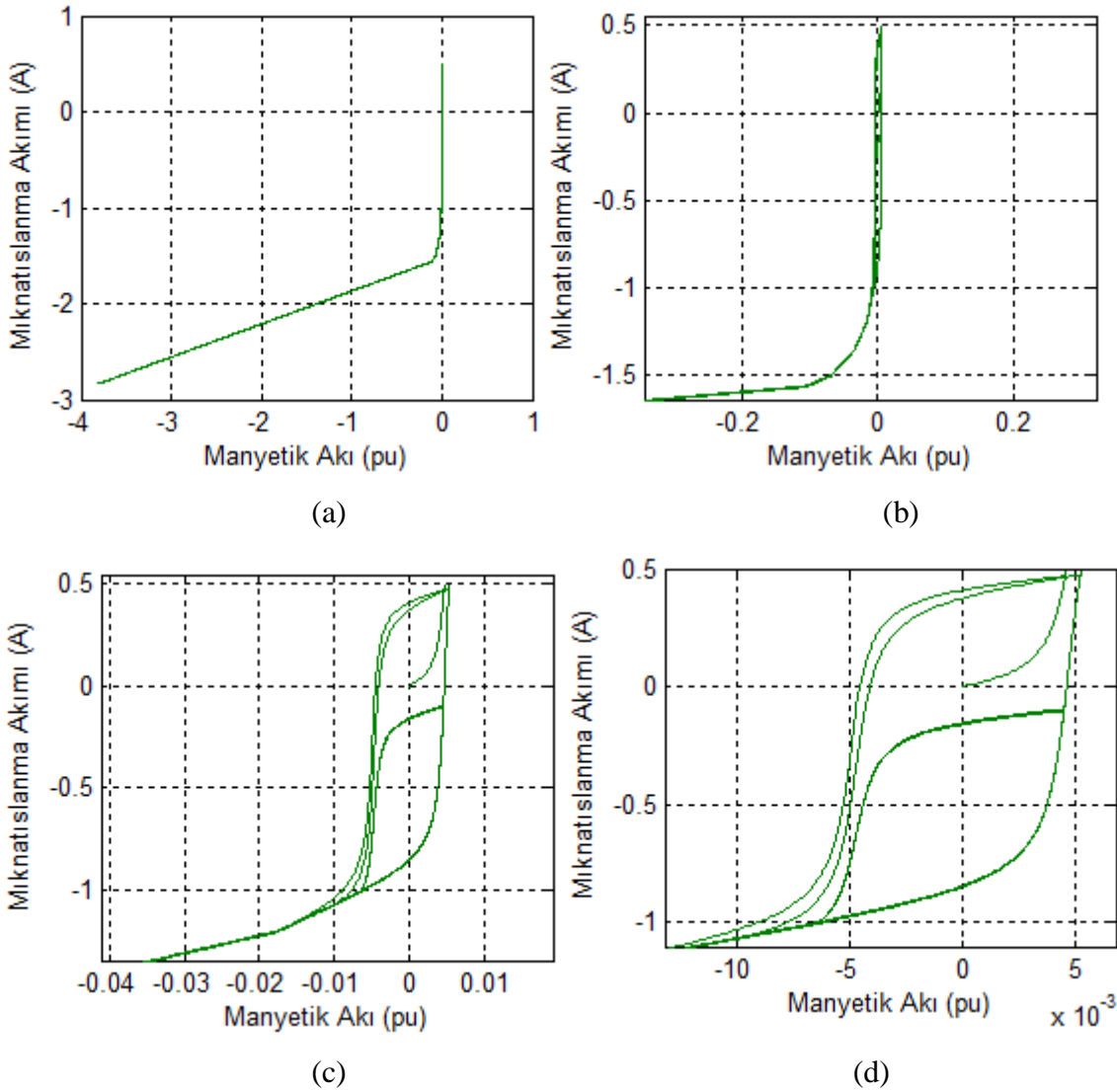
Şekil 6.22. incelendiğinde TR2 gerilim trafosu primer sargısına tepe değeri 25,72 kV olan şebeke geriliminin işaretin 120° seviyesinde uygulandığında primer sargı gerilimi 20 kV seviyesin ulaşmış ancak izleyen tam işarette gerilim yaklaşık 35 kV'u aşmıştır. Benzer şekilde sekonder sargı gerilimi içinde durum 120° seviyesinde uygulandığında aynı periyotun 90° durumunda işaret normal seviyesin ulaşmış ancak bu periyotu izleyen tam işarette gerilim yaklaşık 426,6V seviyesine ulaşmıştır.



Şekil 6.23. TR2 gerilim transformatörünün parametrelerinin boşa çalışma durumundaki zamanla değişimleri

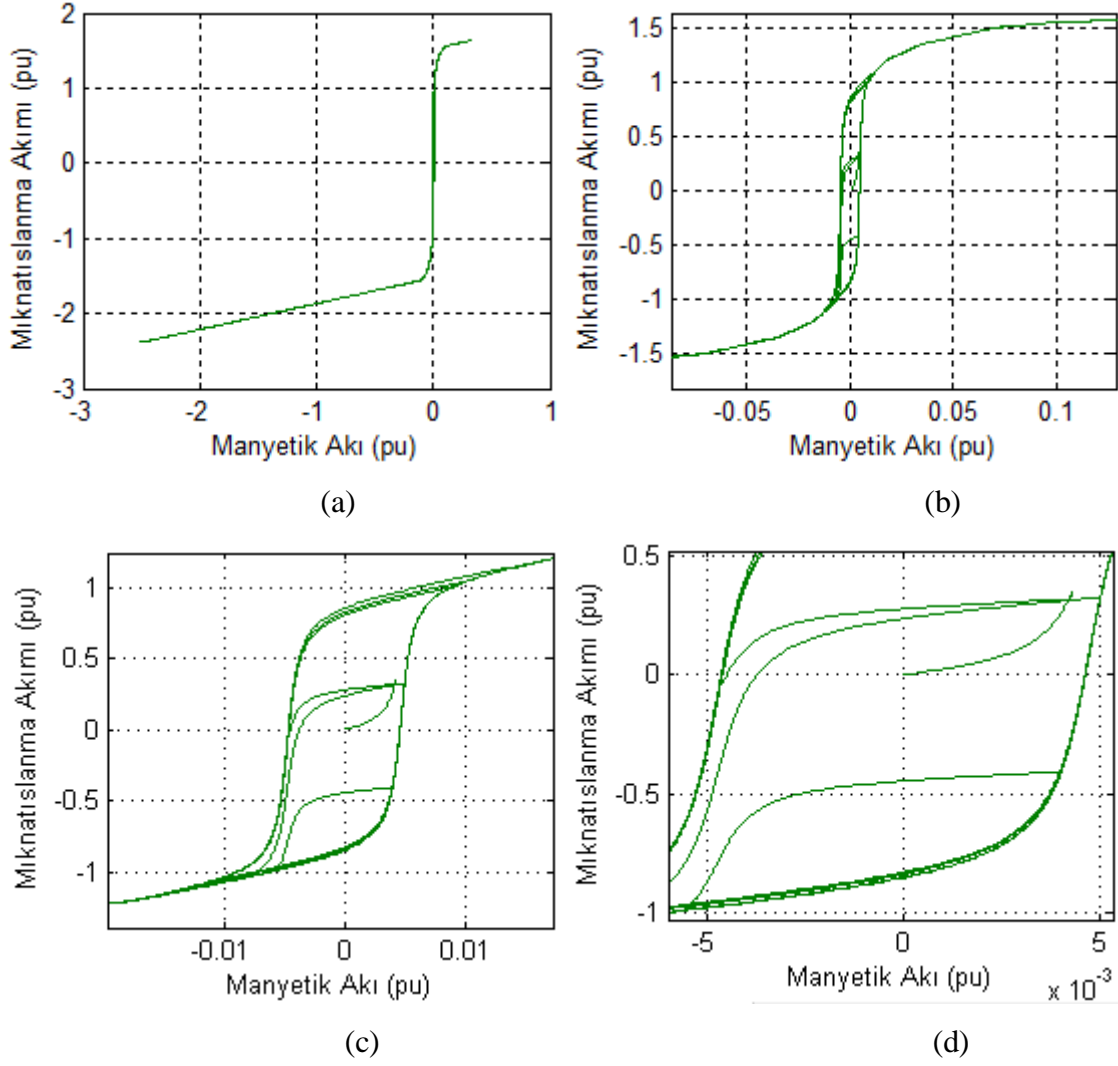
Manyetik akının zamanla değişimi Şekil 6.23. incelendiğinde anahtarın ilk kapandığı 120° 'de sıfırdan başlayan bir simetrik olmayan, tepe değeri 28,15 V.s yada 0,34 pu olan cosinüs eğrisi görülmektedir. Manyetik akının birim değer cinsinden tepe değeri pozitif alternansta en büyük 1,638 pu seviyesinde iken negatif alternansta en küçük -2,386 pu seviyesindedir.

Ayrıca BADA 1 anahtarı ilk açıldığı anda TR1 trafosundaki kalıcı akı -0,9 pu seviyesindedir. İkinci kapama geldiği anda manyetik akı anahtarın açıldığı -0,9 pu seviyesinden değişimi seviyesinden başlamıştır. Mıknatıslanma ve uyarma akımlarının tepe değerleri -0,1675 A yada -2,5 pu seviyesindedir.



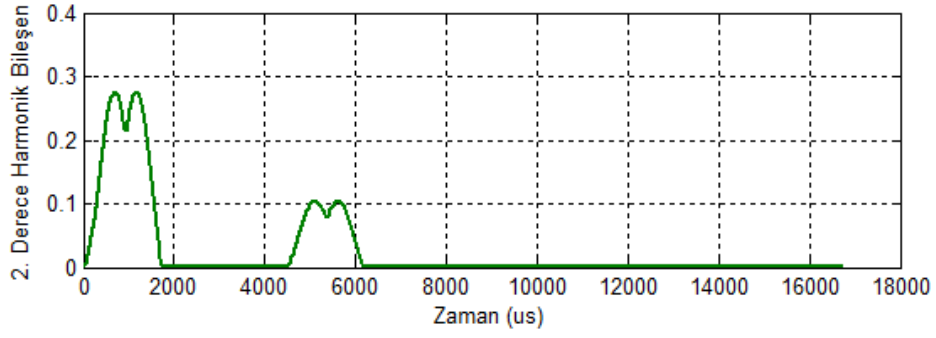
Şekil 6.24. TR1 gerilim transformatörünün boşa çalışma durumunda primerdeki BADS-1 anahtarı $\alpha_{\text{kapama}} = 120^\circ$ ve $\alpha_{\text{acma}} = 45^\circ$ için ve sekonderdeki BADS-2 anahtarı $\alpha_{\text{kapama}} = 60^\circ$ ve $\alpha_{\text{acma}} = 15^\circ$ için mıknatıslanma akımı ile manyetik akı değişimini histerisiz çevrimi

Şekil 6.24.'de TR1 yükseltici gerilim trafosuna ait mıknatıslanma akımı ile manyetik akı arasındaki değişim iki boyutlu düzlemde çizdirilmiştir. Detaylı olarak verilen grafikler incelenirse histerisiz eğrisinde remenans yani artık mıknatıslık $B_r = 0,4123$ pu ve $-0,85$ pu değerinde olduğu görülür bu kalıcı akıyı yok edecek olan giderici kuvvet $H_g = -4,5662 \times 10^{-3}$ pu ve $4,6428 \times 10^{-3}$ pu değerindedir.

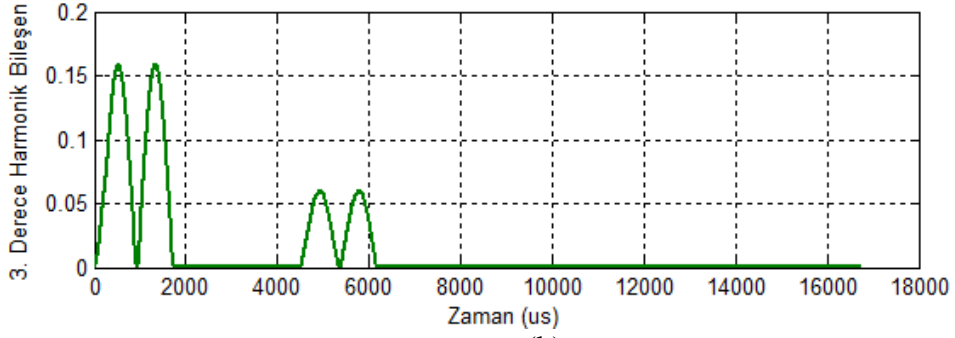


Şekil 6.25. TR2 gerilim transformatörünün boşa çalışma durumundaki mıknatıslanma akımı ile manyetik akı değişimini histerisiz çevrimi.

Şekil 6.25.'de TR2 indirici gerilim trafosuna ait mıknatıslanma akımı ile manyetik akı arasındaki değişim iki boyutlu düzlemde çizdirilmiştir. Detaylı olarak verilen grafikler incelenirse histerisiz eğri incelenirse remanans yani artık mıknatıslık $B_r = \pm 0,85$ pu değerinde olduğu görülür bu kalıcı akıyı yok edecek olan giderici kuvvet $H_g = \pm 4,643 \times 10^{-3}$ pu değerindedir.



(a)

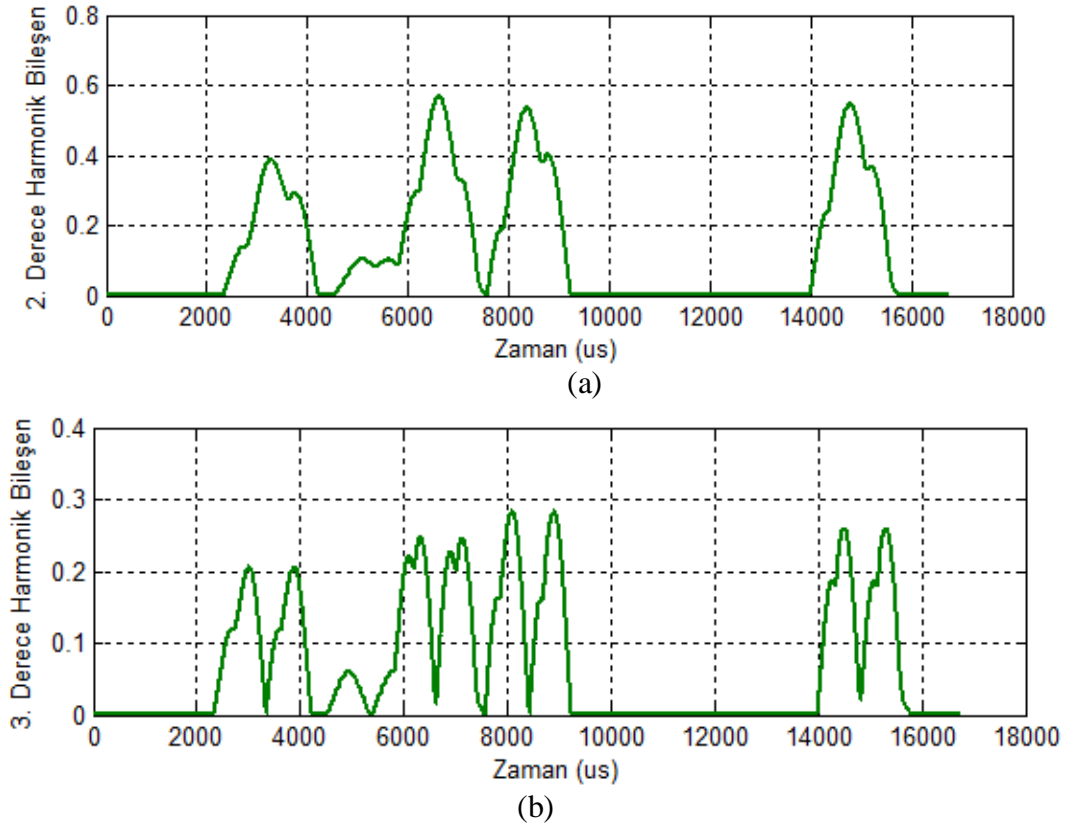


(b)

Şekil 6.26. Boşta çalışma durumu TR1 gerilim transformatörü primer sargı gerilimine ait birim değer cinsinden fourier analizi (a) 2. Derece bileşeni (b) 3. Derece bileşeni

Şekil 6.26.'de TR1 gerilim transformatörünü besleyen kaynağın gerilimi için yapılan fourier analizinin 2. ve 3. derece bileşenlerinin simetrik olduğu görülmektedir. Bu sinyaller üzerinde ferrezonans tipi teşhis edilecek olursa temel mod ferrezonans'ta olduğu görülür.

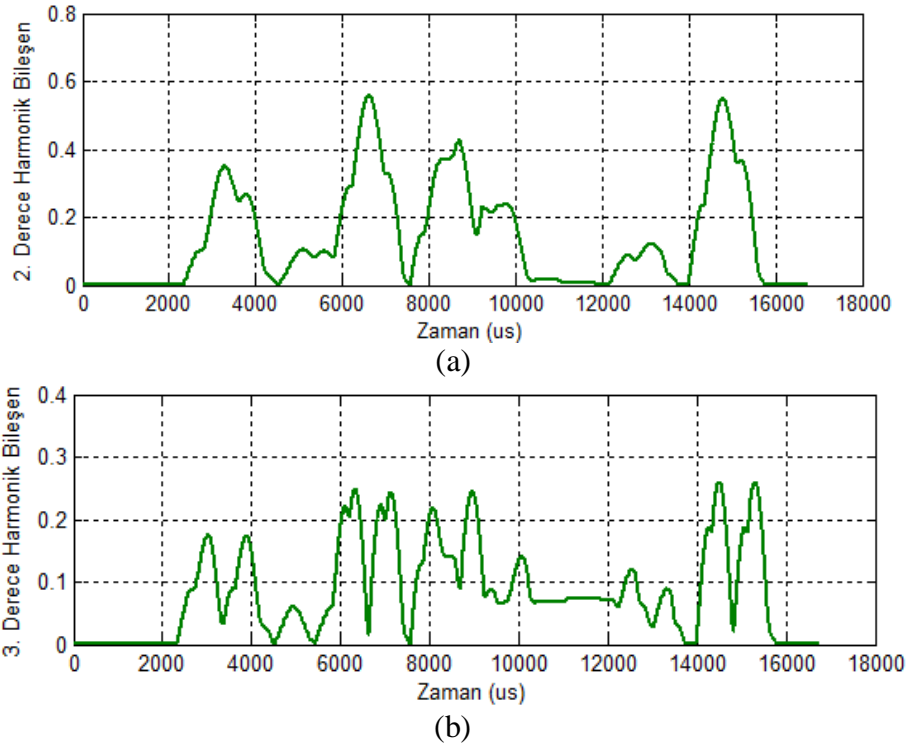
Şekil 6.27.'de TR2 gerilim transformatörünü besleyen kaynağın gerilimi için yapılan fourier analizinin 2. ve 3. derece harmonik bileşenlerinin bozulduğu görülmektedir. Bu sinyaller üzerinde ferrezonans tipi teşhis edilecek olursa alt harmonik mod ferrezonans'ta olduğu görülür.



Şekil 6.27. Boşta çalışma durumu TR2 gerilim transformatörü primer sargı gerilimine ait birim değer cinsinden fourier analizi (a) 2. Derece bileşeni (b) 3. Derece bileşeni

Şekil 6.28.'de TR2 gerilim transformatörünü besleyen kaynağın gerilimi için yapılan fourier analizinin 2. ve 3. derece bileşenlerinin simetrik olmadığı görülmektedir. Özellikle 3. derece harmonik bileşenin oldukça bozulduğu tespit edilmiştir.

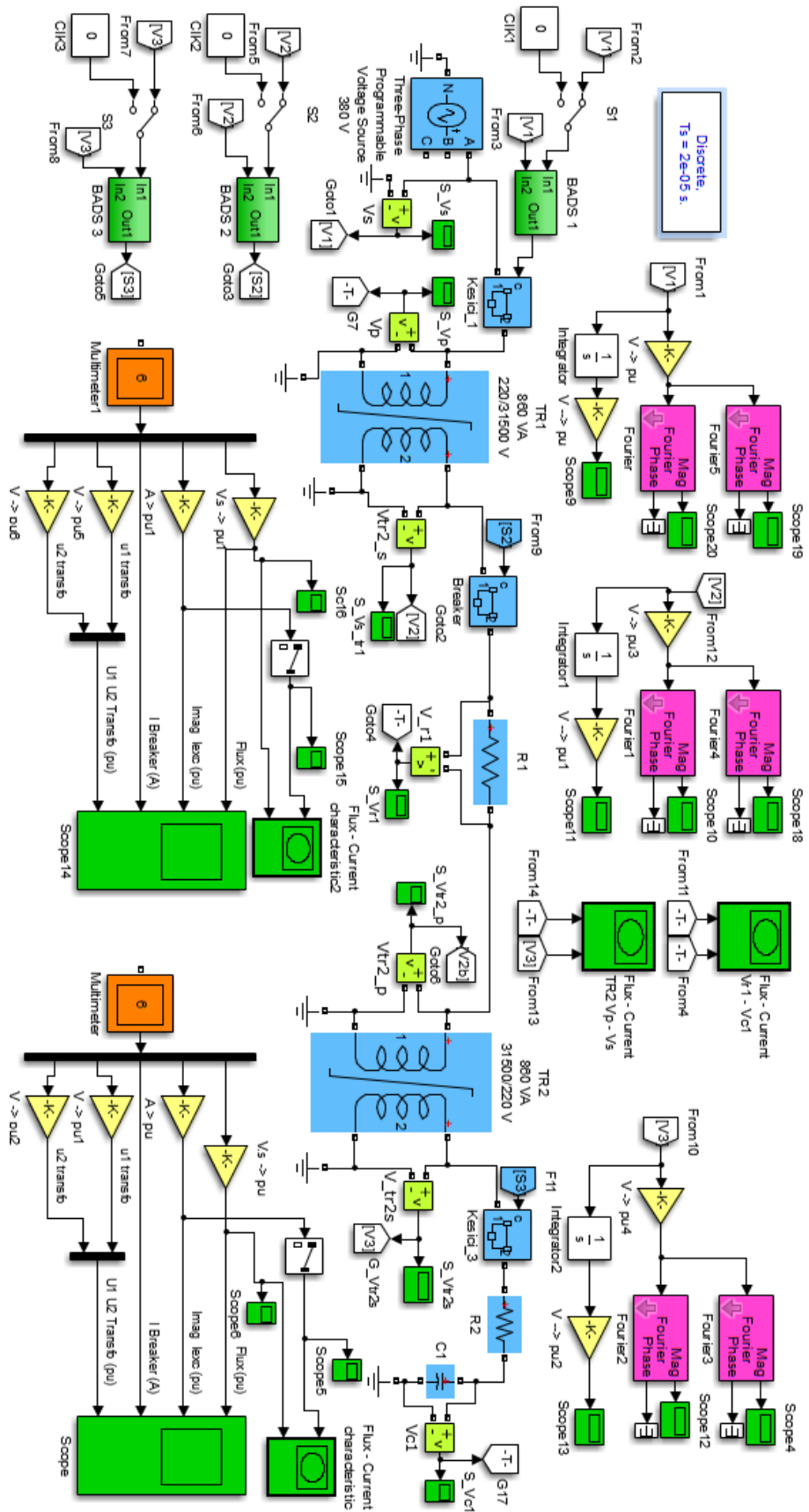
Bu sinyaller üzerinde ferrezonans tipi teşhis edilecek olursa 2. Derece harmonik sinyalin ferrezonans durumu için yarım periyodik mod için bir örnek olabileceği anlaşılmaktadır. 3. Derece harmonik bileşen işareti için ise karmaşık mod ferrezonansta olduğu söylenebilir.



Şekil 6.28. Boşta çalışma durumu TR2 gerilim transformatörü sekonder sargı gerilimine ait birim değer cinsinden fourier analizi (a) 2. Derece bileşeni (b) 3. Derece bileşeni

6.1.2. Yüklü Çalışan Sistemin Benzetimi

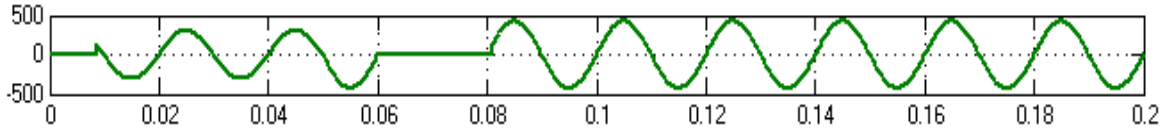
Yüksek gerilim sistemlerinde ölçüm amaçlı kullanılan gerilim trafolarının yüklü çalışma durumlarında elektriksel parametrelerin incelenmesi için oluşturulan Matlab/Simulink ortamında hazırlanan benzetim bloğu Şekil 6.29.'da verilmiştir. Tasarlanan sistem 220 V etkin değere sahip kaynaktan aldığı gerilimi ölçüp BADS-1 nolu açılı denetim sisteminin kontrol ettiği Kesici-1 isimli devre kesiciye vermiştir. BADS-1 isimli açılı denetim sistemi alternatif tipte olan kaynak gerilimini ölçüp kullanıcının istediği hassasiyette kapama ve açma yaparak ve beraber çalıştığı kesiciyi kontrol etmektedir. Kesici 1 çıkışı TR1 isimli gerilim transformatörünün primer sargısına başlanmaktadır. Aynı transformatörün sekonder sargı gerilimi ölçüldükten sonra BADS-2 isimli açılı denetim sistemi ve Kesici-2'ye bağlanmıştır. Kesici-2, önce R1 direncine daha sonrada TR2 gerilim transformatörünün primer sargısına bağlanmıştır. Aynı transformatörün sekonder gerilimi ölçülüp BADS-3'ün kontrol ettiği Kesici-3'e bağlanmıştır. Kesici-3 çıkışı bir direnç ve kapasiteye bağlanmış ve ferrezonansın incelenmesine imkân sağlayacak hale getirilmiştir.



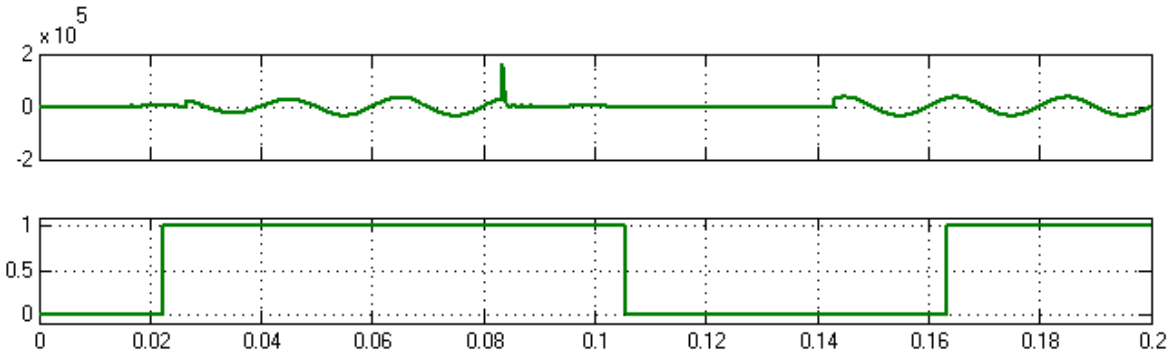
Şekil 6.29. Yük Bağlanmış Tam Sistemin Matlab/Simulink Görüntüsü

6.1.2.1. BADS-1 Anahtarının $\alpha_{\text{kapama}}=120^\circ$ - $\alpha_{\text{açma}}=45^\circ$ 'de ve BADS-2 Anahtarının $\alpha_{\text{kapama}}=60^\circ$ - $\alpha_{\text{açma}}=15^\circ$ 'de Görev Yaptığı Durumun İncelenmesi

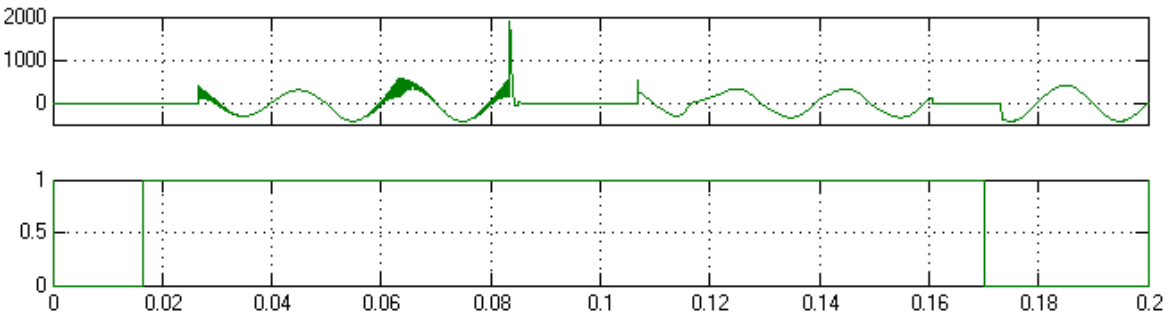
Ana sisteme yük başlandıktan sonra başka bir uygulama yapılacak olursa boşta çalışan sistemde bağlı olan BADS-1 anahtarı $\alpha_{\text{kapama}} = 120^\circ$ ve $\alpha_{\text{açma}} = 45^\circ$ seçilerek ve BADS-2 anahtarı da $\alpha_{\text{kapama}} = 60^\circ$ ve $\alpha_{\text{açma}} = 15^\circ$ seçilerek kullanıcı tarafından rastgele kapama va açma yaptığı durumlar için Şekil 6.30.'da anahtarlara gelen işaret ve anahtarların ürettiği işaretler görülmektedir.



(a)



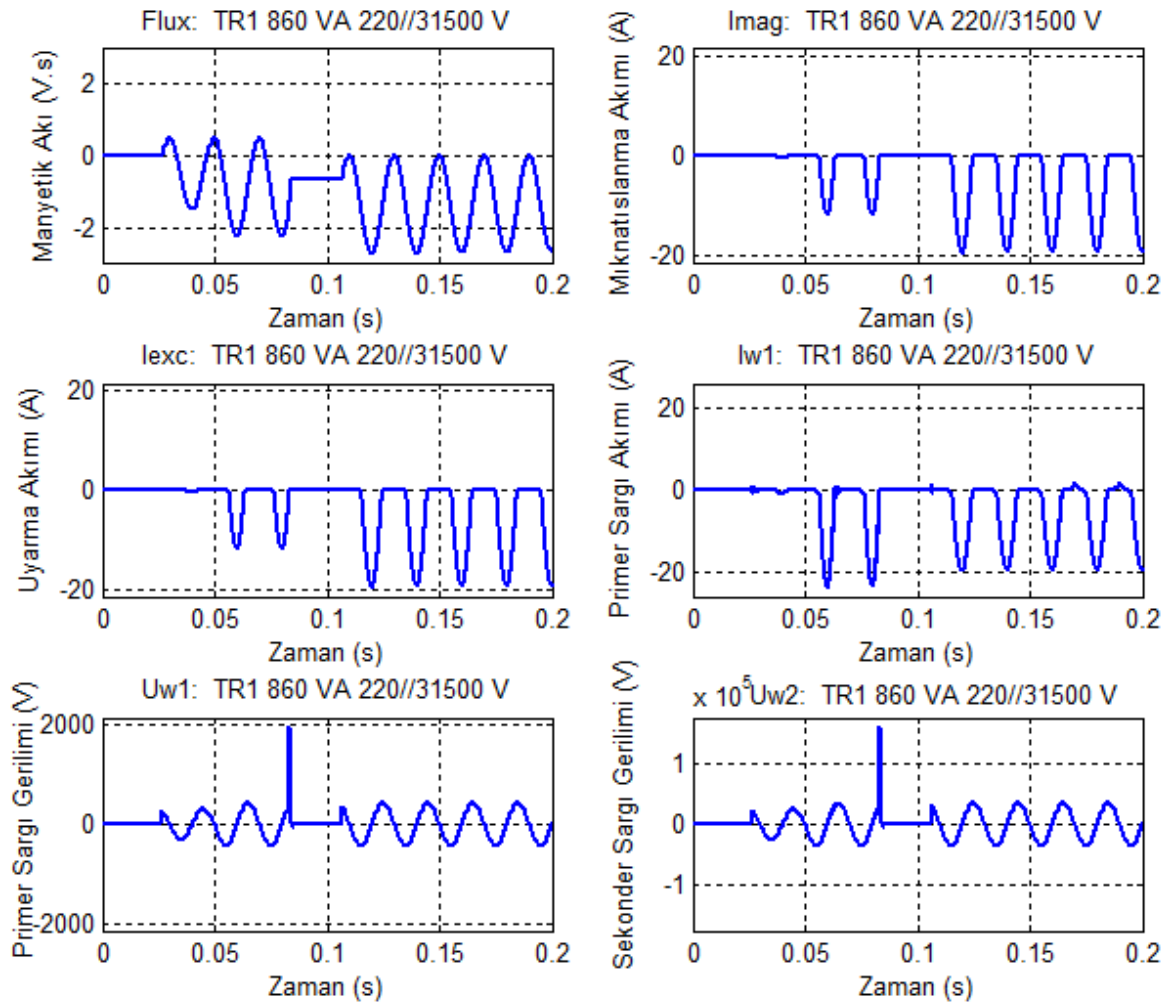
(b)



(c)

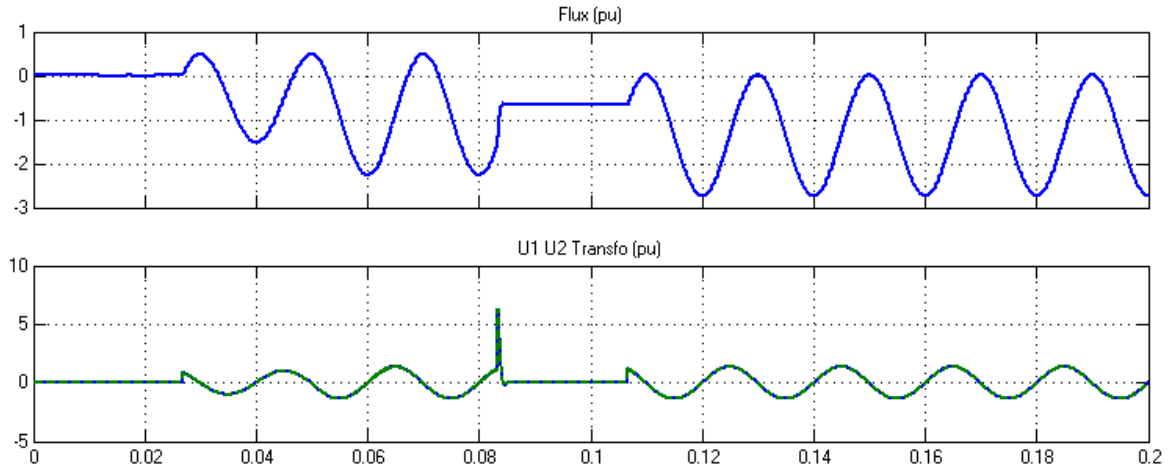
Şekil 6.30. (a) BADS 1, (b) BADS 2 ve (c) BADS 3 açma kontrol sistemine gelen gerilim ve bunların kesiciler için ürettiği kapama ve açma işaretleri

Şekil 6.30. incelendiğinde TR1 gerilim trafosu primer sargısına etkin değeri 220V olan şebeke geriliminin işaretinin ilk periyotunun 150° seviyesinde uygulandığında izleyen periyotun 120° durumunda BADS-1 ve Kesici 1 ile işaret normal seviyesin ulaşmış ancak izleyen tam işarette gerilim yaklaşık 400V'u aşmıştır. Benzer şekilde sekonder sargı gerilimi içinde durum 120° seviyesinde uygulandığında işaret 20kV seviyesine ulaşmış ancak bu periyodu izleyen tam işarette gerilim 40kV'a yaklaşmıştır seviyesine ulaşmıştır. Ancak en dikkat çekici değişim BADS1'e kaynak geriliminin 4. Periyotunda gelen açma işareti neticesinde 5. Periyotun 45° 'sinde Kesici 1 açıldığında primer sargı gerilimi yaklaşık 6 katı seviyesi olan 2 kV'a ulaşmış, sekonder sarı gerilimi de 160 kV'u aşan bir darbe üretmiştir. Bu darbe bağlı olan elektriksel sistem için çok yıkıcı olabilir.



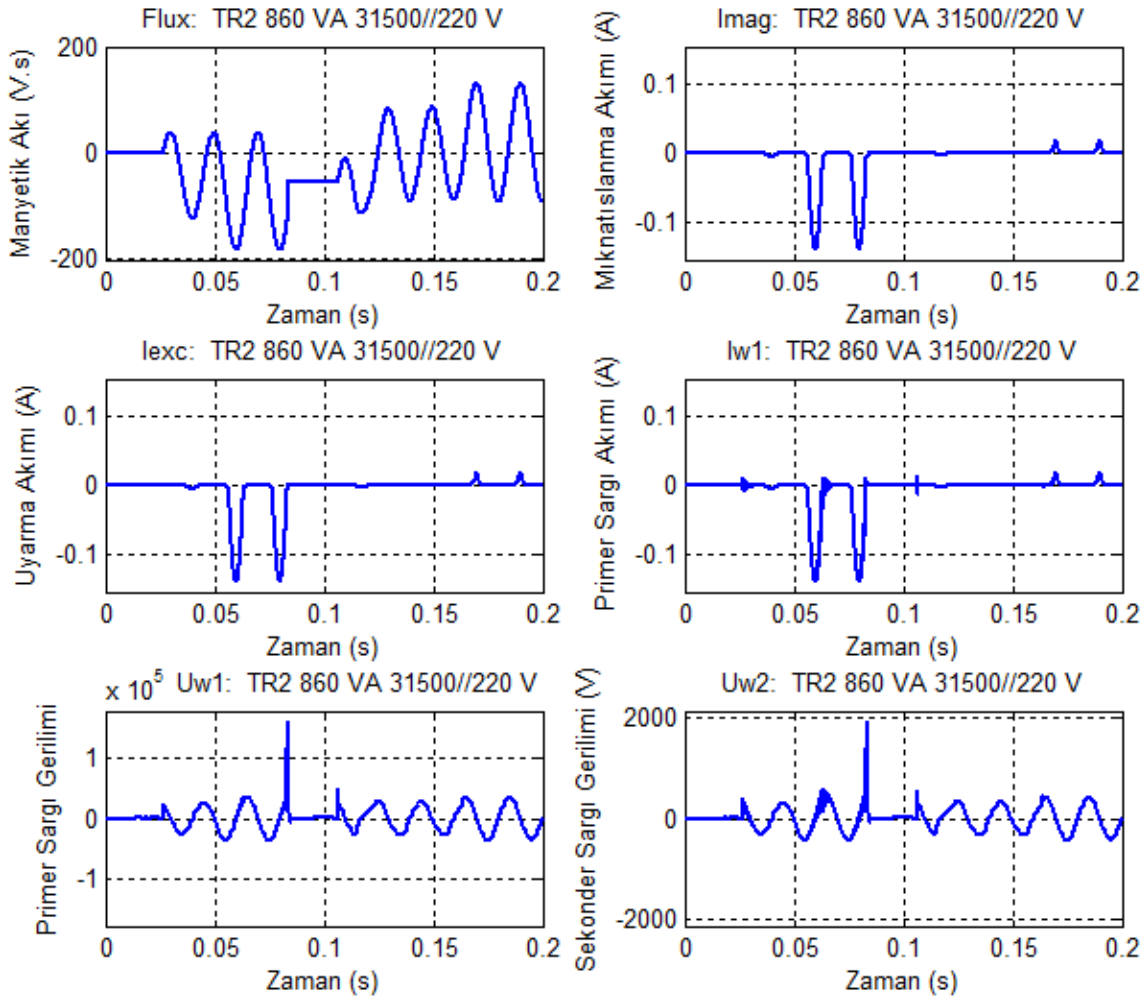
Şekil 6.31. ADS kontrollü kesicilerin bağlı olduğu, TR1 gerilim transformatörünün parametrelerinin yüklü çalışma durumundaki zamanla değişimleri

Manyetik akının zamanla değişimi Şekil 6.32. incelendiğinde anahtarın ilk kapandığı 120° 'de sıfırdan başlayan bir simetrik olmayan, tepe değeri 0,488 pu olan cosinüs eğrisi görülmektedir. Manyetik akının birim değer cinsinden tepe değeri pozitif alternansta 0,5 pu seviyesinde iken negatif alternansta -2,258 pu seviyesindedir. Ayrıca BADS- anahtarı ilk açıldığı anda TR1 trafosundaki kalıcı akı -0,66 pu seviyesindedir. İkinci kapama geldiği anda manyetik akı anahtarın açıldı -0,66 pu seviyesinden değişimi seviyesinden başlamıştır. Mıknatıslanma ve uyarma akımlarının tepe değerleri -20 A seviyesindedir.

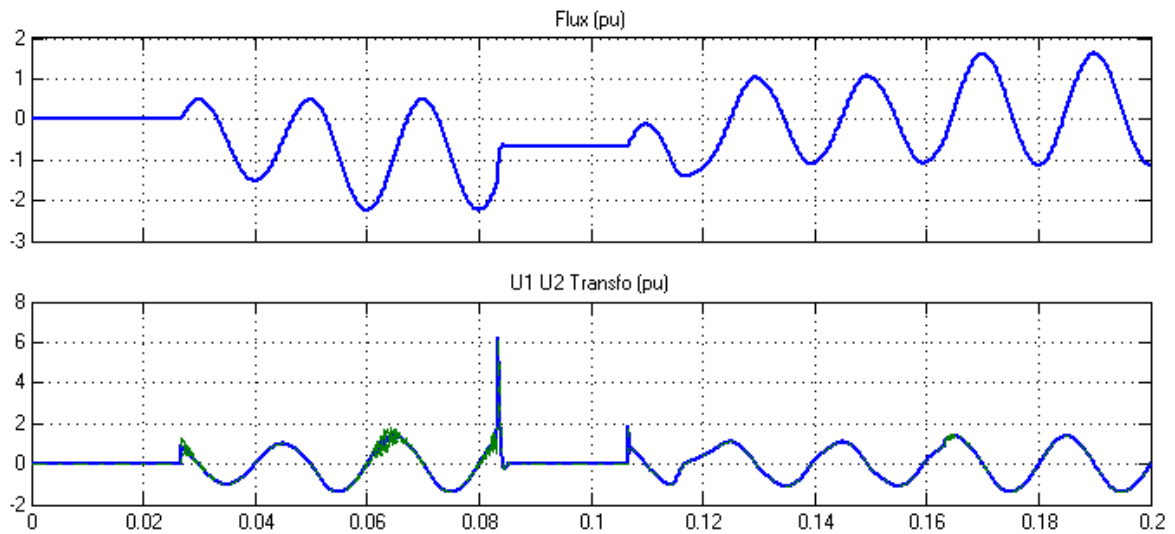


Şekil 6.32. TR1 gerilim transformatörünün birim değer cinsinden manyetik akı, primer ve sekonder gerilimlerinin yüklü çalışma durumundaki zamanla değişimleri

Şekil 6.33. incelendiğinde TR2 gerilim trafosu primer sargısına tepe değeri 23,5 kV olan şebeke geriliminin işaretin 120° seviyesinde uygulandığında primer sargı gerilimi 20 kV seviyesin ulaşmış ancak izleyen tam işarette gerilim yaklaşık 36 kV'u aşmıştır. Benzer şekilde sekonder sargı gerilimi içinde durum 120° seviyesinde uygulandığında aynı periyotun 90° durumunda işaret normal seviyesin ulaşmış ancak bu periyotu izleyen tam işarette gerilim yaklaşık 2000 V seviyesine ulaşmıştır.

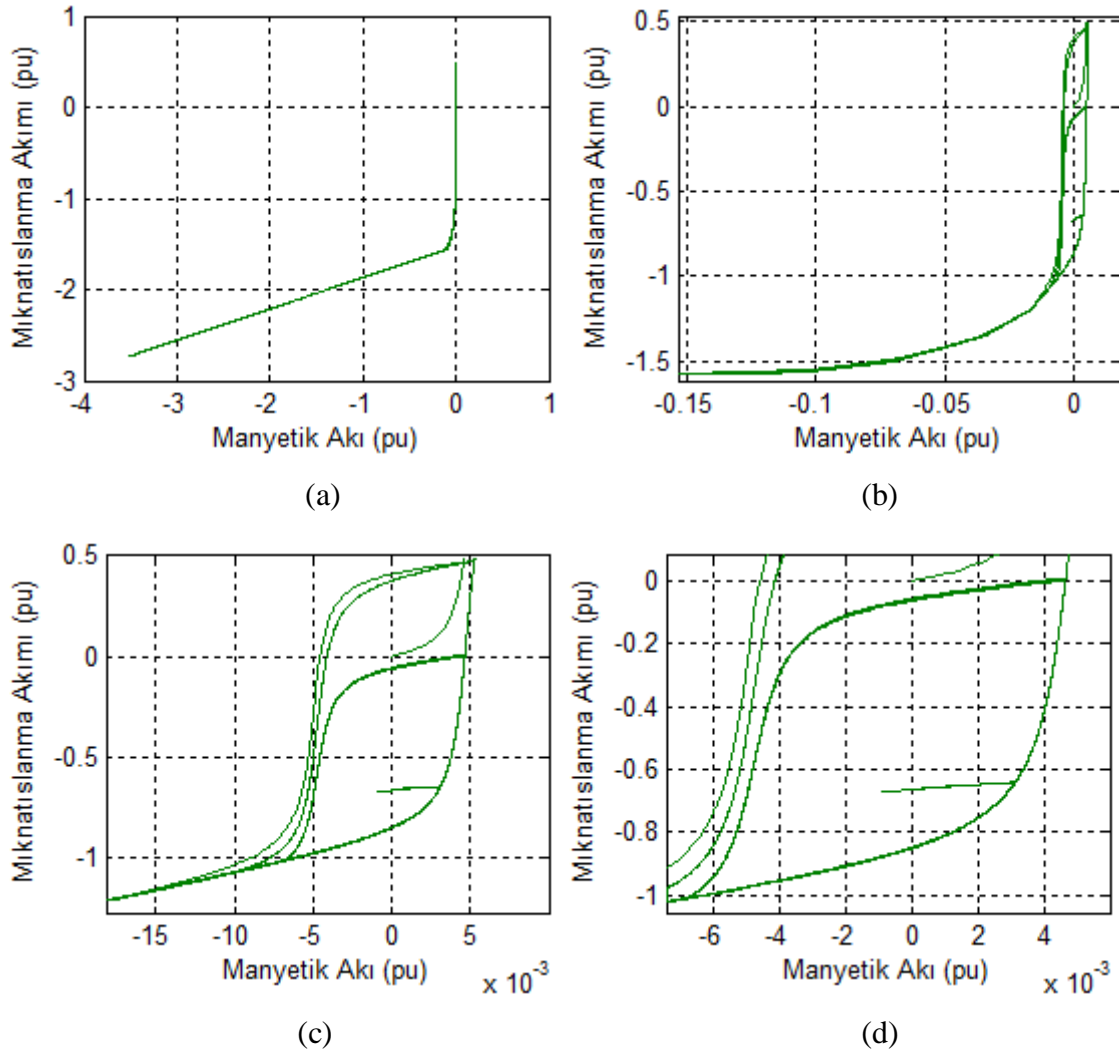


Şekil 6.33. TR2 gerilim transformatörünün birim değer cinsinden bazı parametrelerinin boşa çalışma durumundaki zamanla değişimleri



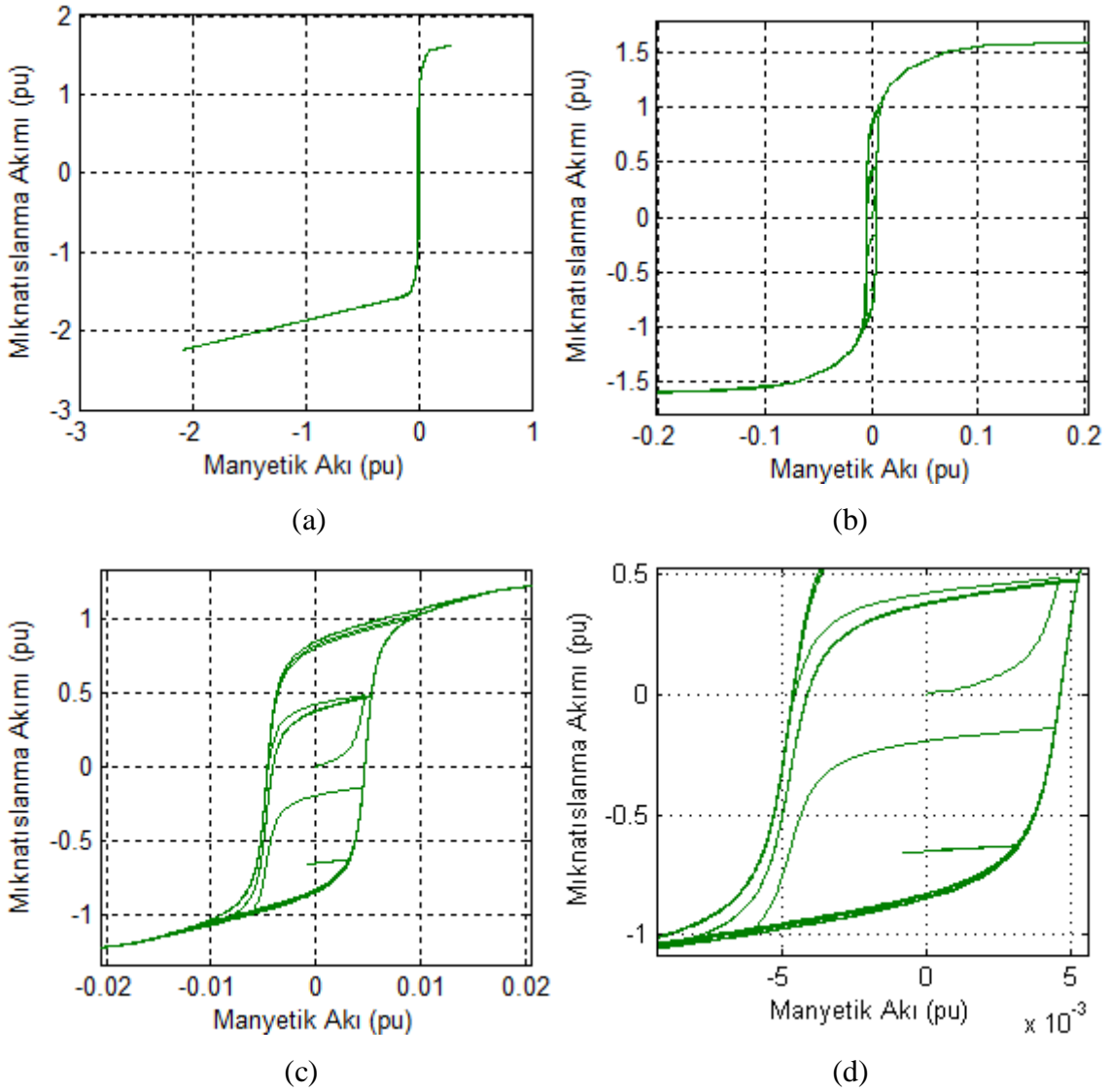
Şekil 6.34. TR2 gerilim transformatörünün birim değer cinsinden manyetik akı, primer ve sekonder gerilimlerinin yüklü çalışma durumundaki zamanla değişimleri

Manyetik akının zamanla değişimi Şekil 6.34. incelendiğinde anahtarın ilk kapandığı 120° 'de sıfırdan başlayan bir simetrik olmayan, tepe değeri 40 V.s yada 0,488 pu olan cosinüs eğrisi görülmektedir. Manyetik akının birim değer cinsinden tepe değeri pozitif alternansta en büyük 1,618 pu seviyesinde iken negatif alternansta en küçük -2,24 pu seviyesindedir. Ayrıca BADS-1 anahtarı ilk açıldığı anda TR1 trafosundaki kalıcı akı -0,65 pu seviyesindedir. İkinci kapama geldiği anda manyetik akı anahtarın açıldığı -0,65 pu seviyesinden değişimi seviyesinden başlamıştır. Mıknatıslanma ve uyarma akımlarının tepe değerleri -0,139 A yada -3,48 pu seviyesindedir.



Şekil 6.35. TR1 gerilim transformatörünün yüklü çalışma durumunda primerdeki BADS-1 anahtarı $\alpha_{\text{kapama}} = 120^\circ$ ve $\alpha_{\text{acma}} = 45^\circ$ için ve sekonderdeki BADS-2 anahtarı $\alpha_{\text{kapama}} = 60^\circ$ ve $\alpha_{\text{acma}} = 15^\circ$ için mıknatıslanma akımı ile manyetik akı değişimini histerisiz çevrimi.

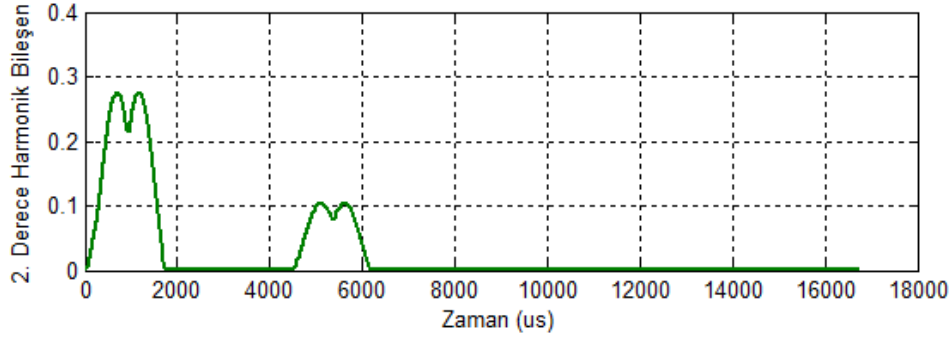
Şekil 6.35.'de TR1 yükseltici gerilim trafosuna ait mıknatıslanma akımı ile manyetik akı arasındaki değişim iki boyutlu düzlemde çizdirilmiştir. Detaylı olarak verilen grafikler incelenirse histerisiz eğrisinde remenans yani artık mıknatıslık $B_r = 0,4096$ pu ve $-0,851$ pu değerinde olduğu görülür bu kalıcı akıyı yok edecek olan giderici kuvvet $H_g = -4,566 \times 10^{-3}$ pu ve $4,6429 \times 10^{-3}$ pu değerindedir.



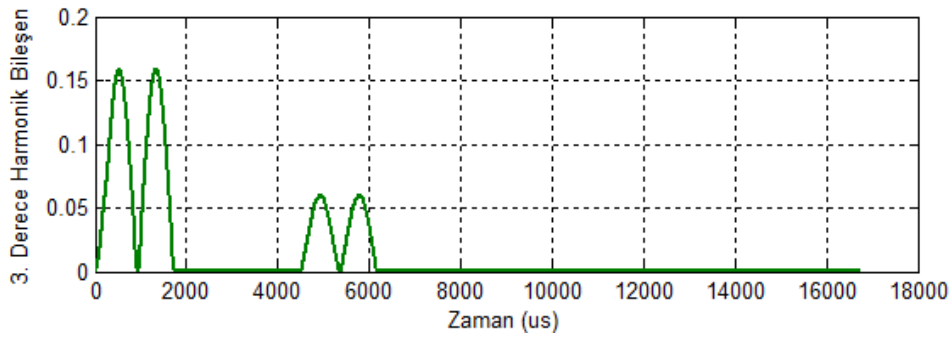
Şekil 6.36. TR2 gerilim transformatörünün yüklü çalışma durumundaki mıknatıslanma akımı ile manyetik akı değişimini histerisiz çevrimi.

Şekil 6.36.'da TR2 indirici gerilim trafosuna ait mıknatıslanma akımı ile manyetik akı arasındaki değişim iki boyutlu düzlemde çizdirilmiştir. Detaylı olarak verilen grafikler

incelenirse histerisiz eğri incelenirse remenans yani artık mıknatıslık $Br = \pm 0,85$ pu değerinde olduğu görülür bu kalıcı akıyı yok edecek olan giderici kuvvet $Hg = \pm 4,64 \times 10^{-3}$ pu değerindedir.



(a)

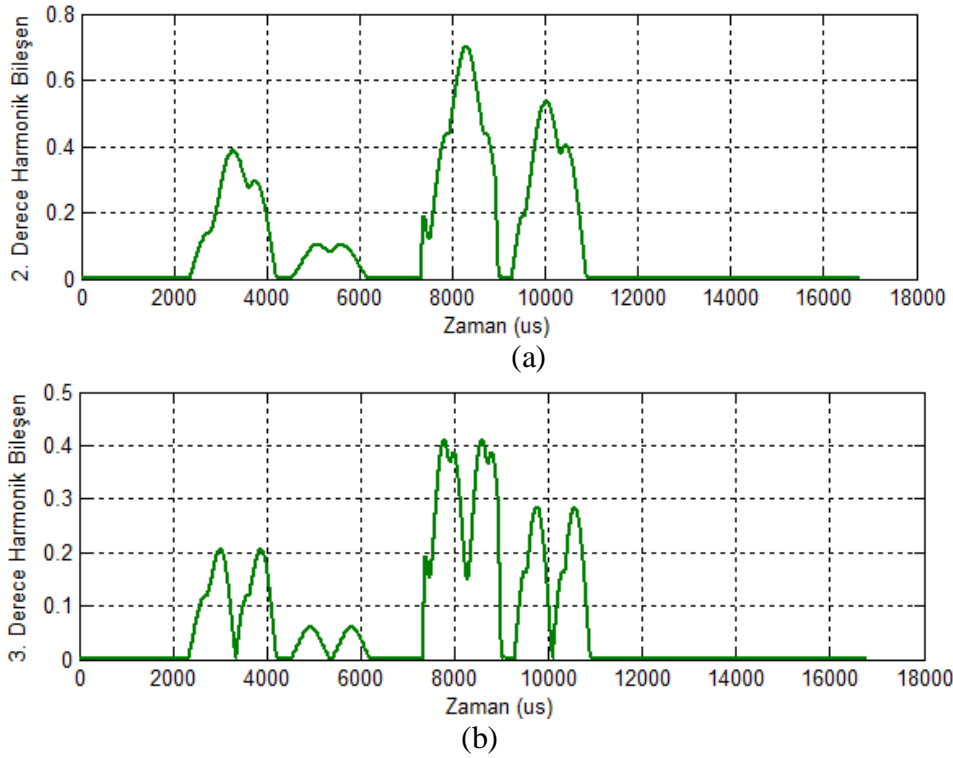


(b)

Şekil 6.37. Yüklü çalışma durumu TR1 gerilim transformatörü primer sargı gerilimine ait birim değer cinsinden fourier analizi (a) 2. Derece bileşeni (b) 3. Derece bileşeni

Şekil 6.37.'de TR1 gerilim transformatörünü besleyen kaynağın gerilimi için yapılan fourier analizinin 2. ve 3. Derece bileşenlerinin düzgün görülmektedir. Bu sinyaller üzerinde ferrezonans tipi teşhis edilecek olursa temel mod ferrezonansta olduğu görülür.

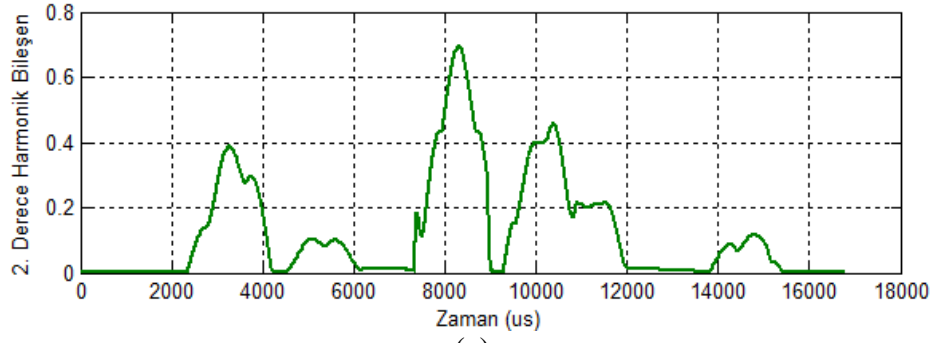
Şekil 6.38.'de TR2 gerilim transformatörünü besleyen kaynağın gerilimi için yapılan fourier analizinin 2. ve 3. Derece bileşenlerinin bozulduğu görülmektedir. Bu sinyaller üzerinde ferrezonans tipi teşhis edilecek olursa alt harmonik mod ferrezonansta olduğu görülür.



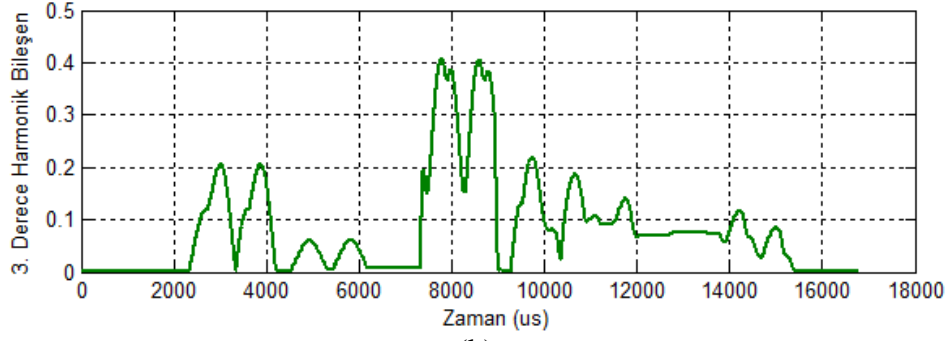
Şekil 6.38. Yüklü çalışma durumu TR2 gerilim transformatörü primer sargı gerilimine ait birim değer cinsinden fourier analizi (a) 2. Derece bileşeni (b) 3. Derece bileşeni

Şekil 6.39.'da TR2 gerilim transformatörünü besleyen kaynağın gerilimi için yapılan fourier analizinin 2. ve 3. Derece bileşenlerinin düzgün olmadığı görülmektedir. Özellikle 3. derece harmonik bileşenin oldukça bozulduğu tespit edilmiştir.

Bu sinyaller üzerinde ferrezonans tipi teşhis edilecek olursa 2. Derece harmonik sinyalin ferrezonans durumu için belli aralıklarda yarım periyodik mod için bir örnek olabileceği ancak işaretin tamamı incelendiğinde karmaşık moda örnek olabileceği anlaşılmaktadır. 3. Derece harmonik bileşen işareti için ise karmaşık mod ferrezonansa olduğu söylenebilir.



(a)

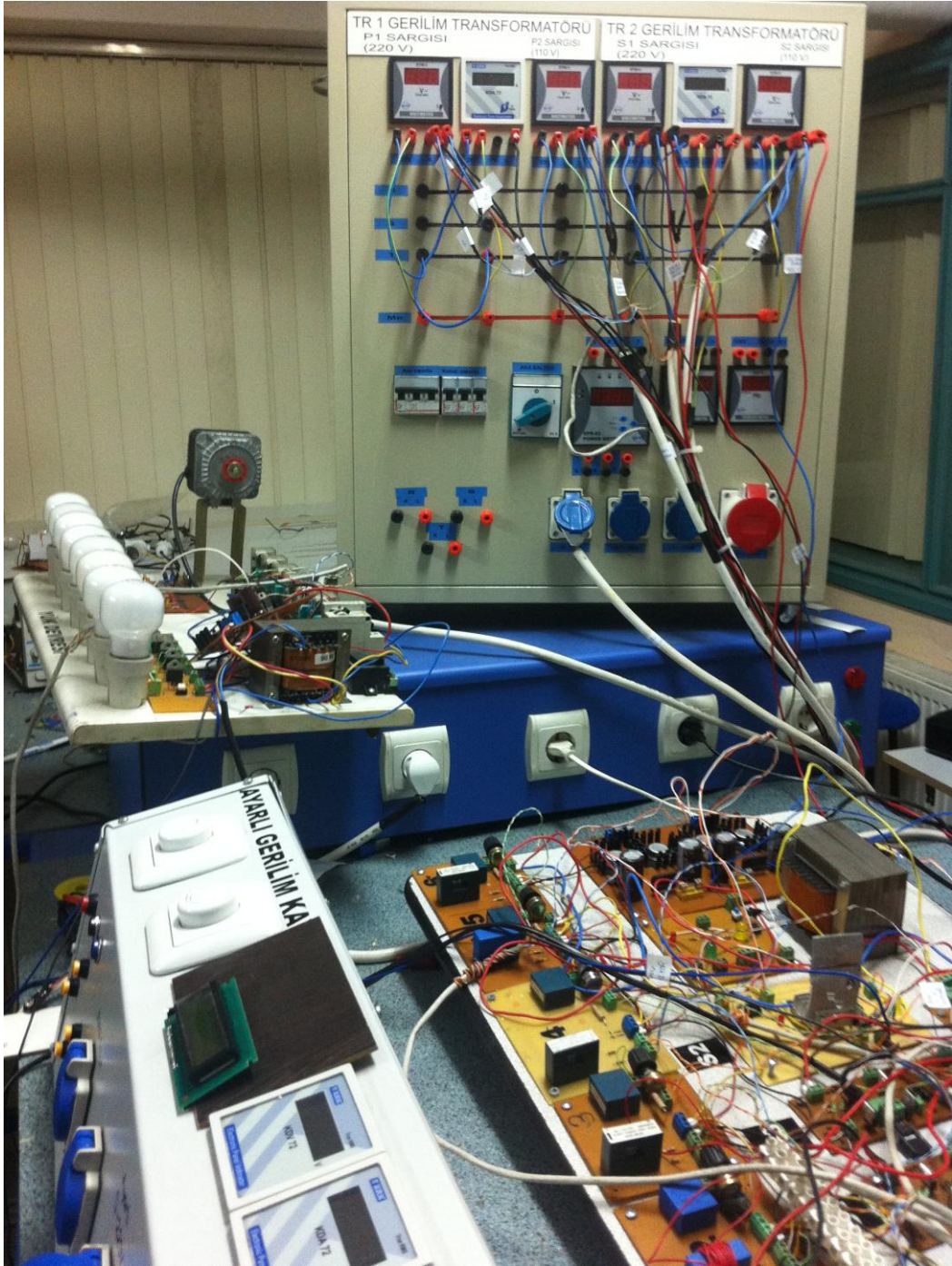


(b)

Şekil 6.39. Yüklü çalışma durumu TR2 gerilim transformatörü sekonder sargı gerilimine ait birim değer cinsinden fourier analizi (a) 2. Derece bileşeni (b) 3. Derece bileşeni

6.2. Deneysel Sistemdeki Gerilim Transformatörünün İncelenmesi

Yüksek gerilim sistemlerinde ölçüm amaçlı kullanılan gerilim trafolar için kurulan deneysel sistemdeki elektriksel parametrelerin incelenmesi için oluşturulan deneysel ortam Şekil 6.40.'da verilmiştir.



Şekil 6.40. Deneysel sistemin genel görünümü

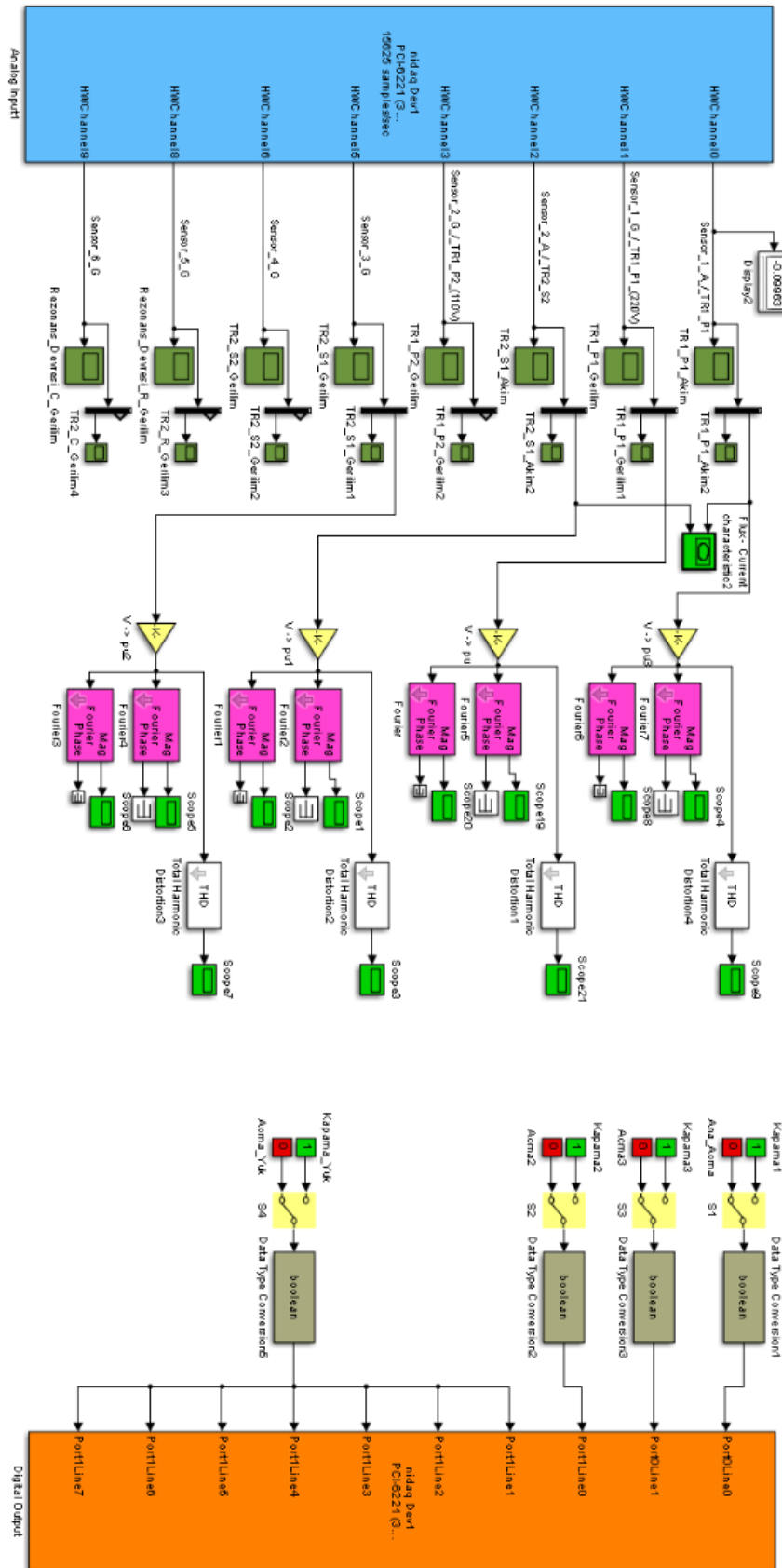
Tasarlanan sistemde iki adet eşdeğer gerilim trafosu kullanılmıştır. TR1 gerilim trafosu ters bağlanarak incelenecek TR2 gerilim trafosuna gerçek yüksek gerilim oluşturmaktadır. Kullanım açısından TR1 gerilim trafosunun primerine ayarlı şebeke gerilimi verilmiş olup bu gerilim sensörlerle ölçüldükten sonra PCI veri aktarım kartı aracılığıyla bilgisayara ve önceki bölümlerde anlatılan Matlab/Simulink ortamına aktarılmıştır.

Benzetimde kullanılan BADS blokları aynen korunarak program üzerinden gerçek sistem denetlenmiş ve denetlenen sistemin elektriksel parametreleri yine programa aktarılabilmiştir. Ayarlı şebeke gerilimi önce bilgisayar programında oluşturulan BADS-1 nolu açılı denetim sisteminin kontrol ettiği çıkış portlarına bağlı Kesici-1 ismi verilen yarıiletken anahtarın, yüksek hızlarda açma kapama görevini yaptığı elektronik devreye bağlanmıştır. BADS-1 isimli açılı denetim sistemi alternatif tipte olan kaynak gerilimini ölçüp kullanıcının istediği hassasiyette kapama ve açma yaparak ve beraber çalıştığı kesiciyi kontrol etmektedir. Kesici-1 çıkışı TR1 isimli gerilim transformatörünün primer sargısına başlanmaktadır. Aynı transformatörün sekonder sargısı TR2 gerilim trafosunun primer sargısına bağlanmıştır. TR2 gerilim trafosunun iki adet sekonderi bulunmaktadır. Bunlardan birisi S1 isimli 220 V etkin değerli gerilime sahipken diğeri de S2 ismiyle 110 V gerilimde çalışmaktadır. S1 gerilimi ölçüldükten sonra BADS-2 isimli açılı denetim sistemi ve Kesici 2'ye bağlanmıştır. Kesici 2, önce R1 direncine daha sonrada TR2 kapasiteye bağlanmış ve ferrezonansın incelenmesine imkan sağlayacak hale getirilmiştir. Benzer şekilde S2 çıkışında gerilimi ölçüldükten sonra BADS-3 isimli açılı denetim sistemi ve Kesici 2'ye bağlanmıştır.

6.2.1. Sistemin Boşta Çalışma Durumu

Tasarlanan deneysel sistemden toplanan veriler ile sistemin bilgisayar denetimli elektronik açılı seçici anahtarları yine bilgisayar kontrollü olarak sağlanmaktadır. Deneysel sistemin boşta çalışma durumlarındaki elektriksel parametrelerin incelenmesi ve bilgisayar tabanlı açılı denetim sistemi (BADS) için oluşturulan Matlab/Simulink ortamında hazırlanan benzetim bloğu Şekil 6.41.'de verilmiştir.

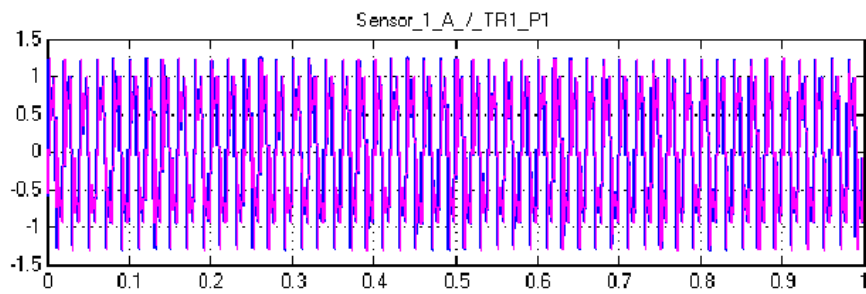
Verilen blokta S1 anahtarı kapatıldığında, sistemdeki TR1 ve TR2 gerilim trafoları enerjilenmiş olacak ve diğer anahtarlar kapanmadı sürece boşta çalışacaklar.



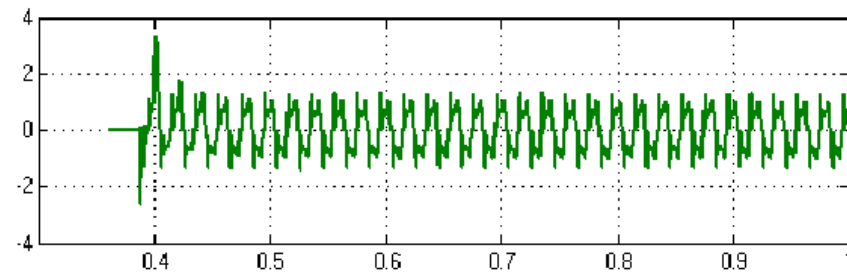
Şekil 6.41. Deneysel sistemin boşa çalışma durumu için elektriksel parametrelerinin izlenmesi için oluşturulan benzetim bloğu

6.2.1.1. Boşta Çalışan Sistemde BADS Anahtarların Görev Yapmadığı Durum

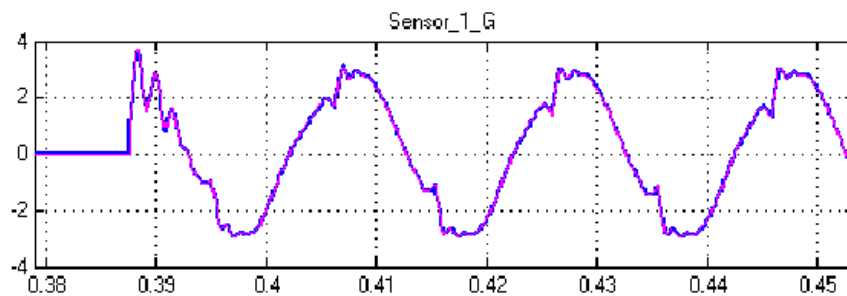
Deneysel çalışmalarda kullanılan açıcı denetim sistemleri görev yapmadan sistemin boşta çalışma durumu için sistemin elektriksel parametrelerini okuyan algılayıcılardan elde edilen sonuçlar Şekil 6.42. ile 6.46. arasında verilmiştir. Sistemin benzetiminde kullanılan transformatör parametreleri gerçek sistemde kullanılan transformatörlerin veri dikkate alınarak kullanılmıştır. Şekil 6.42. ve 6.43.'de benzetimi yapılan sistemdeki TR1 gerilim transformatörünün primer sargısı akımı ve geriliminin zamanla değişimi görülmektedir.



(a)

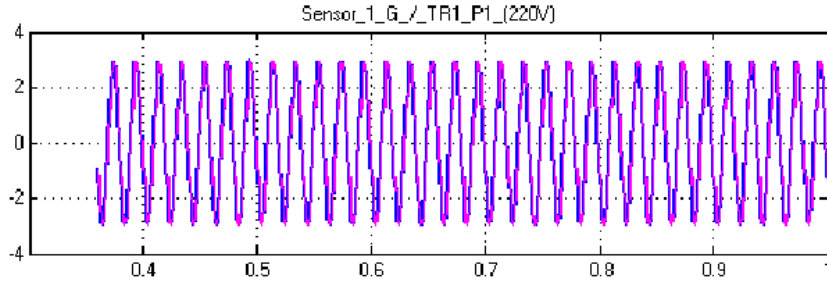


(b)

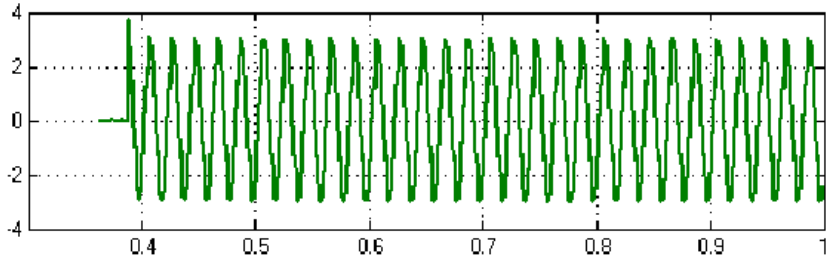


(c)

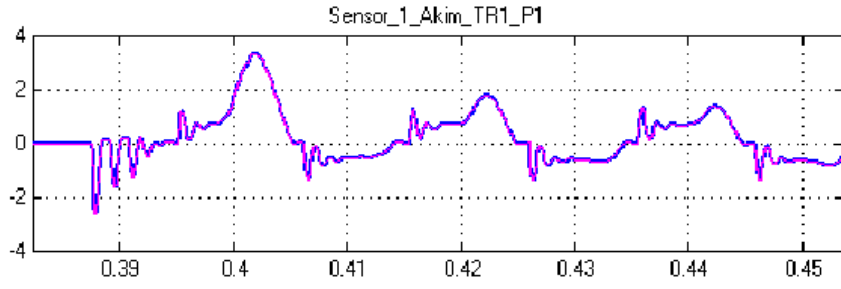
Şekil 6.42. Rastgele anahtarlama yapılması durumunda yükseltici TR1 gerilim transformatörü üzerindeki P1 sargısından geçen akımın boşta çalışma durumundaki zamanla değişimleri



(a)

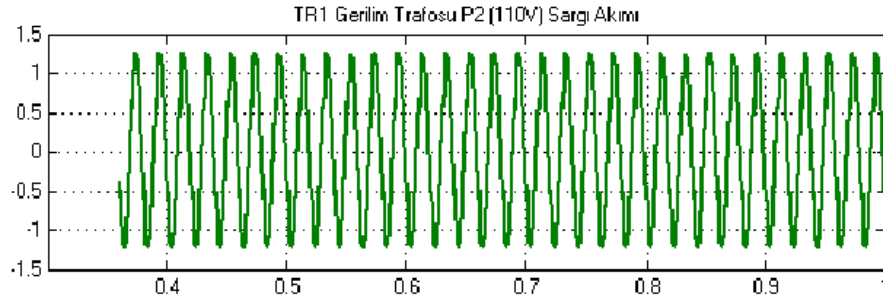


(b)

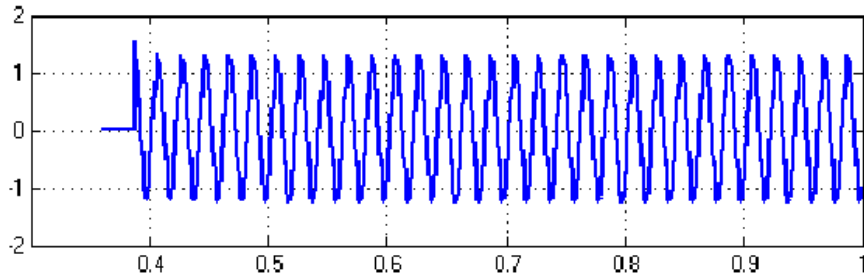


(c)

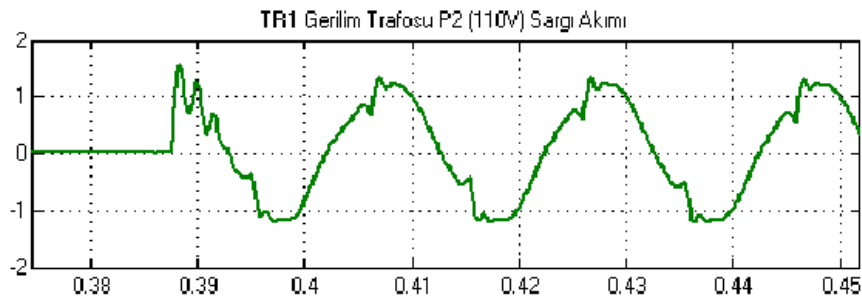
Şekil 6.43. Rastgele anahtarlama yapılması durumunda, boştaki yükseltici TR1 gerilim transformatörü üzerindeki P1 sargısının gerilim işareti



(a)



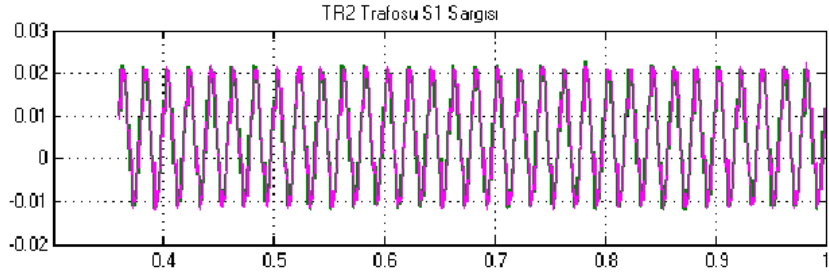
(b)



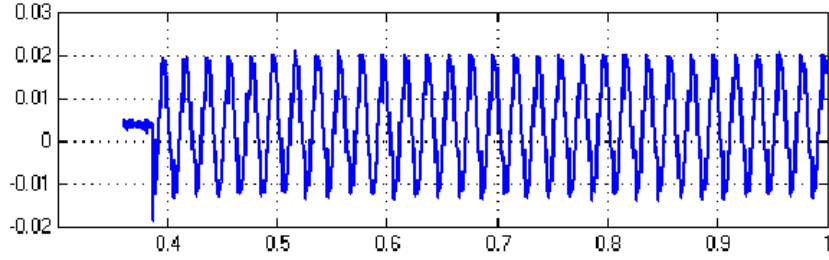
(c)

Şekil 6.44. Rastgele anahtarlama yapılması durumunda, boştta çalışan yükseltici TR1 gerilim transformatörü üzerindeki S1 sargısının gerilim işareti

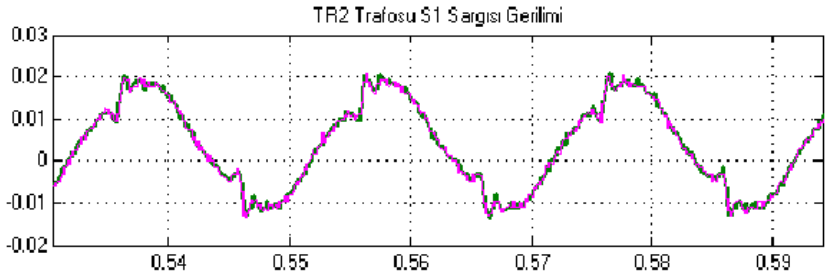
Boştta çalışan TR1 transformatörüne ait deneysel sistemin verileri Matlab/Simulink ortamında alınarak Şekil 6.42. – 6.44.’de verilen grafikler incelendiğinde primer sargıya etkin değeri 220V olan şebeke geriliminin uygulanmasıyla gerilim yaklaşık 400V’a yükselmiştir. Benzer şekilde izleyen bir kaç periyot işaretler bozulmaya uğramıştır.



(a)



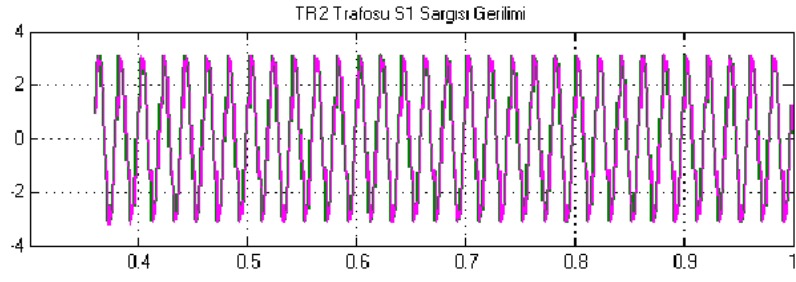
(b)



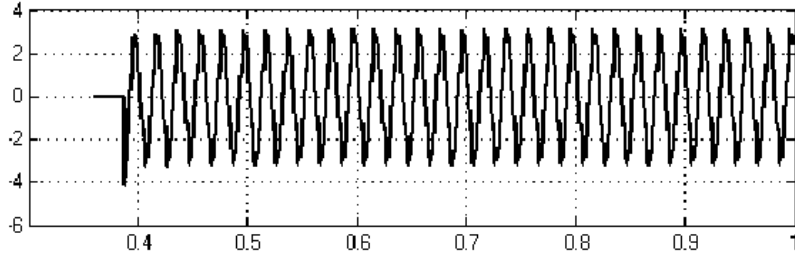
(c)

Şekil 6.45. Rastgele anahtarlama yapılması durumunda indirici TR2 gerilim transformatörü üzerindeki S1 sargısından geçen akımın boşa çalışma durumundaki zamanla değişimleri

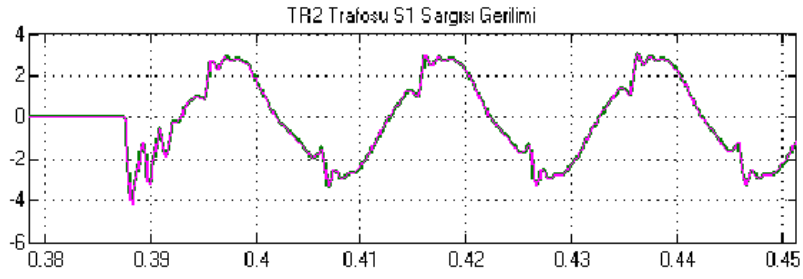
Boşa çalışan TR2 transformatörüne ait deneysel sistemin verileri Matlab/Simulink ortamında alınarak Şekil 6.45. – 6.47.’de verilen grafikler incelendiğinde primer sargıya etkin değeri 220V olan şebeke geriliminin uygulanmasıyla gerilim yaklaşık 400V’a yükselmiştir. Benzer şekilde izleyen bir kaç periyot işaretler bozulmaya uğramıştır.



(a)

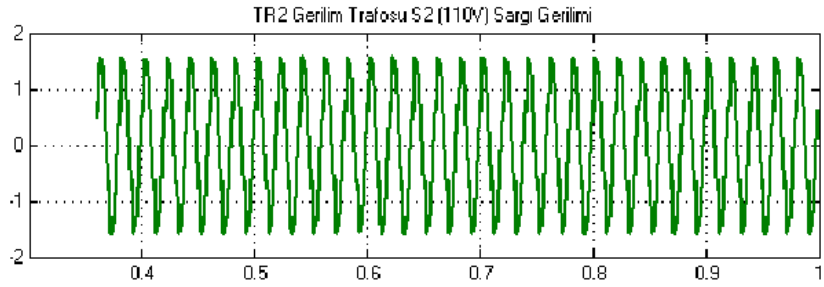


(b)

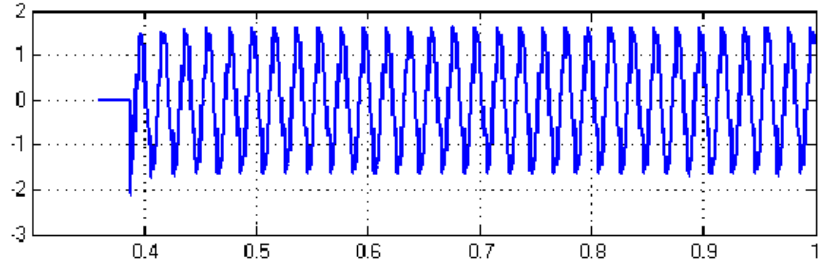


(c)

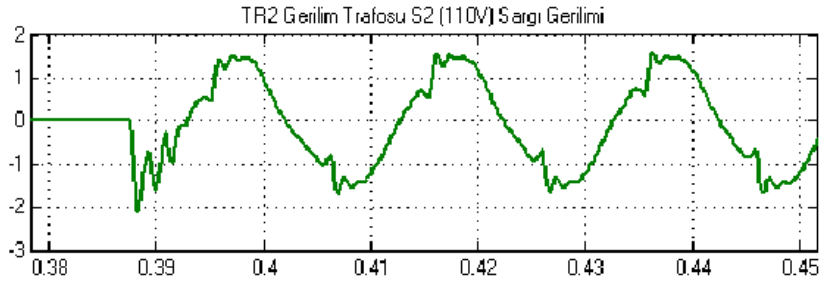
Şekil 6.46. Rastgele anahtarlama yapılması durumunda, boşta çalışan indirici TR2 gerilim transformatörü üzerindeki S1 sargısının gerilim işareti



(a)



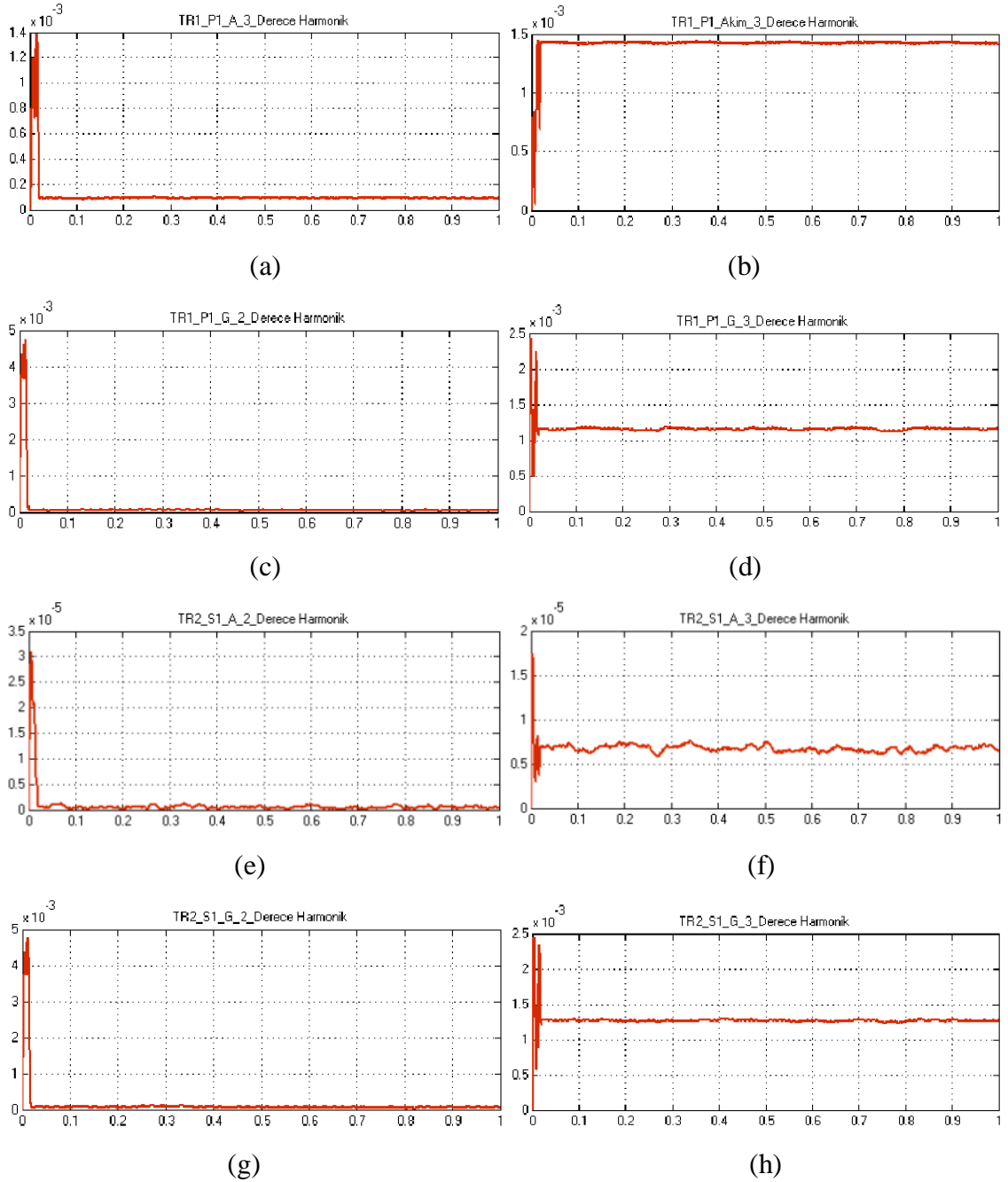
(b)



(c)

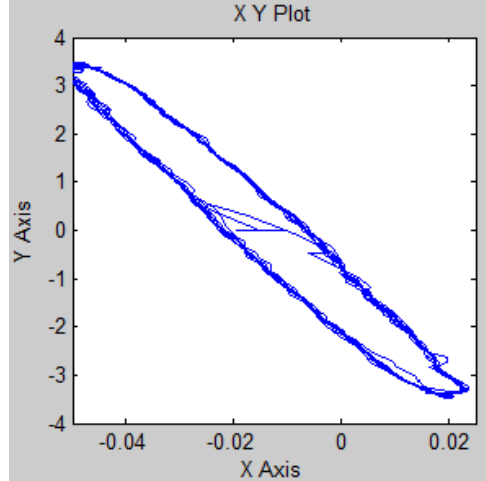
Şekil 6.47. Rastgele anahtarlama yapılması durumunda, boşa çalışan indirici TR2 gerilim transformatörü üzerindeki S2 sargısının gerilim işareti

Şekil 6.47.'de verilen grafikler incelendiğinde TR2 gerilim trafosunun sekonder sargısında ilk anahtar kapama anında bir miktar işaretle bozulma olmuş sonra işaretler düzelme eğilimine girmiştir.

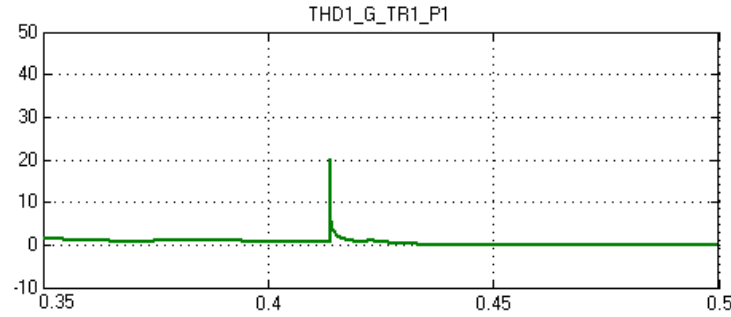


Şekil 6.48. Boşta çalışma durumu; TR1 ve TR2 gerilim transformatörleri primer sargı gerilimine ait fourier analizi, (a) TR1, P1 sargısı akımı 2. derece harm. bileşeni, (b) TR1, P1 sargısı akımı 3. derece harm. bileşeni (c) TR1, P1 sargı gerilimi 2. derece harm. bileşeni (d) TR1, P1 sargı gerilimi 3. derece harm. bileşeni, (e) TR2, S1 sargısı akımı 2. derece harm. bileşeni, (f) TR2, S1 sargısı akımı 3. derece harm. bileşeni, (g) TR2, S1 sargı gerilimi 2. derece harm. bileşeni, (h) TR2, S1 sargı gerilimi 3. derece harm. bileşeni

Şekil 6.48'de TR1 ve TR2 gerilim transformatörlerinin boşta çalışma durumu için detaylı primer ve sekonder akım sargı gerilimlere ait fourier analizi görülmektedir. Tüm grafiklerde anahtar konum değişikliklerinde bir hareketlenme söz konusu olmuştur.



Şekil 6.49. TR2 boşa çalışma durumundaki mıknatıslanma akımı ile manyetik akı değişimini histerisiz çevrimi

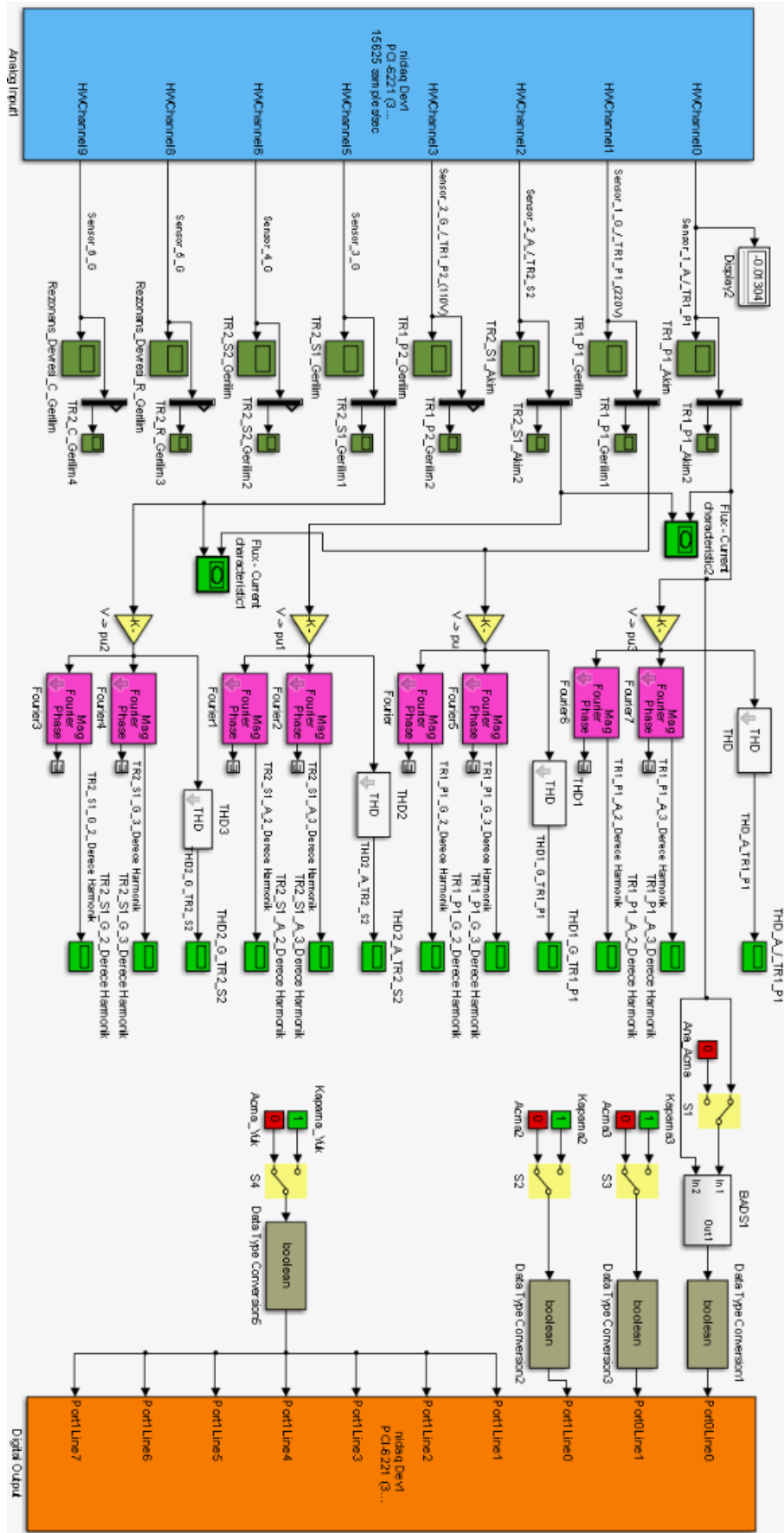


Şekil 6.50. TR1 boşa çalışma durumunda kapama anındaki THD değişimi

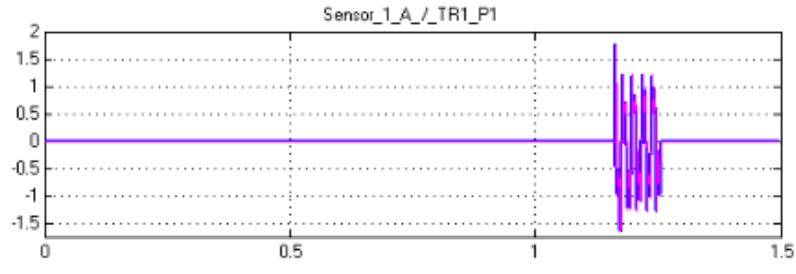
Şekil 6.49.'da verilen kapalı çevrim manyetik akı yoğunluğu ile manyetik alan şiddeti değişimi görülmektedir. Şekil 6.50.'de kapama anındaki toplam harmonik bozulması görülmektedir.

6.2.1.2. BADS-1 Anahtarının $\alpha_{\text{kapama}}=30^\circ$ ve $\alpha_{\text{açma}}=0^\circ$ 'de Görev Yaptığı Durum

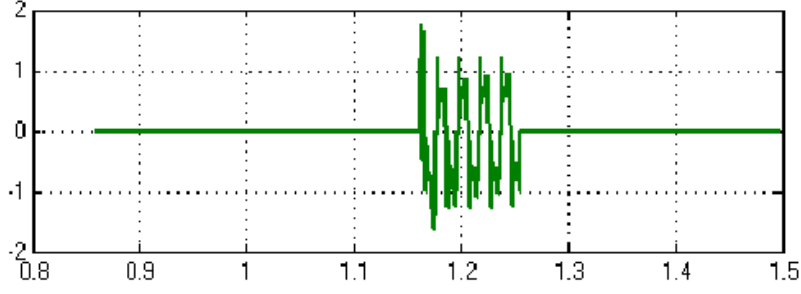
Deneysel sistemindeki gerilim transformatörlerinin boşa çalışma durumunda açma denetim sisteminin devreye alınması durumu için Şekil 6.51.'de verilen bağlantıda yalnız BADS -1 nolu anahtarın kapama açısının 30° 'deki ve açma açısının 0° 'deki çalışma durumu için BADS-1 nolu anahtarın bağlandığı faz gerilimi ile kapama ve açma geldiği durumlar için üretilen işaretler Şekil 6.52. – 6.57.'de verilmiştir.



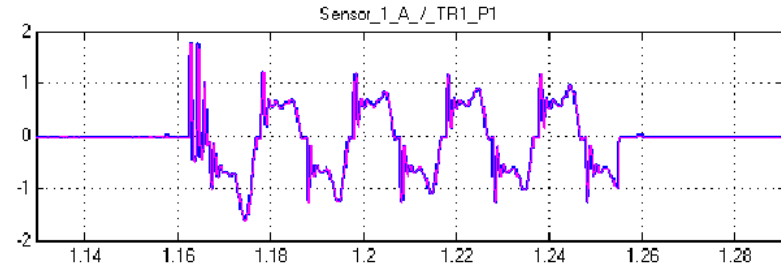
Şekil 6.51. Boşta çalışma durumu için BADS-1 anahtarının aktif olduğu durum



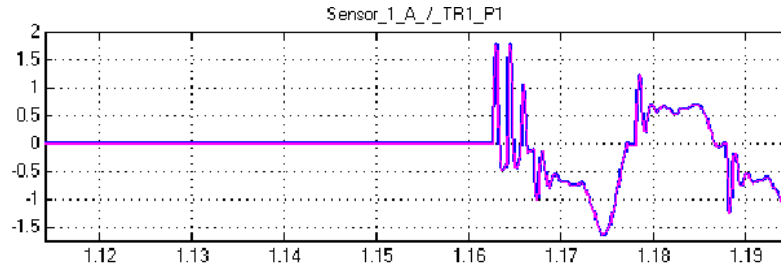
(a)



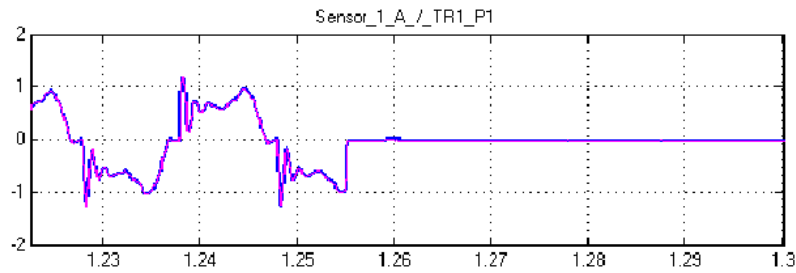
(b)



(c)

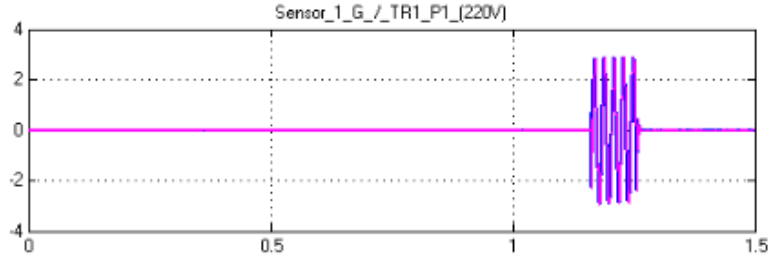


(d)

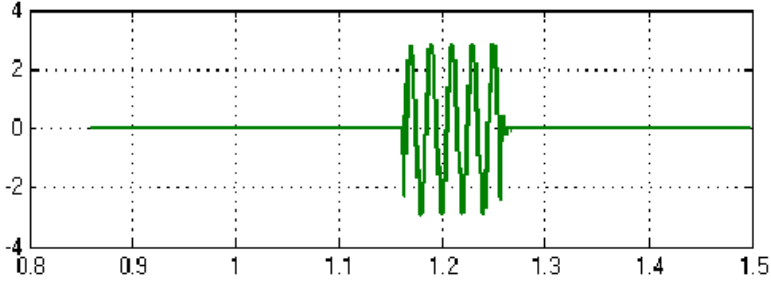


(e)

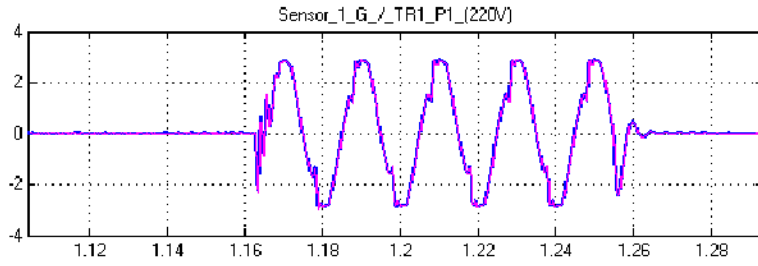
Şekil 6.52. Boşta çalışma durumu yalnız BADS-1 anahtarlarının aktif olduğu durumda TR1 Gerilim Trafosu, P1 sargı akımı işaretleri



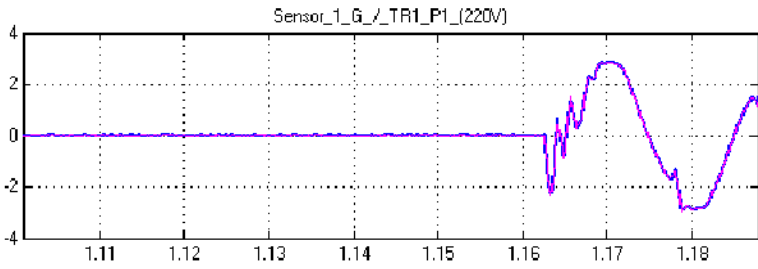
(a)



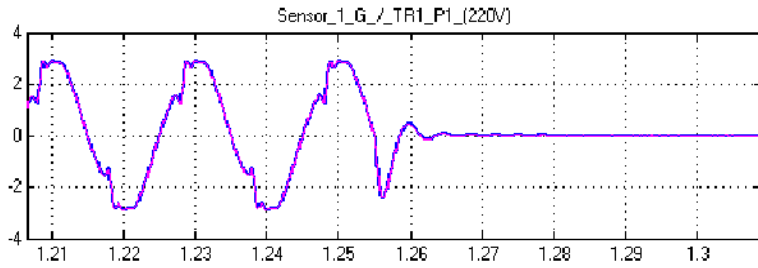
(b)



(c)

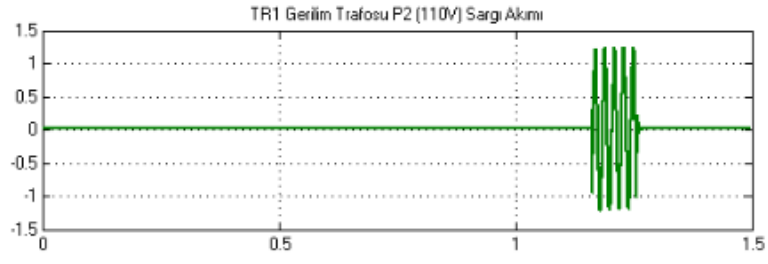


(d)

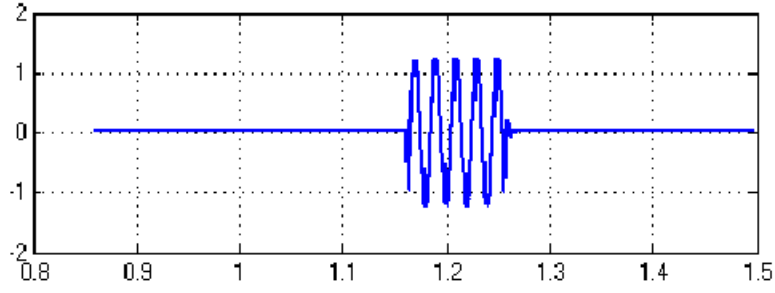


(e)

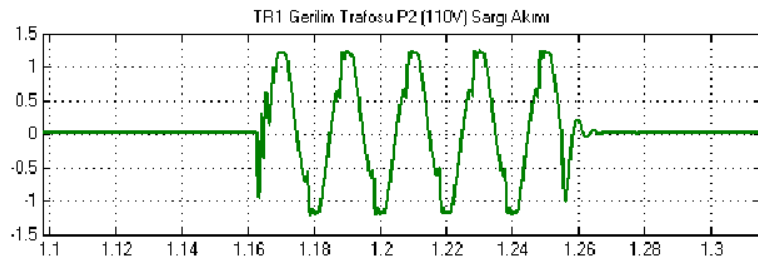
Şekil 6.53. Boşta çalışma durumu yalnız BADS-1 anahtarının aktif olduğu durumda TR1 Gerilim Trafosu, P1 sargı gerilimi işaretleri



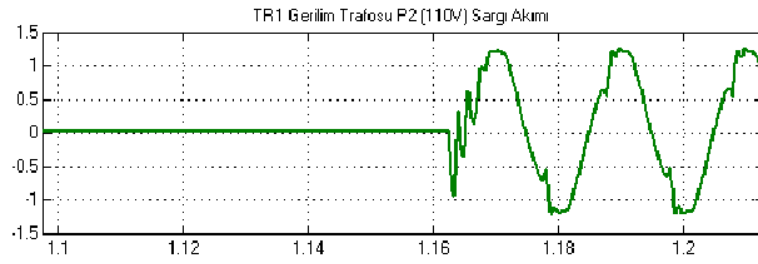
(a)



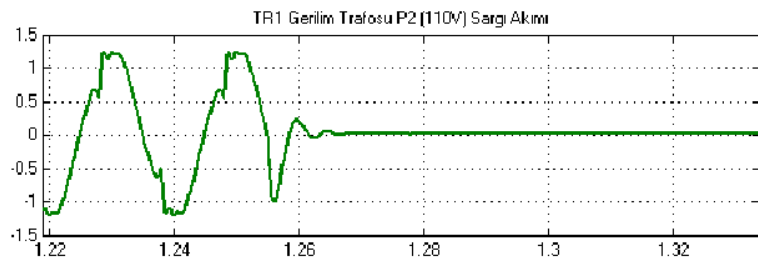
(b)



(c)

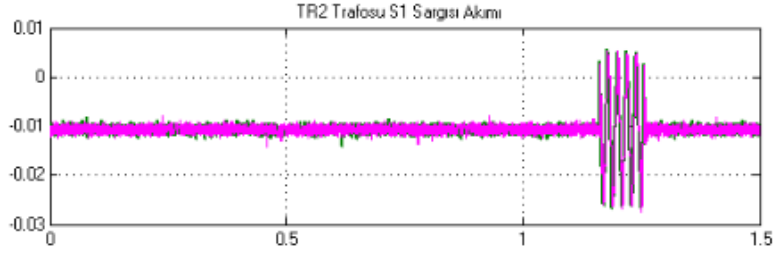


(d)

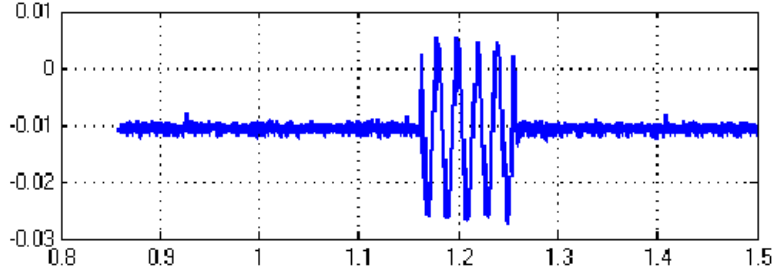


(e)

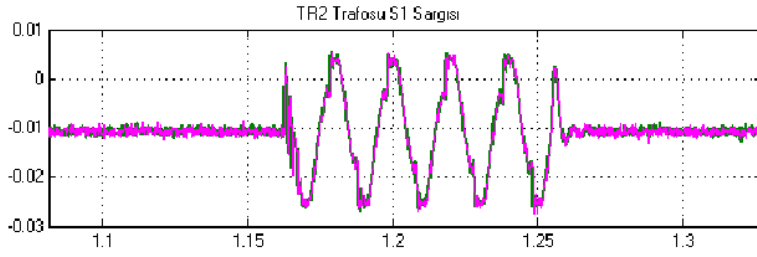
Şekil 6.54. Boşta çalışma durumu yalnız BADS-1 anahtarlarının aktif olduğu durumda TR1 Gerilim Trafosu, P2 sargı gerilimi işaretleri



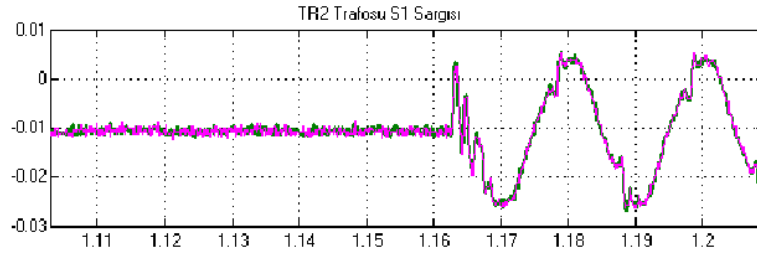
(a)



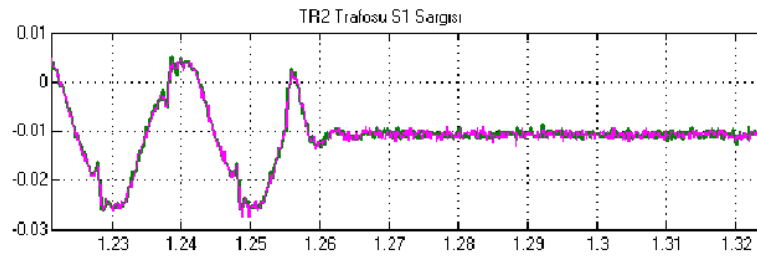
(b)



(c)

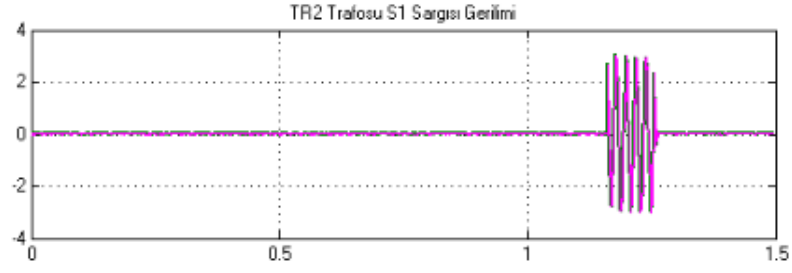


(d)

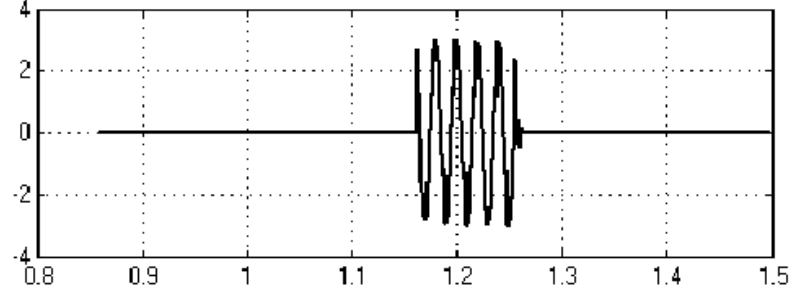


(e)

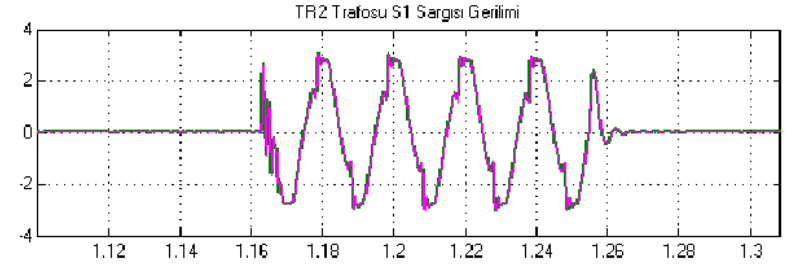
Şekil 6.55. Boşta çalışma durumu yalnız BADS-1 anahtarının aktif olduğu durumda TR2 Gerilim Trafosu, S1 sargısı akımı işaretleri



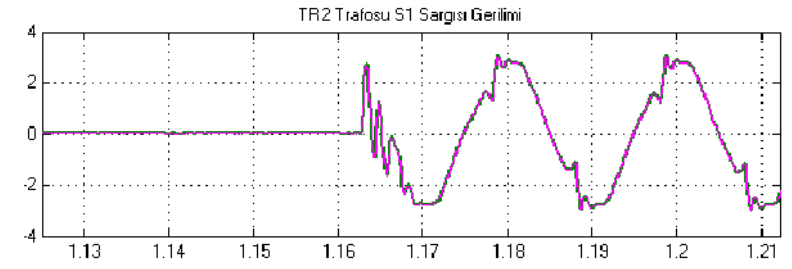
(a)



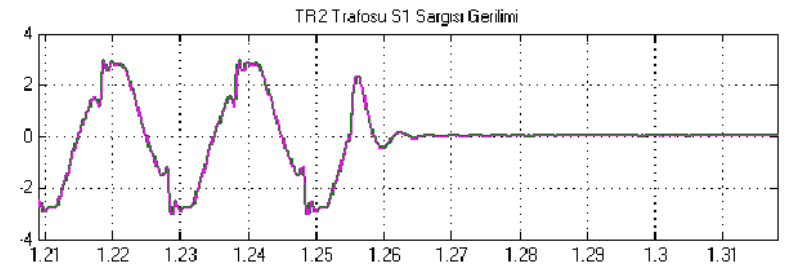
(b)



(c)

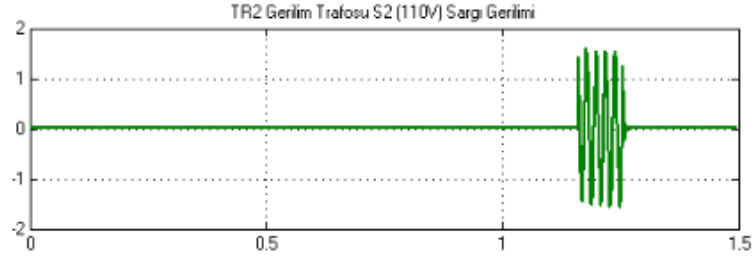


(d)

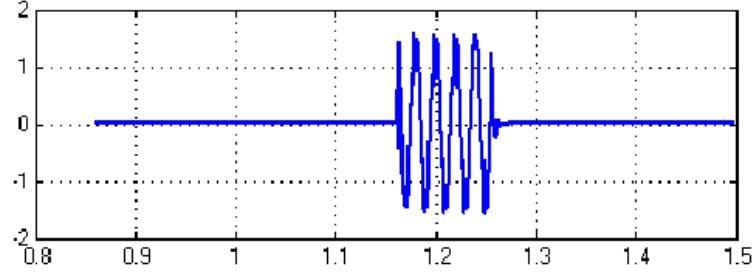


(e)

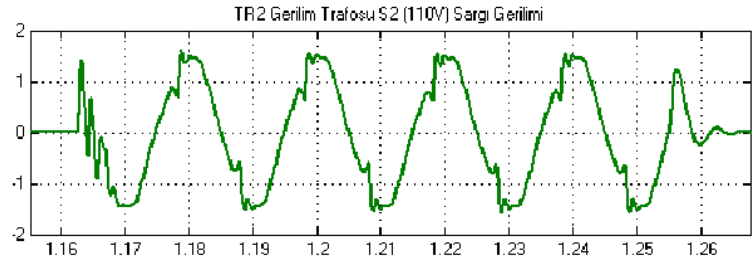
Şekil 6.56. Boşta çalışma durumu yalnız BADS-1 anahtarının aktif olduğu durumda TR2 Gerilim Trafosu, S1 sargısı gerilimi işaretleri



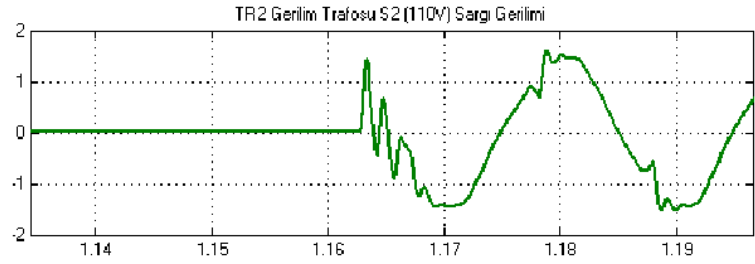
(a)



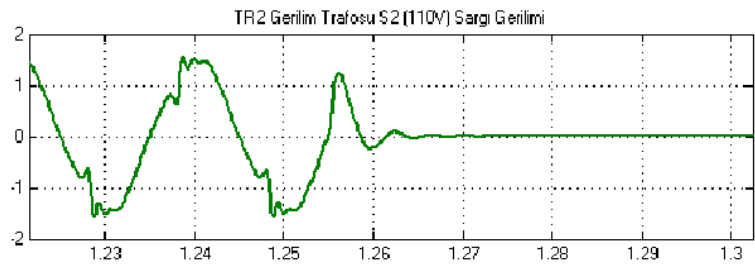
(b)



(c)

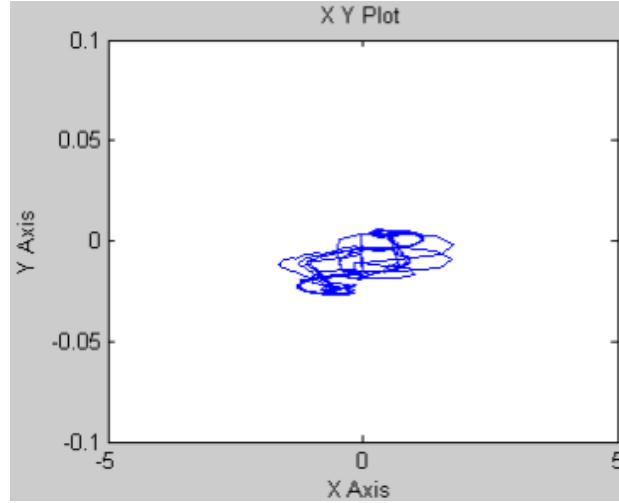


(d)



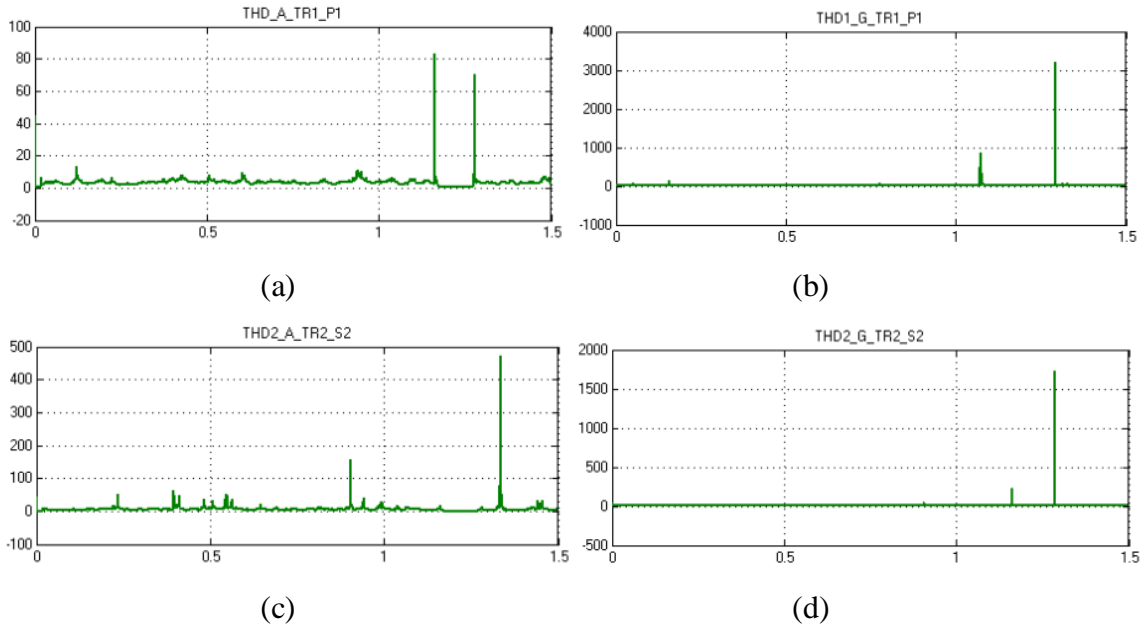
(e)

Şekil 6.57. Boşta çalışma durumu yalnız BADS-1 anahtarının aktif olduğu durumda TR2 Gerilim Trafosu, S2 sargı gerilimi işaretleri

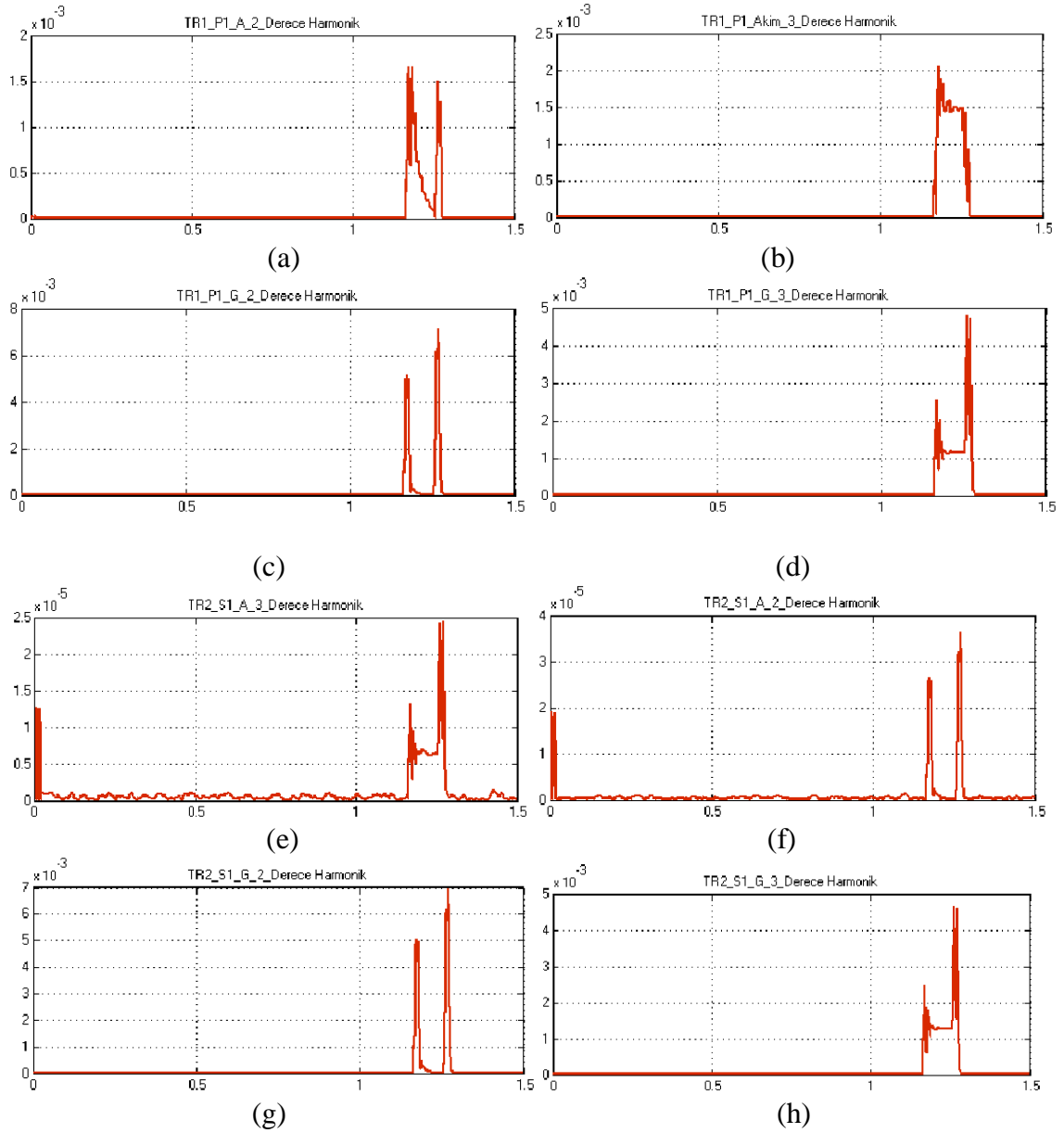


Şekil 6.58. TR1 gerilim transformatörünün boşa çalışma durumunda $\alpha_{\text{kapama}} = 30^\circ$ ve $\alpha_{\text{acma}} = 0^\circ$ için mıknatıslanma akımı ile manyetik akı değişimini histerisiz çevrimi

Şekil 6.58.'de verilen kapalı çevrim mıknatıslanma akımı ile manyetik akı değişimi sistemin kaotik mod ferrezonans durumuna geçmeye başladığı hakkında bilgiler vermektedir.



Şekil 6.59. TR1 ve TR2 gerilim transformatörlerinde boşa çalışma durumunda toplam harmonik bozulma işaretleri

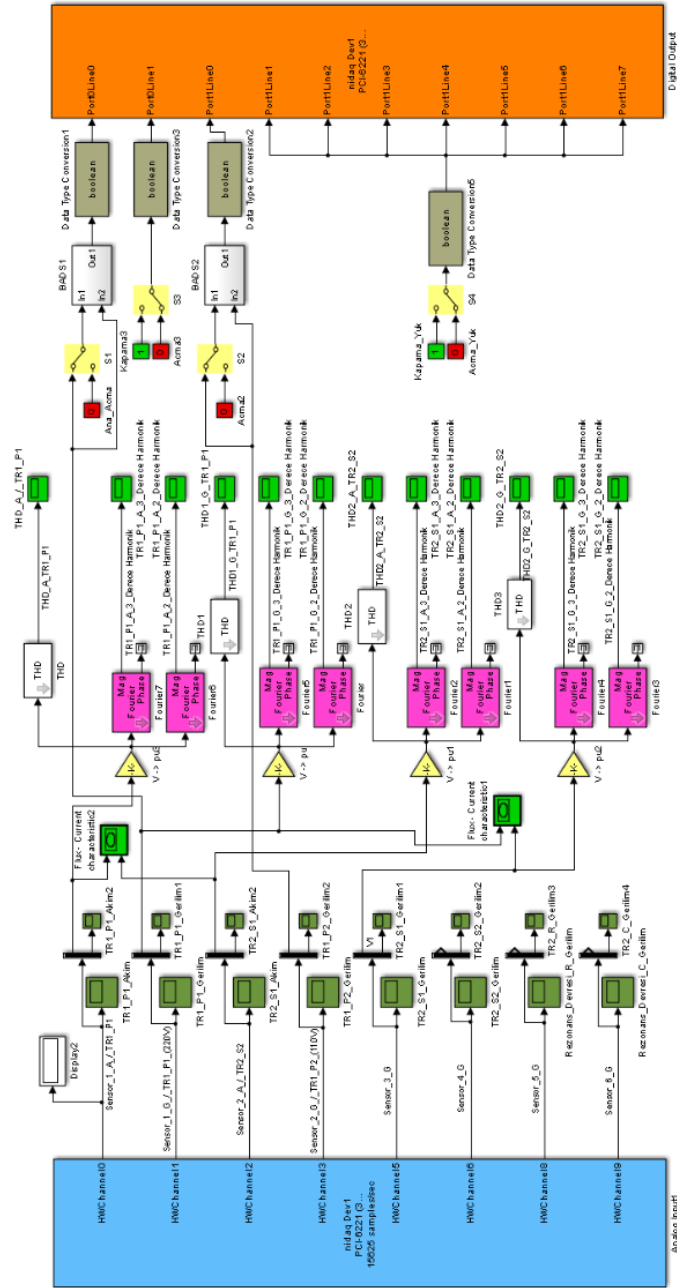


Şekil 6.60. Boşta çalışma durumu; TR1 ve TR2 gerilim transformatörleri primer sargı gerilimine ait fourier analizi. (a) TR1, P1 sargısı akımı 2. derece harmonik bileşeni, (b) TR1, P1 sargısı akımı 3. derece harmonik bileşeni (c) TR1, P1 sargı gerilimi 2. derece harmonik bileşeni (d) TR1, P1 sargı gerilimi 3. derece harmonik bileşeni, (e) TR2, S1 sargısı akımı 2. derece harmonik bileşeni, (f) TR2, S1 sargısı akımı 3. derece harmonik bileşeni, (g) TR2, S1 sargı gerilimi 2. derece harmonik bileşeni, (h) TR2, S1 sargı gerilimi 3. derece harmonik bileşeni

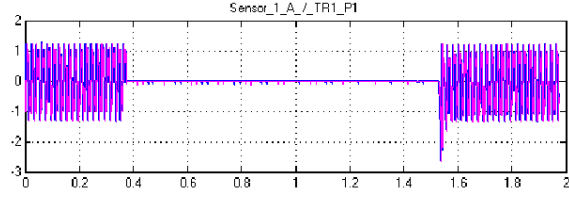
Şekil 6.60.'da verilen grafikler, TR1 ve TR2 gerilim transformatörlerinin boşta çalışma durumu için primer ve sekonder sargı akım gerilimlere ait detaylı fourier analizi verileri görülmektedir. Tüm grafiklerde anahtar konum değişikliklerinde olumsuz yönde bir hareketlenme söz konusu olmuştur.

6.2.1.3. BADS-1 Anahtarının $\alpha_{\text{kapama}}=120^\circ$ ve $\alpha_{\text{açma}}=45^\circ$ 'de ve BADS-2 Anahtarının $\alpha_{\text{kapama}}=60^\circ$ ve $\alpha_{\text{açma}}=15^\circ$ 'de Görev Yaptığı Durum

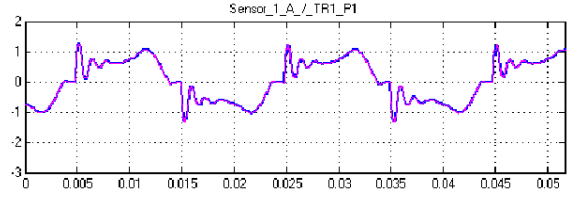
Başka bir uygulama yapılacak olursa boşa çalışan sistemde bağlı olan BADS-1 anahtarını $\alpha_{\text{kapama}} = 120^\circ$ ve $\alpha_{\text{açma}} = 45^\circ$ seçilerek ve BADS-2 anahtarını da $\alpha_{\text{kapama}} = 60^\circ$ ve $\alpha_{\text{açma}} = 15^\circ$ seçilerek kullanıcı tarafından rastgele kapama va açma yaptığı durumlar için hazırlanan Matlab/Simulink bloğu Şekil 6.61.'de görülmektedir.



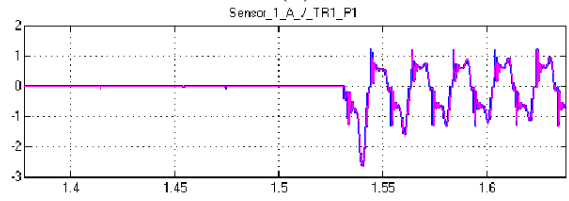
Şekil 6.61. BADS-1 ve BADS-2 birlikte görev yaptığı durum için Matlab/Simulink bloğu



(a)

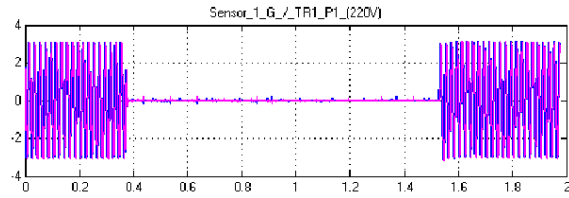


(b)

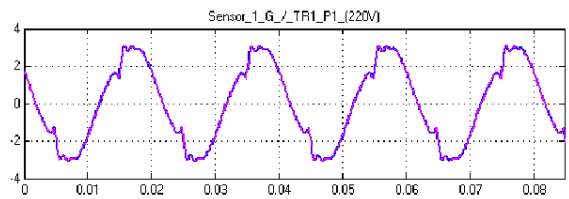


(c)

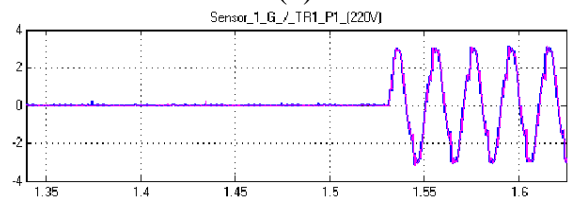
Şekil 6.62. BADS-1 ve BADS-2 bağlı, TR1 gerilim trafosu için, P1 sargı akımı işaretleri



(a)

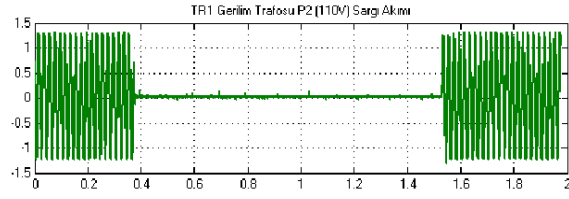


(b)

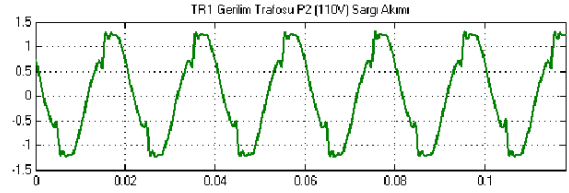


(c)

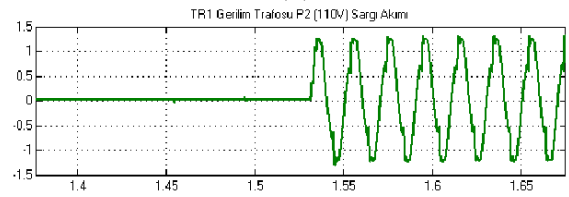
Şekil 6.63. BADS-1 ve BADS-2 bağlı, TR1 gerilim trafosu için, P1 sargı gerilimi işaretleri



(a)

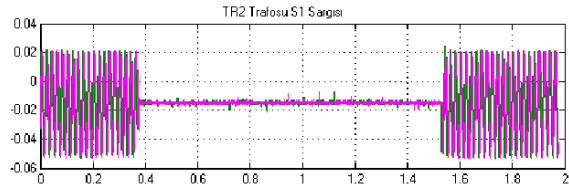


(b)

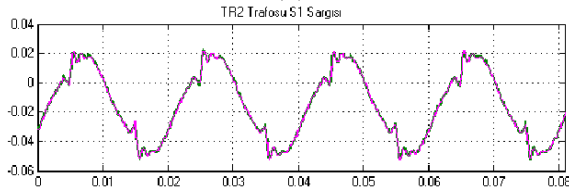


(c)

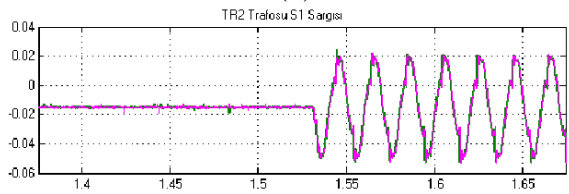
Şekil 6.64. BADS-1 ve BADS-2 bağlı, TR1 gerilim trafosu için, P2 sargı gerilimi işaretleri



(a)

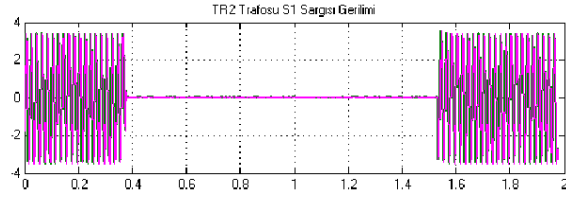


(b)

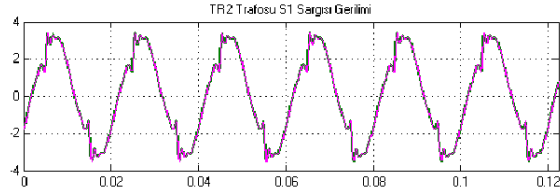


(c)

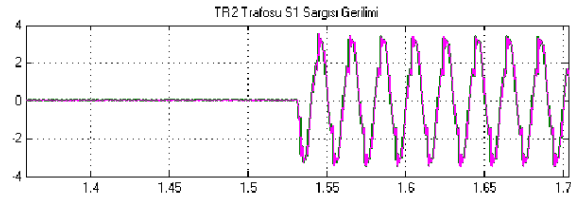
Şekil 6.65. BADS-1 ve BADS-2 bağlı, TR2 gerilim trafosu için, S1 sargı akımı işaretleri



(a)

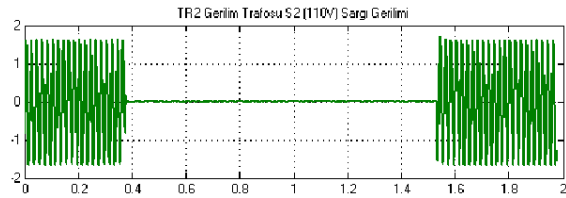


(b)

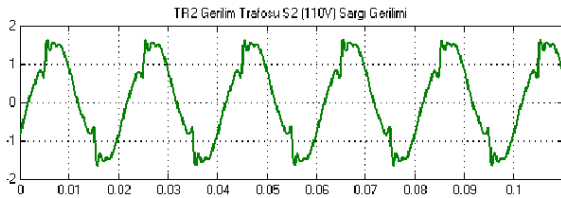


(c)

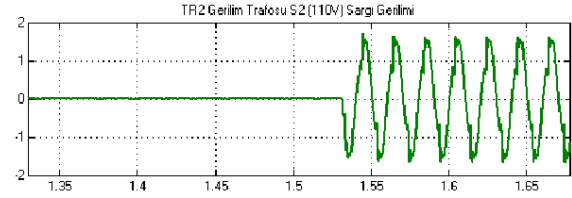
Şekil 6.66. BADS-1 ve BADS-2 bağlı, TR2 gerilim trafosu için, S1 sargı gerilimi işaretleri



(a)



(b)

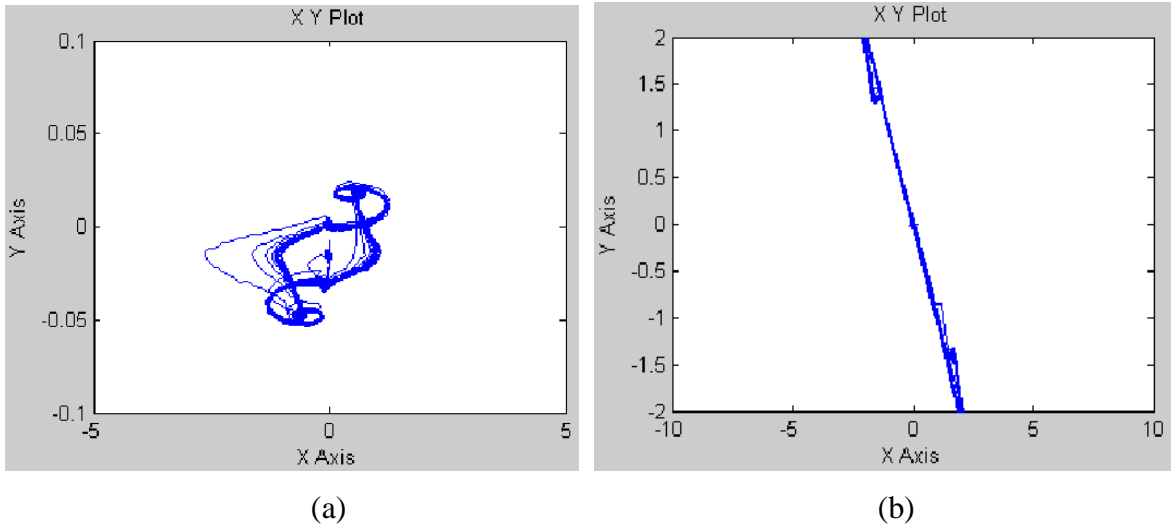


(c)

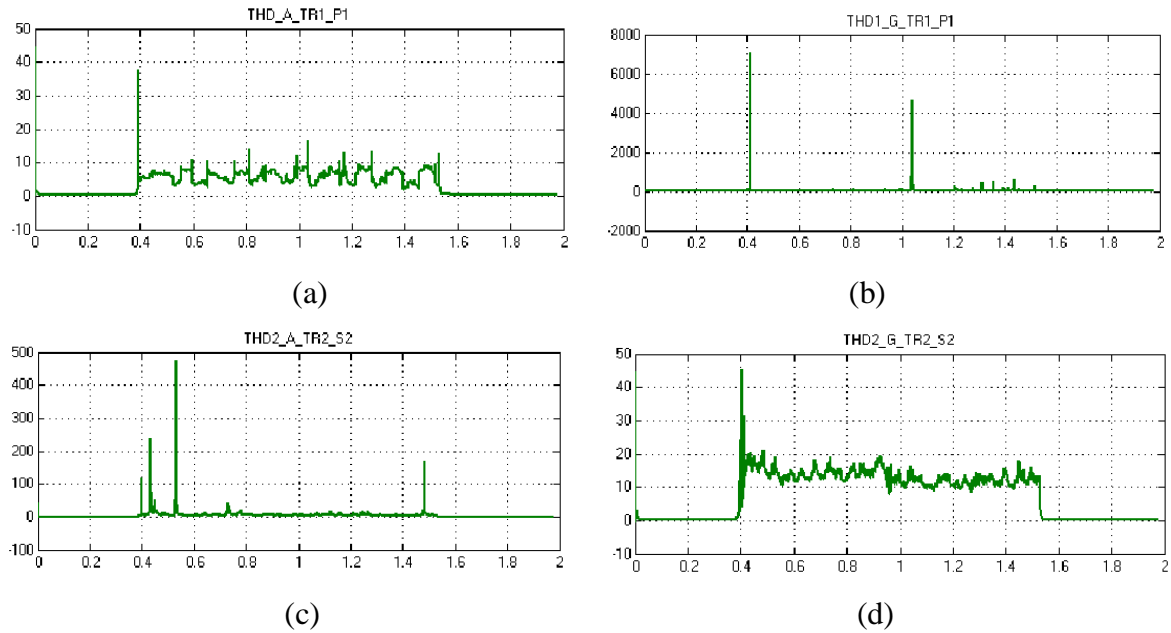
Şekil 6.67. BADS-1 ve BADS-2 bağlı, TR2 gerilim trafosu için, S2 sargı gerilimi işaretleri

Şekil 6.62. ile Şekil 6.67. arasında verilen grafikler incelendiğinde boşa çalışan sistemde bağlı olan BADS 1 anahtarı $\alpha_{kapama} = 120^\circ$ ve $\alpha_{açma} = 45^\circ$ seçilerek ve BADS 2

anahtarı da $\alpha_{kapama} = 60^\circ$ ve $\alpha_{açma} = 15^\circ$ seçilerek kullanıcı tarafından rastgele kapama ve açma yaptığı durumlar için, BADS-1 anahtarının kapama konumunda genliği çok büyük olmadığı için üretilen işaretlerin sinüsoidal karakteristiğe uygun olduğu gözlenmiştir. Ancak, primer akımı kapama anında yaklaşık 2 katı genliğe ulaşmış bunun sebebi çekirdekte kalan artık mıknatıslık miktarının yüksek olmasıdır.



Şekil 6.68. TR1 ve TR2 gerilim transformatörlerinin boşa çalışma durumunda, (a) primerdeki BADS-1, (b) sekonderdeki BADS-2 anahtarları için mıknatıslanma akımı ile manyetik akı değişimini histerisiz çevrimleri



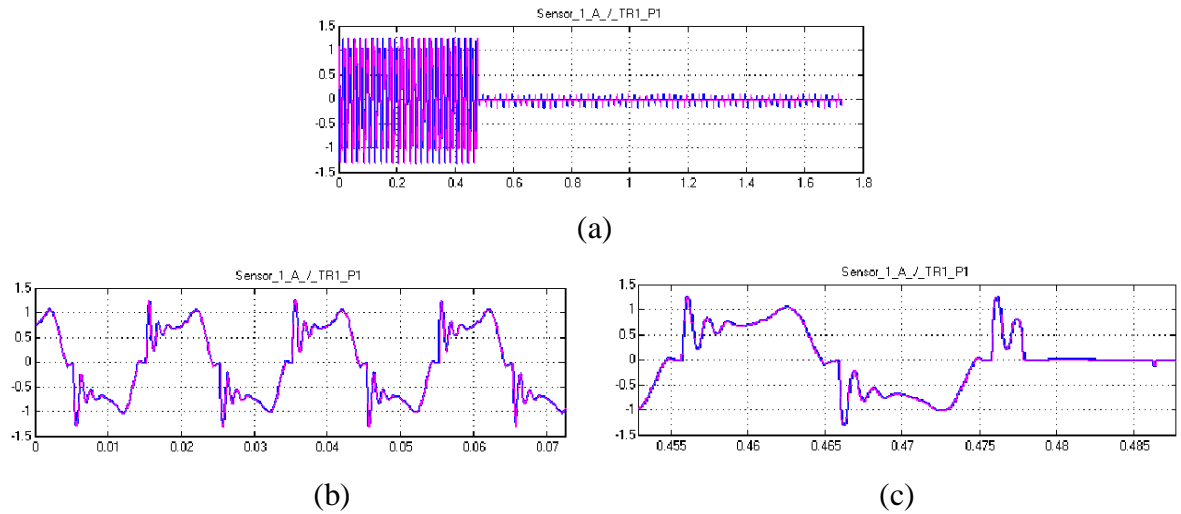
Şekil 6.69. TR1 ve TR2 için verilen durumundaki toplam harmonik bozulma işaretleri

6.2.2. Yüklü Çalışan Gerilim Transformatörü

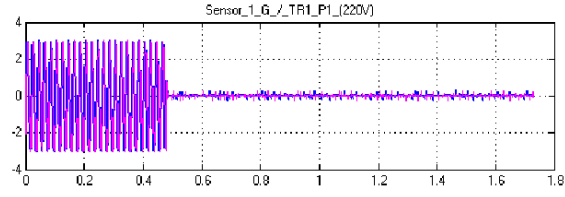
Tasarlanan sisteme 220 V etkin değere sahip kaynaktan aldığı gerilimi ölçüp BADS-1 nolu açma denetim sisteminin kontrol ettiği Kesici 1 isimli devre kesiciye vermiştir. BADS 1 isimli açma denetim sistemi alternatif tipte olan kaynak gerilimini ölçüp kullanıcının istediği hassasiyette kapama ve açma yaparak ve beraber çalıştığı kesiciyi kontrol etmektedir. Kesici 1 çıkışı TR1 isimli gerilim transformatörünün primer sargısına başlanmaktadır. Aynı transformatörün sekonder sargı gerilimi ölçüldükten sonra BADS 2 isimli açma denetim sistemi ve Kesici 2'ye bağlanmıştır. Kesici 2, önce R1 direncine daha sonrada TR2 gerilim transformatörünün primer sargısına bağlanmıştır. Aynı transformatörün sekonder gerilimi ölçülüp BADS 3'ün kontrol ettiği Kesici 3'e bağlanmıştır. Kesici 3 çıkışı bir direnç ve kapasiteye bağlanmış ve ferrezonansın incelenmesine imkan sağlayacak hale getirilmiştir.

6.2.2.1 Yüklü Çalışan Sistemde BADS-1 Anahtarının $\alpha_{\text{kapama}}=120^\circ$ ve $\alpha_{\text{açma}}=45^\circ$ 'de ve BADS-2 Anahtarının $\alpha_{\text{kapama}}=60^\circ$ ve $\alpha_{\text{açma}}=15^\circ$ 'de Görev Yaptığı Durumun İncelenmesi

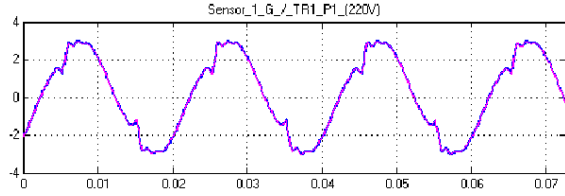
Tasarlanan sisteme, BADS-1 anahtarının $\alpha_{\text{kapama}}=120^\circ$ ve $\alpha_{\text{açma}}=45^\circ$ 'de ve BADS-2 anahtarının $\alpha_{\text{kapama}}=60^\circ$ ve $\alpha_{\text{açma}}=15^\circ$ 'de görev yaptığı duruma uygun komutlarla yapılan senaryodan elde edilen veriler Şekil 6.70. ile 6.75. arasında gösterilmiştir.



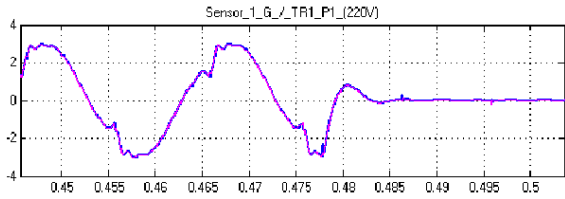
Şekil 6.70. BADS-1 ve BADS-2 bağlı, Yük altındaki TR1 gerilim trafosu için, P1 sargı akımı işaretleri



(a)

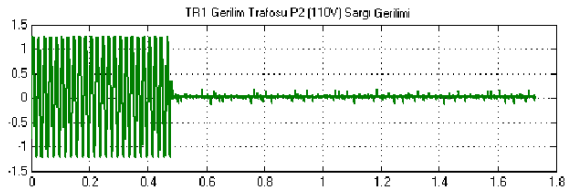


(b)

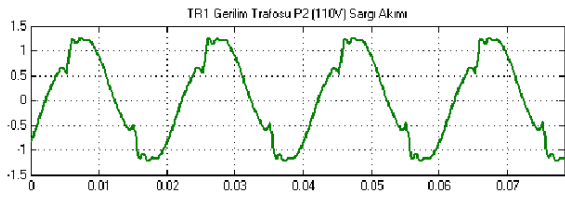


(c)

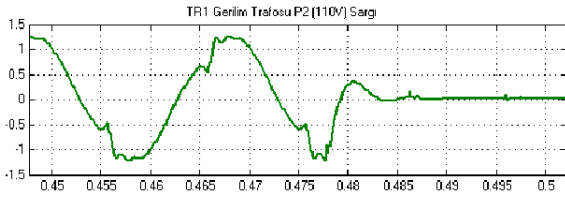
Şekil 6.71. BADS-1 ve BADS-2 bağlı, yük altındaki TR1 gerilim trafosunun P1 sargı gerilimi işaretleri



(a)

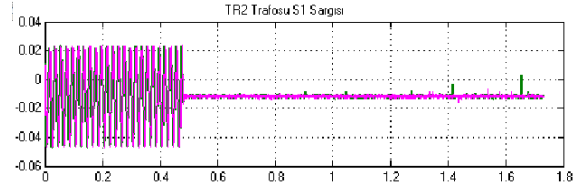


(b)

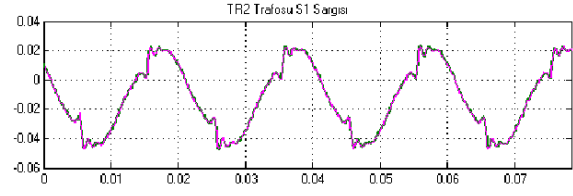


(c)

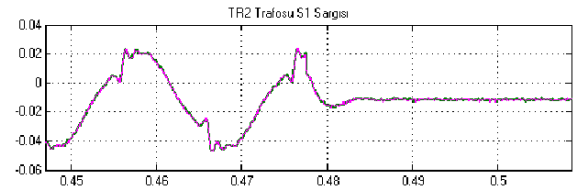
Şekil 6.72. BADS-1 ve BADS-2 bağlı, yük altındaki TR1 gerilim trafosu için, P2 sargı gerilimi işaretleri



(a)

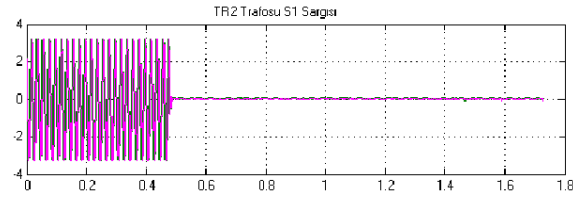


(b)

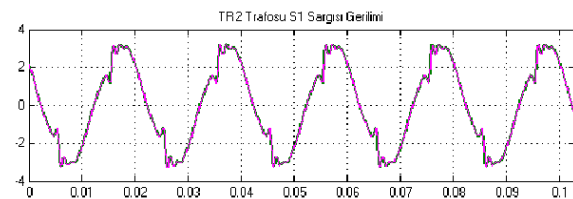


(c)

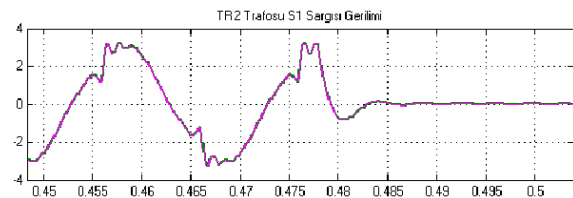
Şekil 6.73. BADS-1 ve BADS-2 bağlı, yük altındaki TR2 gerilim trafosu için, S1 sargı akımı işaretleri



(a)



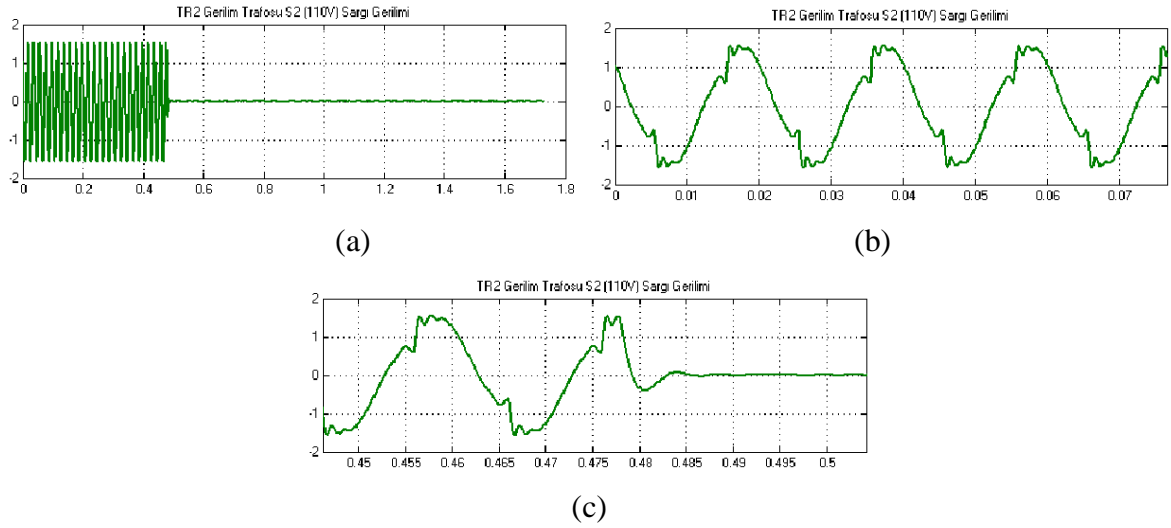
(b)



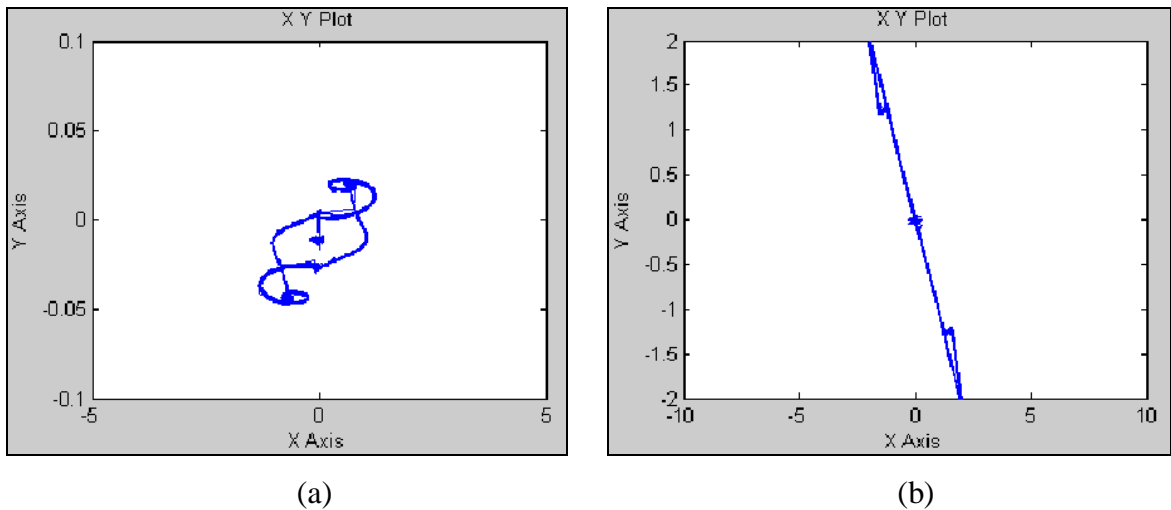
(c)

Şekil 6.74. BADS-1 ve BADS-2 bağlı, yük altındaki TR2 gerilim trafosu için, S1 sargı gerilimi işaretleri

Yüklü çalışan sisteminden alınan elektriksel verilere bakıldığında işaretlerdeki bozulma ile kapama açısının elektriksel büyüklüğü orantılı olduğu görülmüş, anahtar açma açısı da çekirdekte kalan artık mıknatıslığı etkilemektedir. Açma ve kapamada sıfır derecede işlem yapılması işaretlerin düzelmesine katkı sağlamaktadır.



Şekil 6.75. BADS-1 ve BADS-2 bağlı, yük altındaki TR2 gerilim trafosu için, S2 sargı gerilimi işaretleri



Şekil 6.76. Yüklü çalışan, (a) TR1 ve (b) TR2 gerilim transformatörünün primerdeki BADS-1 anahtarı $\alpha_{\text{kapama}} = 120^\circ$ ve $\alpha_{\text{acma}} = 45^\circ$ için ve sekonderdeki BADS-2 anahtarı $\alpha_{\text{kapama}} = 60^\circ$ ve $\alpha_{\text{acma}} = 15^\circ$ için mıknatıslanma akımı ile manyetik akı değişimini histerisiz çevrimi

Yüklü çalışan sisteminden alınan elektriksel verilere bakıldığından boştaki sistemden daha keskin eğriler olduğu görülmüştür. Ayrıca Şekil 6.76.'daki mıknatıslanma akımı ile manyetik akı değişimini histerisiz çevriminin aynı şartlardaki boşta çalışma durumundan daha karalı olduğu görülür.

6.3. Deneysel Sistem İle Benzetimlerin Karşılaştırılması

Deneysel sistem ile benzetimler karşılaştırıldığında boşta çalışma durumu, açı denetim sistemlerinin bulunmadığı durumda sistem parametrelerinin birbirine yakın eğrilere sahip olduğu görülür.

Boşta çalışma durumu için yalnız BADS-1 anahtarının bağlı olduğu ve $\alpha_{\text{kapama}}=30^\circ$ ve $\alpha_{\text{açma}}=0^\circ$ 'de Görev Yaptığı Durum için, benzetim çalışmaları incelendiğinde trafoların akım, gerilim, manyetik akı yoğunlu gibi elektriksel parametrelerin işaretlerinde bozulmalar olduğu ancak daha az yıkıcı olduğu görülür. Yine Şekil 6.18. Boşta çalışma durumu $\alpha_{\text{kapama}}=30^\circ$ ve $\alpha_{\text{açma}}=0^\circ$ için, TR2 gerilim transformatörü sekonder sargı gerilimine ait birim değer cinsinden fourier analizi grafiği incelendiğinde, 2. Derece harmonik bileşen ve 3. Derece harmonik bileşendeki simetride bozulmaların başladığı görülür. Aynı durum deneysel sistemde Şekil 6.60. boşta çalışma durumu için TR1 ve TR2 gerilim transformatörleri primer sargı gerilimine ait fourier analizinde daha net bir şekilde görülmektedir. Özellikle TR1 transformatörü P1 sargı gerilimi 2. derece harmonik bileşeninde işaretlerin bozulduğu görülür.

Yüklü çalışma durumunda, primerdeki BADS-1 anahtarı $\alpha_{\text{kapama}}=120^\circ$ ve $\alpha_{\text{açma}}=45^\circ$ ve sekonderdeki BADS-2 anahtarı, $\alpha_{\text{kapama}}=60^\circ$ ve $\alpha_{\text{açma}}=15^\circ$ için, benzetim çalışmaları incelendiğinde, TR2 gerilim transformatörü sekonder sargı gerilimine ait birim değer cinsinden fourier analizi Şekil 6.39.'da 2. ve 3. derece bileşenlerinin alt harmonik moddan yarı periyodik moda geçmeye başladığı görülmektedir. Şekil 6.69.'da deneysel sistemdeki TR1 ve TR2 trafolarının aynı şartlar için toplam harmonik bozulma işaretlerinde kapama ve açma darbelerinde bozulmalar çok yüksek seviyelere çıktığı görülmektedir.

7. SONUÇLAR

Güç kalitesinin artırılması üzerine yapılan çalışmalar, enerji sisteminde temel görevler üstlenen elemanların verimliliğinin artırılması konusunun yeniden gündeme gelmesinde etkili olmuştur. Bu çalışmada enerji sistemlerinde yaygın olarak kullanılan transformatörlerin enerji dönüşümü yaparken zaman zaman meydana getirdiği ferrezonans olgusu üzerine çalışılmıştır. Ferrerezonansın sistem parametrelerinden birçoğuna duyarlı olduğu bilinmektedir. Bunların en önemlilerinden biri olan devre kesici anahtarın kapama yada açma yaparken hangi elektriksel açıda görev yaparsa sistemin güvenilirliği daha yüksek olur sorusuna cevap aranmıştır. Çalışmalar, hem benzetim hem de deneysel incelemeler üzerinden yürütülmüştür. Bir yüksek gerilim sisteminde meydana gelen olayları anlayabilmek için yüksek gerilim enerji sistemlerinde kullanılan, iki adet gerilim ölçü transformatörü kullanılmıştır. Deneysel çalışmalar, NI-PCI 6229 veri aktarım kartı kullanılarak tamamlanmıştır.

Çalışmalarda ilk olarak YG ölçüm düzeni kurulmuş ve gerilim trafolarının ferrezonans durumunun oluşturulması sağlanmıştır. Ferrerezonans durumu ile sistem gerilimi arasındaki ilişkiyi anlayabilmek için elektronik denetimli bir anahtar tasarlanmıştır. Bu anahtar bağlandığı faz gerilimi ölçerek istenilen açıda kapama ve açma işlemleri yapacak şekilde iki farklı yöntemde tasarlanmıştır.

İlk yöntemde anahtar kapama ve açma işlemini bir mikrodenetleyici ile yaparak ferrezonansa, transformatör çekirdeğindeki başlangıç koşullarının etkisi ortaya çıkarılmıştır.

İkinci yöntemde, ölçülen sistemden alınan elektriksel veriler bilgisayar ortamına aktarıldıktan sonra, gerekli hesaplamalar yapıp dışarıya gönderilmiştir. Gönderilen bu verilerle çok yüksek hızlı güç elektroniği anahtarlarının bulunduğu devre kesici devreler kontrol edilerek incelenen transformatöre yüksek hassasiyette müdahale edilmiştir. Bu sistem ferrezonansın oluşum etkilerini ayrıntılı bir şekilde anlama ve önlemine almada çok ciddi katkılar sunmuştur.

Tasarlanan sistemin benzetimi ve deneysel sonuçları göstermiştir ki anahtar kapama açısı büyüdükçe ferrezonans olayının oluşma olasılığı artmış, sistemdeki akım ve gerilim işaretleri bozulmaya gitmiş, harmonik değerleri büyümüş, histerisiz eğrisi üzerinde küçük iç döngüler oluşmuştur. Büyük açı değerleri ile kapanan anahtarın, kapama anlarındaki toplam harmonik bozulmaları çok yüksek değerlere ulaşmaktadır.

Diğer taraftan bu çalışmada tasarlanan anahtar ile aynı zamanda kontrollü devre açma işlemide yapılmıştır. Kontrollü kapama yapan anahtar açma işleminde enerjisini keseceği fazın parametresinin sıfırdan geçtiği anları tepsi ederek gerekli gecikmeler ile sistemi açar. Bu işlem ile transformatör çekirdeğindeki artık akımın, rezonans ve harmonikler üzerine etkisinin incelenmiştir.

Literatüre bulunan çok az sayıdaki benzer çalışmada, ferrezonans olayına açma etkisi ya teorik hesaplama yöntemleri kullanılarak yada bilgisayar benzetimleri yardımıyla incelenmiştir. Bu çalışmada ilk defa gerçek fiziksel koşullar oluşturularak ferrezonans olayı incelenmiştir. Özellikle bilgisayar tabanlı açma denetim sistemi ile kapama ve açma açılarının transformatör çekirdeğindeki artık mıknatısa etkisi gözlemlenmiştir. Benzer çalışmalar incelendiğinde bu çalışmada sunulan açma denetim sistemi ilk olma özelliğini taşımaktadır.

Gelecekte tasarlanacak çok hızlı güç elektroniği devre elemanlarının yüksek gerilim ve akım sorunlarının giderileceği devre kesicilerin üretilmeye başlanmasıyla birlikte transformatör merkezlerinde, kesici ölçü kabinlerinde (KÖK), kontrollü manevra yapılmasına sağladığı katkılar nedeniyle yaygın olarak kullanılacağı öngörülebilmektedir.

8. ÖNERİLER

Bu tezde anahtar kapama açılarının transformatörlerde oluşan ferrezonans olayına etkilerinin incelemek istenilen elektriksel açılarda kapama ve açma yapabilen bir anahtar önerilmektedir. Gerilim ölçü transformatörü, akım ve gerilim sensör devreleri, yük devresi, NI-PCI 6221 veri aktarım cihazı ve faz kontrolü yapan IGBT anahtar ile deneysel çalışmada elde edilmiştir. Tasarlanan bu sistemin daha sağlıklı, daha verimli ve bilimsel kalitesi daha iyi sonuçlar vermesi için şunlar yapılması önerilir;

- Tasarlanan deneysel sistemdeki temel eleman olarak kullanılan gerilim transformatörlerinin güçleri, gerçek yüksek gerilim sistemlerinin temel taşı olan güç transformatörleriyle karşılaştırılmaz. Yapılan deneylerinin yaygın kullanıma sahip büyük güçlü bir transformatörde tekrarlanarak olası beklenmedik etkilerinin ortaya çıkarılması gerekir.
- Sistemde kullanılan rezonans devresi, laboratuvar fiziki koşulları, yalıtım ve finansman problemleri, gibi nedenlerle gerilim transformatörlerinin alçak gerilim sargılarına bağlanarak veriler alınmıştır. Daha sağlıklı veriler için rezonans devresi transformatörün yüksek gerilim sargısına bağlanarak deneyler sonuçları güçlendirilmelidir.
- Elektronik tabanlı açı denetim sistemi ister mikodenetleyici ile tasarlansın isterse de bilgisayar kullanılsın hepsinde de belli bir yazılım algoritmasına dayanmaktadır. Algoritma geliştirilerek daha hızlı kapama ve açma işlemlerini yapacak şekilde yeni tasarımlara ihtiyaç duyabilir.
- Tasarlanan sistem tamamen çok hızlı görev yapan güç elektroniği devre elemanlarının çalışma kabiliyeti dayanmaktadır. Çok daha hızlı görev yapan elemanlar kullanılarak sistemin hassasiyeti artırılabilir.
- Bu çalışmada kullanılan NI-PCI 6221 veri aktarım cihazı, sabit noktalı aritmetik işlem yapmaktadır. Bu da aritmetik işlemlerin ve trigonometrik işlemlerin sistemin hızını etkilemesi anlamına gelmektedir. Bu nedenle kayan noktalı işlem yapabilen, çok daha hızlı farklı sayısal işaret işlemcisi kullanılabilir.
- Elektrik dağıtım şebekeleri çoğunlukla üç faz üzerine kurulmaktadır. Sistemde kullanılacak üç fazlı trafolar ile deneyler tekrarlanmasında ve açı etkilerinin gözlemlenmesinde yarar vardır.

9. KAYNAKLAR

1. Zenk H. ve Akpinar A. S., High Voltage Instrument Transformers Ferroresonance Events Occurring in the Investigation of the Circuit Breaker Switch Positions, *Electrical and Electronic Engineering*, 4, 1, (2014), 10-19.
2. Akıncı, T. Ç., Gökmen, G., Mokryani, G., Ekren, N. ve Seker, S., Bir Fazlı İletim Sistemlerinde Ferrerezonans Olayının İncelenmesi, 5. Uluslararası İleri Teknolojiler Sempozyumu, Mayıs 2009, Karabük, Türkiye, *Bildiriler Kitabı*, 13-15.
3. Akıncı, T. Ç., Seker, S., ve Ekren, N., Spectral Analysis for Signal Based on Ferroresonance Phenomena in Electric Power System, *International Conference Engineering, Technologies and Systems TechSys'2009, Fundamental Sciences and Applications*, 14, May 2009, Plovdiv, Bulgaria, *Bildiriler Kitabı*, 29-30.
4. Ijaz, S.A., Ferroresonance On Power Systems, Master of Science in Electrical Engineering, The University of Texas at Arlington, 1992, USA.
5. Kieny, C., Application of the Bifurcation Theory in Studying and Understanding the Global Behavior of a Ferroresonant Electric Power Circuit, *IEEE Transactions on Power Delivery*, 6, 2, (1991).
6. Sakurung, P., Application of PSCAD/EMTDC and Chaos Theory to Power System Ferroresonance Analysis, *International Conference on Power Systems Transients (IPST'05)*, 19-23 June 2005, Montreal, Canada, No.IPST05-227,.
7. Tanggawelu, B., Mukerjee, R. N., Arifin, A. E., Ferroresonance Studies in Malaysian Utility's Distribution Network, *IEEE Power Engineering Society General Meeting*, 2, 13-17 July 2003, *Bildiriler Kitabı*,1216-1219.
8. Janssens, N., Vanderstockt, V., Denoel, H., Monfils, P. A., Elimination of Temporary Overvoltages due to Ferroresonance of Voltage Transformers: Design and Testing of a Damping System, 33, September 1990.
9. Naidu, S. R., Souza, B. A., Analysis of Ferroresonant Circuits in the Time and Frequency Domains, *IEEE Transactions on Magnetics*, 33, 5, September 1997, *Bildiriler Kitabı*, 3340-3342.
10. Batora, B., Toman, P., Topolanek, D., Belatka, M., Hesteresis and Influence on the Creation of the Ferroresonance, *XIV Modern Technique and Technologies International Conference*, 24-28 March 2008, Tomsk, Russia, *Bildiriler Kitabı*, 9-12.
11. Yiğit E., Güç Trafolarında Ferrerezonans Olayların Kaotik Analizi, Yüksek Lisans Tezi, Fen Bilimleri Enstitüsü, Sakarya Üniversitesi, Haziran 2009.

12. Alparslan Y., Elektrik Sistemlerinde Manyetik Çekirdekdeki Doyma Dolayısıyla Hasıl Olan Gerilimler (Ferrorezonans), Elektrik Mühendisliği 6. Teknik Kongresi, 1983, Bildiriler Kitabı,147-153.
13. Kocatepe C., Uzunoğlu M., Yumurtacı R., Karakaş A. ve Arıkan O., Elektrik Tesislerinde Harmonikler, Birsen Yayınevi, 2003.
14. Rajesh G. Kavasseri, Analytical Prediction of Subharmonic Oscillations in a Ferroresonant Circuit, Department of Electrical and Computer Engineering North Dakota State University, 58105 - 5285, Fargo, ND, USA.
15. Swift G. W., An Analytical Approach to Ferroresonance, IEEE Transactions On Power Apparatus And Systems, 88, 1, January 1969.
16. Yunge Li, Wei Shi and Furong Li, Novel Analytical Solution to Fundamental Ferroresonance—Part II: Criterion and Elimination, IEEE Transactions On Power Delivery, Vol. 21, No. 2, April 2006.
17. Bernard C., Lesieutre Jama A., Mohamed Aleksandar, M. Stankovid, Analysis of Ferroresonance in Three-phase Transformers, IEEE Transactions On Power Delivery, from IEEE xplore.
18. Rezaei-Zare A., Sanaye-Pasand M., Mohseni H., Farhangi S., ve Iravani R., Analysis of Ferroresonance Modes in Power Transformers Using Preisach-Type Hysteretic Magnetizing Inductance, IEEE Transactions On Power Delivery, 22, (2007).
19. Kavasseri R. G., Analysis Of Subharmonic Oscillations In a Ferroresonant Circuit, Elsevier Technical Journey, Electrical Power and Energy Systems, 2005,207–214.
20. Mulad M. S., Fahmy M. M., An Analytical investigation of a Ferroresonant Circuit, IEEE Transactions On Magnetics, MAG-16, 2, (1980), 465-469.
21. Rezaei-Zare A., Iravani R., Sanaye-Pasand M., Mohseni H., ve Farhangi S., An Accurate Hysteresis Model for Ferroresonance Analysis of a Transformer, IEEE Transactions On Power Delivery, 23, 3, (2008), 1448-1456
22. Al Zahawi B. A. T., Emin Z. ve Tong Y. K., Chaos in Ferroresonant Wound Voltage Transformers: Effect of Core Losses And Universal Circuit Behaviour, IEE Proc-Sci. Meas. Technol., 145,1, (1998).
23. Mozaffari S., Henschel S., ve Soudack A. C., Chaotic Ferroresonance In Power Transformers, IEE Proc.-Gener. Transm. Distrib., 142, 3, (1995).
24. Eung-Bo Shim, Jung-Wook Woo ve Sang-Ok Han, Digital Time-Domain Simulation of Ferroresonance of Potential Transformer in the 154 kV GAS Insulated Substation, KIEE International Transactions on PE, 11A-4, 9-14, (2001).

25. Mozaffari, S., Sameti M. ve Soudack, A. C., Effect of Initial Conditions on Chaotic Ferroresonance in Power Transformers, IEE Proc.-Gener. Transm. Distrib., 144, 5, September 1997.
26. K. Al-Anbari, R. Ramanujam, R. Saravanaselvan, K. Kuppusamy, Effect of iron core loss nonlinearity on chaotic ferroresonance in power transformers, Elsevier Electric Power Systems Research, 1,12, (2003).
27. H Lamba, S. McKee, R Simpson, The Effect Of Circuit Parameters On Ferroresonant Solutions in an LCR Circuit, J. Phys. A: Math. Gen. 31, 7065-7076, 1998. Printed in the UK PII: S0305-4470(98)89529-2.
28. David A. N. Jacobson, Examples of Ferroresonance in a High Voltage Power System.
29. J.R. Marti; A.C. Soudack, Ferroresonance in power systems: Fundamental Solutions, Jee Proceedings-C, J38, 4, (1991).
30. Saravanaselvan R., Ramanujam R., Al-Anbari K., ve Naresh S. L., Ferroresonant oscillations in a transformer terminated line due to an energised parallel line on the same right-of-way, IEE Proc.-Gener. Transm. Distrib., 152, 4, 2005.
31. Abdallah A. S., El-Kady M. A., Ferroresonance Phenomenon in Power Transformers - Experimental Assessment, JKAU: Eng. Sci., 16, 1, (2005), 71-82.
32. Shott, H.S., Peterson, H.A., Criteria for Neutral Stability of Wye-Grounded - Primary Broken-Delta-Secondary Transformer Circuits, Transactions on AIEE, 60, 1941, 997-1002.
33. Peterson, H.A., Transient in Power Systems, John Wiley & Sons, New York, USA, 1951.
34. Brenner, E., Subharmonic Response of the Ferroresonance Circuit with Coil Hysteresis, AIEE Transaction, 74, (1956), 450-456.
35. Plotkin, S., Discontinuous Transition Time Between Stable State in Ferroresonance Circuits, AIEE Transactions, 75, September (1957), 410- 421.
36. Van Craenenbroeck, T., Van Dommelen ve D., Janssens, N., Damping Circuit Design for Ferroresonance in Floating Power Systems, ETEP, 10, 3, May/June 2000.
37. Kelly, Jr. G.E., The Ferroresonance Circuit, AIEE Transactions, 77, (1959), 843-848.

38. Karlicek, R. F. Ve Taylor Jr. E. R., Ferroresonance of Grounded Potential Transformers on Ungrounded Power Systems, AIEE Transactions, 77, August (1959), 607-618.
39. Clerici, A. Ve Didriksen, C.H., Dynamic Overvoltages and Ferroresonance Found in Switching Surge Studies for Iran 400kV System, IEEE Winter Power Meeting, 1, January/February 1972, Bildiriler Kitabı, 195-203.
40. Prusty, S., Sanyal, S.K., Some New Solutions to Ferroresonance Problem in Power System, Proceeding of IEE, 124, 12, (1977), 1207-1211.
41. Barbisio, E., Bottauscio, O., Chiampi, M., Crotti, G., Giordano, D., Parameters Affecting Ferroresonance in LCR Electric Circuits, IEEE Transactions on Magnetics, 44, 6, June 2008.
42. Robert Gunnarsson, , Chalmers University of Technology, Phd Thesis, 2004.
43. Demiray, A. S., Nano Boyuttaki Bazı $\text{La}_{0.7}(\text{Sr}, \text{Ca})_{0.3}\text{MnO}_3$ İnce Filmlerin Ferromanyetik Rezonans İncelemeleri Yüksek Lisans Tezi, Gebze Yüksek Teknoloji Enstitüsü, Mühendislik ve Fen Bilimleri Enstitüsü, Kocaeli, 2009.
44. Ramadan Ebrahim Ali Shaioub, Phd Thesis, Universiti Putra Malaysia, 2004.
45. Jiles D, Introduction to Magnetism and Magnetic Materials, Chapman, hall London, 1994.
46. Chikazumi S., Physics of Ferromagnetism, Oxford University Press, 1994.
47. Chapman S. J., Elektrik Makinalarının Temelleri, Çağlayan Kitabevi, İstanbul.
48. Bal G., Transformatorlar, Seçkin Yayıncılık, Ankara, 2008.
49. İ. Şenol, N. Bekiroğlu, O Aybar, Elektrik Makineleri I, Birsen Yayınevi, 2005.
50. Çanakoğlu A. İ., Ünsal A., Tunaboş N. S., Elektrik Makinaları, Açıköğretim Fakültesi Yayınları, Eskişehir, Haziran 2012.
51. Peşint A., Ürkmez A., Elektrik Makineleri Cilt II, Milli Eğitim Basımevi, İstanbul, 1984.
52. Mergen A. F., Kocabaş D. A., Elektrik Makineleri I, Birsen Yayınevi, İstanbul, 2006.
53. Sen, P. S., Principles of Electric Machines and Power Electronics, John Wiley & Sons, Toronto, 1997.
54. Rosenblatt J., Charles E. Merrill, Friedman M. H., Direct and Alternating Current Machinery, London, 1984.

55. Sarma S. M., Electric Machines, West Publishing Company, New York, 1985.
56. MEGEP, Elektrik Elektronik Teknolojisi Ders Notları, Ölçü Transformatörleri, MEB Yayınları, Ankara, 2007.
57. TEDAŞ, Elektrik Dağıtım Teknisyeni Temel Eğitimi, Ankara, 1996.
58. Akıncı, T. Ç., Güç Sistemlerinde Ferrerezonans Olayının Spektral ve Dalgacık Analizi Yöntemleriyle Belirlenmesi, Doktora Tezi, Marmara Üniversitesi, Fen Bilimleri Enstitüsü, İstanbul, 2009.
59. Akpınar S., An Approach To The Analysis of Fundamental Frequency Ferreresonance, Electric Machines and Power Systems, 18, 1990.
60. Özer M., Akpınar S., Cebeci M., Kürüm H., Başlangıç Koşullarının Ferrerezonans Olaylarına Etkileri, Elektrik Mühendisliği 6. Ulusal Kongresi, Bursa, Eylül, 1995, Bildiriler Kitabı, 223-226.
61. Altuncu A., Elektronik I Ders Notları, Dumlupınar Üniversitesi, Kütahya, 2009.
62. Akpınar A. S., Altaş İ. H. ve Okumuş H. İ., Temel Elektrik Laboratuvarı I Deney Föyü, Elektrik Elektronik Müh. Böl., KTÜ.
63. Jacobson, D. A. N., Swatek, D. R. ve Mazur, R.W., Mitigating Potential Transformer Ferreresonance in a 230kV Converter Station, Transmission and Distribution Conference, , Canada, September 1996, Bildiriler Kitabı, 269-275.
64. Van Craenenbroeck, T., Van Dommelen, D., Stuckens, C., Janssens, N. A., ve Monfis, P., Harmonic Balance Based Bifurcation Analysis of Three-Phase Ferreresonance with Full Scale Experimental Validation, IEEE Transmission and Distribution Conference, 2, New Orleans, USA, 11-16, April 1999. Bildiriler Kitabı, 772-777.
65. Sanaye P. M. ve Aghazadeh, R., Capacitive Voltage Substations Ferreresonance Prevention Using Power Electronic Devices, International Conference on Power Systems Transients-IPST'03, New Orleans, USA, 2003.
66. Al-Anbarri, K., Ramanujam, R., Keerthiga, T., Kuppusamy, K., Analysis of Nonlinear Phenomena in MOV Connected Transformer, IEE Proc.-Gener.Transform Distribution, 148, 6, (2001), 562-566.
67. Ferracci, P., Ferreresonance, Cahier Technique, 190, Schneider Electric, Mart 1998.
68. Akça, F., Enerji İletim Sistemlerinde Ferrerezonans Olayının Analizi, Yüksek Lisans Tezi, SAÜ Fen Bilimleri Enstitüsü, Sakarya, 2002.

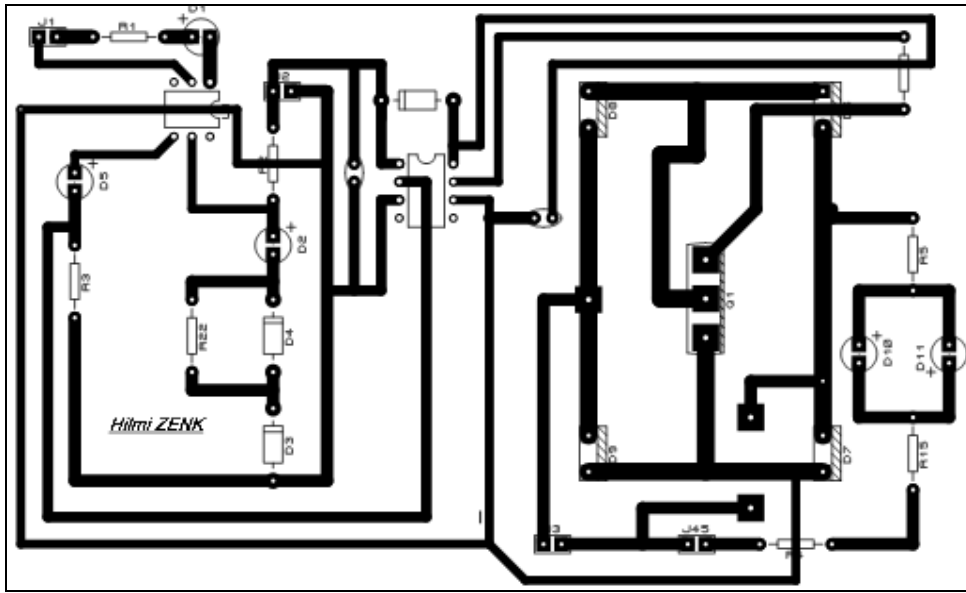
69. Morkyani, M., ve Haghifam, R., Identification of Ferroresonance Based on Wavelet Transform and Artificial Neural Networks, IEEE Manuscript receiving date: 2007.
70. Araujo A. E., Soudack A. C., ve Marti J. R., Ferroresonance In Power Systems: Chaotic Behaviour, IEE Proceedings C, 140, 3, 1993.
71. Emin, Z., Al Zahawi ,B. A. T., Auckland, D. W., ve Tong, Y. K., Ferroresonance in Electromagnetic Voltage Transformers: A Study Based on Nonlinear Dynamics Ferroresonance in a High Voltage Power Sistem, IEE Proc. Gener. Transm Distrib., 144, 4, 1997, 383-387.
72. Iravani, M. R., Chaudhary, A. K. S., Giesbrecht, W. J., Hassan, I. E., Keri, A. J. F., Lee, K. C., Martinez, J. A., Morched, A. S., Mork, B. A., Parniani, M., Sharshar, A., Shirmohammadi, D., Walling, R. A., ve Woodford, D. A., Modelling and Analysis Guidelines for Slow Transients – Part: The Study of Ferroresonance, IEEE Transactions on Power Delivery, 15, 1, (2000), 255-265.
73. Smith, K., Wind Farm Transformer Inrush Studies, PSCAD Application Notes, [https://pscad.com/resource/File/Library/Application Note Wind Farm Transformer Inrush Studies](https://pscad.com/resource/File/Library/Application%20Note%20Wind%20Farm%20Transformer%20Inrush%20Studies), 2011.
74. Dimitriyev, Y. V., Haşimov, A. ve Nayır, A., Elektrik İletim Hatlarında Kaza Açmalarında Oluşan Gerilimlerin Modelleri, , Bakü, ELM, Azerbaycan, 2002.
75. Hoesrauf, R., Nichols, N., Avoiding Potential Transformer Ferroresonant Problems in Industrial Power Systems, IEEE, Industrial and Commercial Systems Technical Conference, 1989, Bildiriler Kitabı, 61-68.
76. Dugan, R. C., Examples of Ferroresonance in Distribution Systems, IEEE Power Engineering Society General Meeting, 2, (2003), 1213-1215.
77. IEEE, 2008. IEEE Guide for Application of Transformer Connections in Three-Phase Distribution System, 20-27. Date of Approval: June 2, 1977. Date of Affirmation March 27, 2008.
78. Kara Ö., Ferrorezonans Olgusunun Anlaşılması ve Engellenmesi İçin Alınabilecek Önlemlerin İrdelenmesi: Dağıtılmış Enerji Üretimi Sistemlerinde Ferrorezonans, Yüksek Lisans Tezi, İTÜ, Fen Bilimleri Enstitüsü, İstanbul, 2011.
79. Jacobson D., Examples of Ferroresonance in a High Voltage Power System-sunumu, IEEE Power Engineering Society 2003 General Meeting, Toronto, Ontario, 13-17 July 2003.
80. Akpınar S. ve Nasar S.A., Harmonic Balance Analysis of the Subharmonic Ferroresonance, Electric Machines And Power Systems, 18, (1990), 409-428.

81. Özden T., Kapama Açısının Üç Fazlı Asenkron Motorların Dinamik Davranışına Etkisi, Yüksek Lisans Tezi, KTÜ, Fen Bilimleri Enstitüsü, Trabzon, 2006.
82. Zenk H. ve Akpınar A. S., Electrical Harmonic Effects of Controlled System Switch's On-Off Angle, during Ferroresonance Events, Universal Journal of Electrical and Electronic Engineering 2, 4, (2014), 197-205.
83. Akpınar S., Parametric Analysis of Ferroresonance. Including Hysteresis Effects, Electric Machines and Power Systems, 18, 1990.
84. Akpınar S., Tek Fazlı Transformatörlerden Oluşan Transformatör Banklarında Açma-Kapama Açısının ve Çekirdek Anlık Mıknatıslığının Geçici-Hal Davranış Üzerine Etkileri, Elektrik Mühendisliği II Ulusal Kongresi, Ankara, 1987.

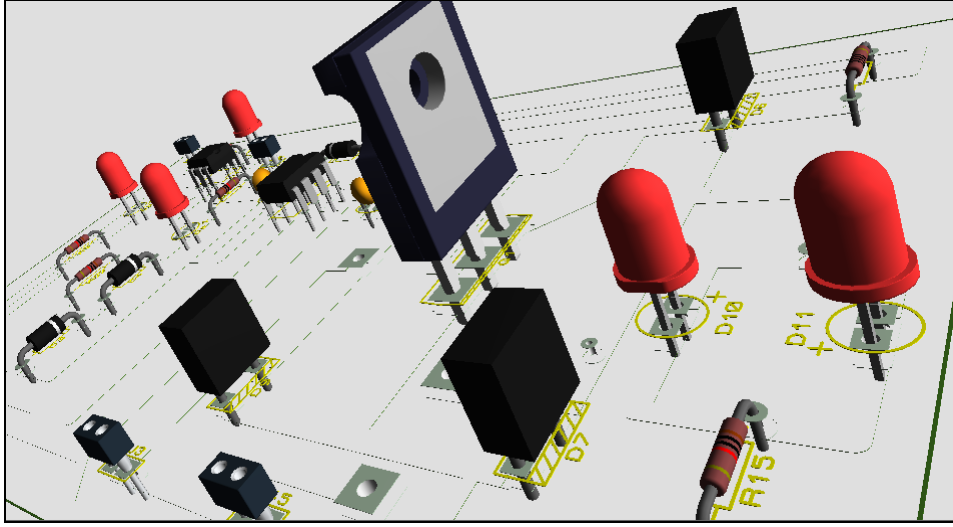
10. EKLER

EK 1. Sistemde Kullanılan Devrelerle İlgili Bilgiler

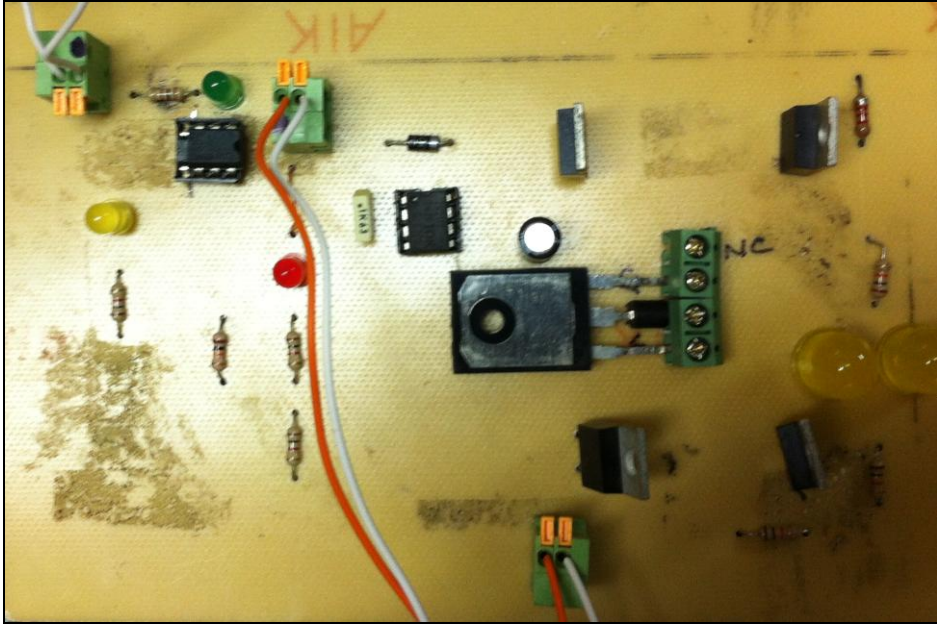
Şekil 5.19.'da tasarlanan güç devresinin ISIS/Proteus programında hazırlanan baskı devre şeması Ek Şekil 1.'de görülmektedir. Aynı devrenin üç boyutlu (3D) görüntüsü de Şekil 10.2.'de verilmiştir. Sistemin genel amacı; başlangıçta ayarlanmış anahtarlama açısı kadar gecikme ile sisteme enerji vererek yada enerjisini keserek dinamik davranışını incelemektir. Bundan dolayı incelenen sistemin dinamik davranışını tam anlayabilmek için istenilen anahtarlama açıları için sistemin her bir bileşeni kabul edilebilir bir gecikme ile çalışmalıdır. Bu amaç göz önünde tutularak seçilen IGBT'ler (11N80C3) 100 ns'de, diyotlar (DSEI 12-12A) ise 50 ns'de ilettime geçebilmektedirler. Her iki elemanın ilettime geçme süreleri, 20 ms olan alternatif akımın bir periyotunun oluşma süresinin yanında çok küçüktür. Dolayısıyla sistemin genel davranışına göre çok hızlı olduklarından, anahtarlama açılarında oluşturdukları gecikmeler yaklaşık 10 mikrosaniye kadardır ve buda ihmal edilecek düzeydedir. Mikrodenetleyicinin tetikleme işaretlerinin girdiği, faz için besleme kısımlarınca beslenen, yalıtım ve sürme kısımlarına sahip olan güç devresinin resmi Şekil 10.3.'de görüldüğü gibidir.



Ek Şekil 1. Güç ünitesi baskı devre seması

EK 1.'in Devamı:

Ek Şekil 2. Güç ünitesi üç boyutlu görüntüsü



Ek Şekil 3. Güç devresi resmi

EK 2. Tez Aşamasında Üretilen Yayınlar

1. Zenk H., Akpınar A. S., Electrical Harmonic Effects of Controlled System Switch's On-Off Angle, during Ferroresonance Events, Universal Journal of Electrical and Electronic Engineering Vol.2, No.4, 197-205, 2014. DOI: 10.13189/ujeee.2014.020408.
2. Zenk H., Akpınar A. S., High Voltage Instrument Transformers Ferroresonance Events Occurring in the Investigation of the Circuit Breaker Switch Positions, Electrical and Electronic Engineering, Vol.4 No.1, 10-19, 2014. doi: 10.5923/j.eee.20140401.02.
3. Zenk H., Akpınar A. S., An Investigation Of The Circuit Breaker ON-OFF Angle Position At Ferroresonance Events Occurring In Voltage Transformers, Journal of Electrical and Control Engineering 2014. (Yayınlanma aşamasında)
4. Zenk, H., Akpınar A. S., Dynamic Performance Comparison of Cúk Converter with DC Motor Driving and Using PI, PID, Fuzzy Logic Types Controllers, Universal Journal of Electrical and Electronic Engineering Vol.2, No.2, 90-96, Feb 2014. DOI: 10.13189/ujeee.2014.020206.
5. Zenk H., Akpınar A. S., Solar Power Generation Potentials Of The Houses In Turkey. International Conference on Environmental Science and Technology (ICOEST 2013), 01/2013.
6. Zenk, H., Akpınar A. S., PI, PID and fuzzy logic controlled SSSC connected to a power transmission line, voltage control performance comparison, 2013 Fourth International Conference on Power Engineering, Energy and Electrical Drives, POWERENG-2013, 1493 - 1497, İstanbul, 13-17 May 2013.
7. Zenk, H., Akpınar A. S., Multi Zone Power Systems Load-Frequency Stability Using Fuzzy Logic Controllers, Journal of Electrical and Control Engineering Dec Vol.2, No.6, 49-54, 2012.
8. Zenk, H., Zenk O., and Akpınar A. S., Two different power control system load-frequency analysis using fuzzy logic controller." Innovations in Intelligent Systems and Applications (INISTA), 2011 International Symposium on. IEEE, 2011.
9. Akyazı, Ö., Zenk H., Akpınar A. S., Farklı Bulanık Üyelik Fonksiyonları Kullanarak Sürekli Mıknatıslı DA Motorunun Hız Denetiminin Gerçeklenmesi, 6th International Advanced Technologies Symposium (IATS'11), 2011.
10. Zenk, H., Altaş İ. H., Farklı Kural Tabanlı Bulanık Mantık Denetleyicilerle DA Motorunu Denetlerken Performanslarının Kıyaslanması TOK'10 Otomatik Kontrol Ulusal Toplantısı, 536-540, Eylül 2010.

ÖZGEÇMİŞ

Hilmi ZENK 1983 yılında Giresun'da dünyaya geldi. İlk ve ortaokulu Giresun'un Dereli ilçesinde, lise öğrenimini Giresun Lisesi'nde tamamladı. 2004 yılında Dumlupınar Üniversitesi, Elektrik-Elektronik Mühendisliği Bölümü'nden Elektrik-Elektronik Mühendisi unvanı ve Şeref Öğrencisi olarak mezun oldu. Aynı yıl Yıldız Teknik Üniversitesi, FBE, Elektronik ve Haberleşme Anabilim Dalında Yüksek Lisansa eğitime başladı. 2004 yılında Türkiye Elektrik Dağıtım A.Ş. Giresun Elektrik Dağıtım Müessesesi, Proje ve Tesis Müdürlüğüne, Proje Mühendisi olarak atandı. Burada, Proje ve Ar-GeP Başmühendisi, Bilgi İşlem Şefi, Performans Yönetimi ve İş Güvenliği Şeflikleri ile Kontrol Mühendisliği görevlerini yürüttü. 2005 yılında KTÜ, Fen Bilimleri Enstitüsü, Elektrik-Elektronik Anabilim Dalında Doktora Eğitime başladı. 2008 yılında Giresun Üniversitesi, Meslek Yüksekokulu, Teknik Programlar Bölümü, Elektronik Programında Öğretim Görevlisi olarak atandı. Halen bu görevine devam etmektedir. İngilizce bilmektedir. 2011 yılında evlenmiş olup bir çocuk babasıdır.