

İÇİNDEKİLER

	Sayfa
SİMGE LİSTESİ	v
KISALTMA LİSTESİ	vii
ŞEKİL LİSTESİ	viii
ÇİZELGE LİSTESİ	x
ÖNSÖZ	xi
ÖZET	xii
ABSTRACT	xiii
1. GİRİŞ	1
2. ENDÜKSİYONLA ISITMA SİSTEMLERİ	3
2.1 Giriş	3
2.2 Tarihsel Gelişimi	4
2.3 Endüksiyonla Isıtmada Temel Kavramlar	6
2.3.1 Elektromanyetik Endüksiyon	7
2.3.2 Eddy Akımları	10
2.3.3 Histerizis Kayıpları	12
2.3.4 Dalma Derinliği	12
2.3.5 Isı Transferi	14
2.3.5.1 Isı Transferi Aşamaları	15
2.4 Endüksiyonla Isıtmanın Diğer Yöntemlere Göre Üstünlükleri	15
2.5 Endüksiyonla Isıtmanın Kullanıldığı Alanlar	17
3. MUTFAK UYGULAMALARINDA ENDÜKSİYONLA ISITMA SİSTEMİNİN KULLANIMI ve BOBİN SEÇİMİ	18
3.1 Giriş	18
3.2 Mutfak Uygulamalarında Endüksiyonla Sisteminin Yapısı ve Üstünlükleri	18
3.3 Bobin Seçimi	19
3.3.1 Isıtma Bobini Tasarlanırken Göz Önünde Bulundurulması Gereken Önemli Faktörler	21
3.3.2 Pancake Bobin	22
3.3.2.1 Asimetrik Pancake Bobin	23
4. ENDÜKSİYONLA ISITMA SİSTEMLERİNDE KULLANILAN GÜÇ KAYNAKLARI	25
4.1 Giriş	25

4.2	Şebeke Frekanslı Sistemler	26
4.3	Motor Alternatör Sistemleri	27
4.4	Yarı İletken Kontrollü İnverter Sistemleri	28
4.5	Yüksek Frekanslı Sistemler	29
5.	ENDÜKSİYONLA ISITMADA YARI İLETKEN KONTROLLÜ İNVERTER SİSTEMLERİ	30
5.1	Giriş	30
5.2	Gerilim ve Akım Kaynaklı İnverterler	30
5.3	PWM (Pulse Width Modulation) İnverterler	32
5.3.1	Sinüsoidal PWM Tekniği	33
5.3.2	DC PWM Tekniği	34
5.4	Rezonans Devreli İnverterler	35
5.4.1	Seri Rezonans İnverterler	37
5.4.2	Paralel Rezonans İnverterler	39
5.4.3	E Sınıfı Rezonans İnverterler	41
5.5	PWM ve Rezonans İnverter Tekniklerinin Karşılaştırılması	42
5.6	İnverterlerde Kullanılan Yarı İletken Anahtarlar ve Seçimleri	45
5.7	İnverterlerde Anahtar Kayıpları ve Anahtarı Koruma Teknikleri	48
5.7.1	Yumuşak Anahtarlama Teknikleri	50
5.7.1.1	Sıfır Gerilimde Anahtarlama	51
5.7.1.2	Sıfır Akımda Anahtarlama	52
6.	YARIM KÖPRÜ SERİ REZONANSLI İNVERTER DEVRESİNİN ANALİZ TASARIM ve SİMÜLASYONU	54
6.1	Giriş	54
6.2	Yarım Köprü Seri Rezonans İnverter Devresinin Çalışma Prensipleri	55
6.2.1	Yarım Köprü Seri Rezonans İnverter Devresinin Çalışma Frekansının Rezonans Frekansının Üstünde Olma Durumu ($f_s > f_r$)	57
6.3	Yarım Köprü Seri Rezonans İnverter Devresinin Analizi	59
6.4	Yarım Köprü Seri Rezonans İnverterli Endüksiyonla Isıtıcı Tasarımı	65
6.5	Yarım Köprü Seri Rezonans İnverter Devresi PSPICE Simülasyonu	68
7.	YARIM KÖPRÜ SERİ REZONANSLI İNVERTER ile MUTFAK TİPİ ENDÜKSİYON ISITMA UYGULAMASI	73
7.1	Giriş	73
7.2	Güç Devresi	73
7.3	Endüksiyon Bobini Dizaynı	74
7.3.1	Yüklü Bobin Parametrelerinin Hesabı	77
7.4	Kontrol Devresi	81
7.5	Mosfet Sürme Devresi	86
7.6	DeneySEL Çalışma Sonuçları	89
7.6.1	Rezonans Devresi Bobin Akımı ve Kondansatör Gerilimi	90
7.6.2	Sıfır Gerilimde Anahtarlama	91
7.6.3	Yarım Köprü Seri Rezonanslı İnverter ile Endüksiyonla Isıtma Sonuçları	92
7.7	Endüksiyonla Isıtma Sisteminin Verimi	94
8.	SONUÇLAR ve ÖNERİLER	96

KAYNAKLAR.....	98
ÖZGEÇMİŞ.....	101

SİMGE LİSTESİ

A	Yüzey alanı
B	Manyetik akı yoğunluğu
B_{max}	Manyetik akı yoğunluğunun maksimum değeri
c	Öz ısı
c_{Cr-Ni}	Krom-nikel malzemesinin öz ısısı
C	Kondansatör
C_f	Filtre kondansatörü
C_r	Rezonans devresi kondansatörü
C_p	Koruma kondansatörü
D	Diyot
di/dt	Akım yükselme hızı
dv/dt	Gerilim yükselme hızı
E	Endüklenen gerilim
F	Frekans
F_m	Manyetik itici kuvvet
f_p	Üçgen gerilimin frekansı
f_r	Rezonans frekansı
f_s	Anahtarlama frekansı
H	Manyetik alan şiddeti
I_g	Giriş akımı
I_L	Rezonans akımı
I_{Lmax}	Rezonans devresi akımının maksimum değeri
I_{Mmax}	Anahtar akımının maksimum değeri
I_{Meff}	Anahtar akımının efektif değeri
I_p	Primer sargı akımı
I_s	Sekonder sargı akımı
$I_{şrj}$	C_1 kondansatörünün şarj akımı
I_l	Kaynak akımı
i	Akım
$i_L(t)$	Rezonans devresi akımının anlık değeri
$\dot{I}_a$	Anahtar akımı
K_h	Malzeme özelliklerine bağlı histerezis kaybı katsayısı
l	Uzunluk
L	Endüktans
L_{DS}	Anahtara ait kaçak endüktans
L_r	Rezonans devresi endüktansı
m	Ağırlık
M	Mosfet yarı iletken anahtarı
N	Sarım sayısı
N_1	Primer sarım sayısı
N_2	Sekonder sarım sayısı
Q	Yarı iletken anahtar
Q_y	Yüklü kalite faktörü
Q_e	Isı enerjisi
P_A	Anahtarlama kayıpları
P_{AL}	Alınan güç
P_h	Histerizis kayıpları
P_l	İletim süresi boyunca oluşan güç kaybı
P_{ig}	İletime geçiş güç kaybı
P_K	Toplam güç kaybı

P_{KAPI}	Anahtarı tetikleyen sinyalin oluşturduğu güç kaybı
P_{SZ}	Anahtar yalıtımdayken sızıntı akımlarının oluşturduğu güç kaybı
P_V	Sisteme verilen güç
P_{yg}	Yalıtıma geçiş güç kaybı
R	Direnç
R_{min}	Minimum direnç değeri
R_p	Paralel direnç
R_{pot}	Ayarlı direnç
R_r	Rezonans devresi yüklü bobin direnci
t	Zaman
t_f	Yalıtıma geçiş süresi
t_i	İletimde kalma süresi
t_s	Anahtarlama periyodu süresi
t_r	İletime geçiş süresi
T_r	Rezonans periyodu
V	Gerilim
V_a	Anahtar gerilimi
V_{cc}	± 15 V kaynak gerilimleri
V_{Cp}	Koruma kondansatörü gerilimi
V_{Crmax}	Rezonans kondansatörü geriliminin maksimum değeri
$v_{Cr}(t)$	Rezonans kondansatörü geriliminin anlık değişimi
V_{Crtt}	Rezonans kondansatörü geriliminin tepeden tepeye değeri
V_{DS}	Anahtar drain-source gerilimi
V_{GS}	Anahtar gate-source gerilimi
V_{iletim}	İletim süresince oluşan kaçak gerilim düşümü
V_k	Kontrol sinyali gerilimi
V_{Mmax}	Mosfet anahtar geriliminin maksimum değeri
V_{rfrmax}	Referans gerilimin maksimum değeri
$V_{üçgmax}$	Üçgen gerilimin maksimum değeri
V_I	Giriş gerilimi
$v_I(t)$	Giriş geriliminin anlık değişimi
V_{Imax}	Giriş geriliminin maksimum değeri
V_{Irms}	Giriş geriliminin etkin değeri
X_C	Rezonans kondansatörü reaktansı
X_L	Rezonans bobin reaktansı
Z_r	Rezonans devresi giriş empedansı
Δt	İlk ve son sıcaklık arasındaki değişim
φ	Faz açısı
Φ	Manyetik akı
μ	Bağıl manyetik geçirgenlik katsayısı
μ_0	Boşluğun manyetik geçirgenlik katsayısı
μ_r	Malzemenin manyetik geçirgenlik katsayısı
η	Verim
ρ	Özgül direnç
δ	Dalma derinliği
ω	Açısal frekans
ω_r	Açısal rezonans frekansı
ω_s	Açısal çalışma frekansı

KISALTMA LİSTESİ

AC	Alternatif Akım
BJT	İki Kutup Jonksiyonlu Transistör (Bipolar Junction Transistor)
DC	Doğru Akım
EMI	Elektromanyetik Girişim (Electro-magnetic Interference)
GTO	Kapı Sönümlü Tristör (Gate Turn-Off)
IGBT	Yalıtılmış Kapılı İki Kutup Transistör (Insulated Gate Bipolar Transistor)
LED	Işık Yayan Diyot (Light Emitting Diode)
MCT	Metal Oksit Yarı İletken Kontrollü Tristör
MOS	Metal Oksit Yarı İletken (Metal Oxide Semiconductor)
MOSFET	Metal Oksit Yarı İletken Alan Etkili Transistör (Metal Oxide Semiconductor Field Effect Transistor)
PSPICE	Simulation Program with Integrated Circuit Emphasis
PWM	Darbe Genişlik Modülasyonu (Pulse Width Modulation)
RFI	Radyo Frekans Girişimi (Radio-frequency Interference)
SCR	Silikon Kontrollü Doğrultucu (Silicon Controlled Rectifier)
SI	Uluslararası Birim Sistemi
SIT	Static Induction Transistor
ZCS	Sıfır Akımda Anahtarlama (Zero Current Switching)
ZVS	Sıfır Gerilimde Anahtarlama (Zero Voltage Switching)

ŞEKİL LİSTESİ

Şekil 1.1	Mutfak uygulamalarında endüksiyonla ısıtma sistemi blog diagramı (Llorente vd., 2002)	1
Şekil 2.1	Endüksiyonla ısıtmanın temel çalışma prensibi (Durukan, 2007)	3
Şekil 2.2	(a) Transformatör ve (b) endüksiyonla ısıtma eşdeğer devreleri	6
Şekil 2.3	Manyetik alan oluşumu	8
Şekil 2.4	Akım ve manyetik akı yoğunluğu yönleri arasındaki ilişki (Tacer, 2004)	8
Şekil 2.5	Elektromanyetik endüksiyon oluşumu	9
Şekil 2.6	Eddy akımları	11
Şekil 2.7	Akım yoğunluğu ve dalma derinliği ilişkisi	13
Şekil 2.8	Yuvarlak bir demir parçada frekansın malzemenin merkezi ile yüzeyi arasındaki sıcaklık dağılımına etkisi (Sazak, 2006)	14
Şekil 3.1	Mutfak uygulamalarında endüksiyonla ısıtma sistemlerinin temel blog şeması	18
Şekil 3.2	Mutfaklarda kullanılan örnek bir endüksiyon ocağı	19
Şekil 3.3	Değişik şekilli, endüksiyonla ısıtma amaçlı çok sarımlı bobinler	20
Şekil 3.4	Endüstride kullanılan iki sarımlık bobin örneği	20
Şekil 3.5	Özel amaçlar için dizayn edilmiş bobin örnekleri	21
Şekil 3.6	Pancake bobinin ürettiği manyetik alanın sonucu tencerede oluşan eddy akımları (Wang vd., 1998)	23
Şekil 3.7	Ferit çubukların genel olarak yerleştirilme geometrisi (Köroğlu, 2002)	24
Şekil 4.1	Çeşitli endüksiyonla ısıtma alanlarında seçilen güç ve frekanslara göre güç kaynakları (Balbozan, 1984)	26
Şekil 4.2	Endüksiyonla ısıtma için bir inverter sistemi blog diyagramı	28
Şekil 5.1	Gerilim kaynaklı inverter modeli	31
Şekil 5.2	Akım kaynaklı inverter modeli	32
Şekil 5.3	Sinüsoidal PWM dalga çıkış biçimi	34
Şekil 5.4	DC PWM dalga çıkış biçimi	35
Şekil 5.5	Seri rezonans devresi	37
Şekil 5.6	Yarım köprü seri rezonans inverter devresi	37
Şekil 5.7	Tam köprü seri rezonans inverter devresi	38
Şekil 5.8	Paralel rezonans devresi	39
Şekil 5.9	Yarım köprü paralel rezonans devresi	40
Şekil 5.10	E sınıfı rezonans inverter (Öncü ve Sazak, 2006)	41
Şekil 5.11	PWM ve rezonans anahtarlama tekniklerince üretilen akım dalga formları (Çetin ve Sazak, 2004)	43
Şekil 5.12	(a) Yarı iletken anahtarın dalga şekilleri ve (b) meydana gelen güç kayıpları (Çetin ve Sazak, 2004)	48
Şekil 5.13	Sıfır gerilimde anahtarlama konfigürasyonları (Bodur, 2007)	51
Şekil 5.14	Sıfır akımda anahtarlama için oluşturulan devreler (Bodur, 2007)	52
Şekil 6.1	Yarım köprü seri rezonans inverter devresi	55
Şekil 6.2	Yarım köprü seri rezonans inverter anahtarlama sinyalleri (Çetin, 2005)	57
Şekil 6.3	Rezonans frekansının üstündeki çalışma durumuna ait dalga şekilleri (Kazimierczuk ve Czarkowski, 1995)	58
Şekil 6.4	Yarım köprü seri rezonans inverterde rezonans akımının dalga şekli	59
Şekil 6.5	M_1 anahtarının iletim, M_2 anahtarının yalıtımda olma durumu	60
Şekil 6.6	Her iki anahtarın yalıtım, D_2 diyotunun iletimde olma durumu	62
Şekil 6.7	M_2 anahtarının iletim, M_1 anahtarının yalıtımda olma durumu	63
Şekil 6.8	Her iki anahtarın yalıtım, D_1 diyotunun iletimde olma durumu	64
Şekil 6.9	Yarım köprü seri rezonans inverterin PSPICE ortamında oluşturulması	69
Şekil 6.10	Rezonans akımı dalga şekli ve maksimum değeri	70
Şekil 6.11	Kontrol sinyalleri dalga şekilleri	71

Şekil 6.12	Sıfır gerilim anahtarlamaı gösteren dalga şekli	71
Şekil 6.13	Rezonans kondansatörü gerilimi dalga şekli ve tepeden tepeye değeri	72
Şekil 7.1	Bir fazlı yarım köprü seri rezonans inverter devresi.....	74
Şekil 7.2	Tasarımda ferit çubukların yerleştirilme geometrisi.....	75
Şekil 7.3	Dizayn edilen asimetric pancake bobin	76
Şekil 7.4	Seçilen mutfak kabı, izolatör ve ferit çubuklarla birlikte bobin sistemi.	76
Şekil 7.5	(a)Yüklü ısıtma bobini ve (b) eşdeğer devresi (Llorente vd., 2002).....	77
Şekil 7.6	Bobinin endüktans ve direncinin belirlenmesi için kullanılan paralel rezonans devresi	78
Şekil 7.7	150x150 mm yüklü asimetric bobin için rezonans kondansatörü gerilimi (Volt/div=200 mV, Time/div=10 µs).....	78
Şekil 7.8	250x250 mm yüklü asimetric bobin için rezonans kondansatörü gerilimi (Volt/div=200 mV, Time/div=25 µs).....	79
Şekil 7.9	Kontrol ünitesinde (a) gerçekleştirilen devre şeması, (b) kontrol kartı.....	82
Şekil 7.10	TL082 entegresi blok diyagramı.....	83
Şekil 7.11	Kontrol sinyalleri (Volt/div=5 V, Time/div=10 µs)	85
Şekil 7.12	TLP250 (a) prensip devre şeması, (b) gerçekleştirilen sürücü devresi.....	87
Şekil 7.13	Tam yüklü durumda TLP250 sürücülerinden elde edilen tetikleme sinyalleri (Volt/div=5 V, Time/div=10 µs).....	88
Şekil 7.14	Bir fazlı yarım köprü seri rezonans devreli inverter ve endüksiyon bobini sistemi	89
Şekil 7.15	Rezonans bobini akımı I_L (Volt/div=1 V, Time/div=25 µs).....	90
Şekil 7.16	Rezonans kondansatörü gerilimi V_{Cr} (Volt/div=10 V, Time/div=25 µs)	91
Şekil 7.17	M_2 anahtarına ait V_{DS} ve V_{GS} gerilimleri (CH1 Volt/div=20 V, CH2 Volt/div=10 V, Time/div=10 µs)	92

ÇİZELGE LİSTESİ

Çizelge 3.1 Metal malzemelerin özellikleri.....	23
Çizelge 6.1 Yarım köprü seri rezonans inverter devresi tasarım ve simülasyon sonuçları	72
Çizelge 7.1 Endüksiyon ısıtma bobini ve yük değişimine göre hesaplanan değerler	80
Çizelge 7.2 Yarım köprü seri rezonans inverter ile değişik yük modellerine ait sıcaklıklar....	93
Çizelge 7.3 Isıtma yüklerinden alınan güç değerleri	94
Çizelge 7.4 Isıtma yüklerine göre elde edilen su sıcaklıkları	94

ÖNSÖZ

“Rezonanslı Endüksiyonla Isıtma Sistemlerinin İncelenmesi ve Bir Uygulama Devresinin Gerçekleştirilmesi” başlıklı yüksek lisans tez çalışmamı teorik ve pratik olarak tamamlamış bulunmaktayım.

Tez çalışmalarım boyunca beni yönlendiren ve her türlü yardımı, desteği, güleryüzü esirgemeyen tez danışmanım ve hocam Yrd. Doç Dr. Hülya OBDAN’a öncelikle yürekten teşekkürlerimi sunarım.

İyi bir eğitim görmem için her türlü özveriye gösteren, her zaman maddi ve manevi yönden desteklerini esirgemeyen aileme ve Turgut BEBEK’e en içten teşekkürlerimi sunarım.

Bu çalışmanın her aşamasında fikir ve destekleriyle katkıda bulunan, emekleri geçen hocalarıma, Arş. Gör. Sevilay ÇETİN, Arş. Gör. İsmail AKSOY, Arş. Gör. Burak AKIN, Arş. Gör. Nihan ALTINTAŞ, Metin ÖZTÜRK, M. Nur GÜRCAN, Salih USTAMEHMETOĞLU, Zeynep TACAR ve tüm arkadaşlarıma teşekkürü bir borç bilirim.

REZONANSLI ENDÜKSİYONLA ISITMA DEVRELERİNİN İNCELENMESİ VE BİR UYGULAMA DEVRESİNİN GERÇEKLEŞTİRİLMESİ

ÖZET

Endüksiyonla ısıtma sistemleri endüstride, yüzey sertleştirme, ergitme, kaynak yapma, tavlama gibi oldukça geniş bir uygulama alanına sahiptir. Isıtma çeşidine göre çalışma frekansı 50 Hz ile birkaç MHz arasında değişmektedir. Son yıllarda mutfak uygulamalarında endüksiyonla ısıtma sistemlerinin kullanımı oldukça yaygınlaşmıştır.

Bu çalışmada endüksiyonla ısıtma sistemleri incelenmiş ve mutfak uygulamaları için bir endüksiyonla ısıtma sistemi tasarlanmış, elektronik benzetimi yapılmış ve uygulaması gerçekleştirilmiştir. Güç dönüştürücü devrenin ve endüksiyon bobininin verimini arttırmaya yönelik tedbirler alınarak sistem verimi yükseltilmiştir.

Yarı iletken anahtar olarak çalışma frekansına uygun MOSFET kullanılmış, güç dönüştürücü devre olarak seri rezonans devreli bir fazlı yarım köprü inverter topolojisi ile mutfak uygulamaları için endüksiyonla ısıtma sistemi gerçekleştirilmiştir. Sistemin güç kontrolü, anahtarlama frekansının 25-30 kHz aralığında değiştirilmesi ile yapılabilmektedir. Yüksek frekanslarda çalışmanın getirdiği anahtarlama kayıpları ve elektromanyetik girişimler, güç dönüştürücü devrenin rezonans inverter olma özelliği ve sert anahtarlama yerine yumuşak anahtarlama tekniklerinin kullanılmasıyla önlenmiştir.

Deneysel çalışmalarda farklı ebatlardaki yük modelleri üzerindeki sıcaklık değişimi incelenmiş ve endüksiyonla ısıtma sistemlerinin rezistanslı mutfak tipi ısıtıcıya göre daha yüksek verime sahip olduğu görülmüştür.

Anahtar Kelimeler : Mutfak tipi endüksiyon ısıtma, sıfır gerilimde anahtarlama, yarım köprü seri rezonans inverter, PSPICE.

Nihal KAYA

EXAMINATION AND DESIGN OF INDUCTION HEATING SYSTEMS WITH RESONANCE

ABSTRACT

The induction heating technique has a wide range of applications in industry including heating, melting, welding, soldering, and etc. It can be used in the range from 50 Hz to several MHz according to the heating type. In recent years, usage of induction heating technique on kitchen applications became more common.

In this study, induction heating system was examined, a home type induction heating system was designed, simulated and experimentally carried out. Some precautions were taken to increase the efficiency of the power converter and the induction coil.

A home type induction heating system was prepared via as semiconductor, a suitable MOSFET for operation frequency and as power converter circuit monophase serial resonant half bridge inverter topology has been used. Power control for the system, can be performed by adjusting the swithing frequency between 25-30kHz. Swithing losses and electromagnetic interferences caused by very high operation frequency, prevented by resonant inverter as converter and soft swithcing techniques.

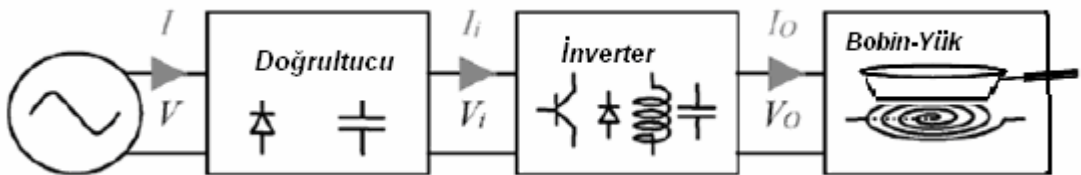
Keywords : Induction heating on domestic applications, zero voltage switching, half bridge series resonant inverter, PSPICE.

Nihal KAYA

1. GİRİŞ

Endüksiyonla ısıtma teknolojisi, kuvvetli bir elektro-manyetik alan içerisine konulan metal bir malzemenin üzerinde oluşan elektrik akımının, malzemenin iç direnci nedeniyle ısı açığa çıkarması prensibine göre çalışır. Günümüzde endüstri ve ev tipi uygulamalarda kullanımı giderek artmaktadır. Endüksiyon ocakları döküm sanayiinde en önemli ve en çok kullanılan eritme tesisleridir. Endüksiyonla ısıtma sistemleri endüstride daha çok ergitme, ısıtma, kaynak yapma, yüzey sertleştirme vb. uygulamalarda kullanılırken evlerde daha çok mutfaklarda kullanılan tencere, tava vb. pişirme kaplarının ısıtılmasında kullanılmaktadır. Klasik ısıtma sistemlerine göre temiz olması, işlem süresinin oldukça kısa olması, denetiminin kolay olması, çevreye ısı dağılımının olmaması, yüksek verimliliği ve yanma, patlama riski taşımadığı için güvenilir bir sistem olması, madde kayıplarının son derece düşük olması, tam otomatik üretime uygunluğu endüksiyonla ısıtma sistemlerinin yaygınlaşmasını sağlamıştır(Elfallah vd., 1987).

Bu çalışmada mutfak uygulamalarında kullanılabilecek yüksek frekanslı, düşük maliyetli bir ev tipi endüksiyon ısıtma sistemi tasarlanmıştır. Sistemde gerekli uygun frekansta, gerilim beslemeli yarım köprü seri rezonans inverter devrenin analizi, elektronik benzetimi yapılmış, deneysel sonuçları incelenmiş ve uygulaması gerçekleştirilmiştir. Endüksiyon bobini ve güç dönüştürücü inverter devresindeki kayıpları azaltmaya yönelik doğru bobin tipi seçimi, yumuşak anahtarlama gibi önlemler mutfak tipi endüksiyon ısıtıcıda uygulamaya geçirilerek sistem verimi arttırılmıştır. Sistemde kullanılan ısıtma amaçlı endüksiyon bobini mutfaklarda kullanılan tencere, tava vb. kaplara uygun olarak pancake bobin türünde tasarlanmış ve anahtarlama elemanı olarak MOSFET seçilmiştir. Anahtarlama kayıplarının azaltılabilmesi için, yarı iletken anahtarlara uygun kontrol sinyalleri ve sürücü devre tasarlanmıştır. Şekil 1.1’de sistemin blok diyagramı görülmektedir.



Şekil 1.1 Mutfak uygulamalarında endüksiyonla ısıtma sistemi blok diyagramı (Llorente vd., 2002)

AC giriş, tam dalga bir doğrultucu tarafından doğrultularak DC/AC bir inverter yardımıyla

yüksek frekanslı bir AC işarete dönüştürülür. Bu işaret tencerenin yapısıyla uygun bir şekilde tasarlanan pancake tipi endüksiyon bobinini besler. Bobindeki yüksek frekanslı değişken akım, bobin üzerindeki tencerede bir gerilim indükler. İndüklenen bu gerilimden dolayı oluşan Eddy akımları malzemenin ısınmasını sağlar.

Birinci bölümde, bu araştırma da tasarlanan sistemden kısaca bahsedilmiş ve tasarlanan sistem blok diyagramı üzerinde gösterilmiştir.

İkinci bölümde, endüksiyonla ısıtma sistemlerinin tarihsel gelişimi, endüksiyon ısıtmanın temel çalışma prensipleri, dalma derinliği, ısı transferi, endüksiyonla ısıtmanın diğer ısıtma yöntemlerine göre üstünlükleri ve uygulama alanları anlatılmıştır.

Üçüncü bölümde, mutfak uygulamalarında endüksiyon ocakları kullanılmasının avantajları ve mutfak uygulamaları için kullanılan bobin tipinin belirlenmesi anlatılmıştır.

Dördüncü bölümde, endüksiyonla ısıtma da kullanılan güç kaynakları anlatılmıştır.

Beşinci bölümde, temel DC/AC güç dönüşüm sistemleri tanıtılmış, çalışma prensipleri, inverterlerde kullanılan anahtarların özellikleri, anahtarlama kayıplarından ve bunları azaltma tekniklerinden sözedilmiştir.

Altıncı bölümde, tasarlanan endüksiyon ısıtma sistemi için seçilen yarım köprü seri rezonans inverter devresinin çalışma prensibi, analizi ve dizaynı üzerinde durulmuştur ve PSPICE programı ile simülasyonu yapılmıştır.

Yedinci bölümde, laboratuvar ortamında gerçekleştirilen yarım köprü seri rezonans inverterin güç ve kontrol devresi, bobin-yük eşdeğer devresi ve bobin dizaynının nasıl yapıldığı anlatılmıştır. Alınan deneysel sonuçların değerlendirilmesi yapılmıştır.

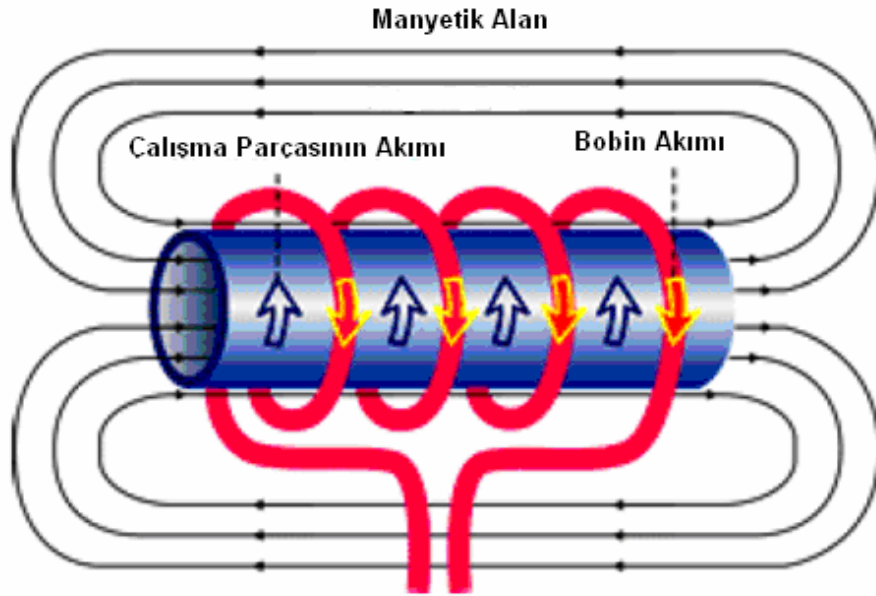
Sekizinci bölümde ise, sonuç kısmından bahsedilmiştir.

Dizayn edilen sistem yardımıyla mutfak uygulamalarında endüksiyonla ısıtmanın verimli olarak kullanılabileceği gösterilmiştir. Seri rezonans inverter yardımıyla anahtar kayıpları azaltılmış, manyetik parazitler engellenmiş, verimli, temiz ve güvenli bir sistem elde edilmiştir.

2. ENDÜKSİYONLA ISITMA SİSTEMLERİ

2.1 Giriş

Endüksiyonla ısıtma temel olarak elektrik enerjisinin ısı enerjisine dönüştürülmesidir. Diğer ısıtma yöntemlerinden farkı ise, ısıtılacak parçanın dışında değilde içinde, endüksiyon yolu ile oluşturulmasıdır. Bu sebeple ısıtılacak parça metal olmalıdır. Isıtılan parça ve bobin manyetik alan yoluyla birleştirilmiştir (Sazak, 2006). Endüksiyon bobininden uygun frekansta geçen alternatif akım, bobin etrafında değişken bir manyetik alan meydana getirir. Bu manyetik alan içerisinde kalan, elektriksel olarak iletken olan çalışma parçasında bir gerilim indüklenir ve Şekil 2.1’de görüldüğü gibi, bu parçadan bobin akımına ters yönde eddy (foucoult) akımları geçer ve çalışma parçasının direncinden dolayı, parça içinde ısı açığa çıkar. Böylece çalışma parçası ve endüksiyon bobini arasında herhangi bir fiziksel temas olmadan, çalışma parçası ısıtılmakta ve erilmektedir. Isıyı endüksiyon akımı meydana getirdiğinden, bu işleme “Endüksiyonla Isıtma” denir.



Şekil 2.1 Endüksiyonla ısıtmanın temel çalışma prensibi (Durukan, 2007)

Endüksiyonla ısıtmanın temeli, değişken akım sonucu değişken manyetik alan, değişken manyetik alan sonucu oluşan elektromanyetik endüksiyon, elektromanyetik endüksiyon sonucunda çalışma parçası üzerinde indüklenen gerilimlerin oluşturduğu eddy akımları, eddy akımlarının parçanın direncine ve manyetik geçirgenliğine bağlı olarak oluşturduğu dalma derinliği etkisi ve bu akımların açığa çıkardığı ısıtının parça üzerindeki transferinin aşamalarıdır.

2.2 Tarihsel Gelişimi

Enerji, teknolojinin gelişimindeki en önemli etkenlerden biridir. Doğal enerji kaynakları, güneş, fosil (kömür, gaz, petrol, vb.), nükleer, rüzgar, hidrolik ve geotermal olarak ortaya çıkmaktadır. Bunlar geliştirilerek kimyasal, mekanik ya da termal enerji haline getirildikten sonra, enerjinin üretilmesi, taşınması ve denetlenerek kullanıcıya uygun hale getirilmesi için, bu enerjiler elektrik enerjisine dönüştürülmüştür. Elektrik enerjisinin diğer enerji türlerine kolay çevrilmesi, üretiminin kolay olması, tüketiminde fosil kaynaklı yakıtlar gibi çevreye zarar vermemesi, kontrollü ve çok çeşitli kaynaklardan elde edilebilmesi gibi bir çok üstünlüğü vardır (Cora ve Eroğlu, 1999). 1881 yılında Michael Faraday’ın elektrik ve mekanik enerjiler arasındaki ilişkiyi keşfine kadar sadece kimyasal yollarla elde edilen elektrik enerjisi, Ampere ve Bio’Savart gibi bilim adamları tarafından ortaya konulan elektrik ve manyetik alanlarla ilgili diğer çalışmalar sonunda, mekanik enerjiden elde edilmeye başlanmıştır (Tacer, 2004).

Elektrik enerjisinin kullanımı, içinde bulunduğumuz yüzyılda, özellikle hassas ısı kontrolünün önemli olduğu çalışmalarda oldukça yaygınlaşmıştır. Elektromanyetik endüksiyon ile ısıtma, son yıllarda oldukça yaygınlaşan bir elektrik enerjisi ile ısıtma işlemidir. Endüksiyonla ısıtmanın dayandığı temel prensip, teorik düzeyde Michael Faraday’ın 1831 yılında Faraday Yasası olarak ileri sürdüğü elektromanyetik endüksiyondur. Buna göre, bir manyetik devredeki primer sargıdan yönü ve şiddeti değişen bir akım geçirildiğinde, kapalı bir sekonder sargıda yine değişken bir akım oluşur. Faraday’dan sonra Lenz ve Neumann’ın bu konudaki çalışmaları ile elektromanyetik endüksiyonun teorik gelişimi başlamıştır (Balbozan, 1984). Ancak endüksiyonla ısıtma için yeterli güç kaynaklarının bulunmamış olması nedeniyle teorik prensiplerin uygulamaya geçmesi mümkün olmamıştır (Altıntaş, 1990).

Foucault’un Eddy (Foucault veya girdap) akımları üzerine 1968 yılında çalışmaları olmuştur. İlk yazılı eser, Heaviside tarafından 1884 yılında yayınlanan “The Induction of Currents in Cores” başlıklı makaledir. Bu makalede, bobinde oluşan elektromanyetik endüksiyon ile nüveye enerji iletilmesi anlatılmıştır (Çetin, 2005). Sonrasında Thomson’un yapmış olduğu çalışmalar ile elektromanyetik endüksiyon, endüstride de bir alternatif olarak görülmeye başlanmıştır.

Endüksiyon ocakları ile ilgili ilk patent 1897’de İngiltere’de Ferranti tarafından alınmıştır. Bulunan bu ocak tipine, metal bobinin dışına konduğu için “halka” veya “nüveli”ocak denilmiştir. Ticari ilk uygulama ise 1900 yılında İsveç’te Gysimge’de Kjellin tarafından kurulan 80 kg kapasite ve 73 kW güçlü çelik ergitme ocağı olmuştur. Daha sonraları 1906’da

Essen (Almanya)'da Röchling Rodenhauser ocağı geliştirildi. Bu ocağın en önemli özelliği 750 kW'lık bir güç ve güç faktörünün daha iyi olacağı umularak 5 Hz gibi çok düşük bir frekans ile çalıştırılmasıydı. Düşük frekans sebebi ile özel, pahalı ve bakım güçlükleri fazla olan jeneratörlere ihtiyaç duyulması, endüksiyon ocaklarının bu aşamada en büyük problemi olmuştur.

Sonraki yıllardaki çalışmalar çoğunlukla çalışma frekansının arttırılmasına yöneliktir. 1916'da Ajax Metel Company'den Dr. G. H. Clamer, Leeds and Northrup firmasının kurucusu ve aynı zamanda Fizik Profesörü olan Dr. E. F. Northrup'tan bu konularda, temel prensiplerde herhangi bir yanlışlığın bulunup bulunmadığının araştırılmasını istemesi üzerine, Dr. Northrup çalışmaları sonunda, yüksek frekanslı ısıtma yönteminin en doğru yöntem olduğunu belirtmiştir.

Yüksek frekansın getirdiği problemler 1922'lere kadar devam etti. Buraya kadar kullanılan tek yüksek frekans donanımı telsiz telgraf alanında kullanılan ark çeviricisiydi. Dr. Northrup bu frekans yükselticisini birkaç yüz watt'lık bir güç ile kalay ergitiminde kullandı. Bu sistem basın tarafından ateşsiz ve telsiz bir fırının bulunduğu şeklinde duyuruldu. Fakat yapılan bu fırının endüstride çelik ergitiminde kullanılması için daha uzun yıllar gerekiyordu. Şebeke frekansından daha yüksek bir frekansta çalışmada karşılaşılan önemli problemlerden biri de kompanzasyonda kullanılan kondansatörlerin uzun ömürlü olmaması olmuş, bu problem daha sonraları General Electric'in geliştirdiği kağıt kondansatörler sayesinde çözülmüştür.

İlk orta frekans ergitme ocağı 1927 yılında Sheffield'da Electric Furnace Company tarafından gerçekleştirilmiştir. Bu tarihten sonra paslanmaz çelik üretimi ve özel alaşım hazırlanmasında sıcaklık kontrolü ve ısı dağılımının düzgün bir şekilde olması gibi birçok avantajından dolayı bu ocakların kullanımı büyük bir artış göstermiştir.

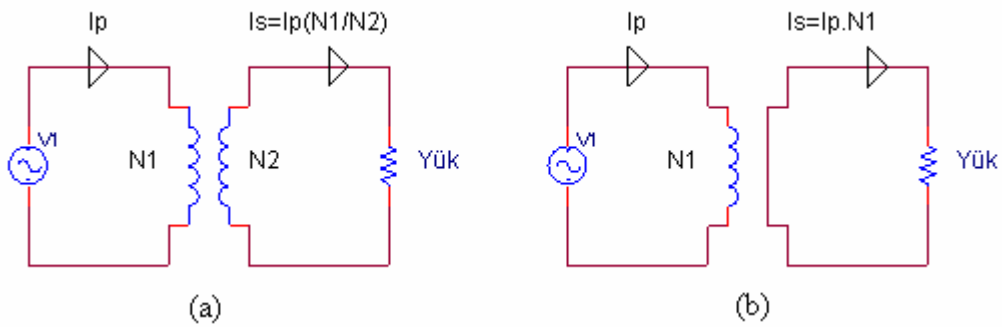
İkinci dünya savaşından sonra otomotiv endüstrisinin gelişimi elektromanyetik endüksiyon ile ısıtma işlemin önemini arttırmış, daha değişik uygulamaları için çalışmalar hızlandırılmış ve yüzey sertleştirme işlemleri için radyo frekansında ısıtıcılar geliştirilmiştir. Endüksiyonlu ısıtıcılar, ilk yıllarda yatırım maliyetleri açısından oldukça pahalı bir sistem teşkil etmişlerdir. Özellikle orta frekanslı ısıtıcılar olan motor-alternatör sistemleri, ilk yatırım maliyetleri ve periyodik bakım giderleri yönünden pahalı bir sistem olmuşlardır. Fakat 1966 yılından itibaren yarı iletken güç sistemlerinin geliştirilmesi ile endüksiyonla ısıtmada yeni bir devir başlamıştır. Endüksiyonla ısıtma da güç elektroniği sistemlerinden yararlanılması ekonomi ve işletme de kolaylık ve temiz uygulama alanları sağlamaktadır (Yıldırım ve Gülgün, 1988).

Endüksiyonla ısıtma sistemlerinin çalışma frekansı uygulama çeşidine göre alçak, orta veya yüksek frekans değerlerinde olabilir. Günümüzde MHz mertebesindeki frekanslara yaklaşılmıştır. Rezonans devreli inverterlerde, GTO ile 50 kHz'lere, IGBT ile 150 kHz'lere ve MOSFET ile MHz'lere ulaşan frekans değerleri elde edilmiştir (Bodur vd., 1993). Hızla ilerleyen gelişmeler sayesinde günümüzde 2 MW'a kadar çıkış gücü elde edilebilen inverterler gerçekleştirilebilmektedir.

Günümüzde mutfak uygulamalarında endüksiyonla ısıtma, temiz, güvenilir, verimli olması gibi birçok avantajından dolayı oldukça yaygınlaşmıştır. (Llorente vd., 2002), (Köroğlu, 2002), (Çetin, 2005), (Acero vd., 2006) vs. gibi araştırmacıların çalışmaları buna örnek gösterilebilir.

2.3 Endüksiyonla Isıtmada Temel Kavramlar

Elektromanyetik endüksiyonun temel teorisi, transformatörün çalışma prensibine dayanır. Şekil 2.2'deki iki eşdeğer devre arasındaki tek fark, endüksiyonla ısıtma modelinde sekonder sargı olmayışıdır. Şekil 2.2 (b)'de endüksiyon bobini primer sargıyı, çalışma parçası ise tek spirlik uçları kısa devre edilmiş sekonder sargıyı temsil etmektedir. Sekonder sargı iç direnci, çalışma parçasının öz direncinden oluşur ve ideal transformatör eşdeğer devresinde gösterilen yük direncinin yerini alır (Balbozan, 1984).



Şekil 2.2 (a) Transformatör ve (b) endüksiyonla ısıtma eşdeğer devreleri

İdeal bir transformatör de, primer ve sekonder akımlarının sarım sayıları ile ilişkisi aşağıdaki gibidir.

$$I_s = I_p (N_1 / N_2) \quad (2.1)$$

Burada N1 transformatörün primer sarım sayısını, N2 sekonder sarım sayısını, Ip primer akımını, Is sekonder akımını ifade etmektedir. Endüksiyonla ısıtma sistemlerinde

transformatörün sekonder sargısı tek bir spirden oluşur ve sekonder akımı aşağıdaki gibi hesaplanır.

$$I_s = I_p N_1 \quad (2.2)$$

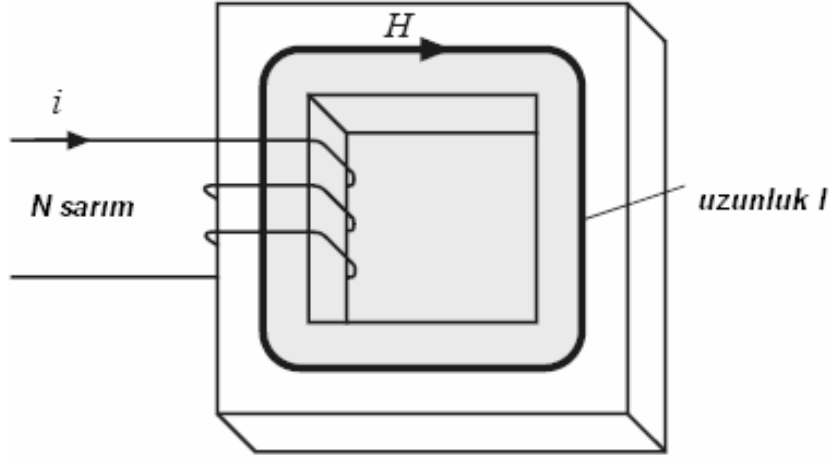
Bunun sonucu olarak, sekonder sargı akımı oldukça yüksek olur. Endüksiyon bobininin iç direnci ideal olarak sıfır kabul edildiğinden kaynaktan çekilen gücün tamamı çalışma parçasına aktarılır ve çalışma parçasında I^2R kayıpları ısı olarak açığa çıkar. Bu kayıplar endüksiyonla ısıtma sistemleri dışındaki çalışmalarda istenmeyen kayıplardır.

2.3.1 Elektromanyetik Endüksiyon

Elektromanyetik endüksiyonun temeli, Faraday, Bio'Savart ve Amper yasaları üzerine kurulmuştur. Faraday yasasına göre, bir manyetik alan içinde hareket eden ya da hareket etmeyen, ancak halkaladığı akısı zamanla değişen iletkenlerde bir gerilim meydana gelir. Bio'Savart yasasına göre ise, bir manyetik alan içinde akım taşıyan iletkenlere bir kuvvet etki eder.

Manyetik alan, elektrik yüklerinin hareketi sonucunda ortaya çıkan bir etkidir. Elektrik yüklü parçacıklar hareket halinde ise ortamda bir değişiklik meydana gelir. İşte bir bobinden değişken bir akım geçirildiğinde bobin etrafında manyetik kuvvet olarak ortaya çıkan bu değişiklik, manyetik alan olarak adlandırılır. Manyetik alan, doğrultusu, yönü ve şiddeti ile belirlenen vektörel bir büyüklüktür.

Elektrik akımı taşıyan bir iletkenin bulunduğu ortamda meydana gelen manyetik alan ile bu akım arasındaki fiziksel ilişki, manyetik alan şiddeti olarak tanımlanır. SI birim sisteminde metre başına amper olarak tanımlanır. Bir sistemde akımın varlığı, her zaman manyetik alan şiddetine sebep olur.

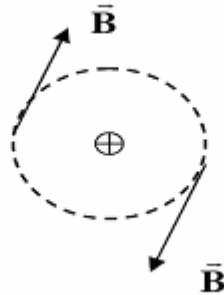


Şekil 2.3 Manyetik alan oluşumu

$$F_m = \int H \cdot dl = N \cdot i \quad (2.3)$$

Burada F_m manyetik itici kuvveti, H manyetik alan şiddetini, l uzunluğu, N sarım sayısını, i akımı ifade etmektedir. Bobinin sarım sayısı, manyetik alanın gücünde önemli bir etkindir. Her bir sarımdan geçen akımların meydana getirdiği manyetik alan birbirine eklenerek toplam manyetik alan güçlenir.

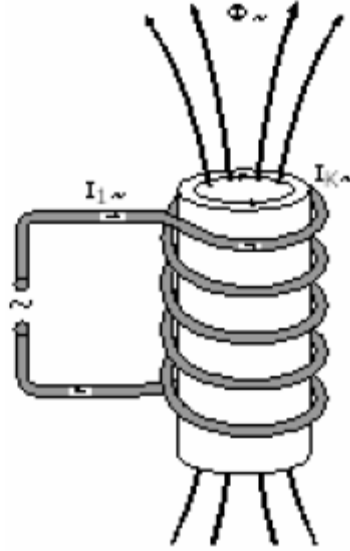
Bir manyetik alan içinde, birim yüzeyden geçen kuvvet çizgisi sayısı “manyetik akı yoğunluğu” olarak tanımlanır ve bir m^2 lik alan içerisindeki weber cinsinden akı olarak ifade edilir. Manyetik akı yoğunluğu, manyetik alanın yönünü de belirtir. Manyetik alanın yönü ise akım yönüne bağlıdır. Akım ve manyetik akı yoğunluğu vektörlerinin doğrultuları arasındaki ilişki, sağ el burğu kuralıyla belirlenir. Baş parmak akım yönünü göstermek üzere diğer parmakların doğrultusu, manyetik alanın ya da manyetik akı yoğunluğunun doğrultusunu gösterir.



Şekil 2.4 Akım ve manyetik akı yoğunluğu yönleri arasındaki ilişki (Tacer, 2004)

Manyetik akı yoğunluğu (2.4) ile ifade edilir. Burada μ bağıl manyetik geçirgenlik katsayısıdır.

$$B = \mu \cdot H \quad (2.4)$$



Şekil 2.5 Elektromanyetik endüksiyon oluşumu

Manyetik alanda, alınan belli bir yüzeyden geçen kuvvet çizgisi sayısı, manyetik akı olarak tanımlanır ve (2.5) ile ifade edilir. Burada A yüzey alanını ifade etmektedir.

$$\Phi = B \cdot A = \mu \cdot H \cdot A \quad (2.5)$$

Kapalı bir yüzeyde, bir alana giren akı çizgileri ile çıkanların birbirine eşit olması gerekmektedir. Bu özellik akının sürekliliği olarak isimlendirilir (Mohan vd., 1989)

Herhangi bir noktadaki manyetik akı yoğunluğu, (2.4)'te görüldüğü gibi manyetik alan şiddeti ile birlikte ortama da bağlıdır. Ortam, manyetik geçirgenlik olarak adlandırılan fiziksel bir büyüklükle belirlenir. Manyetik geçirgenlik, malzemenin akıyı iletme yeteneğidir.

Daha yüksek manyetik geçirgenlikli malzemelerden yapılmış cisimler üzerinde, büyük bir akı dağılımı oluşur.

$$\mu = \mu_0 \cdot \mu_r \quad (2.6)$$

$$\mu_0 = 4\pi 10^{-7} \text{ (Wb / At - m)}$$

Burada μ_r malzemenin manyetik geçirgenliğini, μ_0 ise boşluğun manyetik geçirgenliğini ifade

etmektedir.

Faraday yaptığı araştırmalar sonunda, tüm maddelerin manyetik alana bir tepki gösterdiğini ve bu tepki nedeniyle karşılıklı bir etkileşimin söz konusu olmasından dolayı maddelerin üç grupta toplanabildiğini göstermiştir.

- **Diamanyetik Maddeler :** Bağlı manyetik geçirgenlikleri $\mu_r < 1$ olan bu tür maddeler, güçlü bir manyetik alana dik şekilde kendilerini yönlendirirler. Radyum, potasyum, magnezyum, hidrojen, bakır, gümüş, altın ve su diamanyetik gruba giren maddelere örnektir.
- **Paramanyetik Maddeler :** Bağlı manyetik geçirgenlikleri $\mu_r > 1$ olan bu tür maddeler, güçlü bir manyetik alana paralel şekilde kendilerini yönlendirirler. Hava, alüminyum ve silisyum paramanyetik gruba giren maddelere örnektir.
- **Ferromanyetik Maddeler :** Demir, nikel, kobalt ve alaşımlarını içeren maddeler bu gruba girer. Bu maddelerin manyetik geçirgenlikleri birkaç bin seviyesindedir.

Ferromanyetik malzemelerde H alan şiddetindeki küçük bir değişim, B manyetik akı yoğunluğunda büyük değişikliklere neden olur. Dolayısı ile manyetik geçirgenlik ferromanyetik malzemelerde manyetik akı yoğunluğu H'nin belli bir değerine kadar sabit kalırken, bu değerden sonra doğrusallıktan ayrılır. Diamanyetik ve paramanyetik maddelerin bağlı manyetik geçirgenlikleri 1 civarındadır. Bu nedenle uygulamalarda her iki maddeler için $\mu_r = 1$ alınır (Tacer, 2004).

2.3.2 Eddy Akımları

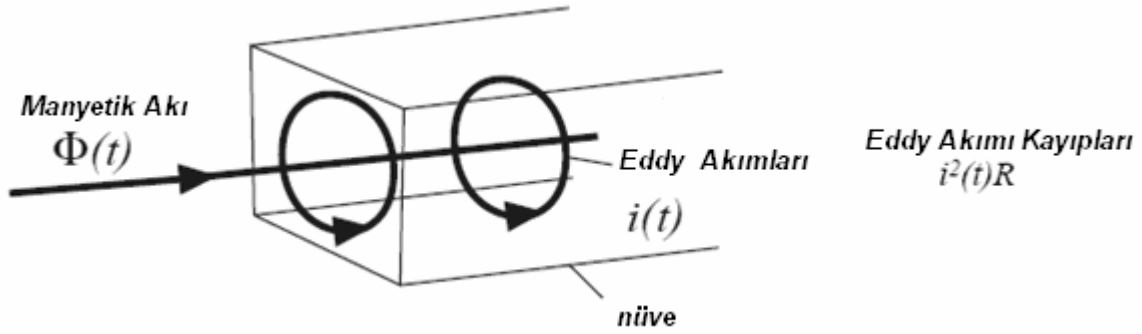
Girdap ya da Foucult akımları olarak da adlandırılan eddy akımları, alternatif akım ya da zamanla değişen manyetik alanların söz konusu olduğu durumlarda oluşur. İletken malzemeler içeren nüve elemanları, manyetik alan içerisinde kısa devre edilmiş iletken gibi davranırlar. Bu sebeple içerdikleri iletken malzemelerde bir gerilim indüklenir ve eddy akımları meydana gelir. Bunun sonucu olarak ortaya çıkan ısı motor, generatör ve transformatörlerde uzun yıllar boyunca istenmeyen bir durum olmuş ve azaltılması için çözüm yolları aranmıştır. Bu durumun avantaja dönüşmesi ve metallerin ısıtılmasında kullanılması fikri ilk kez Fransa, İsveç ve İtalya'da ortaya çıkmıştır.

Transformatör nüvesi düşünüldüğünde, nüve üzerindeki manyetik akı sekonder sargılarını keser ve sargılar üzerinde bir gerilim indüklenir, bu da transformatörün çalışmasını sağlar. Bu

gerilim (2.7)'deki gibi ifade edilir.

$$E = -\frac{d\Phi}{dt} (\text{volt}) \quad (2.7)$$

Akı akı iletimi ile sekonder sargılarda oluşan bu gerilimden dolayı eddy akımları meydana gelir ve sekonder sargıların R direnci üzerinde $I^2.R$ şeklinde ısı kayıpları oluşur.



Şekil 2.6 Eddy akımları

Eddy akımları, manyetik alanın frekansı yanında malzeme cinsi, yapısı ve boyutlarına da bağlıdır. Endüksiyonla ısıtmada iletken malzemenin ısıtılması büyük çoğunlukla eddy akımlarıyla sağlandığından, eddy akımlarını etkileyen çalışma frekansı, ısıtılan malzemenin iletkenliği, manyetik geçirgenliği, şekli ve kalınlığı gibi faktörler endüksiyonla ısıtma için son derece önemli faktörlerdir. Endüksiyonla ısıtma sistemlerinde ısıtılacak metal parça bobinin nüvesi gibi düşünülürse, parça üzerindeki eddy akımları nedeniyle $I^2.R$ kayıpları oluşarak çalışma parçası ısınır. Nüvenin ısınmasına neden olan bu kayıp, bobine seri eşdeğer bir direnç ile elektriki olarak temsil edilebilir (Öncü, 2005).

Eddy akımlarının izledikleri yolları tam olarak belirlemek mümkün olmadığı gibi izledikleri yol da düzgün değildir. Sadece malzemenin ısınmasına değil, aynı zamanda kendisini oluşturan alana ters yönde olacağından, manyetik alanın da zayıflamasına neden olurlar. Eddy akımları endüksiyonla ısıtma sistemleri dışında istenmeyen bir durumdur.

Eddy akımlarının sebep olduğu enerji kaybını azaltmak için hareketli iletken parçalar, yapraklar haline getirilir ve aralarına iletken olmayan malzemeler (vernük, metaloksit gibi) konur. Böylece birbirinden ayrılmış ince tabakalardan iletken parçalar oluşturulur. Bu katmanlı yapı eddy akımlarının yolları üzerindeki direnci artırır ve akım tek tek katmanlar içinde sınırlanır. Böyle katmanlı yapılar transformatörler ve motor gövdelerinin yapımında eddy akımlarını minimum hale getirerek cihazın verimini artırır (Tacer, 2004).

2.3.3 Histerizis Kayıpları

Endüksiyonla ısıtma temelde histerizis kayıpları ve eddy akımları (fuko) kayıplarından oluşur. Histerezis kayıplarının fuko kayıplarına göre önemi, çalışma frekansı, malzemenin manyetik geçirgenliği ve öz direncine bağlıdır. Histerezis kaybı malzemede moleküllerin frekansa bağlı olarak yön değiştirmesi sonucunda birbirleriyle sürtünmesi ile ısı şeklinde açığa çıkar (Köroğlu, 2002). Bu tür ısınma sadece malzemenin manyetik özelliklerinin bulunduğu aralıkta söz konusudur. Örneğin demir cinsi malzemelerde histerizis kayıpları sadece Curie noktasına kadar mevcuttur (Yıldırım ve Gülgün, 1988).

Histerezis kayıpları P_h için Steinmetz' in deneylerine dayalı tanımlaması,

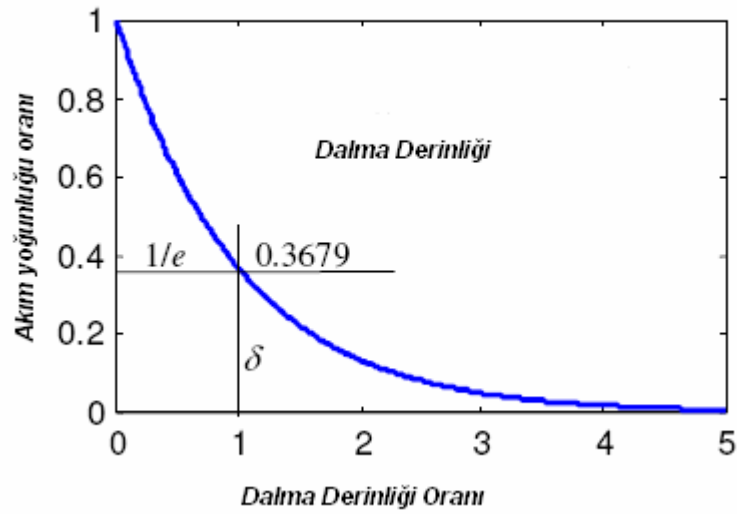
$$P_h = K_h \cdot f \cdot (B_{\max})^{1.6} \quad (2.8)$$

ile ifade edilir. Burada K_h malzemenin histerezis kaybı katsayısını, $B_{\max}$ akı yoğunluğunun maksimum değerini, f frekansı temsil etmektedir.

Genel ısı işlemlerde, histerezis kayıplarının katkısının fuko kayıplarına oranla çok düşük olması nedeniyle bir çok uygulamada histerizis kayıpları ihmal edilir. Yoğun manyetik alana maruz bırakılan demir, çelik, nikel vb. ferromanyetik malzemelerde histerezis ve eddy kayıpları oluşmaktadır. Ferromanyetik malzemelerde oluşan bu kayıplar ısıya dönüşmekte ve malzemenin çok hızlı bir şekilde ısınmasına yol açmaktadır (Yıldız ve Alan, 2006).

2.3.4 Dalma Derinliği

İçinden akım geçen bir iletkenin daha çok merkezi manyetik kuvvet çizgisi tarafından kesilir. Bu bölgede iletken, yüzeye yakın bölgeye kıyasla daha yüksek endüktansa ve bundan ötürü daha yüksek reaktansa sahip olur. Bu sebeple, akım iletken yüzeyine yakın bölgeden akar. Frekans arttıkça merkezdeki reaktans artacağı için akım yoğunluğunun dağılımı yüzeyden merkeze doğru üstel olarak azalacak şekilde olur ve merkezde akım akışı neredeyse sıfır olur. Bütün akımın malzeme yüzeyinden itibaren yüzeydeki yoğunlukla geçmesi halinde erişebileceği derinliğe “Dalma Derinliği” denir. Şekil 2.7’de görüldüğü gibi, diğer bir ifadeyle dalma derinliği, deri etkisi nedeniyle yüzeyden merkeze doğru azalan akım yoğunluğunun, yüzeydeki değerinin e^{-1} 'ine düştüğü derinlik değeridir ($e^{-1} = 0.368$).



Şekil 2.7 Akım yoğunluğu ve dalma derinliği ilişkisi

Şekil 2.7’den akımın yüzeydeki değerinin %37’sine düştüğü değerdeki derinliğin dalma derinliği olduğu anlaşılmaktadır. Endüksiyonla ısıtmada önemli bir büyüklük olarak, uygun frekansın belirlenmesini sağlayan dalma derinliği,

$$\delta = \sqrt{\frac{\rho}{\mu_0 \cdot \mu_r \cdot f_s \cdot \pi}} \quad (2.9)$$

bağıntısı ile tanımlanır. Burada ρ malzemenin özgül direncini, f_s çalışma frekansını ifade etmektedir.

Eşitlikten görüleceği gibi frekansın artması deri kalınlığını azaltır. Dolayısıyla yüksek frekanslarda dış yüzeydeki akım yoğunluğu artışı, bu bölgenin daha fazla ısınmasına sebep olur. Bu sebeple uygulamalarda en yüksek sıcaklığa en dış yüzeyin hemen altında ulaşılır (Sazak, 2006). Manyetik malzemelerde ayrıca mıknatıslanma kayıpları olduğundan, bu tür malzemelerin ısıtılması daha kolaydır. Ancak bu tür malzemeler curie noktasının üzerinde manyetik özelliğini kaybeder (Bodur vd., 1993). Curie noktasının üzerinde demir cinsi malzemeler manyetik özelliklerini kaybettiklerinden, daha öncesinde birkaç bin olan μ_r 1’e düşmektedir (Yıldırım ve Gülgün, 1988). Bu anda çalışma parçasının iç kısımları daha soğuk olduğundan manyetik özelliğini yitirmemiştir. Bu sebeple çalışma parçası içerisinde düzgün olmayan bir akı ve akım dağılımı meydana gelir.

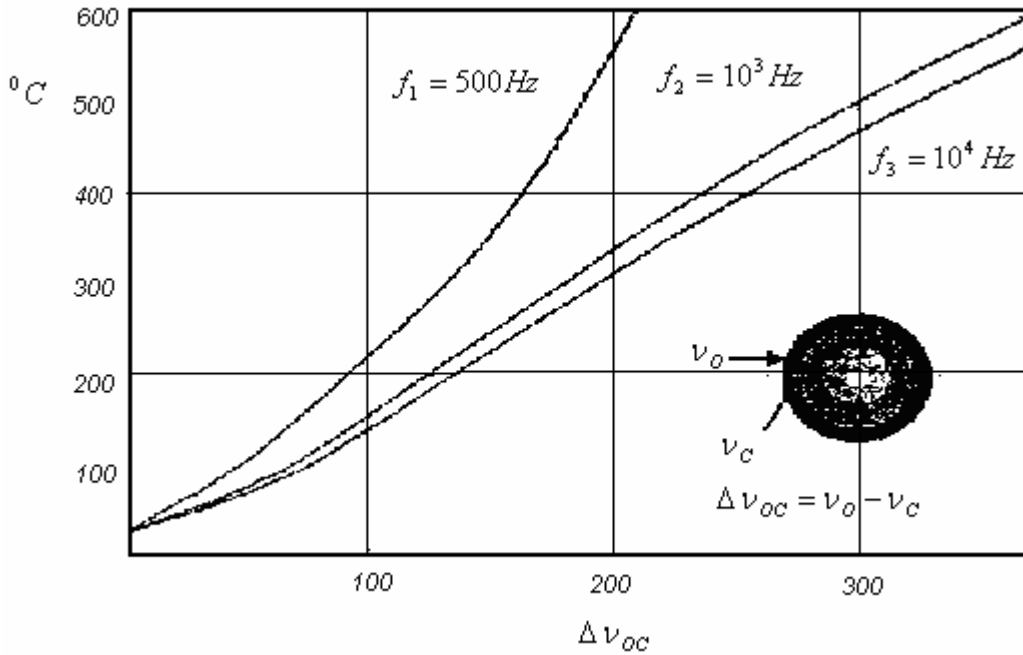
Frekansın yanında dalma derinliğini etkileyen faktörler, kullanılan malzemenin boyutları, manyetik geçirgenliği ve öz direncidir. Malzemenin öz direnci ve μ_r de büyük ölçü de

sıcaklığa bağlı olduğundan sıcaklığın ortalama değerinin alınması gerekir. Sıcaklık artışı ile beraber öz direnç katsayısı artmaya, manyetik geçirgenlik katsayısı ise azalmaya başlamaktadır. μ_r ayrıca demir cinsi malzemelerde alan şiddetine de bağlıdır.

Endüksiyonla ısıtma sistemlerinde, dalma derinliği özelliği dikkate alınarak değişik uygulama alanları geliştirilmiştir. Bu uygulama alanları daha çok eritme işlemlerinin yapıldığı kaynak frekanslı sistemler, kaynak yapma, ısıtma, küçük çaplı eritme, lehimleme gibi uygulamaların yapıldığı motor-alternatör ve statik inverter sistemleri, daha çok yüzey sertleştirme işlemlerinde kullanılan yüksek frekanslı sistemler olarak gruplandırılabilir (Çetin, 2005).

2.3.5 Isı Transferi

Isıtma süresi boyunca sıcaklık çalışma parçası üzerinde dengeli dağılmaz. Dalma derinliği içerisinde yüzeyin hemen altında en yüksek sıcaklık oluşur. Bunun sebebi, parça yüzeyinin ortam ile teması sonucunda bir miktar ısı kaybetmesidir. Şekil 2.8’de frekansın parçanın merkezi v_c ile yüzeyi v_o arasındaki ısı farkı Δv_{oc} ’ye etkisi görülmektedir.



Şekil 2.8 Yuvarlak bir demir parçada frekansın malzemenin merkezi ile yüzeyi arasındaki sıcaklık dağılımına etkisi (Sazak, 2006)

Şekil 2.8’de görüldüğü gibi yüksek frekanslar parçanın yüzeyi ile merkezi arasındaki ısı farkını arttırır. Dolayısıyla uygun frekans seçimi yüzey ile merkez arasındaki sıcaklık dağılımını hızla dengeler. Bu sebeple frekans seçimi çalışma parçasındaki sıcaklık

dağılımında en önemli faktördür.

2.3.5.1 Isı Transferi Aşamaları

Endüksiyonla ısıtma sistemlerinde ısı dağılımı üç aşamada ele alınabilir.

- **Geçiş Aşaması:** Parçanın yüzeyine enerji uygulandığında, parçanın yüzey sıcaklığı hızla yükselir ama parçanın diğer kısımları, ısısal geçiş oluşturup enerjiyi bir alt katmana itene kadar ısınmaz. Her bir tabaka yeterli sıcaklık yükselmesi sağlamadan diğer tabakaya ısı transfer etmez. Bu aşama bütün tabakalar kendi enerjisini depo edip diğer tabakaya yeterli ısı aktarana kadar devam eder.
- **Sabit Isı Yükselmesi:** Geçiş aşaması bittiğinde ısı tüm parça boyunca doğrusal şekilde yükselir. Yani watt/m^3 oranı sabittir.
- **Soğurma Zamanı:** Genellikle parçanın merkezi ile yüzeyi arasındaki sıcaklık farkı parçanın hemen kullanılabilmesi için çok yüksektir. Bu nedenle dengeli ısı dağılımı için zamana ihtiyaç vardır.

2.4 Endüksiyonla Isıtmanın Diğer Yöntemlere Göre Üstünlükleri

Endüstride ve mutfaklarımızda kullanılan ısıtma teknikleri ile karşılaştırıldığında endüksiyonla ısıtma yönteminin en önemli avantajı yüksek verimliliğidir. Buna sebep olan en önemli etken de, ısıtma işleminin yalnızca ısıtılacak parça üzerinde gerçekleşmesidir. Endüksiyonla ısıtmanın yüksek verimliliğinin yanında, endüstride yaygın olarak kullanılmasındaki avantajlardan bazıları aşağıda sıralanmıştır.

- Metallerin ısınma süresi çok kısadır. Klasik ısıtma da gün ve saat mertebelerinde oluşan ısı işlemler, endüksiyonla ısıtma sistemleri ile dakika ve saniye mertebelerinde meydana gelir. Isı doğrudan ısıtılacak tencere, tava içerisinde herhangi bir dış temas olmadan olduğu için, ısıtma hızı ve dolayısıyla ısıtma sisteminin verimi çok yüksektir. Bu nedenle birim zamanda yapılan iş fazladır. Bu ise işletme karlılığını artırır.
- Isıtma sırasında, ısı kaynağı ısıtılacak malzemeye doğrudan temas etmez. Klasik ısıtmada eriyen kısma ısı verilmeye devam edildiğinde malzeme yüzeyinde aşırı ısıdan zarar görme, cüruf oluşma, yanma, form değişiklikleri oluşması gibi etkiler görülür. Cüruf oluşması ısı iletimini zorlaştırır. Fırın kapağının sık sık açılması gerekir. Bu da ısınma olayını yavaşlatır. Bu sebeple kalite ve verim düşer.

- Isıtma veriminin yüksek olması enerji kullanım maliyetlerini düşürür. Bazı uygulamalarda enerji kullanımının %80'lere varan avantajları vardır.
- Isıtma hızı ve ısıtılacak bölge çok kolay kontrol edilebilir. Bu durum özellikle hassas uygulamalarda bir avantaj olduğu gibi, malzemenin işlem yapılmayacak kısımlarının gereksiz yere ısıtılmasını da engeller. Dolayısıyla malzemenin işlem yapılmayacak kısmında gereksiz ısıdan dolayı herhangi bir deformasyon oluşmaz.
- Isıtma derinliğini kontrol etmek mümkündür. Bütün parçayı ısıtmak yerine yüzeyin istenilen bölümleri ısıtılabilir. Uygulanacak frekansa bağlı olarak gerekli görüldüğü durumlarda malzemenin yüzeyinden istenen derinliğe kadar olan kısmın ısıtılması yapılabilir. Bu durum özellikle yüzey sertleştirme uygulamalarında bir avantajdır.
- Endüksiyonla ısıtma sırasında çalışma ortamına herhangi bir zararlı gaz veya madde yayılmaz. Ortam ve çalışan personel temiz kalır. Diğer fırınlarda kullanılan gazlar nedeni ile oluşan hava kirliliği oluşmaz.
- Endüksiyon fırınlarında, gücün yalnızca gerektiğinde ısıtma için kullanılması, sürekli fırın sıcaklığını koruma zorunluluğunun bulunmaması da önemli bir avantajdır.
- Ergitmede alaşımlar mükemmel şekilde karışır. Ayrıca eritilen maddeye yabancı madde karışmaz.
- Endüksiyon fırınlarında, fırın ısısının kontrolü çok kolay ve hassas bir şekilde gerçekleştirilebilir.
- Endüksiyonla ısıtma sistemlerinde, herhangi bir alev veya kızarmış bir rezistans olmadığı için bu sistemler yangın riski taşımaz.
- Gazlı ocaklarda kap ısınırken enerji dışardan verildiği için, bulunan ortam da ısınır. Endüksiyonla ısıtma sisteminde ise ısı direkt olarak kap içerisinde olduğu için ortama fazla ısı yayılmaz.

Endüksiyonla ısıtmanın dezavantajları da bulunmaktadır. Sistem maliyetinin yüksek olması, elektromanyetik parazitler üretmesi, denetim devrelerinin karmaşık olması bunlardan bazılarıdır. Ancak yüke göre uygun şekillendirilmiş bobin kullanılarak, uygun güç dönüştürücü devre ve anahtarlama tekniği seçilerek bu problemler azaltılabilir (Öncü, 2005).

2.5 Endüksiyonla Isıtmanın Kullanıldığı Alanlar

Günlük hayatta kullanılabilmesi için metallerin alaşım, lehim, kaynak, eritilme, sertleştirilme gibi çeşitli ısıtma işlemlerinden geçirilmesi gerekir. Bu ısıtma işlemlerinde yaygın olarak kullanılan yöntemlerden birisi de daha temiz, verimli, güvenli, hızlı olması gibi avantajlarından dolayı endüksiyonla ısıtma yöntemidir(Koertzen vd., 1992). Örneğin, sertleşebilen bir çelik malzeme, yüzeyinden itibaren istenen bir derinliğe kadar ısıtılıp, uygun ortamda soğutulularak sertleştirilebilir (Bodur vd., 1993). Endüksiyonla ısıtmanın en çok kullanıldığı alanları şöyle sıralayabiliriz.

- Yüzey sertleştirme
- Genel ısıtma
- Sıvı ısıtma
- Boya kurutma
- Lehim yapma
- Döküm
- Metal şekillendirme
- Metal tavlama / Gerginlik alma
- Bölgesel ısıtma
- Dövme
- Metal şerit ısıtma
- Kaynak yapma
- Dişli sertleştirme
- Genel sertleştirme
- Mutfak uygulamaları

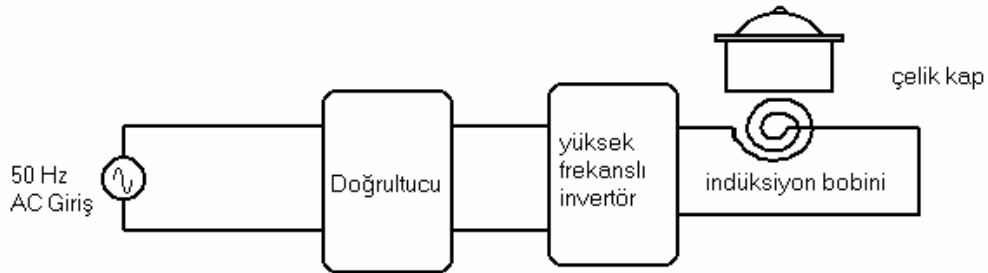
3. MUTFAK UYGULAMALARINDA ENDÜKSİYONLA ISITMA SİSTEMİNİN KULLANIMI ve BOBİN SEÇİMİ

3.1 Giriş

Endüksiyonla ısıtma sistemleri, 1970’li yıllardan itibaren mutfak uygulamalarında da kullanılmaya başlanmıştır. Sistem genel olarak güç kaynağı ve endüksiyon bobini olmak üzere iki kısımdan oluşur. Dolayısıyla her iki kısımda endüksiyonla ısıtma için uygun olarak dizayn edilmelidir. Günümüzde farklı tiplerde güç dönüştürücü devreleri, ısıtma bobinleri ve ısıtma kapları kullanarak, mutfak uygulamalarında endüksiyonla ısıtma üzerine birçok araştırma yapılmıştır (Öncü, 2005).

3.2 Mutfak Uygulamalarında Endüksiyonla Sisteminin Yapısı ve Üstünlükleri

Şekil 3.1’de görüldüğü gibi öncelikle 50 Hz frekanslı AC şebeke gerilimi doğrultulur ve yüksek frekanslı inverter sisteminin girişine uygulanır. Yarı iletken elemanlardan oluşmuş güç kaynağı bölümünden endüksiyon bobini için gerekli orta frekansta, zamanla yönü ve şiddeti değişen akım üretilir. Bobinden geçen değişken akımdan dolayı manyetik alan oluşur, bu sebeple bobin üzerindeki kap içerisinde gerilim indüklenir ve kap içerisinde, kap malzemesinin direncine bağlı olarak eddy akımları oluşur, bu akımlar da kabın ısınmasını sağlar. Kap malzemesi olarak genellikle demir ya da çelik kullanılır.



Şekil 3.1 Mutfak uygulamalarında endüksiyonla ısıtma sistemlerinin temel blok şeması

Endüstriyel alanda yüzey serleştirme, bölgesel ısıtma, metal şekillendirme gibi alanlarda kullanılan bir endüksiyonla ısıtma sistemi ile mutfak tipi uygulamalarda kullanılanlar arasında temel çalışma prensibi bakımından fark olmamakla beraber, çalışma frekansı, buna bağlı olarak kullanılan güç kaynağı, ısıtılacak malzeme türü, endüksiyon bobininin bu malzemeye göre şekli gibi faktörler göz önünde bulundurularak, bu faktörlerin mutfak uygulamaları için

endüksiyonla ısıtma sistemlerine göre belirlenmesi gerekir. Son yıllarda yarı iletken elemanlardaki gelişmeler, değişik bobin tasarımları ve mutfaklarda çelik kapların yaygın olarak kullanılması endüksiyonla ısıtma sistemlerini mutfak uygulamaları için son derece cazip kılmıştır. Özellikle Japonya ve Avrupa ülkelerinde, ev tipi pişirme ocaklarında endüksiyonla ısıtma ocakları yaygın olarak kullanılmaktadır (Forest vd., 2007)



Şekil 3.2 Mutfaklarda kullanılan örnek bir endüksiyon ocağı

Endüksiyonla ısıtma sistemlerinin mutfak uygulamaları için bazı avantajları,

- Isının sadece ısıtılacak kap üzerinde yoğunlaşması ve bu şekilde çevreye yayılan gereksiz ısı kaybının büyük ölçüde azaltılması,
- Isı sadece tencerede olduğu için endüksiyon ocaklarının dokunmaya karşı güvenli olması,
- Sistemin yüksek verimli, hızlı, güvenli olması,
- Yanıcı ya da patlayıcı gazlar olmadığı için yangın tehlikesinin olmaması,
- Çok sayıda ocağın bulunduğu büyük mutfaklarda, endüksiyon ocağında diğer ocaklara göre doğrudan açığa çıkan bir ateş olmadığı için ortamın gereksiz yere aşırı ısınmaması,
- Ocakların kolay temizlenebilir olması,
- Bakımının kolay olması.

3.3 Bobin Seçimi

Endüksiyonla ısıtma için yapılan bobin tasarımları ve bunların gelişimi, basit birçok endüksiyon geometrilerinden, geniş kapsamlı deneysel verilerden elde edilen bilgiler üzerine kurulmuştur. Endüksiyonla ısıtma sistemlerinin en önemli parçalarından biri bobin kısmıdır.

Bobin doğru dizayn edildiğinde, herhangi bir şekildeki çalışma parçasına uygulanabilir.

Bobin tasarımı, uygulamada gerekli olan ısıtma şekilleri, frekans ve gereken güç yoğunluğuna dayanır. Ayrıca üretim için kullanılacak malzeme taşıma teknikleri büyük ölçüde, hangi bobinin kullanacağını belirler. Eğer parça bobin arasına koyulacak, naklediciyle taşınacak veya arka arkaya itilecekse ya da bobin/ısıtma istasyonu kombinasyonu bir parça üzerine koyulacaksa, bobin tasarımı yapılırken uygun taşıma teknikleri göz önünde bulundurulmalıdır. Bundan dolayı özel uygulamalar için çeşitli özel bobin tasarımları geliştirilmiştir.



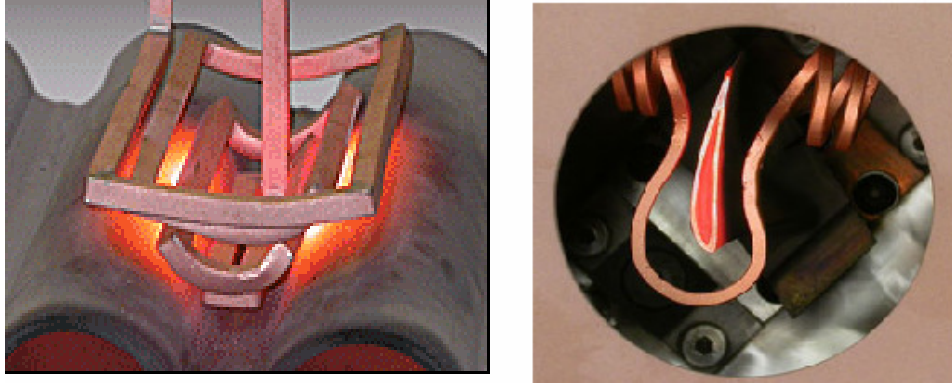
Şekil 3.3 Değişik şekilli, endüksiyonla ısıtma amaçlı çok sarımlı bobinler

Endüksiyonla ısıtma sistemlerinde kullanılacak bobin çeşidi çalışma parçasının geometrik yapısı, materyalin çeşidi, yapılacak işlem türü vb. faktörler gözönüne alınarak değişik tiplerde olabilirler. Bunlardan bazıları Şekil 3.3'te olduğu gibi yuvarlak, dörtgen, helisel ve pancake tipi bobinlerdir. Bunların yanı sıra bir ya da iki sarımlık bobinlerde mevcuttur. Bunlar daha çok bobin sarımının imkansız olduğu çalışma parçalarında ve genellikle yüzey sertleştirmede kullanılır.



Şekil 3.4 Endüstride kullanılan iki sarımlık bobin örneği

Endüstride bütün çalışma parçaları dairesel yapıda olmayabilir. Ya da parçanın belli bir bölümünde ısıtma yapılmak istenebilir. Şekil 3.5'te bu tip ısıtma için özel olarak dizayn edilmiş bobin örnekleri görülmektedir.



Şekil 3.5 Özel amaçlar için dizayn edilmiş bobin örnekleri

Parça şekli dikkate alınmadığı takdirde en yüksek verimli bobin standart daire şeklinde olanıdır. Bu sayede bütün akı yoğunluğu bobin merkezinde toplanır ve malzemeye aktarılan enerji maksimum olur.

Endüksiyonla ısıtmanın mutfak için olan kısmında, endüksiyon bobini tencerenin geometrisine uygun bir şekilde dizayn edilmelidir. Pancake bobinleri genellikle, sadece bir taraftan ısıtma gerekli iken ya da parçayı çevrelemenin imkansız olduğu durumlarda kullanılır. Mutfak uygulamalarında ısıtılacak olan tencere, tava, çaydanlık vb. mutfak kapları düz bir tabana sahip oldukları için en uygun bobin çeşidi pancake bobinlerdir. Bu çalışma mutfak uygulamalarında endüksiyonla ısıtmayı kapsadığı için, bobin çeşidi olarak pancake bobin tipi seçilmiştir.

3.3.1 Isıtma Bobini Tasarlanırken Göz Önünde Bulundurulması Gereken Önemli Faktörler

Endüksiyonla ısıtma da bobin, tasarım açısından oldukça önemlidir. Bir endüksiyonla ısıtma sisteminde verim, çalışma parçasında eddy akımlarından dolayı ısı olarak açığa çıkan gücün, bobin girişine verilen güce oranıdır. Dolayısıyla sistemin verimi, çalışma parçası üzerinde endüklenen akımın büyüklüğü ve dağılımı ile endüksiyon bobinindeki kayıplara bağlıdır. Bobin tasarımının temel görevi, çalışma parçası içerisinde istenilen sıcaklık dağılımının sağlanması ve istenilen sıcaklığa istenilen sürede ulaşılmasıdır.

Isıtma şekli endüksiyon bobini seçiminde oldukça önemlidir. Çalışma parçası bobinin içinde,

dışında ya da yakın çevresinde olabilir. Bobin ile çalışma parçası arasındaki mesafe sistem verimliliği ve güç faktörünü iyileştirebilmek için manyetik akı açısından oldukça önemlidir ve mümkün olduğunca az tutulmalıdır. Bobin tasarımında, çalışma parçasının konumuna göre seçim yapılır.

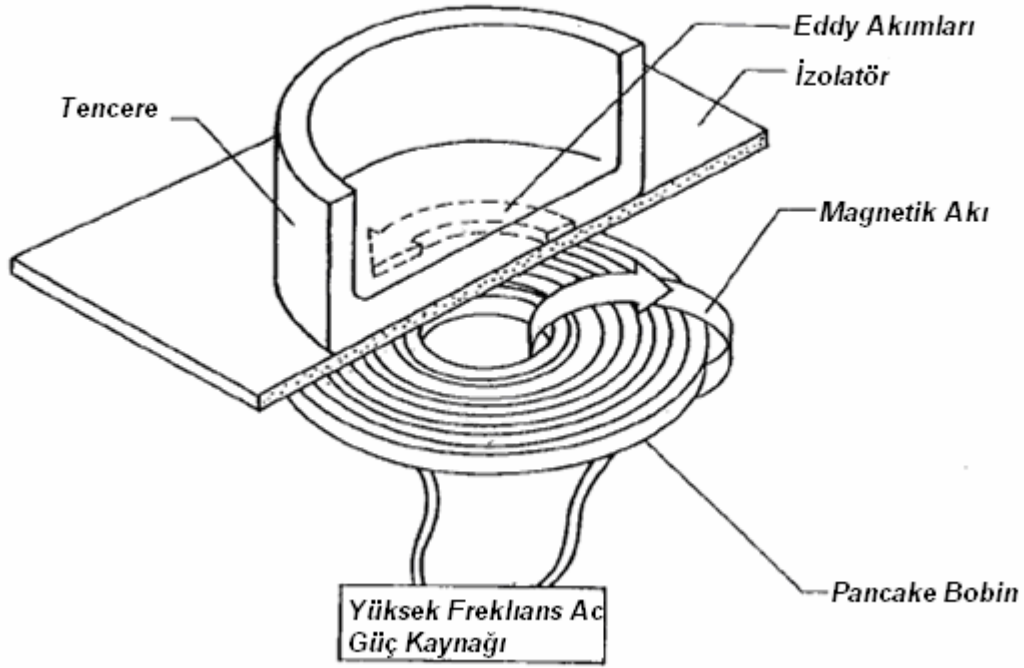
Manyetik akı bobin sargılarına yakın bölgelerde en fazladır. Sargılardan uzaklaştıkça akı yoğunluğu düşer. Bobin ile çalışma parçası arasındaki mesafenin artması, bobin ile çalışma parçası arasındaki manyetik bağı zayıflatacağı için verimi düşürür. Bundan dolayı, çalışma parçası mümkün olduğunca bobin sargılarına yakın olmalıdır. Fakat çalışma parçasının sıcaklığından bobinin zarar görmemesi için yeteri kadar mesafe bırakılmalıdır.

3.3.2 Pancake Bobin

Endüksiyonla ısıtmanın mutfak uygulamalarında kullanılan tipik pancake bobini-yük sistemi Şekil 3.6'da görülmektedir. Bu amaçla kullanılacak endüksiyon bobininin üç temel görevi bulunmaktadır.

- Üretilen enerjiyi bağlı bulunduğu güç devresinden manyetik alan yolu ile mutfak kabına transfer etmek,
- Manyetik alanın mümkün olduğunca mutfak kabının tabanında yoğunlaştırmak,
- İnverter için rezonans devresinin bir parçası olmak (Acero vd., 2005).

Genellikle yüksek akım ve yüksek ısının kullanıldığı endüksiyon ısıtma sistemlerinde bobin direncini düşürmek ve kayıpları azaltmak amacıyla bobinin soğutulması istenir. Bu amaçla içi boş olan bobin teli kullanılarak bobin içerisinden su geçirilir. Bu uygulama küçük güçlü olduğu için soğutma normal hava yoluyla sağlanmıştır.



Şekil 3.6 Pancake bobinin ürettiği manyetik alanın sonucu tencerede oluşan eddy akımları (Wang vd., 1998)

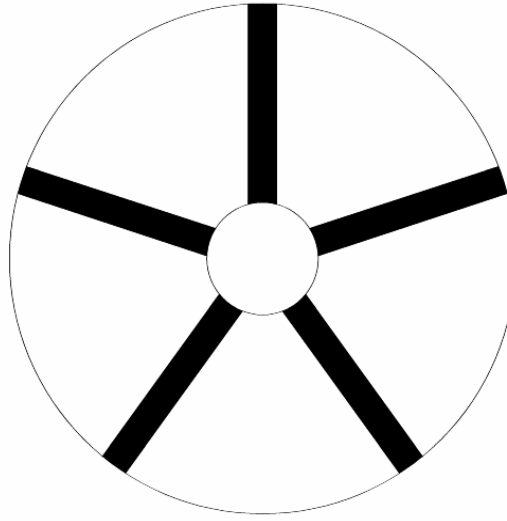
3.3.2.1 Asimetrik Pancake Bobin

Mutfak için kullanılan endüksiyon ısıtma uygulamalarında bobinin üzerine önce ısıya dayanıklı bir izolatör yerleştirilir. Daha sonra ısıtılacak kap izolatörün üzerine, merkezleri bobinle üstüste gelecek şekilde yerleştirilir. Bu şekilde tasarlanmış bobinlere simetrik bobinler denir. Simetrik bobinlerde bobin üzerinde oluşan değişken manyetik akı havaya dağılarak akı yoğunluğu azalır, dolayısıyla verim düşer. Bunu önlemek için genelde ferromanyetik (yüksek μ 'lü) malzemeler pancake bobinin alt kısmına yerleştirilir (Sazak, 2006).

Çizelge 3.1 Metal malzemelerin özellikleri

Malzeme	Bağıl manyetik geçirgenlik katsayısı (μ)
Ferit nüve	600
Paslanmaz çelik	100
Alüminyum	1
Bakır	1

Çizelge 3.1’de görüldüğü gibi ferit nüve malzemesinin bağıl manyetik geçirgenlik katsayısı oldukça yüksektir. Bobinin altına çubuk şeklinde ferit nüveler yerleştirilerek asimetric bir bobin yapısı elde edilir. Aynı boyutlarda asimetric bobinler simetric bobinlere göre daha fazla endüktans sağlar. Ferit nüveler sayesinde, bobin üzerinde oluşan değişken manyetik akı bobin üzerinde yoğunlaşır ve havaya dağılmasıyla oluşacak kaçak akılar azaltılır (Hernandez vd., 1999). Bobinde oluşan manyetik akı hava yoluyla devresini tamamladığından kaçak akı oranı artar. Ama ferromanyetik malzemeler manyetik akıya karşı çok küçük elektriksel direnç gösterirler ve bobinin bir tarafındaki manyetik akı yolunun direncini azaltarak, akının bobin üzerinde yoğunlaşmasını sağlarlar.



Şekil 3.7 Ferit çubukların genel olarak yerleştirilme geometrisi (Köroğlu, 2002)

Yüksek frekansla orantılı olarak kaçak akılar artacağından, ferromanyetik malzemeler 1 kHz ve üzerindeki frekanslarda kaçak akıların ve dolayısıyla eddy kayıplarının azaltılması için tercih edilmektedirler.

4. ENDÜKSİYONLA ISITMA SİSTEMLERİNDE KULLANILAN GÜÇ KAYNAKLARI

4.1 Giriş

Endüksiyonla ısıtma uygulamalarında ısıtma ihtiyaçlarını optimum şekilde karşılamak için pek çok farklı yapıda güç kaynağı üretilmiştir. Bazı ısıtma işlemi uygulamaları, frekans, güç seviyesi, bobin gerilimi/akımı ve güç katsayısını içine alan endüktör parametrelerine ihtiyaç duyar. Çalışma frekansı, çıkış gücü, yüksek verim, frekans denetiminin kolaylığı endüksiyonla ısıtma güç kaynağı için önemli parametrelerdir. Dalma derinliği üzerinde birincil etken olan frekans, uygulamaya göre seçilir. Güç devresini oluşturan elemanlar, bu frekansta yüksek güvenilirlikte sonuç almak için yeterli sınır değerlerinde çalışacak şekilde tasarlanmış olmalıdır. Sistemin kuruluş ve işletimi sırasındaki maliyetler de uygun güç kaynağı için son derece önemlidir (Akkaya ve Anadol, 2003). Endüksiyonla ısıtmada, malzemenin cins ve ebadı ile ısıtmanın amacına göre klasik olarak gerekli güç,

50 Hz’de doğrudan AC şebekeden

500 Hz’de frekans dönüştürücülerinden

1-10 kHz arasında motor-genaratör gurubundan

100 – 500 kHz arasında vakum tüpünden

elde ediliyordu. Endüksiyonla ısıtma sistemlerinde, kullanılacak malzemenin özelliklerine ve ısıtma işleminin amacına göre, 50 Hz’den 2 MHz’e kadar frekans değerlerinde güç kaynaklarına ihtiyaç duyulmaktadır. Son yıllarda yarı iletken güç elemanlarındaki sürekli ve hızlı gelişmeler sayesinde bu elemanlarla gerçekleştirilen statik güç kaynaklarının endüksiyonla ısıtma da kullanılması yaygınlaşmış ve günümüzde MHz’ler mertebesinde frekans değerleri elde edilebilmiştir (Bodur vd., 1993). Bu kaynaklar motor-alternatör sistemleri kullanılan güç kaynaklarının pek çok dezavantajını da ortadan kaldırır.

Endüksiyonla ısıtma sistemlerini ısının çalışma parçası üzerinde dağılımı açısından incelediğimizde, alçak, orta, yüksek olarak belirlenen frekans aralıklarına göre kullanılan değişik güç kaynaklarını şöyle sıralayabiliriz.

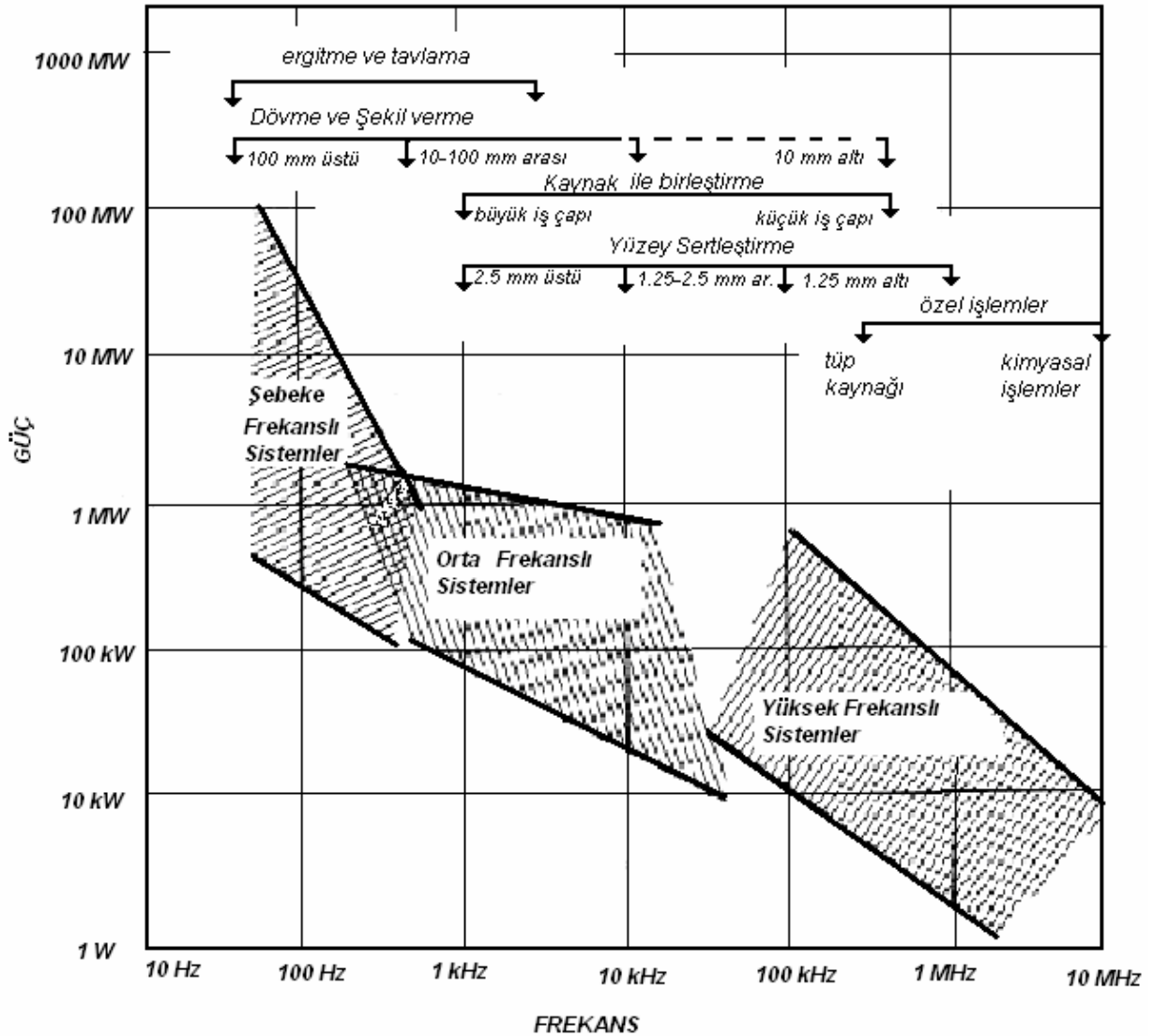
Şebeke frekanslı sistemler (50/60 Hz)

Motor-alternatör sistemleri (500 Hz – 10 kHz)

Yarı iletken kontrollü inverter sistemleri (500 Hz – 50 kHz)

Yüksek frekanslı sistemler (50 kHz – 10 MHz)

Endüksiyonla ısıtma sistemlerinde kullanılan güç ve frekans değerlerine göre seçilen güç kaynakları ve kullanım alanları Şekil 4.1’de görülmektedir .



Şekil 4.1 Çeşitli endüksiyonla ısıtma alanlarında seçilen güç ve frekanslara göre güç kaynakları (Balbozan, 1984)

4.2 Şebeke Frekanslı Sistemler

Bu tip endüksiyonla ısıtma sistemlerinde bobin doğrudan doğruya 50 Hz’lik şebekeden beslenir. Frekansın yükseltilmemesi, dolayısıyla güç kayıplarının düşük olması, kompleks elektronik elemanların olmayışı bakımından, ilk yatırım maliyetleri düşük, bakım onarım

masrafları da azdır. Bu sebeple endüstride geniş bir uygulama alanına sahiptir. Genellikle ısıtılacak hacmin büyük, ısıtma süresinin uzun ve talep edilen sıcaklığın düşük olduğu uygulamalarda tercih sebebidir. Öte yandan verim ve işlem hızı, yüksek frekanslı sistemlere göre düşüktür.

Çalışma frekansının düşüklüğü dalma derinliğini arttırdığı için 10 mm ile 100 mm arasında ısı dağılımı düzgündür. Dalma derinliğinin büyük olması ve ısı dağılımının düzgün olması sebebiyle şebeke frekanslı güç kaynakları, genel ısıtma alanında, büyük çaplı dövme ve ergitme ocaklarında kullanılırlar.

Endüksiyon bobininin sarım sayısı, çapı gibi özellikleri çalışma parçasına göre belirlenir. Bu sistemlerde bobin yeterli miktarda soğutulmalıdır. Bunu sağlamak için genelde bobinin içinden soğuk su geçirilir. Bu şekilde bobin direnci düşer ve verim yükseltilmiş olur.

4.3 Motor Alternatör Sistemleri

Çalışma frekansı 500 Hz - 10 kHz arasında olan sistemlerdir. Dalma derinliğinin daha az olmasını gerektiren küçük çaplarda çalışma ve hızlı ısıtma gibi sebepler yüzünden, kaynak frekanslı sistemler yetersiz kalmış ve daha yüksek frekanslara ihtiyaç duyulmuştur. Bu amaçla asenkron motorlar ile sürülen ve çalışma frekansları 500 Hz-10 kHz aralığında olan alternatörler kullanılmaya başlanmıştır. 500 kW civarındaki güçlere kadar tek motor-alternatör gurubu, daha büyük güçlerde birden fazla motor-alternatör grupları kullanılmaktadır. Orta büyüklükteki ergitme ocaklarında ve dalma derinliğinin 1 mm ile 10 mm arasında olması istenen küçük çaplı eritme, çalışma parçasına şekil verme gibi ısıtma işlemlerinde bu sistemler tercih edilmektedir.

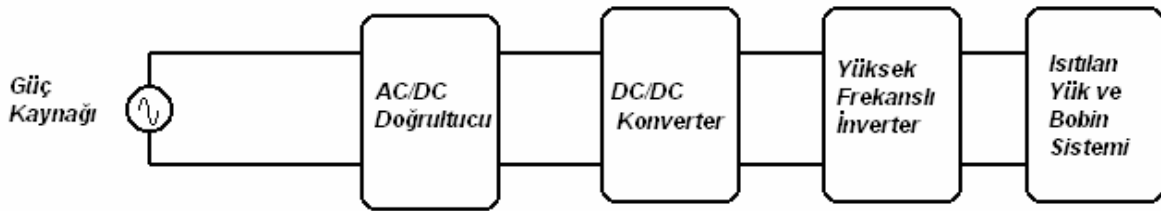
Motor-alternatör sistemleri hareketli parçalar (dönen makinalar) içerdiği için çok sık bakım ve onarım gerektirirler. Ayrıca gürültü yaptığı için çevreyi rahatsız ederler. İlk yatırım maliyetleri yüksektir. Özellikle orta frekansın üst bölgelerinde verim oldukça düşüktür. Sabit frekanslı olmaları nedeniyle güç faktörü düzeltme işlemi, çalışma anında güç faktörü gözlemlenerek kondansatörlerin devreye alınıp çıkarılmalarıyla sağlanır.

Bu sistemler, statik güç kaynaklarının gelişiminden önce, orta frekans uygulamaları için tek seçenek olarak görülmekteydi ama statik güç kaynaklarının kullanımı bu sistemlerin dezavantajlarını büyük ölçüde ortadan kaldırdığı için gittikçe yaygınlaşmış ve motor-alternatör sistemlerinin kullanımı da hızla azalmıştır.

4.4 Yarı İletken Kontrollü İnverter Sistemleri

İnverterler kısaca doğru akımı alternatif akıma çeviren DC-AC konverterlerdir. İnverterin görevi, girişindeki doğru gerilimi, çıkışında istenilen genlik ve frekansta alternatif gerilime dönüştürmektir. Çıkışta elde edilen gerilim ve frekans değerleri sistemin ihtiyacına göre sabit veya değişken olabilir.

Bu yüzyılın son çeyreğinde yarı iletken elemanların geliştirilmesi, daha önce anlatılan motor-alternatör sistemlerinin yerine statik inverterlerin kullanılmasını yaygınlaştırmıştır. Teknolojik gelişmelerle beraber, katı hal teknolojisinin getirdiği, daha verimli ve daha ucuz yarı iletken anahtarlar ile oluşturulan inverterler, zamanla motor-alternatör sistemleri ve manyetik frekans çoğullayıcılarının yerine geçmeyi başarmıştır. Az yer kaplamaları, sabit oldukları için sık bakım ve onarım gerektirmemeleri, değişen yük şartlarında çalışma frekansı değişimi ile kaynak-yük empedans uyumu sağlayarak sürekli maksimum güç iletme olanağı, güç kontrolünün kolay olması ve %90 verimin üzerine çıkılabilmesi inverterlerin temel avantajlarından olup, diğer güç kaynaklarına göre daha yaygın kullanılmalarını sağlayan belli başlı faktörlerdir (Balbozan, 1984, Çetin, 2005).



Şekil 4.2 Endüksiyonla ısıtma için bir inverter sistemi blok diyagramı

Şekil 4.2’de blok diyagramı verilen inverter sisteminde, ilk önce şebekeden alınan 50/60 Hz frekansında alternatif gerilim, AC/DC doğrultucu devresi yardımıyla doğru gerilime dönüştürülür. DC/DC konverter devresi de, bu gerilimi çalışma şartlarına göre ya düşürür ya da yükseltir. Konverter çıkışında elde edilen istenilen genlikteki doğru gerilim inverter sisteminin girişine uygulanır. İnverter çıkışında ise istenilen genlik ve frekansta AC gerilim ve akım elde edilir. Bu akım da endüksiyon bobinine uygulanır ve ısıtma işlemi gerçekleştirilir.

Statik inverter sistemlerinde frekans değişkendir, sistem frekansını kendiliğinden ihtiyaç duyulan değere ayarlar. Dolayısıyla ısıtma işlemi sırasında motor-alternatör sistemlerinde olduğu gibi kondansatörlerin devreye sokulup çıkarılmasına gerek yoktur. Fakat bunu

gerçekleştirebilmek için sistemde devreyi hızlı açıp kapatan anahtarlara ihtiyaç duyulur. İnverter sistemlerinde önceleri anahtar olarak sadece tristörler gerçekleştirilmekteydi. Fakat tristörlerin sönüm sürelerinin yaratacağı sorunlar ve komütasyon sorunu statik inverter sistemlerinde karşılaşılan belli başlı problemlerdi. Ancak günümüzde tristörlerle beraber, gelişen yarı iletken teknolojisi sayesinde BJT, GTO, MOSFET, IGBT gibi anahtarlama elemanları da kullanılmaya başlanmış ve bu anahtarlar sayesinde yüksek frekanslarda çalışabilen inverter sistemleri yapılabilmektedir. Anahtarlama elemanlarındaki gelişmeler sayesinde birçok inverter topolojisi geliştirilmiştir. Rezonans devreli inverterler bu topolojiler içinde en yaygın olanlarıdır. Frekansın yükseltilmesinde en önemli rolü, rezonans devreli inverterler oynamaktadır (Bodur vd., 1993)

Anahtarlama elemanlarının gelişimiyle inverter sistemleri, endüksiyonla ısıtma alanında yüksek frekansa bağlı olarak yüzey sertleştirme, küçük çaplı eritme, parçaya şekil verme, ısıtma, lehimleme, parçaların kaynak yapılması ve mutfak tipi uygulamalarında yaygın olarak kullanılmaya başlanmıştır.

4.5 Yüksek Frekanslı Sistemler

Endüksiyonla ısıtma da yüksek frekansta çalışmanın amacı, frekansa bağlı olarak dalma derinliğini azaltmak ve çalışma parçasının dış yüzeyini kısa sürede ısıtmaktır. Çalışma frekansı 50 kHz–10 MHz arasında olan sistemlerdir. Dalma derinliği 0.1 mm ile 1mm arasında değişmektedir. Metalin dış yüzeyi çok kısa sürede ısındığı için genel olarak eritme, yüzey sertleştirme ve belli bir noktanın kaynak yapımında tercih edilen sistemlerdir.

Şebeke frekansından MHz'ler mertebesindeki frekanslara ihtiyaç duyulmasının amacı, yüksek güç yoğunluğu ve hızlı bir şekilde metallerin dış yüzeylerinin ısıtılmasıdır. Geçmiş yıllarda yüksek frekanslı sistemlerde sadece vakum tüpleri kullanılmaktaydı. Fakat vakum tüpleri kısa ömürlü ve düşük verimlidir. Yarı iletken elemanlarındaki gelişmelerle beraber vakum tüpleri tek seçenek olmaktan çıkmış, günümüzde bunların yerine inverter sistemleri tercih edilmiştir. Yüksek verimlilik sağlayan inverter sistemleri sayesinde anahtarlama frekansları birkaç 100 kHz'e kadar çıkmıştır. Bu sistemlerde 100 kHz'lere kadar IGBT'ler, birkaç 100 kHz için ise MOSFET anahtarlama elemanları kullanılmaktadır.

5. ENDÜKSİYONLA ISITMADA YARI İLETKEN KONTROLLÜ İNVERTER SİSTEMLERİ

5.1 Giriş

Herhangi bir güç çevirme sürecinde güç kaybının çok az olması ve verimin yüksek olması iki nedenden dolayı önemlidir. Bunlar kayıp enerji bedeli ve enerji kaybı ile ortaya çıkan ısının yokedilme zorluğudur (Mohan vd., 1989). Endüksiyonla ısıtma sistemlerinde klasik enerji kaynaklarını kullanmak yerine, güç elektroniği sistemlerinden yararlanılması bakım, maliyet, işletme kolaylıkları ve iyi çevre şartları sağlamaktadır (Yıldırım ve Gülgün, 1988). Bu alanda ısıtma ihtiyaçlarını optimum şekilde karşılamak için pek çok farklı yapıda güç kaynağı dizayn edilmiştir. Çalışma frekansı ve çıkış gücü, endüksiyonla ısıtma sistemlerinde dizayn edilen güç kaynağı için iki temel parametredir (Akkaya ve Anadol, 2003). Temel olarak bir endüksiyonla ısıtma sisteminde, öncelikle AC şebeke gerilimi bir doğrultucu sistemi yardımıyla istenilen değerde DC gerilime dönüştürülür. Daha sonra inverter sistemleri bu DC gerilimi, istenilen gerilim ve frekans değerlerinde AC gerilime çevirir. İnverterlerin üreteceği dalgalının biçimi SCR, BJT, MOSFET IGBT gibi kullanılan yarı iletken elemanın karakteristiklerine ve bu elemanların kontrol sinyallerine bağlıdır. Ayrıca elemanları anahtarlama sırası da önemlidir.

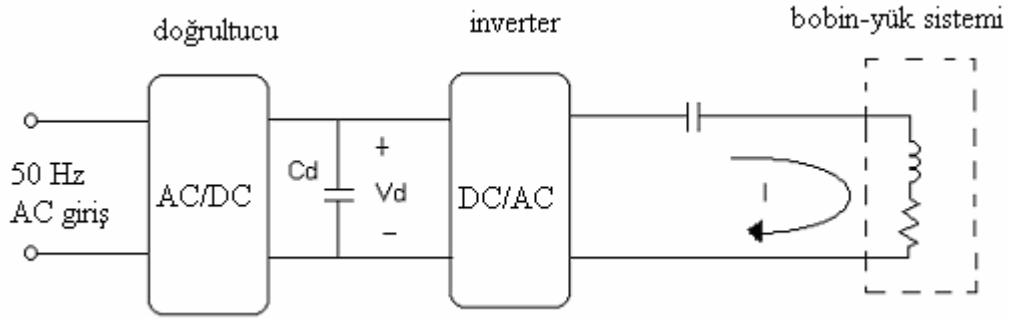
Genel olarak inverterler, değişken hızlı ac motor hız denetimi, endüksiyonla ısıtma güç kaynakları, ac gerilim regülatörleri, kesintisiz güç kaynakları gibi birçok endüstriyel uygulamalarda kullanılmaktadır. Endüksiyonla ısıtmada inverter frekansı endüksiyon ısıtıcının kurulma amacına göre belirlenir.

5.2 Gerilim ve Akım Kaynaklı İnverterler

Yarı iletken güç anahtarlarından oluşan statik inverterler, endüksiyonla ısıtma sistemlerinde geniş bir uygulama alanı bulmuştur. Genellikle güç kaynağı tiplerine göre gerilim kaynaklı inverterler ve akım kaynaklı inverterler olmak üzere ikiye ayrılırlar (Bodur ve Gülgün, 1989). Aynı zamanda tek fazlı veya üç fazlı olarak endüstride yaygın olarak kullanılmaktadırlar.

Gerilim kaynaklı inverter devrelerinde, doğru akım kaynağından alınan giriş gerilimi inverter devresi tarafından dalgalı bir çıkış gerilimine dönüştürülür. Dolayısıyla bu inverterlerin çıkış gerilimleri, her zaman doğru akım kaynağına bağlıdır. Şekil 5.1’de gerilim kaynaklı inverter modelinde görüldüğü gibi, giriş gerilimi bir doğrultucu tarafından doğrultulur ve C_d

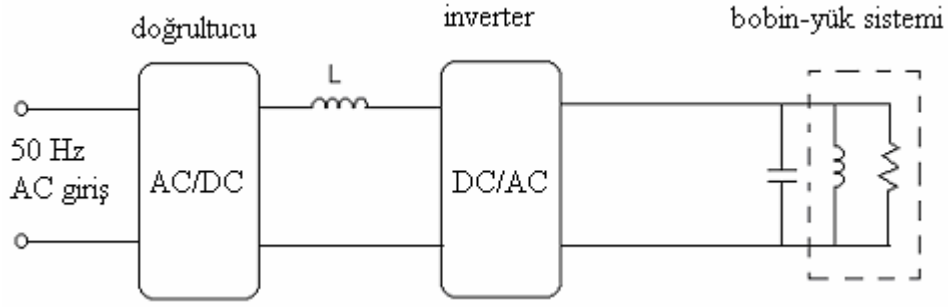
kondansatörü tarafından düzeltilerek invertere değişmez bir gerilim beslemesi sağlanır. Gerilim kaynaklı inverterlerin girişi, batarya veya kontrollü bir doğrultucu çıkışından elde edilen gerilim kaynağı da olabilir. Bu inverterlerde, çıkış gerilimi kare dalgadır. Çıkış geriliminin genliği giriş geriliminin genliği değiştirilerek ayarlanabilir. Bu tip inverterlerde giriş gerilimi yüke uygulanır ve anahtarların dönüşümlü olarak anahtarlama yapması sağlanarak yük üzerindeki akımın değişken olması sağlanır. Çıkış akımının dalga şeklini tamamen yükün özellikleri belirler (Bodur ve Gülgün, 1989).



Şekil 5.1 Gerilim kaynaklı inverter modeli

Anahtarlama elemanları olarak tristörler veya güç transistörleri kullanılmaktadır. Gerilim kaynaklı inverterlerin performansı, ilk başlarda tristörlerin hızlı bir şekilde yalıtıma geçememesi, ters toparlanma diyotlarının yavaş olması gibi sebeplerden dolayı çok fazla önemsenmemişti. Fakat günümüzde, gelişen yarı iletken teknolojisi ile tristörlerin yalıtıma geçme zamanı ve diyotların toparlanma süreleri geliştirilerek gerilim kaynaklı inverterler yeniden gündeme gelmiştir (Dawson ve Jain, 1991).

Akım kaynaklı inverterlerde ise yine doğru akım kaynağından alınan sabit ve sürekli giriş akımı inverter devresi tarafından değişken bir çıkış akımına dönüştürülür. Şekil 5.2’de böyle bir yapı görülmektedir. Burada giriş gerilim doğrultulduktan sonra yüksek değerli bir L endüktansı üzerinden invertere sabit ve sürekli bir akım kaynağı beslemesi oluşturulur. Akım kaynağı gerilim kaynağı ile sağlandığı için değişken değerli bir akım kaynağı elde etmek için, ayarlanabilir bir güç kaynağına ihtiyaç vardır.



Şekil 5.2 Akım kaynaklı inverter modeli

Bu inverterlerde, çıkış akımı kare dalgadır ve yük üzerindeki gerilim, yüke paralel bağlı bir kondansatör yardımıyla değişime zorlanır.

Güç dönüşüm sistemlerinde en yaygın olarak kullanılan inverter tipleri PWM ve rezonans inverterlerdir. Endüksiyonla ısıtma uygulamalarında, bir çok inverter topolojisi geliştirilmektedir. Bunlar arasında anahtar kayıplarının yok denecek kadar az olması ve elektromanyetik parazit yaymamaları gibi birçok avantaja sahip oldukları için rezonans inverterler en yaygın olarak kullanılanlarıdır (Wang vd., 1996). Bu çalışmada inverter sistemleri, PWM inverterler ve rezonans inverterler olmak üzere iki ana grupta incelenmiştir. Rezonans inverterlerde, gerilim kaynaklı seri rezonans inverterler, akım kaynaklı paralel rezonans inverterler ve E sınıfı rezonans inverterler olmak üzere üç alt grupta incelenmiştir.

5.3 PWM (Pulse Width Modulation) İnverterler

Günümüzde endüstrinin bir çok alanında kullanılan inverterlerin çıkış geriliminin bazı durumlarda kontrol edilmesi istenir. Bunun sağlanması için çeşitli teknikler kullanılır. Bu tekniklerden biri de Darbe Genişlik Modülasyonu (PWM) tekniğidir.

İnverterlerde çıkış gerilimi ayarlı olabilirken, bu iş ya sabit, ya da değişken frekansta yapılmaktadır. Değişken bir çıkış gerilimi, değişken bir DC giriş gerilim kullanılarak, inverter kazancının sabit tutulması ile elde edilebilir. Diğer bir yol olarak, eğer DC giriş gerilimi sabit ve ayarlanamaz ise, değişken bir çıkış gerilimi inverter kazancını değiştirerek elde edilebilir ki, bu genelde inverterin darbe genişlik modülasyonu kontrolüyle sağlanır. İnverter kazancı ise, ac çıkış geriliminin DC giriş gerilimine oranıdır (Mohan vd., 1989).

PWM de amaç ana kare dalga da darbeler oluşturmak ve bu darbelerin genişliğini değiştirmek suretiyle çıkış ana dalgasının temel bileşenini değiştirmektir. Çıkış frekansının kontrolü için inverterdeki elemanların faz değiştirme zamanlarının değiştirilmesi yeterli olacaktır. Yüksek

frekanslı harmoniklerin filtrelenmesinin daha kolay olmasından dolayı, anahtarlama frekansının mümkün olduğu kadar yüksek seçilmesi istenir. Burada tek bir sakınca vardır, eviricideki yarı iletken elemanların anahtarlama kayıpları, anahtarlama frekansıyla doğru orantılı olarak artacaktır. (Wang vd., 1996).

PWM inverterlerde çıkış gerilimi ve frekansı aynı anda inverterden kolayca ayarlanabilecektir. Çıkış geriliminin genliği bir periyot boyunca toplam iletim süresinin değiştirilmesi ile denetlenebilir. Darbe genişliğini sabit tutup darbe sayısını değiştirmekle ya da darbe sayısını değiştirmeyip darbe genişliğini değiştirmekle çıkış gerilimi kontrolü elde edilebilir.

PWM inverterlerde gerilim kontrolü, inverter çıkış gerilimi dalga şeklinin kontrolü ile sağlandığından, inverterlerin beslenmesi için girişinde kontrollu bir doğrultucuya gerek duyulmamaktadır ve giriş gerilimi sabittir. Son yıllarda PWM uygulamalarının büyük bir oranında IGBT'ler kullanılmaktadır. Ayrıca anahtarlama hızları yüksek olan güç transistörleri, MOSFET ve MCT gibi anahtarlama elemanları da kullanılmaktadır. Yüksek güçlü inverterlerde ise tristör ve GTO'lar kullanılmaktadır. Ancak bu elemanların hızları diğerlerine göre oldukça düşüktür.

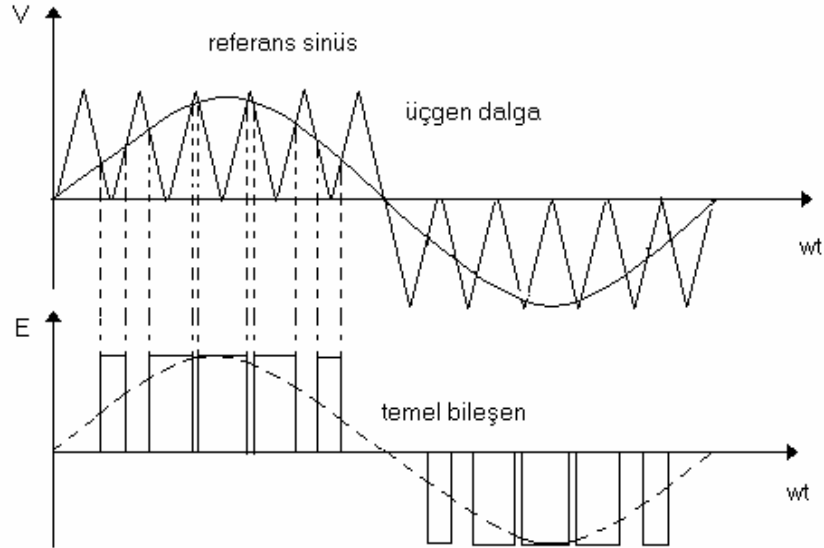
PWM, temel elektronik devre elemanlarıyla gerçekleştirildiği gibi son yıllarda gelişme gösteren mikro işlemciler yardımıyla da gerçekleştirilmektedir. Mikro işlemcilerin kullanılmaya başlandığı ilk yıllarda, referans sinyali mikro işlemciden sağlanıp, operasyonel amplifikatörlü bir devreyle elde edilen taşıyıcı sinyal ile karşılaştırılıyor ve PWM sinyali elde ediliyordu. Daha sonraki gelişmelerde PWM sinyallerinin açıları daha önceden hesaplanıp, bir hafıza elemanında toplandı ve mikro işlemci yardımıyla da PWM sinyali elde edilebildi. Mikro işlemcilerin hızlarının çok fazla artmasıyla bu hesaplama işlemi aynı anda yapılarak PWM sinyalleri elde edilmeye başlandı.

İnverter sistemlerinde darbe genişlik modülasyonu, sinüsoidal PWM ve DC PWM olarak ikiye ayrılır.

5.3.1 Sinüsoidal PWM Tekniği

İnverterlerde yarı iletken anahtarlama elemanlarının tetikleme anlarını belirlemek ve eş zamanlamayı sağlayabilmek için kullanılan yöntemlerden biri de Şekil 5.3'te gösterilen sinüsoidal PWM yöntemidir. Genel olarak PWM sinyalleri, yüksek frekanslı bir üçgen taşıyıcı gerilim ile düşük frekanslı genliği ayarlanabilen bir sinüsoidal kontrol gerilimi

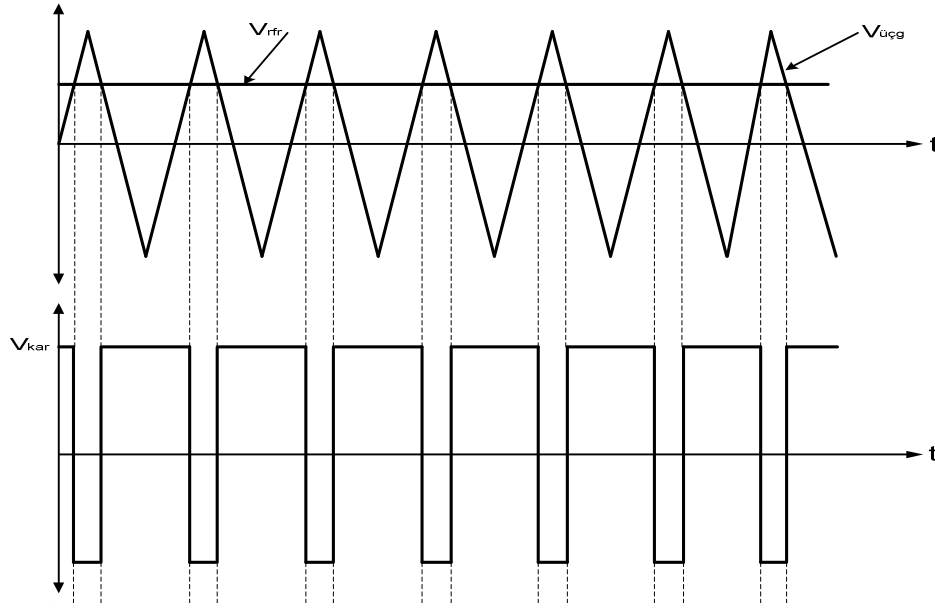
karşılaştırılarak elde edilir. Bu iki gerilimin çalışma noktaları, anahtarlama elemanlarının tetikleme anlarını belirler. İnverterin çıkış gerilimini azaltmak veya yükseltmek için referans sinüsün genliği azaltılır veya yükseltilir. Üçgen gerilimin frekansı ise inverterin anahtarlama frekansını belirler.



Şekil 5.3 Sinüsoidal PWM dalga çıkış biçimi

5.3.2 DC PWM Tekniği

DC PWM yönteminde prensip olarak bir üçgen ya da testere dişi gerilim ile bir DC gerilim karşılaştırılarak inverterlerde yarı iletken anahtarların kontrol sinyalleri oluşturulur. Kontrol gerilimi işareti gerçek çıkış gerilimiyle istenen çıkış gerilimi arasındaki farkın (hatanın) kuvvetlendirilmesiyle elde edilir. İnverterin çıkış gerilimini ayarlamak için referans DC gerilimin genliği azaltılır veya yükseltilir. Üçgen ya da testere dişi gerilimin frekansı ise inverterin anahtarlama frekansını belirler. Şekil 5.4'te görüldüğü gibi bu iki gerilimin çalışma noktaları, anahtarlama elemanlarının tetikleme anlarını belirler.



Şekil 5.4 DC PWM dalga çıkış biçimi

5.4 Rezonans Devreli İnverterler

Güç elektroniği devrelerinde bulunan endüktör, kapasitör gibi enerji depolama ve aktarma elemanları güç devrelerinde önemli ölçüde yer kaplar, sistem ağırlığının ve fiyatının artmasına neden olurlar. Güç kaynaklarının yüksek verime, uygun fiyata, daha küçük fiziksel boyutlarda ve daha hafif olmaları ile birlikte yüksek güç yoğunluğuna sahip olması ancak enerji depolama ve aktarma elemanlarının daha küçük olmasına bağlıdır. Bu ise ancak anahtarlama frekansının artırılması ile sağlanabilir. Fakat anahtarlama frekansı arttıkça anahtarlama kayıpları da artar. Bunun sonucunda ise anahtarlama konumunda çalışmanın ortaya çıkardığı sorunlar daha da büyür. Kayıpların artması sonucu yarı iletken anahtarlar aşırı sıcaklık sebebiyle yanabilir. Bu konuda yapılan çalışmalar, yarı iletken anahtarlardaki gelişmeler sonucu enerjinin aktarılması ve kontrolünün rezonans tekniğiyle yapılması ile bu tip sorunların ortadan kalktığını göstermiştir. Anahtar iletimden yalıtıma veya yalıtımdan iletme geçerken, anahtar akımı ya da gerilimi sıfır veya sıfıra yakın değerlerde iken anahtarlamanın gerçekleştirilebilmesiyle bu sorunlar en aza indirilebilir. Rezonans devreli inverterler sıfır akım veya sıfır gerilim anahtarlama durumlarının kullanımı ile gündeme gelmişlerdir ve yüksek frekanslarda da verimli çalışma olanağı sağlamışlardır. Bu yüzden rezonans inverterlerde kullanılan yarı iletken elemanlar, yüksek frekanslı diğer inverterlerde kullanılan yarı iletken elemanlara göre daha düşük iletim kayıplarına sahiptir ve endüksiyonla ısıtma sistemlerinde anahtarlama kayıplarının azaltılması için rezonans devreli inverterler

oldukça sık kullanılırlar (Başkurt, 1997, Monterde vd., 1999)

Yüksek frekanslarda çalışmanın sebep olduğu anahtarlama kayıpları, elektromanyetik gürültüler ve sert anahtarlama koşulları rezonans tekniği kullanılarak ortadan kaldırılabilir. Rezonans inverterlerin dönüştürücü kısmındaki yarı iletken anahtarlar, DC gerilim ya da akımdan rezonans devre tipine göre AC kare dalga gerilim ya da akım oluştururlar. Yarı iletken anahtarlı güç devresine bobin ve kondansatör elemanlarından oluşmuş rezonans devresinin eklenmesiyle rezonans devreli inverterler elde edilir. Yarı iletken anahtarların anahtarlama frekansıyla elde edilen kare dalga akım veya gerilim sinyalinin temel bileşeni rezonans tank devresi aracılığıyla yüke aktarılır. Rezonans elemanları yük akım ve geriliminin salınımlı olmasını sağlar. Arzu edilen harmonikleri temel bileşenlerden ayırmak için yaklaşık anahtarlama frekansına ayarlı bir rezonans L-C devresi kullanılır. Endüktör ve kondansatörler ile istenmeyen harmonik bileşenler temel dalga bileşeninden çıkarılır. Bu tür inverterlerde kaynak tarafında bulunan doğru gerilim, rezonanslı bir alternatif gerilime çevrilir. Rezonans inverterlerin avantajı kullanılan L-C devresinden kaynaklanmaktadır. Bu elemanlar filtre gibi davranarak, yüksek çalışma frekanslarında yaklaşık olarak sinüs dalga şeklinde çıkış verilmesini sağlarlar.

Rezonans devreli inverterlerin çalışma prensibinde bobin ve kondansatör elemanlarının birbiriyle etkileşimi sonucu rezonans olayı meydana geldiği için, bu devreler rezonans devreli inverterler olarak adlandırılırlar. Rezonans devresi kısmında seri veya paralel L-C devresi kullanılabilir. Rezonans inverterin çıkışı, anahtarlama frekansı ile rezonans frekansı arasındaki ilişkiye bağlıdır. Rezonans frekansını ayarlamak için, endüktans veya kapasitenin değerlerinin ayarlanması gerekir.

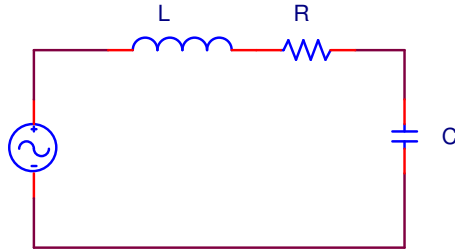
Rezonans devreli inverterler, radyo vericileri, fiber optiklerin üretimi, elektronik balastlar, endüksiyonla ısıtma uygulamaları, plastik kaynak yapmak için dielektrik ısıtma alanı ve daha birçok alanda kullanılmaktadırlar.

Endüksiyonla ısıtma uygulamalarında yüksek frekanslı güç kaynağı olarak yaygın şekilde kullanılan rezonans inverterler,

- Seri rezonans inverter
- Paralel rezonans inverter
- E sınıfı rezonans inverter olarak üç alt grupta incelenebilir.

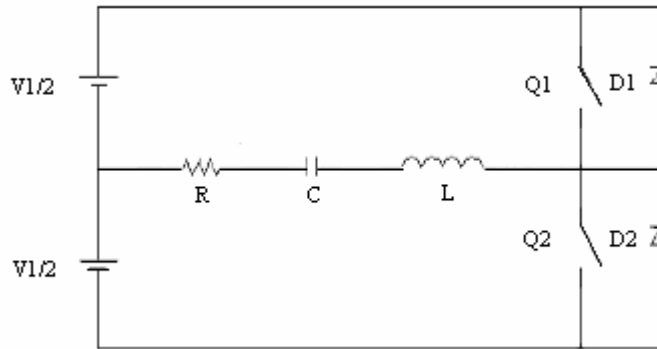
5.4.1 Seri Rezonans İnverterler

Şekil 5.5'te görüldüğü gibi seri rezonans devresi R-L-C elemanlarının birbirine seri bağlanması ile oluşturulmuştur. Endüksiyon bobini, rezonans endüktörü ve seri direnç olarak gösterilebilir.



Şekil 5.5 Seri rezonans devresi

Gerilim beslemeli seri rezonans inverterlerin girişinde büyük bir filtre kondansatörü ile, sağlanan sabit bir DC gerilim kaynağı, çıkışında ise seri bağlı rezonans yük devresi bulunur. Bu devrelerin giriş güç katsayısı yüksektir, geniş bir frekans aralığında kontrol edilebilmektedirler. Yüksek anahtarlama frekansından dolayı komütasyon elemanlarının boyutları küçüktür. Endüksiyonla ısıtma uygulamalarında yarım köprü seri rezonans inverter ve tam köprü seri rezonans inverter yapılarına sıkça rastlanmaktadır.



Şekil 5.6 Yarım köprü seri rezonans inverter devresi

Şekil 5.6'da bir yarım köprü seri rezonans devreli inverter görülmektedir. Burada iki eşdeğer kapasitör DC girişte aynı değerdedir ve her bir kondansatör üzerinde, giriş geriliminin yarısı kadar ($V1/2$) gerilim oluşmaktadır.

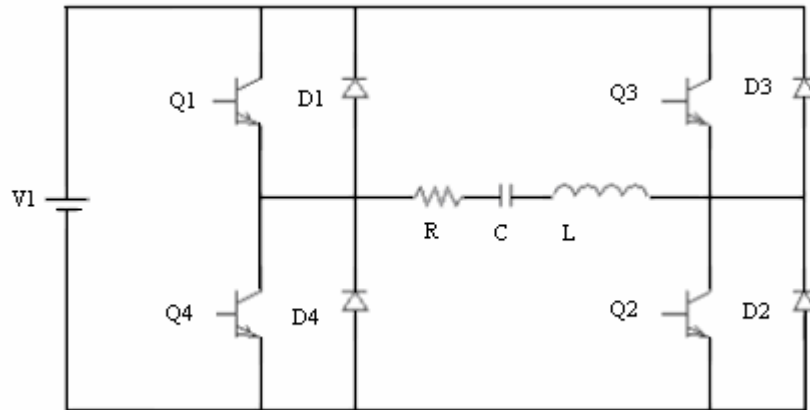
Devrenin çalışmasını kontrol eden anahtarlar tristör, MOSFET, BJT, GTO, IGBT gibi anahtarlama elemanlarından biri olabilir. Bu anahtarlar yalnızca pozitif yönde akım

iletebildikleri için bunlara ters paralel bağlanan diyotlar sayesinde hem negatif hem de pozitif yönde akım iletebilirler.

İnverter devresi iki anahtar içerir. Yük üzerinde değişken gerilim elde edebilmek için her bir yarım periyotta anahtarlardan biri iletimi sokulur. Devre çalışırken Q_1 ve Q_2 anahtarları dönüşümlü olarak anahtarlama yaparlar. İlk önce Q_1 anahtarı iletime sokulur ve yarım periyot boyunca iletimde tutulur. Yük üzerine giriş geriliminin yarısı kadar ($V_1/2$) gerilim düşer. Daha sonra Q_2 anahtarı yarım periyot boyunca iletimde tutulur ve yük üzerinde $-V_1/2$ gerilimi oluşur. Dolayısıyla yük üzerinde iki basamaklı gerilim elde edilir. Kontrol devresi, Q_1 ve Q_2 anahtarları aynı anda iletimde olmayacak şekilde dizayn edilmelidir. Q_1 iletimde iken Q_2 yalıtımda, Q_2 iletimde iken Q_1 yalıtımdadır. Anahtarlama elemanının özelliklerine bağlı olarak yüksek frekanslarda çalışılabilir.

Endüktif yük halinde, yük akımı çıkış gerilimi ile hemen değişmez. Q_1 , yarım periyot sonunda iletimden çıkarıldığında yük akımı sıfır oluncaya kadar D_2 , yük ve alttaki yarı DC kaynak üzerinden geçmeye devam eder. Q_2 , yarım periyot sonunda iletimden çıkarıldığında ise yük akımı D_1 , yük ve üstteki yarı DC kaynak üzerinden geçer. D_1 ve D_2 diyotları iletime girdiğinde, enerji DC kaynağa geri verilir ve bu diyotlar geri besleme diyotları olarak isimlendirilirler. Rezistif yük halinde yük akımı ani yön değiştirdiği için geribesleme diyotlarına gerek yoktur.

Daha yüksek güç çıkışı istenilen uygulamalarda tam köprü seri rezonans inverter devreleri tercih edilmektedir. Gerilim kaynaklı tam köprü seri rezonans inverter devreleri Şekil 5.7’de görüldüğü gibi devre yapısına sahiptirler.



Şekil 5.7 Tam köprü seri rezonans inverter devresi

Şekil 5.7’de görüldüğü gibi tam köprü inverterlerde dört tane yarı iletken anahtar kullanılır.

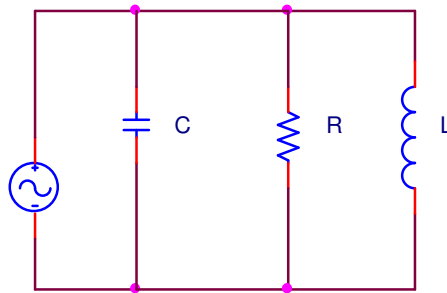
İlk olarak Q_1 ve Q_2 anahtarları aynı anda ilettime sokulurlar ve yük üzerine giriş gerilimi kadar (V_1) gerilim uygulanmış olur. Benzer olarak, Q_3 ve Q_4 anahtarları aynı anda ilettime girerse yük üzerine $-V_1$ gerilimi uygulanmış olur. Q_1 ve Q_2 anahtarları iletimdeyken, Q_3 ve Q_4 anahtarları yalıttımdadır. Aynı şekilde Q_3 ve Q_4 anahtarları iletimdeyken Q_1 ve Q_2 anahtarları yalıttımdadır. Aynı değerdeki giriş gerilimi değeri için tam köprü seri rezonans inverterden elde edilen çıkış geriliminin genliği, yarım köprü seri rezonans inverterden elde edilen çıkış geriliminin genliğinin iki katıdır.

Endüktif yük halinde, Q_1 ve Q_2 anahtarları yalıttıma sokulduklarında akım bir süre negatif yönde akmaya devam eder. Bu negatif yük akımı D_3 ve D_4 geri besleme diyotları üzerinden kaynağa geri verilir. Aynı zamanda Q_3 ve Q_4 anahtarları yalıttıma sokulduklarında da endüktif yükü besleyen akım bir süre pozitif yönde D_1 ve D_2 geri besleme diyotları üzerinden kaynağa geri verilir.

Birçok uygulama da rezonans frekansının altında veya üstünde çalışma durumlarında değişik frekans değerleri ile çıkış gücünün ve geriliminin kontrolü yapılmaktadır (Kazimierczuk ve Szaraniec, 1995, Monterde vd., 1999, Acero vd., 2006).

5.4.2 Paralel Rezonans İnverterler

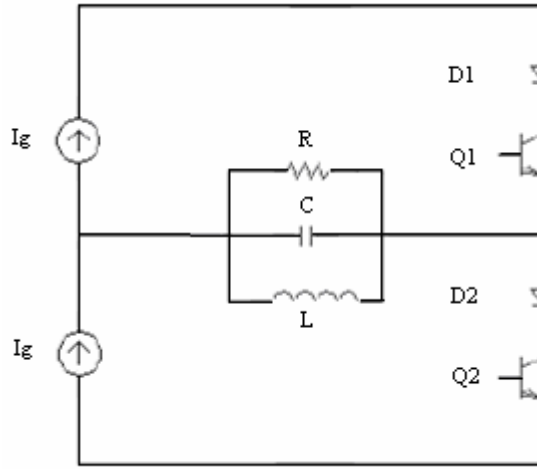
Şekil 5.8’de görüldüğü gibi paralel rezonans devresi R-L-C elemanlarının birbirlerine paralel bağlanması ile oluşturulmuştur. R, L, C üzerinden geçen akımların toplamı kaynak akımını verir.



Şekil 5.8 Paralel rezonans devresi

Akım beslemeli paralel rezonans inverterler değişken bir DC gerilim kaynağından büyük bir endüktör ile sağlanan sabit bir DC akım kaynağı ile beslenirler ve çıkışlarında paralel bir rezonans yük devresi bulunur. Akım sürekli kontrol edildiğinden, hata durumunda kısa devre durumlarına karşı koruması seri rezonans inverterlere göre daha iyidir. Fakat endüktör

devrenin güç katsayısını düşürmektedir. Endüksiyonla ısıtma uygulamalarında yarım köprü paralel rezonans inverter ve tam köprü paralel rezonans inverter yapıları kullanılabilir.



Şekil 5.9 Yarım köprü paralel rezonans devresi

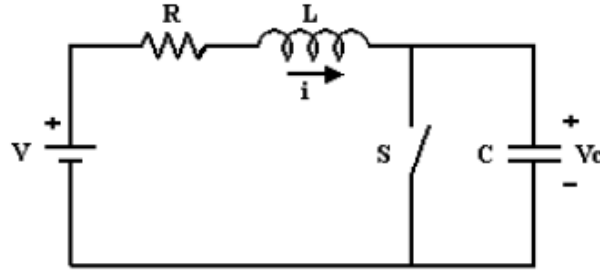
Şekil 5.9’da akım kaynaklı yarım köprü paralel rezonans inverter devresi gösterilmiştir. Paralel rezonans devresi, R-L-C elemanlarının Şekil 5.9’da görüldüğü gibi birbirine paralel bağlanması ile sağlanmıştır. Çift yönlü anahtarlar yarı iletken bir anahtar ile bir diyotun seri bağlanmasından meydana gelmiştir.

Devre çalışırken, endüktif yük halinde, yük direnci üzerinden geçen akımın bir kısmı kendisine paralel bağlı endüktans üzerinden geçer ve yük direnci içindeki akımı azaltır. Kapasitif yük halinde ise giriş akımının bir kısmı eşdeğer kapasite üzerinden bir kısmı da yük direnci üzerinden geçmektedir. Anahtarlama frekansı rezonans frekansına eşit olduğunda L-C devresi sonsuz empedans gösterir ve giriş akımının tamamı yük direnci üzerinde yoğunlaşır. Akımın genliği bu durumda maksimum değerine ulaşmıştır. Endüktif ve kapasitif yük hallerinde paralel L ve C elemanlarının üzerinde meydana gelen akım, çıkış geriliminin genliğini omik durumda çalışmaya göre azaltmaktadır.

Paralel rezonans inverter devresinde de çıkış gücünü kontrol etmek için ya anahtarlama frekansı değiştirilir ya da giriş akımının genliği değiştirilir. Bu inverter devreleri de seri rezonans inverterler gibi endüksiyonla ısıtma uygulamalarının yanı sıra ac motor uygulamaları, elektronik balast uygulamaları ve dielektrik ısıtma uygulamaları gibi alanlarda kullanılmaktadırlar (Kazimierczuk ve Czarkowski, 1995).

5.4.3 E Sınıfı Rezonans İnverterler

Yüksek frekanslarda anahtarlamanın getirmiş olduğu dezavantajları önlemeye yönelik kullanılan rezonans inverter çeşitlerinden birisi de E sınıfı (tek anahtarlı) rezonans inverterdir. E sınıfı rezonans inverterler, sıfır akım anahtarlama E sınıfı inverter ve sıfır gerilim anahtarlama E sınıfı inverter olmak üzere iki gruba ayrılabilir (Kazimierczuk ve Czarkowski, 1995).



Şekil 5.10 E sınıfı rezonans inverter (Öncü ve Sazak, 2006)

Şekil 5.10'da görülen tek anahtarlı rezonans inverter devresinin çalışması iki aşamada incelenebilir. Birinci durumda anahtar kapatılarak DC kaynak gerilimi endüksiyon bobinine uygulanır. Bobin akımı yükselir ve bobinde enerji depo edilir. İkinci aşamada anahtar yalıtım durumuna getirilerek bobin ile kondansatör arasında enerji alışverişi sağlanır. Bu süre, kondansatör gerilimi sıfıra ulaştığında tamamlanır. Diyot kondansatör uçlarını kısa devre ederek ters polarmayı önler. Devre anahtarı kapatıldığında yeni anahtar periyodu başlar (Öncü ve Sazak, 2004).

Çıkış akımı sinüsoidaldir, devrede tek bir anahtar kullanılması anahtar kayıplarını ve devrenin maliyetini azaltmıştır. Şekil 5.10'daki devrede, anahtar iletme geçtiği anda şarj akımı anahtar ve yük üzerinden akar. Anahtar yalıtıma girdiğinde ise kondansatör üzerinde gerilim sıfır değerinden başlayarak yavaş yavaş şarj olmaya başlar ve anahtarın sıfır gerilimde yalıtıma geçişi sağlanmış olur. Rezonans akımı kondansatör üzerinden geçerek kondansatör uçlarındaki gerilimi artırır, gerilim tepe değerine ulaştığında ise kondansatör deşarj olmaya başlayarak üzerine düşen gerilimi yavaş yavaş azaltır. Gerilim değeri sıfıra ulaştığında anahtar sıfır gerilim şartlarında tekrar iletme geçer.

Basit bir yapıya sahip olması, yüksek verimliliği, yüksek çıkış frekansı, düşük elektromanyetik gürültü etkisi E sınıfı inverterlerin avantajlarındanıdır. Bu inverterler de yüksek frekanslı elektronik balast ve endüksiyon ısıtma uygulamalarında sıkça kullanılmaktadırlar.

5.5 PWM ve Rezonans İnverter Tekniklerinin Karşılaştırılması

Günümüzde güç dönüştürücülerde önemli bir nokta, dönüştürücünün yüksek performans sağlarken, ucuza mal olması ve boyutlarının küçük olmasıdır. Bu konuda çeşitli güç dönüştürücü topolojileri geliştirilmiştir.

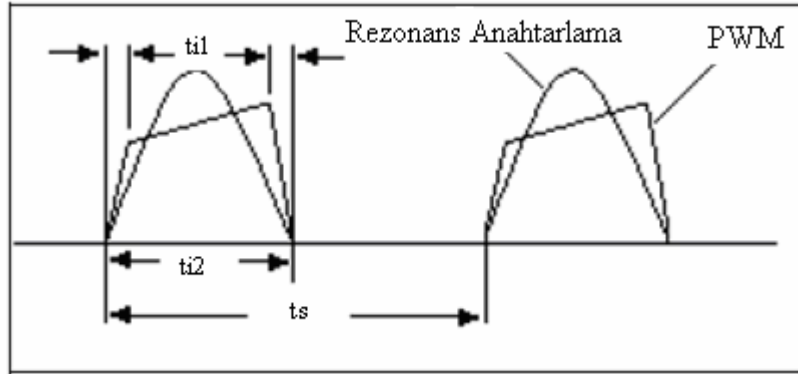
PWM inverter topolojisinde DC giriş gerilimi sabittir. Sabit ara devre gerilimi, diyot köprüsünden oluşan kontrolsüz bir redresörle temin edilebilir. Gerilim ve frekans kontrolü inverterin içinde birlikte gerçekleştirildiğinden, PWM inverterlerde geçici rejim cevabı daha iyidir. Bu inverterlerde anahtarlama elemanları, çıkış geriliminin ya da akımının istenilen şekline bağlı olarak kontrol edilebilir. Hızlı anahtarlama elemanlarının gelişmesi sonucu gerilim beslemeli PWM inverterler, ac motor sürücüler, kesintisiz güç kaynakları, endüksiyonla ısıtma gibi alanlarda sıkça kullanılmaktadır (Bodur vd., 1993).

PWM inverterlerdeki temel problemlerden birisi anahtarlama kayıplarıdır. Bu kayıplar, yüksek frekanslarda anahtarlama elemanlarının kontrolünü imkansız kılar. Frekans yükseldikçe devrede kullanılan manyetik elemanların ve kapasitörlerin boyut ve ağırlıkları azaltılmış olur. Fakat anahtarlarda, frekansla lineer olarak artan bir anahtarlama güç kaybı da oluşur (Wang vd., 1996). Bununla birlikte anahtarlama elemanlarında ısınma meydana gelir. Anahtarların iletme ve yalıtıma gitmesinde kayıplar oluşur. İletim ve kesim kaybı, toplam güç kaybının önemli bir kısmını oluşturur. Bu yüzden verim hızla düşer, anahtar elemanı üzerindeki termal ve elektriksel zorlamalar iyice artar. Anahtarlama kayıplarının hesabı, güç devresinin termal boyutlandırılması açısından önemlidir (Köroğlu, 2002). Bu devrelerin tersine rezonans inverterlerde böyle bir durum yoktur. Rezonans inverterlerde anahtarlama kayıpları ve anahtar zorlamaları oldukça azdır. Dolayısıyla rezonans inverterlerde kullanılan soğutucuların boyutları, PWM inverterlerde kullanılanlara nazaran, kayıpların azaltılmasına bağlı olarak daha küçüktür.

PWM inverterlerde kontrollü yarı iletkenler, anahtarlama konumunda çalışmaktadır ve anahtarlar içlerinden yüksek akım geçerken iletme ve yalıtıma sokulurlar. Yarı iletken anahtarlar, yalıtımdan iletme ya da iletimden yalıtım durumuna geçerken, yüksek gerilim zorlamasına maruz kalırlar. Anahtarlama konumunda çalışmanın bir diğer olumsuz yanı ise, anahtarlama esnasında inverter dalga şekillerindeki yüksek di/dt ve dv/dt nedeniyle çok yüksek elektromanyetik parazitlerin oluşmasıdır. Bu yüzden yarı iletken anahtarlar yüksek frekanslarda kullanılamazlar (Çetin, 2005).

PWM tekniğindeki sakıncalar, anahtarlama elemanları iletme veya kesime geçirilirken

eleman üzerindeki gerilim veya akım sıfır yapılırsa minimuma indirilebilir. Bu amaçla yarı iletken anahtarların akımı veya gerilimi, rezonans inverterlerdeki L-C devresi ile sıfır geçişi zorlanır. Her bir anahtar periyodunda enerji, rezonans sağlamak suretiyle sıfır akımda veya gerilimde inverter çıkışına iletilir. Dolayısıyla anahtarlama kaybı sıfır olur.



Şekil 5.11 PWM ve rezonans anahtarlama tekniklerince üretilen akım dalga formları (Çetin ve Sazak, 2004)

Şekil 5.11’de, PWM ve rezonans anahtarlama teknikleri ile üretilen akımların dalga formları görülmektedir. PWM inverterlerde Şekil 5.11’de görüldüğü gibi keskin kenarlar hem anahtarlama frekansında harmonikler üretir, hem de daha yüksek frekanslarda inverterdeki parazitik elemanları parazit üretecek şekilde tahrik eder. Parazitik gürültüler şebeke vasıtasıyla yayılabilir, bu da ek filtreleme maliyetini beraberinde getirir. Rezonans inverterler ise sinüsoidal dalga formuna sahiptirler. Bundan dolayı daha düşük harmonik gürültü meydana gelir ve çok daha az parazitik gürültü oluşur (Wang vd., 1996).

Rezonans inverterler, yüksek frekanslarda çalışma olanağı sağlar. Böylelikle devredeki kapasitif ve endüktif elemanların enerji depolama ihtiyacı, bundan dolayı da inverter boyut ve maliyetleri azalır. Endüksiyonla ısıtma sistemlerinde yüksek frekanslarda çalışılması bölgesel ısıtmaya olanak tanımakta, hızlı ısıtmayı sağlamakta ve ısıtma verimini yükseltmektedir. Bu sebeple endüksiyonla ısıtma uygulamalarında, rezonans inverterler PWM inverterlerden daha avantajlıdır.

Rezonans devresi ile harmonikler süzülür ve anahtarlama kayıpları azaltılır. Rezonans frekansında devrenin empedansı minimum değerdedir ve yüke maksimum güç aktarılır. Bu frekansta rezistif özellik gösteren rezonans devresi, birim güç katsayısında çalışmasını sağlar. Rezonans devrelerini karşılaştırırken ilk olarak, rezonans devresi elemanlarının devredeki konumlarına göre seri ve paralel rezonans devreleri olarak inceleyebiliriz.

Isıtma bobinine seri kondansatör bağlanmasıyla seri rezonans inverter elde edilir. Seri rezonans inverterde rezonans akımı, güç kaynağından yüke enerji transferini sağlar. Paralel rezonans ise ısıtma bobinine kondansatör paralel olarak bağlanır ve kondansatör gerilimi, güç kaynağından yüke güç iletimini gerçekleştirir.

Seri rezonans inverterlerde kontrol devresi yoktur, daha güvenilirdir. Reaktif akım çekme riski yoktur, şebekeye çok az harmonik distorsiyon gönderir. Daha çok parça içeren paralel devreli inverterler sistemin güvenilirliğini azaltmaktadır, akım kaynağını oluşturmak için devreye ilave edilen bobin, sistemin ağırlığını ve boyutlarını arttırmıştır. Aynı zamanda endüktif etki yaratarak giriş güç faktörünü düşürmektedir. Akım kaynağı gerilim kaynağı ile sağlandığından, değişken değerli bir akım kaynağı elde etmek için ayarlanabilir bir güç kaynağına ihtiyaç vardır. Paralel rezonans inverterlerin en önemli dezavantajı yarı iletken anahtarlar ve rezonans devresi elemanlarından geçen akım yükten bağımsızdır. Bu da yarı iletken anahtarların iletim kayıplarının yükten bağımsız olmasına sebep olur. Dolayısıyla çıkış gücünün düşük olduğu çalışma şekillerinde inverter verimi düşer. Seri rezonans inverterlerde kullanılan kondansatör ve endüktörün enerji kayıpları çok daha azdır ve dolayısıyla toplam verimliliği daha yüksektir.

Paralel rezonans inverterler de bazı avantajlara sahiptir. Düşük çıkış gerilimi yüksek çıkış akımı istenilen ve çıkışın kısa devre olma ihtimalinin yüksek olduğu yerlerde tercih edilirler. Herhangi bir hata durumunda kısa devre korumasının olması açısından seri rezonans inverterlere göre daha güvenilirdirler. İnverter çıkışında herhangi bir kısa devre durumu meydana gelse dahi akım yükselmez, çünkü çıkış akımı giriş akımı tarafından ayarlanmaktadır. Bu yüzden daha çok büyük güçlü sistemlerde tercih edilmektedirler.

Rezonans devrelerini karşılaştırırken ikinci olarak, güç devresindeki yarı iletken anahtar sayısına göre, yarım köprü, tam köprü ve tek anahtarlı rezonans devreleri olarak inceleyebiliriz. Köprü tipi inverter, mutfak tipi endüksiyonla ısıtma sistemlerinde kullanılan ilk inverter çeşididir (Omori ve Nakaoka, 1989). Köprü inverterlerde çıkış gücü kontrol aralığının teorik olarak bir sınırı yoktur. Anahtarlama elemanlarının gerilimi kaynak gerilimi ile sınırlıdır. Tam köprü inverterler dört anahtar, yarım köprü inverterler iki anahtar barındırdığı için maliyet açısından yarım köprü inverterler daha avantajlıdır. Fakat tam köprü inverterlerin çıkış gerilimi yarım köprü inverterlerin çıkış geriliminin iki katı olduğu için, daha yüksek çıkış gücünün istendiği durumlarda tam köprü inverterler tercih edilirler.

Köprü inverterler tek anahtarlı inverterlere göre içeriğinde bulundurdıkları iki veya dört

anahtar nedeniyle daha karmaşık devre yapısına ve daha yüksek maliyete sahiptirler. Ancak geniş güç denetim aralığı, yüksek verim, yüksek çıkış güçlerinin elde edilebilmesi gibi avantajları mevcuttur. Tek anahtarlı inverterler genellikle rezonans elemanlarındaki zorlanmalardan dolayı dezavantaja sahiptir. Bu zorlanmalar akım ve/veya gerilim zorlanmaları şeklindedir. Özel uygulamalara bağlı olarak bu zorlanmalar ortadan kaldırılamaz. Ayrıca çıkış gücünün kontrol aralığı da teorik olarak sınırlıdır ve anahtar gerilimi kaynak geriliminin her zaman yaklaşık üç ya da dört katıdır. Bununla birlikte basit, düşük maliyetli ve küçük hacimli olmaları en büyük avantajlarıdır (Sazak, 2006).

5.6 İnverterlerde Kullanılan Yarı İletken Anahtarlar ve Seçimleri

Yarı iletken elektronik elemanlardaki gelişmeler, güç elektroniğinin endüksiyonla ısıtma sistemlerinde kullanılması için bir alternatif olmuştur. Diğer güç kaynaklarının sahip olduğu büyük kütle, düşük verim, sınırlı çalışma frekansları dezavantajları, güç dönüştürücü elektronik devreler ile ortadan kaldırılmıştır.

Kontrol ettikleri akım, gerilim değerlerinin artması, kontrol edilebilirliklerinin kolaylaşması ve fiyatlarının düşmesi yarı iletken anahtarların geniş bir alanda kullanılmasına imkan sağlamış ve güç elektroniği uygulamaları için çok sayıda yeni çevirici topolojisinin ortaya çıkmasına yol açmıştır (Mohan, 1989). General Electric Company'de 1957 yılında üretilen ilk SCR'den bu yana çeşitli tip ve özelliklerde yarı iletken anahtarlar geliştirilmiştir. Yarı iletken güç elemanı üretiminde, yüksek anahtarlama hızı, iletim gerilim düşümü, anahtarlama kayıplarının az olması, kolay sürülme, yüksek akım ve gerilim değerlerine dayanma özellikleri bakımından sürekli olarak mükemmele erişilmeye çalışılmaktadır (Obdan ve Bodur, 1993). Bu gelişmeler ile birlikte güç elektroniği uygulamalarındaki çalışmalar da hız kazanmaktadır. İnverter devrelerinde iletim, yalıtım ve anahtarlama anındaki akım ve gerilim nedeniyle elektronik elemanlar üzerinde güç kaybı meydana gelir. Bu sebeple inverter tasarımı yapılırken dikkat edilmesi gereken önemli faktörlerden birisi de elemanların seçimidir.

Endüksiyonla ısıtma sistemlerinde kullanılan kontrol edilebilir anahtarlar, anahtarlama elemanlarının özellikleri göz önünde bulundurularak belirlenmelidir. Bu elemanların taşıyabildikleri akım ve gerilim seviyeleri, çalışma frekansları, denetim edilebilirlikleri, dahili diyot bulundurmaları gibi özellikleri uygulama çeşidine göre farklı güç anahtarı kullanılmasını gerektirir. Yarı iletken anahtarlarda aranan genel özellikleri aşağıdaki gibi sıralayabiliriz.

- Anahtarın yalıtımda iken sonsuz dirence, iletimde iken sıfır dirence sahip olması.
- Tetiklendiğinde ani olarak iletimden kesime ya da kesimden iletime geçebilmesi. Bu özellik elemanın yüksek frekanslarda kullanımına izin verir.
- Elemanın anahtarlanmasında ihmal edilebilecek kadar küçük bir kontrol gücünün yeterli olması. Bu özellik kontrol devre tasarımını basitleştirir.
- Anahtarlama esnasında anma gerilimine ve anma akımına aynı anda dayanabilme kapasitesi. Bu özellik eleman uçlarında söndürme devrelerine olan gereksinimi ortadan kaldırır.
- Büyük dv/dt ve di/dt değerleri. Bu özellik dış devre kullanımını en aza indirger. Aksi halde elemanın zarar görmemesi için elemandaki dv/dt ve di/dt 'yi sınırlamak gereklidir.

Güç dönüştürücü devreler de kullanılan yarı iletken anahtarlar güç elektroniğinin temelini oluşturmaktadır. Yarı iletken elemanlar taşıma gücü çok yüksek, dayanma gücü çok düşük elemanlardır. İletim durumunda çok küçük, kesim durumunda ise çok büyük bir direnç özelliği gösterirler. Güç elektroniğinde kullanılan ilk yarı iletken anahtar tristördür (SCR). Tristörün ardından triyak, kapı sönmümlü tristör (GTO), metal oksit yarı iletken kontrollü tristör (MCT), iki kutup jonksiyonlu transistör (BJT), metal oksit yarı iletken alan etkili transistör (MOSFET), yalıtılmış kapılı iki kutuplu transistör (IGBT) gibi elemanların kullanımı yaygınlaşmıştır. Ayrıca yüksek akım taşıma ve gerilim bloke edebilme özellikli güç diyotları da kullanılan önemli güç anahtarlarından. Endüksiyon ısıtma sistemlerinde genellikle kontrollü anahtarlar kullanılmaktadır.

Diyotlar iletim ve yalıtıma güç devresi sayesinde geçebilirler. Küçük bir gerilim ile iletime geçerler, ters yönde ise üzerlerinden çok küçük bir sızıntı akımı akar. Diyotlar hızlı bir şekilde iletime geçerler fakat yalıtıma geçerken üzerlerindeki akım hemen sıfır olmaz ve bu da yalıtıma geçmelerini geciktirir. Güç dönüştürücü devrenin çalışma şartlarına göre değişik diyot türleri geliştirilmiştir. Bunlardan biri olan hızlı toparlanma diyotları, küçük bir ters toparlanma süresine sahip olan diyotlardır. Yüksek frekans devrelerinde kontrol edilebilir anahtarlar ile birlikte kullanılmaktadırlar.

Tristörler 1950'li yıllarda düşük frekans endüksiyonla ısıtma sistemlerinde kullanılan motor-alternatör sistemlerinin yerini almıştır. Motor-alternatör sistemlerine göre verimleri yüksektir ve ani olarak çalıştırılıp durdurulabilirler. Ayrıca daha az yer kaplarlar ve kontrolleri daha kolaydır. Kapı ucuna kısa süreli bir darbe uygulandığında iletime sokulurlar. Fakat güç

devresi tarafından yalıtıma geçirilirler. Bu yüzden tristörler, iletimi denetimli yalıtımı denetimsiz elemanlardır. Büyük güçlü sistemlerde kullanılırlar, 10 kV'a ve 10 kA'e kadar gerilim ve akım taşıma kapasitelerine sahiptirler. Taşıdıkları akım ve gerilim değerlerine göre anahtarlama frekansları düşüktür. Fakat yarı iletken anahtarlar içerisinde kontrol ettiği gerilim ve akım değerleri en yüksek olan eleman tristördür.

Kapı sönmümlü tristörler, iletme geçmek için kısa süreli pozitif bir darbeye, yalıtıma geçmek için yine kısa süreli negatif bir darbeye ihtiyaç duyarlar. İletim anındaki dirençleri tristörlerden daha fazladır. Dolayısıyla bu elemanların soğutucu seçiminde dikkat edilmesi gerekir. GTO'lar 10 kHz'lere kadar anahtarlama frekanslarında 6.5 kV'a kadar büyüklükteki gerilimleri ve 6 kA'e kadar büyüklükteki akımları taşıyabilme yeteneğine sahiptirler. Yüksek güç ve düşük frekanslı çalışmalarda tercih edilirler.

Hem iletimde hem de yalıtımda denetim edilebilen bir diğer eleman MOS denetimli tristördür. Daha basit sürücü devreler ile denetim edilebilme ve yüksek anahtarlama hızı gibi üstünlüklere sahiptir. GTO'dakinin aksine negatif darbe ile iletme, pozitif darbe ile yalıtıma geçer.

BJT'ler akım kontrollü elemanlardır ve iletimde kalabilmeleri için sürekli bir kapı akımı ile beslenmelidirler. İletim dirençlerinin yüksek olması yüksek akımlı devrelerde anahtar kayıplarını artırır ve bu da verimi düşürür. Fakat en düşük iletim gerilim düşümüne sahiptirler (Obdan ve Bodur, 1993). Genellikle orta güç seviyesi ve orta frekans değerleri gerektiren çalışmalarda tercih edilirler.

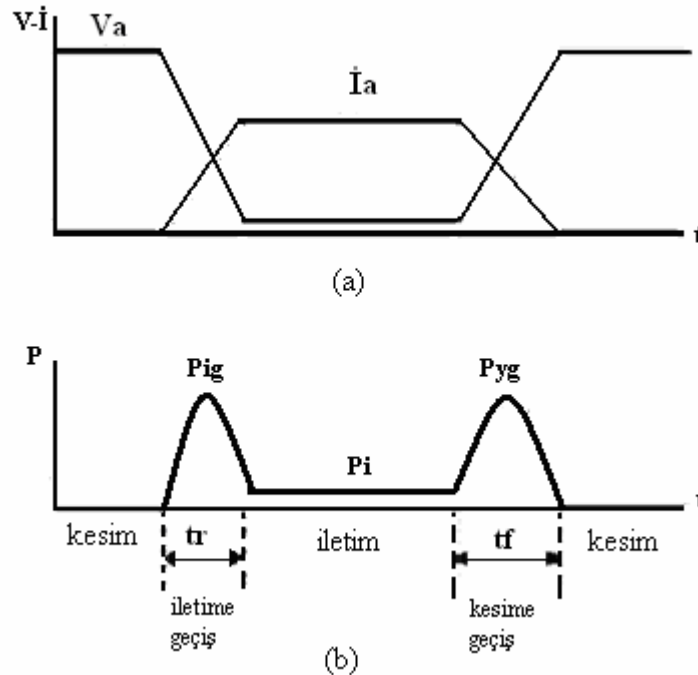
MOSFET, kapı ile kaynak arasına yeterli büyüklükte bir gerilim uygulanarak iletme geçirilen gerilim kontrollü bir elemandır. Kapı gerilimi eşik geriliminden düşük olduğunda yalıtımdadır. Yüksek hızlıdır, genellikle düşük güçlü devrelerde 250 kHz'e kadar olan frekanslarda kullanılırlar. Anahtar elemanlarının karşılaştırıldığı bir çalışmada MOSFET'ler 30-80 kHz frekans aralığında kullanılabilecek en iyi yarı iletken anahtar seçilmiştir (Sazak, 2000). Anahtarlama hızları yüksek olduğu için anahtarlama kayıpları da düşüktür. Kurulan sistemin çalışma koşullarına uygunluğu ve bahsedilen avantajlarından dolayı bu çalışmada MOSFET anahtarlama elemanı kullanılmıştır.

IGBT'ler için MOSFET ve BJT'nin özelliklerinin birleşimi gibi düşünülebilir. BJT'den daha yüksek frekanslarda kullanılabilir ve iletim durumunda MOSFET'lere göre daha az dirence sahiptirler. BJT gibi yüksek gerilim tutma özelliğine sahiptir. Anahtarlama frekansları MOSFET'lere göre daha düşüktür. Düşük iletim kayıpları, anahtarlama özellikleri ve

maliyetleri bakımından IGBT'ler özellikle yüksek güçlü uygulamalarda geniş kabul görmüştür (Bodur, 2007).

5.7 İnverterlerde Anahtar Kayıpları ve Anahtarı Koruma Teknikleri

Güç elektroniğinde koruma, özellikle yarı iletken eleman ve devrelerin korunması ile ilgilidir. Motor, transformatör, bobin, kondansatör, direnç gibi yarı iletken olmayan elemanlar ve bunların devreleri genellikle sigorta, röle, kesici gibi elemanlarla korunur. Fakat yarı iletken anahtarları koruma da bu koruyucu elemanlar genellikle yavaş ve yetersiz kalır (Bodur, 2007). Devrelerdeki parazitik endüktif ve kapasitif etkiler anahtarlarda yüksek gerilim ve akımlara sebep olabilir. Özellikle endüksiyonla ısıtma sistemleri gibi endüktif çalışma durumlarında bu daha da önemlidir. Yarı iletken elemanların kısa süreli aşırı akım veya ani akım darbesi dayanımları genellikle çok düşüktür. Bu nedenle anahtarları aşırı gerilim, aşırı akım ve bunların sebep olduğu aşırı ısınmalara karşı korumak gerekir. Anahtarlar ani gerilim ve akım yükselmelerine karşı ilave edilen devreler ile, aşırı ısınmaya karşı soğutucular ile, arıza ve kısa devre olaylarına karşı ise sigorta gibi koruyucu elemanlarla korunurlar.



Şekil 5.12 (a) Yarı iletken anahtarın dalga şekilleri ve (b) meydana gelen güç kayıpları (Çetin ve Sazak, 2004)

Anahtar iletimden yalıtıma veya yalıtımdan iletime geçerken meydana gelen yüksek akım ve gerilimin neden olduğu kayıplar anahtarlama kayıplarıdır. Şekil 5.12'de görüldüğü gibi yarı

iletken anahtarlarda, iletme geçiş ile kesime geçiş anlarında anahtarlama ve iletim durumunda iletim kayıpları oluşur. Bu güç kayıpları çok fazla olduğunda ise hem elemanın kendisi hem de kullanıldıkları sistem zarar görür. Frekansa bağlı olan anahtarlama kayıpları, yüksek frekanslarda anahtarlama imkansız kılabilir. Bu durum frekansı arttırmaya engel teşkil eder. Güç dönüşüm devrelerinde manyetik elemanlar ve kondansatörlerin hacmi, ağırlığı ve fiyatları frekans ile ters orantılı olduğundan, güç elektroniği devrelerinin boyutlarını düşürmek için yarı iletken elemanların orta ve yüksek frekanslarda anahtarlama gerekir. Dolayısıyla, yüksek frekanslarda bu güç kayıpları dikkate alınarak tasarım yapılmalıdır.

Bir anahtarda meydana gelen toplam güç kayıpları (5.1) ile ifade edilebilir.

$$P_K = P_I + P_A + P_{KAPI} + P_{SZ} \quad (5.1)$$

Burada P_I iletim süresi boyunca oluşan güç kaybını, P_A anahtarlama kayıplarını, P_{KAPI} anahtarı tetikleyen sinyalin oluşturduğu güç kaybını, P_{SZ} anahtar yalıtımdayken sızıntı akımlarının oluşturduğu güç kaybını temsil etmektedir. Anahtarın tetikleme sinyalinin ve sızıntı akımlarının oluşturduğu güç kayıpları, iletim ve anahtarlama kayıpları yanında çok küçük olduğu için ihmal edilebilir. İletime ve yalıtıma geçiş durumlarında meydana gelen anahtarlama kayıpları (5.2) ile hesaplanabilir.

$$P_A = \frac{V_a \cdot \dot{I}_a \cdot f_s}{2} \cdot (t_r + t_f) \quad (5.2)$$

Burada V_a anahtar gerilimini, $\dot{I}_a$ anahtar akımını, t_r iletme geçiş süresini, t_f yalıtıma geçiş süresini ifade etmektedir. Görüldüğü gibi anahtarlama frekansı f_s 'nin yükselmesi ya da geçiş sürelerinin uzaması, yarı iletken anahtar kayıplarının artmasına sebep olur. Anahtarların iletme ve yalıtıma geçme kaybı yüksek di/dt ve dv/dt oranından dolayı, elektromanyetik girişim (EMI) problemini ortaya çıkarır. Anahtar güç kayıplarını oluşturan diğer bir faktörde anahtar iletim kayıplarıdır. İletim kayıpları (5.3) doğrultusunda hesaplanabilir.

$$P_I = \frac{V_{iletim} \cdot \dot{I}_a \cdot t_i}{t_s} \quad (5.3)$$

Burada V_{iletim} iletim süresince oluşan kaçak gerilim düşümü, t_i iletimde kalma süresi, t_s anahtarlama periyodudur. Anahtar kayıpları, verimi etkileyen ve dikkate alınması gereken önemli hususlardan birisidir. Bu kayıplar sebebiyle anahtarda açığa çıkacak ısının anahtardan uzaklaştırılması için büyük soğutuculara ihtiyaç duyulacaktır. Anahtarların iletme ve yalıtıma

geçiş anlarındaki yüksek akım ve gerilim değerlerinden dolayı meydana gelen anahtarlama kayıplarını önlemek için farklı koruma devreleri geliştirilmiştir. Bu koruma devreleri, genellikle anahtarlara seri ve paralel bağlı diyotlardan ve pasif devre elemanlarından oluşurlar. Yarı iletken anahtarlar üzerindeki zorlanmaları azaltarak taşıdıkları akım ve gerilim değerlerinin nominal değerde olmasını sağlarlar. Yalıtıma geçiş anında anahtar üzerindeki zorlanmaları azaltmak için yalıtım koruma devreleri, iletim durumundaki zorlanmalar için de iletim koruma devreleri geliştirilmiştir. Koruma devreleri ile güç devresi çalışma şartlarına göre, anahtarlama esnasında akım veya gerilimin sıfır yapılması suretiyle yumuşak anahtarlama teknikleri geliştirilmiş ve bu sayede anahtar kayıpları minimize edilmiştir.

5.7.1 Yumuşak Anahtarlama Teknikleri

Endüksiyonla ısıtma sistemlerinde, bobin seçimi ne kadar önemliyse bobini besleyecek olan inverter seçimi de o kadar önemlidir. İnverterlerde, akım nüfuz derinliği ve kullanılan elemanların boyutlarının küçük olması açısından, yüksek frekans tercih edilir. Öte yandan, yüksek frekansta, iletim ve kesim kaybı toplam güç kaybının büyük bir kısmını oluşturur. Bu noktada verim hızla düşer, anahtar elemanı üzerindeki termal-elektriksel zorlanmalar ve EMI gürültüsü de artar. Bu da şebeke kirliliğine yol açar. Eğer anahtarlama elemanları kesime veya ilettime eleman üzerindeki gerilim ve/veya akım sıfır olduğunda geçirilirse, anahtarlama kayıpları elimine edilir veya minimuma indirilir. Bu sebeple yumuşak anahtarlama tekniklerinden yararlanılır. Yumuşak anahtarlamanın avantajlarından bazıları şunlardır.

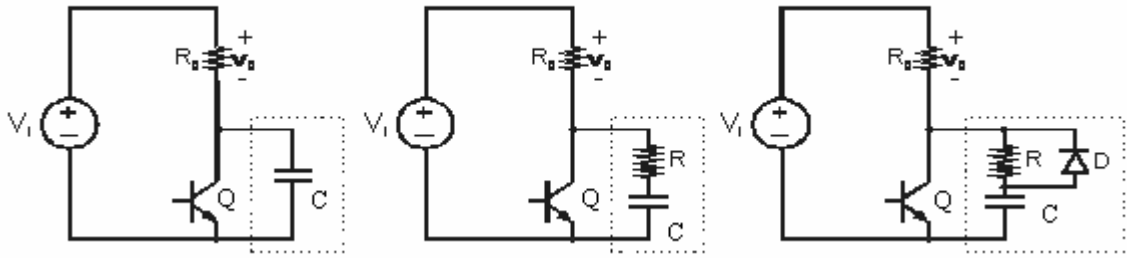
- Anahtarlama geçişleri esnasında akım ve gerilimin üst üste binmesini azaltmak,
- Akım (di/dt) ve gerilim (dv/dt) yükselme hızlarını azaltmak,
- Anahtarlama enerji kayıplarını bastırmak,
- Anahtarlama enerjilerini geri kazanmak,
- Devrenin boyut ve maliyetini düşürmek,
- EMI ve RFI gürültülerini bastırmak,
- Yüksek frekanslarda çalışmayı sağlamak,
- Hafif yüklerde de yumuşak anahtarlamaı sürdürmek,
- Devrenin verimini ve güç yoğunluğunu arttırmak(Bodur, 2007).

Yumuşak anahtarlamanın getirdiği avantajlar sayesinde kurulacak sistemler çok yüksek frekanslarda dizayn edilebilirler ve sistemler üzerinden sürekli çok yüksek bir verim sağlanabilir. Yumuşak anahtarlama tekniklerini,

- Sıfır Gerilimde Anahtarlama (ZVS)
- Sıfır Akımda Anahtarlama (ZCS) olarak iki gruba ayırabiliriz.

5.7.1.1 Sıfır Gerilimde Anahtarlama

Sıfır gerilimde anahtarlama tekniği kesime girme işleminde kullanılmaktadır. Temel olarak anahtarlama elemanına bir kondansatör paralel olarak bağlanır (Monterde vd., 1999). Böylece kesime girme esnasında anahtarlama elemanının uçlarında oluşan gerilimin yükselme hızı (dv/dt) ve anahtar geriliminin maksimum değeri sınırlandırılmış olur. Bu teknik ile anahtarlama enerji kaybı azaltılmakta ve anahtarlama enerjisi kondansatöre aktarılmaktadır.



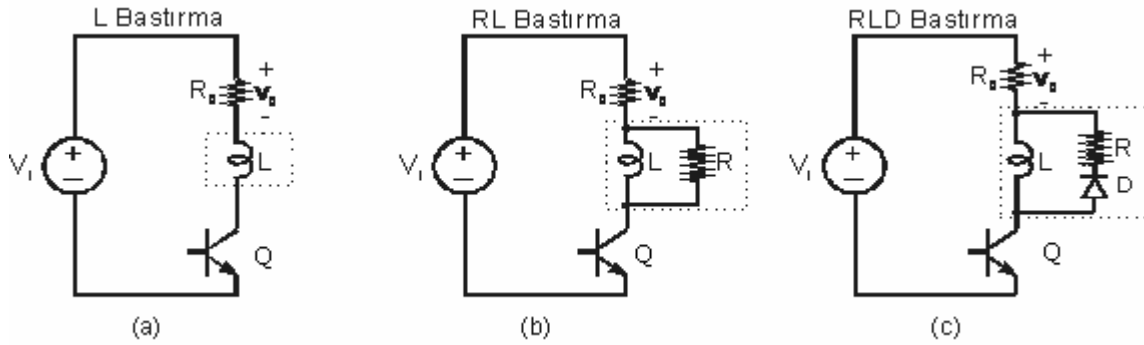
Şekil 5.13 Sıfır gerilimde anahtarlama konfigürasyonları (Bodur, 2007)

Şekil 5.13’de çeşitli sıfır gerilimde anahtarlama devreleri görülmektedir. Temel de anahtara paralel olarak küçük değerli bir kondansatör bağlanmasıyla, kesime girme anahtarlama esnasında, eleman uçlarında oluşan gerilimin yükselme hızı sınırlandırarak sıfır gerilimde anahtarlama sağlanır. Burada, kesime girmedeki anahtarlama enerji kaybı büyük ölçüde azaltılır ve bu enerji kondansatöre aktarılır. Kondansatörün şarjı anahtar yalıtımında kaldığı sürece devam eder. Aynı zamanda anahtar yalıtım durumunda iken, kondansatör anahtarın gerilim piklerini ve kayıplarını azaltır. Dolu olan kondansatör, iletme girme işleminde anahtardan aşırı bir akım geçmesine neden olur. Bunu önlemek için, kondansatöre seri bir direnç bağlanır. Anahtar iletme geçtiğinde kondansatör gerilimi R direnci ve anahtar yardımı ile deşarj olmaya başlar. R-C elemanı kullanılma amacına ve korunacak elemana göre düzenlenmelidir. Prensipte olarak, çalışma veya anahtarlama frekansı arttıkça, kondansatör değeri düşürülmektedir (Bodur, 2007).

R direnci olmaz ise, C'nin deşarj akımı, yüksek frekanslarda yarı iletkenlere büyük yükler getirebilir. İletimden çıkma işleminde ek bir gerilim stresine neden olmaması için, bu direnç anahtarın iletim yönünde bir diyot ile köprülenir. Kondansatör gerilimi sıfıra yaklaştığı anda diyot iletime geçer ve kondansatör gerilimi bu diyot sayesinde negatif olamaz.

5.7.1.2 Sıfır Akımda Anahtarlama

Sıfır akımda anahtarlama tekniği iletime girme işleminde gerçekleştirilmektedir. İletime girerken oluşan di/dt , bütün yarı iletken elemanlarda anahtarlama kaybına neden olur. Temel olarak anahtara seri olarak küçük değerli bir endüktans bağlanır. Böylece iletime girme sırasında anahtarlama elemanından geçen akımın yükselme hızı sınırlanmış olur ve sıfır akımda anahtarlama gerçekleştirilir.



Şekil 5.14 Sıfır akımda anahtarlama için oluşturulan devreler (Bodur, 2007)

Şekil 5.14'te çeşitli sıfır akımda anahtarlama için oluşturulan devreler görülmektedir. Bu devre çeşitleri, anahtar iletime geçerken meydana gelen ani akım değişimini önlemek ve akımın sebep olduğu anahtar uçlarındaki gerilimi azaltmak için tasarlanırlar. Genel olarak, küçük değerli seri bir endüktans bağlanarak, iletime girme esnasında güç elemanından geçen akımın yükselme hızı di/dt sınırlanır ve akım ile gerilimin üstüste binmesi önlenmiş olur. Bu sayede iletime girme işleminde anahtarlama enerji kaybı büyük ölçüde azaltılır.

Uygulamalarda, anahtarlar tarafından endüktans akımının ani olarak kesilmesi ile endüktansta ters emk oluşur ve anahtarlar aşırı gerilimler sonucu tahrip olabilir. Bu yüzden Şekil 5.14'te görüldüğü gibi endüktans ters bir diyot ve bir direnç üzerinden köprülenir. Fakat bağlanan direnç, iletime girme esnasında yarı iletken anahtarda ek bir akım stresine neden olur. Bunun için de, endüktansa paralel, dirence seri olarak ve anahtarın iletim yönüne ters yönde bir diyot bağlanır. Endüktansa paralel bağlı diyot, anahtar iletimde iken yalıtmadadır. Anahtar yalıtıma geçtiğinde, endüktans üzerinde depolanan enerji diyot üzerinden geçerek direnç üzerinde

harcanır. Böylece anahtarın maruz kaldığı gerilim sadece bir diyotun gerilim düşümü kadar artmış olur. Fakat, anahtarlama enerjisi dirençte harcandığı için, anahtarda ek bir gerilim stresi olduğu gözönünde bulundurulmalıdır.

Sonuçta yarı iletken anahtarların durum değiştirdiği anda, akımının veya geriliminin sıfır olması sağlanarak sıfır akım ya da gerilimde anahtarlama koşulları gerçekleştirilebilir. Bu sayede güç dönüştürücü sistemlerin daha yüksek frekanslarda çalıştırılması, daha az elektromanyetik parazitler yayması sağlanır ve verim artar. Ayrıca sistemler daha küçük ve hafif elemanlardan oluşturulur. Bundan dolayı da sistemin boyut, ağırlık ve maliyeti oldukça azalır.

6. YARIM KÖPRÜ SERİ REZONANSLI İNVERTER DEVRESİNİN ANALİZ TASARIM ve SİMÜLASYONU

6.1 Giriş

Bu çalışmada, bir önceki bölümde anlatılan avantajlar doğrultusunda mutfak tipi uygulamalarda kullanılmak üzere sıfır gerilim anahtarlama yarım köprü seri rezonans inverter devresi analiz ve tasarımı yapılarak PSPICE (Simulation Program with Integrated Circuit Emphasis) programı ile bilgisayar ortamında simülasyonu gerçekleştirilmiş ve sonuçları sunulmuştur. Endüksiyonla ısıtma sisteminin en pahalı ve önemli parçası inverter kısmıdır. Bu sistemler için çeşitli inverter topolojileri tasarlamak mümkündür. Bölüm 5'te bahsedildiği gibi bunların bazıları tek anahtarlı inverter, seri veya paralel rezonans devreli yarım köprü ve tam köprü inverterlerdir. Tasarım aşamasında her yönden optimum bir inverter seçmek her zaman için çok önemlidir. Bu sistemin mutfak uygulamalarında verimli bir şekilde uygulanabileceği ve yüksek frekanslarda anahtarlamanın getirmiş olduğu dezavantajları önlemeye yönelik kullanılan inverter çeşitlerinden birisi de yarım köprü seri rezonans inverterdir.

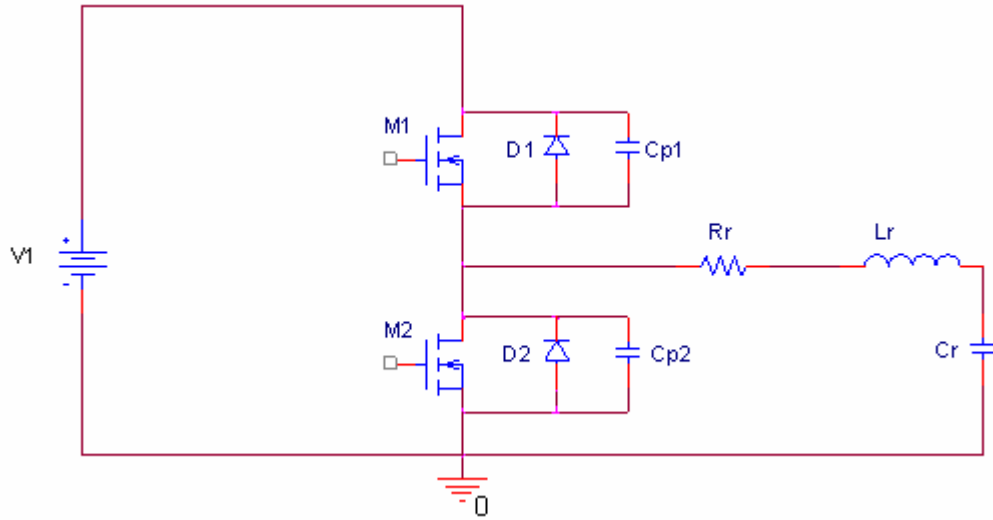
E sınıfı (tek anahtarlı) inverterler rezonans elemanlarından kaynaklanan akım ve gerilim zorlamalarına sahiptir. Yarı iletken anahtar iletimde iken üzerinden kaynak akımının yaklaşık 3 katı değerinde yüksek bir akım geçerken, yalıtım durumunda da anahtar geriliminin tepe değeri kaynak geriliminin yaklaşık 3-4 katı büyük değerlere sahip olabilir. Bu sebeplerden dolayı anahtar üzerinde zorlanmalar meydana gelir. Bu zorlanmalar özel uygulamalara bağlı olarak ortadan kaldırılamaz. Ayrıca anahtar gerilimi her zaman kaynak geriliminden daha fazladır. Bu yüzden yüksek blok gerilimi özellikli anahtarlara ihtiyaç duyulur. Aynı zamanda, tek anahtarlı bir devre yapısına sahip oluşu çıkış gücünün geniş aralıkta denetimini de mümkün kılmaz ve sıfır gerilim anahtarlama koşulları sınırlı yük değerleri için sürdürülebilmektedir (Öncü, 2005). Diğer taraftan, tek anahtarlı rezonans inverterler, yarım ya da tam köprü rezonans inverterlere göre daha az sayıda eleman gerektirdiği ve daha basit yapıda oldukları için maliyet olarak daha avantajlıdır (Sazak, 2006).

Köprü tipi inverterlerde ise birden fazla anahtara sahip olmaları nedeniyle çıkış gücü kontrol aralığının bir sınırı yoktur ve bu inverterlerde anahtar gerilimi kaynak gerilimi ile sınırlıdır (Chatterjee ve Ramanarayanan, 1993). Tam köprü inverterler dört anahtarlama elemanı içerirler. Maliyetler göz önüne alındığında yarım köprü inverterler iki adet anahtar içerdikleri için daha avantajlıdır. Paralel rezonans inverterler de, sabit akım kaynağını oluşturmak için

devreye büyük değerli bir endüktans ilavesinin devrenin boyutlarını ve ağırlığını artırması, giriş güç faktörünü düşürmesi gibi dezavantajlara sahiptir. Yarım köprü seri rezonans inverterler, tam köprü inverterlere göre maliyetinin daha az olması ve E sınıfı inverterlere göre sahip olduğu üstünlükler sebebi ile bu tez çalışmasında tercih edilmişlerdir.

6.2 Yarım Köprü Seri Rezonans İnverter Devresinin Çalışma Prensibi

Şekil 6.1’de rezonans elemanı olarak ısıtma bobininin kullanılmış olduğu mutfak tipi endüksiyon ısıtmada kullanılan gerilim beslemeli bir fazlı yarım köprü seri rezonans inverter devresi görülmektedir. Burada R_r seri rezonans devresinin direncini, L_r endüktansını, C_r rezonans kondansatörünü temsil eden elemanlardır. Devre şekil üzerinde görüldüğü gibi M_1 , M_2 anahtarları ve C_r - L_r - R_r seri rezonans devresinden oluşmaktadır. Yarı iletken anahtarlar kendilerine ters paralel bağlı D_1 ve D_2 diyotları ile paralel bağlı koruma kondansatörleri C_{p1} ve C_{p2} ’den meydana gelmiştir. Anahtarlama elemanı olarak bir önceki bölümde de bahsedildiği gibi MOSFET kullanılmıştır.



Şekil 6.1 Yarım köprü seri rezonans inverter devresi

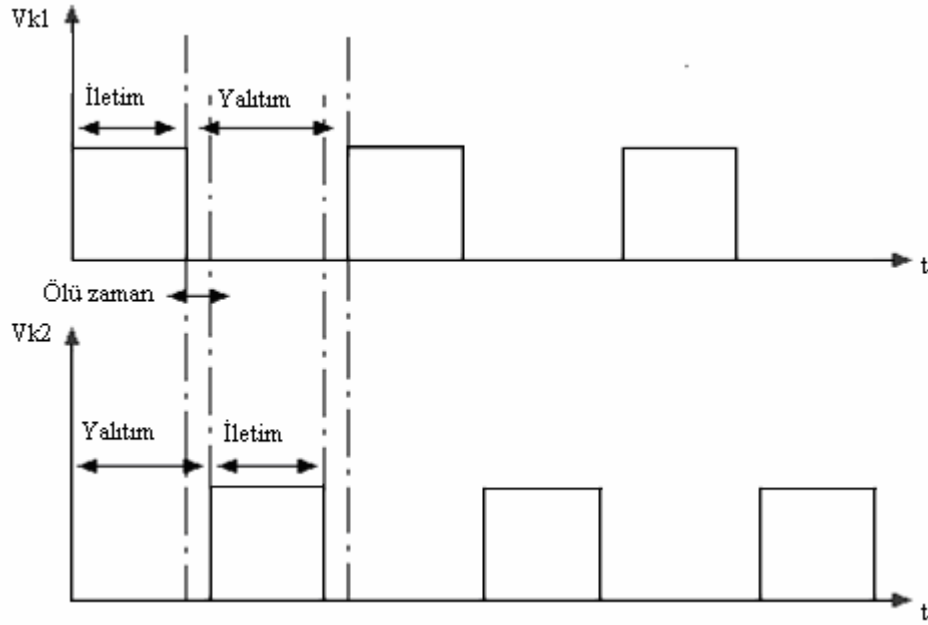
Yarı iletken anahtarlar, seçilen çalışma frekansında, anahtarın özelliğine göre belli değerlerdeki kare dalga gerilimlerle sürülürler. Yük üzerinde değişken gerilim elde edebilmek için her bir yarım periyot da anahtarın biri iletime sokulur. M_1 ve M_2 anahtarları dönüşümlü olarak anahtarlama yaparlar. Bu dönüşümlü anahtarlama görev oranı yarım köprü seri rezonans inverter devresi için %50 veya bu değerden bir parça az olabilir (Kazimierczuk ve Czarkowski, 1995). M_1 ve M_2 anahtarları iletimde olduğu sürece içlerinden pozitif yönde

akım akar. Anahtarlar iletimde kaldığı sürece bobin akımı üstel artış göstererek doğru gerilim kaynağından enerji depo eder. Yalıtıma süresinde ise anahtarlar üzerinde, yalnızca diyot içinden geçen negatif yönde bir akım iletimi vardır. Anahtarlama periyodunun ilk yarısında M_1 kapalı ve M_2 açık, ikinci yarısında ise M_2 kapalı ve M_1 açık olacaktır. Dolayısıyla yük üzerinde değişken gerilim elde edilir. Anahtarlama periyodunda her iki anahtarın birlikte yalıtımda kaldığı süreye ölü zaman adı verilir.

Yarı iletken anahtarlar içerisindeki ters gövde diyotları akım kayıplarını minimum yapmak için tasarlanmıştır. Bu diyotlar yükün endüktif olduğu durumlarda bobinde depolanan ters yöndeki enerjiyi kaynağa geri verebilmek için kullanılır ve bobin akımındaki değişimin devam etmesini mümkün kılarlar.

M_1 anahtarının yalıtıma girdiği ölü zaman aralığında D_2 diyotu bobin üzerinde depolanan enerjiyi kaynağa geri vererek M_2 anahtarının iletime geçmeden önce sıfır gerilim veya akım durumunda olmasını sağlamaktadır. Aynı şekilde M_2 'nin yalıtıma girdiği ölü zaman aralığında D_1 diyotu bobin üzerinde depolanan enerjiyi kaynağa geri vererek M_1 anahtarının iletime geçmeden önce sıfır gerilim veya akım durumunda olmasını sağlamaktadır. 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. Bu yüzden C_{p1} ve C_{p2} koruma kondansatörleri yalıtıma geçiş anındaki kayıpları kendi üzerlerinde tutarak anahtarlama kayıplarını azaltırlar.

Devrenin yarı iletken anahtarlarına uygulanan tetikleme sinyalleri gerimleri V_{k1} ve V_{k2} Şekil 6.2'de görüldüğü gibidir.



Şekil 6.2 Yarım köprü seri rezonans inverter anahtarlama sinyalleri (Çetin, 2005)

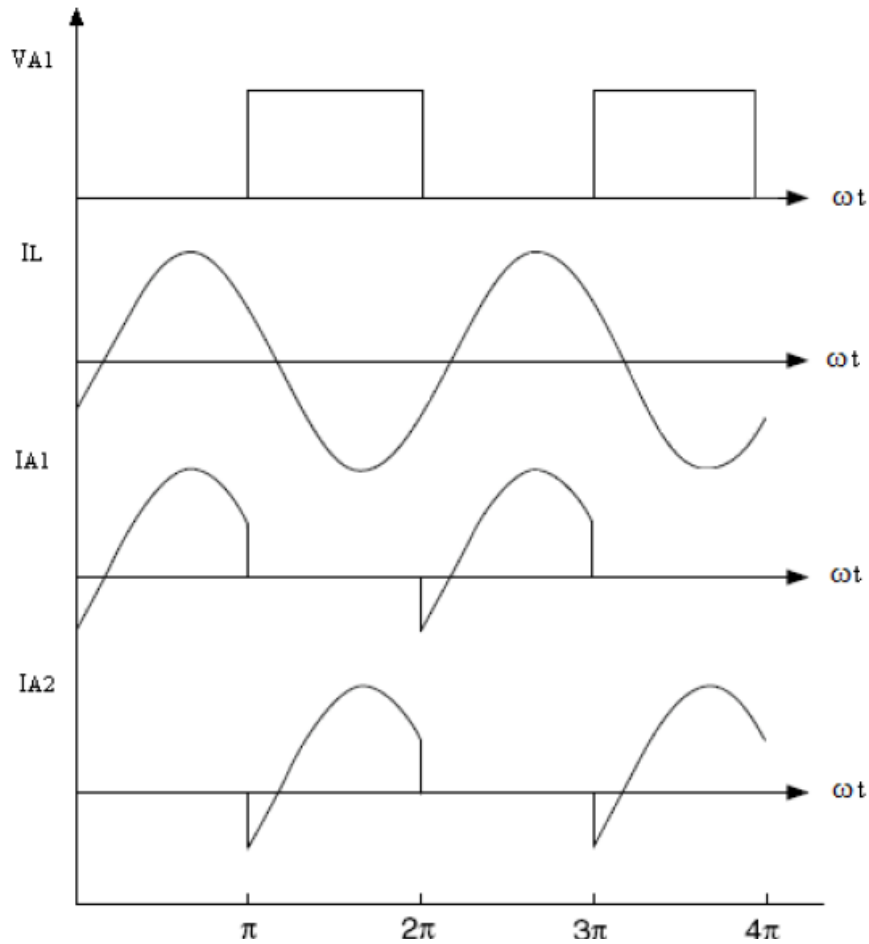
Yarım köprü seri rezonans inverterlerde çıkış akımı ve gerilimi rezonans devrenin etkisine bağlı olarak sinüsoidal bir yapıya sahiptir. Dolayısı ile rezonans olmayan inverterlerde oluşan elektromanyetik parazitler, bu inverter yapıları sayesinde önemli ölçüde azaltılmış olacaktır.

6.2.1 Yarım Köprü Seri Rezonans İnverter Devresinin Çalışma Frekansının Rezonans Frekansının Üstünde Olma Durumu ($f_s > f_r$)

Devrenin anahtarlama frekansı f_s 'nin, rezonans frekansı f_r 'den daha yüksek değerde olması durumudur. Bu çalışmada avantajlarından dolayı, anahtarlama frekansı rezonans frekansının üstünde seçilmiştir. Bu durumda devre endüktiftir. Devrenin faz açısı ϕ , sıfırdan büyüktür ve rezonans devresi akımı kendisini oluşturan gerilimden daha geridedir. Anahtar akımı anahtar iletime geçmeden önce negatiftir ve yalıtıma geçmeden önce pozitifdir. Anahtar iletime geçmeden önce rezonans akımı negatif olduğu için ilk önce D_1 diyotu iletime geçer. Bu durumda yarı iletken anahtarların iletim sırası D_1 - M_1 - D_2 - M_2 şeklindedir. Diyotlar düşük akım değeri ile iletime geçtikleri için diyotların ters toparlanma problemi ve bunun meydana getirdiği kayıplar bu çalışma durumunda ortadan kaldırılır. Bu yüzden ters paralel bağlı diyotların hızlı olmasına gerek yoktur. Rezonans frekansının altında çalışma durumunda yarı iletken anahtarların iletim sırası M_1 - D_1 - M_2 - D_2 şeklinde olur. Bu durumda çalışmanın, anahtar iletimde iken rezonans devresinde biriken enerjinin kaynağa geri verilmesi için anahtara ters paralel bağlı diyotun ters toparlanma süresinin çok kısa olması gibi olumsuz etkileri meydana

gelir.

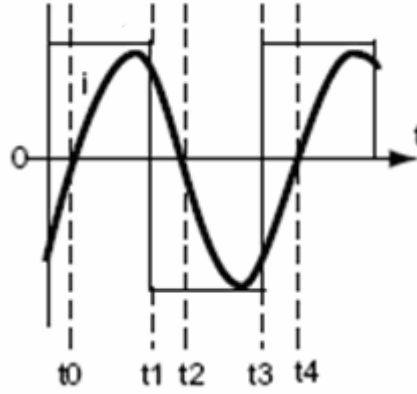
Yarım köprü seri rezonans inverter devresinin rezonans frekansının üstünde çalışması durumuna ait dalga şekilleri Şekil 6.3'te verilmiştir. Görüldüğü gibi anahtarlar iletim durumunda iken kayıpsızdırlar ve anahtar sıfır gerilim koşullarında iletme geçtiği için anahtarın çıkış kondansatörünün deşarjı gibi bir sorun da yoktur. Bununla birlikte devrenin yalıtım durumunda anahtarlama kayıpları vardır. Bu kayıpları azaltmak için anahtara paralel bir kondansatör bağlanabilir (Kazimierczuk ve Czarkowski, 1995). Rezonans frekansının altında çalışma durumunda ise anahtarlar yüksek akım ve gerilim değerlerinde iletme geçtiği için iletim anı kayıpları meydana gelir. Bu durum çok hızlı toparlanma süresine sahip diyotlar ile engellenebilir. Ayrıca anahtarlar yaklaşık kaynak gerilimine eşit olan bir gerilim değeri ile iletme geçtikleri için anahtarların iletim anında meydana gelen çıkış kondansatörünün şarjı anahtarlama kaybına sebep olur. Bu çalışma durumunda, iletim anında anahtarlar üzerinde kayıplar meydana gelirken, yalıtım anında anahtar üzerindeki kayıplar sıfırdır.



Şekil 6.3 Rezonans frekansının üstündeki çalışma durumuna ait dalga şekilleri (Kazimierczuk ve Czarkowski, 1995)

6.3 Yarım Köprü Seri Rezonans İnverter Devresinin Analizi

Yarım köprü seri rezonans inverterin çalışma aralıklarına göre rezonans akımı I_L 'nin değişimi Şekil 6.4'te görülmektedir. Devrenin çalışma frekansı rezonans frekansının altında veya üstünde olabilir. Çalışma frekansı rezonans frekansının altında olursa kapasitif çalışma, üstünde olursa endüktif çalışma tercih edilmiş olur. Anahtarlama frekansı rezonans frekansına eşit olduğunda anahtarlama kayıpları sıfırdır. Fakat devrenin çıkış gücü genellikle uygulamalarda çalışma frekansının değiştirilmesi ile kontrol edildiği için rezonans frekansında çalışma koşulu tercih edilmez (Kazimierczuk ve Czarkowski, 1995). Bu çalışma da rezonans frekansının üstünde çalışma durumu tercih edilmiştir ve devrenin çalışması dört ayrı durumda incelenmiştir.

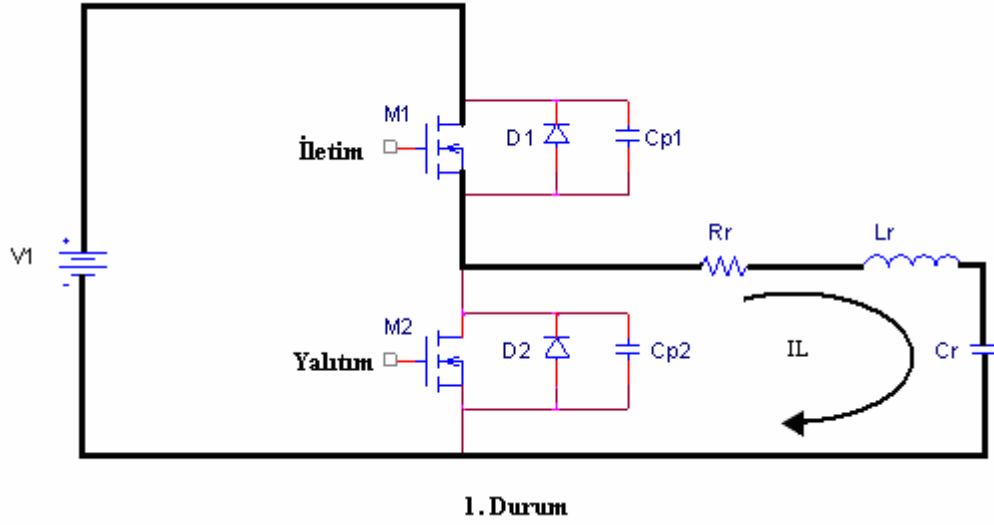


Şekil 6.4 Yarım köprü seri rezonans inverterde rezonans akımının dalga şekli

Yarım köprü seri rezonans inverter devresinin çalışma aralıkları yarı iletken anahtarların iletim durumları ve yalıtım durumları olmak üzere dört temel aşamada incelenebilir. Şekil 6.4'e göre bu aşamalarda, M_1 anahtarının iletimde M_2 anahtarının yalıtımda olduğu $t_0 < t < t_1$ zaman aralığı 1. Durum olarak, her iki anahtarın yalıtımda olup D_2 diyotunun iletimde olduğu $t_1 < t < t_2$ zaman aralığı 2. Durum olarak, M_2 anahtarının iletimde M_1 anahtarının yalıtımda olduğu $t_2 < t < t_3$ zaman aralığı 3. Durum olarak ve her iki anahtarın yalıtımda olup D_1 diyotunun iletimde olduğu $t_3 < t < t_4$ zaman aralığı 4. Durum olarak değerlendirilebilir. Bu durumlara ait devre şemaları ve açıklamalar aşağıda verilmiştir. Koyu çizilen çizgiler her durumdaki iletim yolunu göstermektedir.

1. Durum (t_0-t_1 aralığı) : D_1 üzerinde ters yönde akmakta olan rezonans akımının yönü $t=t_0$ noktasında değişir. M_1 anahtarı iletime geçer ve Şekil 6.5'te gösterildiği yönde, seri rezonans

inverter kolu üzerindeki elemanlarda akım dolaşmaya başlar. Bu durum gerçekleşirken rezonans devresi üzerinde bir enerji birikir.



Şekil 6.5 M₁ anahtarının iletim, M₂ anahtarının yalıtımda olma durumu

M₁ anahtarının iletime geçmesi ile birlikte rezonans devresine (6.1)'de verilen aralıklarda kare dalga gerilim uygulanmaktadır. Bu gerilim (6.2) ile fourier serilerine açıldığında rezonans olayının meydana getirdiği yaklaşık olarak sinüs dalga gerilim değişimi elde edilir. Bu gerilimin anlık değişimi (6.3)'te, ifadedeki giriş geriliminin maksimum değeri V_{1max} ise (6.6)'da verilmiştir.

$$v_1(t) = \begin{cases} V_1 & 0 < \omega t < \pi \\ 0, & \pi < \omega t < 2\pi \end{cases} \quad (6.1)$$

$v_1(t)$ ifadesi, (6.2)'de fourier serisi ile açılırsa temel bileşen olarak (6.3)'teki ifade elde edilir.

$$v_1(t) = V_1 \left(\frac{1}{2} + \frac{2}{\pi} \sin \omega t + \frac{2}{3\pi} \sin 3\omega t + \frac{2}{5\pi} \sin 5\omega t + \frac{2}{7\pi} \sin 7\omega t + \dots \right) \quad (6.2)$$

$$v_1(t) = V_{1max} \cdot \sin \omega_s t \quad (6.3)$$

Burada ω_s açısıl çalışma frekansı (6.4) ile, ω_r açısıl rezonans frekansı ise (6.5) ile ifade edilir.

$$\omega_s = 2\pi f_s \quad (6.4)$$

$$\omega_r = 2\pi f_r = \frac{1}{\sqrt{L_r \cdot C_r}} \quad (6.5)$$

$$V_{1\max} = \frac{2V_1}{\pi} \approx 0,637V_1 \quad (6.6)$$

$$V_{1rms} = \frac{V_{1\max}}{\sqrt{2}} \approx 0.45V_1 \quad (6.7)$$

Giriş geriliminin etkin değeri V_{1rms} (6.7) ile ifade edilmiştir. Rezonans kondansatörü C_r 'nin anlık gerilim değişimi (6.8)'de, üzerindeki gerilim düşümünün maksimum değeri ise (6.9)'da verilmiştir.

$$v_{C_r}(t) = V_{Cr\max} \cdot \sin(\omega_s t - \varphi) \quad (6.8)$$

$$V_{Cr\max} = \frac{I_{L\max}}{\omega_s \cdot C_r} \quad (6.9)$$

Rezonans akımının anlık akım değişimi (6.10)'daki gibi ifade edilir.

$$i_L(t) = I_{L\max} \cdot \sin(\omega_s t - \varphi) \quad (6.10)$$

Burada φ akım ile gerilim arasındaki faz açısını vermektedir ve (6.11)'deki gibi ifade edilir.

$$\cos \varphi = \frac{1}{\sqrt{1 + Q_y^2 \left(\frac{\omega_s}{\omega_r} - \frac{\omega_r}{\omega_s} \right)^2}} = \frac{R_r}{Z_r} \quad (6.11)$$

Burada Q_y rezonans devresi yüklü kalite faktörünü temsil eder ve (6.12) ile ifade edilir. Z_r rezonans devresi giriş empedansını temsil eder ve (6.13)'deki gibi ifade edilir.

$$Q_y = \frac{\sqrt{L_r / C_r}}{R_r} = \frac{1}{\omega_r \cdot C_r \cdot R_r} = \frac{\omega_r \cdot L_r}{R_r} \quad (6.12)$$

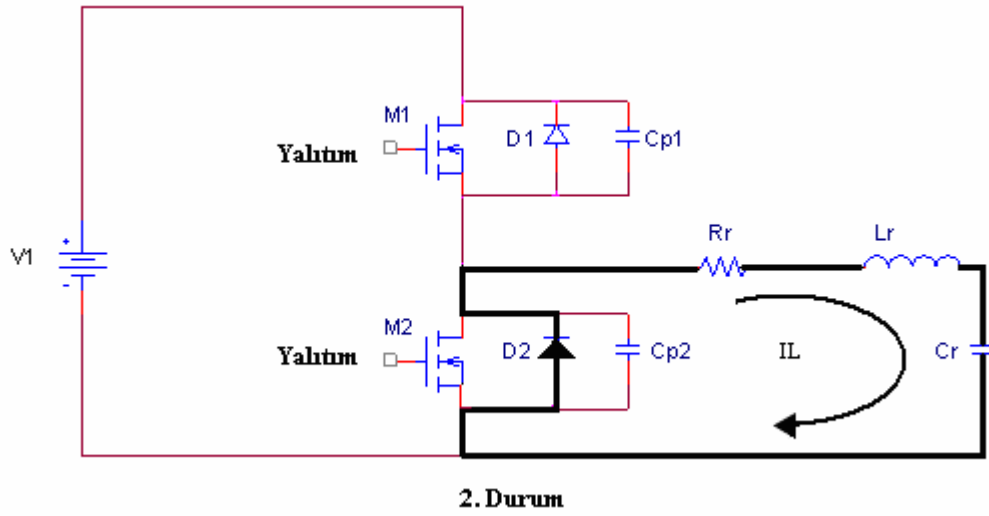
$$Z_r = R_r \left(1 + jQ_y \left(\frac{\omega_s}{\omega_r} - \frac{\omega_r}{\omega_s} \right) \right) = R_r + j \left(\omega_s \cdot L_r - \frac{1}{\omega_s \cdot C_r} \right) \quad (6.13)$$

Rezonans devresi üzerindeki akımın maksimum değeri (6.14) ile verilmiştir.

$$I_{L\max} = \frac{V_{\max}}{Z_r} = \frac{2 \cdot V_1}{\pi \cdot Z_r} = \frac{2 \cdot V_1 \cdot \cos \varphi}{\pi \cdot R_r} \quad (6.14)$$

2. Durum (t_1 - t_2 aralığı): $t=t_1$ olduğu anda M_1 anahtarı kontrol sinyali tarafından yalıtıma geçirilir ve uçlarındaki gerilim artmaya başlar. Bu durumda D_2 diyotu uçlarındaki gerilim

yaklaşık olarak -0.7 V'a ulaştığında ilettime geçer ve M_1 anahtarı içinden dolaşan rezonans akımı artık D_2 diyotu içinden dolaşmaya başlar. Bu işlem sırasında çalışma frekansı rezonans frekansının üzerinde seçildiği için, M_1 anahtarı yalıtıma geçerken üzerinde bir miktar akım ve gerilim değerleri tutulur ve bu yüzden yalıtım kayıpları meydana gelir. Bu kayıpları önlemek için M_1 anahtarı yalıtıma geçtikten sonra, rezonans akımı kısa bir süre C_{p1} kondansatörü üzerinden geçer ve daha sonra D_2 diyotu üzerinden dolaşmaya başlar. $t_1 < t < t_2$ aralığında M_2 anahtarı iletimde olur ve bu sırada üzerinde sıfır akım ya da gerilim olduğu için iletim anı kayıpları oluşmaz.



Şekil 6.6 Her iki anahtarın yalıtım, D_2 diyotunun iletimde olma durumu

Rezonans akımı Şekil 6.6'da gösterildiği gibi 1. çalışma durumu ile aynı yöndedir. Rezonans kondansatörü C_r 'nin anlık gerilim değişimi (6.15)'te, üzerindeki gerilim düşümünün maksimum değeri ise (6.16)'da verilmiştir. Rezonans akımının anlık değişimi (6.17), maksimum değeri ise (6.18)'de verilmiştir.

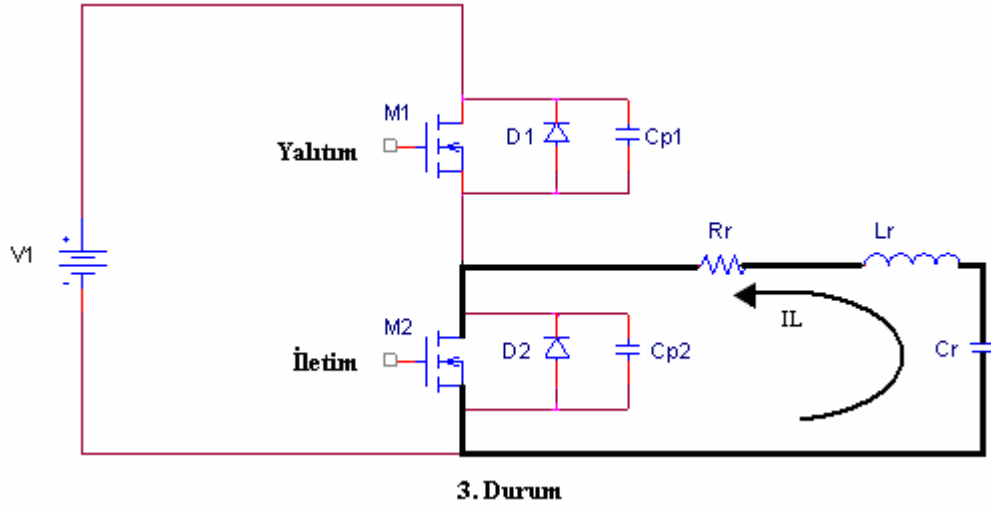
$$v_{C_r}(t) = V_{C_r \max} \cdot \sin(\omega_s t - \varphi) \quad (6.15)$$

$$V_{C_r \max} = \frac{I_{L \max}}{\omega_s \cdot C_r} \quad (6.16)$$

$$i_L(t) = I_{L \max} \cdot \sin(\omega_s t - \varphi) \quad (6.17)$$

$$I_{L \max} = \frac{V_{\max}}{Z_r} = \frac{2 \cdot V_1}{\pi \cdot Z_r} = \frac{2 \cdot V_1 \cdot \cos \varphi}{\pi \cdot R_r} \quad (6.18)$$

3. Durum (t_2 - t_3 aralığı): $t=t_2$ anından sonra rezonans akımı, halen iletimde olan M_2 anahtarı içinden dolaşmaya başlar ve yönü Şekil 6.7’de görüldüğü gibi önceki iki duruma ters yöndedir.



Şekil 6.7 M_2 anahtarının iletim, M_1 anahtarının yalıtımda olma durumu

Burada rezonans kondansatörü C_r , üzerinde depoladığı enerjiyi deşarj ederken devrenin gerilim kaynağı gibi davranır. Rezonans kondansatörü üzerindeki gerilimin anlık değişimi (6.19) ile, maksimum gerilim değeri ise (6.20) ile tanımlanmıştır.

$$v_{C_r}(t) = -V_{C_r \max} \cdot \sin(\omega_s t - \varphi) \quad (6.19)$$

$$V_{C_r \max} = -\frac{I_{L \max}}{\omega_s \cdot C_r} \quad (6.20)$$

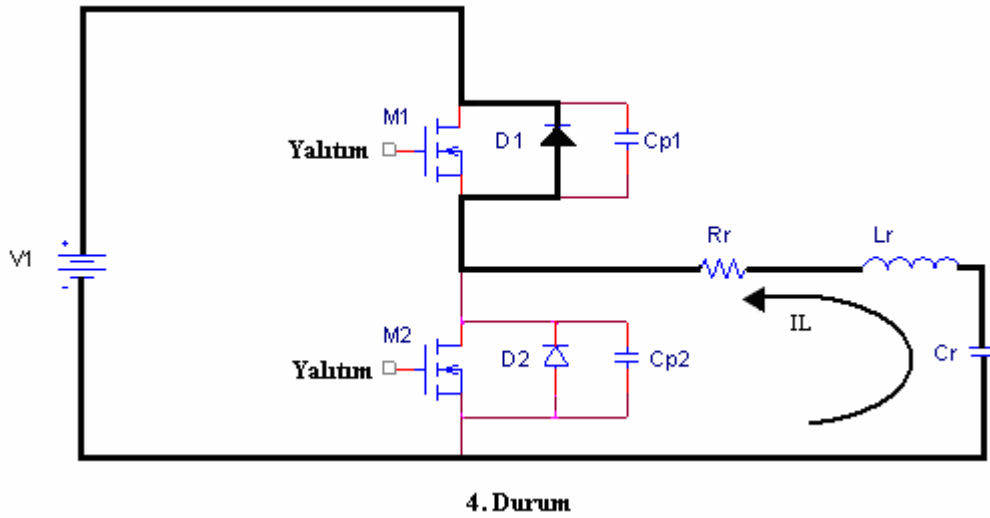
Rezonans akımının anlık değişimi ve maksimum değerinin tanımlaması ise (6.21) ve (6.22) ile verilmiştir.

$$i_L(t) = -I_{L \max} \cdot \sin(\omega_s t - \varphi) \quad (6.21)$$

$$I_{L \max} = -\frac{V_{\max}}{Z_r} = -\frac{2 \cdot V_1}{\pi \cdot Z_r} = -\frac{2 \cdot V_1 \cdot \cos \varphi}{\pi \cdot R_r} \quad (6.22)$$

4. Durum (t_3 - t_4 aralığı) : $t=t_3$ olduğunda M_2 anahtarı kontrol sinyali tarafından yalıtıma geçirilir ve uçlarındaki gerilim artmaya başlar. Bu durumda D_1 diyotu, uçlarındaki gerilim yaklaşık -0.7 V’a ulaştığında iletime geçer ve M_2 anahtarı içinden dolaşan rezonans akımı artık D_1 diyotu içinden dolaşmaya başlar. Bu sırada M_2 anahtarı yalıtıma geçerken üzerinde

bir miktar akım ve gerilim değerleri tutulur ve bu yüzden yalıtım kayıpları meydana gelir. Bu kayıpları önlemek için M_2 anahtarı yalıtıma geçtikten hemen sonra, rezonans akımı kısa bir süre C_{p2} kondansatörü üzerinden geçer ve C_{p2} kondansatörü bir miktar enerjiyi kendi üzerinde biriktirerek yalıtım kayıplarını azaltır. Daha sonra rezonans akımı D_1 diyotu üzerinden dolaşmaya başlar. Bir sonraki durumda $t_3 < t < t_4$ noktasında sıfır akım veya gerilim değerlerine sahip olan M_1 anahtarı ilettime geçer ve bu sebeple anahtarda iletim kayıpları meydana gelmez. Dalgalı rezonans akımı D_1 diyotu üzerinden geçerken, rezonans enerjisinin kaynağı, tekrar V_1 gerilim kaynağı olur. Rezonans akımının yönü Şekil 6.8’de gösterildiği gibidir.



Şekil 6.8 Her iki anahtarın yalıtım, D_1 diyotunun iletimde olma durumu

Rezonans kondansatörü üzerindeki gerilimin anlık değişimi (6.23) ile, maksimum gerilim değeri (6.24) ile tanımlanmıştır.

$$v_{C_r}(t) = -V_{C_{r\max}} \cdot \sin(\omega_s t - \varphi) \quad (6.23)$$

$$V_{C_{r\max}} = -\frac{I_{L\max}}{\omega_s \cdot C_r} \quad (6.24)$$

Rezonans akımının anlık değişimi ve maksimum değerinin tanımlaması ise (6.25) ve (6.26) ile verilmiştir.

$$i_L(t) = -I_{L\max} \cdot \sin(\omega_s t - \varphi) \quad (6.25)$$

$$I_{L\max} = -\frac{V_{\max}}{Z_r} = -\frac{2 \cdot V_1}{\pi \cdot Z_r} = -\frac{2 \cdot V_1 \cdot \cos \varphi}{\pi \cdot R_r} \quad (6.26)$$

6.4 Yarım Köprü Seri Rezonans İnverterli Endüksiyonla Isıtıcı Tasarımı

Bu çalışmada Şekil 6.1’de görüldüğü gibi yarım köprü seri rezonans inverter devresi dizaynı ile mutfak uygulamaları için bir endüksiyon ocağı gerçekleştirilmiştir. Tasarlanan devre, yapısında çeşitli ısıtma yüklerini beslemek için rezonans devresi bobin ve kondansatörü, iki tane yarı iletken anahtar ve bu anahtarların üzerindeki stresi azaltmak için kullanılan koruma devresi elemanlarını içermektedir.

Devrenin tasarımına öncelikle çalışma frekansının seçimi ile başlanmıştır. Anahtarların çalışma frekansı bir önceki kısımda bahsedilen sebeplerden dolayı rezonans frekansının üstünde seçilmiştir ve çıkış gücü kontrolü için değişik frekanslarda çalışılabilecek bir dizayn yapılmıştır. Bu çalışma durumunda anahtarın yalıtıma geçişi sırasında bir takım kayıplar meydana gelirken iletim durumunda herhangi bir kayıp söz konusu değildir. Meydana gelen yalıtım kayıpları anahtara paralel bağlanan bir koruma kondansatörü ile azaltılmıştır. Aynı zamanda anahtarlara ters paralel bağlı diyotların ters toparlanma sürelerinin anahtarlama frekansının altında çalışma durumunda olduğu gibi çok kısa olmasına gerek yoktur.

Çalışma frekansı seçiminden sonra, Bölüm 3’te bahsedildiği gibi mutfak tipi endüksiyon uygulamalarında sıkça kullanılan pancake şeklinde bir bobin tipi seçilmiş ve Bölüm 7’de anlatıldığı gibi bobin dizaynı gerçekleştirilmiştir. Rezonans frekansını anahtarlama frekansının altında tutabilmek için rezonans kondansatörünün değeri (6.5) ile $C_r=1.22 \mu F$ olarak seçilmiştir. Değişik çaptaki yük kombinasyonları ile endüktans ve direnç değişimleri ölçüm yolu ile belirlenmiştir. Devrenin PSPICE elektronik benzetim programı kullanılarak yapılan simülasyonunda, 150x150x1 mm yükü ile yüklü asimetrik bobin kullanılarak yapılan ölçümler sonucu rezonans devresi direnci $1,66 \Omega$, endüktansı $40,2 \mu H$, kondansatörü $1,22 \mu F$, yüklü kalite faktörü 3,55, rezonans frekansı 22,7 kHz ve rezonans frekansı gözönüne alınarak anahtarlama frekansı 30 kHz alınmıştır. Tasarım hesapları yapılırken bu değerler kullanılacaktır.

Bu durumda öncelikle devrenin açısal rezonans frekansı (6.5) ile, açısal anahtarlama frekansı (6.4) ile ve faz açısı (6.11) ile hesaplandığında,

$$\omega_r = 2\pi f_r = \frac{1}{\sqrt{L_r \cdot C_r}} = \frac{1}{\sqrt{40,2 \cdot 10^{-6} \cdot 1,22 \cdot 10^{-6}}} = 142793,05 \text{ rad / sn}$$

$$\omega_s = 2\pi f_s = 2 \cdot \pi \cdot 30 \cdot 10^3 = 188495,56 \text{ rad / sn}$$

$$\cos \varphi = \frac{1}{\sqrt{1 + Q^2 \left(\frac{\omega_s}{\omega_r} - \frac{\omega_r}{\omega_s} \right)^2}} = \frac{1}{\sqrt{1 + 3,55^2 \cdot \left(\frac{188495,56}{142793,05} - \frac{142793,05}{188495,56} \right)^2}} = 0,45$$

değerleri bulunur. Giriş güç kaynağının değeri $V_1=30$ V seçildiğinde, rezonans akımının maksimum değeri (6.14) ile hesaplandığında,

$$I_{L \max} = \frac{2 \cdot V_1 \cdot \cos \varphi}{\pi \cdot R_r} = \frac{2 \cdot 30 \cdot 0,45}{\pi \cdot 1,66} = 5,18 A$$

olarak elde edilir. Rezonans akımının efektif değeri (6.27) ile hesaplanabilir.

$$I_{Leff} = \sqrt{f_s \cdot \int_0^{(1/f_s)} (I_{L \max} \cdot \sin(\omega_s t - \varphi))^2 \cdot d(t)} \quad (6.27)$$

$$I_{Leff} = \sqrt{30000 \int_0^{1/30000} (5,18 \cdot \sin(2 \cdot \pi \cdot 30000 \cdot t - 0,45))^2 \cdot d(t)} = 4,29 A$$

bulunur. Rezonans akımı aynı zamanda anahtar üzerindeki akım olduğu için anahtar akımında aşağıdaki gibidir.

$$I_{M \max} = I_{L \max} = 5,18 A$$

$$I_{Meff} = I_{Leff} = 4,29 A$$

Rezonans kondansatörü üzerinde meydana gelen gerilimin maksimum değeri (6.16) eşitliği ile hesaplandığında,

$$V_{Cr \max} = \frac{I_{L \max}}{\omega_s \cdot C_r} = \frac{5,18}{188495,56 \cdot 1,22 \cdot 10^{-6}} = 22,53 V$$

bulunur. Kondansatör geriliminin tepeden tepeye değeri hesaplanırsa (6.28) ile,

$$V_{CrTT} = 2 \cdot V_{Cr \max} = 2 \cdot 22,53 = 45,06 V \quad (6.28)$$

olarak bulunur.

Bu çalışmada yarım köprü seri rezonans inverter devresi için, orta frekans bölgesinde çalışabilen, hesaplanan ve simülasyon sonuçlarında elde edilen akım gerilim değerlerini taşıyabilen yarı iletken anahtarlar araştırılarak, bunların içinden IXYS firmasının ürettiği

IXFH26N50 tipi MOSFET'ler tercih edilmiştir. Bu anahtar bünyesinde ters bloklama diyotu da bulundurulur. Bu nedenle devrede ayrıca diyot kullanılmamıştır. Yarı iletken anahtarlar çalışma frekansları ve taşıdıkları akım, gerilim değerleri doğrultusunda seçilmektedirler. Elemanın gerilim değeri (drain-source gerilimi) 500 V, akım taşıma kapasitesi (drain akımı) 26 A, iletim durumunda iken direnci 0.20Ω ve çalışma frekansı orta frekans bölgesinde çalışmaya uygundur. Bununla birlikte yapılan tasarım sonuçlarına göre anahtarların taşıması gereken maksimum akım değeri 5.18 A ve gerilim değeri 30 V'dur. Anahtar tipi bu çalışma için büyük değerli bir anahtar olsa da, daha sonraki çalışmalarda güç artımına gidilebileceği için bu anahtarın seçimi uygundur. Rezonans frekansının üstündeki çalışma durumunda, anahtarın iletim anındaki kayıpları sıfırdır, fakat yalıtım kayıpları vardır. Yalıtım kayıplarını azaltmak için Bölüm 5'te anlatıldığı üzere anahtara paralel bir kondansatör bağlanmıştır.

Kondansatörün değeri, yalıtım sırasında anahtar uçlarında meydana gelen gerilim artışının oranına göre belirlenir. Anahtar yalıtıma girinceye kadar üzerinde, yük akımı I_L 'yi taşır ve yalıtım anında üzerindeki akım lineer olarak azalmaya başlar. Anahtar akımı sıfır olduğu anda, anahtar uçlarındaki yaklaşık gerilim değerine göre kondansatör değeri seçilir. Anahtar akımı sıfıra ulaşmadan önce kondansatörün tamamen şarj olduğu düşünülürse, kondansatör gerilimi (6.29) ile hesaplanabilir (Çetin, 2005, Sazak, 2006).

$$V_{C_p} = \frac{I_{Leff} \cdot t_f}{2 \cdot C_p} \quad (6.29)$$

Buradan t_f yalıtıma geçiş süresi olmak üzere koruma kondansatörü değeri C_p (6.30) ile,

$$C_p = \frac{I_{Leff} \cdot t_f}{2 \cdot V_{C_p}} \quad (6.30)$$

olarak bulunur. Anahtar akımı sıfır olduğunda, drain-source gerilimi kaynak gerilimine eşit veya küçük olur. Bu durumda paralel bağlanacak kondansatörün değeri (6.31) ile ifade edilir.

$$C_p = \frac{I_{Leff} \cdot t_f}{2 \cdot V_1} \quad (6.31)$$

Burada anahtar yalıtım durumunda iken, kaçak endüktansların sebep olduğu aşırı gerilim düşümlerinde gözönüne almak gerekir. (6.32)'de belirtilen eşitlik doğrultusunda bu aşırı gerilim düşümlerini önleyen kondansatör değeri belirlenebilir.

$$C_p = \frac{100 \cdot k \cdot I_{Leff} \cdot t_f}{V_1} \quad (6.32)$$

Burada k parametresi anahtar üzerinde koruma devresi yok iken meydana gelen aşırı gerilim yüzdesidir ve (6.33) ile ifade edilir.

$$k = \frac{L_{DS} \cdot I_{Leff}}{t_f \cdot V_1} \quad (6.33)$$

Seçilen anahtar modelinin katalog bilgilerinde yalıtım süresi 30 ns ve kaçak endüktans değeri L_{DS} 18 nH'dir. Bu durumda devre için koruma kondansatörünün değeri,

$$k = \frac{L_{DS} \cdot I_{Leff}}{t_f \cdot V_1} = \frac{18 \cdot 10^{-9} \cdot 4,29}{30 \cdot 10^{-9} \cdot 30} = 0,086$$

$$C_p = \frac{100 \cdot k \cdot I_{Leff} \cdot t_f}{V_1} = \frac{100 \cdot 0,086 \cdot 4,29 \cdot 30 \cdot 10^{-9}}{30} = 36,81nF \text{ olarak bulunur.}$$

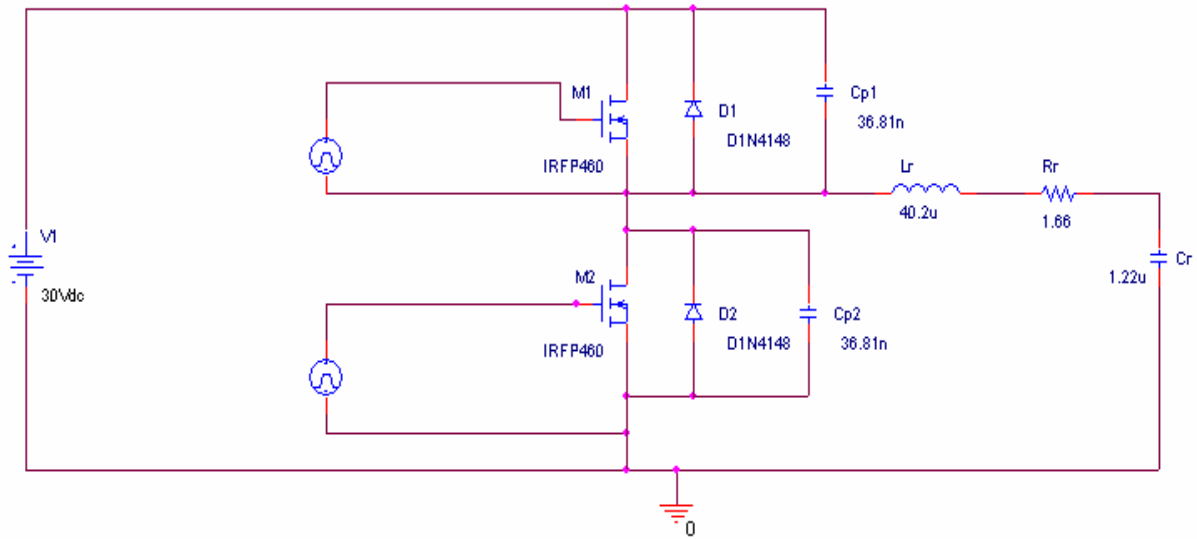
6.5 Yarım Köprü Seri Rezonans İnverter Devresi PSPICE Simülasyonu

Bilgisayar benzetimi güç elektroniğinin öğrenilmesine yardımcı olan bir araçtır. Aynı zamanda araştırma çalışmalarında yeni bir devrenin analizi amacıyla kullanılır ve devrenin daha iyi anlaşılmasını sağlar. Sanayide ise, laboratuvarında devreyi gerçekleştirip devre parametrelerinin etkilerinin deneylerle incelenmesi yerine, aynı işi bilgisayar modeli üzerinde çok daha hızlı yaptığı için, tasarım süresinin kısaltılması amacıyla kullanılır (Mohan, 2003).

Yarım köprü seri rezonans inverter devresinin çalışmasını incelemek, daha iyi kavramak, yorum yapabilmek, çıkabilecek sorunları önceden saptayıp önlem alabilmek amacı ile devre kurulmadan önce bilgisayar ortamında benzetimi yapılmıştır. Güç elektroniği devrelerinde kullanılan yarı iletken güç anahtarları hem pahalı hem de çok kolay bulunmayan elemanlardır. Bu amaçla tasarımcının özel bir dikkatle devresini tasarlaması ve çeşitli çalışma koşullarında anahtara zarar gelmemesi için önlem alması gerekir. Bilgisayar benzetimleri, güç elektroniği devresindeki dalga şekillerinin, sistemin sürekli ve geçici hal davranışlarının, yarı iletkenlerin akım ve gerilim anma değerlerinin hesaplanmasında kullanılır. Ön tasarlamadan sonra devrenin geliştirme sürecinin önemli bir aşamasını simülasyon kısmı oluşturur. Alınan önlemlere karşın önceden görülmeeyen bazı unsurlar güç anahtarlarının zarar görmesine ve önemli ölçüde zaman kaybına yol açabilir. Fakat bunlar simülasyon yapılarak görülür ve önlenmiş olur. Bunların yanında kullanıcı sistemin nasıl çalıştığını daha iyi anlar ve daha

verimli dizaynlar için tahminlerde bulunabilir. Genel olarak, çeşitli adımlar arasında birçok yuvarlamalar yapılır. Benzetime olan güven arttıkça, devrenin güç kayıplarını da kapsama almak mümkün olur. Bunun sonucunda sistemde meydana gelen sıcaklık artışının istenen düzeyde kalmasını sağlayan termik tasarımda gerçekleştirilir. Son yıllarda devrelerin bilgisayarda simülasyonu giderek önem kazanmaktadır.

PSPICE (Simulation Program with Integrated Circuit Emphasis) programı elektronik devrelerin bilgisayar ortamında benzetimi için geliştirilmiş önemli programlardan biridir. Bu program MicroSim şirketi tarafından geliştirilmiştir. PSPICE, elektriksel devre dizaynlarını oluşturmadan önce, deneme yapılmasına yardımcı olur. Hiçbir donanıma dokunmadan gerekli olan değişikliklerin yapılmasına müsaade eder. Son yıllarda yaygın kullanım alanı bulmuştur. Bu çalışmada inverter devresinin simülasyonu PSPICE programının şematik kısmında yapılmıştır. Şekil 6.9'da oluşturulan devre görülmektedir.

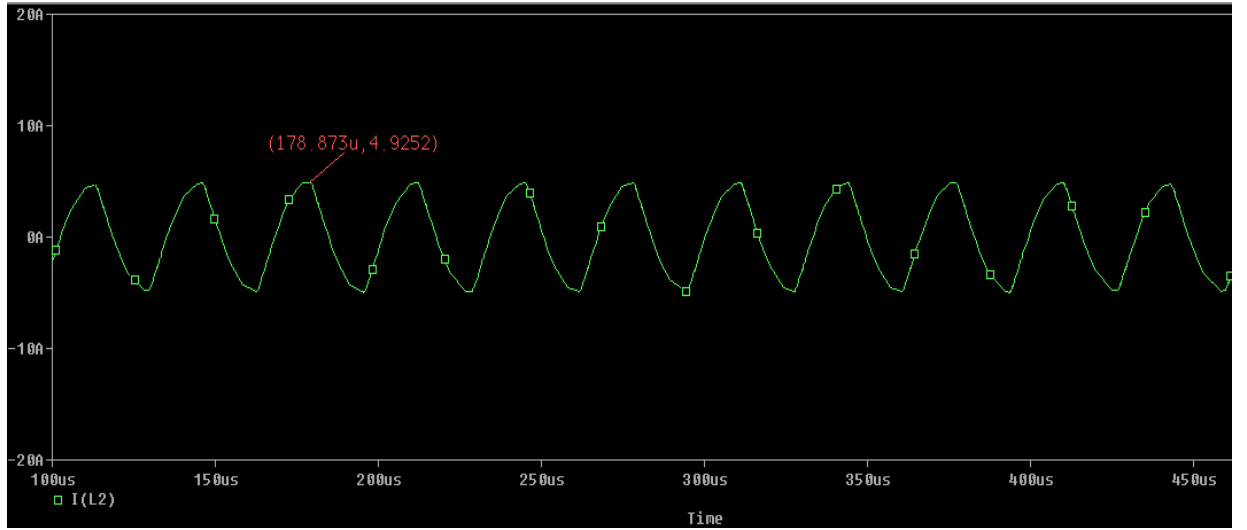


Şekil 6.9 Yarı köprü seri rezonans inverterin PSPICE ortamında oluşturulması

Yarı köprü seri rezonans inverterli mutfak tipi endüksiyon ısıtma sistemi 30V DC gerilimde ve 30 kHz anahtarlama frekansında çalıştırılmıştır. Devrenin toplam çalışma periyodu 33.3 μ s'dir. Devreye bakıldığında, M_1 ve M_2 anahtarları devrenin 30 kHz'de çalışmasını sağlayan dönüşümlü olarak anahtarlama yapan elemanlardır. Programın kütüphanesinden gerekli elemanlar seçilerek eşdeğer devre elemanların değeri atanmıştır. Burada $R_r=1.66 \Omega$ ve rezonans devresi direncidir. $L_r=40.2 \mu$ H ve rezonans devresi endüktansıdır. $C_r=1.22 \mu$ F ve rezonans devresi kondansatörüdür. $C_{p1}=C_{p2}=36.81$ nF ve yarı iletken anahtarları koruma kondansatörleridir. PSPICE elektronik benzetim programı kullanılarak devrenin yarı iletken

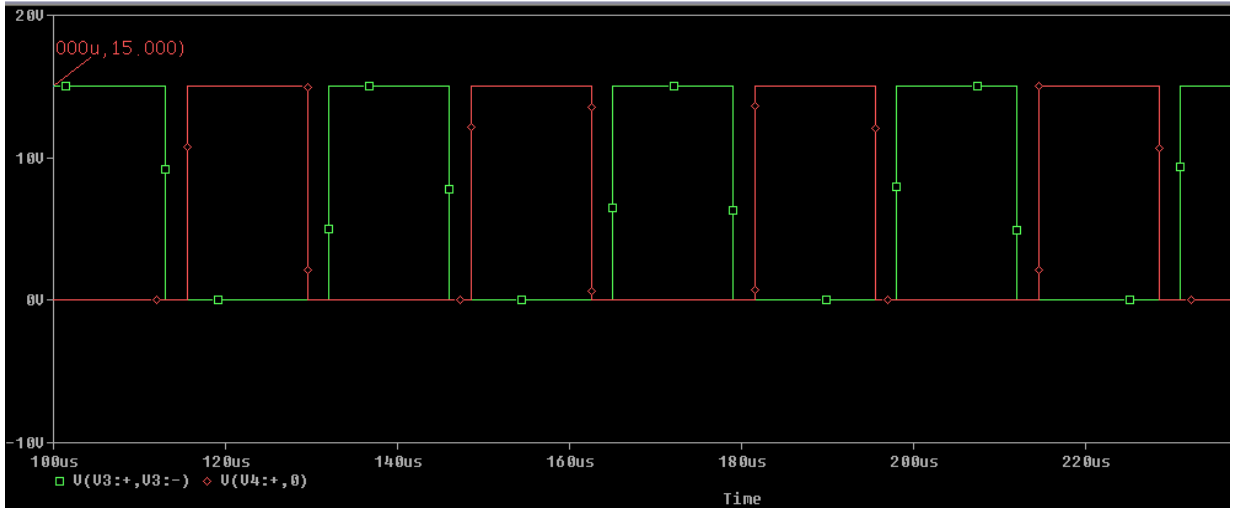
anahtar gerilimi ve akımı, bobin akımı ve kondansatör gerilimi dalga şekilleri alınmıştır. Devrede güç anahtarı modeli olarak programın dahili kütüphanesinde IXFH26N50 MOSFET yarı iletken elmanı olmadığı için onun devre modeline yakın IRFP460 MOSFET kullanılmıştır. D_1 ve D_2 diyotları D1N4148 geri besleme diyotlarıdır.

Devrenin benzetimi yapıldığında rezonans akımının dalga şekli ve maksimum değeri Şekil 6.10'daki gibi olmaktadır. Isıtma bobininden geçen akım, orta frekansta ve zamanla yönü ve şiddeti değişmektedir. Böylece endüksiyonla ısıtma için gerekli olan zamanla değişen manyetik akı üretilebilir ve elektromanyetik ısıtma gerçekleştirilebilir.



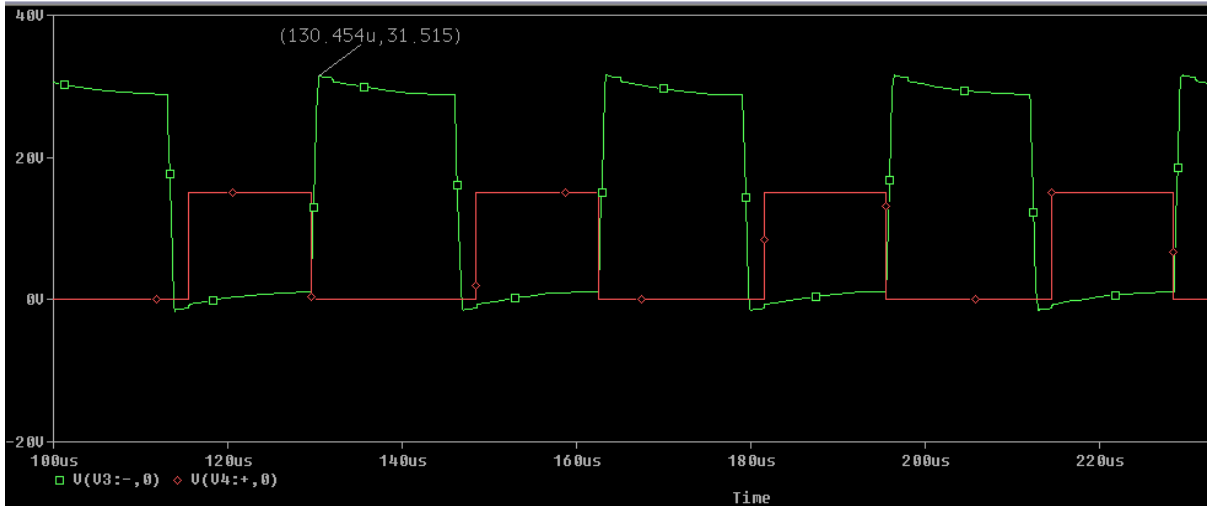
Şekil 6.10 Rezonans akımı dalga şekli ve maksimum değeri

Şekil 6.11'de MOSFET'in denetim sinyali darbe kaynağıyla sağlanmıştır. 30 kHz olarak seçilen çalışma frekansında toplam periyot 33.3 μ s olmaktadır ve iki anahtarın birlikte yalıtımda kaldığı ölü zaman aralığı ise 2.5 μ s bırakıldığı için, anahtarlar dönüşümlü olarak 14 μ s iletimde, 19 μ s kesimde kalmaktadırlar.



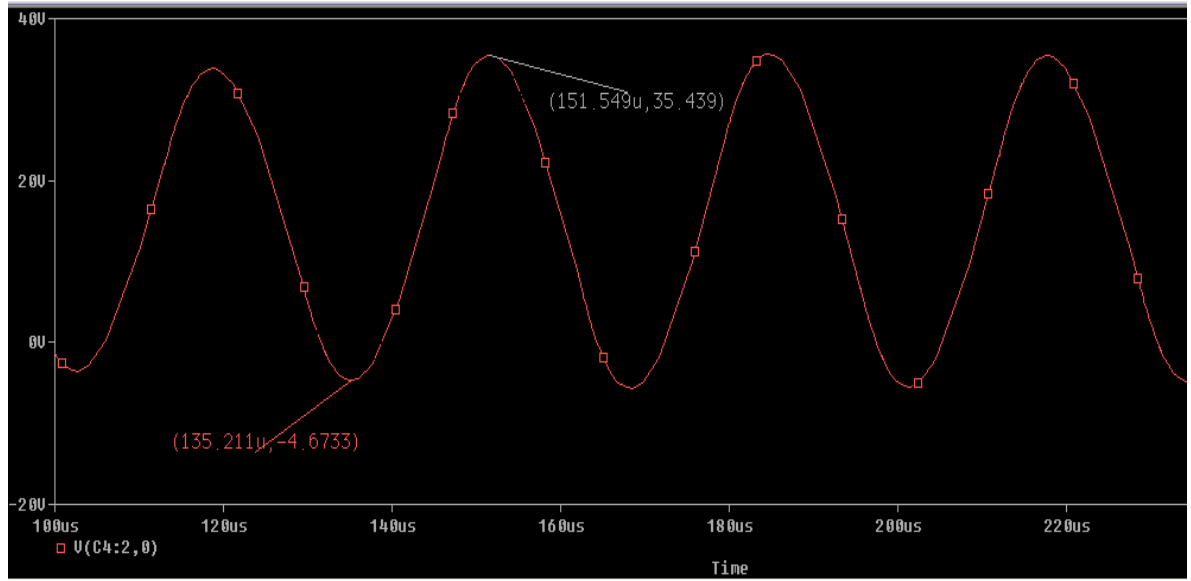
Şekil 6.11 Kontrol sinyalleri dalge şekilleri

Şekil 6.12’de sıfır gerilim anahtarlama’yı göstermek amacı ile M_1 anahtarının tetikleme sinyalleri V_{GS} ve uçlarındaki gerilim V_{DS} ’nin dalga şekilleri gösterilmiştir. Anahtar gerilimi sıfır iken anahtarın iletme geçtiği ve anahtar üzerine düşen maksimum gerilimin kaynak gerilimi ile sınırlandığı şekil üzerinde görülmektedir. Bölüm 5’te bahsedildiği üzere sıfır gerilimde anahtarlama yapmak yarı iletkenlerde oluşan anahtarlama kayıplarını büyük ölçüde azaltmaktadır. Çünkü anahtar üzerindeki gerilim sıfır olduğu anda anahtar iletme sokulursa herhangi bir güç kaybı oluşmaz.



Şekil 6.12 Sıfır gerilim anahtarlama’yı gösteren dalga şekli

Şekil 6.13’de rezonans kondansatörü üzerinde meydana gelen gerilimin dalga şekilleri verilmiştir ve dalga şeklinin tepeden tepeye değeri işaretlenmiştir.



Şekil 6.13 Rezonans kondansatörü gerilimi dalga şekli ve tepeden tepeye değeri

Çizelge 6.1’de tasarım ve simülasyon sonuçlarının karşılaştırılması görülmektedir. Benzetim ve analiz sonuçları birbirinden biraz farklı çıkmasının sebebi, devre tasarımının ideal ortamda yapılması ve yarı iletken anahtarın farklı kullanılmasıdır.

Çizelge 6.1 Yarı köprü seri rezonans inverter devresi tasarım ve simülasyon sonuçları

Parametreler	Tasarım Sonuçları	Benzetim Sonuçları
I_{Lmax}	5,18	4,92
V_{Ctt}	45,06	40,11
V_{M1max}	30	31,51
V_{M2max}	30	31,4

İdeal anahtar kullanılarak alınan elektronik benzetim sonuçları ile yarı köprü seri rezonans inverter devresinin analizinden elde edilen sonuçlar Çizelge 6.1’de karşılaştırılmıştır. Çizelgedeki değerler sırasıyla rezonans akımı maksimum değeri, rezonans kondansatörünün tepeden tepeye gerilimi ve yarı iletken anahtarların maksimum değerleridir.

7. YARIM KÖPRÜ SERİ REZONANSLI İNVERTER ile MUTFAK TİPİ ENDÜKSİYON ISITMA UYGULAMASI

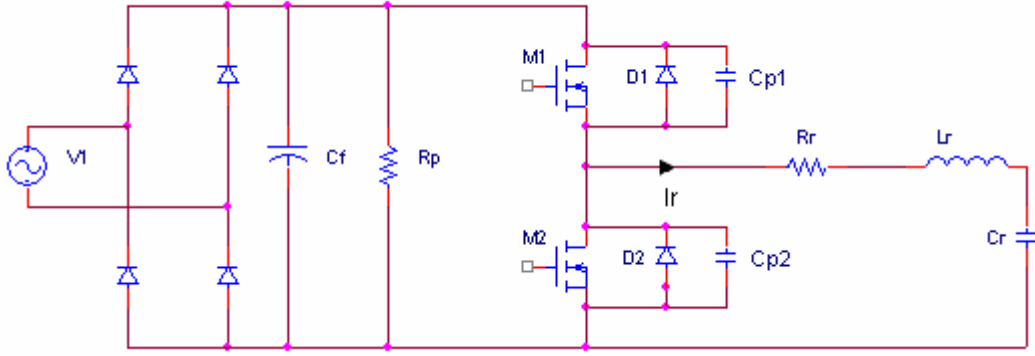
7.1 Giriş

Bu bölümde bir fazlı orta frekanslı mutfak tipi bir endüksiyon ısıtma uygulaması, sıfır gerilim anahtarlama, gerilim beslemeli yarım köprü seri rezonans inverter ve pancake tipi endüksiyon bobini uygulaması ile birlikte anlatılmış, deneysel çalışma sonuçları sunulmuştur.

Sistemin gerçekleştirilmesinde ilk olarak mutfak uygulamalarında kullanılan pancake bobin tasarımı yapılmıştır. Yüklü bobin sisteminin endüktans ve direnç değerleri için gerekli ölçümler yapılmıştır. Ölçümler ve hesaplamalar sonucu sistemin rezonans devresi elemanlarının değerleri belirlenmiş ve rezonans frekansına göre çalışma frekansı aralığı seçilmiştir. Sonrasında bobin tasarımı sonucu belli olan değerlere ve ana güç devresinin hesap ve simülasyon sonuçlarındaki akım ve gerilim değerlerine göre, güç devresi için uygun olan yarı iletken anahtarlar belirlenmiş ve bu anahtarların kontrol sinyallerini üretecek kontrol ünitesi tasarlanmıştır. Bir sonraki aşamada bu kontrol sinyallerini izoleli bir şekilde yarı iletken anahtara verebilmek için izoleli sürücü devresi gerçekleştirilmiştir. Tasarlanan sistemin çalışması sağlandıktan sonra çalışma sonuçları ve belli zaman aralıklarında yükün sıcaklık ölçümleri alınmış ve sonuçlar verim açısından değerlendirilmiştir.

7.2 Güç Devresi

Güç devresi ayarlı bir transformatör, tam dalga bir doğrultucu, filtre elemanları ve seri rezonans devreli bir fazlı yarım köprü inverterden meydana gelmektedir. Şebekeden alınan AC gerilimi tam doğrultulmuş DC gerilime çevirmek için, tam köprü bir doğrultucu kullanılmıştır. DC gerilimdeki dalgalanmayı gidermek amacı ile C_f kondansatörü filtre görevi yapmak için doğrultucu çıkışına bağlanmıştır ve değeri $400 \mu F/230V$ 'tur. Filtre kondansatörünün hızlı bir şekilde şarj/deşarj olması için C_f 'ye paralel $10 k\Omega$ lık bir R_p direnci bağlanmıştır. Şekil 7.1'de güç devresi görülmektedir.

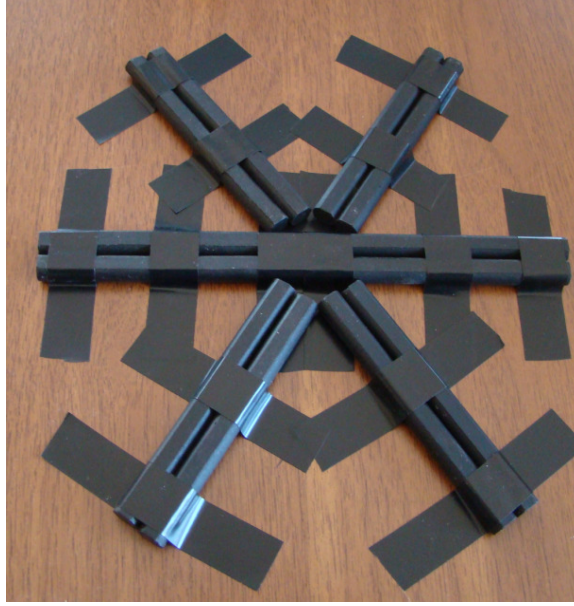


Şekil 7.1 Bir fazlı yarım köprü seri rezonans inverter devresi

7.3 Endüksiyon Bobini Dizaynı

Endüksiyonla ısıtma sistemlerinde bobin dizaynı ısıtma sisteminin önemli aşamalarından biridir. Bobin tasarımı konusunda birçok araştırmacı çeşitli yöntemler geliştirmiştir. Endüstri de bobin dizaynı, Baker tarafından geliştirilen, sonrasında Reichert, Williamson ve Vaughan, Al-Shaikhli ve Hobson ve Lavers tarafından iyileştirilen “Eşdeğer Devre Yöntemi” ile sağlanmıştır. Bu yöntem, endüksiyon bobini ve çalışma parçasının eşdeğer direnç ve endüktans olarak gösterilmesidir. Öte yandan çeşitli araştırmacılar ve akademisyenler bobin dizaynı konusunda çeşitli karmaşık sayısal teknikler geliştirmişlerdir. Bunlardan bazıları, Sonlu Elemanlar Yöntemi, Sonlu Farklar Yöntemi ve Manyetik Bağlantılı Devre Yöntemi olarak sayılabilir (Elfallah vd., 1987).

Elektromanyetik ısıtmanın gerçekleştirilebilmesi için endüksiyon bobini, pancake bobin olarak seçilmiştir. Şekil 7.2’de gösterildiği gibi bobinin ürettiği manyetik alanının yük üzerindeki etkisinin artırılması, kaçak akıların azaltılması ve dolayısıyla daha verimli bir ısıtma için aralarında 45^0 ve 90^0 açı bulunan ferit nüveler bobinin altına bir tahta zemin üzerine yerleştirilmiştir.

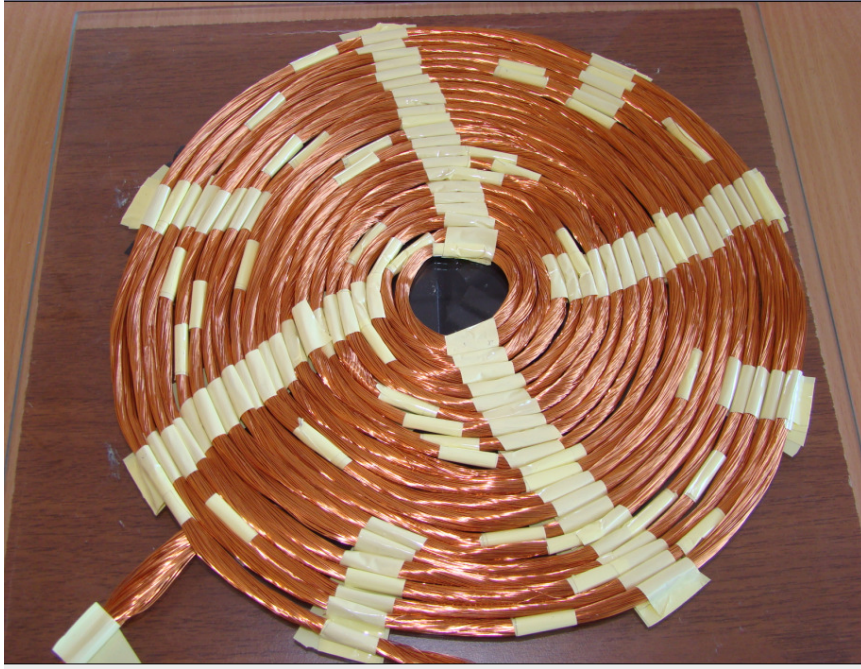


Şekil 7.2 Tasarımda ferit çubukların yerleştirilme geometrisi.

Bu çalışmada çalışma frekansı olarak 25-30 kHz arası seçilmiş ve bu frekanslarda deri olayı etkisi, bakır için (2.9) bağıntısı ile hesaplanmıştır.

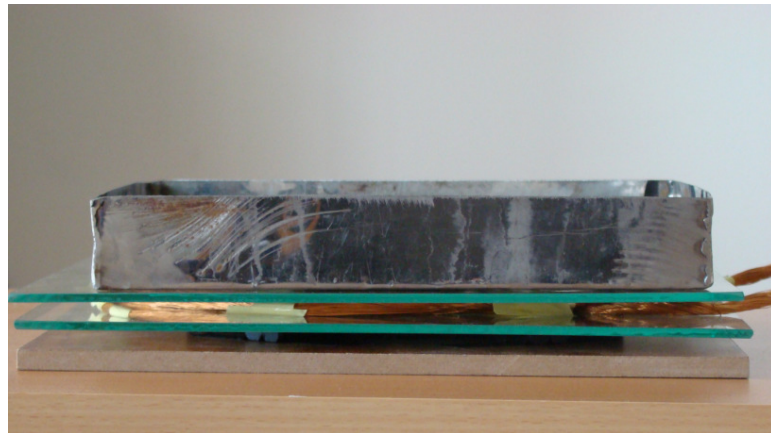
$$\delta = \sqrt{\frac{\rho}{\mu_0 \cdot \mu_r \cdot f_s \cdot \pi}} = \sqrt{\frac{0.017857}{4\pi \cdot 10^{-7} \cdot 1 \cdot 25 \cdot 10^3 \cdot \pi}} = 0.43mm$$

(2.9)'a göre 25-30 kHz için akımın ulaşabileceği maksimum derinlik 0.43-0.39 mm arasında olmaktadır. En yüksek verim endüksiyon bobini direncinin çalışma parçası direncinden daha küçük olduğu durumlarda gerçekleşir. Endüksiyon bobini direncini düşürmek, orta frekansta bobin sarımında deri etkisi nedeniyle oluşacak direnç artışının önlemek ve bobin telinin birim kesitteki akım taşıma kapasitesini artırmak için her biri 0.30 mm çaplı emaye yalıtımlı bakır iletkenlerden oluşmuş litz teli kullanılmış ve böylelikle bobin verimi arttırılmıştır. Özellikle yüksek frekanslar için endüksiyon bobininde oluşacak güç kayıplarını azaltmak için temel stratejilerden biri de litz teli kullanımıdır (Acero vd., 2005). Bu tellerden 170 adet sarılarak bir bobin spiri oluşturulmuş, sonra bu sarımın açılmaması için bu sarım aynı yönde çevrilelek burulmuş ve belli aralıklarla bantlanmıştır. Sonuç olarak pancake bobin yapımı için gerekli olan düz spiral şeklinde, spirler arasında boşluk kalmayacak şekilde bobin sarımı elde edilmiştir. Daha sonra bu litz teli ısıya dayanıklı düz cam yüzey üzerine sarılarak pancake bobin haline getirilmiştir. Şekil 7.3, bu çalışmada dizayn edilen pancake endüksiyon bobinini göstermektedir.



Şekil 7.3 Dizayn edilen asimetrik pancake bobin

Isıtmanın verimli olabilmesi için mutfak kabının çapı, sarılan bobinin çapından ya küçük olmalıdır ya da bobin çapına eşit olmalıdır. Sistemde yük modeli olarak Şekil 7.4’de görüldüğü gibi, çapı bobin çapına yaklaşık olarak eşit, 1 mm kalınlığında ve bir kenarı 150 ve 250 mm olan krom-nikel kare tepsi şeklinde yükler seçilerek, her biri için ayrı ayrı ısıtma deneyleri gerçekleştirilmiştir.



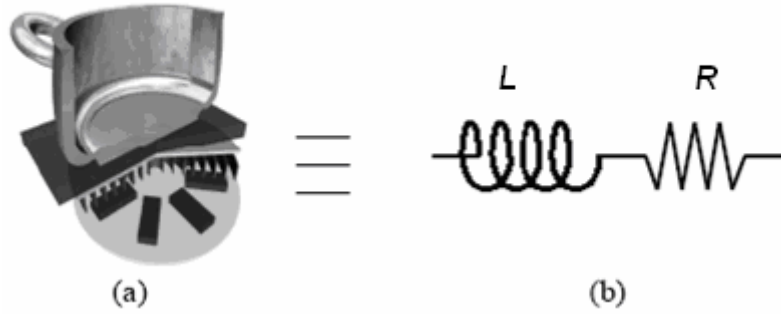
Şekil 7.4 Seçilen mutfak kabı, izölatör ve ferit çubuklarla birlikte bobin sistemi.

Sonuç olarak, tasarlanan ferit çubuk yapısı ile akının bobin üzerinde yoğunlaşması sağlanarak kaçak akılar azaltılmış, litz teli kullanılarak bobin direnci düşürülmüş ve birim kesitteki akım taşıma kapasitesi arttırılmış, yük olarak yüksek manyetik geçirgenlikli olan krom-nikel yükler

endüksiyonla ısıtma sistemleri için seçilmiştir. Bobin ile yük arasındaki yalıtkanın ısıya dayanıklı 4 mm kalınlığında cam seçilmeside bobin ile yük arasındaki manyetik etkileşimi kuvvetlendirmiş ve bütün bunların sonucunda bobin verimi artmıştır.

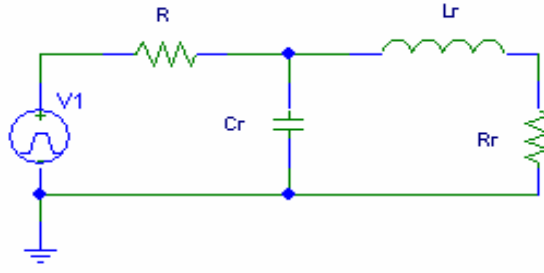
7.3.1 Yüklü Bobin Parametrelerinin Hesabı

Isıtma bobininin endüktansı, rezonans frekansı, kalite faktörü gibi parametreler verimde büyük rol oynadığı için yüklü bobinin eşdeğer devresinin çıkartılması oldukça önemlidir. Mutfak tipi endüksiyon ısıtıcılarda pancake bobin üzerine seçilen 150x150 mm ve 250x250 mm krom-nikel yükler konularak elde edilen yüklü bobin, en basit haliyle Şekil 7.5'teki gibi seri RL devresi olarak modellenenir.



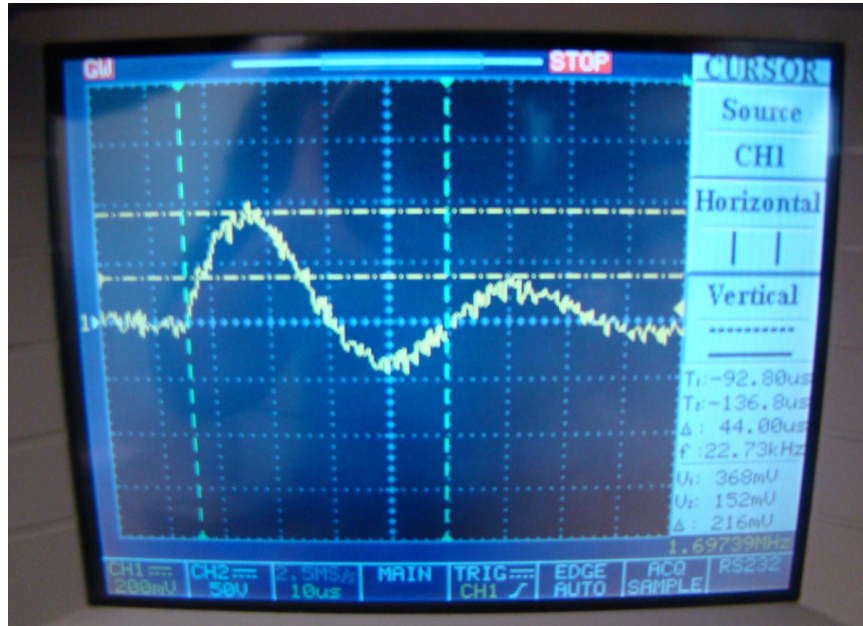
Şekil 7.5 (a)Yüklü ısıtma bobini ve (b) eşdeğer devresi (Llorente vd., 2002)

Bobin yüklü durumda iken değişik çalışma frekanslarında endüktans ve direnç değerini belirlemek için matematiksel yöntemlerden faydalanılabileceği gibi, Şekil 7.6'deki yüklü bobin eşdeğer devresinden elde edilecek salınımlı kondansatör geriliminin salınım periyodundan ve kullanılan kondansatörün değerinden faydalanılarak da elde edilebilir. Bobin parametreleri tek bir frekansta devre üzerinde yapılan ölçümler yoluyla hesaplanmaktadır. L_r ve C_r rezonans devrsi elemanları, R_r yüklü bobin direnci ve R direnci ise rezonans akımını sınırlamak amacıyla konulmuştur. Devre parametreleri belirlenirken bazı temel ölçümlerden ve hesaplamalardan faydalanılacaktır.

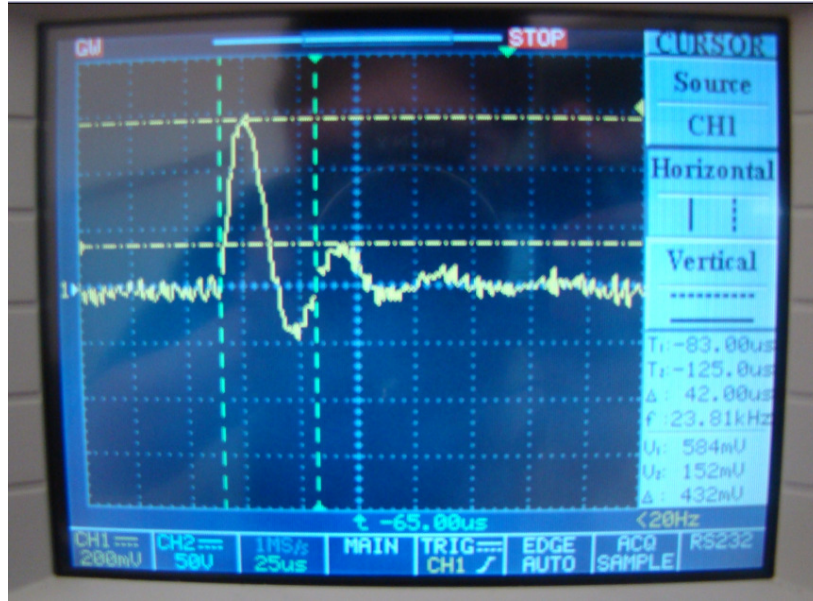


Şekil 7.6 Bobinin endüktans ve direncinin belirlenmesi için kullanılan paralel rezonans devresi

Frekans osilatöründen belirli bir frekansta gerilim verilerek devre çalıştırıldığında, endüksiyon ısıtıcı sistemi için seçilen yüksek frekanslara dayanıklı polipropilen rezonans kondansatörü geriliminin periyodu, bobin ile kondansatörün rezonansa girdiği periyodu göstermektedir. Şekil 7.7 ve Şekil 7.8’de yüklü asimetrik bobin modeli eşdeğer devrenin rezonans kondansatörü gerilimlerinin dalga şekilleri görülmektedir.



Şekil 7.7 150x150 mm yüklü asimetrik bobin için rezonans kondansatörü gerilimi (Volt/div=200 mV, Time/div=10 μ s).



Şekil 7.8 250x250 mm yüklü asimetrik bobin için rezonans kondansatörü gerilimi
(Volt/div=200 mV, Time/div=25 µs).

Rezonans kondansatörü geriliminin periyodu ölçülür ve aşağıdaki bağıntı kullanılarak rezonans frekansı hesaplanır. Yapılan hesaplamaların 150x150x1 mm yükü ile yüklü asimetrik bobin modeli için sonuçları aşağıda verilmiştir. Diğer yük ve bobin modelleri için hesaplanan değerler Çizelge 7.1 de verilmiştir.

150x150x1 mm lik yük için, yüklü asimetrik bobinin rezonans frekansı rezonans periyodu T_r 'den,

$$f_r = \frac{1}{T_r} = \frac{1}{44\mu s} = 22,7kHz \quad (7.1)$$

olarak hesaplanır.

Devre rezonans frekansındayken bilindiği gibi endüktif reaktans X_L ile kapasitif reaktans X_C birbirine eşit olur. Bu eşitlik kullanılarak endüktans değeri (7.3)'teki gibi bulunur. Burada kondansatör değeri değiştirilerek değişik rezonans frekanslarında çalışma durumları elde edilebilir ve elde edilen frekans değerleri ile frekansa göre meydana gelen endüktans değişimi saptanabilir.

$$f = f_r \quad \text{için} \quad X_L = X_C \quad (7.2)$$

$$2\pi \cdot f_r \cdot L_r = \frac{1}{2\pi \cdot f_r \cdot C_r} \quad (7.3)$$

$$L_r = \frac{1}{(2\pi \cdot f_r)^2 \cdot C} = \frac{1}{(2\pi \cdot 22,7 \cdot 10^3)^2 \cdot 1,22 \cdot 10^{-6}} = 40,2 \text{ } \mu\text{H}$$

Endüksiyon ısıtma sistemlerinde bobin ve çalışma parçası arasındaki ilişki kalite faktörü ile ilgilidir. Bobinde depo edilen maksimum enerji ile direnç üzerinde harcanan enerji arasındaki oran, bobinin kalite faktörüdür. Seri rezonans devresinin yüklü kalite faktörünün yeterince büyük seçilmesi halinde, yük akımı sinüse yakın dalga şeklini alır (Kazimierczuk ve Czarkowski, 1995). Kalite faktörü bu devrede, rezonans kondansatörünün salınım geriliminin birinci ve ikinci tepe değerleri $V_{Cr\max 1}$ ve $V_{Cr\max 2}$ kullanılarak (7.4) ile hesaplanabilir.

$$Q_y = \frac{\pi}{\ln\left(\frac{V_{Cr\max 1}}{V_{Cr\max 2}}\right)} = \frac{\pi}{\ln\left(\frac{368mV}{152mV}\right)} = 3,55 \quad (7.4)$$

Yüklü durumdaki bobin direnci (7.5)'te verilen kalite faktörü eşitliği kullanılarak hesaplanabilir.

$$R_r = \frac{\sqrt{L_r / C_r}}{Q_y} = \frac{\sqrt{40,2 / 1,22}}{3,55} = 1,66\Omega \quad (7.5)$$

Yapılan ölçümler ve hesaplamalar sonucu rezonans devresi için 150x150x1 mm krom-nikel yük ile yüklü asimetrik bobin endüktansı $L_r = 40,2 \text{ } \mu\text{H}$ ve direnci $R_r=1,66 \text{ } \Omega$ ve kalite faktörü $Q_y=3,55$ olarak ölçülmüştür. Bobin direnci kullanılan iletken çeşidine, sıcaklığa ve bobinden geçen akımın frekansına göre değişim gösterir. Verimin yükseltilebilmesi için bobin direnci düşük tutulmalıdır. Özellikle orta ve yüksek frekans uygulamalarında dalma derinliği nedeniyle bobinde oluşan direnç değişimi dikkate alınmalı ve buna göre önlemler alınmalıdır.

Çizelge 7.1 Endüksiyon ısıtma bobini ve yük değişimine göre hesaplanan değerler

Parametreler	150x150x1 mm yüklü simetrik bobin modeli için	150x150x1 mm yüklü asimetrik bobin modeli için	250x250x1 mm yüklü simetrik bobin modeli için	250x250x1 mm yüklü asimetrik bobin modeli için
f_r (kHz)	23,25	22,7	25,64	23,81
Q_y	3,84	3,55	2,93	2,33
L_r (μH)	38,41	40,2	31,58	36,65
R_r (Ω)	1,46	1,66	1,74	2,35

Değişken yük ve bobin modellerine göre bobin endüktansı, direnci ve kalite faktörü değerleri her bir model için tek bir frekansta bobin üzerinde yapılan ölçümler ve hesaplamalar yoluyla bulunmuştur. Bunların sonuçları Çizelge 7.1’de verilmiştir. Çizelgeden de görüleceği gibi ferit çubuk bobin endüktansını arttırmıştır.

Bobin tasarımı sonucu laboratuvar ortamında deneysel çalışmaların yapıldığı mutfak tipi endüksiyon ısıtıcıya ait özellikler aşağıdaki gibi belirlenmiştir.

- Rezonans frekansı: 22,7-25,64 kHz.
- Çalışma frekansı: 25-30 kHz.
- Çalışma gerilimi: 30-60 V, 50 Hz.

Sistemin rezonans frekansı, bobin tasarımı bölümünde anlatılmış olan farklı ebatlı iki yük için 22.7 ve 23.81 kHz değerlerindedir. Buna göre seçilen çalışma frekansı 25-30 kHz aralığıdır. Daha sonra sistemin bu çalışma frekansı aralığında yarı iletken anahtarları için tetikleme sinyallerini üretecek kontrol ünitesine geçilmiştir.

7.4 Kontrol Devresi

Kontrol ünitesinde, sistemin belirlenen çalışma frekansı aralığına göre, frekans kontrolü yapılabilecek şekilde yarı iletken anahtarlar için gerekli kontrol sinyalleri oluşturulur ve anahtarların çalışması kontrol edilir. Bu ünite anahtarlama sırasını ve devrenin çıkış frekansını belirler. Ayrıca frekans kontrolü yapılabilmesi, çıkış gücü kontrolünü de gerçekleştirmiş olur. Şekil 7.9’da, tek fazlı yarım köprü inverterde, kontrol sinyallerinin üretildiği devre şeması ve gerçekleştirilen kontrol kartı görülmektedir.

C_1 kondansatörünün şarj ve deşarj akımı,

$$I_{şrj} = \frac{V_{CC}}{R_{\min 1} + R_{por1}} \text{ ile hesaplanabilir.} \quad (7.7)$$

Üçgen gerilim sinyalinin frekans aralığı,

$$f_p = \frac{R_2}{4.R_3.(R_{\min 1} + R_{por1}).C_1} \text{ ile hesaplanır.} \quad (7.8)$$

Referans gerilimin maksimum değeri,

$$V_{rfr \max} = V_{CC} \cdot \left(1 - \frac{R_{\min 3}}{R_{\min 2} + R_{por2} + R_{\min 3}}\right) \quad (7.9)$$

ile bulunabilir. Çalışmanın kontrolden çıkmaması için, mutlak değerler olmak üzere referans gerilimin maksimum değeri ile üçgen gerilimin maksimum değeri arasında $V_{rfr \max} \leq V_{üçg \max}$ ilişkisi olmalıdır.

TL082 entegresi ile minimum ve ayarlı dirençler üzerinden, 15V genlikli üçgen dalga oluşturulur. Üçgen sinyalin frekansı, anahtarlama frekansını belirlemektedir.

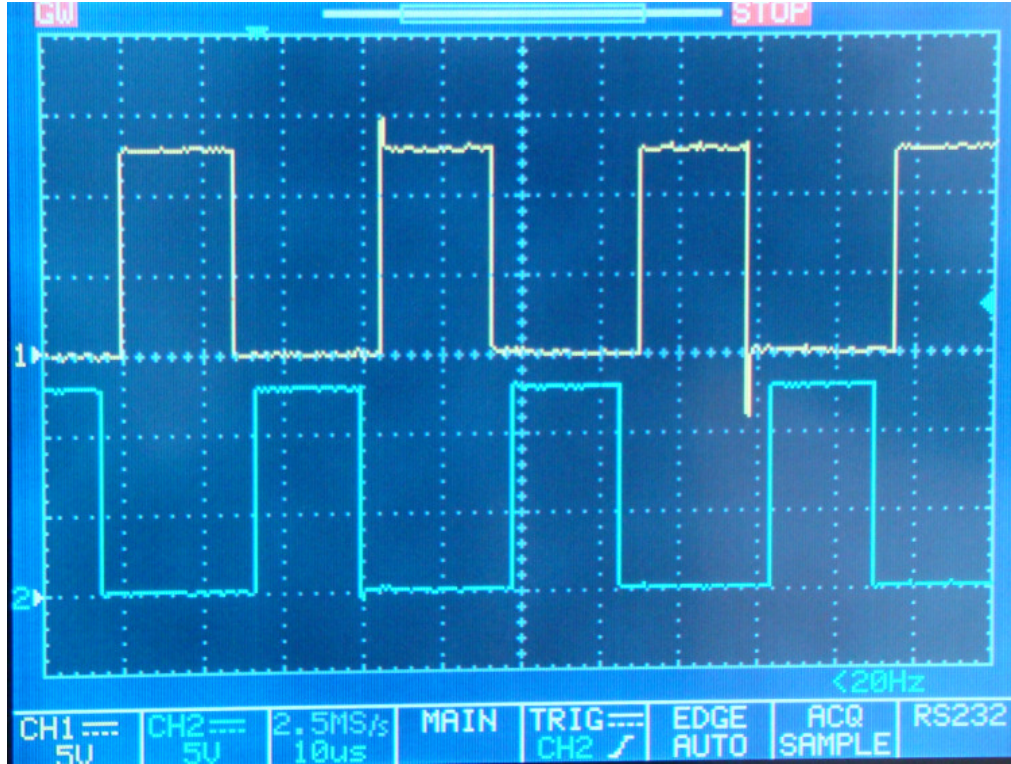
Üçgen taşıyıcı dalga, DC referans gerilimi ile LF353 (2/1) entegresinde karşılaştırılır. DC referans gerilimi karşılaştırıcının + yani evirmeyen tarafına, üçgen dalga ise – tarafına bağlanır. Böylece DC referans gerilim değeri, üçgen dalga gerilim değerinden daha büyük olduğunda karşılaştırıcı çıkışı 1'e çekilir ve çıkışta frekansı ayarlanabilen çift yönlü (pozitif sinyal) kare dalga sinyali elde edilir. Yine bir LF353 entegresi (2/2) ile bu sinyalin inversi (negatif sinyal) elde edilmektedir. Yarı iletken anahtarların her ikisi için de uygun sinyallerin üretilmesi amacıyla karşılaştırma sonucundaki sinyalin tersi alınmış ve pozitif sinyale uygulanacak her işlem tersine de uygulanmıştır.

Üretilen pozitif ve negatif kare dalga sinyallerin başları, iki sinyal diyotu ve iki direnç ile bir kondansatör ve bir karşılaştırıcıdan oluşan iki devreyle bir miktar kesilerek, bu sinyaller arasında ölü zamanlar oluşturulmaktadır. Ölü zaman oluşturmanın amacı, yarı iletkenlere uygulanan pozitif ve negatif sinyallerin çakışmasını engellemektir. Oluşturulacak ölü zaman RC ile hesaplanır ve sinyaller arasında seçilen yarı iletken anahtarlar için yeterli ölü zaman elde edilecek şekilde devre düzenlenir.

Daha sonra, iki sinyal diyotu ve iki dirençten oluşan devreler ile sinyaller tek yönlü hale getirilir. Pozitif darbeler, üstteki sinyal diyotu üzerinden çıkışa aktarılır. Negatif darbelerde

ise alttaki sinyal diyotu üzerinden bir akım geçer ve iletimde olan diyot çıkışı -0.6 V 'ta tutar. Böylece diyotlu devre, iki yönlü darbeleri tek yönlü hale getirmiş olur. Kontrol ünitesinde bütün aşamalarda kullanılmak üzere yüksek frekans uygulamalarına uygun 4148 hızlı diyotları tercih edilmiştir.

Seçilen yarı iletken anahtarları tetikleyecek sinyallerin pozitif olması gerekmektedir. Bu yüzden sinyaller ötelendikten sonra negatif alternansları yok edilmiştir. Bu aşamalardan sonra elde edilen sinyallerin yükselen ve düşen kenarları VE DEĞİL (4093) kapısıyla keskinleştirilmiş ve anahtarların hızına uygun yükselme ve düşme zamanlarına sahip hale getirilmişlerdir. Böylece, tek fazlı yarım köprü bir inverter için, aralarında yeterli ölü zamanlar bulunan pozitif ve negatif tek yönlü % 50 iletim süreli kontrol sinyalleri üretilmiş olmaktadır. Bu devrelerde güç kaynağı olarak, LM7915 entegre devreleri ile 220V AC'den $\pm 15\text{ V}$ izoleli çift yönlü regüle DC gerilimler sağlanmıştır.



Şekil 7.11 Kontrol sinyalleri (Volt/div=5 V, Time/div=10 μs)

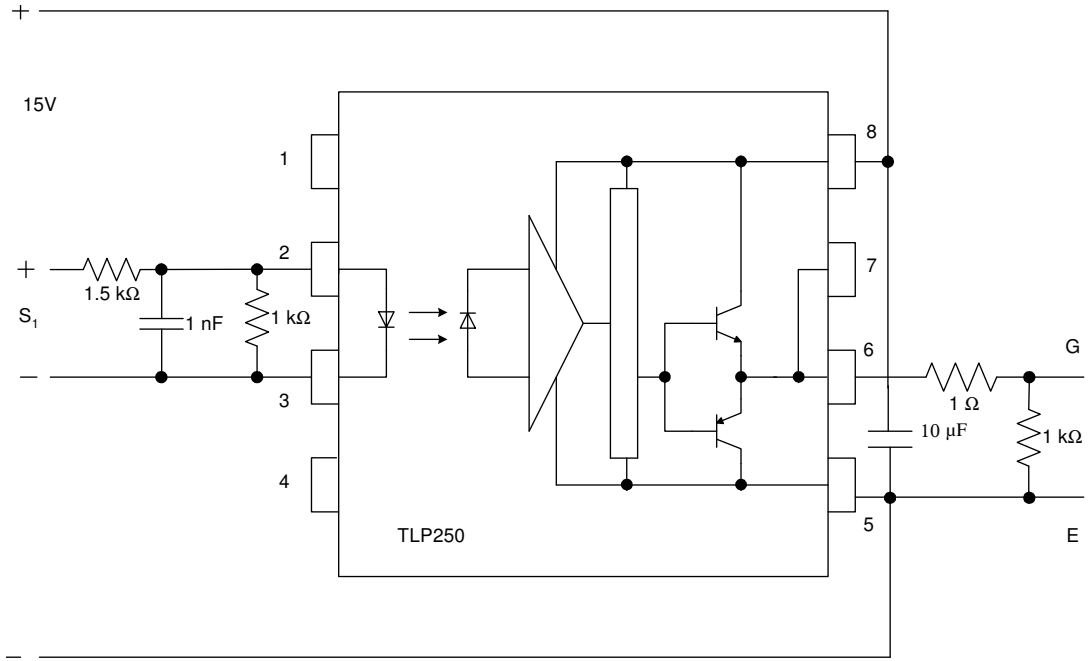
Şekil 7.11'deki dalga şekillerinde görüldüğü gibi kontrol devresindeki mevcut değerlere göre, sinyaller arasında anahtarlar için yeterli olan $2.5\text{ }\mu\text{s}$ ölü zaman bırakılmıştır ve sinyallerin çakışması engellenmiştir. 15V genlikli taşıyıcı üçgen sinyalin frekansı potansiyometre ile çalışma frekansı aralığı olarak seçtiğimiz 25-30 kHz değerleri arasında değişmektedir. Örneğin 25 kHz olarak seçilen çalışma frekansında toplam periyot $40\text{ }\mu\text{s}$ olmaktadır. Bağlı

iletim süresi %50 ve iki anahtarın birlikte yalıtımda kaldığı ölü zaman aralığı 2.5 μ s bırakıldığı için, anahtarlar dönüşümlü olarak 17.5 μ s iletimde, 22.5 μ s kesimde kalmaktadırlar.

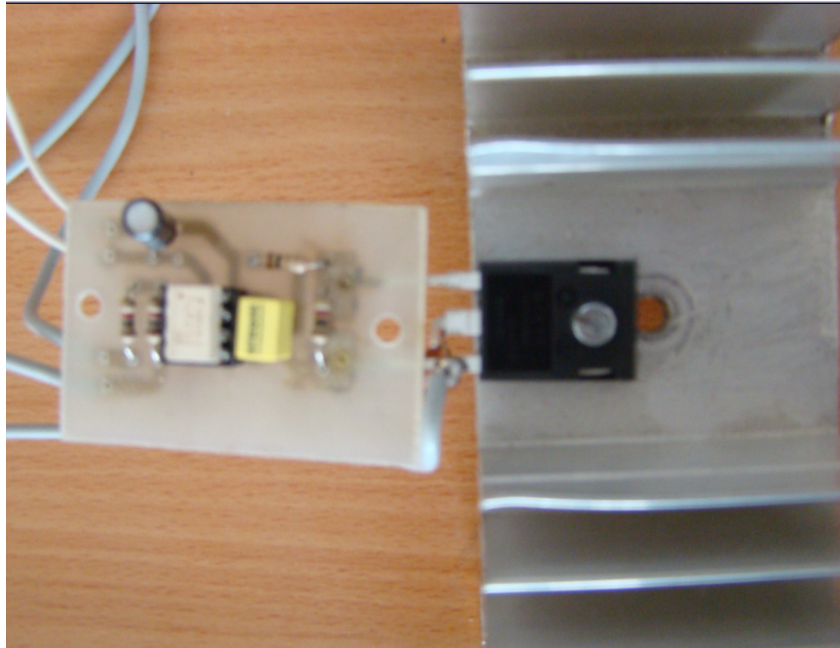
7.5 Mosfet Sürme Devresi

Sürücü devreleri anahtarların iletim ve yalıtıma sokulması için gerekli olan sinyal seviyelerini sağlayan tetikleme devreleridir. Kontrol devrelerinde üretilen sinyaller, tetikleme veya sürme devrelerinde yükseltilmekte, izole edilmekte, şekillendirilmekte ve güç elemanlarına uygulanmaktadır. Sürme devreleri de günümüzde farklı özelliklerde entegre devreler şeklinde üretilmektedir. Bu entegre devrelerin bazılarında izolasyon özelliği de bulunmaktadır. Yarı iletken anahtarlardan oluşmuş güç dönüştürücü devrelerde anahtarlama kayıplarını etkileyen en önemli faktörlerden birisi anahtarlama geçiş anlarıdır. Bu süre içerisinde akım ve gerilim aynı anda güç terminallerinde bulunur. Oluşacak güç kayıplarının önüne geçilmesi için yapılması gerekenlerden biri anahtarın iletimden yalıtıma ve yalıtımdan iletime geçiş süresini mümkün olduğunca kısaltmaktır. Anahtarlama elemanının kaç kHz'de çalışacağı, kontrol sinyalinin başlama ve bitişindeki gecikme süreleri ile yükselme ve düşme süreleri entegre seçiminde önemli faktörlerdir.

Tasarlanmak istenen inverter devresi için IXFH26N50 MOSFET'leri kullanılmıştır. Bu anahtarların çalışmasında, gerekli kontrol sinyalleri için seçilen izoleli sürücü entegre tipi, Toshiba firması tarafından üretilen TLP250 entegresidir. Yarım köprü seri rezonans inverter devrelerinde dikkat edilmesi gereken hususlardan biri de yalıtım problemidir. TLP250 sürücü entegresi, giriş sinyallerinin yüksek gerilimden izolasyonu için kullanılan, yaklaşık 2500 V'a kadar izolasyon sağlayan optik bir izolatöre sahiptir ve seçilen yarı iletken anahtarın zamanında iletime ve yalıtıma geçmesini sağlayacak kadar hızlıdır. Devredeki optik izolasyon entegresi, güç devresi ile kontrol devresini birbirinden elektriki olarak yalıtarak kontrol devresini korumaktadır. Aynı zamanda denetim sinyalinin güç devresinden etkilenmesini önlemektedir.



(a)



(b)

Şekil 7.12 TLP250 (a)prensip devre şeması, (b) gerçekleştirilen sürücü devresi

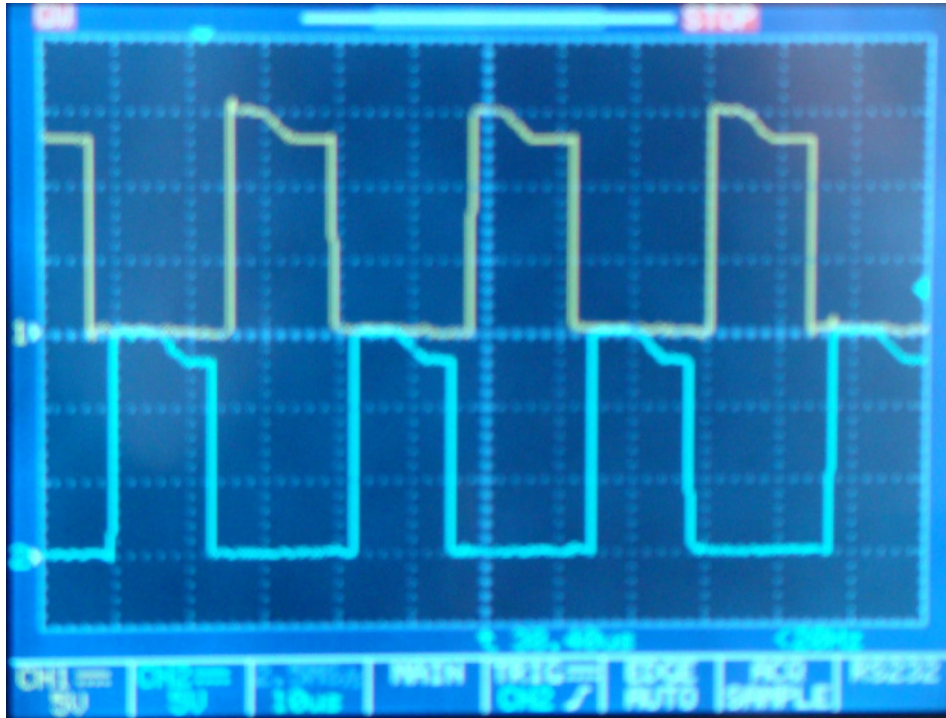
İnverter devresinde her bir anahtar için ayrı ayrı olmak üzere iki tane TLP250 sürücü entegre kullanılmıştır. Şekil 7.12’de izoleli bir MOSFET sürme entegresi olan TLP250 entegresinin prensip devre şeması ve gerçekleştirilen devre modeli verilmiştir. Görüldüğü gibi, girişte sinyalin izolasyonu için bir opto-eleman ve çıkışta sinyalin yükseltilmesi için tabanları ters

paralel bağılı iki transistör bulunmaktadır. Giriş gerilim sinyali ve sürme gerilim kaynağı, bu çalışmada 15 V değerine sahiptir.

Sinyal 1 konumunda iken yani LED iletime girdiği anda foto dedektörü tetikler. Gerçekleşen işlemler sonucu, npn tipi transistör tetiklenerek, 1Ω luk direnç üzerinden MOSFET'in gate-source arasındaki kapasitesi şarj olmaya başlar. Sinyal 0 konumunda olduğu anda LED kesime girer. Gerçekleşen işlemler sonucu bu kez pnp tipi transistör tetiklenir ve MOSFET' in gate-source arasındaki kapasitesi 1Ω luk direnç üzerinden deşarj olur. Seri çıkış direnci, MOSFET'in eşdeğer giriş kondansatörünün çok hızlı bir şekilde şarj ve deşarjını sağlamak amacı ile 1Ω seçilmiştir. Burada entegrenin yarı iletken anahtarı iletime ve yalıtıma sokmak için ürettiği darbelerin geçiş anları uzun sürerse, anahtar üzerindeki kayıplar artar ve bu istenmeyen bir durumdur.

TLP250 nin girişindeki LED üzerinden geçen akımı sınırlamak için $1,5\text{ k}\Omega$ 'luk direnç, LED üzerindeki gerilimi sınırlamak, sinyallerde oluşabilecek parazitleri önlemek için de $1\text{ k}\Omega$ 'luk direnç ve 1 nF 'lık bir kapasite bağlanmıştır.

Güç devresi çalışır durumda ve tam yüklü iken kontrol sinyalleri, uygun eleman değerleri ile kurulan kapı izolasyon devresi ile sürüldükten sonra, anahtarın kapı ve kaynak uçlarından osiloskop yardımı ile ölçülmüş ve V_{GS} gerilimleri Şekil 7.13 'de verilmiştir.

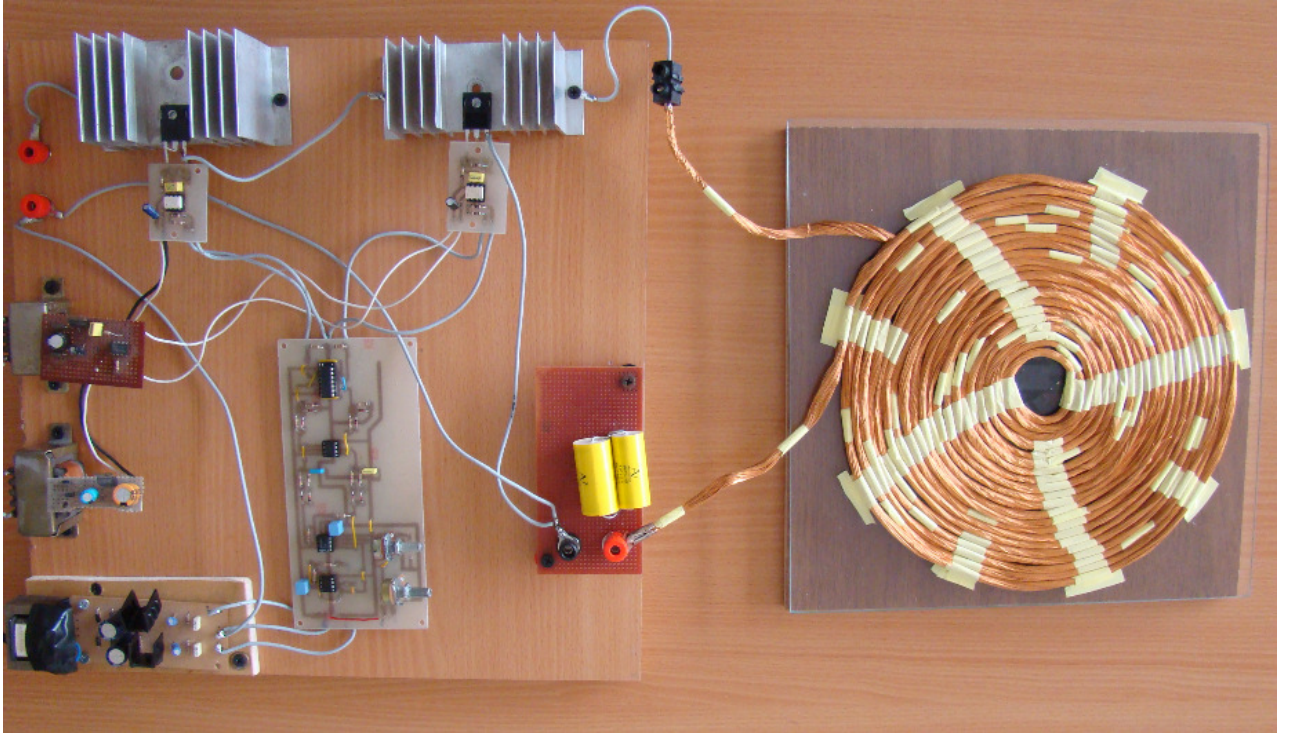


Şekil 7.13 Tam yüklü durumda TLP250 sürücülerinden elde edilen tetikleme sinyalleri (Volt/div=5 V, Time/div=10 μ s)

Sürücü devresinden alınan çıkışlar direkt olarak anahtarlara verildiğinde, güç devresi ile sürücü devresinin toprak seviyeleri farklı olduğu için bir toprak uyuşmazlığı meydana gelmektedir. Bu problemi ortadan kaldırmak için devrelerde güç kaynağı olarak, LM7815 entegre devreleri ile 220 V AC'den 0 +15 V izoleli tek yönlü regüle DC gerilimler sağlanmış, izole edilmiş sinyaller anahtarın kapı ve kaynak uçlarına uygulanmıştır.

7.6 Deneysel Çalışma Sonuçları

Deneysel çalışma sonuçları alınırken, güç devresinde şebeke gerilimi ayarlı transformatör ile düşürülmüştür. Daha sonra doğrultucu ve filtre kondansatörü ile 30 V doğru gerilim değerinde iken, anahtarlama frekansı 30 kHz'e ayarlanarak çalışma sonuçları alınmıştır. Kontrol devreleri ± 15 V güç kaynakları ile, izoleli MOSFET sürme devreleri 15 V güç kaynakları ile ana güç devresinden bağımsız olarak beslenmişlerdir. Kullanılan yarı iletken anahtarlar altıncı bölümde belirtilen IXFH26N50 tipi MOSFET'lerdir. Oluşturulan bir fazlı yarım köprü seri rezonans inverter devresi ve endüksiyon bobini sistemi Şekil 7.14'te verilmiştir.

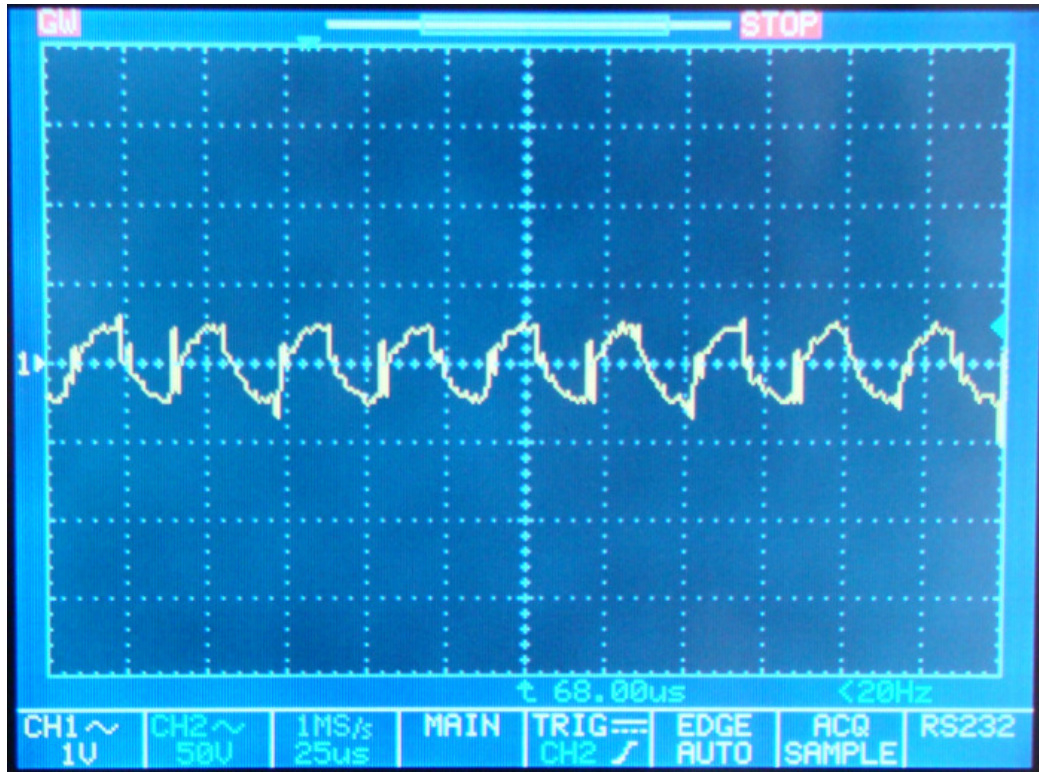


Şekil 7.14 Bir fazlı yarım köprü seri rezonans devreli inverter ve endüksiyon bobini sistemi

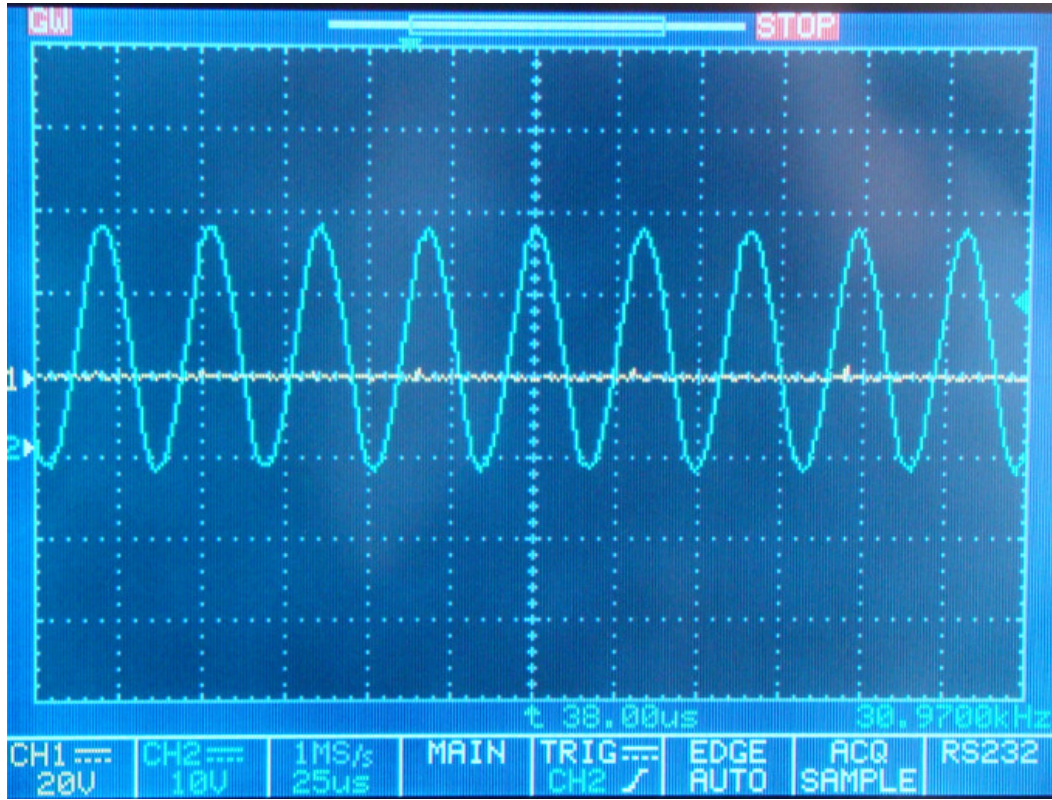
Ana güç devresi, 250x250x1 mm ve 150x150x1 mm ebatlarında iki değişken yükü besleyebilecek ve 25-30 kHz arasında çalışabilecek şekilde tasarlanmıştır.

7.6.1 Rezonans Devresi Bobin Akımı ve Kondansatör Gerilimi

Yarım köprü seri rezonans inverter devresi çalıştırıldığında meydana gelen rezonans akımı dalga şekillerini osiloskoptan gözleyemediğimiz için, onun yerine inverterdeki rezonans kolu üzerine $1\ \Omega$ 'luk bir direnç bağlanarak dalga şekilleri alınmıştır. Bağlanan direnç 25 watt'lık taş dirençtir. Direnç rezistif bir eleman olduğu için üzerindeki gerilim akımla aynı fazdadır ve direnç üzerinden ölçülen gerilim akımı vermektedir. 30 kHz anahtarlama frekansı ve 30 V DC gerilimde bobin üzerinde 250x250x1 mm ebatlı yük varken invertere ait rezonans kondansatörü ve ısıtma bobini akımı Şekil 7.15 ve Şekil 7.16'da verilmiştir. Bobinden geçen akımın yönü ve şiddeti zamanla değişmektedir. Bu, aynı zamanda yük eşdeğer direnci üzerinden geçen akımın dalga şeklidir.



Şekil 7.15 Rezonans bobini akımı I_L (Volt/div=1 V, Time/div=25 μ s)



Şekil 7.16 Rezonans kondansatörü gerilimi V_{Cr} (Volt/div=10 V, Time/div=25 μ s)

7.6.2 Sıfır Gerilimde Anahtarlama

Gerçekleştirilen devrede anahtarın iletme girerken uçlarındaki gerilimin sıfır olması başarılararak DC/AC güç dönüştürücü devrenin verimi yükseltilmiştir. Şekil 7.17’de inverter devresine ait yarı iletken anahtarın üzerine düşen gerilim ve tetikleme sinyali verilmiştir.



Şekil 7.17 M_2 anahtarına ait V_{DS} ve V_{GS} gerilimleri (CH1 Volt/div=20 V, CH2 Volt/div=10 V, Time/div=10 μ s)

Anahtar kayıplarını etkileyen bir diğer faktör de iletimden kesime ya da kesimden iletme geçme anlarında yarı iletken anahtarın uçlarındaki gerilimin ve taşıdığı akımın değeridir. Bunlardan herhangi birinin önceki bölümlerde bahsedilen yöntemler kullanılarak sıfır yapılmasıyla da anahtar üzerinde harcanan güç önemli miktarda azaltılmış olur. Şekil 7.17’de görüldüğü üzere anahtar gerilimi sıfır iken anahtar iletme geçmektedir, yani sıfır gerilimde anahtarlama yapılmaktadır. Bu işleme yumuşak anahtarlama denilir ve anahtarlama kayıpları bu teknik sayesinde büyük ölçüde azalır.

7.6.3 Yarım Köprü Seri Rezonanslı İnverter ile Endüksiyonla Isıtma Sonuçları

Endüksiyonla ısıtma sistemlerinde inverter devresinin veriminin yanı sıra, manyetik devrenin verimi de oldukça önemlidir. Endüksiyon bobini ile seçilen yük arasındaki manyetik etkileşim artırıldığı oranda verimde artırılmış olur. Bobin altına yerleştirilen ferit nüveler ile verim yükseltilmiştir. Endüksiyonla ısıtma sistemin de bilindiği gibi ısı direkt yük üzerinde oluşur. Bu sebeple termal verimi yüksek bir sistemdir. Manyetik etkileşimin kuvvetlendirilmesi için gerekli bir diğer önlem ise, yükün yeterince yüksek bağlı manyetik geçirgenlikli ve dirençli metallerden imal edilmesidir. Bu sebeple, sistemin ısıtma verimliliğinin incelenebilmesi için

bakır ve alüminyuma göre daha yüksek manyetik geçirgenliğe sahip krom-nikel yük modelleri kullanılmıştır. Kullanılan yükler 250x250x1 mm ve 150x150x1 mm ebatlarındadır. Bu yüklerden elde edilen güç değerlerini bulmak için her bir yükün sıcaklık değerleri belli zaman aralıklarında ölçülmüş ve değişik zaman aralıklarında elde edilen sıcaklık değerleri Çizelge 7.2’de verilmiştir. Yapılan ısı deneylerinde giriş gerilimi olarak 60 V, çalışma frekansı olarak 30 kHz değerleri kullanılmıştır. Her yük için kullanılan rezonans kondansatörünün değeri aynı, 1,22 μ F’tır. Bütün yüklerde sıfır gerilimde anahtarlama koşulları sağlanmıştır. Zamana bağlı sıcaklık değerlerini ölçmek için yüklerin iç tabanına sıcaklık ölçer aletinin ucu temas ettirilmiş ve sıcaklık değerleri ölçü aletinden okunarak kaydedilmiştir. Çizelge 7.2’de görüldüğü gibi yük ebatları arttıkça aynı sürede suyun ısınma miktarı da artmaktadır.

Çizelge 7.2 Yarım köprü seri rezonans inverter ile değişik yük modellerine ait sıcaklıklar

	Sıcaklık Değerleri (C°)	
Isıtma Süresi (dk)	250x250x1 mm’lik yük	150x150x1 mm’lik yük
0	20	20
2	36	31
4	50	38
6	58	43
8	65	48
10	69	51

Elde edilen sıcaklık değerleri ile ısıtma yüklerine aktarılan güç bulunabilir. Bunun için öncelikle ısıtma yüküne aktarılan ısı enerjisi hesaplanmalıdır. Isıtma yükleri krom-nikelden yapılmıştır ve öz ısısı $c_{Cr-Ni}=0.5$ J/g $^{\circ}$ C’dir. 250x250x1 mm’lik ısıtma yükünün ağırlığı $m_1=412$ g, 150x150x1 mm’lik ısıtma yükünün ağırlığı $m_2=195$ g’dır. (7.10)’dan sistemde yüke aktarılan ısı enerjisi Q_e joule cinsinden hesaplanabilir.

$$Q_e = m \cdot c_{Cr-Ni} \cdot \Delta t \quad (7.10)$$

Burada Δt ilk ve son sıcaklık arasındaki değişim miktarıdır. 250x250x1 mm’lik yük için $m_1=412$ g ağırlığı, $t_1=10$ dakika ısıtma süresi ve bu süre boyunca $\Delta t_1=49$ $^{\circ}$ C sıcaklık değişimi için elde edilen ısı enerjisi $Q_{e1}=10094$ joule, 150x150x1 mm’lik yük için $m_2=195$ g ağırlığı, $t_2=10$ dakika ısıtma süresi ve bu süre boyunca $\Delta t_2=31$ $^{\circ}$ C sıcaklık değişimi için elde edilen ısı

enerjisi $Q_{e2}=3022,5$ joule hesaplanmıştır. Elde edilen ısı enerjisini watt cinsinden ifade edebilmek için (7.11)'de verilen bağıntı kullanılabilir.

$$1 \text{ joule} = 1 \text{ watt} \times 1 \text{ saniye} \quad (7.11)$$

$$P_{AL} = \frac{Q_e}{t} \text{ watt} \quad (7.12)$$

Hesaplanan enerji (7.11)'de verildiği gibi watt cinsinden ifade edildiğinde her bir ısıtma yüküne aktarılan P_{AL} güç değerleri Çizelge 7.3'te verilmiştir.

Çizelge 7.3 Isıtma yüklerinden alınan güç değerleri

	Isıtılan Yükler	
Alınan Güç	250x250x1 mm'lik yük	150x150x1 mm'lik yük
P_{AL} (Watt)	16, 82	5, 03

7.7 Endüksiyonla Isıtma Sisteminin Verimi

Yapılan deneylerde çalışma frekansı, ısıtma bobini, yük ile bobin arasındaki mesafe ve kullanılan yüklerin özellikleri aynı seçilmiştir. Isıtma sisteminde 250x250x1 mm ve 150x150x1 mm boyutlarındaki ısıtma yüklerinde 450 gr su ısıtılmıştır. Her bir ısıtma sisteminden belli zaman aralıklarında ölçülen sıcaklık değerleri Çizelge 7.4'te verilmiştir.

Çizelge 7.4 Isıtma yüklerine göre elde edilen su sıcaklıkları

	Sıcaklık Değerleri (C°)	
Isıtma Süresi (dk)	250x250x1 mm'lik yük 500 gr su	150x150x1'lik mm yük 500 gr su
0	18	18
2	27	22
4	32	25
6	36	28
8	41	30
10	44	33

Isıtılan suyun öz ısı $c_{su}=4.18 \text{ J/g } ^\circ\text{C}$ 'dir. Alınan sıcaklık değerleri doğrultusunda $250 \times 250 \times 1 \text{ mm}$ 'lik yük ile endüksiyonla ısıtma sisteminden elde edilen güç değeri (7.10) ve (7.12) ile hesaplandığında $P_{AL}=56,43 \text{ W}$ bulunmuştur.

Rezonans devresi akımının maksimum değeri ve yüklü bobin direnci kullanılarak (7.13) ile sisteme verilen güç P_V bulunabilir.

$$P_V = \frac{1}{2} \cdot I_{L_{\max}}^2 \cdot R_r \quad (7.13)$$

Bobin parametreleri belirlenirken, bobin $250 \times 250 \times 1 \text{ mm}$ 'lik yük ile yüklü durumda iken $R_r=2,35 \text{ } \Omega$ olarak hesaplanmıştır. Rezonans devresi akımının osiloskop üzerinden maksimum değeri okunduğunda $I_{L_{\max}}=8 \text{ A}$ olarak ölçülmüştür. Bu değerler doğrultusunda (7.13) bağıntısı ile sisteme verilen güç hesaplandığında $P_V=75,2 \text{ W}$ olarak bulunur.

Sistemin verimi η için (7.14) bağıntısı kullanılır.

$$\eta = \frac{P_{AL}}{P_V} \cdot 100 \quad (7.14)$$

(7.14) ile endüksiyonla ısıtma sisteminin verimi de hesaplandığında %75 bulunmuştur. Elde edilen sonuçlardan yük ile ısıtma bobini arasındaki manyetik etkileşimin en iyi $250 \times 250 \times 1 \text{ mm}$ ebatlı yük modelinde sağlandığı görülmektedir. Kullanılan yük ebatının artmasıyla yüke aktarılan enerji ve dolayısı ile verim artmaktadır. Bobin çapına yakın büyüklükte ısıtma kabı kullanılması, devresini hava üzerinden tamamlayan kaçak akıların oluşmasını azaltır. Bu sebeple, kullanılan yükün çapının ve ebatlarının ısıtma bobini çapına ve ebatlarına yakın seçilmesi, daha yüksek verimin elde edilmesini sağlamıştır.

Endüksiyonla ısıtma sisteminin verimi, diğer ısıtma yöntemleri ile karşılaştırdığımız zaman oldukça iyi bir verimdir. Gazlı ve rezistanslı fırınlarda verim ortalama %30 civarlarında olduğundan endüksiyonla ısıtma sistemleri ile karşılaştırıldıklarında verimleri oldukça düşüktür (Köroğlu, 2002). Bunun sebebi ise endüksiyonla ısıtma sistemlerinde ısıнын direkt yük üzerinde oluşması, diğer yöntemlerde ise ısıнын dolaylı yoldan yükü ısıtmasıdır.

8. SONUÇLAR ve ÖNERİLER

Günümüzde endüksiyonla ısıtma sistemlerinin kullanımı endüstri ve ev tipi uygulamalarda giderek artmaktadır. Bu çalışmada mutfak uygulamaları için kullanılabilecek bir fazlı, orta frekanslı, düşük maliyetli bir endüksiyonla ısıtma sistemi tasarımı gerçekleştirilmiştir.

Sistemin önemli parçalarından birisi endüksiyon bobinidir. Mutfak uygulamaları için endüksiyonla ısıtma sistemlerinde, pancake tipi bobinler en elverişli simetriye sahiptir. Bu çalışmada pancake tipi bobin seçilerek litz teli ile uygun ölçülerde sarılmış ve bobin tasarımı gerçekleştirilmiştir. Aynı zamanda bobin altına uygun simetride ferit nüve sistemi yerleştirilerek bobin ile ısıtma kabı arasındaki manyetik kuplaj artırılmış ve bobin-ısıtma kabı arasındaki hava aralığı mümkün olduğu kadar küçük seçilerek bobinden sağlanan verim yükseltilmiştir. Endüksiyonla ısıtma sistemlerinde çalışma frekansı arttıkça verim artmaktadır. Ancak mutfak tipi endüksiyon ısıtıcılarda frekans aralığı doğru seçilmelidir. Yüksek frekanslar yüzeysel ısıtma alanında elverişlidir. Diğer taraftan, düşük çalışma frekansları insanların duyma sınırının üzerinde seçilmelidir. Dolayısıyla mutfak uygulamaları için endüksiyonla ısıtma sistemleri, orta frekans ile sınırlıdır.

Endüksiyonla ısıtma sistemlerinde güç dönüştürücü devrenin verimi sistem verimini doğrudan etkileyen ikinci faktördür. Bu yüzden tasarlanmak istenen sistemin ihtiyaçlarına göre güç dönüştürücü devre topolojisi tercih edilmelidir. Sistemde güç devresi olarak, gerekli uygun frekansta, bir fazlı, gerilim beslemeli yarım köprü seri rezonans devreli inverter topolojisi seçilmiştir. Devrenin analizi, matematiksel hesaplamaları, elektronik benzetimi yapılmış ve deneysel ölçümler ile karşılaştırılmıştır.

Yarı iletken anahtar olarak mutfak tipi endüksiyonla ısıtma frekans aralığına uygun güç MOSFET'i kullanılmıştır. Anahtar seçiminde çalışma frekansı, akım ve gerilim taşıma kapasitesi, dahili diyot içermesi gibi karakteristik özellikler göz önünde bulundurulmuştur. MOSFET'in iletim ve yalıtım zamanlarının denetimine uygun sinyali üreten kontrol ve sürücü devresi tasarlanarak anahtarlama geçiş kayıpları azaltılmıştır.

Köprü tipi inverterler de çıkış gücü kontrol aralığının teorik bir sınırı yoktur ve anahtar gerilimi kaynak gerilimi ile sınırlıdır. Tam köprü inverter dört tane anahtarlama elemanından oluşur. Bu çalışmada, yarım köprü seri rezonans devreli inverter, yarı iletken anahtar sayısının tam köprü invertere nazaran azlığı ve denetim kolaylığı nedeniyle tercih edilmiştir. Sistemin çıkış gücünün kontrolü, giriş güç kaynağının veya yarı iletken anahtarların anahtarlama frekanslarının değiştirilmesi ile yapılabilmektedir. Endüksiyon bobinindeki ve güç

dönüştürücü inverter devresindeki kayıpları azaltmaya yönelik doğru bobin tipi seçimi, sıfır gerilimde anahtarlama gibi önlemler bu çalışmada uygulamaya geçirilerek sistemin hacmi ve ağırlığı azaltılmış, maliyeti düşürülmüştür. Elde edilen sistem ile endüksiyonla ısıtma yönteminin mutfak tipi uygulamalarda da verimli olarak kullanılabileceği gösterilmiştir. Bu sistem, kolay ısı kontrolünün yapılabildiği, ısıtma zamanı kısa, verimli, temiz, güvenli bir sistemdir.

Endüksiyonla ısıtma sistemleri endüstride daha çok ergitme, ısıtma, kaynak yapma, yüzey sertleştirme gibi uygulamalarda kullanılırken evlerde daha çok mutfaklarda kullanılan tencere, tava gibi pişirme kaplarının ısıtılmasında kullanılmaktadır. Mutfaklarda kullanılan rezistanslı tip ısıtıcılar ile kıyaslandığında uygulaması gerçekleştirilen mutfak tipi endüksiyon ısıtıcı ile çok daha yüksek ısıtma verimi elde edilmiştir.

KAYNAKLAR

- Acero, J., Hernandez, P. J., Burdio, J. M., Alonso, R. and Barragan, L. A., (2005), "Simple Resistance Calculation in Litz-Wire Planar Windings for Induction Cooking Appliances", IEEE Transactions on Magnetics, vol. 41, no. 4, 1280-1287.
- Acero, J., Burdio, J. M., Barragan, L. A. and Navarro, D., (2006), "Loss Analysis and Optimization of Round-Wire Planar Windings for Domestic Induction Heating Appliances" IEEE Spanish MCYT, 553-558.
- Akkaya, R. ve Anadol, M. A., (2003), "Akım Beslemeli Paralel Rezonans İnverterli Bir İndüksiyonlu Isıtma Uygulaması", Elk. Elt. Bilg. Müh. 10. Ulusal Kong., 156 – 159.
- Altıntaş, M. I., (1990), "Endüksiyon Isıtma Uygulamaları için Yarı İletken Elemanlarla Gerçeklenmiş Sistem Tiplerine Genel Bir Bakış", Dokuz Eylül Üniversitesi Mühendislik-Mimarlık Fakültesi Elektrik-Elektronik Mühendisliği, Yüksek Lisans Tezi, İzmir.
- Balbozan, E., (1984), "Endüksiyon Isıtma", Dokuz Eylül Üniversitesi Mühendislik Mimarlık Fakültesi, Elektrik Elektronik Bölümü, Yüksek Lisans Tezi, İstanbul.
- Başkurt, Y., (1997), "Evaluation of Resonant Tracking Inverters for Induction Heating ", Dokuz Eylül Üniversitesi Elektrik-Elektronik Mühendisliği, Yüksek Lisans Tezi, İzmir.
- Bodur, H. ve Gülgün, R., (1989) "Gerilim Beslemeli ve Akım Beslemeli İnverterlerin Karşılaştırılması", Elektrik-Elektronik-Bilgisayar Mühendisliği 3.Ulusal Kongresi, 25-30 Eylül 1989, 182-185, İstanbul.
- Bodur, H., AKKAYA, R. ve Yaman, C. , (1993), "Endüksiyonla Isıtmada Rezonans Devreli İnverterler ve Örnek Bir Endüksiyonla Isıtma Uygulaması", 2. Elektromekanik Sempozyumu, ELMEKSEM'93, 384 – 391.
- Bodur, H., (2007), "Güç Elektroniği Laboratuvarı", Yıldız Teknik Üniversitesi Elektrik Mühendisliği Bölümü Ders Notları, İstanbul.
- Bodur, H., (2007), "Güç Elektroniğinde Kontrol ve Koruma Devreleri", Yıldız Teknik Üniversitesi Elektrik Mühendisliği Bölümü Ders Notları, İstanbul.
- Bodur, H., (2007), "DC-DC Dönüştürücülerde Yumuşak Anahtarlama Teknikleri", Yıldız Teknik Üniversitesi Elektrik Mühendisliği Bölümü Ders Notları, İstanbul.
- Chatterjee, K. and Ramanarayanan V., (1993), "A Comparative Study of Inverter Circuits for Induction Heating", International Power Engineering Conference, 537-542.
- Cora, A. ve Eroğlu, Y. S., (1999) "Endüksiyonlu Isıtma ve Endüksiyon Fırınlarının Tasarımı", Elektrik-Elektronik-Bilgisayar Mühendisliği 8. Ulusal Kongresi, 723-726.
- Çetin E. ve Sazak B. S., (2004), "Fotovoltaik Enerji Dönüşüm Sistemlerinde Kullanılabilecek Bir Seri Rezonans İnvertör Devresinin İncelenmesi" Pamukkale Üniversitesi Mühendislik Fakültesi, Mühendislik Bilimleri Dergisi, cilt no.10, sayı 3, 339-346.
- Çetin, S., (2005), "Bir Fazlı İndüksiyon Isıtma Sistemi Analizi ve Dizaynı", Pamukkale Üniversitesi Fen Bilimleri Enstitüsü, Yüksek Lisans Tezi, Denizli.
- Çetin S. ve Sazak B. S., (2006a), "Mutfak Tipi Isıtma Uygulamaları için İki Çıkışlı Bir İndüksiyon Isıtma İnverteri Tasarımı", Pamukkale Üniversitesi Mühendislik Fakültesi, Mühendislik Bilimleri Dergisi, cilt no.12, sayı 3, 397-401.

Çetin S. ve Sazak B. S., (2006b), “Mutfak Tipi İndüksiyon Isıtma Cihazları için Üç Çıkışlı Bir Seri Rezonans İnverter Uygulaması”, Teknoloji Dergisi , cilt no. 8, sayı 1, 7-16.

Davies, J. and Simpson, P., (1979), *Induction Heating Handbook*, McGraw-Hill Book Company, 426 p., Berkshire.

Dawson, F. P. and Jain, P., (1991), “A Comparison of Load Commutated Inverter Systems for Induction Heating and Melting Applications”, *IEEE Transactions on Power Electronics*, vol.6, no. 3, 430-441.

Durukan, İ., (2007), “Effects of Induction Heating Parameters on Forging Billet Temperature”, *Ortadoğu Teknik Üniversitesi Makine Mühendisliği, Yüksek Lisans Tezi*, Ankara.

Elfallah, A., Ermiş, M. ve Tosun, H., (1987), “Endüksiyonla Düzgün Isıtma Uygulamalarında İş Bobininin Tasarımı”, *Elektrik Mühendisliği 2. Ulusal Kongresi*, 753-756.

Forest, F., Faucher, S., Gaspard, J. Y., Montloup, D., Huselstein, J. J. and Joubert, C., (2007), “Principle of A Multi Load Single Converter System for Low Power Induction Cooking Appliances”, *IEEE Transactions on Industrial Electronics*, vol. 54, no. 1, 441-452.

Gülgün, R., (1999), *Güç Elektroniği*, YıldızTeknik Üniversitesi Basım-Yayın Merkezi, İstanbul.

Hernandez, P., Monterde, F., Burdio, J. M., Garcia, J. R. and Martinez, A., (1999), “About the Power Losses Distribution in Inductors for Induction Cooking Appliances”, *EPE Journal*, Lausanne.

Kazimierczuk, M. K., (1991), “Class-D Voltage-Switching MOSFET Power Amplifier”, *IEEE Proceedings-B*, vol. 138, no. 6, 285-296.

Kazimierczuk, M. K. and Szaraniec, W., (1992), “Class-D Zero-Voltage-Switching Inverter with Only One Shunt Capacitor”, *IEEE Proceedings-B*, vol. 139, no. 5, 449-456.

Kazimierczuk, M. K. and Czarkowski, D., (1995), *Resonant Power Converters*, John Wiley & Sons Inc., 481 p., Canada.

Koertzen, H. W. A., Ferreira, J. A. and Wyk, J. D., (1992), “A Comparative Study of Single Switch Induction Heating Converters Using Novel Component Effectivity Concepts”, *IEEE* 298-305.

Koroğlu, S., (2002) “Bir Fazlı Seri Rezonans İnvertörlü İndüksiyon Isıtma Sistemi Tasarımı” *Pamukkale Üniversitesi Fen Bilimleri Enstitüsü, Yüksek Lisans Tezi*, Denizli.

Koroğlu, S. ve Sazak, B.S., (2002), “Mutfak Uygulamaları için Yarım Köprü Seri Rezonans İnvertörlü İndüksiyon Isıtma Sistemi Tasarımı”, *Pamukkale Üniversitesi Mühendislik Fakültesi, Mühendislik Bilimleri Dergisi*, cilt 8, 167-172.

Llorente, S., Monterde, F., Burdio, J. M., and Acero, J., (2002), “A Comparative Study of Resonant Inverter Topologies Used in Induction Cookers”, *IEEE Applied Power Electronics Conference and Expositions*, vol. 2, 1168-1174.

Mohan, N., Undeland, T. M. and Robbins, W. P., (1989), *Power Electronics; Converters, Applications and Design*, John Wiley and Sons Publication, 667p., USA.

Mohan, N., Undeland, T.M. and Robbins, W.P., (2003), “Güç Elektroniği Çeviriciler Uygulamalar Ve Tasarım”, (Çev: Nejat Tuncay, Metin Gökaşan, Seta Boğosyan), *Literatür*

Yayınları, 874 p., İstanbul.

Monterde, F., Hernandez, P., Burdio, J. M., Garcia, J. R. and Martinez, A., (1999), "Comparison of Control Strategies for Series-Resonant Full-Bridge Inverter for Induction Cookers", EPE, Lausanne.

Obdan, H., Bodur, H., (1993), "MOS Kontrollu Tristörlerin Özellikleri ve Sürme Devrelerinin Etüdü", Elektrik-Elektronik-Bilgisayar Mühendisliği 5.Ulusal Kongresi, 13-18 Eylül 1993, 1118-1123, Trabzon.

Okman, O., (2005), "Free Forming of Locally Induction Heated Specimens ", Ortadoğu Teknik Üniversitesi Makine Mühendisliği, Yüksek Lisans Tezi, Ankara.

Omori, H. and Nakaoka, M., (1989), "New Single Ended Resonant Inverter Circuit and System for Induction Heating Cooking Apparatus", Int. J. Electronics, vol. 67, no. 2, 277-296.

Öncü, S., (2005), "Bir Fazlı Yüksek Verimli Ev Tipi Bir İndüksiyon Isıtma Sistemi", Pamukkale Üniversitesi Fen Bilimleri Enstitüsü, Yüksek Lisans Tezi, Denizli.

Öncü S. ve Sazak B.S., (2004), "E Sınıfı İnverterli Mutfak tipi Bir İndüksiyon Isıtma Uygulaması", Yıldız Teknik Üniversitesi Sigma Müh. ve Fen Bilimleri Dergisi, sayı 2004/2., 68-73.

Öncü S. ve Sazak B.S., (2006), "Tek Anahtarlı İnverterlerde Bazı Kontrol Palslerinin Silinmesiyle Güç Kontrolü", Journal of the Faculty of Engineering and Architecture of Gazi University, vol.21, no.1, 123-127.

Sazak, B. S., (2000), "İndüksiyonla Isıtmada Kullanılan Güç Sistemleri ve Yarı İletken Anahtar Elemanlarındaki Gelişmeler", 8. Denizli Malzeme Sempozyumu, 435-439, Denizli.

Sazak, B. S., Öncü, S. ve Çetin, S., (2005), "Bir Ev Tipi İndüksiyon Isıtma Sistemi Tasarım Metodu", TEKNOLOJİ Dergisi, cilt 8, sayı 4, 321-329.

Sazak, B. S., (2006), İndüksiyon Isıtma Sistemleri, Bilal Ofset Matbaacılık, Denizli.

Tacer, E., (2004), "Elektromekanik Enerji Dönüşümü", İstanbul Teknik Üniversitesi Elektrik Mühendisliği Bölümü Ders Notları, İstanbul

Wang, S., Izaki, K., Hirota, I., Yamashita, H., Omori, H. and Nakaoka M., (1998), "Induction-Heated Cooking Appliance Using New Quasi-Resonant ZVS-PWM Inverter with Power Factor Correction", IEEE Transactions On Industrial Electronics, vol. 34, no. 4, 705-712.

Wang, Z., Sznaiier, M., Batarseh, I. and Bu, J., (1996), "Robust Controller Design for A Series Resonant Converter", IEEE Transactions on Aerospace and Electronic Systems, vol. 32, no. 1, 221-233.

Yıldırım, G. ve Gülgün, R., (1988), "Güç Elektroniğinin Endüksiyonla Isıtmada Kullanılması", Bursa II. Elektromekanik Sempozyumu, 69-75.

Yıldız, M. N. ve Alan, İ., (2006), "2,2 kW' lık İndüksiyonlu Sıvı Isıtıcı Tasarımı ve Denenmesi", Makine Teknolojileri Elektronik Dergisi, sayı 3, 11-23.

ÖZGEÇMİŞ

Doğum tarihi 09.05.1982

Doğum yeri Erzurum

Lise 1996-2000 Bursa Erkek Anadolu Lisesi

Lisans 2000-2005 Yıldız Teknik Üniversitesi
Elektrik–Elektronik Fakültesi
Elektrik Mühendisliği Bölümü

Yüksek Lisans 2005-2008 Yıldız Teknik Üniversitesi
Fen Bilimleri Enstitüsü
Elektrik Mühendisliği Anabilim Dalı
Elektrik Makineleri ve Güç Elektroniği Programı

Çalıştığı kurum(lar)

2006-2007 Nortel Netaş A.Ş.

2008-Devam ediyor TOFAŞ A.Ş.