



**T.C.**  
**SELÇUK ÜNİVERSİTESİ**  
**FEN BİLİMLERİ ENSTİTÜSÜ**



**ISITMA BULGULARINDA ENDÜSTRİYEL  
ISITMANIN UYGULANABİLİRLİK**

**Bayram Volkan REZİSOĞLU**

**YÜKSEK LİSANS TEZİ**

**Elektrik-Elektronik Mühendisliği Anabilim Dalı**

**Haziran-2017**  
**KONYA**  
**Her Hakkı Saklıdır**

## TEZ KABUL VE ONAYI

Bayram Volkan RE SO LU tarafından hazırlanan “ISITMA BUJ LER NDE NDÜKS YON ISITMANIN UYGULANAB L RL ” adlı tez çalışması 01/06/2017 tarihinde a a ıdaki jüri tarafından oy birli i ile Selçuk Üniversitesi Fen Bilimleri Enstitüsü Elektrik-Elektronik Mühendisli i Anabilim Dalı’nda YÜKSEK L SANS olarak kabul edilmiştir.

### Jüri Üyeleri

#### Ba kan

Prof.Dr. Saadetdin HERDEM

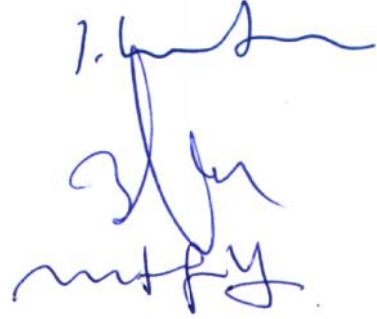
#### Danı man

Yrd.Doç.Dr. Bayram AKDEM R

#### Üye

Yrd.Doç.Dr. Mustafa YA CI

mza



Yukarıdaki sonucu onaylım.

Prof. Dr. Mustafa YILMAZ  
FBE Müdürü

## TEZ B LD R M

Bu tezdeki bütün bilgilerin etik davranı ve akademik kurallar çerçevesinde elde edildi ini ve tez yazım kurallarına uygun olarak hazırlanan bu çalı mada bana ait olmayan her türlü ifade ve bilginin kayna ma eksiksiz atıf yapıldı nı bildiririm.

## DECLARATION PAGE

I hereby declare that all information in this document has been obtained and presented in accordance with academic rules and ethical conduct. I also declare that, as required by these rules and conduct, I have fully cited and referenced all material and results that are not original to this work.



Bayram Volkan REİSOĞLU  
02.06.2017

## ÖZET

### YÜKSEK LİSANS TEZİ

#### ISITMA BUJİLERİNDE İNDÜKSİYON ISITMANIN UYGULANABİLİRLERİ

Bayram Volkan REİSOĞLU

Selçuk Üniversitesi Fen Bilimleri Enstitüsü  
Elektrik-Elektronik Mühendisliği Anabilim Dalı

Danışman: Yrd.Doç.Dr. Bayram AKDEMİR

2017, 80 Sayfa

#### Jüri

Prof.Dr. Saadetdin HERDEM  
Yrd.Doç.Dr. Mustafa YALÇIN  
Yrd.Doç.Dr. Bayram AKDEMİR

Sonuç ortamlarda ve don gibi elverişsiz çalışma koşullarında dizel motorlar sadece havanın sıkı tırılmasıyla kendiliğinden tutulması için gerekli olan sıcaklığa ulaşamaz. Bu nedenle yanma odalarına ek ısı gönderilmesi ihtiyacı doğar. Sonuç dizel motorlarının kolay çalışmasını sağlayan bu sisteme ön ısıtma denir.

Ön ısıtma sistemi ile Cold Start olarak isimlendirilen sonuç çalıştırma durumlarında düşük sıcaklıklarda motorun çalıştırılması kolaylaşır. Bu ısınmayla sonuç hava koşullarında motorun çalışmaya yeteneği ciddi oranda artar.

1960'lı yıllarda ilk çalıştırma süreleri 30 saniye gibi uzun sürelerle kadar çıkabiliyordu. 1980'lerde bu süre 3-5 saniyeye kadar kısaltılabilmektedir. TDI motorların kullanılmaya başlaması ile yani ısıtma bujilerine ihtiyaç duyulması ile 0°C üstündeki ortam sıcaklıklarında benzinli motorlar ile aralarındaki fark uygulamalarda belli olmayacak kadar azaltıldı ve sadece 0°C altındaki ortam sıcaklıklarında ön ısıtma sistemlerine gerek duyulmaktadır.

Isıtma bujilerinin temel görevi, ilk çalıştırma için yanma odasına ilave ısı sağlamaktır. Isıtma bujilerinin çalışmaya prensibi basit olarak ifade edilebilir; içlerinde bulunan rezistanslar kontak açıldıktan sonra motor çalıştırılmadan önce kızdırma borusunu kızdırır ve bunun sonucunda yanma odası 800°C üzerindeki sıcaklıklara kadar ısıtılmı olur. Bu seviyedeki sıcaklıklar motorların sonuçta çalıştırılma yeteneklerini oldukça arttırmaktadırlar. Isıtma bujilerinin oluşturmaları bu ilave ısı, yanma sürelerinin daha iyi koşullarda olmasını sağladıkları gibi motorların daha gürültüsüz çalışmasını da sağlar. Böylece duman oluşumu ve emisyonlar azaltılır.

Isıtma bujileri ile ilgili gelişmeler devam etmektedir. Sonradan da kızdırma yapabilen ısıtma bujilerine ihtiyaç duyulabilmektedir. Isıtma bujilerinin sadece ilk çalıştırma anında değil, motor sıcaklığına göre ısınma süresince de belirli aralıklarla çalışması istenebilmektedir. Ancak bu sayede ilk çalıştırmadan hemen sonra motorun rahat çalışması ve emisyon oranlarının düşmesi sağlanabilir. Bundan dolayı ısıtma bujilerinin ömürleri konusunda yapılan çalışmalar devam etmektedir.

İndüksiyon ısıtma teknolojisi tam bu yeni teknik arayışlar noktasında devreye girmektedir. Yapı itibarıyla üzerinden akım geçirilen iletkenin etrafında oluşan manyetik alanın etkisinden faydalanılan bu teknikte, yeni bir ısıtma bujisi tasarımı ile içerisinde bulunan rezistanslardan geçirilecek olan yüksek frekansta alternatif bir sinyal ile dış gövdenin eddy akımlarından faydalanılarak kızdırılmasının sağlanması hedeflenmektedir.

İndüksiyon ısıtma yönteminin en büyük avantajı yüksek verimlilik sağlamasıdır. Isıtma bujilerinin yalnızca ısıtılacak parça üzerinde yoğunlaşması, bunun en önemli sebeplerinden birisidir. İndüksiyon ısıtmanın yüksek verimliliğinin yanı sıra birçok üstünlüğü de mevcuttur; metalleri ısıtma süresi kısadır,

ısıtma i lemi çabuk geçikle ti inden dolayı ürün de i imi hızlıdır, enerji tasarrufu sa lar, ısıl i lem sırasında yanma olmadı ından dolayı havalandırma ihtiyacı en az seviyededir. Isıtma bölgesinde yanma ürünü olmamaktadır, yanma esnasında zararlı duman olu umu olmamasında dolayı sa lıklı ve güvenli bir uygulamadır, çevre kirlili i olu turmaz, denetimli ısıtma gerçikle tirilebilir.

Tasarlanabilecek olan yeni bir ısıtma bujisi ve indüksiyon ısıtmanın buji yapısına uygun olması bize böyle bir ara tırma yapma fırsatı sunmu tur. Ara tırma sonrasında elde edilebilecek bu sistem ile hem kısa sürelerde yanma odasının ısıtılması hem de yüksek ısılara eri erek yakıtın tamamının yakılması ile yani tam yanma ile tutu ma gecikmesinin ve dizel vuruntusunun azaltılmaya çalı ılması amaçlanmı tur.



**Anahtar Kelimeler:** Cold Start, dizel motorlar, ısıtma bujisi, indüksiyon ısıtma, ön ısıtma, rezonans devreli invertörler.

## **ABSTRACT**

### **MS THESIS**

#### **APPLICABILITY OF INDUCTION HEATING IN GLOW PLUGS**

**Bayram Volkan REISOGLU**

**THE GRADUATE SCHOOL OF NATURAL AND APPLIED SCIENCE OF  
SELÇUK UNIVERSITY  
THE DEGREE OF MASTER OF SCIENCE IN ELECTRICAL AND  
ELECTRONICS ENGINEERING**

**Advisor: Assoc.Prof.Dr. Bayram AKDEMİR**

**2017, 80 Pages**

**Jury**

**Prof.Dr. Saadetdin HERDEM  
Assoc.Prof.Dr. Mustafa YAGCI  
Assoc.Prof.Dr. Bayram AKDEMİR**

Under inadequate operating conditions, such as cold conditions and frost, diesel engines can not reach the temperature required for self-ignition by simply compressing the air. For this reason, it is necessary to send additional heat to the combustion chambers. This system, which enables easy operation of cold diesel engines, is called preheating.

With the preheating system, it is easier to start the engine in low temperatures in the case of cold start conditions called Cold Start. With this warming, the ability of the engine to operate in cold weather conditions increases substantially.

In the 1960s, the first start-up could take as long as 30 seconds. In the 1980s, this period could be shortened to 3-5 seconds. With the start of the use of TDI engines, ie with the need for glow plugs, at ambient temperatures above 0°C, the difference between diesel engines and the petrol engines is reduced so that they are not apparent in practice, and preheating systems are only needed at ambient temperatures below 0°C.

The main function of the glow plugs is to provide additional heat to the combustion chamber for initial start-up. The operating principle of the glow plugs is simply as follows; the resistors located inside of them will heat the glow tube before the engine is started after the ignition is turned on and this results in the combustion chamber being heated to temperatures above 800°C. Temperatures at this level greatly increase the engine's ability to operate cold. This additional heat generated by the glow plugs ensures that the combustion processes are in better conditions and that the motors run smoother. Thus, smoke formation and emissions are reduced.

The developments in glow plugs are ongoing. The glow plugs which can subsequently be heated too may be needed. It may be required that the glow plugs operate not only at the first start-up but also at certain intervals during the warm-up period according to the engine temperature. However, immediately after the first start, the engine can be run smoothly and the emission rates can be reduced. Therefore, studies on the life span of glow plugs are continuing.

Induction heating technology enters our study at this point of this new technologies searching. In this technique, which utilizes the effect of the magnetic field formed around the conductor through which the current flows, it is aimed to provide a new glow plug design with a high frequency alternating signal which will be passed through the resistances in it and to make it possible to warm the outer body by using the eddy currents.

The greatest advantage of induction heating is its high efficiency. The heating process is concentrated only on the part to be heated is one of the most important reasons. Induction heating has

many advantages as well as high efficiency; the heating time of the metal is short and the heating operation is quick so that the product change is fast and saves energy and the ventilation requirement is the least as it is not burning during the heat treatment. There is no combustion product in the heating zone, it is a healthy and safe application due to the absence of harmful smoke formation during combustion, it does not create environmental pollution, supervised heating can be realized.

The most obvious advantage of induction heating is that it has high efficiency. One of the most important reasons for this is that the heating process is concentrated only on the part to be heated. Induction heating has many advantages as well as high efficiency; heating time of metals is short, product change can be easy because of heating is started quickly, energy saving is achieved, heat treatment is not done by burning and ventilation is the minimum level, there is no combustion product in heating zone, no explosion phenomena caused by gas mixtures and it is a safe application because it does not create environmental pollution, supervised heating can be realized.

A new glow plug that can be designed and the fact that induction heating is suitable for spark plug construction has offered us the opportunity to do such a research. With this system that can be obtained after the research, it is aimed to warm both the combustion chamber in a short time and to burn the entire fuel by reaching to the high temperature, that is to try to reduce the ignition delay and diesel knock.



**Keywords:** Cold Start, diesel engines, glow plug, induction heating, preheating, resonant circuit inverters.

## ÖNSÖZ

Hazırladığım bu tez çalışmasında; değerli bilgi ve tecrübeleriyle bana ılk tutan, gerekli ara tırma ve geli tirme çabalarında deste ini esirgemeyen tez danı manım Selçuk Üniversitesi Mühendislik Fakültesi Elektrik-Elektronik Mühendisli i ö retim üyesi Yrd.Doç.Dr. Bayram AKDEMİR'e, maddi ve manevi deste ini esirgemeyen aileme, Emit Elektromekanik San. ve Tic. Ltd. ti. ailesine ve Elektrik-Elektronik Mühendisi Hasan ÜZÜLMEZ'e sonsuz te ekkür ederim.

Bayram Volkan REİSOĞLU  
KONYA-2017





## Ç NDEK LER

ÖZET .....	iv
ABSTRACT.....	vi
ÖNSÖZ .....	viii
Ç NDEK LER .....	ix
S MGELER VE KISALTMALAR .....	xi
<b>1. G R</b> .....	<b>1</b>
1.1. Dizel Motorlarda Isıtma Bujilerinin Gereklili i .....	2
1.2. Isıtma Bujilerindeki Eksiklikler ve Ya anan Problemler .....	2
1.3. Yapılan Çalışmanın Önemi ve Amacı.....	3
1.4. Neden İndüksiyon Isıtma?.....	4
1.5. Tasarlanan Sisteme Genel Bakı .....	4
<b>2. KAYNAK ARA TIRMASI .....</b>	<b>6</b>
2.1. Dizel Araçlar .....	6
2.1.1. Dizel araçlarda yanma olayı .....	6
2.1.2. Dizel araçlarda vuruntu .....	8
2.1.3. Ön ısıtma ve Cold Start.....	9
2.2. Isıtma Bujileri .....	12
2.2.1. Tarihi geli imi ve önemi .....	12
2.2.2. Genel yapısı .....	13
2.2.2.1. Çubuk tipi ısıtma bujisi .....	13
2.2.2.2. Seramik tip ısıtma bujisi .....	15
2.2.3. Isıtma bujilerindeki eksiklikler ve ya anan problemler .....	16
2.2.4. deal bir ısıtma bujisinde aranan özellikler .....	17
2.3. İndüksiyon Isıtma .....	18
2.3.1. Tarihçesi.....	18
2.3.2. İndüksiyon ısıtmanın üstünlükleri .....	20
2.3.3. İndüksiyon ısıtma.....	21
2.3.3.1. Giri .....	21
2.3.3.2. Temel teorisi .....	22
2.3.3.3. Elektromanyetik indüksiyon .....	24
2.3.3.4. Histerezis kayıpları .....	26
2.3.3.5. Eddy kayıpları .....	26
2.3.3.6. Dalma derinli i (skin effect, deri etkisi) .....	27
2.3.3.7. Isı aktarımı .....	29
2.3.4. İndüksiyon ile ısıtma uygulamaları.....	30
2.3.4.1. Kaynak frekanslı sistemler.....	30
2.3.4.2. Motor alternatör sistemleri.....	32
2.3.4.3. Statik inverter sistemleri .....	33
2.3.4.4. Yüksek frekanslı sistemler .....	34
2.3.5. Statik inverter sistemleri .....	35
2.3.5.1. Giri .....	35

2.3.5.2. Gerilim kaynaklı inverterler.....	35
2.3.5.3. Akım kaynaklı inverterler .....	37
2.3.5.4. Rezonans inverterler .....	38
2.3.5.5. PWM inverterler .....	46
2.3.5.6. PWM ve rezonans inverterlerin kar ıla tırılması.....	49
2.3.5.7. nverter devrelerinde kullanılan anahtarlama elemanları ve anahtar seçimi .....	52
2.3.5.8. Anahtarlarda olu an güç kayıpları ve bu kayıpları azaltma teknikleri ..	55
<b>3. MATERYAL VE YÖNTEM.....</b>	<b>63</b>
3.1. ndüksiyon ısıtmanın ısıtma bujilerine uygulanabilirli inin incelenmesi.....	63
3.2. Uygun sürme devresinin seçilmesi .....	64
3.3. Tasarlanan bujinin genel yapısı .....	65
3.4. Sistemin çalı ma prensibi .....	66
3.5. ndüksiyon ısıtma ile hedeflenen özellikler .....	68
<b>4. DENEYSEL SONUÇLAR VE TARTI MA .....</b>	<b>70</b>
<b>5. ÖNER LER .....</b>	<b>76</b>
<b>KAYNAKLAR .....</b>	<b>77</b>
<b>ÖZGEÇM .....</b>	<b>80</b>

## SİMGELER VE KISALTMALAR

### Simgeler

$w_{ad}$	: Başlangıçtaki A halinden B haline geçen bir sistemde yapılan iş
$U_B$	: Sistemin B halindeki ısı miktarı
$U_A$	: Sistemin A halindeki ısı miktarı
$W$	: Bir cisme uygulanan kuvvetin o cismin konumunda yaptığı işin miktarı
$F$	: Cismin konumunda iş yapmak için uygulanan kuvvet
$\Delta x$	: Cisimde meydana gelen yer değiştirme miktarı
$P$	: Birim zamanda yapılan iş miktarı
$I_p$	: Primere ait akım (A)
$I_s$	: Sekondere ait akım (A)
$N_p$	: Primere ait sarım sayısı
$N_s$	: Sekondere ait sarım sayısı
$e$	: İndüklenen gerilim (V)
$\Phi$	: Manyetik akı (Wb)
$B$	: Manyetik akı yoğunluğu (T)
$i$	: Akım (A)
$H$	: Manyetik alan şiddeti (A/m)
$N$	: Spir sayısı
$S$	: Yüzey alanı ( $m^2$ )
$l$	: Akı yoğunluğunun ortalama uzunluğu (m)
$f$	: Frekans (Hz)
$\mu_0$	: Havanın bağıl manyetik geçirgenlik katsayısı
$\mu_r$	: Malzemenin bağıl manyetik geçirgenlik katsayısı
$B_m$	: Manyetik akı yoğunluğunun maksimum değeri (Wb)
$P_h$	: Histerezis kayıpları (watt)
$K_h$	: Histerezis katsayısı
$\rho$	: Malzemenin özgül direnci ( $\Omega mm^2/m$ )
$\delta$	: Dalma derinliği (mm)
$V_g$	: Giriş gerilimi (V)
$V_{\phi}$	: Çıkış gerilimi (V)
$V_A$	: Anahtar gerilimi (V)
$I_g$	: Giriş akımı (A)
$I_{\phi}$	: Çıkış akımı (A)
$I_L$	: Rezonans akımı (A)
$I_A$	: Anahtar akımı (A)
$I_C$	: Kondansatör akımı (A)
$Z$	: Empedans ( )
$X_C$	: Kondansatör reaktansı ( )
$X_L$	: Bobin reaktansı ( )
$\omega$	: Açısal frekans (rad/s)
$\omega_r$	: Açısal rezonans frekansı (rad/s)
$\omega_a$	: Açısal anahtarlama frekansı (rad/s)
$f_a$	: Anahtarlama frekansı (Hz)
$f_r$	: Rezonans frekansı (Hz)
$t$	: Zaman (s)

T	: Periyot (s)
R	: Direnç ( $\Omega$ )
L	: Endüktans (H)
$L_{\sigma}$	: Anahtara ait kaçak endüktans (H)
C	: Kondansatör (F)
A	: Anahtar
D	: Diyot
$D_K$	: Koruma diyodu
$P_A$	: Anahtarın anahtarlama güç kaybı (W)
$P_i$	: Anahtarın iletim güç kaybı (W)
$V_i$	: Anahtarın iletim durumundaki kaçak gerilim dü ğümü (V)
$t_{yg}$	: Anahtarın yalıtıma geçi süresi (s)
$t_{ig}$	: Anahtarın iletime geçi süresi (s)
$t_i$	: Anahtarın iletimde kalma süresi (s)
$T_A$	: Anahtarlama periyodu (s)

### Kısaltmalar

DC, DA	: Direct Current (Do ru Akım)
AC, AA	: Alternating Current (Alternatif Akım)
SI	: Uluslararası Birimler Sistemi
HFK	: Hava Fazlalılık Katsayısı
H/Y	: Hava-Yakıt Oranı
EO	: Ekivalans Oranı
ÜON	: Pistona ait Üst Ölü Nokta
TDI	: Turbo Diesel Injection
AQGS	: Advanced Quick Glow System
QGS	: Quick Glow System
SRC	: Self Regulating Ceramic
SRM	: Self Regulating Metal
NHTC	: New High Temperature Ceramic
HTC	: High Temperature Ceramic
BJT	: Bipolar Junction Transistor
MOSFET	: Metal Oxide Semiconductor Field Effect Transistor
GTO	: Gate Turn-Off Thyristor
IGBT	: Insulated-Gate Bipolar Transistor
GK	: Gerilim Kaynaklı nvertör
AK	: Akım Kaynaklı nvertör
EMI	: Electromagnetic Interference (Elektromanyetik Giri im)
SGA	: Sıfır Gerilim Anahtarlama
SAA	: Sıfır Akım Anahtarlama
PWM	: Pulse Width Modulation (Darbe Geni lik Modülasyonu)

## 1. G R

Günümüzde dizel motorlar hem düşük yakıt tüketimi ile ideal bir güç üretici olarak kullanılmakta hem de karbondioksit emisyonlarının azaltılması için esas teşkil etmektedirler. Dizel motorların bu başarısı hem kontrollü yapılan bir tam yanma süreci hem de iyileştirilen yüksek teknolojiye egzoz sistemlerinden kaynaklanmaktadır. Bu kombinasyon, mümkün olan en düşük emisyonla birlikte yakıt tüketiminin de çok düşük olmasını sağlamaktadır. Bu düşük emisyon hedeflerini desteklemek amacıyla yeni nesil dizel motorların birçoğunun sıkı tırma oranı da sürekli gelişen teknolojiye göre sürekli düşürülmeye devam etmektedir. Bu durum da motoru ısıtma ve soğuk başlangıç gibi bazı konularda problemleri beraberinde getirmektedir.

Avrupa'da otomobil sektöründe söz sahibi bazı şirketler, benzinli motorlarda olduğu gibi beklemeksizin çalışan, sabit bir rölanti devrine sahip, görünür bir duman olmaksızın çalışan yetenekli sistemler için herkesin kabul edebileceği standartlar belirlemiştir. Kuzey Amerika pazarı için de benzer hedefler bulunmaktadır fakat burada araç çalışırken görünür bir duman oluşması konusunda daha sert yaptırımlar uygulanmaktadır.

Azaltılmış sıkı tırma oranının yan etkilerini azaltmak için, yakıt kalitesinin de artırılması gibi diğer iklimlerin yanı sıra yeni dizayn edilebilecek soğuk başlatma sistemlerinin de tasarlanması gerekmektedir.

Soğuk başlatma sistemlerini; kendinden ayarlı metal ya da seramik kızdırma bujisi, elektronik bir kızdırma süresi kontrol ünitesi ve sıcaklık sensörü oluşmaktadır.

Çalışmamızda, dizel araçlarda oluşan bu yeni gereksinim göz önünde bulundurularak soğuk başlatma sistemlerinde nasıl bir değişiklik yapabiliriz fikri doğmuştur.

Dizel yakıtın tutulması ile ilgili en önemli payı ısıtma bujileri üstlenmektedir. Bujiler aküden beslenirken önce kendi içini daha sonra ise uç kısmını ısıtarak motor bloğunda içerisinde tutulması için gerekli havayı ısıtmaktadır. Bu da ısıtma süresini geciktirmektedir.

Çalışmamızda bujinin önce içini de il de en hızlı bir şekilde gövdesinin nasıl kızdırılabileceği fikri esas alınmıştır. Isıtma bujisi içerisinde bulunan rezistanslardan nasıl farklı faydalanabiliriz veya yeni bir ısıtma bujisi dizaynı ile sistemin çalışmasına nasıl faydalı olabiliriz fikri doğmuştur.

### 1.1. Dizel Motorlarda Isıtma Bujilerinin Gereklili i

Isıtma bujileri elveri siz hava ko ullarında dizel motorlarına ek ısı sa layıcı ekipmanlar olarak bilinmektedirler. So uk hava ko ullarında dizel motorların çalı tırılmasını kolayla tırmak, yanmanın daha iyi ko ullarda gerçeikle mesini sa lamak ve egzoz gaz emisyonlarını azaltmak için ısıtma bujileri vazgeçilmez ekipmanlar olarak kar ımıza çıkmaktadır.

çlerinde bulunan rezistanslar sayesinde motorun içerisinde bulunan havayı, ilk çalı tırmadan önce ısıtırlar ve motor içerisinde püskürtülen yakıtın ısınan hava ile hemen tutu masını sa larlar.

Bu sayede motor içerisinde daha iyi bir yanma gerçeikle tirilerek, zararlı gaz olu umu, fazla yakıt tüketimi, gürültülü çalı ma gibi birçok olumsuz etken ortadan kaldırılmı olur.

### 1.2. Isıtma Bujilerindeki Eksiklikler ve Ya anan Problemler

Günümüzde modern kızdırma bujilerinin içerisinde iki ayrı rezistans bulunmaktadır. Bunlar; ısıtma ve ayar rezistanslarıdır. Bu rezistansların sarım ve birle tirilmesi sırasında olu an direnç de i iklikleri ve direnç de i ikli inden kaynaklanan ısı problemini ve buna ba lı olarak da ısıtma bujilerinin belirlenen standart sıcaklık de erlerini yakalayamaması veya a ırı ısınması ısıtma bujilerinde ya anan en büyük problemlerdir.

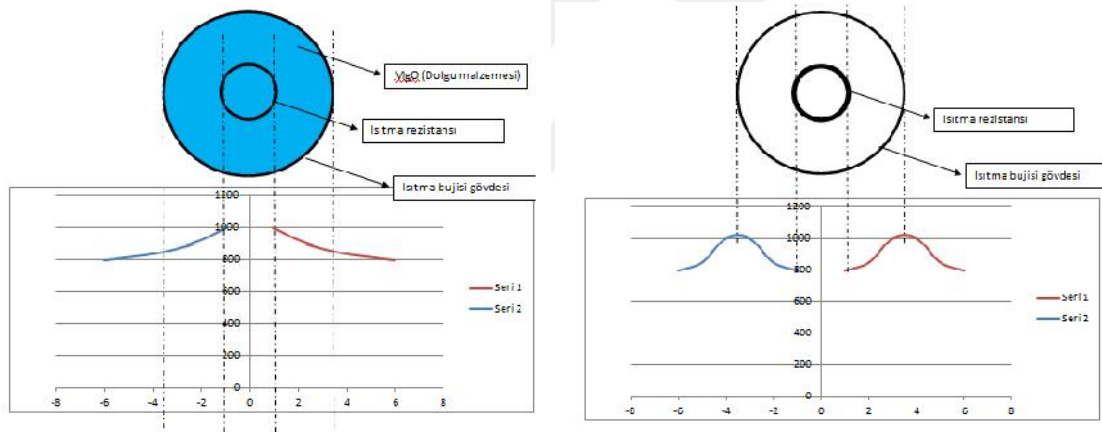
te bu nedenlerden ve ülkemizde bulunan küçük çaplı üretici firmalardaki bilgi birikiminin ve deneyimin yetersiz olmasından dolayı ısıtma bujilerinin standardizasyonu, verimliliklerinin artırılması ve ideal ısıtma bujisi hedefi yeni bir kapı aralamaktadır.

Bu problemlerin akademik çalı maların beraberinde uygun teçhizat ve teknolojinin kullanılmasıyla giderilmesi veya ısıtma bujilerinin çalı tırılmasına yönelik yeni teknik uygulamalar ile giderilmesinin hedeflenmesi bizi yeni aray lar içerisinde yönlendirmi tir.

Yeni bir ısıtma bujisi tasarımı ile sadece indüksiyon ısıtma bu i i daha kısa sürede çözebilir mi, standart sıcaklık de erlerini bu yöntemle yakalayabilir miyiz gibi sorular çalı mamızın ilham kayna ı olmu tur.

### 1.3. Yapılan Çalışmanın Önemi ve Amacı

Dizel araçlarda bulunan modern ısıtma bujileri iki ayrı rezistanslı ve 3 ayrı eklem noktalı olarak imal edilmektedirler. Rezistanslardan biri ayar di eri ise ısıtma rezistansı olarak çalışmaktadır. Isıtma ve ayar rezistanslarının sarım ve birleştirilmesi sırasında oluşan direnç de i iklikleri ve direnç de i ikli inden kaynaklanan ısı problemi ve buna bağlı olarak da ısıtma bujilerinin belirlenen standart sıcaklık değerlerini yakalayamaması veya aşırı ısınması günümüz bujilerinin temel sorunu haline gelmiştir. Eklem yerlerinin çokluğu ve farklı malzemelerin birleştirilmesi bujilerin ömrünü kısaltmakta ve hızlı arızalanmalarına sebep olmaktadır. Ayrıca Şekil 1.1 (a)'da modern bir ısıtma bujisinde görüldüğü gibi ısı çekirdekten gövdeye doğru yayılmakta ve çekirdek her zaman daha fazla sıcaktır. Bu da malzemenin daha hızlı yaşlanmasına sebep olmaktadır ve ömrünü azaltmaktadır.



(a) Modern bir ısıtma bujisi

(b) Hedef grafik

Şekil 1.1. Modern bir bujiye ve hedeflenen bujiye ait grafikler

Buji yapısı incelendiğinde dışta alaşım bir metal gövde ve içinde spiraller halinde sarılmış rezistansların olması burada elektromanyetik induksiyon ile sisteme ayrıca ısıl bir katkı yapabileceğimizi düşündürmektedir. Mikroiletimci veya güç elektroniği devreleri ile kontrol edilebilecek bir kontrol sistemi ile bir ısıtma bujisinin daha verimli ve daha uzun ömürlü çalıştırılması ve Şekil 1.1 (b)'deki gibi maksimum sıcaklığın buji gövdesinde oluşturulması hedeflerimiz arasındadır.

Ayrıca ısıtma bujileri, araçtaki aküden beslenirler ve ilk çalıştırma anında uç kısımları belirli bir kızarıklıkla gelene kadar oldukça fazla akım çekerler. Çekilen bu DC

akım, ısıtma bujisinin sıcaklığının artması sonucu içindeki rezistansların direncinin artmasına bağlı olarak azalsa da akü için ekstra bir yük tekil etmektedir.

Bu tez çalışması ile amacımız; yeni bir ısıtma bujisi tasarımı ve kontrol devresi ile aküden çekilen DC akımı yüksek frekansta bir sinyale çevirerek ısıtma bujilerinin hem daha düşük bir akımla hem de manyetik indüksiyon ile ısınmasını sağlamaya çalışmaktır. Bu amaç doğrultusunda hedefimiz; bir tel üzerinden akan akımın etrafında oluşan manyetik alanın, manyetik alan içerisinde/dışında kalan bir malzemenin üzerinde oluşan eddy kayıplarının her ne kadar çok olursa sistemde kayıp olarak görülse de burada faydalı ısı olarak kullanılabilmesini ve ısıtma bujilerine indüksiyon ısıtma tekniğinin uygulanabilirliğini göstermektir.

Bu sayede hem daha kısa sürelerde ısınma sağlanabilecek hem de otomotiv sektörüne hizmet veren ısıtma bujisi üreticisi firmalara AR-GE desteği sağlanabilecektir.

#### **1.4. Neden İndüksiyon Isıtma?**

İndüksiyon ısıtma tekniğinin en belirgin özelliği yüksek verimlilik sunmasıdır. Isıtma işleminin yalnızca ısıtılacak parça üzerinde yoğunlaşması bunun en önemli sebeplerinden birisidir. İndüksiyon ısıtmanın yüksek verimliliğinin yanı sıra birçok üstünlüğü de mevcuttur.

İndüksiyonla ısıtmayı; malzemelerin eritilmesi, kaynatılması, lehimlenmesi, ekil verilerek tavlanması, yüzeylerinin sertleştirilmesi, çelikleme gibi birçok uygulamada rahatlıkla görebilmekteyiz. Örneğin; metallerin indüksiyon fırınlarında eritilmesi, iş gücü ve ham madde elde edilmesinde düşük maliyet sağlamaktadır. Bu yöntemle alaşımların hazırlanması daha kolay olmaktadır ve üretim sonrası elde edilmiş ürünlerin kalitesi daha yüksektir (Khan ve ark 2000).

İndüksiyon ısıtma teknikleri, frekans değeri 50 Hz ile birkaç MHz seviyeleri arasında değişebilen farklı güç kaynakları ile birçok uygulamada kullanılmaktadır (Tebb ve Hobson 1987).

#### **1.5. Tasarlanan Sisteme Genel Bakış**

Tasarlamamız oldu umuz sistem; yeni bir ısıtma bujisini basit bir güç elektroniği sürme devresi ile çalıştırmayı hedeflemektedir.



Mevcut bir ısıtma bujisinden farklı olarak; buji içerisinde bulunan 2 adet rezistans da birbirinin aynısıdır ve her iki bujinin de birer ucu buji dı ında birle tirilmi tir. Di er uçları ise sürme devresine gitmektedir.

Aküden gelen (+) ve (-) uçlar sürme devresini besleyecek olup, kontrol kartı da ısıtma bujisini sürecektir.

Isıtma bujisinin bu ekilde dizayn edilmesinin en önemli sebebi; buji içerisinde bulunan rezistanslarda herhangi bir ba lantı noktasının olmaması sebebiyle direnç kayıplarının olu maması sa lanacaktır.

lerleyen bölümlerde hem kontrol devresinin hem de yeni dizayn edilen ısıtma bujisinin di er yapılardan farklılıkları ve farklı olma sebepleri, çalı ma prensipleri, sistemsel özellikleri vb. detaylandırılacaktır.



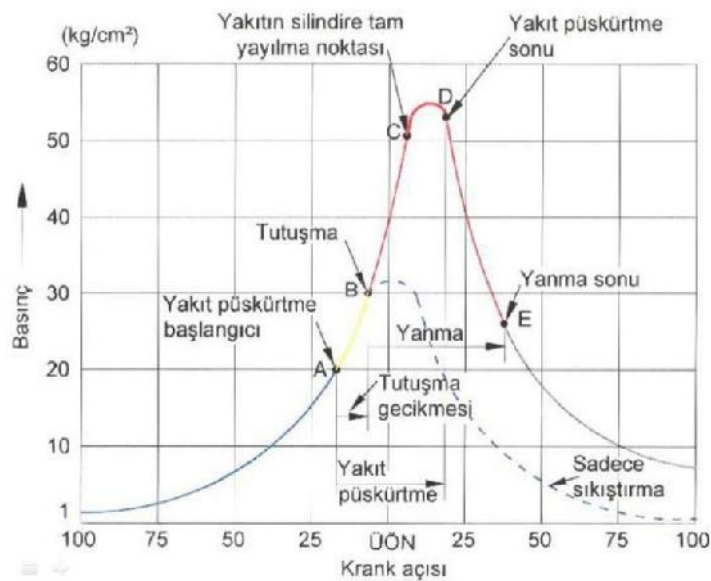
## 2. KAYNAK ARA TIRMASI

Bu bölümde çalı mamıza kaynak te kil eden dizel araçlardaki yanma olayından, ilk çalı manın gerçekleşmesi için gerekli olan ısıtma bujilerinden, ısıtma bujilerinin çalı masına katkıda bulunabileceğini dü ündü ümüz indüksiyon ısıtma tekni i ve indüksiyon ısıtmanın temeli olu turan güç elektroni i devreleri ve sürme elemanlarından bahsedece iz.

### 2.1. Dizel Araçlar

#### 2.1.1. Dizel araçlarda yanma olayı

Dizel motorlar, çalı ma özellikleri bakımından benzinli motorlardan farklılık göstermektedirler. Dizel motorlar, benzin motorlarının aksine kendili inden tutu malı motorlardır. Dizel motorlarda yanmada ihtiyaç duyulan hava emme zamanında alınır ve sıkı tırılır. Sıkı tırmanın etkisi ile sıcaklı ı 600-900°C'ye yükselen havanın içerisinde piston üst ölü noktaya (Ü.Ö.N.) gelmeden yakıt sistemi elemanı olan enjektör tarafından yakıt püskürtülür ve yanma olayı ba lar. Dizel motorlar bu sebepten dolayı benzin motorlarından daha sa lam bir tasarıma ve daha yüksek sıkı tırma oranlarına ihtiyaç duyar.



ekil 2.1. Dizel motorunun yanma süreci

Yanma olayı ekil 2.1’de görüldü ü gibi 4 evrede gerçekleşir:

a. Tutuma gecikmesi (A-B arası): Hazırlık evresi olarak tanımlanır ve silindir içinde sıkı an havaya püskürtülen yakıt, hava ile tamamen karışır ve buharlaşır. Krank açısına göre basınç belirli bir oranda artmaya başlar.

Sıkı tırma sonuna doğru silindirlere püskürtülen yakıt tanecikleri hemen tutamaz. Yakıt taneciklerinin tutabilmesi için oksijenle karışması ve tutuma sıcaklığının yüksek olması gerekmektedir. Bunun için de bir zamana ihtiyaç vardır. Enjektörün yakıtı silindire püskürtmeye başladığı andan itibaren ilk alevin oluşmaya başladığı ana kadar geçen zamana ‘tutuma gecikmesi’ denir.

Tutuma gecikmesi motorun sesli ve vuruntulu çalışmasına etki eder. Ancak tutuma gecikmesini ortadan kaldırmamız mümkün olmadığından bu sürenin kısaltılması gerekir. Bu sürenin uzaması ve kısalmasına etki eden faktörler ise şunlardır:

- Sıkı tırma sonu sıcaklığı,
- Sıkı tırma sonu basıncı,
- Yakıtın kimyasal yapısı,
- Yakıtın atomize edilmesi,
- Sıkı tırılan havada meydana getirilen türbülansdır.

b. Kontrolsüz yanma (alevin yayılması, B-C arası): Tutuma gecikmesi sonrası yanabilecek halde olan yakıt-hava karışımı artık silindir içerisinde iyice yayılmış ve ateşleme birkaç noktadan başlayacaktır. Bu noktadan sonra alev hızlı bir şekilde yayılıp bir patlama etkisi yaratacaktır. Silindir içerisinde basınç da aniden yükselecektir. Basıncın yükselme miktarı birinci evrede hazırlanan yanabilir karışım miktarına bağlıdır.

Tutuma gecikmesi süresi içerisinde silindirlere biriken yakıt ısınarak havayla karışır ve bir dereceye kadar buharlaşır. İlk alev çekirdeği meydana geldiği anda silindir içerisindeki yakıtın tamamı yanmaya başlayarak hızla yanar. Bu yanma ani basınç yükselmesine yol açar. Bu ani basınç yükselmesi motor parçaları arasındaki boşluğun birden alınmasına neden olduğundan motorun vuruntulu, sert ve sarsıntılı çalışmasına yol açar. Bu vuruntuya dizel vuruntusu denir. Dizel vuruntusunu ayrı bir konuyla birlikte altında inceleyeceğiz.

c. Kontrollü yanma (tam yanma, C-D arası): Bu evrede silindir içerisine püskürtülen yakıt, silindir içerisindeki basınç ve sıcaklığın artması aynı zamanda alevin bulunması etkisi ile gecikme olmadan yanar. Yanma artık püskürtülen yakıt miktarıyla kontrol edilir. Bu sebepten dolayı bu evreye kontrollü yanma denir.

d. Gecikmiş yanma (yanma sonrası, D-E arası): Yakıtın silindir içerisine püskürtülmesi bitmiş ve motor genişleme zamanına geçmiştir. Diğer evrede silindirlere püskürtülen fakat yanma imkânı bulamayan yakıt zerrecikleri oksijen buldukça yanmaya başlarlar. Buna gecikmiş yanma denilir. Eğer bu süre uzun sürerse egzozdaki sıcaklığın artması ile verimlilik düşer.

### 2.1.2. Dizel araçlarda vuruntu

Eğer silindir içerisindeki ateşleme gecikmesi uzayacak olursa veya bu süre içinde çok miktarda yakıt tanecikleri buharlaşırsa ikinci evrede (kontROLSÜZ yanma) çok miktarda yakıt yanacağı için ani bir basınç yükselmesi yaşanır. Bu durum motorda titreşime ve dolayısıyla motordan ses gelmesine neden olur. Dizel araçlarda duyulan bu sese "dizel vuruntusu" denir. Vuruntuya neden olan faktörleri aşağıdaki gibi sıralayabiliriz:

- Hava hareketleri ve türbülans,
- Setan sayısı,
- Devir sayısı.

Bunlardan başka vuruntuya etki eden faktörleri; yakıt/hava oranı, püskürtülen yakıtın atomizasyon derecesi, motor gücü, sıkı tırma oranı, emme manifoldu basıncı, ağırlı doldurma, soğutucu akışkan sıcaklığı, karışımındaki oksijen ve egzoz gazı yüzdesi ve püskürtme avansı gibi devam ettirebiliriz.

Dizel vuruntusunun en önemli sakıncası basıncın aniden artması ve bunu takiben yüksek basıncın oluşturacağı gerilmelerdir. Daha düşük bir basınç yükselme hızıyla aynı basınç seviyelerine ulaşmak gerilme etkilerini de azaltacaktır. Yüksek basınç artışının bir başka sonucu da sebep olduğu titreşimlerdir.

Dizel motorlarda vuruntuyu önleyebilmek için bazı yöntemler uygulanır. Bu yöntemlerin bazıları aşağıdaki gibidir:

- Setan oranı yüksek yakıtları tercih etmek,
- Püskürtme ba langıç noktasında basınç ve sıcaklı ı arttırmak,
- Püskürtme ba langıç noktasında yakıtın miktarını dü ürmek,
- Yanma odasındaki sıcaklı ı arttırmak.

Bu metotların uygulanması ise u ekilde olur:

- Kompresyon oranının yükseltilmesi,
- Giri teki havanın sıcaklı ının yükseltilmesi,
- Sıkı tırma basıncının artırılması,
- Silindirdeki sıcaklı ın yükseltilmesi,
- Yakıtın tutu ma noktasının azaltılması,
- Tutu ma gecikmesinin kısaltılması.

### 2.1.3. Ön ısıtma ve Cold Start

Dizel motorlarında yanma i leminin nasıl gerçekte ti i ile ilgili olarak daha önceki konularımızda yer vermi tik. So uk ilk çalı tırma ve don gibi elveri siz çalı tırma ko ullarında dizel motorlar sadece havanın sıkı tırılmasıyla kendili inden tutu ma için gerekli olan sıcaklı a ula amaz. Bu nedenle yanma odalarına ek ısı gönderilmesi ihtiyacı do ar. So uk dizel motorlarının kolay çalı masını sa layan bu sisteme ön ısıtma sistemi, yapılan bu i leme de ön ısıtma denir.

Ön ısıtma u ekilde gerçekte ir; yanma odalarında silindir kapa ına vidalanmı durumda bulunan ısıtma bujileri bulunmaktadır. Bujinin kızdırma borusu yanma odasının içine uzanmı ekildedir. Kendisine elektrik verilen ısıtma bujisi hemen ısınır ve bujinin uç kısmı kızarır. Ucu kızarmaya ba layan buji de yanma odasını ısıtır. Bu ısınma bujinin ekline ve cinsine göre de i ir ve a ı yukarı 1000°C'dir.

Ön ısıtmada motor, tek veya her silindir için ayrı ayrı bulunan ısıtma bujileri ile ısıtılır. Motor çalı tırılmadan ön ısıtma sistemi çalı tırılarak elektrik enerjisinin ısıtma bujileri ile ısı enerjisine çevrilmesinden sonra çalı tırmaya hazır hale getirilir.

Sonradan ısıtma, motorun çalı ma evresinden sonra motorun sürekli çalı ma evresinde de devam eden kızdırma i lemidir. Isıtma bujilerinin çalı ma sürelerinin uzatılması anlamına da gelmektedir. Böylece motor çalı tıktan sonra da yanmanın daha etkin olması sa lanacak, so uk çalı tırma gürültüsü azaltılacak, rölanti kalitesi

geli tirilmi ve zararlı gaz emisyonları azaltılmı olacaktır. Normal ısıtma, motor çalı ırken her zaman yapılabilir. Fakat normal ısıtmayı da devreden çıkartan faktörler vardır. Bu faktörleri a a ıdaki gibi sıralayabiliriz:

- Motorun devri 2500 d/d'ye geldi inde kesilir ve en fazla 4 dakika daha çalı ır,
- 15 sn. sonra so utma suyu sıcaklı ı 20°C'den fazla ise,
- Silindirlere püskürtülen yakıt miktarı 35 mm<sup>3</sup>'ten fazla ise ısıtma bujileri devre dı ı kalır.

Ön ısıtma sistemini; kendinden ayarlı metal ya da seramik ısıtma bujisi, elektronik bir kızdırma süresi kontrol ünitesi ve sıcaklık sensörü olu turur. Ön ısıtma sistemleri çe itlilik göstermektedir:

- Kızdırma sinyalli tip ön ısıtma sistemi,
- Sabit gecikmeli tip ön ısıtma sistemi,
- De i ken gecikmeli tip ön ısıtma sistemi,
- Klasik süper kızdırma tip ön ısıtma sistemi,
- Yeni süper kızdırma tip ön ısıtma sistemi,
- Ön-son ısıtmalı ön ısıtma sistemi.

Ön ısıtma sistemiyle dü ük sıcaklıklarda motorun çalı tırılması kolayla ır. Bu ısınmayla so uk hava ko ullarında çalı ma yetene i ciddi oranda artar. Yanma i lemi iyi ko ullarda olur ve bu durum beyaz/mavi duman olu umunu ve emisyonu azaltır.

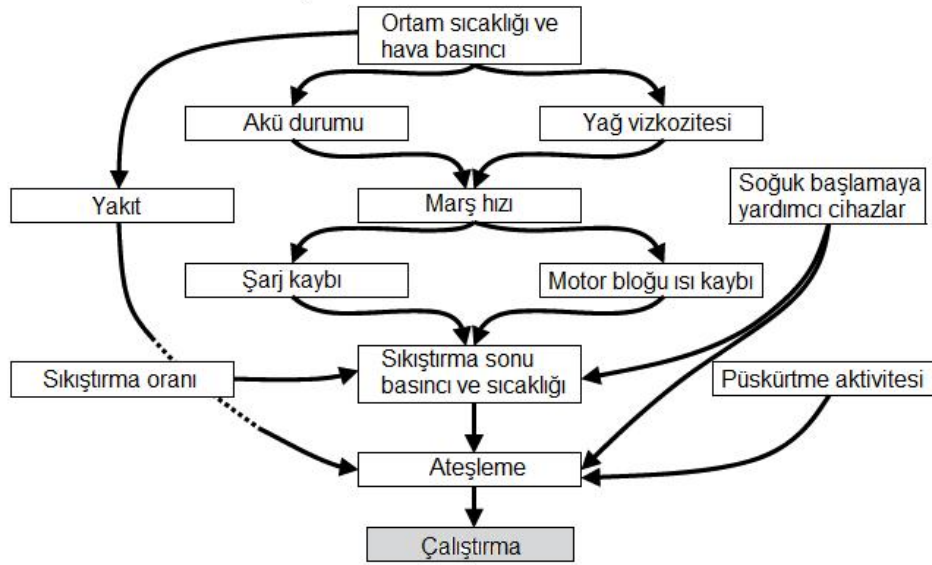
So uk çalı tırma; normal çalı ma sıcaklı ının altında, genellikle sert hava ko ulları nedeniyle araç motorunun so uk oldu u zamanlarda aracın motorunu çalı tırma giri imidir (motorun çalı tırılabilme yetene idir). So uk çalı tırma durumu, ço u iklim ko ullarında hava artları elbette bir motorun tipik çalı tırma sıcaklı ından daha dü ük bir sıcaklık olaca ından dolayı kaçınılmaz hale gelmi tir.

So uk ba layan bir aracın motorunun çalı tırılması, 90 dakika ile 2 saat arasındaki bir sürede çalı mı bir aracın motorunun tekrar çalı tırılmasına göre daha zordur. Dü ük sıcaklıklar akü gücünü azaltır, motorun sürtünmesini ve ya viskozitesini de arttırır. So uk bir motoru çevirmek için birçok nedenden dolayı daha fazla güç gereklidir:

- Isı eksikliği ateşlemeyi daha zor hale getirdiği için motor basıncı daha yüksektir,
- Düşük sıcaklıklar, motor yağının daha yapışkan hale gelmesine neden olur ve motor yağının sirkülasyonunu daha da zorlaştırır,
- Hava, soğuluğun etkisinden dolayı daha yoğun bir hale gelir. Bu da karışımın alevlenmesini etkileyen hava-yakıt oranına dolaylı olarak etki eder,
- Düşük sıcaklıklarda kimyasal ve fiziksel enjeksiyon gecikme zamanları artar.

Motorun soğuk çalışması; deplasman, sıkıştırma oranı, akü hacmi ve arız durumu, marj ve yardımcı ekipman, enjeksiyon sistemi ve soğuk çalıştırma yardımcıları gibi motor karakteristiklerine bağlıdır. Motor yağı, yakıt, hava sisteminin özellikleri ve iletimi tümüyle soğuk çalıştırma üzerinde bir etkiye sahiptir.

ekil 2.2’de soğuk çalıştırma kalitesini etkileyen en önemli motor parametreleri ve bu parametreler arasındaki bağlantı gösterilmektedir:



ekil 2.2. Motorun soğuk çalışmasına etki eden faktörler

Soğuk başlama sorunu tüm modern araçlarda bulunan yaygın olan motor başlatıcıların uygulamaya konulmasından bu yana büyük ölçüde azaltılmıştır. Dizel motorlarında motor içerisindeki ateşleme koullarını iyileştirmek amacıyla önce motor bloğunun ısıtılması için ısıtma bujilerinden faydalanılır.

Yukarıda belirttiğimiz bu sorunların üstesinden gelmek için gelişmiş bir enjeksiyon sistemi ve soğuk çalıştırma sistemi gereklidir. Bir soğuk çalıştırma sistemi için iki çözüm tekniği mevcuttur. Hava girişi ısıtıcısı sıkıştırma sonu sıcaklığını bölgesel

olarak arttırır. Di er yandan motor içerisindeki ate leme ko ullarını iyile tirmek amacıyla motor blo unun ısıtılması ve püskürtülen yakıtı tutu turmak için ısıtma bujilerinden faydalanılır.

## 2.2. Isıtma Bujileri

### 2.2.1. Tarihi geli imi ve önemi

1960'lı yıllara kadar motorların ilk çalı tırma süreleri 30 saniyeyi bulmaktaydı. 1980'lerde yakla ık 3-5 saniyelere kadar kısaltılabildi. TDI motorlarının kullanıma ba laması ile yani ısıtma bujilerine ihtiyaç duyulması ile 0°C üstündeki sıcaklıklarda benzinli motorlar ile aralarındaki fark uygulamalarda belli olmayacak kadar azaltıldı ve sadece 0°C altındaki ortam sıcaklıklarında ön ısıtma sistemlerine gerek duyulmaktadır.

Ancak geli meler halen devam etmektedir. Sonradan da ısıtma yapabilen ısıtma bujilerine ihtiyaç duyulmaktadır. Isıtma bujilerinin sadece ilk çalı tırma anında de il de motorun sıcaklığına göre ısınma süresince de belirli aralıklarla çalı ması istenebilmektedir. Ancak bu sayede ilk çalı tırmadan hemen sonra motorun rahat çalı ması ve emisyon oranlarının dü ürülmesi hedeflenebilir. Bundan dolayı ısıtma bujilerinin ömürleri konusunda yapılan çalı malar da devam etmektedir.

Isıtma bujilerindeki geli meler ile yakın zamanda dizel motorlar ve benzinli motorlar arasında ilk çalı tırma davranı ları konusunda anla ılabilir fark kalmayacaktır.

Isıtma bujisinin ba lıca görevi, motorun ilk çalı tırılması sırasında motora ilave ısı sa lamalarıdır. Motor alı tırılmadan önce ısıtma bujisi enerjilendirilir ve ısıtma ubu u 800°C üzerindeki sıcaklıklara kadar ısınır. Bu seviyelerdeki sıcaklıklar motorların so uk çalı tırma yeteneklerini oldukça arttırırlar. Isıtma bujilerinin olu turmu oldukları bu ilave ısı, yanma i lemlerinin daha iyi ko ullarda olmasını sa ladıkları gibi motorların daha gürültüsüz çalı masını da sa lar. Böylece duman olu umu ve emisyonlar azaltılır. Isıtma bujisinin ba lıca görevlerini a a ıdaki gibi sıralayabiliriz:

- Motoru ısıtmak; en temel görevleri so uk havalarda motoru ısıtmaya yardımcı olmaktır,
- Emisyonları azaltmak; ısıtma bujileri daha verimli bir yanma ortamı sa layarak bu emisyonların %49 oranında azalmasına yardımcı olur,



- Gürültüyü azaltmak: ısıtma bujileri yakıtın yanma verimliliğinin artmasına yardımcı olur ve motor çalışırken oluşan gürültüyü de azaltır.

## 2.2.2. Genel yapısı

Isıtma bujileri genel itibarıyla çubuk tipi metal ısıtma bujileri ve seramik tip ısıtma bujileri olmak üzere 2 ana grupta incelenirler. Bunları ayırt etmekte oldukça basittir. Çubuk tipi bir metal ısıtma bujisinde ilave ısıyı ısıtma çubuğundaki ısıtma rezistansları üretirken seramik tip ısıtma bujilerinde ise metal ısıtma borusundan ziyade seramik ile çevrili bir ısıtma rezistansından faydalanılır. Seramik ile çevrili olmaları istenilen sıcaklıklara hızlı bir şekilde ulaşmalarını sağlar. Boyut olarak daha küçük olmaları modern motorlarda kullanılmaları için ayrı bir avantaj sağlamaktadır.

### 2.2.2.1. Çubuk tipi ısıtma bujisi

Çubuk tipi metal ısıtma bujileri; yüksek ısıya dayanıklı bir metal ısıtma çubuğu ve bu çubuk içerisinde bulunan rezistanslara sahiptirler. Isıtma çubuğundaki seramik malzeme (magnezyum oksit) rezistans titreşimlerden ve darbelerden korunmaktadır. Rezistanstaki yüksek sıcaklık, magnezyum oksidin süper bir ısı iletken olmasından dolayı hızla buji gövdesine verilir.



ekil 2.3. Bir çubuk tipi ısıtma bujisi

Çubuk tipi ısıtma bujileri, farklı çeşitlerde üretilmekle beraber içlerinde en yaygın olarak kullanılan tipi kendinden ayarlı çubuk tipi ısıtma bujileridir.

Kendinden ayarlı çubuk tipi metal ısıtma bujilerinde iki farklı tipte rezistans bulunmaktadır; ısıtma ve ayar rezistansları. Isıtma rezistansları hızlı bir şekilde ısınarak



### 2.2.2.2. Seramik tip ısıtma bujisi

Seramik tip ısıtma bujilerinde bulunan ısıtma rezistanslarının erime noktası, çubuk tipi ısıtma bujilerinde bulunan ısıtma rezistanslarının erime noktasına göre çok daha yüksektir. Isıtma çubu u olarak görev yapan kısımları silikon nitrit olarak bilinen yüksek dirençli bir malzemedir. Seramik muhafazanın yüksek ısı iletkenli i sayesinde çubu un ısınma süresi çok kısa sürmektedir. Bunun yanı sıra daha küçük boyutlarda tasarlanabilmektedirler. Küçük boyutlarda tasarlanabiliyor olmaları modern motorlarda kullanılabilir yerin az olmasından dolayı önem arz etmektedir.



ekil 2.5. Seramik tipi ısıtma bujisi

Seramik tip ısıtma bujileri de kendi içlerinde farklılık göstermelerine rağmen genel yapıları ekil 2.6'da gösterilmiştir.



ekil 2.6. Bir seramik tipi ısıtma bujisinin genel yapısı

- Isıtma rezistansı: Metal telden üretilirler. Çubuk tipi ısıtma bujilerinde kullanılan rezistanslara göre daha yüksek erime noktalarına sahiptirler. Bu sayede bujinin çok daha fazla sıcaklıklara kadar ısıtılmasını sağlarlar.
- Seramik muhafaza: Silikon nitrit ( $Si_3N_4$ ) olarak bilinen seramik bir malzeme ile kaplıdır. Mükemmel bir ısı iletken oldukları gibi rezistansların titreşimden ve yüksek sıcaklıktan korunmasını sağlarlar.
- Orta elektrot: Akü voltajının rezistanslara iletilmesini sağlar.
- Balantı civatası: Aküden gelen (+) uç buraya balantıdır.
- Vida dişi: Isıtma bujisinin motor bloku na tutturulması için gerekli olan buji üzerinde açılmış dişlerdir. Vida dişlerinin haddeli olması ısıtma bujilerinin kalitesini gösterir.
- Ayar rezistansı: Sıcaklığın yükselmesi ile birlikte ayar rezistansının direnci artar ve bu sayede akım sınırlandırılmış olur.

### 2.2.3. Isıtma bujilerindeki eksiklikler ve yaşanan problemler

Çubuk tipi ısıtma bujilerindeki ısıtma ve ayar rezistanslarının sarım ve birleştirilmesi sırasında oluşan direnç defektleri, direnç defektlerinden kaynaklanan ısı problemi ve buna bağlı olarak da ısıtma bujilerinin belirlenen standart sıcaklık değerlerini yakalayamaması veya aşırı ısınması ön ısıtma bujilerinde yaşanan en büyük problemlerdir.

Isıtma rezistans telleri ve ayar rezistans telleri ülkemizde çoğu yerel işletmede bir elektrik motoruna bağlı basit bir aparat sayesinde sarılmaktadır. Bu sarım tamamen el yardımı ile yapılmaktadır. Operatör hesaplanan tel spir sayısını kontrol edememekte, operatöre bağlı olarak da spir sayısı ve spir aralığı defektlik göstermektedir. Sarımı gerçekte tirilen ısıtma rezistans telinin ve ayar rezistans telinin birleştirilmesi gerekmektedir. Bu birleştirme genellikle rezistans tellerinin birbiri ile iç içe geçirilmesiyle veya birbirine kaynak ile tutturulması ile yapılmaktadır. Bu sebeplerden dolayı sistemin toplam direnci defektli olmamakta, rezistanslar arasındaki düğüm veya sarım noktalarından dolayı kaynaklanan problemler artmaktadır. Direnç defektli defektlik gösterdiğinden dolayı standart bir balantı akımı elde edilememekte, standart sıcaklık değerleri yakalanamamaktadır. Ayrıca iki rezistansın kaynakla birleştirilmesi sonrasında; birleştirildikleri yerin tüm hat boyunca geçecek olan akımdan

etkilenmemesi, akıma ve ısıya dayanıklı olması gerekmektedir ki rezistanslar arasındaki düüm kopmasın.

#### 2.2.4. deal bir ısıtma bujisinde aranan özellikler

- Isıtma bujisinin motor blo u içerisinde uzanmasından dolayı, motor blo u içerisinde yanan yakıtın olu turaca ı yüksek sıcaklık, yüksek basınç, titre im ve a ndırıcı kimyasallar gibi etkenlere kar ı dayanıklı olması gerekir,
- Motoru çalı ması için gerekli olan sıcaklı a çabuk ula tırması gerekir,
- Uzun ömürlü olmak zorundadır,
- Kendili inden kontrole (Self-controlled) veya bir kontrol ünitesine ihtiyaç duyarlar. Araçlarda ön ısıtma i leminin tamamlandı ı gösterge panelinde bulunan bir kontrol ı ı ile takip edilebilmektedir,
- Sonradan da ısıtma yapabilmesi sayesinde yakıtın tam yakılmasını sa layarak zararlı gazların olu mamasına yani gaz emisyonlarının azaltılmasını yardımcı olması gerekir,
- Yanma odasının sıcaklı ını hızlı bir eilde yükseltebilmesi sayesinde dizel vuruntusunu azaltması gerekir.

te bu nedenlerden ve ülkemizde bulunan küçük çaplı üretici firmalardaki bilgi birikiminin ve deneyimin yetersiz olmasından dolayı ısıtma bujilerinin standardizasyonu, verimliliklerinin artırılması ve ideal ısıtma bujisi hedefi yeni bir kapı aralamaktadır.

Bu problemlerin akademik çalı maların beraberinde uygun teçhizat ve teknolojinin kullanılmasıyla giderilmesi veya ısıtma bujilerinin çalı tırılmasına yönelik yeni teknik uygulamalar ile giderilmesinin hedeflenmesi bizi yeni aray ı lar içerisinde yönlendirmi tir.

Mevcut çalı ma mantı ına bakıldı nda; metal ala ımlı boru içerisinde rezistans entegre edilerek kullanılan ısıtma bujilerinde indüksiyon ısıtma yönteminin kullanılabilirli i ile ilgili sorular aklımıza gelmi tir. Sistemde bulunan mevcut düzende manyetik indüksiyon ile ayrıca ısıl etki yaratılabilir mi? ndüksiyon ısıtma ile ne derecede sisteme katkı sa lanır? Veyahut yeni bir ısıtma bujisi tasarımı ile sadece indüksiyon ısıtma bu i i daha kısa sürede çözebilir mi? Standart sıcaklık de erlerini bu yöntemle yakalayabilir miyiz?

## 2.3. İndüksiyon Isıtma

### 2.3.1. Tarihçesi

İndüksiyon ile ısıtma uygulamalarının temelini 1831 yılında Michael Faraday'ın elektromanyetik indüksiyon ile ilgili yaptığı çalışmalar olmuştur. Transformatörleri incelendiğimiz zaman, primer sargısı ve sekonder sargısı arasında hiçbir elektriksel bağlantının olmadığını görürüz. Michael Faraday, primer tarafta oluşturulabilecek deien bir akım sayesinde sekonderde gerilimin indüklenebileceği teorisi üzerinde durmuş ve indüksiyonla ısıtma sistemlerinin mimarı olmuştur. Çok uzun yıllardan beri bu metod; motorlarda, jeneratörlerde, transformatörlerde ve radyo iletiminde kullanılmaktadır. Faraday'ın yaptığı deneyler; indüklenen gerilimlerin sekonder tarafta bir akım akmasına neden olduğunu ve ısınma olduğunu göstermektedir. İndüklenen gerilime bağlı olarak oluşan bu akımın da kendine zıt polaritede frekans ile deien bir akım olduğunu gösteren Lenz ve Neuman kanunları ortaya çıkmıştır. Akımdan veya manyetizmadan dolayı oluşan bu ısınma çoğu uygulamada istenmeyen bir durum olarak karşımıza çıkmaktadır. Tüm bu gelişmelerin ışığında, 1868'de Foucault'un eddy akımı kayıpları konusundaki çalışmaları ve 1884'de Heaviside'in "The Induction of Currents in Cores" isimli makalesini yayınlaması ile indüksiyonla ısıtmanın temelleri atılmıştır. Heaviside'in bu çalışmasında bobinde oluşan elektromanyetik indüksiyonun nüvede enerji oluşturması prensibi anlatılmaktadır. İndüksiyon ısıtma konusundaki bu çalışmalar ilk başlarda yeterli güç kaynaklarının bulunmamasında dolayı uygulamaya geçememiştir, teorik olarak sınırlı kalmıştır.

İndüksiyon ile ısıtma konusundaki ilk patenti 1897'de Ferranti almıştır (Lupi 2012). Ticari anlamdaki ilk uygulamalara 1900'de İsveç'te ve 1906'da ise Almanya'daki çelik eritme ocaklarının yapılmasıyla başlamıştır.

1900'lü yılların başlarında İtalya'da, Fransa'da ve İsviçre'de eritme işlemlerinin yapılması için orta frekans seviyelerinde çalışabilecek indüksiyon fırınlarının yapılabileceği önerilmiştir ve bununla birlikte reaktif gücün kompanze edilebilmesi için kondansatörlerden faydalanılması gerçeği ortaya çıkmıştır. Dr. Northrup, 1916 yılında endüstride kullanılacak olan orta frekans seviyelerinde çalışabilen indüksiyon fırınlarını geliştirmiştir (Çetin 2005). Ancak ebeke frekansından daha yüksek frekanslarda çalışılması için uygun boyutta kondansatörlerin olmaması sorunu ile karşılaşmıştır. Kâğıt tipi kondansatörlerin üretilmesi ile bu problem de ortadan

kaldırılmıştır. 1927 yılında Electric Furnace Company (EFCO) tarafından ilk orta frekansta çalışabilen eritme ocağı üretilmiş ve ilgi görmüştür. Bu yıllardan itibaren metallerin eritilmesi, özel alaşımların hazırlanması ve paslanmaz çelik üretimi gibi konularda fırınların kullanımı yaygınlaşmaya başlamıştır.

İkinci dünya savaşı sonrasında gelişen otomotiv sektörü ile indüksiyon ısıtma önem kazanmıştır. Bunun haricinde daha farklı uygulamalarda da kullanılabilecekine dair çalışmalar hızlandırılmıştır. Elektromanyetik indüksiyonun; yüzey sertleştirme işlemlerinde kullanılması, seri üretim için uygulama kolaylığı sağlaması, kayıpların diğer sistemlere göre daha az olması ve dalma derinliğinin kontrol edilerek malzeme üzerindeki ısıtılacak yüzey kalınlığının ayarlanabiliyor olması gibi üstünlükleri kullanımının yaygınlaşmasını sağlamıştır (Egan ve Furlani 1991).

İndüksiyon ile ısıtma yapan sistemlerin yatırım maliyetleri ilk tasarlanmaya başladıkları dönemlerde diğer yöntemlere göre oldukça fazlaydı. Özellikle orta frekans seviyelerinde çalışabilen ısıtıcı sistemlerin ilk yatırım ve periyodik bakım giderleri yüksek maliyetler gerektirmekteydi.

Yarı iletken teknolojisinin gelişmesi ile birlikte maliyet problemi neredeyse önemini yitirmiş ve indüksiyon ısıtma ile ilgili çalışmalar şu an oldukça yaygın olarak devam etmektedir. İndüksiyon ile ısıtma yapılan uygulamalarda standart güç kaynaklarından ziyade güç yarı iletken güç anahtarları ile kurulmuş sistemlerden faydalanılması birçok konuda kolaylık sağlamaktadır.

1966 yılından bu yana yarı iletken teknolojisinin gelişmesi ve kullanımı ile birlikte statik inverterler tasarlanmaya başlanmış olup, indüksiyon ısıtma konusunda yeni bir dönem başlamıştır. Statik inverterlerdeki gelişme beraberinde rezonans devreli inverterlerin ortaya çıkmasını sağlamıştır. Rezonans devreli inverterlerde tasarlamak istenilen uygulamalara göre farklı anahtarlama elemanları kullanılmaktadır; kapısından tükenebilen tristörler (GTO) ile 50 kHz seviyelerine, yalıtılmış kapılı transistörler (IGBT) ile 150 kHz seviyelerine ve metal oksit yarı iletken alan etkili transistör (MOSFET) ile de GHz seviyelerine ulaşabilen frekanslar elde edilebilmiştir (Bodur ve ark.). Gelişen teknoloji ile birlikte şu an 2 MW çıkış gücünde inverterler yapabilmek mümkün hale gelmiştir (Atavi 1991).

Rezonans devreli inverterler ile ilgili yapılan çalışmalar, modern anahtarlama yöntemlerinden faydalanılması durumunda daha yüksek frekans değerlerinde daha yüksek verimlerin alınabileceğini kanıtlamıştır. Bununla birlikte frekansın artması,

yüksek frekanslarda verimliliği de yüksek olan daha maliyetli güç kaynaklarını gerektirmektedir.

İndüksiyon ısıtma ile belirli frekans aralıklarında farklı uygulamalar gerçekleştirilebilmektedir. Örneğin malzemenin ısıtılabilmesi, fiziksel özellikleri değiştirilerek şekillendirilebilmesi, eritilmesi gibi işlemler düşük frekanslar ile yapılabilmektedir. Fakat malzeme yüzeyini ısıtmak, sertleştirmek gibi uygulamalar orta ve yüksek frekans seviyelerini gerektirir (Davies ve Simpson 1979).

İndüksiyon ısıtma tekniğinin verimli ve güvenli olması, iş parçası üzerinde oluşturulan sıcaklığın kontrol edilebilir olması ve işlem sonucunda temiz bir ortamın sağlanması gibi bazı özellikleri günümüzde tencere ve tava gibi evlerde kullandığımız ürünlerde de tercih sebebi olmuştur (Hobson ve ark 1985, Chatterjee ve Ramanarayanan 1993, Imai ve ark 1997, Köroğlu ve Sazak 2002, Sami Sazak 2004).

İndüksiyonla ısıtmaya ait ilk örneklerin üretiminin yapılmasından bu güne kadar geçen zamanda uygulama rahatlığı sağlanması ve ısıtılacak olan malzemenin kalitesini artırması gibi avantajlarından dolayı büyük ilgi görmüştür. Bu konu ile ilgilenen firmalar, zamanla kendilerini büyütür ve geliştirecek kendi pazarlarında söz sahibi olmaktadır. İndüksiyon ısıtma sistemi üretimi hem ciddi maliyetler oluşturduğundan hem de iyi bir akademik çalışmaya gerektirdiğinden dolayı çok fazla üretici bu konu ile ilgilenmemektedir. Ülkemizde 1980'lerden sonra indüksiyon ocaklarının belirli sayıda çeşitlerinin üretimi ile bu konuya ancak giriş yapılabilmektedir.

### **2.3.2. İndüksiyon ısıtmanın üstünlükleri**

İndüksiyon ısıtma tekniğinin en büyük avantajı yüksek verimlilik elde edilebilir olmasıdır. Verimliliğin yüksek olabilmesinin en önemli sebebi ısıtma işleminin sadece ısıtmak istenen parça üzerinde yoğunlaşarak elde edilmesidir. İndüksiyon ısıtmanın bunun yanı sıra birçok üstünlüğü de mevcuttur:

- Metalleri ısıtma süresi kısadır,
- Isıtma işlemi çok kısa süreden dolayı malzemenin hal değişimi de kısa süreceği için enerji tasarrufu sağlanır,
- Isıtma işlemi malzeme üzerinde yoğunlaşarak yapıldığından dolayı dış ortama verilen ısı miktarı azdır,



- Isıtma i lemi yanma olayı ile gerçekle tirilmedi inden dolayı hava ihtiyacı yok denecek kadar azdır,
- Isıtma bölgesinde yanma ürünü olmamaktadır,
- Yanma olayı ile ısıtma yapılmadı ndan dolayı yanma ürünü olarak zararlı gazlar olu madı ı için sa lıklı ve güvenli bir uygulamadır,
- Çevre kirlili i olu turmaz,
- Isıtma i leminin kısa sürmesi otomasyonel sistemlere uygunlu unu da göstermektedir,
- Denetimli ısıtma gerçekle tirilebilir.

Her sistemde oldu u gibi indüksiyon ısıtma tekni inin de dezavantajları bulunmaktadır. Sistemsel olarak ekonomik olmaması, de i ik yüklerde toplam empedansın farklı olmasından kaynaklı uyum problemleri, elektronik gürültü üretmesi, güç faktörünü dü ürmesi, kontrol ünitelerinin anla ılabilir olmaması indüksiyon ısıtma tekni inin dezavantajları arasında yer almaktadır. Fakat her farklı yüke göre uygun bir indüktör kullanarak, uygun güç elektroni i devresi ve anahtarlama teknikleri seçerek bu sorunlar azaltılabilir.

### **2.3.3. ndüksiyon ısıtma**

#### **2.3.3.1. Giri**

Elektrik enerjisi her yerde bulunabilen, verimi yüksek ve kontrolü kolay olan bir enerji türüdür. Bu nedenle birçok alanda elektrik enerjisinin kullanımı ön plana geçmi tir. Hassas ısı kontrolü gerektiren uygulamalarda elektrik enerjisinden sıklıkla yararlanılmaktadır. Günümüzde kullanılan birçok ısıtma yöntemi vardır. Enerji kayna ı olarak genellikle elektrik enerjisini kullanan bu yöntemler a a ıda maddeler halinde verilmi tir. Bunlar:

- ndüksiyon ısıtma sistemleri,
- Plazma ısıtıcılar,
- letimsel ısıtma,
- Elektron ı n kaynakları,
- Dirençli ısıtma,

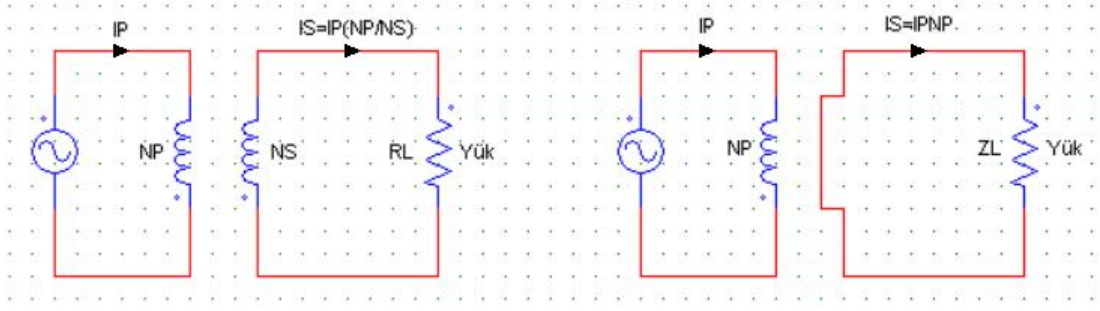
- Elektrikli ark ocakları,
- IR (kızıl ötesi radyasyon) ısıtma,
- Lazer ısıtma,
- Dielektrik ısıtmadır.

İndüksiyon ısıtma sisteminin genel mantığı elektromanyetik enerjinin ısı enerjisine dönüştürülmesi şeklindedir. Diğer ısıtıcı sistemlerden ayrılan en önemli özelliği ısıtma için gerekli olan ısının malzemenin kendi içindeki indüksiyonundan elde edilmesidir. Bundan dolayı ısıtılmak istenen malzemenin iletken bir malzeme olması gerekir. Ve ayrıca malzemenin ısınması için gerekli olan manyetik alanın de i ken olması gerekmektedir. Çünkü malzemeyi ısıtacak olan kısa devre akımları de i ken manyetik alan içerisinde meydana gelmektedir.

Elektriksel iletkenliği olan bir malzeme, de i ken bir manyetik alan içerisine bırakılırsa malzeme üzerinde gerilim indüklenmektedir. İndüklenen bu gerilim eddy akımları olarak tanımlanan akımların akmasına neden olacaktır. Eddy akımlarından faydalanılarak yapılan bu ısıtma işlemine indüksiyon ısıtma denir. Alınan yöntemlerle yapılan ısıtma işlemlerinde bir malzemenin sıcaklığını yükseltmek malzemenin dış yüzeyine ısı verirken, indüksiyon ile ısıtma işleminde gereken bu ısıyı malzemenin kendi içindeki indüksiyonu ile elde ederiz.

### 2.3.3.2. Temel teorisi

Şekil 2.7 (a)'daki gibi transformatör için kullanılan e de er devrelerden ve teorilerden faydalanarak bir indüksiyon ısıtma sistemi elde edilebilmektedir. Aralarındaki tek fark indüksiyon ısıtmaya ait e de er devrede sekonder sargı olmamasıdır. Şekil 2.7 (b)'de görüldüğü gibi indüksiyonla ısıtma sisteminin primer tarafı bobin ve sekonder tarafı ısıtılacak veya ısılenecek malzeme olan nüvesiz, kısa devre edilmiş bir trafo gibi düşünülebilir.



(a) Transformatöre ait elektrik devre

(b) İndüksiyon ısıtmaya ait elektrik devre

Şekil 2.7. Transformator ve induksiyon ısıtma elektrik devreleri

 $I_P$ : Primere ait akım $I_S$ : Sekondere ait akım $N_P$ : Primere ait sarım sayısı $N_S$ : Sekondere ait sarım sayısı

İndüksiyonla ısıtma sistemi, primer tarafı bobin ve sekonder tarafı ısıtılacak veya ısıtılacak malzeme olan nüvesiz, kısa devre edilmiş bir trafo gibi düşünülebilir. İndüksiyonla ısıtma sisteminin elektrik devresindeki  $Z_L$  ısıtılacak malzemenin iç direncini temsil etmektedir. Bu  $Z_L$  direnci, trafonun elektrik devresindeki  $R_L$  yük direncine karşılık gelmektedir.

Tek sarımdan oluşan bobine uygun frekansta alternatif bir gerilim uygulandığında zaman bobinin çevresinde belirli bir manyetik alan oluşur. Bu belirli manyetik alan, ısıtılmak istenen malzeme üzerinde bir gerilim indüklenmesine neden olur (Faraday Yasası) ve Denklem 2.1 ile hesaplanır.

$$\varepsilon = -\frac{d\phi}{dt} \text{ (volt)} \quad (2.1)$$

Bobinin “n” sarımdan oluşması halinde indüklenecek gerilim Denklem 2.2’de görüldüğü üzere;

$$\varepsilon = -\frac{d\phi}{dt} n \text{ (volt) olur.} \quad (2.2)$$

Bu indüklenen gerilim, sistemin sekonder kısmını oluşturulan ısıtılacak malzeme içerisinde bobin akımına ters yönde bir akım akmasına neden olur (Lenz Yasası). Bu akım fukolt veya girdap akımı olarak adlandırılır.

ekil 2.7 (a)'daki e de er devrenin ideal bir transformatöre ait oldu unu dü ünürsek primer ve sekonder akımlarının sarım sayıları ile orantıları Denklem 2.3'teki gibidir:

$$I_S = I_P \frac{N_P}{N_S} \quad (2.3)$$

ekil 2.7 (b)'deki e de er devrede sekonder tarafı kısa devre olarak dü ünürsek; sekonder akımın, primer akımı ve sarım sayısı ile ili kisi Denklem 2.4'teki hale gelir:

$$I_S = I_P N_P \quad (2.4)$$

Bunun sonucunda sekonderden akacak olan akım artar ve kaynak tarafından çekilecek olan gücün tamamı yüke aktarılmalı olur. Yüke aktarılan güç  $I^2R$  kayıpları olarak tanımlanan ısı kaybına neden olur. Olu an bu ısı kaybı ço unlukla elektrik devrelerinde istenmeyen bir durum olarak kar ımıza çıkar. Fakat bu ısı kaybından faydalanarak indüksiyon ile ısıtma yapılmaktadır.

### 2.3.3.3. Elektromanyetik indüksiyon

Elektriksel iletkenli i olan bir malzemedan akım geçirilecek olunursa malzeme etrafında manyetik bir alan olu ur. Geçirilen bu akım alternatif ise manyetik alan da de i ken olur.

ekil 2.8'de temsili olarak bobine, alternatif akım güç kayna ı ile enerji verilmi ve amper yasasına göre bobin etrafında olu an manyetik alanın de i ken oldu u gösterilmi tir. Manyetik alan iddeti, manyetik akı yo unlu u ve manyetomotor kuvveti gibi bazı de erler Denklem 2.5 ve Denklem 2.6'da gösterildi i gibi hesaplanmaktadır.

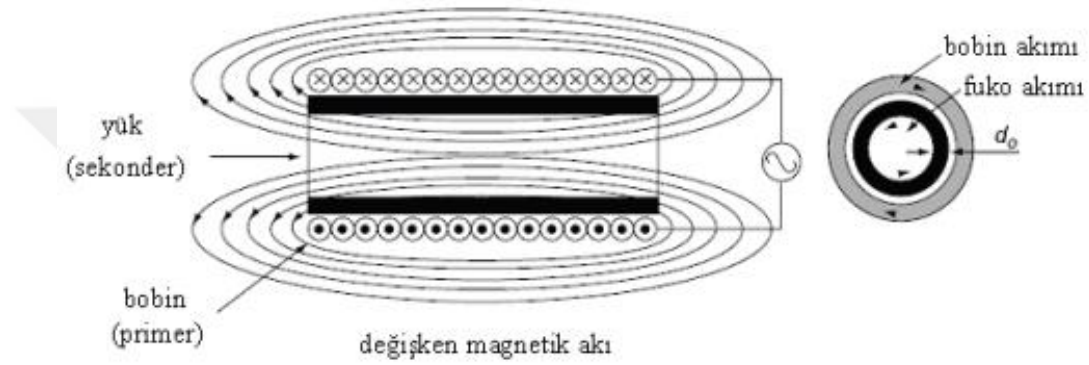
$$H = \frac{N \cdot i}{l} \quad \text{ve} \quad F_m = \int H \cdot dl = N \cdot i \quad (2.5)$$

$$B = \mu \cdot H \quad \text{ve} \quad \Phi = B \cdot S = \mu \cdot H \cdot S \quad (2.6)$$

Burada:

H: Manyetik alan (At/m),

- N: Spir sayısı (t),  
i: Akım (A),  
l: Akı olu an yolun ortalama uzunlu u (m),  
 $F_m$  : Manyetomotor kuvveti (A),  
 $\Phi$  : Manyetik akı (Wb),  
B: Manyetik akı yo unlu u (T),  
 $\mu$  : Manyetik geçirgenlik katsayısı (Wb/At-m),  
S: Yüzey alanı ( $m^2$ )'dır.



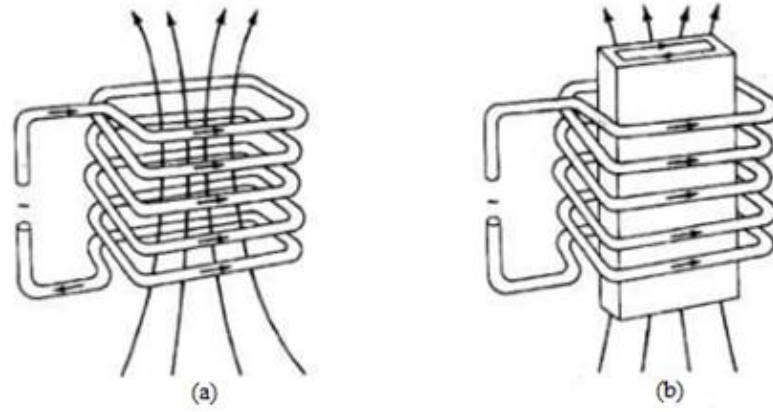
ekil 2.8. De i ken manyetik alan çizgilerinin olu umu

Bobin etrafında olu an manyetik akının de eri, cismin manyetik geçirgenlik katsayısına ba lı olup, do ru orantılı olarak de i mektedir. Yani malzemenin manyetik geçirgenli i ne kadar yüksekse malzeme üzerinde o kadar büyük bir manyetik akı olu acaktır. Manyetik geçirgenlik katsayısı “ $\mu$ ” de eri hem malzemenin hem de havanın manyetik geçirgenli i ile do rudan ili kilidir ve Denklem 2.7’deki gibi hesap edilmektedir. Burada  $\mu_0$  bo lu un yani havanın manyetik geçirgenlik katsayısı ve  $\mu_r$  ise malzemeye ait ba ıl manyetik geçirgenlik katsayısıdır.

$$\mu = \mu_0 \cdot \mu_r \quad \mu_0 = 4\pi \cdot 10^{-7} \quad (2.7)$$

De i ken manyetik alan içerisinde kalan cisim üzerinde olu an manyetik alanın yo unlu u, frekansa ba lı olarak yüzeyinden merkezine do ru farklılık göstermektedir.

ekil 2.9’da indüksiyon bobini ve parça üzerinde olu an manyetik alan ile parça üzerindeki akım yönleri görülmektedir.



(a) Bobindeki manyetik alan ve akım yönü (b) parçasında meydana gelen akım  
**ekil 2.9.** Bobindeki manyetik alan ve akım yönü ile i parçasındaki akım yönü

#### 2.3.3.4. Histerezis kayıpları

Histerezis kayıpları manyetik sürtünme sonucu oluşmaktadır. Manyetik alan içerisinde kalan moleküllerin ileri ve geri yöndeki hareketleri esnasında birbirlerine sürtünmeleriyle açığa çıkan ısı enerji kaybıdır. Ve bu kayıp malzemenin belirli bir oranda ısınmasına neden olur (Agrawal 2001). Bu kayıplar, indüksiyon ile yapılan ısıtma işlemlerinde katkılarının az olmasından dolayı ihmal edilirler ve Denklem 2.8'de gösterildiği gibi hesaplanırlar:

$$P_h = K_h f B_m^{1,6} \quad (2.8)$$

Burada;

$K_h$ : Histerezis katsayısı,

$f$ : Kaynak frekansı (Hertz),

$B_m$ : Akı yoğunluğunun maksimum değeri ( $\text{Wb}/\text{m}^2$ )'dir.

#### 2.3.3.5. Eddy kayıpları

Demir bir nüveyi de i ken bir manyetik alan içerisine yerle tirecek olursak nüve üzerinde girdap şeklinde akımlar akmaya başlar ve bu akımlara eddy (girdap) akımları denir. İndüksiyon ile ısıtılmak istenen metal parçayı nüve olarak düşünürsek, nüve üzerinde eddy akımları nedeniyle  $I^2R$  omik kayıpları oluşur ve nüve ısınır. Nüvede

ısınmaya sebep olan bu kayıplar, indüktöre seri olarak bağlanan bir dirençle elektriki olarak temsil edilebilir. Buradaki R direncinin, dalma derinliğine bağlı olarak değiştiği unutulmamalıdır.

İndüksiyon ile ısıtma yapılırken malzemeyi ısıtmak için neredeyse tamamen eddy akımlarından faydalanılmaktadır. Bundan dolayı eddy akımı kayıplarına etkisi olan kaynak frekansının, ısıtılmak istenen malzemenin iletkenlik katsayısının, manyetik geçirgenlik katsayısının ve malzemenin hacmi gibi faktörlerin göz önünde bulundurulması gerekir.

Eddy akımı güç kaybını Denklem 2.9 ile hesap etmek mümkün olabilir:

$$P_e = K_e B_m^2 t^2 f^2 V \quad (2.9)$$

Burada:

$K_e$ : Eddy akımı katsayısı,

$B_m$ : Akı yoğunluğunun maksimum değeri ( $\text{Wb/m}^2$ ),

$T$ : Malzemenin kalınlığı (m),

$f$ : Kaynak frekansı (Hz),

$V$ : Isıtılacak malzemenin hacmi ( $\text{m}^3$ )'dir.

Ayrıca eddy akımı kayıplarının, indüksiyon ısıtmanın haricindeki diğer uygulamalarda istenmeyen bir durum olduğu da unutulmamalıdır.

### 2.3.3.6. Dalma derinliği (skin effect, deri etkisi)

İletken bir malzemeye yüksek frekansta bir gerilim uygulandığı zaman malzemeye ait toplam direnç dalma derinliği nedeniyle değişimlilik gösterir. İletkene ait direnç frekans arttıkça artacaktır. İletkenden akım akarken manyetik alan çizgileri malzemenin merkezini daha çok oranda kesecektir. Bu nedenle iletkenin merkezindeki endüktans değeri yüzeyine oranla daha yüksek olacaktır, yani merkezdeki reaktansı daha fazla olacaktır. Merkezdeki reaktansın yüksek olmasından dolayı akım yüzeye yakın bölgelerden akacaktır. Frekansın artması merkez noktasındaki endüktansı arttıracak için malzemenin üzerinden akan akımın yoğunluğu malzemenin yüzeyinden merkezine doğru gidildikçe üstel olarak azalacaktır. Dalma derinliği, deri etkisinden dolayı

yo unlu u malzeme yüzeyinden merkezine do ru azalan akımın yo unlu unun, yüzeydeki de erinin 1/e'sine dü tü ü derinlik de eri olarak kabul edilir. “e” de eri 2,718 olarak alındı ı zaman gücün %86'sının ve akımın ise %63'ünün yüzeyde yo unla tı ının sonucunun çıkartılması mümkün olacaktır.

Dalma derinli i de eri frekansa ba lı oldu u kadar malzemenin fiziksel ve manyetik özelliklerine de ba lıdır. Bu nedenle dalma derinli inin hesaplanmasında Denklem 2.10'da formül kullanılır:

$$\delta = \sqrt{\frac{\rho}{\mu f \pi}} = \sqrt{\frac{1}{4\pi^2 10^{-7}}} \sqrt{\frac{\rho}{\mu_r f}} \quad (2.10)$$

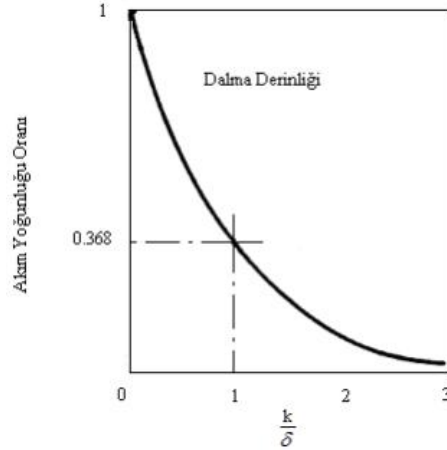
Burada;

f: Frekans (Hz),

$\mu$  : Malzemenin manyetik geçirgenli i (Wb/At-m),

$\rho$  : Malzemenin özgül direnci (  $\text{mm}^2/\text{m}$ ),

$\delta$  : Dalma derinli i (mm)'dir.



**ekil 2.10.** Dalma derinli inin üstel olarak azalması

ekil 2.10'da yatay eksen de görünen “k” de eri ısıtılan cismin kalınlı ına ait de erdir. Grafikten de görüldü ü üzere akım yo unlu u yüzeyden merkeze do ru gidildikçe azalmaktadır. Denklem 2.10'a baktı ımızda frekans arttıkça dalma derinli inin azaldı ını görmekteyiz. Bu nedenle akım, malzemenin en dı na



da ılacaktır. Dalma derinli inin malzemeye ait özgül direnç ve manyetik geçirgenlik katsayısına ba lı oldu u unutulmamalıdır (Sazak 1999).

Malzemenin yüzeyinden herhangi bir k uzaklı ındaki akım yo unlu u Denklem 2.11 ile verilen formülle bulabiliriz:

$$i_x = i_0 e^{-\frac{k}{\delta}} \quad (2.11)$$

Burada:

$i_k$ = Dı yüzeyden k mesafesi kadar bir uzaklıktaki akım yo unlu u,  
 $i_0$ = k'nın sıfır oldu u andaki akım yo unlu u (en dı yüzey)'dur.

Yukarıdaki formülde k mesafesi olarak  $\delta$ 'ı alırsak, akım yo unlu u Denklem 2.12'de gösterildi i gibi:

$$i_\delta = i_0 e^{-\frac{\delta}{\delta}} \quad i_\delta = i_0 e^{-1} \quad i_\delta = i_0 \cdot 0,368 \quad (2.12)$$

eklinde hesaplanır. Bu sonuç bize akım nüfuz derinli indeki akım miktarının, en dı yüzeydeki akımın %36,8'i oldu unu gösterir. Buldu umuz sonuç ekil 2.10 üzerinde de görülebilmektedir.

### 2.3.3.7. Isı aktarımı

Herhangi bir malzemeyi ısıtırken malzemed e meydana ısı da ılımı malzemenin her yerinde farklı de erdedir. Isı dı arıdan verildi i taktirde yüzeyden merkeze do ru gidildikçe ısı yo unlu u azalır. ndüksiyon ısıtma ile ısıtılan bir malzemedeki ısı transferini ısının geçici olarak depolanması, sıcaklı ın sabit olarak yükselmesi ve sıcaklı ın so rulma süresi olarak üç a amada inceleyebiliriz.

Isının geçici olarak depolanması a aması, ısının malzemenin katmanlar arasında da ılmaya ba laması zamanıdır. En dı yüzeydeki katmanın ısıyı kendi üzerinde depoladıktan sonra di er katmana iletmesi ile bu a ama devam eder. Bu a ama gerçekte tikten sonra malzemenin her yerinde sabit bir sıcaklık yükselmesi ba lar. Sabit sıcaklık yükselmesinden sonra malzemenin kullanılabilmesi için so rulma zamanına

ihtiyaç vardır. Yüzey ile merkez arasındaki ısı da ılımlı farklılıktan dolayı sıcaklık farkı olmaktadır. Bu nedenle sıcaklık farkının giderilebilmesi için malzemenin sıcaklığı soğuması beklenir.

#### **2.3.4. İndüksiyon ile ısıtma uygulamaları**

İndüksiyonla ısıtmayı; malzemelerin eritilmesi, kaynatılması, lehimlenmesi, ekil verilerek tavlanması, yüzeylerinin sertleştirilmesi, çeltili ısıl işlemler gibi birçok uygulamada rahatlıkla görebilmekteyiz. Örneğin; metallerin indüksiyon fırınlarında eritilmesi, iş gücü ve ham madde elde edilmesinde düşük maliyet sağlamaktadır. Bu yöntemle alaşım hazırlamak daha kolay olmakta ve üretim sonrası elde edilmiş ürünlerin kalitesi daha yüksek olmaktadır (Khan ve ark 2000).

İndüksiyon ısıtma teknikleri, frekans değeri 50 Hz ile birkaç MHz seviyeleri arasında değişebilen farklı güç kaynakları ile birçok uygulamada kullanılmaktadır. İndüksiyon ile ısıtma yapılacak olan bir uygulamada kullanılacak frekansın, ısıtılmak istenen malzeme üzerindeki dalma derinliği etkisi dikkate alınarak uygulanacak işleme uygun olarak seçilmesi gerekir.

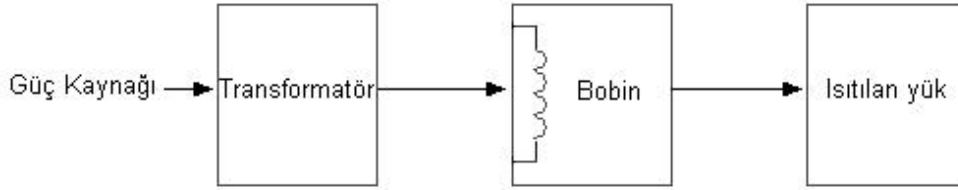
Dalma derinliği dikkate alınarak farklı frekans aralıkları ve bu aralıklara uygun farklı uygulamalar geliştirilmektedir.

- Kaynak frekanslı sistemler ( 50/60 Hz),
- Motor alternatör sistemleri (500 Hz – 10 kHz),
- Statik invertör sistemleri (500 Hz – 50 kHz),
- Yüksek frekanslı sistemler (50 kHz – 10 MHz).

##### **2.3.4.1. Kaynak frekanslı sistemler**

Bu sistemlerde frekans dönüşümünün olmaması sistemin en büyük avantajıdır. Sistemde oluşacak olan güç kaybı daha azdır ve sürme devresinin karmaşık olmaması sistemi daha basit kılmaktadır. Sistem bakımı daha azdır ve sistemde kullanılacak olan donanımlar klasik elektronik devre elemanlarından oluşabilir. Sekonderde karışıklan ısı kayıplarının oluşması, kaçak akıdan kaynaklı ısınmalar ve indüklenen yüksek frekansdaki gerilimler gibi problemler dikkate alınmayacak derecede azdır. Sistem maliyeti diğer sistemlere göre daha azdır. Çünkü frekansın artması beraberinde

daha maliyetli yapıları gerektirir. Bu sistemlerin blok diyagramı ekil 2.11’de görüldü ü gibidir.



**ekil 2.11.** Kaynak frekanslı sistemlere ait blok eması

Bu tip sistemlerde indüksiyon bobini direkt olarak 50Hz’lik ebededen beslenir. Bu nedenle bu sistemlere ebeke frekanslı sistemlerde denilmektedir. ndüksiyonla ısıtma sistemlerinde kullanılan en basit bobin besleme yöntemidir. Çünkü yapısında karma ık elektronik elemanlar barındırmaz. İlk kurulum masraflarının fazla olmaması ve kayıplarının az olu u bu sistemin avantajlarıdır. Diğer bir avantajı ise fazla bakım gerektirmemesidir. Ancak akım nüfuz derinli inin yüksek olmasından dolayı her uygulamada kullanılması uygun de ildir. Akım nüfuz derinli i 10 mm – 100 mm arasında de i mektedir. Bu tip sistemlerde ısı da ılımı düzgün oldu u için genel ısıtma ve eritme uygulamalarında kullanılır. Dü ük güç katsayısının yükseltmek için kondansatör kullanmak gerekir. Dü ük frekanslı sistemlerde genellikle su borusu ekinde içi bo bakır iletkenler kullanılır. Bobin, ısıtılan veya i lenen malzemedен yansıyan sıcaklıkla ısınarak bobin direncinin artmasına neden olur. Bu nedenle çalı ma esnasında bakırın içerisinden su geçirilerek so utulur. Böylece bobin direnci dü ürlerek indüksiyonla ısıtma sisteminin verimi yükseltilir.

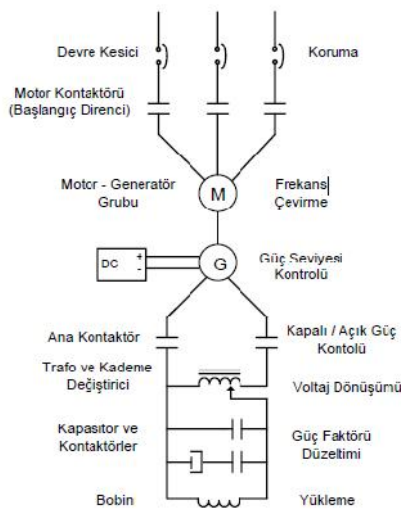
Dü ük frekanslı sistemlere örnek olarak Frekans Üçleme Sistemi’ni de verebiliriz. Frekans üçleme sistemleri, özel yapıda transformatörler ve süzgeçler kullanılarak üç faz ebeke frekanslı sistem temel bile enler süzülüp, üçüncü harmoniklerin toplamı tek faz kaynak ekline dönü türülerek gerçekleştirilmektedir. Bu sistemlerde hareket eden parçalar bulunmadı ı için bakımı ve onarımı kolaydır. Ancak i lem hızının dü ük olması ve tasarım güçlükleri nedeniyle, statik güç kaynaklarının geli imiyle bu sistem kullanılmamaktadır.

### 2.3.4.2. Motor alternatör sistemleri

ndüksiyon ile ısıtmanın otomasyonel sistemlere entegrasyonu, minimal boyutlarda ve çok kısa sürelerde ısıtma ihtiyacı duyulan uygulamalarda talep edilir olması çalı ma frekanslarının yüksek olmasını gerektirmektedir. Bu nedenle tahrik kısmı asenkron motorlardan olu an ve çıkı frekansı 500 Hz ile 10 kHz arasında de i ebilen alternatörler kullanılmaya ba lanmı tır. 500 kW güce kadar tek motor alternatör gurubu kullanılabilir. 500 kW'tan büyük güçler için tek alternatör yerine birden fazla alternatör grubu kullanılmaktadır. Sistemsel olarak birçok hareketli parça oldu undan dolayı sıklıkla bakım gerektirmektedirler ve yatırım maliyetleri oldukça yüksektir. Çıkı frekansları sabit oldu undan dolayı güç faktörünün ölçülerek sistemin kompanze edilmesi de kolaylıkla sa lanabilir.

Dalma derinli i 1 mm. ve 10 mm. arasında olması istenen eritme ocaklarında, parçalara ekil verme ve parçaların birbirine kaynatılması gibi uygulamalarda bu sistem kullanılmaktadır. Motor alternatör sistemleri, statik inverterler ile ilgili geli melere kadar tek seçenektir fakat statik inverterlerin kullanılması ile bu sistemlere olan ilgi de kullanım da azalmı tır.

A a ıdaki ekilde motor alternatör sistemlerine ait bir ema ekil 2.12'de görülmektedir.

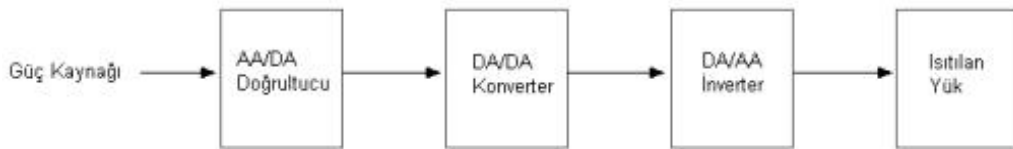


ekil 2.12. Motor generatör sistemi eması

### 2.3.4.3. Statik inverter sistemleri

1960'larda yarı iletken teknolojisinde meydana gelen gelişmeler ile birlikte statik inverterlerin kullanımı da başlamıştır. Bu son gelişmeler, verimlilik ve maliyet açısından daha uygun yarı iletken anahtarlar ile tasarlanan inverterlerin alternatiflerin yerine geçmesini sağlamıştır. Tristörler ile tasarlanmış inverterlerin kullanımı MW seviyelerinde güce sahip güç kaynaklarının kullanımı sağlamıştır. Boyutlarının küçük olması, sistemsel olarak hareketli parçalar olmadığından bakım ve onarım gerektirmemeleri, deri ken yük durumlarında bile maksimum güç iletim imkânı sunması, çıkış gücünün kontrol edilebilir olması ve verimliliklerinin %90'ın üzerinde olması gibi özellikler statik inverterlerin uygulamalarda tercih edilmesini sağlamıştır.

Statik inverterler, Şekil 2.13'deki gibi bir blok diyagramına sahiptir. Öncelikle ebekeden gelen alternatif akım sinyalinin konvertere verilebilmesi için doğru akıma sinyaline dönüştürülmesi gerekir ve konverter ile girişteki doğru akım istenilen genlikte elde edilir ve invertere verilir. Inverter çıkışından elde edilen alternatif akımla yük ısıtılmış olur.



Şekil 2.13. Statik inverter sistemi blok diyagramı

Bu sistemler çalışması için gerekli olan frekansı kendiliğinden yük için gerekli frekans değerine ayarlamaktadırlar. Bu sebepten dolayı malzeme ısıtılırken sistemin kompanze edilebilmesi için anlık olarak açma kapama yapabilen anahtarlar gerekmektedir. Yarı iletken teknolojisindeki gelişmeler daha henüz tam olmamışken civa buharlı elemanlardan faydalanılmış, sadece 500 Hz'e kadar olan frekanslar elde edilebilmiştir. Fakat tristörlerin kullanıma başlaması ile bu sistemler daha da önem kazanmıştır (Dede ve ark 1991). Gelişmeye devam eden yarı iletken teknolojileri ile birlikte tristörlerden farklı olarak IGBT, GTO, MOSFET, BJT gibi yarı iletken anahtarların kullanılması ile de yüksek güçlerde daha verimli çalışabilen inverterlerin tasarlanması mümkün olmaktadır.

Yarı iletken güç anahtarları ile dizayn edilmiş statik inverter sistemlerinin kullanımı yaygın olarak devam etmektedir. Bu konuda çok sayıda inverter topolojisi geliştirilmeye devam etmektedir (Dawson ve Jain 1991). Bunlardan sık olarak tercih edilenler ise akım ve gerilim kaynaklı inverterlerdir.

Bu inverterlerin gelişimini incelediğimizde gerilim kaynaklı inverterlerin performanslarının, tristörün kesime geçme süresinin ve diyotların tekrardan ilettime girme sürelerinin uzun olmasından dolayı düşük olması ilk zamanlarda sorun teşkil etmekteydi (Dawson ve Jain 1991). Fakat yarı iletken elektroniğindeki gelişmeler, güç diyotlarındaki ve tristörlerdeki bu sorunların giderilmesine imkân sunmuş ve bu sistemlerin tekrardan amaçlarına uygun olarak kullanılmasını sağlamıştır.

#### **2.3.4.4. Yüksek frekanslı sistemler**

İndüksiyonla ısıtmanın yüksek frekanslarda yapılması malzemenin en kısa sürede ısıtılmasını sağlar (Grajales 1995, Thompson ve ark 2002). İlk olarak 50 Hz gibi düşük frekanslarından 100 kHz gibi yüksek frekanslara geçilmesi, güç yoğunluğunun yükseltilerek kısa süre içerisinde metalin küçük bir derinliği ile ısıtılmasının sağlanmasında etkili olmuştur. Gelişmeler ile birlikte megahertz seviyelerindeki frekanslar ile derinliği daha da küçültülerek ısıtmanın malzemenin yüzeyinde yoğunlaştırılmasını sağlamıştır (Khan ve ark 2000). IGBT ile tasarlanmış inverterlerin kullanılması ile 150 kHz gibi yüksek frekanslarda anahtarlama yapılabilir. 500 kHz frekans gibi özel amaçlı uygulamalarda ise MOSFET'lerden faydalanılmıştır (Hammad ve ark 2002). Yüksek frekanslı sistemlerin kullanılmasının en büyük nedeni düşük bir derinliği oluşturmalarından dolayı malzemelerinin yüzeylerinin sertleştirilmesi, birbirlerine lehimlenmesi veya kaynatılması gibi uygulamalarda rahatlıkla kullanılabilmesidir. Tercih edilmelerindeki bir büyük neden de yüksek frekanslarda yük yüzeyinde yüksek bir güç yoğunluğu sağlamalarıdır.

İndüksiyon ısıtma sistemleri, yüksek frekanslarda malzemelerin kaynatılarak birleştirilmesi ve 0.1 mm - 2 mm arası derinliğinde malzemelerin yüzeylerinin sertleştirilmesi gibi kısa sürelerde hızlı ısıtma ihtiyacı duyulan uygulamalarda kullanılmaktadır.

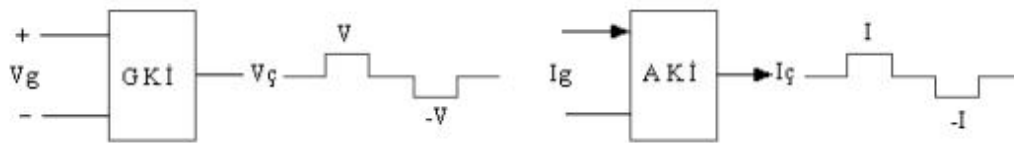
### 2.3.5. Statik inverter sistemleri

#### 2.3.5.1. Giri

Günümüzde güç elektroni ini; haberle me sistemlerinde, tıp elektroni inde, kontrol uygulamalarında ve maksimum güç transferi gerektiren birçok uygulamada yaygın olarak kullanılmaktadır. Miliwatt seviyelerinden megawatt seviyelerine kadar birçok kademede uygulamaların çe itlili ine göre güç elde edilebilmektedir (Maksimovic ve ark 2001). Güç elektroni i sistemlerinin temelini; alternatif akımı do u akıma çevirebilen do rultucu sistemleri, giri indeki do ru akımı çıkı na istenilen genlikte verebilen konverterler ve do ru akımdan alternatif akım elde edebilen inverterler sistemleri olu turmaktadır.

nverterler, giri lerinde bulunan do ru akım sinyalini, çıkı nda istenilen özellikte frekans ve gerilim de erlerindeki alternatif akım sinyaline çevirebilen sistemlerdir. Endüstri de birçok uygulamada inverterler tercih edilmektedirler. Alternatif akım motorlarının hız kontrolünde, indüksiyon ile ısıtmada, kesintisiz güç kaynaklarında özellikle kar ımıza çıkmaktadırlar. Akım kaynaklı inverterler (AK ) ve gerilim kaynaklı inverterler (GK ) olmak üzere iki grupta inceleyebiliriz.

Gerilim kaynaklı inverterlerde do ru akım kayna ndan alınan giri gerilimi inverterin çıkı nda dalgalı bir gerilime dönü türülürken, akım kaynaklı inverterlerde ise giri akımı inverterin çıkı nda dalgalı bir çıkı akımına dönü türülmektedir. Her iki inverter devresine de ait blok emasını ekil 2.14'te görebiliriz.



(a) GK konfigurasyonu

(b) AK konfigurasyonu

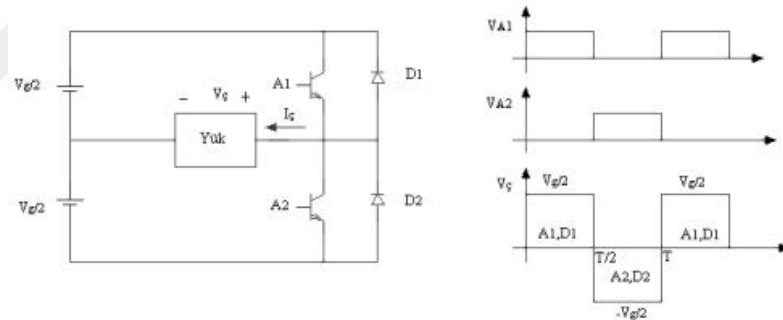
ekil 2.14. nverter konfigurasyonları

#### 2.3.5.2. Gerilim kaynaklı inverterler

Gerilim kaynaklı inverterlerin giri i, akümülatör veya kontrollü bir do rultucu devresinden elde edilmi do ru akım kayna na ait güçtür. Endüstriyel uygulamalarda

hem tek fazlı hem de üç fazlı olanları kullanım yerlerine göre tercih edilmekte ve yaygın olarak kullanılmaktadırlar. Inverter içerisindeki anahtarlamalar tristörler veya güç transistörleri aracılığı ile yapılmaktadır. GK'ler, ilk zamanlarda tristörlerin kısa sürelerde yalıtıma geçememeleri ve diyotların ters toparlanma sürelerinin yavaş olması gibi bazı sebeplerden dolayı performans bakımından uygulamalarda yetersiz kalmaktaydı. Fakat yarı iletken teknolojisindeki gelişmelerin beraberinde tristörlerin ve diyotların bu sorunlarının giderilmesi GK'lerin yeniden incelemeye başlanmasını sağlamıştır (Dawson ve Jain 1991).

Şekil 2.15 (a)'da giriş bir fazlı ve gerilim kaynağına bağlı olan, kare dalga ile anahtarlama yapılan bir yarım köprü inverter devresi gösterilmektedir. İki gerilim kaynaklarının değerleri aynıdır ve A1-A2 anahtarlarına paralel olarak bağlanırlar. Burada A1 ve A2 anahtarlarını; tristör, GTO, BJT, MOSFET veya IGBT anahtarlarından herhangi birinden seçebiliriz. D1 ve D2 diyotlarının görevi ise yükte reaktif enerjinin kaynağa geri aktarılmasına yardımcı olmaktır ve geri besleme diyotları olarak bilinirler.



(a) Yarım köprü GK

(b) Dalga şekilleri.

Şekil 2.15. Yarım köprü inverter devresi

Devrenin çalışması şu şekilde gerçekleşir;  $A_1$  ve  $A_2$  anahtarları sırası ile ilettime girer ve çıkarlar. Çıkış gerilimine ait gerilim-zaman grafiğinde yatay eksenin üst kısmında kalan bölümde  $A_1$  anahtarının iletimde olduğunu gösterir ve yükün uçlarındaki gerilim, giriş geriliminin yarısı değerindedir yani  $V_g/2$ 'dir. Grafiğin yatay ekseninin alt kısmında ise  $A_2$  anahtarı iletimdedir ve yük uçlarındaki gerilim, yine giriş geriliminin yarısına eşittir fakat negatif polaritede olacaktır, yani  $-V_g/2$ 'dir.

Anahtarların iletimde oldukları ve anahtarların durumuna göre çıkış gerilimlerinin dalga şekilleri Şekil 2.15 (b)'de gösterilmektedir. Şekillerden de anlaşılacağı üzere anahtarların biri iletimde iken diğeri kesimde yani yalıtımdadır. Enerji

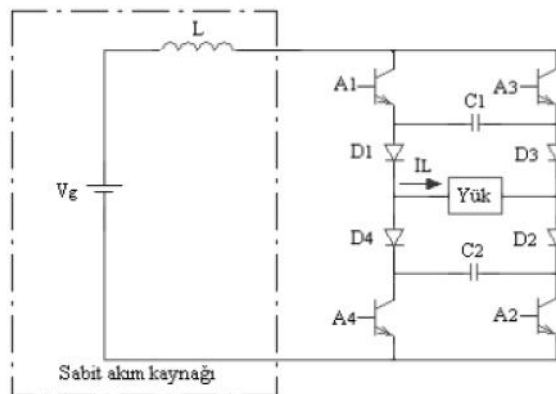


anahtarların ikisi de aynı anda iletme geçecek olursa do ru akım kaynakları kısa devre olacaktır. Bu yüzden aynı anda iletimde olamazlar.

Yarım köprü inverterlerde ekil 2.15 (b)'de dalga ekillerinden görüldü ü üzere çıkı gerilimi kare dalga olarak üretilmektedir. Çıkı gerilimine ait genlik de erini giri gerilimine ait genlik de erini de i tirerek ayarlayabiliriz.

### 2.3.5.3. Akım kaynaklı inverterler

Akım kaynaklı inverterlerin giri ini süreklili i olan ve de i meyen bir akım verebilen DC kaynak olu turmaktadır. Giri teki akımı sabit ve sürekli tutabilmek için gerilim kayna ına seri bir bobin ba lanır. Devrede bulunan anahtarların kontrolü, akım ile yapılmaktadır. Bu yüzden akım kaynaklı inverterler olarak isimlendirilmektedirler. Bu inverterlerde akım sabittir ve yüke aktarılan voltaj, yüke paralel ba lanan kondansatörler yardımı ile de i tirilir. Kondansatörlerin, akımdan kaynaklı harmoniklerin filtrelenmesi ile yüke aktarılan akımın sinüzoidal olmasını sa lamaları ve ani voltaj yükselmesini azaltmaları gibi görevleri de vardır. Sabit ve sürekli olan akımın, gerilim kayna ından sa lanmasından dolayı de eri de i tirilebilen bir akım kayna ının elde edilebilmesi için ayarlanabilir güç kaynakları gerekmektedir. Bu yüzden devrede olu abilecek bir kısa devre durumunda, güç kayna ının kısa devre korumasının olmasından dolayı gerilim kaynaklı inverterlere göre daha güvenirlidirler (W 1993, Paresh 1997). Çıkı taki akım, giri ten ayarlandı ı için inverterin çıkı ında kısa devreden kaynaklı bir sorun olsa bile akım yükselmeyecektir. ekil 2.16'da örnek bir akım kaynaklı inverter devresi gösterilmi tir.



ekil 2.16. Akım kaynaklı tam köprü invertör

$A_1$  ve  $A_2$  anahtarları iletime geçtiğinde  $A_3$  ve  $A_4$  anahtarları yalıtımda olur ve devreden akacak olan akım  $A_1$ ,  $C_1$ ,  $D_3$ , yük,  $D_4$ ,  $C_2$  ve  $A_2$  yolunu takip eder. Bu sırada kondansatörler pozitif yönde arj olurlar.  $A_3$  ve  $A_4$  anahtarları iletime geçtiğinde ise  $A_1$  ve  $A_2$  anahtarları yalıtımda olurlar ve akım  $A_3$ ,  $C_1$ ,  $D_1$ , yük,  $D_2$ ,  $C_2$  ve  $A_4$  yolunu takip eder. Bu sırada ise kondansatör ters yönde arj olurlar. Böylece yük üzerindeki gerilim sürekli değişime zorlanmaktadır.

AK elde etmek için güç kaynağına seri bağlanan indüktörün, sistemin boyutlarının büyümesine ve endüktif etki yaratmasından dolayı giriş güç faktörünün düşmesine neden olması dezavantaj olarak görünmektedir. Fakat kısa devre koruması ve geri kazanım gibi özelliklerinin olması da sistemin avantajları arasında yer almaktadır. Özellikle kısa devre korumalarının olması daha yüksek güçteki sistemlerde tercih sebebi olmalarını sağlamıştır. Ayrıca alternatif akım ile çalışan asenkron ve senkron motorların sürüş sistemlerinde de kullanılabilirler.

#### 2.3.5.4. Rezonans inverterler

Rezonans inverterler, doğru akım sistemlerinde kullanılırlar ve bu sistemlerin kendi içindeki güç transferlerinin, çıkış akımlarının veya gerilimlerinin kontrol edilmesini sağlarlar. Herhangi bir alternatif akım sistemi ya da başka bir doğru akım sistemi elde edebilmek için kullanılırlar (Skvarenina 2002). Rezonans yapıları inverterler, floresan lambalar için elektronik balastların üretilmesi, radyo vericileri, DA/DA rezonans konverterler ve indüksiyonla ısıtmanın karlı olduğu malzeme yüzeylerinin sertleştirilmesi, birbirlerine kaynatılması, lehimlenmesi gibi birçok uygulamada kullanılmaktadırlar.

Rezonans yapıda olmayan DA/AA dönüştürücü inverterlerde, kontrol edilebilir yarı iletken anahtarlar, sistemin anahtarlanması için kullanılmakta ve anahtarların iletime ya da kesime girmeleri tam yük altında olmaktadır. Anahtarların açılıp kapatılması sırasında uçlarında yüksek gerilimler meydana gelir. Bunun yanı sıra PWM frekansı ile doğru orantılı olarak artan bir güç kaybı da olur. Yarı iletkenler anahtarlamalarda kullanılırken yüksek derecede elektromanyetik girişimlere neden olmaktadır.

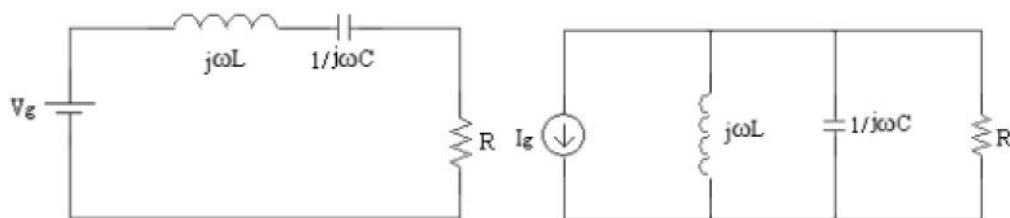
Güç elektroniği dönüştürücülerinin boyut ve ağırlıklarının küçültülerek çekilebilecek olan güç yoğunluğunun artırılması amacıyla anahtarlama frekansının artırılması gerekir. Bundan dolayı anahtarlamalar sırasında çıkan problemler daha da

büyümetedir. Anahtarlar pozisyon de i tirirken anahtarlamalar akım ya da gerilimin sıfır anında yapılırsa bu problemler ez az seviyelere indirilebilir. Bu sayede yüksek frekans seviyelerindeki çalı maların daha verimli olması sa lanabilir. Bu devrelerde indüktör (L) ve kapasitörler (C) birbirleri ile etkile im içerisinde olduklarından bu devrelere rezonans inverter devreleri denmektedir.

Rezonans inverterlerde L-C devrelerinin kullanılması avantaj sa lamaktadır. L-C devreleri; sinüzoidale yakın bir sinyal elde edilmesini, elektromanyetik girişim etkisinin azaltılmasını, akım ve gerilimin sıfır noktasından geçerken anahtarlanması ile çıkı gücü ve geriliminin frekans ile de i tirilmesini sa lamaktadır. nverterlerde kullanılan anahtarlar, akım ve gerilimin sıfır noktasında iletme veya yalıtıma girdiklerinde teorik olarak anahtarlama kayıplarına sahip de ildirler. Bundan dolayı rezonans devreleri ile ilgili yakla ımlar, akım ve gerilimin sıfır anındaki anahtarlanmaları ile gündeme gelmi tir (Skvarenina 2002, Wolfs ve Li 2002).

Rezonans inverterlerde DC kaynak ile sa lanan gerilim, rezonans özelli indeki bir AC gerilime dönü türülür. Sistemin devamında DA/DA bir konverter varsa bu gerilim konverterde tekrar do rultularak yüke aktarılır. Çıkı ta alternatif gerilim kullanılacaksa rezonans inverter ile elde edilen gerilim direkt olarak yüke verilebilir.

Rezonans inverterler; ekil 2.17 (a) ve (b)'de gösterildi i gibi seri ve paralel rezonans devreleri olarak dizayn edilebilirler. Seri rezonans inverterde rezonans anındaki akım, güç kayna ı üzerinden yüke enerji transfer edilmesini sa lar. Paralel rezonans inverterde ise yük için gerekli enerjiyi kondansatörde arj edilen gerilim sa lamaktadır. Her iki inverter devresinde de L-C devresi ile elde edilen rezonans sayesinde güç kayna ından yüke güç iletimi sa lanmı olur (Bonsall ve ark 1994, Ben-Yaakov ve Rahav 1996).



(a) Seri rezonans devresi

(b) Paralel rezonans devresi

ekil 2.17. Rezonans inverter devresi e de er emaları

Herhangi bir frekans anındaki indüktör ve kapasitörlere ait reaktanslar Denklem 2.13 ve Denklem 2.14'te gösterildiği gibi bulunur. Denklemlerde bulunan ifadesi açısal frekansı temsil etmektedir. Devrenin kapasitif veya endüktif olması durumundaki empedansı Denklem 2.15 ve Denklem 2.16'da gösterildiği gibi hesaplanır.

$$X_L = j\omega L = j2\pi fL \quad (2.13)$$

$$X_C = 1/j\omega C = -1/j2\pi fC \quad (2.14)$$

$$|Z| = \sqrt{R^2 + \left(\frac{1}{\omega C} - \omega L\right)^2} \quad (\text{Kapasitif empedans}) \quad (2.15)$$

$$|Z| = \sqrt{R^2 + \left(\omega L - \frac{1}{\omega C}\right)^2} \quad (\text{Endüktif empedans}) \quad (2.16)$$

Rezonans frekansı “ $f_r$ ” ile ifade edilir. Devre çalıırken endüktif reaktans ile kapasitif reaktans birbirine eşit olacak olursa sistem rezonanstadır denir ve gerilim ile akım aynı fazdadır. Rezonans frekansı L ve C parametrelerine bağılı olarak Denklem 2.17'deki gibi hesaplanır. Devreden akacak olan akım sistem rezonans frekansında çalıırken maksimum değerine ulaşır. Devreye ait frekans, rezonans frekansının altına iner veya üstüne çıkarsa devre akımında azalma görülür.

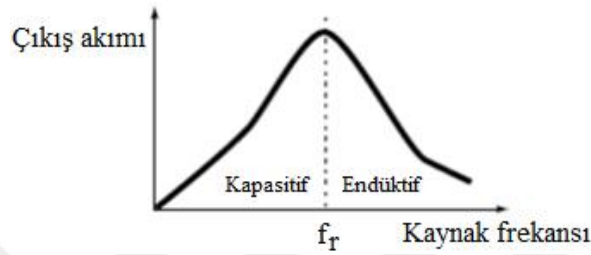
$$2\pi f_r L = 1/2\pi f_r C \quad \text{ise} \quad f_r = 1/2\pi \sqrt{LC} \quad (2.17)$$

Anahtarlama frekansının rezonans frekansına göre düşük seçilmesi durumunda, Denklem 2.13'e göre  $X_L$  deeri frekansla doğru orantılı olarak deeri inden dolayı azalacak, Denklem 2.14'e göre  $X_C$  deeri frekansla ters orantılı olarak deeri inden dolayı artacaktır. Diğer durumda da yani anahtarlama frekansının rezonans frekansından yüksek seçilmesi durumunda  $X_L$  deeri artacak,  $X_C$  deeri azalacaktır.

Anahtarlama frekansındaki artışı, kapasitif ve endüktif devrelerde farklı deeriimler göstermektedir. Kapasitif devrelerde anahtarlama frekansı arttırılırsa Denklem 2.15'te görüldüğü gibi kapasitif empedans azalacağından dolayı çıkışı verilen akım artacaktır. Dolayısıyla çıkışı gücü de artacaktır. Tam tersi durumda frekans

dü ü rülecek olursa toplam kapasitif empedans da eri daha da artaca ından çıkı gücü de azaltılmı olur.

Endüktif devrelerde ise Denklem 2.16 incelendi inde frekansın artması toplam endüktif empedansı arttıracı ından dolayı çıkı gücü azalır. E er frekans azalırsa toplam endüktif empedans da azalaca ından dolayı çıkı gücü de artmaya ba lar. ekil 2.18, rezonans frekansının altında veya üstündeki çalı ma durumlarında yani endüktif ve kapasitif devrelerde çıkı akımının frekansla de i imini göstermektedir.



**ekil 2.18.** Frekansın çıkı akımına etkisi

ekilde de görüldü ü üzere sistemin frekansı, rezonans frekansına e it olacak ekilde ayarlanacak olursa sistemden maksimum akım çekilir ve maksimum güç elde edilir. Rezonans inverterlerde kayna ın akım veya gerilim de erinin ya da çalı ma frekansının de i tirilmesi ile çıkı gücü rahatlıkla kontrol edilebilir. Frekans ile kontrolün sa lanması daha pratik bir yöntemdir. Rezonans inverterlerdeki tüm bu avantajlar, indüksiyon ısıtma uygulamalarında kullanılmalarına katkı sa lamı tır.

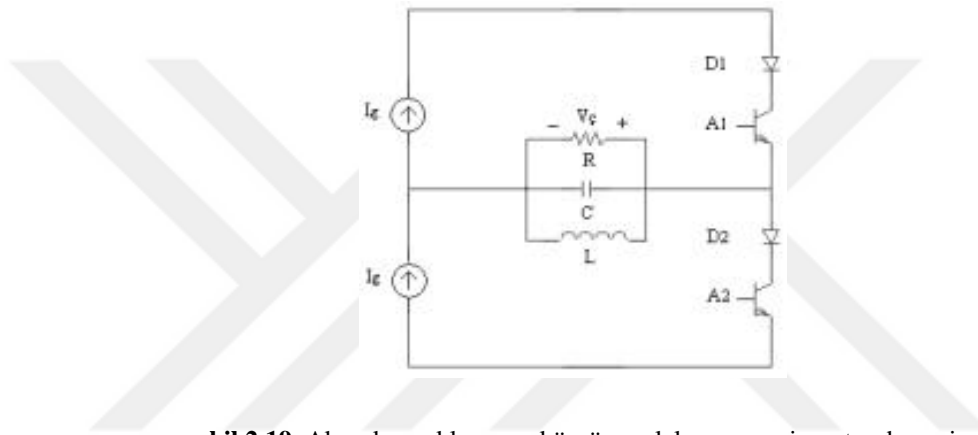
Rezonans inverterler, indüksiyon ısıtma uygulamalarında kullanıldıkları yerlere göre 3 farklı ekilde dizayn edilebilirler:

- Akım kaynaklı paralel rezonans inverter,
- Gerilim kaynaklı seri rezonans inverter,
- E sınıfı rezonans inverter.

i. Akım kaynaklı paralel rezonans inverter

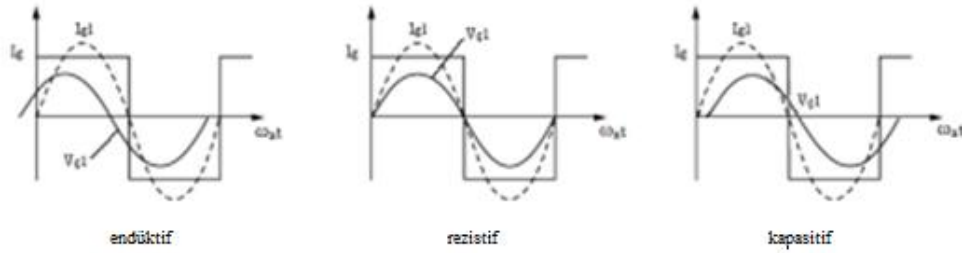
Bu devrelerde güç kayna ı olarak sürekli ve sabit akım üretebilen bir do ru akım kayna ı kullanılmaktadır. Tam köprü ve yarım köprü olarak dizayn edilebilirler. ekil 2.19'da akım kaynaklı bir yarım köprü paralel rezonans invertör devresine örnek

verilmi tir. Devredeki rezonans, direnç, bobin ve kondansatörün birbirlerine paralel ba lanmasıyla elde edilmi tir.  $I_g$  akım kayna ı temsili olarak gösterilmi olup, DC gerilim kayna ına seri ba lanmı bir indüktör ile olu turulmu tur. Bu indüktör devrenin güç faktörünü dü ürmektedir. Çift yönlü anahtarlar, birer diyot ve transistor ün seri ba lanmasıyla olu turulmu tur. Anahtarlar, çift yönlü iletim yaptı ı gibi aynı zamanda hem negatif hem de pozitif gerilim dü ümlerinin olu masına engel olmaktadır. Devrenin akım kaynaklı olması, herhangi bir sorundan dolayı olu abilecek kısa devre anında sistemi korumaktadır. Bu özelli inden dolayı seri rezonans inverter devrelerine göre daha çok tercih edilmektedirler.



ekil 2.19. Akım kaynaklı yarım köprü paralel rezonans inverter devresi

nverter çalı ırken; çalı ma frekansı ( $f_a$ ), rezonans frekansından ( $f_r$ ) küçük olursa devre endüktif etki gösterir ve kaynaktan çekilecek olan maksimum akımın bir kısmı bobin üzerinden akar ve direnç üzerinden akacak olan akımı azaltır. Çalı ma frekansının rezonans frekansına e it olması durumunda L-C devresi sonsuz empedans gösterir ve direnç üzerinden maksimum akım akmaya ba lar. Bu durumda akım ile gerilim de aynı fazdadırlar. Çalı ma frekansının rezonans frekansından büyük olması durumunda ise devre kapasitif etki gösterir. Kaynaktan çekilebilecek olan maksimum akımın bir kısmı kondansatör üzerinden bir kısmı da direnç üzerinden akar. ekil 2.20'de, anahtarların sırası ile iletimi girerken rezonans frekansı ile çalı ma frekansı arasındaki ili kiye göre farklı çıkı dalga ekillerinin olu umu gösterilmeye çalı ılmı tir. Grafikler üzerinde gösterilen  $I_{g1}$  akımı, anahtarlardan birisi iletme geçti inde ve di eri kesime girdi inde rezonans devresi üzerinden akan toplam akıma ait sinyali göstermektedir.  $V_{c1}$  ise çıkı gerilimine ait sinyali göstermektedir.

(a)  $f_a < f_r$ (b)  $f_a = f_r$ (c)  $f_a > f_r$ 

ekil 2.20. nverterin farklı çalı ma durumlarındaki dalga ekilleri

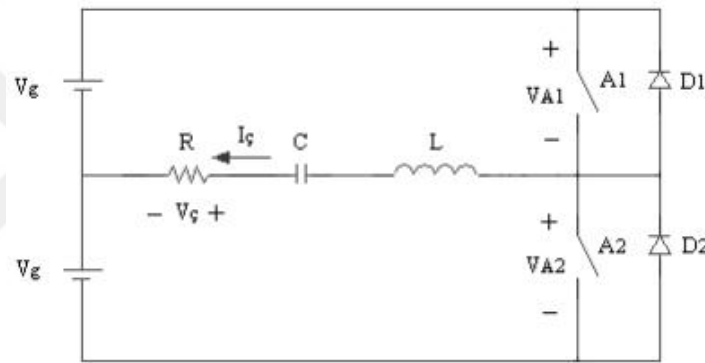
ıkı gücünü de i tirmek için ya giri akımının genli inin de i tirilmesi ya da frekansın de i tirilmesi gerekmektedir. Devrenin sabit giri akımı ile çalı tırıldı mı d ündü mzde, sistem kapasitif durumda iken çalı ma frekansının arttırılması çıkı gücünü arttırırken, endüktif durumda çalı ma frekansının arttırılması çıkı gücünü azaltacaktır.

Akım kaynaklı paralel rezonans inverter devreleri, indüksiyon ısıtma uygulamalarının haricinde; dielektrik ısıtma uygulamaları, flüoresan lambaların için elektronik balast uygulamaları gibi uygulamalarda da kullanılmaktadırlar (Kazimerczuk ve Czarkowski 1995).

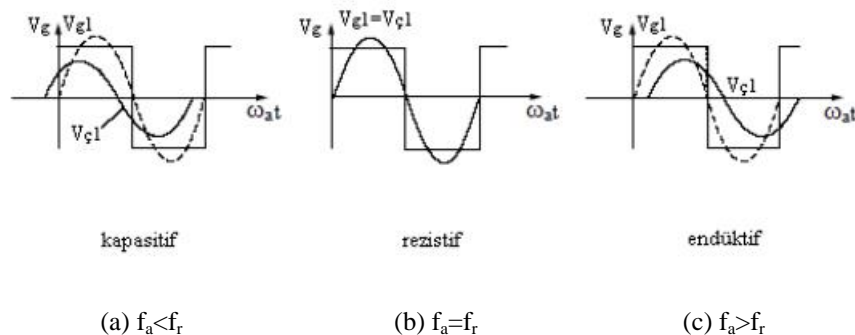
## ii. Gerilim kaynaklı seri rezonans inverter

Akım kaynaklı paralel rezonans devrelerinde giri g kayna ı sabit ve sürekli akım üretebilen bir akım kayna ı iken bu inverterlerde giri g kayna ını DC akım üretebilen bir gerilim kayna ı olu turmaktadır. Akım kaynaklı paralel rezonans inverterlerinde oldu u gibi kayna a seri ba lı bir bobin olmadı ndan dolayı g faktörü yüksektir ve geni bir frekans aralı nda kontrol edilebilmektedirler. Kontrol ve güç devresi oldukça basittir. Akım kaynaklılarda oldu u gibi bu inverterlerde de tam köprü ve yarım köprü rezonans devrelerine sıkça rastlanmaktadır. ekil 2.21'de gerilim kaynaklı bir yarım köprü seri rezonans inverter devresine örnek gösterilmi tir. Seri rezonans devresi, direnç, bobin ve kondansatörün birbirlerine seri ba lanması ile elde edilmi tir. Devrenin yarım köprü bir inverter devresi olmasından dolayı iki tane anahtar kullanılmı tir ve bu anahtarlar; BJT, MOSFET, IGBT, GTO veya tristrdn herhangi birinden seçilebilir. Bu anahtarlar sadece ileri yönde akım iletebilirler. E er geri yönde de akım iletebilmeleri istenirse, anahtara ters konumda paralel bir diyot ba lanması gerekir.

Devre çalışırken  $A_1$  ve  $A_2$  anahtarları sıra ile anahtarlama yaparlar. Çıkı geriliminin dalga ekli,  $A_1$  anahtarı iletim durumunda iken, anahtarlama frekansı  $f_a$ 'nın rezonans frekansı  $f_r$ 'ye göre durumuna ba lı olarak ekil 2.22'de görülen dalga ekilerinden birisi olabilir. Burada  $V_{g1}$  gerilimi, devrenin giri gerilimi ve aynı zamanda anahtarlardan birisi kapatıldı ında rezonans devresi üzerine dü en toplam gerilim olan  $V_g$  geriliminin anlık de imini göstermektedir.  $V_{c1}$  gerilimi ise yük üzerinden elde edilen  $V_c$  çıkı geriliminin anlık de imini göstermektedir.  $f_a < f_r$  ise devre kapasitif etki gösterir ve akım gerilimden daha ileridedir.  $f_a = f_r$  ise devre rezistiftir yani L-C devresi sonsuz empedans gösterir, akım ile gerilim aynı fazdadır ve rezonans devresinden maksimum akım akar.  $f_a > f_r$  ise devre endüktif etki gösterir ve bu sefer de gerilim akımdan ileridedir.



**ekil 2.21.** Gerilim kaynaklı yarım köprü seri rezonans inverter devresi

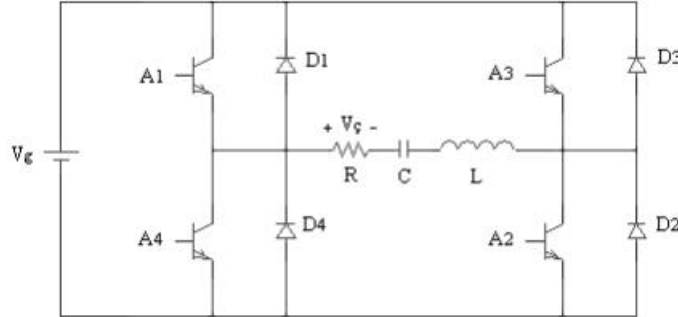


**ekil 2.22.** nverterin farklı çalışma durumlarındaki dalga ekileri

Devre, rezonans frekansında çalıştırıldı ında anahtar kayıpları olmazken, çalışma frekansının rezonans frekansından küçük veya büyük olması durumlarında anahtar kayıpları olmaktadır.



Tam köprü seri rezonans inverter devreleri daha yüksek güç istenen uygulamalarda tercih edilmektedirler. ekil 2.23'te gerilim kaynaklı bir tam köprü seri rezonans inverter devresine ait konfigürasyon gösterilmiştir.



**ekil 2.23.** Gerilim kaynaklı tam köprü seri rezonans inverter devresi.

Tam köprü seri rezonans inverterlerde, yarım köprü seri rezonans inverterlerden farklı olarak dört tane anahtar kullanılmaktadır.  $A_1$  ve  $A_2$  anahtarları ilettime geçtiklerinde,  $A_3$  ve  $A_4$  anahtarları yalıtıma girerler. Aynı şekilde  $A_3$  ve  $A_4$  anahtarları da ilettime geçtiklerinde,  $A_1$  ve  $A_2$  anahtarları kesime girerler. Aynı gerilim kaynağı ile çalıştırıldıklarında ürettiği güçte; tam köprü inverterin çıkış geriliminin genliği, yarım köprü inverterden elde edilen çıkış gerilimi genliğinin iki katıdır. Yüksek güç gerektiren uygulamalarda tercih edilmeleri bundan kaynaklanmaktadır (Mohan ve ark 2003).

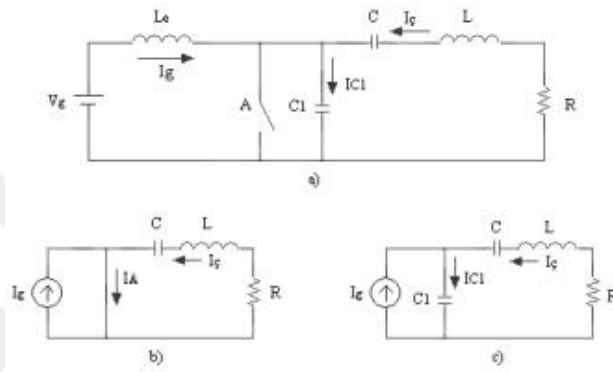
Gerilim kaynaklı seri rezonans inverter devreleri, indüksiyon ısıtma uygulamalardan başta olmak üzere, DA/DA güç dönüştürme ara devrelerinde, flüoresan lambalar için balast uygulamaları gibi farklı alanlarda da kullanılmaktadırlar.

### iii. E sınıfı rezonans inverter

E sınıfı inverterlerde, ekil 2.24 (a)'da görüldüğü üzere DC gerilim kaynağına seri bağlı bir bobinle oluşturulan akım kaynağı kullanılmaktadır. Çıkış akımı sinüzoidal bir sinyaldir. Inverterde kullanılan anahtar sayısının tek olmasından dolayı anahtar kayıpları ve sistem maliyeti oldukça azdır. Anahtar ilettime iken anahtar üzerinden geçen akım ekil 2.24 (b)'de görüldüğü gibi  $I_g + I_c$  toplamına eşittir. Anahtar yalıtımdayken ekil 2.24 (c)'de görüldüğü gibi  $C_1$  kondansatörü üzerinden rezonans akımı akar ve kondansatör arız olmaya başlar. Rezonans akımı kondansatörün uçları

arasındaki gerilimi artırır. Gerilim tepe de erine ula tı ı zaman de arj i lemi ba lar ve depolanan enerji yava yava azalır.

Yük direnci uygun bir de erde seçilirse, anahtar ilettime geçmeden önce  $C_1$  kondansatörü zamanında de arj olarak üzerindeki gerilimi sıfır yapar. Böylece anahtar ilettime sıfır gerilim şartlarında geçmi olur. Yük direnci olması gereken de erinden daha küçük seçilirse  $C_1$  kondansatörünün de arj süresi uzar. Bunu önlemek için anahtara ters paralel bir diyot ba lanır ve anahtar yine sıfır gerilimde ilettime geçmi olur. Anahtarın sıfır gerilimde ilettime geçmesi ile sistemin verimlili i artırılmı olur.



(a) E sınıfı rezonans inverter yapısı (b) Anahtarın iletimde olması durumu  
 (c) Anahtarın yalıtımda olması durumu  
**ekil 2.24.** E sınıfı rezonans inverter devresi

Sistem topolojisinin basit olması, yüksek verimlilik sa laması, yüksek çıkı frekansı ve dü ük elektromanyetik giri im etkisi göstermesi; E sınıfı inverterlerin avantajları arasında yer almaktadır. Bunlarla birlikte anatarada yüksek akım ve gerilim elde edilmesi E sınıfı inverterleri dezavantajları arasında yer almaktadır (Skvarenina 2002, Mohan ve ark 2003, ÖNCÜ ve SAZAK 2004).

ndüksiyon ısıtma uygulamalarında ve yüksek frekanslı elektronik balastlarda kullanılmaktadırlar.

### 2.3.5.5. PWM inverterler

Günümüz uygulamalarında endüstriyel alanda yapılan birçok çalı mada artık inverterlerin çıkı gerilimlerinin kontrol edilebilmesi istenmektedir. Bunu sa layabilmek için de farklı metotlar uygulanmaktadır. Bu metotlardan en etkili olanı Darbe Geni lik Modülasyonu (PWM) tekni idir.

inverterlerde çıkı taki gerilimin ayarlanabilir olması frekansın ya sabit tutulması ile ya da de i tirilmesi ile yapılabilmektedir. Çıkı geriliminin de i ken olması, giri teki DC gerilimin de i tirilmesi ve inverterdeki kazancın sabit tutulması ile elde edilir. E er giri teki DC gerilim sabit tutulamaz ise çıkı geriliminin ayarlanabilir olması için darbe geni lik modülasyonu ile inverter kazancının de i tirilmesi ile elde edilebilir. AC çıkı geriliminin DC giri gerilimine oranı bize inverter kazancını verir (Henze ve ark 1989).

PWM tekni indeki temel amaç ana kare dalgada darbeler olu turarak bu darbelerin geni li ini de i tirmek suretiyle çıkı ana dalgasının temel bile enini de i tirmektir. Çıkı taki frekansın kontrol edilebilmesi için inverterde kullanılan elemanlara ait faz de i tirme sürelerinin de i tirilmesi yeterli olacaktır. Bu teknikle yüksek frekans de erine sahip harmonik sinyaller daha kolay filtrelenece i için sisteme ait anahtarlama frekansının olabildi ince yüksek seçilmesi istenir. Bunun tek bir dezavantajı vardır; inverterde kullanılan yarı iletken anahtarlardaki kayıplar, anahtarlama frekansı ile do ru orantılı olarak de i ecektir (Wang ve ark 1996).

Çıkı geriliminin genli i ve frekans de er PWM inverterler ile kolay bir ekilde ayarlanabilmektedir. Bir periyotluk zaman içerisindeki toplam iletim süresini de i tirerek, çıkı geriliminin genli i kontrol edilebilir. Veyahut darbe geni li i sabit tutularak darbe sayısını de i tirme suretiyle veya darbe sayısı sabit tutularak darbe geni li i de i tirmek suretiyle çıkı gerilimi yine kontrol edilebilmektedir.

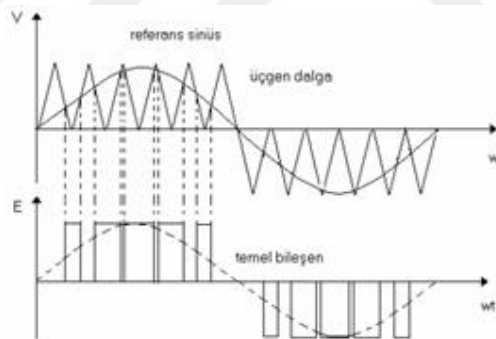
PWM inverter ile gerilimin kontrol edilmesi, inverterin çıkı gerilimine ait dalga eklinin kontrolü ile yapıldı ndan dolayı giri te ayrıca bir kontrollü do rultu devresine gerek yoktur ve giri gerilimi de i memektedir. Son yıllarda PWM uygulamalarının büyük bir oranında IGBT'ler kullanılmaktadır. Ayrıca anahtarlama hızları yüksek olan güç transistörleri, MOSFET ve MCT gibi anahtarlama elemanları da kullanılmaktadır. Yüksek güçlü inverterlerde ise tristör ve GTO'lar kullanılmaktadır. Ancak bu elemanların hızları di erlerine göre oldukça dü üktür.

PWM tekni i, temel elektronik devre elemanları ile yapılabildi i gibi son yıllarda mikrodenetleyiciler konusundaki geli meler neticesinde mikrodenetleyiciler ile de yapılabilmektedir. PWM sinyali, mikrodenetleyicilerin ilk kullanılmaya ba landı ı zamanlarda, mikroi lemciden bir referans sinyali üretilip, bu sinyal, opampli bir devreden üretilen sinyal ile kar ıla tırılarak elde ediliyordu. Geli melerin devam etmesi ile PWM sinyaline ait aç ı önceden hesaplanarak bir hafıza elemanında saklanarak mikrodenetleyiciler ile de PWM sinyallerinin üretilmesi sa lanmı tır.

Mikrodenetleyicilerin çalı ma hızlarının geli meler ile beraber artmasından dolayı bu hesaplamalar anlık olarak mikrodenetleyiciler ile yapılırken PWM sinyalleri elde edilebilmiştir. Inverterlerde PWM tekni i, sinüzoidal PWM ve DC PWM olmak üzere ikiye ayrılır.

i. Sinüzoidal PWM tekni i

Inverterlerde yarı iletken anahtarların iletimde oldukları zamanları belirlemek ve zamanlama sağlamak için kullanılan yöntemlerden biri de ekil 2.25'te gösterilen sinüzoidal PWM yöntemidir. Genellikle PWM sinyalleri, yüksek frekanstaki bir üçgen taşıyıcı sinyalin düşük frekanstaki genli i ayarlanabilen bir sinüzoidal kontrol gerilimi ile karşılaştırılmasından elde edilir. Bu iki gerilimin çalı ma noktaları, anahtarlama elemanlarının tetikleme anlarını belirler. Inverterden elde edilen çıkı gerilimi genli inin azaltılması veya yükseltilmesi için referans sinüs sinyali genli inin azaltılması ya da yükseltilmesi gerekmektedir. Üçgen gerilimin frekansı ise inverterin anahtarlama frekansını belirler.

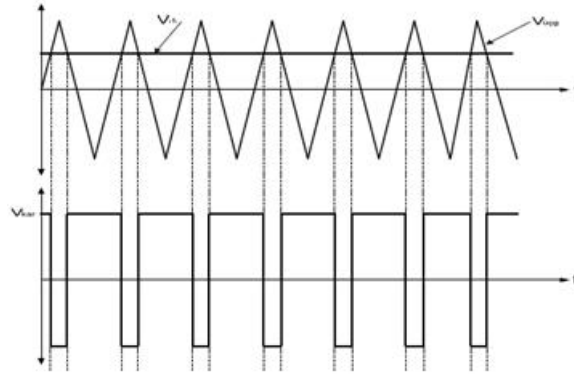


ekil 2.25. Sinüzoidal PWM dalga çıkı biçimi

ii. DC PWM tekni i

DC PWM yönteminde prensip olarak bir üçgen ya da testere di i gerilim ile bir DC gerilim karşılaştırılarak inverterlerde yarı iletken anahtarların kontrol sinyalleri oluşturulur. Kontrol gerilimi i artı gerçek çıkı gerilimiyle istenen çıkı gerilimi arasındaki farkın (hatanın) kuvvetlendirilmesiyle elde edilir. Inverterin çıkı gerilimini ayarlamak için referans DC gerilimin genli i azaltılır veya yükseltilir. Üçgen ya da testere di i gerilimin frekansı ise inverterin anahtarlama frekansını belirler. ekil

2.26'da görüldü ü gibi bu iki gerilimin çalı ma noktaları, anahtarlama elemanlarının tetikleme anlarını belirler.



ekil 2.26. DC PWM dalga çıkı biçimi

### 2.3.5.6. PWM ve rezonans inverterlerin kar ıla tırılması

Günümüzde güç dönü türücülerde önemli bir nokta, dönü türücünün yüksek performans sa larken, ucuza mal olması ve boyutlarının küçük olmasıdır. Bu konuda çe itli güç dönü türücü topolojileri geli tirilmi tir.

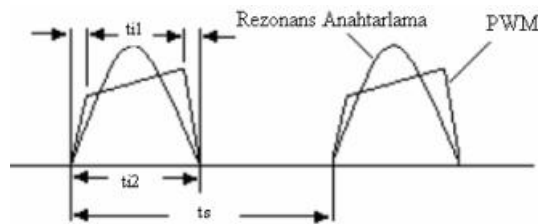
PWM inverterlerde giri teki DC gerilimi sabittir. Köprü diyotlardan olu an kontrolsüz bir redresör ile sabit ara devre gerilimini üretmek mümkündür. Gerilimin ve frekansın inverterde beraber kontrol edilebilmesinden dolayı PWM inverterlerin geçici rejim cevapları oldukça iyidir. nverterlerde çıkı ta istenen gerilimin veya akımın ekline ba lı olarak anahtarlama elemanları kontrol edilebilmektedirler. Hızlı anahtarlama elemanlarının geli mesi sonucu gerilim beslemeli PWM inverterler, AC motor sürücüler, kesintisiz güç kaynakları, endüksiyonla ısıtma gibi alanlarda sıkça kullanılmaktadır (Bodur ve ark).

PWM inverterlerdeki en temel problem; yüksek frekanslarda anahtarın kontrolünün imkânsız kılan anahtarlama kayıplarıdır. Frekansın artması anahtarlama kayıplarını da arttırdı ı gibi, kullanılan manyetik elemanların ve kapasitörlerin boyut ve a ırlıkları artmı olur. Fakat anahtarlarda, frekansla lineer olarak artan bir anahtarlama güç kaybı da olu ur (Wang ve ark 1996). Bununla birlikte anahtarlama elemanlarında ısınma meydana gelir. Anahtarların iletme ve yalıtıma gitmesinde kayıplar olu ur. Anahtarların iletme ve kesime gittikleri anda olu an kayıplar, sistemdeki toplam güç kaybının büyük bir kısmını olu turmaktadır. Verim, bu nedenden dolayı hızla azalır,

anahtardaki ısısal ve elektriksel zorlanmalar da iyice artar. Anahtarlamalardan kaynaklı kayıpların hesap edilmesi, güç devresinin ısısal açıdan değerlendirilmesi açısından önem taşımaktadır (Köroğlu ve Sazak 2002). Bu devrelerin tersine rezonans inverterlerde böyle bir durum yoktur. Rezonans inverterlerde anahtarlamalardan kaynaklı kayıplar daha azdır (Hua ve Lee 1993). Bu nedenle sistem daha az ısınacağı için rezonans inverterlerdeki soğutucular, PWM inverterlerdeki soğutuculara nazaran daha küçük olarak tasarlanmaktadır.

PWM inverterlerde kontrollü yarı iletkenler, anahtarlama konumunda çalışmaktadır ve anahtarlar içlerinden yüksek akım geçerken iletme ve yalıtıma sokulurlar. Yarı iletken anahtarlar, yalıtımdan iletme ya da iletimden yalıtım durumuna geçerken, yüksek gerilim zorlamasına maruz kalırlar. Ayrıca inverter dalga şekillerinde çok yüksek elektromanyetik parazitler oluşmaktadır. Bu yüzden yarı iletken anahtarlar yüksek frekanslarda kullanılamazlar (Çetin 2005).

PWM ile kontroldeki dezavantajlar, yük üzerindeki gerilimin veya akımın sıfır olduğu durumda anahtarlama yapılmasıyla minimuma indirilebilir. Bu amaçla yarı iletken anahtarların akımı veya gerilimi, rezonans inverterlerdeki L-C devresi ile sıfır geçişe zorlanır. Enerji, anahtarın iletme geçtiği her bir periyotta, sistem rezonansta olacak şekilde akımın veya gerilimin sıfır olduğu noktada inverter çıkışına iletilmektedir. Bu sayede anahtarlamalardan kaynaklı kayıplar sıfır olur.



**ekil 2.27.** PWM ve rezonans anahtarlama ile üretilen akımlara ait dalga şekilleri

ekil 2.27, PWM ve rezonans anahtarlama teknikleri ile üretilen akımların dalga şekillerini göstermektedir. PWM inverterlerde ekil 2.27’de görüldüğü gibi keskin kenarlar hem anahtarlama frekansında harmonikler üretir, hem de daha yüksek frekanslarda inverterdeki elemanları parazit üretmesi için zorlar. Parazit özelliğindeki bu sinyaller ebeke sinyali ile birlikte yayılabilirler ve ilave filtre devrelerinden dolayı mali problemi beraberinde getirirler. Rezonans inverterlerin dalga şekilleri sinüzoidal

oldu u için ebekedeki harmonik ve parazitik gürültüler daha az olacaktır (Wang ve ark 1996).

Rezonans inverterler, yüksek frekanslarda çalışmaya olanak sağlar. Böylelikle devredeki kapasitif ve endüktif elemanların enerji depolama ihtiyacı, bundan dolayı da inverter boyut ve maliyetleri azalır. Endüksiyonla ısıtma uygulamalarında yüksek frekansların kullanılması; belirli bölgelerin ısıtılması, ısıtma uygulamasının hızlı yapılması ve ısıtma verimliliğinin artırılması gibi avantajlar sağlamaktadır. Bu sebeple endüksiyonla ısıtma uygulamalarında, rezonans inverterler PWM inverterlerden daha avantajlıdır.

Rezonans devrelerinin kullanılması ile harmonikler filtrelenir ve anahtarlardan kaynaklı kayıplar azaltılmı olur. Rezonans frekansında devrenin empedansı minimum değerdedir ve yüke maksimum güç aktarılır. Ayrıca devrenin rezistif özellik göstermesinden dolayı güç faktörü en ideal değerinde, 1'dedir. Rezonans devrelerini değerlendirirken ilk olarak, rezonans devresi elemanlarının devredeki konumlarına göre seri ve paralel rezonans devreleri olarak inceleyebiliriz.

Seri rezonans inverter devresi, ısıtma bobinine seri bir kapasitör bağlanarak elde edilir. Rezonans anındaki akım, yüke güç kaynağından enerji transfer edilmesini sağlar. Paralel rezonans inverter devresi ise ısıtma bobinine paralel bir kondansatör bağlanarak elde edilir. Burada da güç, yüke kondansatör üzerindeki gerilim ile aktarılır.

Seri rezonans inverterlerde kontrol devresi olmadığından dolayı daha güvenilirlerdir. Ebekeden reaktif bir akım çekilmez ve harmonik distorsiyonlar da çok az seviyededir. Paralel devreli inverterlerde elektronik malzeme miktarı fazla olduğundan dolayı sisteme olan güvenilirlik de bir o kadar azalmaktadır. Güç kaynağına seri olarak bağlanan indüktör, sistemin boyutlarını arttırmaktadır. Endüktif etki yaratmasından dolayı güç faktörü de azalmaktadır. Akım kaynakları da gerilim kaynaklarından elde edildiklerinden dolayı, akım kaynağının ayarlanabilir olması için seçilen güç kaynağının ayarlanabilir olması gerekir. Paralel rezonans inverterlerin en önemli dezavantajı yarı iletken anahtarlar ve rezonans devresi elemanlarından geçen akım yükten bağımsızdır. Bu da yarı iletken anahtarların iletim kayıplarının yükten bağımsız olmasına sebep olur. Dolayısıyla çıkış gücünün düşük olduğu çalışmaları sırasında inverter verimi düşer. Seri rezonans inverterlerde kullanılan kondansatör ve indüktörün enerji kayıpları çok daha azdır ve dolayısıyla toplam verimliliği daha yüksektir.

Paralel rezonans inverterler de bazı avantajlara sahiptir. Düşük çıkış gerilimi yüksek çıkış akımı istenilen ve çıkışın kısa devre olma ihtimalinin yüksek olduğu

yerlerde tercih edilirler. Herhangi bir hata durumunda kısa devre korumasının olması açısından seri rezonans inverterlere göre daha güvenilirlerdir. Inverterde herhangi bir sorundan kaynaklı kısa devre olsa bile akım artmaz. Çünkü çıkıştaki akım, girişteki akım ile ayarlanmaktadır. Yüksek güç gerektiren uygulamalarda tercih edilmelerinin sebebi bundan kaynaklanmaktadır.

Rezonans devrelerini karşılaştıran ikinci olarak güç devresindeki yarı iletken anahtar sayısı dikkate alınır. Köprü tipi inverter, indüksiyonla ısıtma yapabilen sistemlerin mutfak tiplerinde kullanılan ilk örnekleridir (Omori ve Nakaoka 1989). Köprü inverterlerde çıkış gücünü kontrol etmenin teorik olarak herhangi bir sınırı yoktur. Anahtarlardaki gerilim, kaynağın verdiği gerilim ile sınırlandırılır (Chatterjee ve Ramanarayanan 1993). Tam köprü inverterler dört anahtar, yarım köprü inverterler iki anahtar barındırır. İçin maliyet açısından yarım köprü inverterler daha avantajlıdır. Fakat tam köprü inverterlerde çıkış geriliminin de girişin yarım köprü inverterlerdeki çıkış gerilimi de girişin iki katı olmasından dolayı daha yüksek çıkış gücü gereken uygulamalarda tam köprü inverterler tercih edilirler.

Köprü inverterler tek anahtarlı inverterlere göre içlerinde bulunan anahtar sayısının fazla olmasından dolayı daha karmaşıktır ve maliyetleri daha fazladır. Bunun yanı sıra verimliliklerinin yüksek olması, yüksek çıkış gücü elde edilebilmesi gibi avantajlar da sunmaktadırlar. Tek anahtarlı inverterlerin dezavantajı, genellikle rezonans elemanlarında meydana gelen akım ve/veya gerilim zorlanmalarıdır. Bu zorlanmaların ortadan kaldırılması özel uygulamalar ile yapılamamaktadır. Ayrıca çıkış gücüne ait kontrol aralığı da teorik olarak sınırlı ve anahtara ait gerilim kaynak geriliminin çoklukla yaklaşık üç ya da dört katıdır. Karmaşık olmamaları, maliyetlerinin yüksek olmaması ve kapladıkları alanın küçük olması da en büyük avantajları arasında yer almaktadır.

### **2.3.5.7. Inverter devrelerinde kullanılan anahtarlama elemanları ve anahtar seçimi**

Günümüzde yarı iletken teknolojisinin gelişmesi ile birlikte güç elektroniği devrelerinde çok farklı çalışma özelliklerine sahip anahtarlama elemanları bulunmaktadır. Bu elemanlar kontrol edilebilirliklerine göre 3 grupta incelenebilirler; tristörler, diyotlar ve kontrol edilebilir özelliklere sahip anahtarlar.

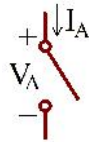
Tristörlerin iletme girmesi verilen bir kontrol sinyali ile sağlanırken, yalıtıma geçmeleri güç devresi tarafından gerçekleştirilir. Genellikle yüksek güç gerektiren



uygulamalarda tercih edilirler. 10 kA gibi yüksek bir akım ve 10 kV gibi yüksek bir gerilim taşıma kapasitesine sahiptirler. Anahtarlama frekansları, taşıdıkları akım ve gerilim değerlerine göre 20 kHz'e kadar çıkabilmektedir.

Diyotların iletme ve yalıtıma girip çıkmaları güç devresi tarafından kontrol edilir. Çok küçük voltaj değerlerinde ileri yönde iletme girerler ve üzerlerinden ihmal edilebilecek büyüklükteki bir sızıntı akımı akar. İletme geçme süreleri çok hızlı olmaktadır. Fakat üzerlerinden geçen akım değeri sıfır olana kadar yalıtıma geçemezler. Farklı uygulamalar için çok farklı çeşitte diyotlar geliştirilmiştir. Örneğin; Schottky diyotların ileri yönde iletme geçebilmeleri için 0.3 V'luk düşük bir gerilim gerekir ve çıkış gerilimi çok küçük olan devrelerde kullanılırlar. Başka bir tür olan hızlı toparlanma diyotları, yüksek frekanslarda çalıştırılan devrelerde kontrollü anahtarlarla beraber kullanılırlar ve küçük bir ters toparlanma süresine sahip diyotlardır.

Kontrollü anahtarlar ise çoğunlukla indüksiyonla ısıtma yapılan sistemlerde tercih edilirler. BJT, MOSFET, GTO ve IGBT gibi kontrollü anahtarların iletme veya yalıtıma geçebilmeleri, kontrol uçlarına uygulanan kontrol sinyalleri ile yapılmaktadır. Bu anahtarlar elektrik devre şemalarında ekil 2.28'de gösterildiği gibi temsili olarak ifade edilirler. İletimde olmaları halinde üzerlerinde gösterilen ok yönünde akım akarken, yalıtımda olmaları halinde ise üzerlerinden geçen sızıntı akımının haricinde herhangi bir akım akımı olmaz.



**ekil 2.28.** Genel kontrol edilebilir anahtar

BJT'ler, 50 kHz anahtarlama frekansında, maksimum 500 A akım ve maksimum 1400 V gerilim taşıma kapasitesine sahip akım kontrollü anahtarlardır. Akım ve gerilim değerinin daha düşük olması durumlarında GHz gibi daha yüksek frekanslarda da anahtarlatabilmektedirler. Sürekli gelen bir kapı akımı ile iletimde bırakılabilirler.

MOSFET'ler gerilim kontrollü anahtarlardır. Anahtar kapısındaki gerilim değeri gerilim değeri üstüne çıktığında iletme girerler ve gerilim değeri değeri altına düşecek olursa yalıtıma geçerler. Anahtarlama hızları 200 kHz ile GHz kademeleri arasında farklılık gösteren çok hızlı çeşitleri vardır. Anahtarlama hızlarının yüksek olmasından dolayı anahtarlama kayıpları da oldukça azdır (Tebb ve Hobson 1987). Düşük

gerilimlerde 180A'e kadar akım taşıyabildikleri gibi düşük akımlarda da 1000V'a kadar gerilim taşıyabilirler.

MOSFET'leri düşük güçlerde sürebildiğimiz gibi yüksek güç gerektiren uygulamalarda akımın etkisinden korunmak için paralel bağlanarak rahatlıkla çalıştırılabilirler.

GTO'lar, 10 kHz'e kadar olan anahtarlama frekanslarında, maksimum 6 kA akım ve 6,5 kV gerilim taşıma kapasitesine sahip kontrollü anahtarlardır. Akım ve gerilim değerlerinin küçültülmesi haline 50 kHz'e kadar olan frekanslarda anahtarlama yapabilmektedirler. Küçük bir kapı akımı ile iletme geçebilmelerine rağmen yalıtıma geçmeleri için büyük bir kapı akımı darbesi gerekmektedir (Houben ve Rottner 2008).

IGBT'ler hem BJT'nin hem MOSFET'in hem de GTO'nun özelliklerine sahip kontrollü anahtarlardır. BJT'lerdekine benzer yüksek gerilim tutma özelliğine sahiptirler. MOSFET'lere benzer olarak anahtarlama için sadece küçük bir gerilime ihtiyaç duyarlar. GTO'ya benzer olarak ise negatif gerilimlerin tutulabilmesi için kullanılabilirler. 20 kHz altındaki düşük frekanslarda 1200 A ve 3300 V gibi yüksek akım ve gerilim altında çalışabilirlerken, 150 kHz gibi yüksek çalışma frekanslarında ise 13 A ve 600 V gibi akım ve gerilim taşıma kapasitesine sahiptirler.

IGBT kullanılarak tasarlanmış devrelerde kullanılan akım ve gerilimlerin yüksek olması ile yüksek güç gerektiren uygulamalarda da kullanılabilirleri mümkün hale gelmeye başlar (Sheng ve ark 2000).

IGBT'lerin indüksiyonla ısıtma yapan uygulamalarda kullanılması ile MW seviyelerine kadar güçler elde edilebilir.

500 kHz gibi yüksek frekans gerektiren özel uygulamalarda, anahtarlama hızlarının yüksek olmasından dolayı genellikle MOSFET'ler kullanılmaktadır (Hammad ve ark 2002).

Anahtarlama hızı ve güç kaybı değerleri, güç elektroniği devrelerinde önem arz etmektedir. Çalışmak istenen akım ve gerilim değeri, çalışma frekansı veya elde edilmesi istenilen verim değeri gibi parametreler sistemde kullanılacak olan anahtarın belirlenmesi konusunda önemlidir. Çizelge 2.1'de anahtarlara ait çalışma frekansları ve güç kapasiteleri gösterilmiştir.

Anahtarların seçilmesi hususunda anahtarlama karakteristikleri de önemli bir paya sahiptir. GTO'larda ve transistörlerde iletim ve yalıtım süreleri kontrol edilebilirken, triyotlarda sadece iletim süresi kontrol edilebilmektedir. Diyotlarda ise ne iletim ne de yalıtım süresi kontrol edilememektedir (Hart Daniel 1997).

**Çizelge 2.1.** Kontrol edilebilir anahtarlara ait özellikler

Eleman	Güç Kapasitesi	Anahtarlama Hızı
BJT	Orta	Orta
MOSFET	Düük	Hızlı
GTO	Yüksek	Yava
IGBT	Orta	Orta
Tristör	Yüksek	Yava

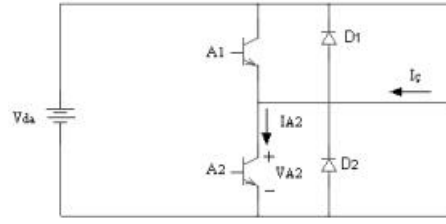
### 2.3.5.8. Anahtarlarda olu an güç kayıpları ve bu kayıpları azaltma teknikleri

#### i. Anahtar güç kayıpları

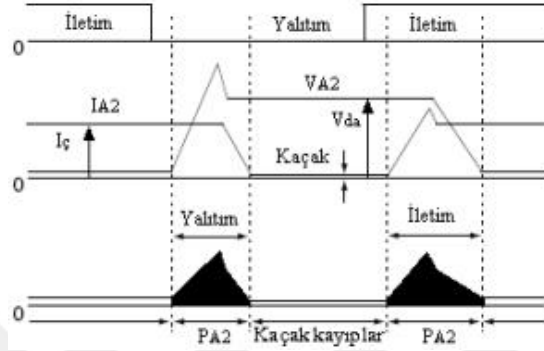
Bilindi i gibi güç üreten devrelerde manyetik elemanlar ve kondansatörler, enerji depolama, transfer etme, filtreleme gibi i lemlerde önemli rol oynamaktadır. Bu elemanlar di er devre elemanları yanında a ırlık, hacim ve fiyat olarak yüksek de erlere sahiptir. Bu elemanların hacmi ve a ırlı ı frekans ile ters orantılı oldu u için güç elektroni i devrelerinin boyutlarını dü ürmek için frekansın yükseltilmesi gerekmektedir. Frekansın yükseltilmesi ise anahtar elemanları üzerinde akım, gerilim de erlerinin yükselmesi ve anahtarlama kayıplarının artması gibi stresler olu turur (Liu ve ark 1985).

Bir anahtarın kayıpsız olabilmesi için ideal bir anahtarın özelliklerini göstermelidir. Bunlardan bazıları, tetiklendi inde ani olarak yalıtımdan ilettime ve iletimden yalıtıma geçebilme, anahtarı tetiklemek için verilen gücün ihmal edilebilecek kadar küçük olması, iletim durumundayken sıfır gerilim dü üümü ile büyük akımları iletebilmesidir. Fakat gerçek ortamda kullanılan elemanlar ideal özelliklere sahip olamadıkları için kullanıldıkları uygulamalarda güç kayıplarına yol açarlar. Bu güç kayıpları çok fazla oldu unda ise hem elemanın kendisine hem de kullanıldıkları sisteme zarar verirler. Anahtar güç kayıpları, anahtarlama sırasında meydana gelen anahtarlama kayıpları ve anahtar iletim durumunda iken meydana gelen iletim kayıplarındır.

Anahtar iletimden yalıtıma veya yalıtımdan ilettime geçerken meydana gelen yüksek akım ve gerilimin neden oldu u kayıplar anahtarlama kayıplarındır. Anahtarlama kayıplarını açıklamak için ekil 2.29'daki devre ele alındı ında alt kolda bulunan  $A_2$  anahtarının akım ve gerilim dalga ekilleri ekil 2.30'da görülmektedir.



ekil 2.29. Yarım köprü invertör



ekil 2.30. Endüktif bir akımın anahtarlama konumunda açma kapama i lemi

Ba langıçta  $A_2$  anahtarının iletimde oldu u dü ünüldü ünde, bu andan sonra  $A_2$  anahtarı yalıtıma geçirmek üzere bir kontrol sinyali uygulanır. Anahtarın gerilimi  $V_g$  gerilimine kadar hatta kaçak endüktanslardan dolayı bu de erin de üzerine çıkar. Bu andan itibaren anahtar akımı sıfıra yakla ır ve yalıtıma geçi süresinin sonunda sıfır de erini alır. Akımın sıfıra ula ması ideal anahtarlarda oldu u gibi bir anda gerçekleşmedi i için anahtar, üzerindeki akım sıfır de erine ula ncaya kadar üzerine dü en  $V_g$  gerilimi ile birlikte anahtarlama güç kayıplarını meydana getirir. Anahtarın yalıtıma girmesi ile birlikte  $I_c$  akımı  $D_1$  diyotu üzerinden akmaya ba lar.  $A_2$  anahtarının yalıtıma geçi i esnasındaki meydana gelen güç kaybı  $P_{A2}$ , ekil 2.30'da koyu boyalı alanda gösterilmi tir.

Aynı anahtarın ilettime geçi i incelenecek olursa, anahtar ilettime geçmeden önce  $I_c$  akımı  $D_1$  diyotu üzerinden akmaktaydı, anahtarın üzerindeki sıfır akım iletim sinyalinin alınmasıyla birlikte  $I_c$  de erine ula ır. Bu sırada  $D_1$  diyotunun akımı da sıfıra yakla ır ve ekil 3.14 üzerinde de görüldü ü gibi  $D_1$  diyotunun ters toparlanma akımı kadar  $I_c$  akımını a ar. Ietim süresinin sonunda  $D_1$  diyotu yalıtıma geçer ve akımın tamamı  $A_2$  anahtarından akmaya ba lar. Yalıtım durumundan ilettime geçerken meydana gelen anahtarlama kaybı  $P_{A2}$  yine ekil üzerinde koyu boyalı alanda gösterilmi tir.

İletim ve yalıtıma geçi durumlarında meydana gelen anahtarlama kayıpları Denklem 2.18 yardımı ile hesaplanabilir.

$$P_A = \frac{1}{2} V_A I_A f_A (t_{ig} + t_{yg}) \quad (2.18)$$

Burada;

$P_a$ : Anahtarlama kayıpları (W),

$V_a$ : Anahtar gerilimi (V),

$I_a$ : Anahtar akımı (A),

$F_a$ : Anahtarlama frekansı (Hz),

$t_{ig}$ : Anahtarın ilettime geçi süresi (s),

$t_{yg}$ : Anahtarın yalıtıma geçi süresi (s)'dir.

Anahtarlama sırasında meydana gelen güç kayıpları Denklem 2.18'de görüldü ü gibi anahtarlama frekansı ile orantılıdır. Bu da yüksek frekanslarda daha fazla kayıpların meydana geldi ini açıkça göstermektedir.

Anahtar güç kayıplarını oluşturan diğer bir bileşen anahtar iletim kayıplarıdır. Anahtar iletim durumunda iken üzerine düşen gerilim teorik olarak ideal anahtarlarda sıfırdır fakat pratik uygulamada anahtar gövde direnci sebebi ile kaçak bir gerilim düşümü meydana gelmektedir. Bu gerilim düşümü anahtar üzerinde bir ısı etkisi meydana getirir. Bu yüzden meydana gelen gerilim düşümünün olabildi ince minimum değerde olması istenmektedir. Meydana gelen ısı kaybının oluşturdugu iletim kayıpları Denklem 2.19'da belirtilen parametreler doğrultusunda hesaplanabilir.

$$P_i = V_i I_A \frac{t_i}{T_A} \quad (2.19)$$

Burada;

$P_i$ : İletim kayıpları (W),

$V_i$ : İletim durumundaki kaçak gerilim düşümü (V),

$T_A$ : Anahtarlama periyodu (s),

$t_i$ : İletimde kalma zamanı (s)'dir.

Anahtar üzerinde meydana gelen güç kayıpları iletim kaybı  $P_i$  ile anahtarlama kaybı  $P_a$ 'nın toplamıdır.

Anahtarlama kayıplarının anahtarlar üzerinde olduğu zorlanmaları azaltmak için farklı teknikler geliştirilmiştir. Bu tekniklerde bazıları; koruma devrelerinin tasarlanması, Bölüm 2.3.5.4'te bahsedilen rezonans inverterler ve rezonans anahtarlama teknikleridir.

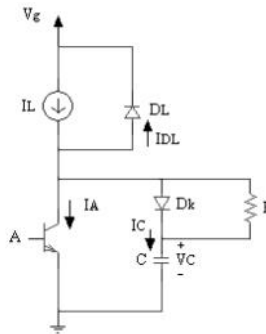
Koruma devreleri, anahtarlara seri ve paralel bağlı diyotlardan ve pasif devre elemanlarından oluşmaktadır. Yalıtıma geçiş anındaki anahtar üzerindeki zorlanmaları azaltmak için yalıtım koruma devreleri, iletim durumundaki zorlanmalar için de iletim koruma devreleri geliştirilmiştir. Koruma devreleri yarı iletken anahtarlar üzerindeki zorlanmaları azaltarak taşıdıkları akım ve gerilim değerlerinin nominal değerlerde olmasını sağlarlar.

Bununla birlikte anahtarlama esnasında anahtar akımının veya geriliminin sıfır yapılabilmesi ile rezonans anahtarlama teknikleri geliştirilmiştir.

Koruma devrelerinin tasarımı ve rezonans anahtarlama teknikleri ayrı başlıklar halinde anlatılmıştır.

## ii. Koruma devrelerinin tasarımı

Koruma devreleri, anahtarın iletime ve yalıtıma geçmesi durumları için farklı şekillerde tasarlanırlar. İletim anı koruma devreleri; anahtar üzerinden geçen akımın yükselmesine bağlı olarak anahtar uçlarındaki gerilimin düşürülmesi prensibine göre çalışırlar. Yalıtım koruma devreleri ise bu devreler anahtar akımının sıfıra yaklaşması durumunda anahtar uçlarındaki gerilimin de sıfır yapılması prensibine göre çalışırlar. Ekil 2.31'de örnek bir yalıtım koruma devresi görülmektedir.



ekil 2.31. Yalıtım koruma devresi

ekil 2.31'deki yalıtım koruma devresi, transistörün yalıtıma geçmesi durumunda  $I_L$  akımının  $D_k$  diyotunun ileri yönde iletme geçmesi sonrası kondansatör üzerinden akmasını sağlar. Bu sayede transistörün uçlarında oluşabilecek olan ani gerilim değişimleri kondansatör ile azaltılmı olur (Bronstein ve Ben-Yaakov 2002). Kondansatör, transistör yalıtımda kaldığı sürece arj olmaya devam eder. Transistör iletme geçecek olursa, kondansatör üzerinde depolanan enerji, diyota paralel bağlı olan  $R$  direnci ve transistör sayesinde de arj olmaya başlar.

Kondansatör de eri, transistörün yalıtımda kalması sırasında transistörün uçlarında oluşacak olan gerilim artışı göz önünde tutularak belirlenmelidir. Yani anahtarlama akımı sıfıra düştüğünde, anahtarın uçlarında olması istenen gerilim de erine göre kondansatörün seçilmesi gerekir.

Anahtar akımı sıfıra ulaşmadan önce kondansatörün tamamen arj olduğu düşünülürse, kondansatör gerilimi dolayısıyla de eri Denklem 2.20'ye göre hesaplanır.

$$V_C = \frac{I_L t_{yg}}{2C} \quad \text{ve} \quad C = \frac{I_L t_{yg}}{2V_C} \quad \text{'dir.} \quad (2.20)$$

Burada;  $V_C$ , kondansatör gerilimini (V),  $I_L$  ise yük akımını (A) temsil etmektedir.

Anahtar akımı sıfıra ulaştığında son gerilimi kaynak gerilimine eşit veya küçük olur ( $V_C \leq V_g$ ). Bu durumda kondansatör de eri Denklem 2.21'deki gibidir.

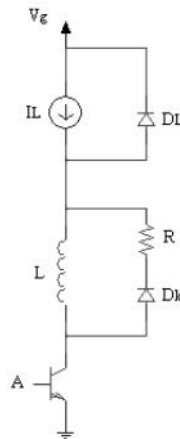
$$C = \frac{I_L t_{yg}}{2V_g} \quad (2.21)$$

Burada hesaplanacak olan kondansatör de eri, devredeki kaçak endüktans etkisinin göz önünde bulundurulmadığı durum için geçerlidir. Anahtarın yalıtımda olması anında kaçak endüktansın oluşturacağı gerilim düşümlerine engel olmak için kondansatörün daha büyük kapasite de erinde seçilmesi gerekir. Denklem 2.22, kaçak endüktans de eri göz önünde bulundurularak hesaplanan kondansatör de erini bulmamıza yardımcı olur. Denklem 2.23 ile gösterilen "k" de eri, anahtar için bir koruma devresi olmadığında anahtardaki aşırı gerilim yüzdesini ifade etmektedir.

$$C = \frac{100kI_L t_{yg}}{V_g} \quad (2.22)$$

$$k = \frac{L_{\sigma} I_L}{t_{yg} V_g} \quad (2.23)$$

Anahtarların ilettime geçmesi durumunda; ani akım de i imlerine engel olmak ve anahtar uçlarında olu an akım kaynaklı gerilimleri azaltmak için ise iletim koruma devreleri kullanılmaktadır. Anahtara seri ba lı bir bobin kullanılması akımın yükseli ini belirli oranlarda azaltacaktır. Akım ve gerilim dalga ekillерinin de i tirilmesi de güç kayıplarını azaltacaktır. ekil 2.32, iletim koruma devresini göstermektedir. Anahtarın ilettime olması anında bobine paralel ba lı olan diyot yalıtım durumundadır. Anahtar kesime geçti i anda ise bobinde depolanmı olan enerji diyotun ilettime geçmesi ile direnç üzerinde harcanmaktadır.



ekil 2.32. letim koruma devresi

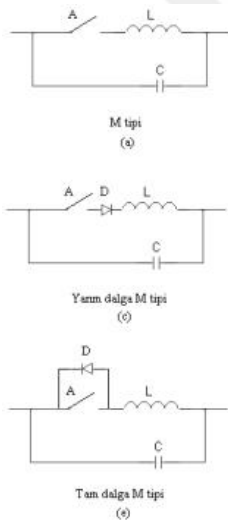
### iii. Rezonans anahtarlama teknikleri

nverterlerde yüksek frekanslarda çalı lması beraberinde bazı problemler getirmektedir. Bu sorunların çözülmesi için anahtarlar, sıfır akım anahtarlama (SAA) ve sıfır gerilim anahtarlama (SGA) yapacak ekillde konfigüre edilmi tirler. SAA, anahtarın ilettime veya yalıtıma geçmesi durumunda akımın sıfır olması, SGA ise anahtarın ilettime ve yalıtıma geçmesi durumunda gerilimin sıfır olması demektir (Karlsson ve ark 2000). Anahtarlama anlarında akımın ve gerilim sıfır olması artı anahtarlamadan

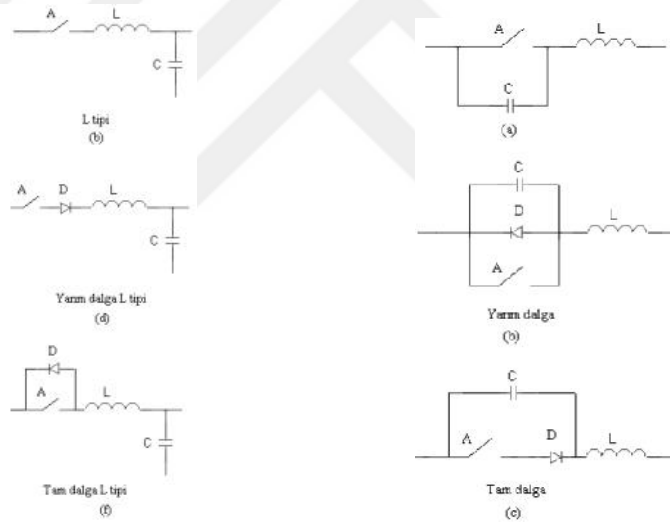


kaynaklı güç kayıplarını önemli ölçüde azaltmaktadır. Sıfır akım ve sıfır gerilim anahtarlama yapabilmek için anahtarın etrafına ekil 2.33 ve ekil 2.34'teki gibi bobin ve kondansatör ilave edilir. Bu sayede sistemler çok yüksek frekanslarda çalı tırılabilme için dizayn edilebilmekte ve yüksek verimler elde edilebilmektedir. Bundan ba ka olarak, devredeki kaçak endüktans, kondansatörden kaynaklı parazitler ve elektromanyetik girişim etkisi azaltılmı olur (He ve ark 2001).

ekil 2.33'te sıfır akım anahtarlama yapabilen anahtarlama devreleri gösterilmektedir. Burada anahtara seri olarak ba lanan rezonans bobininin görevi, anahtarı sıfır akım anında ilettime veya yalıtıma sokmaktır. Rezonans kondansatörünün görevi ise enerjinin depolanmasını ve transfer edilmesini sa lamaktır (Liu ve ark 1985). L tipi ve M tipi olmak üzere iki çe idi vardır. Diyot; yarım dalga uygulamalarında tek yönlü akım akı mına izin verirken, tam dalga konfigürasyonunda iki yönlü akım akı mı vardır.



**ekil 2.33.** Sıfır akım anahtarlama devreleri



**ekil 2.34.** Sıfır gerilim anahtarlama devreleri

Sıfır gerilim anahtarlama anahtar konfigürasyonlarında ise birbirlerine paralel ba lı olan rezonans kondansatörü ve anahtara seri ba lı bir de bobin bulunmaktadır.

ekil 2.34'te bir SGA yapan bir anahtar devresine örnek verilmi tir. Anahtar ilettime geçti inde kondansatördeki gerilim sıfırdır. Anahtar yalıtımda iken ise kondansatör, arj olarak anahtardaki kayıpları azaltır. (Bronstein ve Ben-Yaakov 2002). Yarım dalga ve tam dalga olmak üzere iki çe idi vardır. Anahtarın ileri yönünün tersine, anahtara paralel olarak ba lanan bir diyot ile yarım dalga çalı ma durumu elde edilir. Bu ekilde

kondansatörün gerilimi hiçbir zaman sıfır olamaz. Diyot; anahtarın iletim yönünde anahtarı seri ba lanmı ise tam dalga çalı ma durumu elde edilmi olur. Böylece kondansatör de rahatlıkla osilasyona girmi olur.



### 3. MATERYAL VE YÖNTEM

#### 3.1. İndüksiyon ısıtmanın ısıtma bujilerine uygulanabilirli ğinin incelenmesi

Isıtma bujisi ile indüksiyon ısıtmanın bir arada oldu ğu bir çalı şma literatürde henüz yoktur. Bu konuda temel olu turabilecek kısa ve küçük parçaları ısıtmaya yönelik indüksiyon ısıtmanın kullanıldı ğını gösteren literatür çalı şmaları mevcuttur. İndüksiyon ısıtma özellikle hızlı ve verimli ısıtmanın en yaygın yöntemlerinden biridir. 2000 yıllarında benzin enjektörünün performansının artırılması adına indüksiyon ısıtmalı bir modeli John S. Bright, Jerry E. Nines, Michael J. Frick, Frank Zimmermann, Christoph Kendlbacher, John F. Nally, Jr., Wei-Min Ren çalı şma grubu tarafından denenmi ş ve US6102303 A patent nosu ile patentlenmi ştir (Bright ve ark 2000).

İndüksiyon ısıtma; eritme, kaynak yapma, lehimleme, sıcak ekil verme amacı ile tavlama, yüzey sertleştirme, muhtelif ısıl işlemler için tercihen kullanılmaktadır. İndüksiyon ısıtma ile yapılan bu işlemlerin sonuçlandırılması daha kolaydır ve üretim sonucu elde edilen ürünlerin kalitesi daha yüksektir.

İndüksiyon ısıtma yönteminin en belirgin avantajı yüksek verimliliğe sahip olmasıdır. Bunun en önemli sebeplerinden birisi ısıtma işleminin yalnızca ısıtılacak parça üzerinde yoğunlaştırılmasıdır.

Bir indüksiyon ısıtmaya ilişkin sistem seri ya da paralel rezonans ilkesi üzerine inşa edilir. Topolojisi ise klasik güç elektroniği yapılarından biri olabilir. Örneğin tam köprü, yarım köprü, flyback, self rezonans vb gibi.

Isıtma bujisinin öncelikle indüksiyon ısıtma için gerekli olan rezonans devresi yapısına uygunluğunu görmek için LCR metre ile Çizelge 3.1'de belirtilen 3 ayrı firmaya ait ısıtma bujisinin toplam direnç, endüktans ve kapasitans değerlerini inceleyelim.

**Çizelge 3.1.** Bosch, Rescal ve SVAC marka ısıtma bujilerine ait uçları kısa devre ve açık haldeki toplam direnç, endüktans ve kapasitans değerleri

		Bosch	Rescal	SVAC
$R_{\text{toplam}}$	Ucu kısa devre	0,68	0,80	1,00
	Ucu açık devre	0,51	0,60	0,53
L	Ucu kısa devre	1,5 mH	20 mH	60 mH
	Ucu açık devre	1,8 $\mu$ H	0,7 $\mu$ H	1,20 $\mu$ H
C	Ucu kısa devre	120 pF	40 pF	30 pF
	Ucu açık devre	120 pF	40 pF	32 pF

Her üç firmaya ait ısıtma bujilerine de baktığımız zaman bujilerin uçları kısa devre iken yani içlerinde bulunan rezistans ve alüminyum metalden oluşmuş gövde temas halinde iken buji yüksek bir endüktans etkisi göstermektedir. Böylece bujiye yüksek frekanslı bir güç uygulayarak bujinin manyetik indüksiyon ile ısıtılabilmesi mümkün görünmektedir.

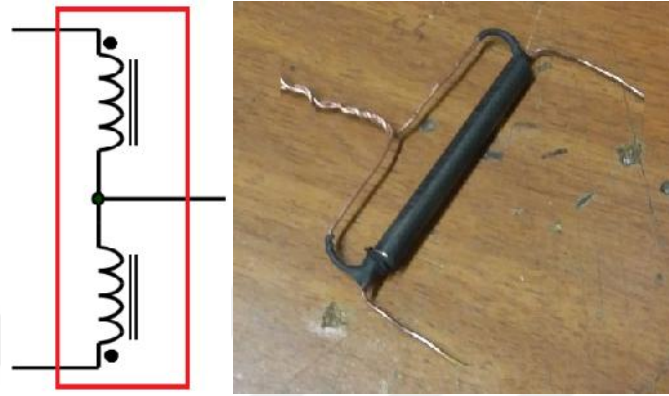
Tüm bu özellikler göz önünde bulundurulduğunda neden bujilerin kızdırılmasının indüksiyon ısıtma tekniği ile yapılamayacağı sorusu bizi bu çalışmayı yapmaya tetikleyen en büyük etken olmuştur.

### 3.2. Uygun sürme devresinin seçilmesi

İnverter uygulamalarında güç yükseldikçe tercih edilen yapı, flyback yarım köprü gibi yapılardan tam köprü sürme devresine doğru yakınsar. Tam köprü yapı ile yük üzerinde DC bara geriliminin tamamı hem negatif hem de pozitif alternans olarak oluşturulabilir ki bu yaklaşımın kayıpları göz ardı edilirse maksimum güç aktarımının limiti olur. Tasarladığımız indüksiyon için olası güç aktarımını maksimum seviyede tutmak ve anahtarlama kayıplarını azaltmak adına orta uçlu bobin ve çift anahtarlı push-pull (it-çek) yapısı tercih edilmiştir. Böylece düşük anahtarlama kaybı ve maksimum güç aktarımı hedeflenmiştir. Tasarım için gerekli bobin yapısı şekil 3.1'deki gibi dizayn edilmiştir.

Günümüzde modern kızdırma bujilerinin içerisinde iki ayrı rezistans bulunmaktadır; ısıtma ve ayar rezistansları. Çalışmamızda şekil 3.1'de de görüldüğü üzere kendi tasarladığımız umuz buji yapısını kullanacağız. Kendi tasarladığımız bujiyi seçmemizin nedenleri arasında hem modern ısıtma bujilerinin yapısı gereği

manyetik alan çizgilerinin geni lemesi veyahut manyetik alan kuvvetinin da ılması bir ihtimal de manyetik alan yönlerinin birbirine zıt olacak ekilde olu ması sonucu bile ke manyetik alanın sıfırlaması veya sıfıra yakın olması ile ısıtılacak bölgenin geç ısınmasına veya yeterli ve verimli bir ekilde kızdırılmamasına neden olabilece i dü üncesi hem de sistem topolojisi gere i bujimizin 3 uçlu olmasını sıralayabiliriz.

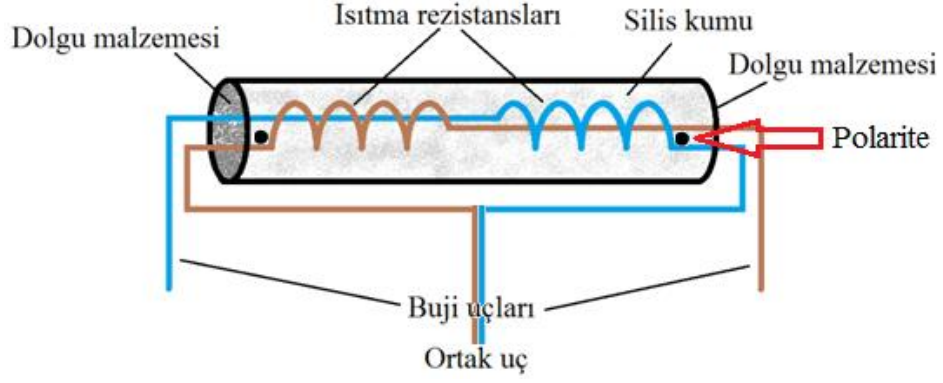


**ekil 3.1.** Tasarlamı oldu umuz ısıtma bujisinin yapısı ve genel görünümü

Kendi tasarladığımız ısıtma bujisi ile olu turulacak olan indüksiyon sayesinde belirli bir bölgenin kayıpsız bir ekilde ısıtılması hedeflenmektedir.

### 3.3. Tasarlanan bujinin genel yapısı

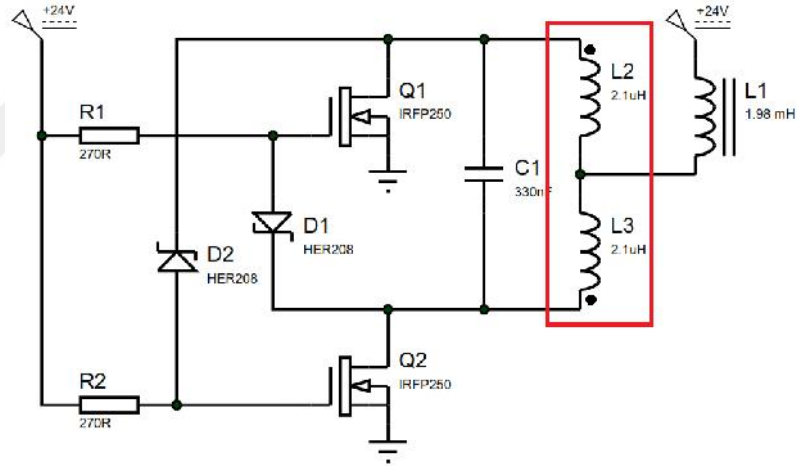
ndüksiyon ile çalı masını planladığımız buji de mevcut bujiler gibi metal bir gövdeden olu maktadır. Bu metal gövde içerisinde sarım yönleri birbirlerine ters olacak ekilde iki adet de ısıtma rezistansı bulunmaktadır. Isıtma rezistanslarını, gövde içerisine yerle tirildikten sonra rezistansların hem metal gövde ile hem de kendi aralarındaki izolasyonunu sa lamak için gövde içerisine kuvars madeninden elde edilen silis kumu ( $\text{SiO}_2$ ) doldurduk. Kum doldurma i lemi de tamamlandıktan sonra gövdenin her iki ucu da yaklaşık  $1500^\circ\text{C}$ 'ye dayanıklı silikon ile kapattık. Bu ekilde bujimiz hazırlanmış oldu. ekil 3.2'de bujimizin iç yapısı temsili olarak gösterilmiştir.



ekil 3.2. Tasarlanan bujiye ait ematik görünüm

### 3.4. Sistemin çalışma prensibi

ekil 3.2'de kurguladığımız topolojinin ısıtma bujisine uygulanması temsili olarak gösterilmiştir.



ekil 3.2. Self rezonans devresi

Kullanılmı oldu umuz sürme devresi bir self-rezonans devresidir ve Royer osilatör devresi olarak da bilinmektedir.

MOSFET'lerin anahtarlanması, uçlarındaki gerilimin sıfıra gelmesi anında yapılmaktadır. Kapasitör ve yük bobinlerinin birbirlerine paralel olmasında dolayı akım kaynaklı paralel rezonans devrelerine de benzemektedir.

Burada;  $R_1$  ve  $R_2$  dirençleri, 270 ohm, 2W'dır. Direnç değerleri, Mosfet'lerin ne kadar hızlı açılabilirini belirleyecekleri için küçük bir değerde seçilmelidir. MOSFET'ler ters zamanlı olarak açıldığında dirençler çok küçük seçilmez ki akım

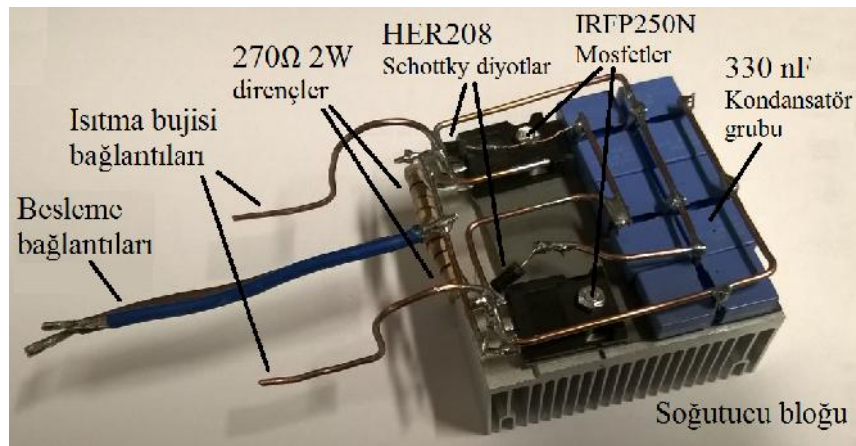
diyot vasıtasıyla toprağa çekilebilir.  $D_1$  ve  $D_2$  diyotları MOSFET kapılarını bloklamak için kullanılırlar. Diyotlar düşük gerilimli olarak seçilmelidir. Çünkü MOSFETlerden biri açıkken diğeri tamamen kapalı olmalıdır. HER208 diyotlar, Schottky diyotlar olarak bilinirler ve yüksek verim, yüksek hız, düşük gerilim düşümü gibi özelliklere sahiptir. Diyotların voltaj direnci, elektrik devresinin rezonansa girmesi sırasında gerilim yükselmesine karşı dirençli olmalıdır.  $Q_1$  ve  $Q_2$  MOSFETleri 200V 30A (IRFP250N)'dir. Bu MOSFET'ler, düşük drain-kaynak direncine ve hızlı tepki sürelerine sahiptirler.

$L_1$  bobini; devrenin çalışması sırasında oluşabilecek gürültülere, yüksek frekans salınımlarına ve sistemin aşırı akım çekmesine karşı koyması için kullanılmaktadır. Bobinini temsil etmektedir ve yaklaşık 1,98 mH'dir. Devreden akacak olan yüksek akımlara dayanabilmesi için 1,1 mm. çapında emayeli bakırdan demir nüve etrafına 14 tur sarılarak elde edilmiştir.

$L_2$  ve  $L_3$  indüktörleri ısıtma bujisinin indüksiyon ısıtma ile ısınmasını sağlayacak olan emayeli indüktörlerdir ve paralel bağlıdır. 1,5 mm<sup>2</sup> çıplak bakırdan 17 tur sarılarak elde edilmiş olup yaklaşık 2,1  $\mu$ H değerindedirler.

$C_1$  kondansatörü,  $L_2$  ve  $L_3$  endüktansları ile birlikte ısıtma bujisinin paralel rezonans devresini oluşturmaktadır. Kondansatörler, polipropilen malzemeden imal olup, yüksek sıcaklık ve akımlara dayanabilmelidir. Rezonans devresi için gerekli 330 nF değerindeki kapasiteyi 10 adet 33 nF kapasitörü paralel bağlayarak elde ettik.

Şekil 3.3'de görüldüğü üzere elektronik ekipmanların tamamını bir soğutucu bloğu üzerinde lehimleyerek birleştirdik.



Şekil 3.3. Devrenin tamamlanmış hali

Rezonans frekansında çalı ma sırasında kapasitif reaktans ile endüktif reaktans birbirine e it olur ve devre teorik olarak rezistif bir yapıya sahip olaca nda güç kayna ının gerilimi ile devre akımı aynı fazda olurlar. Rezonans frekansı L ve C parametrelerine ba lı olarak Denklem 3.1'de görüldü ü gibi hesaplanır. Devre akımı rezonans frekansında çalı rken en yüksek de erine ula ır. Rezonans frekansının altındaki veya üstündeki çalı ma durumlarında devre akımında azalma görülür.

$$\omega_L = \frac{1}{\omega_C} \quad 2\pi f_r L = \frac{1}{2\pi f_r C} \quad \text{olur ve buradan } f_r = \frac{1}{2\sqrt{LC}} \quad \text{olarak bulunur.} \quad (3.1)$$

Sistemin rezonans frekansını hesaplayacak olursak;

$$f_r = \frac{1}{2\pi\sqrt{LC}} = \frac{1}{2\pi\sqrt{1,05 \cdot 10^{-6} \cdot 330 \cdot 10^{-9}}} \cong 270 \text{ kHz} \quad \text{olarak bulunur.}$$

### 3.5. ndüksiyon ısıtma ile hedeflenen özellikler

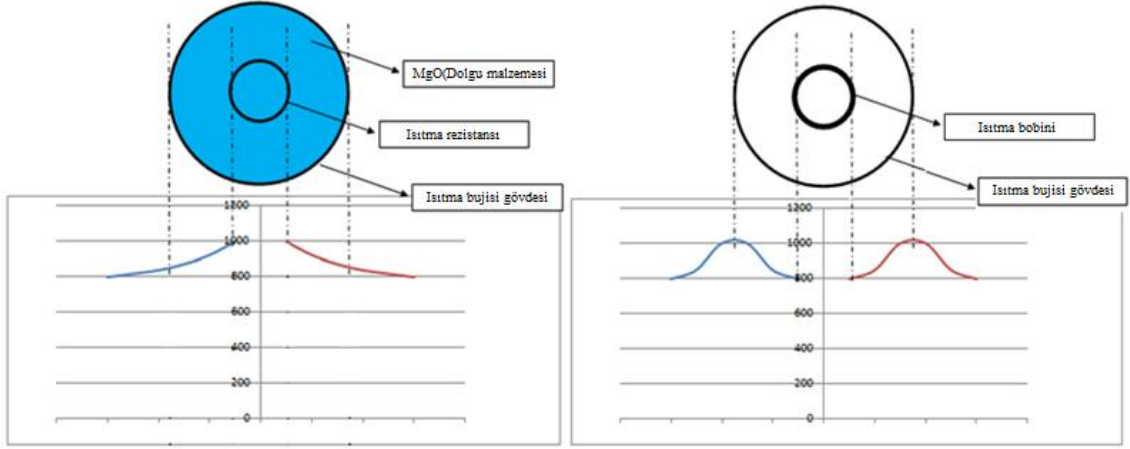
Isıtma bujileri üzerine yapılan çalı malar genelde bujinin mekanik yapısı ve ısı da ılımı üzerinedir. Bujinin ticari öneminden dolayı çalı maların büyük bir kısmı temelde patentli olup fiziksel de i iklikler ve performans etkileri ticari sırlar olarak da kalabilmektedir. Bujilerdeki ısınma limiti ve ısınmanın kontrolü ticari maliyetlerin dü mesi adına self kontrollü olarak dizayn etmek bir gelenek haline gelmi tir. Bu konudaki ilk patent 1993 yılına ait olup US5218183 A patent kodu ile Hiroyuki Kimata'ya aittir (Kimata 1993). Sistem kendi içerisindeki ısıtma dirençlerinin regülasyonu ile kontrol edilmi tir.

Bujinin kızdırılması ile olu an ısıl da ılım merkezinden gövdesine do ru gidildikçe azalmaktadır. Merkezinde yakla ık 1000°C olan sıcaklık buji gövdesinde 800°C'ye kadar dü ebilmektedir. Bu da kızdırılan bujiden tam verimle faydalanılamamasına neden olmaktadır.

Bu çalı ma ile maksimum sıcaklık de erinin bujinin merkezinden ziyade direkt olarak gövdesinde elde edilmesini ve bujinin çok daha kısa sürelerde kızdırılmasını planlamaktayız.



ekil 3.4 (a)'da modern bir ısıtma bujisine ve ekil 3.4 (b)'de de yapmayı planladığımız bujiye ait hedef ısıl dağılım grafiğini temsil olarak gösterilmiştir.



ekil 3.4. (a) Modern bir ısıtma bujisi

ekil 3.4. (b) Hedef grafik

#### 4. DENEYSEL SONUÇLAR VE TARTI MA

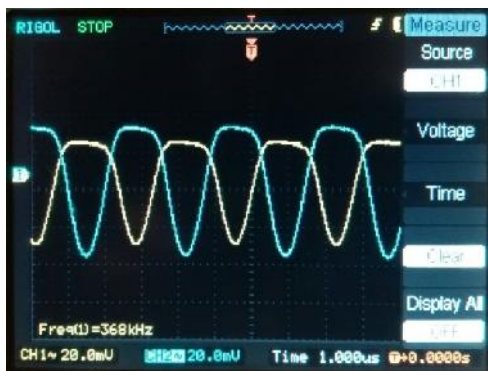
Sistemin çalı ması ile birlikte devremizin yük tarafından büyük de erde akım akaca mı dü ündü ümüz için bobinleri kalın kesitli bakır iletkenlerden yapmı tık. Nitekim çalı ma esnasında devremizden yakla ık olarak 14,20A akım aktı ı gözlenmi tir.

Rezonans devresini olu turabilmek adına kondansatör grubumuzu bujimize paralel olarak ba ladık. Devremiz self-rezonans özelli ine sahip oldu u için buji ve kondansatör blo u devrenin otomatik olarak çalı abilece i belirli bir rezonans frekansına sahip olacaktır.

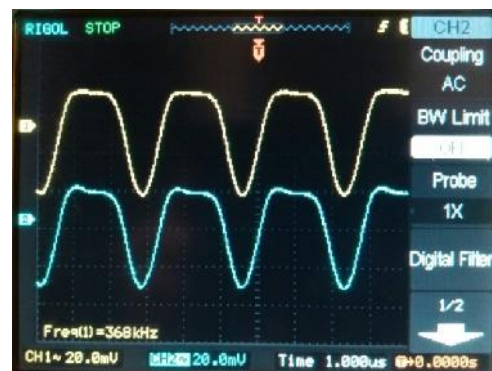
Daha önceden de hesapladı mız üzere devreye ait rezonans frekansının 270 kHz'ler seviyesinde olmasını planladık. Fakat sistem devrede iken osiloskop ile yapmı oldu umuz ölçüm sonrasında frekansın 368 kHz oldu unu gördük.

Kondansatörler büyük akımlara ve ısınmaya kar ı dayanıklı olmalıdır, aksi taktirde hasar görecektir veya devre dı ı kalacaklardır. Ayrıca, akımın büyük bir kısmı ısıtma bujisi ile kondansatör grubunun arasında akaca ı için kondansatörler ısıtma bujisine oldukça yakın yerle tirilmelidir.

ok bobini enerjilendirilmeden önce; ekil 4.1 (a), elektronik devremizde bulunan her iki mosfetin Gate uçlarında, ekil 4.1 (b)'de her iki mosfetin Drain uçlarında osiloskopta ölçülen frekansın 368 kHz oldu unu göstermektedir.



ekil 4.1 (a)

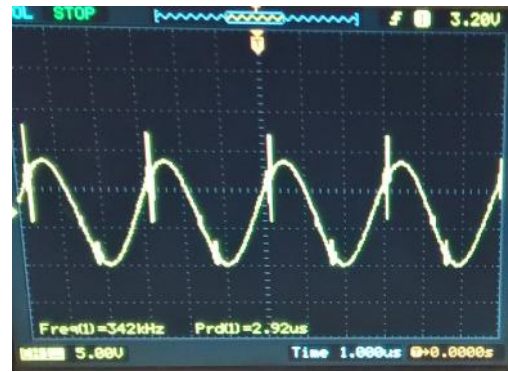


ekil 4.1 (b)

ok bobini enerjilendirildikten sonra; elektronik devremiz kendili inden osilasyona girdi ve bujimiz çok kısa süre içerisinde kızarmı tır. ekil 4.2 (a), mosfetlerin Drain-GND arasındaki, ekil 4.2 (b) ise her iki mosfetin Drain uçları arasındaki osiloskop sinyallerini göstermektedir.



ekil 4.2 (a)



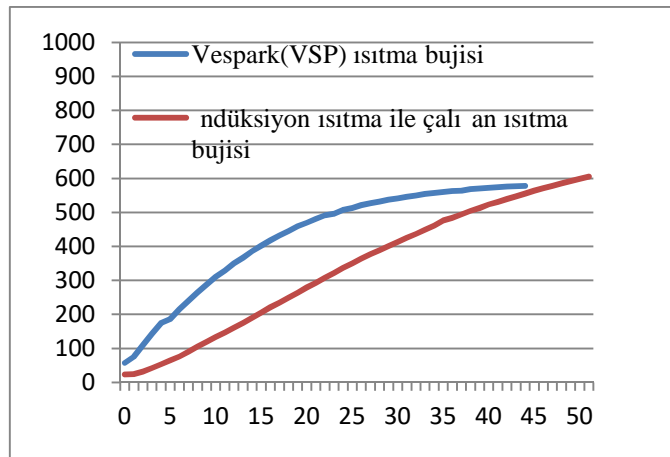
ekil 4.2 (b)

Bujimiz yakla ık 54 sn. içerisinde ekil 4.3'teki kızarıklık a gelmi olup sıcaklı ı yakla ık 600°C'ye kadar ula mı tır.



ekil 4.3. Isıtma bujisinin son hali

Bujimizin gövdesi kızarmasına ra men sıcaklık de erinin dü ük oldu u dü üncesi ile temin etmi oldu umuz Vespark marka 24V gerilimle çalı an bir ısıtma bujisi ile kar ıla tırma yaptık. Temin etti imiz bujiyi direkt olarak 24V DC güç kayna ı ile çalı tırmamız sonrasında yakla ık 45 sn. içerisinde sıcaklı ının 579°C'ye ula tı mı gördük. Her iki bujinin de sıcaklı ının zamana ba lı olarak de i imi ekil 4.4'te gösterilmektedir.



ekil 4.4. Isıtma bujileri için sıcaklık-zaman grafi i

Bu sonuç çalı mamızın mevcut ticari bir buji ile yakla ık aynı seviyede oldu unu göstermektedir. Hatta buji gövdesi olarak kullandı ımız metalin hacimsel olarak büyük olmasına ra men konvansiyonel bujilerle aynı sıcaklıkların elde edilmisi olması bizi tezimizin çıktıları konusunda daha da cesaretlendirmi tir. Çizelge 4.1’de yapımı oldu umuz el yapımı buji ile konvansiyonel bujinin fiziksel özelliklerini kıyaslamaktadır. Deneyde kullanılan ticari model yalnızca 1 gramlık kütleyi istenilen sıcaklı a çıkarmaya çalı ırken tez konusu buji 6 gramlık bir kütleyi ısıtmaya çalı maktadır.

**Çizelge 4.1.** ki ayrı ısıtma bujisine ait de erlerin kar ıla tırılması

	VSP (Vespark)	New GP	
Ölçülen Sıcaklık (°C)	579°C	564°C	t=45 sn.
Malzeme et kalınlı ı (mm)	0,50 mm.	0,50 mm.	
Malzeme çapı (mm)	5 mm.	8,40 mm.	
Isınan kütle (gr)	1 gr.	6 gr.	
Uzunluk (mm)	18,00 mm.	73,00 mm.	

Çizelge 4.1’deki kütle de eri a a ıdaki metot ile normalize edildi inde aynı miktar enerji ile 1 gramlık kütlenin yakla ık 7,5 saniyede 579°C’ye ula abilece i sonucuna varılmaktadır.

6 gr. malzemenin 579°C sıcaklı a ula ması için gereken süre 45 sn.

1 gr. malzemenin 579°C sıcaklı a ula ması için gereken süre x=?

Buradan x 7,5 olarak bulunur.

Elde edilen bu sonuç ile öyle bir yakla ımda bulunmamız mümkün olabilmektedir. Tasarlamı oldu umuz yeni ısıtma bujisinin mevcut bir konvansiyonel ısıtma bujisi ölçülerine indirgenebilmi olması durumunda mevcut ısıtma bujilerine oranla çok daha kısa sürelerde kızdırma i leminin gerçekte tirilebilece i görülebilmektedir.

Bir di er cevap aranması gereken soru ise, buji içerisine eklenmi olan ısıtma bobinlerinin gerçekten indüksiyon yoluyla mı yoksa rezistif yapısı ile mi gövdeyi ısıttı ı

sorusudur. bu sorunun cevabı olarak a a 1daki düzenek kurulmu ve 2 metot ile bu soruya cevap aranmı tır.

Metot 1: Bu metotta bobinlerin iç dirençleri ölçülerek ve DC direnç de erleri baz alınarak bobinin ne kadar güç harcadı ı üzerinden bir yakla ımda bulunulmu tur. Bobinin direnci mikroohm metre ile yakla ık olarak 4 m olarak ölçülmü tür.



**ekil 4.5.** Isıtma bujisine ait iç direncin miliohm metre ile ölçülmesi

$P=I^2R$  oldu undan telde harcanan güç  $(14,2)^2 \times 4 \cdot 10^{-3} = 0,81W$  olarak elde edilir. Sistemin çekti i toplam güç;  $P=U \cdot I$  ise  $P_{\text{Toplam}} = 24 \times 14 = 336W$ . Toplam güç içerisinde yalnızca 0.78W'lık bir kısım telden kaynaklanmakta ve geriye kalan güç indüksiyon tarafından olu turulan ısıtma yetene ini göstermektedir. Buradan:

$$P_{\text{ind}} = (336 - 0,81) / 336 = 0,997 = \%99,7 \text{ olarak bulunur.}$$

Metot 2: Bu yöntemde pirometre ile ekil 4.6 (a)'da gösterildi i üzere 12.62A'lık bir akım kayna ına maruz bırakılan bujimizdeki sıcaklık artı ı hesaba katılmı tır. ekil 4.6 (b)'de ve ekil 4.6 (c)'de ise ısıtma bujisinin akım kayna ına ba lanması ile yakla ık 1 dakika 50 saniye süreyle beklenmesi sonrasında elde edilen sıcaklık ve akım de erlerini gösterilmektedir.



ekil 4.6 (a)

**ekil 4.6.** Tasarlamı oldu umuz ısıtma bujisinin akım kayna ına ba landıktan sonraki sıcaklık ve akım de erleri



ekil 4.6 (b)



ekil 4.6 (c)

ekil 4.6 (b)'den yalnızca DC akım yetene i ile 23,2°C'ye çıkabilen bujimiz tam gerilim altında daha kısa sürede (45 sn.) 564°C'ye kadar çıkabilmi tir. Buradaki enerji oranından ne kadarlık bir ısınma enerjisinin indüksiyon yolu ile olu tu unu normalize edebiliriz.

Öncelikle ekil 4.6 (b)'deki ba langıç sıcaklı ının 14,20 A altında 45 sn sürmü ekliyle normalize edersek (orantı yolu ile):

$$(14,2)^2/(12,62)^2 = 1,266$$

$$Q_{DC}=(0,5 \times 4,47 + 0,4 \times 3,04 + 0,4 \times 5,11) \times 1,266 \times (45 \text{ sn} / 110 \text{ sn}) = 2,755 \text{ joule}$$

Burada; 14,20A, vermeyi hedefledi imiz akım miktarı, 45 saniye ise daha az çalı tırmayı dü ündü ümüz süredir. Bujimizin normal çalı ma ko ullarında harcadı ı toplam enerji:

$$Q_{\text{toplam}} = U \cdot I \cdot t = 24 \times 14,20 \times 45 = 15336 \text{ joule'dür.}$$

ndüksiyon ile elde edilen enerji ise:

$$Q_{\text{ind}} = Q_{\text{toplam}} - Q_{DC}; 15336 - 2,755 = 15333 \text{ joule olarak bulunur.}$$

Buradan  $15333/15336 = 0,999$  ise %99,9 indüksiyon ısıtmanın payı olarak hesaplanabilir. Her iki metodun ortalaması olarak ele alınır; indüksiyon ısıtmanın ortalama etkisi; %99,8 olarak hesaplanabilir.

Bu sonuçlar ve yakla ımlar indüksiyon ısıtma metodunun ısıtma bujilerinde kullanılabilece ini göstermektedir. Önümüzdeki olası engeller ısıtmanın

gerçekle tirilmesinin mümkünü ünden ziyade sistemin ticari de ere eri mesi bakımından araç üreticilerinin gösterece i ilgiye ve bu firmaların talebi noktasındaki direncin kırılması ile ilgili olaca ı öngörülmektedir.



## 5. ÖNER LER

Isıtma bujisi teknolojisindeki ve otomotiv sektöründeki geli meler hızla devam ederken mevcut kızdırma sistemleri hızla ilerleyen bu geli melere cevap veremez hale gelmi tir. Isıtma bujilerindeki direnç kaynaklı kayıplar, uygun rezistans de erlerinin yanlış hesaplanması ve rezistansların birle tirilmesi ile ilgili problemler sistemde ısı kayıplarına, ısı kaybı sonrası yanma i leminin uygun artlarda gerçekleşememesine, tutu ma gecikmesinin, dizel vuruntusunun ve zararlı gaz emisyonlarının artmasına neden olmaktadır. Dolayısı ile ilerleyen teknolojiye uyum sa layacak ısıtma bujilerine ihtiyaç duyulmaktadır. Yeni kurallar gaz emisyonlarını azaltmak için üreticileri olabildi ince zorlamaktadır. Gaz emisyonlarının azaltılmasına etki eden en büyük yerlerden biri de so uk çalı tırmadaki yanma problemlerinin giderilmesi ile olmaktadır.

Bu çalı ma ile elde etmi oldu umuz sistemin günümüz teknolojisine fayda sa lamasını ve yeni akademik çalı malara zemin hazırlayaca ını dü ünülmekteyiz. Isıtma bujisi teknolojisinde yeni arayılara cevap verebilece ini dü ündü ümüz bu çalı ma; verimlilik, kalite, güvenilirlik, maliyet gibi birçok özelli i ile ön plana çıkmaktadır.

Kullanıcı dostu olabilecek olan bu sistemde, sistem arızalarının klasik ısıtma bujilerine oranla daha az olması, kurum olu maması, rezistansların a ırı ısıya ve ısı kaynaklı mekanik gerilmelere maruz kalmaması gibi birçok nedenden dolayı tercih sebebi haline gelebilecektir.

Sistemin daha da geli tirilebilmesinin, AR-GE maliyetlerinin yüksek olmasından dolayı ısıtma bujisi üreticisi olan özel kurulu ların destek vermesine ba lı oldu unu dü ünülmekteyiz. Akademik çalı malar e li inde indüksiyon ısıtma teknolojisi ile çalı an ısıtma bujisi teknolojisinin daha da ilerletilebilece i kanaatindeyiz.



## KAYNAKLAR

- Agrawal JP, 2001. Power electronic systems. Theory and Design, 391.
- Atavi M, 1991. Inverter Design for Maximum Power Transfer in Induction Heating. YL Tezi ODTÜ, 8-17.
- Ben-Yaakov S, Rahav G, 1996. Average modelling and simulation of series parallel resonant converters by PSPICE compatible behavioural dependent sources. Electron Lett, 32, 4, 288-90.
- Bodur H, Akkaya R, Yaman C, Endüksiyonla Isıtmada Rezonans Devreli Inverterler ve Örnek bir Endüksiyonla Isıtma Uygulaması. ELMEKSEM, 93, 384-91.
- Bonsall A, Moussaoui Z, Batarseh I. Modeling and PSPICE simulation of a power resonant converter. Southcon/94. Conference Record, 270-5.
- Bright JS, Nines JE, Frick MJ, Zimmermann F, Kendlbacher C, Nally Jr JF, Ren W-M, (2000). Fuel injector with internal heater, Google Patents.
- Bronstein S, Ben-Yaakov S. Design considerations for achieving ZVS in a half bridge inverter that drives a piezoelectric transformer with no series inductor. Power Electronics Specialists Conference, 2002. pesc 02. 2002 IEEE 33rd Annual, 585-90.
- Chatterjee K, Ramanarayanan V. A comparative study of inverter circuits for induction heating. International Power Engineering Conference, Singapore, 537-42.
- Çetin S, 2005. Bir fazlı bir indüksiyon ısıtma sistemi analizi ve dizaynı, Pamukkale Üniversitesi Fen Bilimleri Enstitüsü.
- Davies J, Simpson P, 1979. Induction heating handbook, London ; New York, McGraw-Hill, p.
- Dawson FP, Jain P, 1991. A comparison of load commutated inverter systems for induction heating and melting applications. Ieee T Power Electr, 6, 3, 430-41.
- Dede EJ, Gonzalez JV, Linares JA, Jordan J, Ramirez D, Rueda P, 1991. 25-kW/50-kHz generator for induction heating. Ieee T Ind Electron, 38, 3, 203-9.
- Egan LR, Furlani EP, 1991. A computer simulation of an induction heating system. Ieee T Magn, 27, 5, 4343-54.
- Grajales L, 1995. Analysis and design of a 500 kHz series resonant inverter for induction heating applications, Virginia Tech.
- Hammad AZ, Makky A, Peter M, Guido B, 2002. A modular IGBT converter system for high frequency induction heating applications. Power Electronic Intelligent Motion Power Quality (PCIM Europe 2002), Power Electronic, 501-6.
- Hart Daniel W, (1997). Introduction to Power Electronics, Prentice Hall Internacional.
- He X, Sheng K, Williams BW, Qian Z, Finney SJ, 2001. A composite soft-switching inverter configuration with unipolar pulsewidth modulation control. Ieee T Ind Electron, 48, 1, 118-26.
- Henze CP, Mohan N, Hayes JG, (1989). Constant frequency resonant power converter with zero voltage switching, Google Patents.
- Hobson L, Tebb DW, Turnbull D, 1985. Dual-Element Induction Cooking Unit Using Power Mosfets. Int J Electron, 59, 6, 747-57.
- Houben D-IH, Rottner D-IBM, 2008. Influence of modern diesel cold start systems on the cold start, warm-up and emissions of diesel engines.
- Hua G, Lee FC. Soft-switching PWM techniques and their applications. Power Electronics and Applications, 1993., Fifth European Conference on, 87-92.

- Imai T, Sakiyama K, Hirota I, Omori H, 1997. A study of impedance analysis for an induction heating device by applying a new interpolation method. *Ieee T Magn*, 33, 2, 2143-6.
- Karlsson P, Bojrup M, Alaküla M, Gertmar L. Zero voltage switching converters. Norpie 2000.
- Kazimerczuk M, Czarkowski D. Resonant power converters. *Fuel and Energy Abstracts*, 343.
- Khan S, Ahmed M, Khan M, Haq A, 2000. Innovative applications of induction heating for selective heat-treatment. *Science Vision*, 5, 4, 14-9.
- Kimata H, (1993). Self temperature control type glow plug, Google Patents.
- Köro lu S, Sazak BS, 2002. MUTFAK UYGULAMALARI Ç N YARIM KÖPRÜ SER REZONANS NVERTÖRLÜ NDÜKS YON ISITMA S STEM TASARIMI. *Pamukkale Üniversitesi Mühendislik Bilimleri Dergisi*, 8, 2, 167-72.
- Liu K-H, Oruganti R, Lee FC. Resonant switches-topologies and characteristics. *Power Electronics Specialists Conference*, 1985 IEEE, 106-16.
- Lupi S, 2012. Survey on Induction Heating Development in Italy. 2012 Third Ieee History of Electro-Technology Conference (Histelcon).
- Maksimovic D, Stankovic AM, Thottuvelil VJ, Verghese GC, 2001. Modeling and simulation of power electronic converters. *Proceedings of the IEEE*, 89, 6, 898-912.
- Mohan N, Undeland TM, Çevirenler WPR, 2003. Nejat Tuncay, Metin Göka an, Seta Bo osyan Güç Elektroni i-Çeviriciler, Uygulamalar ve Tasarım, 2. Basımdan Çeviri, Literatür Kitabevi.
- Omori H, Nakaoka M, 1989. New single-ended resonant inverter circuit and system for induction-heating cooking apparatus. *International Journal of Electronics Theoretical and Experimental*, 67, 2, 277-96.
- ÖNCÜ S, SAZAK BS, 2004. E SINIFI NVERTERL MUTFAK T P B R NDÜKS YON ISITMA UYGULAMASI. *Sigma*, 2.
- Paresh SC, 1997. *Principles of Electric Machines and Power Electronics*". US John Wiley and Sons.
- Sami Sazak B, 2004. A capacitor voltage clamped dual half-bridge series-resonant inverter for home cooking applications. *Int J Electron*, 91, 5, 279-87.
- Sazak BS, 1999. Design of a 500W Resonant Induction Heater. *Pamukkale Üniversitesi Mühendislik Bilimleri Dergisi*, 5, 1, 871-8.
- Sheng K, Williams BW, Finney SJ, 2000. A review of IGBT models. *Ieee T Power Electr*, 15, 6, 1250-66.
- Skvarenina T, (2002). *The Power Electronics Handbook*, Purdue University, West Lafayette, Indiana, CRC Press.
- Tebb D, Hobson L, 1987. Design of matching circuitry for 100-kHz MOSFET induction heating power supply. *Ieee T Ind Electron*, 2, 271-6.
- Thompson K, Booske JH, Gianchandani YB, Cooper RF, 2002. Electromagnetic annealing for the 100 nm technology node. *IEEE Electron Device Letters*, 23, 3, 127-9.
- W LC, (1993). *Power Electronics*, Mc Graw Hill.
- Wang Z-Q, Sznaier I, Batarseh I, Bu J, 1996. Robust controller design for a series resonant converter. *IEEE Transactions on aerospace and Electronic Systems*, 32, 1, 221-33.

Wolfs P, Li Q. An analysis of a resonant half bridge dual converter operating in continuous and discontinuous modes. Power Electronics Specialists Conference, 2002. pesc 02. 2002 IEEE 33rd Annual, 1313-8.



## ÖZGEÇM

### KİŞİSEL BİLGİLER

**Adı Soyadı** : Bayram Volkan REİSOĞLU  
**Uyruğu** : T.C.  
**Doğum Yeri ve Tarihi** : Konya / 1988  
**Telefon** : (+90) 554 585 3164  
**Faks** :  
**e-mail** : bvolkanreisoglu@gmail.com

### EĞİTİM

Derece	Adı, İçeriği	Bitirme Yılı
Lise	: Meram Anadolu Lisesi, Meram, KONYA	2006
Üniversite	: Selçuk Üniversitesi, Selçuklu, KONYA	2011
Yüksek Lisans	: Selçuk Üniversitesi, Selçuklu, KONYA	2017

### DENEYLER

Yıl	Kurum	Görevi
2010-2012	EEM Asansör A.Ş.	AR-GE Müh.
2012	ER-KO Elektrik Ltd. ti.	Otomasyon Müh.
2012-2013	Toprak İnşaat Ltd. ti.	Yönetici
2015-2017	Emit Elektromekanik A.Ş.	antiye efi

### UZMANLIK ALANI

Endüstriyel Tesislerin Elektrik ve Otomasyon Sistemleri

### YABANCI DİLLER

İngilizce

### YAYINLAR

Akdemir B. and Reisoglu B.V, Induction Heating Application for Glow Plugs to Obtain Flexible Heating Capability, International Conference on Engineering Research & Applications, Istanbul, 2017.