İSTANBUL TEKNİK ÜNİVERSİTESİ ★ FEN BİLİMLERİ ENSTİTÜSÜ

ENDÜKSİYON OCAK ELEKTRONİK KONTROL SİSTEM TASARIMI

YÜKSEK LİSANS TEZİ

Elektrik Müh. Burçak AYTEKİN

Anabilim Dalı : ELEKTRİK MÜHENDİSLİĞİ

Programı : KONTROL VE OTOMASYON MÜHENDİSLİĞİ

OCAK 2008

İSTANBUL TEKNİK ÜNİVERSİTESİ ★ FEN BİLİMLERİ ENSTİTÜSÜ

ENDÜKSİYON OCAK ELEKTRONİK KONTROL SİSTEM TASARIMI

YÜKSEK LİSANS TEZİ

Elektrik Müh. Burçak AYTEKİN
(504041125)

Tezin Enstitüye Verildiği Tarih : 24 Aralık 2007
Tezin Savunulduğu Tarih : 28 Ocak 2008

Tez Danışmanı:	**Doç.Dr. Mehmet Turan SÖYLEMEZ**
Diğer Jüri Üyeleri	**Prof.Dr. İbrahim EKSİN**
	Yrd. Doç. Dr. Osman Kaan EROL

OCAK 2008

ÖNSÖZ

Yüksek lisans tez çalışmama olumlu eleştiri ve önerileri ile katkıda bulunan değerli hocam Sn. Doç. Dr. Mehmet Turan SÖYLEMEZ' e çok teşekkür ederim.

Bu çalışmanın gerçekleşmesini sağlayan ve çalışmaya destek olan Arçelik Araştırma ve Geliştirme Merkezi'ne, başta Sn. Cemil İNAN ve Sn. Mustafa YÜKSEL 'in şahsında teşekkür ederim.

Tez çalışmamın başlangıcından sonuna kadar her zaman desteğini esirgemeyen, değerli fikirleri ve eleştrileriyle çalışmama sonsuz katkı sağlayan Sn. Namık YILMAZ' a, ayrıca olumlu katkıları ve görüşleriyle destek veren Sn. Metin ÖZTÜRK' e ve Arçelik ARGE Elektronik Değerlendirme Ailesi' ne çok teşekkür ederim.

Son olarak, her zaman yanımda olan desteğini biran olsun esirgemeyen canım annem ve babam Asiye, Mustafa AYTEKİN' e, abim Dr. Murat AYTEKİN ve biricik kardeşim Burcu AYTEKİN' e sonsuz teşekkürler.

Ocak 2008 **Burçak AYTEKİN**

İÇİNDEKİLER

KISALTMALAR **v**
TABLO LİSTESİ **vi**
ŞEKİL LİSTESİ **vii**
SEMBOL LİSTESİ **x**
ÖZET **xi**
SUMMARY **xii**

1. GİRİŞ **1**

2. LİTERATÜR ARAŞTIRMASI **4**

3. TEMEL KAVRAMLAR **14**
3.1 Isıtma Yöntemlerinin Karşılaştırılması 16
3.1.1 Olumlu Yönler 16
3.1.2 Olumsuz Yönler 18
3.2 Çalışma İlkesi 18
3.2.1 Elektromanyetik Endüksiyon 18
3.2.2 Deri Etkisi ve Girdap Akımları 22
3.2.3 Transformatör Etkisi 23
3.3 Endüksiyon Elektroniği 26
3.3.1 Rezonans Eviriciler 27

4. TEK GÖZLÜ ENDÜKSİYON OCAK UYGULAMASI **33**
4.1 Çalışma Prensibi 33
4.2 Tencere Algılama 37
4.3 Sıcaklık ve Fan Kontrolü 40
4.4 Güvenlik ve Hata Durumu 42
4.5 Akım Kontrolü 43
4.6 Uygulanan Kontrolörler 46
4.6.1 PI Kontrol 49
4.6.2 Sezgisel PI Kontrol 51
4.6.3 Bulanık Kontrol 52
4.6.4 En Keskin İniş (Steepest Descent) Yöntemi 59
4.6.5 İleri Geri Yönde Ayarlamalı Kontrol 64
4.7 Uygulanan Kontrolörlerin Sisteme Verdiği Tepkiler 64
4.7.1 Tencere Gözde Sabit Duruyor 64
4.7.2 Tencere Gözden Hızla Çekiliyor 65
4.7.3 Tencere Algılama Olmadan Tencere Gözden Hızla Çekiliyor 67

5. SONUÇLAR VE ÖNERİLER **69**

KAYNAKLAR **72**

EK A **74**

EK B **79**

ÖZGEÇMİŞ **82**

KISALTMALAR

IGBT	: Insulated Gate Bipolar Transistor
NTC	: Negative Temperature Coefficient
PWM	: Pulse Width Modulation
ADC	: Analog Digital Converter
EMC	: Electromagnetic Compatibility

TABLO LİSTESİ

		Sayfa No
Tablo 2.1	20 kHz' deki Demir ve Alüminyum' un Elektriksel Karakteristiği	9
Tablo 3.1	Transformatör ve Endüksiyon arasındaki ilişki ……..	24
Tablo 3.2	Çeşitli metaller için, değişen frekanslarda endüklenen akımın girme derinlikleri (mm cinsinden)…….....	25
Tablo 4.1	Seviye 6' nın altındaki seviyelerin operasyon zamanları.....	47
Tablo 4.2	Tüm seviyeler için oturmaları gereken referans akım değerleri ….	47
Tablo 4.3	Bulanık Kontrol için kural tablosu .....…	59

ŞEKİL LİSTESİ

		Sayfa No
Şekil 2.1	Endüktör sistem yapısı: (1) tencere, (2) pişirme yüzeyi, (3) elektriksel izolasyon, (4) sargı, (5) akı taşıyıcı, (6) koruyucu	5
Şekil 2.2	İdeal bir transformatörün eşdeğer devresi	6
Şekil 2.3	Yarım köprü seri rezonans devre	6
Şekil 2.4	Endüksiyonla ısıtmanın temel prensibi	7
Şekil 2.5	Bir transformatörün eşdeğer devresi.....	7
Şekil 2.6	Endüksiyon ısıtmalı ocak sistem yapısı.....	8
Şekil 2.7	Isıtılan malzemeye göre çıkış akım karakteristiği. Burada Yük A, 22 cm ve Yük B, 10 cm çapındaki Alüminyum tenceredir.....	9
Şekil 2.8	Endüksiyon ocak donanımının tipik yapısı.....	10
Şekil 2.9	İki çıkışlı seri rezonans yapısı.....	10
Şekil 2.10	İki çıkışlı yarım köprü seri rezonans yapısının çalıştırılma prensibi.....	11
Şekil 2.11	(a) Tek çıkışlı bobin (b) İki çıkışlı bobin.....	12
Şekil 2.12	(a) Karesel bobinler (b) Dikdörtgensel bobinler.....	12
Şekil 3.1	Isıtma yöntemlerinin ısıtma hızı açısından karşılaştırılması.....	16
Şekil 3.2	Isıtma yöntemlerinin ısıtma verimi açısından karşılaştırılması.....	17
Şekil 3.3	Isıtma yöntemlerinin yüzeyin soğuması açısından karşılaştırılması	18
Şekil 3.4	Birim akı yoğunluğunu sembolize eden örnek.....	19
Şekil 3.5	Faraday kanununa örnek.....	20
Şekil 3.6	Manyetik nüveye sarılmış n sarımlı tel.....	20
Şekil 3.7	Lenz Kanuna örnek olarak, kapalı bir tel boyunca oluşan akı.....	20
Şekil 3.8	Amper kanunundaki genel ilişki.....	21
Şekil 3.9	Ampere kanununa örnek olarak verilmiş nüve.....	21
Şekil 3.10	Ampere kanunu için n sarımlı tel örneği.....	22
Şekil 3.11	Girdap akımı ve deri etkisi.....	22
Şekil 3.12	Nüve içinden geçen girdap akımı.....	23
Şekil 3.13	Endüksiyon ve transformatör arasındaki benzerlik.....	24
Şekil 3.14	Endüksiyonla ısıtmada tencere tipi kullanılabilirliği.....	25
Şekil 3.15	Yarım köprü seri rezonans endüksiyon devresi temel yapısı.....	28
Şekil 3.16	İdeal seri rezonans evirici dalga şekilleri.....	29
Şekil 3.17	A>B için rezonans eğrisine direncin etkisi.....	30
Şekil 3.18	Çalışma frekansına bağlı olarak güç kontrol karakteristiği.....	31
Şekil 4.1	Sistemde kullanılan mikrodenetleyicinin pin diyagramı.....	34
Şekil 4.2	Endüksiyon ocak iç elektroniğinin blok şeması.....	35
Şekil 4.3	Ölü zamanlı birbirinin tamamlayıcısı PWM işareti üreten modülün blok diyagramı.....	36
Şekil 4.4	4 rampa modunun çalışma prensibi.....	37
Şekil 4.5	Tencere algılama akış diyagramı.....	39
Şekil 4.6	NTC değerini okuma devresi. Şekildeki uC, mikrodenetleyiciyi sembolize etmektedir.....	40

Şekil 4.7 Sıcaklık ve fan kontrolü ile ilgili akış diyagramı (TS3>TS2>TS1 ve TB2>TB1)..... 41
Şekil 4.8 Aşırı akım devresi..... 43
Şekil 4.9 CH2: Akım trafosu çıkışı bobin akımı, CH4: Geri besleme için kullanılan akım tepe değeri (alçak geçiren filtre çıkışı)..... 44
Şekil 4.10 Simülasyon amaçlı Orcad programında hazırlanan devre şeması... 45
Şekil 4.11 Simülasyon sonucundaki bobin akımına yakından bakış (50 kHz). 45
Şekil 4.12 Simülasyon sonucundaki şebekeyi takip eden bobin akımı..... 45
Şekil 4.13 Endüksiyon ocak kontrol blok diyagramı..... 48
Şekil 4.14 PI kontrolör blok diyagramı..... 49
Şekil 4.15 PI kontrolör giriş çıkış bloğu..... 50
Şekil 4.16 Bir bulanık sistemin iç yapısı..... 54
Şekil 4.17 Hata(e) için üyelik fonksiyonu..... 58
Şekil 4.18 Frekansı belirleyecek zamanlayıcı değerinin değişimi (Δt) için üyelik fonksiyonu..... 58
Şekil 4.19 Çıkış üyelik fonksiyonu..... 58
Şekil 4.20 Dayanıklı lineer toplayıcının genel biçimi..... 59
Şekil 4.21 Tek girişli dayanıklı lineer toplayıcı..... 60
Şekil 4.22 Büyük tencere gözden hızla çekilirken sistemin tüm kontrolörlere göre seviye 10' da akım cevabı..... 66
Şekil 4.23 Küçük tencere gözden hızla çekilirken sistemin tüm kontrolörlere göre seviye 10' da akım cevabı..... 66
Şekil 4.24 Tencere Algılama algoritması olmadan büyük tencere gözden hızla çekilirken sistemin tüm kontrolörlere göre seviye 10' da akım cevabı..... 67
Şekil A.1 Büyük tencere gözde sabit iken sistemin tüm kontrolörlere göre seviye 6'da akım cevabı..... 74
Şekil A.2 Büyük tencere gözde sabit iken sistemin tüm kontrolörlere göre seviye 7'de akım cevabı..... 74
Şekil A.3 Büyük tencere gözde sabit iken sistemin tüm kontrolörlere göre seviye 8'de akım cevabı..... 75
Şekil A.4 Büyük tencere gözde sabit iken sistemin tüm kontrolörlere göre seviye 9'da akım cevabı..... 75
Şekil A.5 Büyük tencere gözde sabit iken sistemin tüm kontrolörlere göre seviye 10'da akım cevabı..... 76
Şekil A.6 Küçük tencere gözde sabit iken sistemin tüm kontrolörlere göre seviye 6'da akım cevabı..... 76
Şekil A.7 Küçük tencere gözde sabit iken sistemin tüm kontrolörlere göre seviye 7'de akım cevabı..... 77
Şekil A.8 Küçük tencere gözde sabit iken sistemin tüm kontrolörlere göre seviye 8'de akım cevabı..... 77
Şekil A.9 Küçük tencere gözde sabit iken sistemin tüm kontrolörlere göre seviye 9'da akım cevabı..... 78
Şekil A.10 Küçük tencere gözde sabit iken sistemin tüm kontrolörlere göre seviye 10'da akım cevabı..... 78
Şekil B.1 Tencere algılama algoritması yok ve gözde büyük tencere var iken sistemin PI kontrolöre göre seviye 10' da akım cevabı..... 79
Şekil B.2 Tencere algılama algoritması yok ve gözde büyük tencere varken sistemin sezgisel PI kontrolöre göre seviye 10' da akım cevabı..... 79

Şekil B.3 Tencere algılama algoritması yok ve gözde büyük tencere var iken sistemin bulanık kontrolöre göre seviye 10' da akım cevabı... 80
Şekil B.4 Tencere algılama algoritması yok ve gözde büyük tencere var iken sistemin en keskin iniş yöntemine göre seviye 10' da akım cevabı..... 80
Şekil B.5 Tencere Algılama algoritması yok ve gözde büyük tencere var iken sistemin ileri-geri yönde ayarlamalı kontrolöre göre seviye 10'da akım cevabı..... 81

SEMBOL LİSTESİ

δ	: Girme Derinliği
μ_r	: Manyetik Geçirgenlik
ρ	: Elektriksel Özdirenç
H	: Manyetik Alan Şiddeti
B	: Manyetik Akı Yoğunluğu
ϕ	: Manyetik Akı

ENDÜKSİYON OCAK ELEKTRONİK KONTROL SİSTEM TASARIMI

ÖZET

Endüksiyonla ısıtma tekniği endüstriyel uygulamalarda uzun yıllardan beri uygulanmaktadır. Ev uygulamalarında özellikle ocak uygulamalarında ise son on yıl içerisinde yaygınlaşmıştır. Bu yeni ve gelişen teknoloji diğer ocaklara göre çok daha yüksek bir verime sahiptir. Geniş bir ısıtma ayar aralığı vardır ve hızlı ısıtma yapabilmektedir. Ayrıca, sadece tencereyi ısıttığı için ocak üstünün daha güvenilir olmasını ve rahat temizlenmesini sağlamaktadır.

Bu tez çalışmasında, sistem temel kavramları ve ilgili elektronik düzen hakkında bilgi verildikten sonra sistem için uygun olan kontrolör yapısının belirlenmesi amaç edinilmiştir. Elektronik yapı olarak yarım köprü seri rezonans evirici yapısı kullanılmıştır. Anahtarlama frekansı 20 kHz ile 50 kHz arasında seçilmiştir.

Sistem için sabit akım kontrolü yapılması uygun görülmüştür. Her seviye için belirlenen referans akım değeri sabit tutulacaktır. Endüksiyon ocak, kullanıcı ara yüzü ile ayarlanabilecek 10 seviyeden oluşmaktadır. İlk 5 seviye 6. seviye ile aynı referansa sahiptir. Bu beş seviyenin seviye 6' dan farkı kesikli modda çalışmalarıdır. Bu sebeple deney koşulları seviye 6, 7, 8, 9, 10 için iki boyut tencere üzerinden incelenecektir. Bu amaçla PI, sezgisel PI, bulanık, ileri-geri yönde ayarlamalı kontrolör yapıları ve en keskin iniş (steepest descent) yöntemi incelenmiştir. Seçilen bu çeşitli kontrolörler öncelikle "tencere gözde sabitken" gözlemlenmiş ve birbirlerine göre kıyaslamaları yapılmıştır. Daha sonra, sistemdeki ani değişikliklere verdikleri cevapların önemi üzerinde durulup, uygulanan kontrolör yapıları bu kez "tencere gözden hızla çekiliyor" ve "tencere algılama algoritması yokken tencere gözden hızla çekiliyor" koşullarında gözlemlenmiştir. Bu sayede yapılan bir dizi incelemeden sonra en uygun kontrolör yapısı sistem için belirlenmiştir.

ELECTRONIC CONTROL SYSTEM DESIGN FOR AN INDUCTION COOKER

SUMMARY

Induction heating has been used in industral applications for long times. In addition induction cooking technique has been succesfully used for last 10 years in domestic cooking appliances. This new and developing technology is more efficient than other cooker types. It has wide power range and it is able to cook fast. This technique is heated up the pans directly that's why its cooker surface is more reliable and easy cleanable.

In this study, after describing the system basic concept and electronical features, the best and suitable controller for the induction cooker system is investigated. Half bridge series resonant converter topology is implemented for the system design and switching frequency is operated between 20 kHz and 50 kHz.

Current control is chosen for the induction cooking system. For this purpose, reference current value for evey level which is chosen by the user with user interface is determined. Induction cooker has 10 levels. The reference values of first five levels are the same as level 6. The difference between those levels and level 6 is the discontinuous mode of the first five levels. For this reason, tests are examined at level 6,7,8,9,10 with two different size pans. PI controller, heuristic PI controller, fuzzy controller, a simpler controller called forward-backward controller and a controller based on the steepest descent algorithm are imlemented as controller types. Firstly, these control methods are investigated when pan is on the hob and then compared the responses. Secondly, unexpected variations of the system characteristic are evaluated so the controller are investigated when pan is removed from the hob suddenly and pan is removed from the hob suddenly without pan detection algorithm. After these implementations, the best and suitable controller is chosen for the induction cooking system.

1. GİRİŞ

Endüksiyonla ısıtma tekniği endüstriyel uygulamalarda uzun yıllardan beri uygulanmaktadır. Ev uygulamalarında özellikle ocak uygulamalarında ise son 10 yıl içerisinde yaygınlaşmıştır. Endüksiyonla ısıtma, temeli 19.yüzyılda keşfedilen doğal bir olaydır. Buna göre eğer metalik bir kütle sabit bir manyetik alan içinde hareket ettirilirse ya da değişen manyetik alan içinde bırakılırsa, üzerinde akımlar endüklenir. Endüklenen bu akım ise metal kütlenin direnci sonucunda oluşan joule etkisi ile metalin ısınmasına yol açar. Endüksiyon ocakta, yüksek frekanslı sinüs biçimli akımla beslenen bobin bir manyetik alan oluşturur. Değişen manyetik alan içinde kalan tencere alt yüzeyinde girdap biçiminde akım endüklenir. Akım belirli bir girme derinliğinde akar. Girme derinliğinin belirlediği direnç ile oluşan ısıl kayıp tencereyi ısıtır. Endüksiyon ocak uygulamalarında manyetik geçirgenliği yüksek, iletkenliği düşük tencereler kullanılmaktadır.

Bu tez çalışmasında başlangıç olarak endüksiyon ocak için gerekli temel kavramlar ve ilgili elektronik düzen hakkında bilgi verilmiştir. Sistem yarım köprü seri rezonans evirici bir devreden oluşmaktadır. Anahtarlama frekansı 20 kHz ve 50 kHz aralığında değişmektedir. Kullanılan anahtarlama elemanı ise IGBT (Isulated Gate Bipolar Transistor) olarak seçilmiştir. Endüksiyon ocak uygulaması gömülü bir sistemden oluşmaktadır. Buna göre ilgili anahtarlama frekansını üretecek özelliğe sahip bir mikrodenetleyici seçilmiştir. Bu mikrodenetleyici birbirinin tamamlayıcısı olan ölü zamanlı DGM (Darbe Genişlik Modülasyonu) ya da diğer bir değişle PWM (Pulse Width Modulation) işareti üretebilmektedir. Sistem için akım kontrolü uygun görülmüştür. Akım, akım trafosu ile algılanmaktadır. 1:200 oranında bölünen akım bağlanan paralel direnç ile gerilime dönüştürülür ve alçak geçiren filtreden geçirildikten sonra mikrodenetleyicinin ADC (Analog-Digital Converter) analog dijital dönüştürücü girişine verilir. Bu sayede, ikinci dereceden olan sistem, bir kazanca indirgenmiştir. Bu hem kontrolörün tasarlanmasını kolaylaştırmış hem de

maliyet açısından daha verimli bir mikrodenetleyici seçimine olanak sağlamıştır. Bu konuya geniş olarak Bölüm 4' de değinilmiştir.

Endüksiyon ocak var olan birçok özelliği ile hem kullanıcıya güvenilirlik hem de en iyi hizmeti vermektedir. Aşırı ısıya ve tencerenin yanmasına karşı algılayıcılar (sensörler) ile alınan önlemler, tencere algılama algoritması, kullanıcı arabirimi ile verilen uyarılar örnek olarak verilebilir. Bunlar hem kullanıcı açısından bir güvenlik hem de endüksiyon ocak sistemi için aynı zamanda bir gerekliliktir.

Endüksiyon ocak, kullanıcı ara yüzü aracılığıyla kullanıcı tarafından seçilebilecek 10 seviyeden oluşmaktadır. Her seviye için sabit tutulacak referans akım değerleri bir tablo aracılığı ile mikrodenetleyiciye gömülmüştür. Belirlenen tablo değerlerine göre akım sabit tutulacaktır. Sabit tutma işlemi mikrodenetleyici tarafından anahtarlama frekansının değiştirilmesi ile gerçekleştirilecektir. Bu amaçla incelenecek kontrolör yapıları mikrodenetleyici içine gömülmüştür. Deneyler seviye 6,7,8,9 ve 10 için yapılmıştır. İlk 5 seviyenin referans akım değerleri, seviye 6 ile aynıdır. İlk 5 seviyenin seviye 6' dan farkı kesikli modda çalışmalarıdır. Bu konu ayrıntılı bir şekilde Bölüm 4' de açıklanmıştır. İlgili giriş ve çıkışlar belirlendikten sonra 5 tip kontrolör yapısı iki tür tencere üzerinden sistemde denenmiştir. İki tür tencerenin birbirinden farkı boyut ve farklı cins yapıda olmalarıdır. Kontrolör olarak, PI, sezgisel PI, bulanık, ileri-geri yönde ayarlamalı kontrolör yapıları ve en keskin iniş (steepest descent) yönteminin kullanıldığı kontrolör seçilmiştir.

Uygulanan bütün kontrolörlerin sistem yapısına verdiği cevap üç durum için incelenmiştir. Bunlar, "tencere gözde sabitken", "tencere gözden hızla çekilirken" ve "tencere algılama algoritması yokken tencere gözden hızla çekiliyor" durumlarıdır. Başlangıçta uygulanan kontrolörlerin sisteme uygun olup olmadığına "tencere gözde sabitken" durumunda bakılmıştır. Daha sonra sistem için önemli bir durum olan ve sistem karakteristiğinin hızla değişmesine sebep olan "tencerenin gözden hızla çekilmesi" durumu incelenmiş ve 5 tip kontrolörün bu duruma verdiği cevaplar karşılaştırılmıştır.

Endüksiyon ocak, sahip olduğu tencere algılama algoritması ile sistem için uygun olan tencereyi algılar ve sistemin tencereyi ısıtmasına izin verir. Ayrıca, ısıtılan bir tencerenin gözden çekilmesi durumunda ilgili göze ait enerjiyi keser. Tencere gözden

hızla çekilirken sistemde oluşan ani değişikliğin sistem elektroniğine zarar vermesine engellemek kontrolör seçiminde önemli bir unsur olarak belirlenmiştir. Bu sebeple kontrolörler, tencere gözden çekilirken, tencere algılama algoritmasına yardımcı bir görev üslenirler. Ancak kontrolör yapısının tek başına sistemi koruma özelliğinin ne kadar olduğu ve tencere algılama algoritmasından sonra sistem için ikinci bir güvenlik olup olamayacağı incelenmek istenmiştir. Bu sebeple kontrolörlerin sistemin ani değişikliklerine verdiği cevap birde "tencere algılama algoritması yokken tencere gözden hızla çekiliyor" durumunda incelenmiştir. Bu üç durum için yapılan gözlemler sonucunda endüksiyon ısıtmalı ocak sistemine en uygun kontrolör yapıları belirlenmiştir.

2. LİTERATÜR ARAŞTIRMASI

Endüksiyon ısıtmalı ocak ile ilgili yapılan literatür çalışmasında öncelikle neden endüksiyon ocak kullanıldığına dair birkaç kaynak üzerinde durulup sistemin genel elemanları irdelenmiştir. Endüksiyon ısıtmalı ocak, ev uygulama alanında oldukça yeni ve gelişen bir teknolojidir. Elbette avantajları olduğu kadar dezavantajları da mevcuttur [1].

Avantajlar:

- Yüksek verim
- Hızlı ısıtma
- Sabit güç veya akım kontrolü
- Göz yani bobin soğuk kaldığından güvenlidir.
- Enerji Tasarrufu (Gözden tencere kaldırılırsa göz ısıtılmaz.)
- Geniş güç aralığı
- Kolay temizlik

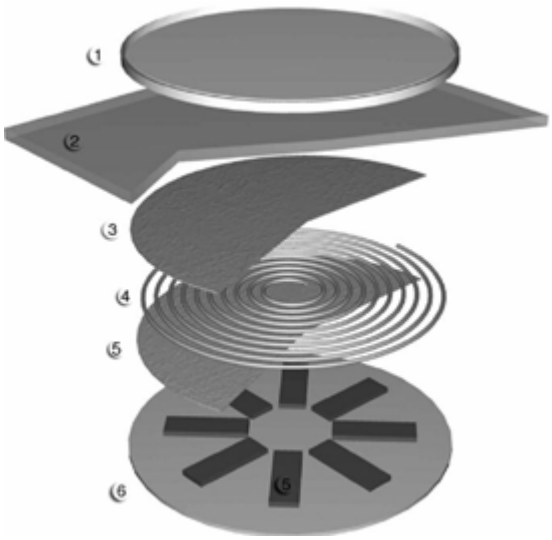
Dezavantajlar:

- Yüksek maliyet
- Sadece manyetik geçirgenliği yüksek ve iletkenliği düşük tencerelerin kullanılabilmesi

Başarılı bir endüksiyon ocak, verimli, ucuz maliyetli ve optimum dizayna sahip olandır. Endüksiyon ocaktan beklenenler birkaç madde altında şöyle açıklanabilir:

- ultrasonik anahtarlama frekansı
- Yüksek verim
- Düşük maliyet
- 1’ e yakın güç faktörü
- Geniş bir güç aralığı (%10-%100 arası)
- Güvenilirlik

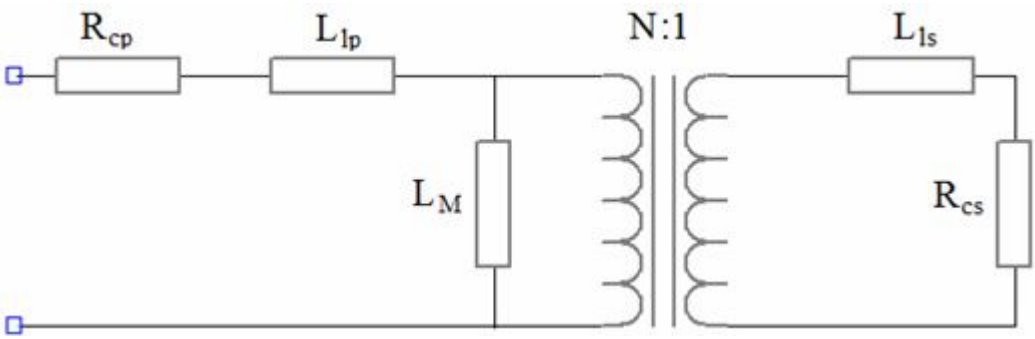
Endüksiyon ocak sistemi, orta-yüksek frekans evirici ve endüktörden oluşur. Genellikle rezonans eviriciler kullanılır ve 20 kHz ile 50 kHz' lik frekans aralığında çalıştırılırlar. Endüktör tencere alt yüzeyinde girdap akımlarının oluşmasını sağlayan değişen manyetik alanı oluşturur. Bu sayede tencere ısınır. Genel anlamda sistemi oluşturan endüktör yapısı incelenecek olursa tüm endüksiyon sistemi Şekil 2.1' de görüldüğü gibi transformatör gibi çalışan endüktörün kendisi ve tencereden oluşur [2]. Sargı ya da bobin transformatörün birincil kısmını, tencere ise ikincil kısmını oluşturur. Akı taşıyıcı (genellikle ferit barlar) nüvenin bir parçası gibi çalışırlar. Vitroseramik cam, sargı ve tencere arasına yerleştirilir. Böylece bobini tencereden dolayı oluşan ısıdan korur yani termal izolatör gibi davranır.



Şekil 2.1: Endüktör sistem yapısı: (1) tencere, (2) pişirme yüzeyi, (3) elektriksel izolasyon, (4) sargı, (5) akı taşıyıcı, (6) koruyucu [2]

İncelenen literatür çalışmaları endüksiyonu daha iyi anlaşılabilmesi için bir transformatöre benzetmiştir. Buna göre endüksiyon sistemi aşağıdaki gibi özetlenebilir:

Endüksiyon sistemi, ikincil kısmı kısa devre olmuş bir transformatör yapısına benzetilebilir. Transformatör için olan eşdeğer devre Şekil 2.2' de verildiği gibi elde edilir [1],[3]. Eğer manyetik endüktans (L_M) ihmal edilirse ısıtıcı bobin, ısıtılan tencere seri L_r ve R_l olarak Şekil 2.3' deki gibi düşünülebilir. İlgili eşitlikler (2.1) ve (2.2)' de verildiği gibidir.



Şekil 2.2: İdeal bir transformatörün eşdeğer devresi [1]

$$R_l = R_{cp} + N^2 R_{cs} \quad \textbf{(2.1)}$$

$$L_r = L_{lp} + N^2 L_{ls} \quad \textbf{(2.2)}$$

Eşitlik (2.1) ve (2.2) ‘ de,

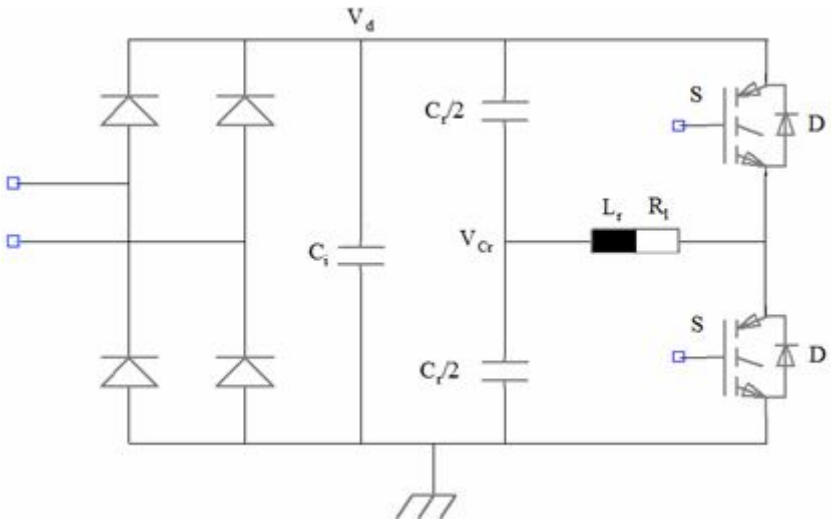
N: Isıtıcı bobin sarım sayısı

R_{cp}: Birincil kısım (ısıtıcı bobin) direnci

R_{cs}: İkincil kısım direnci (tencere)

L_{lp}: Birincil kısmın kaçak endüktansı

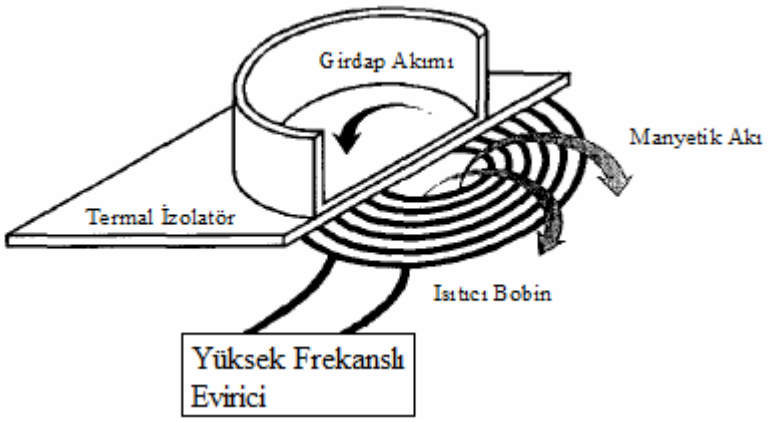
L_{ls}: İkincil kısmın kaçak endüktansı



Şekil 2.3: Yarım köprü seri rezonans devre [1]

Literatürde, endüksiyonun belli metal cinsleri için uygun olduğu vurgulanmış ve değişik metal türlerine verdiği cevaplar incelenmiştir [3]. Isıtılan tencere

malzemesinin direnci ve manyetik geçirgenliği kabul edilebilir bir verimi sağlaması için yüksek olmalıdır.

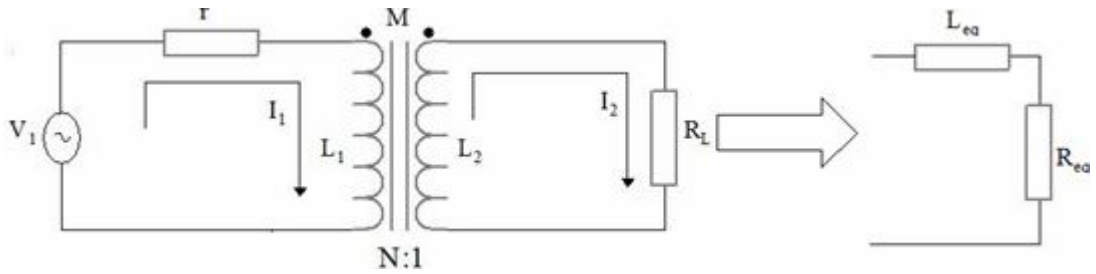


Şekil 2.4: Endüksiyonla ısıtmanın temel prensibi [3]

Endüksiyon ocak enerjilendirildiğinde ısıtıcı bobinde oluşan manyetik alan ısıtılan yük üstünde girdap akımları oluşturur. Böylece tencere, Şekil 2.4' de görüldüğü gibi ısınır. Girdap akımları belirli bir girme derinliğinde akar. Girme derinliği δ eşitlik (2.3)' de verildiği gibidir. Burada μ_r manyetik geçirgenlik ρ ise malzemenin elektriksel özdirenci ve f uygulanan frekanstır.

$$\delta = \sqrt{\frac{1}{4\pi^2 10^{-7}}} \cdot \sqrt{\frac{\rho}{\mu_r f}} \qquad \textbf{(2.3)}$$

Transformatör eşdeğer devresi için Şekil 2.5' deki yaklaşım izlenebilir.



Şekil 2.5: Bir transformatörün eşdeğer devresi [3]

$$\frac{V_1}{V_2} = \frac{N_1}{N_2} = \frac{I_2}{I_1} \qquad \textbf{(2.4)}$$

$$I_2 = \frac{\omega M I_1}{Z_2} \tag{2.5}$$

$$L_{eq} = L_1 - \left(\frac{I_2}{I_1}\right)^2 L_2 = L_1 - \frac{(\omega M)^2 L_2}{R_L{}^2 + (\omega L_2)^2} = L_1 - A^2 L_2 \tag{2.6}$$

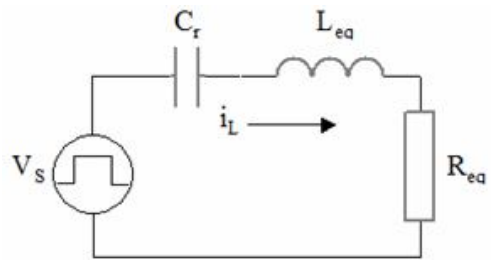
$$R_{eq} = r + \frac{(\omega M)^2 R_L}{R_L{}^2 + (\omega L_2)^2} = r + A^2 R_L \tag{2.7}$$

(2.6) ve (2.7) eşitliklerinde,

$$A = \frac{\omega M}{\sqrt{R_L{}^2 + (\omega L_2)^2}} \approx \frac{M}{L_2} \tag{2.8}$$

(2.8) ifadesinde, $\omega L_2 >> R_L$ ' dir.

Bobin ve tencere ikilisi eşdeğer seri R_{eq} ve L_{eq} şeklinde Şekil 2.6' daki gibi verilebilir. Bu parametreler birçok etkene bağlıdır. Isıtıcı bobin şekli, ısıtıcı bobin ve tencere arasındaki mesafe, elektriksel iletkenlik, manyetik geçirgenlik ve uygulama frekansı gibi.



Şekil 2.6: Endüksiyon ısıtmalı ocak sistem yapısı [3]

Ayrıca ikincil direnç, girme derinliği ve girdap akımları ile, bununla beraber çıkış gücü, akım ve direnç arasındaki ilişkiden hesap edilebilir.

$$R_L = \frac{\rho}{\delta} = k\sqrt{\rho \mu_r f} \text{ ve } I_2 = N I_1 \tag{2.9}$$

$$P = k(NI_1)^2 \sqrt{\rho \mu_r f} \quad \textbf{(2.10)}$$

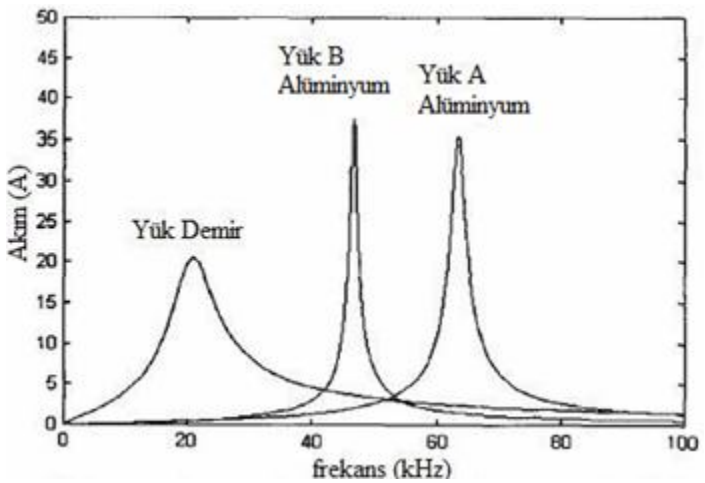
(2.9) ve (2.10) eşitliklerindeki $k = 0.0019869$ eşittir. N ise ısıtıcı bobin sarım sayısına sembolize eder. Farklı tip yapıdaki tencere türleri için örnek olarak demir ve alüminyum arasındaki ilişki Tablo 2.1' de verilmektedir. Bilindiği gibi alüminyumun demire göre manyetik geçirgenliği ve direnci daha düşüktür. Bu sebeple alüminyum gibi malzemelere aktarılan gücü arttırmak için

- Uygulama frekansı yükseltilebilir
- Bobin sarım sayısı arttırılabilir.

Tablo 2.1: 20 kHz' deki Demir ve Alüminyum' un Elektriksel Karakteristiği [3]

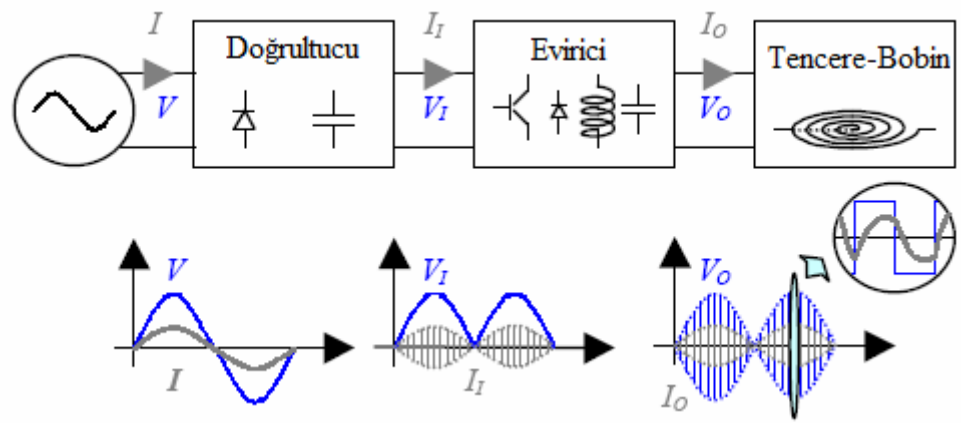
Elektriksel Karakteristikler		
Parametre	Demir	Alüminyum
Özdirenç	9.8×10^{-8}	2.5×10^{-8}
Bağıl Geçirgenlik	100	1
Deri Etkisi	0.11	0.56
Yüzey Direnci	8.8×10^{-4}	0.45×10^{-4}

Bununla beraber uygulama frekansını ve sarım sayısını arttırmak Şekil 2.7 görüldüğü gibi manyetik geçirgenliği yüksek malzemelere göre daha hassas bir güç çıkışına sebep olur ve kontrolü zorlaştırır. Bu sebeple uygulanan frekanslara göre bu tür tencereler uygun değildir.



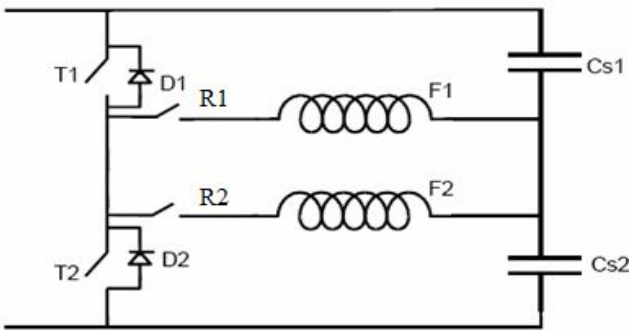
Şekil 2.7: Isıtılan malzemeye göre çıkış akım karakteristiği. Burada Yük A, 22 cm ve Yük B, 10 cm çapındaki Alüminyum tenceredir [3].

Endüksiyon ocak ile ilgili yapılan literatür çalışmalarında ilk göze çarpan kullanılan evirici yapılarıdır. Buna göre kullanılan evirici yapısının topolojisine göre literatürde birçok makale ve patent bulunmaktadır. Yarım köprü, tam köprü, tek anahtarlı ve aynı köprü yapısında birkaç gözü süren çeşitli yapılar literatürde incelenmiştir.



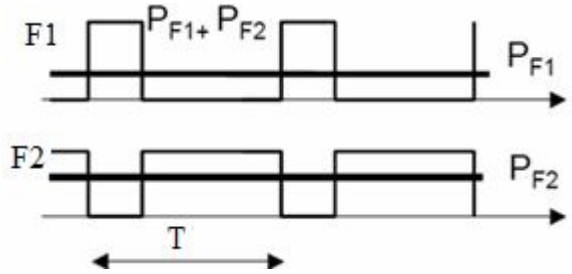
Şekil 2.8: Endüksiyon ocak donanımının tipik yapısı [4]

Buna göre [4]' de yapılan incelemeler sonucunda tam köprü, yarım köprü ve tek anahtarlı yapıların birbirlerine göre durumları incelenmiştir. Şekil 2.8' de şebeke gerilimi doğrultulduktan sonra evirici yapısı, endüksiyon bobinini anahtarlama frekansına bağlı olarak yüksek frekanslı akım ile besler. Endüksiyon ocak uygulamasında kullanılan evirici yapılarının belli alanlarda birbirlerine göre üstünlükleri vardır. Buna göre tam köprü yapısının diğerlerine göre uygulaması daha karmaşıktır. Yarım köprü, uygulanabilirlik ve verim açısından oldukça uygundur. Bununla beraber tek anahtarlı yapılar daha az malzeme içerdiğinden daha kolay bir yapıdadır. Ancak yüksek akımlarda verimleri azalır. Ayrıca kontrolleri karmaşıktır.



Şekil 2.9: İki çıkışlı seri rezonans yapısı [5]

Literatür incelemelerinde göze çarpan diğer bir topoloji yapısı da aynı rezonans yapısından iki çıkışın elde edildiği durumlardır. Genellikle endüksiyon ocaklarda her göz için bir evirici yapısı kullanılırken, incelenen [5] numaralı literatür çalışmasında tek bir seri rezonans yapısı Şekil 2.9' da görüldüğü gibi iki çıkışı birden beslemektedir. Anahtarlama frekansı değiştirilerek yapılan kontrol türü endüksiyon ocak yapısında kullanılan genel kontrol yöntemidir. Ancak tek bir evirici yapısı ile birden fazla yük besleniyorsa sabit bir frekansa gereksinim vardır.



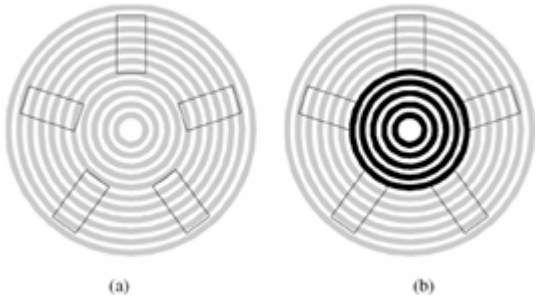
Şekil 2.10: İki çıkışlı yarım köprü seri rezonans yapısının çalıştırılma prensibi [5]

Çalıştırma prensibi Şekil 2.10' de görüldüğü gibidir. Buna göre, Giriş gücü sabit tutulur. R1 ve R2 röleleri ise kapanıp açılarak çıkış gücünü, giriş gücü ile orantılı bir şekilde belirli bir duty saykıl ile ayarlar. Bu yaklaşımın asıl avantajı bu metodun tek anahtarlı, yarım köprü ve tam köprü yapılarda uygulanabilir olmasıdır. Bununla beraber bazı dezavantajları da mevcuttur. Öncelikle ortalama gücün endüksiyon elemanları için eşit olması gerekliliğidir. Çünkü eğer eşit olmaz ise, her ikisi için seçilmiş maksimum güç, küçük değerlere sahip olan için sağlanamaz. İkincil olarak rölelerin çok sık çalışması gerekliliğidir (genellikle her iki saniye de bir). Bu da rahatsız edici seslerin duyulmasına sebep olur.

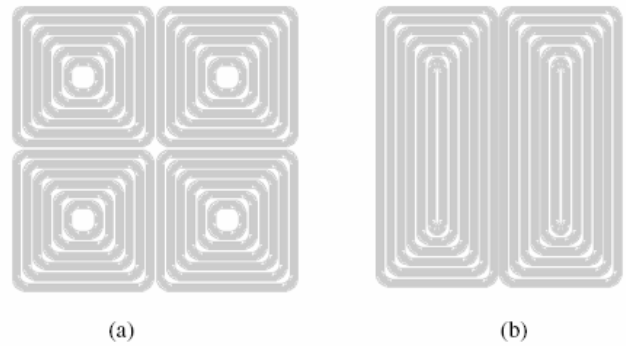
Kontrol yapısı olarak incelendiğinde endüksiyon sistemi iki parametre için kontrol edilebilir. Buna göre ya güç ya da akım kontrolü yapılabilir. Endüksiyon ocakta güç referans değeri kullanıcı ara biriminden gelir. Ancak yükün gücü oldukça değişkendir. Bu değişkenliğin sebebi şebeke değişimleri, genellikle $\pm\%7$ olarak düşünülür. Ayrıca değişik karakteristikteki tencere türleridir. Bu sebeplerden ötürü sistemin güvenli bir çıkış gücünde kalmasını sağlamak için güç değeri sürekli okunmalı ve kapalı bir çevrimde kontrol edilmelidir [6].

Elbette endüksiyon ocak tek göz olabildiği gibi aynı şebekeye fazına bağlı iki göz de içerebilir. Genellikle ev uygulamalarında sistem aynı faza bağlı en az iki gözden

oluşur. Böyle bir durumda iki göz birbirinden farklı frekansta bağımsız olarak sürüldüğünde sürme frekansları arasındaki fark kadar bir ses oluşur. Bu fark insan sesinin duyma frekans aralığında ise kullanıcıyı rahatsız edici bir hal alır. Bu sebeple literatür çalışmalarında bu durumu engelleyici önlemler öne sürülmüş ve patentler alınmıştır [7, 8].



Şekil 2.11: (a) Tek çıkışlı bobin (b) İki çıkışlı bobin [9]



Şekil 2.12: (a) Karesel bobinler (b) Dikdörtgensel bobinler [9]

Ayrıca kullanılan değişik bobin tasarımları literatürde bulunmaktadır. Şekil 2.11' de (a) endüksiyon ocak uygulamalarında kullanılan genel bobin yapısıdır. Buna bağlı olarak (b)' de daha farklı bir bobin yapısı mevcuttur ve şöyle açıklanabilir: Eğer bobin üzerine konan tencere küçük çaplı ise iç bölgedeki küçük çaplı bobin kullanılırken, konan tencere büyük ise bobin iç ve dış çapı aktif olarak kullanılır. Son zamanlarda daha değişik bobin şekilleri de kullanılmaya başlanmıştır. Buna göre Şekil 2.12' deki gibi değişik çap ve şekillere uygun olarak tasarlanmış bobin biçimleri görülebilir.

Yapılan literatür çalışmalarında endüksiyon ısıtmalı sistemin genel yapısı, modeli incelenmiş, olumlu ve olumsuz yönleri irdelenmiştir. Tencerenin ısıtılma prensibi üzerinde durulmuş ve endüksiyon ısıtmalı ocak için tasarlanmış farklı topolojilerde

devre yapıları incelenmiştir. Bununla beraber endüksiyonu oluşturan ana parçalar ve değişik bobin yapıları araştırılmıştır. Aynı anda birden fazla gözü sürme çalışmaları yapılmış ve böyle durumlarda oluşan sorunlar üzerine gidilmiş ve çözüm yolları aranmıştır.

3. TEMEL KAVRAMLAR

Isıtma, kavram itibari ile bir ısı kaynağı ile oluşturulan ısıl enerjinin, belirli bir ısınma yolu üzerinden, ısıtılmak istenen malzemeye aktarılması işidir. Genel anlamda kimyasal ısı kaynağı ve elektriksel ısı kaynağı olmak üzere iki temel ısı kaynağı kullanılmaktadır. Kimyasal yöntem; odun, kömür veya gaz gibi yanabilir maddeler yakılarak, elektriksel yöntem ise elektrik akımının rezistif bir eleman üzerinden akıtılması ile gerçekleştirilir. Endüksiyonla ısıtma yöntemi ise, bu yöntemlerden farklı olarak, ısının belirli bir ortam üzerinden taşınması ile değil, ısıtılmak istenen metalin kendisinin ısı kaynağı olarak kullanıldığı bir yöntemdir. Son olarak bir diğer ısıtma yöntemi ise mikrodalgadır. Bu yöntemde bir adım daha ileri gidilerek ısıtılmak istenen yiyecek doğrudan ısıtılmaktadır. Ancak bu yöntem kapalı bir hacme ihtiyaç duyacağından set üstü biçimindeki ocaklarda kullanıma uygun değildir. Bu açıdan bakıldığında endüksiyonla ısıtmanın diğer ısıtma yöntemlerinden enerjisi tasarrufu açısından daha verimli olacağı açıktır. Ancak gaz ve elektrik kullanan uygulamalar ile karşılaştırma açısından, enerji kavramını biraz daha detaylı açıklamakta fayda vardır. Ocak uygulamaları için enerji akış oranı, diğer bir değişle enerjinin yüke aktarılma oranı daha önemlidir. Gaz kullanan uygulamalarda enerji miktarı BTU (British Thermal Unit) ile enerji akış oranı ise BTU/h ile ölçülür. Elektrik enerjisi miktarı için kWh ve akış oranı için ise güç birimi olan kW kullanılır. İki enerji arasında 1kWh=3400BTU bağıntısı vardır. Ancak güçler için böyle bir dönüşüm söz konusu değildir. Güçler arasındaki oranı ısıl enerjinin yüke ne kadar verimli aktarıldığı belirler. Genelde gaz uygulamalarında enerjinin yüke aktarılma oranı %50 yi geçmez. Endüksiyon uygulamalarında ise bu oran %85-%90 arasındadır. Güçler arasında karşılaştırma yapabilmek için ise BTU/hour=kWx3400xEend/Egaz ifadesi kullanılabilir. Eend, endüksiyonla ısıtmadaki enerji verimini, Egaz ise gaz kullanılarak yapılan ısıtmadaki enerji verimini ifade eder. Karşılaştırma için temel sıkıntı Egaz ve Eend için güvenilir değerlerin elde edilememesinden doğmaktadır. Endüksiyon ocak üreticilerince açıklanan değerler genelde %83-%90 aralığındadır. Orta seviye bir endüksiyon için

ise bu oran %85 olarak alınabilir. Buna karşılık Egaz için verilen değerler %55 ile %30 ‘dur ve neredeyse yarı yarıya değişim göstermektedir.

Endüksiyonla ısıtma, manyetik özelliği olan iletken malzemelerin (genelde çelik, demir vb.), ısıtma yüzeyi ile herhangi bir temas olmadan, değişen manyetik alan ile doğrudan ısıtılmasına dayanan bir ısıtma yöntemidir. Doğal yapısı gereği diğer ısıtma yöntemlerinden farklı olarak bölgesel ısıtma yapmaya olanak sağlamaktadır. 20.yüzyıl ortalarında endüksiyon; endüstride, özellikle ağır metal sanayinde geniş bir uygulama alanı bulmuştur. Başlıca endüstri uygulamaları:

- **Isıl İşleme:** Diğer ısıl işleme yöntemlerinden temel farkı, bölgesel olarak, ısıl gücün istenen yerde oluşturulabilmesidir. Isı belirli bir bölgeye ve derinliğe kadar verimli bir biçimde odaklanır. Böylece diğer parçalara zarar vermeden, istenen noktalar işlenebildiğinden diğer ısıtma yöntemleri arasında tercih sebebidir.

- **Metal Eritme:** Endüksiyonla eritme fırınının verimi diğer eritme fırınlarına göre %80 daha yüksektir. Nispeten pahalı olmamaları, yüzey üzerinde düzgün bir ısıtma alanı oluşturulabilmeleri ve yüksek kalitede ısıtılabilmeleri nedeni ile tercih sebebidir.

- **Araştırma ve Geliştirme:** Özellikle bölgesel ve hassas ısıtma gereken özel deneylerde kontrollü ısıtma özelliği ile tercih edilebilmektedir.

- **Sızdırmazlık:** Bu uygulamada alüminyum kapak, kutusu üzerine, ısıtıcı kaynağı kapak üzerine dokunmadan yapıştırılmaktadır. Özellikle ilaç kutuları ve bazı gıda uygulamaları bu şekilde gerçekleştirilmektedir.

- **Metal birleştirme:** İki metalin birbiri ile bağlanması yaygın bir kullanım alanıdır. Endüksiyon ısıtma yöntemiyle, metal hızlıca ısıtılır ve diğer metal ile birlikte kuvvetlice sıkıştırılır. Bağlanacak metal eğer iyi bir elektriksel iletken ise bu birleştirme birkaç saniye içinde hızlıca gerçekleştirilerek üretim hızı arttırılır.

- **Fiber Optik:** Fiber malzeme endüksiyon ısıtma ile 2000°C' lere kadar koruyucu bir fırına ihtiyaç olmadan ısıtılmakta ve bu yöntemler ile ısıtılan fiber malzeme daha güçlü ve daha iyi optik kaliteye sahip olmaktadır.

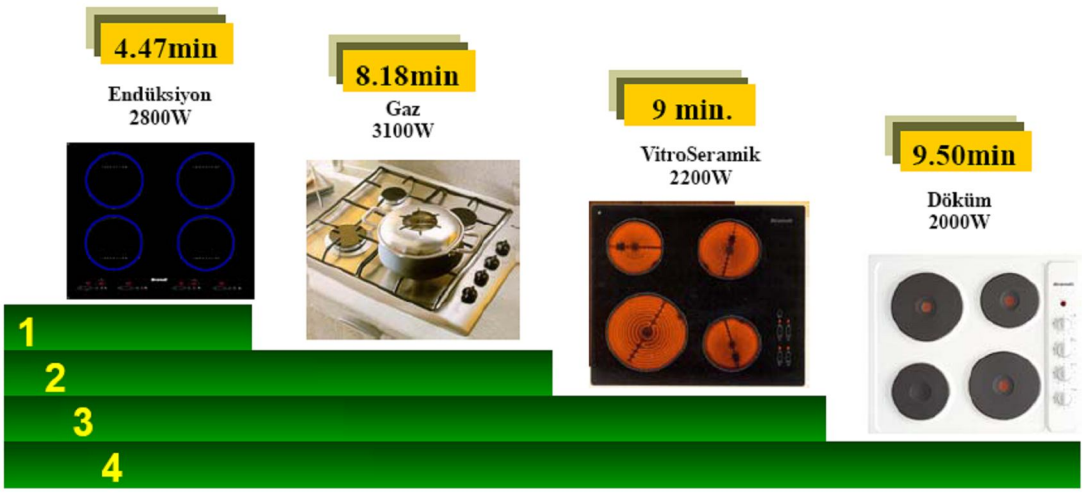
3.1 Isıtma Yöntemlerinin Karşılaştırılması

Bu bölümde endüksiyonla ısıtmanın diğer ısıtma yöntemlerine göre olumlu ve olumsuz yönleri incelenecektir.

3.1.1 Olumlu Yönler

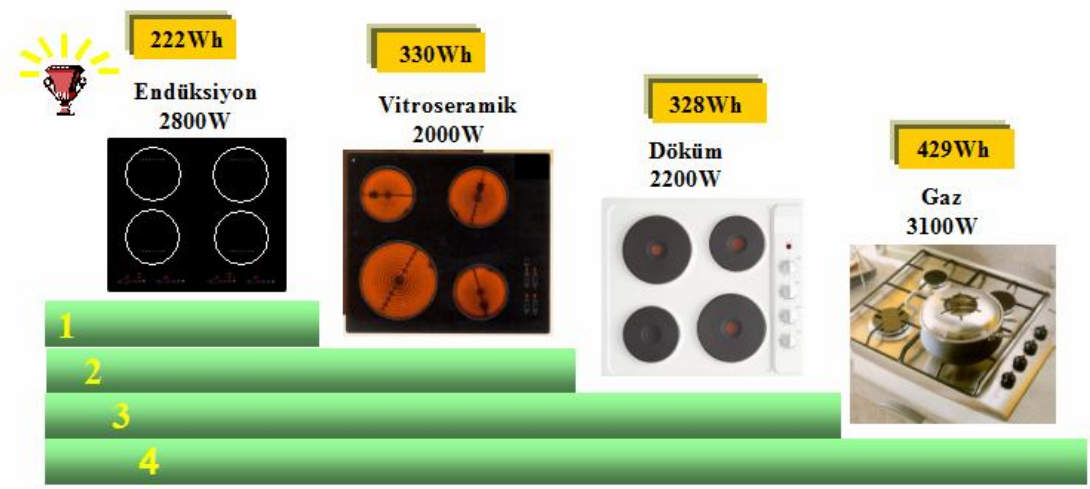
Olumlu yönleri birkaç başlık altında toplarsak;

- **Hızlı Isıtma:** Endüksiyonla ısıtmanın en önemli yanı, ısının yüksek hassasiyetle ve hızla ısıtılan malzemeye aktarılmasıdır. Gazlı ısıtma, düşük eylemsizliğiyle doğrudan metali ısıtarak anlık, hızlı ısıtma özelliğine sahiptir. Bu sebeple diğer yöntemlere göre tercih edilmiştir. Ancak endüksiyonun bu anlamda diğer bir ayırt edici özelliği çok düşük güçlerde, hassas olarak ayarlanarak yavaş yavaş ısıtmayı sağlayabilmesidir. Şekil 3.1' de 2 litre suyun sıcaklığının 20°C' den 95°C' ye ısıtılması için belirlenen optimum güçlerde harcanan zamanlar gösterilmiştir. Diğer elektrikli ısıtma yöntemlerinin ısıl eylemsizliklerinin yüksek olması sebebi ile daha yavaş ısıtması beklenen bir sonuçtur.



Şekil 3.1: Isıtma yöntemlerinin ısıtma hızı açısından karşılaştırılması

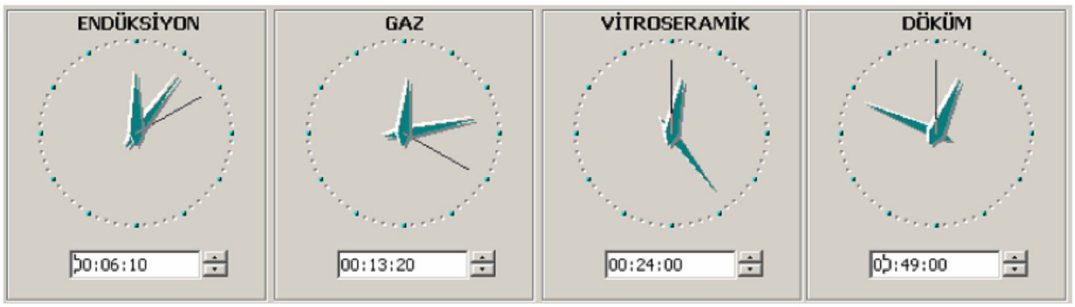
- **Kayıpsız Isıtma:** Endüksiyonla ısıtmada, enerjinin büyük bir kısmı manyetik alan üzerinden doğrudan tencereye aktarılır. Gaz veya geleneksel elektrikli ısıtıcılarda ise enerji öncelikle ısı enerjisine çevrilir ve daha sonra ısıtılacak tencereye yönlendirilir. Ancak bu arada enerjinin önemli bir kısmı yüke aktarılmadan ortamı ısıtır. Isınan tencere ve yiyeceğin ortama ısı yayarak ısınacağı da bir gerçektir. Endüksiyonla ısıtma yöntemi ise, diğer gazlı ve elektrikli ısıtma yöntemleri ile karşılaştırılırsa ortamı daha az ısıtacaktır. Şekil 3.2' de 2 litre suyun sıcaklığının 20°C' den 95°C' ye ısıtılması için harcanan enerji miktarı verilmiştir. Gazlı ısıtma, endüksiyonla ısıtma gibi doğrudan tencereyi ısıtma özelliğine sahiptir ve tencereyi hızlı ısıtır ancak verim açısından ısıtma yöntemleri içinde en düşük verime sahiptir.



Şekil 3.2: Isıtma yöntemlerinin ısıtma verimi açısından karşılaştırılması

- **Güvenli Isıtma:** Endüksiyonla ısıtma, çalışma ilkesi gereği manyetik ısıtma özelliği olan metalleri ısıtmaktadır. Ocak yüzeyi, sadece tencere alt yüzeyinden iletilen ısı sebebi ile ısınacağından, çok daha soğuk ve daha güvenli olacak ve yangın tehlikesini en aza indirecektir. Şekil 3.3' de ısıtıcı yüzey sıcaklığının 60°C ye düşmesi için geçen zaman değerleri gösterilmektedir.

- **Metal Yüzeyi:** Düzgün olmayan ısı dağılımına yol açan ısıtılacak metal yüzeyi, diğer gaz, elektrikli ısıtma yöntemlerinde olduğu kadar etkili değildir.



Şekil 3.3: Isıtma yöntemlerinin yüzeyin soğuması açısından karşılaştırılması

3.1.2 Olumsuz Yönler

- **Tencere ve Tava Uygunluğu:** Daha önce de belirtildiği gibi endüksiyon ile ısıtma yapabilmek için metalin manyetik özellik taşıyan, mıknatıslanmamış ferromanyetik malzeme içermesi gerekir. Özellikle paslanmaz çelik (belirli bir NiCr oranında) gibi malzemeye ihtiyaç duyulur. Bu açıdan tencere, maliyeti ve uygun tencerenin bulunabilmesi açısından sıkıntı oluşturmaktadır.

- **Maksimum Güç Sıkıntısı:** Her ne kadar normal ev kullanıcıları için tek faz beslemeden çekilebilecek güç belirli olsa da bazı kullanıcıların daha yüksek güç çekme ihtiyacı olduğu diğer firmaların saha geri beslemelerinden anlaşılmaktadır.

3.2 Çalışma İlkesi

Endüksiyonla ısıtma, elektromanyetik endüksiyon, deri etkisi ve ısı transferi olmak üzere üç temel kavramdan oluşur.

3.2.1 Elektromanyetik Endüksiyon

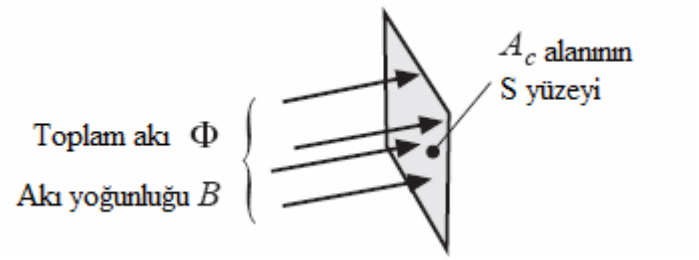
- **Manyetik Alan H ve Manyetik Alan Kuvveti:** x_1 ve x_2 noktaları arasındaki manyetik alana bağlı olarak elde edilen F (manyetik alan kuvveti) eşitlik (3.1)' de verildiği gibidir. Burada l, x_1 ve x_2 arasındaki mesafeyi sembolize eder.

$$F = \int_{x_1}^{x_2} Hdl \qquad \textbf{(3.1)}$$

- **Manyetik Akı Yoğunluğu B ve Toplam Manyetik Akı ϕ:** Ac yüzeyi boyunca akı yoğunluğuna bağlı olarak oluşan toplam manyetik akı eşitlik (3.2)' de verildiği gibidir. Şekil 3.4 incelendiğinde eşitlik (3.3) elde edilir.

$$\phi = \int_{\text{yüzey } S} BdA \qquad \textbf{(3.2)}$$

$$\phi = BA_c \qquad \textbf{(3.3)}$$



Şekil 3.4: Birim akı yoğunluğunu sembolize eden örnek [10]

- **B ve H Arasındaki İlişki:** μ manyetik geçirgenlik olmak üzere $B = \mu H$ ' a eşittir.

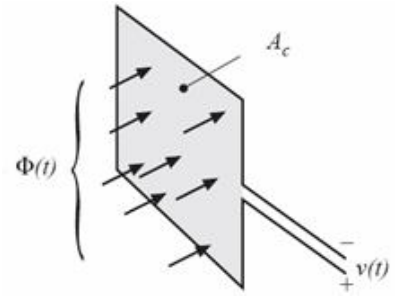
- **Faraday Kanunu:** Bir çerçeveden geçen değişken manyetik akı ile çerçevede indüklenen gerilim arasındaki bağıntı faraday yasasıdır. Bir iletken halkanın çevrelediği bir yüzeydeki manyetik akı zamana göre değiştiğinde, iletken halkada bir gerilim endüklenir. Şekil 3.5 yardımıyla Faraday kanunu eşitlik (3.4) olarak özetlenebilir. Eşitlik (3.3), (3.4)' de yerine konulursa eşitlik (3.5) elde edilir. Şekil 3.6' daki N sarımlı bir tel için (3.4) ve (3.5) eşitlikleri (3.4a) ve (3.5a) şeklindedir.

$$v(t) = \frac{d\phi}{dt} \qquad \textbf{(3.4)}$$

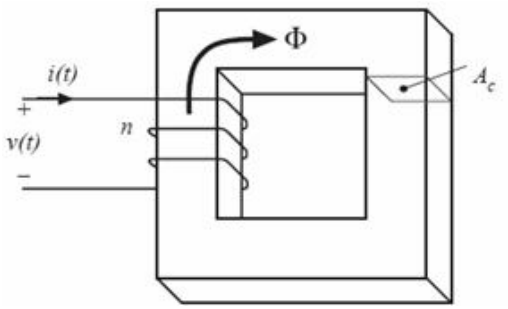
$$v(t) = n\frac{d\phi}{dt} \qquad \textbf{(3.4a)}$$

$$v(t) = A_c \frac{dB(t)}{dt} \qquad \textbf{(3.5)}$$

$$v(t) = nA_c \frac{dB(t)}{dt} \qquad \textbf{(3.5a)}$$

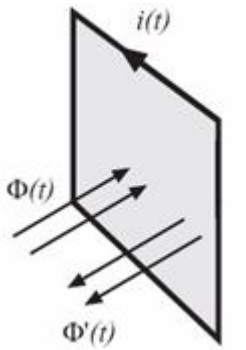


Şekil 3.5: Faraday kanununa örnek [10]



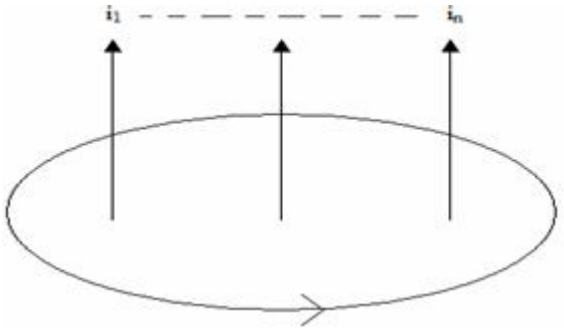
Şekil 3.6: Manyetik nüveye sarılmış n sarımlı tel [10]

- **Lenz Kanunu:** Değişen $\phi(t)$ akısı ile oluşan v(t) gerilimi, bu akıyı engellemek isteyen bir akım geçirir. Lenz kanuna örnek olarak Şekil 3.7' deki kapalı bir tel düşünülürse, tel etrafında oluşan değişken akı çerçeve çevresinde bir gerilim endükler, endüklenen bu gerilim i(t) akımını oluşturur. Oluşan i(t) akımı ise $\phi(t)$ akısına ters yönde $\phi'(t)$ akısını meydana getirir.



Şekil 3.7: Lenz Kanuna örnek olarak, kapalı bir tel boyunca oluşan akı [10]

- **Ampere Kanunu:** Ampere kanunu içinden akım geçen bir telin etrafında oluşturduğu manyetik alanı açıklar. Akım taşıyan bir iletken bir manyetik alan şiddeti meydana getirir. Bu alan şiddeti H ile gösterilir ve SI birim sisteminde metre başına Amper olarak, A/m birimiyle ifade edilir. Amper yasasına göre, manyetik alan şiddetinin Şekil 3.8'deki çizgisel integrali, halkalamış olduğu akımların toplamına eşittir. Ampere kanunu eşitlik (3.6)' da verildiği gibidir. Bu kanuna örnek olarak Şekil 3.9' daki manyetik bir nüve düşünülürse, nüvenin içinden geçen yol manyetik alanı ve manyetik akının yönünü gösterir ve bu eşitlik (3.7) ile ifade edilir. Şekil 3.10' daki n sarımlı bir tel için (3.7) eşitliği (3.7a) şeklindedir.

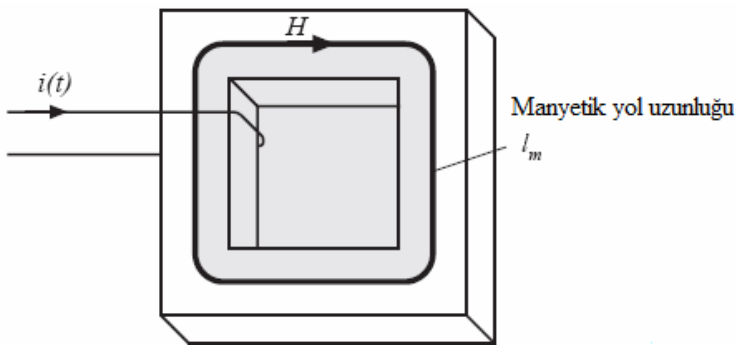


Şekil 3.8: Amper kanunundaki genel ilişki

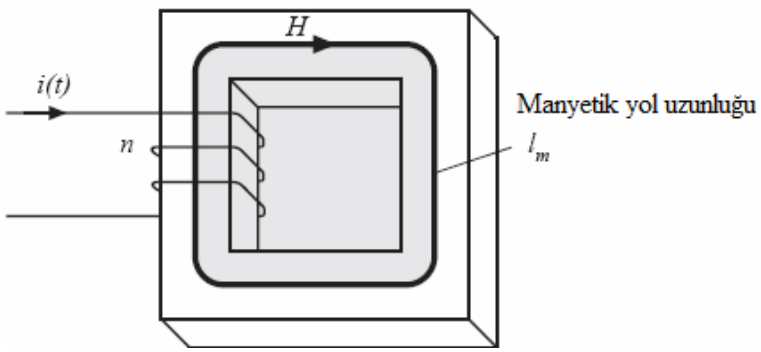
$$\oint Hdl = \sum i \qquad \textbf{(3.6)}$$

$$H(t)l_m = i(t) \qquad \textbf{(3.7)}$$

$$H(t)l_m = ni(t) \qquad \textbf{(3.7a)}$$



Şekil 3.9: Ampere kanununa örnek olarak verilmiş nüve [10]



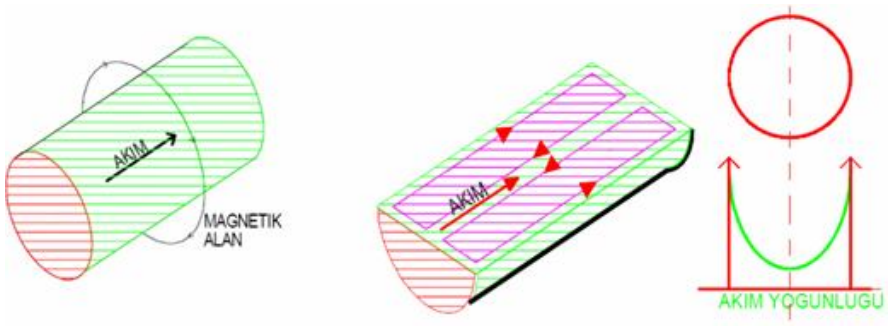
Şekil 3.10: Ampere kanunu için n sarımlı tel örneği [10]

Özetle, içinden alternatif akım geçen bir telin etrafında Ampere kanunu gereği değişen bir manyetik alan oluşur. Değişen manyetik alan içerisinde kalan malzeme üzerinde de Faraday kanunu gereği gerilim endüklenir.

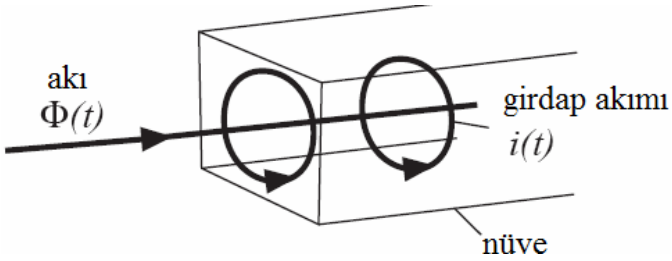
3.2.2 Deri Etkisi ve Girdap Akımları

Üzerinden alternatif akım akan iletken tel ya da bobin, etrafında değişken manyetik alan oluşturur. Değişen manyetik alan değişen manyetik akıyı oluşturur. Lenz kanunu gereği iletken içinde kendi oluşturduğu manyetik akıyı sönümleyici biçimde girdap akımları meydana gelir. Oluşan girdap akımlarının yönü iletkenin iç kesitinde ana akımı zayıflatıcı yönde, dış kısımlarında ise arttırıcı yöndedir. Şekil 3.11' de girdap akımı oluşumu ilkesel olarak gösterilmiştir.

Manyetik nüveler elektrik akımını ileten iletkenlerdir. Lenz kanununa göre nüve içindeki manyetik akı, nüve içinden bir akım geçmesine sebep olur (Şekil 3.12). Oluşan bu akım, nüve içinden geçen $\phi(t)$ akısını zayıflatıcı, ters yönde bir akı oluşturur.



Şekil 3.11: Girdap akımı ve deri etkisi



Şekil 3.12: Nüve içinden geçen girdap akımı [10]

Deri etkisinin sonucu olarak akım yoğunluğu metalin iç yüzeyinde azalacak, dış yüzeyine doğru yığılacaktır. Frekans arttıkça girdap etkisi ile akım daha çok yüzeye doğru yığılacak ve akımın aktığı etkin kesit azalacaktır.

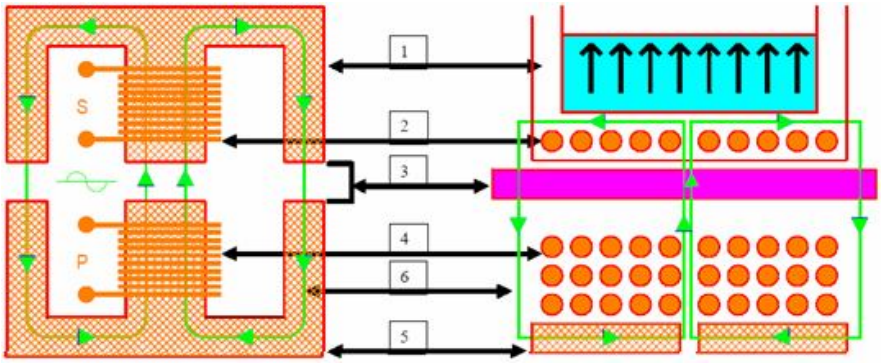
Etkin kesitin belirlediği direnç ve akan akımın ısıl (joule) etkisi ile metallere $P = \frac{V^2}{R} = i^2 R$ gereğince ısıl enerji aktarılmaktadır. Dikkat edilirse transformatördeki ısıl demir kayıplara yol açan girdap akımları endüksiyon uygulamasında avantaj olarak kullanılmaktadır. Transformatörlerin ya da motor stator, rotorlarının sac yapılı üretilmelerinin temel nedeni de girdap akımının aktığı yüzey alanın küçültülerek bu etkinin en aza indirilmesidir. Benzer biçimde çok telli kabloların, tek telli kablolara avantajı, esnekliğin yanı sıra deri etkisinin küçük tel kesitlere indirgenerek azaltılması ve aynı kesitte daha yüksek akım taşıma kapasitesine sahip olmalarıdır.

3.2.3 Transformatör Etkisi

Endüksiyonla ısıtma ilkesinin daha iyi anlaşılabilmesi için Şekil 3.13' de endüksiyon çalışma ilkesi, endüksiyonu oluşturan öğeler ile geleneksel transformatör arasında bağ kurularak anlatılmaya çalışılmıştır.

Transformatör, uyarma sargısı (primer-birincil) tarafından ferit ya da sac nüve gibi manyetik bir ortamda endüklenen manyetik akının, aynı nüveye sarılı olan diğer sargılarda (sekonder-ikincil) gerilim endüklenmesine dayanarak, iki ortamı birbirinden manyetik olarak izole ederek enerjinin iletilmesini sağlayan bir güç aktarım elemanıdır. Daha önceki bölümlerde değinildiği gibi değişen bir manyetik alan içinde bırakılan manyetik malzeme ya da sargılarda gerilim endüklenir. Eğer transformatörün sekonder tarafı kısa devre edilirse, sekonder tarafta akım çok fazla artacaktır. Bu durumda ısı kaybı da artar. Endüksiyonu anlamak için transformatörün primer tarafı çok sarımlı iken sekonder taraf tek sarımlı düşünülür. Endüksiyon

bobinin sargısı ile (primer sargı), yük (sekonder sargı) arasında oldukça küçük bir hava aralığı bulunur.



Şekil 3.13: Endüksiyon ve transformatör arasındaki benzerlik [11]

Tablo 3.1' den yola çıkarak, geleneksel transformatör yapısında birincil sargının (4) yerini, endüksiyonda bobinin kendisi alır. Yüksek frekanslı akımın bobine uygulanmasıyla, bobine dik yönde manyetik alan (6) oluşur. Oluşan manyetik akı aynen elektrik akımı gibi kapalı bir çevrimde akmak ister. Manyetik alanın akış yolu üzerindeki malzemelerin manyetik özellikleri, ikincil tarafta endüklenen akımın genliğini, fazını ve manyetik direnç olarak adlandırılan relüktansını belirler.

Tablo 3.1: Transformatör ve Endüksiyon arasındaki ilişki

TRANSFORMATÖR		ENDÜKSİYON
İkincil Manyetik Ortam	1	Tencere
İkincil Sargı	2	Tencere
Hava Aralığı	3	Cam-Seramik Yüzey
Birincil Sargı	4	Bobin
Birincil Manyetik Ortam	5	Ferit
Manyetik Alan	6	Manyetik Alan

Transformatörde ferit ya da sac nüvenin yerini (5), endüksiyonda bobinin tencere koyulmayan kısmına yerleştirilen çubuk feritler alır. Feritlerin diğer görevi alanın düzgün dağılmasını sağlayarak tencerenin eşit ısıtılmasını sağlamak ve istenen güç değerini kararlı kılmaktır. Transformatörde hava aralığını (3), endüksiyon sisteminde bobin ile tencere arasındaki mesafe alır. Endüksiyonla ısıtmada temel amaç ısı transferini maksimize etmek olduğu için hava aralığı optimum düzeyde tutulur ve yükün yüksek dirençli-yüksek manyetik geçirgenliğe sahip olması istenir.

Transformatörde, sekonder sargı ve nüve, Endüksiyonla ısıtmada yerini, ısıtılacak metale bırakır. Bobin tarafından oluşturulan manyetik alan sabit duran tencere üzerinde girdap akımları endükler. Yukarıda ilkeleri anlatılan akım yığılma etkisi sebebi ile akım, metalin yüzeyinde belirli bir girme derinliğinde akar. Akımın aktığı etkin kesitin belirlediği direncin ısıl etkisi ile metal ısınmaya başlar.

Anlaşılabileceği gibi bobin üzerine yerleştirilen tencere transformatörün sekonder kısmını oluşturmaktadır. Dolayısıyla manyetik geçirgenlik özelliği yüksek metaller tercih edilmelidir. Manyetik özelliği nispeten daha kötü olan metallere istenen gücün aktarılabilmesi için etkin direncin dolayısıyla alanın frekansının yükseltilmesi gerekmektedir. Tablo 3.2' de bazı metallerin değişken frekanslarda endüklenen akımların girme derinlikleri gösterilmiştir.

Tablo 3.2: Çeşitli metaller için, değişen frekanslarda endüklenen akımın girme derinlikleri (mm cinsinden)

METAL	50 Hz	1 kHz	10 kHz	20 kHz	30 kHz	450 kHz
Bakır	9.2	2.1	0.65	0.46	0.38	0.096
Alüminyum	11.6	2.6	0.82	0.58	0.47	0.12
Demir	2.2	0.51	0.16	0.11	0.092	0.023
Çelik	0.78	0.18	0.057	0.040	0.033	0.008
Nikel	0.65	0.15	0.05	0.035	0.029	0.007

Pratik anahtarlama frekansları insan kulağının duyma sınırının üstünde 20 kHz-50 kHz aralığındadır. Bu anlamda yeterli girme derinliğinin (~35μm) oluşturulması için Demir, Çelik ve Nikel gibi malzemeler endüksiyon uygulamalarında tercih edilirler.



Şekil 3.14: Endüksiyonla ısıtmada tencere tipi kullanılabilirliği

Alüminyum ve bakır gibi metallere verilen frekans aralığında girme derinliklerinin yüksek olması sebebi ile sınırlı miktarda güç aktarılabilmektedir. İstenen gücün aktarılabilmesi için ise 450 kHz mertebesinde frekanslara çıkmak gerekmektedir. Bu nedenle endüksiyon ocak uygulamalarında alüminyum ve bakır tencerelerin ısıtılması uygun olmamaktadır. Şekil 3.14' de endüksiyon için uygun olan ve olmayan tencereler sıralanmıştır.

3.3 Endüksiyon Elektroniği

Önceki ayrıtlarda anlatılan temel çalışma ilkelerinden çıkan sonuç endüksiyonla ısıtmanın gerçekleşebilmesi için endüksiyon bobininin yüksek frekanslı ve sinüs biçimli akımlar ile uyarılması gerektiğidir. Bu amaçla motor sürücü devrelerindeki Darbe Genişlik Modülasyon tekniği PWM (Pulse Width Modulation) kullanılarak Doğru gerilimden sinüs modülasyonu ile yüksek frekanslı sinüse benzer akım elde edilebilir. Ancak bütün PWM' li DC/AC eviricilerde anahtar yükte açma kapama yapacak şekilde çalışır ve bu durum kayıpları artırır, ayrıca yüksek frekansın sebep olduğu yüksek di/dt, dv/dt nedeni ile anahtarlar aşırı zorlanarak, yanlış açma kapamalara sebep olur.

Anahtarlama frekansı yükseltilerek devredeki transformatörlerin ve filtrelerin boyutları küçültülebilir; bu durum aynı güç değeri için daha ufak ve daha hafif eviriciler yapma olanağını sağlar. Frekansın artması anahtarlama kayıplarının da artmasına neden olacağından verimi düşürür. Anahtar üzerindeki kayıp, anahtara paralel bir bastırma (snubber) devresi konarak azaltılabilir. Yüksek frekansta enerji aktarımında maksimum verimin elde edilebilmesi için gerilimin veya akımın sıfır geçiş noktalarında anahtarlama yapılmaya çalışılır. Bu olaya "yumuşak anahtarlama (soft switching)" denir. Yumuşak anahtarlama ikiye ayrılır: Sıfır gerilim anahtarlama (zero voltage switching), sıfır akım anahtarlama (zero current switching). Sıfır gerilim anahtarlamada anahtar iletime geçmeden hemen önce anahtar üzerindeki gerilim sıfıra çekilerek iletim zamanı kaybı sıfıra indirilir. Sıfır akım anahtarlamada ise anahtar kesime gitmeden hemen önce anahtar üzerinden akan akımın sıfır olması sağlanarak kesim kaybı sıfıra indirilir. Anahtar üzerindeki gerilim veya akım L-C rezonans devresi kullanılarak sıfıra indirilebilir. Bu topoloji "rezonans evirici" adını alır.

Genel olarak yarı iletkenli anahtarlama devreleri “zorlamalı anahtarlama modunda (hard switch mode)” çalışırlar. Bu modda anahtar, belirli bir miktar akım, belirli bir miktar gerilim seviyesinde açılır ve kapanır. Bu nedenle anahtarlama kayıpları oluşur. Frekans ne kadar yüksek ise anahtarlama kayıpları da o kadar yüksek olur.

Bu amaçla temel devre elemanlarından endüktans ve kondansatörün kare dalga uyarıma verdiği sinüs akım cevabı kullanılarak, anahtarlama yük tarafında değil rezonans devrede gerçekleştirilir. Sinüs biçimli akım ve/veya gerilimin sıfırdan geçtiği anlarda da anahtarlama gerçekleştirilir. Bu ilkeden hareketle “rezonans eviriciler” türemiştir.

3.3.1 Rezonans Eviriciler

Rezonans eviricilerin amacı bir güç elektroniği sistemini, üzerinde nerede ise sıfır akım ya da sıfır gerilim olduğunda anahtarlama yapacak hale dönüştürmektir. Azalan anahtarlama kayıplarıyla anahtarlama frekansı ve kontrol aralıkları artabilecek, gerilimdeki değişim azalabilecektir.

Rezonans evirici anahtarlama kayıplarını en aza indirerek enerji dönüşümünü sağladığı için günümüzde endüstrinin çeşitli alanlarında kullanılmaktadır. Bu durum endüksiyonla ısıtmada neden rezonans eviricilerin kullanıldığını da açıklamaktadır.

Rezonans sisteminin temeli aslında basit bir ilkeye dayanır. Herhangi bir akım ya da gerilim çalışma noktasında güç akışı her zaman tek yönlüdür, anahtarlama frekansı sabittir ve çıkışı kontrol etmek için çalışma oranı değiştirilmelidir. Bu durumda endüktans ve kondansatör elemanlarının birbirlerine aktardıkları enerjinin miktarı ayarlanarak güç ayarı gerçekleştirilir. Rezonans frekansında ise tam bir güç transferi vardır ve maksimum güç aktarılır. Bir başka değişle maksimum güç akışının gerçekleştirildiği nokta rezonans frekansıdır.

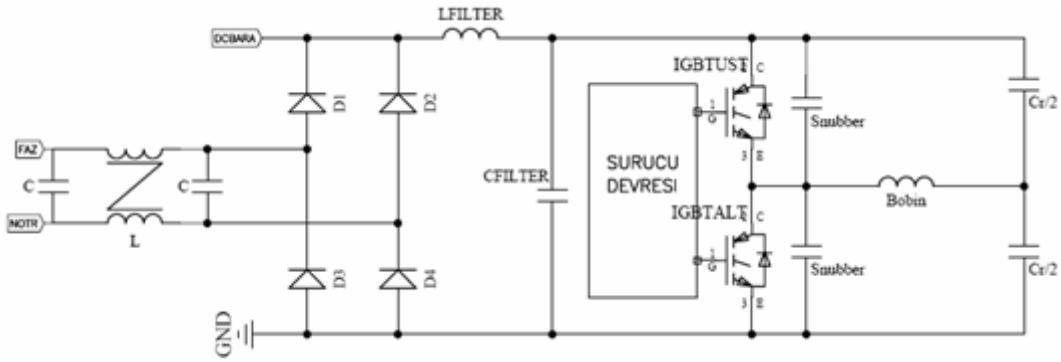
Endüktans, kondansatör ve anahtarlama elemanının sayı ve bağlanma şekline göre rezonans eviriciler çeşitlere ayrılırlar. Bu çalışmada yarım köprü seri rezonans evirici kullanıldığından onun üzerinde durulacaktır.

3.3.1.1 Yarım Köprü Seri Rezonans Evirici

Devrenin temel mantığı endüksiyon bobinine yüksek frekanslı kare dalga uygulanmasıyla bobinin sahip olduğu endüktans ile DC baraya yerleştirilen kondansatörlerin seri rezonansa girerek sinüs biçimli akım oluşturulmasına dayanmaktadır.

Tam rezonans frekansında anahtar sıfır akım ve sıfır gerilimde anahtarlama yapmaktadır. Ancak gücün sabit olmayıp değiştirilmesi gerekeceğinden devre rezonans frekansının altında ya da üzerinde çalışacaktır. Endüksiyon uygulaması için rezonans frekansının üzerinde çalışması kayıpların minimuma inmesi açısından daha anlamlı olmaktadır.

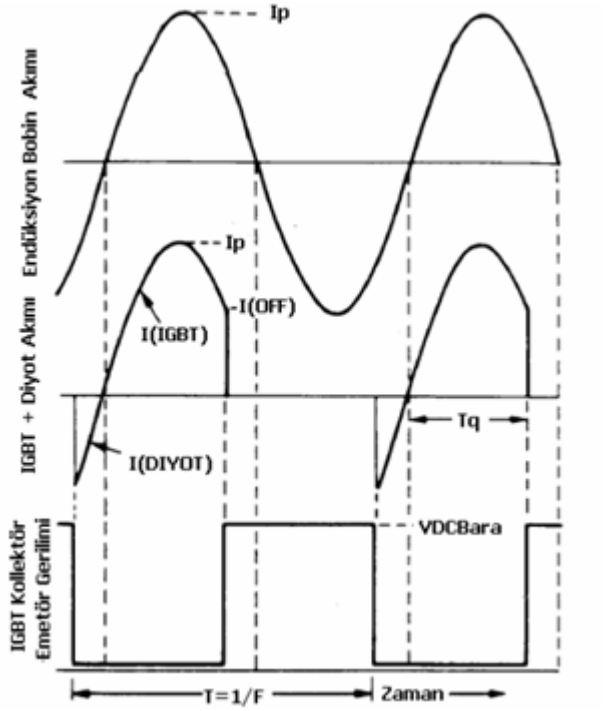
Şekil 3.15' de Yarım köprü seri rezonans endüksiyon devresi temel yapısı ve yapıyı oluşturan elemanlar gösterilmektedir. Şebeke gerilimi EMC (Electromagnetic Compatibility) filtre katından geçtikten sonra doğrultucu ile tam dalga doğrultularak, resonans evirici için gerilim kaynağı oluşturulur. Üst ve alt IGBT (Insulated, Gate, Bipolar, Transistor) ile DC bara, bobin ve kondansatöre uygulanarak rezonans sistem oluşturulur.



Şekil 3.15: Yarım köprü seri rezonans endüksiyon devresi temel yapısı

Şekil 3.16' da ise endüktif bölgede çalışan rezonans eviricide ideal akım ve gerilim dalga şekilleri gösterilmektedir. Şekilden görülebileceği gibi üst ve alt IGBT' lerde hiçbir iletime sokma kaybı oluşmamaktadır; çünkü zıt paralel bağlı diyot akım taşımaktadır ve IGBT, ileri yönde akımı geçirmeden önce, üzerindeki gerilim sıfırdır. Diğer IGBT akımı, öteki IGBT' nin kesime geçmesi ile oluşur. Endüktif bölgede çalışmanın sonucu olarak IGBT, üzerinden akım geçerken kesime gitmek zorundadır.

Bunun sonucu olarak kesme kayıplarının oluşması kaçınılmazdır. Ancak IGBT' ye bağlanan bastırma (snubber) kondansatörleri ile kesme enerjisi kondansatöre aktarılarak kayıplar önemli ölçüde düşürülebilir. Bastırma devresinde bir boşaltma direncine ihtiyacı yoktur. Bunun nedeni ise yarım köprüdeki ters IGBT' nin kapanması ile kondansatörün boşalabilmesidir.



Şekil 3.16: İdeal seri rezonans evirici dalga şekilleri

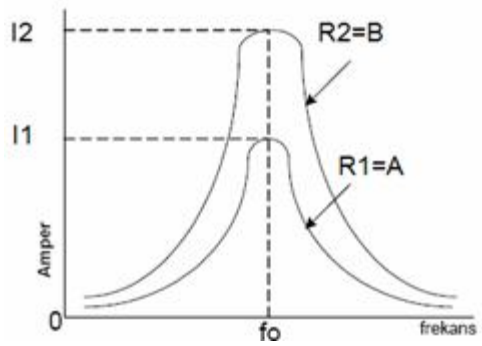
3.3.1.2 Seri Rezonans Devrede Güç Kontrol Karakteristiği

Herhangi bir sistemde rezonans olabilmesi için iki çeşit enerji depo edebilen elemanın mevcut olması gerekir. Örneğin mekanik bir sistemde kütle ile yayın, bir elektrik devresinde ise Endüktans (L) ve kapasite (C) bulunması lazımdır. Eğer bir sistemde bir tane enerji depo edebilen eleman varsa, bu sistemde rezonanstan bahsedemeyiz. L ve C' li bir elektrik devresinde uygulanan gerilim ile geçen akım aynı fazda ise, bu devre rezonans halindedir denir. Rezonanstaki bir RLC devresinin, endüktif reaktansı kapasitif reaktansına eşittir. Empedans minimumdur ve devrenin direncine eşittir (Z=R). Devreden geçen akım maksimumdur (I=U/Z=U/R). Kaynak gerilimi R direncinde düşen gerilime eşittir U_R=U, Kondansatörün uçlarındaki gerilim bobinin uçlarındaki gerilime eşittir (U_C=U_L) Rezonanstaki bir sistemin

endüktif reaktansı, kapasitif reaktansına eşit ise rezonans frekansı eşitlik (3.8) şeklinde bulunur. Rezonansta sistem maksimum aktif gücü çeker.

$$2\pi f_0 L = \frac{1}{2\pi f_0 C} \Rightarrow f_0 = \frac{1}{2\pi\sqrt{LC}} \qquad \textbf{(3.8)}$$

Rezonans frekansını veren formül incelendiğinde direncin frekansı etkilemediği görülür. R direncinin küçük veya büyük olması empedansın minimum değerini değiştirir. Dolayısıyla rezonansta devreden geçen maksimum akımın değerini R direnci tayin eder. R küçüldükçe akım eğrisi sivrileşir. Şekil 3.17' de görüldüğü gibi R büyüdükçe de akım eğrisi yayılır, yani sivriliği gider [12].



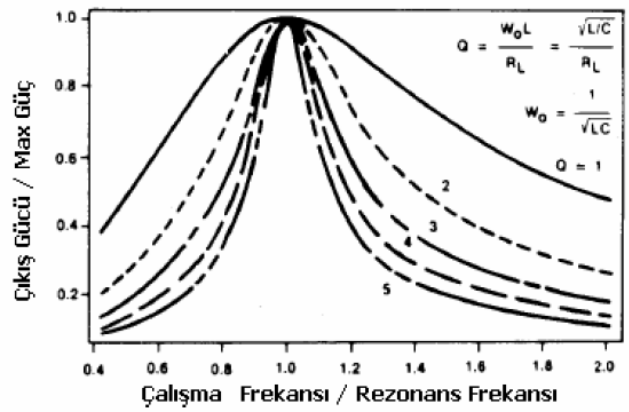
Şekil 3.17: A> B için rezonans eğrisine direncin etkisi [12]

Rezonans devrelerinde bir diğer önemli kavram ise kalite faktörü (Q)' dur. Endüktans ve kapasitansa sahip olan bir RLC devresinde reaktif güç alış verişi bu iki devre elemanında olur. Rezonans halinde endüktansın reaktif gücü, kondansatörün reaktif gücüne eşittir. Bu durumda kaynak devrenin direncinde ısı şeklinde kaybolan hakiki gücü (aktif gücü) sağlar. Seri RLC devresi rezonansta iken, endüktanstaki veya kapasitanstaki reaktif gücün hakiki güce oranına, rezonans devresinin kalite katsayısı veya Q'su denir.

$$Z_0 = X_L = X_C = \omega_0 L = \frac{1}{\omega_0 C} = \sqrt{\frac{L}{C}} \qquad \textbf{(3.9)}$$

$$Q = \frac{Reaktif\ Güç}{Aktif\ Güç} = \frac{I^2 X_L}{I^2 R} = \frac{X_L}{R} = \frac{2\pi f_0 L}{R} = \frac{\omega_0 L}{R} = \frac{1}{\omega_0 CR} = \frac{Z_0}{R} = \frac{1}{R}\sqrt{\frac{L}{C}} \qquad \textbf{(3.10)}$$

Bir rezonans devresinin Q katsayısı, eşitlik (3.10)' dan anlaşılacağı üzere devrenin R direncine ve L/C oranına bağlıdır. R direncinin ve L/C oranının rezonans eğrisi üzerindeki etkisine göre, Q katsayısı büyüdükçe rezonans eğrisinin sivrileceği sonucu çıkarılır. Dolayısıyla, devre bazı frekansları daha iyi seçebilir. Şekil 3.18' de görüleceği gibi Q katsayısına bağlı olarak anahtarlama frekansı değişimi ile yüke güç aktarım karakteristiği değişir. Endüksiyon sisteminde yük direnci arttıkça Q değeri azalır yani rezonans eğrisi yayvanlaşır. Dolayısıyla frekans değişimi ile güç daha az değişmektedir. Tencere ısındıkça direnci artar ancak rezonans eğrisinin yayvan oluşu sabit frekansta gücün nerede ise hiç değişmemesine sebep olur. Bu anlamda endüksiyonla ısıtma için uygun görünmektedir. Eğrilerden çıkan bir diğer sonuç ise yük azaldıkça IGBT' ler üzerindeki akımın azalmasıdır.



Şekil 3.18: Çalışma frekansına bağlı olarak güç kontrol karakteristiği [13]

Direnç endüktansa göre küçülmeye başladıkça, kaynak frekansı rezonans frekansına yaklaşırken frekans eğrisi dikleşir ve Q büyür. Eşitlik (3.10)' daki pay rezonans boyunca endüktansta depo edilen enerji, payda ise her bir periyotta direnç üzerinde kaybolan enerjinin ortalama değeridir. Akım ve çıkış gücü rezonans frekansında maksimum değerine ulaşır. Anahtarlama frekansının rezonans frekansından daha düşük olduğu bölgede: Endüktif reaktans ile anahtarlama frekansı arasında doğrudan bir ilişki vardır. Başka bir değişle, frekans düştükçe endüktif reaktans da düşer. Kapasitif reaktans ile frekans ilişkisi ise ters orantılı olduğundan anahtarlama frekansı düştükçe reaktans daha kapasitif olur. Anahtarlama frekansı arttıkça empedans ve çıkış gücü artar. Daha düşük anahtarlama frekansı daha küçük empedansa yol açar ve çıkış gücünün düşürür. Anahtarlama frekansının rezonans frekansından daha büyük olduğu bölgede: Anahtarlama frekansı arttıkça endüktif

reaktans artar. Kapasitif reaktans azalır. Daha yüksek anahtarlama frekansı çıkış gücünü düşürür. Anahtarlama frekansı düşerken ise empedans azalır, çıkış gücü artar.

4. TEK GÖZLÜ ENDÜKSİYON OCAK UYGULAMASI

Endüksiyon ocağın diğer ocaklara kıyasla birçok olumlu yanlarının olduğu daha önceki kısımlarda bahsedilmişti. Bu bölümde ise bunlara ek olarak ne gibi fonksiyonel üstünlükleri olduğundan, içinde nasıl bir gömülü sistemin işlediğinden ve nasıl bir kontrol algoritmasının koşturulduğundan bahsedilecektir.

4.1 Çalışma Prensibi

Temel prensip önceki kısımlarda anlatıldığı gibi bobin üzerinden yüksek frekanslı alternatif bir akımın (AC) geçirilmesiyle oluşan manyetik alan ile bobin üzerine konulan tencere alt yüzeyinde girdap biçimli bir akım endüklenmesidir. Akım, tencere alt yüzeyinde belli bir girme derinliğinde akar. Girme derinliğinin belirlediği direnç ile oluşan ısıl kayıp tencerenin ısınmasını sağlar. Sistemde kullanılan anahtarlama frekansı 20 kHz ile 50 kHz arasında değişmektedir. Anahtarlama kayıplarını azaltmak için sıfır gerilimde anahtarlama yapılır. Bu uygulamada kullanılan rezonans evirici, yarım köprü seri rezonans eviricidir. Sistem endüktif bölgede çalıştırılmaktadır.

Endüksiyon elektroniğinin iç yapısında kullanılan IGBT' ler soğutucu üst yüzeyine monte edilmişlerdir. Isınan IGBT' leri soğutma amaçlı soğutucu hizasına bir de fan yerleştirilmiştir.

Sistem bobin akımı ile kontrol edilmektedir. Her ısıtma seviyesinin kendine ait bir akım değeri mevcuttur. Bunlar tablo halinde mikrodenetleyiciye gömülüdür. Amaç her seviye için belirlenen akım değerine göre bobin akımını sabit tutmaktır. Bobin akımı, akım trafosu ile algılanır.

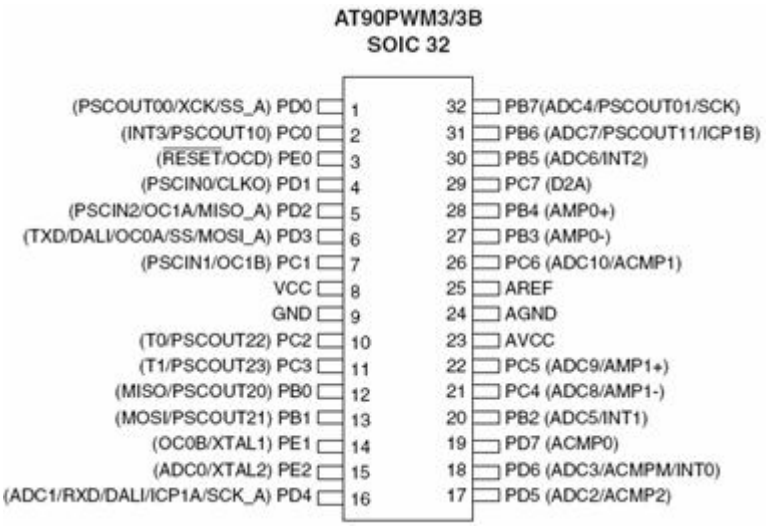
Endüksiyon sisteminde bobin akımı ve tencere algılama, şebeke sıfır geçişlerine bağlı olarak 10 ms' de bir kontrol edilir. Şebeke sıfır geçişlerinde gerilimin çok düşük olması bobin akımının düşük olmasına sebep olur. Yapılacak kontroller

anlamında en güvenilir bölge bu sebeple burasıdır. Ayrıca gürültünün en az olduğu bölgedir. Bu nedenle sıcaklık algılayıcılarından gelen veriler ADC okuma olarak bu bölgede okunurken, şebeke sıfır geçişten 1 ms sonra tencere algılama algoritması çalışır. Şebeke geçişten sonraki 4 ms ile 6 ms arasında ise kontrol edilecek akım tepe değeri okunur.

Sıcaklığa karşı olan bütün koruma ve güvenlikler bobin ve soğutucuya bağlı sıcaklık algılayıcıları (NTC-Negative Temperature Coefficient) aracılığıyla kontrol edilirler.

Sistemde oluşabilecek aşırı akım durumunda, ilgili sinyal tarafından uyarılan mikrodenetleyici, sisteme uygulanan PWM frekansını keser böylece bobin üzerinden akım geçişi engellenir. Aşırı akım koruma devresi bobin üzerinden geçen AC akımın hem pozitif hem de negatif bölgesine karşı duyarlıdır.

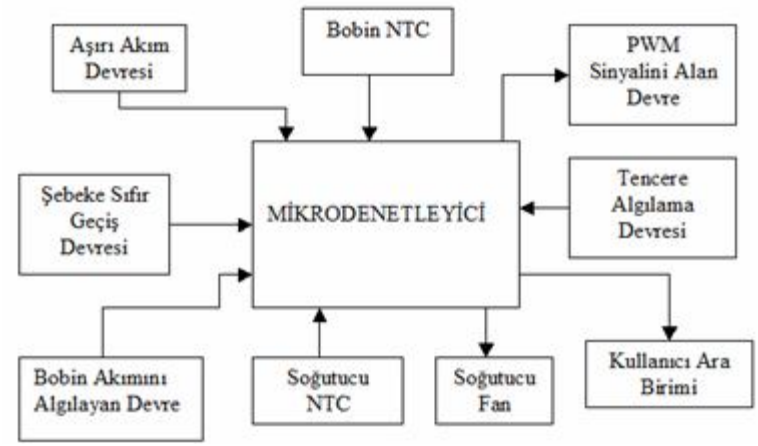
Hata ve güvenlik algoritmaları, kullanıcı ara birimi üzerinden bilgilendirme amaçlı kullanıcıya sunulur ve herhangi bir hata durumunda gözlerin açılmasına izin verilmez.



Şekil 4.1: Sistemde kullanılan mikrodenetleyicinin pin diyagramı [14]

Endüksiyon ocak elektroniğinde gömülü bir sistem mevcuttur. Bu sistemde seçilen mikrodenetleyici birbirinin tamamlayıcı ve aralarında ölü zaman olan darbe genişlik modülasyon (PWM) işaretini üretebilecek özellikte seçilmiştir. Çünkü yarım köprü seri rezonant devrede bulunan alt IGBT ve üst IGBT hiçbir zaman aynı anda iletime geçmemelidir. Böyle bir durumda faz nötr kısa devresi meydana gelir. Bu amaçla

kullanılan mikrodenetleyici Şekil 4.1' de verildiği gibi ATMEL marka AT90PWM3'tür. Mikrodenetleyicinin, Şekil 4.2' de görüleceği gibi, birbirinin tamamlayıcısı ölü zamanlı darbe genişlik modülasyonu (PWM), analog dijital dönüştürücü (ADC), sinyal okuma (CAPTURE), zamanlayıcı (TIMER), kesme (INTERRUPT), harici kesme (EXTERNAL INTERRUPT) ve normal giriş çıkış birimleri kullanılmıştır. Sistemde kullanılan mikrodenetleyicinin dahili saat frekansı 16MHz seçilmiştir. 8K Byte flash program hafızası, 512 Byte dahili SRAM hafızası ve 512 Byte EEPROM hafızası mevcuttur..



Şekil 4.2: Endüksiyon ocak iç elektroniğinin blok şeması

- **Birbirinin tamamlayıcısı ölü zamanlı Darbe genişlik modülasyonu:** Rezonans sisteminde kullanılan alt ve üst IGBT' lerin anahtarlanmasında görev alır.

- **Analog dijital dönüştürücü (ADC):** Bu birim, bobin akımını ve sıcaklık sensörü NTC' lerden gelen verileri okuma için kullanılmıştır. Kullanılan ADC modülü 8 bitliktir.

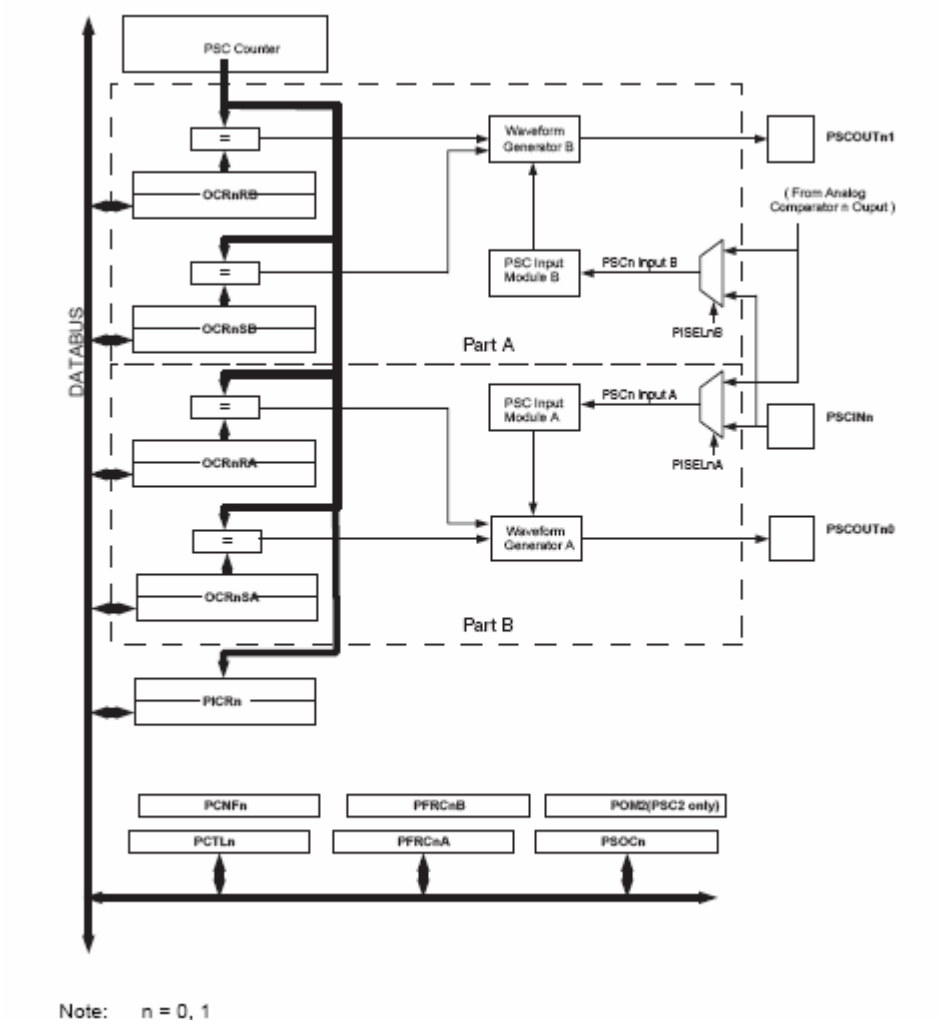
- **Sinyal okuma (CAPTURE):** Bu birim, tencere algılama algoritması için gereken işaretin yükselen ve düşen kenar arasını okur.

- **Zamanlayıcı (TIMER):** Bu birim, sistemin algoritması için gerekli her türlü zaman akışını kontrol eder.

- **Kesme (INTERRUPT):** Sistemde kullanılan analog dijital dönüştürücü, sinyal okuma ve zamanlayıcı birimleri kesmeler ile kontrol edilir.

- **Harici Kesme (EXTERNAL INTERRUPT):** Harici kesme şebeke sıfır geçişini izlemede ve sistemde oluşabilecek aşırı akım sinyalini yakalamada kullanılır.

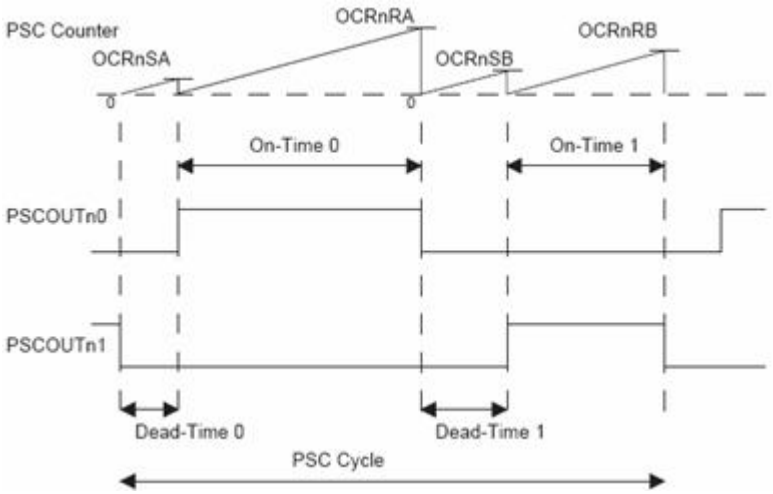
- **Giriş Çıkış Birimi:** Kullanıcı arabiriminde, gerekli sinyallerin üretilmesinde ana enerji rölesini sürmede ve soğutma sistemi için fanın çalıştırılmasında kullanılır.



Şekil 4.3: Ölü zamanlı birbirinin tamamlayıcısı PWM işareti üreten modülün blok diyagramı [14]

Kullanılan mikrodenetleyicinin birbirinin tamamlayıcı ve aralarında ölü zaman olan PWM işareti üretebilecek modülü vardır. Bu modülün kendine ait Şekil 4.3' de görüleceği gibi bir sayıcısı (PSC counter) bulunmaktadır. Buna göre modül sayıcısı birkaç modda sayabilir. Bunlar: 4 rampa modu, 2 rampa modu, 1 rampa modu, merkezi hizalama modudur. Endüksiyon sisteminde 4 rampa modu kullanılmıştır.

Buna göre ilgili 16 bitlik yazmaç değerleri Şekil 4.4' deki şekilde belirlenmiştir. Modül sayıcısı (PSC Counter) ilgili yazmaç değerlerine ulaştığında çıkış üretir.



Şekil 4.4: 4 rampa modunun çalışma prensibi [14]

Şekil 4.4' de PSCOUTn0 ve PSCOUTn1 birbirini tamamlayan ölü zamanlı PWM işaretini üretecek çıkışlardır. Şekilde verilen On-Time 0, On-Time 1, Dead-Time 0, Dead-Time 1 aşağıdaki eşitlikler ile hesaplanır. Burada F_{clkpsc}, 16MHz' e eşittir. Buna göre 16 bitlik OCRnRA, OCRnRB, OCRnSA, OCRnSB yazmaçlarının değerleri istenen ölü zaman ve iletim zamanı sürelerine göre belirlenir.

$$\text{On-Time 0} = \text{OCRnRAH\L} * 1/F_{clkpsc} \quad \textbf{(4.1)}$$

$$\text{On-Time 1} = \text{OCRnRBH\L} * 1/F_{clkpsc} \quad \textbf{(4.2)}$$

$$\text{Dead-Time 0} = (\text{OCRnSAH\L}+2) * 1/F_{clkpsc} \quad \textbf{(4.3)}$$

$$\text{Dead-Time 1} = (\text{OCRnSBH\L}+2) * 1/F_{clkpsc} \quad \textbf{(4.4)}$$

4.2 Tencere Algılama

Tencere algılama ile kastedilen ocağın üzerinde tencere olup olmadığının ve eğer tencere varsa ısıtılmaya uygun olup olmadığının algılanmasıdır. Tencere algılama, endüksiyon ocakların temel özelliği ve aynı zamanda gereksinimidir. Bu gereksinim,

önemli bir fonksiyonel özelliği doğurmuştur. Buna göre bir endüksiyon ocakta göz açılmasına rağmen tencere konmamışsa hiçbir zaman göze enerji aktarılmaz. Aynı zamanda ısıtılan bir tencere gözden alınırsa sistem otomatik olarak enerjiyi keser. Böyle bir fonksiyonellik enerji tasarrufu açısından çok önemli bir özelliktir. Gereksinim açısından bakıldığında, daha önce de belirtildiği gibi endüksiyon ocak manyetik geçirgenliği yüksek ancak iletkenliği düşük tencereleri ısıtabilir. Bunun sebebi çalışılan frekansta yeterli girme derinliğinin her metalde sağlanamaması bu nedenle istenen güç miktarının aktarılamamasıdır. Ayrıca sistem için hesap edilen rezonans frekansına yakın yerlerde uygun olmayan özellikteki tencerelerin sistemin elektroniğini bozacak yükseklikte akım çektiği gözlemlenmiştir. Bu tarz uygun olmayan metallerde, düşük çalışma frekanslarında bobin üzerinden geçen akımın çok yüksek olmasına rağmen tencereye aktarılan gücün çok düşük olduğu gözlemlenmiştir. Böyle bir durum sistem elektroniği için tehlike arz etmektedir. Tüm bu durumlar düşünüldüğünde, tencere algılama algoritması endüksiyon ısıtmalı ocak için bir gereksinim aynı zamanda verimi sağlayan bir özelliktir.

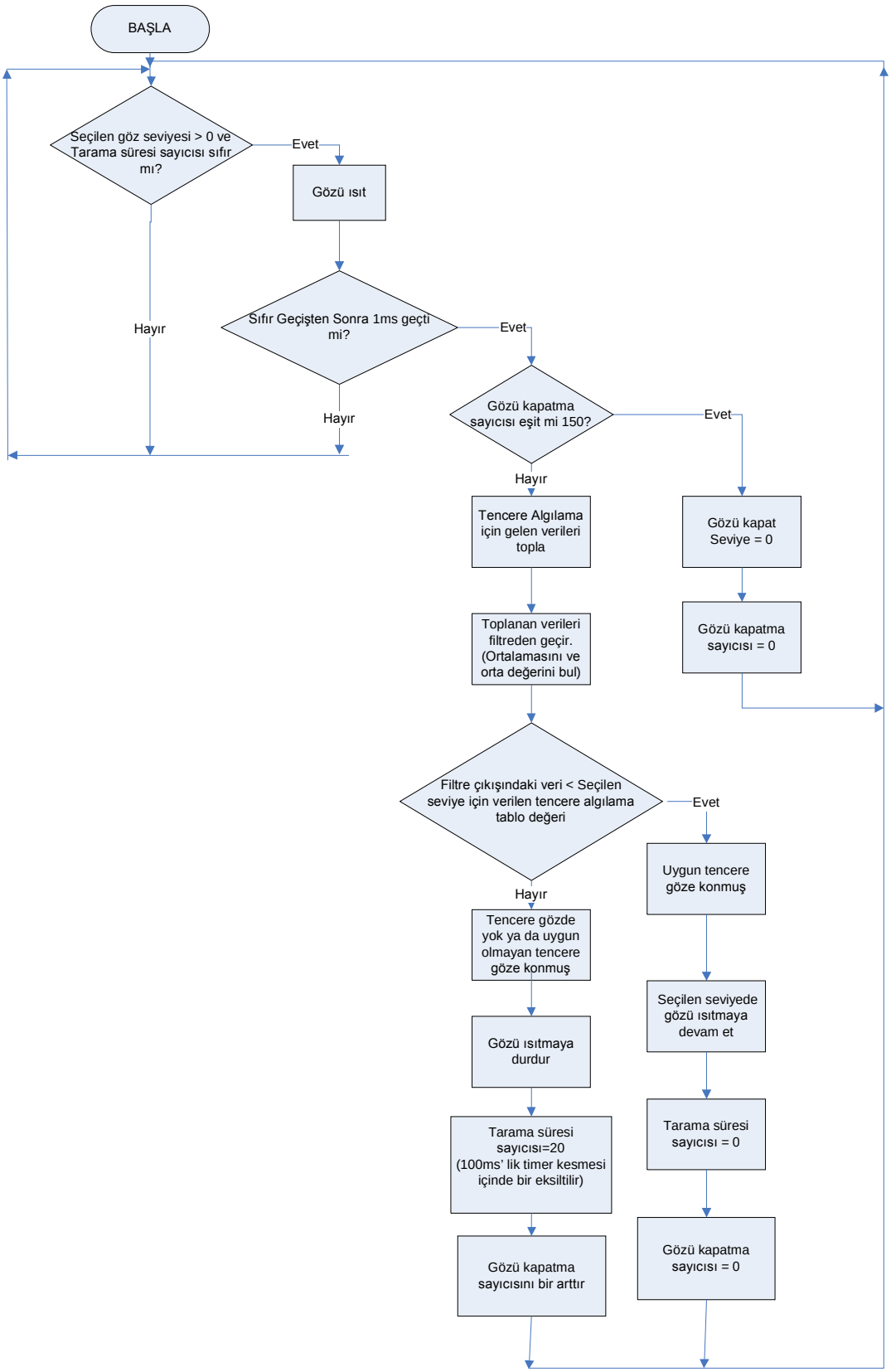
Algılama algoritması iki aşamalı olarak düşünülebilir.

1) Tencere yok
2) Tencere var ama uygun özellikte değil

Tencerenin yok olma durumu da iki aşamalı düşünülebilir.

1) Açık olan göze tencere hiç konmamış
2) Tencere ısıtılırken gözden uzaklaştırılmış.

Tencere algılama algoritması tüm bu durumlar için uygulanır. Her göz açıldığında bu algoritma çalışır. Mikrodenetleyici tarafından sistemin çalıştığı en yüksek frekans (50 kHz) başlangıçta bobine uygulanır. Bunun sebebi ne tür tencere olursa olsun yüksek frekansta çekilecek akımın düşük olmasıdır. En güvenli bölge burasıdır. Algoritma gereği mikrodenetleyici tarafından okunan bilgi 50 kHz için olan referans tablo değerleri ile karşılaştırılarak, tencere var mı yok mu varsa uygun mu değil mi algılanır. Eğer uygun tencere olduğu kanaatine varılırsa sistem mikrodenetleyici kontrolünde ısıtılmaya ve kontrol edilmeye başlanır. Ancak uygun değilse verilen PWM sinyali kesilir ve bobinden geçen akımın akışı engellenir. Bu durum mikrodenetleyici tarafından kullanıcı arabiriminde tencere yok ikazı ile kullanıcıya



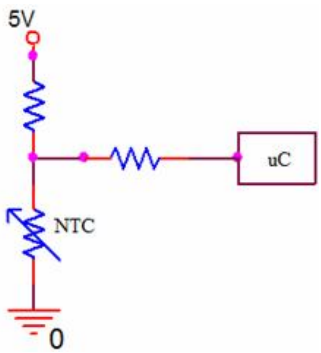
Şekil 4.5: Tencere algılama akış diyagramı

bildirilir. 2 saniye sonra göz hala açıksa tencere algılama algoritması tekrar uygulanır. Göz açık olduğu sürece, 2 saniyede bir maksimum 3 dakika boyunca uygun tencere var mı yok mu diye bakılır. Bu süre içerisinde uygun tencere konulursa sistem ısıtılmaya başlanır ve tencere yok ikazı söner. Konulmaz ise 3 dakika sonunda göz otomatik olarak kapanır.

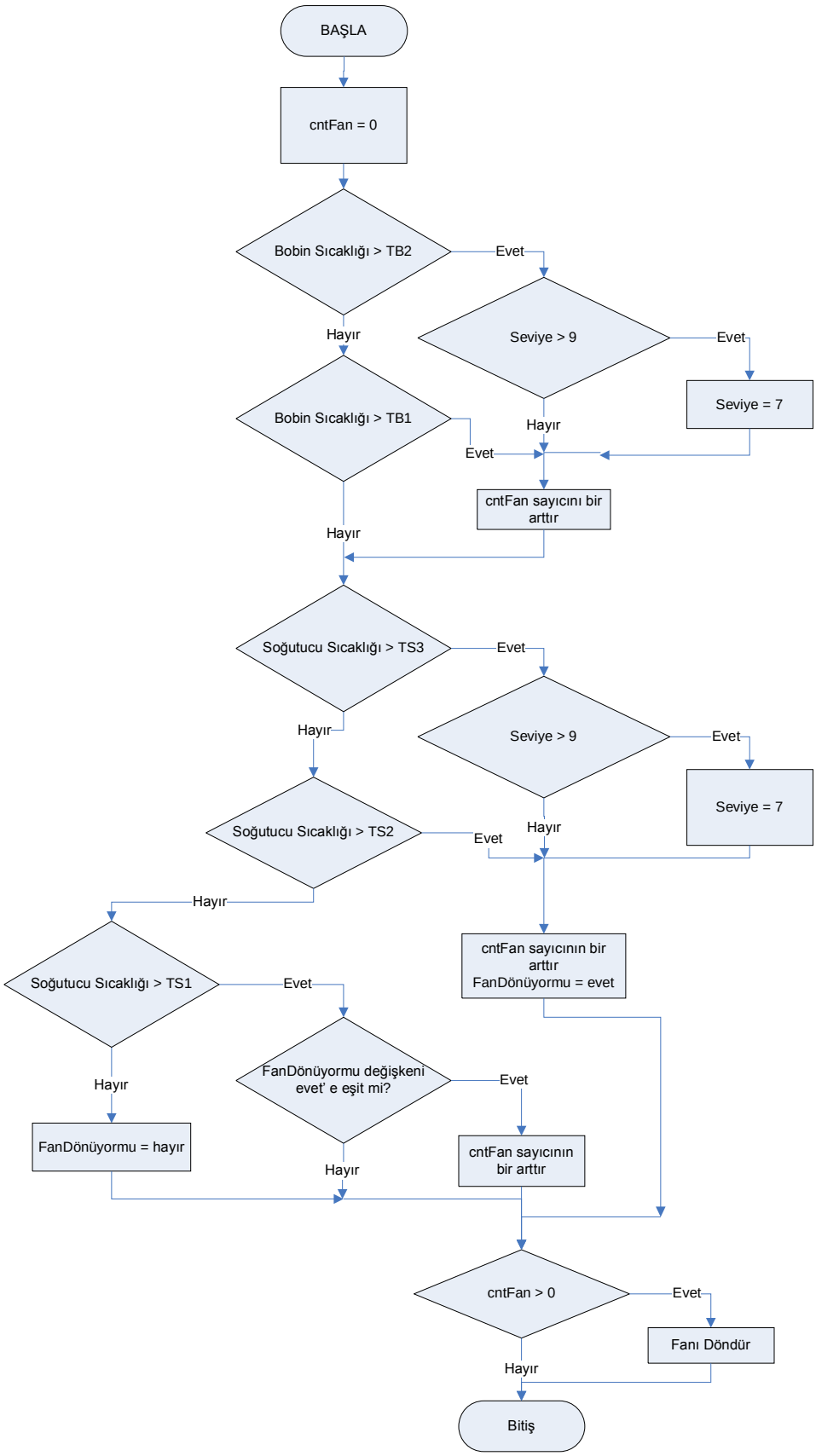
Eğer uygun tencere konulmuş ve ısıtılıyorsa, gözden tencerenin alınıp alınmadığı her seviye için ayarlanmış referans tablo değerleri ile 10 ms' de bir karşılaştırılarak kontrol edilir. Eğer algoritma gereğince okunan değer tablo değerinden yüksek ise kullanıcı arabirimine tencere yok ikazı verilir ve 2 saniyede bir maksimum 3 dakika boyunca uygun tencere var mı yok mu durumu 50 kHz için olan referans tablo değerleri ile karşılaştırılarak kontrol edilir. Tencere algılama algoritması daha ayrıntılı bir şekilde Şekil 4.5' de verilmiştir.

4.3 Sıcaklık ve Fan Kontrolü

Endüksiyon elektroniğinde ısınan IGBT' leri ve bobini soğutmak amaçlı bir soğutucu fan söz konusudur. Fanın konumu IGBT' lerin monte edildiği soğutucuya üfleyecek şekilde yerleştirilir. Fan çalıştığı zaman yüksek bir ses çıkardığı için, çalışma düzeni kullanıcıyı rahatsız etmeyecek optimum bir şekilde ayarlanmalıdır. Sıcaklık, soğutucu ve bobin üzerine yerleştirilmiş NTC algılayıcılar ile algılanır. Buna göre çalışma düzeni, soğutucu ya da bobin NTC' lerinden gelen ADC değerine göre mikrodenetleyici tarafından okunur ve yorumlanır. NTC değeri mikrodenetleyicinin ADC girişi ile Şekil 4.6' daki şekilde okunur.



Şekil 4.6: NTC değerini okuma devresi. Şekildeki uC, mikrodenetleyiciyi sembolize etmektedir.



Şekil 4.7: Sıcaklık ve fan kontrolü ile ilgili akış diyagramı (TS3>TS2>TS1 ve TB2>TB1)

Fanın çalışması ile ilgili algoritma şöyle işlemektedir: Eğer soğutucu NTC tarafından okunan soğutucu sıcaklığı TS2°C' den büyükse fan dönmeye başlar. Soğutucu sıcaklığı TS1°C' ye düşene kadar fan dönme devam eder (TS2 > TS1). Fanın dönmesi için olan ikinci bir olasılık ise bobin NTC tarafından okunan sıcaklık değeridir. Bu değer TB1°C' den büyükse de fan döner.

Sıcaklık ile ilgili koruma yalnızca fan ile sağlanmaz. Aynı zamanda belli sıcaklıkların üstünde belli seviyeler çalıştırılmaz buna göre bobin sıcaklık seviyesi ya da soğutucu sıcaklık seviyesi belirli değerlerin üstünde ise mikrodenetleyici sistemin bazı seviyelerde çalışmasına izin vermez ve bu durumu kullanıcıya bildirir.

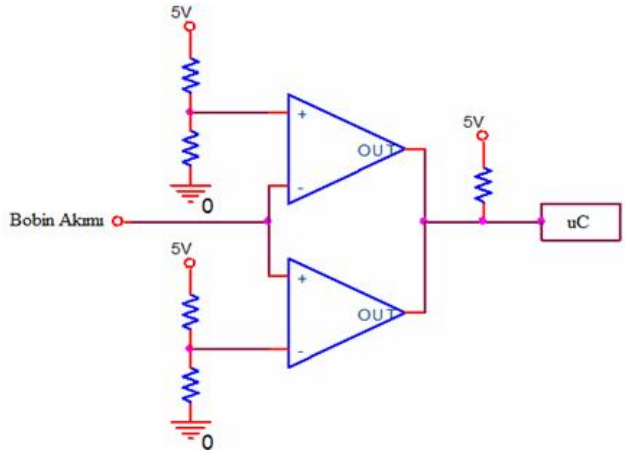
Aşırı sıcağa karşı olan sistem koruması, sistem elektroniğini korumanın yanı sıra kullanıcının güvenliğini de sağlar. Buna göre gözde uzun süre unutulmuş bir tencerenin yanma tehlikesi yoktur çünkü böyle bir durumda aşırı ısınan bobin sayesinde mikrodenetleyici gözü kapatır. Bununla beraber tencere içinde ısıtılan bir yağın alev alma riski de yoktur. Mikrodenetleyici, bobin NTC algılayıcıları sayesinde ayrıca kullanılan gözün çalışma sonrası el değmeyecek sıcaklıkta olduğunu kullanıcı ara birimiyle kullanıcıya bildirerek herhangi bir el yanmasına karşı kullanıcıyı korur. Sıcaklık ve fan kontrolü ayrıntılı olarak Şekil 4.7' de incelenebilir.

4.4 Güvenlik ve Hata Durumu

Sıcaklık kontrolünün sistem elektroniği ve kullanıcı güvenliği açısından ne kadar önemli olduğu bir önceki kısımda bahsedilmiştir. Buna göre sıcaklık ve fan kontrolünde olabilecek herhangi bir aksamanın anlaşılması ve bunun kullanıcı ara birimi ile gösterilmesi çok önemlidir. Bu sebeple çeşitli hata algoritmaları geliştirilmiştir. Buna göre eğer bobin ya da soğutucu NTC' lerinde herhangi bir sorun varsa sistem kullanıcı ara biriminde bunu bildirir ve hiçbir şekilde gözün açılmasına izin vermez.

Buna ek olarak bobin aşırı akımına karşı aşırı akım güvenlik algoritması geliştirilmiştir. Bilindiği üzere bobin üzerinden geçen akım alternatif bir akımdır. Aşırı akım devresinin her iki alternanstaki aşırılığı algılayabilmesi gerekmektedir. Buna göre, ilgili aşırı akım referans değerleri, var olan akım ile karşılaştırıcı opamp yapısından geçirilmiştir. Normal durumda çıkış 5V' dur ve mikrodenetleyicinin

harici kesme girişine bağlanmıştır. Karşılaştırıcı çıkışının sıfıra düşmesi sistemde bir aşırı akımın varlığını ifade eder ve bu durumda mikrodenetleyici, düşen kenar tetiklemeli olan harici kesmesi ile kesmeye girer. Böyle bir durumda mikrodenetleyici sistemdeki PWM sinyalini keser ve gözün seviyesini sıfıra çekerek gözü kapatır. Aşırı akım devresi Şekil 4.8' deki gibidir.



Şekil 4.8: Aşırı akım devresi

4.5 Akım Kontrolü

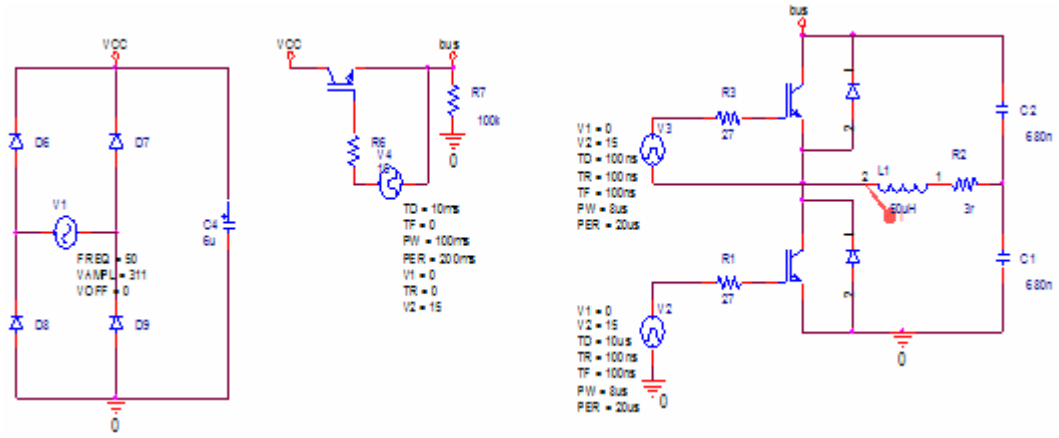
Endüksiyon ocak on ısıtma seviyesinden oluşur. Sistem akım ile kontrol edilmektedir. Her ısıtma seviyesinin kendine ait bir akım değeri mevcuttur. Bunlar tablo halinde mikrodenetleyiciye gömülüdür. Amaç her seviye için belirlenen akım değerine göre bobin akımını sabit tutmaktır. Bobin akımı, akım trafosu ile algılanır. Akım trafosu 1:200 oranındadır. Böylece bobin üzerinden geçen akım 200' e bölünür ve trafo çıkışına bağlanan paralel direnç ile gerilim değerine dönüştürülür. Belli bir gerilim üzerine bindirildikten sonra yüksek frekanslı akım trafosu çıkışı alçak geçiren filtreden geçirilir. Böylece, şebekeye paralel bir eksende tepe değerleri tutularak mikrodenetleyiciye gönderilir. Şebeke sıfır geçişlerine paralel bir şekilde kontrol yapıldığından örnekleme zamanı 10 ms' dir. İstenen, akımın tepe değerinin sabit tutulmasıdır. Akımın tepesi ile kastedilen Şekil 4.9' daki yüksek frekanslı (20 kHz-50 kHz) bobin akımının alçak geçiren filtre çıkışının tepesidir. Akım tepe değeri, şebeke sıfır geçişinden sonraki 4ms ile 6ms arasında alınan örneklerin ortalaması ile elde edilir.



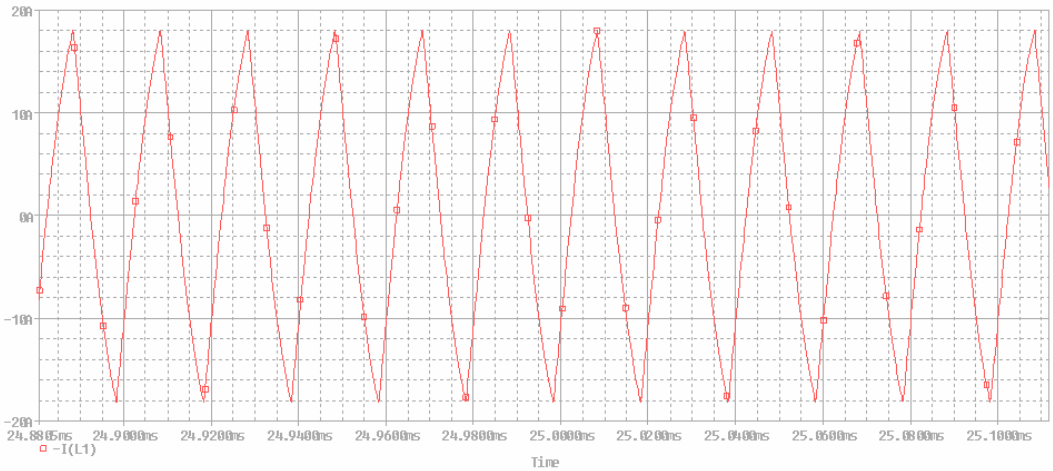
Şekil 4.9: CH2: Akım trafosu çıkışı bobin akımı, CH4: Geri besleme için kullanılan akım tepe değeri (alçak geçiren filtre çıkışı)

Endüksiyon sistem modelini, ikincil kısmı kısa devre olan bir transformatör gibi düşünebiliriz. Bu sebeple Bölüm 2 incelenirse sistemin seri bir RLC devresi olduğu gözlemlenir. Bu durumda, endüksiyon sistemi ikinci dereceden bir sistemdir. Her ne kadar sistem seri bir RLC devresi gibi de düşünülsede akım işaretinin alçak geçiren filtreden geçirilmesi ile 2. dereceden olan sistem bir K kazancına dönüştürülür. Bunun sebebi akımın okunduğu tepenin herhangi bir salınım yapmadan şebeke gerilimini takip ederek, sisteme ne veriliyorsa onunla orantılı olarak direk ilgili yere oturmasıdır. Bu sebepledir ki, bu şekilde yapılan gözlem ile sistemin dinamiği ortadan kaldırılarak sistem bir K kazancına dönüştürülür. Ancak verilen frekanslar ile bobin üzerinde oluşan akim doğru orantılı değildir. Bu nedenle doğrusal olmayan ve frekansla değişen bir kazançtan söz etmek gerekir.

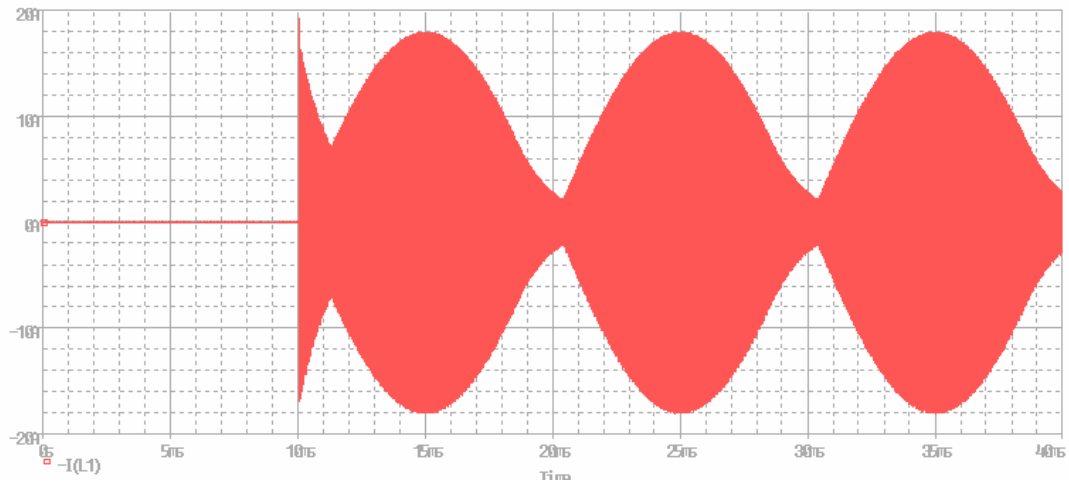
Uygulamada yapılan aslında sistemin çalışma frekansından (20 kHz-50 kHz) çok uzakta 100 Hz' de bir örnek alarak sistemin kendi içinde olan dinamiğini ihmal ederek oturduğu yeri gözlemlemektir. Yapılan işlemin daha iyi anlaşılması için Şekil 4.10' daki simülasyon amaçlı devre incelenirse, Şekil 4.11' deki bobin akımı elde edilir. Ancak sistem örnekleme zamanı şebekeye paralel 10ms' de bir olduğu için kontrol algoritması yalnızca Şekil 4.12' deki akımın şebeke zarfı ile ilgilenir.



Şekil 4.10: Simülasyon amaçlı Orcad programında hazırlanan devre şeması



Şekil 4.11: Simülasyon sonucundaki bobin akımına yakından bakış (50 kHz)



Şekil 4.12: Simülasyon sonucundaki şebekeyi takip eden bobin akımı

Görüldüğü üzere sabit bir frekans sisteme verildiğinde örnek alınan yerlerde (Şekil 4.12' de tepe noktalar) akımın tepe değeri belirli bir dinamiğe maruz kalmadan her bir örneklemede sabittir. Bu da böyle bir durumda sistemin dinamiğinin ihmal edilmesine sistemin bir kazançtan oluşmasına sebep olur.

4.6 Uygulanan Kontrolörler

Kullanılacak kontrolörler, Endüksiyon ocağın 210 mm çapındaki gözü üzerinde test edilmiştir. 2 tür, boyutları birbirinden farklı tencere ile denemeler gerçeklenmiştir. Bunlardan birinin çapı 223 mm olan 18/10 Cr-Ni alaşımlı markası Mehtap olan diğeri ise çapı 130 mm, markası Silargan olan tenceredir. Bundan sonra Mehtap marka tencereye "büyük tencere", Silargan marka boyutça daha ufak tencereye ise "küçük tencere" denilecektir.

Endüksiyon ocak 10 seviyeden oluşmaktadır. Bunlardan ilk beşi kesikli mod olarak adlandırdığımız seviye 6' nın referans değerini referans olarak kabul eden ayar seviyeleridir. Seviye 6' dan farkları, IGBT' lere uygulanan PWM' in belirli bir süre kesilmesiyle bobinden akım geçirilmemesidir. İlgili bu süreler Tablo 4.1' deki gibidir. Seviye 6,7,8,9,10' uncu seviyeler ise sabit referans akım değerlerine sahip PWM' in sürekli verildiği seviyelerdir. İlgili seviye referans değerleri Tablo 4.2' deki gibidir.

Endüksiyon ocak üzerinde ısıtılmaya başlayan tencere konum olarak ya göz üzerinde sabit kalır ya da göz üzerinden kayar ya da kaldırılır. Uygulanan tüm kontrolörler ısıtılmaya başlayan tencerenin kayması yani gözden uzaklaşması durumuna ayak uydurmuşlardır. Ancak tencerenin ani kaldırılması ile meydana gelen fiziksel değişime ayak uydurmakta zorluk çekmişlerdir. Bu nedenle bu durum büyük önem teşkil etmektedir. Sistem üzerinde denenecek birçok kontrolör yapısının birbirlerine göre oturma süreleri açısından üstünlük göstermeleri böyle bir ev uygulaması sisteminde insanın algılaması açısından çok büyük bir önem taşımamaktadır. Kısaca oturma süresinin çok kısa olması kontrolör kıyası açısından bir önem taşımamaktadır. Buradaki üstünlük meydana gelecek fiziksel değişime ayak uydurma şeklinde düşünülecektir.

Endüksiyon ocak seri bir RLC devresi gibi düşünülüp modellenebilir. Bu durumda sistem 2. derecedendir. Yüksek dereceden bir sistemin kontrolü elbette sadece kazançtan oluşan bir sistemin kontrolünden çok daha zordur. Bu tez çalışmasında sistem bir K kazancına indirgenmiştir. Bu anlamda tasarlanan kontrolörlerin sistemin hesabını ne kadar kolaylaştırdığı da açıktır. Endüksiyon ocak sistemi akım kontrollü çalışmaktadır. Uygulanacak kontrolörler mikrodenetleyicinin içine gömülmüştür. Mikrodenetleyici tarafından üretilecek PWM çıkışları IGBT' leri anahtarlayarak, bobindeki akımı ayarlar. Endüktif bölgede çalışılmasından ötürü, oluşan akım ile frekans ters orantılıdır. Çalışılan PWM frekansları 20 kHz ile 50 kHz arasında değişmektedir. 50 kHz' de minimum akım elde edilirken frekans düştükçe akım artmaktadır. Bu durum rezonans eğrisinin doğal sonucudur.

Tablo 4.1: Seviye 6' nın altındaki seviyelerin operasyon zamanları

Seviyeler	PWM aktif kalma süresi (ms)	PWM aktif kalmama süresi (ms)
Seviye 1	300	1700
Seviye 2	600	1400
Seviye 3	900	1100
Seviye 4	1200	800
Seviye 5	1500	500

Tablo 4.2:Tüm seviyeler için oturmaları gereken referans akım değerleri

Seviyeler	Referans akım değerleri (8 bit ADC Değeri olarak)
Seviye 1,2,3,4,5,6	145
Seviye 7	155
Seviye 8	170
Seviye 9	185
Seviye 10	195

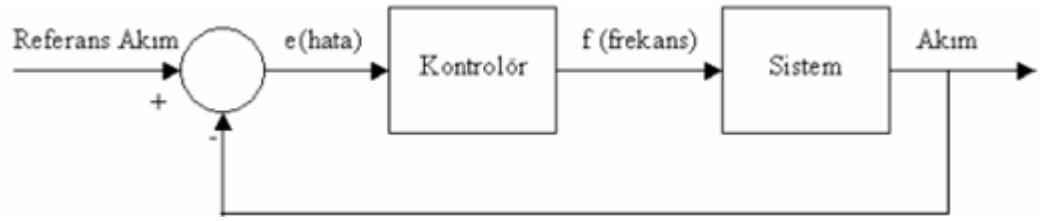
Daha önceki kısımlarda anlatılmak istenen rezonans eğrisi yapısı gereği frekans akım ile ters orantılıdır. Ancak aralarındaki oran doğrusal değildir. Bu nedenle sistem doğrusal olmayan bir kazançtır. Bu kazanç sistemin direnci ve frekansı ile değişmektedir.

Endüksiyon sistemine uygulanan kontrolörlerin birbirine göre kıyası üç durum için incelenecektir. Bunlardan birincisi tencerenin göz üstünde sabit olduğu durum, ikincisi, sistem dinamiğinin hızla değişmesine sebep olan ısınan tencerenin gözden

hızla çekildiği durum ve üçüncüsü tencere algılama algoritmasının olmadığı durumdur.

Endüksiyon sisteminde uygulanan kontrolörler,

- PI kontrolör
- PI kontrolörün özel bir şekli (Sezgisel PI kontrolör)
- Bulanık kontrolör
- En keskin iniş (steepest descent) Yöntemi
- İleri, geri yönde ayarlamalı kontrolör.



Şekil 4.13: Endüksiyon ocak kontrol blok diyagramı

Endüksiyon ocak kontrol blok diyagramı Şekil 4.13' deki gibidir. Kontrolör mikrodenetleyiciye gömülmüştür. Referans akim, mikrodenetleyiciye yazılmış olan tabloda bulunmaktadır. Bobin akımı, ADC' ile okunup referans akım ile karşılaştırıldıktan sonra kontrolör algoritmasından geçerek mikrodenetleyicinin birbirinin tamamlayıcısı olan ölü zamanlı PWM bloğundan dışarı verilir. Oluşturulan PWM çıkışları IGBT' leri anahtarlayarak, bobindeki akımı ayarlar. Şekil 4.13' deki frekans bilgisi, PWM frekansını sembolize eder. Frekans, mikrodenetleyicinin ölü zamanlı PWM çıkışını üretecek bloğunun zamanlayıcı değerinin ayarlanması ile oluşturulur.

Endüktif bölgede çalışılmasından ötürü rezonans eğrisi gereği, frekans ve akım ters orantılıdır. Frekans bilgisi kontrolör için zamanlayıcı değeridir. Zamanlayıcı değeri ile frekans ters orantılı olduğundan kontrolör giriş ve çıkışları doğru orantılıdır.

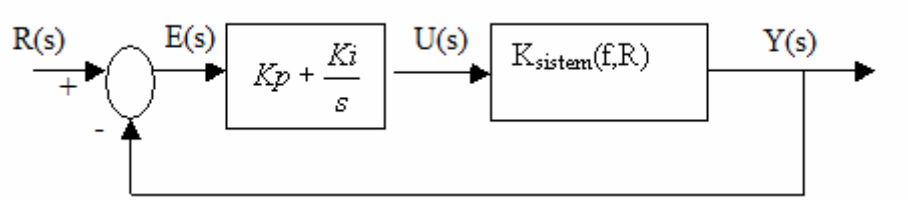
Sistem cevabı, büyük ve küçük tencereler ile seviye 6,7,8,9,10 için incelenecektir. Tencerenin gözün üstünde sabit kaldığı, gözden hızla çekildiği ve tencere algılama algoritmasının olmadığı durumlar üç ayrı durum olarak sunulacaktır.

4.6.1 PI Kontrol

PI kontrolörünün transfer fonksiyonu eşitlik (4.5)' de verildiği gibidir.

$$G_C(s) = K_P + \frac{K_I}{s} \tag{4.5}$$

Şekil 4.14' deki sistemin bir kazanç olarak görüldüğü daha önceki bölümlerde anlatılmıştı. Buna göre kazançtan oluşan bir sistemin transfer fonksiyonu eşitlik (4.6)' deki gibi elde edilir.



Şekil 4.14: PI kontrolör blok diyagramı

$$T(s) = \frac{(Kps + Ki)K_{sistem}}{s + (Kps + Ki)K_{sistem}} = \frac{(Kps + Ki)K_{sistem}}{s(1 + KpK_{sistem}) + KiK_{sistem}} \tag{4.6}$$

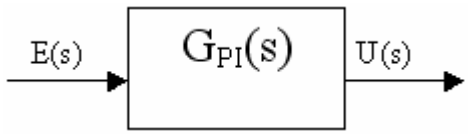
sistem zaman sabiti,

$$\tau = \frac{KpK_{sistem} + 1}{KiK_{sistem}} \tag{4.7}$$

PI kontrolörü ayrık zamana dönüştürmek amacıyla tustin dönüşümü kullanılmıştır. Tustin dönüşümü eşitlik (4.8)' de verildiği gibidir. Bu yöntem sürekli kontrolörleri ayrığa dönüştürmede kullanılır.

$$s = \frac{2}{T}\left(\frac{z-1}{z+1}\right) = \frac{2}{T}\left(\frac{1-z^{-1}}{1+z^{-1}}\right) \tag{4.8}$$

Eşitlik (4.8)' teki T örnekleme zamanını sembolize eder.



Şekil 4.15: PI kontrolör giriş çıkış bloğu

Şekil 4.15 yardımıyla kontrolörün giriş çıkışı arasındaki bağıntı eşitlik (4.9) ile verilir

$$u(t) = Kpe(t) + Ki\int edt \tag{4.9}$$

Eşitlik (4.9)' un Laplace dönüşümü alınırsa eşitlik (4.10) elde edilir.

$$U(s) = KpE(s) + Ki\frac{1}{s}E(s) \tag{4.10}$$

Eşitlik (4.8), (4.10)' da yerine konulursa neticede eşitlik (4.14) bulunur.

$$G_{PI}(s) = \frac{U(s)}{E(s)} = Kp + \frac{1}{s}Ki \Rightarrow \frac{U(z)}{E(z)} = Kp + Ki\frac{T(1+z^{-1})}{2(1-z^{-1})} \tag{4.11}$$

$$2U(z) - 2U(z)z^{-1} = (2Kp - 2Kpz^{-1} + KiT + K_iTz^{-1})E(z) \tag{4.12}$$

$$2U(z) - 2U(z)z^{-1} = 2E(z)Kp - 2E(z)Kpz^{-1} + E(z)KiT + E(z)K_iTz^{-1} \tag{4.13}$$

$$U(z) - U(z)z^{-1} = E(z)(Kp + Ki\frac{T}{2}) + E(z)z^{-1}(K_i\frac{T}{2} - Kp) \tag{4.14}$$

Eşitlik (4.14), (4.15) ve (4.16) yardımıyla eşitlik (4.17) şeklinde ifade edilebilir.

$$K_1 = Kp + Ki\frac{T}{2} \tag{4.15}$$

$$K_2 = K_i\frac{T}{2} - Kp \tag{4.16}$$

$$u(n) = u(n-1) + K_1 e(n) + K_2 e(n-1) \quad \textbf{(4.17)}$$

u(n): Sisteme verilecek frekans (Kontrolör çıkışı)

u(n-1): Bir örnekleme zamanı önce verilen frekans

e(n): Referans akım ile okunan akım arasındaki fark

e(n-1): Bir örnekleme zamanı önce oluşan hata.

$K_{sistem} = 0{,}02$, sistem zaman sabiti $\tau = 0{,}5$, Örnekleme zamanı $T = 0{,}01$, $K_P = 0{,}5$ alınarak ilgili eşitlikler yardımıyla eşitlik (4.17) için gerekli katsayılar bulunarak sistem kontrol edilir.

Buradan hareketle eşitlik (4.7) yardımıyla

$$\tau = \frac{KpK_{sistem} + 1}{KiK_{sistem}} = 0{,}5 = \frac{0{,}5.0{,}02 + 1}{K_i.0{,}02} \Rightarrow K_i = 101 \text{ bulunur.}$$

$$K_1 = Kp + Ki\frac{T}{2} = 0{,}5 + 101.\frac{0{,}01}{2} \Rightarrow K_1 = 1{,}005 \text{ bulunur.}$$

$$K_2 = K_i\frac{T}{2} - Kp = 101.\frac{0.01}{2} - 0{,}5 \Rightarrow K_2 = 0{,}005 \text{ bulunur.}$$

Dolayısıyla, uygulanacak işaret,

$$u(n) = u(n-1) + 1{,}005e(n) + 0{,}005e(n-1) \quad \textbf{(4.18)}$$

elde edilir.

Yukarıda belirlenen sistem katsayısı K_{sistem}, K_p ve zaman sabiti değerleri, K_1 ve K_2 katsayılarını negatif yapmayacak şekilde belirlenmiştir. Ayrıca K_1 ve K_2' nin, hatanın minimuma yaklaştığı yerlerde sistemin istenen değere oturmasını sağlayacak büyüklükte ve sistemi aşıma götürmeyecek optimum değerde olması gerekmektedir. Bu sebeple yapılan bir dizi denemeden sonra en uygun değerler belirlenmiştir.

4.6.2 Sezgisel PI Kontrol

Sezgisel PI kontrolörün PI kontrolörden farkı, PI kontrolörde sabit olarak kullanılan K sistem kazancının, sezgisel PI' da her örneklemede hesap edilmesidir. Sistem

kazancı okunan akım ile verilen frekans arasındaki orana eşittir. Buna göre, sistem zaman sabiti $\tau = 0{,}1$, Örnekleme zamanı $T = 0{,}01$, $K_P = 0{,}1$ alınmıştır. Sistemde karşılaşılacak ani değişimlere karşı sistemin cevabının hızlı olması amacıyla eğer hata negatif ise sistem zaman sabiti örnekleme zamanına çekilmiştir.

K_{sistem}=Okunan Akımın ADC Değeri/Verilen Frekansın Zamanlayıcı Değeri **(4.19)**

$$\tau = \frac{KpK_{sistem} + 1}{KiK_{sistem}} = 0{,}1 = \frac{0{,}1K_{sistem} + 1}{KiK_{sistem}} \quad \textbf{(4.20)}$$

(4.20)' de K_{sistem} bilinendir. Buradan K_i çekilir ve değeri bulunur. Eğer hesap edilen hata değeri negatif ise zaman sabiti 0,01' e eşitlenir.

Eşitlik (4.15) ve (4.16) için K_i değeri bulunduktan sonra Kp yerine 0,1 konulur ve K_1, K_2 değerleri hesaplanır.

u(n): Sisteme verilecek frekans (Kontrolör çıkışı)

u(n-1): Bir örnekleme zamanı önce verilen frekans

e(n): Referans akım ile okunan akım arasındaki fark

e(n-1): Bir örnekleme zamanı önce oluşan hata.

Olmak üzere, (4.17) eşitliğinde bulunan ve ölçülen değerler yerine konularak kontrolör çıkışı hesap edilir.

4.6.3 Bulanık Kontrol

Bazı sistemlerin matematiksel modellemesi mümkün olmayabilir. Sistemin değişkenleri matematiksel modelleme yapabilecek kadar kesin olarak bilinmeyebilir veya bu değişkenler zaman içinde değişiklik gösterebilir.

Bazı sistemlerde modelleme doğru şekilde yapılsa bile elde edilen modelin denetleyici tasarımında kullanımı karmaşık problemlere ve oldukça yüksek maliyete neden olabilir. Bu nedenle algoritmalarının belirsiz, doğru olmayan, iyi tanımlanmamış, zamanla değişen ve karmaşık sistemlere uygulanması mümkün olmayabilir. Bu durumda ya hiç çözüm üretilememekte ya da elde edilen denetleyicinin performansı yeterince iyi olmamaktadır.

Bu gibi durumda genellikle bir uzman kişinin bilgi ve deneyimlerinden yararlanılma yoluna gidilir. Uzman kişi az, çok, pek az, pek çok, biraz az, biraz çok gibi günlük hayatta sıkça kullanılan dilsel niteleyiciler doğrultusunda bir denetim gerçekleştirir. Temeli insanın herhangi bir sistemi denetlemedeki düşünce ve sezgilerine bağlı davranışının, benzetimine dayanmaktadır. Dolayısıyla bir insan bir sistemin bulunduğu gerçek durumdan, istenilen duruma götürmek için sezgilerine ve deneyimlerine bağlı olarak bir denetim stratejisi uygulayarak amaca ulaşmaktadır.

4.6.3.1 Bulanık Küme ve Üyelik

Klasik küme kuramında bir eleman o kümenin ya elemanıdır ya da değildir. Hiçbir zaman kısmi üyelik olmaz. Nesnenin üyelik değeri 1 ise kümenin tam elemanı, 0 ise elemanı değildir. Başka bir değişle klasik kümelerde elemanların üyelikleri {0,1} değerlerini alır. Klasik kümelerin aksine bulanık kümelerde üyelik dereceleri [0,1] aralığında sonsuz değişebilir.

Bir x evrensel kümesinde A bulanık kümesinin $\mu_A(x)$ üyelik fonksiyonu eşitlik (4.21) ile tanımlanır.

$$\mu_A = x \rightarrow [0,1] \qquad \textbf{(4.21)}$$

4.6.3.2 Bulanık Sistemlerin İç Yapısı

Bulanık sistemlerin çok büyük kısmı, EĞER-O HALDE kuralları aracılığıyla tanımlanmıştır. Bu tür sistemler, kural tabanlı bulanık sistemler olarak adlandırılır. En basit bulanık sistemin ana yapıları bulanık kural tabanı ve çıkarım mekanizmasıdır. Kural tabanında, bulanık EĞER-O HALDE kuralları bulunur. Kural tabanı ve çıkarım mekanizmasından oluşan temel bulanık sistem yapısı bulandırıcı ve durulayıcı adı verilen iki birim daha içerir. Bulandırıcı gerçel değerli sistem girişini bulanık kümelere dönüştürürken, durulayıcı, tersine, çıkarım mekanizmasını ürettiği bulanık kümeleri gerçel değerli sistem çıkışına dönüştürür. Bu tür bulanık sistemlere ilişkin blok şema Şekil 4.16' da verilmiştir.



Şekil 4.16: Bir bulanık sistemin iç yapısı

4.6.3.3 Bulanık Kural Tabanı

Bulanık sistemlerdeki değişkenler arasındaki ilişkiler EĞER öncül önerme-O HALDE sonuç önermesi bulanık kurallarına göre ifade edilir. Elde edilen bulanık model, bulanık kuralların türüne göre adlandırılır. Bulanık önermedeki sonuç ifadesinin yapısına göre bulanık kural tabanı 4 farklı yapı oluşturur.

- Mamdani Tipi Bulanık Kurallar: K_i: EĞER x A_i ise O HALDE y B_i' dir. Burada x giriş öncül dilsel değişken ve A_i' ler ise öncül dilsel terimlerdir. Benzer şekilde y çıkış sonuç dilsel değişken ve B_i' ler ise sonuç dilsel terimlerdir. İlgili bulanık kümelere ilişkin üyelik fonksiyonu eşitlik (4.22) şeklindedir.

$$\mu(x) : X \rightarrow [0,1], \mu(y) : Y \rightarrow [0,1] \qquad \textbf{(4.22)}$$

- Tekli (singleton) tip bulanık kurallar: Mamdani tipi bulanık kuralların özel bir halidir. Kuralların sonuç önermesinde yer alan B_i bulanık kümelerinin tekli (singleton) bulanık küme seçilmesi ile oluşturulur. B_i gerçel sayı olmak üzere tekli kurallar K_i: EĞER x A_i ise O HALDE $y=b_i$' dir.

- Takagi-Sugeno tipi bulanık kurallar: Mamdani tipi bulanık EĞER-O HALDE kurallarındaki öncül ve sonuç kısımlar bulanık önermeler ile sistemi ifade etmektedir. Takagi-Sugeno ise bulanık modelin sonuç kısmında bir kesin sonuç mevcuttur. K_i: EĞER x A_i ise O HALDE $y=f_i(x)$, i=1,2,...,r ' dir. Mamdani modelin aksine x girişi kesin değerlidir. Her kuraldaki $f_i(x)$ fonksiyonu aynı tip yapıdadır, yalnızca parametreler değişiktir.

- Tsukamoto tipi bulanık kurallar

4.6.3.4 Bulanık Çıkarım Mekanizması

Mamdani tipi K_i: EĞER x A_i ise O HALDE y B_i, i=1,2,...,r şeklindeki her bulanık kural, bir bulanık bağıntı olarak gösterilir ($R_i : (XxY) \rightarrow [1,0]$). Çıkarım mekanizması için birçok yöntem önerilmektedir. Ancak endüksiyon ocak uygulamasında, hesap ve yazılıma gömme kolaylığı açısından çıkarım yöntemi olarak çarpım kullanılmıştır.

Endüksiyon sistemi üzerinden incelersek;

EĞER x_1, A_{i1} ve x_2 A_{i2} ise O HALDE y B_i' dir. i=1,2,...,r

Bulanık kuraldaki A_i bulanık kümeleri, A_{ij} bulanık kümelerinin kartezyen çarpımı ile elde edilir. $A_i = A_{i1} x A_{i2} x ... x A_{ip}$ ise, buna göre doğruluk değeri eşitlik (4.23) şeklindedir.

$$\beta_i = \mu_{A_{i1}}(x_1) * \mu_{A_{i2}}(x_2) * ... * \mu_{A_{ip}}(x_p) \quad 1 \leq i \leq r \qquad \textbf{(4.23)}$$

4.6.3.5 Bulandırıcı

Bulanık sistemlerin yapısında ilk blok bulandırıcıdır. Sisteme giren x^* sayısal değerini $\mu_A(x)$ gibi bulanık kümeye çevirir. Bu işleme bulandırma denir. Bulandırıcı temelde iki grupta incelenir.

- Tekli (singleton) bulandırıcılar: bu tipteki bulandırıcılar bulanık sisteme giren sayısal değeri tekli (singleton) bulanık kümesine çevirir.
- Tekli olmayan bulandırıcılar: Bu tip bulandırıcılar ise sayısal değeri üçgen, gauss, çan gibi diğer bulanık kümelere çevirir.

4.6.3.6 Durulayıcı

Bulanık çıkarımın sonucu bulanık bir kümedir. Bu sonucun tekrar sisteme uygulanması için giriş değeri gibi sayısal değere dönüştürülmesi gerekir. Bu işlem durulama olarak adlandırılır. Durulama birimi karar verme biriminden gelen bulanık

bir bilgiden bulanık olamayan ve uygulamada kullanılacak gerçek değerlerin elde edilmesini sağlar.

En çok kullanılan yöntemler

- Ağırlık merkezi
- Alanlar toplamının merkezi
- En büyük alanın merkezi
- Maksimum durulayıcılar (maksimumun ilki, maksimumun ortalaması, maksimumun sonu)
- Ağırlıklı ortalama

Endüksiyon uygulamasında ağırlıklı ortalama kullanılmıştır. Buna göre durulayıcı çıkışı aşağıdaki şekilde hesaplanmıştır.

$$y^* = \frac{\sum \beta_i * y_i}{\sum \beta_i} \qquad \textbf{(4.24)}$$

4.6.3.7 Endüksiyon Sisteminde Üyelik Fonksiyonlarının Belirlenmesi

Endüksiyon sistemi için iki giriş düşünülmüştür. Bunlardan birisi hata diğeri ise mikrodenetleyici tarafından üretilecek frekansın, zamanlayıcı değerinin değişimidir. Değişim $\Delta t = t(n) - t(n-1)$ şeklinde ifade edilir. Üyelik fonksiyonları belirlenirken sistemin ani durum değişikliğine vereceği cevap düşünülmüştür. Bu sebeple girişlerden biri frekansı üretecek zamanlayıcı değerinin değişimi seçilmiştir. Sistem için en önemli ani durum değişikliği ısınan tencerenin gözden hızla çekilmesidir. Böyle bir durumda yükselen akımı düşürmek için frekansı büyütmek gerekir. Bu amaçla zamanlayıcı değerini düşürdüğümüz halde, düşmesi beklenen bobin akımının yükselmesi devam ediyorsa tencere gözden hızla çekiliyor demektir. Böyle bir duruma karşı alınan önlem, sistem rezonans frekansına yakın yerlerde tencerenin ani olarak gözden çekilmesi ile akımın aşırı yükselmesini engellemek için önemlidir. Bu durum frekansı belirleyen zamanlayıcı değerinin düşmesine rağmen akımın hala yükselmesinden anlaşılabileceği için iki girişten biri hata e, diğeri Δt seçilmiştir.

Negatif (N), Sıfır (S) ve Pozitif (P) olmak üzere her bir giriş için 3 bulanık küme tasarlanmıştır. Bunlar sırası ile Şekil 4.17 ve Şekil 4.18 verilmiştir.

Kontrolör çıkışı, PWM üretmek için mikrodenetleyici tarafından ayarlanan zamanlayıcı (timer) değerine eklenecek yeni zamanlayıcı değeri olacaktır. Çıkış üyelik fonksiyonu Şekil 4.19' de görüleceği gibi 4 tane bulanık küme içermektedir. Bunlar Negatif büyük (NB), Negatif küçük (NK), Sıfır (S), Pozitif Küçük (PK) kümeleridir. Kontrolör singleton tipinde çekilmiştir. Bunun sebebi mikrodenetleyiciye gömülmesinin kolay olmasıdır.

Sistem 20kHz ile 50kHz arasında, zamanlayıcı değeri olarak 368 ile 128 arasında değişmektedir. Burada 368 değeri 20kHz' e, 128 değeri ise 50kHz' e tekabül etmektedir. Sistemde oluşabilecek ani durum değişikliği için akımı düşürecek yönde frekansın arttırılması gerekmektedir. Zamanlayıcı değerinin düşürülmesi akımın yükselmesine engel olmuyorsa bu durum sistemden tencerenin hızla çekildiğine işarettir. Bu durumda akımın hızla yükselmemesi için frekans hızla yükseltilmeli yani zamanlayıcı değeri hızla düşürülmelidir. Çıkış üyelik fonksiyonu ve kural tablosu buna göre belirlenmiştir. Buna göre mikrodenetleyici çıkışında oluşturulacak yeni frekans değeri;

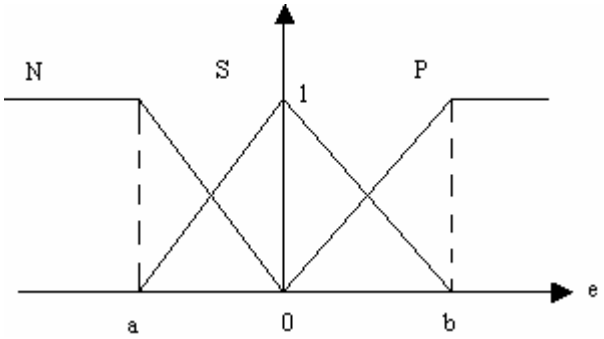
Üretilecek frekans=Bir örnekleme önce verilen frekans+Bulanık kontrolör çıkışı **(4.25)**

şeklinde ifade edilir.

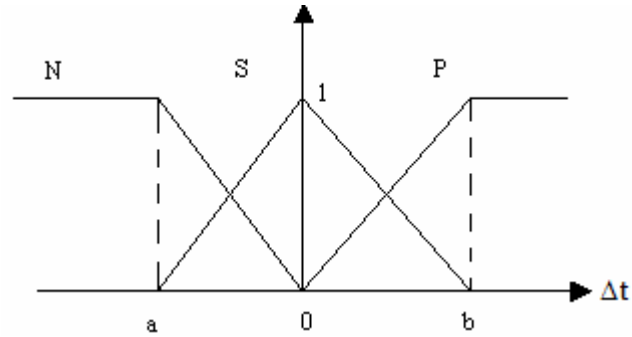
Yukarıdaki ifade çıkış üyelik fonksiyonundaki negatif değerleri açıklar. Buna göre eğer frekans yükseltildiği halde akım yükselmeye devam ediyorsa yapılacak şey frekansı hızla yükseltip akımın aşımını engellemektir. Bu amaçla frekansı üretecek zamanlayıcı değeri hızla küçültülmelidir. Bir sonraki üretilecek frekans, bulanık kontrolör çıkışının bir örnekleme önce üretilen frekans için belirlenen zamanlayıcı değerine eklenmesi ile sağlanır. Eklenecek bulanık kontrolör çıkışı negatif ise bu durum uygulanan frekansın yükseltilmesi anlamını taşır. Buna göre çıkış üyelik fonksiyonları belirlenir.

Şekil 4.17' deki a = (Referans Değer – Maksimum Akım Değeri) ve b = (Referans Değer – Minimum Akım Değeri) değerini sembolize etmektedir. Buradaki

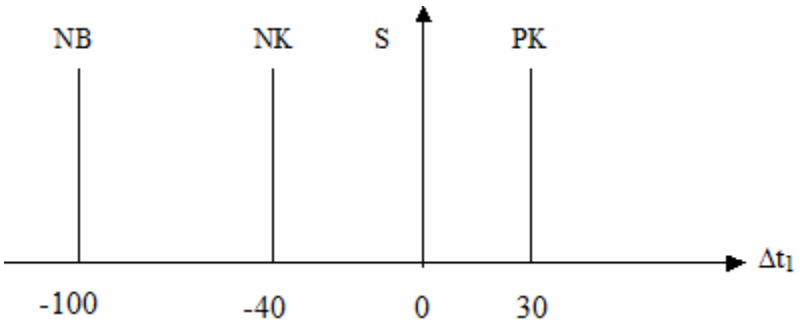
Maksimum Akım Değeri = 230 ADC değeri ve Minimum Akım Değeri = 120 ADC değeridir. Şekil 4.18' deki a = -20 ve b = 30 değerini sembolize etmektedir.



Şekil 4.17: Hata(e) için üyelik fonksiyonu



Şekil 4.18: Frekansı belirleyecek zamanlayıcı değerinin değişimi (Δt) için üyelik fonksiyonu



Şekil 4.19: Çıkış üyelik fonksiyonu

4.6.3.8 Endüksiyon Ocak Sisteminin Kural Tablosu

Kural tablosu sistemde oluşabilecek ani değişimlere karşı hızla cevap verecek şekilde düzenlenmiştir. Buna göre yukarıdaki detaylı açıklamalar incelendiğinde, hata negatif olduğu durumda zamanlayıcı değişimi negatif ise bu, tencerenin gözden ani olarak çekildiğinin göstergesidir. Bu sebeple hızlı bir cevap gerekmektedir yani

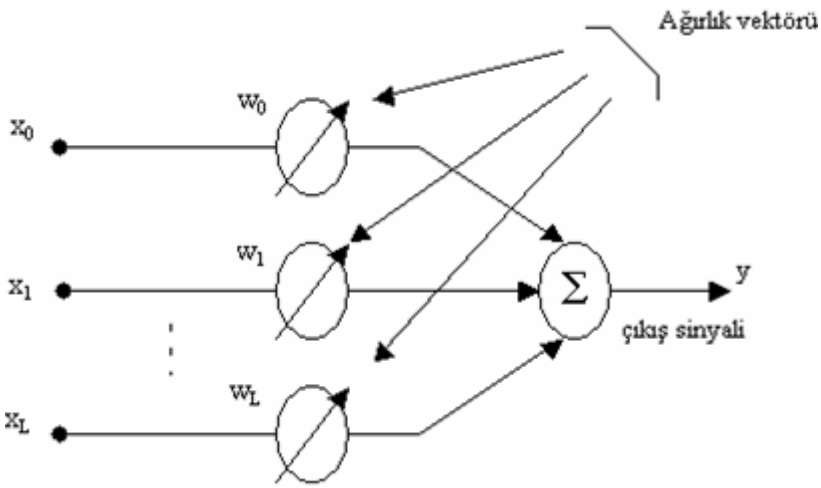
kontrolör, yükselen akımın davranışını kesmek için frekansı yükseltmeli yani bir önceki zamanlayıcı değerini düşürmelidir. Bu sebeple sisteme NB uygulanır. Hatanın negatif olduğu durumda zamanlayıcı değişimi pozitif ise bu durum sistemde aşıma işarettir ve kontrolör, belirsiz olan sistem katsayısı için uygun değildir. Herhangi bir kritik durumu önlemek adına sisteme NB uygulanır. Diğer tablo değerler ise yapılan bir dizi incelemeden sonra sistem cevabının hataya karşı çok hassas olmayacağı, sistemi aşımdan koruyacak optimumlukta ve istenen cevabı verebilecek düzeyde seçilmiştir. Giriş hata ve frekansı üretecek zamanlayıcı değişimlerine göre elde edilecek kural tablosu Tablo 4.3' de verilmiştir.

Tablo 4.3: Bulanık Kontrol için kural tablosu

e \ Δt	N	S	P
N	NB	NK	NB
S	S	S	S
P	PK	PK	PK

4.6.4 En Keskin İniş (Steepest Descent) Yöntemi

Genel olarak dayanıklı lineer toplayıcı formu Şekil 4.20' deki gibidir. Şekil, x_0, x_1, ...,x_L elemanlarından oluşan giriş sinyal vektörü, w_0, w_1, ...,w_L elemanlarından oluşan ayarlanabilir ağırlık vektörü, toplama birimi ve y çıkış sinyaliden oluşmaktadır. Ağırlıkları ayarlamak işlemine genel olarak ağırlıklı ayarlama, kazanç ayarlaması ya da dayanılıklaştırma prosedürü denir.



Şekil 4.20: Dayanıklı lineer toplayıcının genel biçimi

4.6.4.1 Giriş Sinyali ve Ağırlık Vektörü

Giriş sinyali birden çok olacağı gibi tek bir girişten de oluşabilir.

Çoklu girişler için; $X_k = \begin{bmatrix} x_{0k} & x_{1k} & \dots & x_{Lk} \end{bmatrix}^T$ **(4.26)**

Tek giriş için, $X_k = \begin{bmatrix} x_k & x_{k-1} & \dots & x_{k-L} \end{bmatrix}^T$ **(4.27)**

k notasyonu zamanı sembolize etmektedir. Endüksiyon sistemi için tek giriş düşünülecektir. Şekil 4.20 ve Şekil 4.21' den yola çıkarak giriş ve çıkış arasındaki bağıntı aşağıdaki gibi elde edilir.

$$y_k = \sum_{l=0}^{L} w_{lk} x_{k-l} \quad \textbf{(4.28)}$$

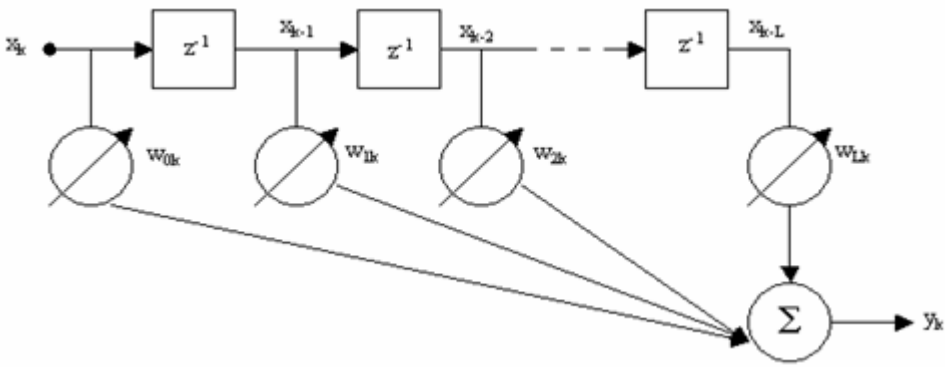
Ağırlık vektörü ise,

$$W_k = \begin{bmatrix} w_{0k} & w_{1k} & \dots & w_{Lk} \end{bmatrix}^T \quad \textbf{(4.29)}$$

Çıkışı tekrar yazar isek

$$y_k = X_k{}^T W_k = W_k{}^T X_k \quad \textbf{(4.30)}$$

elde edilir.



Şekil 4.21: Tek girişli dayanıklı lineer toplayıcı

4.6.4.2 İstenen Cevap ve Hata

Dayanıklı kontrolde çıkış, istenen cevabı verecek şekilde ağırlık vektörlerinin ayarlanması ile belirlenir. Bu durum ise çıkış işareti ve istenen cevabın karşılaştırılması ile elde edilen hatanın minimuma indirilmesini sağlayacak ağırlık vektörünün ayarlanması ya da optimizasyonu ile olur. Birçok pratik örnekte dayanıklı süreç hatanın en küçük kareler yöntemiyle belirlenmesi ile sağlanır.

Performans Fonksiyonu:

Hata sinyali, k zaman notasyonu olmak üzere aşağıdaki gibidir. Burada d_k hedef değeri, y_k ise çıkışı sembolize eder.

$$e_k = d_k - y_k \tag{4.31}$$

$$e_k = d_k - X_k{}^T W_k = d_k - W_k{}^T X_k \tag{4.32}$$

Hatanın karesini alınırsa,

$$e_k^2 = d_k^2 + W_k{}^T X_k X_k{}^T W_k - 2 d_k X_k{}^T W_k \tag{4.33}$$

ve hatanın beklenen değeri bulunursa;

$$E\left[e_k^2\right] = E\left[d_k^2\right] + W_k{}^T E\left[X_k X_k^T\right] W_k - 2E\left[d_k X_k^T\right] W_k \tag{4.34}$$

Buradan endüksiyon sistemine geçer ve sistemin bir k_s kazancından oluştuğunu düşünürse eşitlik (4.35) elde edilir. Burada i_e hatayı, i_d referans değeri sembolize eder.

$$i_e(n+1) = i_d - k_s W^T I_e \tag{4.35}$$

Aşağıda hatanın beklenen değeri üzerinden yorum yapılacaktır.

$$E\{Hata^2\} = E\{\|i_e(n+1)\|^2\} = E\{(i_d - k_s W^T I_e)(i_d - k_s W^T I_e)^T\} \tag{4.36}$$

$$E\{i_d{}^2 - i_d k_s I_e{}^T W - i_d k_s I_e{}^T W + k_s{}^2 W^T I_e I_e{}^T W\} \quad \textbf{(4.37)}$$

$$E\{Hata^2\} = i_d{}^2 - i_d k_s E\{I_e{}^T\} W - i_d k_s E\{I_e{}^T\} W + k_s{}^2 E\{W^T I_e I_e{}^T W\} \quad \textbf{(4.38)}$$

Eğer giriş ve istenen cevap belli ise, beklenen değerin W' nın karesel (quadratic) bir fonksiyonu olduğu belirgindir. Bu hata fonksiyonu ya da performans yüzeyi kase biçimindedir. Kasenin en dibindeki nokta optimum ağırlık değerini verir. Çünkü burada hata en küçüktür.

Performans Yüzeyini Bulma:

Buradaki amaç, performans yüzeyini araştırıp optimal ağırlık vektörünü bulmaktır. Bunun için birçok yöntem geliştirilmiştir. En keskin iniş (steepest descent) yöntemi de bunlardan biridir. En keskin iniş yöntemi aşağıdaki eşitlik ile sunulabilir.

$$W_{k+1} = W_k + \alpha(-\nabla_k) \quad \textbf{(4.39)}$$

Buradaki α ilerlenecek sabit basamak boyutudur. ∇_k ise,

$$\nabla_k = \frac{dE\{Hata^2\}}{dw}|_{w=w_k} \text{ eşittir.} \quad \textbf{(4.40)}$$

Buradan hatanın minimum olduğu optimum ağırlık vektörü için aşağıdaki yol izlenir.

$$E\{\partial Hata^2 / \partial W\} = -2 i_d k_s E\{I_e\} + 2 k_s{}^2 E\{I_e I_e{}^T\} W \quad \textbf{(4.41)}$$

$$R_e = E\{I_e I_e{}^T\} \quad \textbf{(4.42)}$$

Eşitlik (4.42), eşitlik (4.41)' de yerine konur.

$$E\{\partial Hata^2 / \partial W\} = -2 i_d k_s E\{I_e\} + 2 k_s{}^2 R_e W \quad \textbf{(4.43)}$$

Eşitlik (4.43), eşitlik (4.39)' de yerine konur.

$$W(n+1) = W(n) - \alpha(-2i_d k_s E\{I_e\} + 2k_s{}^2 R_e W) \quad \textbf{(4.44)}$$

$$E\{I_e\} = I_e \quad \textbf{(4.45)}$$

$$R_e = E\{I_e I_e{}^T\} = I_e I_e{}^T \quad \textbf{(4.46)}$$

Eşitlik (4.45) ve (4.46) eşitlik (4.44)' da yerine konur.

$$W(n+1) = W(n) - \alpha(-2i_d k_s I_e + 2k_s{}^2 I_e I_e{}^T W) \quad \textbf{(4.47)}$$

Satır sayısı N=2 için, bir dizi eşitlikten sonra (4.51) elde edilir.

$$\begin{bmatrix} w_1(n+1) \\ w_2(n+1) \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} w_1(n) \\ w_2(n) \end{bmatrix} - \alpha\left(-2i_d k_s \begin{bmatrix} e(n) \\ e(n-1) \end{bmatrix} + 2k_s{}^2 \begin{bmatrix} e(n) \\ e(n-1) \end{bmatrix} [e(n) \quad e(n-1)] \begin{bmatrix} w_1(n) \\ w_2(n) \end{bmatrix} \right) \quad \textbf{(4.48)}$$

$$\begin{bmatrix} w_1(n+1) \\ w_2(n+1) \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} w_1(n) \\ w_2(n) \end{bmatrix} - \alpha\left(-2i_d k_s \begin{bmatrix} e(n) \\ e(n-1) \end{bmatrix} + 2k_s{}^2 \begin{bmatrix} e(n)^2 & e(n)e(n-1) \\ e(n-1)e(n) & e(n-1)^2 \end{bmatrix} \begin{bmatrix} w_1(n) \\ w_2(n) \end{bmatrix} \right) \quad \textbf{(4.49)}$$

$$\begin{bmatrix} w_1(n+1) \\ w_2(n+1) \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} w_1(n) \\ w_2(n) \end{bmatrix} - \alpha\left(-2i_d k_s \begin{bmatrix} e(n) \\ e(n-1) \end{bmatrix} + 2k_s{}^2 \begin{bmatrix} e(n)^2 w_1(n) + e(n)e(n-1)w_2(n) \\ e(n-1)e(n)w_1(n) + e(n-1)^2 w_2(n) \end{bmatrix} \right) \quad \textbf{(4.50)}$$

$$\begin{aligned} w_1(n+1) &= w_1(n) - \alpha\left(-2i_d k e(n) + 2k_s{}^2 e(n)^2 w_1(n) + 2k_s{}^2 e(n)e(n-1)w_2(n)\right) \\ w_2(n+1) &= w_2(n) - \alpha\left(-2i_d k e(n-1) + 2k_s{}^2 e(n-1)e(n)w_1(n) + 2k_s{}^2 e(n-1)^2 w_2(n)\right) \end{aligned} \quad \textbf{(4.51)}$$

Tek giriş için çıkış:

$$y(n+1) = W^T I_e = \begin{bmatrix} w_1(n+1) & w_2(n+1) \end{bmatrix} \begin{bmatrix} e(n) \\ e(n-1) \end{bmatrix} \quad \textbf{(4.52)}$$

$$y(n+1) = w_1(n+1)e(n) + w_2(n+1)e(n-1) \quad \textbf{(4.53)}$$

Elde edilen eşitlikler N=2, α =0.00001, k_s =0.13 için yazılımda yerine konularak mikrodenetleyiciye gömülmüş ve sistemin kontrolü sağlanmıştır. N, α ve k_s değerleri sistemi aşıma götürmeyecek ve sistem hızlı yanıtı için zaman sabitinin küçük olmasını sağlayacak şekilde belirlenmiştir.

4.6.5 İleri Geri Yönde Ayarlamalı Kontrol

İleri-geri yönde ayarlamalı kontrol yöntemi, çıkış frekansını ayarlayan zamanlayıcı değerini eğer ölçülen akım referanstan küçük ise +1 arttır. Şayet büyük ise –1 azaltır. Kısaca hata pozitifse kontrolör çıkışı zamanlayıcı değeri olarak 1 arttırılır. Negatifse 1 azaltılır. Bu yöntemin sisteme uygulanmasının sebebi en ilkel şekilde uygulanacak bir kontrolör yapısının nasıl bir davranış sergilediği ve ani durum değişikliklerine karşı nasıl davrandığıdır.

4.7 Uygulanan Kontrolörlerin Sisteme Verdiği Tepkiler

Uygulanan kontrolcülerin sisteme verdiği tepkiler 3 başlık altında incelenecektir.

- Tencerenin gözde sabit kaldığı durum
- Tencerenin gözden hızla çekildiği durum
- Tencere algılama algoritmasının olmadığı durum

Bu üç durum iki tür tencere için ve seviye 6, 7, 8, 9 ve 10 konumlarında incelenecektir. İki tür tencere olarak daha öncede belirtildiği gibi küçük ve büyük tencereler kullanılacaktır. Sistemin verdiği yanıtı incelemek için alınan veriler, mikrodenetleyicinin bilgisayar ile seri haberleşmesi ile elde edilmiş Visual Studio ortamında c# dili yardımıyla bir dosyaya kaydedilmiştir. Daha sonra bu dosyadaki veriler Microsoft Excel ortamında çizdirilmiştir.

4.7.1 Tencere Gözde Sabit Duruyor

Tencere gözde sabit dururken, değişik kontrolörler için sistemin ilgili seviyelerdeki cevabı büyük ve küçük tencere için incelenmiştir. İlgili sistem yanıtları Ek A' da verilmiştir.

İki tür tencere için kontrolörlerin verdikleri cevaplar Ek A' daki şekiller aracılığı ile incelendiğinde, uygulanan tüm kontrolörlerin değişik oturma zamanlarına sahip olmasına rağmen istenen cevabı verdiği gözlemlenmiştir. Endüksiyon ısıtmalı ocak kullanıcısının insan olmasından ötürü oturma zamanlarının insan algılaması göz önüne alındığında hiçbir önemi olmadığı söylenebilir. Bunun sebebi en yavaş kontrolörün bile saniyeler mertebesinde istenilen akım değerine oturmasıdır. Bu açılardan bakıldığında kontrolörlerin birbirlerine göre üstünlükleri yoktur. Her bir kontrolörde sistem için istenen sonucu vermiştir.

4.7.2 Tencere Gözden Hızla Çekiliyor

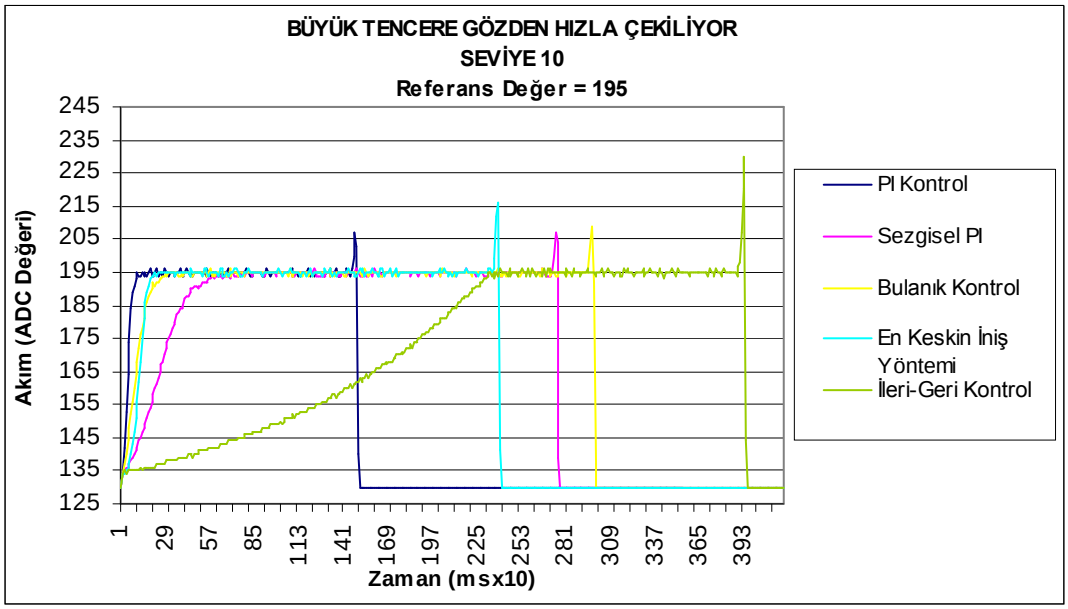
Daha öncede belirtildiği gibi seçilecek kontrolörün en büyük özelliği sistemde oluşabilecek ani değişikliklere vereceği tepkidir. Böyle bir durumu ısıtılan tencerenin gözden hızla çekildiği durum ile inceleyebiliriz.

Tencerenin gözden çekilmesi durumunda tencere algılama algoritması devreye girer. Böyle bir durumda sistemden akım geçişi engellenir. Akım değeri yaklaşık 2,5 Volt üzerine bindirildiği için, akımın kesilmesi durumunda mikrodenetleyici 8 bit ADC değeri olarak yaklaşık 130 okur. Ancak her ne kadar sistemi aşırı akımlara karşı korumak için tencere algılama algoritması olsada, tencerenin hızla çekildiği durumda akımın yükselişi engellenemez. Aşağıda, iki tür tencere için en yüksek seviyede, gözlerin hızla çekilmesi ile oluşacak durum, çeşitli kontrolörler ile incelenmiştir. Burada akımın oturduğu referans değerden 130 ADC değerine aniden düşmesinin sebebi tencere algılama algoritmasının devreye girmesidir.

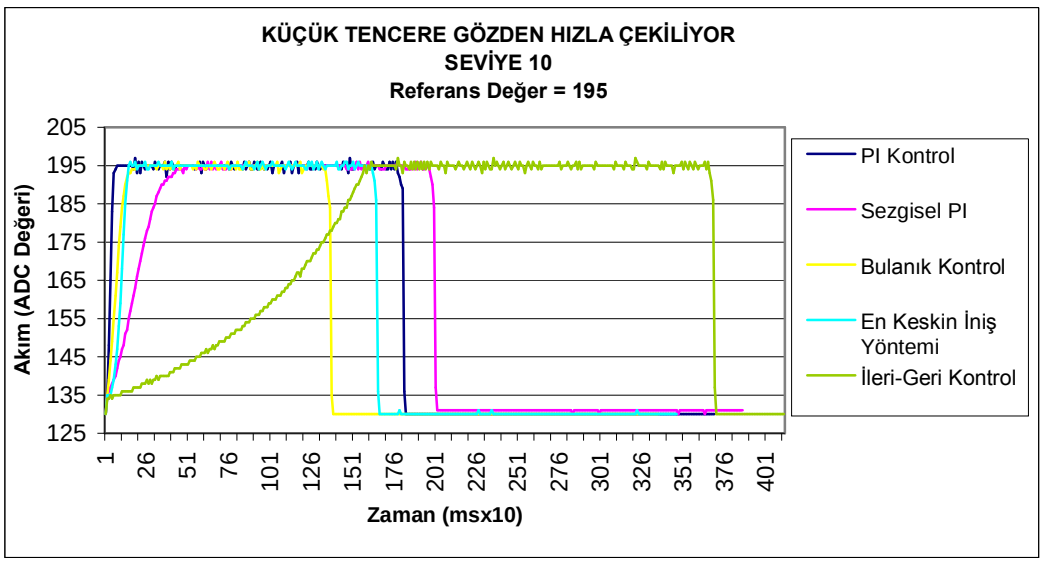
Yapılan deneylerin en yüksek seviyede yapılmasının sebebi sistem rezonans frekansına en yakın yerin en yüksek kademede olmasından ileri gelir. Tencere gözden hızla çekildiğinde sistemin endüktansı büyür ve direnci küçülür. Böyle bir durumda sistemin çekeceği akım tencerenin gözden hızla çekildiği frekansta artmış olur.

Şekil 4.22 ve Şekil 4.23 incelendiğinde büyük tencerenin gözden hızla çekilmesinin önemli bir durum değişikliğine sebep olduğu gözlemlenmiş ve kontrolörlerin verdiği cevaplar incelendiğinde ileri-geri kontrolörün ve en keskin iniş yöntemi ile oluşturulan kontrolör yapısının böyle bir duruma iyi yanıt veremediği

gözlemlenmiştir. Bu iki kontrolör yapısı, sistemdeki ani akım yükselişine diğer kontrolörlere kıyasla hızlı ve etkin bir cevap verememiş ve ani yükselişe engel olamamışlardır. Akımın bu derece yükselmesi sistem elektroniğine çok zarar veren bir durumdur.



Şekil 4.22: Büyük tencere gözden hızla çekilirken sistemin tüm kontrolörlere göre seviye 10' da akım cevabı

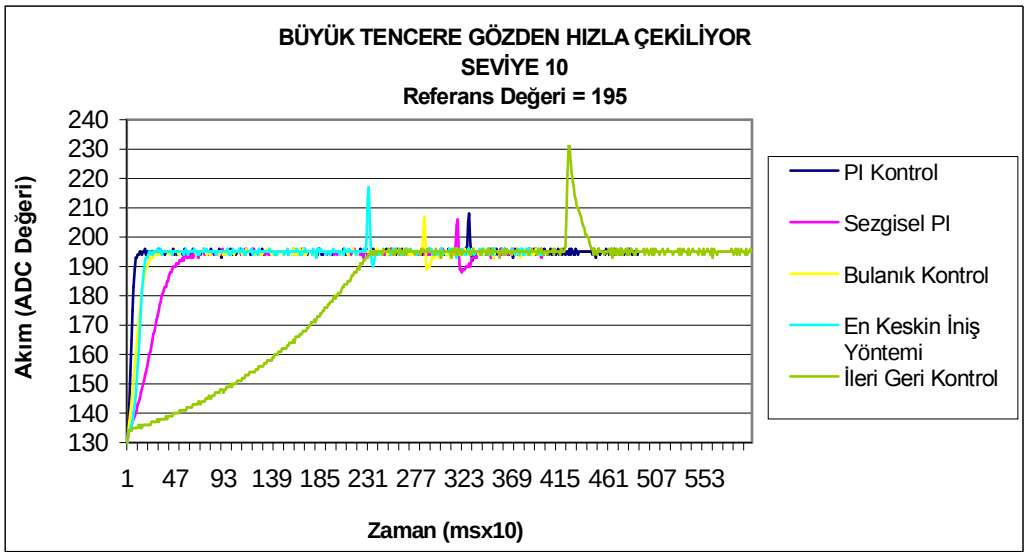


Şekil 4.23: Küçük tencere gözden hızla çekilirken sistemin tüm kontrolörlere göre seviye 10' da akım cevabı

Küçük tenceredeki durum değişikliğinin sistem cevabını etkilememesinin sebebi şöyle açıklanabilir. Küçük tencerenin seviye 10 için istenen referans akıma oturması büyük tencereye göre daha yüksek frekanslarda olur. Büyük tencere için bu akıma oturma, küçük tencereye göre daha düşük frekanslarda gerçekleşir. Bu düşük frekans, sistem durumunun değişmesiyle (endüktansı artar, direnci düşer) oluşan rezonans frekansına daha yakın bir bölgede olunmasını sağlar ve böylece yüksek akımların geçmesine sebep olur.

4.7.3 Tencere Algılama Olmadan Tencere Gözden Hızla Çekiliyor

İncelenen kontrolörlerin tencere algılama algoritması olmadan nasıl bir tepki vereceği ve sistemi ikinci bir güvenlik olarak nasıl koruyacağı bu bölümde incelenecektir. Bu amaçla yüksek kademede her kontrolör için büyük tencerenin gözden hızla çekildiği durum incelenmiştir. Kontrolörlerin davranışları Şekil 4.24' de verilmiştir. Ayrıntılı olarak her kontrolör için çizilen şekiller Ek B' de incelenebilir.



Şekil 4.24: Tencere algılama algoritması olmadan büyük tencere gözden hızla çekilirken sistemin tüm kontrolörlere göre seviye 10' da akım cevabı

Sonuç olarak Şekil 4.24 incelendiğinde ileri-geri kontrolörün ve en keskin iniş yönteminin diğer kontrolörlere nazaran oldukça kötü olduğu gözlemlenmiştir. PI, sezgisel PI ve bulanık kontrolörlerin ise sistemdeki değişikliğe verdikleri ani cevabın birbirlerine çok benzediği gözlemlenmiştir. Burada, ani değişiklikten sonra tenceresiz göz, ilgili kontrolör yapıları ile çalışmaya devam etmiş ve sistem istenen

referans akım değerine yeniden oturmuştur. Bu aşamada gözlemlenen diğer bir sonuç ise tencere algılama algoritmasının kontrolörlerden daha yavaş bir karakteristik sergilemesidir. Bu aynı zamanda seçilen kontrolör yapısının sistemi korumak anlamında büyük bir görev üsleneceğinin de işaretidir.

Uygulanan tüm kontrolörler, tencere gözde sabit iken, tencere gözden hızla çekilirken ve tencere algılama algoritması yok iken tencerenin gözden hızla çekildiği durumlarda incelenmiştir. Başlangıç olarak sistem ani değişikliklerine verdikleri yavaş cevap ile elenen ileri-geri yönde ayarlamalı kontrolör ve en keskin iniş yöntemi kullanılarak elde edilen kontrolör olmuştur. Diğer kontrolörler istenen koşulu sağlamalarına rağmen PI kontrolörün sistem kazancının seçimi ampirik yol ile hesaplandığından diğer iki kontrolörün gerisinde kalmıştır. Bunun sebebi endüksiyon ocakta değişik göz boyutlarının kullanılmasıdır. Buradaki tüm kontrolörler 210mm' lik göz çapında denenmiştir. Böyle bir durumda değişik gözler için, seçilen amprik sistem katsayısının geçerliliği yoktur. Bu özellik mikrodenetleyici yazılımının taşınabilirliğini de yok etmektedir. Endüksiyon ocak uygulamasında, bulanık kontrolör ve sezgisel PI kontrolör kullanılabilecek kontrolör yapılarıdır. Sistem kontrolü için her ikisi de yapılan incelemeler sonucu uygun görülmüştür.

5. SONUÇLAR VE ÖNERİLER

Bu tez çalışmasında, yeni ve gelişen bir teknoloji olan endüksiyon ocak üzerinde incelemeler yapılmış ve diğer ocaklara göre olan üstünlükleri, var olan fonksiyonel yapıları tanıtılmıştır. Başlangıçta, sistemin çalışma prensibi üzerinde durulmuştur. Daha sonra tanıtılan sistem için en uygun kontrolör yapısını seçmek amaç edinilmiştir.

Sistem elektronik yapısı olarak, yarım köprü seri rezonans devre yapısı kullanılmış ve anahtarlama elemanı olarak IGBT seçilmiştir. Sistem anahtarlama frekansı 20 kHz ile 50 kHz arasında değişmektedir. Alt ve üst anahtar birbirinin tamamlayıcısı olan ölü zamanlı PWM işareti ile sürülür. Bu işaret sistem için özellikle seçilmiş bir mikrodenetleyici tarafından sağlanır.

Sistem bobin akımı ile kontrol edilmektedir. Akım, sisteme verilen anahtarlama frekansı ile ayarlanır. Frekans ise mikrodenetleyiciye gömülü kontrolör yapısıyla hataya göre yorumlanarak değiştirilir ve böylece bobin akımı kontrol edilir. Her seviye için belirlenen referans akım değerleri bir tablo ile mikrodenetleyiciye yazılmıştır. Sistem için 5 tip kontrolör yapısı incelenmiştir. Bunlar PI, sezgisel PI, bulanık, ileri geri yönde ayarlamalı kontrolör ve en keskin iniş yönteminin kullanıldığı kontrolör yapılarıdır.

Bu tez çalışmasında amaç, belirlenen sistem yapısı için en uygun kontrolör yapısını seçmektir. Bu sebeple öncelikle sistem karakteristiği üzerinde durulmuş ve sistem derecesi bir K kazancına indirgenmiştir. Sisteme uygulanan 5 tip kontrolör yapısı 210 mm çapındaki göz üzerinde incelenmiş ve bu amaçla iki tip tencere kullanılmıştır. Uygulanan kontrolörler seviye 6,7,8,9 ve 10 için gözlemlenmiştir.

Seçilen kontrolör yapılarının sistem için uygun olup olmadığı öncelikle tencere gözde sabit iken test edilerek kontrol edilmiştir. Buna göre 5 tip kontrolör yapısı birbirlerine göre farklı özelliklere sahip olmalarına rağmen istenen akıma oturmada hiçbir sorun yaşanmamıştır. Oturma zamanları arasındaki farklılığın, endüksiyon

kullanıcısının insan olmasından ötürü algılama süresi anlamında bir önem teşkil etmediği kanaatine varılmış ve tüm kontrolörler bu aşamada uygun görülmüştür.

İkinci aşamada sistem "tencere gözden hızla çekilirken" durumunda incelenmiştir. Bunu sebebi sistem karakteristiğinde oluşan ani bir değişiklikte elektroniğe zarar verici akımların oluşmasıdır. Böyle bir durumda seçilen kontrolör yapılarının hızlı cevabı çok önemlidir. Bu amaçla, en yüksek seviyede ısıtılan bir tencerenin gözden hızla çekilmesi anında, kontrolörlerin verdiği cevaplar incelenmiştir. İncelenen 5 tip kontrolör yapısından ileri-geri yönde ayarlamalı kontrolör ve en keskin iniş yöntemi ile oluşturulan kontrolör yapılarında, ani değişiklikte meydana gelen akım yükselmesi, diğer kontrolörlere göre oldukça yüksek bulunmuştur. Bu kontrolörlerin sistem cevabı diğerlerine nazaran oldukça yavaştır.

Üçüncü aşamada deneyleri yapılan 5 tip kontrolör yapısı bu kez tencere algılama algoritması olmadan en yüksek seviyede incelenmiştir. Bu deneyin amacı ikinci aşamada yapılan deneye yardımcı bir fonksiyonun olmasından ileri gelmektedir. Tencere gözden hızla çekilirken gözün boş kalmasından ötürü tencere algılama algoritması da bu aşamada görev üstlenmekte ve sistemin akımını kesmektedir. Böyle bir koruyucu algoritma olmadan sistemin ilgili kontrolörler ile nasıl davranacağı üçüncü aşamada gözlemlenmiştir. Bununla beraber tencere algılama algoritmasında oluşabilecek herhangi bir hata durumunda seçilecek kontrolör yapısının sistemi korumaya yönelik ikinci bir güvenlik olup olamayacağı da incelenmek istenmiştir. Yapılan deney sonuçlarında ikinci aşamadaki uygun olamayan kontrolörlerin yine aynı davranışı sergilemesi şaşırtıcı olmamıştır. Bu sebeple ileri-geri yönde ayarlamalı kontrolör ve en keskin iniş yöntemi ile oluşturulan kontrolör yapıları elenmiştir. Bu aşamada gözlemlenen diğer bir sonuç ise tencere algılama algoritmasının kontrolörlerden daha yavaş bir karakteristik sergilemesidir. Bu nedenle böyle ani değişikliklere karşı elektroniğin korunması anlamında kontrolörlere büyük bir görev düşmektedir.

Uygulanan tüm kontrolörler, tencere gözde sabit iken, tencere gözden hızla çekilirken ve tencere algılama algoritması yok iken tencerenin gözden hızla çekildiği durumlarda incelenmiştir. Sonuç olarak PI, sezgisel PI ve bulanık kontrolör yapılarının sistem için uygun yapıda olduklarına karar verilmiştir. Endüksiyon ocaklar müşteri isteğine bağlı olmak üzere çeşitli boyutlarda örneğin, 145 mm, 180

mm, 210 mm ve 280 mm çaplarında gözlere sahip olabilirler. Böyle bir durumda PI kontrolör için seçilen amprik sistem kazancının diğer gözlerde bir geçerliliği yoktur. Bu durum mikrodenetleyiciye gömülen kodun taşınabilirliğini tamamen etkilemektedir. Bu açıdan bakıldığında sezgisel PI ve bulanık kontrolör yapıları endüksiyon sistem için önerilmektedir.

KAYNAKLAR

[1] **Koertzen, H.W., van Wyk, J.D., Ferreira, J.A.,** 1995. Design of the half bridge, series resonant converter for induction cooking, *Power Electronics Specialists Conference*, Atlanta, GA, USA, Jun 18-22.

[2] **Acero, J., Hernandez, P.J., Burdio, J.M., Alonso, R., Barragdan, L.A.,** 2005. Simple Resistance Calculation in Litz-Wire Planar Windings for Induction Cooking Appliances, *IEEE Transactions on Magnetics* **41,** 1280-1288.

[3] **Young-Sup Kwon, Sang-Bong Yoo, Dong-Seok Hyun,** 1999. Half-Bridge Series Resonant Inverter for Inductio Heating Applications with Load-adaptive PFM Control Strategy, *Applied Power Electronics Conference and Exposition,*. Dallas, TX, USA, March 14-18.

[4] **Llorente, S., Monterde, F., Burdio, J.M., Acero, J.,** 2002 A Comparative Study of Resonant Inverter Topologies Used in Induction Cookers, *Applied Power Electronics Conference and Exposition,* Dallas, TX, USA, March 10-14.

[5] **Monterde, F., Hernadez, P., Burdio, J.M., Garcia, J.R., Martinez, A.,** 1999. Multiple-Output Series-Resonant Inverter for Induction Cookers, *Proc. European Conf. on Power Electronics and Applications (EPE),* Lausanne, Switzerland, September 7-9.

[6] **Acero, J., Artigas, J.I., Burdio, J.M., Barragan, L.A., Llorente, S.** 2002. Power Measuring in two-output Resonant Inverters for Induction Cooking Appliances, *Power Electronics Specialists Conference*, Cairns, Australia, June 23-27.

[7] **Hideki Omori, Hirofumi Noma, Hideyuki Kominami, Toshiaki Iwai, Kazuhiko Asada,** 1994. Induction Heating Cooker with Constant Frequency Controlled Inverter, *United States Patent*, No: US5319174, dated 07.06.1994.

[8] **Hiroshi Tominaga, Kenji Hattori; Hirobumi Noma; Tamotsu Izumitani,** 1996. Multi-Coil Induction Heating Cooker, *Japan Patent*, No: JP8213163, dated 20.08.1996.

[9] **Franois Forest, Sbastien Faucher, Jean-Yves Gaspard, Didier Montloup, Jean-Jacques Huselstein, Charles Joubert,** 2007. Frequency-Synchronized Resonant Converters for the Supply of Multiwinding Coils in Induction Cooking Appliances, *IEEE Transactions on Industrial Electronics,* **54,** 441-452.

[10] **Y. Doç Dr. Faruk Bakan,** 19.10.2006. "Manyetik Malzemelerin Özellikleri". <http://www.yildiz.edu.tr/~fbakan/>.

[11] **Yılmaz Namık, Hazır Sefa,** 2005. Endüksiyon Yöntemi ile İlgili Isıtma Tasarım Çalışmaları, Arçelik Ar-Ge Raporu, İstanbul.

[12] **Ögr.Gör. Harun Topak,** 07.08.2007. "Alternatif Akım Devre Analizi". <http://uzak.mersin.edu.tr/UserFiles/EndElo/Eln-122/aa-07.pdf>.

[13] **Steigerwald, R.L,** 1992. Pratical Design Methodologies for Load Resonant Converters Operating Above Resonance, *Telecommunications Energy Conference*, Washington, DC, USA, October 4-8.

[14] **ATMEL Corporation,** 18.10.2005. "AT90PWM3 Datasheet", <http://www.atmel.com/dyn/resources/prod_documents/doc4317.pdf>.

[15] **Widrow, B.; McCool, J.,** 1976 A comparison of adaptive algorithms based on the methods of steepest descent and random search, *IEEE Transactions on Antennas and Propagation* **24**, 615–637.

[16] **Widrow Bernard, Stearns Samuel D.,** 1985. Adaptive Signal Processing, Prentice Hall, New Jersey.

[17] **Fairchild Semiconductor,** 26.11.2007. **"**Induction Heating System Topology Review". <http://www.fairchildsemi.com/an/AN/AN-9012.pdf>.

[18] **Kuo Benjamin C,** 2005. Otomatik Kontrol Sistemleri, Literatür Yayınları, İstanbul.

[19] **Ned Mohan, Tore M. Undeland, William P. Robbins, Çevirenler,** 2003. Güç Elektroniği Çeviriciler, Uygulamalar ve Tasarım, Literatür Yayınları, İstanbul.

[20] **Prof. Dr Hacı Bodur,** 2004. Güç elektroniği Ders Notları, YTÜ, İstanbul.

[21] **Prof. Dr Hacı Bodur,** 2004. Güç elektroniğinin Endüstrüyel Uygulamaları II Ders Notları, YTÜ, İstanbul.

[22] **Keller F. J., Gettys W. E., Skove M. J.,** 1996. Fizik, Papirus Basım, İstanbul.

[23] **Araş. Gör. Engin Yeşil,** 2005. Bulanık Modelleme ve Kontrol Ders Notları, İTÜ, İstanbul.

[24] **Klir G.J and Yuan Bo,** 1995. Fuzzy Sets and Fuzzy Logic Theory and Applications, Prentice Hall, New Jersey.

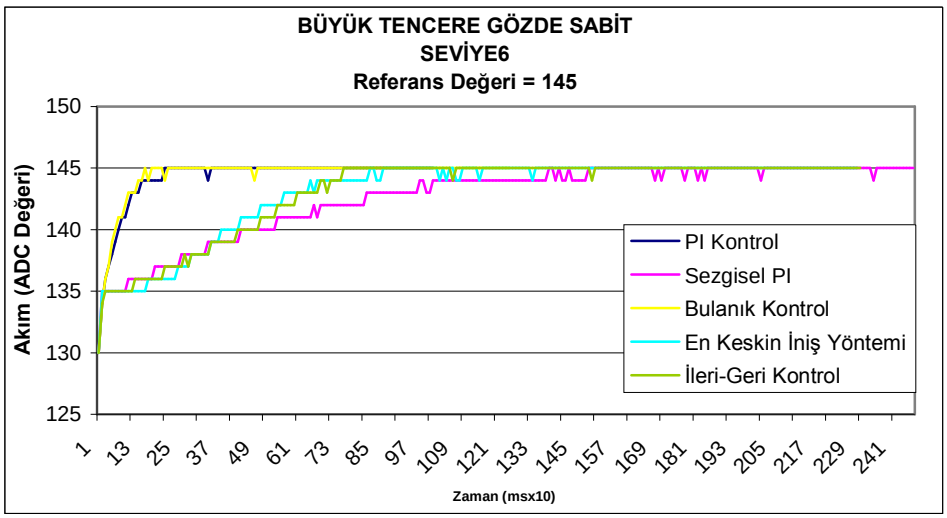
[25] **The Owlcroft Company,** 18.10.2007. <http://theinductionsite.com>.

[26] **Luenberger D. G,** 2003. Linear and Nonlinear Programming, Kluwer Academic Publishers, USA.

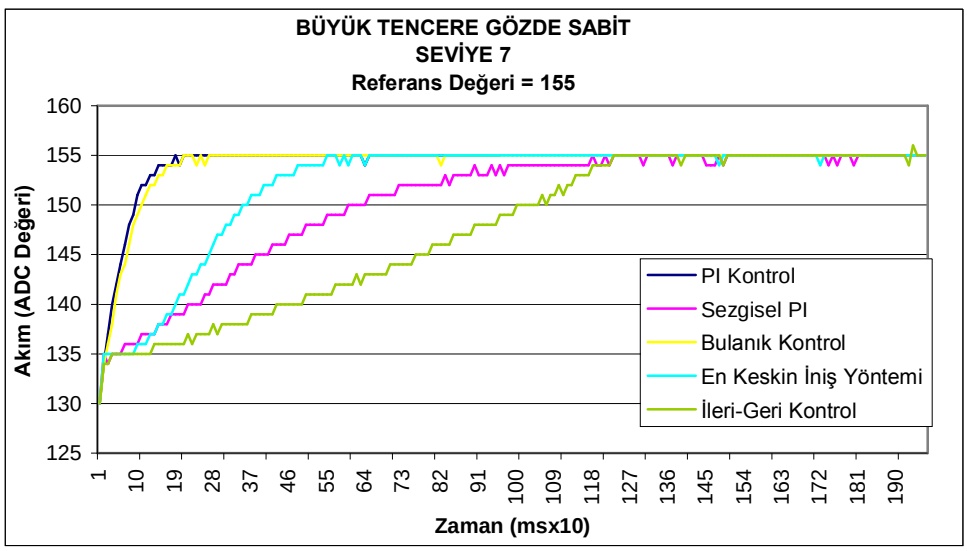
[27] **ATMEL Corporation,** 13.06.2007. "AVR434:PSC Cookbook". <http://www.atmel.com/dyn/resources/prod_documents/doc7670.pdf>.

EK A

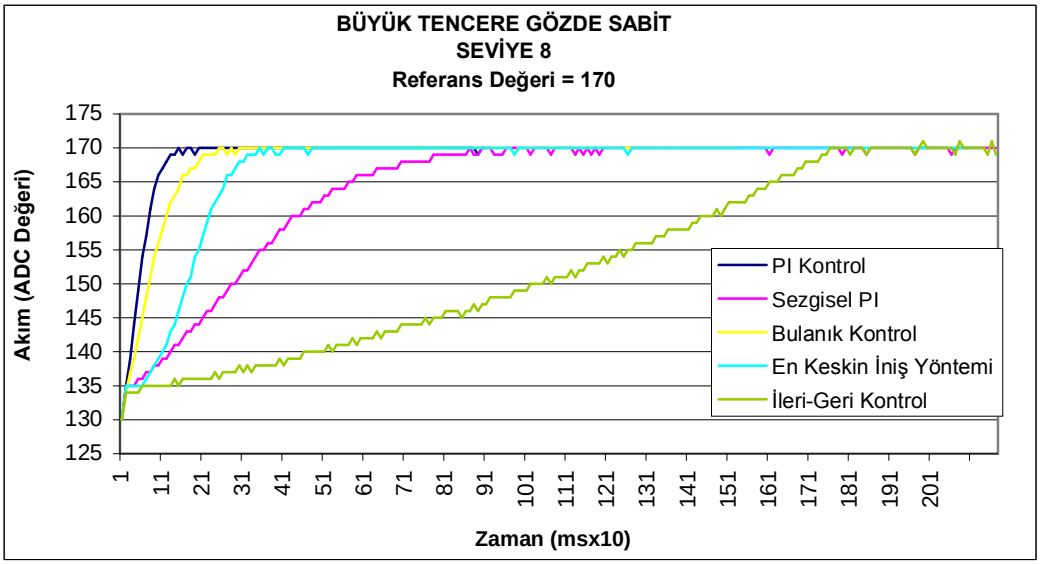
Büyük ve küçük tencerelerin seviye 6,7,8,9,10 için tüm kontrolörlerde verdikleri akım cevapları aşağıdaki gibidir.



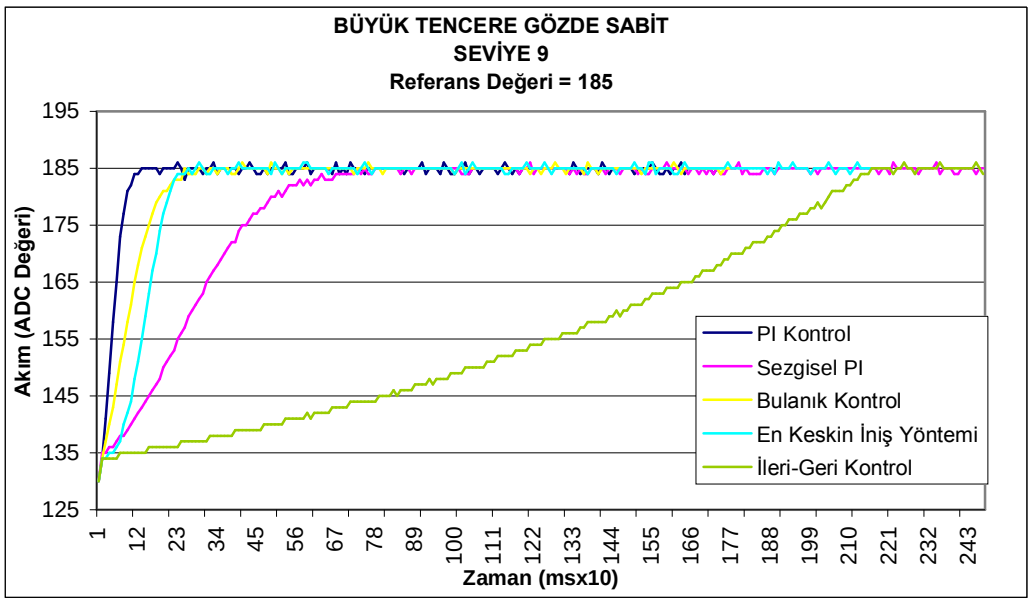
Şekil A.1: Büyük tencere gözde sabit iken sistemin tüm kontrolörlere göre seviye 6'da akım cevabı



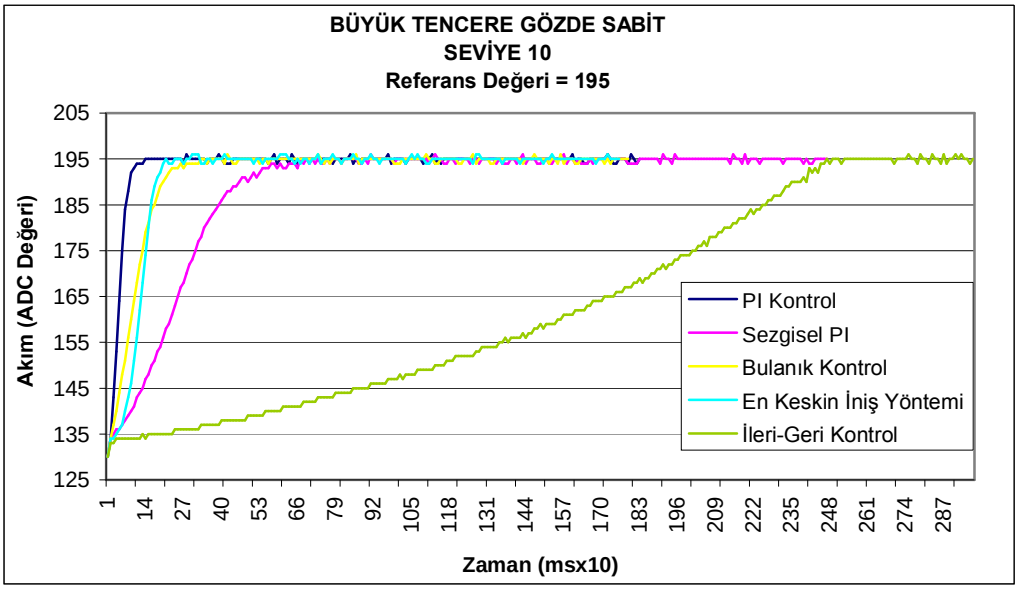
Şekil A.2: Büyük tencere gözde sabit iken sistemin tüm kontrolörlere göre seviye 7'de akım cevabı



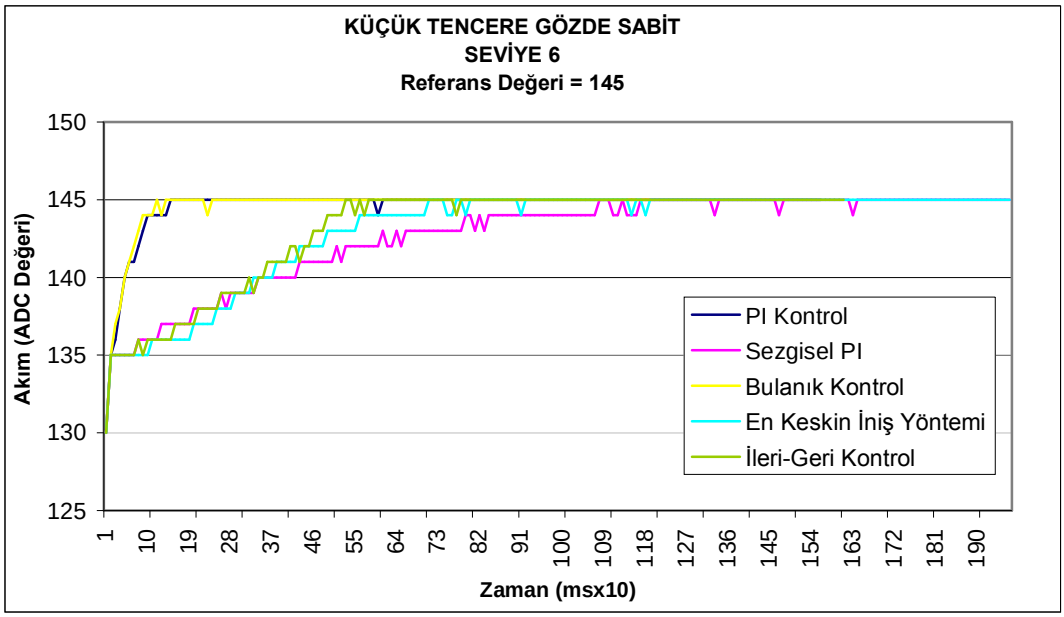
Şekil A.3: Büyük tencere gözde sabit iken sistemin tüm kontrolörlere göre seviye 8'de akım cevabı



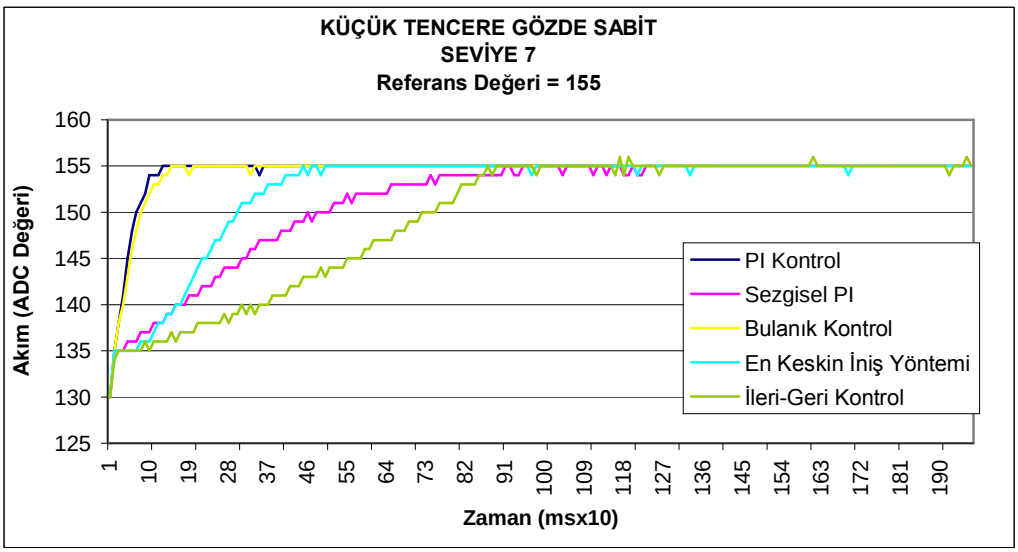
Şekil A.4: Büyük tencere gözde sabit iken sistemin tüm kontrolörlere göre seviye 9'da akım cevabı



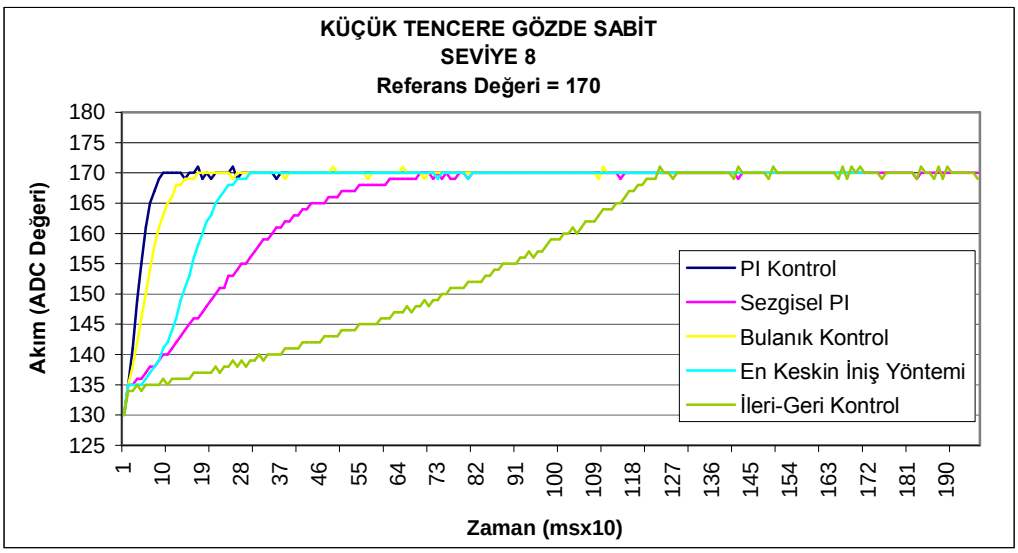
Şekil A.5: Büyük tencere gözde sabit iken sistemin tüm kontrolörlere göre seviye 10'da akım cevabı



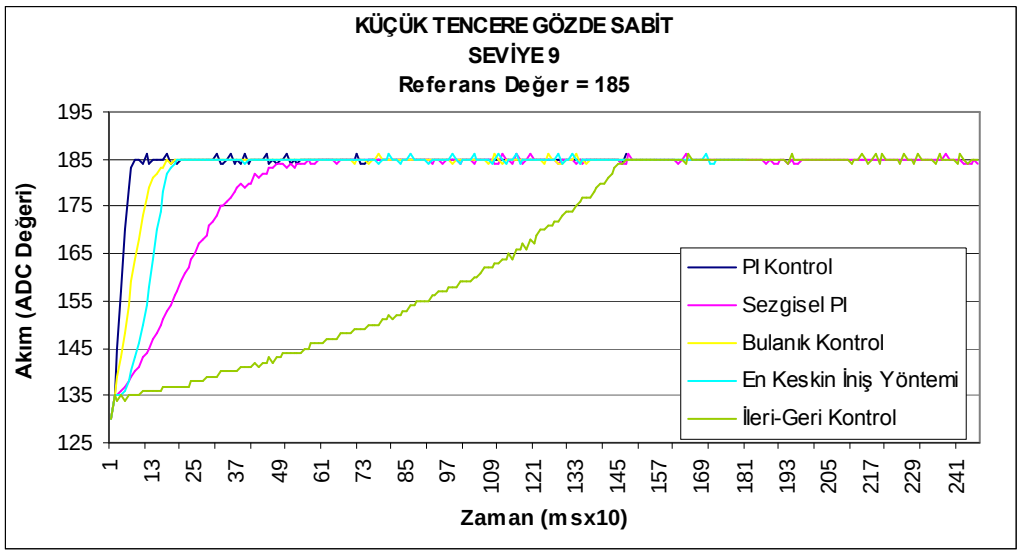
Şekil A.6: Küçük tencere gözde sabit iken sistemin tüm kontrolörlere göre seviye 6'da akım cevabı



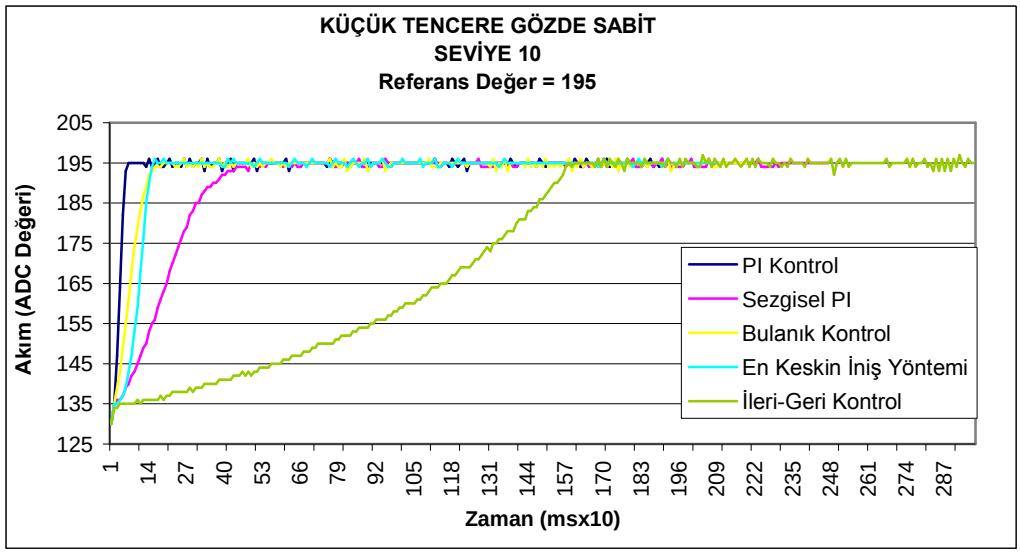
Şekil A.7: Küçük tencere gözde sabit iken sistemin tüm kontrolörlere göre seviye 7'de akım cevabı



Şekil A.8: Küçük tencere gözde sabit iken sistemin tüm kontrolörlere göre seviye 8'de akım cevabı



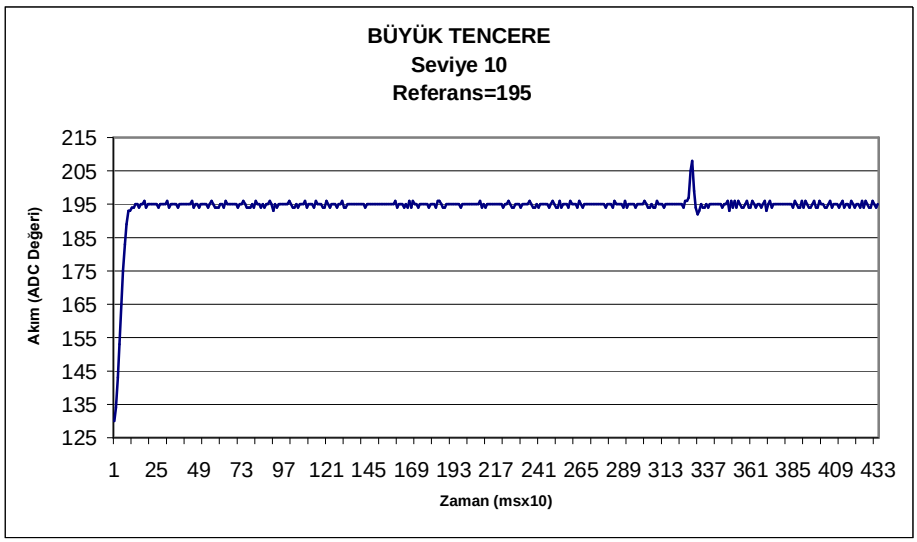
Şekil A.9: Küçük tencere gözde sabit iken sistemin tüm kontrolörlere göre seviye 9'da akım cevabı



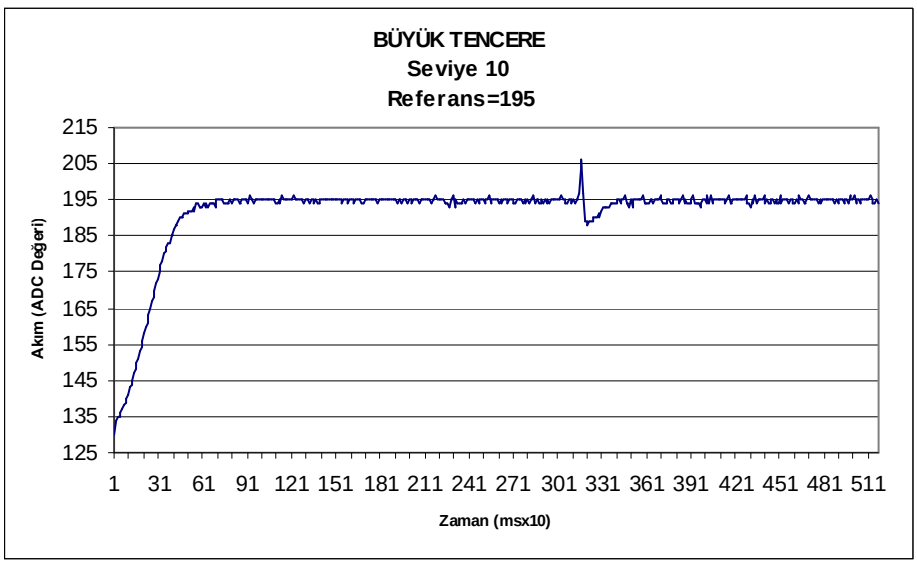
Şekil A.10: Küçük tencere gözde sabit iken sistemin tüm kontrolörlere göre seviye 10'da akım cevabı

EK B

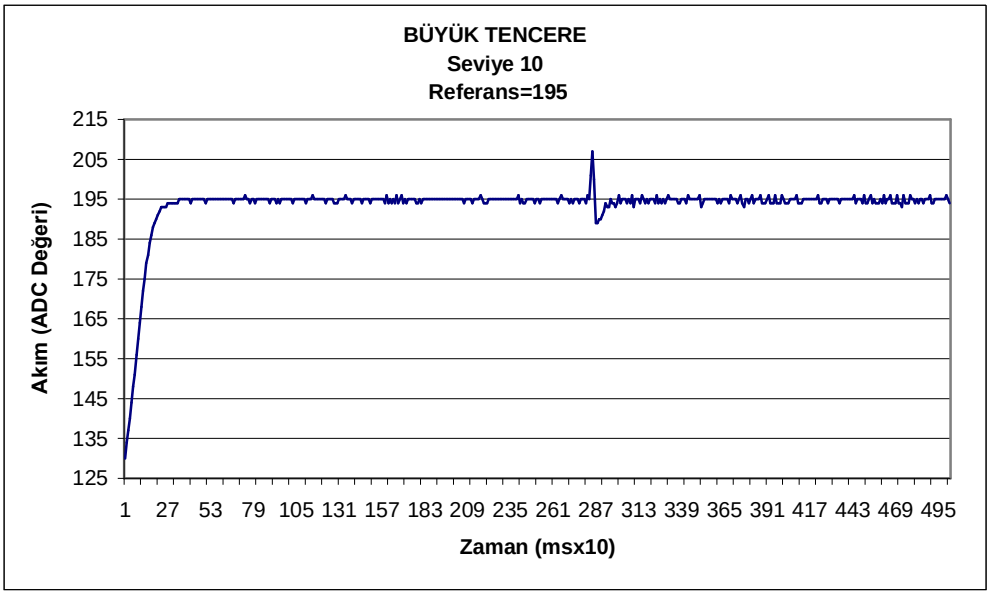
Tencere algılama algoritması olmadan seviye 10 için tüm kontrolörlerin gözde büyük tencere varken gözden hızla çekilmesine verdiği tepki aşağıdaki şekillerde incelenebilir.



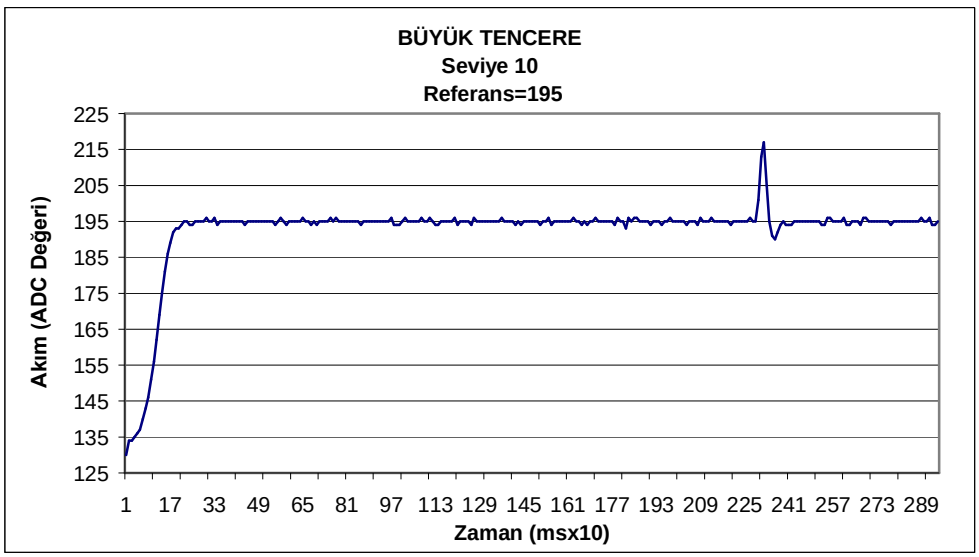
Şekil B.1: Tencere algılama algoritması yok ve gözde büyük tencere var iken sistemin PI kontrolöre göre seviye 10' da akım cevabı



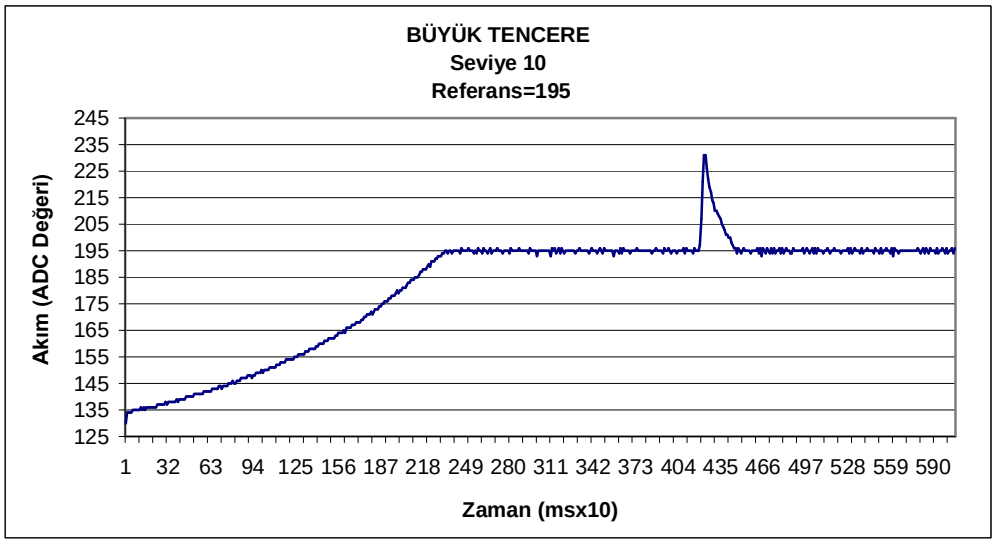
Şekil B.2: Tencere algılama algoritması yok ve gözde büyük tencere var iken sistemin sezgisel PI kontrolöre göre seviye 10' da akım cevabı



Şekil B.3: Tencere algılama algoritması yok ve gözde büyük tencere var iken sistemin bulanık kontrolöre göre seviye 10' da akım cevabı



Şekil B.4: Tencere algılama algoritması yok ve gözde büyük tencere var iken sistemin en keskin iniş yöntemine göre seviye 10' da akım cevabı



Şekil B.5: Tencere Algılama algoritması yok ve gözde büyük tencere var iken sistemin ileri-geri yönde ayarlamalı kontrolöre göre seviye 10'da akım cevabı

ÖZGEÇMİŞ

Burçak Aytekin, 1982 yılında İstanbul' da doğdu. 1993 yılında başladığı ortaokul öğrenimini 1996 yılında ikincilikle tamamladı. Daha sonra devam ettiği Kadir Has Lisesi' ndeki öğrenimini 2000 yılında başarıyla tamamladı. 2000 yılında girdiği Yıldız Teknik Üniversitesi Elektrik Mühendisliği Bölümü' nden 2004 yılında Elektrik Mühendisi olarak mezun oldu. Aynı yıl İstanbul Teknik Üniversitesi Kontrol Otomasyon Mühendisliği yüksek lisans programına başladı. 2005 yılında. "Endüstride Uygulama Destekli Tez Programı" kapsamında Arçelik A.Ş. Araştırma ve Geliştirme Direktörlüğü'nde çalışmaya başladı. 2007 yılının Eylül ayına kadar bu görevde çalışmaya devam etti. Daha sonra Arçelik A.Ş Pişirici Cihazlar İşletmesi'nde Ürün Geliştirme Mühendisi olarak göreve başladı. Hala bu görevde çalışmaktadır.