

İSTANBUL TEKNİK ÜNİVERSİTESİ ★ FEN BİLİMLERİ ENSTİTÜSÜ

**MANYETİK OLMAYAN TENCERELERİ ISITABİLEN EV TİPİ
ENDÜKSİYON OCAK UYGULAMASI**

**YÜKSEK LİSANS TEZİ
Serdar Gökhan DOĞANAY**

Anabilim Dalı : Elektrik Mühendisliği

Programı : Elektrik Mühendisliği

EKİM 2011

İSTANBUL TEKNİK ÜNİVERSİTESİ ★ FEN BİLİMLERİ ENSTİTÜSÜ

**MANYETİK OLMAYAN TENCERELERİ ISITABİLEN EV TİPİ
ENDÜKSİYON OCAK UYGULAMASI**

**YÜKSEK LİSANS TEZİ
Serdar Gökhan DOĞANAY
(504081029)**

Tezin Enstitüye Verildiği Tarih : 14 Eylül 2011

Tezin Savunulduğu Tarih : 13 Ekim 2011

**Tez Danışmanı : Yrd. Doç. Dr. Özgür ÜSTÜN (İTÜ)
Diğer Jüri Üyeleri : Prof. Dr. Oruç BİLGİÇ (İKÜ)
Yrd. Doç. Dr. Levent OVACIK (İTÜ)**

EKİM 2011

ÖNSÖZ

Çalışmalarımı yürütmemde yardımcı olan ve yol gösteren değerli hocam Sn. Yrd. Doç. Dr. Özgür ÜSTÜN'e öncelikle çok teşekkür ederim.

Bu çalışmanın gerçekleşmesini sağlayan ve çalışmalarına katkı sağlayan Arçelik Araştırma ve Geliştirme Merkezi'ne sonsuz teşekkürlerimi sunarım.

Çalışmalarımın başlangıcından, sonuna kadar desteklerini esirgemeyen, bilgi ve tecrübelerini tereddütsüz benimle paylaşan Sn. Namık YILMAZ, Sn. Sefa HAZIR ve Sn. Hakan Süleyman YARDİBİ'ye ve Arçelik Ar-Ge Güç Elektroniği Ailesi'ne çok teşekkür ederim.

Her zaman yanımda olan, maddi ve manevi desteklerini hiç esirgemeyen aileme, annem, babam Saniye, Metin DOĞANAY' a ve ablam Neslihan DOĞANAY'a sonsuz teşekkürler...

Eylül 2011

Serdar Gökhan DOĞANAY
(Elektrik Mühendisi)

İÇİNDEKİLER

Sayfa

ÖNSÖZ.....	iii
İÇİNDEKİLER	v
KISALTMALAR	vii
ÇİZELGE LİSTESİ.....	ix
ŞEKİL LİSTESİ.....	xi
SEMBOL LİSTESİ.....	xiii
ÖZET.....	xv
SUMMARY	xvii
1. GİRİŞ	1
1.1 Tezin Kapsamı.....	1
2. ENDÜKSİYON ISITMANIN TEMEL TEORİSİ	3
2.1 Temel Bilgiler	3
2.2 Elektromanyetik Endüksiyon	4
2.2.1 Deri etkisi ve girdap akımları.....	5
2.3 Kullanım Alanları.....	6
3. EV TİPİ ENDÜKSİYON OCAK TEKNOLOJİSİ	9
3.1 Olumlu Yönleri	9
3.1.1 Hızlı ısıtma.....	9
3.1.2 Kayıpsız ısıtma.....	9
3.1.3 Güvenli ısıtma	10
3.2 Olumsuz Yönleri	11
3.2.1 Tencere ve tava uygunluğu	11
3.2.2 Yüksek güç ihtiyacı.....	11
3.3 Endüksiyon Ocak Çalışma İlkesi	11
3.4.1 Rezonans çeviriciler.....	15
3.4.1.1 Yarım köprü seri rezonans çevirici	16
3.4.1.2 Tek anahtarlı paralel rezonans çevirici	18
4. ENDÜKSİYON OCAKLARDA MANYETİK ÖZELLİĞİ OLMAYAN TENCERELERİ ISITMA YÖNTEMLERİ	21
4.1 Temel Bilgiler	21
4.1.1 Frekans ayarı	25
4.1.1.1 Frekans sürme tekniği	26
4.1.2 Bobin sarım sayısını arttırmak	28
5. EV TİPİ MANYETİK OLMAYAN TENCERELERİ ISITABİLEN ENDÜKSİYON OCAK UYGULAMASI.....	29
5.1 Yarım Köprü Seri Rezonans Devresinin Çalışma Prensibi.....	29
5.2 Yarım köprü seri rezonans devre tasarımı.....	34
5.2.1 Anahtarlama elemanının seçimi.....	37
5.3 Kontrol Devresi	40
5.4 Bobin Tasarımı	43

6. DENEY DÜZENEGİ VE ALINAN ÖLÇÜMLER.....	47
6.1 Deney Düzenegi	47
6.2 Deneyisel Sonuçlar	47
6.2.1 Bobin ölçümleri.....	47
6.2.2 Verim ölçümleri	49
6.2.3 Devre üzerinden alınan akım ve gerilim dalga şekilleri.....	50
7. SONUÇLAR VE ÖNERİLER.....	53
KAYNAKLAR.....	55
ÖZGEÇMİŞ.....	57

KISALTMALAR

AC	: Alternative Current
BJT	: Bipolar Junction Transistor
DC	: Direct Current
DGM	: Darbe Genişlik Modülasyonu
EMC	: Electromagnetic Compatibility
EMI	: Electromagnetic Interference
FEM	: Finite Element Method
GTO	: Gate Turn Off Thyristor
IGBT	: Insulated Gate Bipolar Transistor
MOSFET	: Metal Oxide Semiconductor Field Effect Transistor
PWM	: Pulse Width Modulation
Q	: Quality Factor
RLC	: Resistance Inductance Capacitance Circuit
RMS	: Root Mean Square
UART	: Universal Asynchronous Receiver/Transmitter

ÇİZELGE LİSTESİ

	<u>Sayfa</u>
Çizelge 4.1 : Metal malzemelerin özellikleri.....	21
Çizelge 4.2 : Çeşitli metallerin değişken frekanslarda endüklenen akımın girme derinliği (mm)	22
Çizelge 5.1 : Kontrol edilebilir anahtarların bağlı özellikleri.....	38
Çizelge 5.2 : Kullanılan ferit nüvelerin özellikleri.	45
Çizelge 6.1 : Farklı frekanslara göre bobinin endüktans ve direnç ölçümleri	48
Çizelge 6.2 : Farklı tipte tencereye göre alınan bobinin L ve R değerleri.....	48
Çizelge 6.3 : Farklı tipte tencere ile alınan verim ölçümleri	49

ŞEKİL LİSTESİ

Sayfa

Şekil 2.1: (a)Transformatör eşdeğer devresi, (b)Endüksiyon ısıtma eşdeğer devresi [3]	3
Şekil 2.2: Elektromanyetik endüksiyonun meydana gelişi [3]	5
Şekil 3.1: Isıtma yöntemlerinin ısıtma zamanı bakımından karşılaştırılması [7]	9
Şekil 3.2: Isıtma yöntemlerinin harcadıkları enerji miktarı bakımından karşılaştırılması [7]	10
Şekil 3.3: Isıtma yöntemlerinde yüzeyin soğuma zamanları bakımından karşılaştırılması [7]	10
Şekil 3.4: Endüksiyon ocak türlerinde tencere tipi uygunluğu.....	11
Şekil 3.5: Endüksiyon ocak bobin yapısı [9]	12
Şekil 3.6: Endüksiyon ocak transformatör benzetimi [16]	13
Şekil 3.7: Endüksiyon ocak yapısı.....	14
Şekil 3.8: Yarım köprü seri rezonans endüksiyon devresi temel yapısı.....	16
Şekil 3.9: Çalışma frekansına bağlı olarak güç kontrol karakteristiği [11]	17
Şekil 3.10: Tek anahtarlı paralel rezonans çevirici devre şeması.....	18
Şekil 3.11: Paralel rezonans karakteristik eğrisi [11]	19
Şekil 4.1: Çelik ve alüminyum tencerelerdeki manyetik alan dağılımı [21]	22
Şekil 4.2: Basit RLC devresi [21].....	23
Şekil 4.3: Çelik tencere durumunda RLC devresi akım grafiği [21]	23
Şekil 4.4: Manyetik olmayan tencere durumunda RLC devresi akım grafiği [21] ...	24
Şekil 4.5: Ferromanyetik tencere ve alüminyum tencerenin rezonans eğrileri.	24
Şekil 4.6: Farklı malzemelerin frekansa göre verim eğrisi [13]	25
Şekil 4.7: Farklı malzemelerin frekansa göre direnç grafiği	26
Şekil 4.8: Aynı kapı işareti için akımın 1. ve 3. harmonik dalga şekilleri [14].....	27
Şekil 4.9: Ferromanyetik olan ve olmayan malzemelerin frekansa göre direnç ve endüktans değerleri [14]	27
Şekil 4.10: Endüksiyon bobininin trafoya benzetimi [15].....	28
Şekil 5.1: Rezonans akımının dalgaşekli	30
Şekil 5.2: Yarım köprü rezonans çevirici durum 1 [16]	31
Şekil 5.3: Yarım köprü rezonans çevirici durum 2 [16]	32
Şekil 5.4: Yarım köprü rezonans çevirici durum 3 [16]	32
Şekil 5.5: Yarım köprü rezonans çevirici durum 4 [16]	32
Şekil 5.6: Yarım köprü seri rezonans çevirici anahtarlama sinyalleri	33
Şekil 5.7: T ₂ anahtarının akım ve gerilim dalga şekilleri [22]	33
Şekil 5.8: Devre simülasyon çalışmaları	35
Şekil 5.9: Endüksiyon bobini simülasyon sonucu akım ve gerilim dalga şekilleri ...	36
Şekil 5.10: Anahtarlama elemanının akım ve gerilim dalga şekilleri.....	36
Şekil 5.11: TLP 350 pin görüntüsü.....	39
Şekil 5.12: Toplam kapı şarjı - V _{GE} eğrisi ve anahtarlama anı	39
Şekil 5.13: IGBT sürme devresi	40
Şekil 5.14: Endüksiyon ocak elektronığının blok şeması.....	41
Şekil 5.15: Sistemde kullanılan mikroişlemcinin pindiyagramı [17]	41

Şekil 5.16: Frekans kontrolü için bilgisayar arayüz program [7]	42
Şekil 5.17: Tasarımı yapılan bobin [21]	44
Şekil 5.18: Bobin ferit yapısı	44
Şekil 6.1: Deney düzeneği [21].....	47
Şekil 6.2: Rezonans devresi akım ve gerilim dalga şekilleri	50
Şekil 6.3: Rezonans devresi akım ve gerilim dalga şekilleri	51

SEMBOL LİSTESİ

I_P	: Transformatör birincil sargı akımı (A)
I_S	: Transformatör ikincil sargı akımı (A)
N_P	: Transformatör birincil sarım sayısı
N_S	: Transformatör ikincil sarım sayısı
H	: Manyetik alan şiddeti (A/m)
i	: Akım(A)
Θ	: Amper-sarım
Φ	: Manyetik akı(Wb)
A	: Yüzey alanı(m ²)
μ	: Manyetik geçirgenlik katsayısı (H/m ⁻¹)
i_x	: Yüzeyden x kadar uzaklıktaki akım yoğunluğu (A)
i_0	: Girme derinliğinde akan akım yoğunluğu (x = 0) (A)
d_0	: Frekans tarafından belirlenen bir sabit
ρ	: Özgül direnç ($\Omega\text{mm}^2/\text{m}$)
ω	: Cismin yüzeyinde akan akımın açısal frekansı (rad/s)
P_{sw}	: Anahtarlama kaybı(W)
V_{dc}	: Anahtarlama gerilimi (V)
V_{on}	: Anahtar iletimde iken üzerine düşen gerilim (V)
I_{dc}	: Anahtarlama akımı (A)
f_s	: Anahtarlama frekansı (Hz)
t_{on}	: İletim zamanı (s)
t_{off}	: Kesim zamanı (s)
V	: Gerilim (V)
T_s	: Anahtarlama periyodu (1/Hz)
t	: Zaman (s)
δ	: Girme derinliği (mm)
μ_r	: Bağlı manyetik geçirgenlik
X_L	: Bobin reaktansı (Ω)
X_C	: Kapasite reaktansı (Ω)
I_{Lm}	: Rezonans akımının maksimum değeri (A)
V_{Cm}	: Rezonans kondansatörü gerilimi maksimum değeri (V)
$i_L(t)$	: Rezonans akımının anlık değişimi (A)
$V_C(t)$	: Rezonans kondansatörü geriliminin anlık değişimi (V)
V_{GE}	: IGBT gate-emiter gerilimi (V)
$L_{eşF}$	: Manyetik tencere ile bobinin eşdeğer endüktans değeri (H)
$L_{eşNF}$	: Manyetik olmayan tencere ile bobinin eşdeğerendüktans değeri (H)
$R_{eşF}$	: Manyetik tencere ile bobinin eşdeğer direnç değeri (Ω)
$R_{eşNF}$	: Manyetik olmayan tencere ile bobinin eşdeğer direnç değeri (Ω)
C_F	: Manyetik tencere ısıtma anındaki rezonans kapasitesi (F)
C_{NF}	: Manyetik olmayan tencere ısıtma anındaki rezonans kapasitesi (F)
R_y	: Yük direnci (Ω)
Q	: Isı enerjisi (J)
m	: Isıtılan yükün kütlesi(g)

c	: Isıtılan yükün yapıldığı malzemenin öz ısısı(J/g°C)
ΔT	: İlk ve son sıcaklık arasındaki değişim(°C)
P_{su}	: Suda harcanan güç (W)
P_{Giriş}	: Giriş gücü (W)

MANYETİK OLMAYAN TENCERELERİ ISITABİLEN EV TİPİ ENDÜKSİYON OCAK UYGULAMASI

ÖZET

Endüksiyon ile ısıtma, diğer ısıtma sistemlerine göre, ısıtma işleminin oldukça kısa sürede olması, çevreye ısı dağılımının olmaması, yüksek verimli ve güvenli olması gibi birçok avantaja sahiptir. Bu avantajlarından dolayı ev tipi uygulamalarda endüksiyon ocaklar giderek yaygınlaşmaktadırlar.

Endüksiyon ocaklarının yaygınlaşmasını yavaşlatan en önemli kısıt ise mutfaklarda en çok kullanılan tencere tiplerinin endüksiyon ile uyumlu olmaması görülmektedir. Mevcut endüksiyon ocaklarda manyetik tabana sahip tencereler ısıtılabilir. Bu dezavantajı ortadan kaldırabilmek amacı ile bu tez kapsamında manyetik olmayan yani alüminyum ve bakır tabanlı tencereleri de ısıtabilen mutfak tipi endüksiyon ocak uygulaması ortaya konmuştur.

Sistem yarım köprü seri rezonans çevirici bir devreden oluşmaktadır. Anahtarlama frekansı ise 100 kHz'e kadar çıkabilmektedir. Kullanılan anahtarlama elemanı ise IGBT (Insulated Gate Bipolar Transistor) olarak seçilmiştir. Endüksiyon ocak uygulaması gömülü bir sistemden oluşmaktadır. Buna göre ilgili anahtarlama frekansını üretecek özelliğe sahip bir mikrodenetleyici seçilmiştir. Ancak sistemin daha hassas kontrolü için bir arayüz programı ile devre UART üzerinden bilgisayardan açık çevrim olarak kontrol edilmektedir.

A DOMESTIC INDUCTION COOKER WHICH CAN HEAT NON MAGNETIC PANS

SUMMARY

According to the other heating systems, induction heating has many advantages because of its short heating time, no distribution of heat around, its high efficiency and being reliable. Because of these advantages, induction cookers are increasing in household applications.

The only disadvantage of induction cookers is the pans which are not compatible with induction. The pans which have magnetic base are heated at current induction cooktops. In this thesis, an alternative application of induction cooker which can heat non magnetic pans such as aluminium, copper pans is developed for home cooking application.

In this thesis, a circuit which is half bridge series resonant inverter is developed. The switching frequencies of circuit can be increased at about 100 kHz. IGBT (Insulated Gate Bipolar Transistor) was chosen as switching element. Induction cooker system consists an embedded system. According to this, a microcontroller is chosen by generating the switching frequency. However, the system is being controlled with using a interface program in computer via the UART for controlling more precise.

1. GİRİŞ

Endüksiyon ısıtmanın temeli olan elektromanyetik endüksiyon 1831 yılında Michael Faraday tarafından bulunmuştur. Transformatörlerde, birincil ve ikincil sargıları arasında hiçbir elektriksel bağlantı yoktur ve Michael Faraday, birincil devresinde meydana gelen akım değişimi ile ikincil devresinde bir gerilim endüklenebileceği prensibini ortaya koyarak modern endüksiyon ile ısıtmanın kurucusu olmuştur. Buna göre metalik bir kütle sabit bir manyetik alan içinde hareket ettirilirse ya da değişen manyetik alan içinde bırakılırsa, üzerinde akımlar endüklenir. Endüklenen bu akım ile metal kütlenin direnci sonucunda oluşan kayıp enerji, metali ısıtır [1].

Endüksiyonla ısıtma tekniği endüstriyel uygulamalarda uzun yıllardan beri uygulanmaktadır. Ev uygulamalarında özellikle ocak uygulamalarında ise son 10 yıl içerisinde yaygınlaşmıştır. 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. Deri etkisinin belirlediği direnç ile oluşan ısı kayıp tencereyi ısıtır [2].

Enerji kavramının günümüzde giderek öneminin artmasıyla endüksiyonla ısıtma, mevcut ocak seçenekleri arasında özellikle verimi ve ısıtma hızı ile gelecek vaat eden bir teknoloji olarak göze çarpmaktadır. Ev tipi endüksiyon ocaklarda manyetik geçirgenliği yüksek, iletkenliği düşük tencerelerin kullanılma zorunluluğu vardır. Evlerde yaygınca kullanılan tencere tipleri göz önüne alındığında, bu durum endüksiyonun yaygınlaşmasını yavaşlatan önemli bir engel olarak görülmektedir.

1.1 Tezin Kapsamı

Bu tez kapsamında, enerji verimliliği yüksek olan endüksiyon ocaklarının kullanımını arttırmak için manyetik olmayan, yani iletkenliği yüksek manyetik geçirgenliği az olan tencereleri ısıtabilecek bir çalışma ortaya konulmuştur.

Endüksiyonla ısıtma kavramının tamamına hakim olabilmek adına, bu tez çalışmasında başlangıç olarak literatür araştırması ile endüksiyon ocak için gerekli temel kavramlar ve ilgili elektronik yapı hakkında bilgi verilmiştir. Manyetik özelliği olmayan tencereleri ısıtabilecek yöntemler tez kapsamında irdelenmiştir. Uygulanacak yöntemler belirlenip, elektronik devre tasarımı yapılmıştır.

Sistem yarım köprü seri rezonans çevirici bir devreden oluşmaktadır. Anahtarlama frekansı 100kHz'e kadar çıkabilmektedir. Kullanılan anahtarlama elemanı ise IGBT (Insulated Gate Bipolar Transistor) olarak seçilmiştir. Endüksiyon ocak uygulaması gömülü bir sistemden oluşmaktadır. Buna göre ilgili anahtarlama frekansını üretecek özelliğe sahip bir mikrodenetleyici seçilmiştir (Atmel firmasına ait AT90PWM3 mikrodenetleyici kullanılmıştır.). Bu mikrodenetleyici birbirinin tamamlayıcısı olan ölü zamanlı DGM ya da diğer bir deyişle PWM işareti üretebilmektedir.

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 veya 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.

Tez kapsamında uygulanacak devrenin kontrol yöntemi açık çevrim ve bilgisayar desteklidir. Visual C'de yapılan arayüz programı ile RS-232 seri port bağlantısı kullanılarak bilgisayar üzerinden elektronik devrenin kontrolü sağlanmaktadır. Bilgisayardan yapılan frekans ayarı ile işlemcinin kare dalga üretmesi sağlanmaktadır.

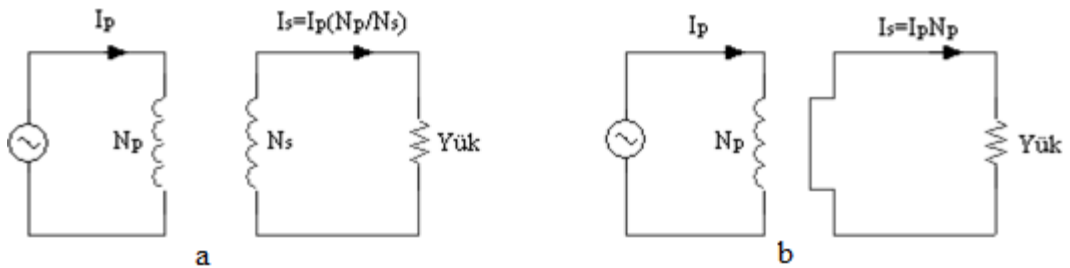
2. ENDÜKSİYON ISITMANIN TEMEL TEORİSİ

2.1 Temel Bilgiler

Endüksiyon ısıtmanın genel prensibi elektromanyetik enerjinin ısı enerjisi haline dönüştürülmesine dayanmaktadır. Elektriksel olarak iletken bir malzemenin değişken bir manyetik alan içine bırakılması ile malzeme üzerinde endüklenen gerilimlerin oluşturduğu girdap akımlarının meydana getirdiği ısıya endüksiyon yolu ile ısıtma adı verilmektedir.

Endüksiyon ile ısıtmanın temeli tanımından da anlaşılacağı gibi, değişken manyetik alan sonucu oluşan elektromanyetik endüksiyon, elektromanyetik endüksiyon sonucunda cisim üzerinde endüklenen gerilimlerin oluşturduğu girdap akımları, girdap akımlarının oluşturduğu deri etkisi ve bu akımların meydana getirdiği ısı cisim üzerinde dağılımını konu alan ısı transferi teorileri üzerine kurulmuştur. Bunun yanında histerezis kayıpları girdap akımlarının oluşturduğu kayıpların yanında çok küçük olduğu için ihmal edilirler.

Transformatör teorisi ve transformatör eşdeğer devresi kullanılarak bir endüksiyon ısıtma sistemi elde edilebilir. İki eşdeğer devre arasındaki tek fark endüksiyon ısıtma modelinde ikincil sargı olmayışıdır, bu görevi tenceretek sarımlık ikincil sargı gibi üstlenmektedir. Şekil 2.1 (b)'de görüldüğü gibi tencerenin öz direncinden oluşan ikincil sargı iç direnci, ideal transformatör eşdeğer devresinde gösterilen yük direnci yerini alacaktır [3].



Şekil 2.1 : (a) Transformatör eşdeğer devresi, (b) Endüksiyon ısıtma eşdeğer devresi [3].

I_p : Birincil akımı

I_s : İkincil akımı

N_p : Birincil sarım sayısı

N_s : İkincil sarım sayısı

Sonuç olarak, endüksiyon ile ısıtma, ısıtılacak cisim üzerinde elektromanyetik endüksiyonla meydana getirilen girdap akımları, bu akımların meydana getirdiği deri etkisi ve cisim üzerinde ısı transferinin oluşturulması sonucu meydana gelmektedir.

2.2 Elektromanyetik Endüksiyon

Bir iletken içinden akım geçirildiğinde iletken etrafında bir manyetik alan meydana gelir. İletken içinden geçirilen akım alternatif ise değişken bir manyetik alan meydana gelir.

Şekil 2.2’de görüldüğü gibi bobine alternatif bir akım uygulandığında amper kanununa göre etrafında değişken bir manyetik alan meydana gelir. Bobinin her bir sarımından geçen akımların oluşturduğu manyetik alan birbirine eklenerek manyetik alan güçlenir [3].

$$\int H dI = Ni = \theta \quad (2.1)$$

$$\phi = \mu HA \quad (2.2)$$

H : Manyetik alan

i : Akım

θ : Amper-sarım

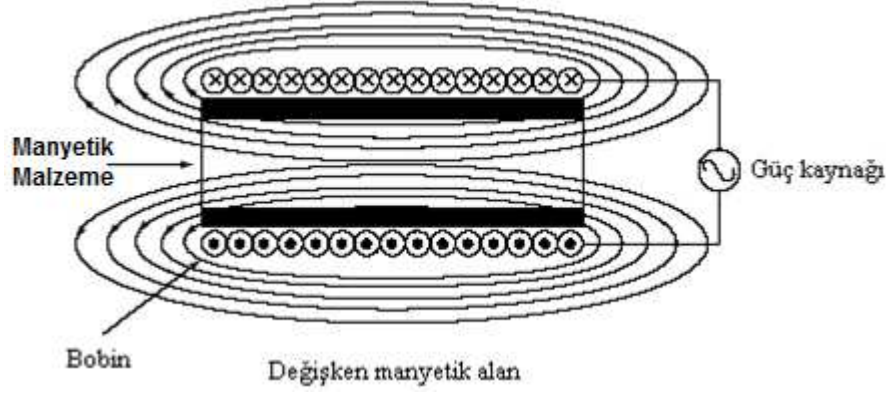
N : Sarım sayısı

ϕ : Manyetik akı

A : Yüzey alanı

μ : Manyetik geçirgenlik

Değişken manyetik alanın içinde kalan cisimde manyetik alanın yoğunluğu, frekansın etkisi ile yüzeyden merkezine doğru inildikçe azalır. Elektromanyetik endüksiyon ile cisim üzerinde oluşan girdap akımlarının meydana getirdiği ısı enerjisi, endüksiyon ile ısıtma işlemini sağlar.



Şekil 2.2 : Elektromanyetik endüksiyonun meydana gelişi [3].

2.2.1 Deri etkisi ve girdap akımları

Manyetik nüve malzemeleri kendi yapısı içerisinde iletken malzemeleri içerir. Bu durumda bu iletken malzemeler, nüve içinde dikey bir düzlem şeklinde manyetik akı yolunu oluşturan kısa devre edilmiş bir iletken gibi davranır. Yani iletken malzemeler içinde endüklenen gerilimle meydana gelen elektrik akımlarıdır. Girdap akımları endüksiyon ile ısıtma uygulaması dışında istenmeyen bir durumdur.

Transformatör nüvesi düşünüldüğünde, nüve üzerindeki akı iletimi ikincil sargılarını keserek, sargılar üzerinde bir gerilim endüklenmesine sebep olur ve ikincil sargılar üzerinde oluşan bu gerilim transformatörün çalışmasını sağlar. Bu akı iletimi ile ikincil sargılarında meydana getirilen akıma girdap akımı denilmektedir. Girdap akımlarının sonucunda ikincil sargının R direnci üzerinde ısı şeklinde I^2R kayıpları ortaya çıkar. Burada R direnci, deri etkisine bağlı olarak değişmektedir [3].

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

$$i_x = i_0 e^{-x/d_0} \quad d_0 = \sqrt{\frac{2\rho}{\mu\omega}} \quad (2.3)$$

i_x : Yüzeyden x kadar uzaklıktaki akım yoğunluğu;

i_0 : Girme derinliğinde akan akım yoğunluğu ($x = 0$);

d_0 : Frekans tarafından belirlenen bir sabit;

ρ : Özgül direnç;

μ : Cismin manyetik geçirgenliği;

ω : Cismin yüzeyinde akan akımın açısal frekansı.

2.3 Kullanım Alanları

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.

Endüksiyon ısıtma, ergitme, kaynak yapma, lehimleme, sıcak şekil verme amacı ile tavlama, yüzey sertleştirme, muhtelif ısı işlemler için tercihen kullanılır. Endüksiyon fırınları ile metallerin ergitilmesi, iş gücü ve hammadde de maliyet avantajı sağlar. Bu metotla alaşımların hazırlanması daha kolaydır ve üretim sonucu elde edilen ürünlerin kalitesi yüksektir [4,5].

Endüksiyon ısıtma teknikleri, güç kaynağı frekansları 50 Hz'den birkaç MHz'e kadar çıkabilen güç kaynağı frekansları ile çok çeşitli uygulama alanlarına sahip olmuşlardır [6].

Endüksiyon ile ısıtmada kullanılacak olan frekans, ısıtılacak olan parça üzerinde meydana getirdiği deri etkisi göz önünde bulundurularak uygulanacak işlemin türüne göre seçilmelidir.

Başlıca endüstri uygulamaları:

- **Isıl İşleme:** Diğer ısı işleme yöntemlerinden temel farkı, bölgesel olarak, ısı gücünün 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.

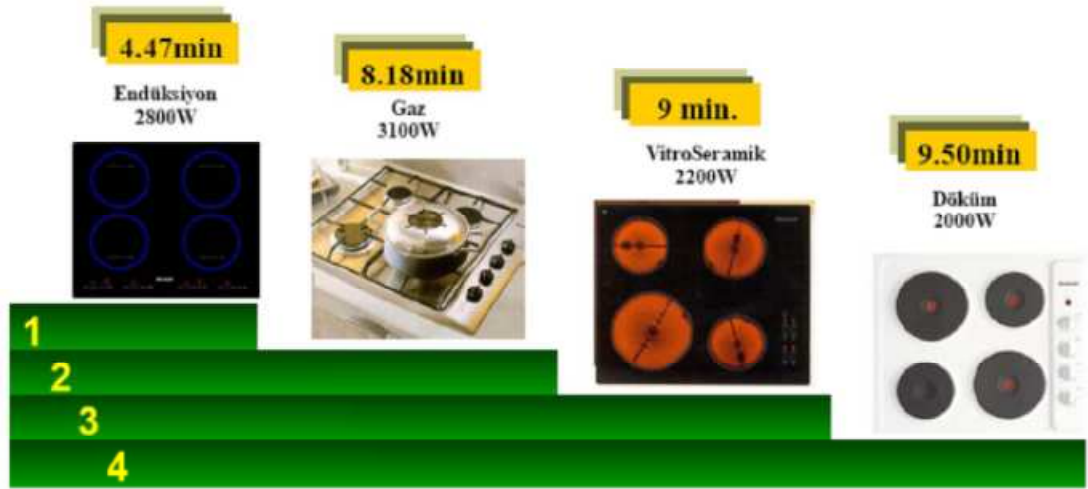
- **Araştırma ve Geliştirme:** Özellikle bölgesel ve hassas ısıtma gereken özel deneylerde kontrollü ısıtma özelliği ile tercih edilebilmektedir.
- **Sızdırmazlık:** Bu uygulamada alüminyum kapak, kutusu üzerine, ısıtıcı kaynağı kapak üzerine dokunmadan yapıştırılmaktadır. Özellikle ilaç kutuları ve 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 artırılır.
- **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. EV TİPİ ENDÜKSİYON OCAK TEKNOLOJİSİ

3.1 Olumlu Yönleri

3.1.1 Hızlı ısıtma

Endüksiyonla ısıtmanın en önemli yanı, konveksiyon yolu ile ısıtma yerine doğrudan tencerenin ısıtılmasıdır. Gazlı ısıtmada düşük eylemsizliğiyle doğrudan metali ısıtarak anlık, hızlı ısıtma özelliğine sahiptir. Bu sebeple kullanım alanı fazladır. Ancak endüksiyonun bu anlamda diğer bir ayırt edici özelliği ise çok düşük güçlerde, hassas ayarlama ile yavaş yavaş ısıtmayı sağlayabilmesidir. Şekil 3.1’de 2 litre suyun sıcaklığının 20°C’ den 95°C’ ye çıkması için belirlenen optimum güçlerde harcanan zamanlar gösterilmiştir. Endüksiyon ocaklar en yakın rakibi olan gazlı ocaklara göre %50 zaman tasarrufu sağlamaktadır [7].

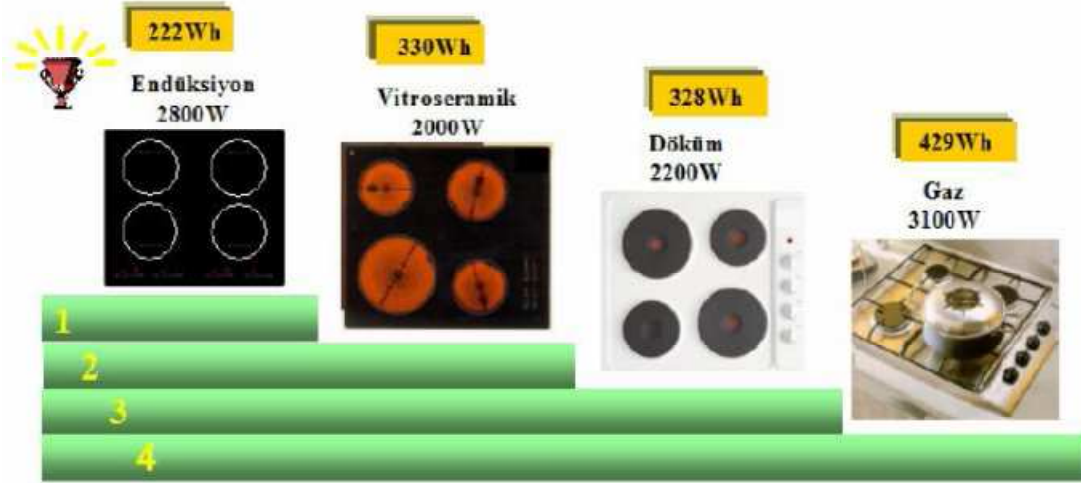


Şekil 3.1 : Isıtma yöntemlerinin ısıtma zamanı bakımından karşılaştırılması [7].

3.1.2 Kayıpsız ısıtma

Daha öncede bahsi geçtiği gibi endüksiyon ocaklarda ısı doğrudan tencereye aktarılır. Gaz, vitroseramik veya döküm diye adlandırılan elektrikli ısıtıcılarda ise enerji öncelikle ısı enerjisine çevrilir ve daha sonra ısıtılacak tencereye yönlendirilir. Ancak bu arada enerjinin önemli bir kısmı yüke aktarılmadan ortamı da 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 [7].



Şekil 3.2 : Isıtma yöntemlerinin harcadıkları enerji miktarı bakımından karşılaştırılması [7].

3.1.3 Güvenli ısıtma

Endüksiyonla ısıtma, genellikle manyetik özelliği olan metalleri ısıtmaktadır. Ocak yüzeyi, sadece tencere alt yüzeyinden iletilen ısı sebebi ile ısınacağından, çok daha soğuk, daha güvenli olacak ve yangın tehlikesi en aza indirilecektir. Şekil 3.3’ de ısıtıcı yüzey sıcaklığının 60°C ye düşmesi için geçen zaman değerleri gösterilmektedir [7].



Şekil 3.3 : Isıtma yöntemlerinde yüzeyin soğuma zamanları bakımından karşılaştırılması [7].

Çeşitli sensör uygulamaları ile endüksiyon ocaklarda taşma emniyeti sağlanabilmektedir. Ayrıca çocukların kullanımını önlemek için özel güvenlik donanım algoritmaları içermektedir.

3.2 Olumsuz Yönleri

3.2.1 Tencere ve tava uygunluğu

Daha önce de belirtildiği gibi endüksiyon ile ısıtma yapabilmek için metalin manyetik özellik taşıyan mıknatıslanmamış ferromanyetik malzeme özellikle paslanmaz çelik (belirli bir NiCr oranında) gibi malzemeye ihtiyaç duyulur. Bu açıdan tencere maliyeti ve uygun tencerenin bulunabilmesi açısından sıkıntı oluşturmaktadır.

Piyasada mevcut satılan endüksiyon ocaklarda bulunan bu olumsuzluk özellik bu proje kapsamında çalışılarak ortadan kaldırılmıştır. Şekil 3.4’de standart endüksiyon ocak ile tüm metal diye adlandırılan endüksiyon ocaklarda tencere ısıtılabilir durumu karşılaştırılmıştır [8].

	 FerroManyetik ÇELİK	 DökmeDemir ve Emaye	 NonFerro ÇELİK	 Teflon Kaplı Alüminyum	 Alüminyum	 Çok Katmanlı	 BAKIR
Standart OCAK	✓	Sınırlı	✗	✗	✗	✗	✗
All Metal OCAK	✓	✓	✓	✓	✓	✓	✓

Şekil 3.4 : Endüksiyon ocak türlerinde tencere tipi uygunluğu.

3.2.2 Yüksek güç ihtiyacı

Endüksiyon ocakları diğer ocak türlerine göre daha etkin ısıtma sağlamaktadır ve daha yüksek güçlere de çıkabilmektedir. Bunun önündeki engel ise çekilen elektrik enerjisinin evlerde anlık olarak belirli bir seviyenin üzerine çıkamamasıdır. Çekilecek güç evlerin tesisatından dolayı sınırlı kalmaktadır.

3.3 Endüksiyon Ocak Çalışma İlkesi

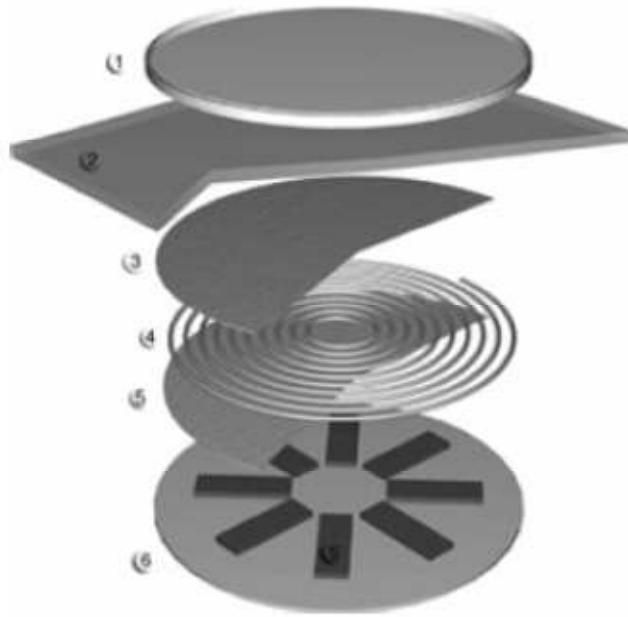
Başarılı bir endüksiyon ocak, verimli, ucuz maliyetli ve optimum dizayna sahip olmalıdır. Endüksiyon ocaktan beklenenler;

- Yüksek verim
- Düşük maliyet
- 1’ e yakın güç faktörü

- Geniş bir güç aralığı
- Güvenilirlik

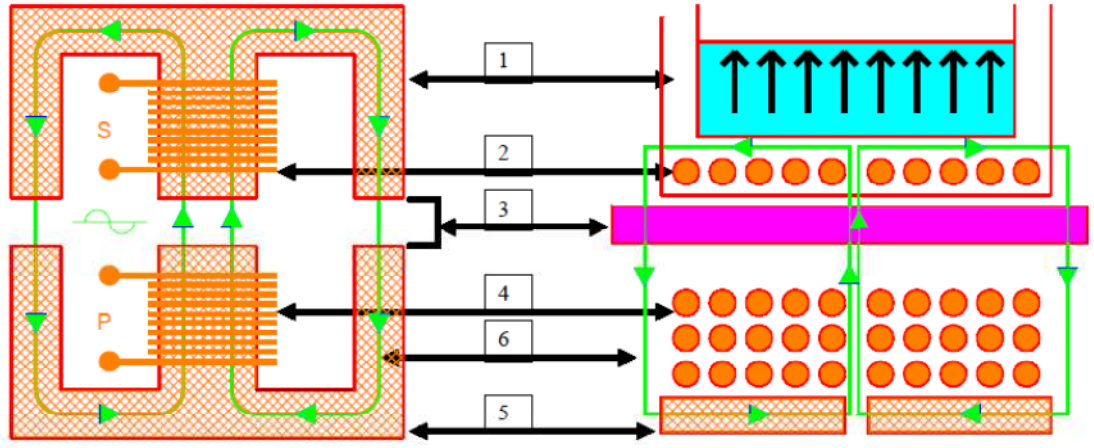
Endüksiyon ocaklarda, 20kHz ile 50kHz frekans aralığında çalışan rezonans çeviriciler kullanılır. Kullanılan bobinler, tencere alt yüzeyinde girdap akımlarının oluşmasını sağlayan değişken manyetik alan oluştururlar. Kötü bir iletken olması koşulu ile tencerede oluşan kayıplar sayesinde tencere ısınır.

Endüksiyon ocak tencere ve bobin yapısı kabaca Şekil 3.5’de gösterildiği gibidir. Yük olarak manyetik özelliği olan tencere (1), hava aralığı vitroseramik yüzey (2), yüksek gerilim ve sıcaklık izolasyonu sağlayan mika ve cam yünü (3), sargılar (4) ve manyetik devreyi tamamlayan akıyı taşıyan ferit nüveler (5) endüksiyon ocaklardaki en önemli yapıyı oluştururlar [9].



Şekil 3.5 : Endüksiyon ocak bobin yapısı [9].

Endüksiyon ocağı Şekil 3.6’da gösterildiği gibi transformatöre benzetilebilir. Bu sistemde tencere transformatörün nüvesinin ikincil kısmını, akı yolunu tamamlaması ve ekranlama görevi için konulan ferit nüveler transformatör nüvelerinin birincil kısmını oluşturmaktadır. Transformatördeki hava aralığı endüksiyon ocağında da tencere ile bobin arasındaki mesafe olarak algılanabilir ki bu hava aralığı genelde camdır. Transformatörün birincil sargısı bobinin kendisi iken ikincili tencere üzerinde endüklenecek olan akımlar dolayısıyla tencere yüzeyidir.



Şekil 3.6 : Endüksiyon ocak transformator benzetimi [16].

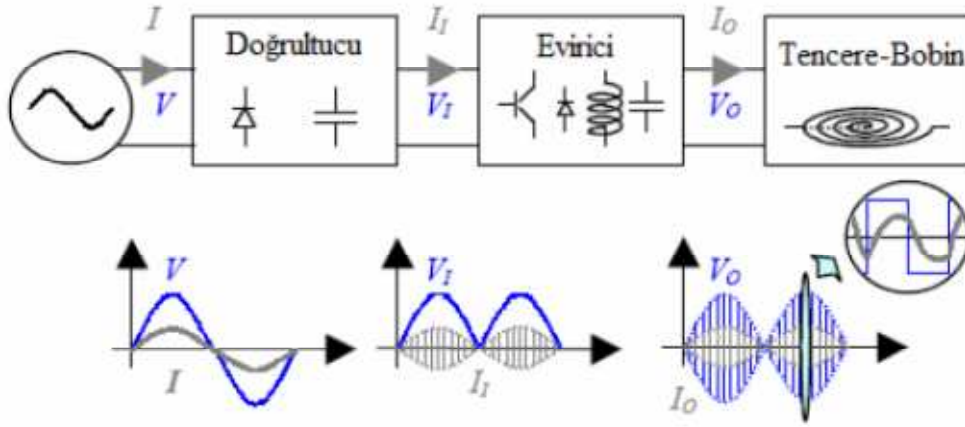
Transformatörün ikincil tarafı kısa devre edilirse, ikincil tarafta akımın çok fazla artmasından dolayı ısı kaybı da artacaktır. Bu sistemde birincil taraf çok sarımlı iken ikincil taraf tek sarımlıdır. Endüksiyon bobinin sargısı ile (birincil sargı), yük (ikincil sargı) arasında oldukça küçük bir hava aralığı bulunur. Geleneksel transformator yapısında birincil sargının (4) yerini, endüksiyonda bobinin kendisi alır. Yüksek frekanslı akımın bobine uygulanması ile, 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. Transformörde ferit yada 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. Elektrik devrelerinde akımın akışına karşı elektriksel direnç etkisi, manyetik akımın kapalı çevrimden aktığı yolun manyetik direncini kapsar. Transformörde hava aralığı (3), endüksiyon sisteminde bobin ile tencere arasındaki mesafe alır. Endüksiyonla ısıtmada temel amaç ısı transferini maksimize etmek olduğu için hava aralığı olabildiği kadar küçük tutulur ve yükün düşük dirençli-yüksek manyetik geçirgenliğe sahip olması istenir [10].

3.4 Endüksiyon Ocak Elektroniği

Endüksiyonla ısıtmanın gerçekleşebilmesi için endüksiyon bobininin yüksek frekanslı ve sinüs biçimli akımlar ile uyarılması gerekmektedir.

Şekil 3.7' de gösterildiği gibi şebeke gerilimi doğrultulduktan sonra çevirici yapısı,

endüksiyon bobinini anahtarlama frekansına bağlı olarak yüksek frekanslı akım ile besler.



Şekil 3.7 : Endüksiyon ocak yapısı.

Endüksiyon ocak devrelerinde, darbe genişlik modülasyon tekniği DGM (Pulse Width Modulation-PWM) kullanılarak DC gerilimden sinüs modülasyonu ile yüksek frekanslı sinüse benzer akım elde edilir. Bütün DGM'li DC/DC ve DC/AC çeviricilerde 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 olurlar.

Frekansın artması anahtarlama kayıplarının da artmasına neden olacağından verimi düşürür. Anahtar üzerindeki kayıplar, anahtara paralel bir bastırma devresi konularak azaltılabilir. Ancak devredeki toplam kayıp değişmez. Yüksek frekansta enerji aktarımında maksimum verimin elde edilebilmesi için gerilimin veya akımın sıfır geçiş noktasında 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 anahtarlama anahtar iletime geçmeden hemen önce anahtar üzerindeki gerilim sıfıra çekilerek iletim zamanı kaybı sıfıra indirilir. Sıfır akım anahtarlama 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 çevirici” adını alır.

Genel olarak yarı iletkenli anahtarlama devreler zorlamalı anahtarlama modunda (Hard Switch Mode) çalışırlar. Bu modda anahtar, belirli bir miktar akım, belirli bir

miktar gerilim altında açılır ve kapanır. Bu nedenle anahtarlama kayıpları oluşur. Frekans ne kadar yüksek ise anahtarlama kayıpları da o kadar yüksek olur. Anahtarlama aynı zamanda, yüksek di/dt ve dv/dt 'lerden dolayı, EMI problemlerine de sebep olur.

Bu amaçla endüktans ve kondansatörün kare dalga uyarıma verdiği sinüs akım cevabı kullanılarak, anahtarlama yük tarafında değil rezonans devrede gerçekleştirilir. Sinüs biçimli akım ve gerilimin sıfırdan geçtiği anlarda da anahtarlama gerçekleştirilir. Bu ilkedен hareketle rezonans çeviriciler türemiştir. Sıfır akım anahtarlama, devrenin tüm endüktansı rezonans devre tarafından emilir. Böylece kesim anında yüksek gerilimlerin oluşması engellenir. Fakat devrenin ilettime geçmesi anında devredeki kapasitörün boşalmasıyla ortaya çıkan yüksek gerilimler engellenemez. Bu durum anahtarlama kaybına yol açar. Sıfır gerilim anahtarlama devredeki tüm endüktans ve kapasitelerin rezonans devresi tarafından emilmesinden dolayı sıfır akım anahtarlama ektra kayıp yoktur. Sıfır gerilim anahtarlamanın bu avantajı, kesim (endüktansdan dolayı) ve iletim (kapasitörden dolayı) anındaki aşırı akım yükselmelerini engeller. Sıfır gerilim anahtarlama daha düşük anahtarlama kaybını sağlarken aynı zamanda yüksek frekanslarda EMI problemini de düşürür. Bu farklar, sıfır gerilim anahtarlamanın sıfır akım anahtarlama göre daha tercih edilir olduğunu gösterir.

3.4.1 Rezonans çeviriciler

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

Rezonans çevirici anahtarlama kayıplarını en aza indirerek enerji dönüşümünü sağladığı için günümüzde endüstrinin çeşitli alanlarında kullanılmaktadır. Bu durum endüksiyonla ısıtmada neden rezonans çeviricilerin kullanıldığını da açıklamaktadır. Rezonans sisteminin temeli aslında basit bir ilkeye dayanır. Herhangi bir akım yada 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.

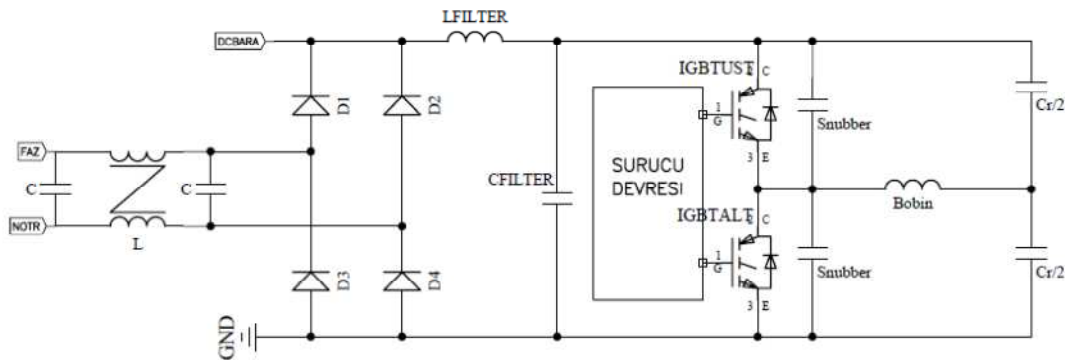
Rezonans frekansında ise tam bir güç transferi gerçekleştirilir ve maksimum güç aktarılır. Bir başka deyişle maksimum güç akışının gerçekleştirildiği nokta rezonans frekansıdır.

Endüktans, kondansatör ve anahtarlama elemanının sayı ve bağlanma şekline göre rezonans çeviriciler çeşitlere ayrılırlar. Temelde endüktans ve kondansatörün paralel ve seri bağlanmasının sonucu olarak paralel, seri veya seri-paralel rezonans çeviri olmak üzere üç tip tanımlanabilir. Aşağıdaki ayrıtlarda paralel ve seri rezonans yapıların temel çalışma ilkelerinden bahsedilecektir. Tez kapsamında uygulanacak devre olan yarım köprü seri rezonans devresi, daha kapsamlı olarak ele alınacaktır.

3.4.1.1 Yarım köprü seri rezonans çevirici

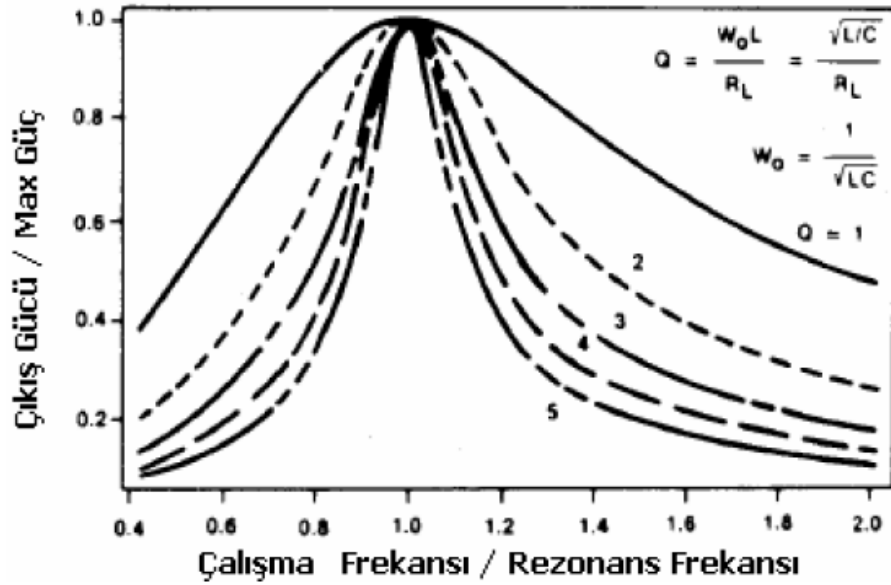
Devrenin temel mantığı endüksiyon bobinine yüksek frekanslı kare dalga uygulanmasıyla bobinin sahip olduğu endüktans ile DC baraya yerleştirilen kondansatörlerin seri rezonansa girerek sinüs biçimli akım oluşturulmasına dayanmaktadır. Tam rezonans frekansında anahtar sıfır akım veya sıfır gerilimde anahtarlama yapmaktadır. Ancak gücün sabit olmayıp değiştirilmesi gerekeceğinden devre rezonans frekansının altında ya da üzerinde çalışacaktır. Endüksiyon uygulaması için rezonans frekansının üzerinde çalışması kayıpların en az olması açısından daha anlamlı olmaktadır. Şekil 3.8’ de yarım köprü seri rezonans endüksiyon devresi ve bu yapıyı oluşturan komponentler gösterilmektedir.

Şebeke gerilimi, EMC filtre katından geçtikten sonra doğrultucu ile tam dalga doğrultularak, Rezonans Çevirici için gerilim kaynağı oluşturulur. Bu gerilim, üst ve alt IGBT ile DC bara bobin ve rezonans kondansatörüne uygulanarak rezonans sistem oluşturulur.



Şekil 3.8 : Yarım köprü seri rezonans endüksiyon devresi temel yapısı.

Çeşitli makale ve çalışmalarda seri rezonans devrelerin karakteristikleri çıkarılmıştır. Şekil 3.9’ da seri rezonans devrede güç kontrol karakteristiği gösterilmektedir [11].



Şekil 3.9 : Çalışma frekansına bağlı olarak güç kontrol karakteristiği [11].

Sistemin rezonans frekansı,

$$\omega = \frac{1}{\sqrt{LC}} \quad (3.1)$$

olarak tanımlanır. Bu ise endüktans ve kondansatör empedanslarının birbirine eşit olduğu, diğer bir deyimle maksimum gücün aktarıldığı frekansa karşılık gelir.

Rezonans sisteminde bir diğer önemli kavram ise yük faktörüdür (Quality Factor).

$$Q = \frac{\omega L}{R_{es}} \quad (3.2)$$

Yüke aktarılan enerji ile kayıp enerji arasındaki oranını ifade eder. Şekil 3.9’da görüleceği gibi bu değişkene bağlı olarak anahtarlama frekansı değişimi ile yüke güç aktarım karakteristiği değişir. Endüksiyon sisteminde yük direnci arttıkça Q değeri azalır. Bu yüzden frekans değişimi ile güç daha az değişmektedir. Dolayısı ile tencere ısındıkça direnç artışı dolayısı ile sabit frekansta güç nerede ise değişmemektedir. Bu anlamda endüksiyonla ısıtma için manyetik tencelerin ısıtılması uygun görünmektedir. Eğrilerden çıkan bir diğer sonuç da yük azaldıkça IGBT’ler üzerindeki akımın azalmasıdır.

Direnç endüktansa göre küçülmeye başladıkça, kaynak frekansı rezonans frekansına yaklaşırken frekans eğrisi dikleşir ve Q büyür.

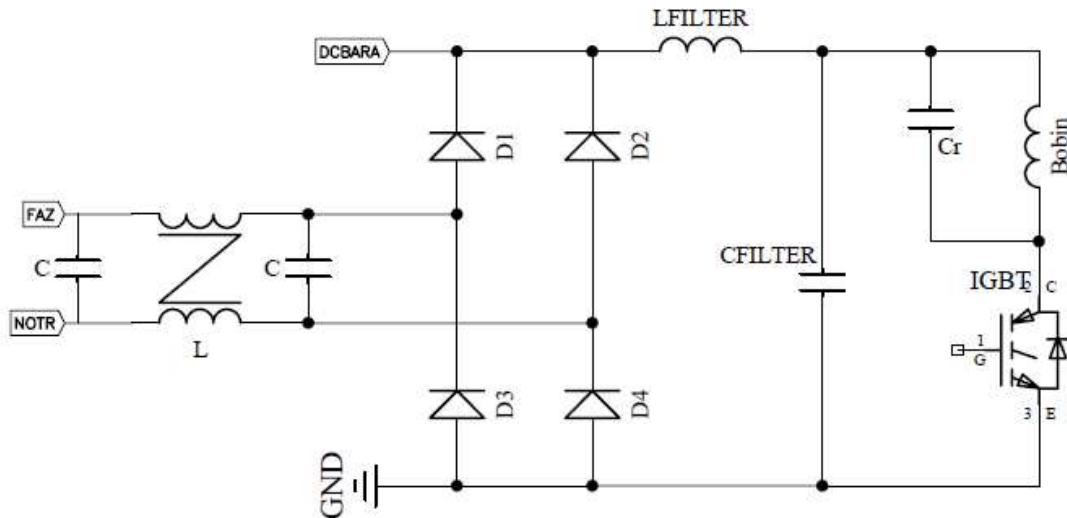
Formüldeki pay rezonans boyunca endüktansta depo edilen enerji, payda ise her bir periyotta direnç üzerinde kaybolan enerjinin ortalama değeridir.

Anahtarlama frekansının rezonans frekansından daha düşük olduğu bölgede, endüktif reaktans ile anahtarlama frekansı arasında doğrudan bir ilişki vardır. Başka bir deyişle, frekans düştükçe endüktif reaktans da düşer. Kapasitif reaktans ile frekans ilişkisi ise ters orantılı olduğundan anahtarlama frekansı düştükçe reaktans daha kapasitif olur ve akım seviyesi gerilim seviyesini geçer. Anahtarlama frekansı arttıkça ise empedans artar, çıkış gücü artar. Daha düşük anahtarlama frekansı daha küçük empedansa yol açar; çıkış gücünü düşürür.

Anahtarlama frekansının rezonans frekansından daha büyük olduğu bölgede, anahtarlama frekansı arttıkça endüktif reaktans artar, kapasitif reaktans azalır. Daha yüksek endüktif reaktans, akımın gerilimden daha düşük olmasına yol açar. Bu durumda, daha yüksek anahtarlama frekansı çıkış gücünü düşürür. Anahtarlama frekansı düşerken empedans azalır, çıkış gücü artar.

3.4.1.2 Tek anahtarlı paralel rezonans çevirici

Yarım köprü seri rezonans çeviriciden farklı olarak rezonans kondansatörü yükü paralel bağlanmış ve tek anahtar kullanılabilir (Bkz Şekil 3.10). Güç devresi doğrultulmuş DC gerilim ile beslenir. AC gerilimin doğrultulması için tam dalga doğrultucu kullanılır.



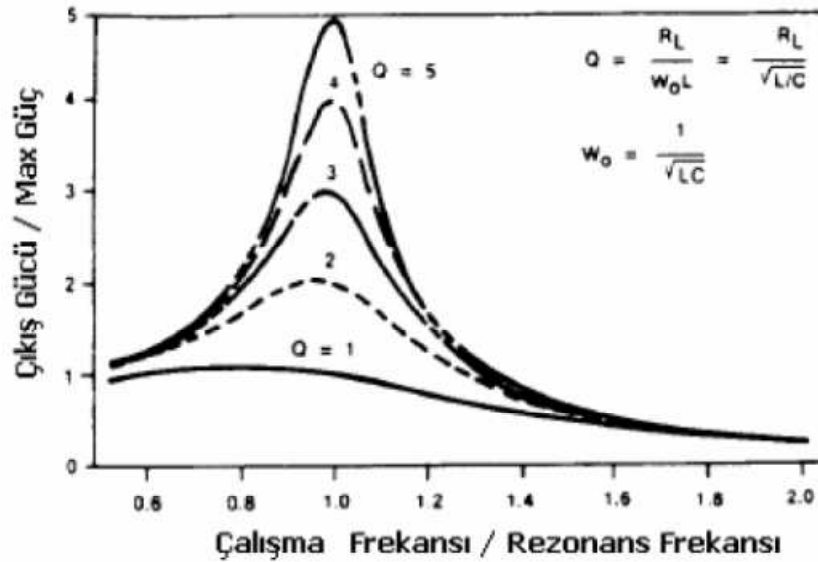
Şekil 3.10 : Tek anahtarlı paralel rezonans çevirici devre şeması.

DC barada kullanılacak kondansatörün büyüklüğüne göre DC bara gerilimi süzölmüş bir DC gerilim olabileceği gibi, yarım periyotların sıralanmasından oluşan ve saf DC

olmayan bir gerilim de olabilir. Eğer DC bara gerilimi süzölmüş saf DC gerilim olarak teşkil edilirse, endüksiyon bobininden ve IGBT’den her anahtarlama çevriminde tepe değeri sabit bir akım akar. DC bara gerilimi sadece doğrultulmuş AC gerilim yarım dalga şekillerinden oluşturulmuş ise her anahtarlama çevriminde bobinden ve IGBT’den akacak akımın genliği şebeke geriliminin genlik zarfını takip edecek ve şebeke geriliminin anlık değeri ile orantılı olacaktır. Anahtarlama frekansı (20kHz...50kHz) şebeke frekansına (50..60Hz) göre çok yüksek olduğundan her bir anahtarlama çevrimi için şebeke gerilimi sabit kabul edilebilir. Dolayısı ile DC bara gerilimi modelleme açısından sabit bir DC kaynak gibi modellenebilir.

Şekil 3.11’de paralel rezonans karakteristik eğrisi görölmektedir. Bu eğrilerden çıkış gücünün, yüksüz durumda iken rezonans frekansının üzerinde çalışarak kontrol edilebilir olduğu anlaşılmaktadır. Rezonans frekansında çıkış gücü yükün bir fonksiyonudur [11].

Bu devrenin temel dezavantajı akımın IGBT’ler ile taşınması ve rezonans elemanlarının yükten bağımsız olmasıdır. Akım girişteki gerilimin tepe değerine ve frekansına bağlıdır. Yük direnci arttığında, çalışma frekansı gücü ayarlamak için artar ancak giriş akımı sabit kalır. Bu yüzden IGBT ve reaktif elemanlardaki iletim kayıpları sabit kalır.



Şekil 3.11 : Paralel rezonans karakteristik eğrisi [11].

Tek anahtarlı yapı yukarıda açıklanan nedenlerden dolayı değişken güç uygulamaları için uygun değildir. Alüminyum gibi manyetik olmayan tencerelerin ısıtılmasında da kullanılabilecek bir devre topolojisi değildir.

4. ENDÜKSİYON OCAKLARDA MANYETİK ÖZELLİĞİ OLMAYAN TENCERELERİ ISITMA YÖNTEMLERİ

4.1 Temel Bilgiler

Endüksiyon ocaklarda ısıtılacak malzemelerin elektriksel direncinin ve manyetik geçirgenliğinin büyük olması gerekmektedir. Örneğin bakır ve alüminyum gibi manyetik olmayan tencereler bu özellikleri sağlamamaktadır. Bu yüzden mevcut endüksiyon ocaklarda bu malzemeler ısıtılamamaktadır. Endüksiyon ocaklarda kullanılabilecek malzemelerin teknik özellikleri Çizelge 4.1’de verilmiştir.

Çizelge 4.1 : Metal malzemelerin özellikleri.

Metal Malzeme	Demir	432 tip Çelik	Alüminyum	Bakır
Özdirenç (Ohm.m)	9.8×10^{-8}	60×10^{-8}	2.8×10^{-8}	1.7×10^{-8}
Bağlı Manyetik Geçirgenlik	100	100	1	1
Deri Etkisi δ (mm) @20kHz	0.11	0.28	0.6	0.46
Yüzey Direnci R_s (Ohm)	8.8×10^{-4}	22×10^{-4}	0.47×10^{-4}	0.37×10^{-4}

Çizelge 4.1’ de de görüldüğü gibi alüminyum ile çelik tencerenin yüzey direnci ve bağlı manyetik geçirgenlikleri arasında çok büyük farklar vardır.

Akımın f frekansında akabileceği en büyük derinlik ya da kullanabileceği maksimum kesit derinliği deri etkisi olarak bilinir. Deri etkisi **(4.1)** ile hesaplanabilir.

$$\delta = \sqrt{\frac{1}{4 \cdot \pi^2 \cdot 10^{-7}}} \cdot \sqrt{\frac{\rho}{f \cdot \mu_r}} \quad (4.1)$$

ρ : özgül direnç;

f: frekans;

μ_r : bağlı manyetik geçirgenlik.

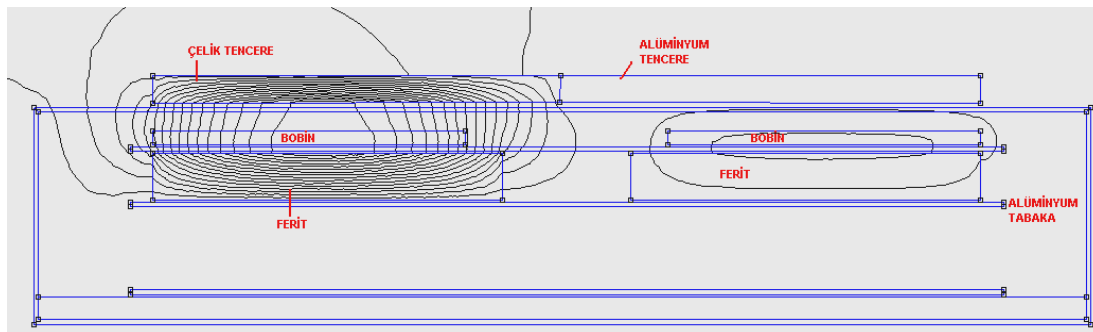
(4.1)'de görüleceği üzere manyetik özelliği nispeten daha kötü olan metallere istenen gücün aktarılabilmesi için etkin direncin dolayısı ile alan frekansının yükseltilmesi gerekmektedir. Çizelge 4.2'de bazı metallerin değişken frekanslarda endüklenen akımların girme derinlikleri verilmiştir.

Çizelge 4.2 : Çeşitli metallerin değişken frekanslarda endüklenen akımın girme derinliği(mm).

METAL CİNSİ	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	0.04	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 20kHz..50kHz aralığındadır. Bu anlamda yeterli girme derinliğinin ($\sim 35\mu\text{m}$) oluşturulması anlamında demir, çelik ve nikel gibi malzemeler endüksiyon uygulamalarında tercih edilirler. Alüminyum ve bakır gibi metallere bu frekans aralığında girme derinliklerinin yüksek olması sebebi ile sınırlı miktarda güç aktarılabilir. İstenen gücün aktarılabilmesi için ise 450kHz mertebesinde frekanslara çıkmak gerekmektedir. Ev tipi endüksiyon ocaklarda ise bu kadar yüksek frekanslara çıkmak mümkün değildir.

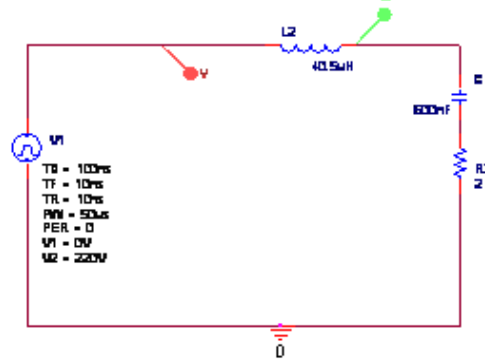
Sonlu elemanlar yöntemi kullanılarak (FEM) yapılan analizde ise çelik tencere ile alüminyum tencere üzerindeki manyetik alan dağılımı Şekil 4.1' de gösterilmiştir.



Şekil 4.1 : Çelik ve alüminyum tencerelerdeki manyetik alan dağılımı [21].

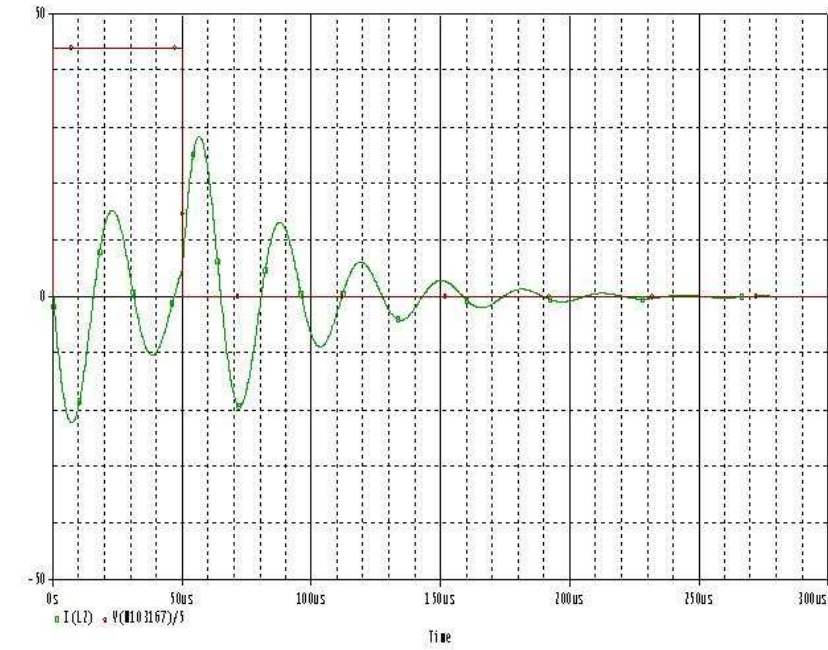
Şekil 4.2' de basit bir seri RLC devresiyle alüminyum tipi manyetik olmayan tencereler ile manyetik özelliği olan çelik tencereler arasındaki farklılıklar gösterilebilir.

Belirli frekanslarda seri RLC devresi doğrultulmuş gerilim ile aralıklı olarak beslenir ve rezonans olayı gerçekleştirilir. Seri RLC devresinin endüktansı ve direnci, bobin ile birlikte tencerenin oluşturduğu sisteme eşdeğerdir. Kapasite ise rezonansın gerçekleştirilmesi amacıyla devreye eklenen bir elemandır.



Şekil 4.2 : Basit RLC devresi [21].

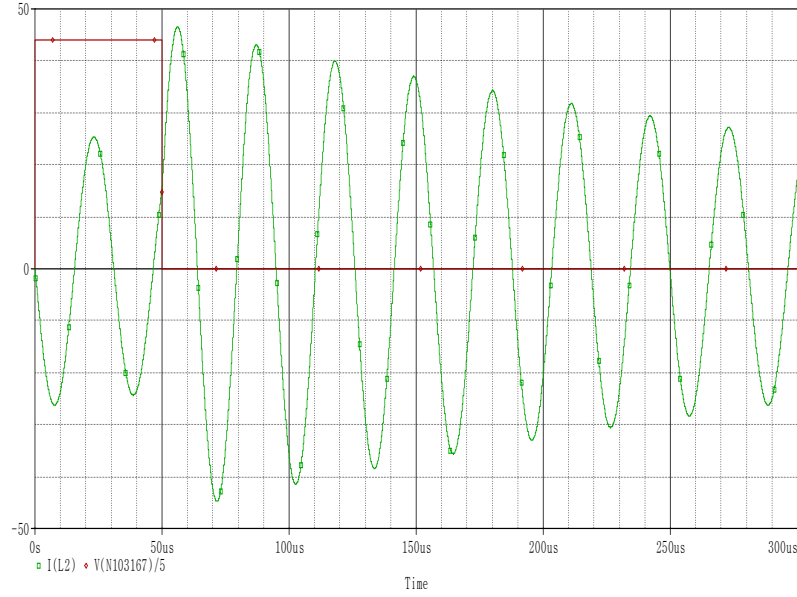
Belli bir frekansta devreye uygulanan akımın genliği ve sönümlenme süresi direnç ile belirlenir. Rezonans anında $X_L = X_C$ olduğundan kayıplar sadece dirençte olmaktadır. Manyetik tencerelerde olduğu gibi direnç büyük olursa akımın genliği düşük ve sönümlenmesi çabuk olur. Direncin küçük olduğu durum ise alüminyum tencerenin ısıtıldığı durumu sembolize etmektedir.



Şekil 4.3 : Çelik tencere durumunda RLC devresi akım grafiği [21].

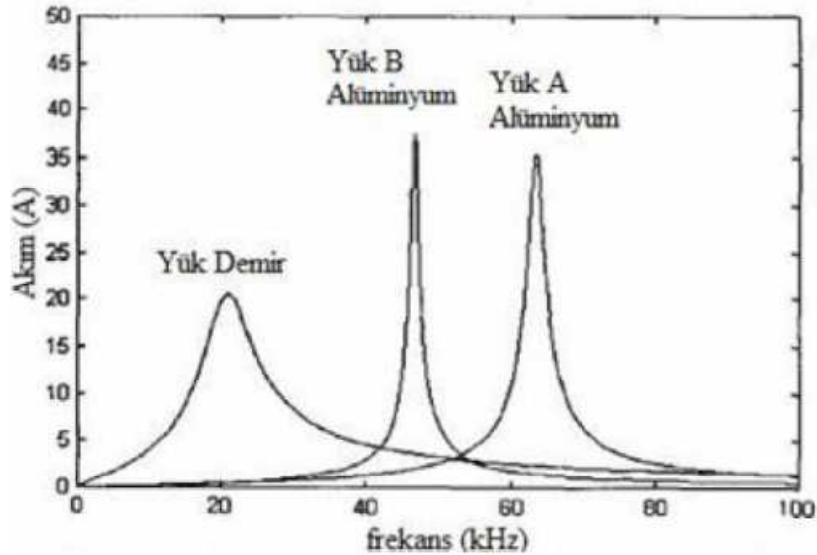
Şekil 4.4' den anlaşılacağı üzere manyetik olmayan tencereleri ısıtabilmek için yüksek akım kapasitesine sahip anahtarlama elemanları kullanmak gerekmektedir.

Ancak yüksek frekanslarda yüksek akımlarda anahtarlama yapabilecek IGBT teknolojisi bulunmamaktadır.



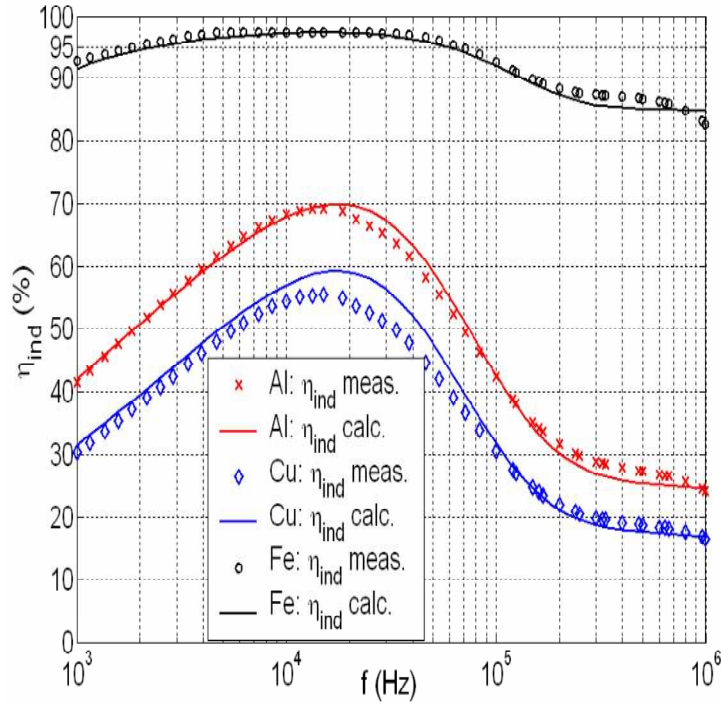
Şekil 4.4 : Manyetik olmayan tencere durumunda RLC devresi akım grafiği [21].

Çelik gibi manyetik malzeme ile alüminyum gibi manyetik olmayan malzemelerin Şekil 4.5’de gösterildiği gibi rezonans eğrileri karşılaştırılacak olursa alüminyumunki çok daha keskindir. Ufak frekans değişimlerinde güç ani artışlar gösterebilmektedir. Hassas frekans ayarı yapılarak güç kontrolü yapmak gerekmektedir. Burada yük A 22 cm ve yük B 10 cm çapındaki alüminyum tencerelerdir [12].



Şekil 4.5 : Ferromanyetik tencere ve alüminyum tencerenin rezonans eğrileri [12].

Yapılan patent ve makale araştırmalarında görülmüştür ki, mevcut endüksiyon ocaklarda manyetik tencerelerde verim %85-%90 arasında değişirken, şekil 4.6'da da görüldüğü gibi alüminyum gibi manyetik olmayan tencerelerde verim maksimum %70 olmaktadır [13].



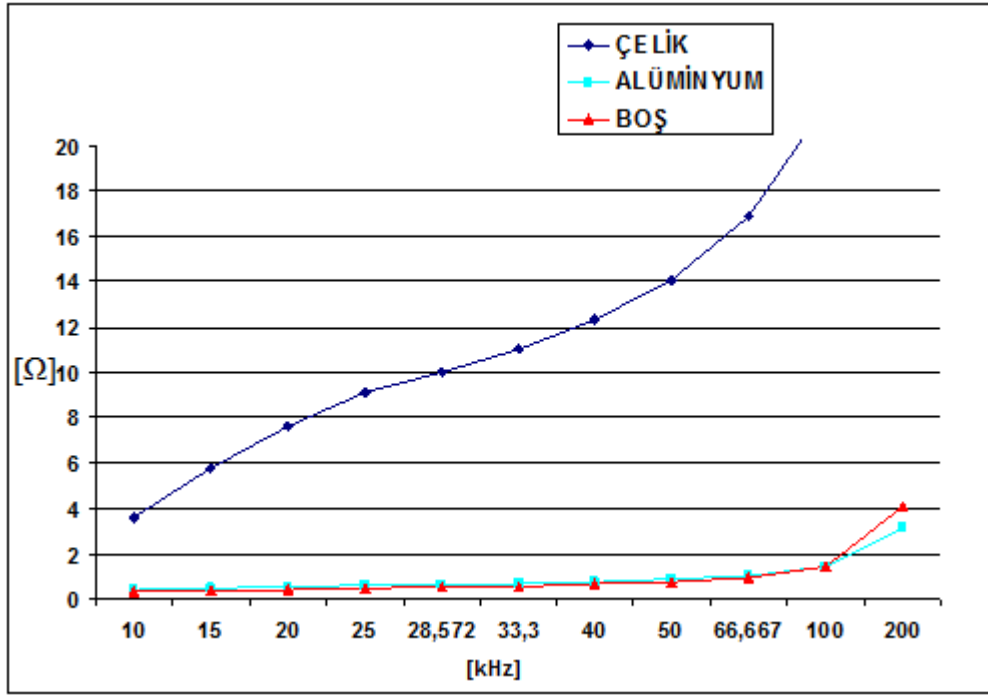
şekil 4.6 : Farklı malzemelerin frekansa göre verim eğrisi [13].

Yukarıda anlatılmaya çalışılan nedenlerden dolayı ferromanyetik olmayan ve iyi iletken malzemeleri ısıtmak amacıyla yeni bir tasarım gerekmektedir. Bu amaçla dünya üzerinde yapılan çeşitli çalışmalar mevcuttur. Bu çalışmalardan elde edilen bilgilere göre aşağıda verilen yöntemler ile manyetik olmayan tencereleri ev tipi endüksiyon ocaklarda ısıtmak mümkün gözükmektedir.

4.1.1 Frekans ayarı

(4.1)'e göre frekans artırılarak deri etkisi azaltılabilir. Deri etkisinin az olması direncin yüksek olması demektir ve bu yüzden kayıplar da artmaktadır. Görünen tencere direnci frekansın karekökü ile artmaktadır. Direncin artması ile de akım sınırlandırılabilir. Frekansın artmasının getirdiğ  bir takım dezavantajlar söz konusudur. Frekans artırıldığında, g   elektroniğ  devresi daha karmaşık olacaktır.

şekil 4.7'de RLC metre ile bobin üzerine konulan farklı tip malzemeye sahip tencerelerin direnç değerleri frekansa göre karşılaştırılmıştır.



Şekil 4.7 : Farklı malzemelerin frekansa göre direnç grafiği.

Grafikten de anlaşılacağı üzere alüminyum tencere ile okunan bobin direnç değeri hemen hemen bobinin boş durumdaki direnç değeri ile aynıdır. Manyetik çelik tencereye göre frekans arttıkça, alüminyum gibi tencerelerde sistemde görünen direncin artışı çok azdır. Bu yüzden sadece rezonans frekansı ile anahtarlama frekansı artırılarak dirençte bir artış beklemek yetersiz olacaktır.

4.1.1.1 Frekans sürme tekniği

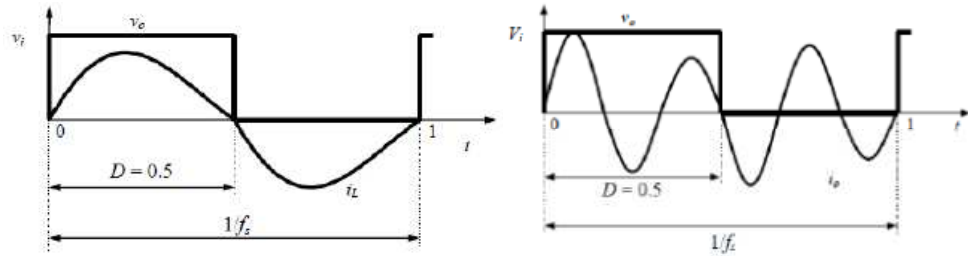
Yarım köprü seri rezonans devresinde 0 ile +V_i arasında değişen ω açısal frekansında bir kare dalgaının harmonikleri;

$$V(t) = \frac{V_i}{2} + 2 \frac{V_i}{\pi} \left[\sin(\omega t) + \frac{1}{3} \sin(3\omega t) + \frac{1}{5} \sin(5\omega t) + \dots \right] \quad (4.2)$$

şeklinde sonsuz sayıda sinüsün birleşimi vardır. Kare dalgaının rezonans frekansına yakın bileşenleri için düşük empedans, diğerleri için yüksek empedans olarak davranır. Kare dalgaının 1. harmoniği rezonans frekansında, teorik olarak L ve C'nin empedansları birbirlerini iptal eder. Kaynağın tüm gücü dirence aktarılır, akımı R (direnç) belirler ve sınırlar. Rezonans anında L ve C nin üzerindeki akım ve voltajlar maksimumdur. 3. harmonik çalışma modu, rezonans frekansının 1/3'ü frekansta yarı iletken anahtarları tetikleyerek gerçekleşir.

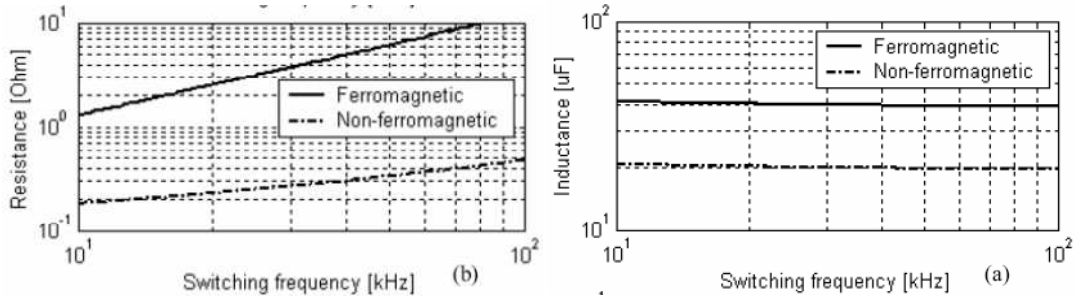
Şekil 4.8'de anahtarlama elamanı olan IGBT'nin anahtarlama işareti ile kollektör ve

emiter arasından geçen akımın 1. ve 3. harmonik şekilleri verilmiştir.



Şekil 4.8 : Aynı kapı işareti için akımın 1.ve 3. harmonik dalga şekilleri [14].

Bu konu ile ilgili yapılan çalışmada kullanılan bobinde endüktans değerleri alüminyum ve çelik tencere durumlarında karşılaştırıldığında yarı yarıya bir fark görülmektedir. Bu durum Şekil 4.9'daki grafiklerde görünmektedir. Direnç değerlerine bakıldığında ise 10 kat bir fark görülmektedir [14].



Şekil 4.9 : Ferromanyetik olan ve olmayan malzemelerin frekansa göre direnç ve endüktans değerleri [14].

$$L_{e\dot{s}F} = 2L_{e\dot{s}NF}$$

$$R_{e\dot{s}F} = 10R_{e\dot{s}NF} \quad (4.3)$$

Uygulamaya göre anahtarlama frekansı 23kHz'de kalırken tencere üzerinde akan akımın (girdap akımları) 69kHz'de kalması öngörülmüştür. Endüktans değeri yarıya inerken rezonans frekansını 23kHz'den 69kHz'e çıkarılmıştır. Bu amaçla bazı röleler kullanılmış ve böylelikle kapasite değerleri değiştirilerek rezonans frekansı 69kHz'e getirilmiştir. Rezonans frekansı ayarlamak için yapılan kapasite değişimi (4.4) ile hesaplanır.

$$C_{NF} = \frac{L_{e\dot{s}F}/L_{e\dot{s}NF}}{9} \times C_F \quad (4.4)$$

Anlatılan çalışma sonucu makalede bobin akımı değerlerinin rms olarak 70A ve tepe değeri olarak 133A olduğu söylenmiştir.

4.1.2 Bobin sarım sayısını arttırmak

Sargı uçlarından sistemin gördüğü direnci artırmanın bir başka yolu da bobinin sarım sayısını arttırmaktır. Böylece oluşturulan akı da artacaktır. Bunun sonucu olarak histerezis kayıpları ve girdap akımının genliği büyüyecektir.

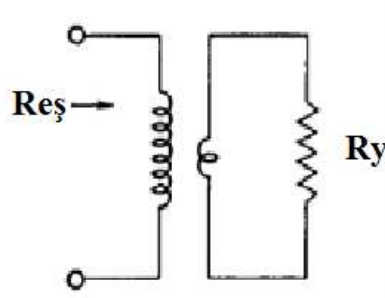
Sarım sayısı artırılarak birincilden görülen tencere direnci artırılabilir. Birincilden görülen direnç sarım sayısının karesi ile orantılıdır ve oldukça etkili bir yöntemdir. Direnç değerinin daha etkin şekilde artacağı (4.5) ve (4.6)' dan anlaşılmaktadır.

$$R_Y = \frac{\rho}{\delta} = \sqrt{4\pi^2 \times 10^{-7}} \sqrt{f \cdot \mu \cdot \rho} \quad (4.5)$$

$$R_{eş} \approx N^2 \cdot R_Y$$

$$R_{eş} \approx N^2 \cdot \sqrt{4\pi^2 \times 10^{-7}} \sqrt{f \cdot \mu \cdot \rho} \quad (4.6)$$

Bu etki Şekil 4.10'da görüldüğü gibi sistemin trafo ile benzerliğinden gelmektedir. Daha önceki başlıklarda da anlatıldığı gibi bobin ve tencereden oluşan sistem, birincil sargısında çok sayıda sarım ve ikincilinde tek sarım olan bir trafoya benzetilebilir. Bobinin sarım sayısı arttıkça çevirme oranının karesi ile birincilde görülen direnç de artacaktır [15]. Frekansın direnç üzerindeki etkisi (4.5) ve (4.6)' dan görülmektedir.



Şekil 4.9 : Endüksiyon bobininin trafoya benzetimi [15].

Uzakdoğu'da yapılan çalışmalarda sarım sayısı artırma yönteminin sıkça uygulandığı görülmektedir ve bazı başarılı sonuçlar gözlenmiştir. Sarım sayısı manyetik tencere ısıtılırken 15 iken manyetik olmayan malzemeler ısıtılırken sarım sayısı 65 tura çıkarılmaktadır [15].

Sarım sayısının artırmanın dezavantajlardan birisi yakınlık kayıplarını arttırmasıdır. Diğer bir dezavantaj ise sarım sayısının artışı ile endüktansın artması ve bu nedenle de Q faktörünün büyüyerek rezonans çeviricinin frekans duyarlılığının artmasıdır. Ayrıca fazla sarım sayısı daha fazla yer kaplamaktadır.

5. EV TİPİ MANYETİK OLMAYAN TENCERELERİ ISITABİLEN ENDÜKSİYON OCAK UYGULAMASI

Bu bölümde, dünyada fazla uygulaması olmayan ev tipi endüksiyon ocaklarda manyetik olmayan tencereleri ısıtabilen bir çalışma ortaya konmuştur.

Endüksiyon ısıtma uygulamalarında genelde yarım köprü seri rezonans çeviriciler kullanılmaktadır. Bu çalışmada da uygulama devresi için yarım köprü seri rezonans topolojisi seçilmiştir. Uygulamaya ilk önce bobin tasarımı ile başlanmıştır. Mutfak tipi bir uygulama olduğu için düz spiral (pancake) bir bobin tasarlanmıştır ve bobin-yük kombinasyonunun endüktans değerini saptayabilmek için gerekli ölçümler yapılmıştır. Hesaplanan akım gerilim değerleri doğrultusunda uygun olan yarı iletken anahtarlar seçilerek bu anahtarların kontrol devreleri tasarlanmıştır. Endüksiyon ocak uygulaması gömülü bir sistemden oluşmaktadır. Buna göre ilgili anahtarlama frekansını üretecek özelliğe sahip bir mikrodenetleyici seçilmiştir (Atmel firmasına ait AT90PWM3 mikrodenetleyici kullanılmıştır). Bu mikrodenetleyici birbirinin tamamlayıcısı olan ölü zamanlı DGM ya da diğer bir deyişle PWM işareti üretebilmektedir.

5.1 Yarım Köprü Seri Rezonans Devresinin Çalışma Prensipleri

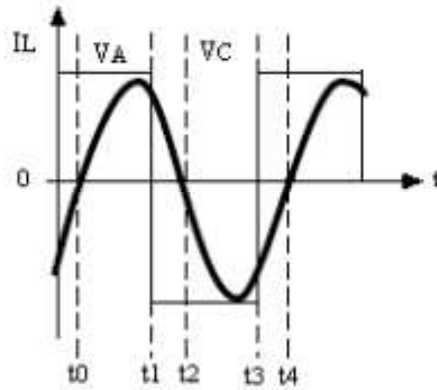
Uygulama için kullanılacak yarım köprü seri rezonans devre yapısı bölüm 3.4'te anlatılmıştı. Şekil 3.8'de gösterildiği gibi devre IGBT_{üst}, IGBT_{alt} şeklinde adlandırılan anahtarlarından ve C, L seri rezonans devresinden oluşmaktadır. Her bir anahtar kendisine ters paralel bağlı bir diyottan ve paralel bağlı bir bastırma kondansatöründen meydana gelmiştir.

Anahtarlar iletimde olduğu sürece içlerinden pozitif yönde akım akışı, yalıtıma girdiklerinde ise anahtar üzerinde, yalnızca diyot içinden geçen negatif yönde bir akım iletimi vardır. Anahtarlar, anahtarlama frekansında, anahtarın özelliğine göre belli değerlerdeki kare dalga gerilimlerle sürülürler. Üst ve alt IGBT'ler dönüşümlü olarak anahtarlama yaparlar.

Anahtarlama periyodunda her iki anahtarın birlikte yalıtımda kaldığı süreye ölü zaman adı verilir. Anahtarlara ters paralel bağlı diyotlar akım kayıplarını minimum yapmak için tasarlanmıştır.

Üst IGBT yalıtıma girdiğinde ölü zaman aralığında, alt IGBT'nin ters paralel bağlı diyotu bobin üzerinde depolanan enerjiyi kaynağa geri vererek alt IGBT'nin ilettime geçmeden önce sıfır gerilim veya akım durumunda olmasını sağlamaktadır. Aynı durum üst IGBT için de geçerlidir. Böylelikle diyot yalıtıma geçtikten sonra her iki tarafta da sıfır gerilim sağlandığı için ters toparlanma problemi ortadan kalkmış olur. Yalnızca yalıtım zamanında anahtarlama kayıpları meydana gelir. Şekilde Snubber olarak adlandırılan bastırma kondansatörleri yalıtıma geçiş anında bir miktar kayıpları kendi üzerinde tutarak anahtarlama kayıplarını azaltır.

Devre rezonans frekansının altında veya üstünde çalıştırılabilir. Anahtarlama frekansı rezonans frekansına eşit olduğunda anahtarlama kayıpları sıfırdır. Fakat devrenin çıkış gücü genellikle çalışma frekansının değiştirilmesi ile kontrol edildiği için bu değerler birbirine eşit tutulmaz. Devrenin endüktif etki gösterdiği rezonans frekansının üstünde çalışma durumu için devrenin çalışması dört ayrı durumda incelenmiştir. Bu durumların toplamında meydana gelen rezonans akımı I_L 'nin değişimi Şekil 5.1' de görülmektedir.



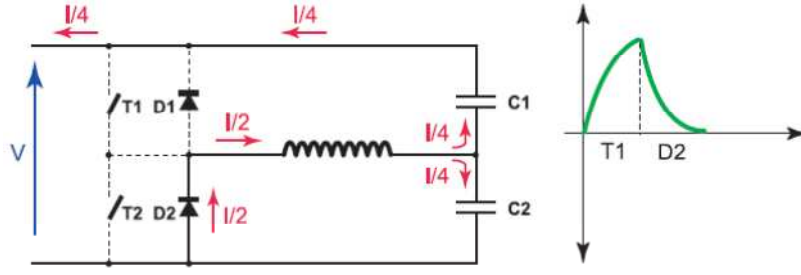
Şekil 5.1 : Rezonans akımının dalga şekli.

Bu yapının çalışma prensibi bobin akımı ve anahtarların iletim ve kesim modlarıyla 4 bölüme ayrılarak incelenebilir [16].

Durum 1 (t_0-t_1) : Şekil 5.2'de gösterildiği gibi D_1 üzerinde ters yönde akmakta olan rezonans akımının yönü $t=t_0$ noktasında değişir. Bu noktada T_1 anahtarı ilettime geçer ve akım T_1 içinden dolaşmaya başlar.

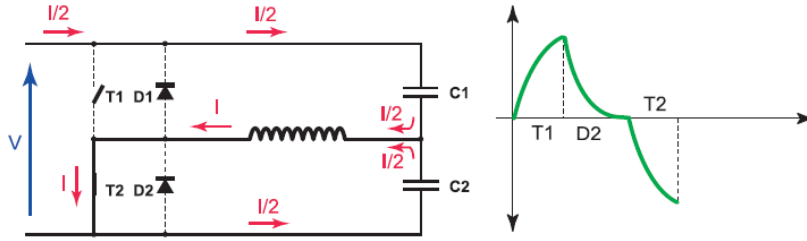
The diagram shows a buck converter circuit on the left and its current waveform on the right. The circuit includes an input voltage V , two diodes T_1 and T_2 , two capacitors C_1 and C_2 , and an inductor. Currents are labeled as $I/2$ and I . The waveform on the right shows a green curve representing the current i over time T_1 .

31



Şekil 5.3 : Yarım köprü rezonans çevirici durum 2 [16].

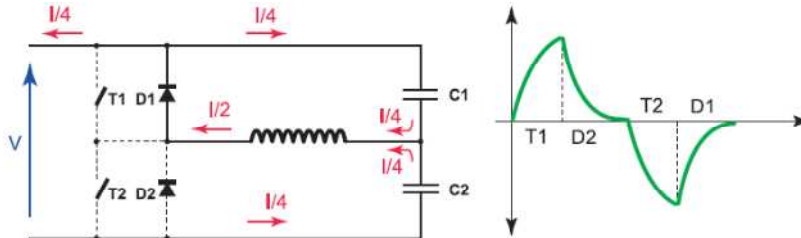
Burada rezonans kondansatörleri olan C_1 ve C_2 üzerinde depoladığı enerjiyi deşarj ederken devrenin gerilim kaynağı gibi davranır. Bu durumda iken rezonans akımının yönü önceki iki duruma göre ters yöndedir ve anlık değişimi ve maksimum değerinin tanımlaması (5.5)' da verilmiştir.



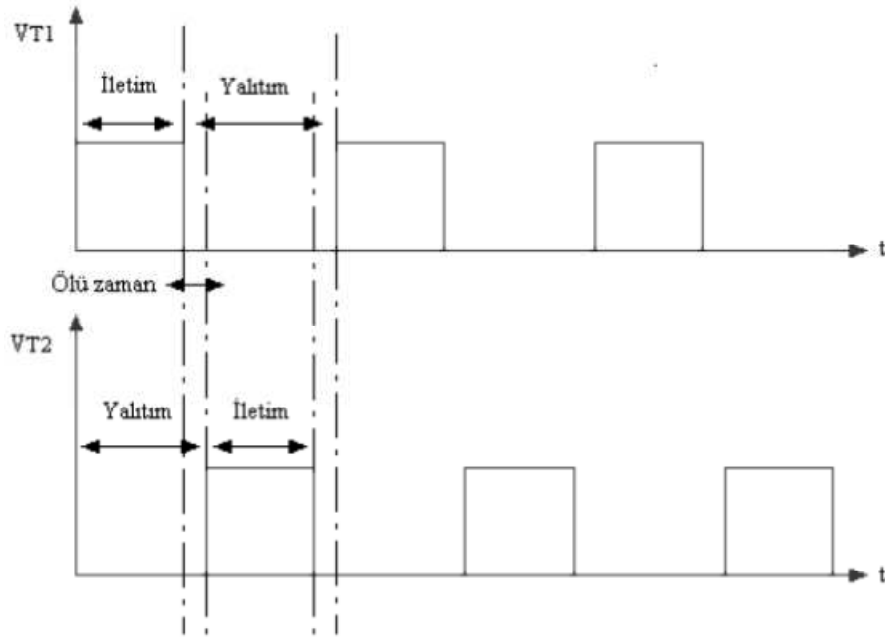
Şekil 5.4 : Yarım köprü rezonans çevirici durum 3 [16].

$$i_L(t) = -I_{Lm} \sin(\omega_a t - \theta) \quad (5.5)$$

Durum 4 (t_3 - t_4) : Şekil 5.5 'te gösterildiği gibi $t=t_4$ anında T_2 anahtarı sürme sinyali tarafından yalıtıma geçirilir ve T_2 içinde dolaşan akım D_1 diyotu üzerinden dolaşmaya başlar. Bu işlem sırasında da Durum 2'de olduğu gibi bir miktar yalıtım kayıpları meydana gelir. Bir sonraki durumda $t_3 < t < t_4$ noktasında T_1 anahtarı ilettime geçer. Bu sırada T_1 sıfır akım veya gerilim değerlerine sahip olduğu için iletim kayıpları meydana gelmez.

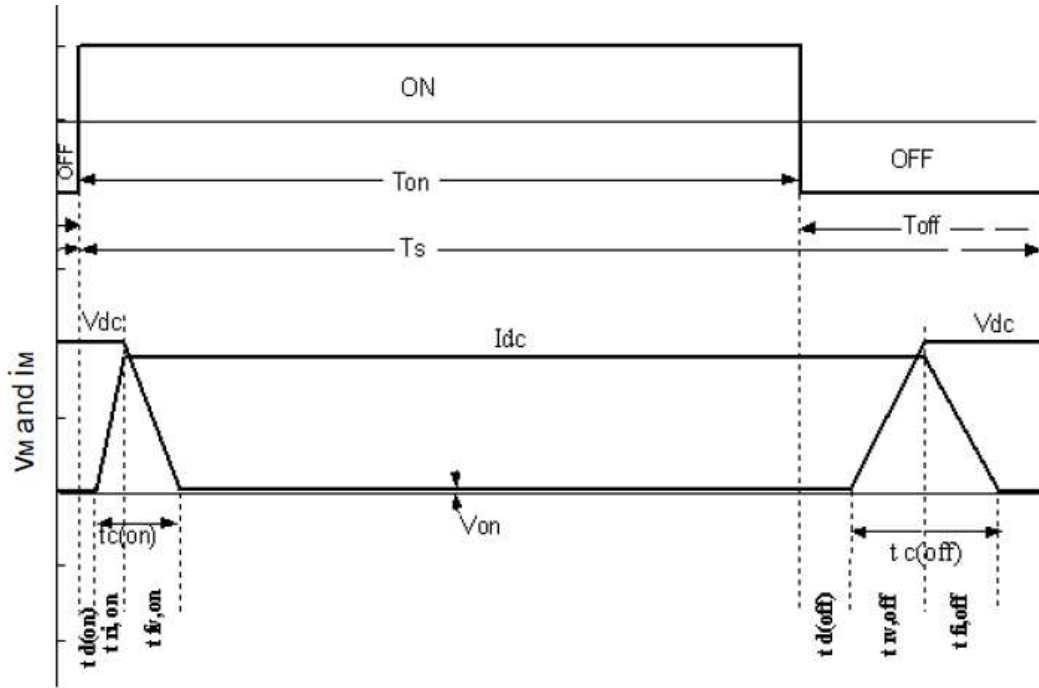


Şekil 5.5 : Yarım köprü rezonans çevirici durum 4 [16].



Şekil 5.6 : Yarım köprü seri rezonans çevirici anahtarlama sinyalleri.

Anahtarlar iletimden yalıtıma veya yalıttımdan iletime geçerken meydana gelen yüksek akım ve gerilimin neden olduğu kayıplar anahtarlama kayıplarıdır. Yarım köprü seri rezonans devresi dikkate alındığında alt anahtarındaki akım ve gerilim dalga şekilleri Şekil 5.7’de gösterilmiştir. Ayrıca aynı grafik üzerinde anahtarlama kayıpları da verilmiştir [2].



Şekil 5.7 : T_2 anahtarının akım ve gerilim dalga şekilleri [2].

$$P_{SW} = \frac{1}{6} \left(V_{dc} I_{dc} \frac{t_{on} + t_{off}}{T_s} \right) + \frac{1}{3} \left(V_{on} I_{dc} \frac{t_{on} + t_{off}}{T_s} \right) \quad (5.6)$$

P_{sw} : Anahtarlama Kaybı;

V_{dc} : Anahtarlama Gerilimi;

V_{on} : Anahtar İletimde İken Üzerine Düşen Gerilim;

I_{dc} : Anahtarlama Akımı;

T_s : Anahtarlama Peryodu;

t_{on} : İletim Zamanı;

t_{off} : Kesim Zamanı.

Manyetik olmayan tencereleri ısıtabilmek için yüksek akım ve frekansa ihtiyaç duyulmaktadır. Denklem 5.6'da da görüleceği gibi bu da uygulamadaki anahtarlama kayıplarının artması anlamına gelmektedir. Bu sebeple devre tasarımı yapılırken anahtarlama elemanlarının etkin soğumasını sağlamak için büyük bir soğutucuya ihtiyaç duyulmuştur.

5.2 Yarım köprü seri rezonans devre tasarımı

Manyetik olmayan tencereleri istenilen verimde ısıtabilmek için yüksek frekans tekniği kullanılmıştır. Günümüzdeki mevcut endüksiyon ocaklarında çalışma frekansı 20 ile 50 kHz arasında değişmektedir. Bu proje kapsamında ise sistemin rezonans frekansı 85 kHz olacak şekilde bobin endüktansı ve rezonans kapasite değeri belirlenmiştir.

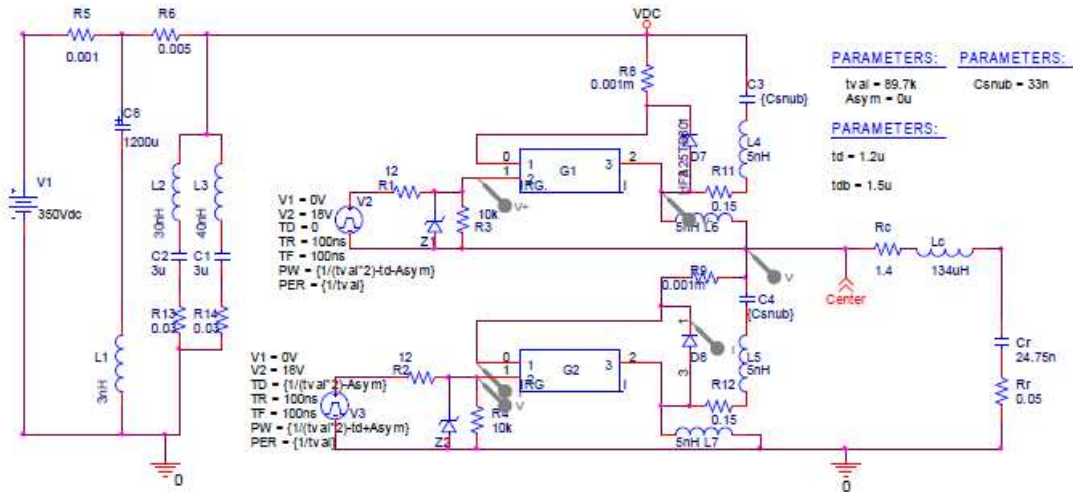
Manyetik olmayan tencerelerde kayıpları arttırmak için eşlenik direncin büyük olması gerekmektedir. Bu da yüksek endüktans değerine sahip bobin tasarımına götürmektedir. İstenilen rezonans frekansında çalışabilmek için ise rezonans kapasitesinin küçük seçilmesi gerekmektedir. Artan endüktans, ya da düşen kapasite değeri seri rezonans devrenin kalite faktörünü yükseltip filtrenin keskinliğini, yani birim frekans için değişim miktarını arttırmaktadır.

Devre dizaynı yapılırken anahtarlama frekansı, sistem endüktif bölgede çalışacak şekilde rezonans frekansının üstünde seçilmiştir. 3. harmonik yöntemi sistemi kapasitif bölgede çalışmaya zorladığı için 1. harmonik ile anahtarlama elemanları sürülmüştür. Endüktif bölgede çalışmak anahtarlama kayıplarını azaltmaktadır.

Anahtarlar yalıtıma geçerken kayıp oluşturmalarına rağmen, iletme geçtiklerinde sıfır geçiş bölgesi anahtarlama sayesinde kayıp oluşmaz. Sistem yüksek frekans ve akımda çalıştığı için kayıpları azaltmak için önemli bir yöntemdir. Ayrıca anahtarlama elemanlarına paralel bağlanan bastırma kapasiteleri ise yalıtım sırasında oluşan kayıpları önlemek için kullanılmaktadır.

Devre tasarımı sırasında, devrenin bazı çalışma durumlarında nasıl davranacağını görmek için yarım köprü seri rezonans yapının simülasyonları yapılmıştır. Simülasyonlar için ORCAD programı kullanılmıştır. Şekil 5.8’ de farklı endüktans ve kapasite değerlerinde anahtarlama elemanlarındaki akım ve gerilimin dalga şekillerini incelemek için yarım köprü seri rezonans devresinin simülasyon çalışması gösterilmiştir.

Devrenin gerçek davranışının görülmesi için en önemli elemanlar anahtarlama elemanları olan IGBT’lerdir. IGBT’ler bazı konularda idealize edilerek modellense de yine de kayıplar ve en doğru sonuçları verme açılarından gerçekte kullanılan IGBT’nin simülasyon modelinin kullanılması önemlidir.

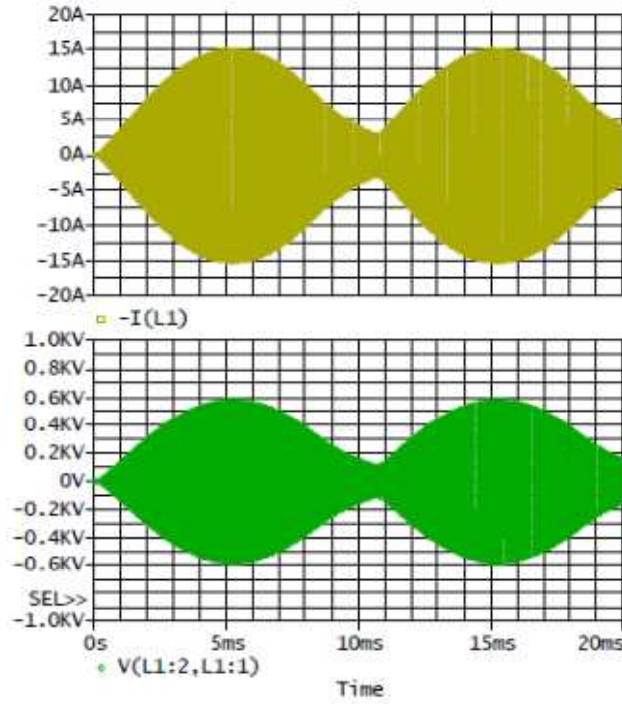


Şekil 5.8 : Devre simülasyon çalışmaları.

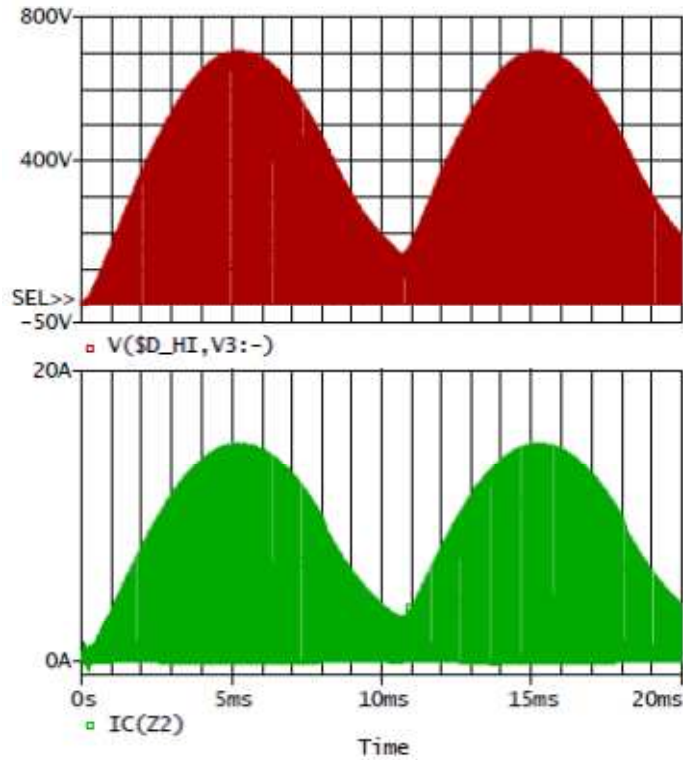
Devre simülasyonu sonucu elde edilen endüktans ve anahtarlama elemanlarının akım ve gerilim dalga şekilleri Şekil 5.9 ve Şekil 5.10’ da verilmiştir.

Simülasyon sonuçları tasarımın oluşturulmasında ve doğrulanmasında oldukça faydalı olmuştur. Simülasyon ile anahtar üzerindeki zorlanmaların azaltıldığı frekans ve uygun anahtarlama frekansı belirlenmiştir.

Devre tasarımı yapılırken kritik komponentlerin seçimi konusunda detaylı açıklamalar konunun devamındaki başlıklarda verilmiştir.



Şekil 5.9 : Endüksiyon bobini simülasyon sonucu akım ve gerilim dalga şekilleri.



Şekil 5.10 : Anahtarlama elemanının akım ve gerilim dalga şekilleri.

5.2.1 Anahtarlama elemanının seçimi

Güç elektroniği devrelerinde, günümüze göre var olan yarı iletken teknolojisinin sunduğu ürün yelpazesine bağlı olarak çok değişik çalışma özelliklerine sahip anahtarlama elemanları kullanılmaktadır. Yarı iletken güç elemanları kontrol edilebilirlik derecelerine göre diyotlar, tristörler ve kontrol edilebilir anahtarlar olmak üzere üç gruba ayrılırlar.

Endüksiyon ısıtma sistemlerinde genellikle kontrollü anahtarlar kullanılmaktadır. Kontrollü anahtar olan BJT'ler, MOSFET'ler, GTO'lar ve IGBT'lerin de içinde bulunduğu bazı yarı iletken güç elemanları kontrol uçlarına uygulanan kontrol işaretleriyle ilettime sokulup yalıtıma geçirilebilir.

IGBT'ler, MOSFET, BJT ve GTO özelliklerinin birleşmesinden oluşmuş avantajlara sahiptirler. MOSFET'e benzer olarak anahtarlama için sadece küçük bir enerji gerektiren yüksek empedanslı bir kapısı vardır. BJT gibi yüksek gerilim tutma özelliğine sahiptir ve GTO'ya benzer olarak negatif gerilimleri tutmak için tasarlanabilirler. 20 kHz'in altındaki düşük frekans değerlerinde 3300 V'a ve 1200 A'e kadar gerilim, akım taşıyabilirler, 150 kHz gibi yüksek çalışma frekanslarında ise 600 V'a ve 13 A'e kadar gerilim ve akım taşıma kapasitelerine sahiptirler. Anahtarlama elemanlarının seçimi, yalnızca gerekli olan akım ve gerilim değerlerine bağlı değildir, bunun yanında anahtarlama karakteristikleri de önemlidir.

Endüksiyon ısıtma sistemlerinde kullanılan kontrol edilebilir anahtarlar, anahtarlama elemanlarının bağlı özellikleri göz önünde bulundurularak belirlenmektedir. Kontrol edilebilir anahtarların bağlı özellikleri aşağıda Çizelge 5.1'de verilmiştir. Manyetik olmayan tencerelerin ısıtılabilceği sistemlerde anahtarlama elemanının güç kapasitesinin yüksek, anahtarlama hızının ise fazla olması beklenir. Bu yüzden Çizelge 5.1'de de görüleceği gibi bu tip uygulamalarda anahtarlama elemanı olarak IGBT seçilmesi uygun olacaktır.

IGBT'den mümkün olduğunca çabuk kesime geçebilmesi beklenmektedir. Bu durumda kapanma gecikme zamanları ve düşme zamanları önemlidir. Anahtarlama sırasındaki gecikmeler yüzünden en yüksek ölü zaman süresini belirlemek açısından önemlidir.

Düşme anı, kuyruk akımı haricindeki anahtarlama kaybının olduğu durum dolayısı ile önemlidir. Bu süre içinde akım sıfıra düşerken V_{CE} gerilimi de artmaktadır.

Çizelge 5.1 : Kontrol edilebilir anahtarların bağıl özellikleri.

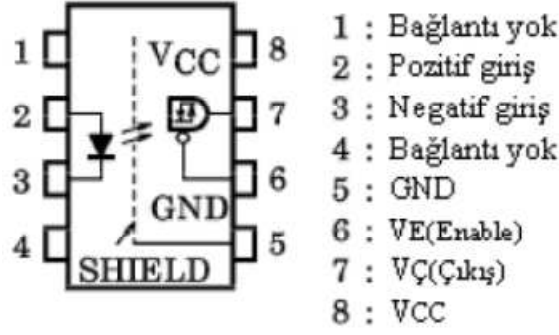
Eleman	Güç Kapasitesi	Anahtarlama Hızı
BJT	Orta	Orta
MOSFET	Düşük	Hızlı
GTO	Yüksek	Yavaş
IGBT	Orta	Orta
Tristör	Yüksek	Yavaş

Firmaların IGBT ürünleri için yayınladıkları teknik dokümanlarda kapanma sırasında oluşan kayıp enerji bilgisi de verilmektedir. Bu bilgi IGBT'nin belirtilen koşullarda kesime geçmesi durumundaki anahtarlama kaybını vermektedir.

Bu bilgiler ışığında birkaç firmanın IGBT örnekleri temin edilip, yapılan devre üzerinde denenmiş, en uygun olanı belirlenmiştir. International Rectifier firmasının IR3575DPbF modeli düşme zamanı ve kapanma sırasında oluşan az kayıpları bakımından öne çıkan modeldir ve prototip çalışmalarında kullanılmıştır.

İşlemciden gelen kontrol sinyalleri iletim durumunda +5 V, yalıtım durumunda ise 0 V'ü göstermektedir. IR3575DPbF anahtarlarının iletime geçmesi için gerekli gerilim seviyesi +18V/-18V'dur. Bu yüzden işlemci çıkışından elde edilen sinyallerin yükseltilmesi ve izolasyon için özel sürücü entegreler kullanılmıştır. Bu sürücü entegreler seçilen yarı iletken anahtarın zamanında iletime ve yalıtıma geçmesini sağlar. Devre tasarımında Toshiba firmasının TLP 350 sürücü entegreleri kullanılmıştır. TLP 350 entegresi içinde giriş sinyallerinin yüksek gerilimden izolasyonu için kullanılan, yaklaşık 2500 V'a kadar izolasyon sağlayan optik bir izolatör vardır ve 2.5 MHz'e kadar çalışma frekansına sahiptir. Şekil 5.11 üzerinde TLP 350 entegresinin pin görünüşü verilmiştir.

Şekil.11'deki devre şemasında görüldüğü gibi 2 nolu uçtan işlemciden elde edilen kontrol sinyalinin pozitif girişi verilir. 3 nolu bacadan ise kontrol sinyalinin negatif girişi verilmektedir. Enable ucu 0 V seviyesine bağlanarak entegrenin çalışması aktif hale getirir. 7 nolu uçtan alınan yükseltilmiş çıkış sinyali anahtarın kapı girişine ve GND çıkışı da anahtarın kaynak girişine verilir. IGBT'nin istenilen sürede kapanıp, açılabilmesi için teknik dokümanlarında verilen süre içerisinde gerekli şarjın sağlanması, yani gerekli akımın kapıdan akıtılması gerekmektedir.

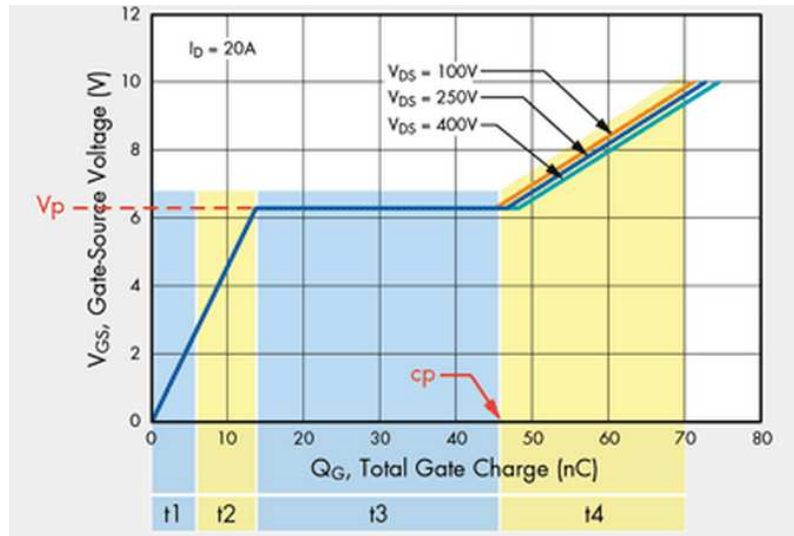


Şekil 5.11 : TLP 350 pin görüntüsü.

Daha az akımın akıtıldığı durumda gerekli şarjın sağlanması daha uzun süre alacaktır ve IGBT teknik dökümanında yazılan süreden daha uzun sürede açılacaktır veya kapatılacaktır. Akım değeri ise kapı direnci ile ayarlanabilmektedir.

İlk beslenme anında kapasitelerin karakteristiği gereği IGBT'nin kapısı ve yayıcı (emitter) ayağı anlık kısa devre gibi görünür ve kapı akımı sadece direnç ile gerilim arasındaki bir ilişkiyle hesaplanabilir. Bu kapı akımını belirleyen direncin değerini IGBT'nin teknik dökümanlarında verilen bilgilerden hesaplanabilir. İletime veya kesime geçme olayının gerçekleştiği sürede IGBT kapısında hangi kapasitenin şarj veya deşarj edildiği bulunmalı ve şarj değerleri elde edilmelidir. Bu bilgiye Şekil 5.12'de gösterildiği gibi toplam kapı şarjı - ' V_{GE} ' eğrisinden ulaşılabilir.

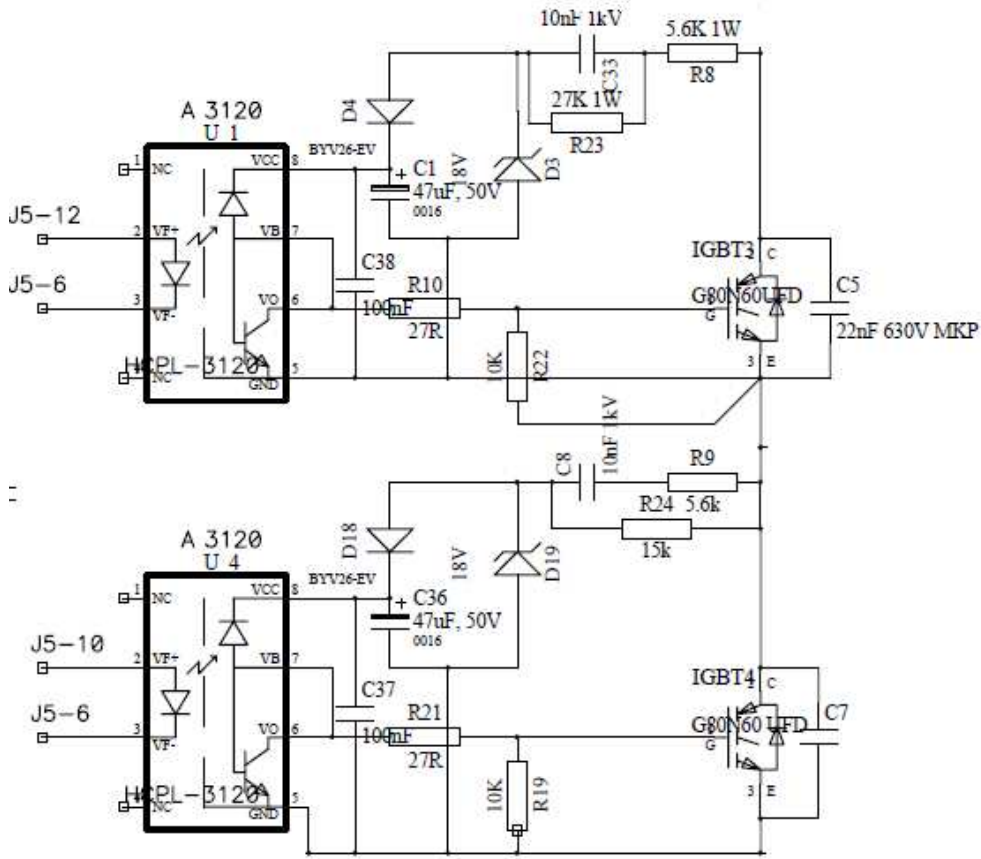
Hesaplanan değerler ile kurulan IGBT sürme devresi Şekil 5.13' de verilmiştir. IGBT'nin iletime geçmesi için gereken 18V gerilimi ise baradan direnç bölücüler ile sağlanmaktadır.



Şekil 5.12 : Toplam kapı şarjı - V_{GE} eğrisi ve anahtarlama anı.

5.3 Kontrol Devresi

Kontrol ünitesi, anahtarların anahtarlama zamanının ayarlandığı, sistemin çalışma frekansının kontrol edildiği ve frekans kontrolü ile aynı zamanda güç kontrolünün yapılabildiği bölümdür.



Şekil 5.13 : IGBT sürme devresi.

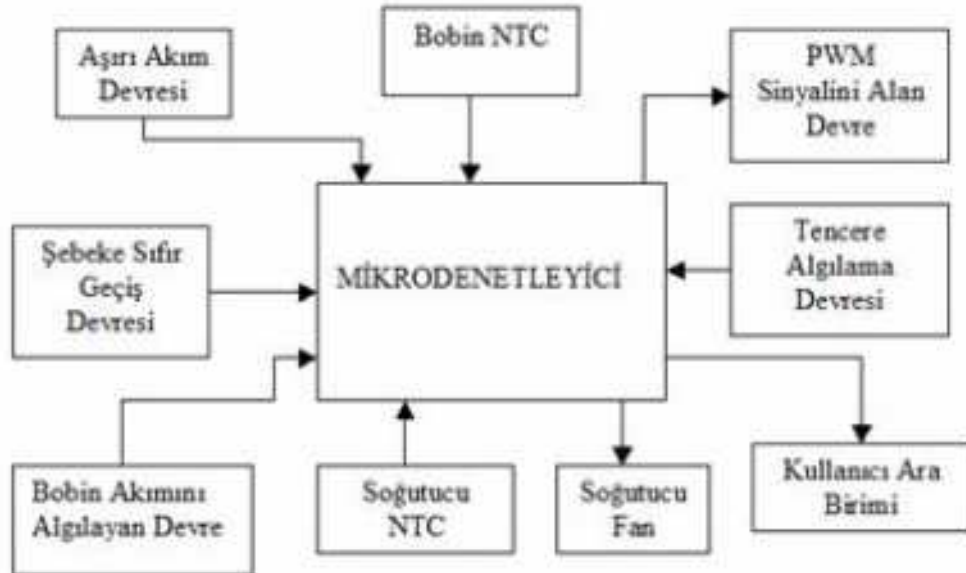
Endüksiyon ocak elektronğinde gömülü bir sistem mevcuttur. Bu sistemde seçilen mikrodnetleyici birbirinin tamamlayıcı ve aralarında ölü zaman olan darbe genişlik modülasyon (PWM) işaretini üretebilecek özellikte seçilmiştir. Çünkü yarım köprü seri rezonans devresinde bulunan alt IGBT ve üst IGBT hiçbir zaman aynı anda ilettime geçmemelidir. Böyle bir durumda faz nötr kısa devresi meydana gelir. Bu amaçla kullanılan mikrodnetleyici Şekil 5.14’de verildiği gibi ATMEL marka AT90PWM3’tür.

Mikrodnetleyicinin, Şekil 5.15’de görüleceği gibi, birbirinin tamamlayıcısı ölü zamanlı darbe genişlik modülasyonu (PWM), analog dijital dönüştürücü (ADC), sinyal okuma (CAPTURE), zamanlayıcı (TIMER), kesme (INTERRUPT), harici

(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 [17].



Şekil 5.14 : Sistemde kullanılan mikroişlemcinin pin diyagramı [17].



Şekil 5.15 : Endüksiyon ocak elektroniğinin blok şeması [7].

Endüksiyon ocak kapalı çevrim çalıştırıldığında, sistem bobin akımı ile kontrol edilmektedir. Ancak manyetik olmayan tencere durumunda sistemin kalite faktörü 1

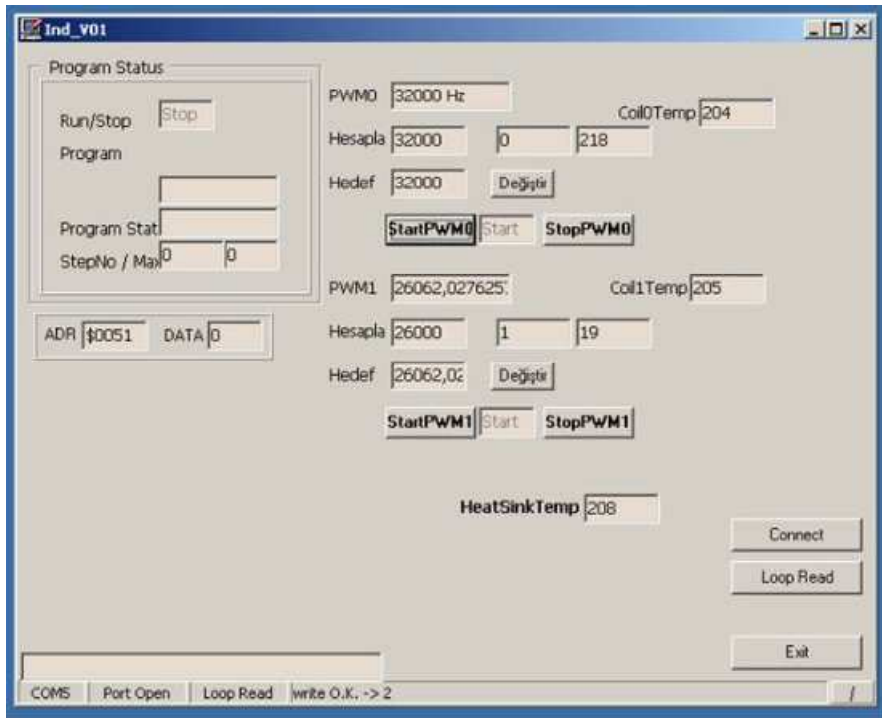
den çok büyük olduğu için sistemin daha hassas kontrol edilmesi gerekmektedir. Q büyüdükçe rezonans eğrisinin keskinliği, birim frekans için değişim miktarı artacaktır.

Önceki bölümlerde verilen rezonans devresinin çıkış akım – frekans grafiğinde, ısıtılacak tencerenin malzemesine göre Q katsayısının değişimi verilmişti.

Q katsayısına bağlı olarak anahtarlama frekansı değişimi ile yüke güç aktarım karakteristiği değişir. Eşlenik direnç arttıkça Q değeri azalır. Alüminyum gibi manyetik olmayan tencerelerin eşlenik direnci düşük, Q katsayısı büyüktür, rezonans frekansına yaklaştıkça değişim artar. Güç kontrolü için dar bir frekans aralığı söz konusu olur. Ufak bir frekans değişimi ani güç değişimlerine yol açar.

Frekans değerini kademeli olarak daha hassas ayarlamak için sistem açık çevrim olarak kontrol edilmektedir. Frekans bilgisayar ile UART üzerinden ayarlanmaktadır. Frekans değerini bilgisayardan kontrolü için Şekil 5.16’ da gösterildiği gibi Visual C programı kullanılarak bir arayüz programı oluşturulmuştur.

Program ile iki ayrı yarım köprü anahtarlama elemanları kontrol edilebilmektedir. Ancak tez kapsamında sadece bir yarım köprü seri rezonans devresi kullanıldığı için tek bir PWM işareti yeterli olmuştur. Ayrıca soğutucu ve bobin sıcaklık sensörlerinden alınan analog dijital veriler de program ile takip edilebilmektedir.



Şekil 5.16 : Frekans kontrolü için bilgisayar arayüz programı [21].

5.4 Bobin Tasarımı

Endüksiyon ile ısıtma işlemi bobin üzerinde elde edilen enerji ile gerçekleştirildiği için bu ısıtma sisteminde en önemli unsurlardan bir tanesi ısıtma bobinidir. Dizayn edilen bobin rezonans devresini oluşturan elemanlardan biridir. Sistem tasarlanırken rezonans devresi içindeki akım ve gerilim değerleri doğrultusunda anahtarlama elemanları seçildiği için rezonans devresinin oluşmasını sağlayan bobin dizaynı bu noktada önemlidir. Anahtarlar üzerlerine transfer edilen güce göre seçilmelidirler ve anahtarlama elemanlarının taşıyabileceği oranda giriş güç kaynağı seçilir. Anahtarlara transfer edilen güç bobin üzerinde üretildiği için indüksiyon ısıtma sistemleri tasarlanırken ilk önce bobin dizaynı yapılmalıdır [18]. İstenilen bobin gücü ise kullanılan güç kaynağının değeri ile ilgili olduğu için güç kaynağının seçimi yapılırken de bobin tasarımı önemlidir.

Mutfak tipi uygulamalarda, yüklerin geometrisine en uygun bobin tipi düz spiral geometrisine sahip bobinlerdir. Bu yüzden endüksiyon bobini tencerenin geometrisine uygun bir şekilde tasarlanmalıdır.

Bu amaç için tasarlanmış uygun geometriler, basket bobin, helisel bobin ve düz spiral tipindeki bobinlerdir. Mutfaklarda kullanılan çoğu tencereler düz bir tabana sahip oldukları için düz spiral geometrisine sahip bir bobin kullanmak daha uygundur [19].

Bu çalışmada, yapılan literatür araştırmalarına ve analiz çalışmalarına göre farklı sayım sayılarına sahip, farklı tel kesitlerinde bobinler tasarlanmıştır. Kurulan elektronik devresi ile en verimli bobin dizaynı ile sistem tasarımı sonlandırılmıştır. Manyetik olmayan tencereleri ısıtabilmek için daha önceki bölümlerde de anlatıldığı gibi sistem yüksek frekans ile çalışmaktadır.

Deri etkisi denklemine göre 100 kHz'de çalışan bir sistem için akımın girme derinliği yaklaşık 0.2 mm bulunmaktadır. Bu yüzden tasarımı yapılan bobinin tel kesitinin de 0.2 mm ile 0.4 mm olması yeterli olacaktır. Birim teller ve sargılar arasındaki yakınlık etkisini azaltabilmek ve birim teldeki akım yoğunluğunu arttırabilmek için tellerin Litz şeklinde burulması önem kazanmaktadır. Litz, tellerin burğu yönü ve miktarı olarak tariflenebilmektedir.

Yüksek frekansta tellerdeki kayıpları azaltabilmek için bu çalışmada Litz teli kullanılmıştır. Bu tellerin 150 tanesi bir araya getirilerek bir bobin spiri oluşturulmuş

ve düz bir spiral şeklinde spirler arasında boşluk kalmayacak şekilde bobin sarımı gerçekleştirilmiştir. Tasarımı yapılan bobinin resmi Şekil 5.17’de görülmektedir.



Şekil 5.17 : Tasarımı yapılan bobin.

Bobinin altına çubuk şeklinde ferit nüveler sayesinde bobin üzerinde oluşan değişken manyetik akının havaya dağılarak meydana getirdiği kaçak akılar azaltılır. Asimetrik bobin yapısını oluşturan ferit nüveler bobinin bir tarafındaki manyetik akı yolunun direncini azaltarak, akının bobin üzerinde yoğunlaşmasını sağlamaktadır. Oluşturulan asimetrik bobin yapısı Şekil 5.18’de görülmektedir. Bobinin altına yerleştirilen ferit çubukların sayısının yani nüve hacminin artırılmasıyla, tencere ile nüveler arasındaki manyetik bağlantı güçlenerek bobin üzerinde depolanan enerji artar diğer taraftan ise havaya kaçak akı olarak dağılan enerji azalır [20]. Kullanılan feritlerin özellikleri Çizelge 5.2’de verilmiştir.



Şekil 5.18 : Bobin ferit yapısı.

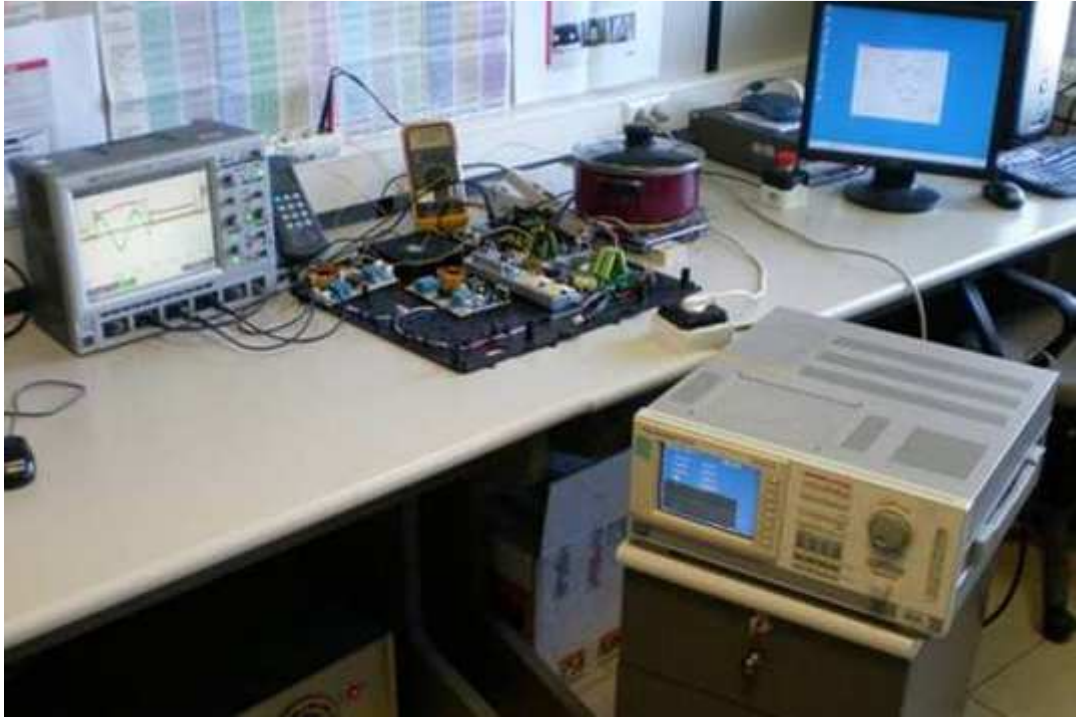
Çizelge 5.2 : Kullanılan ferit nüvelerin özellikleri.

Description	Symbol	Unit	Test Condition	JR2KBF
Initial Permeability	μ_i		25°C	2300±25%
Flux Density	Bs	mT	25°C	510
			100°C (1194 A/m)	390
Coercive Force	Hc	A/m	25C	14
Curie Temperature	Tc	C	1kHz	215 Min
Remanence	Br	mT	25°C	95
Power Losses	PL	kW/cm ³	f=25kHz B=200mT	25°C≤130
				60°C≤90
				80°C≤90
				100°C≤110
Resistivity	ρ	$\Omega.m$		0.6
Density	D	g/cm ³		4.75±0.05

6. DENEY DÜZENEGİ VE ALINAN ÖLÇÜMLER

6.1 Deney Düzenegi

Daha önceki bölümlerde ayrıntıları ile anlatılan elektronik devre ve bobinin oluşturduğu deney düzenegi, ölçüm cihazları Şekil 6.1’de verilmiştir.



Şekil 6.1 : Deney düzenegi [21].

6.2 Deneysel Sonuçlar

Deney düzeneginde, bobinin endüktansını ve direncini ölçebilmek için RLC metre, anahtarlama akım ve gerilim dalga şekillerini kontrol etmek için osiloskop, verim ölçümü yapabilmek için suyun sıcaklığını ölçmek için termometre, sistemin giriş gücünü ve gerilimini ölçmek için powermetre, giriş gerilimini ayarlamak için varyak ve devrenin UART üzerinden kontrolünü sağlamak için bilgisayar bulunmaktadır.

6.2.1 Bobin ölçümleri

Sistem için tasarlanan bobinin frekansa göre RLC metreyle alınan endüktans, direnç

değerleri Çizelge 6.1’de verilmiştir. Ölçümler bobin boş iken ve üzerinde 5,5mm hava aralığı ile manyetik olmayan tencere ile alınmıştır.

Çizelge 6.1 : Farklı frekanslara göre bobinin endüktans ve direnç ölçümleri.

Frekans(kHz)	Direnç (Ohm)	Endüktans (μH)	5,5mm hava aralığı ve al. Tencere		
			Direnç (Ohm)	Endüktans (μH)	Fark(Ral-Rbos)
1	0.108	207	0.1641	59.45	0.0561
5	0.1425	205	0.204	57.7	0.0615
10	0.17	205	0.26	56.7	0.09
20	0.2039	204.6	0.3306	56	0.1267
28	0.2173	204.4	0.373	55.6	0.1557
66	0.1542	204	0.82	55	0.3278

Çizelgede verilen ölçümler incelendiğinde frekans değeri arttıkça bobinin görünür direnci artmaktadır. Sonuçlar, yüksek frekanslarda ısıtmanın daha verimli olacağının bir göstergesidir. Buna rağmen bobin boş iken ölçüldüğünde frekans arttıkça endüktans değeri yavaş yavaş düşmektedir. Bu durumun sebebi ise, bobin üzerinde halkalanan akılar manyetik olmayan tencereyi nüve ya da akı yolu olarak kullanamamasındandır. Manyetik olmayan tencere hava aralığı gibi davranmaktadır. Bu yüzden bobin üzerinde tencere yokmuş gibi endüktans değişimi çok az olmaktadır. 100 kHz’de farklı tip manyetik olmayan tencereler ile alınan endüktans ve direnç ölçümleri ise Çizelge 6.2’de verilmiştir. Karşılaştırma amacı ile 20kHz’de manyetik tencerenin ölçümleri de verilmiştir.

Çizelge 6.2 : Farklı tipte tencereye göre alınan bobinin L ve R değerleri.

Tencere Tipi	Endüktans (μH)	Direnç (Ohm)
Boş	210	0.09
210mm Bakır Tabanlı	72	1.11
210mm Teflon	75.4	1.325
180mm Alüminyum Tabanlı Döküm	77.3	1.642
210mm Alüminyum Tabanlı Döküm	76	1.521
210mm Manyetik Olmayan Çelik Tencere	75.5	1.653
180mm Manyetik Çelik Tencere @20kHz	141	7.132
180mm Manyetik Olmayan Çelik Tencere	128	1.321

Ölçülen direnç değeri ne kadar yüksekse, tencere üzerinde oluşacak kayıplarda yüksektir. Çizelgeye bakıldığında manyetik tencerenin eşlenik direnç değeri manyetik olmayan tencerenin eşlenik direnç değerinin 7 katıdır.

6.2.2 Verim ölçümleri

Verim ölçümlerinde, 1 lt suyun oda sıcaklığında kaynama derecesi olan 100°C'ye ulaşınca kadar geçen süre baz alınmıştır.

Aşağıda verilen formüller yardımı ile verim değerleri % olarak ölçülmüştür.

$$Q = m.c.\Delta T \quad (6.1)$$

$$P_{su} = \frac{Q}{t} \quad (6.2)$$

$$\eta(\%) = \frac{P_{su}}{P_{giriş}} \quad (6.3)$$

m: Isıtılan yükün kütlesi (g);

c: Isıtılan yükün yapıldığı malzemenin öz ısısı (J/g°C);

ΔT : İlk ve son sıcaklık arasındaki değişim (°C).

Farklı tipte manyetik olmayan tencere ile iki farklı giriş gücünde alınan verim ölçümleri Çizelge 6.3'de verilmiştir.

Çizelge 6.3 : Farklı tipte tencere ile alınan verim ölçümleri.

Bobin	Tencere Tipi	Güç (W)	Kaynama Süresi (dk:s)	Soğutucu Sıcaklığı (°C)	Çalışma Frekansı (kHz)	Verim (%)
210mm dış çap, 80mm iç çap, 50 sarım	210mm Teflon Alüminyum Tencere	2000	04:15	65	76	62
	210mm Teflon Alüminyum Tencere (Derinliği Az)	1980	04:00	66.5	78	66
	210mm Bakır Tabanlı Tencere	2000	04:24	85	77	59
180mm dış çap, 80mm iç çap, 40 sarım	180mm Manyetik Olmayan Çelik Tencere	1500	05:34	51	85	65
	210mm Manyetik Olmayan Çelik Tencere	1500	05:56	54	84	60
	180mm Alüminyum Tabanlı Döküm Tencere	1500	05:22	52.5	85	66

Sarım sayısı yüksek olan bobin 2000W civarı bir giriş gücünde çalıştırılırken, sarım sayısı az ve çapı küçük olan bobin 1500W seviyelerinde çalıştırılmıştır. Böylelikle iki farklı güç kademesinde elde edilen verimler gözlenebilmiştir. Bakır tabanlı çelik tencere ısıtılırken sistem aşırı zorlanmıştır. Soğutucu sıcaklığı 85 °C' leri geçmiştir. Bakır tabanlı çelik tencerenin eşlenik direnci de düşük olduğu için veriminin diğer tencerelere göre düşük olması beklenen bir sonuçtur.

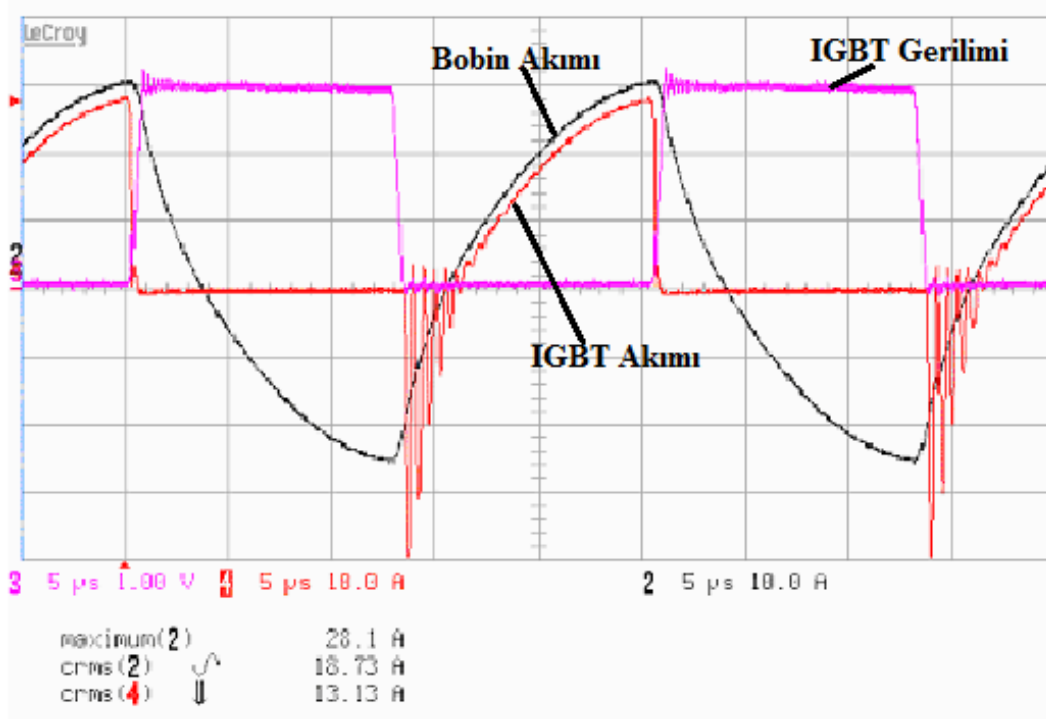
Tencere boyutlarının verim sonuçlarına etkisi de çizelgede görülebilmektedir. Aynı malzeme ve et kalınlığına sahip 210mm çapındaki alüminyum tencerelerden derinliği az olanın verimi daha yüksek çıkmıştır. Aynı durum çapları farklı manyetik olmayan çelik tencerelerde de gözlenmektedir. 210mm çapa sahip manyetik olmayan çelik tencereden alınan verim, 180mm çapa sahip manyetik olmayan çelik tencereden alınan verimden daha azdır.

Genel olarak çizelgeye bakıldığında,manyetik olmayan tencerelerden alınan verimler %60'lar civarındadır. Manyetik tencerelerde verim %85 ile %90 arasında değişirken, manyetik olmayan tencerelerde verim %60'lara düşmektedir.

6.2.3 Devre üzerinden alınan akım ve gerilim dalga şekilleri

Yarım köprü seri rezonans devresi çalıştırıldığında devre üzerinden alınan dalga şekilleri aşağıdaki şekillerde verilmiştir.

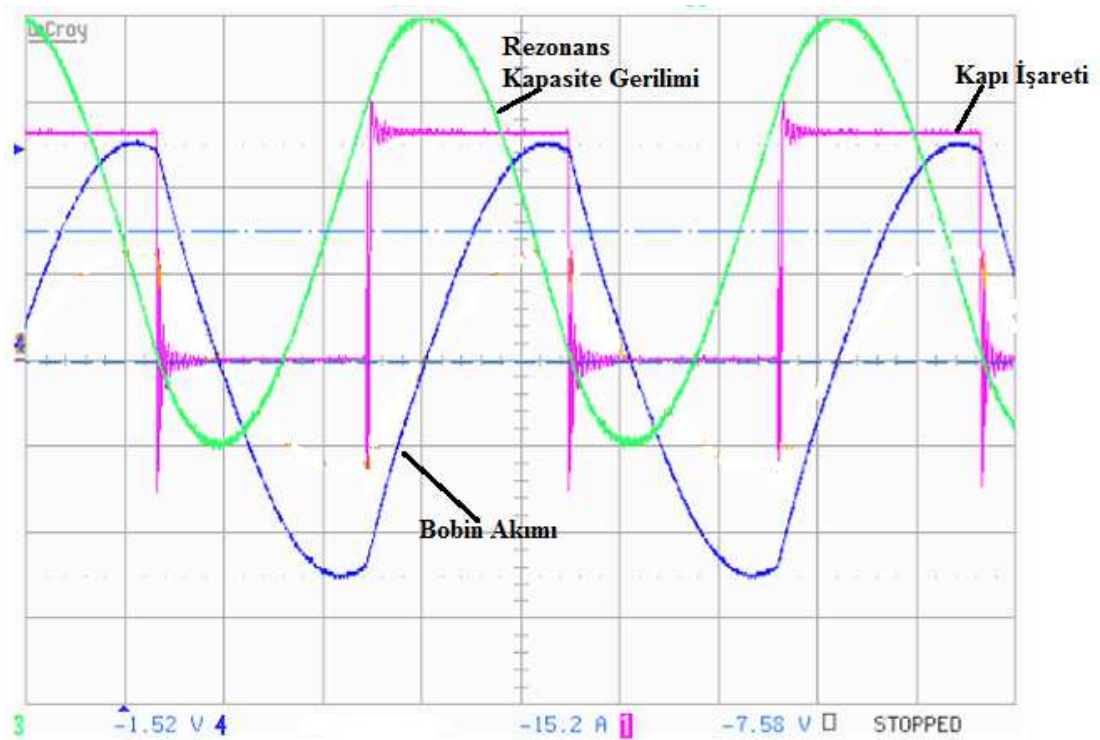
Şekil 6.2' de yarım köprü seri rezonans devresinin anahtarlama elemanlarının orta noktasından alınan gerilimin, anahtarlama elemanı akımının ve bobin akımının dalga şekilleri verilmiştir.



Şekil 6.2 : Rezonans devresi akım ve gerilim dalga şekilleri.

Devre çalışırken bobin akımının RMS değeri 40A, anahtarlama elemanlarının orta noktasının, devrenin toprağına göre olan gerilimi ise 300V'tur. IGBT'nin akımında rezonansa girmiş şeklinde gözüken bölümünde anahtarlama elemanının ters bağlı diyotu devredir. IGBT'nin geç açılması, yani ters bağlı diyotun daha çok devrede kalması, IGBT'nin zarar görmesine neden olmaktadır.

Şekil 6.3'de alt anahtarlama elemanının PWM sinyali, rezonans kapasitesi akımının ve geriliminin, bobin akımının dalga şekilleri verilmiştir. Anahtarlama kayıplarını azaltmak için gerilimin sıfır geçiş anlarında anahtarlama yapılmaktadır. PWM sinyali ile kapasite gerilim şekli karşılaştırıldığında bu durum açıkça görünmektedir.



Şekil 6.3 : Rezonans devresi akım ve gerilim dalga şekilleri (Kapı İşareti 2V/div)

Motor sürücü devrelerinde süzölmüş DC gerilim elde etmede kaynak görevi görerek, yüksek frekanslı anahtarlama yükünü üzerine alan fakat güç faktörünü de çektiği sivri karakterisitkli ve harmonikli akımlar sebebi ile düşüren (0.5 - 0.6) elektrolitik kondansatör yerine, endüksiyon ocaklarda $1\mu\text{F}$ - $4\mu\text{F}$ değerinde seramik tip kondansatörler kullanıldığından yüksek frekanslı rezonans anahtarlama salınımları doğrudan şebekeden çekilmektedir. Bunun yanında güç faktörü pratik değerleri 0.9 - 0.98 mertebelerinde olmaktadır. Diğer bir deyişle şebekeye iletilen yayılım açısından olumsuz bir durum ortaya çıkmaktadır. Sistemin şebekeye vereceği gürültüyü önlemek için özel filtre devreleri kullanılmaktadır.

7. 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. Ancak manyetik olmayan tencerelerin ısıtılamaması, endüksiyon ocakların yaygınlaşmasının önündeki en büyük sorun olarak karşımıza çıkmaktadır. Bu olumsuz özelliği ortadan kaldırabilmek için bu çalışmada çözüm yöntemleri ele alınıp, uygulama devresi ortaya konmuştur.

Manyetik olmayan alüminyum gibi tencereleri endüksiyon ile ısıtamamanın ana sebebi tencere üzerinde oluşan kayıpların az olmasından kaynaklanmaktadır. Tencere üzerindeki kayıpları arttırmak için yüksek endüktansa sahip bobin kullanılıp, yüksek frekansta sistem çalıştırılmıştır.

Sistem elektronik yapısı olarak, yarım köprü seri rezonans devre yapısı kullanılmış ve anahtarlama elemanı olarak IGBT seçilmiştir. Sistem anahtarlama frekansı 100 kHz olarak belirlenmiştir. Alt ve üst anahtarlar birbirinin tamamlayıcısı olan ölü zamanlı PWM işareti ile sürülür. Bu işaret sistem için özellikle seçilmiş bir mikrodenetleyici tarafından sağlanır. Sistemin kontrolü bobin akımının geri beslemesi ile kapalı çevrim yapılabilirken, sistemi daha hassas kontrol etmek için bir arayüz programıyla UART üzerinden bilgisayar ile açık çevrim kontrolü sağlanmıştır.

Sistemin tasarımı yapılırken öncelikle mutfak tipi ısıtma uygulamaları için uygun bobin geometrisi belirlenerek ısıtma bobinin dizaynı yapılmıştır. Mutfak tipi ısıtma uygulamaları için en uygun bobin geometrisi düz spiral (pancake) şeklinde olanıdır. Litz şeklinde burulmuş 0.2 mm kesite sahip 150 adet tel ile bobin tasarımı yapılmıştır. Yeterli girme derinliğine sahip tel kesiti ile Litz yapısı yakınlık kayıplarını azaltmak için kullanılmıştır. Sistemin verimini karşılaştırmak amacı ile çeşitli malzemeye sahip manyetik olmayan tencelerle verim ölçümleri alınmıştır. Sistem verimi genelde %60'lar civarındadır. Mevcut endüksiyon ocaklarda ısıtılabilen manyetik tencerelere göre verim oldukça düşüktür.

KAYNAKLAR

- [1] **Çetin S.**, 2005: *Bir Fazlı Bir İndüksiyon Isıtma Sistemi Analizi ve Dizayını*, Yüksek Lisans Tezi, PÜ, Fen Bilimleri Enstitüsü, Denizli
- [2] **AN9012**, 2000: *Induction Heating System Topology Review*. Fairchild Semiconductor.
- [3] **Agrawal, J.P.**, 2001: *Power Electronics Systems Theory and Design*, P1, Prentice Hall Inc., 0-13-442880-3 New Jersey.
- [4] **Khan, S., Ahamed, M., Khan, M.A.**, 2000: *Innovative Applications of Induction Heating for Selective Heat- Treatment*, Science Vision, Vol. 5, 14-19.
- [5] **Yıldırımaz, G., Gülgün, R.**, 1988: Güç Elektroniklerinin Endüksiyonla Isıtmada Kullanılması, Bursa II. Elektromekanik Sempozyumu, 69-75.
- [6] **Tebb, D.W., Hobson, L.**, 1987: *Design of Matching Circuitry for 100 kHz MOSFET Induction Heating Power Supply*, IEEE Transactions on Industrial Electronics, Vol. IE-34, 271-276.
- [7] **Aytekin, B.**, 2008: *Endüksiyon Ocak Elektronik Kontrol Sistem Tasarımı*, Yüksek Lisans Tezi, İ.T.Ü., Fen Bilimleri Enstitüsü, İstanbul.
- [8] **Url-1** < <http://www.hitachi.com/rev/archive/2009> >, alındığı tarih 20.08.2010.
- [9] **Acero J., Alonso R., Barragán L.A., Carretero C., Lucía O., I.**, 2007: *Domestic Induction Heating Impedance Modeling Including Windings, Load, and Ferrite Substrate*.
- [10] **Yılmaz N., Hazır S.**, 2005: *Endüksiyon Yöntemi İle İlgili Isıtma Tasarım Çalışmaları*, Arçelik Ar-Ge Raporu, İstanbul.
- [11] **Steigerwald, R.L.**, 1992: *Practical Design Methodologies for Load Resonant Converters Operating Above Resonance*, Telecommunications Energy Conference, Washington, DC, USA, October 4-8.
- [12] **Kwon, Y., Yoo, S. and Hyun, D.**, 1999: *Half-Bridge Series Resonant Inverter for Induction Heating Applications with Load-Adaptive PFM Control Strategy*, Applied Power Electronics Conference and Exposition, 1999, Fourteenth Annual, Dallas, TX, USA, Mar. 14-18, Vol. 1, 575 – 581.
- [13] **Acero, J., Alonso, R., Barragán, L.A., Carretero, C., Lucía, O., Millán, I. and Burdío, J.M.**, 2009: *Domestic Induction Heating Impedance Modeling Including Windings, Load, and Ferrite Substrate*, 13th European Conference on Power Electronics and Applications, Barcelona, Spain, Sept. 8-10, Page 1.

- [14] **Acero, J., Alonso R., Puyal D., Millian I., 2007:** *Resonant Inverter Topology for All-Metal Domestic Induction Heating*, 1-4244-0755-9/07/\$20.00 IEEE
- [15] **Tanaka, T., 1989:** *A New Induction Cooking Range For Heating Any Kind Of Metal Vessels*, IEEE Transactions on Consumer Electronics, 635-641.
- [16] **Url-2** < <http://aussiewhitegoodsrescue.com.au/Agents/TSPM/CT/Kleenmaid/> >, alındığı tarih 10.08.2010.
- [17] **ATMEL Corporation:** 18.10.2005. “AT90PWM3 Datasheet”.
- [18] **Atavi, M.K., 1991:** *Inverter Design for Maximum Power Transfer in Induction Heating*, Master Thesis, M.E.T.U. Library, 143 s., 1991.
- [19] **Chatterjee, K., 1991:** *Design of Induction Heaters*, Master Thesis, Indian University, 84 p.,
- [20] **Imai, T., Sakiyama, K., Hirota, I., Omori, H., 1997:** *A Study of Impedance Analysis for an Induction Heating Device by Applying New Interpolation Method*, IEEE Transactions on Magnetics, Vol. 33, 2143-2146, 1997.
- [21] **Hazır, S., Doğanay S., Yardibi H., 2009:** Arçelik Ar-Ge Tasarım Çalışmaları Notu, İstanbul
- [22] **Jain S., Agrawal P., 2010:** *Reduced Switching Loss PWM Technique for Three-Level Diode Clamped Inverter*, IEEE

ÖZGEÇMİŞ

Ad Soyad : Serdar Gökhan DOĞANAY
Doğum Yeri ve Tarihi : Bursa, 13.04.1985
Lisans Üniversite : Yıldız Teknik Üniversitesi
Adres : Tabaklar Mah. Kırış Sk. No:13/7 Merkez/BOLU