

PLC İLE PLL KONTROLLÜ İNDÜKSİYON ISITMA UYGULAMASI

**2016
YÜKSEK LİSANS TEZİ
ELEKTRİK-ELEKTRONİK MÜHENDİSLİĞİ**

İsmail BOŞNAK

PLC İLE PLL KONTROLLÜ İNDÜKSİYON ISITMA UYGULAMASI

İsmail BOŞNAK

Karabük Üniversitesi

Fen Bilimleri Enstitüsü

Elektrik-Elektronik Mühendisliği Anabilim Dalında

Yüksek Lisans Tezi

Olarak Hazırlanmıştır

KARABÜK

Haziran 2016

İsmail BOŞNAK tarafından hazırlanan “PLC İLE PLL KONTROLLÜ İNDÜKSİYON ISITMA UYGULAMASI” başlıklı bu tezin Yüksek Lisans Tezi olarak uygun olduğunu onaylarım.

Yrd. 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. 02/06 /2016

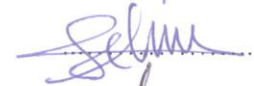
Ünvanı, Adı SOYADI (Kurumu)

İmzası

Başkan : Yrd. Doç Dr. Hüseyin ALTINKAYA (KBÜ)



Üye : Yrd. Doç Dr. Selim ÖNCÜ (KBÜ)



Üye : Doç Dr. Sinan KIVRAK (YBÜ)



29/06/2016

KBÜ Fen Bilimleri Enstitüsü Yönetim Kurulu, bu tez ile, Yüksek Lisans derecesini onamıştır.

Prof. Dr. Nevin AYTEMİZ
Fen Bilimleri 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.”

İsmail BOŞNAK

ÖZET

Yüksek Lisans Tezi

PLC İLE PLL KONTROLLÜ İNDÜKSİYON ISITMA UYGULAMASI

İsmail BOŞNAK

Karabük Üniversitesi

Fen Bilimleri Enstitüsü

Elektrik-Elektronik Mühendisliği Anabilim Dalı

Tez Danışmanı:

Yrd. Doç. Dr. Selim ÖNCÜ

Haziran 2016, 72 sayfa

Bu çalışmada demir-çelik endüstrisinde kullanılmak üzere Siemens S7 200 PLC ile faz kilitlemeli döngü (PLL) kontrollü indüksiyon ısıtma uygulaması yapılmıştır. Çalışma demir-çelik sektöründe, haddehanelerde demir kütüklerin ısıtılarak kesimi esnasında çapağın engellenmesini ve ürün kalitesinin artırılmasını amaçlamaktadır. Sunulan uygulamada yarım köprü seri rezonans evirici devresinin kontrolü Siemens S7 200 PLC ile gerçekleştirilmektedir. PLC denetleyicisinde PLL algoritması çalıştırılarak evirici akımı ve geriliminin faz takibi sağlanmıştır. Böylece farklı bobin veya değişik ebatlardaki iş parçaları yumuşak anahtarlama koşulları altında ısıtılması mümkün olmaktadır.

Yarım köprü seri rezonans eviricide yarı iletken güç anahtarı olarak MOSFET kullanılmaktadır. Evirici PLC'den elde edilen PWM sinyali ile kontrol edilmektedir. 220V AC gerilim ile beslenen ısıtıcı prototipinde 10-12 kHz çalışma frekansında

deneysel veriler elde edilmiştir. Farklı sıcaklıklarda yapılan kesim işlemlerine ilişkin deneysel veriler sunulmuştur.

Anahtar Kelimeler : İndüksiyon ısıtma, yarım köprü seri rezonans evirici, PLC, PLL, sıfır akım anahtarlama.

Bilim Kodu : 905.1.033



ABSTRACT

M. Sc. Thesis

PLL CONTROLLED INDUCTION HEATING APPLICATION WITH PLC

İsmail BOŞNAK

Karabük University

Graduate School of Natural and Applied Sciences

Department of Electric-Electronic Engineering

Thesis Advisor:

Assist. Prof. Dr. Selim ÖNCÜ

June 2016, 72 pages

In this study phase-locked loop (PLL) controlled induction heating with Siemens S7 200 PLC was carried out. The research aims to prevent burr during cutting of heated iron billet and enhance the production quality in iron steel industry and rolling mills. In the present application the control of half bridge series resonance inverter is achieved by Siemens S7 200 PLC. Inverter current and voltage phase tracking was maintained with PLL algorithm in PLC controller. Thus, it is possible to heat under the soft switching conditions with different coils at different sizes of workpieces.

MOSFET's are used as power switch in the half bridge series resonance inverter. Inverter is controlled with PWM signal which is generated from PLC. Experimental results are presented for 10-12 kHz induction heater prototype which is fed from 220 V AC mains. Experimental data related to the cutting operation performed at different temperatures are presented.

Key Words : Induction heating, half bridge series resonance inverter, PLC, PLL,
zero current switching.

Science Code : 905.1.033



TEŞEKKÜR

Bu tez çalıőmasının planlanmasında, araőtırılmasında, yűrűtűlmesinde ve oluőumunda ilgi ve desteęini esirgemeyen, engin bilgi ve tecrűbelerinden yararlandıęım, yűnlendirme ve bilgilendirmeleriyle çalıőmamı bilimsel temeller ıőıęında őekillendiren sayın hocam Yrd. Doç. Dr. Selim ŐNCŪ'ye sonsuz teőekkűrlerimi sunarım.

Çalıőmalarımnda maddi ve manevi desteklerini esirgemeyen eőim Emel'e oęlum Ahmet Oęuz'a ve kızım Ayőe Begűm'e teőekkűr ederim.

Deneysel malzemelerin temininde BAP projesi ile katkıda bulunan Karabűk Őniversitesine, eęitimim sűresince emeęi geçen hocalarıma, deneysel çalıőmalarda çalıőma fırsatı veren Bartın Mesleki ve Teknik Anadolu Lisesi yűnetimine, destek ve katkılarını esirgemeyen İlyas KARA'ya ve mesai arkadaşlarıma teőekkűr ederim.

İÇİNDEKİLER

	<u>Sayfa</u>
KABUL.....	ii
ÖZET.....	iv
ABSTRACT.....	vi
TEŞEKKÜR.....	viii
İÇİNDEKİLER	ix
ŞEKİLLER DİZİNİ.....	xii
ÇİZELGELER DİZİNİ	xiv
SİMGELER VE KISALTMALAR DİZİNİ	xv
BÖLÜM 1.....	1
GİRİŞ.....	1
BÖLÜM 2.....	3
İNDÜKSİYON ISITMA VE İNDÜKSİYON ISITMA GÜÇ KAYNAKLARI	3
2.1. İNDÜKSİYON ISITMA	3
2.1.1. İndüksiyon Isıtmanın Gelişimi	3
2.1.2. İndüksiyon Isıtma Teorisi.....	4
2.1.3. İndüksiyon Isıtıcı Elektrik Eşdeğer Devre Modeli.....	5
2.1.4. İndüksiyon Isıtma Tekniğinin Avantajları	6
2.1.5. İndüksiyon Isıtma Çalışma Prensipleri.....	7
2.1.6. İndüksiyon Isıtma Uygulama Alanları	8
2.1.7. İndüksiyon Isıtma Temel Kavramları.....	8
2.1.7.1. Deri Etkisi Ve Dalma Derinliği	9
2.1.7.2. Kalite Faktörü	10
2.2. İNDÜKSİYON ISITMA SİSTEMİ GÜÇ KAYNAKLARI.....	10
2.2.1. Eviriciler.....	10
2.2.2. Rezonans Eviriciler	11
2.2.3. Seri Rezonans Eviriciler	13

	<u>Sayfa</u>
2.2.4. D Sınıfı Seri Rezonans Evirici	14
2.2.4.1. Dalga Şekilleri.....	15
2.2.4.2. Rezonans Altında Çalışma ($f_a < f_r$).....	15
2.2.4.3. Rezonans Üstünde Çalışma ($f_a > f_r$)	16
BÖLÜM 3	18
D SINIFI SERİ REZONANS EVİRİCİ ANALİZ VE SİMÜLASYONU	18
3.1. D SINIFI SERİ REZONANS EVİRİCİ ANALİZİ	18
3.2. D SINIFI SERİ REZONANS EVİRİCİ ANALİZ SONUÇLARI.....	22
3.3. D SINIFI SERİ REZONANS EVİRİCİ SİMÜLASYONU	23
BÖLÜM 4	25
D SINIFI SERİ REZONANS EVİRİCİNİN PLC İLE PLL KONTROLÜ	25
4.1. D SINIFI SERİ REZONANS EVİRİCİ KONTROL YÖNTEMLERİ	25
4.2. FAZ KİLİTLEMELİ DÖNGÜ TEKNİĞİ (PLL).....	27
4.2.1. Faz Algılayıcı Devre (PD)	28
4.2.2. Filtre Devresi	29
4.2.3. Gerilim Kontrollü Osilatör (VCO)	29
4.2.4. İndüksiyon Isıtma Uygulamalarında PLL Tekniği	30
4.3. PLC VE UYGULAMA ALANLARI.....	31
4.3.1. PLC Sisteminin Temel Yapısı	32
4.3.2. D Sınıfı Seri Rezonans Evirici İçin Denetleyici	33
BÖLÜM 5	36
DENEYSEL ÇALIŞMALAR	36
5.1. PLC İLE PLL KONTROLLÜ D SINIFI SERİ REZONANS EVİRİCİ BÖLÜMLERİ	36
5.1.1. Doğrultucu	37
5.1.2. Evirici Sürücü Devre	37
5.1.3. Evirici Devre.....	40
5.1.4. Siemens S7 200 PLC	41
5.1.5. HMI.....	43

	<u>Sayfa</u>
5.1.6. Akım Sensörü	44
5.1.7. Rezonans Kondansatörü	44
5.1.8. Yüksek Frekans Transformatörü	44
5.1.9. İndüksiyon Bobini	45
5.2. PLC İLE PLL PROGRAMI VE ALGORİTMASI	46
5.3. İNDÜKSİYON ISITMA SİSTEMİNİN PLC İLE PLL KONTROLLÜ ÇALIŞMASI.....	50
5.4. DENEYSEL SONUÇLAR.....	54
5.5. DENEYSEL SONUÇLARIN SİMÜLASYON VE ANALİZ SONUÇLARI İLE KARŞILAŞTIRILMASI.....	57
5.6. SİSTEMİN GENEL GÖRÜNÜMÜ	57
5.7. İŞ PARÇASININ KESİLMESİ.....	58
BÖLÜM 6	61
SONUÇ VE ÖNERİLER	61
KAYNAKLAR	63
EK AÇIKLAMALAR A. DARBE GENİŞLİĞİ MODÜLASYONU VE MİCRO/WIN EKCRAN ALINTISI.....	70
ÖZGEÇMİŞ	72

ŞEKİLLER DİZİNİ

Sayfa

Şekil 2.1.	İndüksiyon ısıtma sistemi.....	4
Şekil 2.2.	Transformatör ve sekonderi kısa devre indüksiyon ısıtma eşdeğer devresi.	4
Şekil 2.3.	İndüksiyon bobini ve iş parçasının seri modeli.	5
Şekil 2.4.	Elektromanyetik indüksiyonun oluşumu.....	7
Şekil 2.5.	Deri etkisi ve dalma derinliği.	9
Şekil 2.6.	Seri ve paralel rezonans devre.....	12
Şekil 2.7.	Seri devrede rezonans frekansına göre yük akımı.....	13
Şekil 2.8.	D Sınıfı seri rezonans evirici.....	15
Şekil 2.9.	D Sınıfı seri rezonans evirici $f_a < f_r$ dalga şekilleri.	16
Şekil 2.10.	D Sınıfı seri rezonans evirici $f_a > f_r$ dalga şekilleri.	17
Şekil 3.1.	$f_a > f_r$ Durumunda seri rezonans devresi bobin akımı.....	18
Şekil 3.2.	D sınıfı seri rezonans evirici çalışma durumları.....	19
Şekil 3.3.	Mathcad hesapları sonucunda alınan i_L akım grafiği.	22
Şekil 3.4.	PSpice simülasyon devresi.	23
Şekil 3.5.	D sınıfı seri rezonans evirici simülasyon sonuçları.....	23
Şekil 4.1.	PLL blok diyagramı.	27
Şekil 4.2.	XOR faz algılayıcı ve örnek XOR çıkış sinyalleri (faz farkı 0-%50-%100).....	28
Şekil 4.3.	Filtre devresi.....	29
Şekil 4.4.	PLC blok şeması.....	32
Şekil 4.5.	PLC tarama döngüsü.	33
Şekil 5.1.	PLC ile PLL kontrollü indüksiyon ısıtma sistemi blok diyagramı.....	36
Şekil 5.2.	Doğrultucu.....	37
Şekil 5.3.	Tersleyici ve ölü zaman devresi.	38
Şekil 5.4.	Terleyici ve ölü zaman devresi PCB görüntüsü.	38
Şekil 5.5.	İzoleli MOSFET sürücü devre.	39
Şekil 5.6.	MOSFET sürücü giriş ve çıkış sinyali.	39
Şekil 5.7.	Alt ve üst MOSFET tetikleme sinyalleri.....	40

Sayfa

Şekil 5.8. D sınıfı evirici devresi.....	40
Şekil 5.9. HMI ve PLC evirici kontrol ünitesi.....	41
Şekil 5.10. PWM giriş sinyali ve sürücü çıkış sinyalleri (-- PLC çıkışındaki PWM, -- Sürücü çıkışı HO -- Sürücü çıkışı LO).....	43
Şekil 5.11. Yüksek frekans transformatörü.....	44
Şekil 5.12. İndüksiyon bobinleri.....	45
Şekil 5.13. Uygulama için tasarlanmış indüksiyon bobini.....	46
Şekil 5.14. PLC PLL algoritması.....	47
Şekil 5.15. PLC’de PLL programı.....	48
Şekil 5.15. (Devam ediyor).....	49
Şekil 5.16. PLC ile PLL kontrollü indüksiyon ısıtma sistemi.....	51
Şekil 5.17. PLC ile PLL kontrollü indüksiyon ısıtma sisteminin çalışması, anahtarlama ve devre akımı test sinyalleri ($CH1 = 5 V/div$, $CH2 = 2 A/div$).....	51
Şekil 5.18. $f_a \gg f_r$ ($f_a = 15 kHz$, $I_{max} = 2,4 A$).....	52
Şekil 5.19. $f_a > f_r$ çalışma durumu.....	52
Şekil 5.20. $f_a = f_r$ ($f_a = 10,8 kHz$).....	53
Şekil 5.21. $f_a < f_r$ ($f_a = 10 kHz$).....	53
Şekil 5.22. $f_a > f_r$ ($f_a = 11 kHz$).....	54
Şekil 5.23. PLC ile PLL kontrollü indüksiyon ısıtma sistemi YFT primer akımı ($CH1 = 5 V/div$, $CH2 = 2 A/div$).....	55
Şekil 5.24. YFT primer ve sekonder akımları.....	55
Şekil 5.25. Alt MOSFET $D - S$ arasındaki gerilim ve I_{Lpm} dalga formları($CH1 = 50 V/div$, $CH2 = 2 A/div$).....	56
Şekil 5.26. Deneysel çalışmalarda ulaşılan sıcaklıklar.....	56
Şekil 5.27. Sistemin genel görünümü.....	58
Şekil Ek A.1. PLC ile Darbe Genişliği Modülasyonu (PWM).....	71
Şekil Ek A.2. STEP 7-Micro/WIN ekran alıntısı.....	71

ÇİZELGELER DİZİNİ

	<u>Sayfa</u>
Çizelge 3.1. $fa = fr$ için Mathcad hesaplama sonuçları.	22
Çizelge 3.2. $fa = fr$ için Pspice simülasyon sonuçları.	24
Çizelge 4.1. XOR doğruluk tablosu.	29
Çizelge 5.1. Deneysel çalışmalarda alınan değerler.	56
Çizelge 5.2. Verilerin karşılaştırılması.	57
Çizelge 5.3. İş parçası kesim deney sonuçları.	59

SİMGELER VE KISALTMALAR DİZİNİ

SİMGELER

I_p	: Primer akımı
I_s	: Sekonder akımı
N_p	: Primer sarım sayısı
N_s	: Sekonder sarım sayısı
S	: Görünür güç
I	: Akımı
Z_e	: Eşdeğer empedans
R_e	: Eşdeğer direnç
V	: Gerilim
μ_r	: Bağıl manyetik geçirgenlik
μ_0	: Boşluğun manyetik geçirgenliği
N	: Sarım sayısı
ϕ	: Manyetik akı
P	: Aktif güç
i	: Akım
R	: Direnç
σ	: Elektriksel iletkenlik
ρ	: Elektriksel özdirenç
l	: Akım taşıyan iletkenin boyu
a	: Akım taşıyan iletkenin kesiti
i_0	: İş parçasının yüzeyindeki akı yoğunluğu
δ	: Dalma derinliği
Q	: Kalite faktörü
L	: Endüktans
C	: Kapasite
f_a	: Anahtarlama (çalışma) frekansı

f_r	: Rezonans frekansı
i_L	: Bobin akımı
I_{Lm}	: Bobin akımının tepe değeri
ω_a	: Anahtarlama açısal hızı
ω_r	: Rezonans açısal hızı
ψ	: Akım ile gerilim arasındaki faz açısı

KISALTMALAR

AC	: Alternative Current (Alternatif Akım)
SCR	: Silicon Controlled Rectifier (Yarı İletken Kontrollü Doğrultucu)
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)
DC	: Direct Current (Doğru Akım)
PLL	: Phase Locked Loop (Faz Kilitlemeli Döngü)
VCO	: Voltage-Controlled Oscillator (Gerilim Kontrollü Osilatör)
PLC	: Programmable Logic Controller (Programlanabilir Lojik Kontrolör)
PWM	: Pulse-Width Modulation (Darbe Genişlik Modülasyonu)
HMI	: Human Machine Interface (İnsan-Makine Arayüzü)
VSI	: Voltage Source İverter (Gerilim Kaynaklı Evirici)
CSI	: Current Source İverter (Akım Kaynaklı Evirici)
DSP	: Digital Signal Processor (Sayısal Sinyal İşlemci)
SRI	: Series Resonant Inverter (Seri Rezonans Evirici)
PRI	: Parallel Resonant İverter (Paralel Rezonans Evirici)
PD	: Phase Detector (Faz Algılayıcı Devre)
LPF	: Low Pass Filter (Alçak Geçiren Filtre)
ADC	: Analog to Digital Converter (Analog-Dijital Dönüştürücü)
DAC	: Digital to Analog Converter (Dijital-Analog Dönüştürücü)
YFT	: Yüksek Frekans Transformatörü

BÖLÜM 1

GİRİŞ

İndüksiyon ısıtma, elektromanyetik indüksiyon yoluyla ferromanyetik parçaya güç aktarılması ve bu gücün ısı şeklinde açığa çıkması veya değişken elektromanyetik alan etkisinde bulunan iletken malzeme üzerinde meydana gelen enerji kayıpları nedeniyle ortaya çıkan ısı olarak tanımlanmaktadır [1,2]. İndüksiyon ısıtmanın diğer ısıtma uygulamalarına göre ısıtma işleminin hızlı başlatılması, çabuk ısıtma, enerji tasarrufu ve daha yüksek üretim oranları gibi pek çok avantajı vardır [3]. Son yıllarda özel güç kaynaklarının da geliştirilmesi ve bu gelişimin sağladığı denetim ve maliyet gibi avantajların ortaya çıkması ile indüksiyon ısıtma uygulamaları endüstriyel veya ticari olarak birçok alanda çok yaygın olarak kullanılmaktadır.

İndüksiyon ısıtma uygulamaları literatürde metallerde yüzey ısıtma, indüksiyon ocakları, mutfak tipi indüksiyon ısıtma sistemleri, yüksek güç ve frekansta indüksiyonla ısıtma, indüksiyon prensibi ile çalışan sıvı ısıtma sistemi gibi birçok farklı alanda gerçekleştirilmiştir [1,4-7].

İndüksiyon ısıtma sistemlerinde güç kaynağı olarak doğru akım veya gerilim kaynağından aldığı gücü, değişik frekans ve gerilim değerlerinde alternatif akıma çeviren eviriciler kullanılmaktadır. Yarım köprü ve tam köprü eviriciler indüksiyon ısıtma sistemlerinde sık kullanılan evirici çeşitlerindedir. Bu eviricilerde frekans veya görev oranı kontrolü ile güç kontrolü yapılmaktadır. Yarım köprü seri rezonans eviriciler D sınıfı evirici olarak ifade edilmektedir. Bu güç kaynakları geçmişte, kendinden tetiklemeli indüksiyon ısıtıcı tasarımı ve uygulaması, düşük güç indüksiyon ısıtma sisteminin tasarımı, rezonans güç dönüştürücü ile çalışan indüksiyon ısıtma sistemi ve güç ölçümü vb. uygulamalarda kullanılmıştır [8-10].

Evirici kontrolü için kullanılan yöntemlerden biri de faz kilitlemeli döngü (Phase Locked Loop-PLL) tekniğidir. PLL, esas olarak kapalı döngülü bir frekans kontrol sistemidir; periyodik çıkış sinyali ile periyodik bir giriş sinyalini senkronize eden bir devredir. Literatürde, 50-150 kHz half bridge rezonans tipi evirici faz kilitlemeli döngü kontrolü, FPGA tabanlı tüm dijital çalışma induksiyon ısıtma güç kaynağı PLL kontrollü gerçekleştirilmiştir [11,12]. İndüksiyon ocaklarının güç kaynaklarında kullanılan eviricilerin programlanabilir lojik kontrolör (PLC) ile PI denetimi gibi uygulamalar da literatürde bulunmaktadır [13].

Bu tez çalışmasında Siemens S7 200 224 XP modeli PLC kullanılarak PLL kontrollü induksiyon ısıtma uygulaması gerçekleştirilmiştir. PLC, PLL yazılımı ve analog girişinden aldığı akım sinyaline göre D sınıfı seri rezonans evirici için değişken frekanslı PWM sinyali üretir. Tasarlanan kontrol algoritması rezonans frekansı yakalandığında frekans değişimini durdurur. Ayrıca kullanılan HMI panel sistemin çalışması ve durdurulması, referans periyod değerinin girilmesine ve anlık frekansın izlenmesine olanak sağlamaktadır.

Tez çalışması kapsamında tasarlanan PLC ile PLL kontrollü induksiyon ısıtıcı demir kütüklerin kesilmesi için gerekli ön ısıtıcı sisteme uygulanmıştır. Bu amaçla profil veya kütük şeklindeki demir ısıtılarak değişik sıcaklıklarda kesim testleri yapılmış, sıcaklığın kesime etkisi incelenmiştir.

BÖLÜM 2

İNDÜKSİYON ISITMA VE İNDÜKSİYON ISITMA GÜÇ KAYNAKLARI

2.1. İNDÜKSİYON ISITMA

2.1.1. İndüksiyon Isıtmanın Gelişimi

Faraday'ın elektromanyetik indüksiyonu keşfi elektrik motorları, jeneratörler, transformatörler, indüksiyon ısıtma ve kablosuz iletişim aygıtları gibi teknolojilerin geliştirilmesine yol açmıştır.

İndüksiyon ısıtma ile ısıl işlemlerin gelişimini hızlandıran ve uygulama çeşitliliği kazandıran bir diğer süreç, otomotiv endüstrisinin gelişimi ile olmuştur [14]. Bu gelişmeyi yarı iletken teknolojisindeki yenilikler de destekleyerek, indüksiyon ısıtma için daha küçük boyutlarda, daha yüksek verimli ve geniş denetim aralığına sahip güç kaynaklarının üretimi sağlanmıştır. Güç kaynağı ile ilgili problemlerin azaltılması, indüksiyon ısıtmanın uygulama alanlarını arttırmıştır [15].

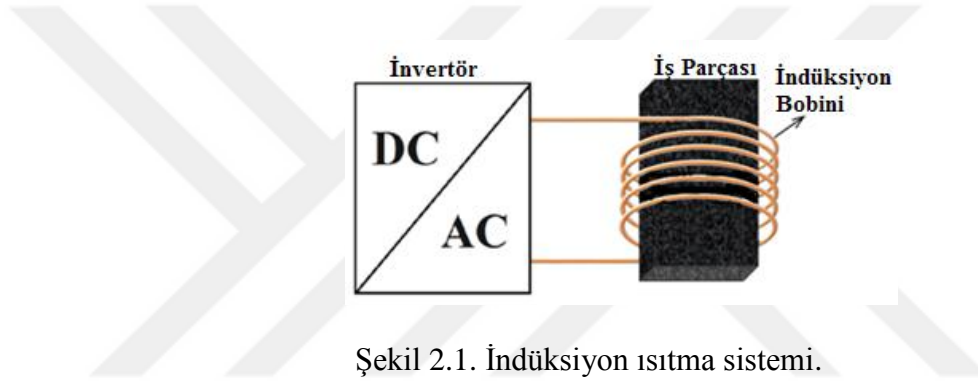
Endüstriyel uygulamalarda güç diyotu, SCR, GTO, BJT, MOSFET, IGBT gibi güç anahtarları kullanılmaktadır [16]. Günümüzde indüksiyon ısıtma uygulamaları için dönüştürücü olarak yarı iletken teknolojisine dayanan, orta güç ve yüksek frekanslı uygulamalar, IGBT ve MOSFET anahtarlama elemanları kullanarak gerçekleştirilmektedir [17].

İndüksiyon ısıtma, değişik frekans aralıklarında, iş parçasının işlenmesi, eritilmesi fiziksel özelliklerinin değiştirilerek şekil verilmesi, malzemenin yüzeylerinin ısıtılması, sertleştirilmesi gibi farklı uygulama alanlarına sahiptir [18]. Ülkemizde indüksiyon ısıtmaya olan ilgi, 1980'li yıllardan sonra indüksiyon ocaklarının üretimi ile başlamıştır [13].

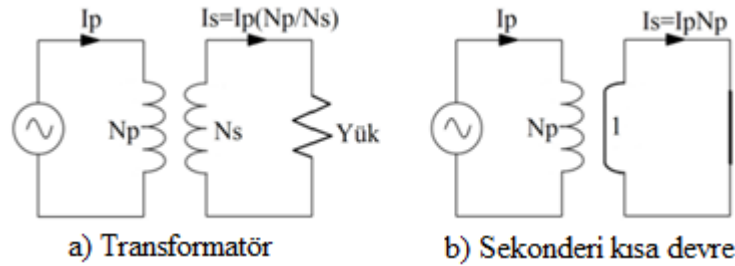
2.1.2. İndüksiyon Isıtma Teorisi

Alternatif akımda indüksiyon bobini yönü zamanla değişen bir manyetik alan meydana getirir ve direnç kayıpları nedeniyle metalik iş parçasında indüklenen indüksiyon akımı etkili bir ısı üretir [19]. Birçok uygulamada iş parçaları, şekli silindirik olan tek veya çok turlu bobin içine yerleştirilerek ısıtılmaktadır.

İndüksiyon ısıtma sistemi; indüksiyon bobini, ısıtılacak malzeme (iş parçası) ve alternatif akım güç kaynağı olmak üzere üç kısımdan oluşur [8]. Şekil 2.1’de indüksiyon ısıtma sistemini oluşturan kısımlar görülmektedir.



Üzerinden alternatif akım geçen indüksiyon bobini ile iş parçasının manyetik etkileşimi sonucunda ısıtma işlemi gerçekleşir. Bu özelliği sebebiyle indüksiyon ısıtma sistemi temel teorisi sekonderi kısa devre edilmiş bir transformatöre benzetilebilir. Bu benzetime göre indüksiyon bobini Şekil 2.2’de görülen transformatörün primer sargısı, iş parçası ise transformatörün kısa devre edilmiş sekonder sargısıdır. İndüksiyon bobinden geçecek olan akımın frekansı ve şiddeti iş parçası akımını da etkilediğinden, ısıtma tipini ve süresini belirlemektedir.



Şekil 2.2. Transformatör ve sekonderi kısa devre indüksiyon ısıtma eşdeğer devresi.

Sekonder akımı (I_s) Eşitlik 2.1 kullanılarak bulunabilir.

$$I_s = I_p \frac{N_p}{N_s} \quad (2.1)$$

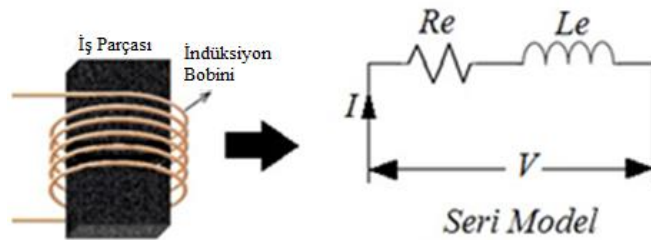
Burada; I_p primer akımı, N_p primer sarım sayısı, N_s sekonder sarım sayısıdır. Şekil 2.2 (b) sekonderi kısa devre edilmiş transformatör gibi düşünüldüğünde

$$I_s = I_p N_p \quad (2.2)$$

Akım yükselir ve ideal bir kaynaktan çekilen gücün tamamı iş parçasına aktarılır. İş parçasına aktarılan güç, $I^2 R$ ısı kaybı olarak ortaya çıkar. Bu ısı kaybı da indüksiyon ile ısıtmayı sağlamaktadır [20].

2.1.3. İndüksiyon Isıtıcı Elektrik Eşdeğer Devre Modeli

İndüksiyon ısıtma sisteminde indüksiyon bobini ve iş parçası genellikle bobin ve direnç ile modellenmektedir. Bobin ve iş parçası elektriksel modelde eşdeğer endüktansı (L_e), eşdeğer direnç (R_e) şeklinde modellenmektedir (Şekil 2.3) [21]. Eşdeğer direnç, indüksiyon bobinin iç direncini ve iş parçasının direncini temsil eder. R_e ve L_e değerleri bobinin şekli, yük ile bobin arasındaki mesafe, yükün boyutları, malzemenin cinsi ve çalışma frekansı gibi parametrelere bağlıdır [22].



Şekil 2.3. İndüksiyon bobini ve iş parçasının seri modeli.

2.1.4. İndüksiyon Isıtma Tekniğinin Avantajları

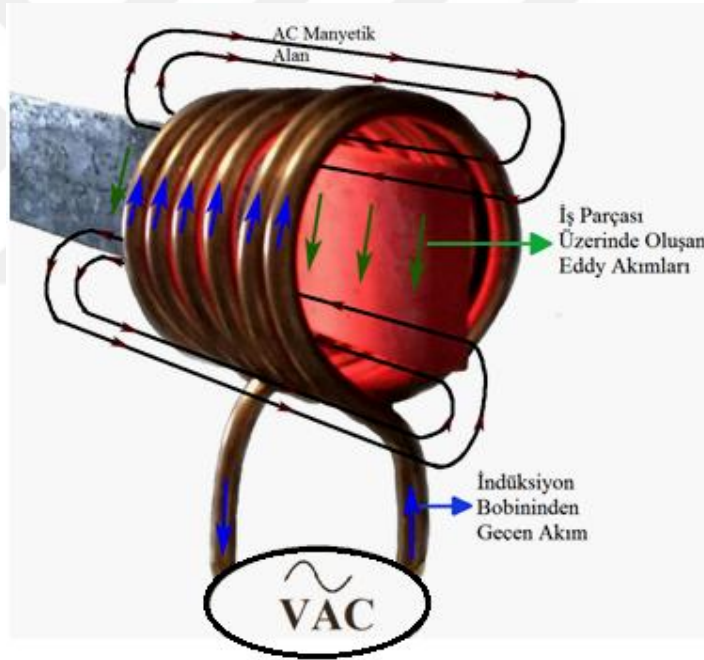
Günümüzde yarı iletken teknolojisinin gelişmesi ile indüksiyon ısıtma sistemlerinin teknolojisi de gelişmiş, elektriksel ısıtma sistemleri (rezistansla ısıtma, lazerle ısıtma, elektrik arkı ile ısıtma, vb.) ve doğal kaynakların kullanıldığı ısıtma sistemleri (katı, sıvı, gaz yakıtlarla ısıtma) arasında ön sıralarda yer almaya başlamıştır. İndüksiyon ısıtma, diğer ısı kaynaklarının birçoğundan daha çevre dostu, doğal enerji ve daha verimlidir. Isıya maruz kalmanın hatırı sayılır bir oranda azaltılması da çevresel korumaya katkıda bulunur [23]. Bu teknolojinin diğer avantajları da şu şekilde sıralanabilir.

1. İş parçasını ısıtma süresi çok kısadır. Enerji tasarrufu sağlar. Elektrik akımının kontrolü daha kolaydır [24].
2. Bütün parçayı ısıtmak yerine bölgesel ısıtma yapılabilir.
3. Sıcaklığı sürekli koruma zorunluluğu yoktur, güç sadece gerektiğinde kullanılır.
4. Katı, sıvı ve gaz halindeki yakıtların kullanıldığı ısıtma sistemlerine kıyasla çevreye ısı dağılımı azdır. Sistem çevresi çalışma alanı olarak kullanılabilir.
5. Katı, sıvı ve gaz halindeki yakıtlar gibi çevre kirliliği meydana getirmez, atık bırakmaz. Bu nedenle baca, filtre, havalandırma gibi ekstra donanım gereksinimi azdır.
6. İşlem süresinin kısa olması sebebiyle endüstriyel otomasyona elverişlidir [20].
7. İş parçasına teması yoktur.
8. Farklı şekil ve boyutlardaki iş parçalarının ısıtılması için uygun bobin seçenekleri ile kolayca yapılabilir.
9. Geleneksel ısıtma yöntemlerine göre, kuruluş masrafları düşüktür, tesis kurulumu kolaydır ve daha az yer kaplamaktadır [25].

Ayrıca, indüksiyonla ısıtma, katma değerli ürünler üretmek için uygun bir ısıtma yöntemi olup, yüksek performanslı ısı kontrolü için yüksek bir potansiyele sahiptir [26].

2.1.5. İndüksiyon Isıtma Çalışma Prensibi

İndüksiyon ısıtma, prensip olarak elektrik akımının elektromanyetik etkisinin ısı olarak ortaya çıkmasına dayanır. Buna göre elektromanyetik indüksiyonun oluşumu Şekil 2.4’de görülmektedir. Klasik ısıtma yöntemlerinde ısı, malzemeye dış yüzeyinden verilirken, indüksiyon ile ısıtmada ise ısı, malzemenin kendi içindeki indüksiyon ile elde edilir. Metal içinde kutupların hızlı yön değiştirmeye çalışması sonucu, histerezis etkisinin metal malzeme üzerinde ısınmaya katkısı söz konusudur [27]. Ancak histerezis etkisi eddy akımlarının oluşturduğu etkinin yanında çok küçük olduğu için ihmal edilebilir [20]. İndüksiyon ısıtma uygulamalarının çoğunda, histerezis kayıpları, eddy akımı kayıplarının %7’sinden daha azdır [28].



Şekil 2.4. Elektromanyetik indüksiyonun oluşumu.

Şekil 2.4’ deki bobinden alternatif akım geçtiğinde, bobin etrafında oluşan manyetik akı iş parçasının manyetik geçirgenliği ile orantılı olarak iş parçasını da keser. Manyetik geçirgenlik arttıkça iş parçası üzerindeki manyetik akı yoğunluğu da artar. Bağıl manyetik geçirgenlik (μ_r), bir iletken malzemenin boşluğun geçirgenliğine (μ_0) oranla manyetik akıyı iletme yeteneği olarak adlandırılır ve birimi yoktur [28]. Eşitlik 2.3’ deki gibi ifade edilir.

$$\mu = \mu_r \mu_0 \quad (2.3)$$

İndüklenen gerilim ve sonucundaki eddy akımlarının (I) etkisi ile parça üzerine güç aktarılmış olur (Eşitlik 2.4).

$$P = I^2 R \quad (2.4)$$

Burada R ısıtılacak malzemenin elektriksel direncidir (ohm), iş parçasının elektriksel öz direncine ve manyetik geçirgenliğine bağlıdır [29].

2.1.6. İndüksiyon Isıtma Uygulama Alanları

İndüksiyon ısıtma tekniği, ferromanyetik olan veya olmayan tüm metallerin ısıtılması, tavlama, eritilmesi, haddelenmesi, kaynak veya lehim yapılması, sertleştirilmesi gibi birçok işlemi gerçekleştirmek için kullanılmaktadır [30]. Ancak indüksiyon ısıtma tekniğinin uygulama alanları yalnızca ısıtılacak malzemenin metal olduğu durumlar ile kısıtlı değildir [31]. Diğer kullanım alanları da şu şekildedir.

1. Isı transferinden yararlanılarak, gıda endüstrisinde gıdaların ısıtılması veya pişirilmesi, evlerde kaplarının ısıtılarak yemek pişirilmesi [31].
2. Sıcak su elde edilmesi [7].
3. Süper ısıtılmış buhar üretilmesi, gazların ısıtılması [32].
4. Boya kurutması, lazer yazıcı ve fotokopi makineleri [33].
5. Süt, ayran, motor yağı şişeleri gibi ürünlerin sızdırmaz ambalajlanması,
6. Boru bükme ve tavlama vb.
7. Sarraflıkta metal eritme (altın, gümüş, pirinç vb...) gibi uygulamalarda da indüksiyon ısıtmadan faydalanılmaktadır.

2.1.7. İndüksiyon Isıtma Temel Kavramları

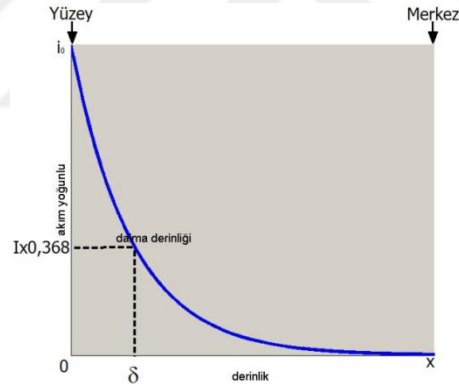
İndüksiyon ısıtma; elektromanyetik indüksiyon, deri etkisi ve ısı transferinden oluşan üç temel kavramı kapsamaktadır [34]. İndüksiyon uygulamasına göre bobin,

ısıtılacak malzemenin cinsi ve şekli, çalışma frekansı, çıkış gücü, evirici devre vb. farklılık gösterse de, indüksiyon ısıtmada kullanılan temel kavramlar şu şekildedir.

2.1.7.1. Deri Etkisi Ve Dalma Derinliği

Dalma derinliği, malzeme üzerinde meydana gelen eddy akımlarının, malzeme yüzeyinden itibaren erişebileceği derinliktir. İş parçasına işleyen manyetik alanın şiddeti, dolayısıyla eddy akımlarının genliği, deri etkisi nedeniyle yüzeyden merkeze doğru gidildiğinde Şekil 2.5’ de görüldüğü gibi göre üstel olarak azalmaktadır [35,36]. Dalma derinliği frekansa, malzemenin öz direncine ve manyetik geçirgenliğine bağlı olarak değişir ve Eşitlik 2.5 ile edilir.

$$\delta = 503 \sqrt{\frac{\rho}{\mu_r f}} \quad (2.5)$$



Şekil 2.5. Deri etkisi ve dalma derinliği.

Şekil 2.5’ deki grafiğe göre deri etkisi sebebiyle yüzeyden merkeze doğru azalan akım yoğunluğunun, yüzeydeki değerinin %36,8’ine düştüğü değer dalma derinliğidir [28]. Çalışma frekansı ile dalma derinliği değiştirilebilir; frekansı yükselterek iş parçasının yüzeyinde ısı üretmek mümkündür [32].

2.1.7.2. Kalite Faktörü

Kalite Faktörü, yüklü indüksiyon bobininin endüktansı ve direnci arasındaki orantıyı belirten bir katsayıdır. İndüksiyon ısıtma sistemlerinde manyetik yükler için 3-10, manyetik olmayan yükler için 10-15 arasında değer almaktadır [37]. Yükün kalite faktörü yeterince yüksek ise, indüksiyon bobininden geçen akım yaklaşık olarak sinüzoidaldir [32]. Eşitlik 2.6 ile bulunmaktadır.

$$Q = \frac{\omega L}{R} \quad (2.6)$$

2.2. İNDÜKSİYON ISITMA SİSTEMİ GÜÇ KAYNAKLARI

Güç elektroniği, günümüzde endüstriyel ve ticari olarak tıp, enerji iletim ve dağıtım, haberleşme, motor sürücüleri, kontrol sistemleri gibi birçok alanda, farklı güçlerde yaygın olarak kullanılmaktadır [38]. Güç elektroniği içeren sistemlerin kullanıldığı cihazlar küçük hacim, sessiz çalışma, yüksek verim, düşük maliyet, tasarım kolaylığı gibi avantajlar sağlamaktadır. Bu sistemlerin önemli kısımlarından birisini güç dönüştürücü devre, diğerini ise kontrol devresi oluşturmaktadır. Güç elektroniği sistemlerinin birçoğunda AC/DC doğrultucu, DC/DC konvertör, AC/AC konvertör, DC/AC evirici gibi güç dönüştürücüler yer almaktadır [20]. İndüksiyon ısıtma sistemlerinde güç kaynağı olarak doğru akım kaynağından aldığı gücü, değişik frekans ve gerilim değerlerinde alternatif akıma çeviren eviriciler kullanılmaktadır.

2.2.1. Eviriciler

Eviriciler (DC/AC), endüstriyel uygulamalar için geçmişten günümüze gelişen güç elektroniği devresi uygulamasıdır. Eskiden DC/AC güç kaynaklarında akım kesiciler yaygın olarak kullanılırken son yıllarda endüstriyel uygulamalarda DC/AC eviriciler kullanılmaktadır. Yarı iletken teknolojisinin gelişimi ile iki kutuplu jonksiyon transistör (BJT), yalıtılmış kapılı iki kutuplu transistör (IGBT), metal oksit yarı iletken alan etkili transistör (MOSFET) gibi güç elemanlarının kullanımı ve yüksek

anahtarlama frekansında çalışan DC/AC güç kaynaklarının kullanımı yaygınlaşmıştır.

MOSFET'ler gerilim kontrollü elemanlar olup, yeterli bir kapı geriliminde anahtar sürekli iletimdedir ve kapı gerilimi eşik geriliminden düşük olduğu durumlarda yalıtımdadır. Eleman tiplerine bağlı olarak 5 - 20 MHz'e kadar frekans aralıklarında değişen anahtarlama hızları çok yüksektir [16]. Düşük akım değerlerinde 1000 V'a kadar gerilimlerde çalışabildikleri gibi 20 V gibi düşük gerilim değerlerinde ise 180 A'e kadar akım taşıyabilme kapasiteleri vardır. Anahtarlama hızları yüksek olduğu için anahtarlama kayıpları da küçüktür.

Eviriciler, UPS, motor kontrolü, kaynak makineleri, indüksiyon ısıtma sistemleri, elektronik balast gibi uygulamalarda kullanılmaktadır. Bir veya üç fazlı olarak PWM ve rezonans eviriciler bulunmaktadır.

DC/AC eviriciler gerilim kaynaklı ve akım kaynaklı olmak üzere iki şekilde kullanılmaktadır. Her iki kaynakta giriş kaynak referanslarına göre çıkışta dalgalı gerilim veya akım üretilmesini sağlamaktadır. İndüksiyon bobini için gerekli alternatif akım genellikle DC/AC rezonans eviriciler ile gerçekleştirilmektedir [8].

2.2.2. Rezonans Eviriciler

Rezonans dönüştürücü DC sistemi bir AC sisteme veya başka bir DC sisteme bağlamak ve bunlar arasındaki güç aktarımını yapmak için kullanılan seri veya paralel RLC devre içeren DC/AC güç dönüştürücüleridir. Uygulama alanları indüksiyon ısıtma, lazer kesme makineleri için güç kaynakları, yüksek frekanslı DC-DC güç kaynakları, sonar vericileri, elektronik balastlar, ultrasonik jeneratörler vb. gibidir [39]. İndüksiyon ısıtma sistemlerinde rezonans evirici, yüklü indüksiyon bobinine seri veya paralel kondansatör eklenerek elde edilir.

Güç dönüştürücülerin anahtarlama kaybı çalışma frekansı ile doğrusal değişmektedir. Bu durumda çalışma frekansının belirli bir değerin üzerine çıkmasına manidir. Bir diğer olumsuzluk ise anahtarlama esnasında oluşan di/dt ve dv/dt nedeniyle

yüksek elektromanyetik parazit meydana gelmesidir. Eğilimler dönüştürücülerin boyut ve ağırlıkların küçülmesi yönündedir [40]. Bu da ifade edilen sakıncaların baskısını arttırmaktadır [39].

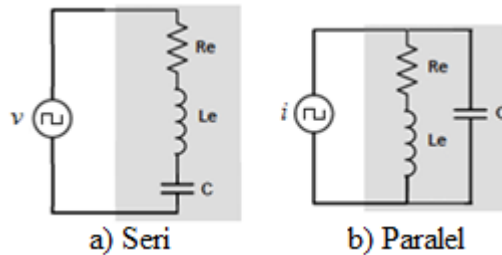
Rezonans evirici kullanırken söz konusu sakıncaların azaltılması mümkündür. Bu amaçla;

1. Kare dalga şeklinde oluşturulan akım veya gerilim darbeleri ile bir L-C rezonans devresinin rezonans frekansına yakın anahtarlama frekansı kullanılır.
2. Anahtarlama elemanları iletimden yalıtıma veya yalıtımdan iletime geçerken, anahtar akımının veya geriliminin sıfır anlarında anahtarlama yapılır.

Böylece anahtarlama frekansının değiştirilmesi ile çıkış gerilimi ve gücü kontrolü yapılabilmektedir. Ayrıca yüksek frekanslarda da verimli çalışma olanağı sağlanmaktadır [20].

Literatürde dönüştürücüler sert ve yumuşak anahtarlama dönüştürücüler olarak ifade edilmektedir [41]. Rezonans dönüştürücüler, anahtarlama kayıpları minimize edilerek enerji dönüşümündeki verimin yükselmesini sağlamaktadır.

Yüklü indüksiyon bobininin güç katsayısı düşüktür. Düşük güç katsayısını kompanse etmek ve devreden sinüsoidale yakın akım geçirmek için bobine seri veya paralel bir kondansatör bağlanır (Şekil 2.6). Seri bağlantıda devre bir gerilim kaynağı tarafından beslenmektedir. Her iki devrede, L-C rezonansı sayesinde güç kaynağından yüke güç iletimi sırasında evirici kayıpları azalır [42,43].

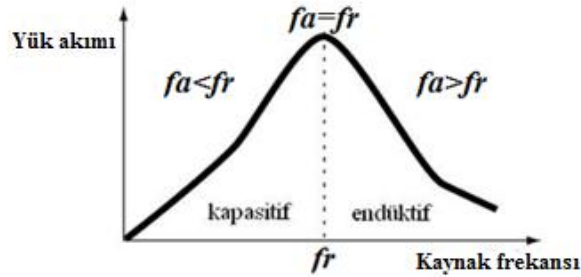


Şekil 2.6. Seri ve paralel rezonans devre.

İndüksiyon ısıtma sistemlerinde dönüştürücüler seri ve paralel rezonans devre türüne göre sınıflandırılarak, gerilim beslemeli seri rezonans evirici (VSI) ve akım beslemeli paralel rezonans evirici (CSI) olarak ifade edilmektedir [17]. İndüksiyon ısıtma sistemleri için yüksek frekanslı güç dönüşümünün gerçekleştirilebilmesi için genellikle yarım köprü, tam köprü veya tek anahtarlı rezonans evirici devreler [31], gerilim veya akım kaynaklı olarak kullanılır [44].

Rezonans dönüştürücü rezonans frekansında (f_r) çalıştırıldığında kapasitif ve endüktif reaktans birbirine eşit olur. Bu durumda devre akımı ve gerilimi aynı fazdadır. Rezonans frekansı L ve C değerlerine bağlı olarak değişmektedir (Eşitlik 2.7). Enerji transfer hızı rezonans frekansı, kondansatör kapasitesi C ve indüksiyon bobininin endüktansı L ile tespit edilir [45]. Seri rezonans devrede anahtarlama frekansının rezonans frekansının altında veya üstündeki çalışma durumlarında devre akımı azalmaktadır. Rezonans anında yük akımı en yüksek değerdedir. Bu durum Şekil 2.7’de gösterilmektedir.

$$f_r = \frac{1}{2\pi\sqrt{LC}} \quad (2.7)$$



Şekil 2.7. Seri devrede rezonans frekansına göre yük akımı.

2.2.3. Seri Rezonans Eviriciler

İlk olarak 1959 yılında Baxandall [46] tarafından önerilen DC/AC rezonans eviriciler D Sınıfı rezonans olarak ifade edilmiştir. Uygulama alanları; DC enerjiyi AC enerjiye dönüştürmek, DC-DC rezonans dönüşümü, radyo vericileri, elektronik

balastlar, indüksiyon kaynağı için yüksek frekanslı elektriksel ısıtma işlemi, plastik kaynağı için dielektrik ısıtma, fiber-optik imalatı vb. olarak sıralanabilir.

D Sınıfı eviriciler seri ve paralel olmak üzere iki gruba ayrılmaktadır. D Sınıfı seri rezonans eviriciler DC gerilim kaynağı ile beslenir. Yüksek kalite faktörleri için yük akımı sinüzoidaldir. Anahtar uçlarındaki gerilim kare dalga, anahtar akımı yarım dalga sinüstür [47].

Diğer taraftan, D sınıfı paralel rezonans eviriciler DC akım kaynağı tarafından beslenir. Kalite faktörünün yüksek değerleri için paralel rezonans devresi uçlarındaki gerilim sinüzoidaldir. Anahtarların uçlarında gerilimler yarım dalga sinüs ve anahtardan geçen akımlar ise kare dalga şeklindedir [47].

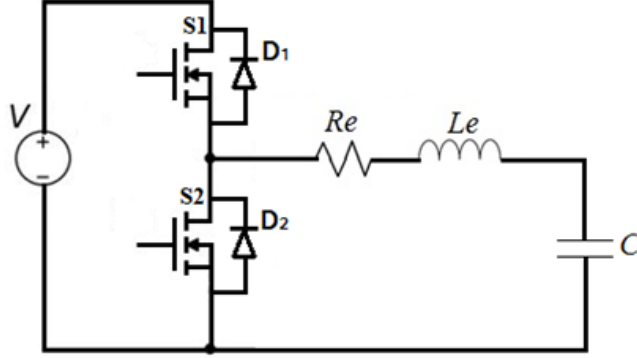
D Sınıfı seri rezonans eviricilerin önemli avantajlarından biri yarı iletken anahtar uçlarına alçak gerilim uygulanmasıdır. Bu gerilim besleme gerilimidir. Bu nedenle, düşük voltaj oranlı cihazlarda kullanılabilir, evirici verimliliği artar ve maliyet düşer. Rezonans eviricinin çıkış gerilimi veya çıkış gücü genellikle anahtarlama frekansı değiştirilerek kontrol edilir (FM kontrol).

Yaygın olarak indüksiyon ısıtma uygulamaları için kullanılan evirici topolojileri, yarım köprü veya tam köprü güç dönüştürücü topolojileridir [48]. Tam köprü, yüksek çıkış gücü sunan, kontrol esnekliği ve verimliliği uygun kontrol stratejisi ile önemli ölçüde optimize edilebilir olan topolojidir. Ancak, indüksiyon ısıtma sistemleri için ortaya çıkan çok yüksek maliyetler bu cihazları olanaksız kılmaktadır [49,50]. Yarım köprü seri rezonans evirici performans, karmaşıklığı ve maliyeti arasındaki dengeli uyum nedeniyle en çok kullanılan topolojidir [51,52].

2.2.4. D Sınıfı Seri Rezonans Evirici

D Sınıfı seri rezonans evirici devresi Şekil 2.8'de görülmektedir. Devre çift yönlü güç anahtarları ile seri rezonans devresinden oluşmaktadır. Devrede anahtarlama elemanı olarak MOSFET kullanılmıştır ve kendi içinde ters paralel bağlı diyot vardır. Güç anahtarları $f = 1/T$ çalışma frekansında, küçük bir ölü zaman aralığında

çakışmayan tetikleme sinyalleri ile sürülmektedir. Dolayısıyla güç anahtarları % 50 veya biraz daha az bir görev oranı ile ON ve OFF dönüşümlü olarak iletimde veya yalıtımdadır.



Şekil 2.8. D Sınıfı seri rezonans evirici.

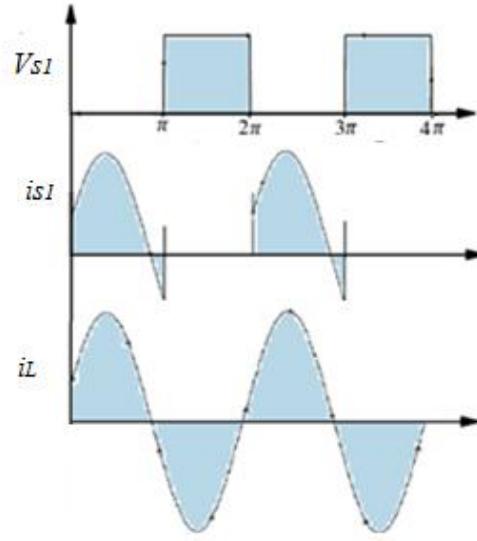
2.2.4.1. Dalga Şekilleri

Yük üzerinde yönü ve şiddeti değişen bir gerilim elde etmek için görev oranına göre anahtarlara uygulanan kare dalga sinyali ile periyodun ilk yarısında 1. güç anahtarı, ikinci yarısında ise 2. güç anahtarı iletime alınır.

Seri rezonans devresini besleyen gerilim kare dalgadır. Rezonans devresinin kalite faktörü yeterince yüksek ise, devre üzerindeki akım yaklaşık bir sinüs dalgası biçimindedir. $f_a = f_r$ olduğu zaman güç anahtarları sıfır akımda açılıp kapanabilir. Bu çalışma durumunda ters paralel diyotlar iletime geçmez. Bu durumda anahtarlama kayıpları sıfır ve verim ise yüksektir. Ancak çalışma frekansı, rezonans frekansına her zaman eşit olmaz. Çünkü çıkış gücü ve çıkış gerilimi çalışma frekansına bağlıdır. Şekil 2.9 ve Şekil 2.10, sırasıyla $f_a < f_r$ ve $f_a > f_r$ için dalga şekilleri gösterilmiştir.

2.2.4.2. Rezonans Altında Çalışma ($f_a < f_r$)

Devrenin çalışma/anahtarlama frekansı, rezonans frekansından küçük olduğu çalışma durumudur (Şekil 2.9). Rezonans altında çalışmada, seri rezonans devresi anahtarları kapasitif yük etkisinde çalışmaktadır.



Şekil 2.9. D Sınıfı seri rezonans evirici $f_a < f_r$ dalga şekilleri.

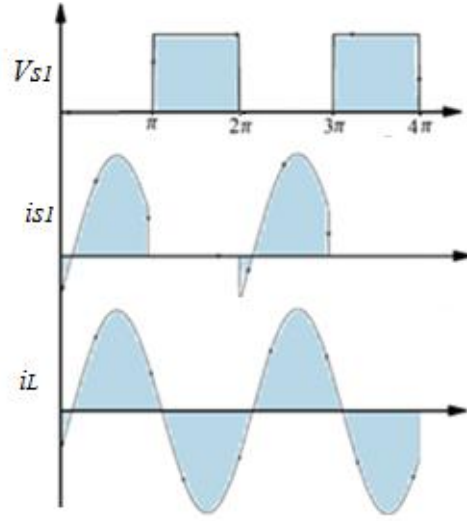
Bu çalışma durumunda, anahtarların açılması ve kapanması sırasında yüksek ani akımlar oluşur. Bu durum güç anahtarlarını ani yüksek akımlara maruz bırakmakta, kayıpların ve parazitlerin artmasına neden olmaktadır.

$f_a < f_r$ için, yalıtımda anahtarlama kaybı sıfır, ancak iletimde anahtarlama kaybı sıfır değildir. Güç anahtarı gerilimi güç kaynağının gerilimine eşittir ve yüksek gerilimde iletme geçmektedir. Güç anahtarı iletme geçtiği andaki kondansatörün deşarjı bir anahtarlama kaybına yol açmaktadır.

2.2.4.3. Rezonans Üstünde Çalışma ($f_a > f_r$)

Devrenin anahtarlama frekansının, rezonans frekansından büyük olması durumudur (Şekil 2.10). Bu durumda devre endüktif ve devre akımı devre geriliminden daha geridedir.

Bu çalışma durumunda, diyotlar düşük akımla iletme geçtikleri için diyotların ters toparlanma sorunları ve bunun meydana getirdiği kayıplar azalmıştır. Bu nedenle ters paralel diyotların hızlı olmasına gerek yoktur. Anahtarlar sıfır gerilim koşullarında iletme geçer.



Şekil 2.10. D Sınıfı seri rezonans evirici $f_a > f_r$ dalga şekilleri.

Rezonans üstünde çalışmada anahtarlama kayıpları iletme geçişte sıfırken, yalıtıma geçişte az da olsa kayıplar söz konusudur. Bu kayıplar anahtara paralel bir kondansatör bağlayarak [53] ve sürücü çıkışındaki sinyalin ölü zamanları ayarlanarak en aza indirgenebilir [39].

BÖLÜM 3

D SINIFI SERİ REZONANS EVİRİCİ ANALİZ VE SİMÜLASYONU

D sınıfı eviricinin kararlı durum analizi aşağıdaki varsayımlar göz önünde bulundurularak yapılmıştır.

Tüm bileşenler idealdir.

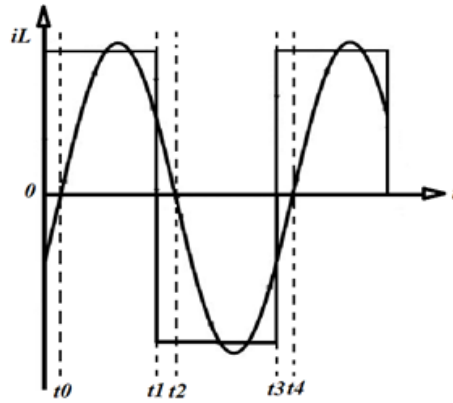
Sabit DC giriş gerilimine sahiptir.

Anahtarların parazitik kapasite etkisi ihmal edilmiştir.

Yüklü kalite faktörü yeterince yüksek kabul edilmiştir.

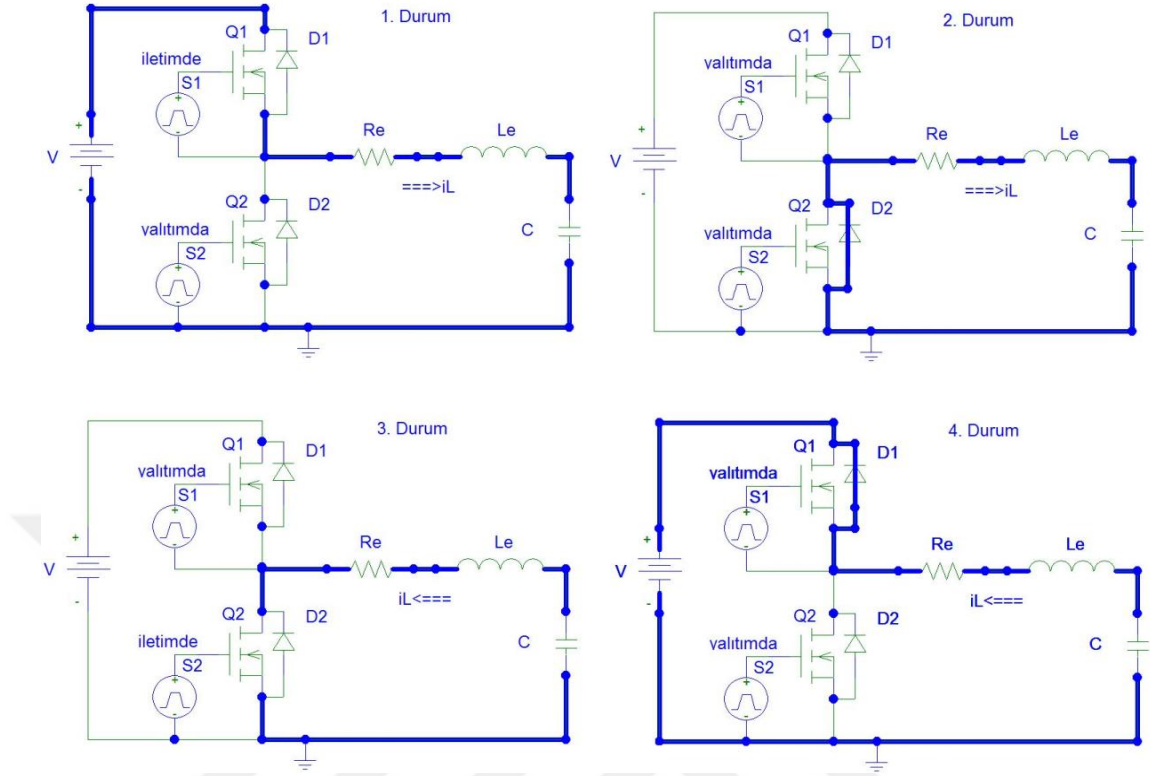
3.1. D SINIFI SERİ REZONANS EVİRİCİ ANALİZİ

Rezonans frekansının üstünde çalışma durumuna göre oluşturulmuş seri rezonans eviricinin bobin akımının değişimi Şekil 3.1’de verilmiştir.



Şekil 3.1. $f_a > f_r$ Durumunda seri rezonans devresi bobin akımı.

Devrenin dört ayrı zaman diliminde çalışma durumları incelenerek analiz edilmiştir. Her bir duruma ait devre şeması Şekil 3.2’de görülmektedir. Her bir şekil üzerindeki koyu çizgiler akım yolunu göstermektedir.



Şekil 3.2. D sınıfı seri rezonans evirici çalışma durumları.

D sınıfı seri rezonans eviricide rezonans frekansında yapılan hesaplamalarda aşağıdaki eşitlikler kullanılmaktadır [8,20].

Bobinden geçen akımın (i_L) denklemleri Eşitlik 3.1’de verilmiştir.

$$i_L(t) = I_{Lm} \sin(\omega_a t - \psi) \quad (3.1)$$

Burada, I_{Lm} bobin akımının tepe değeri, ω_a anahtarlama açısal hızı (r/s) ve ψ faz açısıdır.

Rezonans açısal hızı ω_r , Eşitlik 3.2’de verilmiştir.

$$\omega_r = \frac{1}{\sqrt{LC}} \quad (3.2)$$

Anahtarlama açısal hızı ω_a , Eşitlik 3.3 ile bulunur.

$$\omega_a = 2\pi f_a \quad (3.3)$$

Seri rezonans devresinin empedansı (Z) Eşitlik 3.4 ile bulunur.

$$Z = R \left[1 + jQ \left(\frac{\omega_a}{\omega_r} - \frac{\omega_r}{\omega_a} \right) \right] \quad (3.4)$$

Faz açısı (ψ), Eşitlik 3.5 ile hesaplanır.

$$\psi = \tan^{-1} \left[Q \left(\frac{\omega_a}{\omega_r} - \frac{\omega_r}{\omega_a} \right) \right] \quad (3.5)$$

$f_a < f_r$ için, ψ sıfırdan küçüktür, bu rezonans devresinin, kapasitif karakteristikteki çalıştığını, $f_a > f_r$ için ψ , sıfırdan büyüktür, rezonans devresinin, endüktif karakteristikte çalıştığını göstermektedir.

Karakteristik empedans (Z_r), Eşitlik 3.6'deki gibi hesaplanmaktadır.

$$Z_r = \sqrt{\frac{L}{C}} \quad (3.6)$$

Rezonans devresinin yüklü kalite faktörünü, Eşitlik 3.7 ile bulunmaktadır.

$$Q = \frac{Z_r}{R} \quad (3.7)$$

Anahtarının sıra ile iletme geçmesi ile birlikte rezonans devresine Eşitlik 3.8'de verilen aralıklarda kare dalga gerilim uygulanmaktadır.

$$v(t) = \begin{cases} V, & 0 < \omega t < \pi \\ 0, & \pi < \omega t < 2\pi \end{cases} \quad (3.8)$$

Rezonans ile elde edilen kare dalga gerilimin temel bileşeni Eşitlik 3.9 ile ifade edilir.

$$v(t) = V_m \sin \omega_a t \quad (3.9)$$

Bu gerilimin maksimum değeri (V_m), Eşitlik 3.10 ile hesaplanmaktadır.

$$V_m = \frac{2V}{\pi} \quad (3.10)$$

Rezonans devresinde bobin akımının maksimum değeri (I_{Lm}), Eşitlik 3.11' de verilmektedir.

$$I_{Lm} = \frac{V_m}{Z} \quad (3.11)$$

I_{rms} Eşitlik 3.12 ile hesaplanır.

$$I_{rms} = \sqrt{\frac{1}{T} \int_0^T (I_m \sin(\omega t - \psi))^2 dt} \quad (3.12)$$

1. Durum ($t_0 - t_1$): D_1 üzerinden ters yönde akan i_L akımı, $t = t_0$ anında Q_1 anahtarının tetiklenmesi ile yön değiştirerek Q_1 'den geçmeye başlar.
2. Durum ($t_1 - t_2$): $t = t_1$ olduğunda her iki anahtarda yalıtımdadır, bu anda Q_1 anahtarından geçmekte olan i_L , D_2 üzerinden dolaşmaya başlar. Q_2 sıfır gerilim şartlarında iletme geçmektedir. D_1 ters polarma altındadır, çok hızlı olması gerekli değildir.
3. Durum ($t_2 - t_3$): $t = t_2$ olduğunda akım Q_2 anahtarından geçmeye başlar. Bu durumda Q_2 sıfır gerilim anahtarlama yapmış olur.
4. Durum ($t_3 - t_4$): $t = t_3$ olduğunda Q_2 yalıtıma geçer ve i_L akımı D_1 üzerinden devresini tamamlar. Bu sırada yalıtımdan dolayı bir miktar anahtarlama kaybı oluşmaktadır. $t_3 < t < t_4$ zaman aralığında akım D_1 diyotundan geçer. t_4 anında Q_1 sıfır gerilimle iletme geçer.

3.2. D SINIFI SERİ REZONANS EVİRİCİ ANALİZ SONUÇLARI

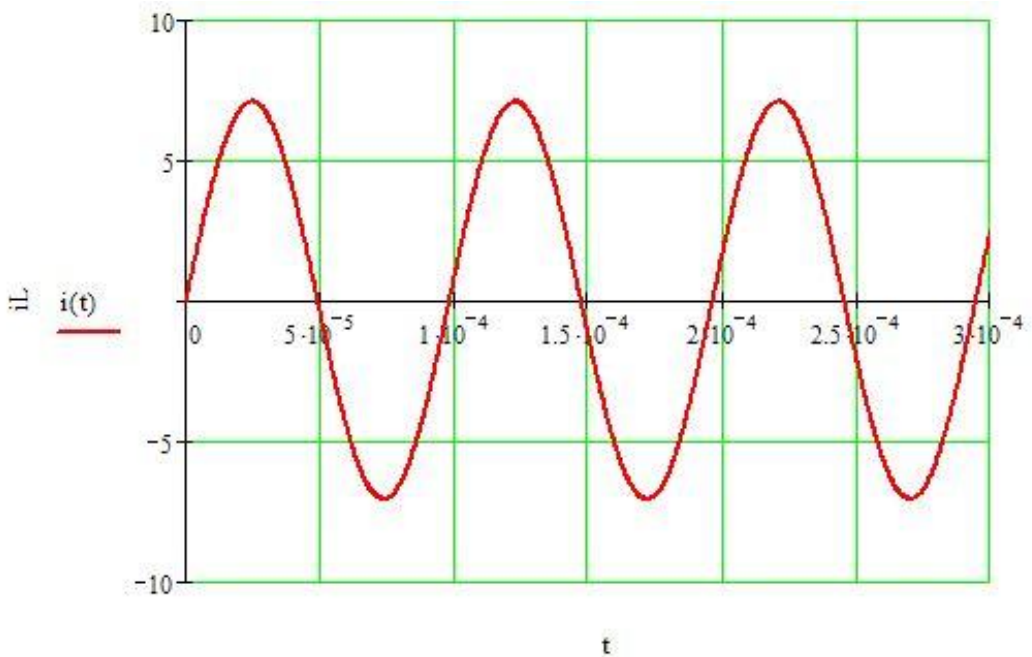
D sınıfı seri rezonans eviricinin analiz ve hesaplamaları Mathcad programı kullanılarak yapılmıştır. Analizde primere yansıtılmış eşdeğer devre parametreleri (28Ω direnç ve $1,46 \text{ mH}$ endüktans değerleri) kullanılmıştır ($f_r = 10.2 \text{ kHz}$).

311 V giriş gerilimi için Bölüm 3.1' deki eşitlikler kullanılarak Çizelge 3.1'deki değerler hesaplanmış ve bobin akım grafiği elde edilmiştir.

Çizelge 3.1. $f_a = f_r$ için Mathcad hesaplama sonuçları.

Evirici Akımı (I_L , A)	
Tepe Akım Değeri	RMS Akım Değeri
7,07	5

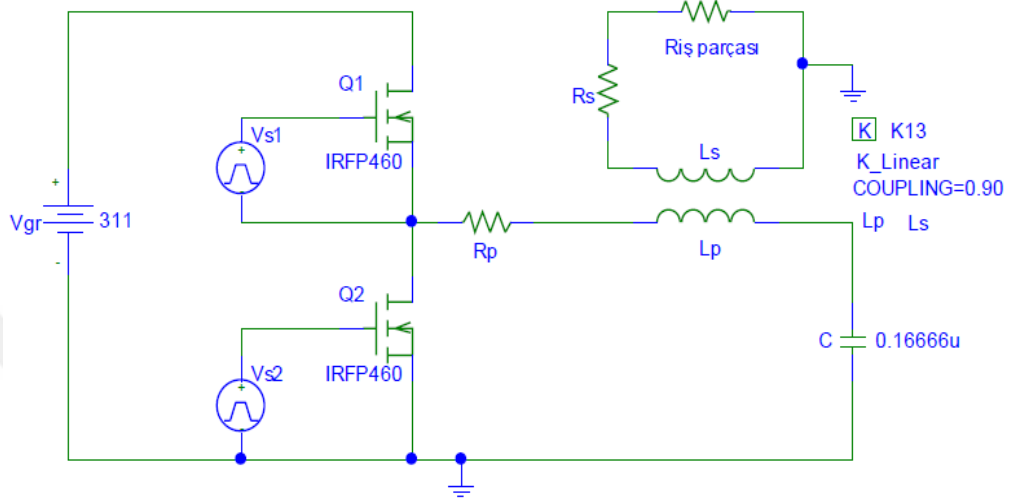
Bobin akımı için elde edilen grafik Şekil 3.3'de görülmektedir.



Şekil 3.3. Mathcad hesapları sonucunda alınan i_L akım grafiği.

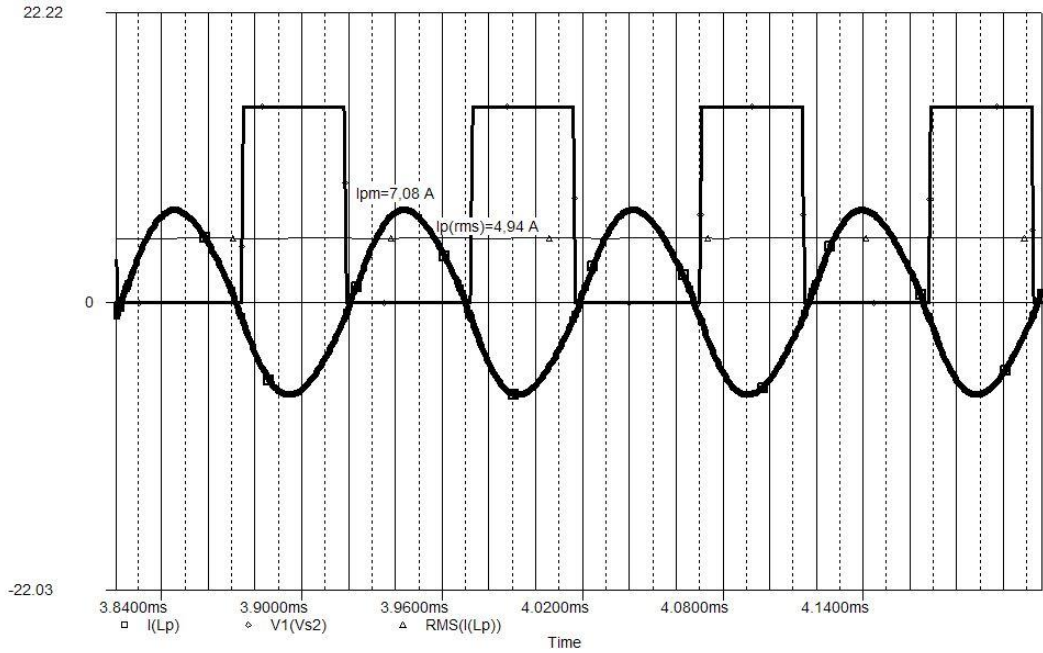
3.3. D SINIFI SERİ REZONANS EVİRİCİ SİMÜLASYONU

Tez çalışmasında uygulanan D sınıfı seri rezonans eviricinin, Şekil 3.4'deki devre ile simülasyonu PSpice'ta yapılmıştır.



Şekil 3.4. PSpice simülasyon devresi.

Şekil 3.4'deki devrenin ile PSpice yazılımı ile simülasyonu sonucunda elde edilen grafik Şekil 3.5'te görülmektedir.



Şekil 3.5. D sınıfı seri rezonans evirici simülasyon sonuçları.

311 V giriş gerilimi uygulanan D sınıfı seri rezonans eviricinin rezonans frekansında simülasyonu sonucunda elde edilen değerler Çizelge 3.2’de görülmektedir.

Çizelge 3.2. $f_a = f_r$ için Pspice simülasyon sonuçları.

Tepe Akım Değeri (A)	RMS Akım Değeri (A)
I_{pm}	I_p
7,08	4,94

BÖLÜM 4

D SINIFI SERİ REZONANS EVİRİCİNİN PLC İLE PLL KONTROLÜ

4.1. D SINIFI SERİ REZONANS EVİRİCİ KONTROL YÖNTEMLERİ

D Sınıfı eviricilerde güç kontrolü, yük özellikleri nedeniyle, yüksek frekanslı anahtarlama işlemi altında yapılmaktadır. Genel olarak, çoğu indüksiyon ısıtma uygulamalarında, çıkış gücünü kontrol etmek için değişken bir frekans düzeni kullanılmaktadır [54]. Frekans modülasyonu kontrolü yük veya hat frekansının değişimine karşı uygulanan temel bir yöntemdir. Bu yöntemin en önemli dezavantajı, büyük frekans aralığıdır. Frekans kontrol sorunlarını önlemek için anahtarlama frekansının sabit tutulması ve PWM kontrolü uygulanabilmektedir [55]. DC/AC güç dönüştürücüler için yaygın olarak kullanılan diğer güç kontrol teknikleri şunlardır [56]:

Frekansın düzenlenmesi; evirici, %50 görev oranında anahtarlama frekansı değiştirilerek kontrol edilir. Rezonans frekansında güç maksimum ve rezonans frekansından uzaklaştıkça güç azalmaktadır.

Darbe genişliğinin düzenlenmesi; güç kontrolü için diğer bir teknik, rezonans frekansına yakın frekans değeri ile kontrol gerçekleştirilir ama darbelerin genişliği değiştirilebilir. Bu şartlar altında H-köprü bir evirici için % 50 görev oranı sağlandığında eviriciden maksimum güç elde edilir.

Bu durumda güç faktörü önceki durumdan daha yüksektir fakat anahtarlama anında akım ve gerilim sıfır değildir, sert anahtarlama söz konusudur, yüksek anahtarlama kayıpları hala vardır [57].

Darbe genişliği ve frekansın düzenlenmesi; Bu güç kontrol tekniği önceki tekniğe benzerdir, ancak iletim sırasında frekansı değişen ZVS'de daha geniş bir aralığa izin verir. Bu tekniğin başlıca dezavantajı, normal çalışma sırasında dönüştürücü tarafından sağlanan reaktif güçtür [58].

Yüksek kaliteli güç kaynakları için artan talepler ve harmonik bozulmaların azalması ile PWM eviriciler, kritik yükler ve yüksek performanslı güç dönüştürücüler için önemli bir unsurdur [59]. Eviricilerde, çıkış gücünün kontrol edilmesi için darbe genişlik modülasyonu (PWM) tekniği uygulanmaktadır. PWM sinyalleri genel olarak referans işareti ve kontrol işaretinin karşılaştırılmasıyla standart bir entegre devresi kullanılarak üretilebildiği gibi, bir mikro denetleyici PIC veya sayısal sinyal işlemci (DSP) kullanılarak da üretilebilmektedir [7]. Üretilen sinyallerin darbe genişliği ve frekansı entegre veya mikro denetleyicinin girişlerine uygulanan analog sinyallerle ayarlanabilmektedir.

İndüksiyon ile iş parçasının ısıtılması sonucunda $R - L - C$ devresindeki parametreler değişmektedir. Bu değişim anahtarlama frekansı ile rezonans frekansı arasında faz farkının oluşmasına neden olmaktadır. İndüksiyon ısıtma sistemlerinde eviriciler, iş parçasına maksimum güç sağlamak için rezonans frekansında veya yakın anahtarlama frekansı ile kontrol edilirler. Bu tez çalışmada gerilim kaynaklı seri rezonans evirici kontrolü rezonans frekansına eşit anahtarlama frekansı ile yapılmaktadır. Rezonans frekansından uzaklaşma söz konusu olduğunda bu kaymayı algılayan bir kontrol sistemleri kullanılmaktadır.

İndüksiyon uygulamaları için rezonans frekansını doğru tespiti oldukça önemlidir [17]. Anahtarlama frekansı ile rezonans frekansı veya gerilimle akım arasındaki faz farkının sıfır ya da sıfıra yakın bir değer olana kadar rezonans frekansını bulmak için kullanılan tekniklerden biri faz kilitleme çevrim (PLL) tekniğidir. İndüksiyon ısıtma uygulamalarında PLL, rezonans frekansına ulaşılan kadar evirici akımı ve gerilim arasındaki faz-farkını kontrol etmek için kullanılır [60]. Bu tez çalışmasında D Sınıfı seri rezonans evirici için, PLC' de yazılan PLL programıyla rezonans ya da rezonansın biraz üzerinde bir frekansta eviricinin çalışmasını sağlayan PWM üretilmektedir.

4.2. FAZ KİLİTLEMELİ DÖNGÜ TEKNİĞİ (PLL)

Phase Locked Loop (PLL), çıkış frekansı ve bir referans frekansı arasında sabit faz ilişkisini belirleyen kapalı döngü geri besleme sistemidir [61]. Çıkış sinyali ile giriş sinyali arasındaki faz farkının sıfıra getirilmesi, faz kilitleme olarak ifade edilir. Başka ifade ile PLL tekniği çıkış sinyali ile giriş sinyalini kilitleyen kontrol sistemidir [62].

PLL tekniği ilk defa 1930'lu yıllarda ortaya çıkmış ve o zamanlarda açıklanan temel kavramlar hâlâ geçerliliğini kaybetmemiştir [61]. Günümüze kadar farklı endüstriyel alanların birçoğunda PLL tekniğinden faydalanılmıştır. PLL tekniği; televizyonun açılmasıyla görüntünün ekrana getirilmesi, renkli televizyonlarda renklerin karışmaması, radyolarda yayınının bulunması, elektronik ateşlemeli floresan lambalar, indüksiyonla ısıtma sistemleri, motor hız kontrol sistemleri, haberleşme cihazları gibi birçok uygulamada kullanılmaktadır [62].

PLL tekniği, yarı iletken ve devre teknolojilerinin gelişimine paralel olarak analog, dijital, tüm dijital ve yazılım ile uygulanabilmektedir. Bu uygulamaların çalışma özellikleri benzer olmasına karşın, temel fonksiyon blokları, işleyiş, kararlılık ve hız gibi konularda farklılık söz konusudur [62].

PLL sistemi gerilim kontrollü osilatör (VCO), faz algılayıcı (PD), ve alçak geçiren filtre (LPF) içeren bir geri besleme sistemidir. Bir PLL devresi temel olarak Şekil 4.1' de görülen üç fonksiyonel bloktan oluşmaktadır;



Şekil 4.1. PLL blok diyagramı.

Eviricilerde kullanılan kontrol şekline göre PLL'in iki işlevi vardır [63];

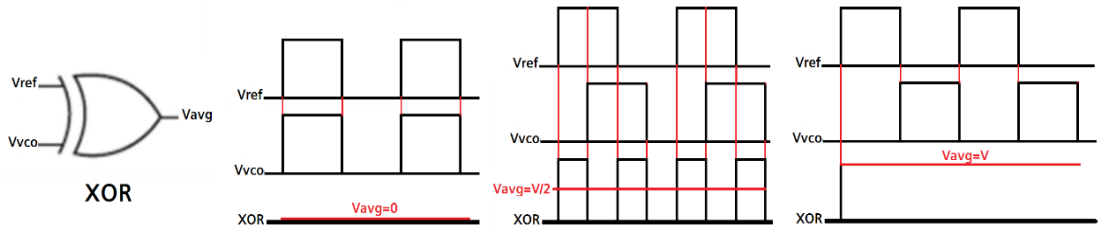
- 1) Sistemin gücünü kontrol etmek [63],
- 2) Rezonans frekansına göre, çalışma frekansını otomatik olarak ayarlamak.

PLL giriş sinyali bir referans frekansı ile, VCO' dan gelen çıkış sinyalinin frekansı PD' de karşılaştırılır. Faz farkı sıfır olana kadar frekans düzeltilir.

4.2.1. Faz Algılayıcı Devre (PD)

Faz algılayıcı, iki giriş sinyali arasındaki faz farkını tespit eden devredir. PLL tekniğinde faz algılayıcıları, XOR faz algılayıcı ve faz frekans algılayıcı olmak üzere temelde iki tane kullanılmaktadır.

XOR faz algılayıcısı "özel veya" kapısıdır. Şekil 4.2' de XOR kapısı ve çıkışında faz farklarına göre gerilim değerleri görülmektedir. PD girişleri arasındaki faz farkına bağlı olarak, çıkış değerleri değişmektedir. Ayrıca çıkışındaki darbe genişlikleri faz farkı ile orantılı olarak bir DC gerilim sağlamaktadır. XOR hem yükselen hem de düşen kenar hata darbeleri üretmektedir.



Şekil 4.2. XOR faz algılayıcı ve örnek XOR çıkış sinyalleri (faz farkı 0-%50-%100).

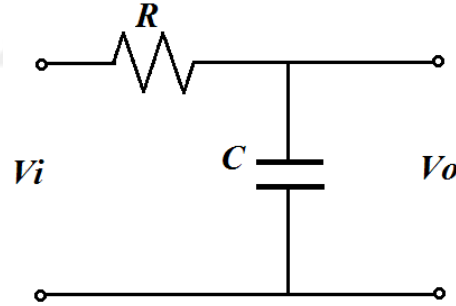
İki girişli XOR faz algılayıcı (özel veya) kapısı doğruluk tablosu Çizelge 4.1'te verildiği gibidir:

Çizelge 4.1. XOR doğruluk tablosu.

A	B	Q
0	0	0
0	1	1
1	0	1
1	1	0

4.2.2. Filtre Devresi

Filtre devresi alçak geçiren filtre (LPF) içeren bir devredir. Döngü filtresi veya Loop Filter (LF) olarak ifade edilir. LF' in görevi faz karşılaştırıcının çıkışındaki dijital sinyalleri bir analog kontrol gerilimine (V_0) dönüştürmektir. VCO frekansını ayarlamak için gerekli DC kontrol gerilimini filtre devresi sağlamaktadır. Örnek filtre devresi Şekil 4.3' de görülmektedir.



Şekil 4.3. Filtre devresi.

4.2.3. Gerilim Kontrollü Osilatör (VCO)

Gerilim kontrollü osilatör (VCO), frekansı DC gerilim ile belirli sınırlar içerisinde ayarlanabilen, kare veya üçgen dalga üretebilen devredir. VCO' nun amacı V_0 girişi ile orantılı çıkış frekansını değiştirmektir. Bir osilatör herhangi bir giriş olmadan periyodik çıkış üreten özel bir sistemdir. Evirici frekansı, VCO ile kolayca gerilim veya akım kontrollü ayarlanabilmektedir [61].

4.2.4. İndüksiyon Isıtma Uygulamalarında PLL Tekniği

İndüksiyon ısıtma eviricilerinin, kontrol için çoğunlukla CMOS 4046 entegre devre ailesi, çoğunluğu yarı analog PLL sistemler kullanılmaktadır. Bu sistemlerin bileşen parametreleri, bileşen bozulması ya da sıcaklık farklılaşmasından etkilenmektedir. Yük değişikliklerine göre, sistem parametrelerini güncellenmelidir.

Tüm dijital ya da yazılım PLL sistemleri göz önüne alındığında, indüksiyon ısıtma alanında deneyimler azdır [17]. Yazılım PLL uygulamak için seçilen mikro denetleyici TMS320F2808 DSP (PWM, ADC, dijital dönüştürücüler ve analog iletişim) gibi gerekli tüm çevre birimlerini entegre şekilde sunmaktadır.

Yazılım PLL kontrolün kullanıcı için avantajları şu şekilde sıralanabilir [17];

1. Sıfır geçişlerin birbirine çok yakın ve ilk anahtarlama frekansının rezonans frekansından uzakta olduğu durumları açıklayan bir uyarı metni ile kullanıcıyı uyarabilir,
2. Uyarı ile zaman gecikmesi ve ölü-zaman referanslarının programlanabilmesine izin verir,
3. Herhangi bir uyarıyı seri haberleşme veya bir endüstriyel iletişim yoluyla, ekran aracılığıyla uyarı gösteren bir programlanabilir lojik kontrolör (PLC) gibi başka bir endüstriyel cihaza gönderebilir.

DSP kullanılarak yazılım tabanlı PLL kontrollü indüksiyon ısıtma sisteminin güç anahtarlarının sıfır akım anahtarlama ve birim güç katsayısı elde edecek şekilde çalışması sağlanmaktadır [64].

Rezonans frekans izleme kontrol devresini teşkil edecek şekilde istenen performans PLL bileşenlerini tümleşik olarak içeren MC14046B vasıtasıyla elde edilebilir. Evirici çıkış akımının fazını EX4462 tipi akım transformatörü ile tespit edilmiştir [11].

Başka bir uygulamada DSP kullanılarak bir fazlı PLL algoritması ile sistem frekansının kontrolü gerçekleştirilmiştir. DSP tabanlı PLL kontrollü kapalı devre sistem tasarlanmıştır [65]. Bir fazlı PLL kontrol tekniği yaygın olarak indüksiyonlu ısıtma cihazlarında kullanılmaktadır [66].

İndüksiyon ısıtma sistemlerinde yük, rezonans devresinin bir parçasıdır. Isıtma çevrimi sırasında rezonans frekansı değişmektedir. Eğer uygun frekans noktası tespit edilemezse yük kalite faktörü eviricinin çalışmasını olumsuz etkileyebilir. Bu problemin çözümüne yönelik gerçekleştirilmiş bir başka çalışmada, faz kaydırmalı PWM ve frekans kontrolü (PFM) kontrol tekniği birlikte kullanılmıştır. Yüklü rezonans eviricilerde kontrolör olarak DSP veya FPGA gibi gelişmiş dijital platformlar, komple ayırık zamanlı kontrolör için önerilmektedir [67].

4.3. PLC VE UYGULAMA ALANLARI

Programlanabilir lojik kontrolör ya da denetleyiciler (**P**rogrammable **L**ogic **C**ontroller: PLC) endüstriyel otomasyon sistemlerinin kumanda ve kontrol devrelerini gerçekleştirmeye uygun yapıda giriş-çıkış ve iletişim arabirimleri ile donatılmış, endüstriyel bir kontrol cihazıdır. Ticari olarak ilk, röle tabanlı kumanda sistemlerinin yerine kullanılmak üzere 1969 yılında geliştirilmiştir. Geliştirilen bu yeni cihazlar yalnız temel lojik işlemleri gerçekleştirebilen komutlar içermektedir. PLC teknolojisinin geliştirilmesi ile giderek geleneksel röle sistemlerinin yerine daha fazla işlev, daha yüksek hız, daha küçük boyutlarda, düşük maliyetli ve yüksek güvenilirlik gibi özellikleriyle endüstriyel kontrolün standart donanımı haline gelmiştir [68].

PLC, bir dijital kontrolör temsilcisi olarak, küçük boyutlu, güvenilirlik ve yapılandırma esnekliği özellikleri ile endüstriyel kontrol ve diğer alanlarda yaygın olarak kullanılmaktadır [69].

Günümüzde birçok PLC modeli, bir kontrol algoritması yazmak için gerekli aritmetiksel ve mantıksal işlemler için güçlü bir komut sistemine sahiptir. Ayrıca analog-dijital dönüştürücü (ADC) ve dijital-analog dönüştürücü (DAC) özellikleri,

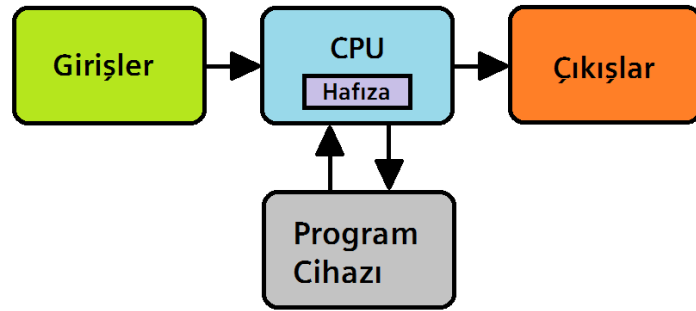
PLC'lerin geri beslemeli kontrol sistemlerinde dijital kontrolör olarak kullanılmasına olanak sağlanmaktadır.

PLC genel olarak, hafızasında bulunan programın akışına göre giriş sinyallerini algılayıp, bu sinyallere göre istenen kontrol sinyallerini üreten ve çıkışlara aktaran özel amaçlı bir kontrolördür.

4.3.1. PLC Sisteminin Temel Yapısı

PLC kompakt yapısı, esnek konfigürasyonu ve güçlü komut seti ile S7-200 pek çok endüstriyel uygulama için çözümler sunmaktadır [70]. Yazılım olarak boolean mantığı, sayma, zamanlama, karmaşık matematik işlemleri ve diğer akıllı cihazlarla iletişimi içermektedir. S7-200 PLC'ye parametreleri kendinden ayarlı çevrimiçi PID entegre edilmiştir [71].

Bir PLC sisteminin temel yapısı, girişler, çıkışlar, merkezi işlem birimi (CPU) ve bellekten oluşmaktadır. PLC, gerilim beslemesi için güç kaynağı, program yazılabilmesi için bilgisayar (PC) veya programlama cihazı ile kullanılmaktadır. Şekil 4.4' te PLC blok şeması görülmektedir.



Şekil 4.4. PLC blok şeması.

PLC bir sistem veya makinanın üretim süreçlerini denetleyen, mantık, sıralama, zamanlama, sayma gibi fonksiyonları sağlayacak komutları içeren, programlanabilir belleğe sahip bir kontrol cihazıdır. PLC marka ve modeli ne olursa olsun endüstriyel protokoller kullanılarak haberleştirilebilmektedir. Ayrıca modern endüstriyel

sistemler, günümüz teknolojileri ile kontrol, izleme, verilerin incelenmesi vb. gibi işlemlere uzaktan erişime imkân vermektedir.

PLC' ler RUN konumunda iken girişlerindeki veya hafızalarındaki verileri kullanıcı tarafından yüklenen program çerçevesinde işlemekte ve yeni veriler elde etmektedir. Gerekirse çıkış kontrol sinyalleri olarak kullanılmaktadır. Giriş verileri ve hafızasındaki veriler, belirli periyotlarla sürekli olarak denetlenmektedir. Değişiklikler tarama süresi içerisinde kullanıcı programına göre işlenmektedir. PLC STOP konumuna alınmaya veya bir hata ortaya çıkıncaya kadar çevrim devam etmektedir. Çevrim için geçen süre tarama döngüsü olarak ifade edilmektedir (Şekil 4.5). Bu süre PLC marka ve modellerine göre veya program yoğunluğuna bağlı olarak değişiklik gösterebilmektedir.



Şekil 4.5. PLC tarama döngüsü.

4.3.2. D Sınıfı Seri Rezonans Evirici İçin Denetleyici

İndüksiyon ısıtma sistemlerinde, denetleyici olarak genellikle kare dalga sinyali üretme yeteneğine sahip entegre kontrolörler kullanılmaktadır. Bu kontrolörler ile analog, dijital, tam dijital ve yazılım kontrolü yapılabilmektedir. Mikrodenetleyicilerin manyetik kirlilikten etkilenmesi, hassasiyet ayarının zor olması ve sistemde yapılmak istenen bir değişiklik durumunda mikrodenetleyici devresinin yeniden tasarlanması gibi problemler bulunmaktadır [72].

Bu tez çalışmasında, D sınıfı seri rezonans eviricinin kontrolü için mikro denetleyici tabanlı endüstriyel bir dijital kontrol cihazı olan PLC tercih edilmiştir. PLC kararlı çalışması, PWM üretme özelliği göz önünde bulundurularak ve yazılım PLL sağlanabileceği ön görülerek seçilmiştir. İndüksiyon ısıtma sisteminin rezonans frekansında çalışıp çalışmadığını belirlemek için güç ünitesinin kontrolü PLC ile sağlanabilmektedir [73].

PLC, indüksiyon ısıtıcının DC/AC dönüştürücüsünün kumanda ve kontrolünde kullanılarak, rezonans frekansı ve çıkış gücünün kararlılık noktasına bağlı olarak yarım köprü evirici tetikleme darbelerinin frekans ve doluluk oranı PI kontrollü gerçekleştirilmektedir [13].

Literatürde, PLC kullanılarak yapılan çalışmalardan bazıları aşağıdaki gibidir.

1. Bulanık mantık denetleyici olarak bir asenkron motorun hız kontrolü [74],
2. Siemens S7-200 CPU 226 ve HMI Simatic HMI TP177 Mikro ile yapılan sıcaklık kontrolü ve oransal kontrol uygulaması [75],
3. SCADA üzerinden PLC ile endüstriyel otomasyonu yapılan sistemin sıcaklık, basınç ve sıvı seviye gibi değerlerinin panel ekranından izlenmesi [72],
4. Motor hız kontrolünde, PLC ile endüstriyel güç hattı iletişimini (power line communication-PLC) modem ile sağlayarak geliştirilmesi [76],
5. Siemens S7-200 serisi PLC, bir tekerlek sökme makinesinde, HMI ile hidrolik kontrol, mekanizma konumlandırma ve süreç izleme gibi fonksiyonlarını bütünleştirilmesi için yapılan kontrol sistemi [77],
6. Su seviyesi kontrolünün, kapalı çevrim analog PID kontrol ile esnek, verimli ve kolayca uygulanması [78],
7. S7-200 PLC ile basit mekanik donanımların uzaktan kontrolünde, PLC, sunucu ve istemcilerin internetten karşılıklı olarak bağlanması [79],
8. Bir çelik tesisi üretim hattındaki indüksiyon ısıtma teknolojisinde, PLC 5 Hz'lik örnekleme frekansında, kütük demir ilk sıcaklık, son sıcaklık, çıkış voltajı ve akımı gibi verilerin analizi [80],

9. İnternet üzerinden denetimi yapılan birbirine basit bir sistem ile bağlı iki tankın sıvı seviyelerinin laboratuvar ortamında endüstriyel proses ile kontrolü [81].

PLC petrol ve ürünleri, otomobil, kimya, demir, maden, inşaat ürünleri, ulaşım gibi endüstrinin birçok kolunda, sıralı kontrol, hareket kontrolü, süreç denetimi ve veri yönetimi gibi iş ve işlemlerinde sıklıkla kullanılmaktadır.

Ayrıca, PLC ile yapılan denetim, üretim bandında kullanılan güç ünitelerinin otomasyon ağına bağlanmasına imkân verecek ve modern kontrol yöntemleri özel tasarımlara gerek duymadan gerçekleştirebilecektir [13].

Bu tez çalışmasında Siemens S7 200 PLC kullanılarak bir indüksiyon ısıtıcının PLL kontrol algoritması gerçekleştirilmiştir.

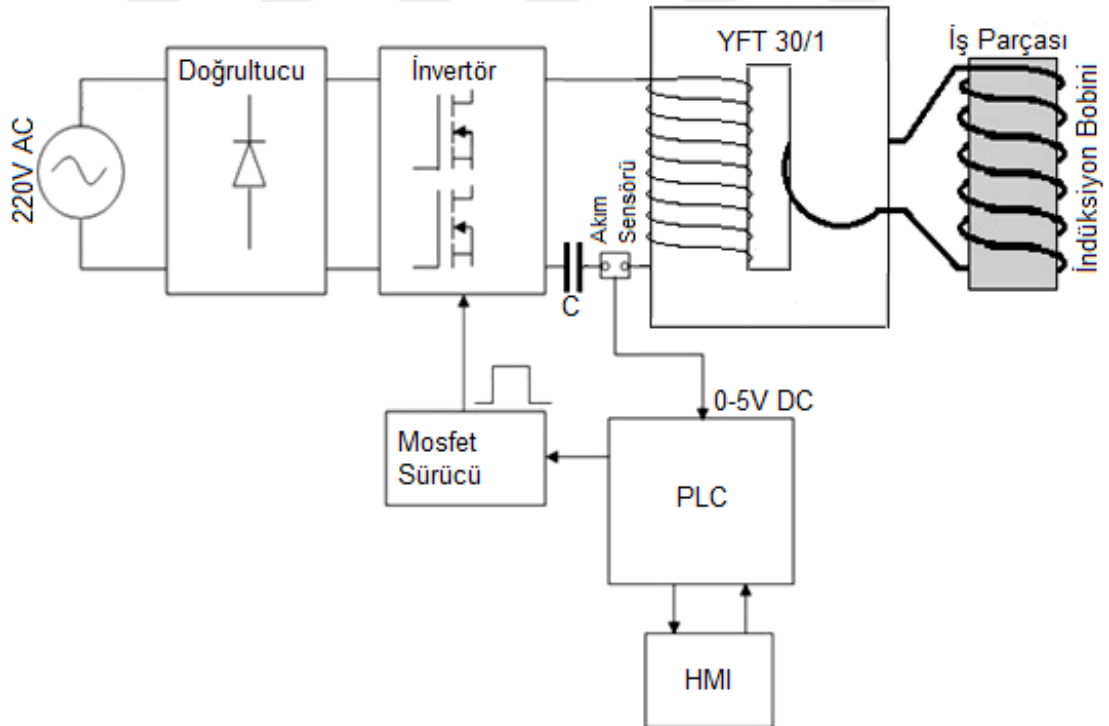
BÖLÜM 5

DENEYSEL ÇALIŞMALAR

Tez çalışmasının bu bölümde; üçüncü bölümde yapılan analiz ve simülasyon sonuçlarını doğrulamak için gerçekleştirilen PLC ile PLL kontrollü indüksiyon ısıtma sistemi verileri ile karşılaştırma yapılarak sunulmuştur.

5.1. PLC İLE PLL KONTROLLÜ D SINIFI SERİ REZONANS EVİRİCİ BÖLÜMLERİ

Şekil 5.1, PLC kontrollü indüksiyon ısıtma sistemi blok diyagramını göstermektedir.

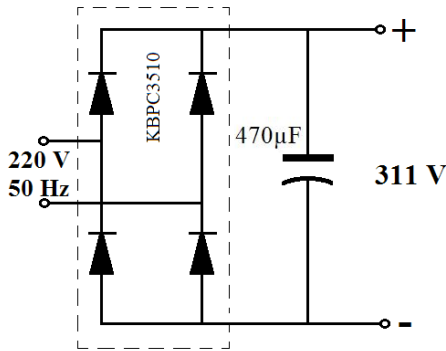


Şekil 5.1. PLC ile PLL kontrollü indüksiyon ısıtma sistemi blok diyagramı.

Uygulaması gerçekleştirilen PLC ile PLL kontrollü indüksiyon ısıtma sistemi; doğrultucu, evirici, sürücü devre, kontrolör (PLC), PLL geri besleme için akım sensörü, yüksek frekans transformatörü, rezonans kondansatörü, indüksiyon bobini ve iş parçasından meydana gelmektedir. Ayrıca sistemin çalışma durumunun takip edilebilmesi ve manuel kontrolü için HMI panel kullanılmıştır.

5.1.1. Doğrultucu

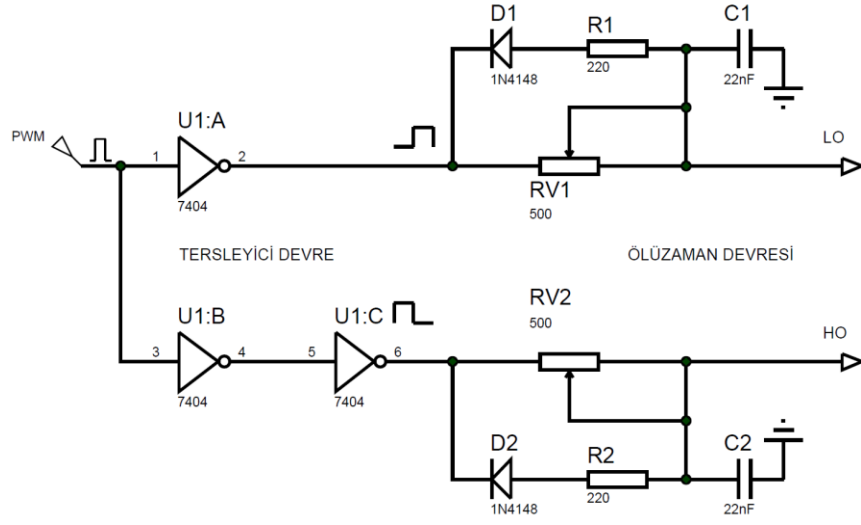
D sınıfı gerilim kaynaklı seri rezonans evirici devresini beslemek için doğrultucu güç kaynağı olarak kullanılmaktadır. 220 V'luk AC şebeke gerilimini 35 A 1000 V KBPC3510 köprü diyot kullanılarak DC gerilime dönüştürülmüştür (Şekil 5.2). doğrultucu çıkışında 450 V 470 μ F kondansatör kullanılmıştır. Böylece 311V DC gerilim elde edilmektedir.



Şekil 5.2. Doğrultucu.

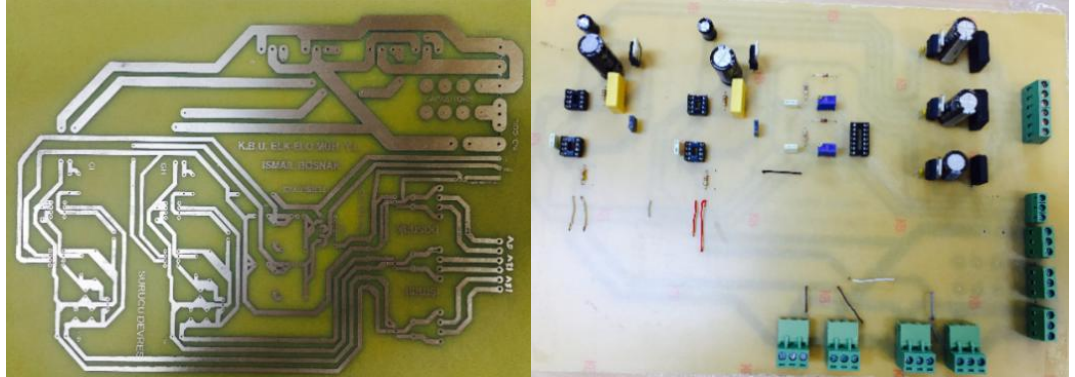
5.1.2. Evirici Sürücü Devre

Evirici sürücü devresi, tersleyici devre, ölü zaman devresi, optokuplör ve MOSFET sürücü entegreleri ile gerçekleştirilmiştir. Siemens S7 200 denetleyicisinden gelen PWM sinyali tersleyici devre ile birbirine göre ters iki sinyale dönüştürülmektedir. Tersleyici olarak 74LS04 entegresi kullanılmıştır. Elde edilen sinyaller ölü zaman devresinden geçirilmektedir. Şekil 5.3' de tersleyici ve ölü zaman devre şeması görülmektedir.



Şekil 5.3. Tersleyici ve ölü zaman devresi.

Devredeki 500 Ω trimpot ile ölü zaman süresi ayarlanabilmektedir. Şekil 5.4' te tersleyici ve ölü zaman devresi PCB görüntüsü verilmiştir.



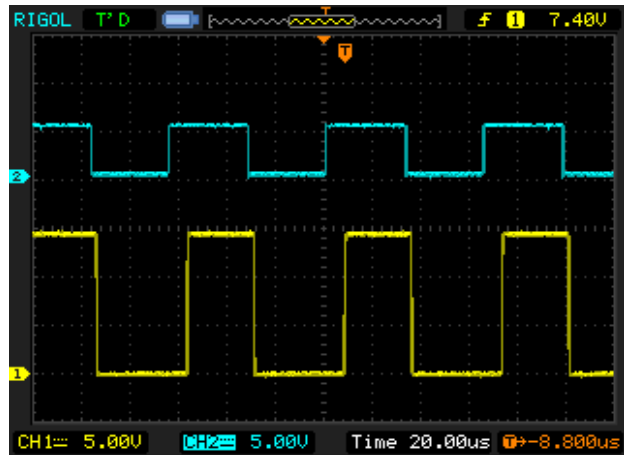
Şekil 5.4. Tersleyici ve ölü zaman devresi PCB görüntüsü.

Ölü zaman devresi, sürücü devre girişinde bulunan optokuplör kullanılarak güç devresinden izole edilmiştir. 6N137 yüksek hızlı optokuplör, sürücü devresi ile tersleyici devre arasındaki izolasyonu sağlamaktadır. Optokuplör çıkışında MOSFET sürücü devre bulunmaktadır. MOSFET sürücü olarak TC4427 kullanılmıştır. Sürücü çıkışındaki sinyaller güç anahtarlarını kontrol etmektedir. Besleme ünitesinden, sürücü devreye 2x15 V DC, tersleyici ve ölü zaman devresine 5 V DC gerilim uygulanmıştır. Uygulama devresi Şekil 5.5' te görülmektedir.



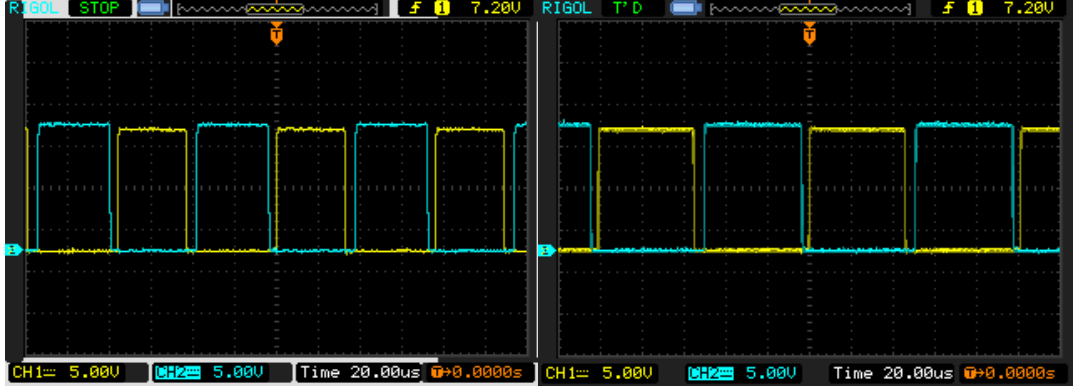
Şekil 5.5. İzoleli MOSFET sürücü devre.

MOSFET sürücü devresi, sürücü devre gerilim kaynağı, MOSFET güç anahtarları, tersleyici ve ölü zaman devresi tek bir elektronik kart üzerinde birleştirilmiştir. Şekil 5.6' da MOSFET sürücü devre giriş ve çıkış sinyali test edilmiş ve sonuçlar karşılaştırılmıştır.



Şekil 5.6. MOSFET sürücü giriş ve çıkış sinyali.

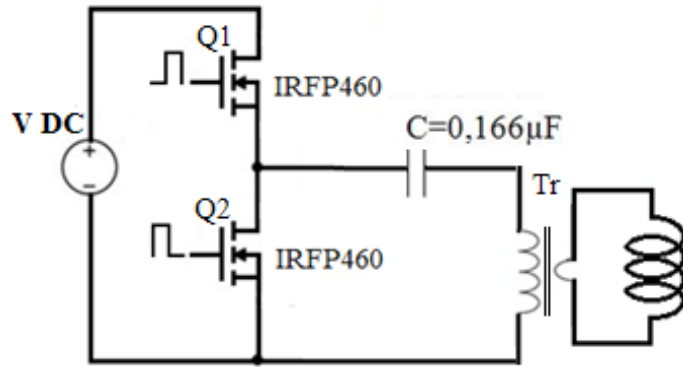
Sistemin, sürücü çıkışındaki anahtarlama sinyalleri ve ölü zaman osiloskopta Şekil 5.7' de görüldüğü gibi farklı frekanslarda test sonuçları verilmiştir.



Şekil 5.7. Alt ve üst MOSFET tetikleme sinyalleri.

5.1.3. Evirici Devre

Şekil 5.8' de D sınıfı evirici devresi görülmektedir. Sistem maliyeti ve kullanılabilirlik açısından evirici devresinde anahtarlama elemanı olarak MOSFET tercih edilmiştir. Evirici devresi IRFP460N MOSFET kullanılarak test edilmiştir.



Şekil 5.8. D sınıfı evirici devresi.

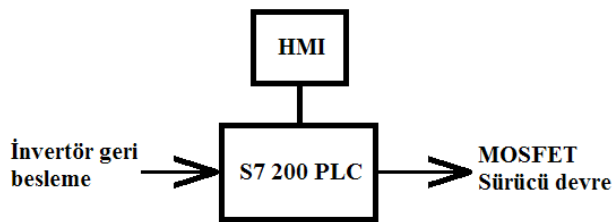
IRFP460 N kanallı güç MOSFET' i dir. İç dirençleri ve maliyetleri düşük olup, hızlı anahtarlama imkân vermektedir. Drain-Source gerilimi 500 V, Gate-Source gerilimi ± 20 V'tur. Sürekli drain akımı 13-20 A'dir, nanosaniyelerde anahtarlama mümkündür. MOSFET' lere uygulanan tetikleme sinyali Şekil 5.7' de görülmektedir.

Sürücü çıkışından alınan anahtarlama sinyalleri MOSFET'lerin G(Gate) – S(Source) ayaklarına bağlanmıştır.

5.1.4. Siemens S7 200 PLC

S7–200 CPU, genel olarak kompakt yapıda bir mikroişlemci, entegre güç kaynağı, giriş ve çıkış devreleri içermektedir. CPU tipine göre boyut, entegre dijital giriş-çıkış sayısı, analog giriş-çıkış sayısı, program ve veri hafızası, (DC) darbe çıkış sayısı, hızlı sayıcı sayısı, vb. özellikleri farklılık göstermektedir. S7-200 zaman kesme sistemi ve diğer kesme özellikleri yanı sıra yüksek hızlı sayıcılarına (yakl. 200 kHz) ve pals çıkışlarına (yakl. 100 kHz) sahiptir [82]. PLC' de değişken görev döngüsü ile dijital pals üretmek için yüksek hızlı PWM darbe jeneratörü kullanılmaktadır. Yüksek hızlı pals çıkışı sağlayan iki jeneratörler vardır. Bunun için sırasıyla Q0.0 ve Q0.1 ayrılmıştır. PWM 1 μ s ya da 1ms zaman tabanında periyod ayarı 2-65535 aralığı içinde, PWM pals genişliği ayarı 0-65535 aralığı içinde yapılabilmektedir (Ek-1) [83].

Genişleme modülleri ile dijital veya analog giriş-çıkış sayısı artırılabilen ve akıllı modüller olarak, pozisyonlama modem ve PROFIBUS–DP modülleri eklenebilmektedir. Ayrıca S7 200 PLC'ler uygulamanın proses olarak ifade edilen sürecin değişkenlerinin izlenebildiği ve değiştirilebildiği text panel ve sabit grafikler, sütun grafikleri, butonlar ve uygulama değişkenlerini gösteren HMI ile kullanılabilir. Uzak bilgisayarlarda S7-224 PLC'nin kontrol bölümünün işletimi eş zamanlı olarak izlenebilmektedir [79]. Şekil 5.9' da HMI ve PLC kontrol ünitesi blok diyagramı görülmektedir.



Şekil 5.9. HMI ve PLC evirici kontrol ünitesi.

S7-200 PLC'leri programlamak için STEP 7-Micro/WIN programlama paketi, uygulamaya kumanda etmek, lojik program oluşturulmak, düzenlenmek ve test etmek için ortam kullanılmaktadır. Ek 2'de STEP 7-Micro/WIN ekran alıntısı görülmektedir. STEP 7-Micro/WIN yazılımında PLC'yi programlamak için STL (Statement List), FBD (Function Blok Diyagram), LAD (Ladder Diyagram) olmak üzere, programlama sırasında bir birine kolaylıkla dönüştürülebilen üç dil kullanılmaktadır. Nispeten, LAD dili daha basittir [84].

Bilgisayarı S7-200'e bağlamak için iki ayrı iletişim seçeneği sunulmaktadır: Bunlar PC/PPI kablosu ile veya MPI ve PROFIBUS-DP iletişim ağlarında da kullanılmak üzere bir Communication Processor (CP) kartı ve MPI kablosudur [70].

Bu tez çalışmasında PLL kontrol için S7 200 224 XP serisi PLC kullanılmıştır. 224 XP serisinde iki analog giriş ve bir analog çıkış bulunmaktadır. Analog giriş eviriciden PLC'ye geri besleme alınabilmesi için gereklidir. Sistem kontrolü PLC'nin dijital girişlerinden veya HMI ile bit hafıza alanlarından yapılmaktadır. PWM sinyalleri için PLC'nin hızlı çıkışlarından biri olan (Q0.0) kullanılmaktadır. Referans veri girişi ve anlık frekansın izlenebilmesi için word ve double word boyutunda hafıza alanlarından yararlanılmaktadır. Ayrıca sayısal dönüşümler için matematiksel fonksiyonlar, PLL takibi için alt programlar, karşılaştırma komutları, zamanlayıcılar, sayıcılar, geri besleme için analog girişler vb. kullanılmaktadır.

Şekil 5.10' da evirici kontrolü için PLC' den alınan PWM sinyali ve sürücü çıkışındaki sinyaller görülmektedir. Sistem PLC kontrollü olarak, sürücü çıkış sinyalleri ve ölü zaman ayarı test edilmiştir.



Şekil 5.10. PWM giriş sinyali ve sürücü çıkış sinyalleri (-- PLC çıkışındaki PWM, -- Sürücü çıkışı HO -- Sürücü çıkışı LO).

5.1.5. HMI

HMI (**H**uman **M**achine **I**nterface), PLC sistemleri kullanılarak gerçekleştirilmiş otomasyon sistemi ile kullanıcı arasında etkileşim sağlayan ünedir. Çoğunlukla operatör paneli olarak ifade edilmektedir. Bir HMI panelin temel görevi operatörden aldığı emirleri otomasyon sistemine iletmek, otomasyon sisteminden aldığı proses verilerini de ekranında görüntülemektir.

Panel ve PLC arasındaki haberleşme için RS232, RS485 veya ethernet bağlantısı kullanılabilir. Her marka kendi ürünlerinde bir veya daha fazla sayıda bağlantı türünü desteklemektedir ancak HMI panellerin birçoğu farklı markalara ait PLC'ler ile de haberleşebilmektedir.

Bu tez çalışmada universal özellikte farklı PLC marka ve modelleri ile kullanılabilen HMI panel, sistemin çalışmasına ve durdurulmasına, referans çalışma frekansının girilmesine ve anlık frekans izlenmesine olanak sağlayacak biçimde ArgusSoft yazılımı ile programlanmıştır.

5.1.6. Akım Sensörü

İndüksiyon ısıtma sisteminde PLC ile PLL sağlamak için geri bildirim ihtiyacı duyulmaktadır. Bu amaçla çalışmada, indüksiyon bobininden geçen akımın geri bildirim için yüksek frekans transformatörünün primerine seri bağlı, üzerinden geçen akımla doğru orantılı gerilim üreten ACS715 akım sensörü kullanılmaktadır. Akım sensörünün çıkışından alınan gerilim PLC'nin analog girişine geri besleme olarak verilmektedir.

5.1.7. Rezonans Kondansatörü

Evirici rezonans devresi endüktans ve kondansatörden C oluşmaktadır. Dönüştürücünün rezonans frekansı esas olarak eşdeğer endüktans (L_e) ve seri kondansatör kapasitesi (C) tarafından belirlenir. Yüksek frekans harmonikleri kare dalga içerir, L_e - C filtresi ile bu harmonikler süzülür [51]. Uygulama için rezonans kondansatörü olarak eşdeğer kapasitesi $0,166\mu\text{F}$ olan seri bağlı $6 \times 1\mu\text{F}$ kondansatör kullanılmıştır.

5.1.8. Yüksek Frekans Transformatörü

Evirici devresinde ferit nüve üzerine sarılmış dönüştürme oranı 30/1 olan yüksek frekans transformatörü (YFT) kullanılmıştır. YFT'nün primeri litz telinden, sekonderi 6 mm çaplı bakır borudan imal edilmiştir. YFT'nün primeri ve rezonans kondansatörleri seri bağlanmıştır. Şekil 5.11'de YFT görülmektedir.



Şekil 5.11. Yüksek frekans transformatörü.

5.1.9. İndüksiyon Bobini

İndüksiyon bobin tasarımı genellikle deneyimlere dayanır ancak göz önünde bulundurulması gereken durumlar söz konusudur. Bunlardan bazıları aşağıda verilmektedir [7].

1. Isıtılacak malzeme bobine olabilecek en yakın mesafede olmalıdır.
2. Manyetik akı çizgileri bobinin merkezinde birbirine yaklaşır ve burada maksimum ısınma söz konusudur.
3. Manyetik akı bobin sarımlarına yakın noktalarda yoğunlaşmakta ve uzaklaştıkça azalmaktadır.
4. Bobin sarımlarını bağlantı noktalarında yan manyetik alan daha zayıftır. Bobinin sarım sayısı arttıkça bu durumun önemi azalır.
5. Bobin, bobin içindeki manyetik alanın azalmasını engelleyecek şekilde tasarlanmalıdır.



Şekil 5.12. İndüksiyon bobinleri.

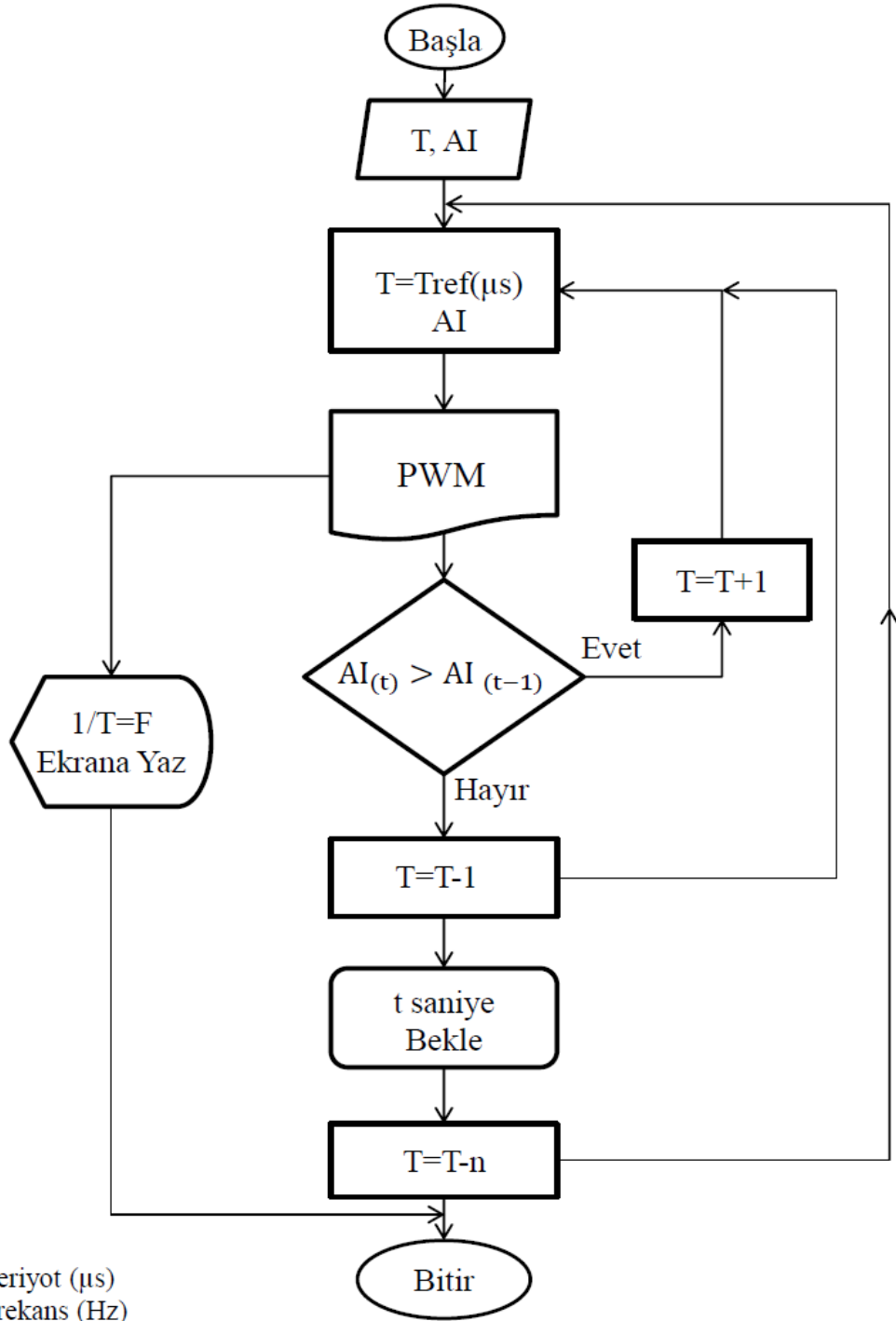
Isıtmak istenen iş parçasına göre çalışmalar sırasında değişik şekillerde bobin uygulamaları yapılmıştır (Şekil 5.12). Çalışmalarda iş parçasının ısısından ve yüksek akımda bobinin kendi direnci nedeni ile ısınmasından dolayı, bakır boru indüksiyon bobininin içinden su geçirilebilecek Şekil 5.13’ deki su soğutmalı bobin tasarlanmıştır.



Şekil 5.13. Uygulama için tasarlanmış indüksiyon bobini.

5.2. PLC İLE PLL PROGRAMI VE ALGORİTMASI

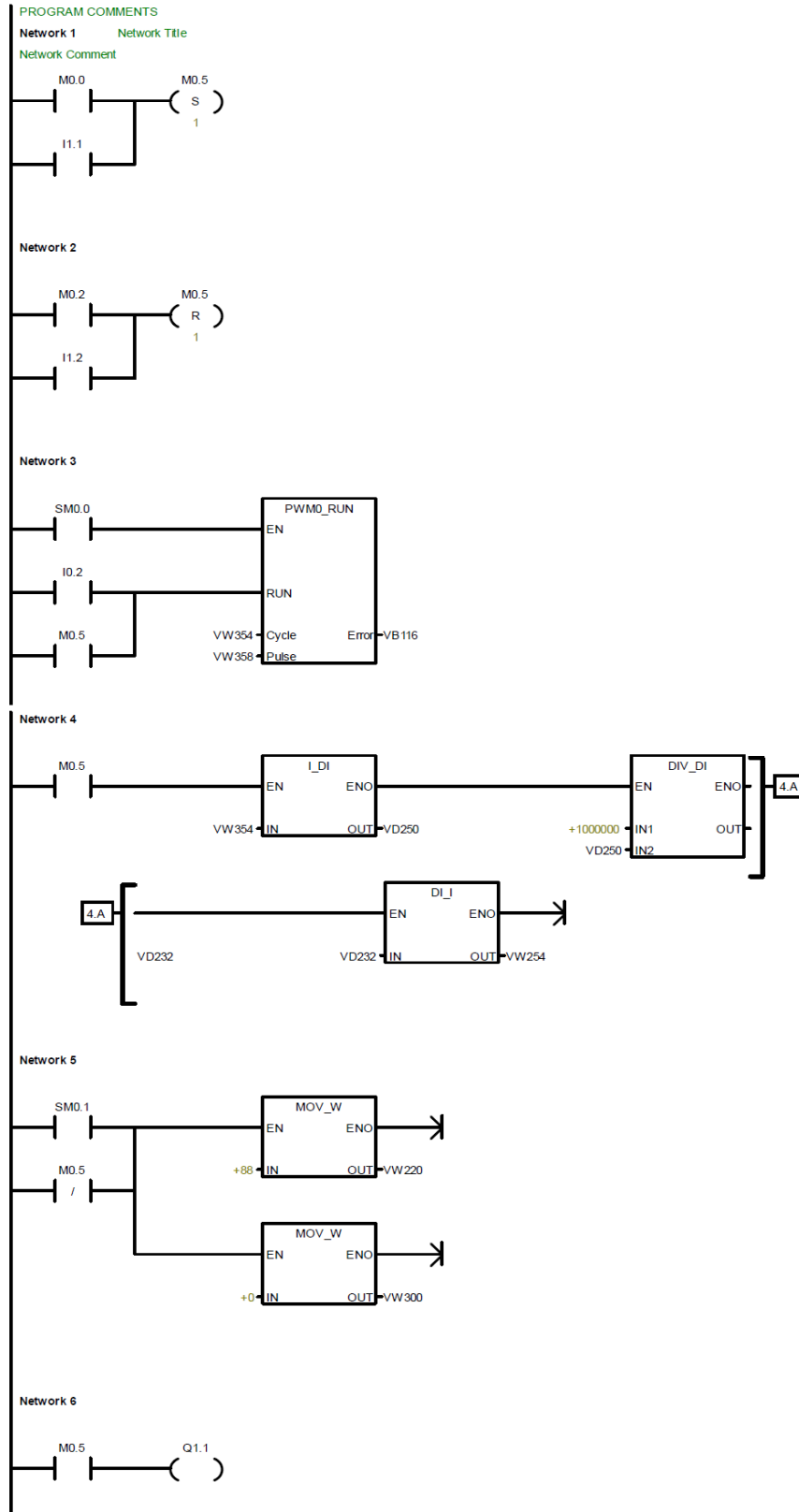
PLL sağlamak amacıyla, Siemens S7 200 PLC’de PLL için program yazılmıştır. PLC’ de PLL kontrol algoritması için, rezonans devresinden geçen akım, akım sensörü ile algılanmıştır. Akım bilgisi analog gerilim değeri olarak PLC’ nin analog girişine girilmiştir. Akımın değişimi ile değişen analog gerilim değerine göre PLC %50 doluluk oranında PWM üretmektedir. PLC ile sadece analog akım sensörü kullanılarak rezonans takibi, başka ek bir donanıma ihtiyaç duymadan yazılımla sağlanmaktadır. PLC de oluşturulan PLL algoritması Şekil 5.14’ de görülmektedir.



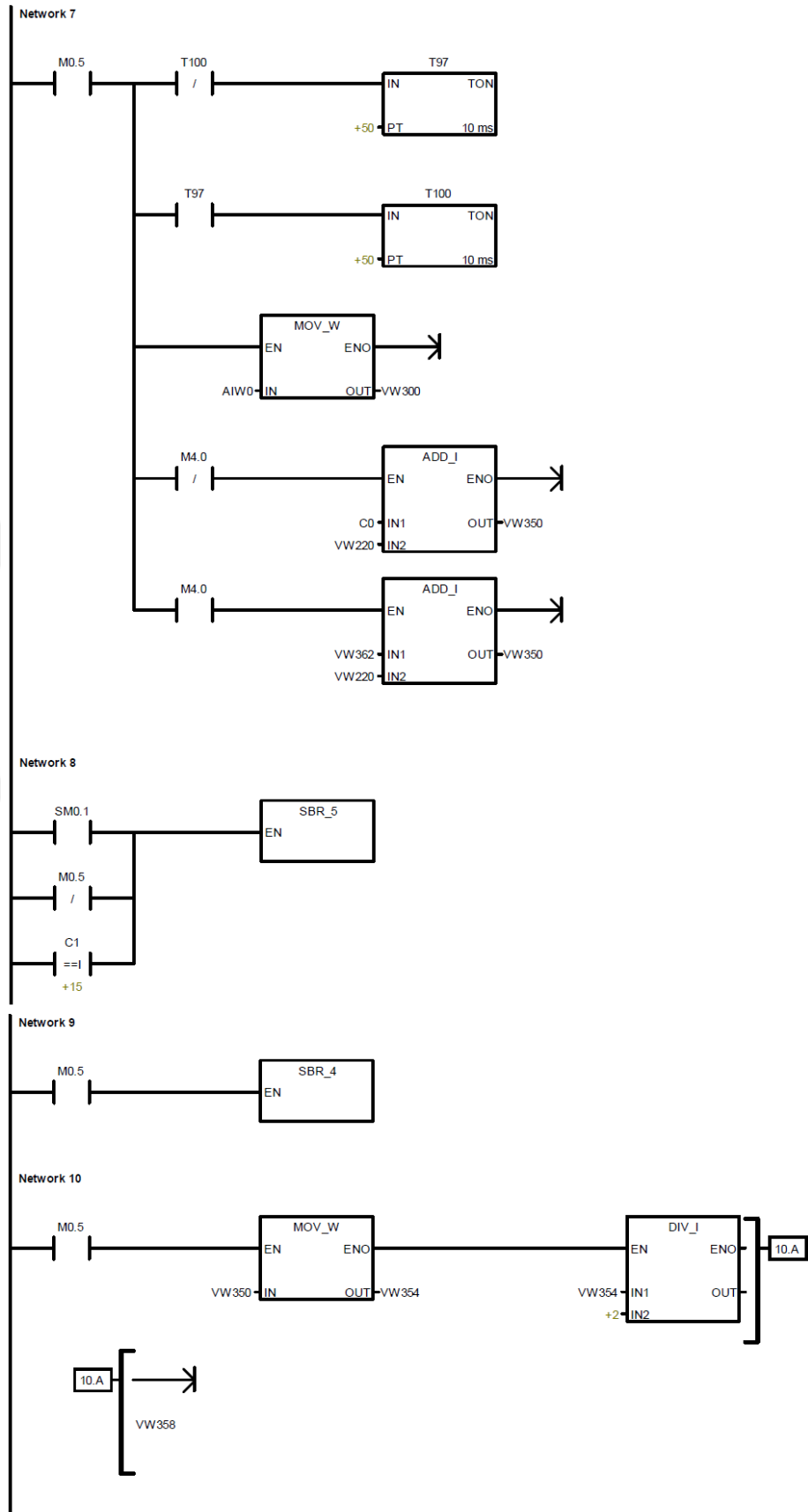
Şekil 5.14. PLC PLL algoritması.

Oluşturulan kontrol algoritması ile PLC, D sınıfı seri rezonans eviricide devre akımı tepe değerini izleyerek rezonans frekansını yakalamaktadır.

PLC’ de PLL programının bir bölümü Şekil 5.15’ de verilmektedir.



Şekil 5.15. PLC’de PLL programı.



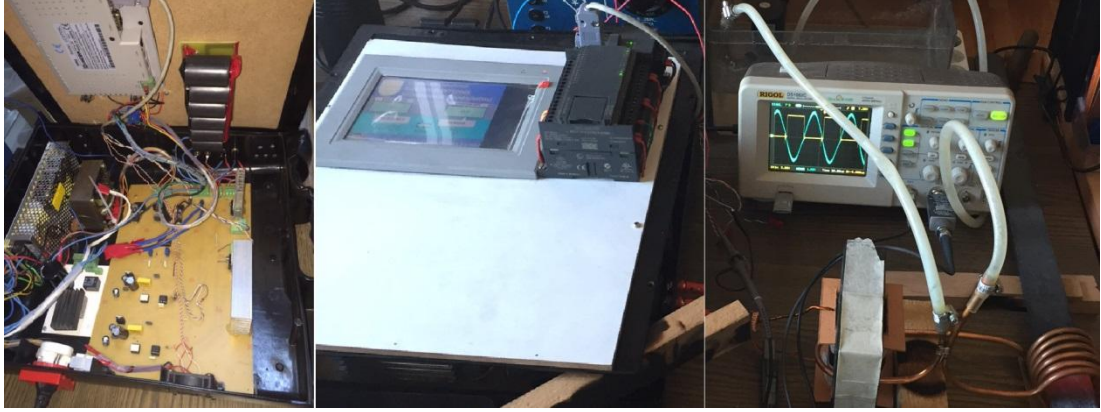
Şekil 5.15. (devam ediyor).

PLC' de program indüksiyon ısıtma sistemi için referans çalışma frekansı ile HMI' den başlatılmaktadır. Başlangıç frekansı rezonans frekansından büyük seçilir. Program referans değerini rezonans frekansına doğru kademe kademe yaklaştırılır $f_a > f_r$. Bu sırada devre akımı rezonansa yaklaştıkça artmaktadır. Artan devre akımı ile aynı zamanda akım sensöründen PLC' ye gelen analog gerilim değeri de artmaktadır. Rezonansa ulaşıldığı anda akım ve dolayısıyla analog değer maksimumdur $f_a = f_r$. Program bir sonraki adıma geçtiğinde akım azalır. PLC akım sensöründen gelen analog gerilim değeri ile akımın azaldığı bilgisini alır. Bu bilgi ile PLC çalışma frekansını günceller, bu durumda f_a, f_r 'ye eşittir. Böylece tam rezonans frekansında çalışma gerçekleştirilir. İhtiyaç durumuna göre yumuşak anahtarlamının gerçekleştirilebildiği rezonans frekansının biraz üzerinde düşük anahtarlama kayıplı çalışma şartları da oluşturulabilir. Bu çalışma frekansı ile sistem bir süre çalışmaktadır.

Belirlenen algoritma ile iş parçası bir müddet ısıtılır. Isınma ile iş parçasının ve indüksiyon bobininin eşdeğer devre parametreleri de değişmektedir. Değişim sistemin endüktansını dolayısı ile rezonans frekansını da değiştirmektedir. Rezonans frekansı ile iş parçasının sıcaklığı ters orantılı olarak değişmektedir. İş parçası ısındıkça rezonans frekansı azalmaktadır. Hali hazırdaki çalışma anındaki anahtarlama frekansından uzaklaşmaktadır. Bu nedenle güncel çalışma frekansı için, belirlenen aralıklarla PLC programı PLL çalışmayı yukarıda açıklandığı gibi periyodik olarak tekrarlamaktadır. İş parçası yeterli ısıya ulaştığında indüksiyon ısıtma sistemi, HMI üzerindeki STOP butonu ile durdurulmaktadır. Deneysel çalışmalar PLC ile PLL kontrollü rezonans takibi yapıldığını göstermektedir.

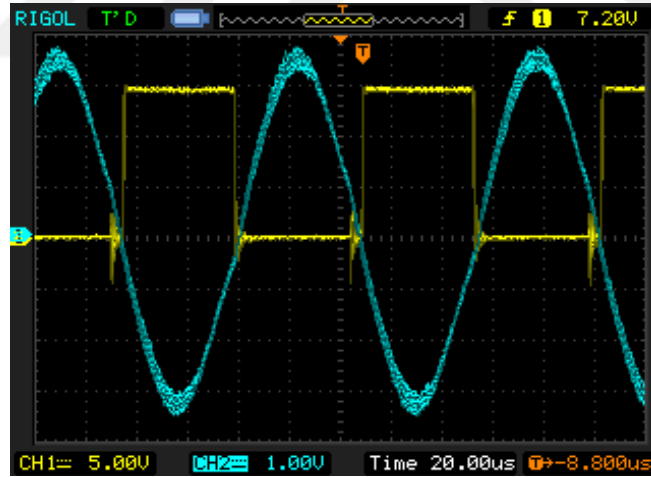
5.3. İNDÜKSİYON ISITMA SİSTEMİNİN PLC İLE PLL KONTROLLÜ ÇALIŞMASI

Çalışmalar neticesinde yukarıda açıklanan tüm donanımlar bir araya getirilmiştir. Şekil 5.16' da indüksiyon ısıtma sistemi görülmektedir. İndüksiyon ısıtma sistemi PLC ile PLL kontrollü olarak çalıştırılmıştır.



Şekil 5.16. PLC ile PLL kontrollü indüksiyon ısıtma sistemi.

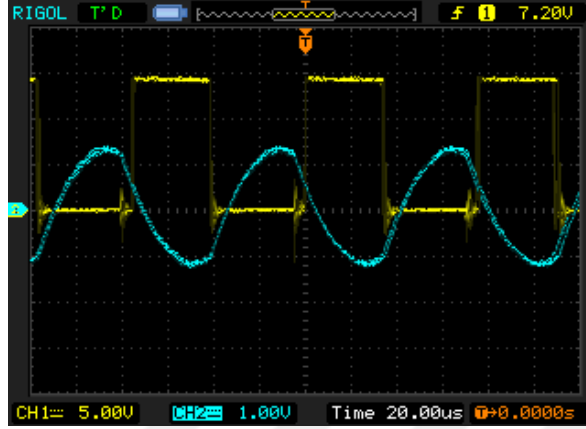
Devre 220V AC gerilimin doğrultulup filtre edilmesi ile elde edilmiş 311 V DC giriş gerilimi ile sistem rezonans frekansında ($f_r = 10.8 \text{ kHz}$) test edilmiştir. Şekil 5.17’ de anahtarlama sinyali ile devre akımı test değerleri incelenmiştir. Akım sinyali, P602 AC Current Probe kullanılarak 2mA/mV kademesinde, $1 \text{ V} \equiv 2 \text{ A}$ olarak ölçülmüştür.



Şekil 5.17. PLC ile PLL kontrollü indüksiyon ısıtma sisteminin çalışması, anahtarlama ve devre akımı test sinyalleri ($CH1 = 5 \text{ V/div}$, $CH2 = 2 \text{ A/div}$).

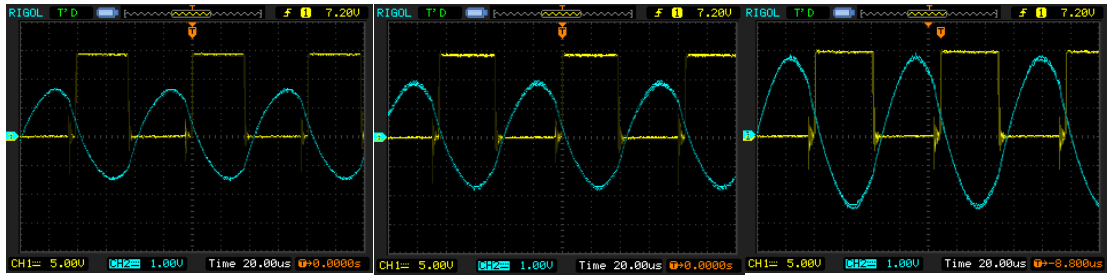
PLC ile PLL kontrollü indüksiyon ısıtma sistemi HMI panel üzerinden sistem başlatılmadan önce çalışma frekansı $f_a \gg f_r$ olacak şekilde periyod değeri girilerek veya daha önceden belirtilen değer ile sistem çalıştırılmaktadır. Bu anda anahtarlama frekansı rezonans frekansının çok üzerinde olduğu için yük akımı oldukça düşüktür.

Bu durum Şekil 5.18’ de görülmektedir. Bu çalışma durumunda çalışma frekansı 15 kHz’ dir ve akımın tepe değeri 2.4A olmaktadır.



Şekil 5.18. $f_a \gg f_r$ ($f_a = 15 \text{ kHz}$, $I_{max} = 2,4 \text{ A}$).

PLC PLL programı ile anahtarlama frekansını kademe kademe azaltır. Anahtarlama frekansı sistemin o anki rezonans frekansına yaklaştıkça akımın genliği yükselmektedir. Şekil 5.19’da 14 kHz, 13 kHz ve 12kHz frekansları için tetikleme gerilimi ve evirici akım dalga şekilleri verilmiştir. Akımın tepe değeri sırası ile 3,2 A, 3,9 A ve 5,7 A olmaktadır. Buna göre anahtarlama frekansı kademe kademe düşürüldükçe akımın tepe değeri de yükselmektedir.



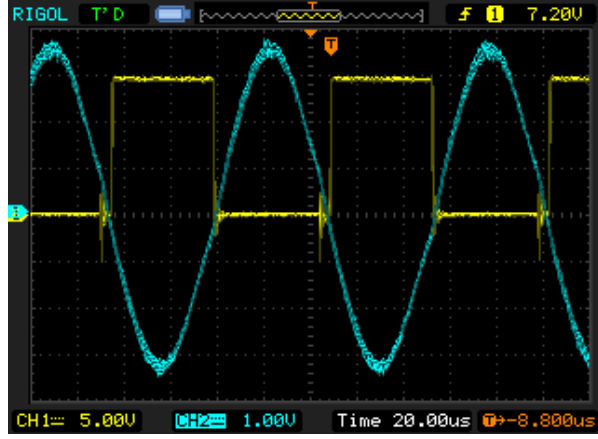
$f_a = 14 \text{ kHz}$

$f_a = 13 \text{ kHz}$

$f_a = 12 \text{ kHz}$

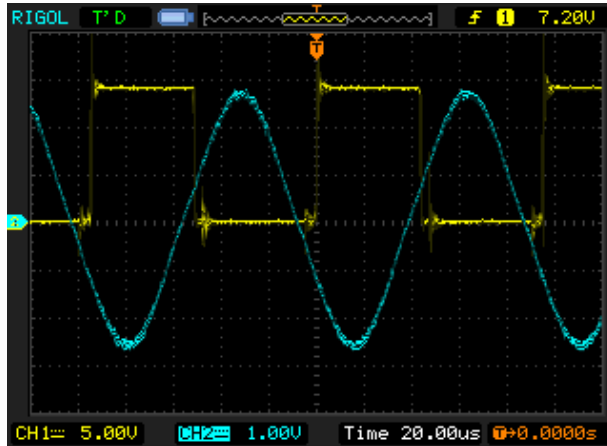
Şekil 5.19. $f_a > f_r$ çalışma durumu.

PLC analog girişine gelen akım bilgisi devreden maksimum akım çekilene kadar yani rezonans frekansına kadar anahtarlama frekansı azaltılmaktadır. Şekil 5.20’ de $f_a = f_r$ olduğunda devreden çekilen akım maksimumdur (7,04 A) ve rezonans sağlanmaktadır.



Şekil 5.20. $f_a = f_r$ ($f_a = 10,8 \text{ kHz}$).

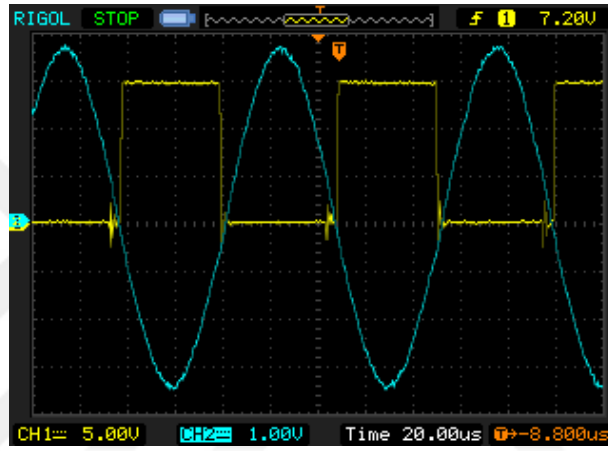
Sistemin çalışmaya başlamasından itibaren f_a kademe kademe azaltılırken akım kademe kademe artmaktadır. Ancak f_a azaltılmaya devam edildiğinde rezonans akımına ulaşıldıktan sonra akım da azalmaya başlar. Şekil 5.21’ de $f_a < f_r$ durumu söz konusudur. Daha önce de belirtildiği üzere devre kapasitif özellikte çalışmaya başlar. Bu durumda yumuşak anahtarlama koşulları bozulacaktır. Dolayısıyla rezonans frekansının altında çalışma tercih edilmemektedir.



Şekil 5.21. $f_a < f_r$ ($f_a = 10 \text{ kHz}$).

PLC akımının azaldığını algıladığı anda f_a 'yı birkaç kademe artırır. Şekil 5.20’deki rezonans durumunda veya istenirse anahtarlama şartları göz önünde bulundurularak Şekil 5.22’ deki yaklaşık rezonans $f_a > f_r$ durumunda sistem bir süre çalıştırılır. Bu çalışma durumu ısıtma süresince devam ettirilir. Fakat belirli aralıklarla frekans kontrolü gerçekleştirilir.

İş parçası ısındıkça devre parametreleri de değişmektedir. Bu durumda rezonans frekansı değeri de sabit bir değer olarak kalmamaktadır. Değişim ile $f_a - f_r$ arasında bir fark meydana gelmektedir. Farkın artması ile devreden çekilen akım azalmakta ve sistemin ısıtma performansı düşmektedir. Bu nedenle PLC ile PLL kontrolü belirlenen aralıklarda periyodik olarak tekrarlamakta, yapılan kontrol ile sistemin çalışma frekansı güncellenmektedir. İş parçası istenilen sıcaklığı ulaştırıldığında sistem durdurulur. Şekil 5.22, rezonans frekansının biraz üstü için gerçekleştirilmiş çalışma durumu için osiloskop verisini göstermektedir.

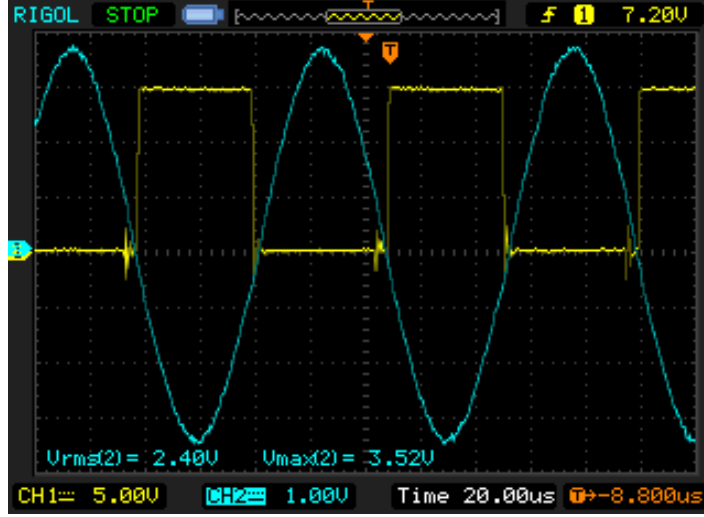


Şekil 5.22. $f_a > f_r$ ($f_a = 11 \text{ kHz}$).

5.4. DENEYSEL SONUÇLAR

PLC ile PLL kontrollü indüksiyon ısıtma sistemi deneysel çalışmaları laboratuvar ortamında ve sistemin rezonans frekans değeri için alınmıştır. Elde edilen deneysel bulgular analiz ve simülasyon sonuçları ile bir çizelge üzerinde karşılaştırılmıştır.

Şekil 5.23'de anahtarlama sinyali ve YFT'nin primerinden geçen akım görülmektedir. Bu akımın tepe değeri önceki bölümlerde I_{pm} olarak ifade edilmektedir. Ölçümler için kullanılan akım probu osiloskop ekranında $1 \text{ V} \equiv 2 \text{ A}$ 'e denklığıne göre, $CH2 = 2 \text{ A/div}$ iken $I_{pm} = 7,04 \text{ A}$, $I_p = 4,97 \text{ A}$ 'dir. Dönüştürme oranına göre; sekonder akımı yaklaşık olarak 149 A hesaplanmıştır.



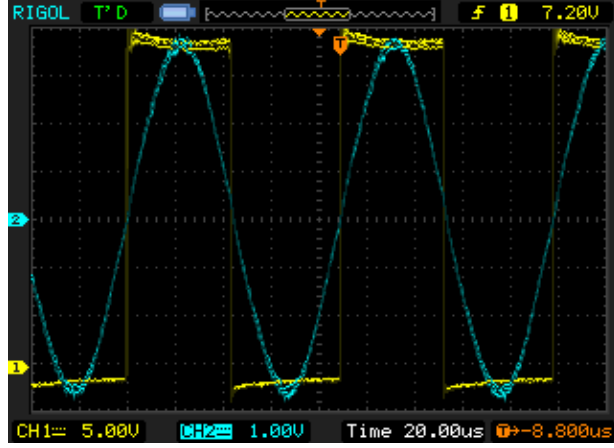
Şekil 5.23. PLC ile PLL kontrollü indüksiyon ısıtma sistemi YFT primer akımı ($CH1 = 5 V/div$, $CH2 = 2 A/div$).

Primer ve sekonder akımı deneysel verileri düşük frekans AC devrelerde kullanılan pens ampermetre kullanılarak da alınmıştır. Şekil 5.24’ de pens ampermetre ile ölçülen I_p ve I_s akımları görülmektedir.



Şekil 5.24. YFT primer ve sekonder akımları.

Evirici DC 311 V besleme geriliminde rezonans frekansında alt MOSFET $D - S$ uçları arasındaki gerilimin, prob x10 kademesinde iken yapılan ölçüm sonucu Şekil 5.25’ de görülmektedir.



Şekil 5.25. Alt MOSFET $D - S$ arasındaki gerilim ve I_{pm} dalga formları($CH1 = 50 V/div$, $CH2 = 2 A/div$).

Deneysel çalışmalarda sonucunda elde edilen veriler Çizelge 5.1’de listelenmiştir.

Çizelge 5.1. Deneysel çalışmalarda alınan değerler.

Evirici Akımı (A)		
Tepe Akım Değeri	RMS Akım Değerleri	
I_{pm}	I_p	I_s
7,04	4,97	149

Deneysel çalışmalar sırasında farklı iş parçaları üzerinde işlemler gerçekleştirilmiş ve netice olarak Şekil 5.26’ da görülen sıcaklık değerlerine ulaşılmıştır.



Şekil 5.26. Deneysel çalışmalarda ulaşılan sıcaklıklar.

5.5. DENEYSSEL SONUÇLARIN SİMÜLASYON VE ANALİZ SONUÇLARI İLE KARŞILAŞTIRILMASI

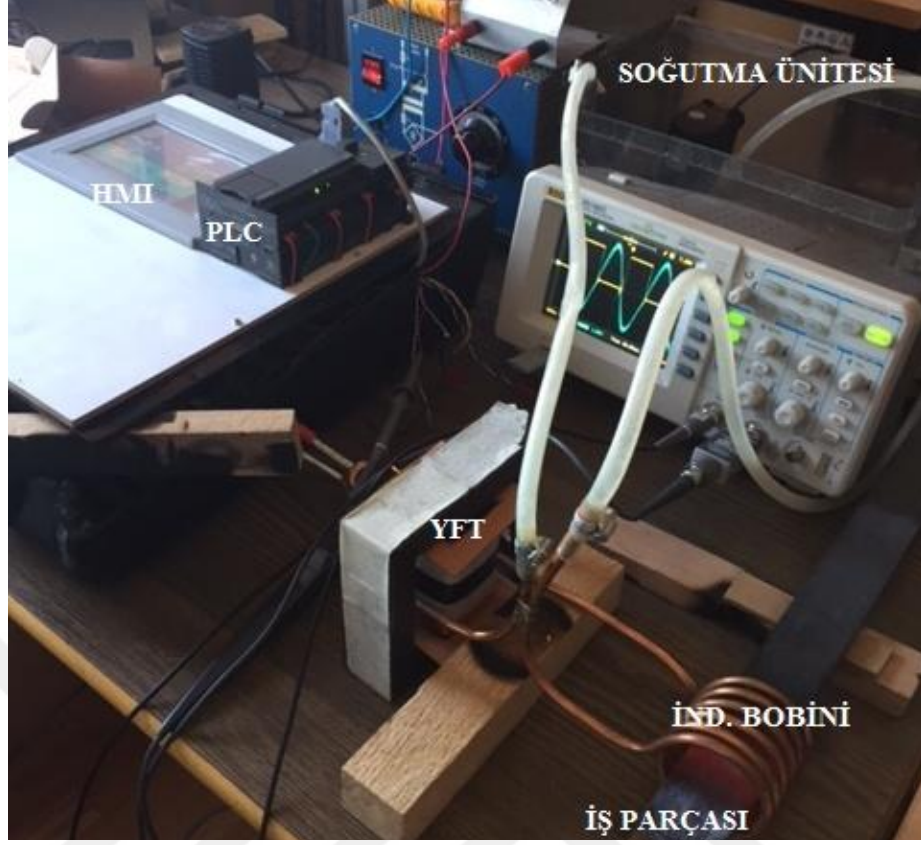
Analiz ve simülasyon sonuçlarını doğrulamak için deneysel çalışmalar sonucunda elde edilen veriler Çizelge 5.2.'de karşılaştırılmıştır. Sonuçların oldukça yakın olduğu görülmektedir. Farklılıkların nedenleri hesaplamalarda dikkate alınmayan kusurlar, çalışmada kullanılan devre elemanlarının, iletkenlerin ideal olmaması AC giriş gerilimindeki dalgalanmalar, DC giriş gerilimindeki değişimler ve ölçü aletlerinin hata oranları vb. etkenlerdir.

Çizelge 5.2. Verilerin karşılaştırılması.

		Analiz Sonuçları	Simülasyon Sonuçları	Deneysel Sonuçlar
Tepe Akım Değerleri	$I_{pm} (A)$	7,07	7,08	7,04
RMS Akım Değerleri	$I_p (A)$	5	4,94	4,97
	$I_s (A)$	150	148	149

5.6. SİSTEMİN GENEL GÖRÜNÜMÜ

Sistem genel olarak Şekil 5.27'de görülmektedir. Deneysel çalışmaların yapılabilmesi ve verilerin sağlıklı alınabilmesi için osiloskop, akım probu, DC ampermetre, multimetre, RLC metre vb. ölçü aletlerinden yararlanılmıştır.



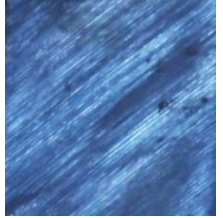


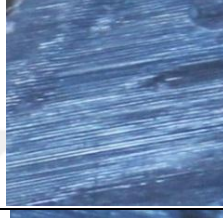


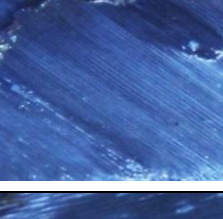
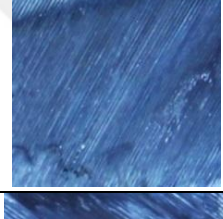
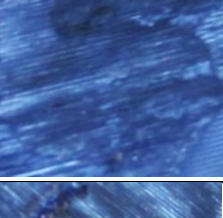
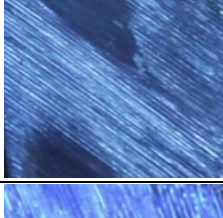
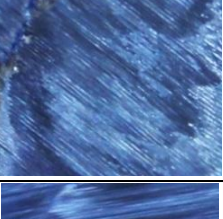

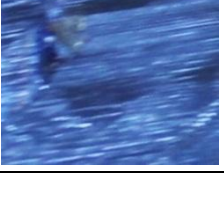
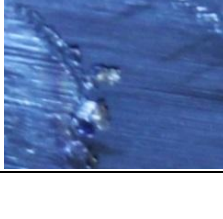
Şekil 5.27. Sistemin genel görünümü.

5.7. İŞ PARÇASININ KESİLMESİ

İş parçasının 16-500 °C arasında kesme işlemi daire testere ile değişik sıcaklıklarda yapılmıştır. Çizelge5.3' de kesilen parçaların yüzey görüntüleri incelenmiş buna göre, yüksek sıcaklıklarda yüzey deformasyonu, düşük sıcaklıklarda kesim yapılanlara göre daha az olduğu görülmüştür. Çapaklanma ve kesim sürelerinin yakın olduğu görülmüştür.

Daire testere ile 500 °C'lerde kolay, hızlı kesim yapılabilecektir, düşük sıcaklıklarda ise kaliteli bir kesme ve yüzey deformasyonunu önlemek için daha uzun süreli kesim işlemi gerektirmektedir. 500 °C'lerdeki sıcaklıklar iş parçasını yumuşattığı düşünülerek giyotin makası ile kesme işlemini kolaylaştıracağı ve kesim süresini kısaltacağı ön görülmektedir.

Çizelge 5.3. İş parçası kesim deney sonuçları.

Sıcaklık (°C)	Isınma Süresi (Dk)	Kesim süresi (Sn)	Çapak Oluşumu			Yüzey Şekli (1)	Yüzey Şekli (2)
			Az	Orta	Çok		
500	10	5,3	X				
400	8	5,7	X				
300	6	4,8		X			
200	4	4,9		X			
100	2	4,3			X		
40	0,5	4,3			X		
16	-	4,8			X		

Yapılan kesimler sonucunda kesim yüzeyleri yüksek çözünürlüklü fotoğraf makinası ile resimleri çekilmiştir. Çizelge 5.3, her iki yüzeyden kesitler sunmaktadır.



BÖLÜM 6

SONUÇ VE ÖNERİLER

Bu tez çalışmasında indüksiyon ısıtma sistemi endüstriyel bir cihaz olan PLC ile PLL kontrollü olarak çalıştırılmıştır. PLC ek bir donanıma ihtiyaç duymadan analog akım sensöründen evirici akımını geri besleme olarak almaktadır. Analog geri besleme alınan PLC' de gerekli yazılım yapılarak PLL kontrol gerçekleştirilmiştir. Sistem HMI panel üzerinden çalıştırılmakta ve durdurulmaktadır. Ayrıca HMI, referans frekans için periyod değerinin girilebilmesine ve frekansın anlık izlenebilmesine imkân tanımaktadır.

Evirici devresinde güç anahtarı olarak MOSFET kullanılmıştır. Rezonans devresi bakır borudan imal edilmiş 6 sarımlı su soğutmalı indüksiyon bobini, yüksek frekans transformatörü ve rezonans kondansatörlerinden oluşmaktadır.

Deneysel çalışmalarda $40mm \times 10mm \times 100mm$ boyutlarında demir iş parçası ısıtılmıştır. Isıtılacak demir iş parçasının boyutlarına ve şekline göre (10-12KHz) aralığındaki frekanslarda çalışılmış, ısıtma 3-6 dakikalık süreler arasında gerçekleşmiştir. Bu çalışmalar neticesinde $600\text{ }^{\circ}\text{C}$ ' ye kadar ısıtma uygulamaları yapılmıştır. Yapılan farklı çalışma süreleri, iş parçaları ve ısıtma sıcaklıklarında, PLL kontrol algoritmasının sağlıklı çalıştığı ve sistemin rezonans frekansını otomatik olarak takip ettiği gözlemlenmiştir. Bu sebeple uygulaması gerçekleştirilen indüksiyon ısıtıcı, farklı boyutlardaki indüksiyon bobinleri ve/veya iş parçalarının ısıtmasına uygundur. Uygulaması gerçekleştirilen prototip ısıtıcı endüstriyel olarak metallerin ısıtması işlemlerinde kullanılabilir.

PLC' de gerçekleştirilen PLL kontrol ile, indüksiyon ısıtma sisteminin çalışma akımının rezonans anında maksimum olduğu prensibinden yola çıkarak frekans kontrolü yapılmıştır. PLC, belirli aralıklarla anahtarlama frekansını güncelleyerek

sistemin rezonansa kalmasını sağlamakta ve sıfır akım anahtarlama koşullarını koruyarak yüksek performans sunmaktadır. Bu da hedef sıcaklıklara daha kısa sürede ulaşmayı ve yumuşak anahtarlama koşullarında çalışmayı sağlamaktadır.

PLC ile PLL kontrollü indüksiyon ısıtma uygulaması, farklı gereksinimlere eviricinin daha iyi uyumu, kolay uygulama ve hızlı tasarım imkânları açısından kullanım esnekliği sağlayan bir prototip ortaya koymaktadır.

Çalışmada kullanılan PLC ilk kurulum maliyetlerini artırmıştır. Ancak endüstriyel özellikleri sebebiyle PLC, indüksiyon ısıtma sistemlerinin kontrolü için büyük avantaj sağlayacaktır. Sistem, ilave bir ısı sensörü ile kapalı ve açık çevrim sıcak kontrollü olarak geliştirilebilir.

Ayrıca ileriki çalışmalarda sıcaklık sensörlü veya farklı kontrol yöntemleri kullanılarak PLC kontrollü indüksiyon ısıtma uygulamaları gerçekleştirilebilir. Hatta PLL parametreleri ayarlanabilen entegre program olarak PLC' ye veya PLC kütüphanesine eklenebilir.

KAYNAKLAR

1. Öncü, S. ve Sazak, B. S., “E sınıfı invertörlü mutfak tipi bir indüksiyon ısıtma uygulaması”, *Journal Of Engineering And Natural Sciences*, 2: 68-73 (2004).
2. Tudbury, C. A., “Electromagnetics in induction heating”, *IEEE Transaction on Magnetics* 10 (3): 694-697 (1974).
3. Zinn, S. and Semiatin, S. L., “Elements of induction heating - design, control, and applications”, *ASM International, Electronic Power Research Institute*, Metals Park, Ohio, USA, v, ix, 1, 5, 6, 9, 10, 11, 160, (1988).
4. Okuno, A., Hayashi, M., Kawano, H., Yasutsune, H. and Nakaoka, M., “Series resonant frequency tracking-based high-frequency inverter using static induction power transistors for electromagnetic industrial induction metal surface heating and feasible evaluations”, *Power Electronics and Drive Systems, 1995. Proceedings of 1995 International Conference on*, 1: 212-217 (1995).
5. Domínguez, A., Barragan, L. A., Otin, A., Puyal, D., Jimenez, O. and Navarro, D., “Resonant inverter sharing resonant capacitor for domestic induction heating”, *Applied Power Electronics Conference and Exposition (APEC), 2013 Twenty-Eighth Annual IEEE* Long Beach, CA, USA, 2563 - 2568 (2014).
6. Zhu, X., Peng, Y., Shi, X. and Li, H., “200 kW 400 kHz high frequency inverter for induction heating application” *2005 International Conference on Power Electronics and Drives Systems*, Kuala Lumpur, 1: 624 - 627 (2005).
7. Kızılkaya, İ., “İndüksiyon ısıtma prensibi ile çalışan mikrokontrolcü denetimli bir sıvı ısıtıcısı tasarımı”, Yüksek Lisans Tezi, *Fen Bilimleri Enstitüsü Makine Eğitimi Anabilim Dalı*, Kütahya (2010).
8. Bal, G., Öncü, S. Ve Börekci, S., “Kendinden tetiklemeli indüksiyon ısıtıcı tasarımı ve deneysel uygulaması”, *Gazi Üniversitesi Mühendislik Mimarlık Fakültesi Dergisi* 26 (4): 771-776, 2011, Ankara (2011).
9. Burca, A., Trip, D. N. And Leuca, T., “Considerations on the design of a low power induction heating system”, *Fundamentals of Electrical Engineering (ISFEE), 2014 International Symposium on*, Bucharest, 1 - 4 (2014).
10. Jimenez, O., Lucía, O., Urriza, I., Barragan, L. A. and Navarro, D., “Power measurement for resonant power converters applied to induction heating applications” *IEEE Transactions on Power Electronics*, 29 (12): 6779 – 6788 (2014).
11. Ali, M., Srinivasu, R. and Jyothsna, T. R. “Phase locked loop control of 50-150 kHz half bridge resonant type inverter for induction heating applications”,

R.Srinivasu et al Int. *R.Srinivasu et al Int. Journal of Engineering Research and Applications*, 4 (8): 21-27 (2014).

12. Li, H., Li, Y. And Peng, Y., “FPGA-based all digital phase-locked loop controlled induction heating power supply operating at optimized ZVS mode”, *TENCON 2006 - 2006 IEEE Region 10 Conference*, Hong Kong, 1-4 (2006).
13. Ünver H. M., “İndüksiyon ocaklarının güç kaynaklarında kullanılan eviricilerin plc ile denetiminin tasarımı ve gerçekleştirilmesi”, *Elektrik -Elektronik - Bilgisayar Mühendisliği 10. Ulusal Kongresi*, 181-184 (2005).
14. Cora, A. ve Eroğlu, Y. S., “Endüksiyonlu ısıtma ve endüksiyon fırınlarının tasarımı”, *Elektrik-Elektronik-Bilgisayar Mühendisliği 8. Ulusal Kongresi*, Gaziantep, 723-726 (1999).
15. Egan, L.R., Furlani, E.P., “A computer simulation of an induction heating system”, *IEEE Transactions on Magnetism*, 27: 4343-4354 (1991).
16. Luo, F. L., Ye, H., Rashid, M.,” Digital power electronics and applications”, *Elsevier Academic Press*, California, USA 22-33 (2005).
17. Segura, G. M.,”Induction heating converter's design, control and modeling applied to continuous wire heating”, Doctoral Thesis,*Universitat Politècnica de Catalunya, Departament d'Enginyeria Elèctrica*, Barcelona, June (2012).
18. Davies, J., Induction Heating Handbook, *Mcgraw-Hill Book Company*, Maidenhead, 426 p. (1979).
19. Chen X. and Jin J., “HTS resonant technology and its application on induction heating”, *Applied Superconductivity and Electromagnetic Devices, 2009. ASEMD 2009. International Conference*, Chengdu, 189 - 192 (2009).
20. Çetin, S. “Bir fazlı bir indüksiyon ısıtma sistemi analizi ve dizaynı” ,Yüksek Lisans Tezi, *Pamukkale Üniversitesi Fen Bilimleri Enstitüsü*, Denizli (2005)
21. Forest, F., Labouré, E., Costa, F. and Gaspard, J. Y., “Principle of a multi-load/single converter system for low power induction heating,” *IEEE Transactions on Power Electronics*, 15 (2): 223–230 (2000).
22. Kamli, M., Yamamoto, S. and Abe M., “A 50-150 kHz half-bridge inverter for induction heating applications”, *IEEE Transactions On Industrial Electronics*, Vol. 43, No. 1, 163-172 (1996).
23. Rudnev, V.,“Maximizing flexibility, controlability and effectiveness of induction heating systems”, *Proceedings of the XV International Conference* Samara, Russia, 17-23 (2013).
24. Favennec, Y., Labbe, V. and Bay, F., "Induction heating processes optimization a general optimal control approach", *Journal of Computational Physics*, 68-94 (2003).

25. Inducto therm İndüksiyon Sistemleri San. A.Ş., *Mühendis ve Makine*, 52 (613): 13,14 (2011).
26. Isobe,T., Usuki, K., Arai, N., Kitahara, T., Fukutani, K. and Shimada, R., “Variable frequency induction heating using magnetic energy recovery switch”, *2008 IEEE Power Electronics Specialists Conference*, 2139 - 2145 (2008).
27. Yıldız, M.N., “Hibrid kaynaktan beslenebilen indüksiyonla su ve bina ısıtma sisteminin tasarımı ve performans analizi”, Doktora Tezi, *Ege Üniversitesi, Fen Bilimleri Enstitüsü*, İzmir (2005).
28. Rudnev, V., Loveless, D., Cook, R. and Black, M., “Handbook of induction heating”, M. Dekker, New York, 76–97 (2003)
29. Sazak, B.S., “Design of a 500 W resonant induction heater”, Pamukkale Üniversitesi *Mühendislik Fakültesi Mühendislik Bilimleri Dergisi*, 5: 871-878 (1999).
30. Köroğlu, S. ve Sazak, B. S., “Mutfak uygulamaları için yarım köprü seri rezonans invertörlü indüksiyon ısıtma sistemi tasarımı”, *Pamukkale Üniversitesi Mühendislik Fakültesi Mühendislik Bilimleri Dergisi*, 8: 167-172 (2002).
31. Saoudi, M., Puyal, D., Bernal, C., Antón, D. and Mediano, A., “Induction cooking systems with single switch inverter using new driving techniques”, *2010 IEEE International Symposium on Industrial Electronics*, Bari, 878 – 883 (2010).
32. Chae, Y. M., Kwon, J. G., Han, S. Y. and Sung, H.H., “Development of hybrid induction heating system for laser printer”, *Journal of Power Electronics*, 6 (2): 178-185 (2006).
33. Arnosky, J., “Induction heating in the manufacture of electric motors”, *Electrical Insulation Conference and Electrical Manufacturing & Coil Winding Conference*, Cincinnati, OH, 57 - 62 (2001).
34. Man, L., Pop, O. and Tăut, A., “Packaging and thermal analysis of a power inverter for inductive heating applications”, *Design and Technology in Electronic Packaging (SIITME), 2010 IEEE 16th International Symposium*, Pitesti, 279 – 282 (2010).
35. Akkaya R. ve Anadol M.A. “Akım beslemeli paralel rezonans devreli inverter içeren bir indüksiyonlu ısıtma uygulaması” *Elektrik -Elektronik - Bilgisayar Mühendisliği 10. Ulusal Kongresi*, 156-159 (2012).
36. Guofa, L., Xiaoli, R. and Shuxiang, Y., “Development and research on a new bearing replacer based on induction heating technology”, *Consumer Electronics, Communications and Networks (CECNet), 2011 International Conference*, XianNing, 264 – 267 (2011).
37. Grajales, L, “Analysis and design of a 500 KHz seri resonant inverter for induction heating applications”, Ph.D., *State University*, Virginia, 180 (1995).

38. Maksimovic, D., Stankovic, A. M., Thottuvelil, V. J. and Verghese, G. C., “Modeling and simulation of power electronic converters”, *Proceedings of The IEEE*, 89: 898- 912 (2001).
39. Skvarenina, T. L., “The power electronics handbook”, *CRC Press*, Part:2, Chapter:5, Indiana (2002).
40. Moisseev, S., Muraoka, H., Nakamura, M., Okuno, A., Hiraki, E. and Nakaoka, M., “Zero voltage soft switching PWM high-frequency inverter using IGBT for induction heated fixing roller”, *IEE Proceedings - Electric Power Applications* 150 (2): 237 – 244 (2003).
41. Hart, D.W., “Introduction to power electronics”, *Prentice Hall*, New York, 418 p. (1997).
42. Bonsall, A., Zaki, M. and Issa, B., “Modeling and PSPICE simulation of a power resonant converter”, *Southcon Conference Record*, 270-275 (1994).
43. Yaakov, S.B. and Rahav, G., “Average modeling and simulation of series-parallel resonant converters by SPICE compatible behavioral sources”, *Applied Power Electronics Conference*, Vol.1, 116-120 (1996).
44. Namadmalan A. And Your Friends, “Current-fed parallel resonant push-pull inverter with coil flux control for induction heating applications” *Power Electronic & Drive Systems & Technologies Conference (PEDSTC), 2010 1st* Tehran, Iran, 186 - 190 (2011).
45. Sanajit, N. and Jangwanitler, A. “A series resonant inverter half bridge inverter for induction iron applications”, *IEEE PEDS 2011*, Singapore, 46-50 (2011).
46. Baxandall, P. J., “Transistor sine-wave LC oscillators, some general considerations and new developments”, *Proc. IEEE*, 13 (106): 748–758 (1959).
47. Czarkowski, D., “The power electronics handbook”, *Purdue University West Lafayette*, Indiana (2002).
48. Millán, I., Burdío, J. M., Acero, J., Lucía, O. and Llorente, S., “Series resonant inverter with selective harmonic operation applied to all-metal domestic induction heating,” *IET Power Electronics*, 4 (5): 587–592 (2011).
49. Pal, N., Member, S., Sadhu, P. K., Sinha, D. and Bandyopadhyay, A., “Selection of power semiconductor switches – a tool to reduce switching & conduction losses of high frequency hybrid resonant inverter fed induction cooker”, *International Journal of Computer and Electrical Engineering*, 3 (2): 265-270 (2011).
50. Sadhu, P. K., Jana, Chakrabarti, N. R. and Mitra, D. K. “A unique induction heated cooking appliances range using hybrid resonant converter” *Journal of Circuits, Systems and Computers*, 14 (3) (2005)

51. Anjana, M. P., Sija, G. and Eldhose, K. A., "Improved AC-AC Converter for induction heating applications", *International Journal of Electrical, Electronics and Data Communication*, 1 (2): 55-59 (2013).
52. Sadhu, P. K., Chakrabarti, R. N., Nath, N. L., Batchu, N. K., Kumari, S. and Rimjhim, K., "Analysis of a seri resonant superimposed inverter applied to induction heating", *IE(I) Journal*, 84: 214-217 (2004).
53. Kazimierczuk, M.K. and Czarkowski, D., "Resonant power converters", *John Wiley & Sons Inc.*, ISBN 0-471-04706-6, 481 p., Canada (1995).
54. Kazimierczuk, M. K., Nandakumar, T. and Wang, S., "Anlysis of series-parallel resonant converter", *IEEE Transaction of AES*, 29 (1): 88-97 (1992).
55. Choi, W.S., Park, N. J., Lee D. Y. and Hyun, D. S., "A new control scheme for Class-D inverter with induction heating jar application by constant switching frequency", *Industrial Electronics Society, 2004. IECON 2004. 30th Annual Conference of IEEE*, 1: 784 – 789 (2004).
56. Fujita, H. and Akagi, H., "Pulse-density-modulated power control of a 4 kW, 450kHz voltage-source inverter for induction melting applications", *IEEE Transactions on Industry Applications*, 32 (2): 279 - 286 (1996).
57. Zhao, Z., Peng, Y., and Li, Y., "Devices dissipation of series-resonant inverter under pulse-width phase-shift operating mode", *2010 Asia-Pacific Power and Energy Engineering Conference*, Chengdu, 1 - 4 (2010).
58. Grajales, L., Sabate, J. A., Wang, K. R., Tabisz, W. A. and Lee, F. C., "Design of a 10 kW, 500 kHz phase-shift controlled series-resonant inverter for induction heating", *Industry Applications Society Annual Meeting, 1993., Conference Record of the 1993 IEEE*, Toronto, Ont. vol.2, 843 - 849 (1993).
59. Khaled, A., Madi, A., Mohammad, E. and Abozaed, S., " Microcontroller based variable frequency power inverter", *Proceeding of the International Multi Conference of Engineers and Computer Scientists*. IMECS 2010, Vol.II, HongKong (2010).
60. Roy, M. and Sengupta, M., "Application of FPGA based PLL in a CSI fed induction heating prototype" *Power Electronics, Drives and Energy Systems (PEDES), 2014 IEEE International Conference*, Mumbai, 1 - 4 (2014).
61. Varghese, G. T., "Phase Locked Loop design as a frequency multiplier", *Department Of Electronics And Communication Engineering National Institute Of Technology, Rourkela* 7-10 (2009).
62. Asa E., "PLL kontrol tekniği ile rezonans evirici tasarımı", Yüksek Lisans Tezi *Fen Bilimleri Enstitüsü, Gazi Üniversitesi*, Ankara, (2009).
63. Kukku J., Benny. K. K., "High frequency llc resonant inverter for induction heating with asymmetrical control", *International Journal of Advanced Information Science and Technology*, 30 (30): 257-2262 (2014).

64. Bayındır N. Süha ve Ark., “Yüzey sertleştirme ve eritme için DSP tabanlı PLL kontrollü 50-100 kHz 20kW yüksek frekans endüksiyon ısıtma sistemi”, *Doğu Akdeniz Üniversitesi, EMO Bilim*, 19: 48-56 (2007).
65. Tipsuwanporn, V., Charoen, A., Numsomran, A. and Phipek, K., “A single-phase PWM inverter controlling base on PLL technique”, *SICE Annual Conference (SICE), 2011 Proceedings*, Tokyo, 1178-1183 (2011).
66. Cui, Y. L., He, K., Fan, Z. W. and Fan, H. L., “ Study on DSP-Base PLL-controlled superaudio induction heating power supply simulation”, *Proceeding of the Fourth International Conference on Machine Learning and Cybernetics*, Guangzhou, China, 2: 1082-1087 (2005).
67. Sawant, R. R. and Rao, Y. S., “A Discrete-time controller for phase shift controlled load-resonant inverter without PLL”, *Power Electronics, Drives and Energy Systems (PEDES), 2014 IEEE International Conference*, Mumbai, 1-4 (2014).
68. Zhou, L., Chen, J. and Xu, L., “The research and application of freeport communication of Siemens PLC”, *2008 International Seminar on Future BioMedical Information Engineering*, Wuhan, Hubei, 318-321 (2008).
69. Li, S. M. and Hui, Y., “Design of data acquisition system for crane electromotor on S7_300PLC”, *Automation and Instrumentatio*, China, 2010 Vol. Issue 2, 34-35 (2010)
70. AG, Siemens “Products for Totally Integrated Automation and Micro Automation”, *Catalog ST. 70*, (2011).
71. Dandan, Z., Zhiyun, Z., Meng, Y., Yue, H. and Chen, G., “Application of relay feedback auto-tuning algorithm in a liquid level PID control system”, *Intelligent Control and Automation (WCICA), 2014 11th World Congress*, Shenyang, 4313-4315 (2014).
72. Bayındır, R., Kaplan, O., Bayyığıt, C., Sarıkaya, Y. ve Hallaçlıoğlu M., “PLC ve SCADA kullanılarak bir endüstriyel sistemin otomasyonu”, *Erciyes Üniversitesi Fen Bilimleri Enstitüsü Dergisi* 27 (1) : 107-115 (2011).
73. Ünver, H. M., “Paralel rezonans devrelerinde basit ve güvenilir rezonans frekansı belirlemede yeni bir yaklaşım”, *International Journal of Engineering Research and Development*, 2 (2): 6-12 (2010).
74. Arrofiq, M. and Saad, N., “PLC-based fuzzy logic controller for induction-motor drive with constant V/Hz ratio”, *Intelligent and Advanced Systems, 2007. ICIAS 2007. International Conference*, Kuala Lumpur, 93 - 98 (2007).
75. Putri, T. O., Rahmadwati and Siswojo, B., “Temperature control of liquid egg pasteurization system using plc (programmable logic controller) Siemens simatic S7-200 and hmi (human machine interface) simatic hmi panel”, *Electrical Power, Electronics, Communications, Controls and Informatics Seminar (EECCIS)*, Malang, Indonesia, 99-104 (2014).

76. Mannah, M. A., Batard, C., Ginot, N. and Machmoun, M., "Characterization of a new PLC modem for an industrial application", *Power Electronics and Applications, 2009. EPE '09. 13th European Conference*, Barcelona, 1-9 (2009).
77. Jun, X. And Wen, M., "A PLC-based control system in wheelset disassembly machine", *Computing, Control and Industrial Engineering (CCIE), 2010 International Conference on (Volume:2)*, Wuhan, 99-102 (2010).
78. Huiqun, Y., "The design and realization of PID liquid level control system based on S7-200 and EM235", *Intelligent Computation Technology and Automation (ICICTA), 2010 International Conference on (Volume:3)* Changsha, China, 762 – 765 (2010).
79. Li, H. and Zhang, J., "Study on remote PLC experiment system based on Web", *Mechanic Automation and Control Engineering (MACE), 2011 Second International Conference*, Hohhot, 1683 - 1686 (2011).
80. Zhe, X. and Sanqiang, P., "Temperature optimal control of the casting billet induction heating process based on the BP prediction model", *2013 IEEE Symposium on Computational Intelligence in Control and Automation (CICA)*, Singapore, 163 - 167 (2013).
81. Petr Skocik, Petr Neumann, "Industrial process in laboratory environment liquid levels in tanks", *Faculty of Applied Informatics Tomas Bata University in Zlin, International Conference on Process Control (PC)*, Zlin, Czech Republic, (2013).
82. Skocik P. and Neumann P., "Industrial process in laboratory environment liquid levels in tanks, faculty of applied" *Process Control (PC), 2013 International Conference*, Strbske Pleso, 320 - 323 (2013).
83. Ma, H., Wang, X. and Zhou, F. P., "Measuring and controlling of analog signal based on high-speed I/O port of PLC", *2009 International Conference on Measuring Technology and Mechatronics Automation (Volume:3)*, Zhangjiajie, Hunan, 393 – 395 (2009).
84. Zhang, X., Zhang, D., Su, Y. and Lv P., "Application of S7-200 PLC to the monitoring system of strip steel temperature", *Power Engineering and Automation Conference (PEAM), 2012 IEEE*, Wuhan, 1-4 (2012).

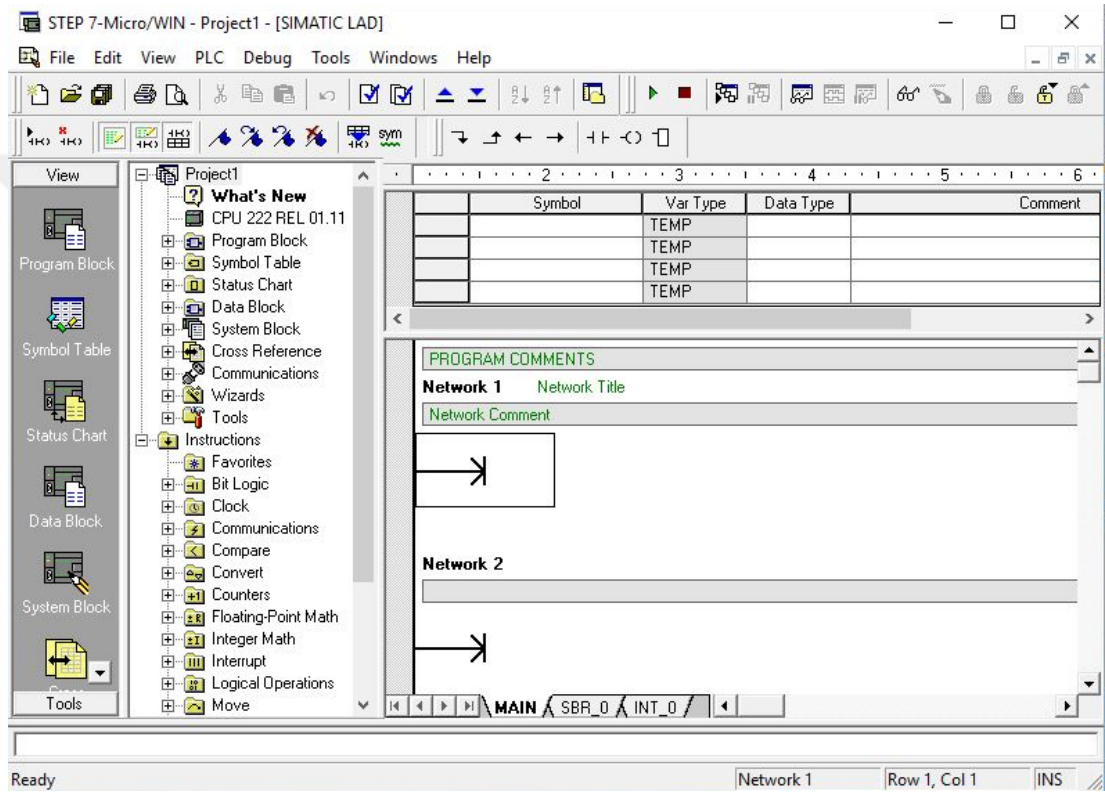


EK AÇIKLAMALAR A.

DARBE GENİŞLİĞİ MODÜLASYONU VE MICRO/WIN EKРАН ALINTISI



Şekil Ek A.1. PLC ile Darbe Genişliği Modülasyonu (PWM).



Şekil Ek A.2. STEP 7-Micro/WIN ekran alıntısı.

ÖZGEÇMİŞ

İsmail BOŞNAK 1973 yılında Devrek'te doğdu. İlk ve orta öğrenimini burada tamamladı. 1992 yılında Gazi Üniversitesi Teknik Eğitim Fakültesi Elektrik Öğretmenliği bölümünde yükseköğretime başladı. Buradan 1996 yılında mezun oldu. Aynı yıl Bartın Mesleki ve Teknik Anadolu Lisesine Elektrik Öğretmeni olarak atandı. Halen aynı okulda Elektrik Elektronik Teknolojisi Alan Şefi olarak görevine devam etmektedir.

ADRES BİLGİLERİ

Adres : MTAL Kemer Köprü Mah.
Bülent Ecevit Bulvarı No:39
74100 Merkez/Bartın

Telefon : (532) 577 27 94
E-posta: ismailbosnak@gmail.com