

# ENDÜKSİYON OCAKLARI

## GİRİŞ

Endüksiyonla ısıtma, metalik iş parçalarını belirtilen sıcaklık ve sürelerde ısıtmakta kullanılan temassız bir ısıtma yöntemidir. Denetim kolaylığı, yüksek verimliliği, madde kayıplarının son derece düşük olması tam otomatik üretime uygunluğu ve çevre kirliliği yaratmaması gibi nedenlerden dolayı endüksiyonla ısıtma, ergitme ve sertleştirme günümüzde giderek yaygın bir kullanım kazanmaktadır.

Endüksiyonla ısıtma sistemleri, düşük frekanslar ( $f < 1\text{kHz}$ ), orta frekanslar ( $1\text{kHz} < f < 100\text{kHz}$ ) ve yüksek frekanslar ( $f > 100\text{kHz}$ )'a göre sınıflandırılan ve en düşük frekanslar için, 100MW'tan başlayıp en yüksek frekanslar için, 5kW'a kadar malzemelerin ısıtılması, eritilmesi, işlenmesi ve birleştirilmesi için ucuz, verimli ve hızlı bir ısıtma metodu olarak geniş çıkış güç aralığında yaygın olarak kullanılmaktadır. Şebeke frekansı gibi düşük frekanslar, büyük çalışma parçalarının endüksiyonla eritilmesinde kullanılabilir. Birkaç yüz kHz'e kadar olan yüksek frekanslar ise malzemeleri sertleştirmek, tavlamak, şekillendirmek ve birleştirmek için kullanılır[1,2].

Herhangi bir iletken malzeme bir alternatif akım devresinin yanına getirildiğinde, kısmen de olsa ısınabilir. Endüksiyonla ısıtma prensibinde alternatif akımın geçeceği bobin ısıtılacak parçanın etrafını sarmakta , fakat parçaya temas etmemektedir. Bobin içinden geçen alternatif akımın yarattığı manyetik alan içindeki veya yakınındaki metal parçalardan devresini tamamlamaktadır. Akımın yön ve değerindeki değişiklik, manyetik alanda da aynı değişikliği yaratır. Manyetik alandaki değişiklik, parça içinde bir gerilim doğurur. Bu gerilim, parça içinden büyük değerde fukolt akımı dolaştırır. Parça direncinden geçen bu akım parça içinde ısı yaratır. Isıyı endüksiyon akımı meydana getirdiğinden, bu işleme endüksiyonla ısıtma denir.

## ENDÜKSİYON OCAKLARININ TARİHÇESİ

Endüksiyonla ısıtmanın dayandığı temel prensip, teorik düzeyde Faraday (1791 – 1867) zamanında biliniyordu. Ancak bu devrede endüksiyonla ısıtma için yeterli güç kaynaklarının bulunmaması nedeniyle teorik prensiplerin uygulamaya geçmesi mümkün olmadı.

Endüksiyon ocakları ile ilgili ilk patent 1897'de İngiltere'de Ferranti tarafından alındı. Bulunan bu ocak tipine, metal bobinin dışına konduğu için “ halka” veya “nüveli” ocak adı verildi. Ticari ilk uygulama ise 1900 yılında İsveç'te Gysimge'de Kjellin tarafından kurulan 80 kg kapasite ve 73 kW güçlü çelik ergitme ocağı oldu.

Daha sonraları 1906'da Essen (Almanya)'da Röchling Roden hauser ocağı geliştirdi . Bu ocağın en önemli özelliği 750 kW'lık bir güç ve 5 Hz frekans ile çalıştırılmasıydı. Güç faktörünün daha iyi olacağı umularak bu ocakta frekans çok düşük tutulmuştur.

Endüksiyon ocaklarının bu devirdeki en büyük problemi özel, pahalı ve bakım güçlükleri fazla olan jeneratörlere ihtiyaç gösteren frekans düşüklüğü olmasıdır. Nitekim 1900-1910 yılları arasında metalin karbon almasını engelleyen curuf örtüsü altında çalıştırılan ilk Heroult tipi ocaklarının piyasaya çıkarılması ile bu endüksiyon ocakları bütün özelliklerini kaybederek terkedilmiştir.

1916' da Ajax Metel Company' den Dr.G.H.Clamer, Leeds and Northrup'tan elektrik enerjisi ile ısı enerjisi elde edilmesi konusunda temel prensiplerle herhangi bir yanlılığın bulunup, bulunmadığının araştırılmasını istedi. Dr. Northrup bu konudaki çalışmaları sonunda ümit verici olarak görünen tek yöntemin yüksek frekanslı indüklenmiş akımlarla ısıtma yöntemi olduğunu belirtiyordu.

O dönemde şebeke frekansında daha yüksek bir frekans ile çalışmada karşılaşılan en büyük sorun kompanzasyon kondansatörlerinin yarattığı sorunlardır. General Electric Company' nin kağıt kondansatör üretimi ile bu sorun da çözümlenmiş ve şebeke frekansının üzerinde çalışma imkanları artmıştır

İlk orta frekans ergitme ocağı 1927 yılında Sheffield' da Electric Furnace Company ( EFCO ) tarafından gerçekleştirilmiş, bu tarihten sonra paslanmaz çelik üretimi ve özel alaşım hazırlanmasında kullanımı yaygınlaşmaya başlamıştır.

Ergitme ocaklarında karıştırma özelliği dolayısıyla düzgün bir metal ve ısı dağılımı, alaşım kayıplarının azlığı, sıcaklık ve bileşim kontrolünün çok iyi olması, işlem görece malzeme özelliklerinin sınırlı olmaması, istenildiği zaman kısa süre içerisinde soğuktan işleme alınabilmesi hava kirliliği probleminin olmayışı endüksiyon ergitme ocakları kullanımının yaygınlaşmasında temel faktörlerdir.

Endüksiyon ocaklarının çelik ergitimi en hızlı gelişme gösterdiği konu paslanmaz çelik üretimi ve çelik dökümhanelerindeki uygulamaları oldu. Karbon kayıp veya kazanımının bulunmaması, hurdayı seri olarak ergitebilmesi, krom ve diğer alaşım elementlerindeki oksitlenme, kayıplarının düşüklüğü nedeni ile bu ocaklar paslanmaz çeliklerin üretiminde kolaylıkla uygulanabilmiştir.

İkinci dünya savaşından sonra otomotiv endüstrisinin gelişimi elektromanyetik endüksiyon ile ısıtma işlemin önemini arttırmış, daha değişik uygulamaları için çalışmalar hızlandırılmış ve yüzey sertleştirme işlemleri için radyo frekansında ısıtıcılar geliştirilmiştir. Dalma etkisi dolayısıyla kontrol edilebilir işlem derinliği, kayıpların diğer sistemlere göre az oluşu, bantta seri üretim için uygulama kolaylıkları, yüzey sertleştirme işlemlerinde elektromanyetik endüksiyon ile ısıtma yönteminin kullanımını yaygınlaştırmıştır.

Endüksiyon ısıtıcılarının ilk kullanılmaya başlandığı dönemlerde ilk yatırım maliyetlerinin diğer sistemlere göre yüksek olduğu bir gerçektir. Özellikle orta frekans ısıtıcılar ( motor-alternatör grupları) hem ilk yatırım, hem de periyodik bakım giderleri açısından pahalı bir sistem oluşturmaktadır. 1966 yılından itibaren yarıiletken güç sistemlerinin geliştirilmesi ile endüksiyon ısıtımında yeni bir devir başladı. Bu devrede son zamanlarda kaydedilen en önemli gelişme değişen frekanslı (VSP) endüksiyon ocakları olmuştur. Yarıiletken teknolojinin gelişimi ile bu ekonomi sorunu önemini kaybetmiş ve bu alandaki çalışmaları günümüzde oldukça yaygınlaşmasını sağlamıştır.[9]

## **ELEKTRİKLE ISITMA SİSTEMLERİNİN TÜRLERİ**

Elektrik enerjisinin diğer enerji türlerine kolay çevrilmesi, üretimin kolay olması özellikle de tüketiminde diğer fosil kaynaklı yakıtlar gibi çevreye zarar vermemesi, kontrollü bir düzen olması ve çok çeşitli kaynaklardan elde edilebilmesi üstünlükleridir.

Elektrikle ısıtma sistemleri çeşitli şekillerde yapılmaktadır. Bunlar:

- Rezistans ile Isıtma
- İletim ile Isıtma
- Enfraruj Radyasyon ile Isıtma
- İndüksiyon ile Isıtma
- Dielektrik Histerezis ile Isıtma
- Plazma ile Isıtma
- Elektrik Arkı ile Isıtma
- Elektron Demeti ile Isıtma
- Lazer ile Isıtma

Bu sistemlerden en yaygın olarak kullanılan rezistans ile ısıtmadır. Bu sistem Joule Kanunu'ndaki rezistans akımı ile gerilim arasındaki bağıntıya dayanmaktadır.[7]

## ENDÜKSİYON OCAKLARININ ÜSTÜNLÜKLERİ

Endüksiyonla ısıtmanın aşağıdaki üstünlüklerinden dolayı bu yöntem, metal endüstrisinde çok geniş kullanım alanı bulmuştur.

- Metallerin çabuk ısıtılmasından dolayı oksidasyon ve kabuklaşma olmaz.
- Bütün parça parça yerine parçanın sınırlı bir yeri veya yüzeyi ısıtılabilir.
- Fırın sıcaklığının devamlı kontrolüne lüzum kalmadan yalnız istendiği zaman ısıtma gücünü kullanabilir.
- Alaşımları eritme esnasında karıştırma kendi kendine olur.
- Parça yakıt gazları ile kirletilmez.
- İşçiler için akaryakıt veya gaz alevli fırınlardan daha elverişli bir çalışma ortamı bulunur.
- İndüksiyonla ısıtma; eritme, yumuşatma, sertleştirme, sarı kaynağı ve metallerin kaynağı problemlerini kolayca halleder. Ancak bu iş için gerekli bobin teşkili, frekans seçimi ve güç tayini doğru bir şekilde yapılmalıdır. [9]

## ENDÜKSİYON OCAKLARININ ÇALIŞMA PRENSİBİ

Endüksiyonla ısıtmanın temel prensibi elektromanyetik enerjinin ısı enerjisi haline dönüştürülmesine dayanır. Şekil 1'de görüldüğü gibi bir bobine alternatif akım uygulandığında Amper Yasasına göre bobinin etrafında değişken bir manyetik alan oluşur.

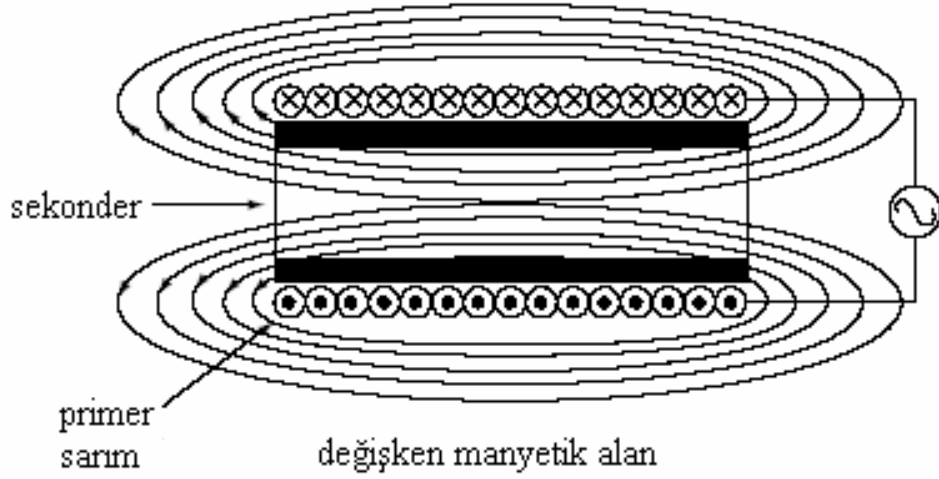
$$\int Hdl = Ni = F$$
$$\Phi = \mu HA$$

**Formül 1**

Bu manyetik alan, Faraday Kanuna göre ısıtılacak parçada bir gerilim indükler. İndüklenen bu gerilim, Lenz Kanuna göre manyetik alan içinde kalan indüksiyon bobini içine yerleştirilmiş olan çalışma parçasında eddy akımlarının geçmesine sebep olur. Sonuç olarak endüksiyon akımı ve eddy akımının oluşturduğu elektrik enerjisi Formül 2'de anlatıldığı şekilde bir ısı enerjisine dönüşür.[7]

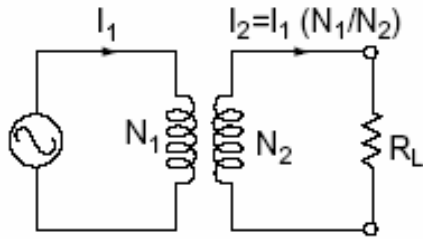
$$P = E^2/R = i^2R$$

**Formül 2**

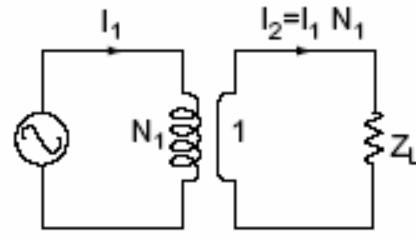


**Şekil 1.** Endüksiyon ile ısıtmanın temel prensibi

Asıl olarak endüksiyonla ısıtmanın temel prensibi transformatöre benzemektedir. Sekonderi tek sarımdan oluşmuş ideal bir transformatör ele alınsın.(Şekil 2) Eğer primer sarım sayısının , sekonder sarım sayısına oranı  $n$  ve primer akımı da  $I_p$ , sekonder akımı  $I_s = n.I_p$  olacaktır. Primer akımına göre hayli yüksek olan bu akım, iş parçasını çevreleyen endüksiyon bobininden geçerken güçlü bir manyetik akım oluşturur. Bu akım da iş parçasına bir gerilim endükleyip akım oluşturur.[7]

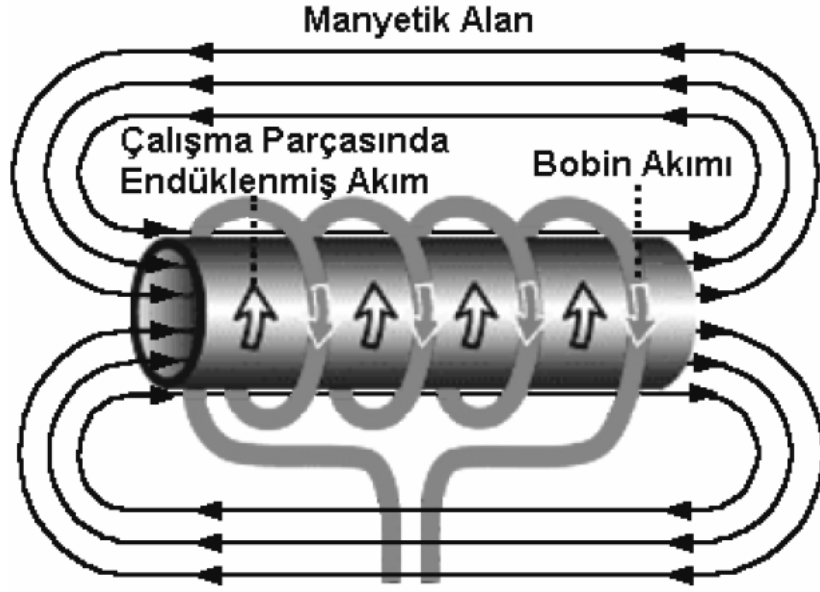


**a)** Standart bir transformatörün eşdeğer devresi



**b)** Sekonderi tek sarımdan oluşmuş transformatör eşdeğer devresi

**Şekil 2.** Transformatör eşdeğer devresi



**Şekil 3.** Endüksiyonla Isıtmada Parça Üzerinde Akım İndüklenmesi

Endüksiyonla ısıtmada, ısıtılacak parçanın her tarafı eşit miktarda ısı almamaktadır. Yalnız ısıtılacak parça ısıyı çok iyi ileten cinsten ise, parçanın her tarafı birbirine yakın miktarda ısıtılabilir. Endüksiyon ısıtma parçanın yüzeyinde çok yüksek, iç kısımlarında az, merkezinde ise daha az bir ısı meydana getirmektedir. Bu ısınma akım kaynağının frekansına ve deri olayına bağlı olarak değişmektedir.

Isının derinlere girmesine ihtiyaç duyulan büyük, kalın parçalar için düşük frekans (5 Khz – 30 Khz); ısının çok derinlere girmesine ihtiyaç duyulmayan küçük parçaların ergitilmesinde ve yüzey sertleştirme işlemlerinde ise daha yüksek frekans (100 Khz – 400 Khz ) kullanılmalıdır. Mikroskobik parçaların ısıtılmasında ise frekans değeri 60 Mhz'e kadar çıkabilmektedir.

Endüksiyonla ısıtmada frekans seçimi ve güç tayini için birçok formül kullanılır. Fakat bu değerlerin tayininde tecrübe ve testler esas teşkil eder. Arzulanan frekans, ısıtılacak olan iletken malzemenin cinsine bağlı değildir.

İndüksiyonla ısıtmanın özelliklerini belli başlı şu noktalarda özetleyebiliriz:

- Belirli bir materyal için ısı derinliği, frekansın karekökü ile ters orantılıdır. Şu halde frekansın çoğalması, parça üzerinde daha ince bir tabakanın ısıtılmasını sağlamış olur.
- Belirli akı yoğunluğu, frekans ve direnç için birim hacme giren ısı, manyetik geçirgenliğin ( $\mu$ ) karekökü ile orantılıdır. Bu da demek oluyor ki manyetik malzemeler, manyetik olmayanlardan daha çabuk ısınırlar.

- Belirli akı yoğunluğu ve ısı derinliği için birim hacme giren sıcaklık, dirençle değişir. Yani yüksek dirençli malzemeler daha çabuk ısınır.
- Belirli bir malzeme ve frekans için birim hacme giren sıcaklık akı yoğunluğunun karesi ile orantılıdır. Yani verilen sıcaklık, sarım sayıları ile veya bobin akımı ile veya her ikisiyle birden kontrol edilir.

Yüksek frekansla çalışmanın diğer bir avantajı da, bobinle ısıtılacak parça arasında daha büyük hava aralığı bırakılabilmesidir. Yüksek frekansla bobine daha büyük gerilim uygulanır. Bu yüzden emniyet bakımından bobinle ısıtılacak parça arasında yeterli bir hava aralığı bırakmak gerekir. Yüksek frekansla çalışmada bu durum sakıncasız olarak gerçekleştirilmiş olur. [8,9]

## NÜFUZ DERİNLİĞİ

İletken bir çalışma parçası, bobin içine yerleştirildiğinde manyetik alan, çalışma parçası ve bobin arasındaki hava aralığında kuvvetli; iletken malzeme ise yoğunluğu azalarak nüfuz edecek şekilde dağılmıştır. Deri olayından dolayı indüksiyonlu ısıtmada akımın çoğu, çalışma parçasının yüzeyinden geçer. Çalışma parçasının merkezine doğru akım yoğunluğu üstel olarak azalır ve merkezde akım akışı neredeyse sıfır olur. Bütün akımın malzeme yüzeyinden itibaren yüzeydeki yoğunlukla geçmesi halinde erişebileceği derinliğe Nüfuz Derinliği denir. Isıtma işlemi süresince manyetik parçaların sıcaklığı, Curie sıcaklığına ulaştığında yükün direnci ve endüktansı değişir. (Kalıcı olarak mıknatıslanabilen malzemelerin -ferromanyetler- bu özelliklerini kaybettikleri sıcaklığa Curie sıcaklığı denir. Bu isim, bu malzemelerin manyetik özelliklerinin sıcaklıkla değişimini inceleyen Pierre Curie'nin anısına verilmiştir. Curie sıcaklığı erime sıcaklığıyla aynı değildir. Örneğin, saf demirin Curie sıcaklığı 770°C ama erime sıcaklığı 1535°C.)

Pratikte, çalışma parçası, hem manyetik(demir veya çelik gibi) hem de manyetik olmayan(altın veya alüminyum gibi) malzeme olabilir. Manyetik malzemelerde ek olarak mıknatıslanma kayıpları oluştuğundan bu tip malzemelerin ısıtılması daha kolaydır[4].

İndüksiyonla ısıtmada önemli bir büyüklük olarak malzemenin cinsine, büyüklüğüne ve amaca göre uygun frekansın belirlenmesini sağlayan nüfuz derinliği,  $e^{-1}$  değerine bağlı olarak değişen manyetik alanın büyüklüğüdür ve aşağıdaki formülle ifade edilir[1,5].

$$\delta = 503 \cdot \sqrt{\frac{\rho}{\mu_r \cdot f}}$$

**Formül 3**

Burada;

$\rho$  : Özgül direnç (  $\Omega \cdot \text{mm}^2/\text{m}$  )

$\mu_r$ : Bağlı manyetik geçirgenlik (A/m)

f : Frekans (Hz)

$\delta$  : Nüfuz derinliği ( mm )

Eşitlikten görüleceği gibi frekansın artması deri kalınlığını azaltır. Dolayısıyla akım parçanın en dış yüzeyinde dağılır.

Malzemenin iletkenliği büyük ölçüde sıcaklığa bağlı olduğundan ortalama sıcaklığın alınması gerekir. Aynı şekilde  $\mu_r$  bağlı manyetik geçirgenliği de sıcaklığa bağlıdır.  $\mu_r$  ayrıca demir cinsi malzemelerde alan şiddetine de bağlıdır. Curie noktasının üzerinde demir cinsi malzemeler manyetik özelliklerini kaybettiklerinden  $\mu_r=1$  olur. Karbon yüzdesi az olan karbon çeliklerinde Curie noktası  $768^\circ\text{C}$ ' dir.

Kullanılan frekans ne kadar büyük olursa, Akım Nüfuz Derinliği o kadar küçük olur. Demir cinsi malzemelerde Curie noktasının altındaki hayli küçük olur. Curie noktasının üstünde ise demir olamayan metallere de büyüktür. Isıtmada iyi bir verim sağlayabilmek için ısıtılacak parçanın kalınlığı veya çapı en az akım nüfuz derinliğinin 4 katı olmalıdır. Pratik olarak frekansın seçilmesi bu şart sağlanacak şekilde yapılabilir.

Çalışma parçasında endüklenen akımın genliği, yüzeye olan  $x$  mesafesi Formül 4'teki gibi üstel olarak azalır. [8]

$$I(x) = I_0 \cdot e^{-\frac{\pi}{\delta} x}$$

**Formül 4**

Burada  $I_0$ , yüzeydeki akımdır. Çalışma parçasına geçen ısıtma gücü ise;

$$P = k \cdot I^2 \cdot \sqrt{\mu \cdot \rho \cdot f}$$

**Formül 5**

Burada;

k : sabit;

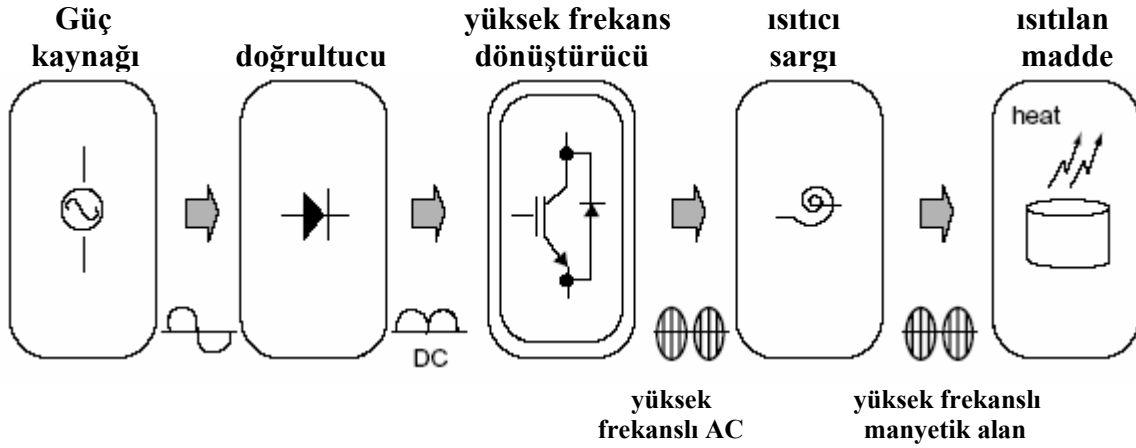
P : ısıtma gücü(W);

I : indüksiyon bobininden geçen akım(A)

## ENDÜKSİYON OCAKLARININ TEMEL DİYAGRAMI

Endüksiyon ocağının basitleştirilmiş diyagramı şekil 4'deki gibidir. İlk olarak güç kaynağından alınan alternatif akım, diyot modülü ile doğru akıma dönüştürülür. Elde edilen doğru akım yüksek frekanslı tetikleme yapan anahtarlama elemanları (IGBT, MOSFET, SCR vb. ) kullanılarak istenilen frekansta alternatif akıma dönüştürülür ve ısıtıcı sargısına

uygulanır. Bunun sonucunda Amper Yasasına uygun olarak ısıtıcı bobinin çevresinde yüksek frekanslı bir manyetik alan oluşur. Eğer oluşan manyetik alanın içerisine iletken bir madde konulursa, Faraday kanuna göre iletken üzerinde bir gerilim endüklenir ve Lenz kanuna göre bir eddy akımı oluşur. Bu eddy akımı da iletken yüzeyinde ısı enerjisi olarak açığa çıkar. [7]



Şekil 4. Endüksiyon ocağının temel diyagramı

## GÜÇ SİSTEMİNİN TOPOLOJİSİ

Genel olarak güç sistemlerinde kullanılan PWM DC-DC konvertörler ve DC-AC inverterlerde yarıiletken anahtarlama elemanları Hard Switch Modunda çalışırlar. Bu modda anahtarlama gerçekleştiğinde belirli gerilim seviyesinde belirli bir akım geçirilir veya kesilir (Şekil 5). Bu proses sonucunda anahtarlama kayıpları oluşur. Anahtarlama kayıpları aşağıdaki formülden faydalanılarak hesaplanır. anahtarlama kayıpları EMI problemine neden olmaktadır. Çünkü proseste yüksek miktarda di/dt ve dv/dt oluşmaktadır.

$$P_{sw} = \frac{1}{2} V_{sw} \cdot I_{sw} \cdot f_s \cdot (t_{on} + t_{off})$$

**Formül 6**

Burada;

$P_{sw}$  : anahtarlama kaybı (W)

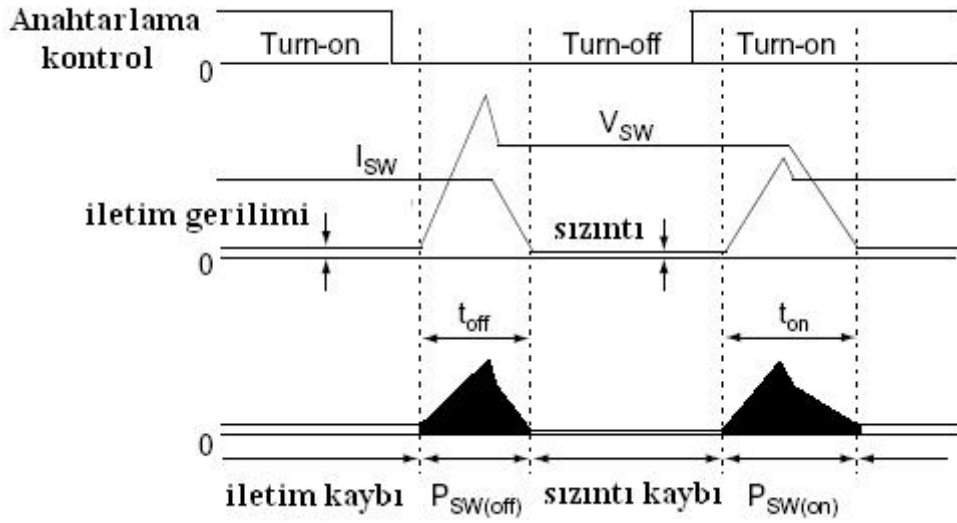
$V_{sw}$  : anahtarlama gerilimi (V)

$I_{sw}$  : anahtarlama akımı (A)

$f_s$  : anahtarlama frekansı (khz)

$t_{on}$  : anahtarlama açma zamanı (s)

$t_{off}$  : anahtarlama kapama zamanı (s)



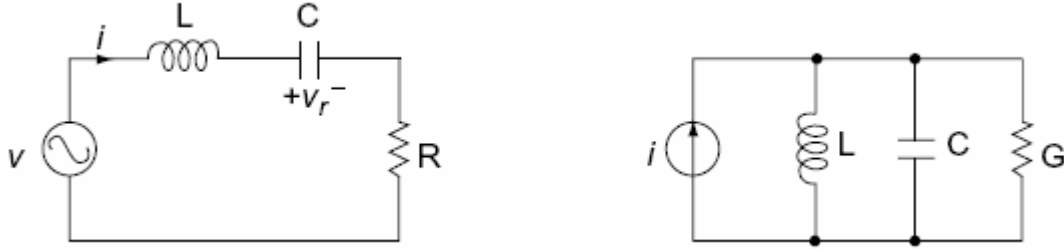
**Şekil 5.** Anahtarlama elemanın dalgı şekli

Anahtarlama frekansını yükselterek transformatör ve filtre boyutları küçültülebilir, bu da yüksek güçlü ama küçük ve hafif bir konvertör yapılmasını sağlar. Fakat daha önce de belirtildiği gibi anahtarlama kayıpları, sistemdeki güç çevirim verimini düşürür. Anahtarlama devresine paralel bağlanan basit bir snubber devresi ile anahtarlama kayıpları kısmen engellenebilir. Bununla birlikte sistemde oluşan anahtarlama kayıplarının toplam miktarı aynı kalır. Gerçekte engellenen kayıplar snubber devresine taşınır.

Yüksek anahtarlama frekansında yüksek enerji çevrim verimi, gerilim veya akımın elde edilebilir. Bu da yumuşak anahtarlama (soft switching) olarak adlandırılır ve iki alt kategoriye ayrılır: sıfır-gerilim anahtarlama ve sıfır-akım anahtarlama. Sıfır-gerilim anahtarlama, iletme geçme anından hemen önce anahtarlama devresindeki gerilimi sıfıra indirerek iletme geçmedeki anahtarlama kayıplarını engellemeyi amaçlar. Sıfır-akım anahtarlama ise kesime gitme anından hemen önce anahtarlama devresinden akım geçmesini engelleyerek kesime gitmedeki anahtarlama kayıplarını engeller. Anahtarlama devresini yöneten akım veya gerilim, bir L-C rezonans devresi tarafından oluşturulan rezonans tarafından sıfırlanabilir. Bu topoloji rezonans dönüştürücü olarak adlandırılır. Rezonans dönüştürücü, anahtarlama kayıplarını minimize ederek enerji dönüşümündeki verimin yükselmesini sağlar ve endüstrinin çeşitli dallarında çok geniş kullanım alanlarına sahiptir. [7]

## REZONANS DÖNÜŞTÜRÜCÜ

Bir indüksiyonlu ısıtma sisteminin yükü, gerçekte ısıtılacak parçanın yerleştirildiği bir endüksiyon bobinidir. İndüksiyon bobini endüktiftir ve yük bobin endüktansı ile seri veya paralel bir eşdeğer direnç ile gösterilir. Bobinin direkt beslenmesi, görünür gücün aktif güce göre oranının çok yüksek olması ile sonuçlanır. Bu nedenle ısıtma bobininin kompanze edilmesi gerekir. Bobin endüktansından dolayı oluşan düşük güç faktörünü kompanze etmek ve bobin endüktansına sinüsoidal akım sağlamak için bir rezonans kondansatörü bobine seri veya paralel bağlanır. İlk durumda, seri endüktanstan dolayı yük, bir akım kaynağı gibi davranır ve bu nedenle bobin, bir gerilim kaynağı tarafından (gerilim beslemeli inverter) beslenmelidir. İkinci durumda yük, bir paralel rezonans devresidir ve paralel bağlı kondansatörden dolayı bir gerilim kaynağı gibi davranır. Bu nedenle yük, bir akım kaynağı tarafından (akım beslemeli inverter) beslenmelidir. Tablo 1’de bu iki tip rezonans devresi kullanılarak yapılan inverterlerin karşılaştırılması görülmektedir. [3]



a) Gerilim beslemeli seri rezonans inverter

b) Akım beslemeli paralel rezonans inverter

Şekil 6. Rezonans devresi

	SERİ REZONANS İNVERTER	PARALEL REZONANS İNVERTER
Avantajları	Basit bir yapıya sahip ve daha ucuz olması	Yüksüz çalışması mümkün
	Güç faktörünün birim kontrolünün daha basit olması	Çalışma bobininde kısa devre mümkün
	Kontrolsüz doğrultucular ile beslenmesi	Yüksek gerilim kondansatörleri gereklidir
		Transistörler sadece aktif akımı iletir.
Dezavantajları	Yüksüz çalışması sadece karmaşık bir kontrol ile mümkündür	Kontrolü daha karmaşıktır
	Kısa devre kabiliyeti yok	Bir kısıyıcı veya kontrollü doğrultucu ile beslenir.
	Değişken frekansla yapılan güç kontrolü bazı uygulamalarda probleme neden olur	Boyutu daha büyüktür.
	Transistörler endüktör akımının tümünü iletme zorundadır.	Girişinde filtre olarak bir şok bobinine ihtiyaç vardır.

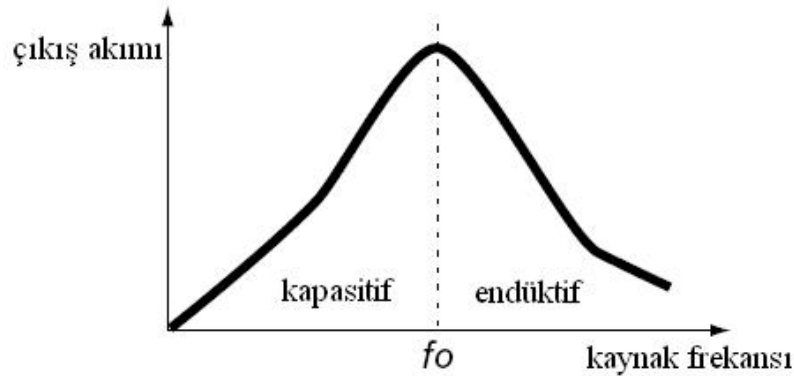
**Tablo 1.** Seri ve Paralel İnverterlerin Karşılaştırılması

Rezonans frekansı enerji transferinin hızını belirler. Değeri kapasitans ve endüktansa bağlıdır, aşağıdaki formül ile hesaplanır:

$$2\pi fL = \frac{1}{2\pi fC} \Rightarrow f_0 = \frac{1}{2\pi\sqrt{LC}} [\text{Hz}]$$

**Formül 7**

Kaynak frekans, rezonans frekansına eşdeğer olduğunda devreden geçen akım tepe değerine ulaşır. Kaynak frekans, rezonans frekanstan yüksek veya alçak olduğunda ise devreden geçen akım azalır.



**Şekil 7.** Frekans Eğrisi

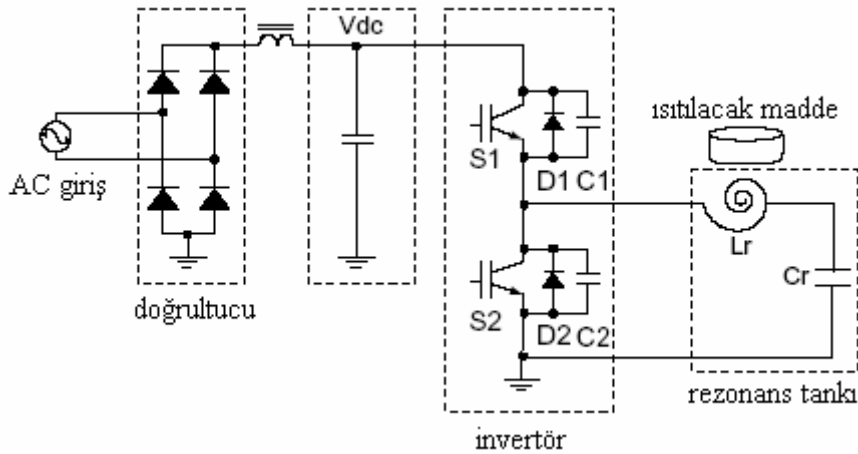
## ENDÜKSİYON OCAKLARININ GÜÇ DEVRELERİ

Endüksiyon ocaklarının güç sistemleri çeşitli şekillerde yapılabilmektedir. Burada tam köprü dönüştürücülü paralel rezonans devreli endüksiyon ocağı ve quasi-rezonans dönüştürücülü paralel rezonans devreli endüksiyon ocağına yer verilmekte olup yarım köprü dönüştürücülü seri rezonans devreli endüksiyon ocağının güç devresi açıklanacaktır.

### YARIM KÖPRÜ DÖNÜŞTÜRÜCÜLÜ SERİ REZONANS DEVRELİ ENDÜKSİYON OCAĞI

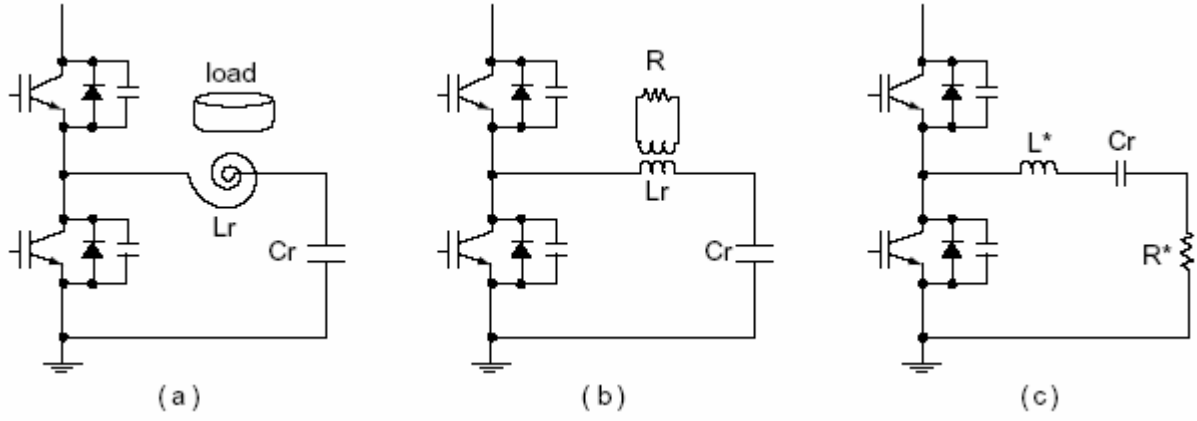
Yarım köprü dönüştürücülü seri rezonans devreli endüksiyon ocağının üstünlükleri: stabil anahtarlama, düşük maliyet, modern dizayndır. Devre gerilim giriş geriliminin üzerine çıkamıyor olması ve anahtarlama devresinin iç basıncının düşük olması maliyetin düşük olmasına etkindir. Dezavantajı ise: yarım köprü dönüştürücü için iki anahtarlama devresine ihtiyaç duyulmaktadır bu da sistemin karmaşıklaşmasına ve devrenin büyümesine yol açmaktadır.

Yarım köprü dönüştürücülü seri rezonans devreli endüksiyon ocağının güç devresi şekil 8’te görüldüğü gibidir.



**Şekil 8.** Yarım köprü dönüştürücülü seri rezonans devreli endüksiyon ocağının güç devresi

Bu sistemin rezonans devresinin eşdeğer devresi şekil 9’ da görülmektedir. Yükleme esnasında (b) devresi (a) devresinin eşdeğeridir. Burada transformatörün sekonder direnci devreye dahil olmaktadır. Bu devre basitleştirildiğinde  $R^*$ ,  $L^*$  ve  $C_r$ ’nin direk bağlı olduğu (c) eşdeğer devresi ortaya çıkmaktadır.  $R^*$  direnci sekonder tarafındaki direncin primer tarafına dönüştürülmüş halini göstermektedir.  $L^*$  ise primer sargı endüktörü ( $L_r$ ) ile sekonder indüktörünün birleştirilmiş halini göstermektedir.

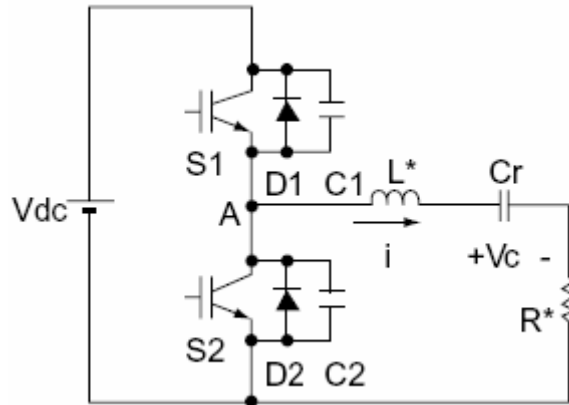


Şekil 9. Rezonans eşdeğer devreleri

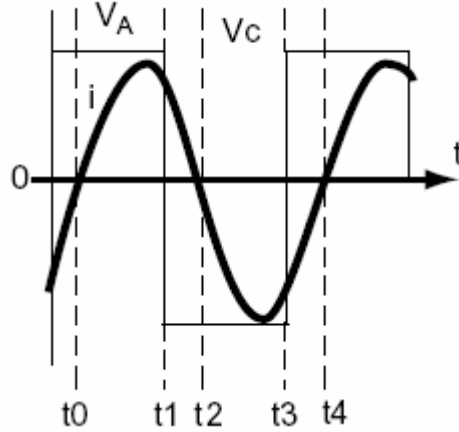
### ÇALIŞMA TEORİSİ

S1 ve S2 den oluşan anahtarlama devresine paralel D1 ve D2 diyotları eklenerek akım kaybı minimize edilmiştir. S1 kesime gittiğinde, D2 diyotu S2'nin ilettime geçmeden önce sıfır gerilim/akımda kalmasını sağlayarak akım kaybında önemli bir azalma sağlamaktadır. Aynı durum S1 için de söz konusudur. Burada diyot kesime gittikten sonra, gerilim her iki tarafta da sıfır olduğunda geri dönme-toparlanma problemi olmamaktadır. Bununla birlikte anahtarlama devresi, gerilim ve akımın üst limit seviyesinde kesime gittiğinde bir miktar anahtarlama kaybı gerçekleşir. S1 ve S2'ye paralel bağlanan C1 ve C2 kapasitörleri turn-off snubberi olarak görev yaparlar ve bu kaybı minimuma indirirler. İletime geçmede anahtarlama çevrimi sıfır gerilim/akımdan başlar bu yüzden bu turn-off snubberları kayıpsız turn-off snubberi olarak çalışırlar.

Yarım köprü seri rezonans dönüştürücü konfigürasyonunun (Şekil 5) Basitleştirilmiş eş değer devresi şekil 10'da görüldüğü gibidir. Şekil 11 ana güç çevriminin her bölümdeki frekans dalga şeklini göstermektedir. [7]



Şekil 10. Yarım dalga dönüştürücülü seri rezonans devreli endüksiyon ocağının güç devresinin eşdeğeri



Şekil 11. Temel güç çevriminin dalga şekli

#### MODE I: t0-t1

Rezonans akımı,  $t=t_0$  anında yön değiştirerek S1 üzerinden ters yönde akar. Bu modda DC-LINK gerilimi  $V_{dc}$ , rezonans devresinin S1 üzerinden aldığı gücü üzerinde depo etmesine olanak sağlar.

#### MODE II: t1-t2

$t = t_1$  anında S1 kesime gider ve S1 üzerinden sağlanan rezonans akımı D2 diyotu üzerinden serbest çevrim (freewheeling) yapmaya başlar. Bu proste S1 anahtarı gerilim ve akımın bazı değerlerini tutarak kesime gittiğinde küçük bir miktar anahtarlama kaybı gerçekleşir. Bir sonraki moda  $t_1 < t < t_2$  anında S2 iletme geçer. S2 anahtarı sıfır gerilim/akımda olduğunda iletme geçme esnasında anahtarlama kaybı olmayacaktır ve ters toparlanma diyotu D1 çok hızlı olmak zorunda değildir. S1'in kesime gitmesinden sonra, D2 serbest çevrim yapmadan önce kısa bir süre rezonans akımı snubber C1 üzerinden geçer.

#### MODE III: t2-t3

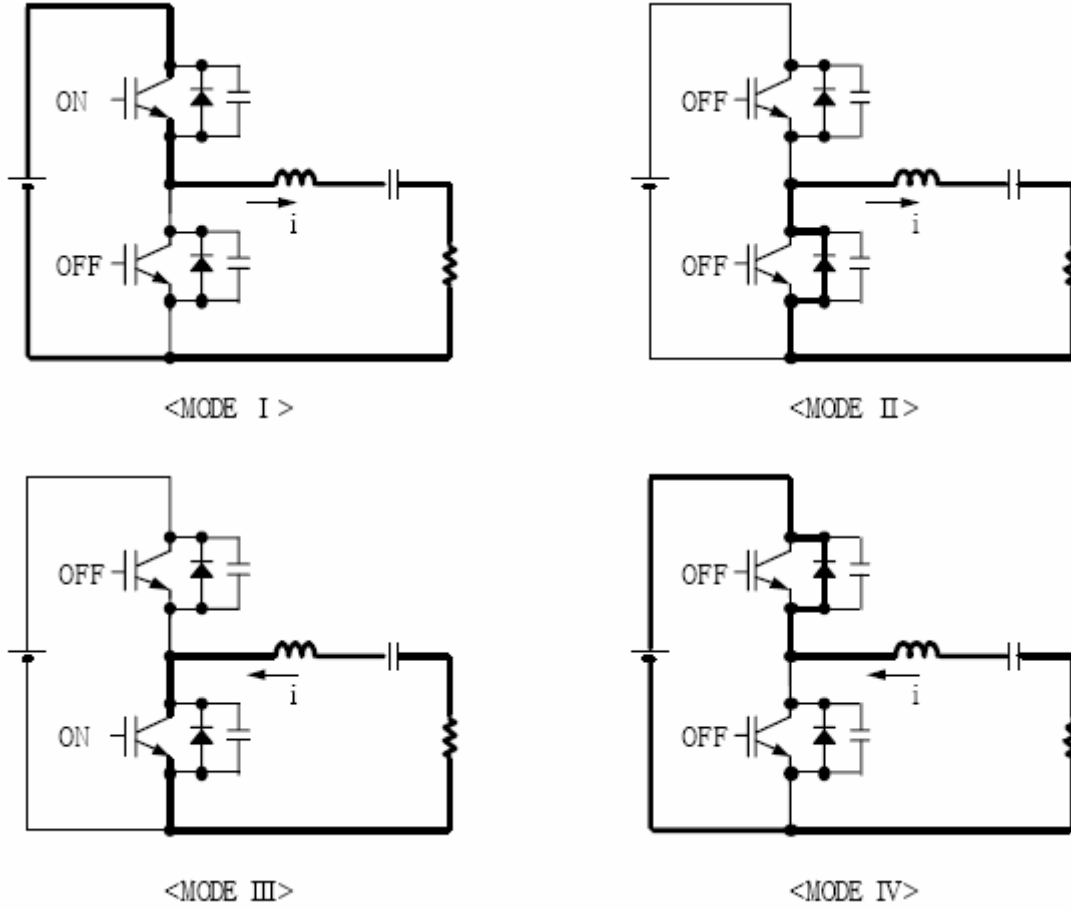
$t = t_2$  anında S2 anahtarı iletme geçer ve akım yön değiştirerek serbestçe S2 üzerinden akar. Burada rezonans kapasitörü  $C_r$  bir gerilim kaynağı görevi görür.

#### MODE IV: t3-t4

$t = t_3$  anında S2 kesime gider ve S1 üzerinden sağlanan rezonans akımı D1 diyotu üzerinden serbest çevrim (freewheeling) yapmaya başlar. Bir sonraki modda S1 anahtarı belirli bir noktada ( $t_3 < t < t_4$ ) iletme geçer. Burada, S1'in iletme geçme anında sıfır gerilim/akımda anahtarlama kaybı yoktur ve ters toparlanma diyodu D2 çok hızlı olmak zorunda değildir.

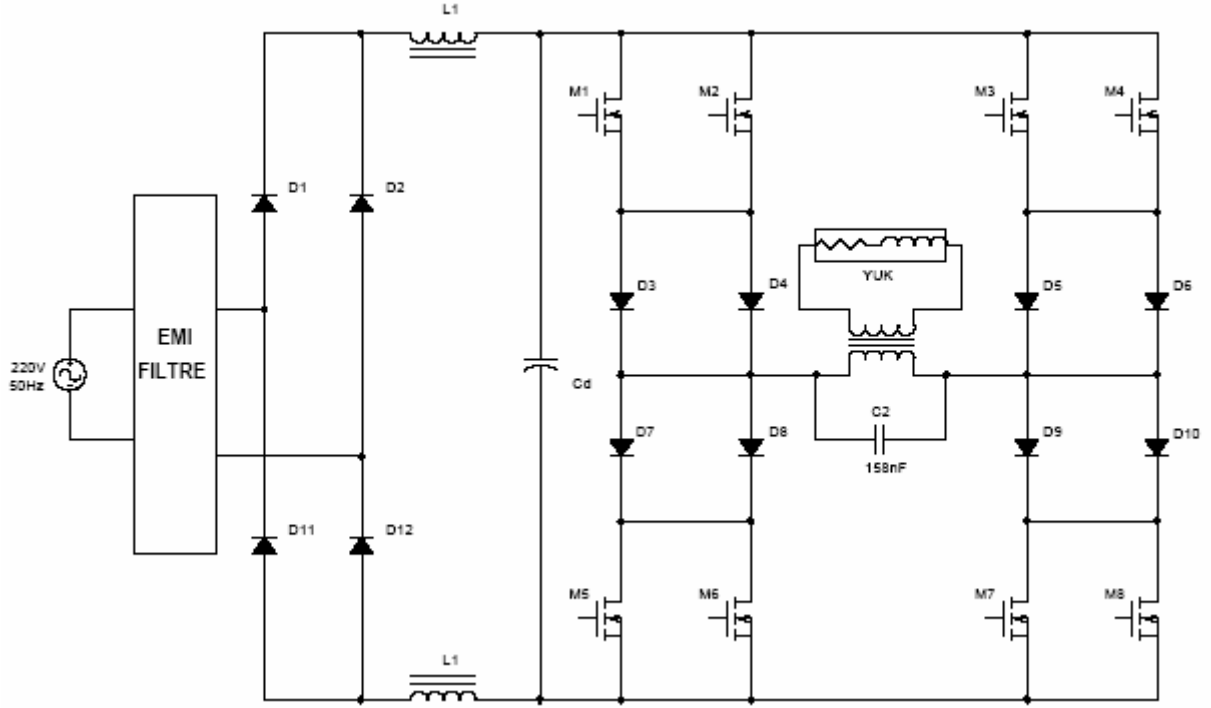
Bu modda rezonans devresinin enerjisi D1'den geçerek Vdc'ye dönüştürülür. Ayrıca bu süreçte, D1 serbest çevrim yapmadan önce kısa bir süre rezonans akımı snubber C2 üzerinden geçer.

Operasyon t4'ten sonra yukarıdaki prosesleri tekrarlayarak devam eder. [7]



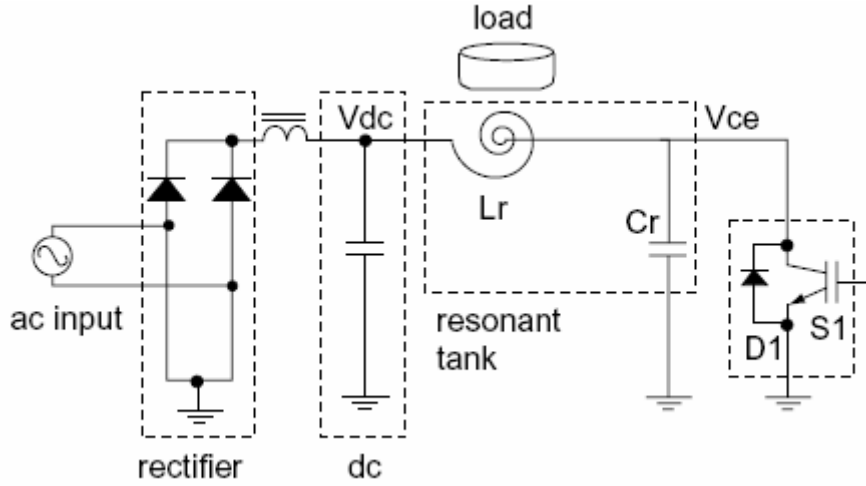
Şekil 12. Yarım köprü dönüştürücülü seri rezonans devreli endüksiyon ocağının güç devresinin çalışması

## TAM KÖPRÜ DÖNÜŞTÜRÜCÜLÜ PARALEL REZONANS DEVRELİ ENDÜKSİYON OCAĞI



Şekil 13. Tam Köprü Dönüştürücülü Paralel Rezonans Devreli Endüksiyon Ocağı

## QUASI-REZONANS DÖNÜŞTÜRÜCÜLÜ PARALEL REZONANS DEVRELİ ENDÜKSİYON OCAĞI



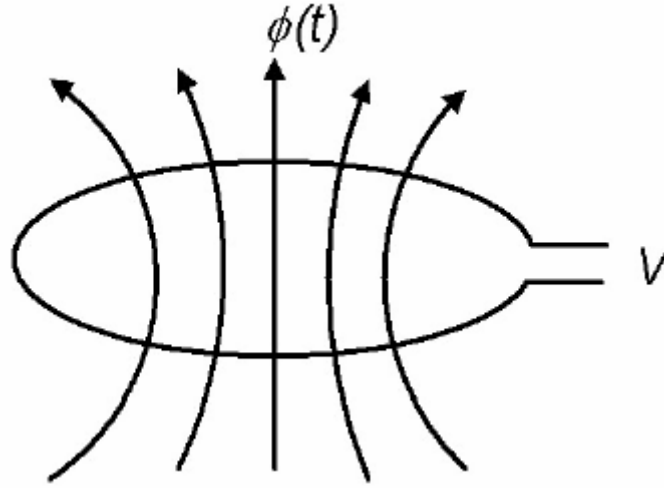
Şekil 14. Quasi-rezonans Dönüştürücülü Paralel Rezonans Devreli Endüksiyon Ocağı

## BOBİN TASARIMI

İndüksiyonla ısıtma için yapılan bobin tasarımları ve bunların gelişimi, basit birçok indüksiyon geometrilerinden, örneğin sarmal bobinden, geniş kapsamlı deneysel verilerden elde edilen bilgiler üzerine kurulmuştur. Bobin tasarımında birçok durum göz önünde bulundurulmalıdır:

1) Bobinden eritilecek malzemeye maksimum enerji transferi için, malzeme bobine olabilecek en yakın mesafede olmalıdır. Isıtılacak alanda bulunan malzemenin içinden maksimum miktarda manyetik akı çizgisinin geçmesi istenir. Malzeme üzerindeki manyetik akı yoğunlaştıkça malzeme içinde üretilen akım o derecede artar.

2) Bir solenoitte akı çizgileri bobinin merkezinde birbirine doğru yaklaşır. Akı çizgilerinin sayısı bobinin içinde yoğunlaşmıştır ve burada maksimum ısınma elde edilir.



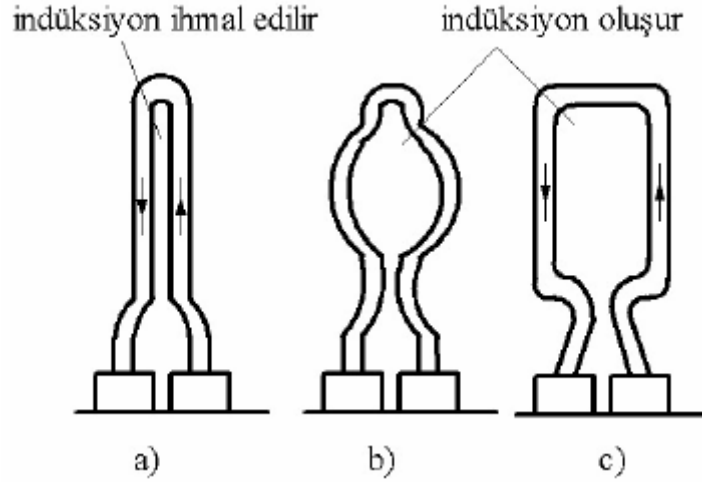
Şekil 15. Magnetik akının zamanla değişimi

3) Akı çizgilerinin sayısının bobin sarmallarına yakın noktalarda yoğunlaşmaları ve iletkenlerden uzaklaştıkça azalmaları nedeniyle bobinin geometrik merkezi yetersiz bir akı bölgesidir. Bu nedenle, manyetik alandan etkilenecek bir parça, bobinin geometrik merkezinin dışına yerleştirilecek olursa, bobin sarmallarına yakın bölgelerde daha çok sayıda akı çizgileriyle kesişir ve malzeme daha yüksek oranda ısınır.

4) Sarmalın bağlantı noktalarında yani bobinlerin kaynak noktalarında manyetik alan diğer bölgelere göre daha zayıftır (kaçak fazladır). Bu nedenle indüktörün manyetik merkezinin aynı zamanda indüktörün geometrik merkezi olması şart değildir. Bu etki en çok tek sarmal bobinlerde görülür. Bobinin sarmal sayısı arttıkça ve her sarmaldaki akı bir önceki sarmaldakine eklendikçe bu durumun önemi azalır. Her zaman bobinin içindeki malzemeyi bobin merkezine koymak kolay olmadığından malzeme bu alandan biraz saptırılmalıdır. Ayrıca malzemenin her yerinde aynı etkiyi oluşturabilmek için eğer uygunsa malzeme bobin içinde döndürülmelidir.

5) Bobin tasarımı, bobin içindeki magnetik akı çizgilerinin sayısının azalmasını engelleyecek şekilde yapılmalıdır. Şekil 16a daki kangalın endüktansı neredeyse yoktur.

Çünkü endüktörün içinden geçen akımlar yanı endüktörün ters tarafları birbirine çok yakındır. Şekil 16b ve Şekil 16c deki endüktörlerin endüktansı olacak ve bu halkalara yeni halkalar eklemekle, endüktans değerinde bir artış sağlanmış olacaktır. Endüktansı olan bu kangalların içine konulan manyetik özellikleri olan bir malzeme ısınacaktır. Şekil 1.4b ve Şekil1.4c deki tasarım, endüktansı olan ve iyi bir bobin tasarımını gösterir.



**Şekil 16** a) endüktansı olmayan b), c) endüktansı olan bobin tasarımları

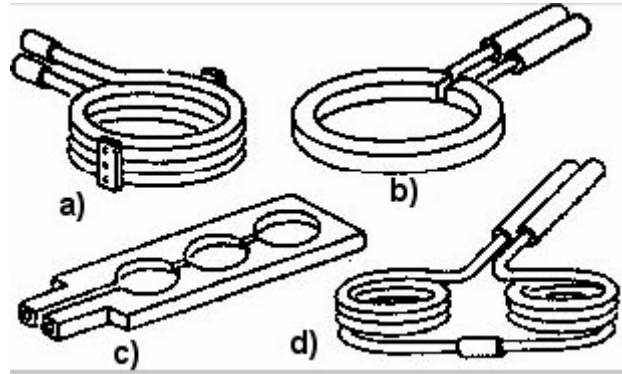
DeneySEL verilere dayanan yukarıdaki şekillerden ve açıklamalardan bazı bobinlerle, ısıtılacak yüzeyde manyetik akı yoğunlaştırılabilmekte ve güç yani ısı yükü daha kolay bir şekilde aktarılmaktadır. Örneğin, malzemeyi ısıtmak için kullanılacak bobinler aşağıdaki gibi üç şekilde olabilir:

- Parça yada ısıtılacak alanın, bobinin içinde olması durumunda, yani manyetik akının en yüksek olduğu sarmal solenoitler.
- Sadece bir yüzeye gelen akı ile ısıtmanın yapılabileceği pankek tipi bobinler.
- Sadece bobinin dışındaki akıdan yararlanarak oyukların ısıtmasında kullanılan iç bobinleri. [6]

## **ORTA -YÜKSEK FREKANS**

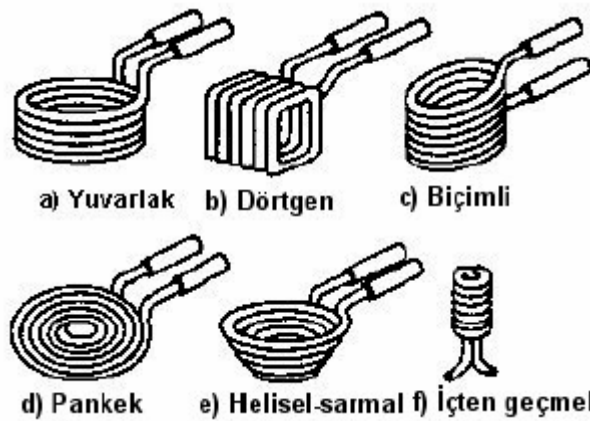
Basit solenoit bobinler genellikle ısıl işlem gibi orta-yüksek frekanslı operasyonlarda güvenlidir. Bunlar tek ya da çok dönüslü tipleri içerir. Şekil 17, solenoit tasarıma dayanan birkaç yaygın tipi gösterir. Şekil 17a çok sarımlı tek-potalı bobinleri gösterir. Bobinlerin bu şekilde adlandırılmasının nedeni genellikle aynı anda anda tek parçanın ısıtılması için bobinlerin kullanılmasındandır. Şekil 17b de tek sarımlı tek potalı bobin, Şekil 17c de ise tek

sarımlı çok potalı bobin gösterilmektedir. Bu tasarımda tek sarım, her ısıtma potasında çalışma parçasıyla kesişir. Şekil 17d çok sarımlı çok potalı bobini gösterir.



**Şekil 17** Tipik indüksiyon bobinleri: a) çoklu sarım, tek pota b) tek sarım, tek pota, c) tek sarım, çoklu pota d) çoklu sarım çok pota

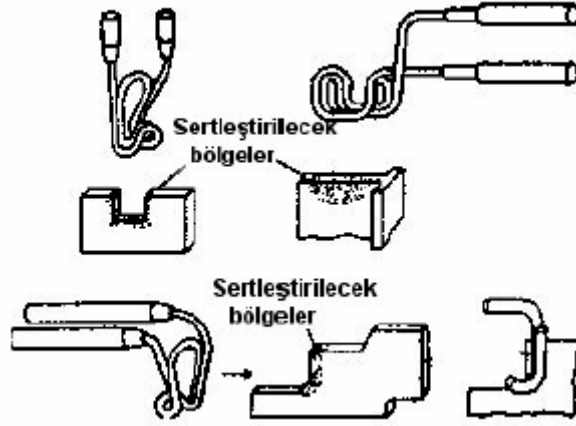
Nadiren orta-yüksek frekans uygulamaları ısı tekdüzeliğini sağlamak için ayarlanmış kuplajlı kontür ya da özellikle ayarlanmış bobinlere ihtiyaç duyar. En basit durumlarda, bobinler bükülür ya da bobinlere parçanın konturuna göre form verilir. (Şekil 18). Bunlar yuvarlak (Şekil 18a), dikdörtgen (Şekil 18b) olabilir ya da kam bobini gibi özel şekillere ulaşmak için şekillendirilir (Şekil 18c). Pankek bobinleri (Şekil 18d) genellikle, sadece bir taraftan ısıtma gerekli iken ya da parçayı çevrelemenin imkansız olduğu durumlarda kullanılır. Spiral bobinler (şekil 18e) konik dişlileri yada gittikçe incelen cisimleri ısıtmak için kullanılır. İç oyukları, çok sarımlı indüktörlerle bazı durumlarda ısıtılabilirler (şekil 18f). Pankek ve iç bobinleri dışında ısınmış parçalar her zaman akı alanının merkezindedir.



**Şekil 18** Değişik şekilli ısıtma amaçlı çok sarımlı bobinler: a) yuvarlak, b) Dörtgen, c) Biçimli, d) pankek, e) Helisel-sarmal, f) içten geçmeli

Parça konturunu önemsemeyen, en verimli bobinler standart yuvarlak bobinlerin değiştirilmiş modifikasyonlarıdır. Konveyör veya kanal bobini, uçları parçanın sürekli

geçişini sağlamak için “köprüler” oluşturmak üzere bükülmüş bir dikdörtgen olarak düşünülebilir. Parçalar bununla birlikte her zaman akının yoğunlaştığı kanalların içinde kalırlar. Şekil 19 sertleştirilecek alanların, bobin sarımlarının merkezi civarında, yani akının en yoğun olduğu yerlerde bulunduğu, benzer durumları gösterir. [6]

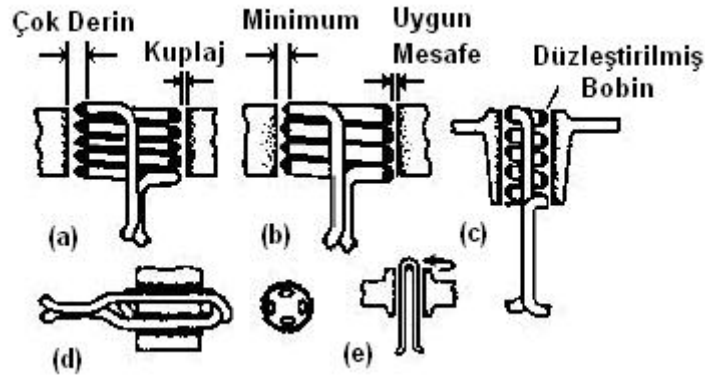


Şekil 19 Bölgesel ısıtma için değişik şekilli bobinler

## İÇTEN GEÇMELİ BOBİNLER

Sertleştirmek, tavlama ya da yerleştirme için oyuk içlerinin ısıtılması karşılaşılan en önemli problemlerden biridir. Tüm pratik amaçlar için 450 KkHz güç kaynağıyla ısıtılabilcek en küçük oyukun iç çapı 1.1 cm dir. 10 kHz de pratik en küçük iç çapı 2.5 cm dir.

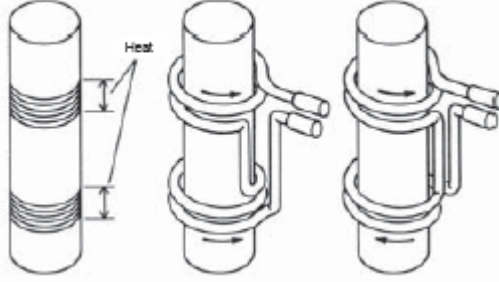
İç bobinleri için borulama yapılabilecek en ince kalınlıkta olmalıdır ve oyuk bobinin uygun olan en yakın yüzeyine yerleştirilmelidir. Şekil 20a da kuplaj uzaklığı çok büyüktür, Şekil 20b de ise bobin modifikasyonu ile tasarım gelişmiştir. Burada kuplaj uzaklığını azaltmak için bobin borusu düzleştirilmiştir ve bobinden çalışma parçasına kadar olan mesafeyi azaltmak için bobinin dış çapı arttırılmıştır. [6]



Şekil 20 İçten geçmeli iç kısımları ısıtma amaçlı değişik şekilli bobinler

## AKI SAPTIRICILARI

Çalışma parçasının Şekil 21 deki gibi birbirlerine yakın olan iki ayrı bölgesi ısıtılacağı zaman bitişik bobin sarımlarının manyetik alanları tüm çubuğun ısınmasına neden olarak örtüşür. Bu sorunu engellemek için artarda gelen sarımlar birbirlerine ters yönde döndürülebilir. Bu yolla orta alanlar yok olacak ve kalan alanlar sınırlandırılmış olacaktır. [6]



**Şekil 21.** Sarımların ters yönde döndürülmesi ile bir çalışma parçasının iki bölgesindeki ısıtma şekillerinin kontrol edilmesi

## SONUÇ

Bu çalışmada endüksiyonla ısıtma genel olarak anlatılmıştır. Örnek bir endüksiyonla ısıtma sistemi olarak yarım köprü dönüştürücülü seri rezonans devreli endüksiyon ocağının güç devresi ele alınarak çalışması incelenmiştir.

Denetim kolaylığı, yüksek verimliliği, madde kayıplarının son derece düşük olması tam otomatik üretime uygunluğu ve çevre kirliliği yaratmaması gibi nedenlerden dolayı endüksiyonla ısıtma, ergitme ve sertleştirme günümüzde giderek yaygın bir kullanım kazanmaktadır. Endüksiyonla ısıtmada rezonans devreli inverterler kullanılarak, çeşitli avantajlar sağlanabilir, daha yüksek frekans ve güç değerlerine çıkılabilir. Genelde endüksiyonla ısıtma için kullanılan gücün elde edilmesinde yüksek frekans ve yüksek güç yeteneğine sahip yarıiletken elemanlar gereklidir. Güç elektroniğinin sağladığı olanaklardan yararlanmak sureti ile ekonomik, güvenilir, çok yönlü kontrol ve kumanda imkanı veren bir endüksiyonla ısıtma tesisi gerçekleştirilebilir.

## KAYNAKLAR

- [1] Mohan, N., Undeland, T.M., and Robbins, W.P., Power Electronics; Converters, Applications and Design , 2nd ed. John Wiley, 1995.
- [2] Grajales, L., Analysis and Design of a 500 kHz Resonant Inverter for Induction Heating Applications, UMI No. 9701830, Virginia, 1995.
- [3] Dede, E. J., 25 kW / 200kHz Parallel Resonant Converter for Induction Heating, ETEP, Vol. 2, No. 2, pp.103 – 109, 1992.

[4] Bodur,H., Akkaya, R., Yaman, C., Endüksiyonla Isıtmada Rezonans Devreli İverterler ve Örnek bir Endüksiyonla Isıtma Uygulaması, ELMEKSEM'93 Bursa, pp. 384-391 , 1993.

[5] <http://www.plustherm.ch>.

[6] Zinn S. and Semiatin S.L. “Coil design and fabrication: basic design and modifications” (1988)

[7] “Enduction Heating System Topology Review” Fairchild Semiconductor Inc. (2000)

[8] Akaya R. Anadol M.A. “Akım Beslemeli Paralel Rezonans Devreli İverter İçeren Bir İndüksiyonlu Isıtma Uygulaması” Elektrik -Elektronik - Bilgisayar Mühendisliği 10. Ulusal Kongresi

[9] “Endüksiyonla Isıtma” [www.dokumanlar.com](http://www.dokumanlar.com) (erişim tarihi:27.09.2005)