



YÜKSEK FREKANSLI İNDÜKSİYON ISITMA SİSTEMİ TASARIMI VE UYGULAMASI

Hüseyin Emre ÖZDEN

**2020
YÜKSEK LİSANS TEZİ
ELEKTRİK-ELEKTRONİK MÜHENDİSLİĞİ**

**Tez Danışmanı
Doç. Dr. Selim ÖNCÜ**

**YÜKSEK FREKANSLI İNDÜKSİYON ISITMA SİSTEMİ TASARIMI VE
UYGULAMASI**

Hüseyin Emre ÖZDEN

**T.C.
Karabük Üniversitesi
Lisansüstü Eğitim Enstitüsü
Elektrik-Elektronik Mühendisliği Anabilim Dalında
Yüksek Lisans Tezi
Olarak Hazırlanmıştır**

**Tez Danışmanı
Doç. Dr. Selim ÖNCÜ**

**KARABÜK
Temmuz 2020**

Hüseyin Emre ÖZDEN tarafından hazırlanan “YÜKSEK FREKANSLI İNDÜKSİYON ISITMA SİSTEMİ TASARIMI VE UYGULAMASI” başlıklı bu tezin Yüksek Lisans Tezi olarak uygun olduğunu onaylarım.

Doç. Dr. Selim ÖNCÜ

.....

Tez Danışmanı, Elektrik-Elektronik Mühendisliği Anabilim Dalı

Bu çalışma, jürimiz tarafından oy birliği ile Elektrik-Elektronik Mühendisliği Anabilim Dalında Yüksek Lisans tezi olarak kabul edilmiştir. 13/07/2020

Ünvanı, Adı SOYADI (Kurumu)

İmzası

Başkan : Dr. Öğr. Üyesi Ersagun Kürşat YAYLACI (KBÜ)

.....

Üye : Doç. Dr. Selim ÖNCÜ (KBÜ)

.....

Üye : Dr. Öğr. Üyesi Rıfki TERZİOĞLU (BAİBÜ)

.....

KBÜ Lisansüstü Eğitim Enstitüsü Yönetim Kurulu, bu tez ile, Yüksek Lisans derecesini onamıştır.

Prof. Dr. Hasan SOLMAZ

.....

Lisansüstü Eğitim Enstitüsü Müdürü

“Bu tezdeki tüm bilgilerin akademik kurallara ve etik ilkelere uygun olarak elde edildiğini ve sunulduğunu; ayrıca bu kuralların ve ilkelerin gerektirdiği şekilde, bu çalışmadan kaynaklanmayan bütün atıfları yaptığımı beyan ederim.”

Hüseyin Emre ÖZDEN

ÖZET

Yüksek Lisans Tezi

YÜKSEK FREKANSLI İNDÜKSİYON ISITMA SİSTEMİ TASARIMI VE UYGULAMASI

Hüseyin Emre ÖZDEN

Karabük Üniversitesi

Lisansüstü Eğitim Enstitüsü

Elektrik-Elektronik Mühendisliği Anabilim Dalı

Tez Danışmanı:

Doç. Dr. Selim ÖNCÜ

Temmuz 2020, 57 sayfa

Bu çalışmada, yüksek frekanslı indüksiyon ısıtma sistemi tasarımı, simülasyonu ve uygulaması yapılmıştır. Sistem D sınıfı yarım köprü seri rezonans evirici kullanılarak tasarlanmıştır. Anahtarlama elemanı olarak MOSFET kullanılmıştır.

Sayısal faz kilitlemeli döngü kontrol tekniği uygulanarak yumuşak anahtarlama koşulları gerçekleştirilmiştir. Mikrodenetleyiciye yazılan program ile evirici anahtarlama frekansının yük değişimine göre rezonans frekansını takip etmesi sağlanmıştır. Yüksek anahtarlama frekansında çalışarak iş parçalarının dalma derinliği sığ tutulmuştur. Sisteme ait parametreler kullanılarak analiz, simülasyon ve uygulama sonuçları karşılaştırılmıştır.

Anahtar Sözcükler : D sınıfı seri rezonans evirici, indüksiyon ısıtma, sayısal faz
kilitlemeli döngü

Bilim Kodu : 905.1.033

ABSTRACT

M. Sc. Thesis

DESIGN AND APPLICATION OF HIGH FREQUENCY INDUCTION HEATING SYSTEM

Hüseyin Emre ÖZDEN

**Karabük University
Institute of Graduate Programs
Department of Electrical-Electronics Engineering**

Thesis Advisor:

Assoc. Prof. Dr. Selim ÖNCÜ

July 2020, 57 pages

In this study, design, simulation and implementation of high frequency induction heating system was made. The system was designed by using class D half bridge series resonant inverter. MOSFET was used as the switching device.

The system was designed by using class D half bridge series resonant inverter. Soft switching conditions were achieved by applying digital phase locked loop (PLL) control technique. With the program written to the microcontroller, the inverter switching frequency is provided to track the resonance frequency according to the load change. The skin depth of the workpiece was kept thin with high switching frequency. Analysis, simulation and implementation results were compared.

Key Word : Class D series resonant inverter, induction heating, digital phase
locked loop

Science Code : 905.1.033

TEŞEKKÜR

Bu tez alıőmasının planlanmasında, araőtırılmasında, yürütülmesinde ve oluşumunda ilgi ve desteğini esirgemeyen, engin bilgi ve tecrübelerinden yararlandığım, yönlendirme ve bilgilendirmeleriyle alıőmamı bilimsel temeller ışığında őekillendiren sayın hocam Do. Dr. Selim ÖNCÜ'ye sonsuz teşekkürlerimi sunarım.

Sevgili aileme manevi hiçbir yardımını esirgemedен yanımda oldukları için tüm kalbimle teşekkür ederim.

İÇİNDEKİLER

	<u>Sayfa</u>
KABUL.....	ii
ÖZET.....	iv
ABSTRACT.....	vi
TEŞEKKÜR.....	viii
İÇİNDEKİLER	ix
ŞEKİLLER DİZİNİ.....	xi
ÇİZELGELER DİZİNİ	xiii
SİMGELER VE KISALTMALAR DİZİNİ	xiv
BÖLÜM 1	1
İNDÜKSİYON ISITMA SİSTEMLERİ.....	1
1.1. GİRİŞ.....	1
1.2. LİTERATÜR ÖZETİ	2
1.3. TEZİN KAPSAMI	6
BÖLÜM 2	7
İNDÜKSİYON ISITMA SİSTEMİ TEMEL KAVRAMLARI.....	7
2.1. İNDÜKSİYON ISITMA TEMEL TEORİSİ	7
2.2. ELEKTROMANYETİK İNDÜKSİYON	9
2.3. DALMA DERİNLİĞİ	10
2.4. İNDÜKSİYON ISITMA SİSTEMLERİNİN AVANTAJLARI	11
BÖLÜM 3	13
EVİRİCİ SİSTEMLER	13
3.1. GÜÇ ELEKTRONİĞİ KAVRAMI.....	13
3.2. REZONANS DÖNÜŞTÜRÜCÜLER.....	13
3.3. EVİRİCİLER.....	15
3.4. D SINIFI SERİ REZONANS EVİRİCİ	17

3.5. D SINIFI SERİ REZONANS EVİRİCİ ANALİZİ	18
BÖLÜM 4	23
EVİRİCİ KONTROL YÖNTEMLERİ VE FAZ KİLİTLEMELİ DÖNGÜ	23
4.1. EVİRİCİ KONTROL YÖNTEMLERİ	23
4.2. FAZ KİLİTLEMELİ DÖNGÜ	24
4.2.1. Faz Karşılaştırıcı	26
4.2.1.1. Özel Veya (XOR) Faz Karşılaştırıcı	26
4.2.2. Filtre Devresi	27
4.2.3. Osilatör	27
4.2.4. Faz Kilitlemeli Döngü Çeşitleri.....	28
BÖLÜM 5	30
BENZETİM VE DENEYSEL ÇALIŞMALAR.....	30
5.1. İNDÜKSİYON ISITICI TASARIMI.....	30
5.1.1. Doğrultma ve Filtreleme.....	31
5.1.2. Sürücü Devre	31
5.1.3. Evirici ve Kontrol Devresi.....	32
5.2. EVİRİCİNİN MATEMATİKSEL MODELLENMESİ	36
5.3. EVİRİCİ SİMÜLASYONU	37
5.3.1. MATLAB Simülasyonu	38
5.3.2. PSpice Simülasyonu	40
5.4. DENEYSEL SONUÇLAR.....	41
5.5. ANALİZ, SİMÜLASYON VE DENEYSEL SONUÇLARIN KARŞILAŞTIRILMASI	46
BÖLÜM 6	47
SONUÇ VE ÖNERİLER	47
KAYNAKLAR	49
EK AÇIKLAMALAR A. MİKRODENETLEYİCİ YAZILIMINDAN KESİT	55
ÖZGEÇMİŞ	57

ŞEKİLLER DİZİNİ

Sayfa

Şekil 2.1. İndüksiyon ısıtma eşdeğer devresi	7
Şekil 2.2. İndüksiyon ısıtma güç dönüşüm blok diyagramı	9
Şekil 2.3. Akım yoğunluğu ve dalma derinliği ilişkisi.....	10
Şekil 2.4. Çalışma frekansına göre aynı iş parçası üzerindeki dalma derinliği.....	11
Şekil 3.1. Seri ve paralel rezonans devresi	14
Şekil 3.2. Temel evirici diyagramı	15
Şekil 3.3. D sınıfı seri rezonans evirici	18
Şekil 3.4. Evirici akım ve gerilimi	19
Şekil 3.5. Evirici çalışma durumları.....	20
Şekil 3.6. D sınıfı seri rezonans evirici eşdeğer devresi.....	20
Şekil 4.1. Faz kilitlemeli döngü blok diyagramı	25
Şekil 4.2. PLL tarafından kilitlemiş iki sinyal [58].....	25
Şekil 4.3. XOR kapısı ve giriş-çıkış sinyalleri [62]	26
Şekil 4.4. Aktif ve pasif filtre devresi	27
Şekil 4.5. Gerilim kontrollü osilatör giriş ve çıkış değerleri.....	28
Şekil 4.6. Analog faz kilitlemeli döngü blok diyagramı	28
Şekil 4.7. Sayısal faz kilitlemeli döngü blok diyagramı.....	29
Şekil 4.8. Tüm sayısal faz kilitlemeli döngü blok diyagramı.....	29
Şekil 4.9. Yazılım faz kilitlemeli döngü blok diyagramı	29
Şekil 5.1. İndüksiyon ısıtma sistemi blok diyagramı	30
Şekil 5.2. Doğrultma ve filtre devresi	31
Şekil 5.3. Sürücü devresi.....	31
Şekil 5.4. Alt ve üst MOSFET sürücü sinyalleri.....	32
Şekil 5.5. Sürücü sinyalleri arasındaki ölü zaman.....	32
Şekil 5.6. İndüksiyon ısıtma evirici ve kontrol devresi blok diyagramı.....	33
Şekil 5.7. Eviricide güç anahtarı yapısı.....	33
Şekil 5.8. Mikrodenetleyici çıkışındaki PWM sinyali	34
Şekil 5.9. Sürücü ve kontrol devresi.....	34
Şekil 5.10. Faz kilitlemeli döngü algoritması	35

Sayfa

Şekil 5.11. Modellenen eşdeğer devre	36
Şekil 5.12. Evirici MATLAB modeli.....	37
Şekil 5.13. MATLAB modeli evirici akım grafiği.....	37
Şekil 5.14. MATLAB simülasyon devresi	38
Şekil 5.15. MATLAB simülasyon anahtarlama sinyalleri	39
Şekil 5.16. MATLAB simülasyonu evirici akımı.	39
Şekil 5.17. MATLAB simülasyonu evirici akım ve gerilimi.....	39
Şekil 5.18. PSpice simülasyon devresi.....	40
Şekil 5.19. PSpice simülasyonu evirici akımı ve gerilimi	40
Şekil 5.20. PSpice simülasyonu primer ve sekonder akımı	41
Şekil 5.21. 87 kHz anahtarlama frekansında çalışma sinyalleri.....	41
Şekil 5.22. Rezonans frekansı üzerinde çalışma sinyalleri	42
Şekil 5.23. 76 kHz anahtarlama frekansında akım ve anahtarlama sinyalleri	42
Şekil 5.24. 76 kHz anahtarlama frekansında evirici gerilim ve akım sinyalleri	43
Şekil 5.25. Anahtarlama ve sekonder akım sinyalleri.....	43
Şekil 5.26. Isıtılan iş parçası	44
Şekil 5.27. Isıtılan iş parçasının termal kamera görüntüsü	45
Şekil 5.28. İndüksiyon ısıtma sistemi genel görüntüsü.....	45

ÇİZELGELER DİZİNİ

	<u>Sayfa</u>
Çizelge 4.1. Faz karşılaştırıcı çeşitleri ve özellikleri [58].....	26
Çizelge 4.2. XOR kapısı doğruluk tablosu [62].....	27
Çizelge 5.1. Eşdeğer devre parametreleri	38
Çizelge 5.2. Eşdeğer parametreler	46
Çizelge 5.3. Sonuç tablosu	46

SİMGELER VE KISALTMALAR DİZİNİ

SİMGELER

- $C_{eş}$: eşdeğer kondansatör (F)
 $R_{eş}$: eşdeğer direnç (Ω)
 $L_{eş}$: eşdeğer bobin (H)
 X_L : endüktif reaktans (Ω)
 X_C : kapasitif reaktans (Ω)
 μ_r : bağıl manyetik geçirgenlik
 ρ : elektriksel özdirenç
 δ : dalma derinliği (m)
 ω : anahtarlama açısal hız (rad/s)
 f_r : rezonans frekansı (Hz)
 $V_{c(t)}$: kondansatör anlık gerilimi (V)
 V_{cm} : kondansatör tepe gerilimi (V)
 Z : empedans (Ω)
 ψ : faz açısı
 I_{Lm} : bobin tepe akımı (A)
 I_L : bobin akımı (A)
 $I_{p(max)}$: primer tepe akımı (A)
 $I_{s(max)}$: sekonder tepe akımı (A)

KISALTMALAR

AC	: Alternative Current (Alternatif Akım)
DC	: Direct Current (Doğru Akım)
BJT	: Bipolar Junction Transistor (İki Kutuplu Jonksiyon Transistör)
IGBT	: Insulated Gate Bipolar Transistor (Yalıtılmış Kapılı İki Kutuplu Transistör)
MOSFET	: Metal Oxide Semiconductor Field Effect Transistor (Metal Oksit Yarı İletken Alan Etkili Transistör)
PLL	: Phase Locked Loop (Faz Kilitlemeli Döngü)
EMI	: Electromagnetic Interference (Elektromanyetik Gürültü)
PWM	: Pulse Width Modulation (Darbe Genişlik Modülasyonu)
DSP	: Digital Signal Processor (Sayısal İşaret İşlemci)
FPGA	: Field Programmable Gate Array (Alanda Programlanabilir Kapı Dizi)
PLC	: Programmable Logic Controller (Programlanabilir Lojik Kontrolcü)
PDM	: Pulse Density Modulation (Darbe Yoğunluk Modülasyonu)
GTO	: Gate Turn Off Thyristor (Kapıdan Kesmeli Tristör)

BÖLÜM 1

İNDÜKSİYON ISITMA SİSTEMLERİ

1.1. GİRİŞ

İndüksiyon yoluyla metal ısıtmanın temelleri 1831 yılında Michael Faraday tarafından keşfedilmiştir. Michael Faraday çalışmaları ile elektrik akımının değişken manyetik alanla üretilebileceği sonucuna varmıştır. Buna göre eğer iletken bir parça, değişken manyetik alan içerisine bırakılırsa üzerinde akım endüklenir. Endüklenen bu akım, iletken parçanın direnci sonucunda oluşan joule etkisi ile parçanın ısınmasına yol açar [1,2]. İndüksiyon ısıtma temel olarak elektrik enerjisinin ısı enerjisine dönüştürülmesidir. İki aşamalı güç dönüşümü içermektedir. İlk aşamada alternatif kaynak gerilimi doğru gerilime çevrilir, ikinci aşamada ise bu doğru gerilim, evirici ile istenilen frekans ve genlikte alternatif gerilime çevrilir. Diğer ısıtma sistemlerine göre en önemli avantajı ısının ısıtılacak parça içerisinde oluşturulmasıdır [3].

İndüksiyon ısıtma sistemlerinin kullanılmaya başlandığı ilk dönemlerde yatırım maliyetleri diğer sistemlere göre daha yüksekti. Bu aşamada frekans değiştirici olarak motor-alternatör grupları, manyetik frekans çoğaltıcılar, üç elektrot lambalı invertörler veya kendinden uyarımlı osilatörler kullanılmıştır [4]. Teknolojinin ilerlemesiyle beraber indüksiyon ısıtma sistemlerinde gelişmiştir. BJT ve MOSFET gibi yüksek frekanslı güç elemanlarının gelişimiyle verimli güç dönüştürücüler dizayn edilmiştir. Böylece indüksiyon ısıtma teknolojisi birçok uygulamada önemli bir seçenek haline gelmiştir. Sonraki zamanlarda yarı iletken teknolojisinde meydana gelen ilerlemeler ve IGBT'ler ile beraber indüksiyon ısıtma teknolojisi sanayi dışında da kullanılmaya başlanmıştır.

Endüstriyel, ev tipi ve medikal uygulamalar, kurulu güç ve ekonomik değer açısından indüksiyon ısıtma sistemlerinin kullanıldığı en önemli alanlardır [5].

İndüksiyon ısıtmanın endüstriyel uygulamalarda kullanımı, 1900'lü yıllarda metalin eritilmesi ile başlamış, otomotiv ve uçak endüstrisi ile devam etmiştir [5]. İndüksiyon ısıtma eritme, ön ve son ısıtma, dövme, sızdırmazlık, birleştirme, tavlama ve kaynak gibi endüstriyel uygulamalarda kullanılmaktadır [6].

Ev tipi uygulamalarda genellikle pişirici olarak kullanılır. Mutfak tipi indüksiyon pişiriciler yüksek verim, hızlı ısıtma, temiz olma, güvenilirlik gibi birçok avantaja sahiptir [5,7,8]. Geleneksel yöntemlerden gaz ile yapılan ısıtma uygulamalarında enerjinin yüke aktarılması oranı %50'yi geçmemektedir, indüksiyon uygulamalarında ise bu oran %85 ile %90 arasındadır [2].

İndüksiyon ısıtma teknolojisi günümüzde medikal alanlarda da yer almaktadır. Tıbbi cihazların üretimi ve sterilizasyonunda, çeşitli hastalıkların tedavisinde kullanımı görülmektedir [9].

1.2. LİTERATÜR ÖZETİ

Literatürde indüksiyon ısıtma sistemleri alanında yapılmış birçok çalışma bulunmaktadır. Bu çalışmalarda evirici topolojileri, güç kontrol yöntemleri ve rezonans frekansı takip yöntemleri incelenmiştir.

1999 yılında yapılan çalışmada; indüksiyon ısıtma uygulamaları için faz kilitlemeli döngü kontrollü seri rezonans evirici oluşturulmuştur. Sıfır gerilim anahtarlama ile çalışan eviricinin çıkış gücü, darbe frekans modülasyonu ile ayarlanabilmektedir. Çalışmada, frekans takibi için 4046 entegresi kullanılmıştır [10].

2003 yılında yapılan çalışmada; yüzey sertleştirme ve kaynak işlemleri için 50-100kHz frekans aralığında çalışabilen DSP tabanlı faz kilitlemeli döngü kontrollü bir indüksiyon ısıtma sistemi tasarlanmıştır. Tam köprü seri rezonans evirici topolojisinin kullanıldığı çalışmada TMS320F240 DSP kullanılmıştır. Sayısal faz kilitlemeli döngü kontrol tekniğiyle rezonans frekansı takip edilmiş sıfır akım anahtarlama gerçekleştirilmiştir [11].

2005 yılında yapılan çalışmada; indüksiyon ısıtma uygulamaları için yüksek frekanslı evirici tasarlanmıştır. Rezonans frekansının takibi için PI kontrollü faz kilitlemeli döngü kullanılmıştır. Gerilim beslemeli seri evirici devrede MOSFET'ler kullanılmıştır. Çalışmada, yüksek frekanslarda anahtarlama kayıplarının azaltılması için sıfır akım ya da sıfır gerilim anahtarlamanın gerekliliği vurgulanmıştır [12].

2005 yılında, DSP tabanlı faz kilitlemeli döngü kontrollü indüksiyon ısıtma sistemi simülasyonu üzerine çalışma yapılmıştır. Çalışmada seri ve paralel eviriciler karşılaştırılmış ve tam köprü seri rezonans eviricinin faz kilitlemeli döngü ile kontrolü MATLAB programında simüle edilmiştir. Tasarlanan evirici modelinin doğru ve uygulanabilir olduğu test sonuçlarıyla ispatlanmıştır [13].

2007 yılında yapılan çalışmada; rezonans eviriciler için FPGA tabanlı kontrolcü tasarımı ve uygulaması yapılmıştır. Eviricinin güç ve faz kilitlemeli döngü kontrolü, tüm sayısal olarak FPGA ile tasarlanmıştır. Çalışmada, anahtarlama frekansı, görev oranı ve faz kilitlemeli döngü fazı değerleri ayarlanabilmektedir [14].

2012 yılında yapılan çalışmada; indüksiyon ısıtma uygulamaları için dsPIC tabanlı sabit güç kontrolcü tasarlanmıştır. Evirici akımı ve gerilimi arasındaki faz farkı minimum tutularak evirici endüktif bölgede çalıştırılmıştır. 100 w ile 800 w arasında çalışabilen eviricinin kontrolü dsPIC mikrodenetleyicisine yazılan programla yapılmıştır [15].

2013 yılında yapılan çalışmada; indüksiyon ısıtma sistemlerinde rezonans frekansının takibi için FPGA tabanlı tüm sayısal faz kilitlemeli döngü kontrolü araştırılmıştır. Simülasyon sonuçları ile önerilen sistemin geniş aralıkta faz kilitleyebildiği, hızlı ve hassas olarak frekans takibi yapabildiği doğrulanmıştır [16].

2013 yılında yapılan çalışmada; TMS320F2812 tabanlı faz takip sistemi uygulanmıştır. MOSFET kullanılan seri rezonans evirici devresinde, akım ve gerilim arasındaki faz farkını azaltmak için anahtarlama frekansı değiştirilmiştir. Faz kaydırma yöntemiyle evirici çıkış gücü kontrol edilmiştir [17].

2016 yılında yapılan çalışmada; indüksiyon ısıtma güç devreleri için SG3525 tabanlı frekans takip kontrol devresi uygulanmıştır. IGBT anahtarlarının kullanıldığı tam köprü seri rezonans devresinde SG3525 entegresinin rezonans frekansını hızlı ve güvenilir biçimde takip ettiği görülmüştür [18].

2016 yılında yapılan çalışmada; PLC ile faz kilitlemeli döngü kontrollü indüksiyon ısıtıcı tasarlanmıştır. D sınıfı seri rezonans evirici topolojisinin kullanıldığı ısıtıcıda, evirici akımı geri besleme yapılarak PLC'nin yazılımla rezonans frekansını yakalaması sağlanmıştır [19].

2017 yılında yapılan çalışmada; yarım köprü seri rezonans evirici PDM tekniği ile sayısal olarak kontrol edilmiştir. Faz kilitlemeli döngü ile anahtarlama frekansı rezonans frekansının üzerinde tutulmuştur. Mikrodenetleyici, darbe genişlik yöntemiyle çıkış gücünü ayarlayabilmektedir [20].

2018 yılında, yarım köprü seri rezonans evirici tasarımı ve uygulaması yapılmıştır. %25, %75, %100 görev oranlarıyla indüksiyon ısıtıcı çıkış gücü PDM tekniğiyle kontrol edilmiştir. MOSFET sürücü sinyalleri PIC18F452 mikrodenetleyici ile oluşturulmuştur. Evirici simülasyonu PSpice programında yapılmıştır [21].

2019 yılında, sıcaklık kontrollü indüksiyon yiyecek kurutucu tasarlanmıştır. Çalışmada tam köprü seri rezonans evirici kullanılmıştır. Anahtarlama frekansı, rezonans frekansı üzerinde tutulmuş ve anahtarlama frekansı değiştirilerek yiyecek kurutucu içerisindeki sıcaklık ayarlanmıştır. Sıcaklık bilgisi kontrol devresine geri besleme yapılmış ve dsPIC ile sistem kontrol edilmiştir [22].

2019 yılında seri rezonans evirici kullanılarak levitasyon eritme uygulaması yapılmıştır. Anahtarlama elemanı olarak IGBT'lerin kullanıldığı uygulamanın simülasyonu PSpice programında yapılmıştır. Evirici, sıfır gerilim anahtarlama koşullarında çalışmış ve yumuşak anahtarlama gerçekleştirilmiştir [23].

2019 yılında yapılan çalışmada; seri rezonans eviricinin tasarımı ve kontrolünde Arduino mikrodenetleyicisi kullanılmıştır. Arduino ve TLP250 optokuplörü

kullanılarak MOSFET'ler yüksek frekanslarda sürülmüştür. Arduino ile farklı frekans ve görev oranlarında sürücü sinyalleri üretilmiştir. Çalışmada, Arduino kullanılarak eviricilerin kontrol edilebileceği görülmüştür [24].

2019 yılında yapılan çalışmada; indüksiyon ısıtıcı güç dönüştürücüsü için elektronik kontrol sistemi tasarlanmıştır. Mikrodenetleyici kullanılarak tasarlanan sistem farklı iş parçaları için rezonans frekansını takip etmektedir. Sistem 25 kHz ile 400 kHz frekans aralığında çalışabilmektedir [25].

2019 yılında yapılan çalışmada; indüksiyon ısıtmalı şofben sistemi gerçekleştirilmiştir. D sınıfı seri rezonans evirici ile tasarlanan ısıtıcıda dsPIC30F2020 mikrodenetleyicisi kullanılmıştır. Maksimum güç istenildiğinde ısıtıcı faz kilitlemeli döngü ile rezonans frekansında çalışmıştır. Sıfır gerilim anahtarlama koşullarında evirici çıkış gücü azaltılabilmektedir [26].

2019 yılında yapılan çalışmada; indüksiyon ısıtma sistemlerinde rezonans frekansının tespiti için yöntem önerilmiştir. Evirici akımı ve gerilimi arasındaki faz farkını ölçmeye bağlı olarak tasarlanan yazılım faz kilitlemeli döngü, rezonans frekansını düşük hata oranı ile tespit edebilmiştir. Tam köprü seri rezonans evirici topolojisinin kullanıldığı çalışmada, DSP kullanılmıştır [27].

2020 yılında yapılan çalışmada; yarım köprü seri rezonans ve yarım köprü paralel rezonans indüksiyon ısıtıcı kaynakları karşılaştırılmıştır. İki rezonans eviricinin avantaj ve dezavantajları karşılaştırmalı olarak açıklanmıştır. Sonuç olarak, seri rezonans eviricinin paralel rezonans eviriciye oranla toplamda daha avantajlı olduğu görülmüştür [28].

2020 yılında yapılan çalışmada; levitasyon eritme sistemi tasarımı ve uygulaması yapılmıştır. Eritme işlemi esnasında, rezonans frekansında meydana gelen değişimler 4046 entegresi ile takip edilmiştir. Seri rezonans evirici sıfır gerilim anahtarlama ile çalışmış, alüminyum iş parçası eritilmiştir. Simülasyon ve deneysel sonuçlar, tasarımı doğrulamıştır [29].

1.3. TEZİN KAPSAMI

Bu çalışmada, yüksek frekanslı indüksiyon ısıtma sistemi tasarımı, uygulaması ve PSpice ile MATLAB programlarında simülasyonu yapılmıştır. D sınıfı yarım köprü seri rezonans evirici topolojisi ve anahtarlama elemanı olarak MOSFET kullanılmıştır. Geçmiş yıllarda yapılan çalışmalarda, rezonans frekansının takibi ve faz kilitlemeli döngünün gerçekleştirilmesi için DSP, mikrodenetleyici, FPGA, PLC ve entegrelerin sayısal, tüm sayısal ve yazılımsal olarak tasarlandıkları görülmüştür. Çalışmada, rezonans frekansının takibi için sayısal faz kilitlemeli döngü kontrol tekniği uygulanmıştır. Faz kilitlemeli döngüde gerilim kontrollü osilatör olarak PIC16F877A mikrodenetleyicisi kullanılarak düşük maliyetli kontrolör ile rezonans frekansının takibi sağlanmıştır. Tasarımda, manyetik izoleli sürücü devreyle yardımcı güç kaynağına ihtiyaç duyulmadan yarım köprü evirici topolojisi kontrol edilmiştir. Böylece sistem karmaşıklığı ve maliyeti azaltılmıştır. Mikrodenetleyici yazılımıyla rezonans frekansı ya da üzerinde çalışılarak yumuşak anahtarlama koşulları gerçekleştirilmiştir.

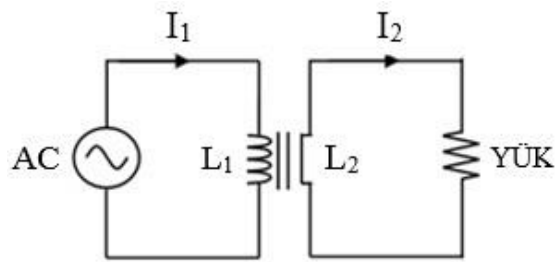
BÖLÜM 2

İNDÜKSİYON ISITMA SİSTEMİ TEMEL KAVRAMLARI

2.1. İNDÜKSİYON ISITMA TEMEL TEORİSİ

İndüksiyon ısıtmanın temel teorisi transformatör modeliyle benzerlik gösterir. İndüksiyon bobinine alternatif akım uygulandığında, bobinin içerisinde değişken manyetik alan oluşur. Bu manyetik alan içerisinde metal parça konulursa eddy akımları ve manyetik histerezisten dolayı metal parça üzerinde ısı enerjisi meydana gelir [30-32].

İndüksiyon ısıtma sistemi, transformatör eşdeğer devresi kullanılarak modellenenir. Sistemdeki ısıtma bobini ve yük, ikincil (sekonder) sargısı tek sarım olan bir transformatör ile eşdeğerdir. Transformatörün birincil (primer) sargısı ısıtma bobini ile, ikincil sargı ise yük ile eşdeğerdir [31-33]. Şekil 2.1’de indüksiyon ısıtma eşdeğer devresi görülmektedir.



Şekil 2.1. İndüksiyon ısıtma eşdeğer devresi.

İdeal bir transformatörde akım ve sarım sayısı arasında Eşitlik 2.1’deki gibi bir ilişki vardır.

$$\frac{I_1}{I_2} = \frac{N_2}{N_1} \quad (2.1)$$

Burada; N_1 birincil sarım sayısını, N_2 ikincil sarım sayısını, I_1 birincil akımı, I_2 ikincil akımı ifade etmektedir. İndüksiyon ısıtma eşdeğer devresinde ikincil sarım sayısı bir olduğundan ikincil akım bulunurken Eşitlik 2.2 kullanılır.

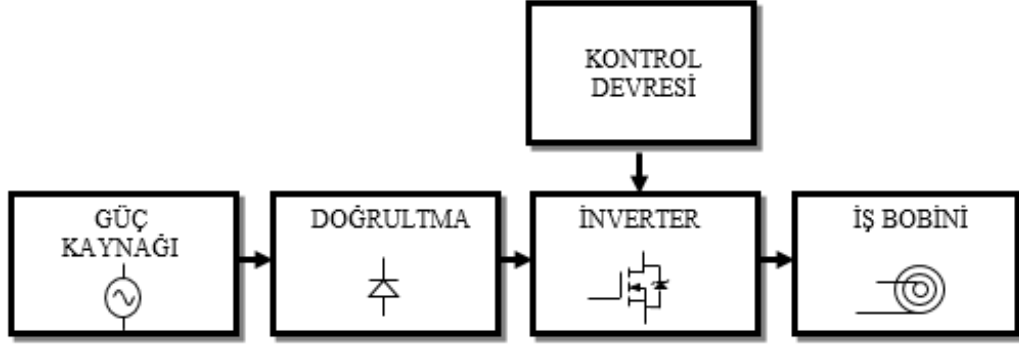
$$I_2 = I_1 N_1 \quad (2.2)$$

Transformatörlerde ikincil sargı sarımı bir olduğunda ya da kısa devre yapıldığında, artan yük akımı nedeniyle büyük bir ısı kaybı meydana gelir. Bu ısı kaybından faydalanılarak indüksiyon ısıtma gerçekleştirilir. İndüksiyon ısıtmada temel amaç sekonderde maksimum ısı enerjisi üretmek olduğundan, yük düşük dirençli ve geçirgenliği yüksek seçilir [7].

İndüksiyon ısıtıcı üç temel birimden oluşur. Bunlar güç ünitesi, tank devresi ve iş bobinidir. Güç ünitesi, frekansı yükseltmek için gerekli evirici devresini içerir. İş bobini ile güç ünitesini eşleştirmek için gerekli olan kondansatör ve transformatör kombinasyonu tank devresinde bulunur. İş bobini, enerjinin iş parçasına aktarılmasını sağlar [34].

Şekil 2.2’de indüksiyon ısıtma sistemine ait güç dönüşüm blok diyagramı görülmektedir. İlk adımda, doğru gerilim üretmek için alternatif gerilim doğrultulur. Elde edilen doğru gerilim, uygun evirici topolojisi kullanılarak yüksek frekanslı alternatif akıma çevrilir. Kontrol devresi indüksiyon ısıtma sisteminde önemli bir role sahiptir ve evirici için gerekli kontrol sinyalinin üretir.

Rezonans dönüştürücüler, indüksiyon ısıtmada yaygın olarak kullanılmaktadır. Bu tür dönüştürücülerde, anahtarlama elemanları sıfır akım ya da gerilimde çalıştırılarak anahtarlama kayıpları en aza indirilir [35].



Şekil 2.2. İndüksiyon ısıtma güç dönüşüm blok diyagramı.

2.2. ELEKTROMANYETİK İNDÜKSİYON

İndüksiyon ısıtma, elektrik enerjisini ısı enerjisine dönüştürürken manyetik alandan faydalanır. Bir bobinden alternatif akım geçtiğinde bobin içerisinde değişken bir manyetik alan oluşur [36,37]. Akım ile manyetik alan şiddeti arasındaki ilişki, Eşitlik 2.3’de verilen Amper yasası ile tanımlanır.

$$\int Hdl = NI \quad (2.3)$$

Burada N sarım sayısını, I akımı (A) ve H manyetik alan şiddetini (At/m) göstermektedir. Manyetik alan şiddeti ile oluşacak manyetik akı Eşitlik 2.4 ile hesaplanır.

$$\Phi = \mu HA \quad (2.4)$$

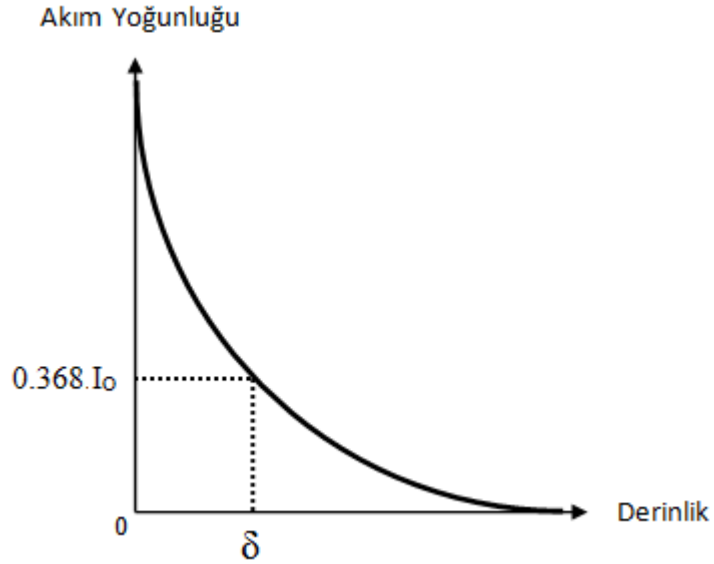
Burada μ manyetik geçirgenliği (Wb/at-m) ve A (m^2) kesit alanını göstermektedir. Cisim üzerinde meydana getirilen manyetik akı, cismin manyetik geçirgenliği ile doğru orantılıdır. Eğer başka bir iletken manyetik alana maruz bırakılırsa o iletken üzerinde bir gerilim endüklenir. Bu gerilim, Faraday yasası ile Eşitlik 2.5’de ifade edilmiştir.

$$\mathcal{E} = N \frac{d\Phi}{dt} \quad (2.5)$$

İndüksiyon ısıtma üzerinden anlatılırsa; Faraday yasası ile iş parçası üzerinde oluşan gerilim, iş parçasında akım akışına neden olacaktır. İş parçası üzerinden akan akım, bobindeki akıma zıt yönde olacaktır. İş parçasında eddy akımları meydana gelecek ve iş parçasında kısa devre olarak dolanan bu akımlar, ısı kayıpları oluşturarak iş parçasının ısınmasını sağlayacaktır [37-40].

2.3. DALMA DERİNLİĞİ

Dalma derinliği, iş parçası üzerinde meydana gelen eddy akımlarının, iş parçası yüzeyinden içeri doğru erişebileceği derinliktir. İletken bir iş parçası bobin içine yerleştirildiğinde, değişken manyetik alan parça üzerinde düzgün dağılıma sahiptir fakat iş parçası içinde oluşan eddy akımları düzgün dağılıma sahip değildir. Akım yoğunluğu, deri etkisi nedeniyle yüzeyden merkeze doğru gidildikçe azalmaktadır. İş parçasının merkezine doğru, akım yoğunluğu üstel olarak azalır ve merkezde akım akışı neredeyse sıfır olur [39].



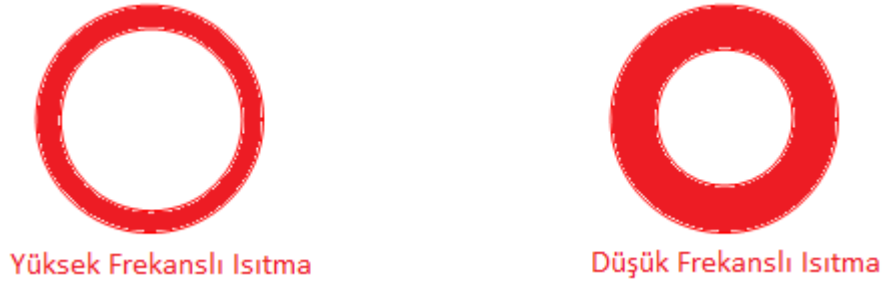
Şekil 2.3. Akım yoğunluğu ve dalma derinliği ilişkisi.

Dalma derinliği, çalışma frekansının hesaplanmasında önemlidir. Eddy akımları tarafından iş parçasında üretilen dalma derinliği Eşitlik 2.6 ile ifade edilir.

$$\delta = \sqrt{\frac{1}{4\pi^2 \times 10^{-7}}} \cdot \sqrt{\frac{\rho}{\mu_r \cdot f}} \quad (2.6)$$

Burada δ dalma derinliğini (m), μ_r bağıl manyetik geçirgenliği, ρ öz direnci ($\Omega\text{mm}^2/\text{m}$), f frekansı (Hz) göstermektedir.

Yüksek frekanslı indüksiyon ısıtmada dalma derinliği sıgıdır ve dar yüzeylerde ısıtma sağlanır. Düşük frekanslı indüksiyon ısıtmada dalma derinliği fazladır ve geniş yüzeylerde ısıtma sağlanır [40]. Şekil 2.4’de aynı iş parçasına düşük ve yüksek frekanslarda uygulanan indüksiyon ısıtma sonucu oluşan farklı dalma derinlikleri görülmektedir.



Şekil 2.4. Çalışma frekansına göre aynı iş parçası üzerindeki dalma derinliği.

2.4. İNDÜKSİYON ISITMA SİSTEMLERİNİN AVANTAJLARI

İndüksiyon ısıtma sistemleri, günümüzde farklı alanlarda yaygın olarak kullanılmaya başlamıştır. Bunun en önemli nedeni, klasik ısıtma sistemlerine göre birçok avantajının bulunmasıdır.

- Hızlı ısıtma: İndüksiyon ısıtma ile sadece iş parçası üzerinde ısı meydana getirilir. Yüksek güç yoğunluğu ve düşük ısı kaybından dolayı ısıtma süresi kısadır.
- Verim: Uygun bobin dizaynı ve güç dönüştürücüleri ile %90’ın üzerinde verim elde edilebilir. Yüksek sıcaklıklarda ısıtma yapılabilir [5].

- Temiz olma ve güvenirlik: ısıtma alanın çevresindeki sıcaklık düşük olduğundan güvenilirdir. Geleneksel ısıtma sistemleri ve fosil yakıtlı fırınların aksine evre kirliliği yaratmaz.
- Kontrollü ısıtma: Uygulanan g ve ısıtma alanı, bobin ve g dönüştürücüsü ile kontrol edilebilir. İstenilen sıcaklıkta ısıtma yapılabilir. Bölgesel ısıtma gibi gelişmiş özelliklere sahiptir.

BÖLÜM 3

EVİRİCİ SİSTEMLER

3.1. GÜÇ ELEKTRONİĞİ KAVRAMI

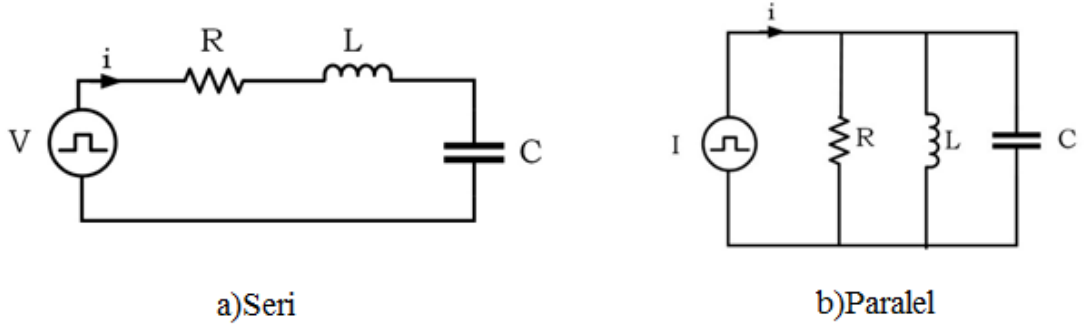
Güç elektroniği devreleri elektrik enerjisini bir biçimden başka biçime dönüştüren devrelerdir. Güç elektroniği devreleri yarı iletken elemanları anahtar gibi kullanarak akım veya gerilimi değiştirirler, kontrol ederler. Güç elektroniği uygulamaları, DC güç iletimi, akülü tornavidalar, bilgisayar güç kaynakları, cep telefonu şarj cihazları ve hibrit otomobiller gibi birçok alanda yer almaktadır. Uygulamalarda güç seviyesi miliwatlardan megawatlara kadar çıkabilmektedir. Güç elektroniğinin başlıca uygulamaları arasında; AC-DC dönüşümü, DC-AC dönüşümü, DC-DC dönüşümü ve AC-AC dönüşümü olarak verilebilir [41].

3.2. REZONANS DÖNÜŞTÜRÜCÜLER

Klasik güç elektroniği devreleri sert anahtarlama ile çalıştıklarından dolayı bazı dezavantajlara sahiptir. Anahtarlama esnasında, anahtarlar üzerinde yüksek akım-gerilim meydana gelir ve güç kayıpları oluşur. Bobin ve kondansatör gibi pasif elemanların boyutlarını küçültmek amacıyla frekans artırıldığında, bu güç kayıpları da frekansla orantılı olarak artar. Sert anahtarlamanın diğer dezavantajı, yüksek dv/dt ve di/dt nedeniyle oluşan elektromanyetik girişimdir. Bu dezavantajlar, verimi azaltır ve yüksek frekanslarda çalışma gerekliliğini sınırlandırmaktadır. Anahtarlama kayıplarını azaltmak ya da tamamen yok etmek için yumuşak anahtarlama teknikleri üzerine çalışılmıştır [42,43]. Rezonans dönüştürücülerin avantajı, yapılarında RLC devresinin bulunmasıdır. RLC devresinde rezonans olayı gerçekleştiğinde yani bobinin endüktif reaktansı ile kondansatörün kapasitif reaktansı birbirine eşitlendiğinde, empedans sadece omik direnç oluşacak ve devreden yüksek bir akım geçebilecektir. Devredeki bobin ve kondansatör filtre gibi davranarak devre çıkışında

sinüse yakın dalga şekilleri oluşmasını sağlayacaktır. Ayrıca yüksek dv/dt , di/dt parametreleri azalacak ve EMI etkisi düşecektir. Anahtarlama sırasında, bobin ve kondansatörün etkisiyle anahtar akımı veya anahtar gerilimi sıfır yapılacaktır. Böylece anahtarlama kayıpları en aza indirilecek, yüksek frekanslarda verim ve güç yoğunluğu da artırılmış olacaktır [39].

Rezonans devreleri, elemanların birbirlerine bağlanış şekillerine göre ikiye ayrılırlar; seri rezonans ve paralel rezonans. Direnç, bobin ve kondansatörün seri bağlanmasıyla oluşan devre seri rezonansdır. Seri rezonans devre elemanları gerilim kaynağından beslenmektedir. Şekil 3.1’de seri ve paralel rezonans devresi görülmektedir.



Şekil 3.1. Seri ve paralel rezonans devresi.

Direnç, bobin ve kondansatörün paralel bağlanmasıyla oluşan devre paralel rezonansdır. Paralel rezonans devresinde elemanlar akım kaynağından beslenmektedir. Rezonans devrelerinde kondansatörün oluşturduğu kapasitif reaktansla bobinin oluşturduğu endüktif reaktans değeri birbirine eşitse rezonans oluşur. Rezonansın oluşması için gerekli frekans değerine rezonans frekansı denir. Rezonans devresinde meydana gelen endüktif reaktans Eşitlik 3.1 ile hesaplanır

$$X_L = \omega L = 2\pi f L \quad (3.1)$$

Rezonans devresinde meydana gelen kapasitif reaktans Eşitlik 3.2 ile hesaplanır.

$$X_C = \frac{1}{\omega C} = \frac{1}{2\pi f C} \quad (3.2)$$

Seri ve paralel rezonans devrelerinde, rezonans anında endüktif reaktans ve kapasitif reaktans birbirine eşit olacaktır. Dolayısıyla rezonans frekansı (f_r) aşağıdaki Eşitlik 3.3 kullanılarak hesaplanır.

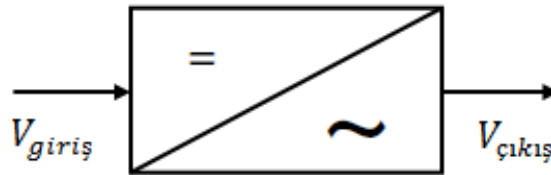
$$f_r = \frac{1}{2\pi\sqrt{LC}} \quad (3.3)$$

Seri rezonans devresinde, rezonans frekansının üst değerlerinde devre endüktif, rezonans frekansının alt değerlerinde devre kapasitiftir. Seri devrede, rezonans frekansında empedans minimum olduğundan akım maksimum değerine ulaşır, rezonans frekansının altında ya da üstünde devre akımı düşer. Rezonans eviricilerde frekans kullanılarak güç kontrolü de yapılabilir.

İndüksiyon ısıtmada güç dönüşümünün gerçekleşmesi için genellikle yarım köprü, tam köprü veya tek anahtarlı rezonans evirici devreler, gerilim veya akım kaynaklı olarak kullanılır [14].

3.3. EVİRİCİLER

Doğru gerilimi, genliği ve frekansı ayarlanabilen alternatif gerilime dönüştüren güç elektroniği dönüştürücülerine evirici denir. Eviricilerde temel ilke anahtarlama elemanlarının uygun şekilde bağlanması ve doğru sıra-zamanda iletim-yalıtıma geçirilmesiyle, girişteki doğru gerilimi çıkışta alternatif gerilime dönüştürmektir. Bu anahtarlama IGBT, MOSFET, GTO, BJT gibi yarı iletken güç elektroniği elemanları kullanılarak yapılabilir [44]. Şekil 3.2’de temel evirici diyagramı görülmektedir.



Şekil 3.2. Temel evirici diyagramı.

Yaygın olarak kullanılan sert anahtarlama eviricilere ek olarak, günümüzde yumuşak anahtarlama teknikleri üzerine çalışmalar yapılmaktadır. Yumuşak anahtarlama eviriciler sıfır gerilim ya da sıfır akım koşulları altında anahtarlama yapmaktadır [42].

Sert anahtarlama eviricilerde özellikle yüksek frekanslarda çalışırken meydana gelen yüksek di/dt , dv/dt nedeniyle anahtarlar zorlanarak hatalı kontrole sebep olurlar. Yüksek di/dt ve dv/dt değerleri güç anahtarları üzerinde;

- Anahtarlama baskısı,
- Anahtarlama güç kaybı,
- Elektromanyetik girişim,
- Radyo frekans girişim gürültüleri,

gibi durumlara yol açar. Bu durumlarda kayıplar artar ve verim düşer. Anahtar üzerindeki kayıplar, anahtara paralel bir bastırma devresi konularak azaltılabilir fakat devredeki toplam kayıp değişmez. Yüksek frekanslı devrelerden maksimum verim alınabilmesi için gerilimin veya akımın sıfır geçiş noktasında anahtarlama yapılması gerekir. Bu olaya “yumuşak anahtarlama” denir. Yumuşak anahtarlama; “sıfır gerilim anahtarlama”, “sıfır akım anahtarlama”, “sıfır gerilim geçiş” ve “sıfır akım geçiş” olmak üzere dörde ayrılır. Anahtarlar üzerindeki gerilim veya akım L-C rezonans devresi kullanılarak sıfıra indirilebilir. Bu topolojiye “rezonans çevirici” adı verilir [45-47].

Sıfır akımda anahtarlama, anahtarın iletme girme esnasında gerçekleştirilen yumuşak anahtarlama tekniğidir. Bu teknikte, güç anahtarına küçük değerlikli bir endüktans seri bağlanarak, iletme girme işleminde elemandan geçen akımın yükselme hızı sınırlanır. Böylece akım ile gerilimin aynı anda anahtar üzerinde olması engellenir, anahtarlama enerji kaybı azaltılır [48-50].

Sıfır gerilimde anahtarlama, anahtarın kesimde olduğunda gerçekleştirilen bir yumuşak anahtarlama tekniğidir. Bu teknikte, güç anahtarına küçük değerlikli bir kondansatör paralel bağlanarak, anahtar iletimden çıktığında anahtarın uçlarında oluşan gerilimin yükselme hızı sınırlanır. Böylece, anahtar iletimden çıktığında,

anahtarlama enerji kaybı azaltılır, anahtarlama enerjisi kondansatör üzerine aktarılır [51,52].

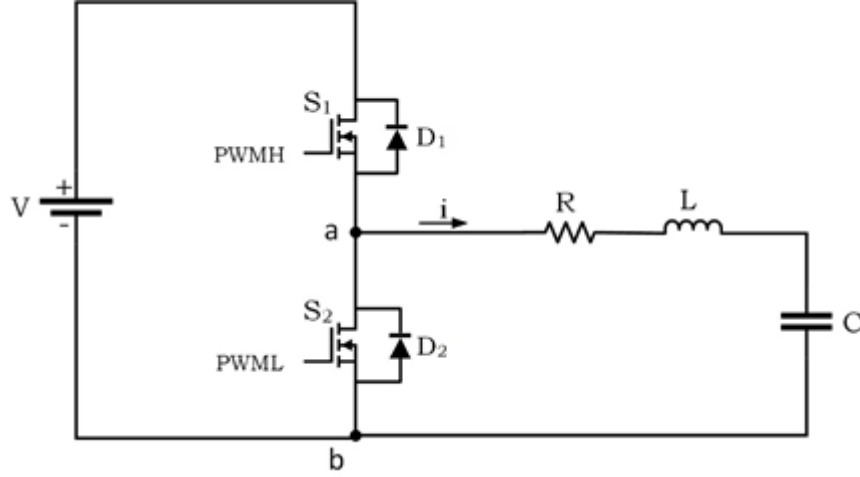
İndüksiyon ısıtma sistemlerinde anahtarlama kayıplarının düşük olması, sıfır akım ya da gerilimde anahtarlama sağlanması nedeniyle genellikle rezonans eviriciler kullanılmaktadır [30].

3.4. D SINIFI SERİ REZONANS EVİRİCİ

D sınıfı eviriciler seri ve paralel olmak üzere iki gruba ayrılırlar. D sınıfı seri rezonans eviriciler, doğru gerilim kaynağı ile paralel rezonans eviriciler, doğru akım kaynağı ile beslenir [42].

D sınıfı gerilim kaynaklı seri eviricinin en önemli avantajı, yarı iletken anahtarlar üzerinde düşük gerilim oluşturmalarıdır. Böylece devrelerde düşük gerilimli anahtarlar kullanılabilir, evirici verimi artar ve maliyet düşer. Basit yapısı ve kontrolü, küçük boyutları, kontrolsüz doğrultma ile beslenebilmesi gibi avantajlarından dolayı gerilim kaynaklı seri rezonans evirici, paralel rezonans eviriciye oranla toplamda daha iyi bir performansa sahiptir [10,13].

D sınıfı seri rezonans evirici Şekil 3.3'te görüldüğü gibi iki güç anahtarı, anahtarlara ters paralel bağlı iki diyot ve RLC elemanlarının birbirlerine seri bağlanmasıyla oluşmaktadır. Güç kaynağı olarak doğru giriş gerilimi uygulanmaktadır. Güç anahtarı olarak BJT, MOSFET, IGBT kullanılabilir. Anahtarlar iletimdeyken içlerinden pozitif yönde akım akışı, anahtarlar yalıtımdayken ters paralel bağlı diyotlar yardımıyla negatif yönde akım akışı sağlanır.



Şekil 3.3. D sınıfı seri rezonans evirici.

Yarım köprü seri rezonans eviricilerde çıkış akımı rezonans devresinin etkisine bağlı olarak sinüsoidal bir yapıya sahiptir. Dolayısıyla rezonans olmayan eviricilerde oluşan elektromanyetik parazitler, evirici sayesinde önemli ölçüde azaltılmış olacaktır [53].

3.5. D SINIFI SERİ REZONANS EVİRİCİ ANALİZİ

Seri rezonans eviricinin anahtarlama frekansı, bobin ve kondansatör elemanlarının belirlediği rezonans frekansı değerinden küçük ya da büyük olabilir.

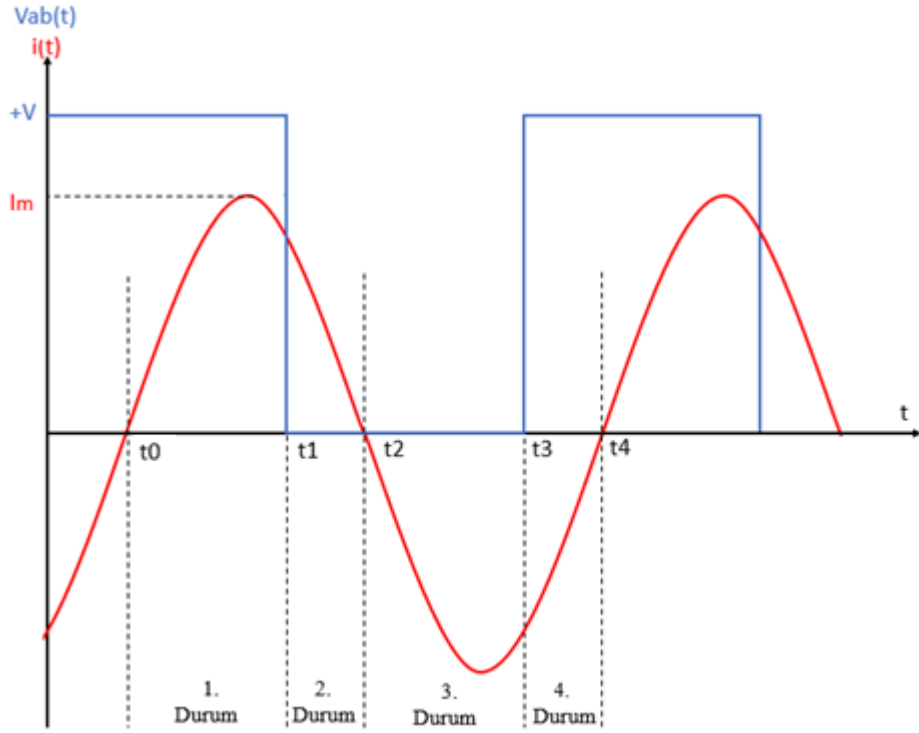
Anahtarlama frekansı rezonans frekansından küçükse devre kapasitiftir. Bu durumda çalışmanın avantajı, kesim anında anahtarlama kayıplarının sıfır olmasıdır fakat iletim anında anahtarlama kayıpları mevcuttur. Anahtarların iletme geçmesi yüksek gerilim ve akım altında olmakta ayrıca ters paralel diyotlarda yüksek akım sıçramaları meydana gelmektedir. Yumuşak anahtarlama koşulları sağlanmamaktadır bu nedenle kapasitif çalışma tercih edilmez.

Anahtarlama frekansı rezonans frekansından büyükse devre endüktiftir. Bu durumda çalışmanın avantajı, iletim anında anahtarlama kayıplarının sıfır olmasıdır fakat kesim anında anahtarlama kayıpları mevcuttur.

Anahtarlama frekansı rezonans frekansına eşitse devrenin empedansı minimum değerdedir, yüke maksimum güç aktarılır [53]. Anahtarlar sıfır akımda açılıp kapanır.

Bu durumda anahtarlama kayıpları sıfırdır. Verimin en yüksek olduğu anahtarlama durumudur.

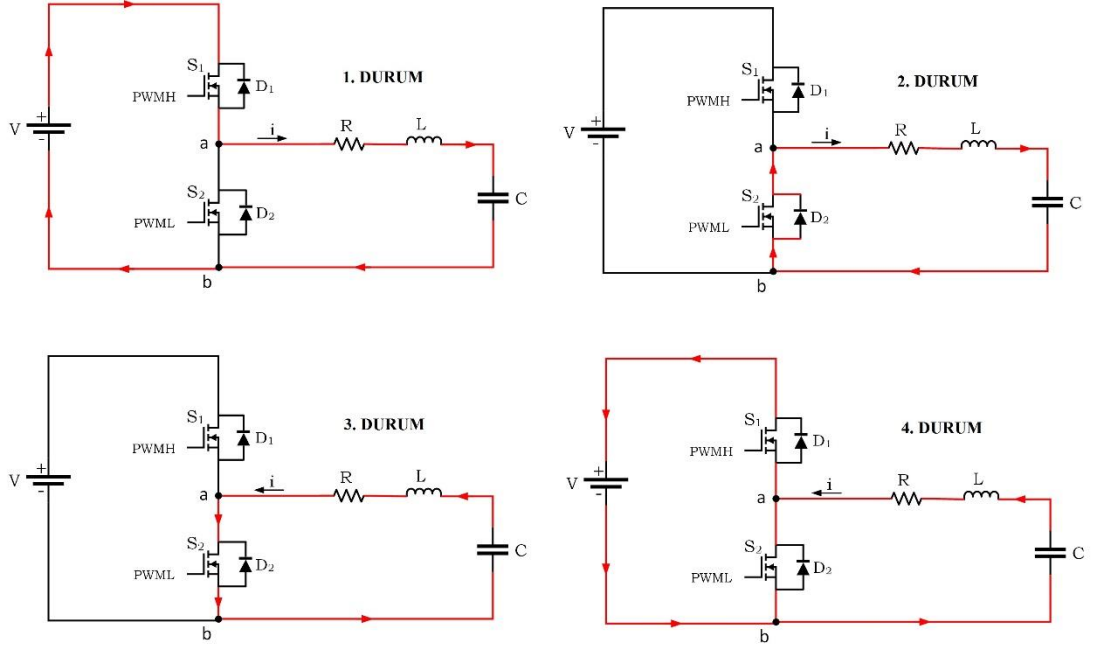
Anahtarlama frekans değerinin rezonans frekans değerinden büyük olduğu endüktif çalışmada, anahtarların iletim-kesim durumlarına göre seri rezonans eviricinin analizi yapılmıştır. Evirici gerilim ve akımı Şekil 3.4'te gösterilmiştir.



Şekil 3.4. Evirici akım ve gerilimi.

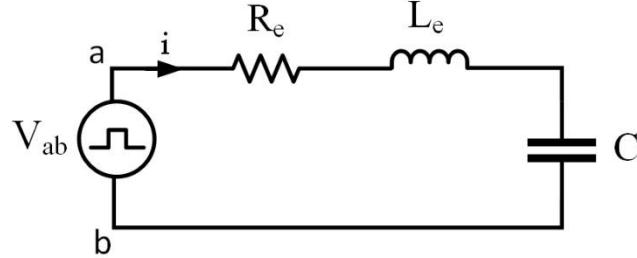
Eviricideki anahtarlar belirli bir frekans değerinde, %50 ya da daha az doluluk oranı olan kare dalga gerilimlerle sürülür. İki anahtar aynı zamanda iletimde olmaz, anahtarların yalıtımda olduğu bu süreye ölü zaman denir.

Şekil 3.5'te dört farklı zaman diliminde eviricinin çalışma durumları çizilmiştir. Her bir durum için akım yolu kırmızı çizgiyle belirtilmiştir.



Şekil 3.5. Evirici çalışma durumları.

Şekil 3.6’da D sınıfı seri rezonans evirici eşdeğer devresi yer almaktadır.



Şekil 3.6. D sınıfı seri rezonans evirici eşdeğer devresi.

1.Durum (t_0-t_1): D_1 diyotu üzerinden ters yönde akan rezonans akımı, $t=t_0$ anında yönünü değiştirerek S_1 anahtarı içinden akmaya başlar. Bu çalışma esnasında rezonans devresi üzerinde enerji birikir.

2.Durum (t_1-t_2): S_1 anahtarı içerisinde akmakta olan rezonans akımı, $t=t_1$ anında S_1 anahtarının yalıtıma geçmesiyle D_2 diyotu üzerinden akmaya başlar. S_1 yalıtıma geçerken bir miktar anahtarlama kayıpları oluşur. Sonraki aşamada $t_1 < t < t_2$ anında, S_2 anahtarı sıfır akım-gerilim şartlarında ilettime geçeceğinden anahtarlama kayıpları oluşmaz.

3.Durum (t₂-t₃): t = t₂ anından sonra, rezonans akımı S₂ anahtarı üzerinden ters yönde akmaya başlar. Bu aşamada rezonans kondansatörü devrenin gerilim kaynağı gibi çalışır.

4.Durum (t₃-t₄): t = t₃ anında S₂ anahtarı kapatıldığında rezonans akımı D₁ diyotu üzerinden akmaya başlar. S₂ yalıtıma geçerken bir miktar anahtarlama kayıpları oluşur. Sonraki aşamada, S₁ anahtarı sıfır akım-gerilim şartlarında ilettime geçeceğinden anahtarlama kayıpları oluşmaz.

Eviriciye ait temel matematiksel eşitlikler;

Akım ile gerilim arasındaki faz açısı (Φ) Eşitlik 3.4 ile hesaplanır.

$$\cos\Phi = \frac{1}{\sqrt{1+Q^2\left(\frac{\omega_a}{\omega_r} - \frac{\omega_r}{\omega_a}\right)^2}} \quad (3.4)$$

Rezonans kolu üzerindeki gerilimin tepe değeri Eşitlik 3.5 ile hesaplanır.

$$V_m = \frac{2V}{\pi} \quad (3.5)$$

Rezonans akımının ani değeri ve bu akımın tepe değeri Eşitlik 3.6 ve 3.7 ile hesaplanır.

$$i(t) = I_m(t)\sin(\omega_a t - \Phi) \quad (3.6)$$

$$I_m = \frac{V_m}{Z} \quad (3.7)$$

Aşağıdaki eşitliklerde; ω_a anahtarlama açısal hızını, ω_r rezonans açısal hızını ve Q kalite faktörünü göstermektedir.

$$\omega_a = 2\pi f_a \quad (3.8)$$

$$\omega_r = \frac{1}{\sqrt{LC}} \quad (3.9)$$

$$Q = \frac{Z_r}{R} \quad (3.10)$$

Karakteristik empedans Z_r Eşitlik 3.11 ile hesaplanır.

$$Z_r = \sqrt{\frac{L}{C}} \quad (3.11)$$

BÖLÜM 4

EVİRİCİ KONTROL YÖNTEMLERİ VE FAZ KİLİTLEMELİ DÖNGÜ

4.1. EVİRİCİ KONTROL YÖNTEMLERİ

Son yıllardaki yarı iletken güç anahtarlarının gelişimiyle, akım ve gerilim kaynaklı eviriciler indüksiyon ısıtma uygulamaları için araştırılmış ve geliştirilmiştir. MOSFET ve IGBT gibi güç anahtarlarını kullanan rezonans eviriciler, yumuşak anahtarlama teknikleri ile yüksek frekanslarda verimli çalışma imkanı sunar. Rezonans evirici çıkış gücünü kendi başına kontrol edemez bu nedenle aşağıda verilen çeşitli güç kontrol yöntemleri kullanılır [54].

- Frekans Kontrolü
- Darbe Genişlik Modülasyonu
- Faz Kaydırma Kontrolü
- Darbe Yoğunluk Modülasyon Kontrolü

Yaygın olarak kullanılan frekans kontrolü, rezonans eviriciler de RLC elemanlarının oluşturduğu rezonans frekansı değerine göre çalışır. Seri rezonans eviricilerde, rezonans frekansında çalışılırken evirici gücü en yüksek değerdedir. Rezonans frekansının üzerinde ya da altında çalışırken çekilen akım azalır, böylece güç kontrolü sağlanabilir. Darbe genişlik modülasyonunda, darbe sinyalinin görev oranı ayarlanarak evirici çıkış gücü değiştirilir. Eviricideki anahtarların iletim süresi artırıldığında çıkış gücü de artar. Faz kaydırma kontrolü, anahtar tetikleme sinyalleri arasında faz farkı oluşturarak evirici gücünü kontrol eder. Darbe yoğunluk modülasyon kontrolü, frekans veya gerilimden bağımsız olarak PWM sinyallerinin aç-kapa ile istenildiği kadarının işlenmesi sonucunda güç kontrolü yapılabilen yöntemdir [36,54,55].

İndüksiyon ısıtıcı kontrol devresinin amacı, genellikle tank devresinden alınan geri besleme sinyalini kullanarak anahtarlama elemanları için gerekli sürme sinyallerini üretmektir. Kontrol devresinin görevi, rezonans frekansının takibini yapmak ve akım sınırlama işlemini gerçekleştirmektir [56].

Rezonans frekansında çalışırken evirici akımı ve gerilimi aynı fazdadır. Kontrol devresi, evirici çıkış akımı ile anahtarlama elemanlarının kontrol edilmesini sağlar. Böyle bir kontrol devresinde, frekans değiştirilerek akım-güç değiştirilemez ve geri beslemedeki gecikmelerden dolayı anahtarlama sıfır akım geçişlerinden sonra yapılır [56,57].

Eviricide anahtarlamanın sıfır akım geçişlerinden önce yapılması istenir ve rezonans frekansının doğru bir biçimde tespit edilmesi gereklidir. Bu nedenle faz kilitlemeli döngü tekniği kullanılabilir. Faz kilitlemeli döngü tekniğinin birçok avantajı mevcuttur [56,57].

- Frekans değiştirilerek akım ve güç kontrolü yapılabilir.
- Bozucu etkilere dayanıklıdır.
- Anahtarlama sıfır akım geçişlerinden önce yapılabilir.

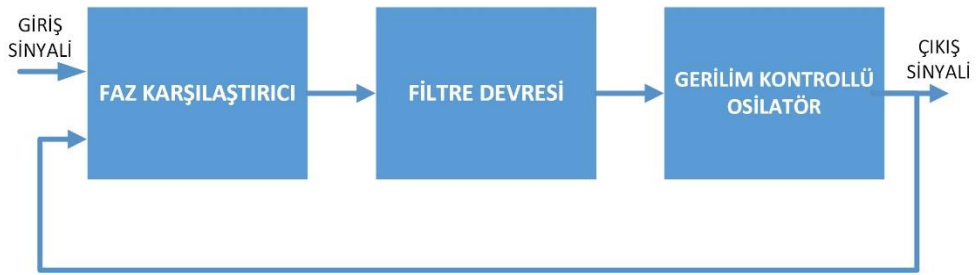
Faz kilitlemeli döngü ve indüksiyon ısıtma sistemleri birlikte incelendiğinde, faz kilitlemeli döngü indüksiyon ısıtmada iki elektriksel sinyal arasındaki faz farkını kontrol etmek ve rezonans frekansını yakalamak amacıyla kullanılır [57]. Isıtma esnasında sıcaklık değişimi ve diğer etkenlerin neden olduğu rezonans frekansı değişimleri faz kilitlemeli döngü ile takip edilerek maksimum çıkış gücüne ulaşılabilir [18].

4.2. FAZ KİLİTLEMELİ DÖNGÜ

Faz kilitlemeli döngü temeli 1930'lara dayanan eski bir tekniktir. Haberleşme, enstrümantasyon, kontrol sistemleri gibi alanlarda yaygın olarak kullanılır [58]. Faz kilitlemeli döngü algoritması ilk kez 1923 yılında Appleton tarafından önerilmiştir. Appleton'dan sonra Bellescize tarafından radyo sinyallerinin senkronize edilmesi için

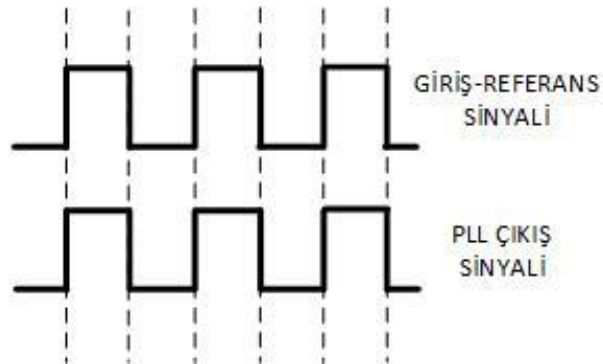
1932 yılında kullanılmıştır. 1970’li yıllara kadar uygulamalarda çok fazla kullanılmamıştır. 1970’lerde entegre devrelerin hızlı gelişimi sayesinde modern haberleşme sistemlerinde yaygın olarak kullanılmaya başlanmıştır. Son yıllarda elektrik motorlarının hız kontrolü ve güç dönüştürücüler gibi çeşitli endüstriyel alanlarda kullanımı artmıştır [59].

Faz kilitlemeli döngü temel olarak, periyodik giriş sinyali ile periyodik çıkış sinyalini senkronize eden bir devredir [57]. Daha kesin bir ifadeyle, kendi çıkış sinyali ile referans sinyal arasındaki faz farkını en aza indirecek şekilde kontrol eden basit bir servo sistemdir [60]. Temel bir faz kilitlemeli döngü blok diyagramı Şekil 4.1 ile gösterilmiştir. Temel olarak faz karşılaştırıcı, filtre devresi ve gerilim kontrollü osilatörden oluşmaktadır. Çıkış sinyali girişe geri besleme olarak verilmektedir.



Şekil 4.1. Faz kilitlemeli döngü blok diyagramı.

Şekil 4.2’de faz kilitlemeli döngü girişine uygulanan referans sinyali ile döngü çıkış sinyali görülmektedir, iki sinyal aynı faza kilitlemiştir.



Şekil 4.2. PLL tarafından kilitlemiş iki sinyal [58].

4.2.1. Faz Karşılaştırıcı

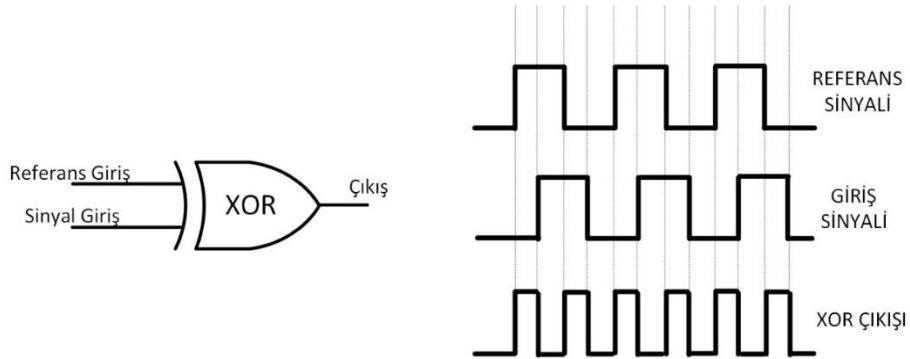
Faz karşılaştırıcı, iki giriş sinyali arasındaki faz farkını bulan ve hata sinyali üreten devredir [58]. Sinüsoidal faz karşılaştırıcı ve kare dalga faz karşılaştırıcı olmak üzere iki çeşittir. Sinüsoidal faz karşılaştırıcı, $-\pi/2$ ile $+\pi/2$ aralığında faz algılayabilir. Hafızası yoktur ve çarpan olarak çalışır. Kare dalga faz karşılaştırıcılar genellikle dijital devrelerden oluşur ve binary dikdörtgen sinyal girişiyle çalışır. Bu nedenle dijital faz karşılaştırıcı olarak adlandırılır [60]. Çizelge 4.1’de faz karşılaştırıcı çeşitleri ve özellikleri verilmiştir.

Çizelge 4.1. Faz karşılaştırıcı çeşitleri ve özellikleri [58].

MODEL	SINIF	DOĞRUSAL ARALIK	UYGULAMA ALANLARI
Çarpan	Analog	$-\pi/2$ ile $+\pi/2$	Frekans modülasyonu
XOR	Dijital	$-\pi/2$ ile $+\pi/2$	Veri kurtarma
RS Flip-Flop	Dijital	$-\pi$ ile $+\pi$	Görüntü düzeltme
PFD	Dijital	-2π ile $+2\pi$	Frekans sentezleme

4.2.1.1. Özel Veya (XOR) Faz Karşılaştırıcı

XOR faz karşılaştırıcı “özel veya” kapısıdır. XOR kapısı, giriş sinyallerinin faz farkını karşılaştırır ve girişe göre çıkış darbeleri üretir. XOR devresi yükselen ve düşen kenarlarda hata darbesi üretir [61]. Şekil 4.3’te XOR kapısı sembolü ve örnek giriş-çıkış sinyalleri görülmektedir.



Şekil 4.3. XOR kapısı ve giriş-çıkış sinyalleri [62].

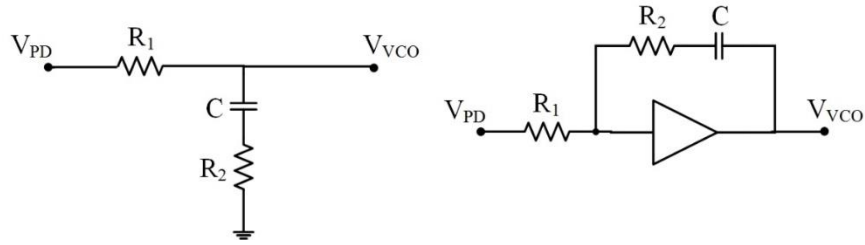
XOR kapısı, girişindeki işaretler birbirinden farklı olduğu zaman çıkış olarak “1” verir, diğer durumlarda “0” verir. Çizelge 4.2’de XOR kapısı doğruluk tablosu verilmiştir.

Çizelge 4.2. XOR kapısı doğruluk tablosu [62].

Referans	Sinyal	Çıkış
0	0	0
0	1	1
1	0	1
1	1	0

4.2.2. Filtre Devresi

Faz kilitlemeli döngüde faz karşılaştırıcından gelen yüksek frekanslı ve parazit sinyalleri engelleyen alçak geçiren bir filtre devresidir. Faz karşılaştırıcı çıkış sinyaliyle orantılı olarak, osilatör için doğru gerilim sağlar. Aktif, pasif, dijital filtre çeşitleri bulunmaktadır. Şekil 4.4’te, aktif ve pasif filtre devreleri verilmiştir.



Şekil 4.4. Aktif ve pasif filtre devresi.

4.2.3. Osilatör

Osilatör, girişine uygulanan kontrol değerine göre çıkışında farklı frekanslarda çeşitli sinyal tipi üreten faz kilitlemeli döngü bloğudur. Girişine herhangi bir işaret uygulanmaksızın çıkışında sinyal üretir. Girişine uygulanan kontrol sinyaline göre osilatörler üç çeşittir.

- Gerilim kontrollü osilatör

- Akım kontrollü osilatör
- Dijital kontrollü osilatör

Yaygın olarak kullanılan dört tip gerilim kontrollü osilatör vardır. Bunlar gerilim kontrollü kristal osilatör, halka osilatör, rezonans osilatör ve RC multivibratörlerdir [58].



Şekil 4.5. Gerilim kontrollü osilatör giriş ve çıkış değerleri.

4.2.4. Faz Kilitlemeli Döngü Çeşitleri

1960'lı yıllarda kullanılan ilk faz kilitlemeli döngü entegresi sadece analog devrelerden oluşmuştur, bu döngü analog faz kilitlemeli döngü olarak adlandırılır. Şekil 4.6'da analog faz kilitlemeli döngü blok diyagramı görülmektedir.



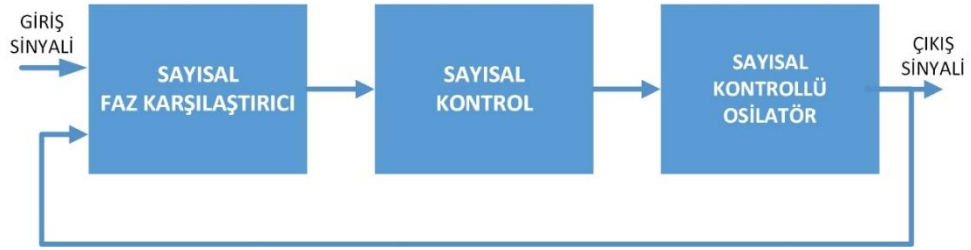
Şekil 4.6. Analog faz kilitlemeli döngü blok diyagramı.

İleriki dönemlerde faz karşılaştırıcı olarak XOR kapıları ve flip-floplar kullanılmıştır. Bu tür dijital faz karşılaştırıcı kullanılarak elde edilen tekniğe sayısal faz kilitlemeli döngü denir. Şekil 4.7'de sayısal faz kilitlemeli döngü blok diyagramı görülmektedir.



Şekil 4.7. Sayısal faz kilitlemeli döngü blok diyagramı.

Tüm sayısal faz kilitlemeli döngü olarak adlandırılan teknikte bütün bloklar dijital devrelerden oluşmuştur, analog devreler kullanılmaz. Şekil 4.8’de tüm sayısal faz kilitlemeli döngü blok diyagramı görülmektedir.



Şekil 4.8. Tüm sayısal faz kilitlemeli döngü blok diyagramı.

Son yıllarda DSP ve mikroişlemcilerin gelişimiyle faz kilitlemeli döngü bloklarının hepsi yazılım ile gerçekleştirilebilir hale gelmiştir. Bu tekniğe yazılım faz kilitlemeli döngü adı verilir [57]. Şekil 4.9’da yazılım faz kilitlemeli döngü blok diyagramı görülmektedir.



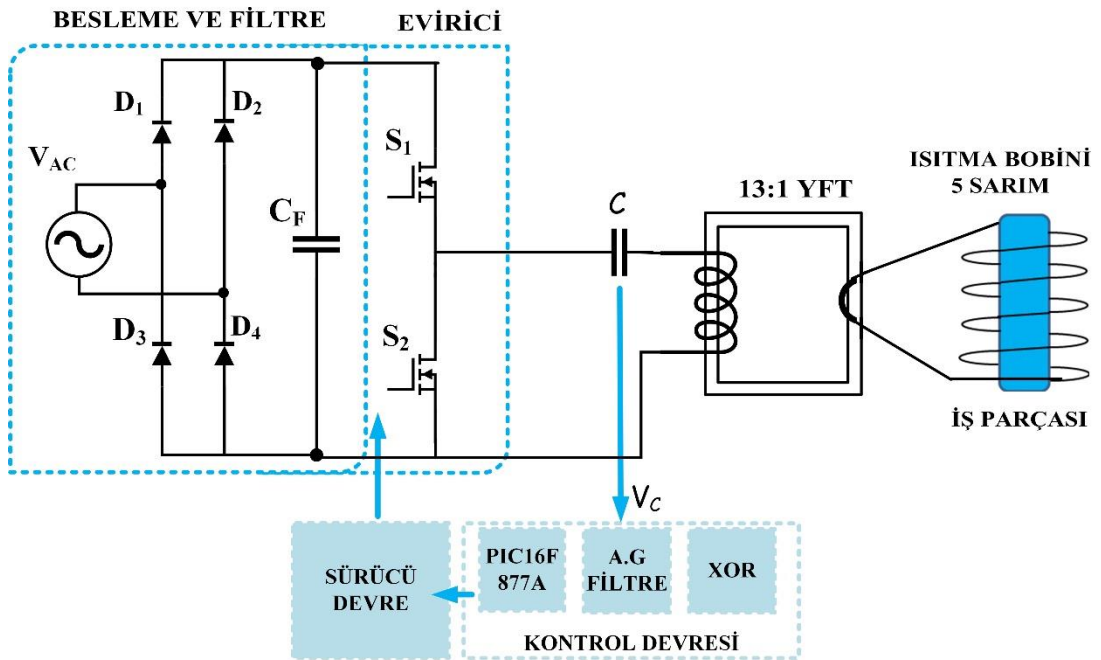
Şekil 4.9. Yazılım faz kilitlemeli döngü blok diyagramı.

BÖLÜM 5

BENZETİM VE DENEYSEL ÇALIŞMALAR

5.1. İNDÜKSİYON ISITICI TASARIMI

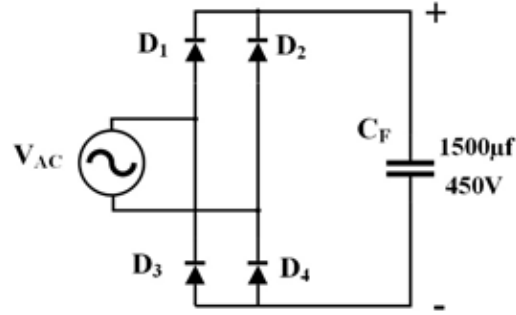
Tasarlanan indüksiyon ısıtma sisteminin blok diyagramı Şekil 5.1’de görülmektedir. Isıtıcı, doğrultma-filtreleme, evirici, kontrol devresi, sürücü devre, yüksek frekans transformatörü ve ısıtma bobini bölümlerinden oluşmaktadır. Isıtıcının beslemesi için alternatif gerilim kaynağı doğrultulmuş ve kondansatörle filtrelenerek 311 volt doğru gerilim elde edilmiştir. Bu gerilim, yarım köprü rezonans evirici devresine uygulanmış ve evirici çıkışında alternatif akım elde edilmiştir. Rezonans frekansının takibi amacıyla, rezonans kondansatörü gerilimi kontrol devresine dönüt verilmiştir. Kontrol devresi çıkışındaki yüksek frekanslı sinyal, manyetik izoleli mosfet sürücü devresine uygulanarak MOSFET’lerin rezonans frekansına ya da üzerinde çalışması sağlanmıştır.



Şekil 5.1. İndüksiyon ısıtma sistemi blok diyagramı.

5.1.1. Doğrultma ve Filtreleme

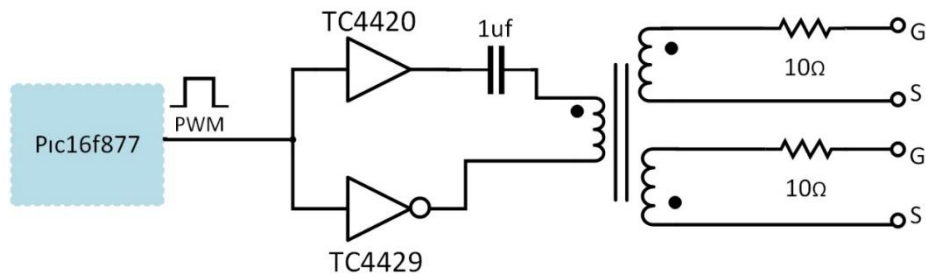
Evirici devresinin beslenmesi için ayarlı alternatif gerilim kaynağı doğrultulup filtrelenmiş ve 311 volt doğru gerilim elde edilmiştir. Filtreleme amacıyla 450 V 1500 μ F değerinde elektrolitik kondansatör kullanılmıştır. Şekil 5.2’de doğrultma ve filtre devresi görülmektedir.



Şekil 5.2. Doğrultma ve filtre devresi.

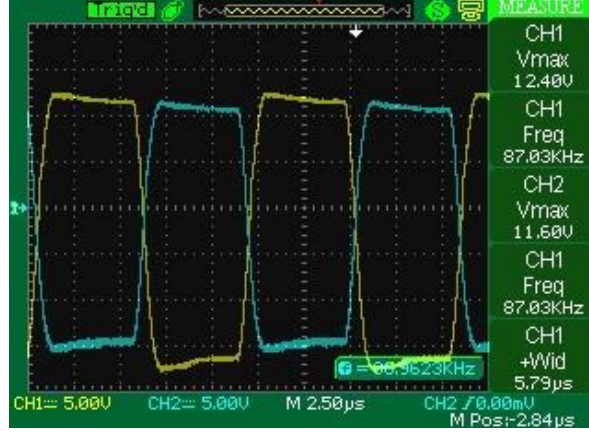
5.1.2. Sürücü Devre

Yarım köprü indüksiyon ısıtma sisteminde, alt ve üst MOSFET’lerin anahtarlama yapabilmesi için sürücü devreye ihtiyaç vardır. Bu sürücü devreler için bootstrap gate sürücü, charge pump gate sürücü, harici beslemeli gate sürücü, trafo kullanılan gate sürücü gibi topolojiler mevcuttur [63]. Bu çalışmada, izolasyon sağlaması, düşük empedanslı sürüşe izin vermesi, aynı anda birçok anahtarlama elemanını kontrol edebilmesi ve yalıtım süresini azaltan negatif gerilimi üretmesi gibi avantajlarından dolayı trafo kullanılan gate sürücü topolojisi kullanılmıştır.



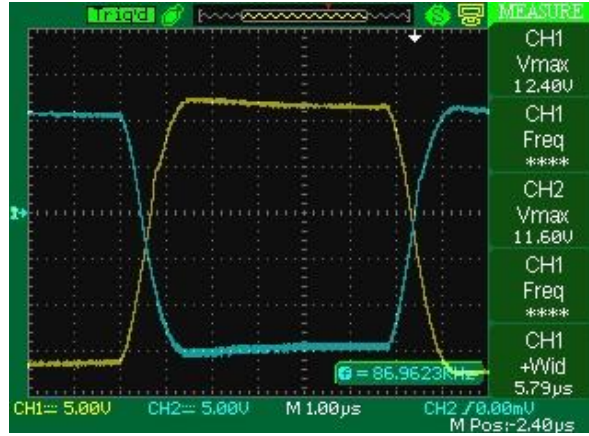
Şekil 5.3. Sürücü devresi.

Sistemin çalışmaya başlatıldığı 87 kHz frekans değeri için Şekil 5.4'te alt ve üst MOSFET'lerin anahtarlama sinyalleri gözükmektedir.



Şekil 5.4. Alt ve üst MOSFET sürücü sinyalleri.

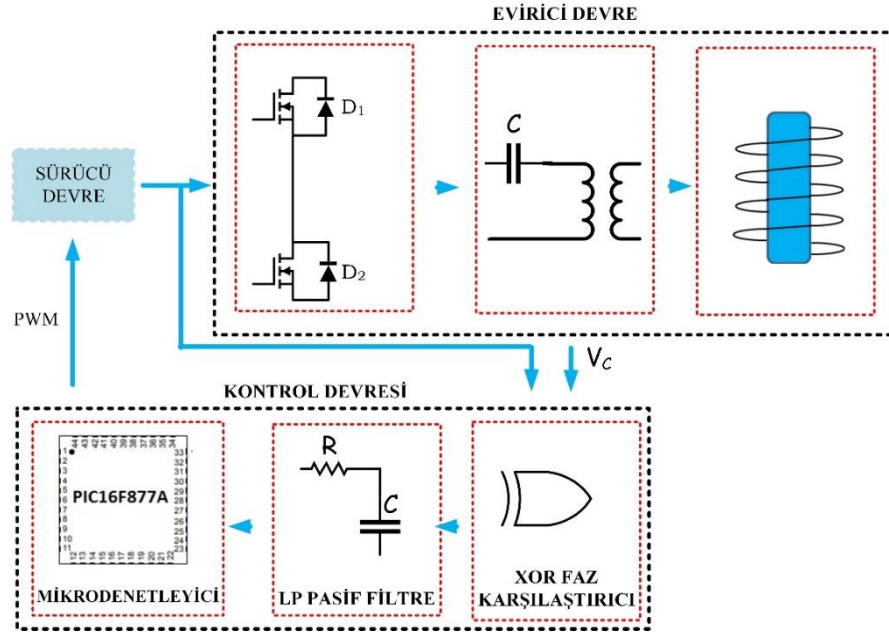
Eviricinin doğru şekilde çalışabilmesi için alt ve üst MOSFET'lerin tetikleme sinyalleri arasında ölü zaman bulunması gerekir. Anahtar sürücü sinyalleri arasındaki ölü zaman detaylı olarak Şekil 5.5'de gözükmektedir.



Şekil 5.5. Sürücü sinyalleri arasındaki ölü zaman.

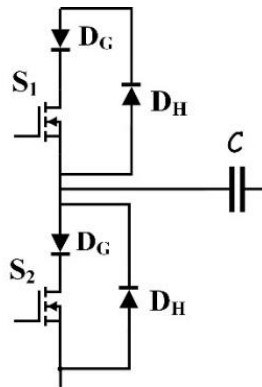
5.1.3. Evirici ve Kontrol Devresi

Tasarlanan indüksiyon ısıtıcının kontrol devresi, XOR kapısı, alçak geçiren filtre ve mikrodenetleyiciden oluşmaktadır. Evirici ve kontrol devresi Şekil 5.6'da verilmiştir.



Şekil 5.6. İndüksiyon ısıtma evirici ve kontrol devresi blok diyagramı.

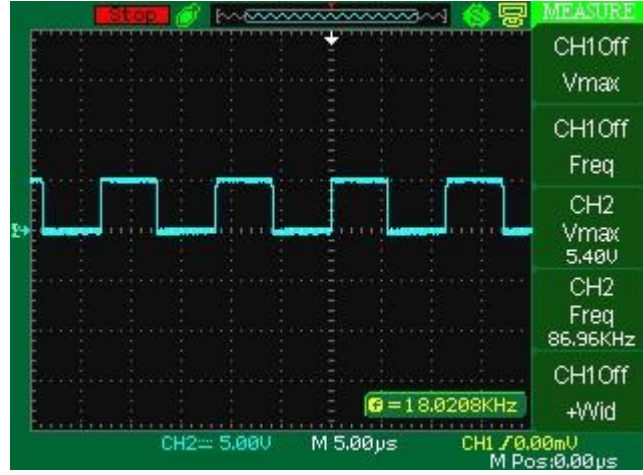
D sınıfı seri rezonans evirici devresinde anahtarlama elemanı olarak IRFP460N MOSFET kullanılmıştır. MOSFET'in drain-source gerilim değeri 500 volt, $V_{GS} = 10$ V iken sürekli drain akım değeri 20 amperdir [64]. Rezonans frekansı dışındaki çalışma durumlarında anahtarların korunması amacıyla anahtarlara seri D_G diyotu, ters paralel olarak D_H diyotu bağlanmıştır. D_G diyotu DSEI30-12A ve D_H diyotu MUR1560'tır. Şekil 5.7'de evirici güç anahtarı yapısı görülmektedir.



Şekil 5.7. Eviricide güç anahtarı yapısı.

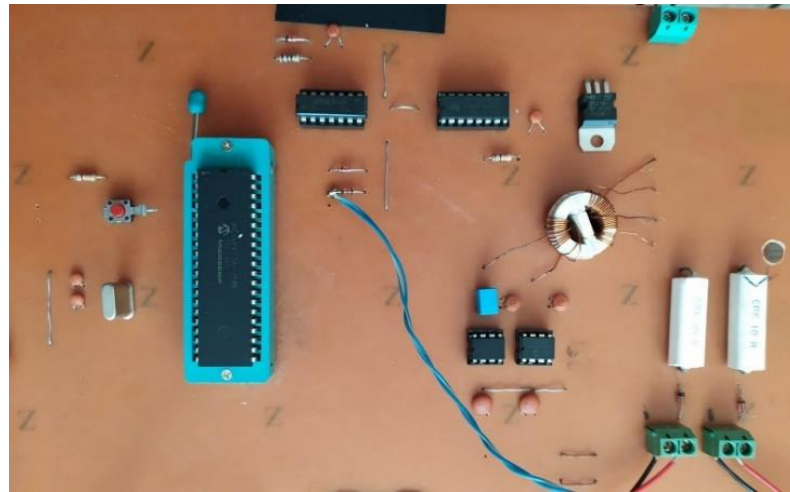
Sürücü sinyallerinin üretilmesi ve eviricinin kontrol edilmesi için Microchip firmasına ait PIC16F877A mikrodeneleyicisi kullanılmıştır. Mikrodeneleyicinin iki bağımsız

yakalama-karşılaştırma-PWM modülü vardır. PWM çıkışı 16-17 numaralı CCP1 ve CCP2 bacaklarından alınabilir. Mikrodenetleyici 10 bit çözünürlükte PWM üretebilir [65]. Şekil 5.8’de mikrodenetleyici ile oluşturulan PWM sinyali görülmektedir.



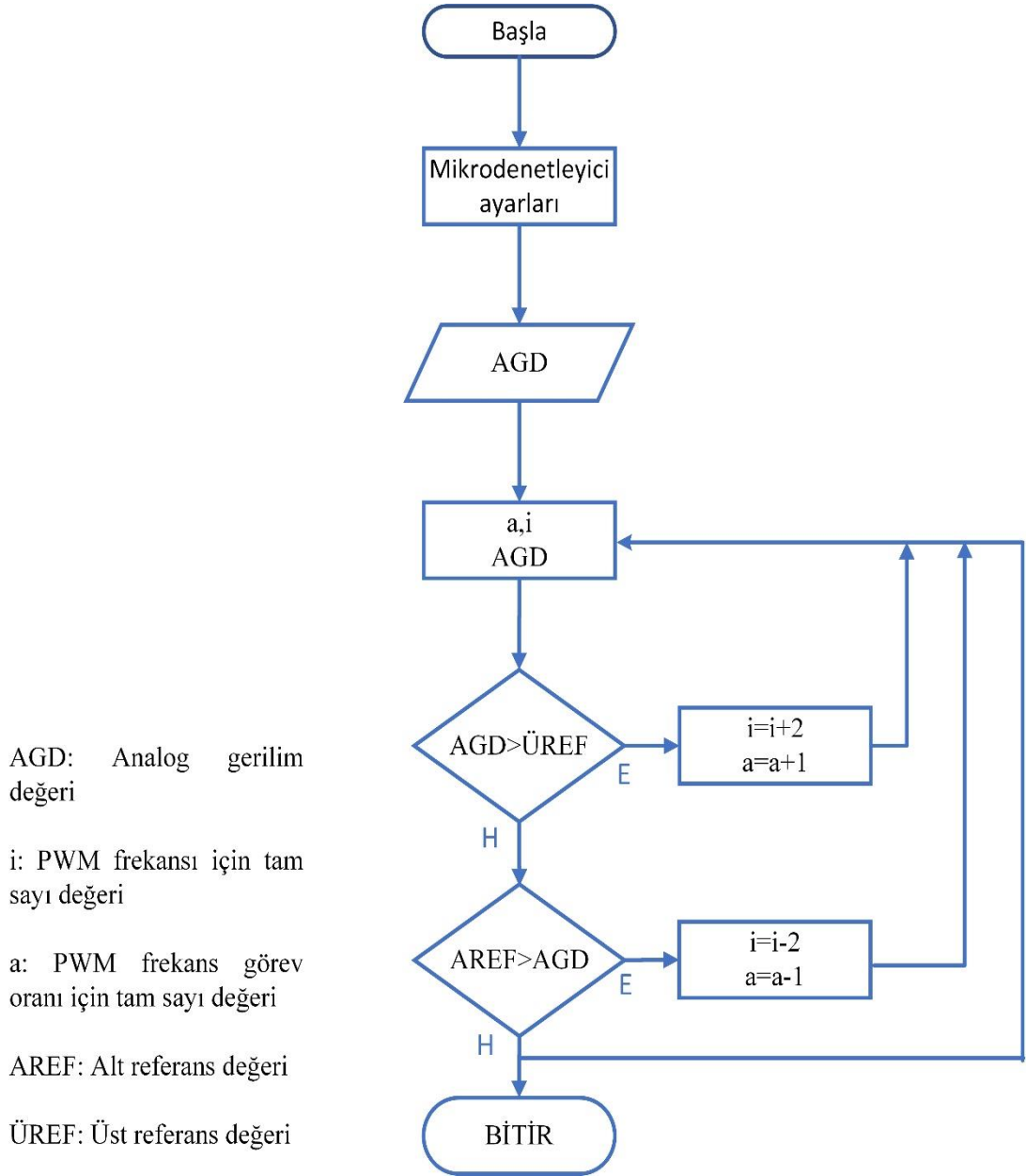
Şekil 5.8. Mikrodenetleyici çıkışındaki PWM sinyali.

Evirici rezonans frekansında çalışırken yük akımı ve kol gerilimi arasında faz farkı yoktur. Bu anahtarlama frekansında akım ile kondansatör gerilimi arasında 90 derece faz farkı vardır. Rezonans takibi kondansatör gerilimi kullanılarak yapılmıştır. Rezonans frekansının takibi için faz kilitlemeli döngü kullanılmıştır. Mikrodenetleyici döngü bloklarından gerilim kontrollü osilatör olarak çalışmıştır. Şekil 5.9’da sürücü ve kontrol devresi görülmektedir.



Şekil 5.9. Sürücü ve kontrol devresi.

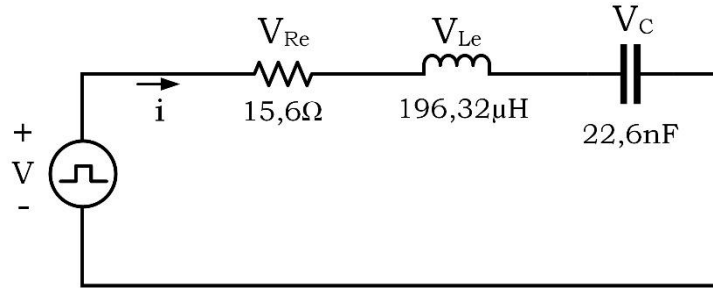
Isıtıcı çalışmaya başlatıldığında mikrodenetleyici 87 kHz değerinde PWM sinyali üretir. Mikrodenetleyicinin ürettiği PWM sinyali ve rezonans kondansatör gerilimi, XOR kapısı ile karşılaştırıldıktan sonra alçak geçiren pasif filtreye uygulanır. Filtre çıkışındaki doğru gerilim değeri, mikrodenetleyicide analog sayısal dönüştürücü kullanılarak işlenir. Mikrodenetleyici, doğru gerilim değerine göre PWM anahtarlama frekansını artırarak ya da azaltarak değiştirir, rezonans frekansına yaklaşır. Şekil 5.10'da faz kilitlemeli döngü algoritması görülmektedir.



Şekil 5.10. Faz kilitlemeli döngü algoritması.

5.2. EVİRİCİNİN MATEMATİKSEL MODELLENMESİ

D sınıfı seri rezonans eviricinin matematiksel modellemesi MATLAB-SIMULINK programında yapılmıştır. Modelleme eşdeğer devre üzerinden, seri RLC devresine 311 V darbe gerilim değeri uygulanarak yapılmıştır. Modellenen eşdeğer devre Şekil 5.11’de görülmektedir.



Şekil 5.11. Modellenen eşdeğer devre.

Rezonans akımının görüntülenebilmesi için modellemeye aşağıda verilen eşitlikler ve eşitliklerin Laplace dönüşümleri kullanılmıştır.

$$V = V_{Re} + V_{Le} + V_C \quad (5.1)$$

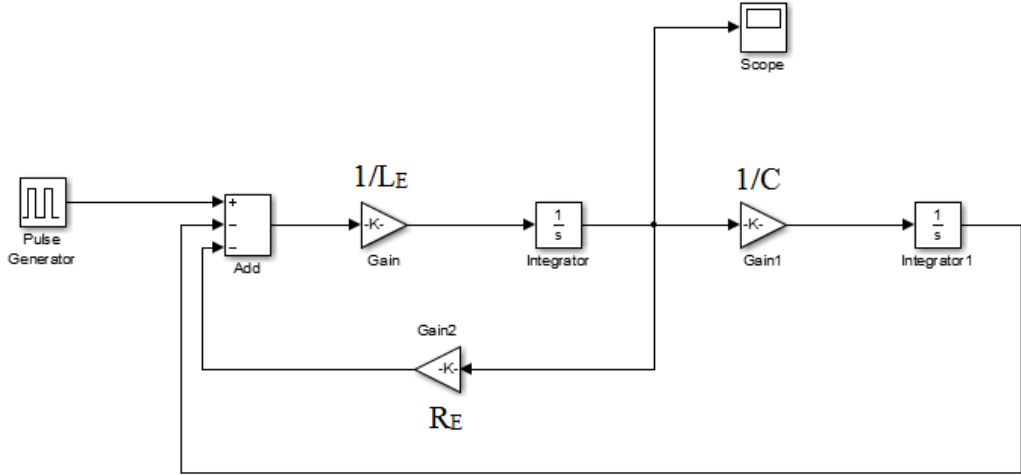
$$V - V_{Re} - V_C = V_{Le} \quad (5.2)$$

$$V - V_{Re} - V_C = sLI(s) \quad (5.3)$$

$$V_{Re} = RI(s) \quad (5.4)$$

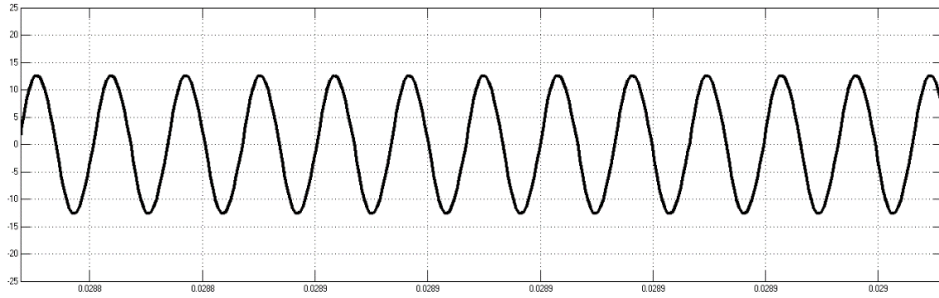
$$V_C = \frac{I(s)}{sC} \quad (5.5)$$

Şekil 5.12’de MATLAB’da oluşturulan evirici modeli görülmektedir. Rezonans akımını ölçmek amacıyla tasarlanan diyagramda darbe gerilimi üretmek için “pulse generator”, toplama ve çıkarma işlemi için “add”, elektriksel değerler için “gain” ve akımın görüntülenmesi için “scope” blokları kullanılmıştır.



Şekil 5.12. Evirici MATLAB modeli.

Modellemede tepe değeri 12,63 amper ölçülen evirici akımı Şekil 5.13'te görülmektedir.



Şekil 5.13. MATLAB modeli evirici akım grafiği.

5.3. EVİRİCİ SİMÜLASYONU

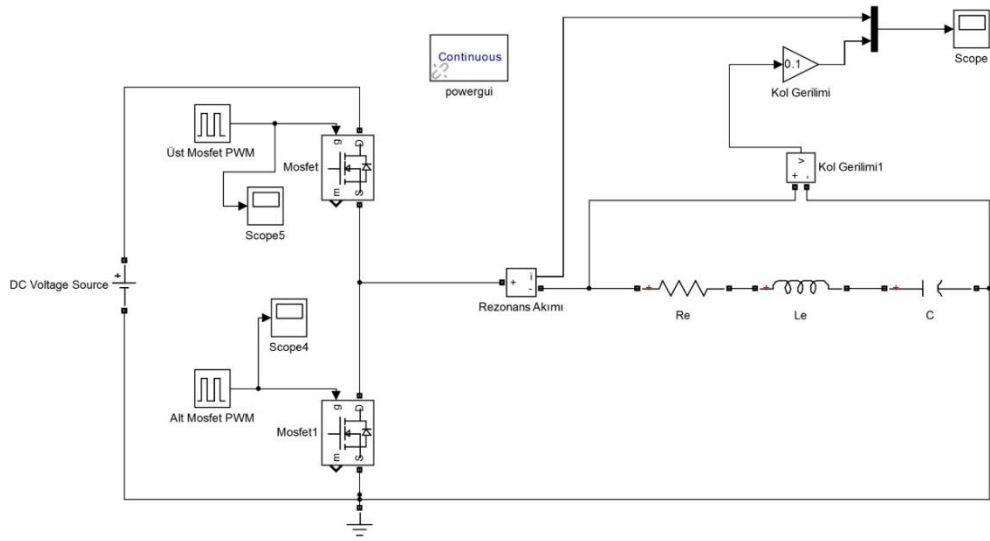
Uygulaması gerçekleştirilen D sınıfı seri rezonans eviricinin simülasyonu, eşdeğer devre parametreleri kullanılarak MATLAB ve PSpice ortamında yapılmıştır. Deneysel sonuçlar ile eviricinin rezonans frekansı 75,6 kHz olarak tespit edilmiştir. Uygulamada evirici 76 kHz anahtarlama frekansında endüktif bölgede çalıştırılmıştır ve simülasyonlar bu frekans değeri ile yapılmıştır. Simülasyonlarda kullanılan evirici anahtarlama frekansı (f_a), eşdeğer direnç (R_e), eşdeğer bobin (L_e) ve kondansatör (C) parametreleri Çizelge 5.1 ile gösterilmiştir.

Çizelge 5.1. Eşdeğer devre parametreleri.

f_a (kHz)	R_e (Ω)	L_e (μH)	C (nF)
76	15,6	196,32	22,6

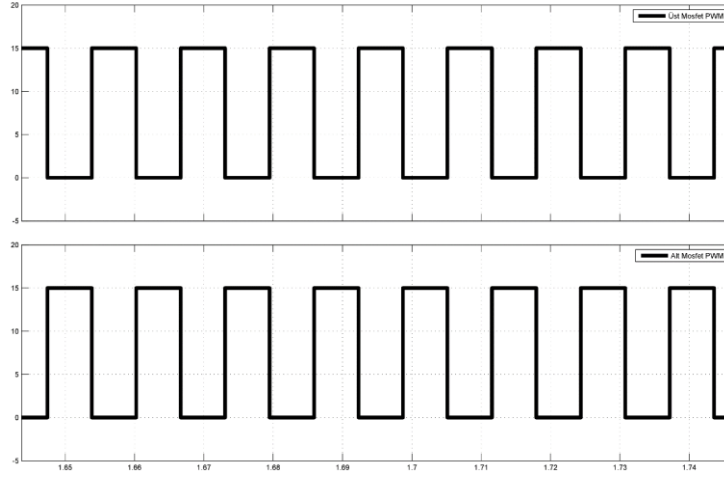
5.3.1. MATLAB Simülasyonu

MATLAB Simulink kullanılarak benzetimi yapılan seri rezonans evirici devresi Şekil 5.14'te görülmektedir.



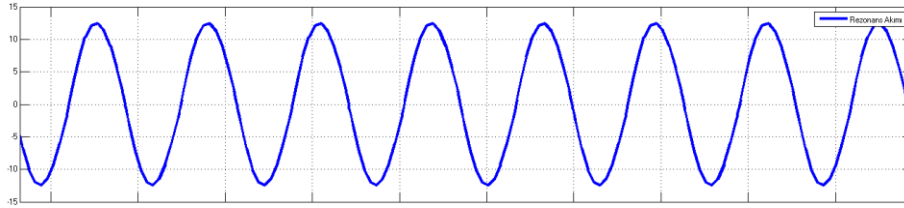
Şekil 5.14. MATLAB simülasyon devresi.

Alt ve üst MOSFET'lerin tetiklenmesi için gerekli PWM sinyalleri, darbe üretici ile 76 kHz değerinde üretilerek anahtarların G-S bacaklarına uygulanmıştır. Şekil 5.15'te 0-15 volt genliğindeki anahtarlama sinyalleri görülmektedir.



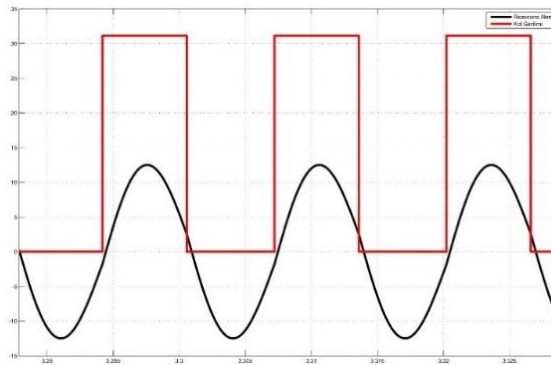
Şekil 5.15. MATLAB simülasyon anahtarlama sinyalleri.

Tepe değeri 12,63 amper olan evirici rezonans akımı Şekil 5.16’da görülmektedir.



Şekil 5.16. MATLAB simülasyonu evirici akımı.

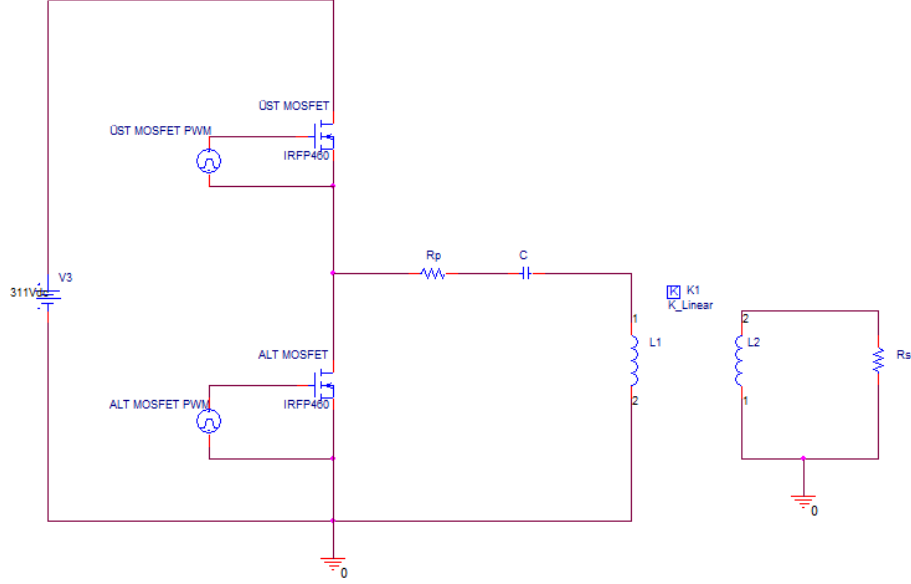
MOSFET’lerin anahtarlama sonucu RLC elemanları üzerine 311 volt kare dalga gerilim uygulanır. Rezonans akımı ve on kat küçültülmüş V_{ab} gerilimi Şekil 5.17’de yer almaktadır.



Şekil 5.17. MATLAB simülasyonu evirici akım ve gerilimi.

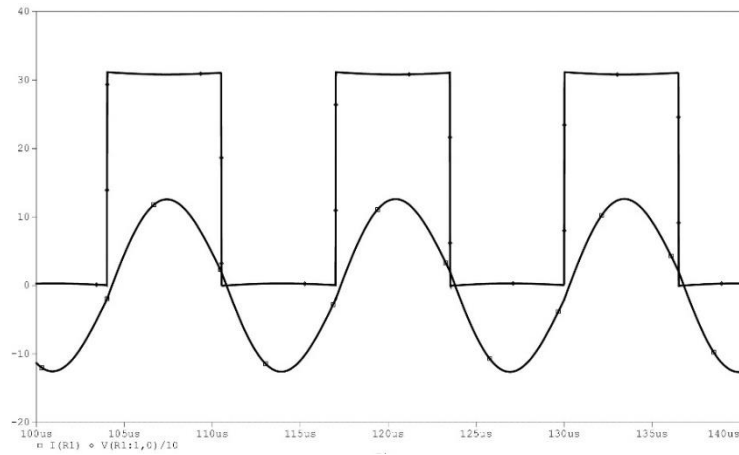
5.3.2. PSpice Simülasyonu

Şekil 5.18’de PSpice’da simülasyonu yapılan seri rezonans evirici devre şeması görülmektedir.



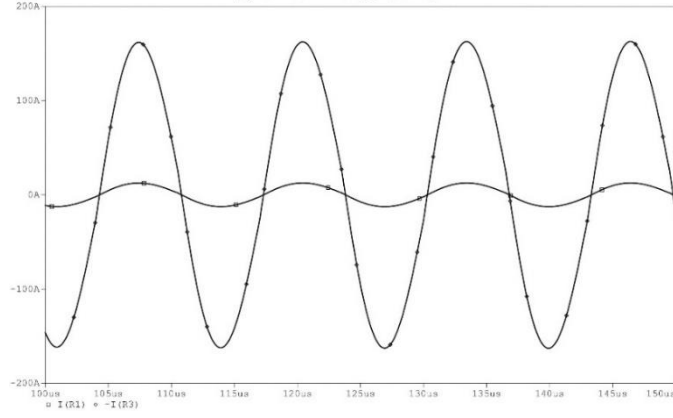
Şekil 5.18. PSpice simülasyon devresi.

Primer akımı ve on kat küçültülmüş evirici gerilimi Şekil 5.19’da yer almaktadır. Primer akımı tepe değeri 12,58 amper ölçülmüştür.



Şekil 5.19. PSpice simülasyonu evirici akımı ve gerilimi.

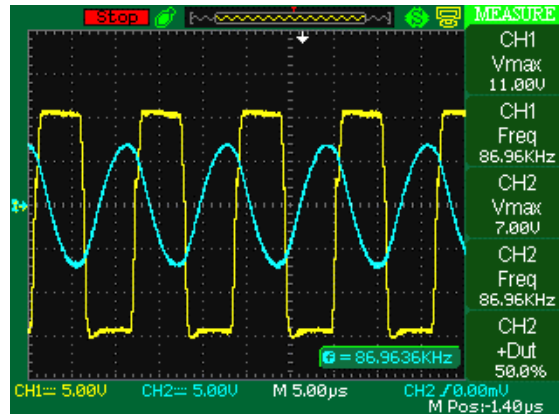
Şekil 5.20’de yüksek frekans transformatörü primer ve sekonder akımları görülmektedir. Primer akımı tepe değeri 12,58 amper, sekonder akımı 163,54 amperdir.



Şekil 5.20. PSPice simülasyonu primer ve sekonder akımı.

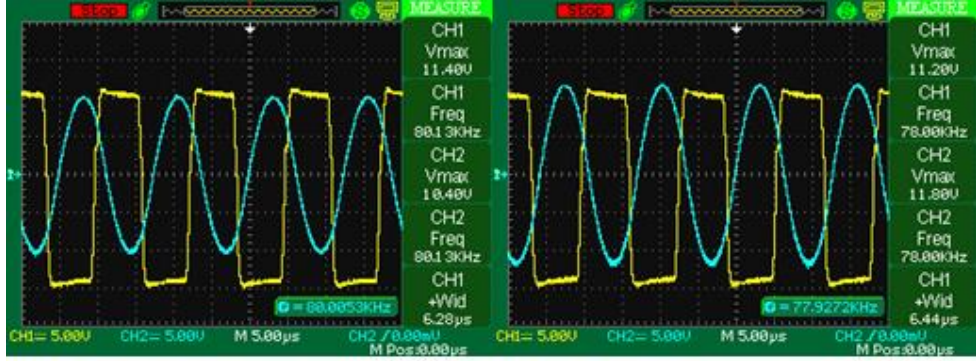
5.4. DENEYSEL SONUÇLAR

İndüksiyon ısıtıcı besleme gerilimi 311 volt ve rezonans frekansı 75,6 kHz civarındır. Deneysel sonuçlarda evirici primer ve sekonder akımlarının görüntülenebilmesi için akım transformatörü kullanılmıştır. Akım transformatörü çıkışına direnç bağlanarak ölçümlerde 1 volt 1 amper oranlaması yapılmıştır. Sistem 87 kHz anahtarlama frekansı ile çalışmaya başlatılmıştır, 87 kHz anahtarlama frekansında alt MOSFET gate-source gerilimi ve rezonans akımına ait sinyaller Şekil 5.21’de görülmektedir.



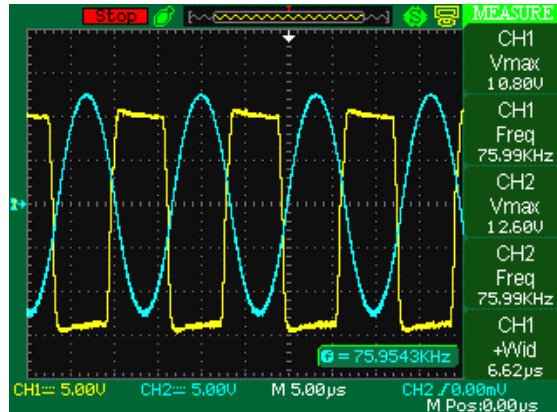
Şekil 5.21. 87 kHz anahtarlama frekansında çalışma sinyalleri.

Evirici, rezonans frekansı üzerinde 80 kHz ve 78 kHz anahtarlama frekanslarında endüktif olarak çalıştırılmıştır. 80 kHz anahtarlama frekansı için rezonans akımı tepe değeri 10,4 amper, 78 kHz anahtarlama frekansı için rezonans akımı tepe değeri 11 amperdir. Rezonans frekansına yaklaşıldığında evirici akımı artmıştır. Bu çalışmada, alt MOSFET gate-source gerilimi ve rezonans akımı Şekil 5.22’de gösterilmiştir.



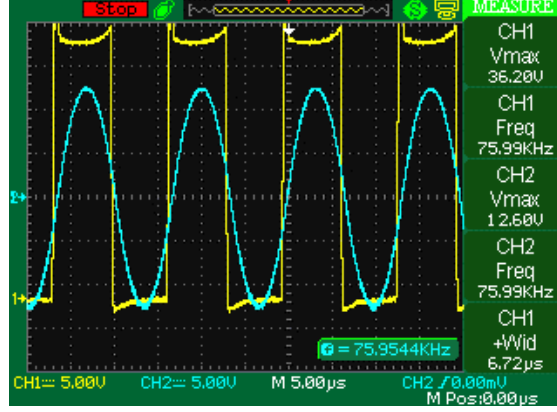
Şekil 5.22. Rezonans frekansı üzerinde çalışma sinyalleri.

Sistemin anahtarlama frekansı, rezonans frekansına eşitlendiğinde ya da biraz üzerindeyken mikrodenetleyici mevcut frekansı sabitler, böylece faz kilitlemeli döngü gerçekleştirilir. Rezonans frekans değerinin altına düşmez, yüksek anahtarlama kayıplarına yol açan kapasitif çalışma gerçekleşmez. Isıtma işlemi gerçekleşirken rezonans frekansında meydana gelen değişikliklerde takip edilir. Şekil 5.23’te 76 kHz çalışma frekansındaki akım ve anahtarlama sinyali görülmektedir. Akımın tepe değeri 12,6 amperdir.



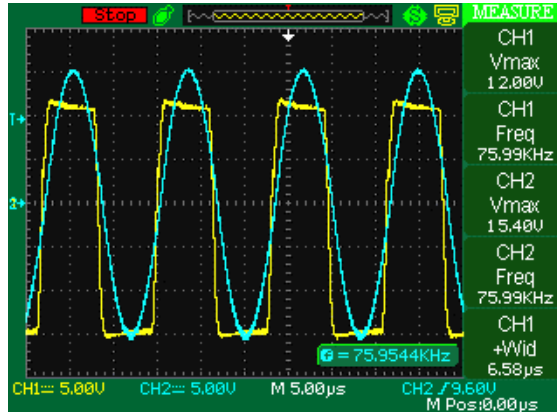
Şekil 5.23. 76 kHz anahtarlama frekansında akım ve anahtarlama sinyalleri.

76 kHz çalışma frekansında, besleme gerilimi 311 volt, CH1 kanalı prob x10 iken alt MOSFET drain-source gerilimi ve rezonans akımı Şekil 5.24'te görülebilir.



Şekil 5.24. 76 kHz anahtarlama frekansında evirici gerilim ve akım sinyalleri.

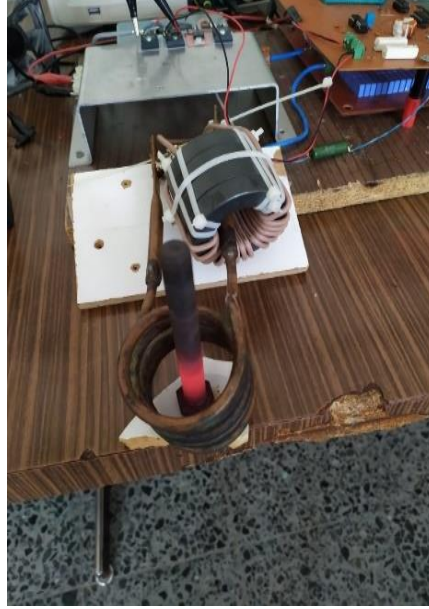
76 kHz çalışma frekansında, CH2 kanalı prob x10 iken yüksek frekans transformatörü sekonder akımı ve anahtar tetikleme sinyali Şekil 5.25'te görülebilir. Transformatör sekonder tepe akımının 154 amper olduğu görülmektedir.



Şekil 5.25. Anahtarlama ve sekonder akım sinyalleri.

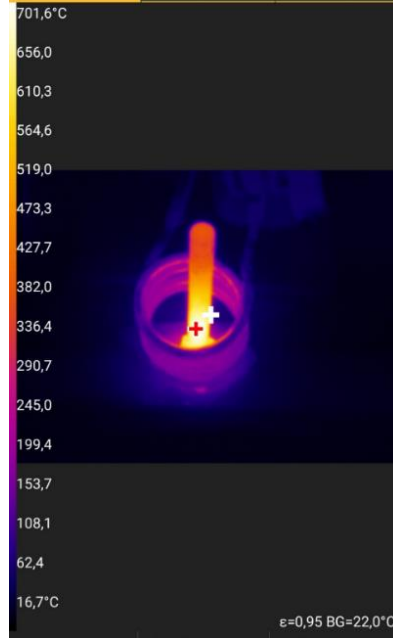
İndüksiyonla sertleştirilecek çelik malzemelerde % 0,30-0,60 karbon miktarının olması gerekmektedir. Daha yüksek karbonlu çeliklerde çatlama riski söz konusudur. % 0,30'un altında karbona sahip çeliklerin indüksiyonla sertleştirilmeleri mümkün değildir, ancak malzemenin içeriğinde yüksek oranda başta Mangan olmak üzere Silisyum, Krom, Nikel ve Vanadyum gibi alaşım elementleri mevcut ise % 0,20 karbon oranına kadar sertleştirme mümkündür. % 0,60'ın üzerinde karbon miktarına

sahip çeliklerin indüksiyonla sertleştirilmeleri tavsiye edilmez çünkü malzeme çatlama riski taşımaktadır [66]. Bu çalışmada %0,23 karbon miktarı içeren düşük karbonlu çelik bir iş parçası kullanılmıştır. Şekil 5.26'da ısıtılan çelik iş parçası görülmektedir.



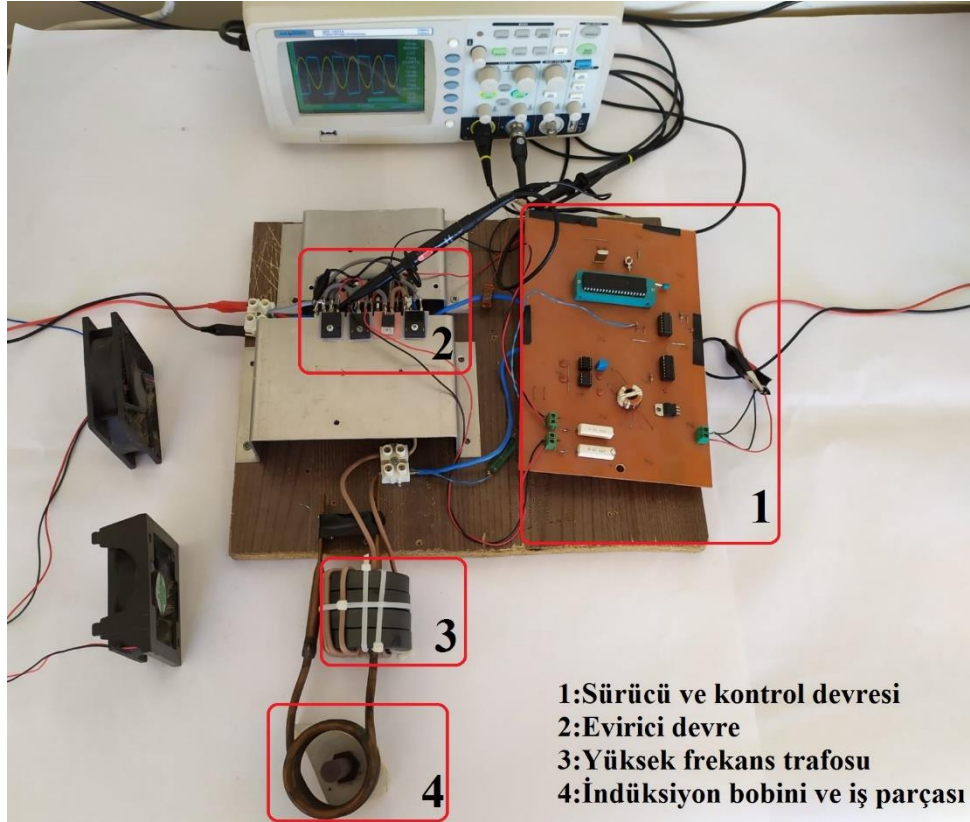
Şekil 5.26. Isıtılan iş parçası.

Çeliklerin sertleşme sıcaklığı genellikle 780°C ile 900°C aralığındadır. Çalışmada kullanılan düşük karbonlu çelik 860°C ile 890°C sıcaklığında sertleşmektedir. Deneysel çalışmalarda ısıtıcının 2 dakika çalışmasıyla iş parçası yaklaşık 700°C sıcaklığa ulaşmıştır. İş parçası sıcaklığının termal kamera görüntüsü Şekil 5.27'de yer almaktadır.



Şekil 5.27. Isıtılan iş parçasının termal kamera görüntüsü.

Sistemin genel görünümü Şekil 5.28’de yer almaktadır.



Şekil 5.28. İndüksiyon ısıtma sistemi genel görüntüsü.

5.5. ANALİZ, SİMÜLASYON VE DENEYSEL SONUÇLARIN KARŞILAŞTIRILMASI

Bu bölümde indüksiyon ısıtıcı sisteminden alınan veriler, matematiksel analiz ve simülasyon sonuçları ile karşılaştırılmıştır. Analiz ve simülasyonlar Çizelge 5.2’de verilen parametreler ile 76 kHz anahtarlama frekansında yapılmıştır.

Çizelge 5.2. Eşdeğer parametreler.

V (V)	f_a (kHz)	R_e (Ω)	L_e (μH)	C (nF)
311	76	15,6	194,24	22,6

Analiz, simülasyon ve deneysel sonuçlar çizelge 5.3’de verilmiştir. Verilerin genellikle benzer olduğu görülmektedir. Farklılık elemanların, iletkenlerin ve ölçü aletlerinin direnç tolerans gibi değerlerinden kaynaklanmaktadır. Veriler sabit bir iş parçası için alınmıştır. Farklı iş parçaları kullanıldığında değerlerin değiştiği gözlenmiştir.

Çizelge 5.3. Sonuç tablosu.

	DENEYSEL SONUÇLAR	MATEMATİKSEL ANALİZ	SİMÜLASYON SONUÇLARI	
			Pspice	Matlab
I_{P(MAX)} (A)	12,6	12,66	12,58	12,63
I_{S(MAX)} (A)	154	164,58	163,54	-
I_{P(RMS)} (A)	8,9	8,95	8,89	8,92
I_{S(RMS)} (A)	109,1	116,35	115,62	-

BÖLÜM 6

SONUÇ VE ÖNERİLER

Bu tez çalışmasında yüksek frekanslı bir indüksiyon ısıtıcı tasarlanmış ve ısıtıcının rezonans frekansı faz kilitlemeli döngü ile takip edilmiştir. Uygulaması gerçekleştirilen ısıtıcının parametreleri kullanılarak, MATLAB ve PSpice programlarında simülasyon yapılmıştır. Ayrıca sistemin matematiksel analizi yapılmış ve elde edilen bütün sonuçlar karşılaştırılmıştır.

Isıtıcı, D sınıfı seri rezonans evirici kullanılarak tasarlanmış, anahtarlama elemanı olarak IRFP460 serisi MOSFET kullanılmıştır. Anahtarlar için manyetik izoleli sürücü devre tasarlanmıştır. Tasarlanan sürücünün yüksek frekans değerlerinde anahtarları doğru biçimde sürebildiği görülmüştür. Sürücü devrenin avantajları ek güç kaynağına ihtiyaç duymaması ve ölü zaman sağlamasıdır. Isıtıcı yüksek frekanslarda çalışabildiği için yüzey sertleştirme uygulamalarında kullanılabilir.

Rezonans devresi 13/1 oranlı yüksek frekans transformatörü, rezonans kondansatörleri ve indüksiyon bobininden oluşmaktadır. Çalışmalarda iş parçaları yaklaşık 700°C sıcaklığa kadar ısıtılmıştır. İş parçalarını daha yüksek sıcaklıklarda ısıtabilmek ve sistemin uzun süreli çalışmasını sağlamak için sıvı soğutma sistemi eklenebilir.

Yumuşak anahtarlama koşullarının sağlanması için evirici rezonans frekansı, faz kilitlemeli döngü ile takip edilmiştir. Sayısal faz kilitlemeli döngü tekniği içerisinde gerilim kontrollü osilatör olarak Microchip firmasına ait PIC16F877A mikrogenetleyicisi kullanılmıştır. Bu özelliğiyle tasarlanan sistem oldukça düşük maliyetli bir kontrol devresine sahiptir. Faz kilitlemeli döngü gerçekleşirken, mikrogenetleyicide analog dijital dönüştürücü kullanılmış ve alçak geçiren filtre çıkış değerine göre anahtarlama frekansı değiştirilmiştir. Paket entegre yerine mikrogenetleyici kullanılması akım, güç, ısı ve frekans gibi sisteme ait büyüklüklerin

kontrol edilebilmesine olanak sağlamıştır. Mikrodenetleyici yazılımı ve giriş çıkış birimleri kullanılarak bu büyüklükler denetlenebilir. Rezonans frekansının daha hassas takip edilebilmesi için ileriki çalışmalarda dsPIC serisi mikrodenetleyiciler de kullanılabilir.

Çalışmada analiz, simülasyon ve deneysel sonuçların benzer olduğu görülmüştür. Bu çalışma, tasarlanan sürücü devresi ile eviricinin yüksek frekanslarda çalışabilmesi, rezonans kondansatör gerilimi geri beslemesiyle mikrodenetleyicinin rezonans frekansını takip edebilmesi gibi avantaj ve özelliklerinden dolayı gelecek çalışmalara kaynak olabilir.

KAYNAKLAR

1. Rudnev, V., Loveless, D., Cook, R. and Black, M., “Handbook of Induction Heating”, *Marcel Dekker*, New York, 1–2 (2003).
2. Aytekin, B., “Endüksiyon ocak elektronik kontrol sistem tasarımı”, Yüksek Lisans Tezi, *İstanbul Teknik Üniversitesi Fen Bilimleri Enstitüsü*, İstanbul, 1-2 (2008).
3. Efteli, Y., “Yüksek frekans endüksiyon kaynak makinası tasarımı”, Yüksek Lisans Tezi, *Ege Üniversitesi Fen Bilimleri Enstitüsü*, İzmir, 1-2 (2012).
4. Öncü, S., “Bir fazlı yüksek verimli ev tipi bir indüksiyon ısıtma sistemi”, Yüksek Lisans Tezi, *Pamukkale Üniversitesi Fen Bilimleri Enstitüsü*, Denizli, 1-2 (2005).
5. Lucia, O., Maussion, P., Dede, E. J. and Burdio, J., “Induction heating technology and its applications: past developments, current technology, and future challenges”, *IEEE Transactions on Industrial Electronics*, 61 (5): 2509-2520 (2014).
6. Phondon, C. and Intani, P., “High power induction heating”, *International Conference on Electrical Machines and Systems*, Hangzhou, 3398-3403 (2014).
7. Khaing, M. M. and Aung, S. S., “Design and comparison of conductor size for induction cooker coil”, *International Journal of Scientific Engineering and Technology Research*, 3 (7): 1240-1244 (2014).
8. Topuz, E., Dawood, K., Kaya, Ü., Odabaş, G. and Kömürgöz, G., “Electromagnetic and thermal analysis of a domestic induction cooker coil”, *International Conference on Power Electronics and Applications*, Elazığ, 1-5 (2019).
9. Nagaraju, G., “Investigation on power electronic converter topologies for induction heating application”, *National Institute of Technology Kurukshetra*, Kurukshetra, 1-20 (2016).
10. Kwon, Y. S., Yoo, S. B. and Hyun, D. S., “Half-bridge series resonant inverter for induction heating applications with load-adaptive PFM control strategy”, *APEC '99 Fourteenth Annual Applied Power Electronics Conference and Exposition 1999 Conference Proceedings*, Dallas, 575-581 (1999).
11. Bayindir, N. S., Kukrer, O. and Yakup, M., “DSP-based PLL-controlled 50-100 kHz 20 kW high-frequency induction heating system for surface hardening and welding applications”, *IEEE Proceedings Electric Power Applications*, 150 (3): 365-371 (2003).

12. Zhu, X., Peng, Y., Shi, X. and Li, H., “200kW/400kHz high frequency inverter for induction heating application”, *2005 International Conference on Power Electronics and Drives Systems*, Kuala Lumpur, 624-627 (2005).
13. Cui, Y. L., He, K., Fan, Z. W. and Fan, H. L., “Study on DSP-based PLL-controlled superaudio induction heating power supply simulation”, *2005 International Conference on Machine Learning and Cybernetics*, Guangzhou, 1082-1087 (2005).
14. Tian, J., Berger, G., Reimann, T., Scherf, M. and Petzoldt, J., “Design and implementation of a FPGA-based controller for resonant inverters”, *2007 IEEE Power Electronics Specialists Conference*, Orlando, 779-784 (2007).
15. Nuttawong, S., Naetiladdanon, S., Sangswang, A. and Koompai, C., “A dsPIC-based constant power controller for induction heating applications”, *2012 9th International Conference on Electrical Engineering/Electronics, Computer, Telecommunications and Information Technology*, Phetchaburi, 1-4 (2012).
16. You, B., Wang, J. and Li, S., “FPGA-based induction heating with variable modulus control all-digital Phase-Locked Loop research”, *Proceedings of 2013 2nd International Conference on Measurement, Information and Control*, Harbin, 1099-1102 (2013).
17. Zhou, M., Xu, Z., Li, Y., Li Z. and Lin, W., “High frequency induction heating power supply phase tracking system based on TMS320F2812”, *Proceedings of 2013 2nd International Conference on Measurement, Information and Control*, Harbin, 1000-1003 (2013).
18. Lijuan, W. and Xuesong, L., “The design of frequency tracking control circuit in induction heating power supply based on SG3525”, *2016 Chinese Control and Decision Conference (CCDC)*, Yinchuan, 2022-2026 (2016).
19. Boşnak, İ., “PLC ile PLL kontrollü indüksiyon ısıtma uygulaması”, Yüksek Lisans Tezi, *Karabük Üniversitesi Fen Bilimleri Enstitüsü*, Karabük, 10-11 (2016).
20. Pholsriphim, A., Nurach, S. and Lenwari, W., “Half-bridge resonance inverter for induction heating using digital-controlled pulse density modulation technique”, *2017 12th IEEE Conference on Industrial Electronics and Applications (ICIEA)*, Siem Reap, 1084-1086 (2017).
21. Mn, R. and Barai, M., “Study of induction heating using half bridge series resonant inverter”, *International Journal Of Scientific Engineering Research*, 1520-1526 (2018).
22. Bowornprasittikun, M., Thanamai, T., Nutwong, S., Sangswang, A. and Naetiladdanon, S., “Induction food dehydrator with temperature control”, *2019 7th International Electrical Engineering Congress (iEECON)*, Hua Hin, 1-4 (2019).

23. Rattanapun, P., Sangswang, A. and Koompai, C., "A series-resonant inverter for levitation melting application", **2019 7th International Electrical Engineering Congress (iEECON)**, Hua Hin, 1-4 (2019).
24. Maamar, A. E. T., Helaimi, M., Taleb, R. and Chabni, F., "Design and control of a single-phase series resonance inverter using an Arduino microcontroller", **2019 International Conference on Advanced Electrical Engineering (ICAEE)**, Algiers, 1-6 (2019).
25. Kadirova, S., Evstatiev, I., Kajtsanov, D. and Nenov, T., "Microprocessor based electronic system for control of induction heating in machine industry", **2019 16th Conference on Electrical Machines, Drives and Power Systems (ELMA)**, Varna, 1-5 (2019).
26. Akoğlu, F., "Sıfır gerilim anahtarlama seri rezonans eviricili ani su ısıtıcı uygulaması", Yüksek Lisans Tezi, **Karabük Üniversitesi Fen Bilimleri Enstitüsü**, Karabük, 1-24 (2019).
27. Davidas, A. C. and Pop, O. A., "Method for Detecting Resonance Frequency in Induction Heating Systems", **IEEE 25th International Symposium for Design and Technology in Electronic Packaging (SIITME)**, Cluj-Napoca, 295-298 (2019).
28. Başkurt, Y. and Karaca, H., "Evaluation of half bridge resonant inverter topologies", **Dokuz Eylül Üniversitesi Mühendislik Fakültesi Fen ve Mühendislik Dergisi**, İzmir, 22 (65): 505-515 (2020).
29. Sakchalatorn, A., Sangswang A. and Naetiladdanon, S., "Design and operation of a levitation melting system", **8th International Electrical Engineering Congress (IEECON)**, Chiang Mai, 1-4 (2020).
30. Çetin, S., "Bir fazlı bir indüksiyon ısıtma sistemi analizi ve dizaynı", Yüksek Lisans Tezi, **Pamukkale Üniversitesi Fen Bilimleri Enstitüsü**, Denizli, 4-60 (2005).
31. Kwon, Y. S., Yoo, S. B. and Hyun D. S., "Half-bridge series resonant inverter for induction heating applications with load-adaptive PFM control strategy", **APEC '99 Fourteenth Annual Applied Power Electronics Conference and Exposition 1999 Conference Proceedings**, Dallas, 575-581 (1999).
32. Baci, I. H., Taut, A., Pop, O. and Lungu, S., "Advanced simulation of load variation in induction heating systems", **2009 32nd International Spring Seminar on Electronics Technology**, Brno, 1-4 (2009).
33. Villar, I., Iruretagoyena, U., Cardenas, A. and Redondo, F., "Induction Application to Aircraft Ice Protection System", **2019 IEEE Energy Conversion Congress and Exposition (ECCE)**, Baltimore, 4201-4206 (2019).

34. Pop, O. A., "Analysis and simulation of quasi-resonant inverter for induction heating applications", *International Universities Power Engineering Conference (UPEC)*, Cluj, Napoca, 1-4 (2014).
35. Parida, N., Kumari, V., Bhaskar, D. V. and Maity, T., "Power control techniques used in high frequency induction heating applications", *International Conference on Circuits, Power and Computing Technologies*, Nagercoil, 1-6 (2015).
36. Kara, İ., "PLC-PDM kontrollü indüksiyon ısıtma sistemi", Yüksek Lisans Tezi, *Karabük Üniversitesi Fen Bilimleri Enstitüsü*, Karabük, 6-8 (2018).
37. Tezcan, Y., "Sıvılar için sıcaklık kontrollü bir indüksiyon ısıtma sistemi tasarımı", Yüksek Lisans Tezi, *Ege Üniversitesi Fen Bilimleri Enstitüsü*, İzmir, 4-10 (2019).
38. Yapıcı, A. T., "İndüksiyonla ısıtma sisteminin incelenmesi ve simülasyonu", Yüksek Lisans Tezi, *Kocaeli Üniversitesi Fen Bilimleri Enstitüsü*, Kocaeli, 3-6 (2018).
39. Yalçın, G., "Üç fazlı gerilim kaynaklı tam köprü paralel rezonans invertörlü indüksiyon ısıtma sistemi", Yüksek Lisans Tezi, *Marmara Üniversitesi Fen Bilimleri Enstitüsü*, İstanbul, 10-11 (2014).
40. Phadungthin, R. and Haema, J., "Full bridge resonant inverter for non-ferrous metal induction heating application", *2015 IEEE PES Asia-Pacific Power and Energy Engineering Conference*, Brisbane, Qrd, 1-4 (2015).
41. Hart, D. W., "Power Electronics", *McGraw-Hill*, New York, 1-3 (2011).
42. Rashid, M. H., "Inverters", Power Electronics Handbook, *Crc Press*, Florida, 25-45 (2002).
43. Çoruh, N., "Yumuşak anahtarlama sarmaşık tip DA-DA dönüştürücü tasarımı ve uygulaması", Doktora Tezi, *Kocaeli Üniversitesi Fen Bilimleri Enstitüsü*, Kocaeli, 1-20 (2013).
44. Yalçın, F., "Bir fazlı inverter tasarımı", Yüksek Lisans Tezi, *Sakarya Üniversitesi Fen Bilimleri Enstitüsü*, Sakarya, 2-3 (2009).
45. Doğanay, S. G., "Manyetik olmayan tencereleri ısıtabilen ev tipi endüksiyon ocak uygulaması", Yüksek Lisans Tezi, *İstanbul Teknik Üniversitesi Fen Bilimleri Enstitüsü*, İstanbul, 15-18 (2011).
46. Asa, E., "PLL kontrol tekniği ile rezonans evirici tasarımı", Yüksek Lisans Tezi, *Gazi Üniversitesi Fen Bilimleri Enstitüsü*, Ankara, 35-66 (2009).
47. Genç, F., "İnverterlerde yumuşak anahtarlama tekniklerinin incelenmesi ve bir uygulama devresinin gerçekleştirilmesi", Yüksek Lisans Tezi, *Yıldız Teknik Üniversitesi Fen Bilimleri Enstitüsü*, İstanbul 5-7 (2008).

48. Nacar, S., “Sayısal kontrollü yumuşak anahtarlama dc-dc güç dönüştürücü tasarımı ve uygulaması”, Yüksek Lisans Tezi, **Karabük Üniversitesi Fen Bilimleri Enstitüsü**, Karabük, 26-28 (2014).
49. Kalaycı, K., “İndüksiyonlu ocak için yüksek verimli rezonans evirici tasarımı”, Yüksek Lisans Tezi, **İstanbul Teknik Üniversitesi Fen Bilimleri Enstitüsü**, İstanbul, 19-20 (2014).
50. Çetin, E., “Sıfır akım anahtarlama tekniğinin ac besleme yapan bir fotovoltaik enerji dönüşüm sistemine uygulanması”, Yüksek Lisans Tezi, **Pamukkale Üniversitesi Fen Bilimleri Enstitüsü**, Denizli, 46-47 (2002).
51. Altıntaş, N., “Yumuşak anahtarlama dc-dc dönüştürücülerin incelenmesi”, Yüksek Lisans Tezi, **Yıldız Teknik Üniversitesi Fen Bilimleri Enstitüsü**, İstanbul, 11-12 (2007).
52. İşbilir, H., “Yüksek güçlü yumuşak anahtarlama tam köprü bir anahtarlama güç kaynağı uygulaması”, Yüksek Lisans tezi, **Yıldız Teknik Üniversitesi Fen Bilimleri Enstitüsü**, İstanbul, 27-28 (2005).
53. Kaya, N., “Rezonanslı endüksiyonla ısıtma devrelerinin incelenmesi ve bir uygulama devresinin gerçekleştirilmesi”, Yüksek Lisans Tezi, **Yıldız Teknik Üniversitesi Fen Bilimleri Enstitüsü**, İstanbul, 42-43 (2008).
54. Hassan, T. K. and Ali, E. A., “Power control of series-parallel resonant inverter for induction heating using buck converter”, **Eng. & Tech. Journal**, 28 (10): 1935-1959 (2010).
55. Ünal, K., “Rezonans eviricili endüksiyon ısıtıcının farklı yük koşullarında test edilmesi”, Yüksek Lisans Tezi, **Karabük Üniversitesi Fen Bilimleri Enstitüsü**, Karabük, 19-20 (2018).
56. Martis, J. and Vorel, P., “Apparatus for induction heating 2.5 kW using a series resonant circuit”, **Proceedings of the 16th International Conference on Mechatronics - Mechatronika**, Brno, 130-135 (2014).
57. Segura, G. M., “Induction heating converter’s design, control and modeling applied to continuous wire heating”, Ph. D. Thesis, **Department of Electrical Engineering Polytechnic University of Catalonia**, Catalonia, 123-126 (2012).
58. Prasad, V. and Sharma, C., “A review of phase locked loop”, **International Journal of Emerging Technology and Advanced Engineering**, 2 (6): 99-104 (2012).
59. Sevilmiş, F. and Karaca, H., “Performance analysis of SRF-PLL and DDSRF-PLL algorithms for grid interactive inverters”, **International Advanced Researches and Engineering Journal**, 03 (02): 116-122 (2019).

60. Hsieh, G. C. and Hung, J. C., "Phase-locked loop techniques-A survey", *IEEE Transactions on Industrial Electronics*, 43 (6): 609-615 (1996).
61. Harikrushna, D., Tiwari, M., Singh J. K. and Khare, A., "Design, implementation and characterization of xor phase detector for dpll in 45 nm cmos technology", *Advanced Computing: An International Journal (ACIJ)*, 2 (6): 45-57 (2011).
62. Internet: Texas Instruments, "7486 Datasheet", <https://www.ti.com/lit/ds/symlink/sn54s86.pdf?&ts=1589748174239> (1988).
63. Nguyen, V., Crebier J. and Jeannin, P., "Compact, isolated and simple to implement gate driver using high frequency transformer", *2011 Twenty-Sixth Annual IEEE Applied Power Electronics Conference and Exposition*, Fort Worth, TX, 1092-1098 (2011).
64. Internet: Vishay, "IRFP460 Datasheet", <http://www.vishay.com/docs/91237/91237.pdf> (2012).
65. Internet: Microchip, "PIC16F87X Datasheet", <http://ww1.microchip.com/downloads/en/DeviceDoc/30292D.pdf> (2013).
66. Duran, M. C., "100cr6 çeliğinden burç imalatında indüksiyonla yüzey sertleştirme uygulaması ve aşınma davranışının incelenmesi", Yüksek Lisans Tezi, *Balıkesir Üniversitesi Fen Bilimleri Enstitüsü*, Balıkesir, 46-50 (2016).

EK AÇIKLAMALAR A.

MİKRODENETLEYİCİ YAZILIMINDAN KESİT

```

#include <16f877.h>
#fuses HS, NOWDT, NOPROTECT, BROWNOUT, PUT, NOLVP
#use delay (clock=20000000)
void main ()
{
setup_ccp1(CCP_PWM);
setup_ccp2(CCP_PWM);
setup_timer_2(T2_DIV_BY_1,i,1);
set_pwm1_duty(a);
set_pwm2_duty(a);
setup_port_a(ALL_ANALOG);
setup_adc(ADC_CLOCK_INTERNAL);
set_adc_channel(0);
while(1)
{
delay_ms(200);
value=read_adc();
if (value>150)
{
set_pwm2_duty(a);
{
i=i-2;
a=a-1;
setup_timer_2(T2_DIV_BY_1,i,1);
set_pwm1_duty(a);
set_pwm2_duty(a);
}
}
}
}

```


ÖZGEÇMİŞ

Hüseyin Emre ÖZDEN 1989 yılında Ankara’da doğdu. 2007 yılında Ankara Türk Telekom Anadolu Teknik Lisesi elektronik bölümünden mezun oldu. 2011 yılında Selçuk Üniversitesi Elektronik Öğretmenliği, 2019 yılında Sakarya Üniversitesi Elektrik-Elektronik Mühendisliği bölümlerini bitirdi. 2014 yılından beri Milli Eğitim Bakanlığında teknik öğretmen olarak görev yapmaktadır.

E-posta: hemreozden@hotmail.com