

T. C.

**PAMUKKALE ÜNİVERSİTESİ
FEN BİLİMLERİ ENSTİTÜSÜ**

**BİR FAZLI YÜKSEK VERİMLİ EV TİPİ BİR
İNDÜKSİYON ISITMA SİSTEMİ**

Selim ÖNCÜ

Yüksek Lisans Tezi

DENİZLİ - 2005

BİR FAZLI YÜKSEK VERİMLİ EV TİPİ BİR İNDÜKSİYON ISITMA SİSTEMİ

**Pamukkale Üniversitesi
Fen Bilimleri Enstitüsü
Tarafından Kabul Edilen
Elektrik Elektronik Mühendisliği Anabilim Dalı
Yüksek Lisans Tezi**

Selim ÖNCÜ

Tez Savunma Tarihi: 28.01.2005

DENİZLİ - 2005

TEZ SINAV SONUÇ FORMU

Bu tez tarafımızdan okunmuş, kapsamı ve niteliği açısından Yüksek Lisans Tezi olarak kabul edilmiştir.

Yrd. Doç. Dr. Bekir Sami SAZAK
(Yönetici)

Yrd. Doç. Dr. Abdullah Tahsin TOLA
(Jüri Üyesi)

Yrd. Doç. Dr. Ömer DEPERLİOĞLU
(Jüri Üyesi)

Pamukkale Üniversitesi Fen Bilimleri Enstitüsü Yönetim Kurulu'nun
.../.../..... tarih vesayılı kararıyla onaylanmıştır.

Prof. Dr. Mehmet Ali SARIGÖL
Müdür
Fen Bilimleri Enstitüsü

TEŞEKKÜR

“Bir Fazlı Yüksek Verimli Ev Tipi Bir İndüksiyon Isıtma Sistemi” konulu yüksek lisans çalışmalarım boyunca desteğini gördüğüm tez danışmanım sayın Yrd. Doç. Dr. Bekir Sami SAZAK’a öncelikle teşekkür ederim.

Katkılarından ötürü sayın Yrd. Doç. Dr. Abdullah T. TOLA’ya ve Pamukkale Üniversitesi Mühendislik Fakültesi Elektrik Elektronik Mühendisliği Bölümü akademik personeline ve mesai arkadaşlarıma teşekkürü bir borç bilirim.

Ayrıca çalışmalarım boyunca desteklerini esirgemeyen eşime ve aileme çok teşekkür ederim.

Selim ÖNCÜ

ÖZET

Bu tez çalışmasında mutfaklarda kullanılan alışlagelmiş ısıtıcı türlerine alternatif olarak ev tipi bir indüksiyon ısıtma sisteminin tasarımı, elektronik benzetimi ve uygulaması gerçekleştirilmiştir. Isıtma sistemini oluşturan E sınıfı tek anahtarlı d.a.-a.a. güç dönüştürücü devrenin, indüksiyon bobininin ve sürücü devrenin verimini arttırmaya yönelik tedbirler alınarak farklı ebatlardaki yük modelleri üzerindeki sıcaklık değişimi incelenmiştir. İndüksiyon ısıtma ile rezistanslı mutfak tipi ısıtıcıya göre daha yüksek verimli ısıtma gerçekleştirilmiştir.

Gerilim beslemeli E sınıfı rezonans invertörde 20-30kHz anahtarlama frekansı aralığında yarı iletken anahtarın iletim süresinin değiştirilmesiyle sıfır gerilim anahtarlama koşulları altında çıkış gücü denetimi yapılmıştır. Aynı invertör devrede 62.5kHz sabit anahtarlama frekansında denetim darbelerinin bazılarının silinmesiyle daha geniş aralıkta çıkış gücü denetimi mümkün kılınmıştır.

Yapılan mutfak tipi indüksiyon ısıtıcıda ilave aktif güç katsayısı düzeltici devre kullanılmadan pasif filtre ile bir fazlı hat akımındaki toplam harmonik bozulma azaltılmıştır.

Anahtar Kelimeler: Ev tipi indüksiyon ısıtma, E sınıfı invertör, Sıfır gerilim anahtarlama, Bazı denetim darbelerinin silinmesiyle güç denetimi.

Selim ÖNCÜ

ABSTRACT

In this study, a home type induction heating system, which is an alternative to conventional domestic cookers was designed, simulated and experimentally carried out. After some precautions were taken to increase the efficiency of the class E single switch dc-to-ac power converter, the induction coil, and the driving circuit, temperature changes on load models with varying sizes were investigated. More efficient heating is achieved by using induction heating system instead of home type resistance heater.

The output power of the voltage fed class E resonant inverter was controlled in zero voltage switching conditions by adjusting the turn on time of the semiconductor to operate between 20-30kHz frequency interval. Moreover, by removing some of the control pulses, it was made possible to control the output power of the same inverter at a wider interval.

In this domestic induction heater, the total harmonic distortion at the line current was minimized by passive filter circuit without the help of an extra active power factor correction circuit.

Keywords: Home type induction heater, Class E inverter, Zero voltage switching, Power control by removing some control pulses.

Selim ÖNCÜ

İÇİNDEKİLER

| | Sayfa |
|-------------------------|-------|
| İçindekiler | VII |
| Şekiller Dizini | XI |
| Çizelgeler Dizini | XIV |
| Simgeler Dizini | XV |

BİRİNCİ BÖLÜM

GİRİŞ

| | |
|--------------------------------------|---|
| 1.1 Genel..... | 1 |
| 1.2 Çalışmanın Amacı ve Kapsamı..... | 2 |

İKİNCİ BÖLÜM

İNDÜKSİYON ISITMA SİSTEMLERİ

| | |
|--|----|
| 2.1 Giriş..... | 5 |
| 2.2 İndüksiyon Isıtma Prensibi | 5 |
| 2.3 İndüksiyon Isıtmanın Avantajları | 7 |
| 2.4 İndüksiyon Isıtmaya Ait Temel Kavramlar..... | 8 |
| 2.4.1 Eddy Akımları..... | 8 |
| 2.4.2 Deri Etkisi ve Dalma Derinliği..... | 8 |
| 2.4.3 Kalite Faktörü ve Manyetik Kuplaj..... | 10 |
| 2.5 İndüksiyon Isıtmanın Mutfak Uygulamalarında Kullanılması | 12 |
| 2.5.1 Sistemin Yapısı ve Üstünlükleri | 12 |
| 2.5.2 Mutfak Tipi İndüksiyon Isıtmada Bobin Eşdeğer Devresi..... | 13 |
| 2.5.2.1 Isıtma Bobini..... | 13 |

| | | |
|---------|--|----|
| 2.5.2.2 | Yüklü Isıtma Bobini Modeli..... | 15 |
| 2.5.2.3 | Bobin ve Yük Direnci | 16 |
| 2.5.2.4 | Kaçak Akı Endüktansı ve Ortak Endüktans..... | 17 |

ÜÇÜNCÜ BÖLÜM

YARI İLETKEN GÜÇ DÖNÜŞTÜRÜCÜLÜ

İNDÜKSİYON ISITMA SİSTEMLERİ

| | | |
|-------|---|----|
| 3.1 | Giriş..... | 19 |
| 3.2 | Yarı İletken Güç Dönüştürücüler..... | 20 |
| 3.2.1 | Güç Dönüşüm Devrelerinde Kullanılan Elemanlar..... | 20 |
| 3.2.2 | Güç Dönüşüm Devreleri | 23 |
| 3.2.3 | Güç Dönüşüm Devrelerinde Verimin Yükseltilmesi | 24 |
| 3.3 | Rezonans Güç Dönüştürücüler | 26 |
| 3.4 | Mutfak Tipi İndüksiyon Isıtıcılarda Yarı iletken Güç Dönüştürücülerin Kullanılması..... | 28 |
| 3.4.1 | Kullanılan İnvörtör Çeşitleri | 28 |
| 3.4.2 | Ev Tipi İndüksiyon Isıtıcılarda Frekans Aralığı..... | 30 |

DÖRDÜNCÜ BÖLÜM

E SINIFI İNVERTÖR DEVRE ANALİZ TASARIM VE

BENZETİM ÇALIŞMASI

| | | |
|-------|--|----|
| 4.1 | Giriş..... | 31 |
| 4.2 | E Sınıfı İnvörtörlerin Üstünlükleri | 31 |
| 4.3 | E Sınıfı İnvörtör Çeşitleri | 32 |
| 4.3.1 | E Sınıfı İnvörtör Çalışma Prensibi | 33 |
| 4.3.2 | E Sınıfı İnvörtör Devresinin Analizi | 34 |
| 4.4 | E Sınıfı İnvörtörlü İndüksiyon Isıtıcı Tasarım | 41 |
| 4.5 | E Sınıfı İnvörtör Devre Benzetim Çalışması..... | 42 |

| | | |
|-------|--|----|
| 4.5.1 | Bobin Akımı ve Kondansatör Gerilimi..... | 43 |
| 4.5.2 | Kaynak Akımı ve Kaynak Gerilimi..... | 44 |
| 4.6 | Denetim Darbelerinin Silinmesi Yöntemiyle E Sınıfı İnvörtör Güç Denetimi..... | 47 |
| 4.6.1 | Sabit Frekans Denetimli E Sınıfı İnvörtör Tasarımı..... | 47 |
| 4.6.2 | Sabit Frekans Denetimli E Sınıfı İnvörtör Benzetim ve Hesaplama Sonuçları..... | 50 |
| 4.6.3 | E Sınıfı İnvörtör Güç Denetim Yöntemlerinin Karşılaştırılması..... | 54 |

BEŞİNCİ BÖLÜM

BİR FAZLI MUTFAK TİPİ İNDÜKSİYON ISITMA UYGULAMASI

| | | |
|-------|--|----|
| 5.1 | Giriş..... | 56 |
| 5.2 | İndüksiyon Bobini ve Yük | 57 |
| 5.3 | E Sınıfı İnvörtörlü İndüksiyon Isıtıcı Deneysel Çalışma Sonuçları..... | 59 |
| 5.3.1 | Kaynak Akımı ve Kaynak Gerilimi..... | 60 |
| 5.3.2 | Bobin Akımı ve Kondansatör Gerilimi..... | 61 |
| 5.4 | D.A.-A.A. Güç Dönüştürücü Devre Kayıplarının Giderilmesi | 65 |
| 5.4.1 | MOSFET Sürme Devresi..... | 65 |
| 5.4.2 | Sıfır Gerilim Anahtarlama..... | 67 |
| 5.5 | E Sınıfı İnvörtörlü İndüksiyon Isıtma Sonuçları | 68 |
| 5.6 | İndüksiyon Isıtma Sisteminin Verimi | 71 |
| 5.7 | E Sınıfı İnvörtörlü İndüksiyon Isıtıcıda Çıkış Gücü Denetimi | 75 |

ALTINCI BÖLÜM
SONUÇ VE DEĞERLENDİRME

| | | |
|-----|-----------------------------|----|
| 6.1 | Sonuç ve Değerlendirme..... | 80 |
| | KAYNAKLAR | 83 |
| | ÖZGEÇMİŞ | 90 |

ŞEKİLLER DİZİNİ

| | Sayfa |
|--|-------|
| Şekil 2.1: İndüksiyon ısıtma blok diyagramı..... | 6 |
| Şekil 2.2: İndüksiyon ısıtma temel prensibi..... | 6 |
| Şekil 2.3: Dalma derinliği..... | 9 |
| Şekil 2.4: Manyetik kuplajlı bobinler..... | 11 |
| Şekil 2.5: Mutfak tipi indüksiyon ısıtma sistemi blok diyagramı..... | 13 |
| Şekil 2.6: Yassı tabanlı bobin ve üretmiş olduğu manyetik alan..... | 14 |
| Şekil 2.7: Yassı tabanlı bobinin ürettiği manyetik alanın kap ve nüve üzerindeki dağılımı..... | 15 |
| Şekil 2.8: Yüklü ısıtma bobini eşdeğer devresi..... | 16 |
| Şekil 2.9: Geliştirilmiş yüklü ısıtma bobini eşdeğer devresi..... | 16 |
| Şekil 2.10: Isıtma bobini vektör diyagramı..... | 18 |
| Şekil 3.1: Güç anahtarlarının sembolleri..... | 21 |
| Şekil 3.2: Yarı iletken anahtarlar ile yapılan güç dönüşüm sistemleri..... | 23 |
| Şekil 3.3: Yarı iletken anahtar anahtarlama dalga şekilleri ve üzerindeki güç harcaması..... | 24 |
| Şekil 3.4: Rezonans anahtar tipleri a) Sıfır akım b) Sıfır gerilim..... | 27 |
| Şekil 4.1: Sıfır gerilim anahtarlama E sınıfı invertör..... | 32 |
| Şekil 4.2: a) İndüksiyon ısıtmada E sınıfı invertörün kullanılması b) Eşdeğer devre..... | 33 |
| Şekil 4.3: Anahtarlama sinyaline göre bobin akımı ve kondansatör gerilimi..... | 34 |
| Şekil 4.4: Anahtarın iletim durumu..... | 35 |
| Şekil 4.5: Anahtar açık devre durumunda kondansatörün enerji depolaması | 36 |
| Şekil 4.6: Kondansatörde depo edilen enerjinin kaynağa aktarılması..... | 37 |
| Şekil 4.7: Anahtardaki dahili diyotun iletim durumu..... | 40 |
| Şekil 4.8: Rezonans kondansatörü gerilimi ve ısıtma bobini akımı..... | 43 |
| Şekil 4.9: Yarı iletken anahtarda sıfır gerilim anahtarlamanın | |

| | | |
|-------------|--|----|
| | gerçekleştirilmesi..... | 44 |
| Şekil 4.10: | Bir fazlı alternatif gerilim ve kaynak akımı..... | 45 |
| Şekil 4.11: | Bir fazlı alternatif gerilim ve filtre edilmiş kaynak akımı..... | 47 |
| Şekil 4.12: | Bazı denetim darbelerinin silinmesi yöntemi ile E sınıfı invertör bobin akımı ve kondansatör gerilimi..... | 49 |
| Şekil 4.13: | İletim durumu söndürme devresi | 50 |
| Şekil 4.14: | Denetim sinyalleri..... | 51 |
| Şekil 4.15: | Bobin akımı ve kondansatör gerilimi dalga şekilleri a) Normal çalışma b) Denetim1..... | 52 |
| Şekil 4.16: | Bobin akımı ve kondansatör gerilimi dalga şekilleri a) Denetim2 b) Denetim3..... | 53 |
| Şekil 5.1: | Bobin parametrelerinin tespit edilmesinde kullanılan devre..... | 57 |
| Şekil 5.2: | Yassı tabanlı indüksiyon bobini..... | 58 |
| Şekil 5.3: | Bir fazlı E sınıfı invertörlü mutfak tipi indüksiyon ısıtma deney düzeneği..... | 59 |
| Şekil 5.4: | Tek anahtarlı mutfak tipi indüksiyon ısıtıcı güç devresi..... | 60 |
| Şekil 5.5: | 200×200×0.7mm CrNi yük ile kaynak akımı (Ch1:5A/div) ve gerilimi (Ch2:5V/div)..... | 60 |
| Şekil 5.6: | Bir fazlı kaynak akımının dalga şeklinin düzeltilmesi (Ch1:5A/div, Ch2:5V/div)..... | 61 |
| Şekil 5.7: | Tam yüklü durumda a) Isıtma bobini akımı (5A/div) b) Rezonans kondansatörü gerilimi (50V/div)..... | 62 |
| Şekil 5.8: | Bobin akımı (Ch1:5A/div) ve rezonans kondansatörü gerilimi (Ch2:50V/div)..... | 63 |
| Şekil 5.9: | MOSFET akımı (5A/div)..... | 63 |
| Şekil 5.10: | Denetim sinyali ile a) Bobin akımı b) Kondansatör gerilimi..... | 64 |
| Şekil 5.11: | MOSFET sürücü devre..... | 65 |
| Şekil 5.12: | Tam yüklü durumda sürücü devre çıkış sinyali (5V/div)..... | 66 |
| Şekil 5.13: | Optik yalıtımsız sürücü devre çıkış sinyali (5V/div)..... | 67 |
| Şekil 5.14: | EXB841 sürücü entegre çıkış sinyali (5V/div, 10µs/div)..... | 67 |
| Şekil 5.15: | E sınıfı invertörde sıfır gerilim anahtarlama (Ch1:5V/div, Ch2:50V/div)..... | 68 |

| | | |
|-------------|--|----|
| Şekil 5.16: | Birer kenarı 200mm ve 160mm olan 0.7mm kalınlıktaki kare yük modellerine ait sıcaklık değişimi..... | 69 |
| Şekil 5.17: | Birer kenarı 140mm ve 100mm olan 0.7mm kalınlıktaki kare yük modellerine ait sıcaklık değişimi..... | 70 |
| Şekil 5.18: | IGBT ile oluşturulmuş E sınıfı invertörlü indüksiyon ısıtıcıda sıcaklık değişimi..... | 71 |
| Şekil 5.19: | Yük ebatlarına göre indüksiyon ısıtma sisteminin verimi..... | 73 |
| Şekil 5.20: | Tam yükte çıkış gücünün frekans ve iletim süresi ile değişimi..... | 74 |
| Şekil 5.21: | Normal çalışma (4N/0D) sürme sinyali (10V/div), bobin akımı (10A/div) ve kondansatör gerilimi (50V/div)..... | 76 |
| Şekil 5.22: | Denetim1 (3N/1D) sürme sinyali (10V/div), bobin akımı (10A/div) ve kondansatör gerilimi (50V/div)..... | 77 |
| Şekil 5.23: | Denetim2 (2N/2D) sürme sinyali (10V/div), bobin akımı (10A/div) ve kondansatör gerilimi (50V/div)..... | 78 |
| Şekil 5.24: | Denetim3 (1N/3D) sürme sinyali (10V/div), bobin akımı (10A/div) ve kondansatör gerilimi (50V/div)..... | 79 |

ÇİZELGELER DİZİNİ

| | Sayfa |
|--|-------|
| Çizelge 2.1: Materyallerin özellikleri..... | 18 |
| Çizelge 3.1: Güç anahtarlarının temel özellikleri..... | 21 |
| Çizelge 4.1: E sınıfı invertör hesaplama ve benzetim çalışması sonuçları..... | 42 |
| Çizelge 4.2: Farklı sürme sinyalleri için benzetim çalışması ve hesaplama sonuçları..... | 54 |
| Çizelge 5.1: Farklı sürme sinyallerinde alınan deneysel sonuçlar..... | 79 |

SİMGELER DİZİNİ

| | |
|----------|--|
| a.a. | Alternatif akım |
| BJT | İki kutup jonksiyonlu transistör |
| c | Özgül ısı değeri |
| C_r | Rezonans kondansatörü |
| d.a. | Doğru akım |
| f | Frekans |
| f_a | Anahtarlama frekansı |
| f_r | Rezonans frekansı |
| GTO | Kapı sönümlü tristör |
| i | Akım |
| I_a | Anahtar akımı |
| I_{ef} | Etkin akım değeri |
| IGBT | Yalıtılmış kapılı iki kutup jonksiyonlu transistör |
| k | Etkileşim katsayısı |
| L_e | Yüklü bobin eşdeğer endüktansı |

| | |
|----------|---|
| L_m | Ortak endüktans |
| L_l | Bobinin kaçak endüktansı |
| m | Kütle |
| MCT | Metal oksit yarı iletken kontrollü tristör |
| MOSFET | Metal oksit yarı iletken alan etkili transistör |
| P_a | Anahtarlama kaybı |
| Q | Kalite faktörü |
| R_b | Bobinin direnci |
| R_e | Yüklü bobin eşdeğer direnci |
| R_y | Yük direnci |
| S | Elektronik anahtar |
| SCR | Tristör |
| THD | Toplam harmonik bozulma |
| t_{il} | Anahtar iletim süresi |
| t_{g1} | İletim gecikme zamanı |
| t_{g2} | Yalıtım gecikme zamanı |
| V_a | Anahtar gerilimi |
| V_c | Kondansatör gerilimi |

| | |
|-------------|---|
| ω | Açısal hız |
| ω_d | Sönümlü salınım açısal hızı |
| ω_r | Rezonans açısal hızı |
| α | Sönümleme katsayısı |
| δ | Dalma derinliği |
| τ | Zaman sabiti |
| μ_r | Bağıl manyetik geçirgenlik |
| ρ | Özdirenç |
| Φ_{11} | Birincil sargı üzerinden devresini tamamlayan akı |
| Φ_{12} | İkincil sargı üzerinden devresini tamamlayan akı |
| ΔT | Sıcaklık farkı |

BİRİNCİ BÖLÜM

GİRİŞ

1.1 Genel

Metaller, birtakım ısıl işlemlerden geçtikten sonra günlük hayatta kullandığımız hale gelmektedirler. Alaşım oluşturabilmek, kaynak veya lehim yapabilmek veya dayanımlarını arttırabilmek için metallerin eritilmesi, hızla ısıtılıp soğutulması ya da yalnızca bölgesel ısıtmanın gerçekleştirilebilmesi gerekmektedir. Bu tip ısıtma gereksinimleri için kullanılan etkin yöntemlerden birisi de elektromanyetik indüksiyon ile ısıtmadır. Transformator, motor, generatör gibi alternatif gerilimde çalışan elektrik makinelerinin nüvelerinde kayıplar nedeniyle meydana gelen ısının bir ısıtma yöntemi olarak kullanılması prensibine dayanmaktadır. 1831 yılında Michael Faraday'ın elektromanyetik indüksiyonu keşfi ile temelleri atılmış ve ilk ısıtma uygulamaları 1897'de İngiltere'de, 1900'de İsveç'te ve 1906'da Almanya'da yapılmıştır (Balbozan, 1984).

Bir metalin elektromanyetik indüksiyon ile ısıtılabilmesi için, manyetik alan üretecek bobinden zamanla değişen akım geçirilmesi gerekir. Bobin üzerinden geçecek olan akımın frekansı, ısıtma tipini (kaynak, hadde, eritme, sertleştirme vb.) ve çıkış gücünü etkileyecektir. Bu sebepten indüksiyon ısıtma sisteminin çalışma frekansı uygulama çeşidine göre alçak, orta veya yüksek frekans değerlerinde olabilir. İndüksiyon ısıtma ile yüksek frekanslarda 1MW, alçak frekanslarda 100MW'a kadar güç elde edilebilmektedir. Kaynak frekansından daha yüksek frekanslarda çalışmadaki amaç, malzemenin istenilen bölgesini kısa sürede yüksek güç yoğunluğu ile ısıtmaktır. Frekans dönüşüm sistemleri ile çeşitli frekanslarda indüksiyon ısıtma gerçekleştirilmektedir.

İlk kullanılmaya başlandığı dönemlerde indüksiyon ısıtma sistemlerinin ilk yatırım maliyetleri diğer sistemlere göre daha yüksekti. Bu aşamada frekans değiştirici olarak motor-alternatör grupları, manyetik frekans çoğaltıcılar, üç elektrotlu lambalar kullanılan invertörler veya kendinden uyarımlı osilatörler kullanıldı. Bu sistemlerden motor-alternatör grupları sabit frekanslar içerir, verimleri düşüktür ve bakım gerektirir. Manyetik frekans çoğaltıcıda, manyetik doymada çalışan demir nüveli bir bobinde akım ve gerilimde harmoniklerin

meydana gelmesi prensibinden yararlanır (Yıldırım ve Gülgün, 1988). Genellikle kaynak frekansının düşük dereceli harmonikleri kullanılır. Dolayısıyla sınırlı frekans değerlerinde ısıtma gerçekleştirilebilir.

Yarı iletken teknolojisindeki ve anahtarlama güç kaynaklarındaki gelişmeler neticesinde, yüksek frekanslarda çalışabilen ve yüksek verimliliğe sahip olan güç kaynakları indüksiyon ısıtmada kullanılır hale geldi. Yüksek güç yoğunluklu güç kaynakları yarı iletken anahtarlar kullanılarak oluşturulabilmektedir.

Endüstrideki uygulamalarının yanı sıra, indüksiyon ısıtma yönteminden ev tipi ısıtma uygulamalarında da faydalanılabilir. Mutfaklarda bulunan metal tabak, tava ve tencereler indüksiyon ısıtma yöntemi ile ısıtılabilir. Yine su ısıtma kaplarında, şofbenlerde ve benzeri uygulamalarda indüksiyon ısıtmadan istifade edilebilir.

1.2 Çalışmanın Amacı ve Kapsamı

Ev tipi indüksiyon ısıtıcıların maliyetinin ve ebatlarının düşürülmesi, veriminin yükseltilmesine yönelik çalışmalar 1970'li yıllardan günümüze kadar sürmektedir (Jung, 1999). Bu amaçla farklı tip d.a.-a.a. güç dönüştürücüleri, indüksiyon bobinleri ve ısıtma kapları kullanılarak birçok mutfak tipi indüksiyon ısıtma uygulaması gerçekleştirilmiştir. Yüksek enerji dönüşüm veriminin elde edilebilmesi için manyetik ve elektronik devrede farklı yöntemler kullanılmıştır. Tek anahtarlı yarı iletken güç dönüştürücüler ve yassı tabanlı indüksiyon bobini bunlara birer örnektir (Omori ve Nakaoka, 1989). Mutfak tipi indüksiyon ısıtıcılarda ihtiyaç duyulan düşük güç orta frekanslı güç dönüşümü, sıfır akım/gerilim ile anahtarlatabilen tek anahtarlı rezonans invertörler ile sağlanabilmektedir (Hirota ve diğ., 1996). Akım veya gerilim beslemeli bir adet güç anahtarı kullanılarak gerçekleştirilen mutfak tipi indüksiyon ısıtıcıların en temel özellikleri geniş aralıkta güç denetimini gerçekleştirebilmeleri, basit, ucuz, verimli ve küçük hacimli olmalarıdır (Leisten ve Hobson, 1990). Mutfak tipi indüksiyon ısıtıcılarda güç dönüştürücü olarak köprü tipi invertörler de kullanılmaktadır (Koertzen ve diğ., 1995) (Llorente ve diğ., 2002). Köprü tipi invertörler ile yüksek güçlerin geniş aralıkta denetimi sağlanabilir. Ancak yalıtımlı sürücü devrelerine ve birden fazla yarı iletken güç anahtarına ihtiyaç duyulması gibi dezavantajları bulunmaktadır.

Bu araştırmada mutfaklarda kullanılabilcek bir fazlı dūřuk gūçlü, orta frekanslı, dūřuk maliyetli ev tipi bir indüksiyon ısıtma sistemi üzerine çalışmalar yapılmıştır. Mutfaklarda kullanılan çelik kapların ısıtılmasında kullanılabilcek indüksiyon ısıtma için gerekli uygun frekans aralığında gerilim beslemeli tek anahtarlı seri rezonans d.a.-a.a. gūç dōnūřtürücü devrenin analizi, elektronik benzetimi yapılmış ve deneysel sonuçları incelenmiştir. Isıtma bobinindeki ve gūç dōnūřtürücü ünitadaki kayıpları azaltmaya yönelik tedbirler mutfak tipi indüksiyon ısıtıcıda uygulamaya geçirilerek sistem verimi artırılmıştır. Gūç dōnūřtürücü devrede kullanılan yarı iletken anahtara uygun sürücü devre oluşturularak, anahtarlama kayıplarının azaltılabilmesi için sürme sinyalinde düzenlemeler gerçekteştirilmiştir. Farklı ebatlardaki yük modelleri için ısıtma deneyleri yapılarak, mutfak tipi indüksiyon ısıtıcının verimi hesaplanmıştır.

Yarı iletken gūç dōnūřtürücü olarak kullanılan gerilim beslemeli E sınıfı invertör devrede iletim süresinin denetimi ile farklı frekanslarda gūç denetimi kolayca gerçekteştirilebilir (Chatterjee ve Ramanarayanan, 1993). Ancak iletim süresinin değiştirilmesiyle sabit frekansta çıkış gūcünün kısıtlı aralıkta denetimi yapılabilir. Sabit frekans ve iletim süresinde gūç denetiminin gerçekteştirilebilmesi için anahtar denetim sinyalinin sürme darbelerinden bazılarının silinmesiyle sistemin geniş aralıkta gūç denetimi sağlanabilir. Denetim darbelerinin silinmesi yöntemi ile daha önce akım beslemeli E sınıfı invertörün gūç denetimi yapılmıştır (Bin Yusoff ve dię., 2003). Benzer yöntemler E sınıfı doğrultuculu (Koizumi ve dię., 2001) ve DE sınıfı invertörlü devrelere de uygulanmıştır (Sekiya ve dię., 1998). Bu çalışmada bazı denetim darbelerinin silinmesi yöntemi gerilim beslemeli E sınıfı invertöre uygulanarak, orta frekanslı indüksiyon ısıtıcıda iletim süresinin değiştirilmesiyle gūç denetimine kıyasla anahtarlama kayıplarını önemli oranda arttırmadan daha geniş aralıkta gūç denetimi mümkün kılınmıştır. Silinen darbelerin sonunda sıfır gerilim anahtarlama şartları bozulmaktadır. Anahtara ilave edilen söndürme devresi ile anahtarın zarar görmesinin önüne geçilmiştir. Kullanılan yöntemin sağlamış olduğu bir diğer avantaj da çıkış gūcünün hızlı ve kademeli olarak değiştirilebiliyor olmasıdır (Fujii ve dię., 1997).

Bir fazlı ev tipi indüksiyon ısıtıcı doęrusal yük özellięi göstermemesi ve anahtarlmalı tip gūç dōnūřtürücü içermesi sebebiyle hat akımını bozucu etkiler üretmektedir. Rezonans gūç dōnūřtürücü kullanılmasıyla bir adet gūç anahtarı yardımıyla indüksiyon ısıtma için gerekli alternatif akım üretilmiř ve elektromanyetik parazitler engellenmiřtir. Aynı zamanda pasif

filtreleme ile sistem maliyeti arttırılmadan ve ilave aktif güç katsayısı düzeltici devre kullanılmadan hat akımındaki toplam harmonik bozulma azaltılmıştır.

İKİNCİ BÖLÜM İNDÜKSİYON ISITMA SİSTEMLERİ

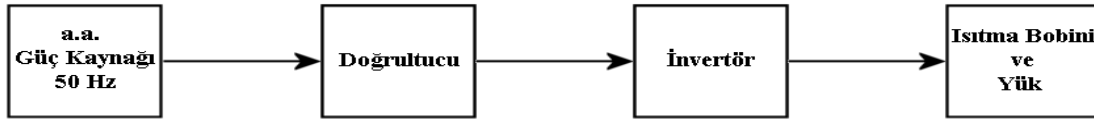
2.1 Giriş

Elektromanyetik indüksiyon yoluyla ısıtma, aslında iletken metal parçası üzerindeki nüve kayıplarının kullanımına yönelik bir uygulamadır. Elektromanyetik alan içerisine yerleştirilen iletkende eddy (foucoult) akımları ve manyetik kutupların sürtünmesi (histerezis) nedeniyle ısı şeklinde açığa çıkan bir güç harcaması oluşmaktadır (Garcia ve diğ., 1994). İndüksiyon

ısıtma, frekansın bir fonksiyonu olarak elektrik makinelerinin nüvelerinin ısınmasına neden olan bu kayıpların, metallerin ısıtılma yöntemi olarak kullanılması ilkesine dayanır.

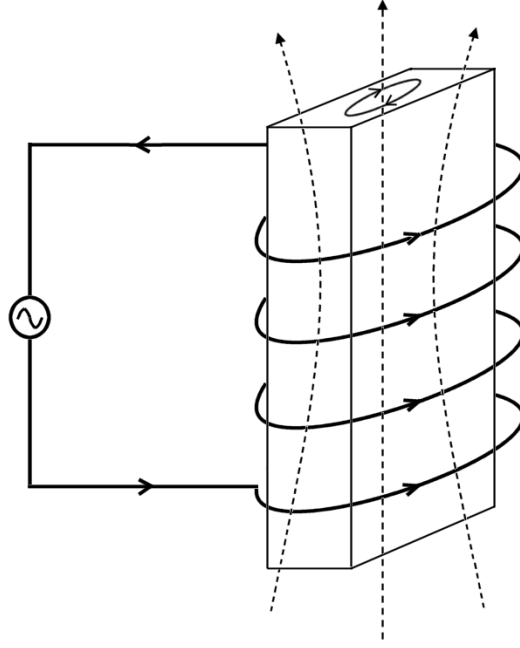
2.2 İndüksiyon Isıtma Prensipleri

Bir indüksiyon ısıtma sistemini oluşturan temel unsurlar, ısıtma amacına göre uygun tasarlanmış bobin ve bu bobinden ihtiyaç duyulan frekansta akım geçirebilecek güç kaynağıdır. Kaynak frekanslı ısıtma yapılmadığı durumlarda indüksiyon ısıtma sisteminde genellikle d.a.-a.a. güç dönüştürücü sistemler ile zamanla yönü ve şiddeti değişen akım elde edilir. Bu yüzden indüksiyon ısıtma güç kaynağı bir çeşit frekans dönüştürücü olarak çalışır. Kaynak frekanslı gerilim doğrultulur; daha sonra elde edilen doğru gerilimden d.a.-a.a. dönüştürücü ile ısıtma bobini için gerekli frekansta alternatif gerilim elde edilir. Güç dönüşüm devrelerinden oluşmuş bir indüksiyon ısıtma sisteminin blok diyagramı Şekil 2.1’de gösterilmiştir.



Şekil 2.1: İndüksiyon ısıtma blok diyagramı.

Isıtma bobini tarafından üretilen değişken manyetik alan içerisine metal parça yerleştirildiğinde, Faraday kanununa göre iletken metal üzerinde bir gerilim indüklenerek parça içerisinde Şekil 2.2’deki gibi eddy akımları oluşur. Parçanın direnci üzerinde harcanan $I_{eddy}^2 \cdot R$ gücü, ısı olarak açığa çıkar. Başka bir ifade ile bobinden geçen değişken akım ikincil devre olarak kabul edilebilecek iletken malzeme üzerinde akımlar dolaştırarak bu parçanın ısıtılması gerçekleştirilir (Khan ve diğ., 2000).



Şekil 2.2: İndüksiyon ısıtma temel prensibi.

Pratikte ısıtılması gereken cisim demir, çelik gibi manyetik veya altın, alüminyum gibi manyetik olmayan iletkenler olabilir. Manyetik malzemelerde eddy akımlarının yanı sıra, histerezis kayıplarının da parçanın ısıtılmasına katkısı olacaktır (Grajales, 1995).

2.3 İndüksiyon Isıtmanın Avantajları

Endüstride ve evlerde kullanılan alışlagelmiş ısıtma teknikleri ile karşılaştırıldığında indüksiyon ısıtma yönteminin en belirgin avantajı yüksek verimliliğe sahip olmasıdır. Bunun en önemli sebeplerinden birisi ısıtma işleminin yalnızca ısıtılacak parça üzerinde yoğunlaştırılmasıdır.

İndüksiyon ısıtmanın yüksek verimliliğinin yanısıra aşağıdaki gibi sıralanabilecek birçok üstünlüğü mevcuttur:

- Isıtma bölgesinde yanma ürünü olmamaktadır.
- Hızlı ısıtma sağlanabildiğinden endüstride otomatikleşmeye olanak sağlar.

▪ Isıtma işlemine hızlı başlanabildiğinden ürün değişimi kolaylaşır, enerji tasarrufu sağlar.

- Çevreye yayılan ısı miktarı azdır.
- Isıl işlemler yanma ile gerçekleşmediğinden havalandırma ihtiyacı en az seviyededir.
- Yanıcı ve patlayıcı madde kullanılmadığından güvenilirdir.
- Çevre kirliliği oluşturmaz.
- Denetimli ısıtma gerçekleştirilebilir.

Özet olarak denetim kolaylığı, yüksek verimliliği, madde kayıplarının son derece düşük olması, otomatik üretime uygunluğu ve çevre kirliliği oluşturmaması gibi nedenlerden dolayı elektromanyetik indüksiyon ile ısıtma günümüzde yaygın kullanılan bir teknik haline gelmiştir (Elfallah ve diğ., 1987).

Yukarıdaki üstünlüklerinin yanı sıra indüksiyon ısıtma sistemlerinin dezavantajları da bulunmaktadır. Sistem maliyetinin yüksek olması, farklı yüklerde empedans uyum problemi, elektromanyetik parazitler üretmesi, güç katsayısını düşürücü etkisinin olması, denetim devrelerinin karmaşık olması bunlardan bazılarıdır. Ancak yüke göre uygun şekillendirilmiş bobin kullanılarak, uygun güç dönüştürücü devre ve anahtarlama tekniği seçilerek bu problemler azaltılabilir.

2.4 İndüksiyon Isıtmaya Ait Temel Kavramlar

İndüksiyon ısıtma prensibinin daha iyi anlaşılabilmesi için eddy akımları, deri etkisi, dalma derinliği, kalite faktörü, kuplaj faktörü gibi temel kavramların bilinmesi gerekir.

2.4.1 Eddy Akımları

Değişken manyetik alan içerisinde bulunan iletken malzemelerden oluşmuş nüve elemanları, kısa devre edilmiş iletken gibi davranırlar ve üzerlerinden girdap akımları dolaşır. Nüve üzerinden dolaşan bu akımlara ‘eddy akımları’ denir (Agrawal, 2001). İndüksiyon ısıtmada ısıtılacak metal parça bobinin nüvesi gibi düşünülürse, parça üzerindeki eddy akımları nedeniyle $I_{eddy}^2 \cdot R$ omik kayıpları oluşarak parça ısınır. Bu kayıplar bobindeki

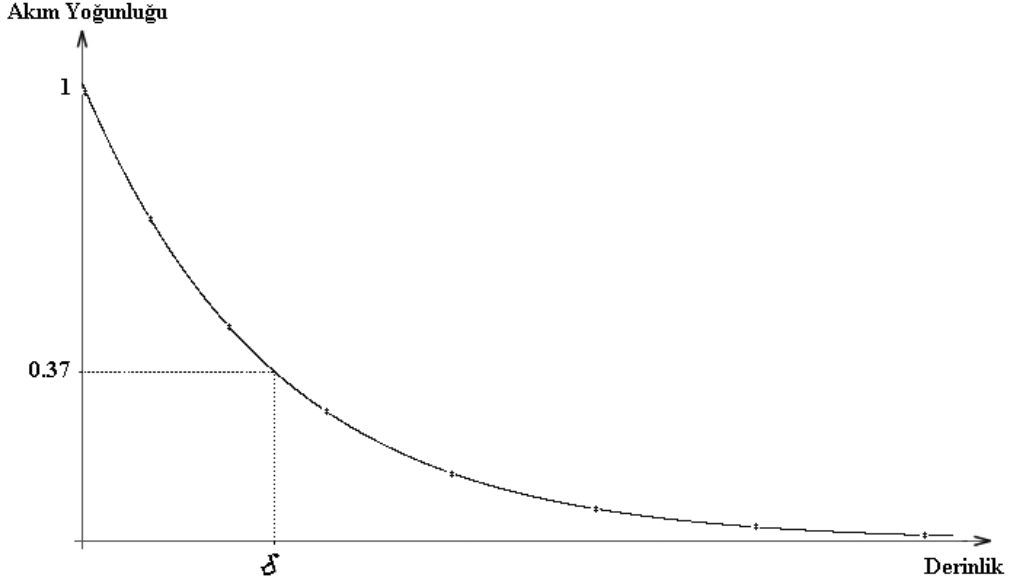
yüklenme miktarını da etkilemektedir. Nüvenin ısınmasına neden olan bu kayıp, bobine seri eşdeğer bir direnç ile elektriki olarak temsil edilebilir.

İndüksiyon ısıtmada iletken malzemenin ısıtılması büyük çoğunlukla eddy akımlarıyla sağlanmaktadır. Bu yüzden eddy akımlarını etkileyen çalışma frekansı, ısıtılan malzemenin iletkenliği, manyetik geçirgenliği, şekli ve kalınlığı gibi faktörler indüksiyon ısıtma için göz önünde bulundurulmalıdır.

2.4.2 Deri Etkisi ve Dalma Derinliği

Yüksek frekanslarda iletkenlerin doğru akım dirençlerinin yanı sıra deri etkisinin de hesaba katılması gerekmektedir. Deri etkisi kısaca iletkenin direncinin frekans arttıkça artması olarak açıklanabilir. Akım taşıyan bir iletkenin merkezi daha çok manyetik kuvvet çizgisi tarafından kesilir. İletken bu bölgede yüzeye yakın bölgeye kıyasla daha yüksek endüktansa ve bundan ötürü daha yüksek reaktansa sahip olur. Merkeze yakın bölgelerdeki reaktansın daha çok olması sebebiyle akım iletken yüzeyine yakın bölgeden akar. Frekans arttıkça merkezdeki reaktans artacağı için akım yoğunluğunun dağılımı yüzeyden merkeze doğru üstel olarak azalacak şekilde olur. ‘Dalma Derinliği’, deri etkisi nedeniyle yüzeyden merkeze doğru azalan akımın yoğunluğunun, yüzeydeki değerinin $1/e$ 'sine düştüğü derinlik değeridir ($e=2.718$). Buradan, akımın %63'ünün gücün ise %86'sının bu bölgede yoğunlaştığı sonucunu çıkartmak mümkündür (Kang ve diğ., 2003).

Frekansın etkisiyle akımın aktığı kesit alanı dalma derinliği kadar kısıtlandığı için, deri etkisi sebebiyle iletkenin etkin direnci artmaktadır. Şekil 2.3'de bir iletkenin geçen akımın deri etkisi nedeniyle iletken yüzeyinden merkezine doğru olan dağılımı görülmektedir. Buradan akımın yüzeydeki değerinin %37'sine düştüğü değerdeki derinliğin dalma derinliği olduğu anlaşılmaktadır.



Şekil 2.3: Dalma derinliği.

Frekans ile değişim gösteren dalma derinliği aynı zamanda malzemenin fiziksel ve manyetik özelliklerinden de etkilenecektir. Eşitlik 2.1’de verilen ifade, dalma derinliğinin hesaplanmasında kullanılabilir (Tanaka, 1989):

$$\delta = \sqrt{\frac{1}{4\pi^2 10^{-7}}} \sqrt{\frac{\rho}{\mu_r f}} \quad (2.1)$$

Burada;

δ : dalma derinliği (m),

f: frekans (Hz),

μ_r : bağıl manyetik geçirgenlik,

ρ : öz direnç ($\Omega\text{mm}^2/\text{m}$)’dir.

2.4.3 Kalite Faktörü ve Manyetik Kuplaj

İndüksiyon ısıtma sistemlerinde ısıtma bobini ve yük parçası arasındaki ilişki eşdeğer devre modellemesi ile ifade edilebileceği gibi kalite faktörü ile de temsil edilebilir. Bobinde depo edilen maksimum enerji ile direnç üzerinde harcanan enerji arasındaki oran, bobinin

kalite faktörüdür. Q harfi ile gösterilir. Seri RLC devresinin kalite faktörü rezonans açısız hızına bağı olarak aşağıdaki şekilde tanımlanır:

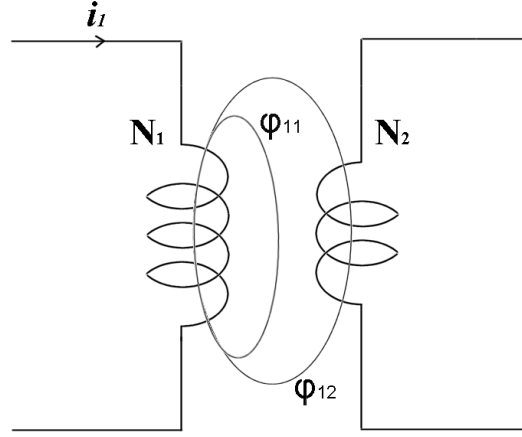
$$Q = \frac{\omega_r L}{R} = \frac{1}{\omega_r C R} \quad (2.2)$$

Q değeri uygulamaya yönelik değişim göstermesine rağmen, yüksek frekans uygulamalarında manyetik yükler için 3 ile 10, manyetik olmayan yükler için 10 ile 15 değerleri arasında değişmektedir (Grajales, 1995).

Isıtma bobini birincil devre, yük parçası ikincil devre olarak düşünöldüğü taktirde indüksiyon ısıtma sistemi transformatöre benzetilebilir. Isıtma bobininde üretilen manyetik akının yük parçası üzerinden devresini tamamlama oranı sistemin verimliliği açısından önemlidir. Yük parçası ile bobin arasındaki manyetik etkileşimi tanımlamaya yönelik kullanılan kavramlardan birisi 'kuplaj faktörü' veya 'etkileşim katsayısı' dır. şekil 2.4'de ikincil sargı üzerinden devresini tamamlayan akının (φ_{12}), birincil sargı tarafından üretilen akıya (φ_1) oranı kuplaj faktörünü (k) verir.

$$k = \frac{\varphi_{12}}{\varphi_{11} + \varphi_{12}} = \frac{\varphi_{12}}{\varphi_1} \quad (2.3)$$

Etkileşim halindeki bobinlerin yerleştiriliş durumu ve aralarındaki mesafeye göre değişen kuplaj faktörü 0 ile 1 arasında değerler alabilir. Bobinler birbirleri ile ideal olarak manyetik kuplajlı ise kuplaj faktörü 1 olmaktadır.



Şekil 2.4: Manyetik kuplajlı bobinler.

Isıtma bobini ve yük parçası manyetik kuplajlı iki bobin gibi düşünülürse, hava boşluğunun mevcut oluşu, kuplajlı bobinde esaslı enerji depolanmasını ifade eder (Witulski, 1995). Bu yüzden indüksiyon ısıtmada verimin yükseltilebilmesi için, bobin ve yük arasındaki manyetik etkileşimin artırılması gerekir.

Yük parçasının şekline ve ebatlarına uygun bobin kullanılması, yük ile bobin arasındaki mesafenin mümkün olabilen en küçük seviyede tutulması gibi tedbirler ile, hava boşluğu nedeniyle sisteme etki eden endüktif reaktans etkisi azaltılabilir. Çünkü bobin empedansının reaktif bileşeninin en büyük parçasını hava boşluğu reaktansı oluşturmaktadır. Kuplaj faktörünün artırılması ile hava boşluğu reaktansı küçültülerek bobinin verimi ve güç katsayısı yükselir, bobindeki sarım başına gerilim değeri azalır ve sistemin görünür gücü düşer (Davies ve Simpson, 1979).

2.5 İndüksiyon Isıtmanın Mutfak Uygulamalarında Kullanılması

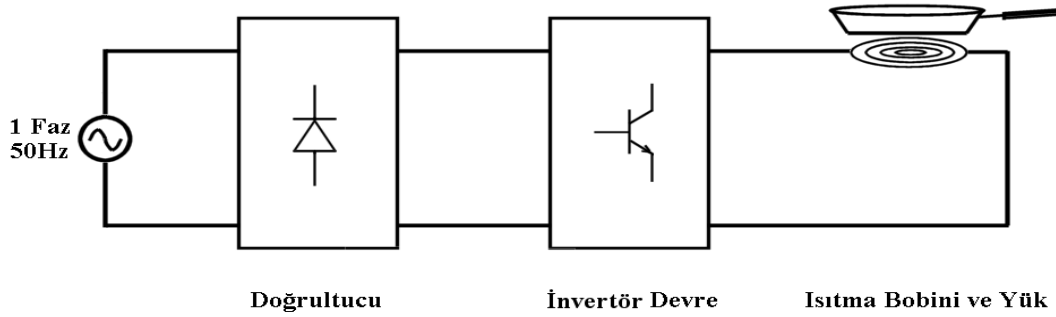
1970’li yılların ortalarından itibaren indüksiyon ısıtma evlerde kullanılmaya başlanarak (Jung, 1999) günümüze kadar farklı ısıtma kapları, ısıtma bobinleri (Tanaka, 1989) (Sazak, 2004) ve güç dönüştürücü devreleri (Llorente ve diğ., 2002) kullanılarak bu konu üzerinde birçok araştırma yapılmıştır. Mutfaklarda indüksiyon ısıtma kullanımını cazip hale getiren etkenlerden bazıları yarı iletken güç dönüştürücülerdeki hızlı gelişmeler, mutfaklarda çelik ısıtma kaplarının yaygın kullanılıyor olması, yüksek verimlilik ve güvenilirliktir.

2.5.1 Sistemin Yapısı ve Üstünlükleri

Endüstride kullanılan bir indüksiyon ısıtıcı ile evlerde kullanılanlar arasında çalışma prensibi bakımından fark olmamakla birlikte, ısıtılacak malzeme cinsi, indüksiyon bobininin şekli, invertör devre ve çalışma frekansı gibi etkenlerin ev tipi ısıtma uygulamalarına göre seçilmesi gerekir.

İnvertör devre, yük ve ısıtma bobininden oluşmuş mutfak tipi bir indüksiyon ısıtma sisteminin blok diyagramı Şekil 2.5’de gösterilmiştir. İnvertör devre için gerekli olan doğru gerilim, bir fazlı alternatif gerilimin doğrultulmasıyla elde edilmektedir.

Yarı iletken anahtarlama elemanlarından oluşmuş invertör devre, doğru gerilimi mutfak uygulamaları için gerekli olan orta frekanslı alternatif gerilime dönüştürür. Isıtma bobini tarafından üretilen değişken manyetik alan, bobin üzerine yerleştirilmiş çelik kapta eddy akımları dolaştırarak kabın ısıtılmasını sağlar. Bu sebepten sistemin iki önemli parçasından birisi indüksiyon (ısıtma) bobini, diğeri d.a.-a.a. güç dönüşümünü gerçekleştiren invertör devredir. Her iki unsur da, mutfak tipi indüksiyon ısıtmaya uygun tasarlanmalıdır.



Şekil 2.5: Mutfak tipi indüksiyon ısıtma sistemi blok diyagramı.

İndüksiyon ısıtma ile ısıнын yalnızca metal kap üzerinde yoğunlaştırılması, çevreye yayılan ısı miktarını azaltmaktadır. Bu, aynı zamanda sistemin yüksek verimli olmasını sağlamaktadır. Yanıcı-patlayıcı gazlar kullanılmadığı ve indüksiyon bobini ısınmadığı için mutfaklarda kullanılan gazlı ve diğer elektrikli ısıtıcılara göre daha güvenilir olmaktadır.

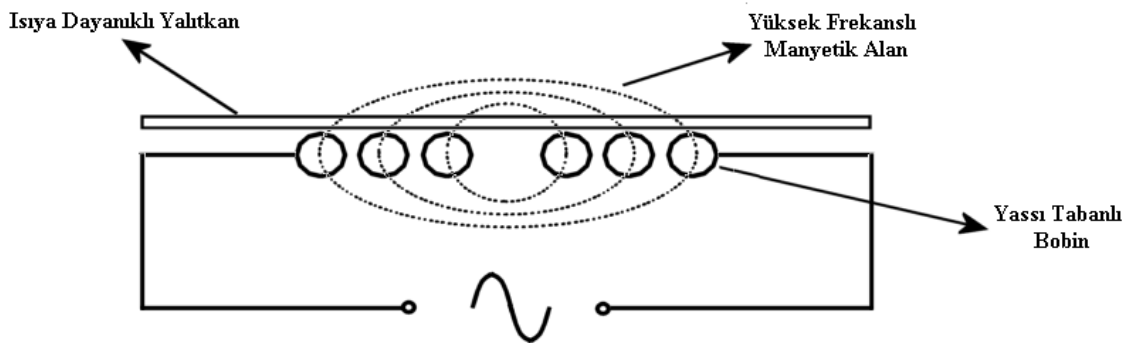
Bununla birlikte, kolay temizlenebilir olması nedeniyle mutfak tipi ısıtma uygulamaları için pratik bir çözümdür.

2.5.2 Mutfak Tipi İndüksiyon Isıtmada Bobin Eşdeğer Devresi

Isıtma bobininin endüktansı verim, rezonans frekansı, güç katsayısı, kalite faktörü gibi parametreleri etkilediği için yüklü bobinin eşdeğer devresinin çıkartılması oldukça önemlidir. Özellikle invertör devrenin sağlıklı çalışmasında bobinin doğru modellenmesinin büyük rolü vardır.

2.5.2.1 Isıtma Bobini

İndüksiyon ısıtma uygulamalarında bobinin yük ile uyumu güç katsayısını, verimi, bobin akım ve gerilim değerlerini etkilediği için mutfaklarda kullanılacak olan ısıtma bobini, ısıtılacak çelik kabın şekline uygun olarak biçimlendirilmelidir. Bu amaçla sarmal (helisel) bobin, basket bobin veya yassı tabanlı (pancake) bobin kullanılabilir. Birçok kabın düz taban şekline sahip olduğu mutfaklarda yassı tabanlı bobin kullanımı oldukça uygun bir seçimdir (Chatterjee ve Ramanarayanan, 1993). Şekil 2.6'da yassı tabanlı bobin ve çevresindeki manyetik alan dağılımı görülmektedir.

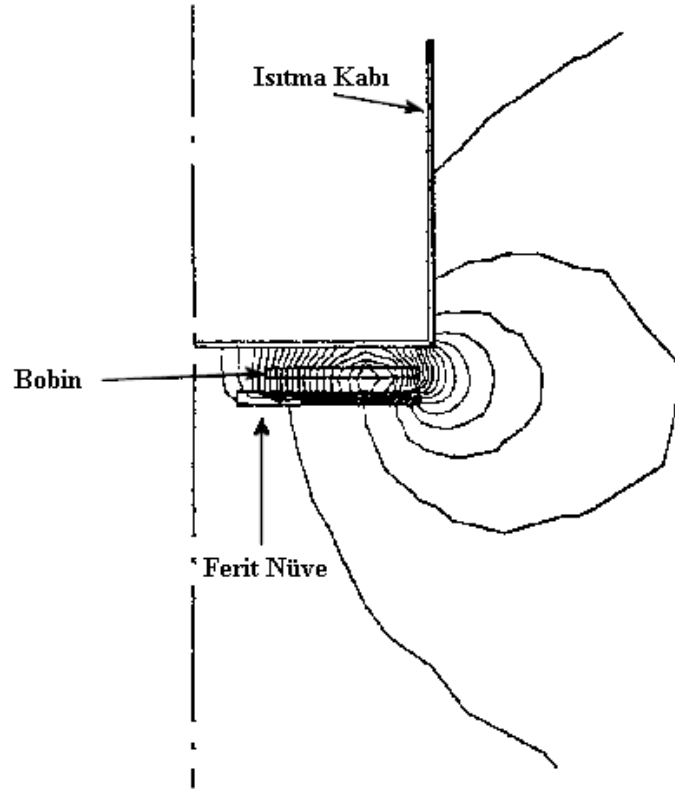


Şekil 2.6: Yassı tabanlı bobin ve ürettiği manyetik alan.

Manyetik devrelerde oluşan bakır, eddy ve histerezis kayıpları çalışma frekansının yükselmesi ile artmaktadır. Bu kayıplardan sargı direnci nedeniyle oluşan bakır kayıpları, orta ve yüksek frekansa uygun yapıdaki iletken çeşitleriyle, bobinin nüvesinde oluşabilecek kayıplar ise yüksek frekanslarda kullanılmak için üretilmiş manyetik seramikler (ferit nüve)

ile önlenir. Manyetik seramikler yüksek manyetik geçirgenlik ve düşük elektriksel iletkenlik gibi özelliklerinden dolayı, 1kHz ve üzerindeki frekanslarda eddy kayıplarının azaltılması için tercih edilmektedirler.

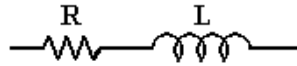
Yassı tabanlı bobinin üzerine relüktansı havaya oranla çok daha düşük olan çelik ısıtma kabı konulduğunda, bobinin ürettiği manyetik akının bir kısmı kap üzerinden devresini tamamlayarak eddy akımlarının oluşumunu sağlar. Bobin üzerine ısıtma kabı konulmadığında üretilen manyetik alan daha geniş bir yüzeye yayılmaktadır. Manyetik kuvvet çizgilerinin bobinin altındaki dönüş yolunun relüktansını azaltmak için bobinin altına yüksek frekans uygulamalarına uygun ferit nüve parçaları veya ferit diskler yerleştirilir (Chatterjee, 1991). Neticede orta frekans güç kaynağı tarafından beslenen yassı tabanlı bobinin ürettiği manyetik akı Şekil 2.7'deki gibi çoğunlukla çelik kap üzerinden ve ferit nüveden devresini tamamlar.



Şekil 2.7: Yassı tabanlı bobinin ürettiği manyetik alanın kap ve nüve üzerindeki dağılımı (Omori ve Nakaoka, 1989).

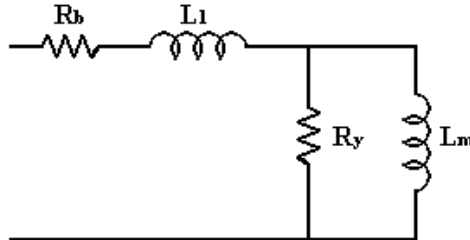
2.5.2.2 Yüklü Isıtma Bobini Modeli

Mutfak tipi indüksiyon ısıtıcılarda yassı tabanlı bobin üzerine çelik kap konularak elde edilen yüklü bobin, en basit haliyle Şekil 2.8'deki gibi seri RL devresi olarak modellenebilir. Devredeki parametreler yük ile bobin arasındaki mesafeye, yükün ebatlarına, anahtarlama frekansına ve yükün bobin üzerindeki konumuna göre değişim gösterir (Lee ve diğ., 1997).



Şekil 2.8: Yüklü ısıtma bobini eşdeğer devresi.

Burada R bobindeki kayıpları ve yükte harcama gücü, L bobin ve çelik kabın endüktif etkisini temsil eder (Forest ve diğ., 2000). Ancak bobin kayıplarının ve gerilim düşümlerinin gösterildiği daha kapsamlı eşdeğer devre Şekil 2.9'daki gibi elde edilebilir.



Şekil 2.9: Geliştirilmiş yüklü ısıtma bobini eşdeğer devresi.

R_b ve L_1 bobinin direncini ve kaçak endüktansını, R_y yük üzerindeki nüve kayıplarını ve L_m bobin ve yük arasındaki ortak endüktansı ifade eder. Neticede yüklenmiş bobin, manyetik nüvesi ısıtılacak kap olan bir endüktif eleman olarak hesaba alınabilir (Forest ve diğ., 2000). Fakat ısıtma sisteminin elektronik benzetiminin ve devrenin matematiksel hesaplamalarının yapılmasında bobin modeli olarak eşdeğer direnç (R_e) ve eşdeğer endüktanstan (L_e) oluşan seri RL devresi kullanılır.

2.5.2.3 Bobin ve Yük Direnci

Isıtma bobininin eşdeğer devresindeki kayıplardan birisi bobin direnci üzerinde harcanan bakır kayıplarıdır. Bobin direnci kullanılan iletken çeşidine, sıcaklığa ve bobinden geçen akımın frekansına göre değişim gösterir.

Yük parçası direncinin toplam dirence oranı bobin verimi olarak adlandırılır (Sazak, 1999). Eşitlik 2.4'e göre verimin yükseltilebilmesi için bobin direnci düşük tutulmalıdır.

$$\eta = \frac{R_y}{R_b + R_y} \quad (2.4)$$

Özellikle orta ve yüksek frekans uygulamalarında dalma derinliği nedeniyle bobinde oluşan direnç değişimi dikkate alınarak birtakım önlemler alınmalıdır. Bununla beraber bobindeki ısı artışı sebebiyle direncinin değerinin yükselmesini önlemek için su soğutmalı boru tipi iletkenler de kullanılabilir. Ancak su soğutmalı iletkenler genellikle yüksek akım ve yüksek ısı uygulamalarında kullanılır. Bobin yapımında kullanılan iletkenin özdirenci düşürülerek de verim yükseltilebilir. Bobin sarımında bakır yerine süper iletkenler kullanılması ile özdirenç azaltılabilmektedir (Runde ve Magnusson, 2002).

Manyetik alanın etkisini arttırmak amacıyla bobin altına yerleştirilen nüve parçalarının da eşdeğer dirence etkisi olacaktır. Yüksek frekans nüve kayıplarının azaltılması için bobin nüvesi olarak ferit malzeme seçilmesi, nüve kayıp direncinin çıkış gücüne etki etmeyecek kadar yüksek değerde olmasını sağlar (Chatterjee, 1991). Ferit nüvenin altına alüminyum tabaka yerleştirilmesiyle bobinin ekranlanması gerçekleştirilmektedir (Hernandez ve diğ., 2002).

2.5.2.4 Kaçak Akı Endüktansı ve Ortak Endüktans

Devresini yük parçası üzerinden tamamlamayan akıların sebep olduğu bobin kaçak endüktansı, bobin ile yük arasındaki manyetik etkileşime bağlıdır. İdealde sıfır olması istenen kaçak endüktans, devrede reaktif gerilim düşümüne sebep olur. Mutfak tipi indüksiyon ısıtma uygulamalarında bobin ile ısıtma kabı arasındaki mesafenin minimum tutulmasıyla, ısıtılacak kabın bobin çapına yakın veya daha büyük çaplı seçilmesiyle ve yüksek manyetik geçirgenlikli yüklerin kullanılmasıyla kaçak endüktans değeri azaltılabilir.

ÜÇÜNCÜ BÖLÜM

YARI İLETKEN GÜÇ DÖNÜŞTÜRÜCÜLÜ

İNDÜKSİYON ISITMA SİSTEMLERİ

3.1 Giriş

İndüksiyon ısıtma sistemleri çalışma frekansı bakımından; 1kHz'in altında olanları alçak frekans, 1kHz ile 100kHz arasında olanları orta frekans, 100kHz'in üstünde olanları yüksek frekans indüksiyon ısıtma sistemleri olarak üç gruba ayrılabilir. Arzu edilen frekans değerini elde etmeye yönelik kullanılan indüksiyon ısıtma güç kaynakları da farklılık göstermektedir. Çalışma frekansı aralığına göre alçak, orta ve yüksek frekans olarak sınıflandırılan indüksiyon ısıtma güç kaynakları;

- Kaynak frekanslı sistemler,
- Motor-alternatör sistemleri,
- Yarı iletken güç dönüştürücülü sistemler,
- Radyo frekans sistemleri,

şeklinde gruplandırılır (Davies ve Simpson, 1979).

Yapılan ısıtma türüne göre çalışma frekansı da değişmekte, buna göre çeşitli türde güç kaynakları kullanılmaktadır. Ancak indüksiyon ısıtma güç kaynaklarında aranan yüksek verim, küçük hacim, frekans denetiminin kolaylığı gibi nitelikler ve teknolojiadaki hızlı gelişmeler, yarı iletken teknolojisinin indüksiyon ısıtma sistemlerinde kullanılmasını yaygınlaştırmıştır. Mutfaklarda kullanılan indüksiyon ısıtıcılarda da gerekli olan orta frekanslı alternatif gerilim, yarı iletken anahtarlar ile yapılan d.a.-a.a. güç dönüştürücü devreler ile elde edilir.

3.2 Yarı İletken Güç Dönüştürücüler

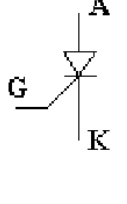
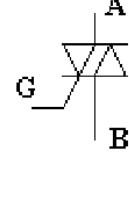
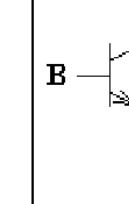
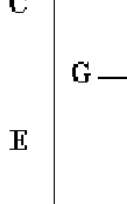
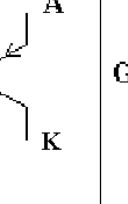
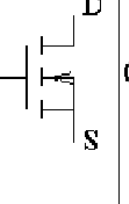
Günümüzde kesintisiz güç kaynakları, motor sürme devreleri, aydınlatma, indüksiyon ısıtma, aktif güç katsayısının düzeltilmesi gibi birçok uygulamada yarı iletken güç dönüştürücü devreler kullanılmaktadır.

Yarı iletken elektronik elemanlardaki gelişmeler, güç elektroniğinin indüksiyon 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.

3.2.1 Güç Dönüşüm Devrelerinde Kullanılan Elemanlar

Bir elektronik anahtarda açık devre (yalıtım) ve kısa devre (iletim) olmak üzere iki durum söz konusudur; idealde anahtarın yalıtımda iken sonsuz dirence, iletimde iken sıfır dirence sahip olması istenir. Devrede iletim, yalıtım ve anahtarlama anındaki akım ve gerilim nedeniyle elektronik eleman üzerinde güç kaybı meydana gelir. Bu istenmeyen güç kaybının önlenmesi için devre şartlarına uygun anahtar seçimi ve denetim devresinin tasarımı önemlidir. Aynı zamanda yarı iletken teknolojisindeki gelişmeler de, daha yüksek güç denetimi sağlayabilen anahtarların kullanımını mümkün kılar. Bu teknolojik gelişmeler ile güç elektroniği uygulamalarındaki çalışmalar hız kazanmaktadır.

Modern güç elektroniğinin temelini, güç devrelerinde kullanılan aktif elemanlar oluşturmaktadır. 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. Yüksek akım taşıma ve gerilim bloke edebilme özellikli güç diyotları da kullanılan önemli güç anahtarlarındandır. Şekil 3.1, sık kullanılan aktif güç anahtarlarının sembollerini, Çizelge 3.1 bu anahtarların temel özelliklerini göstermektedir. Bu elemanların taşıyabildikleri akım ve bloke edebildikleri gerilim seviyeleri, çalışabildikleri frekans aralıkları, denetim edilebilirlikleri, dahili diyot bulundurmaları gibi özellikleri uygulama çeşidine göre farklı güç anahtarı kullanılmasını gerektirir.

| | | | | | |
|---|---|---|---|--|---|
|  |  |  |  |  |  |
| Tristör | Triyak | BJT | MCT | MOSFET | IGBT |

Şekil 3.1: Güç anahtarlarının sembolleri.

Tristör, normalde açık devre olan ve kapı (gate) ucuna kısa süreli darbe uygulandığında ilettime geçen, dört yarı iletken katmana sahip bir elemandır. Kapı ucu tristörü ilettime geçirebilmekte ancak yalıtıma geçerken denetim sağlayamamaktadır. Bu yüzden tristör, iletimi denetimli yalıtımı denetimsiz elektronik anahtardır. Bu özelliğinden dolayı tristörlerin a.a. sistemlerinde kullanımı daha kolaydır.

Çizelge 3.1: Güç anahtarlarının temel özellikleri.

| Anahtar | Anahtarlama Hızı | Güç Kapasitesi |
|---------|------------------|----------------|
| SCR | Yavaş | Yüksek |
| GTO | Yavaş | Yüksek |
| MCT | Orta | Orta |
| BJT | Orta | Orta |
| MOSFET | Hızlı | Düşük |
| IGBT | Orta | Orta |

Kapı sönümlü tristör, pozitif darbe ile ilettime, negatif darbe ile yalıtıma geçen denetimli anahtardır. Anahtarlama kayıpları nedeniyle düşük frekanslı devrelerde kullanılabilirler. Hem iletimde hem de yalıtımda denetim edilebilen bir diğer eleman MOS denetimli tristör, daha basit sürücü devreler ile denetim edilebilme ve yüksek anahtarlama hızı gibi üstünlüklere sahiptir. GTO'dakinin aksine negatif darbe ile ilettime, pozitif darbe ile yalıtıma geçer.

BJT, iletim ve yalıtımı beyz ucundan denetim edilebilen akım denetimli güç transistörüdür. BJT'de yalıtım, aktif çalışma ve doyum olmak üzere üç çalışma durumu mevcuttur. Beyz

akımı uygulanmadığında veya yetersiz olduğu değerlerde BJT yalıttır. Yeterli beyz akımı sağlandığında aktif çalışmaya geçerek bir akım yükselteci gibi çalışır. Beyz akımı arttırıldıkça kollektör-emiter gerilimi azalır. Doyum modunda tamamen iletimdedir ve uçlarındaki gerilim en düşük düzeydedir.

MOSFET, durum değiştirmek için çok küçük akımlara ihtiyaç duyan, gerilim denetimli, yüksek giriş empedanslı yarı iletken elemandır. Yalıtım kayıpları en az olan güç anahtarıdır (Lai, 1997). Megahertzler düzeyinde anahtarlamamın gerçekteştirilebildiği MOSFET'ler, daha çok küçük güç yüksek frekanslı güç dönüştürücülerde tercih edilmektedir. Daha yüksek akım taşıyabilme kapasitesi paralel bağlanmaları suretiyle sağlanabilir; bu yöntem aynı zamanda ısı ile iletim durumu direncinin artışına bir alternatif teşkil eder.

MOSFET ve BJT'nin karakteristiğine sahip olan bir diğer güç anahtarı da IGBT'dir. Beyzi yalıttımlı iki kutup jonksiyonlu transistördür. BJT'den daha yüksek frekanslarda kullanılabilir ve yüksek akımların denetimini gerçekteştirebilirler. İletime geçiş karakteristiği MOSFET gibi olan IGBT'nin çalışma hızını, yapısında bulunan BJT'de depolanan yük nedeniyle oluşan akım kuyruğu sınırlandırmaktadır (Ivensky ve diğ., 1999).

Güç dönüşüm devrelerinde güç anahtarının yanı sıra endüktif, kapasitif ve omik elemanlar, sürme devreleri, söndürme devreleri, denetim ve yalıtım devreleri de kullanılmaktadır. Bunlar elektronik anahtarın denetimini, güç kayıplarının azaltılmasını ve denetim devresi ile güç devresi arasındaki yalıtımı gerçekteştirir.

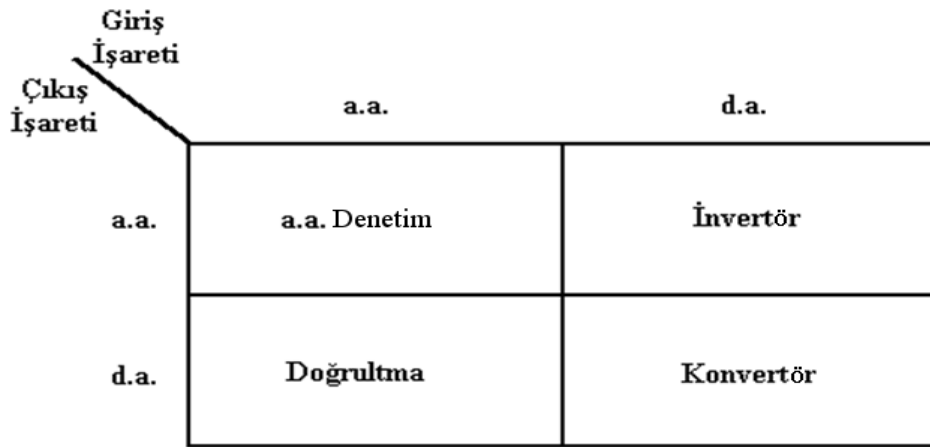
3.2.2 Güç Dönüşüm Devreleri

Yarı iletken güç dönüştürücü devreler dört ana başlık altında toplanabilirler. Bunlar:

- a.a.-d.a. dönüştürücüler (doğrultucu),
- a.a.-a.a. dönüştürücüler,
- d.a.-d.a. dönüştürücüler,
- d.a.-a.a. dönüştürücüler (invertör)'dir.

Şekil 3.2, bir giriş bir çıkışlı güç dönüşüm sistemlerini göstermektedir. Kaynaktan alınan giriş işareti, güç dönüştürücü devre aracılığıyla kullanılabilir şekilde çıkış işaretine dönüştürülür.

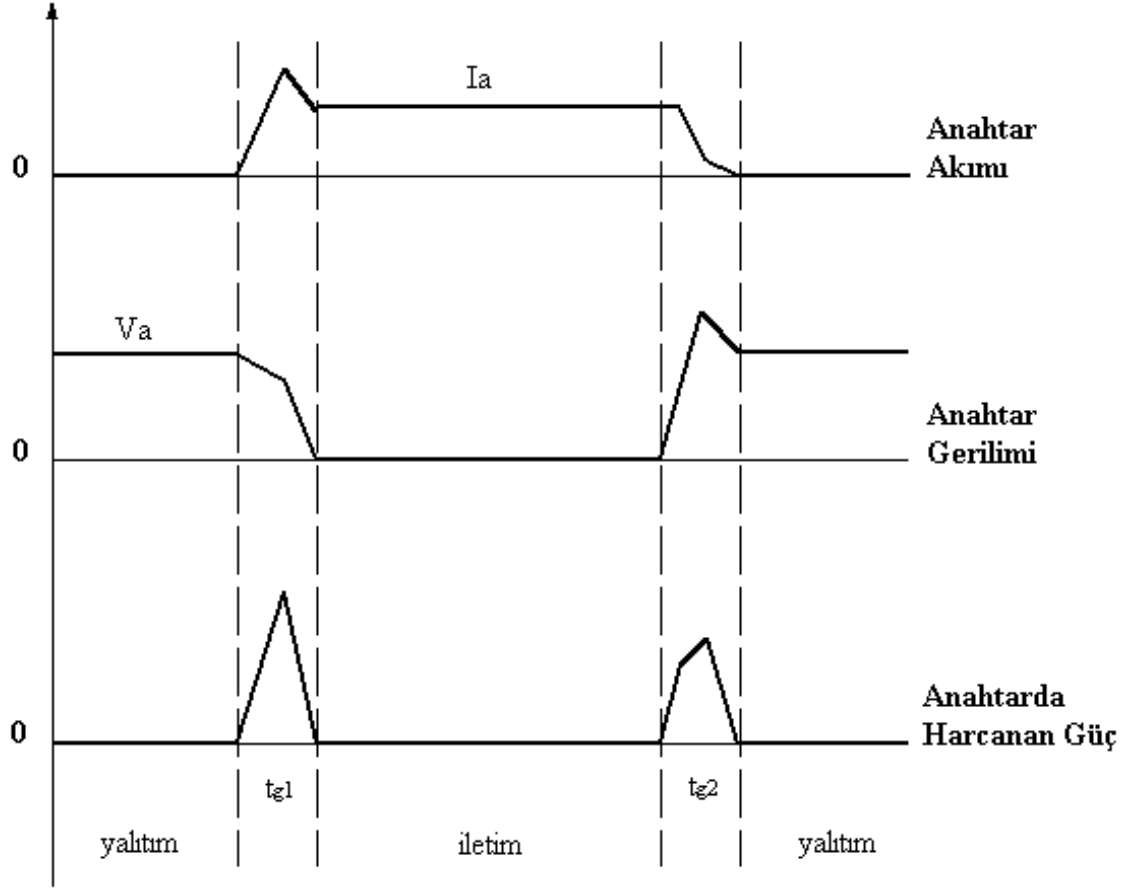
Bu dönüşüm sistemlerinden doğrultma, d.a. motor hız denetimi, regüledi d.a. güç kaynakları; invertörler kesintisiz güç kaynakları, indüksiyon ısıtma güç kaynakları, a.a. motor hız denetimi; d.a.-d.a. dönüştürücüler yüksek verim ve performansa sahip regüledi güç kaynakları, elektronik balast ve d.a. motor hız denetimi; a.a.-a.a. dönüştürücüler aydınlatma denetimi, a.a. motor hız denetimi, gerilim regülatörü gibi uygulama alanlarına sahiptir.



Şekil 3.2: Yarı iletken anahtarlar ile yapılan güç dönüşüm sistemleri.

3.2.3 Güç Dönüşüm Devrelerinde Verimin Yükseltilmesi

Anahtarlama tip güç kaynakları doğrusal güç kaynakları ile karşılaştırıldığında, yüksek güç yoğunluğu ve daha küçük ebatlara sahip olması gibi avantajlarının olduğu görülür. Yarı iletken anahtarlar bulunan devrelerde anahtar açık devre iken akımının sıfır, kapalı devre iken anahtar uçlarındaki gerilimin sıfır olması istenir. İdeal olarak bu başarılamasa da mümkün olabilecek en düşük seviyelere indirilir. Şekil 3.3 anahtarın durum değiştirmesi anında anahtar akımını, gerilimini ve anahtarda harcanan anlık güç göstermektedir. Kötü anahtarlama koşulları, anahtar üzerinde anlık yüksek güç kayıplarına neden olur.



Şekil 3.3: Yarı iletken anahtar anahtarlama dalga şekilleri ve üzerindeki güç harcaması.

Güç dönüşüm devrelerinde reaktif elemanların boyut, ağırlık ve fiyatlarının düşürülebilmesi için yarı iletken elemanların orta ve yüksek frekanslarda anahtarlama gerekir. Eşitlik 3.1'e göre anahtarlama frekansının yükselmesi ve gecikme süresinin uzaması, yarı iletken anahtar kayıplarının artmasına sebep olur (Jain, 2000). Anahtarın iletimde iken taşıdığı akım (I_a) ve yalıtımda iken uçlarındaki gerilim (V_a) de anahtarlama kayıplarını etkilemektedir.

$$P_a = \frac{1}{2} V_a I_a f_a (t_{g1} + t_{g2}) \quad (3.1)$$

Anahtar kayıpları, verimi etkileyen ve dikkate alınması gereken önemli hususlardan birisidir. Bu kayıplar sebebiyle anahtarda oluşacak ısının anahtardan uzaklaştırılması için büyük soğutuculara ve havalandırma tertibatlarına ihtiyaç duyulacaktır. Sonuçta anahtar kayıpları nedeniyle verim düşer ve güç kaynağının ebatları büyür.

İletim ve yalıtım esnasında yarı iletken eleman üzerindeki akım veya gerilimin sıfır olmaması anahtar kayıplarını arttırır. Bu elemanlar üzerindeki güç kaybını azaltmak için;

- 1- Anahtar içinden akım akarken uçlarındaki gerilimin küçültülmesi,
- 2- Anahtar uçlarında gerilim mevcut iken anahtar akımının küçültülmesi,
- 3- Anahtar uçlarında hem akım hem de gerilimin olduğu önlenemez sürenin kısaltılması gerekir (Hinchliffe ve diğ., 1987).

Çalışılan güç devresine uygun özellikte anahtarların seçilmesi ile 1. ve 2. maddelerdeki problemlerin önüne geçilebilir. 3. maddede adı geçen kayıpların azaltılabilmesi için anahtarın iletimden yalıtıma veya yalıtımdan ilettime geçme süresinin mümkün olduğunca kısaltılması gerekir. Anahtarlama geçiş anının kısaltılmasının yanı sıra, anahtar akım veya geriliminin, anahtarlama esnasında sıfır yapılması suretiyle yumuşak anahtarlama gerçekleştirilerek de kayıplar azaltılabilir.

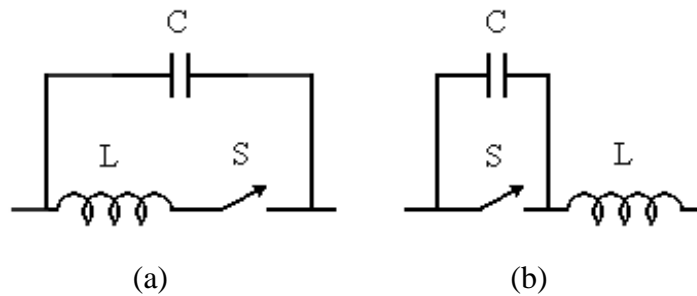
Bir diğer anahtarlama problemi de anahtar geriliminin yükselme ve düşme oranıdır (dv/dt). Anlık değişim problemi anahtar akımı için de geçerlidir. Anahtar gerilimi sıfırdan kaynak gerilimine yükselirken veya kaynak geriliminden sıfıra düşerken dv/dt oranı $2000 \text{ V}/\mu\text{s}$ 'den yüksek olabilir (Lai, 1997). Anahtarlamadaki bu anlık değişimler yüksek gerilim stresleri, ısı ve yüksek frekans gürültüleri oluşturur (Chen ve diğ., 2001). Elektromanyetik parazitleri, anahtarlama kayıp ve streslerini azaltmak için yapılan yumuşak anahtarlama tekniğindeki gelişmeler, 1970'li yıllardan günümüze sürmektedir (Peng ve diğ., 2002). Kullanılan alternatif yöntemlerden birisi rezonans güç dönüştürücülerdir.

3.3 Rezonans Güç Dönüştürücüler

Kullanılan elemanların ebatlarının küçültülebilmesi ve verimin arttırılabilmesi için çalışma frekansı yükseltilmelidir (Feng, 2001). Yüksek çalışma frekansı etkisiyle oluşan anahtarlama kayıpları, elektromanyetik parazitler ve sert anahtarlama koşulları rezonans güç dönüştürücü devreler ile ortadan kaldırılabilir. Yarı iletken anahtarlı güç devresine bobin (L) ve kondansatör (C) elemanlarından oluşmuş rezonans devresinin eklenmesiyle rezonans güç

dönüştürücüler elde edilir. Anahtarlama ile elde edilen kare dalga akım/gerilim dalga şeklindeki arzu edilmeyen harmoniklerin süzülebilmesi, her iki yönde akım taşıyabilen veya iki kutuplu gerilimi bloke edebilen anahtarlara ihtiyaç duyulması, anahtarlamanın anahtar akımı/gerilimi sıfır veya sıfıra yakın değerlerde iken gerçekleştirilebilmesiyle kayıpların azaltılabiliyor olması rezonans güç dönüştürücülerin belirgin özelliklerindedir (Kassakian ve diğ., 1991). Rezonans güç dönüştürücülerin iki önemli çeşidi rezonans anahtarlama güç dönüştürücüler ve rezonans yüklemeli güç dönüştürücülerdir. Yüksek frekans d.a.-d.a. güç kaynakları ve indüksiyon ısıtma sistemleri rezonans güç dönüştürücülerin yaygın olarak kullanıldığı iki uygulama çeşididir (Kassakian ve diğ., 1991).

Rezonans anahtarlama güç dönüştürücülerde yarı iletken anahtara bobin ve kondansatör elemanları ilave edilir (Trivedi, 2001). Rezonans anahtarın yapısında bir adet yarı iletken anahtar (S), bir adet kondansatör (C) ve bir adet bobin (L) bulunmaktadır (Liu ve diğ.,1985). Şekil 3.4’de sıfır akım ve sıfır gerilim anahtar tiplerine birer örnek gösterilmektedir. Bobin ve kondansatörün anahtara seri veya paralel bağlanmasıyla rezonans anahtarlama güç dönüştürücü oluşturulur. Anahtarlamanın sıfır akım ile gerçekleştirilebilmesi için, rezonans bobini anahtara seri bağlanır (Lin ve Huang, 1997). Devredeki bobin, anahtar akımının di/dt oranını sınırlandırmaktadır (Liu ve diğ., 1985). Rezonans kondansatörünün anahtara paralel bağlanmasıyla sıfır gerilim anahtarlama sağlanır. Her iki durumda da bobin ve kondansatör kayıpsız söndürücü devre vazifesi görmektedir. Rezonans anahtarlama konvertörleri literatürde kısmi-rezonans veya rezonans geçiş konvertörleri olarak da anılmaktadır (Agrawal, 2001).



Şekil 3.4: Rezonans anahtar tipleri a) Sıfır akım b) Sıfır gerilim.

Rezonans yüklemeli güç dönüştürücüler (yük rezonans konvertör), doğru gerilimi rezonanslı alternatif gerilime çeviren güç dönüştürücü devrelerdir (Tuncay ve diğ., 2003).

Rezonans anahtarlamaalı güç dönüştürücüden farkı, tank devresinin seri veya paralel olarak yük devresine ekleniyor olmasıdır (Trivedi, 2001). Çıkışta d.a. gerekli ise rezonans frekanslı alternatif gerilim doğrultularak yüke verilir. İndüksiyon ısıtma sistemlerinde anahtarlama kayıplarının azaltılması için kullanılan invertör çeşitlerindedir. Akım veya gerilim beslemeli güç dönüşümü gerçekleştirilir. Yarı iletken anahtarların anahtarlanmasıyla elde edilen kare dalga akım veya gerilim sinyalinin temel bileşeni tank devresi aracılığıyla yüke aktarılır. Rezonans elemanları yük akım ve geriliminin salınımlı olmasını sağlar. Sistemin doğal karakteristiğinden dolayı yüksek çalışma frekanslarında yaklaşık olarak sinüs dalga şeklinde çıkış elde edilebilir. Kullanılan yarı iletken anahtar tristör ise kendiliğinden yalıtıma gitmesi sağlanmış olur (Rashid, 1993). Sonuçta güç anahtarının durum değiştirdiği anda akımının veya geriliminin sıfır olması sağlanarak sıfır akım/gerilim anahtarlama koşulları gerçekleştirilebilir.

Sıfır akım anahtarlama durumunda salınımlı akımın sıfıra ulaştığı anlarda anahtar iletime veya yalıtıma geçirilir. Aynı durum sıfır gerilim anahtarlama da salınımlı anahtar gerilimi için geçerlidir. Sonuçta her iki durumda da tank devresinin rezonans açısız hızına bağlı olan salınımlı dalga şeklinden istifade edilir.

3.4 Mutfak Tipi İndüksiyon Isıtıcılarda Yarı İletken Güç Dönüştürücülerin Kullanılması

İndüksiyon ısıtma sistemlerinde yüksek frekanslarda çalışılması bölgesel ısıtmaya olanak tanımakta, hızlı ısıtmayı sağlamak ve ısıtma verimini yükseltmektedir. Çalışma frekansı arttıkça eşdeğer endüktansta çok fazla değişim olmamasına rağmen eşdeğer direnç artmaktadır (Lee ve diğ., 1997). Ancak ısıtma türüne göre çalışma frekansının alt ve üst sınırları bulunmaktadır. Bu da uygulama türüne ve çalışma frekansına göre farklı tipte yarı iletken elemanların ve güç dönüştürücü devrelerin kullanılmasına yol açar.

3.4.1 Kullanılan İvertör Çeşitleri

İndüksiyon ısıtmada ihtiyaç duyulan yüksek frekanslı akımı üretmek için kullanılan standart yöntemlerden birisi köprü tipi invertördür (Hobson ve diğ., 1985). Köprü tipi invertör mutfak tipi indüksiyon ısıtma sistemlerinde kullanılan ilk invertör çeşididir (Omori ve

Nakaoka, 1989). Bunun yanında yarım köprü invertör, sıfır gerilim veya sıfır akım anahtarlama tek anahtarlı invertör çeşitleri de kullanılabilir (Llorente ve diğ., 2002). Kondansatör geriliminin kaynak değerini aşması istenmediği durumlarda gerilim kenetlemeli invertör devreden yararlanır (Sazak, 2004). Rezonans kondansatörüne paralel bağlanan bir diyot ile kondansatör gerilimi sınırlandırılır.

Köprü tipi invertörler içeriğinde buldukları 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 (Leisten ve Hobson, 1990). Anahtarlama iletim süresi anahtarlama periyodunun yarısı olduğu için geri beslemeye ihtiyaç duyulmaz (Koertzen ve diğ., 1995). Akım/gerilim beslemeli sıfır akım/gerilim ile anahtarlana bilen tek anahtarlı rezonans invertörler ile anahtarlama kayıpları azaltılabilmektedir (Hirota ve diğ., 1996). Basit, düşük maliyetli ve küçük hacimli olmaları en büyük avantajlarıdır.

Endüktif bir yükün yüksek frekanslarda anahtarlama anahtar üzerinde zorlanmalara sebep olur (Liu ve diğ., 1985). İndüksiyon ısıtma sistemleri içeriğinde endüktif yük bulunduğundan, ısıtma bobini bir kondansatör ile birlikte kullanılarak yük rezonans devresi elde edilmektedir. Bobine seri veya paralel bir kondansatör eklenmesiyle sistem yük rezonans invertör olarak çalıştırılır. Yüksek frekans yük rezonans invertörlerinin ev ve işyerlerindeki kullanım alanlarına örnek; indüksiyon ısıtıcılar, televizyonlardaki yüksek gerilim güç kaynakları, mikrodalga fırınlar, fuloresan lambalar ve aydınlatma denetim devreleri verilebilir (Hirota ve diğ., 1996).

Invertör devre, akım veya gerilim beslemeli olabilir. Akım kaynağı gerilim kaynağına seri büyük değerli bir bobin ile sağlanır. Adı geçen invertör çeşitlerinden herhangi birisinde yarı iletken elemanların anahtarlama ile elde edilen kare dalga akım veya gerilimin, ısıtma bobini ile oluşturulmuş rezonans devresi ile harmonikleri süzülür ve anahtarlama kayıpları azaltılır. Seri rezonans invertör (SRİ), indüksiyon ısıtmada yaygın kullanılan invertör çeşitlerinden biridir (Espı ve Dede, 1999). Rezonans frekansında devrenin empedansının minimum değerde olması, yüke en yüksek gücün aktarılabilmesine olanak tanır. Bu frekansta omik özellik gösteren rezonans devresi, birim güç katsayısında çalışmasını sağlar. Isıtma bobinine seri kondansatör bağlanmasıyla seri rezonans invertör elde edilir. Eşdeğer direnç

(R_e), eşdeğer endüktans (L_e) ve rezonans kondansatöründen (C_r) oluşan seri RLC devresinin rezonans frekansı;

$$f_r = \frac{1}{2\pi\sqrt{L_e C_r}} \quad (3.2)$$

eşitliği ile bulunur. Rezonans frekansına uygun denetim sinyalinin üretilmesiyle güç dönüştürücü devrenin verimi yükseltilir.

3.4.2 Ev Tipi İndüksiyon Isıtıcılarda Frekans Aralığı

Evlerde kullanılan indüksiyon ısıtıcıların çalışma frekansları belirlenirken dalma derinliği nedeniyle ısıtılacak kabın kalınlığı, elektriksel manyetik özellikleri, oluşabilecek radyo frekansı gürültüleri, ısıtma bobininden geçecek akım, elektromanyetik parazitler ve invertör devrenin kayıpları hesaba alınmalıdır. Elektromanyetik alan kuvvetinin sebep olduğu istenmeyen mekanik dalgalanmaların frekansı insanların ve evlerde bakılan evcil hayvanların duyma sınırının üzerinde olmalıdır (Seelig, 1982).

Alçak frekanslarda oluşan duyulabilir sesler ve yüksek frekanslarda oluşan radyo frekansı gürültüleri nedeniyle mutfak tipi indüksiyon ısıtma sistemleri genellikle 20-50kHz çalışma frekansı aralığına sahiptirler (Leisten ve Hobson, 1985). 50kHz'in üzerindeki frekanslarda da mutfak tipi indüksiyon ısıtma uygulamaları yapılmaktadır (Tanaka, 1989) (Lee ve diğ., 1997). Bakır, alüminyum gibi düşük bağlı manyetik geçirgenlikli mutfak kaplarının ısıtılmasında sistemin eşdeğer yük direncinin artırılabilmesi için 50kHz'in üzerindeki orta frekans değerlerinde çalışılabilir (Tanaka, 1989).

İnvertör devrede kullanılan yarı iletken anahtarın seçimi yapılırken orta frekansta anahtarlanabilir olması, doğrultulmuş giriş geriliminin tepe değeri, anahtar akımının ve geriliminin tepe değerleri dikkate alınmalıdır. Bunlarla birlikte, düşük maliyet, basit denetim devresi, empedans uyumu, iki yönlü enerji akışının sağlanabilmesi ve güç denetiminin kolaylığı gibi özellikler de mutfak tipi indüksiyon ısıtıcı invertörlerinde tercih edilmektedir.

DÖRDÜNCÜ BÖLÜM

E SINIFI İNVERTÖR DEVRE ANALİZ TASARIM VE BENZETİM ÇALIŞMASI

4.1 Giriş

Yüksek frekanslarda anahtarlamamanın getirmiş olduğu dezavantajları önlemeye yönelik kullanılan invertör çeşitlerinden birisi E sınıfı invertördür. A-D sınıfı yükselteçlerden farklı çalışma prensibine sahip olması ve D sınıfı yükselteçler gibi %50 anahtarlama oranına ihtiyaç duyulmaması gibi ayrıcalıklarından dolayı E sınıfı yükselteç olarak isimlendirilmiştir (Sokal ve Sokal, 1975). Yarı iletken anahtarın ilettime geçtiği anda uçlarındaki gerilim ve eğiminin sıfır olduğu E sınıfı anahtarlama koşulları gerçekleştirilebilmektedir (Bin Yusoff ve diğ., 2003). Anahtarlama tip güç kaynakları, radyo vericileri, indüksiyon ısıtma, elektronik balast gibi kullanım alanları mevcuttur.

4.2 E Sınıfı İnvörtörlerin Üstünlükleri

Tek anahtarlı yarı iletken güç dönüştürücüler grubundan olan E sınıfı invörtörlerin avantajları aşağıdaki gibi özetlenebilir:

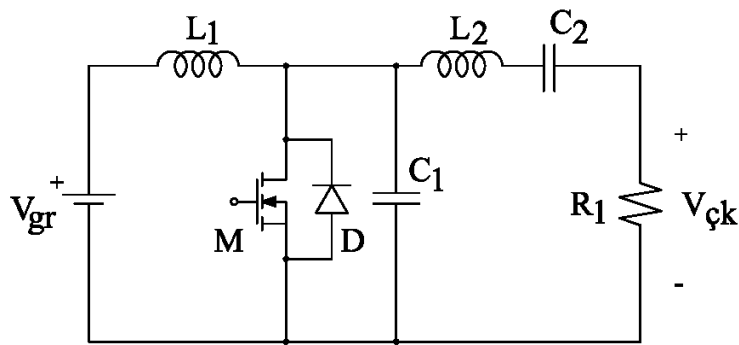
- E sınıfı anahtarlama koşulları gerçekleştirilebildiğinden, yüksek frekanslarda enerji dönüşüm verimi çok yüksektir (Sekiya ve diğ., 2001).
- Anahtarlama geçiş anında anahtar üzerindeki yüksek akım ve gerilim stresleri giderilir (Sokal ve Sokal, 1975).
- Özel sürücü devre kullanımı gerektirmez (Ponce ve diğ., 2001).
- Koruyucu devreye ihtiyaç duyulmaz.
- Toplam anahtarlama kayıpları düşüktür.

- Hızlı toparlama diyotu gerekmez.
- Devredeki eleman sayısı az olduğundan maliyeti düşüktür, ebatları küçüktür.

Sayılan üstünlüklerinin yanı sıra E sınıfı invertörler birtakım dezavantajlara sahiptir. Anahtar geriliminin tepe değeri kaynak geriliminin 4-5 katı, anahtar akımı kaynak akımının 3 katı büyük değerlere sahip olabilir. Bu yüzden yüksek blok gerilimi özellikli anahtarlara ihtiyaç duyulur. Ayrıca çıkış gücünün geniş aralıkta denetimi mümkün değildir. E sınıfı güç dönüştürücülerde sıfır gerilim anahtarlama koşulları sınırlı yük değerleri için sürdürülebilmektedir (Song ve diğ., 1996).

4.3 E Sınıfı İntertör Çeşitleri

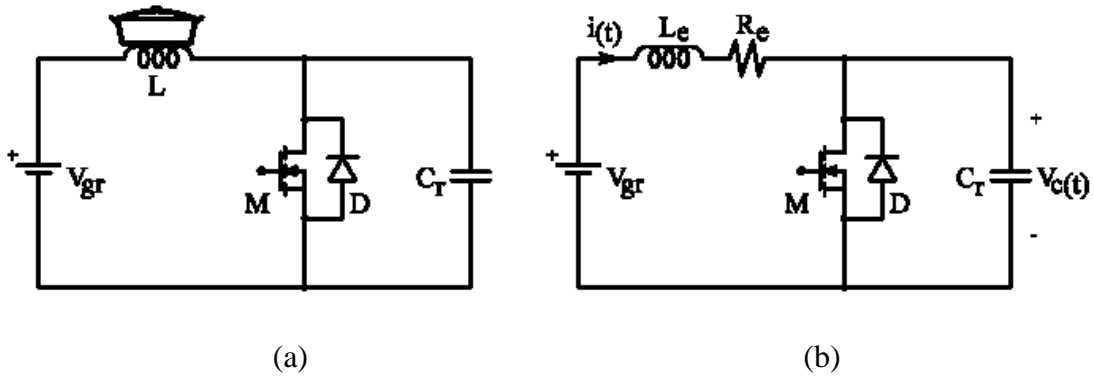
E sınıfı invertörler, sıfır akım anahtarlama E sınıfı invertör ve sıfır gerilim anahtarlama E sınıfı invertör olmak üzere iki gruba ayrılabilir (Kazimierczuk ve Czarkowski, 1995). Şekil 4.1’de sıfır gerilim anahtarlama E sınıfı invertör devre görülmektedir. Çok yüksek çalışma frekanslarında anahtara paralel C_1 kondansatörü yerine, MOSFET’in güç terminallerindeki kapasitif etkiden faydalanılabilir. Aynı zamanda seri rezonans devresinin yüklü kalite faktörünün yeterince büyük seçilmesi halinde yük akımı sinüse yakın dalga şeklini alır (Boonyaroonate ve Mori, 2001). Yarı iletken anahtara paralel kondansatörün kaldırılmasıyla devrenin sıfır akım anahtarlama şartlarında çalışması sağlanır.



Şekil 4.1: Sıfır gerilim anahtarlama E sınıfı invertör.

İndüksiyon ısıtma sistemlerinde bir adet güç anahtarı kullanarak iki veya üç rezonans elemanından oluşmuş, sıfır gerilim veya sıfır akım anahtarlama koşullarını gerçekleştiren

akım/gerilim beslemeli invertör devreleri kullanılabilir. Bunlardan birisi d.a. filtre bobini içermeyen gerilim beslemeli E sınıfı invertördür (Po ve Komatsu, 1998). Bu devrede de anahtar sıfır gerilim ile iletme ve yalıtıma geçirilebilir. Şekil 4.2, rezonans elemanı olarak ısıtma bobininin kullanılmış olduğu mutfak tipi indüksiyon ısıtmada kullanılan gerilim beslemeli E sınıfı invertörü ve eşdeğer devresini göstermektedir. Burada indüksiyon bobini aynı zamanda invertör devrenin rezonans elemanı olarak kullanılmıştır. Şekil 4.1'deki devrede L_2 bobininin ısıtma bobini olarak seçilmesiyle de indüksiyon ısıtma gerçekleştirilebilir. L_1 , akımın sürekliliği için kullanılır ve yaklaşık olarak L_2 'nin on katı büyük değere sahip olması yeterlidir.



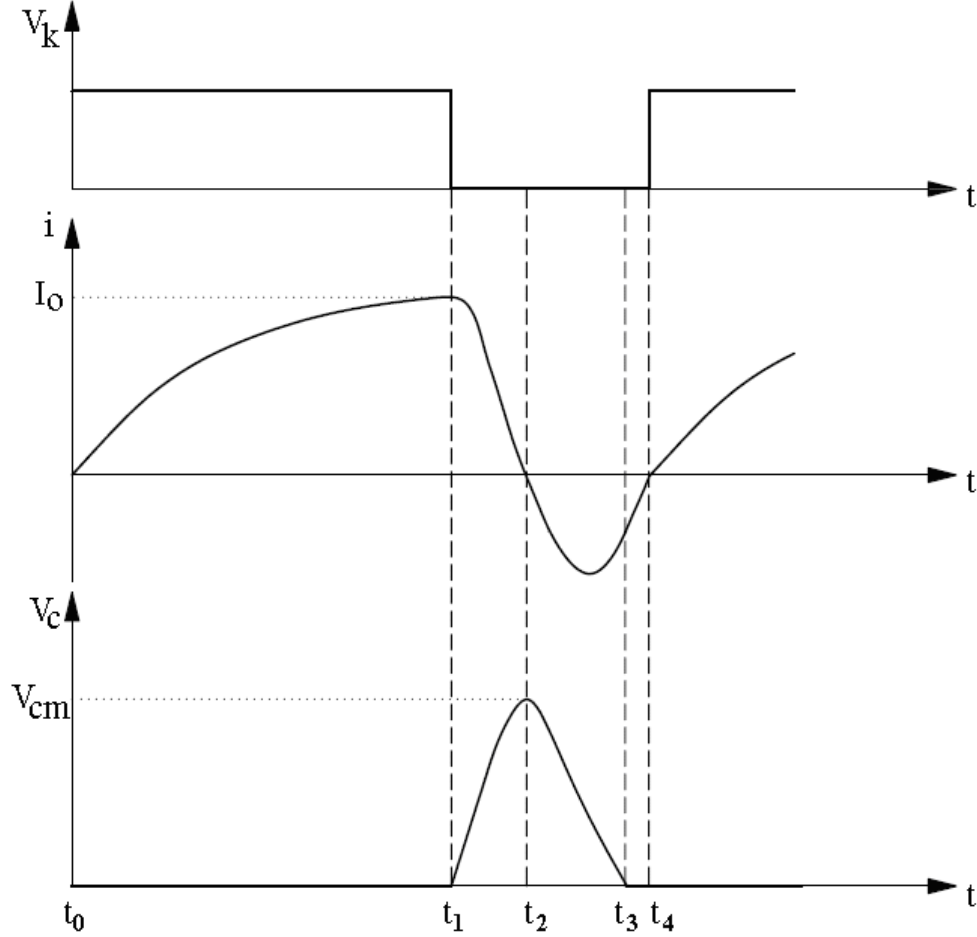
Şekil 4.2: a) İndüksiyon ısıtmada E sınıfı invertörün kullanılması b) Eşdeğer devre.

4.3.1 E Sınıfı İntertör Çalışma Prensibi

Isıtma kabı ve indüksiyon bobininin manyetik etkileşimi ikinci bölümde anlatıldığı gibi modellenirse, yüklü indüksiyon bobini eşdeğer direnç (R_e) ve eşdeğer endüktans (L_e) oluşmuş seri RL devresi ile temsil edilebilir. Anahtar iletimde kaldığı sürece bobin akımı üstel artış göstererek doğru gerilim kaynağından enerji depo eder. Bu durumda kondansatör gerilimi sıfırdır. Anahtar yalıtıma geçtiğinde eşdeğer endüktans, direnç ve kondansatör seri RLC devresini oluşturur. Kondansatör gerilimi ve bobin akımı sönümlü salınım meydana getirirler. Kondansatör gerilimi sıfırdan tepe değerine yükselir, sonra tekrar sıfıra düşer. Salınımına negatif değerinde devam edeceği sırada yarı iletken anahtar içerisindeki ters gövde diyotu doğru polarize olur ve bobinde depolanan ters yöndeki enerji diyot üzerinden kaynağa geri verilir.

Kondansatör geriliminin sıfırdaki değerinin değişmesi engellendiğinden, anahtarın sıfır gerilim ile iletme geçmesi sağlanır. Diyot, bobin akımındaki değişimin devam etmesini

mümkün kılar. Bobin akımı ve kondansatör gerilimi eğrileri Şekil 4.3'deki gibi olur; anahtara uygulanan denetim sinyaline göre devre akımı ve kondansatör gerilimi değişim göstermektedir.



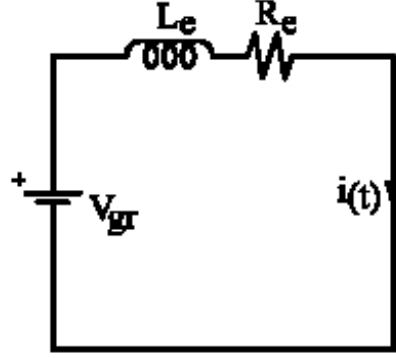
Şekil 4.3: Anahtarlama sinyaline göre bobin akımı ve kondansatör gerilimi.

4.3.2 E Sınıfı İntertör Devresinin Analizi

E sınıfı invertör devrenin çalışma aralıkları, yarı iletken anahtarın iletim durumu, yalıtım durumu ve dahili diyotun iletim durumu olmak üzere üç temel aşamada incelenebilir. Şekil 4.3'e göre bu aşamalar; anahtarın iletimde olduğu süre $t_0 < t < t_1$ zaman aralığı Durum 1 olarak, yalıtımda olduğu $t_1 < t < t_2$ zaman aralığı Durum 2 ve $t_2 < t < t_3$ zaman aralığı Durum 3 olarak, diyotun iletimde olduğu $t_3 < t < t_4$ zaman aralığı Durum 4 olarak daha özel tanımlanabilir.

Durum 1:

Şekil 4.4 Durum 1'e ait devre şeklini göstermektedir. Yarı iletken anahtarın ilettime geçmesiyle kaynak ve ısıtma bobini birbirine seri bağlanır. Kondansatör gerilimi sıfırdır.



Şekil 4.4: Anahtarın iletim durumu.

Bobinin ilk enerjisinin sıfır olduğu kabul edilirse anahtar iletimde iken bobin akımındaki üstel değişim, devredeki eşdeğer endüktansın eşdeğer dirence bölümünden elde edilen zaman sabitine (τ) bağlı olarak Eşitlik 4.2'deki gibi olur:

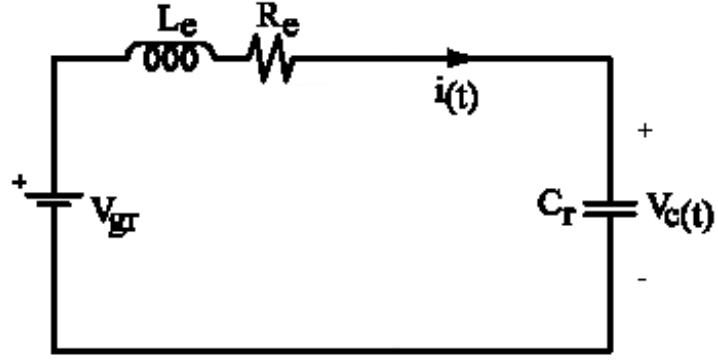
$$\tau = \frac{L_e}{R_e} \quad (4.1)$$

$$i(t) = \frac{V_{gr}}{R_e} \left[1 - e^{-\frac{t}{\tau}} \right] \quad (4.2)$$

$$V_C(t) = 0 \quad (4.3)$$

Durum 2:

Anahtarın t_1 anında açık devre yapılmasıyla ısıtma bobini ve kondansatör, kaynak ile Şekil 4.5'deki gibi seri bağlı devreyi oluşturur.



Şekil 4.5: Anahtar açık devre durumunda kondansatörün enerji depolaması.

Kondansatör gerilimi ve bobin akımı denklemleri Eşitlik 4.4 ve Eşitlik 4.5'den elde edilebilir (Slonim ve diğ., 1988). t_2 anında kondansatör gerilimi tepe değerine ulaşır; bu anda bobin akımı sıfırdır.

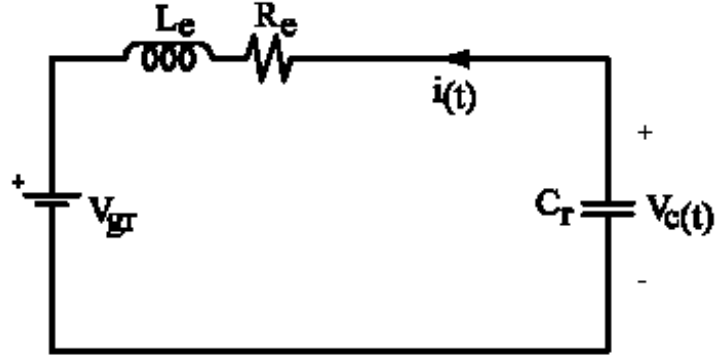
$$V_c(t) = V_{gr} - R_e i(t) - L_e \frac{di(t)}{dt} \quad (4.4)$$

$$i(t) = C_r \frac{dV_c(t)}{dt} \quad (4.5)$$

Durum 3:

Kondansatör, Durum 3'ün başladığı t_2 anından itibaren ısıtma bobini üzerinden Şekil 4.6'daki gibi kaynağa enerjisini aktarır.

Durum 1'in sonunda bobinin depolamış olduğu I_0 akımı, Durum 2 ve Durum 3'de oluşan seri RLC devresi için başlangıç koşuludur.



Şekil 4.6: Kondansatörde depo edilen enerjinin kaynağa aktarılması.

Devrenin gerilim denkleminin karakteristik kökleri rezonans açısal hızına (ω_r) ve sönümlenme katsayısına (α) bağlı olur.

$$\omega_r = \frac{1}{\sqrt{L_e C_r}} \quad (4.6)$$

$$\alpha = \frac{R_e}{2L_e} \quad (4.7)$$

Devrede $\alpha < \omega_r$ hali sönümlü salınım durumudur. Kökler karmaşık eşleniktir. Bu durumda elektrik enerjisi kondansatörde depo edilen elektrik alan ve bobinde depo edilen manyetik alan enerjisi arasında gidip gelir. Devredeki eşdeğer direnç nedeniyle enerji ısıya dönüştürülür; bobin akımında ve kondansatör geriliminde sönümlü salınım meydana gelir. Eşitlik 4.4'ün çözülmesiyle bobin akımının anahtar açık devre iken sönümlü salınım denklemini Eşitlik 4.8'deki gibi bulunur:

$$i(t) = e^{-\alpha t} (A_1 \sin \omega_d t + A_2 \cos \omega_d t) + B \quad (4.8)$$

A_1 ve A_2 katsayıları başlangıç koşullarından tespit edilir. B değeri bobin akımının kararlı durum çözümüdür. Durum 2 ve Durum 3'de oluşan seri RLC devresinde bobin akımının kararlı durum değeri sıfırdır.

$$A_1 = \frac{V_{gr} - RI_0}{L\omega_d} + \frac{\alpha I_0}{\omega_d} \quad (4.9)$$

$$A_2 = I_0 \quad (4.10)$$

Eşitlik 4.8'in bir başka ifade şekli aşağıdaki eşitlikteki gibidir:

$$i(t) = e^{-\alpha t} A \sin(\omega_d t + \theta) + B \quad (4.11)$$

A_1 ve A_2 katsayılarının karelerinin toplamının karekökü ile A katsayısı bulunur. θ açısı $\tan^{-1}(A_2/A_1)$ ifadesinden hesaplanabilir. Akım denklemindeki ω_d katsayısı sönümlü salınım açısal hızıdır ve rezonans açısal hızı ile sönümleme katsayısına bağlıdır;

$$\omega_d = \sqrt{\omega_r^2 - \alpha^2} \quad (4.12)$$

Rezonans kondansatörünün gerilimi Eşitlik 4.13'den bulunur. Durum 1'in sonunda kondansatör geriliminin değeri sıfırdır. K_1 ve K_2 katsayıları Eşitlik 4.14 ve 4.15'deki gibidir.

$$V_C(t) = e^{-\alpha t} [K_1 \cos(\omega_d t + \theta) + K_2 \sin(\omega_d t + \theta)] + V_{gr} \quad (4.13)$$

$$K_1 = -\frac{A\omega_d}{C_r(\omega_d^2 + \alpha^2)} \quad (4.14)$$

$$K_2 = -\frac{A\alpha}{C_r(\omega_d^2 + \alpha^2)} \quad (4.15)$$

Devrede bobin akımının ve kondansatör geriliminin tepe değerleri (4.16) ve (4.17) eşitliklerinden de hesaplanabilir (Po ve Komatsu, 1998):

$$I_m = \frac{M}{Z_r} e^{\left(-\frac{\frac{\pi}{2} - \beta}{2Q_0} \right)} \quad (4.16)$$

$$V_{Cm} = V_{gr} + M e^{\left(-\frac{\pi - \beta}{2Q_0} \right)} \quad (4.17)$$

Burada Q_0 , rezonans açısal hızına bağlı bobin kalite faktörüdür ve Eşitlik 2.2'den hesaplanabilir. Z_r , M ve β değişkenleri sırasıyla aşağıdaki gibidir:

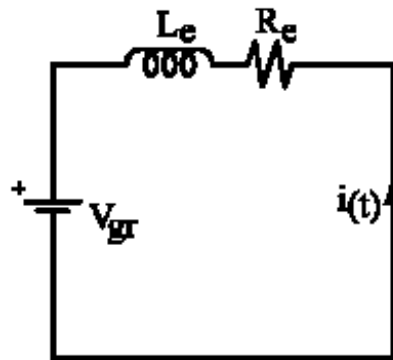
$$Z_r = \sqrt{\frac{L_e}{C_r}} \quad (4.18)$$

$$M = \sqrt{\left[(I_0 Z_r)^2 + V_{gr}^2 \right]} \quad (4.19)$$

$$\beta = \tan^{-1} \left(\frac{I_0 Z_r}{V_{gr}} \right) \quad (4.20)$$

Durum 4:

Kondansatör gerilimi t_3 anında sıfıra ulaşır. Anahtar dahili diyotu doğru polarize olur. Bobinde depo edilen enerji, Şekil 4.7'deki gibi kaynağa aktarılır.



Şekil 4.7: Anahtardaki dahili diyotun iletim durumu.

Durum 4 zaman aralığında kondansatör gerilimi sıfır değerinde kalır. Bobin akımının denklemi Eşitlik 4.21'den bulunur. I_0' akımı, bobin akımının Durum 3 sonunda almış olduğu değerdir. Diyot iletimde iken kondansatör gerilimi sıfırdır.

$$i(t) = \frac{V_{gr}}{R_e} + \left[I_0' - \frac{V_{gr}}{R_e} \right] e^{-\frac{t}{\tau}} \quad (4.21)$$

$$V_c(t) = 0 \quad (4.22)$$

Bobin akımının etkin değeri bir anahtarlama periyodunda (T_a) bobin akımının karesinin belirli integraline bağlı olarak hesap edilebilir. Eşitlik 4.23'deki belirli integralin sınırları Bölüm 4.3.2'ye göre Durum 1, Durum 2, Durum 3 ve Durum 4 zaman aralıklarından bulunur. Bu zaman aralıklarında (4.2), (4.11) ve (4.21) eşitlikleri kullanılarak akımın etkin değeri hesaplanır. Eşitlik 4.24 direnç üzerinde harcanan gücü vermektedir.

$$I_{ef} = \sqrt{\frac{1}{T_a} \left[\int_0^{T_a} (i(t))^2 dt \right]} \quad (4.23)$$

$$P = (I_{ef})^2 R_e \quad (4.24)$$

4.4 E Sınıfı İntertörlü İndüksiyon Isıtıcı Tasarımı

İndüksiyon ısıtma sistemlerinde yüklü bobinin kalite faktörü, bir periyotta depo edilen maksimum enerjinin, periyot başına enerji harcamasına oranı olarak ifade edilebilir. Gerilim beslemeli E sınıfı invertörde bobin akımı sinüs dalga şekline sahip olmamaktadır. E sınıfı invertörlü indüksiyon ısıtıcıda yüklü bobin kalite faktörü ve ihtiyaç duyulan güce göre bobin akımının tepe değeri Eşitlik 4.25'den, gerekli olan kaynak geriliminin değeri Eşitlik 4.2'nin çözümünden yaklaşık olarak bulunabilir. Gerilim değeri Eşitlik 4.2'de anahtar iletim süresi ve maksimum bobin akımı değerleri kullanılarak hesaplanabilir.

$$Q=2\pi \frac{\frac{1}{2}LI_m^2}{\frac{P}{f_r}} \quad (4.25)$$

Tasarlanan indüksiyon ısıtıcıya ait özellikler aşağıdaki gibidir:

- Çalışma frekansı: 20kHz.
- Giriş gücü: 30W.
- Rezonans frekansı: 62.5kHz.

İndüksiyon ısıtıcı çalışma frekansı Bölüm 3.4.2 göz önünde bulundurularak seçilmiştir. Eşdeğer direnci 1.8Ω , eşdeğer endüktansı $29.5\mu H$ olan E sınıfı invertörlü mutfak tipi indüksiyon ısıtma sistemi 20kHz anahtarlama frekansında PSpice elektronik benzetim programı kullanılarak çalıştırılmıştır. Devrede anahtar iletim durumu kayıplarının azaltılabilmesi için anahtar gerilimi sıfır veya sıfıra yakın değerde iken iletim darbesinin uygulanması arzu edilir. Bu şart yarım rezonans periyodundan Eşitlik 4.26'daki gecikme miktarı (T_d) kadar sonra anahtarın iletime geçirilmesiyle sağlanabilir (Omori ve Nakaoka, 1989).

$$T_d = \frac{\pi}{2\omega_r} \quad (4.26)$$

Arzu edilen rezonans frekansında $0.22\mu F$ rezonans kondansatörü ile $12\mu s$ yalıtım süresi, sıfır gerilim anahtarlama için yeterli olmaktadır. Anahtarlama frekansı 20kHz için (iletim süresi $38\mu s$ iken) yaklaşık 11.5V kaynak gerilimi gerekmektedir. İdeal anahtar kullanılarak alınan elektronik benzetim sonuçları ile E sınıfı invertör devrenin analizinden elde edilen sonuçlar Çizelge 4.1'de karşılaştırılmıştır. Çizelgedeki değerler sırasıyla giriş gücü, rezonans ve anahtarlama peryotları, bobin akımının etkin ve tepe değerleri ile rezonans kondansatörünün tepe değeridir. Bölüm 4.3.2'deki analiz denklemleri kullanılarak bobin akımının etkin değeri (4.23), giriş gücü (4.24), bobin akımının ve kondansatör geriliminin tepe değerleri (4.16) ve (4.17) eşitliklerinden hesaplanmıştır.

Çizelge 4.1: E sınıfı invertör hesaplama ve benzetim çalışması sonuçları.

| | Hesaplama | Benzetim |
|-----|------------|------------|
| Pgr | 26.67 W | 25.21 W |
| Tr | 16 μ s | 16 μ s |
| Ta | 50 μ s | 50 μ s |
| Ief | 3.84 A | 3.67 A |
| Im | 5.41 A | 5.55 A |
| Vcm | 66.99 V | 68.08 V |

4.5 E Sınıfı İnvörtör Devre Benzetim Çalışması

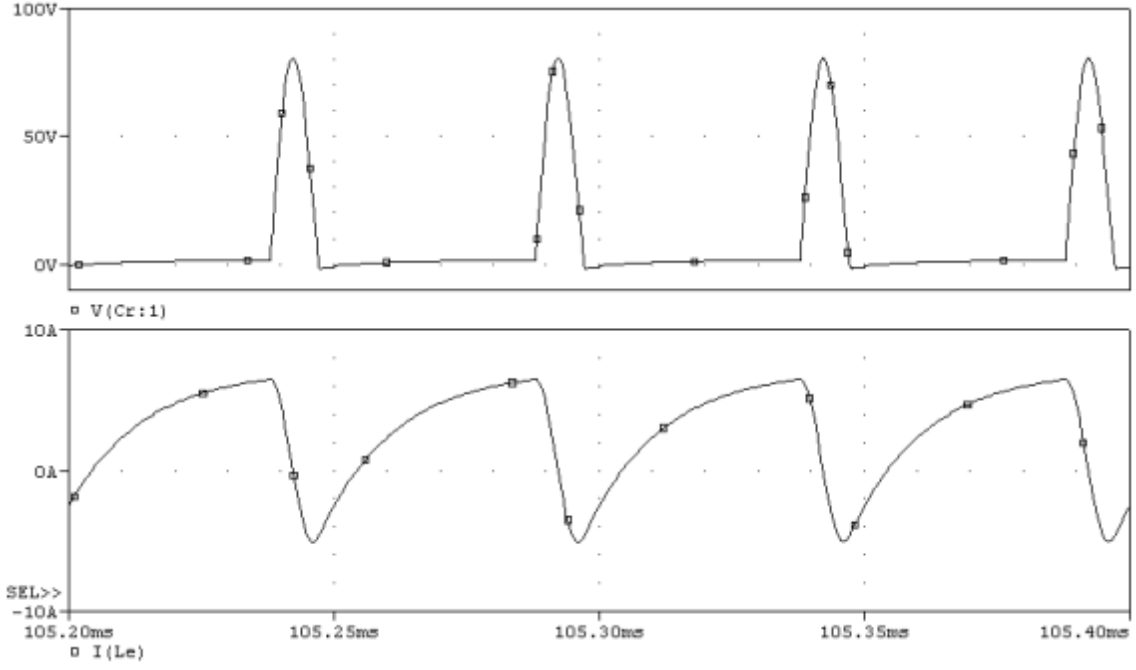
PSpice elektronik benzetim programı kullanılarak E sınıfı invörtör devre bobin akımı ve kondansatör gerilimi dalga şekilleri alınmıştır. Güç devresi için ihtiyaç duyulan doğru gerilim, bir fazlı 12 volt etkin değere sahip gerilimin doğrultulup 1000 μ F kapasiteli kondansatör ile filtre edilmesiyle sağlanmıştır. Devrede güç anahtarı modeli olarak IRFP460 kullanılmıştır. MOSFET'in denetim sinyali darbe kaynağıyla sağlanmıştır.

4.5.1 Bobin Akımı ve Kondansatör Gerilimi

Şekil 4.8'de rezonans kondansatörü gerilimi ve ısıtma bobini akımına ait dalga şekilleri görülmektedir. Bobin akımında üstel artışın olduğu süreç içerisinde kondansatör gerilimi sıfırdır. Anahtarın yalıtıma geçmesiyle birlikte kondansatör gerilimindeki artış başlar.

İnvörtör devrenin normal şekilde çalışabilmesi için iletim süresinin alabileceği bir alt sınır değeri mevcuttur (Chatterjee ve Ramanarayanan, 1993). Bu değer altına düştüğü takdirde, anahtar yalıtıma geçtiğinde kondansatör gerilimi sıfır değerine ulaşamaz ve pozitif bölgede sönümlü salınımına devam eder. Diyot hiçbir zaman doğru polarize olamaz ve sıfır gerilim anahtarlama sağlanamaz. Yalıtım süresi yeteri kadar uzun olursa rezonans kondansatörünün son değeri giriş gerilimi, bobin akımının son değeri ise sıfır olur. Bu sebepten devrenin normal çalışma şartlarının sağlanabilmesi için, iletim süresinin alt sınır değerinin altına

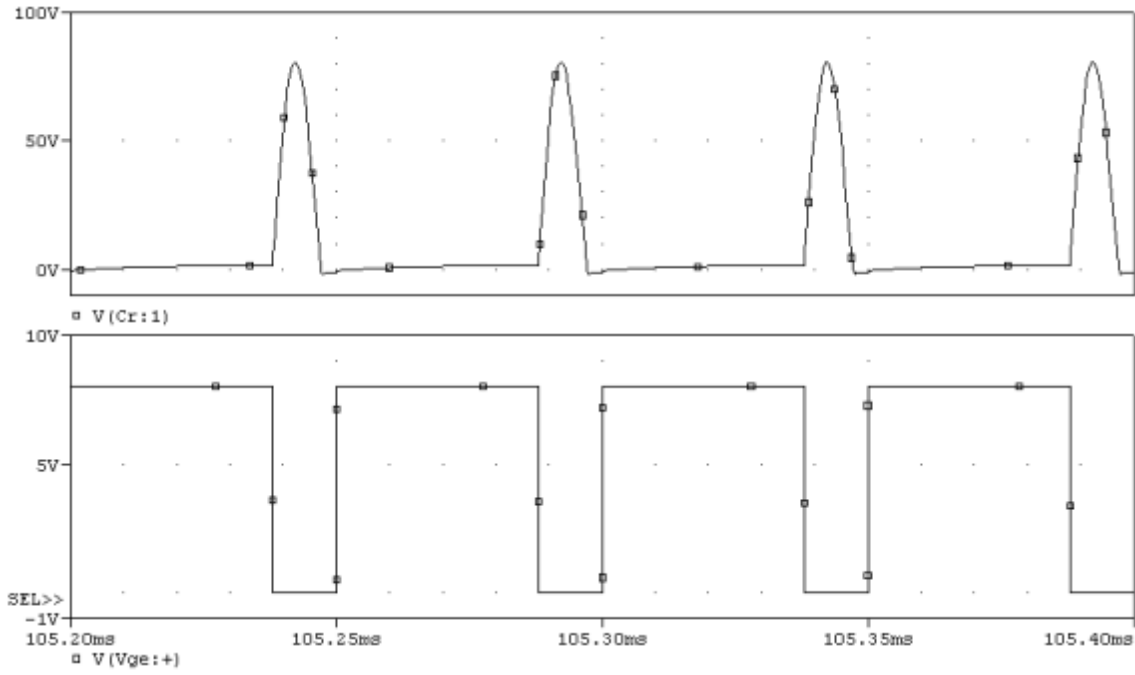
düşülmemesi ve yüklü bobin eşdeğer parametrelerine uygun kondansatör değerinin seçilmesi gerekmektedir. Bu, çıkış gücünün denetim aralığını kısıtlayan bir dezavantajdır.



Şekil 4.8: Rezonans kondansatörü gerilimi ve ısıtma bobini akımı.

Şekil 4.9, denetim sinyali ile kondansatör gerilimini göstermektedir. Kondansatör gerilimi aynı zamanda anahtarın güç uçlarındaki gerilim olduğu için, sıfır gerilim anahtarlamının gerçekleştirildiği bu şekil ile daha açık görülmektedir.

Isıtma bobininden geçen akım, orta frekansta ve zamanla yönü ve şiddeti değişmektedir. Böylece induksiyon ısıtma için gerekli olan zamanla değişen manyetik akı üretilebilir ve elektromanyetik ısıtma gerçekleştirilebilir.



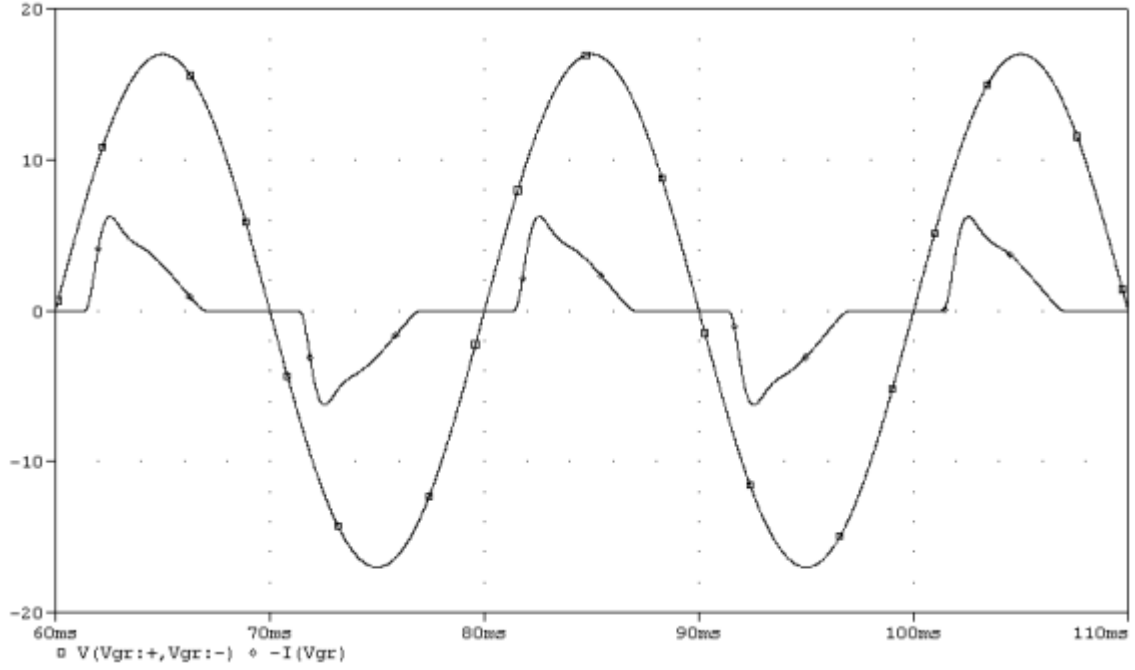
Şekil 4.9: Yarı iletken anahtarda sıfır gerilim anahtarlamanın gerçekleştirilmesi.

4.5.2 Kaynak Akımı ve Kaynak Gerilimi

Aynı anahtarlama koşullarında, invertör devreyi besleyen etkin değeri 12 volt olan alternatif gerilim kaynağının akım ve gerilimine ait dalga şekilleri Şekil 4.10'daki gibi olmaktadır. Doğru gerilimdeki dalgalanmayı azaltma amaçlı kullanılan 1000 μ F'lık alçak frekans filtre kondansatörü, giriş akımının dalga şeklini etkilemekte ve akımdaki toplam harmonik bozulmayı (THD) arttırmaktadır. Burada giriş akımındaki THD %60.35'dir. Şebekedeki harmonikleri arttıran ve akımın sinüs şeklini kaybetmesine sebep olan bu durum aktif veya pasif güç katsayısı düzeltme yöntemleri kullanılarak önlenmelidir.

Aktif akım şekillendirme olarak da bilinen aktif güç katsayısını düzeltme devresinde, yarı iletken anahtar denetimli d.a.-d.a. güç dönüştürücüler kullanılarak akıma sinüs dalga şeklinin kazandırılması sağlanır. Giriş akımını şekillendirmek için doğrultma devresi ile d.a.-d.a. dönüştürücü arasındaki alçak frekans kondansatörü kaldırılarak doğrultucu ve dönüştürücü arasında bir bobin konulur. Aynı işlevi görmek için izolasyon transformatörü içeren dönüştürücülerde, transformatörün kaçak endüktansından da istifade edilebilir (Sipolla ve Sepponen, 2002). Güç katsayısı düzeltici devrelerdeki en büyük problem anahtarlama kayıpları nedeniyle anahtarlama frekansının kısıtlanmasıdır (Khan ve Batarseh, 1995).

Özellikle süreksiz iletim durumunda çalışan devrelerde anahtar stresleri, elektromanyetik parazitler ve bobin kayıpları artmaktadır.

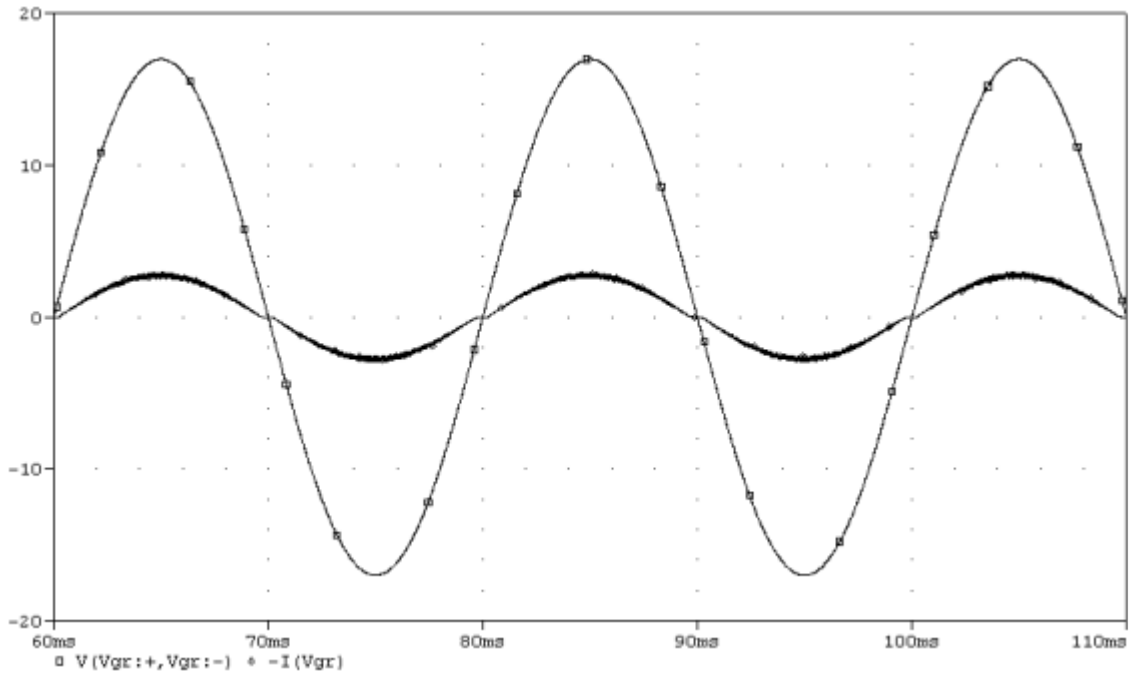


Şekil 4.10: Bir fazlı alternatif gerilim ve kaynak akımı.

Rezonans güç dönüştürücülerde çıkış frekansı yüke en yüksek güç aktarımını sağlamak ve birim güç katsayısı elde etmek için ayarlanabilir. İndüksiyon ısıtma sistemlerinde ilave aktif güç dönüştürücü devre kullanmadan sinüs dalga şekline sahip kaynak akımı elde edilebilmektedir (Hirota ve diğ., 1996). Örneğin bir fazlı tam köprü seri rezonans invertörlü yüksek frekanslı indüksiyon ısıtma sisteminde anahtarlama sinyalleri arasında faz farkı oluşturularak, ilave d.a.-d.a. dönüştürücü kullanılmadan güç denetimi ve yüksek giriş güç katsayısı elde edilebilmektedir (Zhang ve diğ., 1994). Sonuçta rezonans şartlarında çalışan indüksiyon ısıtma invertörü güç katsayısı düzeltici olarak da kullanılabilir. Bunun için sistemin bir fazlı a.a. kaynağı ile beslenmesi, doğrultucu ile invertör arasında filtre olmaması ve invertör frekansının kaynak frekansından daha yüksek değerlerde olması gerekmektedir (Calleja ve Ordonez, 1999). Sayılan şartların temini neticesinde yüksek frekans bileşenleri içeren kaynak akımı, sinüs dalga şeklini kuşatır. Pasif filtre ile akımın yüksek frekans bileşenleri süzülebilir; gerilim ile sıfır fazlı ve gerilim dalga şeklinde akım elde edilir. Şekil 4.11, bu tip bir uygulamaya örnektir. Devrede $L=100\mu\text{H}$, $C=16.5\mu\text{F}$ değerlerinde pasif filtre elemanları kullanılarak kaynak akımındaki THD azaltılmış ve akımın yüksek frekans

bileşenleri süzölmüştür. Bu çalışma durumunda yük ve çalışma frekansı değıştirilmemiş olmasına rağmen THD %5.14'e düşmüştür. Benzer çalışma şekli tek anahtarlı paralel rezonans invertörlü indüksiyon ısıtıcıda da kullanılabilir (Leisten ve Hobson, 1990).

Uygulamada kullanılan E sınıfı invertör devre gerilim beslemeli olduğu için, köprü diyot çıkışına bağlanan büyük kapasiteli filtre kondansatörünün kaldırılması, devrenin çalışmasını olumsuz yönde etkilemektedir. Alternatif gerilim kaynağı tarafına konulacak yüksek frekans filtre devresindeki kondansatörün doğrultucu çıkışına alınmasıyla, invertörde oluşan iki yönlü enerji akışı sebebiyle doğrultucu devrenin olumsuz etkilenişı önlenmiştir.



Şekil 4.11: Bir fazlı alternatif gerilim ve filtre edilmiş kaynak akımı.

4.6 Denetim Darbelerinin Silinmesi Yöntemiyle E Sınıfı İnvörtör Güç Denetimi

4.6.1 Sabit Frekans Denetimli E Sınıfı İnvörtör Tasarımı

E sınıfı invertörde anahtarın iletim süresinin değiştirilmesiyle gerçekleştirilen çıkış gücünün denetimi, sabit çalışma frekansında denetim darbelerinin bazılarının silinmesiyle de sağlanabilir. Bazı denetim darbelerinin silinmesi (thinned out) ile çıkış gücü rezonans elemanlarında ve anahtarın iletim-yalıtım süresinde değişiklik yapılmadan, sabit frekansta geniş aralıkta denetim edilebilir. Denetim darbelerinin silinmesi yöntemiyle akım beslemeli E sınıfı invertör devrede güç değiştirilebilmektedir (Bin Yusoff ve diğ., 2003). E sınıfı doğrultucuya fazladan bir güç anahtarının ilave edilmesiyle de aynı yöntem kullanılmıştır (Koizumi ve diğ., 2001). DE sınıfı invertörde de güç denetimi için benzer denetim teknikleri uygulanmıştır (Sekiya ve diğ., 1998). Yapılan uygulamalar genellikle yüksek frekanslı ve düşük güçlü dönüştürücülerdir. Bazı denetim darbelerinin silinmesi yönteminin gerilim beslemeli E sınıfı invertörlü mutfak tipi indüksiyon ısıtıcıya uygulanmasıyla orta frekansta çıkış gücü denetimi gerçekleştirilmiştir. Ancak bu yöntem anahtarlama frekansının altında harmonikler ürettiği için doğrultucuda daha büyük ebatlı filtre bobinine ihtiyaç duyulur (Sekiya ve diğ., 2003). Isıtma bobini akımının harmonikleri mutfak tipi indüksiyon ısıtıcıda duyulabilir seslerin oluşmasına sebep olmaktadır.

Kullanılan yöntemde devre yapısında herhangi bir değişiklik yapılmadığı için E sınıfı invertör devrenin tasarım yöntemi denetim darbelerinin silinmesi yöntemi için de kullanılabilir. Frekans denetimli E sınıfı invertörden farklı olarak denetim darbeleri sonrası anahtar iletim kayıplarının azaltılması için iletim durumu söndürme devresine ihtiyaç duyulmaktadır. Sistem normal çalışmada iletim süresi yalıtım süresine eşit E sınıfı invertör olarak maksimum giriş gücünde çalışmaktadır. Giriş gücü Eşitlik 4.26 ile silinen denetim darbesi sayısına göre değişim gösteren akımın etkin değerinden hesaplanabilmektedir. Yarı iletken anahtarı denetim eden sürme sinyalinde anahtarlamanın yapıldığı periyotlar normal periyot (N) ve iletim darbelerinin silindiği periyotlar denetim periyodu (D) olarak isimlendirilirse, anahtarlamaadaki denetim periyodu sayısı arttıkça çıkış gücü azalır.

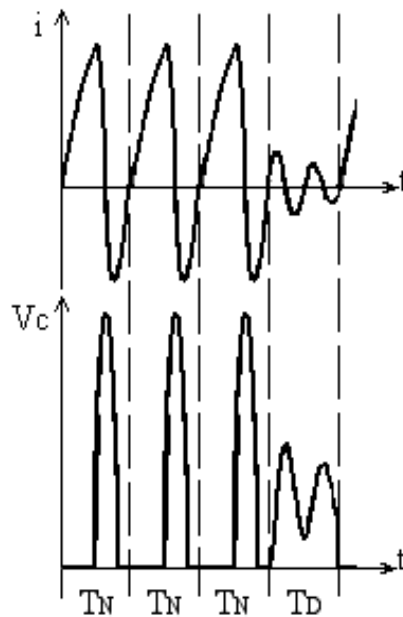
$$I_{ef} = \sqrt{\frac{1}{(N+D)T_a} \left[\int_0^{NT_a} (i_1(t))^2 dt + \int_{NT_a}^{NT_a+t_y} (i_2(t))^2 dt + \int_{NT_a+t_y}^{(N+D)T_a} (i_3(t))^2 dt \right]} \quad (4.26)$$

Eşitlikte $i_1(t)$ bobinin E sınıfı invertör çalışma akımı, $i_2(t)$ ve $i_3(t)$ sırasıyla normal periyot ardından gelen üstel azalan ve sönümlü salınımlı bobin akımlarıdır. Normal periyodun sonunda bobin akımı t_y süresinde sıfıra ulaşır:

$$t_y = \ln\left(\frac{I_0 - V/R}{-V/R}\right) \frac{L}{R} \quad (4.27)$$

Denetim periyodunun sonunda sıfır gerilim şartları bozulmaktadır. Bu yüzden denetim darbelerinin silinmesiyle denetim edilecek E sınıfı invertör tasarlanırken, anahtarın iletme geçtiğinde zarar görmemesi için iletim durumu söndürme devresi kullanılmalıdır. Söndürme devresi anahtardan geçecek impuls akımını sınırlandırır. Büyük söndürme endüktansı anahtarda düşük iletim gerilimi ve düşük iletim anı kaybı demektir. Fakat anahtar yalıtıma giderken anahtar uçlarındaki gerilimi artırır, yalıtım için gerekli aralığı uzatır ve söndürme direncindeki kayıpları artırır. Söndürme devresi parametreleri belirlenirken kullanılan anahtarın di/dt oranı, yalıtım süresi ve kondansatör geriliminin değeri göz önüne alınmalıdır.

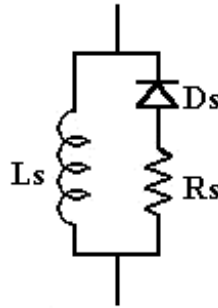
Şekil 4.12 üç adet normal periyot (T_N) ve bir adet denetim periyodu (T_D) içeren bazı denetim darbelerinin silinmesi yöntemi ile bobin akımı ve kondansatör gerilimi dalga şekillerini göstermektedir. Denetim periyodunun ardından sıfır gerilim anahtarlama koşulları bozulmuş olsa da, birçok periyot E sınıfı veya sıfır gerilim anahtarlama koşullarında gerçekleştirildiği için devrede güç dönüşüm verimi yüksek seviyelerde kalmaktadır (Sekiya ve diğ., 1998).



Şekil 4.12: Bazı denetim darbelerinin silinmesi yöntemi ile E sınıfı invertör bobin akımı ve kondansatör gerilimi.

4.6.2 Sabit Frekans Denetimli E Sınıfı İnvörtör Benzetim ve Hesaplama Sonuçları

Eşdeğer direnci 2.9Ω , eşdeğer endüktansı $28.5\mu\text{H}$ olan 130W giriş gücüne sahip E sınıfı invertörlü indüksiyon ısıtıcının 62.5kHz sabit anahtarlama frekansında elektronik benzetimi yapılmıştır. Rezonans kondansatörünün değeri 82nF kaynak gerilimi 60 voltur. Denetim sinyalinin iletim süresi yalıtım süresine eşittir. Devrede kullanılan IRFP460 güç MOSFET'i $di/dt < 100\text{A}/\mu\text{s}$ oranına sahiptir. Anahtar akımının değişimi anahtara seri bağlanan söndürme devresi endüktansı ile sınırlandırılmıştır. Rezonans kondansatörü gerilimi denetim periyodunda kaynak geriliminin üzerinde değer alabilmektedir. Denetim periyodu sonrası anahtar iletime geçtiğinde kondansatör geriliminin anahtara zarar vermemesi için Şekil 4.13'deki söndürme devresinde $L_s = 1.4\mu\text{H}$ ve $R_s = 0.26\Omega$ kullanılmıştır.

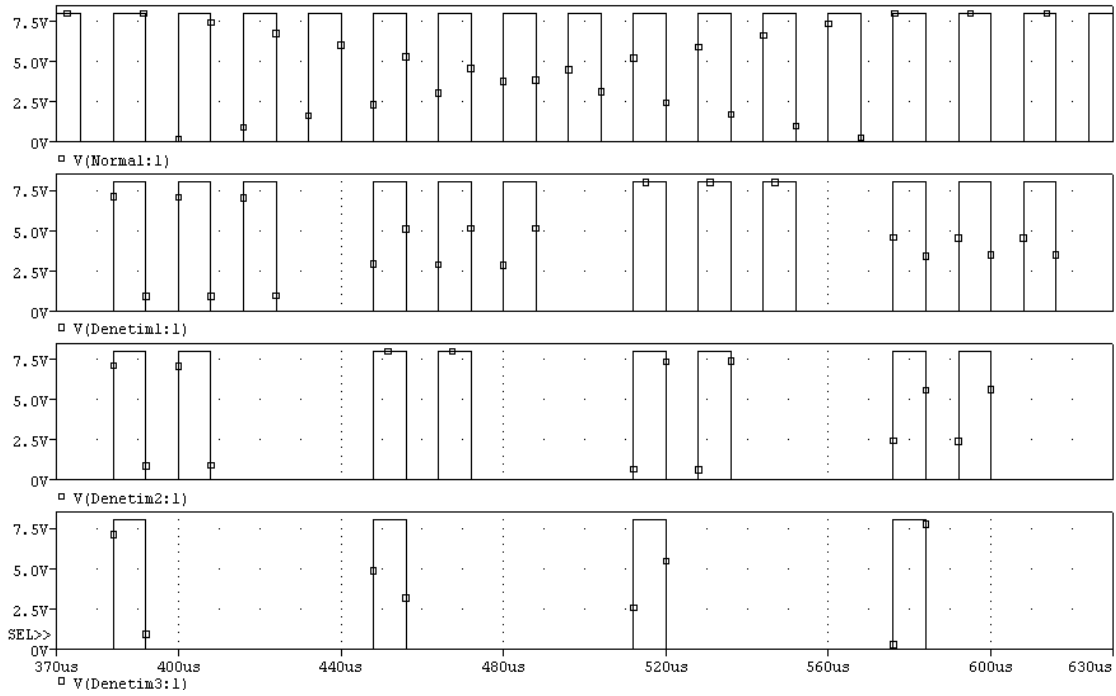


Şekil 4.13: İletim durumu söndürme devresi.

Normal çalışmayı ve üç farklı güç denetimini içeren denetim sinyalleri Şekil 4.14'deki gibidir. Normal çalışmadan farklı olarak Denetim1, 2 ve 3 sinyallerinde her dört periyotta sırasıyla bir, iki ve üçer denetim darbesi silinmiştir.

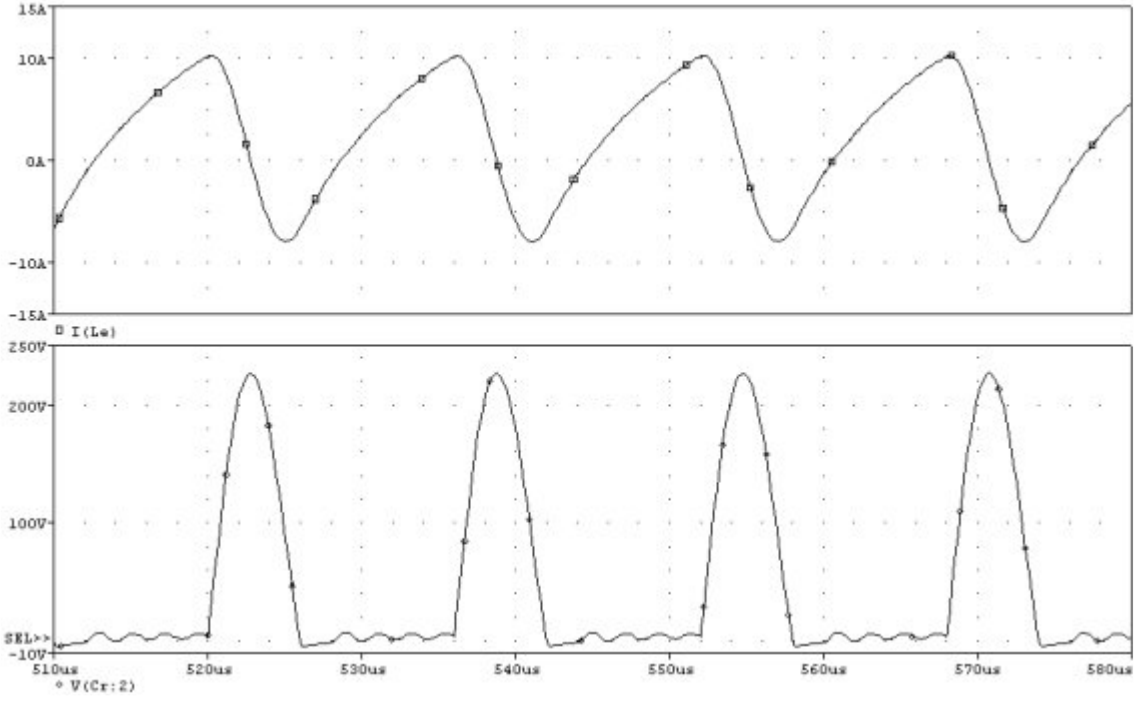
Normal çalışma periyotları N , silinmiş çalışma periyotları D ile gösterilecek olursa, normal çalışma sinyali $4N/0D$, Denetim1 sinyali $3N/1D$, Denetim2 sinyali $2N/2D$, Denetim3 sinyali $1N/3D$ olarak ifade edilebilir.

Şekil 4.15 normal çalışma ve bir denetim darbesinin silinmesiyle elde edilmiş E sınıfı invertör bobin akımı ve kondansatör gerilimi elektronik benzetim dalga şekillerini vermektedir. Normal çalışmada sıfır gerilim anahtarlama gerçekleştirilmektedir. Şekil 4.16’da dört anahtarlama periyodunda sırasıyla iki ve üç denetim darbesinin silinmesiyle elde edilmiş akım ve gerilim dalga şekilleri görülmektedir. Anahtarlama periyodu sayısı arttıkça sönümlü salınımlı akım nedeniyle akımın etkin değeri azalmaktadır.

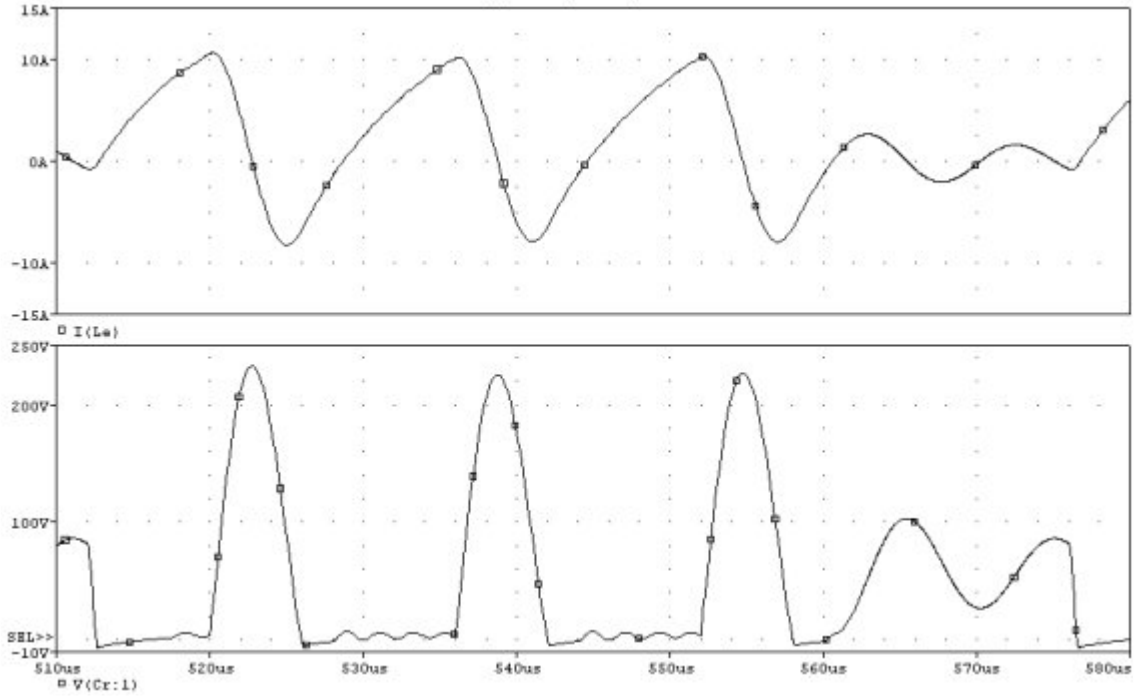


Şekil 4.14: Denetim sinyalleri.

Denetim darbelerinin silindiği zaman aralıklarında bobin akımı ve kondansatör gerilimi sönümlü salınımlarına devam etmektedir. Bu zaman aralığı yeterince uzatılacak olursa bobin akımının son değeri sıfır, kondansatör geriliminin son değeri ise giriş gerilimi olur.

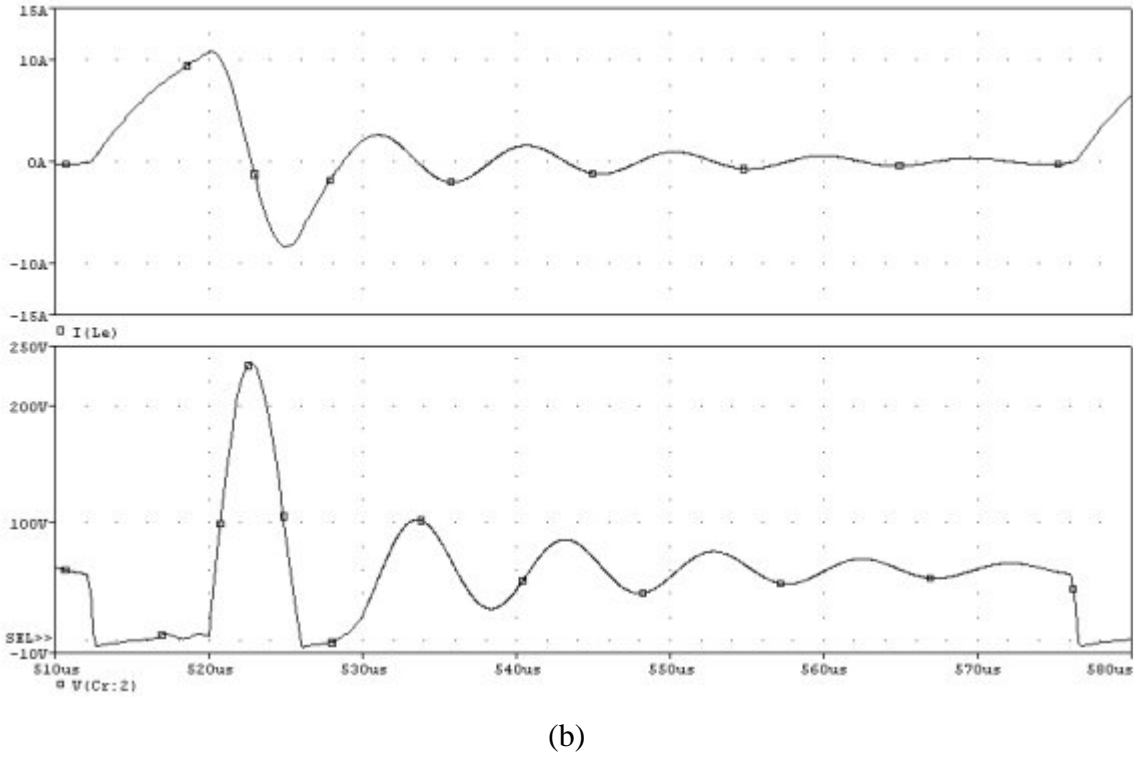
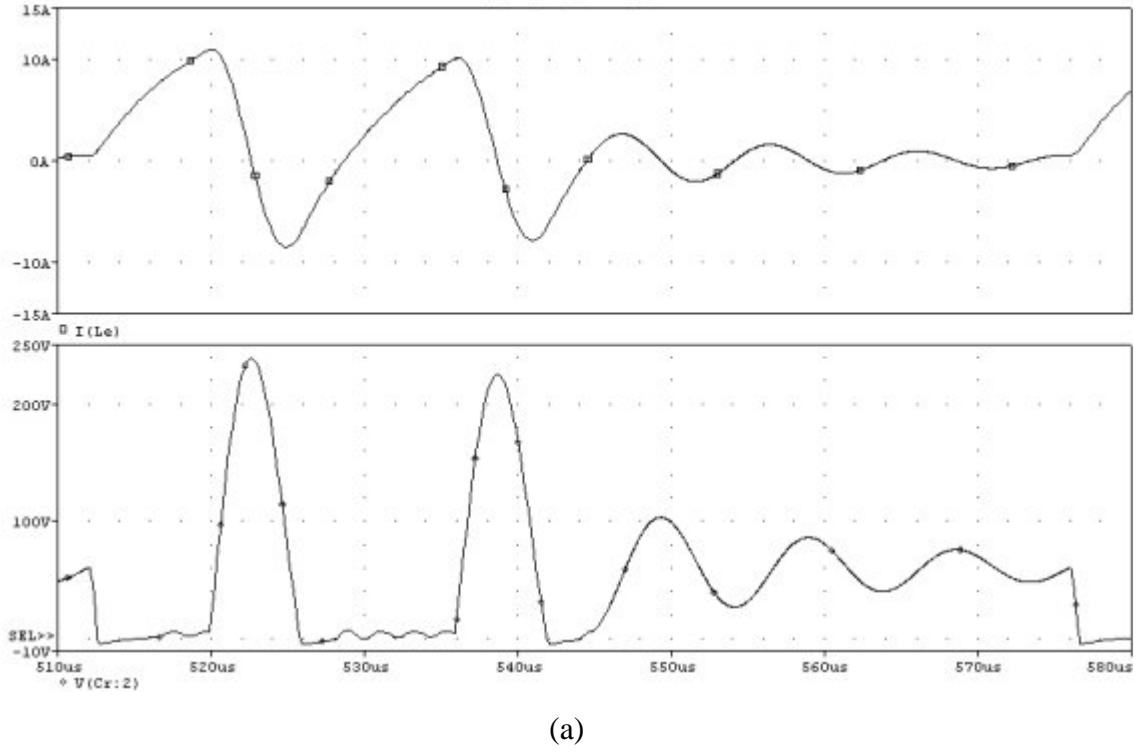


(a)



(b)

Şekil 4.15: Bobin akımı ve kondansatör gerilimi dalga şekilleri a) Normal çalışma b) Denetim1.



Şekil 4.16: Bobin akımı ve kondansatör gerilimi dalga şekilleri a) Denetim2 b) Denetim3.

Çizelge 4.2, söndürme devresi kullanılmadan ideal anahtarlı elektronik benzetim sonuçları ile matematiksel hesaplama sonuçlarından elde edilen değerleri göstermektedir.

Çizelge 4.2: Farklı sürme sinyalleri için benzetim çalışması ve hesaplama sonuçları.

| Sürme Sinyali | Benzetim | | | Hesaplama | | |
|---------------|----------------|---------------------|--------------------|----------------|---------------------|--------------------|
| | Giriş Gücü (W) | I _{ef} (A) | I _m (A) | Giriş Gücü (W) | I _{ef} (A) | I _m (A) |
| 4N/0K | 126.31 | 6.55 | 10.83 | 132.04 | 6.74 | 10.70 |
| 3N/1K | 106.29 | 5.85 | 10.85 | 102.39 | 5.94 | 10.74 |
| 2N/2K | 75.83 | 5 | 10.65 | 71.08 | 4.95 | 10.55 |
| 1N/3K | 42.64 | 3.72 | 11.50 | 40.88 | 3.75 | 11.52 |

4.6.3 E Sınıfı İntertör Güç Denetim Yöntemlerinin Karşılaştırılması

E sınıfı invertörde anahtarın iletimden yalıtıma (t_{g1}), yalıtımdan ilettime (t_{g2}) geçiş anları sıfır gerilim ile gerçekleştirildiği için anahtarlama enerji kaybı (E_k) Eşitlik 4.28'e göre sıfır kabul edilebilir (Kassakian ve diğ., 1991).

$$E_k = \int_0^{t_{g1}, t_{g2}} (V_a I_a) dt \quad (4.28)$$

Kullanılan MOSFET'in düşük iletim durumu direnci ($R_{DSon}=0.22\Omega$) nedeniyle iletim kayıpları da verimi olumsuz yönde etkileyecek düzeyde değildir. Denetim darbelerinin silinmesi yöntemiyle çalıştırılan E sınıfı invertör devrede güç denetimi sabit anahtarlama frekansında 130W ile 40W arasında gerçekleştirilmiştir. Kademeli olarak dört farklı güç değeri elde edilebilmektedir. Normal çalışma durumunda tüm periyotlarda sıfır gerilim anahtarlama gerçekleştirilebildiğinden söndürme devresi kullanılmadan da devre çalıştırılabilir. İntertörde aynı anahtarlama frekansında rezonans elemanlarında değişiklik yapılmadan iletim süresinin değiştirilmesiyle sıfır gerilim anahtarlama güç denetimi gerçekleştirilememektedir. Anahtar geriliminin sıfıra yakın değerlerinde iletim darbesinin uygulanmasıyla denetim aralığı genişletilebilir. Bu durumda her periyotta sıfır gerilim anahtarlama şartları bozulmakta ve anahtarlama kayıpları artmaktadır.

Sabit frekans denetimli E sınıfı invertörde denetim periyotları sonunda anahtar sıfır gerilim ile ilettime geçmediğinden söndürme devresine ihtiyaç duyulmaktadır. Kullanılan söndürme devresi güç dönüşüm verimini düşürmektedir. Bununla birlikte mutfak tipi indüksiyon

ısıtıcıda alçak frekanslarda oluşan duyulabilir sesler nedeniyle denetim darbeleri sınırlanmaktadır. Geniş denetim aralığı için 50kHz'in üzerinde çalışılmasına ve oluşan düşük frekanslı harmonikler nedeniyle daha büyük ebatlı filtre elemanlarının kullanımına ihtiyaç duyulur. Ancak güç geniş aralıkta kademe kademe değiştirilebilmekte ve frekans denetimli güç denetimindeki gibi geri beslemeye ihtiyaç duyulmamaktadır.

BEŞİNCİ BÖLÜM BİR FAZLI MUTFAK TİPİ İNDÜKSİYON ISITMA UYGULAMASI

5.1 Giriş

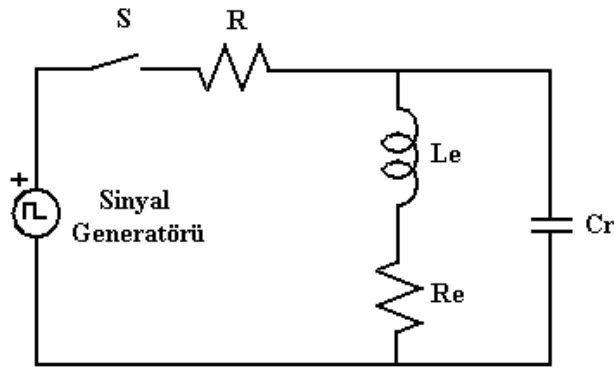
Bir fazlı orta frekanslı ev tipi bir indüksiyon ısıtma uygulaması gerilim beslemeli, sıfır gerilim anahtarlama E sınıfı invertör ve yassı tabanlı indüksiyon bobini kullanılarak

gerçekleştirilmiş, sistemin verimliliğinin artırılabilmesi için bir takım tedbirler alınmıştır. Deneysel çalışmaların yapıldığı mutfak tipi induksiyon ısıtıcıya ait özellikler aşağıdaki gibidir:

- Çalışma gerilimi: 12V 50Hz.
- Çalışma frekansı: 20-30kHz.
- Giriş gücü: 30W.
- Rezonans frekansı: 62.5kHz.

Isıtma sisteminin çalışma frekansı aralığı Bölüm 3.4.2'deki ihtiyaçlar göz önünde bulundurularak seçilmiş, farklı ebatlı yükler için ısıtma deneyleri gerçekleştirilmiştir. Yüklü bobinin parametrelerinin tespitinde matematiksel yöntemlerden faydalanılabileceği gibi, Şekil 5.1'deki devreden elde edilecek salınımlı kondansatör geriliminin salınım periyodundan ve kullanılan kondansatörün değerinden faydalanılarak, Eşitlik 4.6 ile eşdeğer endüktans değeri elde edilebilir. Salınımlı gerilimin tepe değerindeki azalma oranına göre aşağıdaki eşitlikten eşdeğer direnç yaklaşık olarak bulunur. Burada T_r rezonans periyodu, V_{t1} ve V_{t2} sırasıyla salınımlı kondansatör geriliminin birinci ve ikinci tepe değerleridir.

$$R_e = \frac{2L_e}{T_r} \ln \left(\frac{V_{t1}}{V_{t2}} \right) \quad (5.1)$$



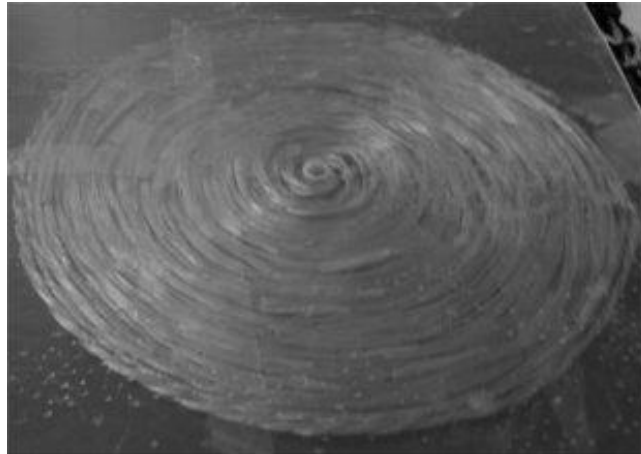
Şekil 5.1: Bobin parametrelerinin tespit edilmesinde kullanılan devre.

Yapılan ölçümler sonucunda en yüksek yük değeri için eşdeğer endüktans $29.5\mu\text{H}$ ve eşdeğer direnç 1.8Ω tespit edilmiştir. Sıfır gerilim anahtarlama için anahtara paralel $0.22\mu\text{F}$ polipropilen kondansatör (plastik film kondansatör) kullanılmıştır.

5.2 İndüksiyon Bobini ve Yük

Elektromanyetik ısıtmanın gerçekleştirilebilmesi için Bölüm 2.5.2.1'deki bobin tasarım kriterleri de dikkate alınarak indüksiyon bobini, yassı tabanlı bobin seçilmiştir. Bobinin ürettiği manyetik alanının yük üzerindeki etkisinin artırılması için aralarında 90° açı bulunan ferit nüveler bobinin altına yerleştirilmiştir. Şekil 5.2, deneysel çalışmalarda kullanılan yassı tabanlı indüksiyon bobinini göstermektedir.

Sarım sayısı 37 olan yassı tabanlı bobinin iç çapı 14mm, dış çapı 170mm'dir. Bakır için 20-65kHz frekans aralığındaki dalma derinliği Eşitlik 2.1'e göre 0.457-0.259mm olmaktadır. Bobin sarımında deri etkisinin olumsuz sonuçlarının önlenmesi için her biri 0.12mm çapta yalıtımlı bakır iletkenlerden oluşmuş litz teli kullanılmıştır. Bobin telinin birim kesitteki akım taşıma kapasitesi artırılarak, orta frekansta deri etkisi nedeniyle oluşacak direnç artışı en düşük düzeye indirilmiş, böylelikle bobin verimi artırılmıştır. Yüksek güçlerde litz telinde oluşan mekanik zorlanmalar ve ısınma sorunları nedeniyle, şerit bakır iletkenlerden sarılmış bobinler de kullanılabilir (Hernandez ve diğ., 1998).



Şekil 5.2: Yassı tabanlı indüksiyon bobini.

Sistemde yük modeli olarak 0.7mm kalınlığında ve bir kenarı 100, 140, 160 ve 200mm olan kare X5CrNi18-10 paslanmaz çelik tabakalar seçilerek, her biri için ayrı ayrı ısıtma deneyleri gerçekleştirilmiştir.

Sonuçta litz teli kullanılarak bobin direncinin toplam dirençteki oranı azaltılmış, ferit nüveler ile bobin relüktansı düşürülerek daha yüksek enerji transferi sağlanmıştır. Bobin verimini yükselten bu etkenlerin yanı sıra yüksek manyetik geçirgenlikli yük modelinin kullanılması ve yük ile bobin arasındaki yalıtkanın 4mm kalınlıkta seçilmesi de manyetik etkileşimin kuvvetlendirilmesini sağlamıştır. Şekil 5.3 güç dönüştürücüler, ısıtma bobini ve yükü içeren mutfak tipi indüksiyon ısıtıcı deney düzeneğini göstermektedir. 220/12V alçaltıcı transformatör, a.a.-d.a. dönüştürücü, d.a.-a.a. dönüştürücü, optik yalıtımlı MOSFET sürücü devre, indüksiyon bobini ve yük sistemin ana unsurlarını teşkil eder.

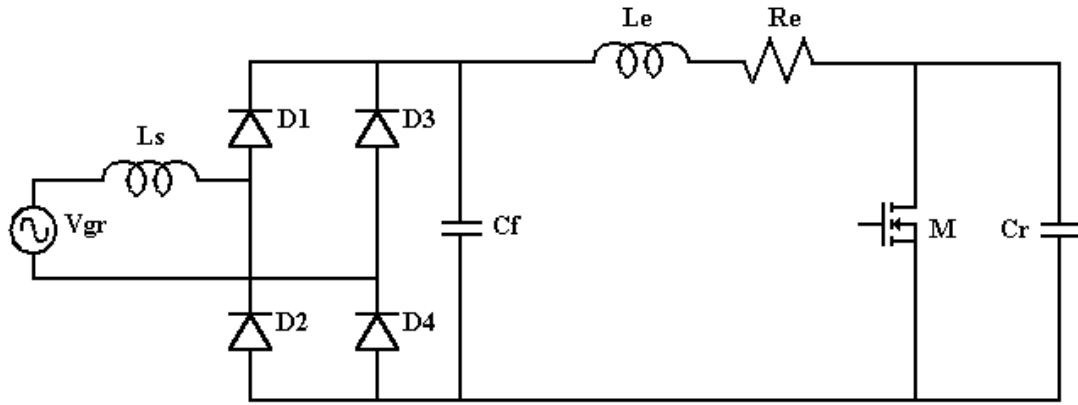


Şekil 5.3: Bir fazlı E sınıfı invertörlü mutfak tipi indüksiyon ısıtma deney düzeneği.

5.3 E Sınıfı İntertörlü İndüksiyon Isıtıcı Deneysel Çalışma Sonuçları

Gerilim beslemeli E sınıfı invertör devrenin giriş gerilimi, bir fazlı alternatif gerilimin köprü diyot ile doğrultulması ile elde edilen doğru gerilimden tedarik edilmiştir. Alternatif gerilim kaynağı, doğrultucu ve invertör olmak üzere üç kısımdan oluşan güç devresi Şekil 5.4'de görülmektedir. Hattın devre üzerindeki endüktif etkisi, kaynağa seri bağlanmış bir endüktans ile temsil edilmiştir. Hat iletkenlerinin ve bağlantı noktalarının endüktansı, devrede

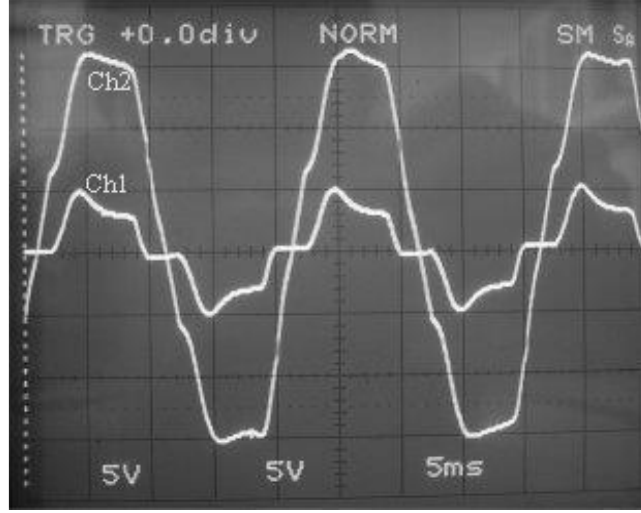
istenmeyen (stray) endüktans değeridir. Güç devresinde stray endüktans değerinin azaltılabilmesi için yüksek akım taşıyan iletkenlerin ve bağlantı noktalarının mümkün olabilen en küçük uzunlukta tutulmaları gerekir. Denetim devresi iletkenleri ile güç devresi iletkenleri birbirinden ayrılmalıdır. Küçük akımlar taşıyan denetim devresinin stray endüktansı, burulmuş iletkenler kullanmak suretiyle önlenir. Yüksek akım taşıyan güç iletkenlerinde ise aralarında ince yalıtkan bulunan paralel güç iletkenleri kullanılarak x-hattı modeli oluşturulur ve devrenin stray endüktansı azaltılır. Yapılan uygulamada güç ve denetim devresine ait önlemlerin alınmasıyla, stray endüktans nedeniyle oluşacak gürültü sinyalleri ve güç kayıpları azaltılmıştır.



Şekil 5.4: Tek anahtarlı mutfak tipi induksiyon ısıtıcı güç devresi.

5.3.1 Kaynak Akımı ve Kaynak Gerilimi

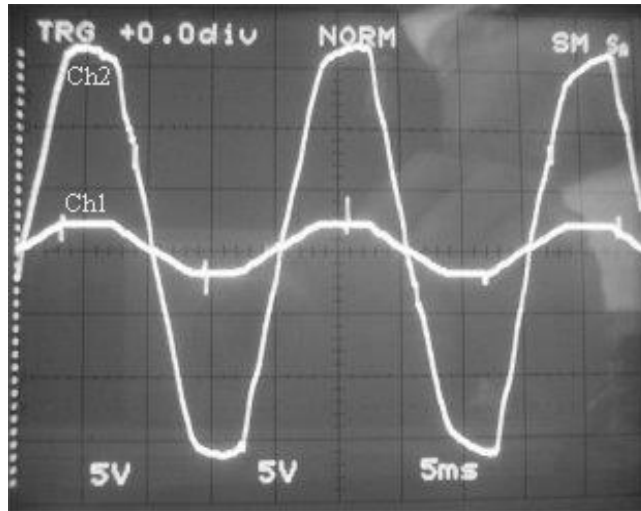
Bobin, 200×200×0.7mm çelik (X5CrNi18-10) ile yüklendiğinde, doğrultucu çıkışında 1000µF 250 volt filtre kondansatörü var iken, etkin değeri 12 volt olan alternatif gerilim kaynağının akımı ve gerilimi Şekil 5.5'deki gibi olmaktadır. Bu esnada invertör devrenin çalışma frekansı 20kHz'dir.



Şekil 5.5: 200×200×0.7mm CrNi yük ile kaynak akımı (Ch1:5A/div) ve gerilimi (Ch2:5V/div).

Akımın dalga şekli alternatif gerilim kaynağına seri ilave edilen 1 ohm'luk direnç uçlarındaki geriliminin osiloskop ekranındaki şekli alınarak elde edilmiş, diğer akım şekilleri de aynı yöntem yardımıyla alınmıştır.

Devrede alternatif gerilim kaynağına seri 100µH filtre bobini bağlanması ve alçak frekans filtre kondansatörünün 16.5µF 200 volt kondansatör ile değiştirilmesiyle aşağıdaki şekil alınmıştır. Akım dalga şeklindeki bozulma azaltılmış, akımın yüksek frekans bileşenleri süzülmüştür. İstenmeyen harmonikler yüksek frekanslı olduğu için, kullanılan LC pasif filtresiyle kolayca süzulebilmektedir.

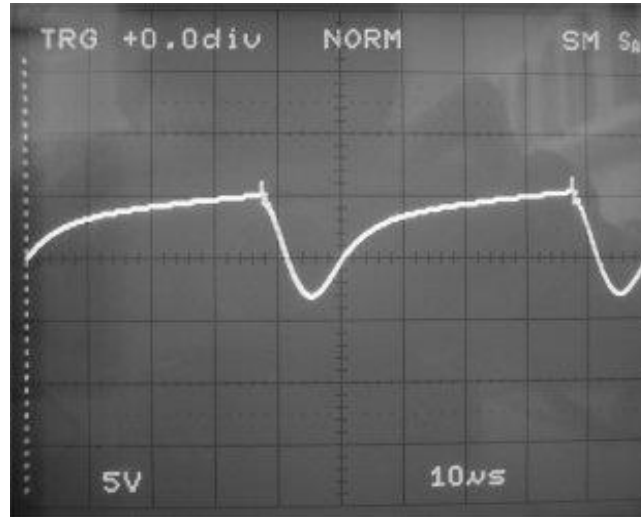


Şekil 5.6: Bir fazlı kaynak akımının dalga şeklinin düzeltilmesi (Ch1:5A/div, Ch2:5V/div).

5.3.2 Bobin Akımı ve Kondansatör Gerilimi

İnvertör devrede kullanılan IRFP460 güç MOSFET'i, dahili ters gövde diyotu bulunduran 18.4 amper akım taşıma kapasiteli ve 500 volt gerilimi bloke edebilen bir yarı iletken anahtardır. Yüksek giriş empedansı nedeniyle denetim devresi kayıpları düşük, anahtarlama frekansı mutfak tipi indüksiyon ısıtma frekans aralığına uygundur. İletim durumu direnci 0.22Ω 'dur. Dahili diyotun özellikleri 18.4 amper, ileri yön gerilim düşümü en yüksek 1.6 volt'tur. Diyotun ters toparlama süresi en yüksek akımda 480ns'dir.

20kHz anahtarlama frekansında bobin üzerinde $200\times 200\times 0.7$ mm ebatlı yük varken (tam yüklü) E sınıfı invertöre ait rezonans kondansatörü ve ısıtma bobini akımı Şekil 5.7'de görülmektedir. Bobinden geçen akımın yönü ve şiddeti zamanla değişmektedir. Bu, aynı zamanda yük eşdeğer direnci üzerinden geçen akımın dalga şeklidir. Kondansatör geriliminin osiloskopta görünen değeri 10 kat küçültme kullanılarak alınmıştır.



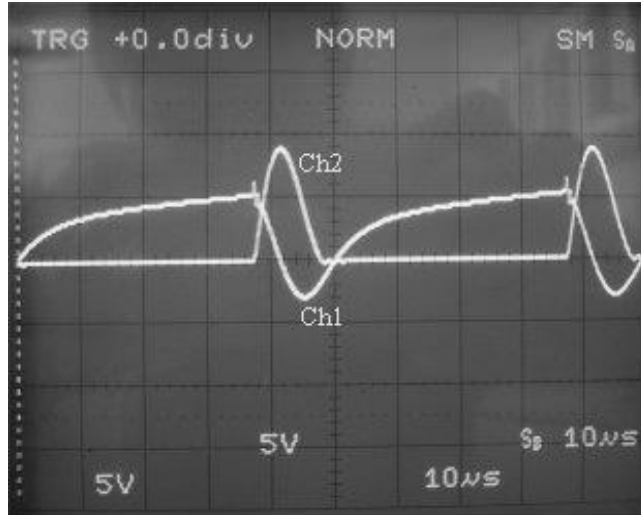
(a)



(b)

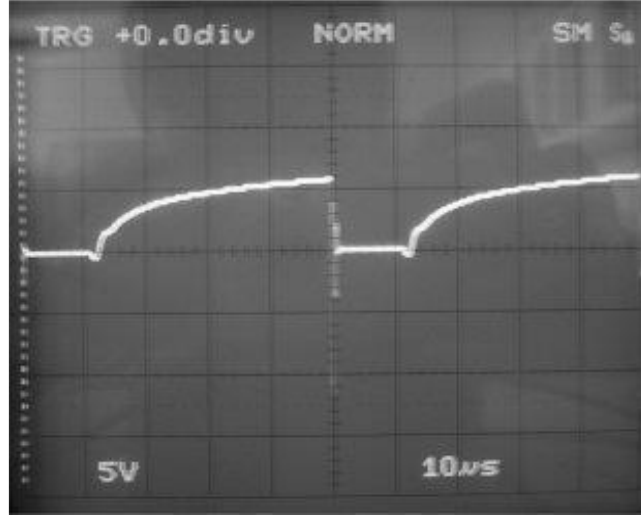
Şekil 5.7: Tam yüklü durumda a) Isıtma bobini akımı (5A/div) b) Rezonans kondansatörü gerilimi (50V/div).

Bobin akımı ve rezonans kondansatörü geriliminin birlikte görüldüğü Şekil 5.8’de, bobin akımının üstel artışta olduğu anda kondansatör gerilimi sıfırdır. Kondansatör geriliminin sıfırdan farklı değer almaya başlamasıyla birlikte, bobin akımı sönümlü salınım gerçekleştirilmektedir.



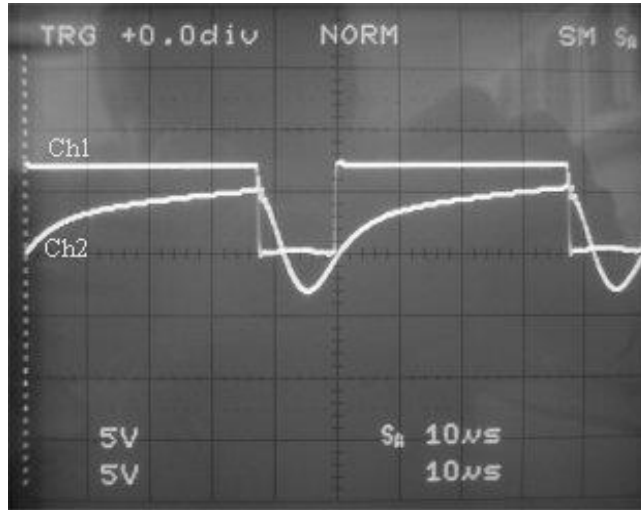
Şekil 5.8: Bobin akımı (Ch1:5A/div) ve rezonans kondansatörü gerilimi (Ch2:50V/div).

Şekil 5.9’da anahtar üzerinden geçen akımın dalga şekli görülmektedir. Akımın negatif değerde olduğu kısa sürede ters yönde diyotu üzerinden akım geçmektedir.

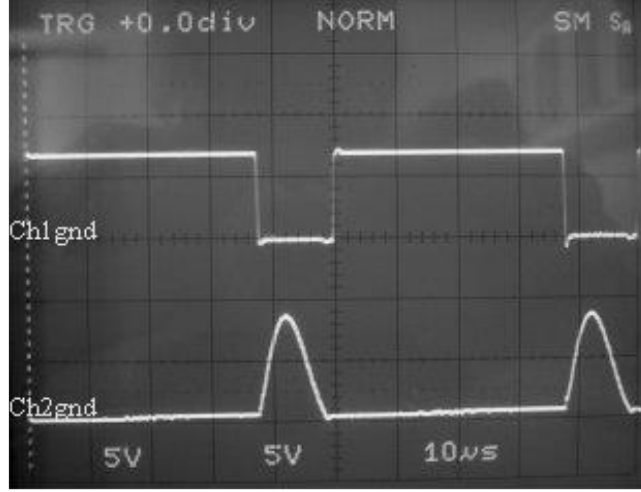


Şekil 5.9: MOSFET akımı (5A/div).

Şekil 5.10 ise denetim sinyaliyle birlikte bobin akımını ve kondansatör gerilimini göstermektedir. Anahtarın denetim ucuna uygulanan gerilim pozitif iken anahtar iletimdedir; bobin akımı artmaktadır, kondansatör gerilimi sıfırdır. Denetim gerilimi sıfırken anahtar yalıtımdadır ve akım diyot doğru polarize olana kadar sönümlü salınım oluşturur. Kondansatör gerilimi yalıtım süresinde tepe değerine ulaşır ve tekrar sıfır değerini alır.



(a) Ch1:5V/div, Ch2:5A/div.



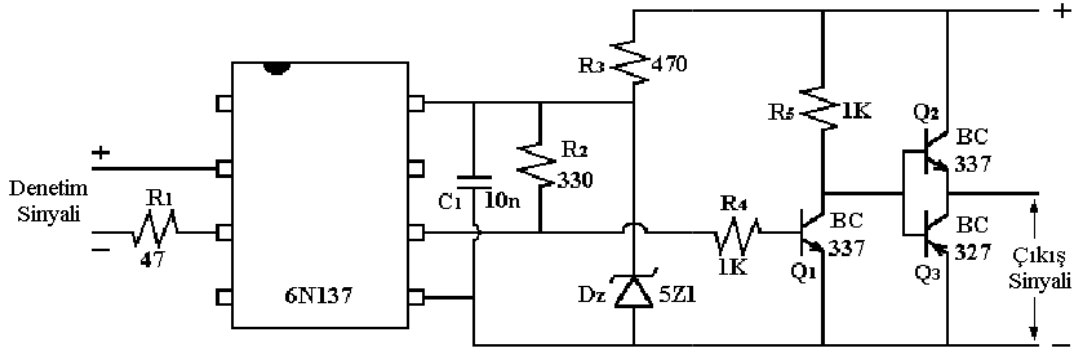
(b) Ch1:5V/div, Ch2: 50V/div.

Şekil 5.10: Denetim sinyali ile a) Bobin akımı b) Kondansatör gerilimi.

5.4 D.A.-A.A. Güç Dönüştürücü Devre Kayıplarının Giderilmesi

5.4.1 MOSFET Sürme Devresi

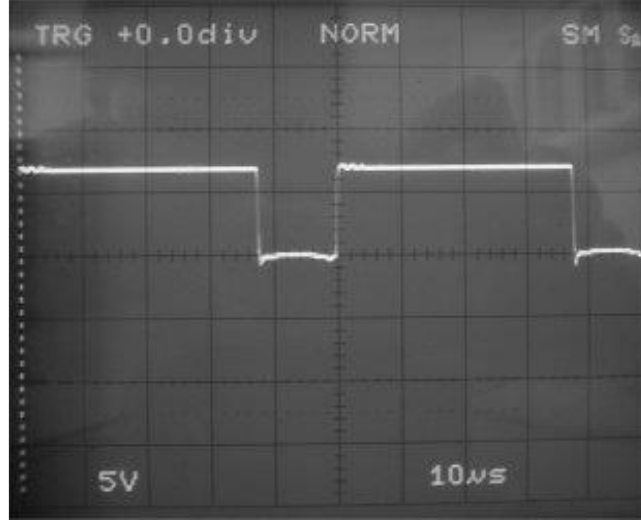
Yarı iletken anahtarlardan oluşmuş güç dönüştürücü devrelerde anahtarlama kayıplarını etkileyen en önemli faktörlerden birisi Bölüm 3.2.3’de anlatıldığı gibi anahtarlama geçiş anlarıdır. Bu süre içerisinde akım ve gerilim aynı anda güç terminallerinde bulunur. Oluşacak güç kayıplarının önüne geçilmesi için yapılması gerekenlerden biri anahtarın iletimden yalıtıma ve yalıtımdan iletime geçiş süresini mümkün olduğunca kısaltmaktır. Bu sebepten uygun sürücü kullanılması oldukça önemlidir. E sınıfı invertörün önemli avantajlarından birisi güç anahtarının toprak ile bağlantılı olması sebebiyle özel sürücü devre kullanılmadan çalıştırılabiliyor olmasıdır (Ponce ve diğ., 2001). Farklı denetim sinyallerinin uygulanabilmesi ve kullanılan MOSFET’in ideal biçimde denetimi için Şekil 5.11’deki optik yalıtımlı sürücü devre yapılmıştır.



Şekil 5.11: MOSFET sürücü devre.

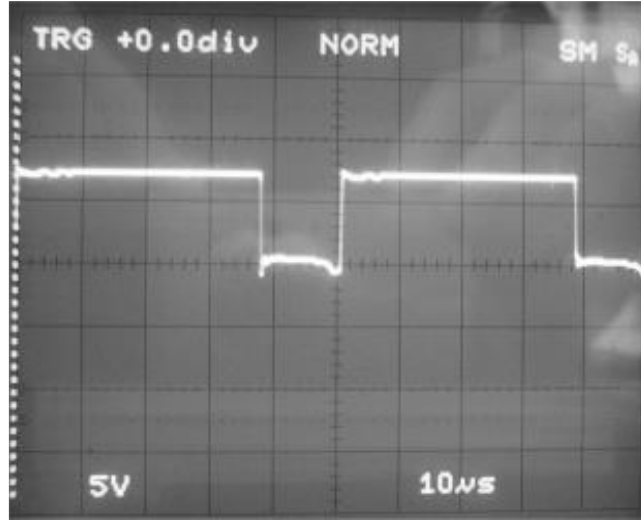
Devredeki optik izolasyon entegresi, güç devresi ile denetim devresini birbirinden elektriki olarak yalıtarak denetim devresini korumaktadır. Aynı zamanda denetim sinyalinin güç devresinden etkilenmesini önlemektedir. Optik yalıtım entegresi yerine yalıtım transformatörüyle de elektrikselsel izolasyon sağlanabilir. Ancak yalıtım transformatöründe birincil devrede oluşacak etkiler ikincil devreye, ikincil devrede oluşacak etkiler birincil devreye veya transformatör yakınlığında oluşacak etkiler her iki tarafa da yansıyacaktır. Bu etkileşim optik yalıtıcılarda daha az olmaktadır.

Sürücü devre çıkışından alınan denetim sinyalinin dalga şekli, güç devresi çalışır durumda ve tam yüklü iken Şekil 5.12'deki gibidir. Sürücü devrede optik yalıtımın olmaması durumunda sinyal Şekil 5.13'deki gibi değişmektedir. Oluşan olumsuz etki sürücü devre çıkışına bağlanacak küçük bir kondansatör aracılığıyla azaltılabilir olsa da, kondansatörün oluşturacağı geçiş anlarındaki gecikmeler nedeniyle MOSFET üzerinde harcanan güç miktarı artar; bu istenmeyen bir durumdur. Şekil 5.14, yapılan sürücü devrenin sinyalleri ile karşılaştırmak amacıyla EXB841 sürücü entegresi çıkışından alınmış denetim sinyalini göstermektedir. Burada entegrenin yarı iletken anahtarı iletme ve yalıtıma götürmek için ürettiği darbelerin geçiş anları yapılan sürücü devresindeki kıyasla daha uzun sürmekte, sonuçta anahtar üzerindeki kayıpların artmasına sebep olmaktadır.

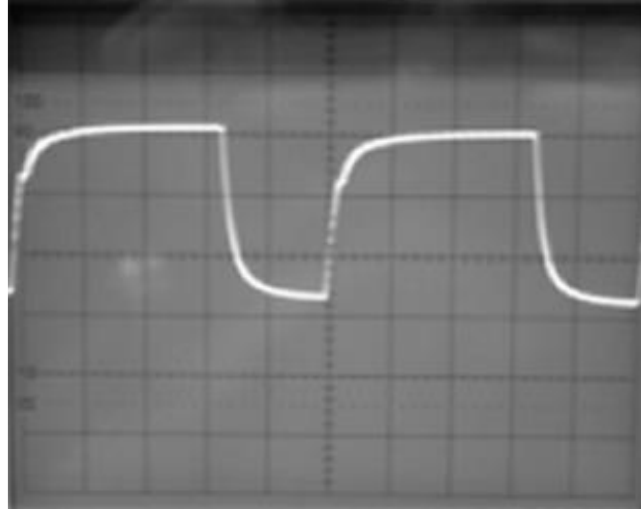


Şekil 5.12: Tam yüklü durumda sürücü devre çıkış sinyali (5V/div).

Anahtar kayıplarını etkileyen bir diğer faktör de geçiş anlarında yarı iletken anahtarın güç uçlarındaki gerilimin ve taşıdığı akımın değeridir. Bunlardan herhangi birinin Bölüm 3.3'deki yöntemler kullanılarak sıfır yapılmasıyla da anahtar üzerinde harcanan güç önemli miktarda azaltılır.



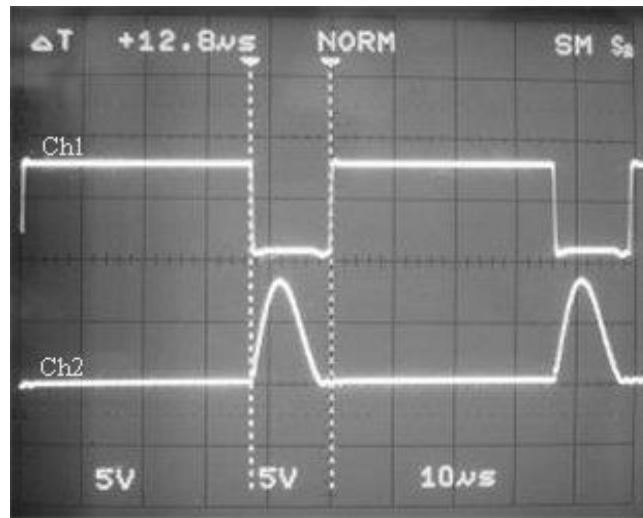
Şekil 5.13: Optik yalıtımsız sürücü devre çıkış sinyali (5V/div).



Şekil 5.14: EXB841 sürücü entegre çıkış sinyali (5V/div, 10µs/div).

5.4.2 Sıfır Gerilim Anahtarlama

E sınıfı invertörde anahtarın durum değiştirme anlarında uçlarındaki gerilimin sıfır olması başarılarak d.a.-a.a. güç dönüştürücü devrenin verimi yükseltilmiş, anahtar için gerekli soğutucu boyutu küçültülmüştür. Şekil 5.15 sıfır gerilim ile anahtarlamaı göstermektedir. Rezonans kondansatörü MOSFET'e paralel olduğu için, kondansatör gerilimi anahtar güç uçlarındaki gerilim ile aynı dalga şekline sahiptir. Şekilde görüldüğü üzere anahtar ilettime veya yalıtıma geçerken uçlarındaki gerilim sıfırdır.

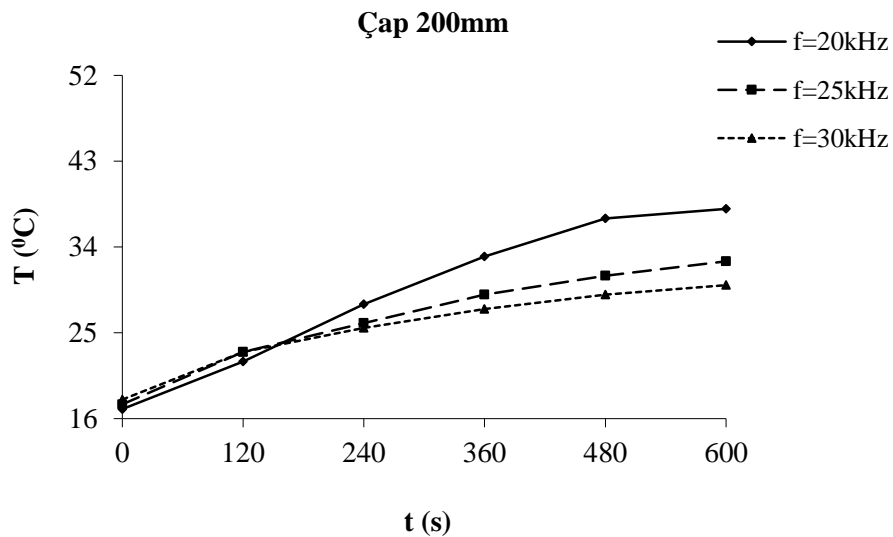


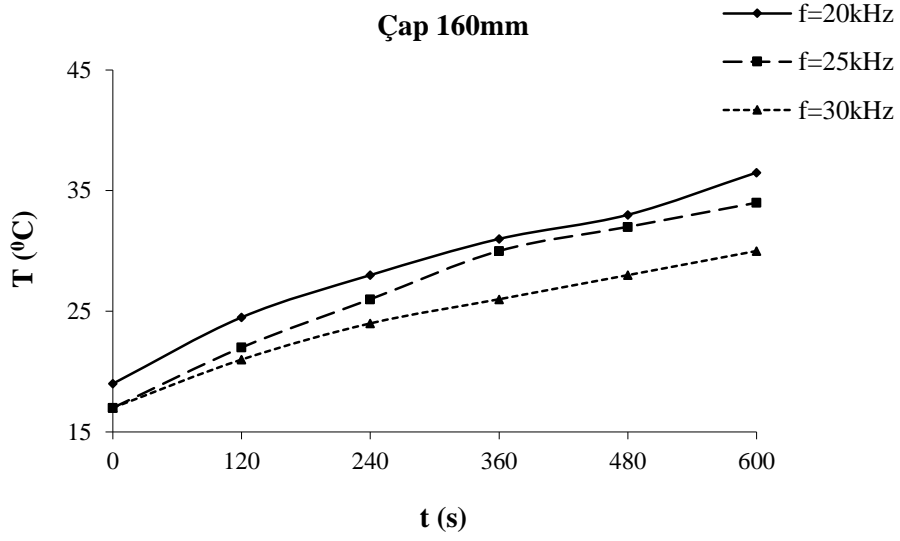
Şekil 5.15: E sınıfı invertörde sıfır gerilim anahtarlama (Ch1:5V/div, Ch2:50V/div).

5.5 E Sınıfı İnvvertörlü İndüksiyon Isıtma Sonuçları

İndüksiyon ısıtma sistemlerinde güç dönüştürücü devrenin veriminin yanı sıra, manyetik devrenin verimi de oldukça önemlidir. İndüksiyon bobini ile yük arasındaki manyetik etkileşim arttırılırsa verim yükselir. Bobin altında ferit nüvelerin kullanılmış olması bunu gerçekleştirmiştir. Etkileşimin kuvvetlendirilmesi için gerekli bir diğer önlem ise, yükün yeterince yüksek bağlı manyetik geçirgenlikli ve dirençli metallere yapılmasıdır (Koertzen ve diğ., 1995).

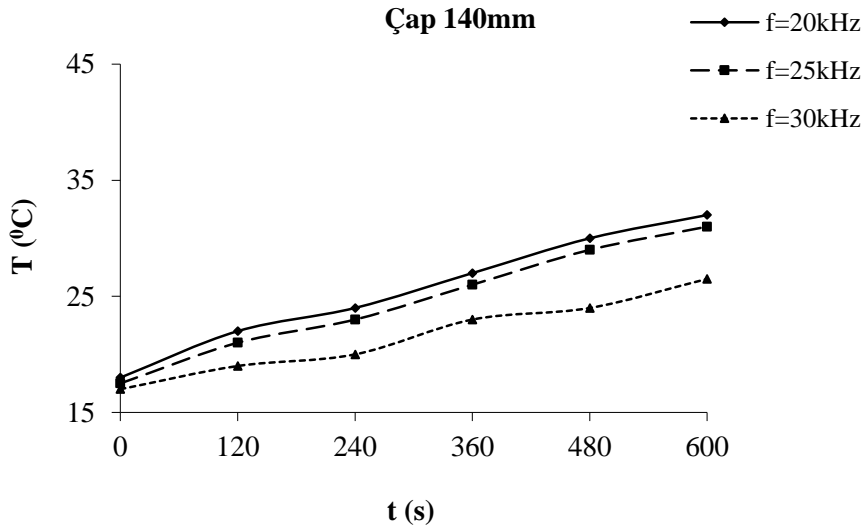
Sistemin ısıtma verimliliğinin incelenebilmesi için bakır ve alüminyuma göre daha yüksek manyetik geçirgenliğe sahip farklı ebatlardaki CrNi yük modelleri ile 10'ar dakikalık ısıtma deneyleri yapılmıştır. Kullanılan çelik tabakaların içindeki suyun ısı değişimi kaydedilerek Şekil 5.16 ve Şekil 5.17'de grafik olarak gösterilmiştir. Yapılan ısı deneylerinde giriş gerilimi, 12 volt alternatif gerilimin doğrultulup filtre edilmesiyle elde edilmiştir. 20, 25 ve 30kHz anahtarlama frekanslarına göre dört farklı yükteki ısı verileri incelenmiştir. Her yük için kullanılan rezonans kondansatörünün değeri aynı, $0.22\mu\text{F}$ 'tır. Bütün yüklerde sıfır gerilim anahtarlama sağlanmıştır. Şekil 5.16'da, $200\times 200\times 0.7\text{ mm}$ tabakadaki 125gr ve $160\times 160\times 0.7\text{ mm}$ tabakadaki 100gr suyun sıcaklık değişimine ait grafikler mevcuttur. Isıtma deneylerinde farklı yük ve frekanslar için giriş gerilimi sabittir.

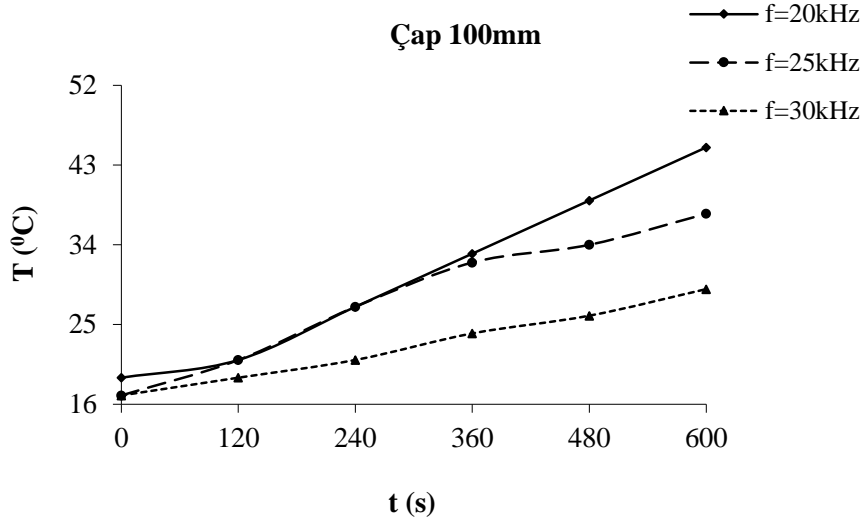




Şekil 5.16: Birer kenarı 200mm ve 160mm olan 0.7 mm kalınlıktaki kare yük modellerine ait sıcaklık değişimi.

Şekil 5.17 ise 140×140×0.7 mm ebatlı yükteki 100gr ve 100×100×0.7 mm ebatlı yükteki 25gr suya ait sıcaklık değişim grafikleridir. Şekil 5.16 ve 5.17’de yük modellerinin üç farklı frekanstaki sıcaklık değişimleri kaydedilmiştir.



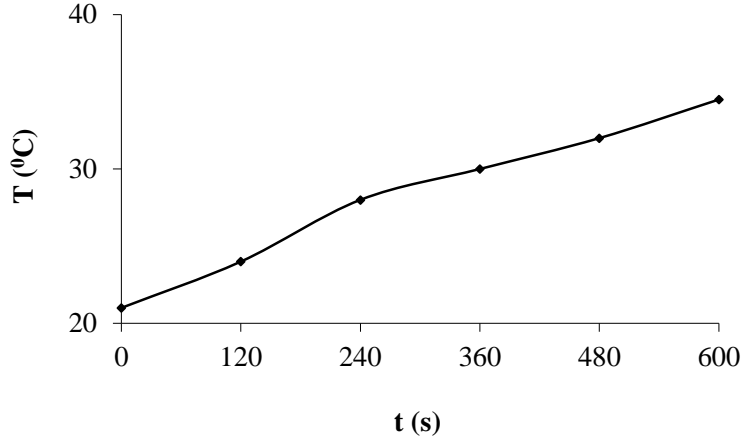


Şekil 5.17: Birer kenarı 140mm ve 100mm olan 0.7mm kalınlıktaki kare yük modellerine ait sıcaklık değişimi.

Şekiller incelendiğinde frekans arttıkça başlangıç ve bitiş süresi sonundaki sıcaklık farkının azaldığı anlaşılır. Bu da frekans yükseldikçe anahtarlama periyodunun düşmesinden ve anahtarın iletim süresinin azalarak bobinde depo edilen enerjinin azalmasından kaynaklanır. Yük ebatları arttıkça aynı sürede suyun ısınma miktarı artmaktadır. Frekans ile ısınma miktarı ise ters orantılıdır.

5.6 İndüksiyon Isıtma Sisteminin Verimi

Sürücü ve güç devresinde alınan önlemlerin etkisinin karşılaştırılabilmesi için IGBT güç anahtarı ve EXB841 sürücü entegresi kullanılarak oluşturulmuş devrede yeni ısıtma sonuçları alınarak ısıtma verimi hesaplanmıştır. 14 volt doğru gerilimde IXGH38N60U1 ters gövde diyotlu yarı iletken güç anahtarı, üst üste konulmuş iki adet 200×200×0.7mm yük ile yapılan E sınıfı invertörlü devrede, 20kHz çalışma frekansındaki 100gr suyun sıcaklık değişimi alınarak grafiği Şekil 5.18'deki gibi oluşturulmuştur. Rezonans kondansatörü 0.33µF kullanılmıştır.



Şekil 5.18: IGBT ile oluşturulmuş E sınıfı invertörlü indüksiyon ısıtıcıda sıcaklık değişimi.

20kHz frekansta ve 200mm kenara sahip yükte farklı iki devrenin sıcaklık değerlerinin karşılaştırılabilmesi için suya ulaşan toplam enerjinin ($Q_{\text{alınan}}$), harcanan elektrik enerjisine (Q_{verilen}) oranı alınarak sistem verimi hesaplanabilir. Eşitlik 5.3, suya ulaşan toplam enerjinin joule (J) cinsinden değerini bulmakta kullanılır.

$$\eta = \frac{Q_{\text{alınan}}}{Q_{\text{verilen}}} \quad (5.2)$$

$$Q = mc\Delta T \quad (5.3)$$

Burada m ısıtılan suyun kütlesi (gr), c suyun özgül ısı değeri ($4.18\text{Jg}^{-1} \text{K}^{-1}$), ΔT alınan sıcaklık farkı ($^{\circ}\text{C}$)'dır. P harcanan güç (W) ve t sıcaklık ölçüm süresi (s) tespit edilerek verilen enerji miktarı bulunur.

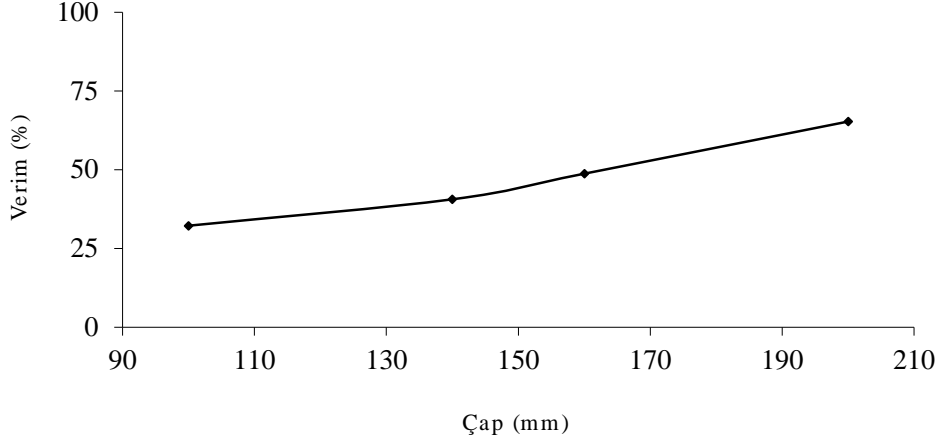
$$Q_{\text{verilen}} = P t \quad (5.4)$$

Elde edilen eşitliklere göre 20kHz anahtarlama IGBT ile yapılan devrede güç 31.5W, ölçüm süresi 600s, 100gr sudaki sıcaklık farkı 13.5°C tespit edilerek, sistemin verimi %29.8 hesaplanmıştır. Aynı anahtarlama frekansında ortalama değeri 10.5 volt doğru gerilim ve

MOSFET ile yapılan E sınıfı invertörlü indüksiyon ısıtma sisteminde 125gr suda 600s'deki sıcaklık değişimi 21°C ve verilen güç 28W tespit edilerek verim %65.3 olarak hesaplanmıştır. Sürücü devredeki, d.a.-a.a. güç dönüştürücüdeki, bobindeki ve manyetik devredeki değişikliklerin yapılması sistem verimine dikkat edilir ölçüde etki etmiştir. Üst üste iki yük modeli olması nedeniyle ısı iletimin azalması, yükün ısıtma bobinine uzak olması, sürücü sinyalindeki geçiş anı gecikmeleri, güç devresinin hat direnci ve endüktansı gibi olumsuz etkenler, aynı frekansta anahtarlama, ısıtma bobini ve yük ebatı kullanılmasına rağmen verimin düşmesine sebep olmuştur. Çalışma gerilimi yükseltildiği takdirde sözü edilen istenmeyen çalışma koşulları, sistemin verimini daha da düşürecek, yarı iletken anahtarın daha fazla ısınmasına sebep olarak soğutucu boyutlarını büyütecek ve anahtar ömrünü kısaltacak, elektromanyetik parazitleri ve radyo frekansı gürültülerini arttıracaktır. Elde edilen verilerden sıfır akım/gerilim anahtarlamanın gerçekleştirilmesinin yarı iletken güç dönüştürücü devrenin performansını arttırmaya yeterli olmadığı, güç ve denetim devreleri ile manyetik elemanların tasarımının da hesaba alınması gerektiği sonucu çıkartılabilir.

İndüksiyon ısıtma ve rezistanslı ısıtma yöntemlerinin karşılaştırılabilmesi için 200×200×0.7mm ebatlı yük modeli kullanılarak 108W'lık rezistanslı ısıtıcı ile ısıtma deneyi yapılmıştır. Yük modeli içerisindeki 125gr suyun 600s'deki sıcaklık değişimi 31°C tespit edilerek, rezistanslı ısıtıcının verimi %24.99 hesaplanmıştır. Verimi %30 civarında olan rezistanslı ısıtıcılarla kıyaslandığında mutfak tipi indüksiyon ısıtıcı ile çok daha yüksek ısıtma verimi elde edilebildiği görülmektedir (Po ve Komatsu, 1998).

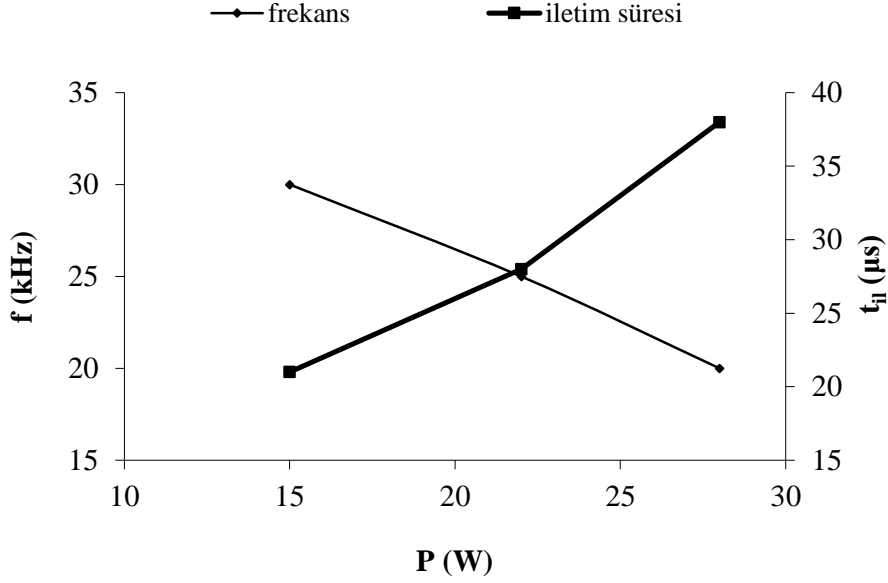
Şekil 5.19, verimi iyileştirmeye yönelik tedbirlerin alındığı güç MOSFET'i kullanılarak yapılmış devrede farklı ebatlardaki yüklerin 20kHz anahtarlama frekansındaki verim değerlerini vermektedir.



Şekil 5.19: Yük ebatlarına göre indüksiyon ısıtma sisteminin verimi.

Yapılan deneylerde çalışma frekansı, ısıtma bobini, yük ile bobin arasındaki mesafe ve kullanılan yüklerin özellikleri aynı seçilmiştir. Şekil 5.19'a göre, elde edilen verim sonuçlarından yük ile ısıtma bobini arasındaki manyetik etkileşimin en iyi $200 \times 200 \times 0.7$ mm ebatlı yük modelinde sağlandığı görülmektedir. Kullanılan yük ebatının artmasıyla verim artmaktadır. Bobin çapına yakın büyüklükte ısıtma kabı kullanılması, devresini yük üzerinden tamamlayamayan akıların sebep olduğu kaçak akı endüktansı değerini azaltmıştır. Bu sebepten kullanılan yükün ebatlarının ısıtma bobini ebatlarına yakın seçilmesi, verimin daha yüksek değerde olmasında etkili olmuştur.

Sabit çalışma geriliminde E sınıfı invertör devrenin çıkış gücünün denetimi, anahtarın iletim süresinin değiştirilmesiyle mümkün olabilmektedir. Yalıtım süresi sabit tutulmak kaydıyla iletim süresi düşürüldüğünde (çalışma frekansı arttırıldığında), çıkış gücü azalır. İletim süresinin azaltılması sıfır gerilim şartlarının sağlanabilmesi için belli bir değere kadar olabilmektedir. Sabit frekansta normal çalışma şartlarının korunabilmesi için çalışma geriliminin veya iletim süresinin düşürülebileceği bir alt değer mevcuttur. Şekil 5.20, tam yüklü durumda farklı frekanslara ve bu frekanslara ait iletim süresine göre çıkış gücünün değişimini vermektedir. Alınan frekans değerleri için anahtarın yalıtım süresi $12 \mu s$ 'dir.



Şekil 5.20: Tam yükte çıkış gücünün frekans ve iletim süresi ile değişimi.

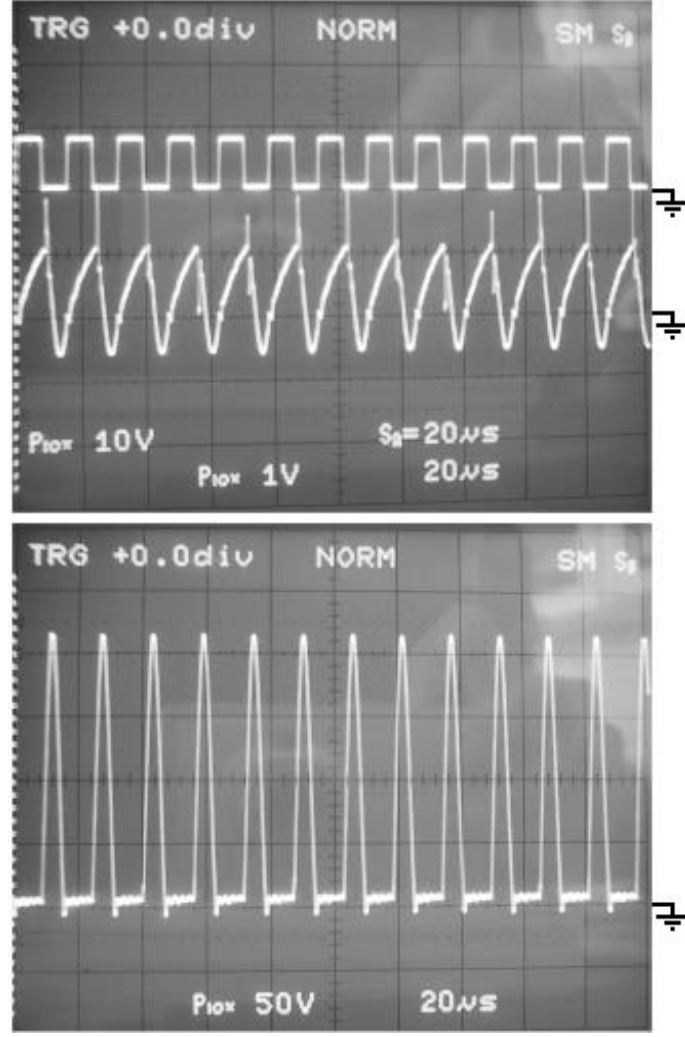
Çalışma geriliminin veya iletim süresinin sınır değerinin altına düşülmesi sakıncalı olduğu için E sınıfı invertör çıkış gücünün denetimi de belli bir değere kadar olmaktadır. Daha geniş aralıkta çıkış gücü denetim edilmek istenilirse, farklı rezonans kondansatörleri ile yeni çalışma koşulları elde edilebilir.

5.7 E Sınıfı İntertörlü İndüksiyon Isıtıcıda Çıkış Gücü Denetimi

E sınıfı invertörde anahtarın iletim süresinin değiştirilmesiyle yapılan güç denetimine ilave olarak sabit frekansta denetim darbelerinden bazılarının silinmesiyle çıkış gücünün denetimi gerçekleştirilmiştir. Silinen denetim darbeleri nedeniyle mutfak tipi induksiyon ısıtmada oluşan duyulabilir seslerin önlenmesi için çalışma frekansı 50kHz'in üzerinde seçilmiştir. Yapılan uygulamaya yönelik induksiyon ısıtma sisteminin parametreleri aşağıdaki gibidir:

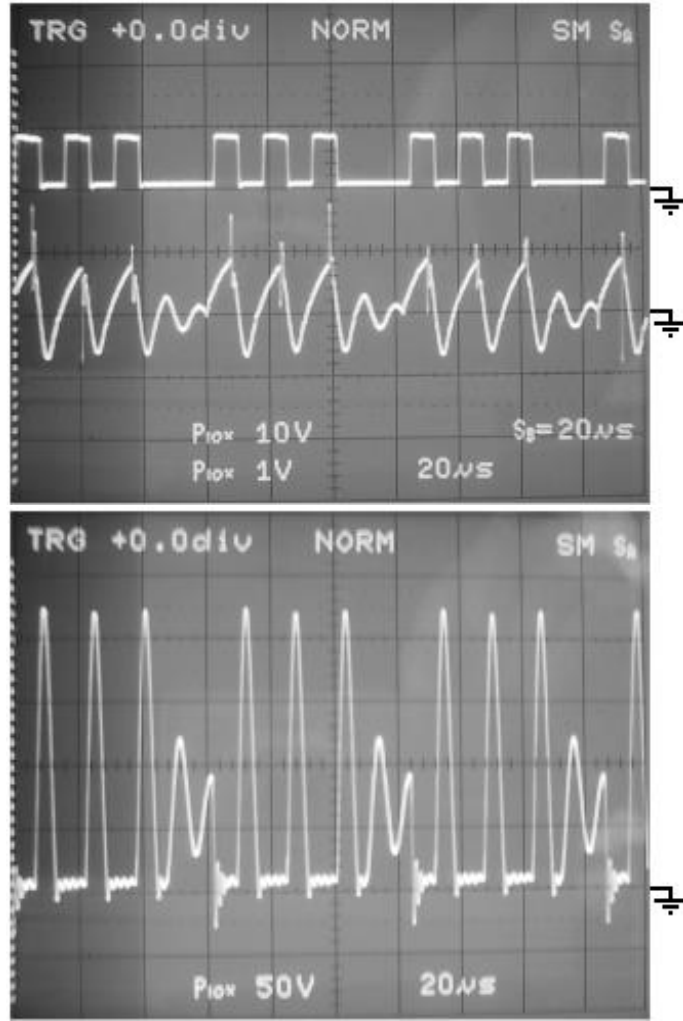
- Çalışma gerilimi: 60V doğru gerilim.
- Çalışma frekansı: 62.5kHz.
- Giriş gücü: 130W.
- Rezonans frekansı: 104kHz.

Yük modeli olarak kullanılan $200 \times 200 \times 0.7$ mm ebatlı CrNi yük modeli ve ısıtma bobininin 62.5kHz'de eşdeğer direnç ve endüktansı 2.9Ω ve $28.5\mu\text{H}$ bulunmuştur. Arzu edilen rezonans frekansında sıfır gerilim anahtarlama için Eşitlik 4.26'ya göre $8\mu\text{s}$ anahtar yalıtım süresi yeterli olmaktadır. Devrede rezonans kondansatörü olarak 82nF polipropilen kondansatör kullanılmıştır. Osiloskopta yük akımının ölçülebilmesi için ısıtma bobinine seri 0.1Ω direnç bağlanmıştır. Anahtara seri bağlanan Şekil 4.14'deki iletim durumu söndürme devresinde söndürme endüktansı $1.4\mu\text{H}$, direnç 0.26Ω ve diyot RURG50100 kullanılmıştır. Şekil 5.21 sıfır gerilim şartlarının sağlandığı normal çalışma IRFP460 MOSFET sürme sinyalini, ısıtma bobini akımını ve rezonans kondansatörü gerilimini göstermektedir. Normal çalışmada devre E sınıfı invertör çalışma şartlarını sağladığı için tüm anahtarlama periyotları sıfır gerilim ile gerçekleştirilmektedir. Bu sebepten maksimum çıkış gücü söndürme devresine ihtiyaç duyulmadan da elde edilebilir. İhtiyaç duyulan diğer denetim sinyalleri kare dalga üretici, sayısal mantık kapıları (74LS04, 74LS08, 74LS32) ve JK flip-flop (74LS112) entegreleri kullanılarak oluşturulmuş devre ile elde edilmiştir.



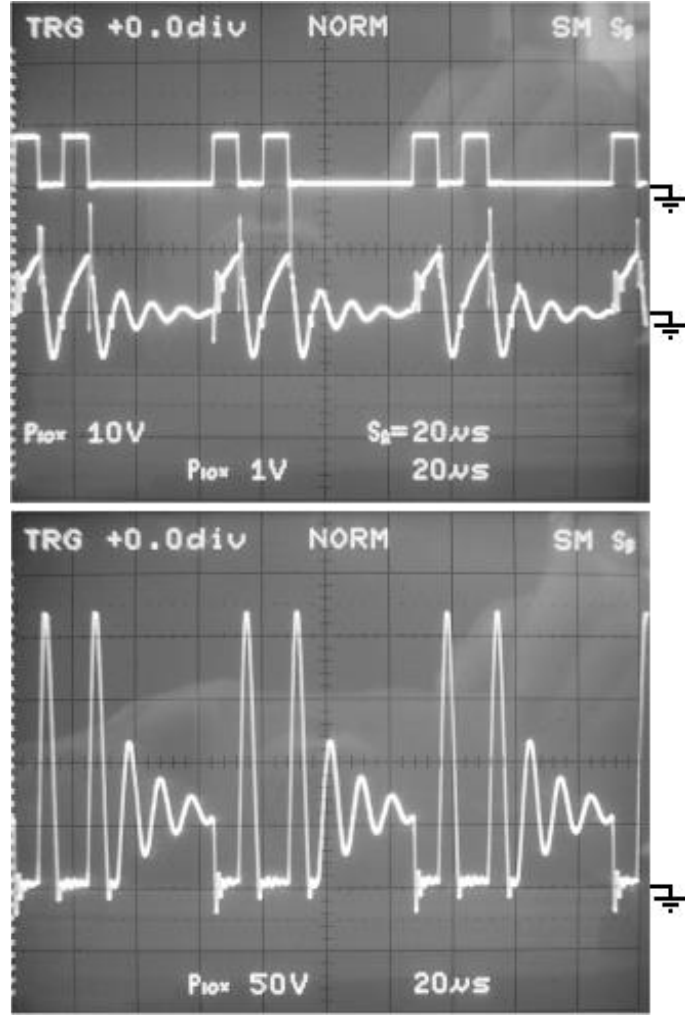
Şekil 5.21: Normal çalışma (4N/0D) sürme sinyali (10V/div), bobin akımı (10A/div) ve kondansatör gerilimi (50V/div).

Şekil 5.22, Şekil 5.23 ve Şekil 5.24'te sırasıyla Denetim1, Denetim2 ve Denetim3 sürme sinyallerine ait bobin akımı, kondansatör gerilimi dalga şekilleri verilmektedir. Her üç şekilde de denetim periyodu süresince akım ve gerilim sönümlü salınım oluşturmaktadır. Denetim periyodunun ardından anahtarın iletme geçirilmesiyle, anahtar yaklaşık olarak giriş gerilimi değerine eşit kondansatör gerilimini kısa devre etmektedir. İletim durumu söndürme devresi ile anahtarın yüksek di/dt oranından etkilenmesi önlenmiştir.

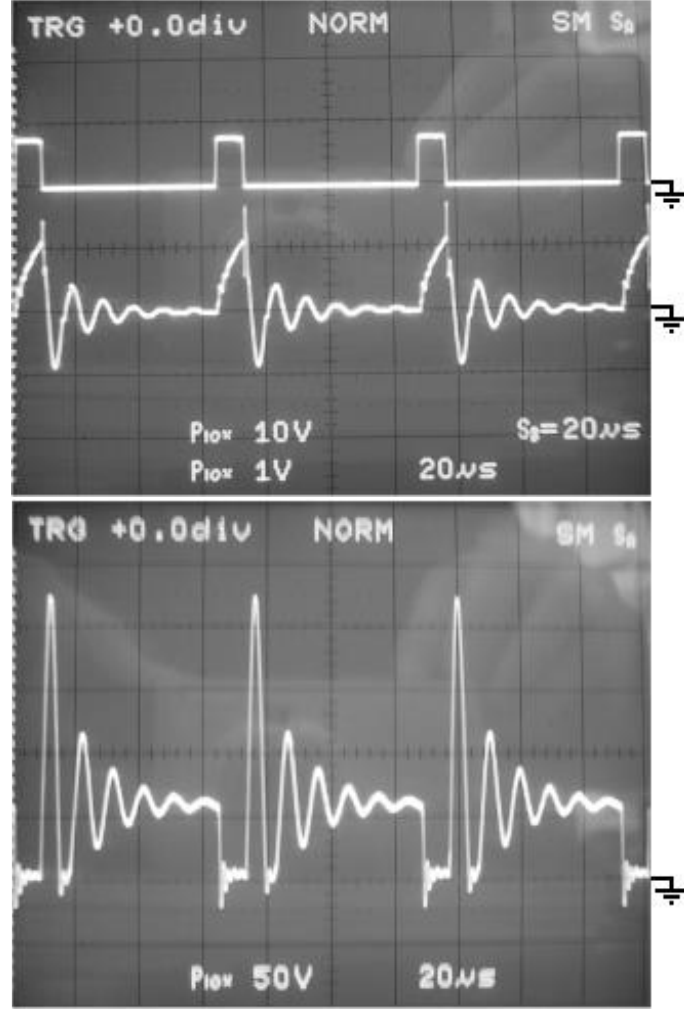


Şekil 5.22: Denetim1 (3N/1D) sürme sinyali (10V/div), bobin akımı (10A/div) ve kondansatör gerilimi (50V/div).

Çizelge 5.1 farklı denetim sinyallerinde ölçülen giriş gücü ve bobin akımı tepe değerlerini göstermektedir. Sürme sinyalindeki denetim periyodunun sayısı arttıkça güç azalmaktadır. Benzetim ve hesaplama sonuçları Çizelge 4.2’de verilmiştir.



Şekil 5.23: Denetim2 (2N/2D) sürme sinyali (10V/div), bobin akımı (10A/div) ve kondansatör gerilimi (50V/div).



Şekil 5.24: Denetim3 (1N/3D) sürme sinyali (10V/div), bobin akımı (10A/div) ve kondansatör gerilimi (50V/div).

Çizelge 5.1: Farklı sürme sinyallerinde alınan deneysel sonuçlar.

| Sürme Sinyali | Giriş Gücü (W) | Im (A) |
|------------------|----------------|--------|
| Normal (4N/0K) | 143.4 | 10.4 |
| Denetim1 (3N/1D) | 119.4 | 9.8 |
| Denetim2 (2N/2D) | 82.2 | 10 |
| Denetim3 (1N/3D) | 43.8 | 11 |

ALTINCI BÖLÜM SONUÇ VE DEĞERLENDİRME

6.1 Sonuç ve Değerlendirme

Mutfaklarda kullanılan metal kapların ısıtılmasında kullanılacak bir fazlı orta frekanslı bir indüksiyon ısıtma sisteminin tasarımı gerçekleştirilerek sistemin matematiksel hesaplamaları ve elektronik benzetim sonuçları yapılan deneysel ölçümler ile karşılaştırılmıştır.

Güç elektroniği uygulamalarında yarı iletken güç dönüştürücü devrenin verimi sistem verimini doğrudan etkilemektedir. Bu sebepten mutfak tipi indüksiyon ısıtıcıda kullanılan d.a.-a.a. güç dönüştürücü devredeki kayıplar azaltılmalıdır. Rezonans anahtarlama ile elektromanyetik parazitler ve anahtarlama kayıpları azaltılabilir. Bununla birlikte anahtarın iletimden yalıtıma, yalıtımdan iletme geçme süreleri en düşük seviyelere indirilmelidir. E sınıfı invertör ve optik yalıtımlı MOSFET sürücü devre ile sistemin anahtarlama kayıpları azaltılmıştır. Sıfır gerilim anahtarlama koşulları farklı büyüklükteki yükler için gerçekleştirilmiştir. Azalan anahtarlama kayıpları nedeniyle yarı iletken için daha küçük ebatlarda soğutucu kullanılabilir. Aynı zamanda devrede kullanılan yarı iletken anahtar ve sürücü sayısı azaldığı ve koruyucu devreye ihtiyaç duyulmadığı için güç dönüştürücü ünitenin hacmi küçülmüş ve maliyeti azalmıştır.

Uygulaması yapılan mutfak tipi indüksiyon ısıtıcıda yük ile bobin arasındaki manyetik etkileşimin artırılması, yüke uygun şekillendirilmiş indüksiyon bobini ve yüksek manyetik geçirgenlikli paslanmaz çelik ısıtma kaplarının kullanılmasıyla gerçekleştirilmiştir. Bununla birlikte bobin ve yük arasındaki hava boşluğunun azaltılması da etkileşimi arttırmaktadır. İndüksiyon bobinindeki bakır ve nüve kayıplarının azaltılabilmesi amacıyla litz telinden sarılmış yassı tabanlı bobin ve ferit nüve blokları kullanılmıştır.

İndüksiyon ısıtma sistemlerinde çalışma frekansı arttıkça verim artmaktadır. Ancak mutfak tipi indüksiyon ısıtıcılarda frekans aralığı yüksek frekanslarda oluşabilecek radyo frekansı gürültüleri ve daha yüzeysel ısıtma gerçekleşmesi nedeniyle orta frekans ile sınırlıdır. Düşük çalışma frekansları insanların ve evlerde bakılan evcil hayvanların duyma sınırının üzerinde seçilmelidir.

Uygulamada kullanılan yarı iletken anahtar seçilirken denetim devresi kayıpları, çalışma frekansı, akım taşıma kapasitesi, dahili diyot içermesi ve gerilim bloke edebilme kapasitesi gibi özellikleri göz önünde bulundurulmuştur. Devrede mutfak tipi indüksiyon ısıtma frekans aralığına uygun güç MOSFET'i kullanılmıştır. MOSFET'in eşik gerilimi değerine uygun iletim ve yalıtım sinyali üreten sürücü devrenin yapılmasıyla anahtarlama geçiş kayıpları azaltılmıştır.

Tek anahtarlı rezonans güç dönüştürücülü indüksiyon ısıtıcılarda güç denetimi anahtarın iletim süresinin değiştirilmesiyle sağlanabilmektedir. E sınıfı invertörde anahtarın iletim süresi arttıkça çıkış gücü artmaktadır; sıfır gerilim anahtarlama şartlarının bozulmaması için güç denetimi yapılırken anahtarın yalıtım süresi sabit tutulmalıdır. Bu çalışmada iletim süresinin değiştirilerek farklı frekanslarda güç denetiminin yanı sıra, sabit iletim ve yalıtım süresi içeren sürme sinyalinin darbelerinden bazılarının silinmesi yöntemiyle de çıkış gücünün denetimi mümkün kılınmıştır. Kullanılan yöntemde de sıfır gerilim anahtarlama koşulları sağlandığı için, anahtar kayıpları önemli oranda arttırılmadan geniş aralıkta kademe kademe güç denetimi gerçekleştirilmiştir. İhtiyaç duyulan denetim darbeleri basit bir dijital devre ile elde edilmiştir. Sabit frekansta güç denetiminde anahtara seri iletim durumu söndürme devresi kullanılarak silinen darbelerin ardından gelen anahtarlama anında anahtarın zarar görmesi engellenmiştir. Söndürme devresine ihtiyaç duyulması ve mutfak tipi indüksiyon ısıtmada duyulabilir sesler nedeniyle çalışma frekansının kısıtlanması, sabit frekans denetimli güç denetim yönteminin olumsuz yönleri olarak sıralanabilir.

Güç dönüştürücü devre girişinde kullanılan pasif filtre ile bir fazlı hat akımındaki harmonik bozulma azaltılmış ve akımın yüksek frekans bileşenleri süzölmüştür.

Mutfaklarda kullanılan rezistanslı tip ısıtıcılar ile kıyaslandığında uygulaması gerçekleştirilen mutfak tipi indüksiyon ısıtıcı ile %40 daha yüksek ısıtma verimi elde edilmiştir.

KAYNAKLAR

Agrawal, J. P., Power Electronic Systems Theory And Design, (1st Ed.) Prentice Hall, ISBN 0-13-442880-3, 562p., New Jersey, 2001.

Balbozan, E., Endüksiyon Isıtma, Dokuz Eylül Üniversitesi Mühendislik Mimarlık Fakültesi, Elektrik Elektronik Bölümü, Yüksek Lisans Tezi, 1984.

Bin Yusoff, M., Sekiya, H., Lu, J., Yahagi, T., Class E Inverter Using Thinned Out Method, The 25th International Telecommunication Energy Conference, 713-720, 2003.

Boonyaroonate, I., Mori, S., Analysis And Design Of Class E Isolated DC/DC Converter Using Class E Low dv/dt PWM Synchronous Rectifier, IEEE Transactions On Power Electronics, Vol. 16(4), 514-521, 2001.

Calleja, H., Ordonez, R., Induction Heating Inverter With Active Power Factor Correction, Int. J. Electronics, Vol. 86(9), 1113-1121, 1999.

Chatterjee, K., Design Of Induction Heaters, M.Sc. Thesis, Indian Institute Of Science, Bangalore, 1991.

Chatterjee, K., Ramanarayanan, V., A Comparative Study Of Inverter Circuits For Induction Heating, International Power Engineering Conference, 537-542, 1993.

Chen, M. P., Chen, J. K., Murata, K., Nakahara, M., Harada, K., On The Switching Surge In The Current Resonant Inverter For The Induction Furnace Application, Transaction Of The Institute Of Electrical Engineers Of Japan, Vol. 121-D(6), 658-668, 2001.

Davies, J., Simpson, P., Induction Heating Handbook, McGraw-Hill Book Company, ISBN 0-07-084515-8, 426p., Berkshire (UK), 1979.

- Elfallah, A., Ermiş, M., Tosun, H., Endüksiyonla Düzgün Isıtma Uygulamalarında İş Bobini Tasarımı, Elektrik Mühendisliği 2. Ulusal Kongresi, 753-756, 1987.
- Espi, J. M., Dede, E. J., Design Considerations For Three Element L-LC Resonant Inverters For Induction Heating, Int. J. Electronics, Vol. 86(10), 1205-1216, 1999.
- Feng, S., Optimal Trajectory Control Of Series Resonant Converter, MSc. Thesis, Lakehead University, Canada, 2001.
- Forest, F., Laboure, E., Costa, F., Principle Of A Multi Load Single Converter System For Low Power Induction Heating, IEEE Transactions On Power Electronics, Vol. 15(2), 223-230, 2000.
- Fujii, M., Suetsugu, T., Shinoda, K., Mori, S., Class E Rectifier Using Thinned-out Method, IEEE Transactions On Power Electronics, Vol. 12(5), 832-836, 1997.
- Garcia, J. R., Burdio, J. M., Martinez, A., Sancho, J., A Method For Calculating The Workpiece Power Dissipation In Induction Heating Processes, IEEE Applied Power Electronics Conference And Exposition, Vol. 1, 302-307, 1994.
- Grajales, L., Analysis And Design Of A 500kHz Series Resonant Inverter For Induction Heating Applications, Ph.D. Thesis, Virginia Polytechnic Institute And State University, Virginia, 1995.
- Hernandez, P., Monterde, F., Burdio, J. M., Garcia, J. R., Power Loss Optimisation Of Foil Coils For Induction Cooking, 24th Annual Conference Of The IEEE Industrial Electronics Society, Vol. 1, 371-374, 1998.
- Hernandez, P., Monterde, F., Burdio, J. M., Garcia, J. R., Llorente, S., Power Losses Distribution In The Litz Wire Winding Of An Induction Cooking Appliance, 28th Annual Conference Of The IEEE Industrial Electronics Society, Vol. 2, 1134-1137, 2002.
- Hinchliffe, S., Thomas, K., Hobson, L., High Efficiency Power Sources For HF Electric Process Heating Applications, Int. J. Electronics, Vol. 63(1), 117-122, 1987.

- Hirota, I., Omori, H., Nakaoka, M., Practical Evaluations Of A ZVS-PFM Quasi Load Resonant High Frequency Inverter Using A New Generation IGBT For An Induction Heated Cooking Appliance, *Int. J. Electronics*, Vol. 80(2), 329-340, 1996.
- Hobson, L., Tebb, D. W., Turnbull, D., Dual Element Induction Cooking Unit Using Power MOSFETs, *Int. J. Electronics*, Vol. 59(6), 747-757, 1985.
- Imai, T., Sakiyama, K., Hirota, I., Omori, H., A Study Of Impedance Analysis For An Induction Heating Device By Applying A New Interpolation Method, *IEEE Transaction On Magnetics*, Vol. 33(2), 2143-2146, 1997.
- Ivensky, G., Zeltser, I., Kats, A., Ben-Yaakov, S., Reducing IGBT Losses In ZCS Series Resonant Converters, *IEEE Transaction On Industrial Electronics*, Vol. 46(1), 67-74, 1999.
- Jain, N., A Zero Voltage Switching Boost Converter Using A Soft Switching Auxiliary Circuit With Reduced Conduction Losses, MSc. Thesis, Concordia University, Canada, 2000.
- Jung, Y., Dual Half Bridge Series Resonant Inverter For Induction Heating Appliance With Two Loads, *Electronic Letters*, Vol 35(16), 1345-1346, 1999.
- Kang, C. G., Seo, P. K., Jung, H. K., Numerical Analysis By New Proposed Coil Design Method In Induction Heating Process For Semi-solid Forming And Its Experimental Verification With Globalization Evaluation, *Material Science And Engineering*, Vol. 34(1-2), 121-138, 2003.
- Kassakian, J. G., Schlecht, M. F., Verghese, C. G., *Principles Of Power Electronics*, Addison Wesley Publishing Company, ISBN 0-201-09689-7, 738p., USA, 1991.
- Kazimierczuk, M. K., Czarkowski, D., *Resonant Power Converters*, John Wiley & Sons Inc., ISBN 0-471-04706-6, 512p., Canada, 1995.

Khan, S., Ahamed, M., Khan, M. A., Ul-Haq, A., Innovative Applications Of Induction Heating For Selective Heat-Treatment, *Quarterly Science Vision*, Vol. 5(4), 14-19, 2000.

Khan, A., Batarseh, I., Zero Voltage Switching Boost Converter For Power Factor Correction, *Int. J. Electronics*, Vol. 78(6), 1177-1188, 1995.

Koertzen, H. W., Van Wyk, J. D., Ferreira, J. A., Design Of The Half Bridge Series Resonant Converter For Induction Cooking, *IEEE Power Electronics Specialists Conference*, Vol. 2, 729-735, 1995.

Koizumi, H., Sekiya, H., Matsuo, M., Mori, S., Sasae, I., Resonant DC/DC Converter With Class DE Inverter And Class E Rectifier Using Thinned Out Method, *IEEE Transactions On Circuits And Systems*, Vol. 48(1), 123-126, 2001.

Lai, J. S., Resonant Snubber Based Soft Switching Inverters For Electric Propulsion Drives, *IEEE Transaction On Industrial Electronics*, Vol. 44(1), 71-80, 1997.

Lee, B. K., Jung, J. W., Suh, B. S., Hyun, D. S., A New Half Bridge Inverter Topology With Active Auxiliary Resonant Circuit Using Insulated Gate Bipolar Transistors For Induction Heating Applications, *IEEE Power Electronics Specialists Conference*, Vol. 2, 1232-1237, 1997.

Leisten, J. M., Hobson, L., Parallel Resonant Power Supply For Induction Cooking Using A GTO, *Fourth International Conference On Power Electronics And Variable-Speed Drives*, 224-230, 1990.

Lin, B., Huang, T., Zero Current Switching CUK Converter For Power Factor Correction, *Electric Power System Research*, Vol. 41, 91-98, 1997.

Liu K. H., Oruganti R., Lee F. C., Resonant Switches-Topologies And Characteristics, *IEEE Power Electronics Specialists Conference*, 0275-9306, 106-116, 1985.

- Llorente, S., Monterde, F., Burdio, J. M., Acero, J., A Comparative Study Of Resonant Inverter Topologies Used In Induction Cookers, IEEE Applied Power Electronics Conference And Expositions, Vol. 2, 1168-1174, 2002.
- Mohan, N., Undeland, T. M. And Robbins, W. P., Güç Elektroniği Çeviriciler Uygulamalar Ve Tasarım (Çev: Nejat Tuncay, Metin Gökaşan, Seta Boğoysan), John Willey And Sons Publication, 874p., USA, 1989.
- Omori, H., Nakaoka, M., New Single Ended Resonant Inverter Circuit And System For Induction Heating Cooking Apparatus, Int. J. Electronics, Vol. 67(2), 277-296, 1989.
- Peng, F. Z., Su, G. J., Tolbert, L. M., A Passive Soft Switching Snubber For PWM Inverters, IEEE Annual Power Electronics Specialist Conference, Vol. 1, 129-134, 2002.
- Po, W., Komatsu, W., A Simple And Reliable Class E Inverter For Induction Heating Applications, Int. J. Electronics, Vol. 84(2), 157-165, 1998.
- Ponce, M., Arau, J., Alonso, M., Rico-Secades, M., Analysis Of The Class E Amplifier Used As Electronic Ballast With Dimming Capability For Photovoltaic Applications, Int. J. Electronics, Vol 88(7), 831-846, 2001.
- Rashid, M. H., Power Electronics Circuit Devices And Applications, (2st Ed.) Prentice Hall, ISBN 0-13-334483-5, 702p., New Jersey, 1993.
- Runde, M., Magnusson, N., Induction Heating Of Aluminium Billets Using Superconducting Coils, Physica C: Superconductivity, Vol. 372-376(3), 1339-1341, 2002.
- Sazak, B. S., A Capacitor Voltage Calamped Dual Half Bridge Series Resonant Inverter For Home Cooking Applications, Int. J. Electronics, Vol 91(5), 279-287, 2004.
- Sazak, B. S., Design Of 500W Resonant Induction Heater, Pamukkale Üniversitesi Mühendislik Fakültesi Mühendislik Bilimleri Dergisi, Vol. 5(1), 871-878, 1999.
- Seelig, A., Medium Frequency Inverters For Inductive Cooking, Wissenschaftliche Briche AEG Telefunken, Vol. 55(n1-2), 80-89, 1982.

Sekiya, H., Matsuo, M., Koizumi, H., Suetsugu, T., Mori, S., Sasae, I., New Control Method Of Class DE Inverter Class DE Thinning-out Inverter, 20th International Telecommunications Energy Conference, 237-242, 1998.

Sekiya, H., Mori, S., Sasase, I., Lu, J., Yahagi, T., Computation Of Design Values For Class E Inverter Without Using Waveform Equations, Midwest Symposium On Circuits And Systems, Vol. 2, 960-963, 2001.

Sekiya, H., Nemoto, S., Lu, J., Yahagi, T., Phase Control Of Resonant DC/DC Converter With Class DE Inverter And Class E Rectifier, European Conference On Circuit Theory And Design, 121-124, 2003.

Sipolla, M., Sepponen, R., A New AC/DC Converter Topology With High Power Factor, Int. J. Electronics, Vol. 89(3), 245-258, 2002.

Slonim, M. A., Van Wyk, J. D., Schoeman, J. J., Analysis Of Transient And Steady State Processes In The Series Resonant Inverter, Int. J. Electronics, Vol. 64(2), 323-332, 1988.

Sokal, N. O., Sokal, A. D., Class E A New Class Of High Efficiency Tuned Single Ended Switching Power Amplifiers, IEEE Journal Of Solid State Circuits, Vol. 10(3), 168-176, 1975.

Song, J., Greenwood, A., Batarseh, I., Analysis And Design Of Zero Voltage Switching Class E Converter, Proceedings Of The 1996 IEEE SOUTHEASTCON Conference, 545-550, 1996.

Tanaka, T., New Induction Cooking Range For Heating Any Kind Of Metal Vessels, IEEE Transaction On Consumer Electronics, Vol 35(3), 635-641, 1989.

Trivedi, M., High Performance Insulated Gate Bipolar Transistors For Soft Switching Power Converters, Ph.D. Thesis, Illinois University, Chicago, 2001.

Yıldırım, G., Gülgün, R., Güç Elektroniğinin Endüksiyonla Isıtmada Kullanılması, Bursa 2. Elektromekanik Sempozyumu, 69-75, 1988.

Witulski, A. F., Introduction To Modeling Of Transformers And Coupled Inductors, IEEE Transaction On Power Electronics, Vol. 10(3), 349-357, 1995.

Zhang, J. F., Pu, Q., Zhang, Y. Q., Zhang, D. H., Single Phase Series Resonant Converter With High Power Factor Input For High Frequency Induction Heating, Proceeding Of The First International Power Electronics And Motion Control Conference, 313-318, 1994.

ÖZGEÇMİŞ

Adı, Soyadı : Selim ÖNCÜ
Ana Adı : Zühriye
Baba Adı : Mevlüt
Doğum Yeri ve Tarihi : Kdz. Ereğli/ 11.10.1978
Lisans : Gazi Üniversitesi Teknik Eğitim Fakültesi Elektrik Eğitimi
Bölümü, 2001
Çalıştığı Yer : Pamukkale Üniversitesi Teknik Eğitim Fakültesi
Yabancı Dil : İngilizce