

29723

YILDIZ ÜNİVERSİTESİ
FEN BİLİMLERİ ENSTİTÜSÜ

ENDÜKSİYON FIRINLARI

YÜKSEK LİSANS TEZİ
Elk. Müh. Asiye TÜRKER

**T.C. YÜKSEKÖĞRETİM KURULU
DOKÜMANTASYON MERKEZİ**

İSTANBUL - 1993

ÖNSÖZ

Bu tezin hazırlanmasında bana yol gösteren Sayın Hocam Doç. Dr. Asım KASAPÖĐLU'na ve yardımcı olan diğer kişilere teşekkür ederim.

Asiye TÜRKER

İÇİNDEKİLER

I	ENDÜKSİYONLA ISITMANIN TARİHSEL GELİŞİMİ.....	1
II	TEMEL PRENSİP VE TANIMLAR.....	4
II.1.	BİLGİLENDİRME.....	4
II.1.1.	Nüveli Fırınlar.....	4
II.1.2.	Potalı Fırınlar.....	5
II.2.	ENDÜKSİYONLA ISITMA TEORİSİ.....	6
II.2.1.	Histerzis Kayıpları.....	9
II.2.2.	Eddy Akımlarının Oluşumu ve Eddy Akımı Kayıpları.....	9
II.2.2.1.	Eddy Akımlarının Oluşumu.....	9
II.2.2.2.	Eddy Akımı Kayıpları.....	11
II.3.	TEMEL TANIMLAR.....	13
II.3.1.	Dalma (Penetrasyon) Derinliği.....	13
II.3.2.	Elektrik Verimlilik.....	15
II.3.3.	Termal Güç.....	16
II.3.4.	Güç Faktörü.....	17
II.3.5.	Endüklermiş Güç.....	18
II.3.6.	Güç Sarfıyatı.....	18
II.3.7.	İşparçası Boyutları.....	20
II.3.8.	Banyo Kanıtırma.....	20
II.3.9.	Külçe Isıtma.....	21
II.3.10.	Yüzey Isıtma.....	22
III.	ENDÜKSİYONLA ISITMA SİSTEMLERİ	
	(Kullanılan Güç Kaynakları).....	24
III.1.	ENDÜKSİYONLA ISITMA SPEKTRUMU.....	24
III.2.	FREKANS SEÇİMİ.....	25
III.2.1.	Şebeke Frekanslı Sistemler ve Frekans Üçleme Sistem.....	29
III.2.1.1.	Şebeke Frekanslı Sistemler (50/60 Hz).....	29
III.2.1.2.	Frekans Üçleme Sistemi.....	36

III.2.2.	Orta Frekanslı Sistemler (500 Hz - 10 kHz).....	37
III.2.2.1.	Motor-Jeneratör Sistemleri (500 Hz - 10 kHz).....	37
III.2.2.2.	Elektronik Sistemler (500 Hz - 50 kHz).....	37
III.2.2.2.1.	Tristörü Sistemler.....	38
III.2.2.2.2.	Diğer Yan İletkenli Sistemler.....	39
III.2.2.3.	Orta Frekansta Çok Kullanılan Fırın Tipleri.....	39
III.2.3.	Yüksek Frekanslı Sistemler (50 kHz ve Üzeri).....	42
IV.	ORTA FREKANS İNVERTER DEVRELERİ ANALİZİ.....	44
IV.1.	GİRİŞ.....	44
IV.2.	DOĞRULTUCU-İNVERTER DEVRESİNİN ANALİZİ.....	48
IV.2.1.	Devrenin Çalışma Şekli.....	48
IV.2.2.	Sürekli Hal Çalışması.....	50
IV.2.3.	Id Akımının Hesaplanması.....	54
IV.2.4.	Isının Etkisi.....	56
IV.2.5.	İnverterin Kalkırması.....	58
IV.2.6.	Devrenin Harmonik Analizi.....	61
V.	ENDÜKSİYON FIRINI BESLEME DEVRESİNİN	
	KARAKTERİSTİKLERİ.....	63
V.1.	İNCELEME.....	63
V.2.	SONUÇ.....	70
VI.	ENDÜKSİYON FIRINI İÇİN BİR GÜÇ VE KONTROL	
	DEVRESİ ANALİZİ.....	72
VI.1.	GÜÇ DEVRESİ ANALİZİ.....	77
VI.2.	KONTROL DEVRESİ ANALİZİ.....	80

EKLER

KAYNAKÇA

ÖZGEÇMİŞ

ÖZET

Elektriğin yaygın olarak kullanılmaya başlanması ve Güç Elektronikindeki gelişmeler; özellikle statik elemanların gelişmesi metal ısıtma ve ergitmede yeni yöntemlerin gelişmesine yolaçtı. Bu yöntemlerin en önemlisi ve gelişmeye en açık olanı Endüksiyonla ısıtma yöntemidir.

Bu tezde öncelikle endüksiyonla ısıtmanın tarihteki gelişimi ve sebepleri anlatıldı. Daha sonra endüksiyonla ısıtma'nın teorisi transformatör eşdeğer devresi ele alınarak pratik biçimde işlendi.

Tez konusu her ne kadar Endüksiyon Fırınları ise de aslında konunun temelini endüksiyon ısıtması oluşturduğu için III. bölümde ısıtma sistemleri tanıtıldı. Pratik olarak kullanılan fırınlar tanıtılıp bağlantı şemaları verildi. Konu fırınlar, eğilimimiz de ergitme olduğu için orta frekans (250 Hz - 10 kHz) üzerinde duruldu.

IV. bölümde orta frekansta kullanılan inverter devreleri ana hatlarıyla kısaca tanıtılıp, bir temel converterin (Doğrultucu ve inverterden oluşan) analizi yapıldı.

V. Bölümde fırın besleme devresinin denge ve güç analizleri incelendi.

Son olarak VI. bölümde endüksiyon fırınları için geliştirilmiş POWER-TRAK yönteminin güç ve kontrol devre şemaları verilerek analizleri yapıldı.

SUMMARY

Initiation of using electricity commonly and the development of power electronics; specially the development of static elements provided new methods of heating and melting metallic substances. The most important and open for development one is heating by induction.

It is discussed in this thesis, the method of heating by induction in the past and its reasons. And then the theory of heating by induction is studied practically by the aid of equivalent circuit of transformer.

At the III. chapter the heating systems are described for the reason of the base of thesis subject is heating by induction; however the subject was induction furnaces.

The furnaces which are used practically is described and their shemes of wiring.

We pointed out is on medium frequency (250 Hz - 10 kHz). because of the subject is furnaces and our bias is on melting.

We analysed at IV. chapter a basic converter (rectifier and inverter together), and the inverter circuits which are used at medium frequencies by mainframe shortly.

At the V. chapter it is discussed the balance and power analyses of furnace power supply circuit.

At the VI. chapter the wiring shemes of power and control circuits of POWER-TRAK method are given and their analyses are done.

I. ENDÜKSİYONLA ISITMANIN TARİHSEL GELİŞİMİ

Endüksiyonla ısıtmanın dayandığı temel prensipler teori düzeyde Faraday (1791-1867) zamanında biliniyordu. Elektromagnetik endüksiyonla ısıtmanın temeli Faraday kanunu olarak anılan elektromagnetik endüksiyon ile başlar. Faraday kanununa göre; bir magnetik devredeki primer (birincil) sargıdan geçirilen değişken akım, kapalı bir sekonder (ikincil) sargıda değişken bir akım oluşturur.

1868 yılında Faucault'un girdap (Eddy ve Faucault) akımları üzerine çalışmaları ve Heavisede'nin 1884 yılında yayımlanan "The Induction of Currents in Cores" makalesi elektromagnetik endüksiyon ile enerji aktarımı konusundaki ilk çalışmaları oluşturmaktadır. Bundan kısa süre sonra Thomson'un çalışmaları ile elektromagnetik endüksiyon ısıl işlem için alternatif bir seçenek haline gelmiştir.

Endüksiyon ısıtma ile ilgili ilk patent 1891'de İngiltere'de Ferranti tarafından alındı. Bulunan bu ocak tipine metal bobin dışta olduğu için "nüveli" olarak dendi. Ticari ilk uygulama ise 1900 yılında İsveç'te Gysinge'de Kjellin tarafından kurulan 30 kg kapasiteli ve 78 KW güçlü çelik ergitme fırını oldu.

Daha sonra 1906'da Essen (Almanya)'de Röchling Rodenhouser ocağı geliştirildi. Bu ocağın en önemli özelliği 750 KW'lık güç ve 5 kHz frekans ile çalıştırılmasıydı. Güç faktörünün iyi olması için frekans küçük tutulmuştu. Bu sıralarda ark ocaklarındaki gelişmeler henüz teorik gelişim sürecinde olan elektromagnetik endüksiyon ile ısıtmanın bir süre daha geri planda kalmasına sebep olmuştur.

Endüksiyon fırınlarının bu devrelerdeki en büyük problemi özel, pahalı ve bakım güçlükleri fazla olan jeneratörlere ihtiyaç gösteren frekans düşüklüğü olmuştur. Nitekim 1906-1910 yılları arasında metalin karbon almasını önleyen cüruf örtüsü altında çalıştırılan ilk Heroult tipi ocakların piyasaya çıkmasıyla bu tip endüksiyon fırınları özelliklerini kaybedip terk edildiler.

Sonraki çalışmalar, genellikle çalışma frekansının yükseltilmesine yöneliktir. 1915 yılında Francesco Spinelli (İtalya)'nın frekans ölçme sistemini geliştirmesiyle ve Ajax Metal Company'den (1916'da) Dr. G.H. Clamer'in, Leeds and Northrup firmasının kurucusu ve Princeton Üniversitesinde fizik profesörü olan Dr. E.F. Northrup'an elektrik enerjisi ile ısı elde edilmesi konusunda temel prensiplerde herhangi bir yanlışlığın bulunup bulunmadığının araştırılmasını istemesiyle olay başka bir boyut kazandı.

Dr. Northrup bu konudaki çalışmaları sonunda "ümitverici olarak görünen tek yöntemin yüksek frekanslı endüklenmiş akımlarla ısıtma yöntemi olduğu"nu belirtiyordu.

Aynı yıl pirinç ergitiminde kullanılan şebeke frekansı ilk endüksiyon ocağı Ajax'dan James Wyatt tarafından geliştirildi. Bu ilk kanallı ocak uygulaması oldu.

Yüksek frekans üretiminde karşılaşılan güçlükler 1922'lere kadar devam etti. Bu devreye kadar kullanılan tek yüksek frekans donanımı telsiz telgraf alanında kullanılan ark çeviricisiydi. Dr. Northrup bu frekans yükselticisini birkaç yüz watt'lık bir güç ile kalay ergitiminde kullandı. Ancak bu fırının endüstriyel çelik ergitiminde kullanılabilmesi için uzun çalışmalara ihtiyaç vardı.

Şebeke frekansından daha yüksek bir frekans ile çalışmada karşılaşılan en büyük sorun kompanzasyon kondansatörlerinin oluşturduğu sorunlardı. General Electric company'nin kağıt kondansatör üretimi ile bu sorun çözümlenmiş ve şebeke frekansınının üzerinde çalışma imkanı gelişmişti.

İlk orta frekans ertitme fırını 1927 yılında Sheffield'da Electric Furnace Company (EFCO) tarafından İngiltere'de, 1928 yılında da Pennsylvania'da (ABD) kuruldu.

Bu tarihten sonra endüksiyon fırınlarının çelik ertitiminde en hızlı gelişme gösterdiği konu paslanmaz çelik üretimi ve çelik dökümhanelerindeki uygulamalar oldu.

1951 yılında teorisi 1938 yılında atılan şebeke frekansı fırınların demir ertitimindeki ilk endüstriyel uygulaması yapıldı. Bu tip fırınların ortaya çıkmasındaki itici güç özellikle II. dünya savaşından sonra endüstride büyük kapasiteli ocaklara duyulan ihtiyaç oldu. Şebeke (50-60 Hz) frekanslı fırınların üç fazlı şebekeye bağlanma probleminin çözülmesi ile bu fırınlar önce Avrupa, daha sonra da ABD'de giderek yaygınlaştı. 1951-1961 yılları arasındaki devre bu tip fırınların en hızlı yayıldığı devre olmuştur. Şebeke frekanslı bu fırınlar özellikle ayrıca bakım ekibi bulunmayan dökümhanelerde ucuz birer ertitme ünitesi olarak büyük ilgi topladı.

1966 yılından itibaren statik güç sistemlerinin geliştirilmesiyle endüksiyon ertitmede yeni bir devir başladı.

Bu devrede son zamanlarda kaydedilen en büyük gelişme ise değişken frekanslı (VSP) endüksiyon ısıtıcıları oldu.

II. TEMEL PRENSİP VE TANIMLAR

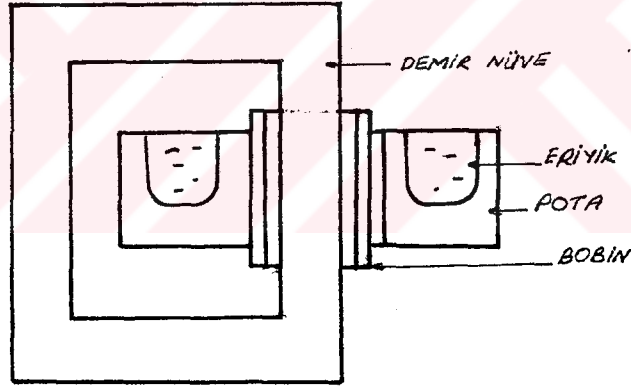
II.1. BİLGİLENDİRME

Ergitme fırınları yapı itibariyle;

- 1) Nüveli fırınlar
- 2) Potalı fırınlar

olarak iki önemli gruba ayrılır.

II.1.1. Nüveli Fırınlar



Şekil II.1

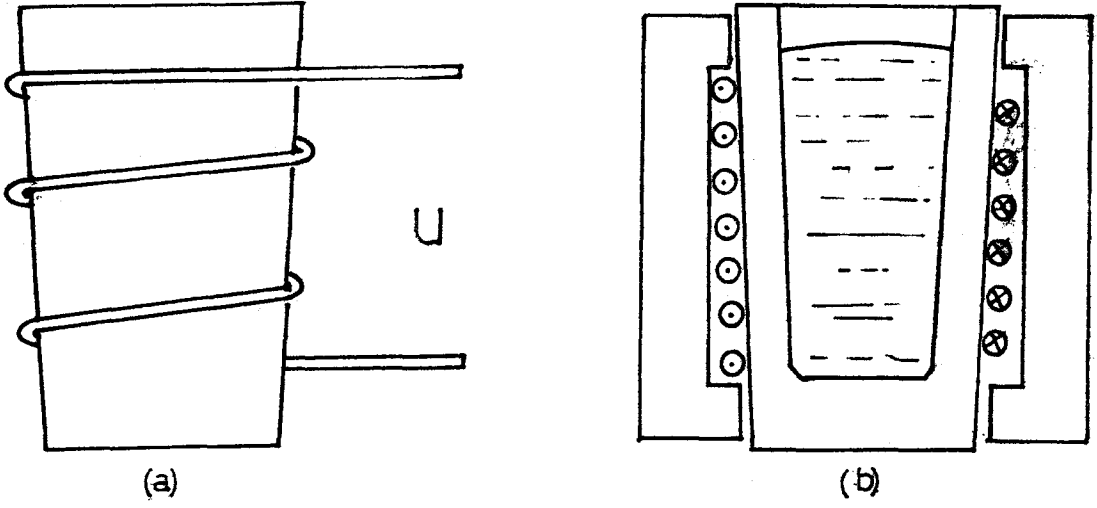
Şekil II.1'de şebeke frekanslı ve nüveli tip bir fırının şematik gösterimi vardır. Prensip aynı olarak, tercihen büyük kapasiteler için gelişmiş şekilde bugün kullanılmaktadır. Şebeke frekanslı fırınlar genellikle bu tipte inşa edilirler.

Fırında elektrodinamik kuvvetlerle iyi bir karışım sağlanarak, eriyiğin belirli bir kısmı ısıtılır. Isıtılan hacim fırın alt bölgesinde seçildiğinden, sıçrama şeklinde etrafa zarar veren ve malzeme kaybına yolaçan eriyik kabarmaları sınırlandırılmıştır. Böylece fırına verilen KW/kg cinsinden özgül güç yükseltilmiştir. Eriyik kabarması özgül gücü sınırlayan faktörlerden biridir. Özgül gücün artırılması ile ergitme zamanı kısaltılarak fırın termik verimi artırılmıştır. Ekonomik bir ergitme için fırına atılacak parça kalınlığının ve çapının büyük olması en büyük mahzurudur. Bu sakıncada pratik olarak şu şekilde ortadan kaldırılır. Fırında ergitilen malzemenin hepsi dökülmez, bir kısmı yaklaşık 1/3'ü, fırın içinde bırakılır. Yeni şarj bu eriyik üzerine yapılır. Atılan parçalar eriyik içine dalacağından, ebatları mühim değildir. böyle yapılıncı fırın kapasitesinden tamamen yararlanılamaz. Fırın işletmeden çıkarılırsa, ilk şarj için yeter büyüklükte kütükler kullanmak gerekir.

II.1.2. Potalı Fırımlar

Bu tip fırlarlarda endüksiyon bobini, doğrudan doğruya içine ergitilecek malzemelerin konduğu pota üzerin yerleştirilmiştir. Gerek içinden geçen akımın hasil ettiği ısı, gerekse pota içindeki eriyik dolayısıyla bobin çok ısınır. Aşırı ısınmaya mani olmak için bobin bakır borudan sarılır ve içinden su geçirilir. Şekil II.2.a'da fırının prensibi görülmektedir. Şarj malzemesinin ebatlarına ve fırının kapasitesine göre değişik işletme frekansları kullanılır. Büyük kapasiteli fırlarlarda şekil II.2.b'de görüldüğü gibi pota dışındaki magnetik devre, çevreye çeşitli sayıda yerleştirilmiş olan silisli saç'dan paketlerle teşkil edilir.

Pota malzemesinin seçimi ergitilecek malzemeye, mamulün kalitesine ve teknolojik şartlara bağlıdır. Pota genel olarak astar ve gövde olarak iki kısımdan oluşur. Eriyikle temas halinde olan ve astar denilen ısıya dayanıklı kısmın dışında asıl gövde bulunur. Adı döküm işleri için astar, silisyum dioksit menşeli asitik veya magnezyum dioksit menşeli bazık malzemedenden sıkıştırılmak suretiyle elde edilir. Pota gövdesi daima, dayanıklı ve yalıtkan bir malzemedden yapılır. Bunun dışında fırın bobini bulunur.



Şekil II.2

Bazı özel maksatlar için astar yerine iletken bir pota kullanılır. Bu pota gövdeyi teşkil eden ana potanın içine yerleştirilir. Bu sebepten böyle fırınlara "iletken potalı fırın" denir.

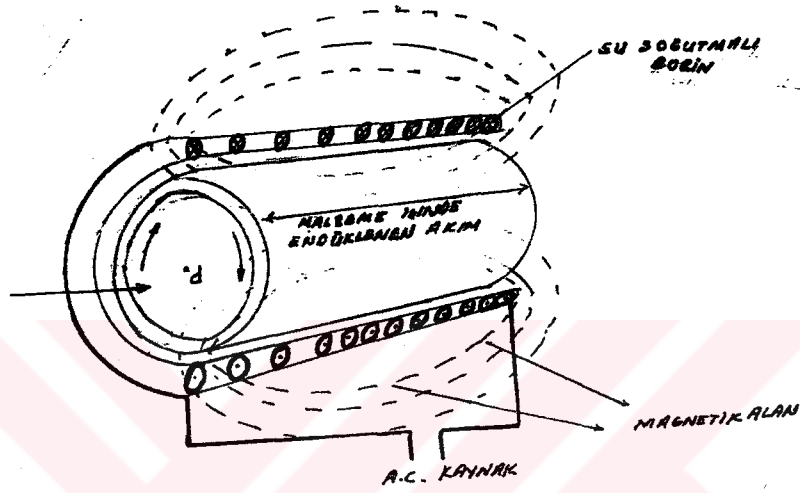
Demir grubu metallerin eritilmesinde ve dubleks sistemlerde sıcaklık yükseltme gayesi ile pota tipi endüksiyon fırınları kullanılır. En yaygın endüksiyon fırını tipleri de bunlardır. Pota tipi ergitme fırınları çok geniş kullanım sahaları, büyüklük, frekans, eritme kapasitesi ve diğer ölçüleri yönünden çok değişik tipleri olması nedeniyle tezde daha çok bu grup üzerinde durulmuştur.

II.2. ENDÜKSİYONLA ISITMA TEORİSİ

Endüksiyonla ısıtma temelde histerizis kayıpları ve eddy akımları kayıplarının kullanılması olayıdır.

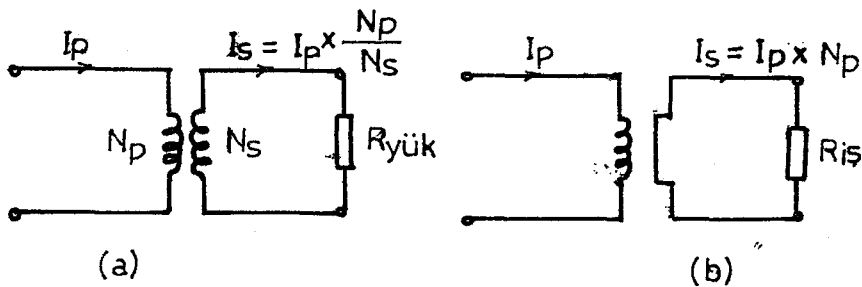
Endüksiyonla ısıtmanın en basit ve en genel örneği transformatör çekirdekleri ile motor içinde çekirdek kayıplarının neden olduğu ısınmadır. Bu tür ısınma istenmeyen bir özelliktir. Ancak bu özellikten faydalınalarak ayrı bir endüstri dalı gelişmiştir.

Transformatör teorisi ve eşdeğer devresi kullanılarak endüksiyon bobini ile iş parçası için basit bir model oluşturmak mümkündür. İki eşdeğer devre arasındaki fark, endüksiyon ısıtıcı modelinde sekonder sargı olması, bu görevi bobin içerisindeki iş parçasının tek sarımlık sekonder sargı gibi üstlenmesidir.



Şekil II.3

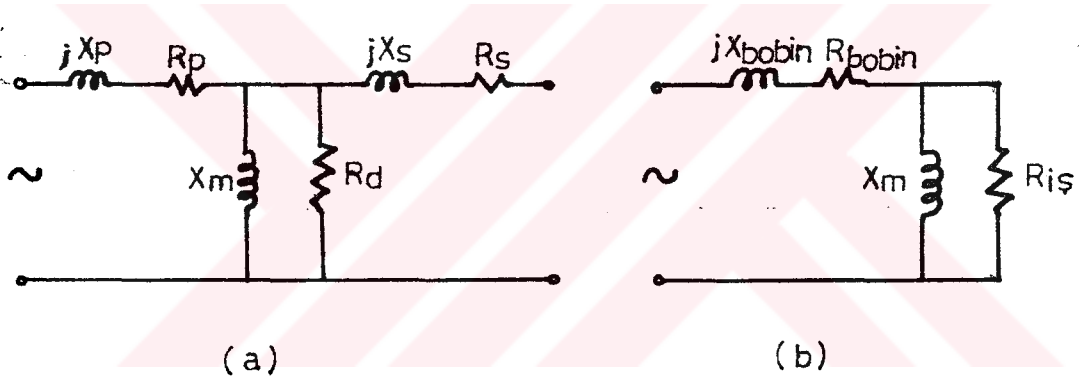
Kaçak akı ve sargı iç dirençleri sıfır kabul edilen ideal bir transformatörde yük akımı kaynak akımına doğrudan bağlıdır. Bu şartlarda kaynaktan çekilen güç tümüyle yük üzerine aktarılır.



Şekil II.4

Endüksiyonla ısıtıcıda işparçası tek sarımlık, uçları kısadevre edilmiş sekonder sargı olarak ele alınırsa, işparçasının öz direncinden oluşan sekonder sargı iç direnci, ideal transformatör eşdeğer devresinde gösterilen yük direnci yerini alacaktır. Böylece primer sargı (endüksiyon bobini) iç direnci ve kaçak akı sıfır kabul edildiğinde, kaynaktan çekilen güç iş parçasına aktarılacak, işparçasında I^2R kayıpları olarak ısı açığa çıkacaktır.

İkinci bir yaklaşımla aşağıda şekil II.5.a'da gösterilen sekonderi açık devre bırakılmış transformatör eşdeğer devresinde, kaynaktan çekilen aktif güç primer sargı direnci (R_p) ve demir kayıpları direnci (R_d) üzerinde harcanacaktır.



Şekil II.5

Şekil II.5.b'de endüksiyon ısıtıcısının bobin-işparçası modeli verilmiştir. Burada transformatördeki mıknatıslama endüktansı ve demir kayıpları direnci, bobin içerisindeki işparçası tarafından oluşturulacaktır. Kaynaktan çekilen aktif güç primer sargı direnci (R_{bobin}) ve demir kaybı direnci ($R_{iş}$) üzerinde harcanacaktır. R_{bobin} direncininin $R_{iş}$ direncine göre çok küçük olduğu düşünülürse, kaynaktan çekilen gücün büyük kısmı $R_{iş}$ direnci üzerinde harcanacaktır.

II.2.1. Histerizis Kayıpları

Elektromagnetik endüksiyon ile ısıtma işlemlerinde histerizis kayıplarının eddy akımları kayıplarına göre önemi çalışma frekansına (f), malzeme magnetik geçirgenliğine (μ) ve öz direncine (ρ) bağlıdır. Genelde ısıtma işlemlerinde histerizis kayıplarının, eddy akımları kayıplarına oranla çok düşük olması nedeniyle birçok uygulamada histerizis kayıpları ihmal edilir.

Histerizis kayıpları için Steinmetz'in deneylere dayalı tanımı aşağıdaki eşitlikte verilmiştir.

$$P_h = \eta \cdot f \cdot B_m^{1.6} \quad (II.1)$$

η : Malzeme özelliklerine bağlı katsayı (0.0002 ile 0.075 arası değişir.)

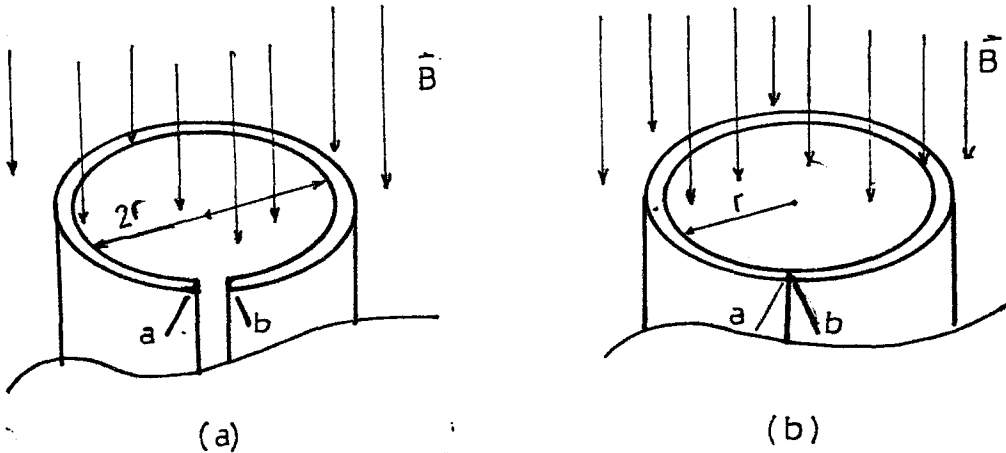
B_m : Akı yoğunluğu tepe değeri

Bu tanım B-H eğrisinin simetrik olduğu durumda ve endüksiyonun 1000 ile 12.000 Gauss olduğu aralıkta geçerlidir. 1000 Gauss'un altında ve 12.000 Gauss'un üzerinde hata yüzdesi artmaktadır.

II.2.2. Eddy Akımlarının Oluşumu ve Eddy Akımı Kayıpları

II.2.2.1. Eddy Akımlarının Oluşumu

Düzgün dağılıma sahip sinüsoidal değişen magnetik alan etkisine şekil II.6.a'da gösterilen biçimde eksenini doğrultusunda kenarı açık ve eksenini alan doğrultusuna paralel bir boru parçasığı yerleştirilmiş olsun.



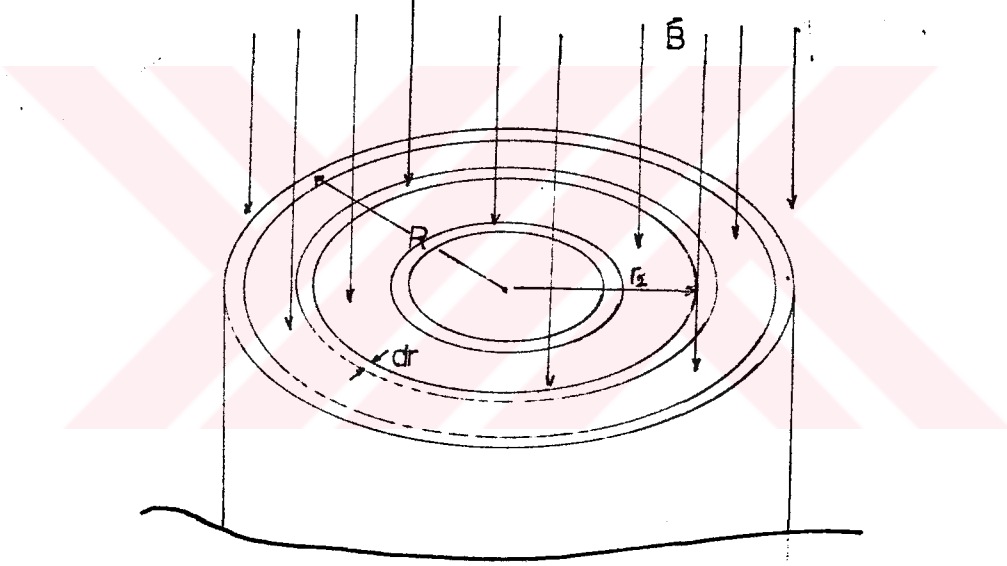
Şekil II.6

Faraday kanununa göre a--b uçları arasında;

$$e = - \frac{d\Phi}{dt} = - A \frac{dB}{dt} \quad V \quad (A = \pi r^2) \quad (II.2)$$

eşitliği ile verilen gerilim endüklenecektir. Boru parçacığı şekil II.6.b'de gösterildiği gibi açıklık kapatıldığında, çevresi boyunca, endüklenen e gerilimine ve malzeme öz direncine bağlı i akımı oluşacaktır.

Şekil II.7'de gösterilen yine aynı tür magnetik alan etkisindeki silindirik yapıda içi dolu demir kökenli malzemenin, iç içe geçirilmiş birim kalınlıklarda borulardan oluştuğu düşünülebilir.



Şekil II.7

Bir önceki örneklemede kullanılan yaklaşım ile içi dolu silindirik malzeme alınacak her birim çember çevresince dairesel döngüler halinde akımlar oluşacağı gösterilebilir. bu akımlara girdap (Eddy veya Foucault) akımları denir. İşparçası içerisinde ısıya dönüşen I^2R kayıplarını oluştururlar.

Lenz kanununa göre eddy akımları kendisini oluşturan magnetik alana karşı koyucu bir alan (ters emk) oluşturacaktır. Oluşan ters emk genliği,

alınacak her birim çemberin katkısı dolayısıyla merkezde maksimum olacak, yüzeye doğru azalacaktır. Bunun sonucu olarak düzgün dağılıma sahip magnetik alan etkisindeki malzeme içerisinde akı dağılımı düzgün olmayacaktır.

II.2.2.2. Eddy Akımı Kayıpları

Düzgün dağılıma sahip magnetik alan etkisindeki R yarıçaplı silindirik işparçası içerisinde geçen akı, yarıçapın işlevi olarak aşağıdaki eşitlik ile tanımlanır;

$$\Phi_r = \frac{2\pi}{\sqrt{2}\alpha} \mu H_{RM} r \cdot \frac{\text{bei}' \sqrt{2}\alpha r - j\text{ber}' \sqrt{2}\alpha r}{\text{ber} \sqrt{2}\alpha R + j\text{bei} \sqrt{2}\alpha R} \quad (\text{II.3})$$

H_{RM} : Magnetik alan şiddetinin yüzeydeki tepe değeri

μ : $\mu_0 \mu_r$ magnetik geçirgenlik

$$\alpha = \sqrt{\frac{\mu \omega}{2\rho}} \quad \omega: \text{Açısal frekans}$$

ber, bei, ber', bei' Bessel fonksiyonlarıdır (Bknz. EK).

r= R için işparçası içerisinde geçen toplam akı;

$$\Phi_R = \frac{\sqrt{2}\pi}{\alpha} \cdot \mu H_{RM} R \cdot \frac{\text{bei}' \sqrt{2}\alpha R - j\text{ber}' \sqrt{2}\alpha R}{\text{ber} \sqrt{2}\alpha R + j\text{bei} \sqrt{2}\alpha R} \quad (\text{II.4})$$

eşitliği ile tanımlanır. Φ ifadesi kısaltılarak;

$$\Phi_{RM} = H_{RM} \cdot A_{\text{işpar}} (Q - jP) = \Phi Q - j\Phi P$$

eşitliği ile yazılabilir. Buradaki P ve Q aşağıdaki eşitlikler ile tanımlanmıştır.

$$\begin{aligned} P &= \frac{\sqrt{2}}{\alpha R} \cdot \frac{\text{bei}' \sqrt{2}\alpha R \cdot \text{bei} \sqrt{2}\alpha R + \text{ber}' \sqrt{2}\alpha R \cdot \text{ber} \sqrt{2}\alpha R}{\text{ber}^2 \sqrt{2}\alpha R + \text{bei}^2 \sqrt{2}\alpha R} \\ &= \frac{\sqrt{2}}{\alpha R} \cdot \frac{\text{bei}'(x) \cdot \text{bei}(x) + \text{ber}'(x) \cdot \text{ber}(x)}{\text{ber}^2(x) + \text{bei}^2(x)} \end{aligned} \quad (\text{II.5})$$

$$Q = \frac{\sqrt{2}}{\alpha R} \cdot \frac{\text{ber}'\sqrt{2}\alpha R \cdot \text{ber}\sqrt{2}\alpha R - \text{ber}'\sqrt{2}\alpha R \cdot \text{bei}\sqrt{2}\alpha R}{\text{ber}^2\sqrt{2}\alpha R + \text{bei}^2\sqrt{2}\alpha R}$$

$$= \frac{\sqrt{2}}{\alpha R} \cdot \frac{\text{bei}'(x) \cdot \text{bei}(x) - \text{ber}'(x) \cdot \text{bei}(x)}{\text{ber}^2(x) + \text{bei}^2(x)} \quad (\text{II.6})$$

$$x = \sqrt{2}\alpha R$$

Dalma derinliği ile P-Q değerleri arasındaki ilişki bobin tasarımı ve frekans seçimi için önemli bir veridir.

İşparçası içinde oluşan eddy akım yoğunluğu yarıçapın işlevi olarak;

$$J_r = \sqrt{2}\alpha H_R \cdot \frac{\text{ber}'\sqrt{2}\alpha r + j\text{bei}'\sqrt{2}\alpha r}{\text{ber}\sqrt{2}\alpha R + j\text{bei}\sqrt{2}\alpha R} \quad (\text{II.7})$$

eşitliği ile tanımlanır.

Birim uzunluktaki malzemeye aktarılan güç;

$$P_{i\text{ş}} = \frac{1}{2} \int_0^R \rho |J_{RM}|^2 2\pi r dr \quad (\text{II.8})$$

$$|J_{RM}|^2 = 2\alpha^2 H_{RM}^2 \cdot \frac{\text{ber}'^2\sqrt{2}\alpha r + \text{bei}'^2\sqrt{2}\alpha r}{\text{ber}^2\sqrt{2}\alpha R + \text{bei}^2\sqrt{2}\alpha R} \quad (\text{II.9})$$

$$P_{i\text{ş}} = \sqrt{2}\pi\rho\alpha H_{RM}^2 \cdot \left[\frac{\text{ber}\sqrt{2}\alpha R \cdot \text{ber}'\sqrt{2}\alpha R + \text{bei}\sqrt{2}\alpha R \cdot \text{bei}'\sqrt{2}\alpha R}{\text{ber}^2 2R + \text{bei}^2 2R} \right] \quad (\text{II.10})$$

eşitlikleri ile tanımlanır.

Parantez içi ρ eşitliği kullanılarak sadeleştirilirse;

$$P_{i\text{ş}} = \mu\pi f H_{RM}^2 (l_{i\text{ş}} - A_{i\text{ş}}) \cdot P \quad (\text{II.11})$$

eşitliğine dönüşür.

$l_{i\text{ş}}$: İşparçası uzunluğu

$A_{i\text{ş}}$: (πr^2) olarak işparçası taban alanı

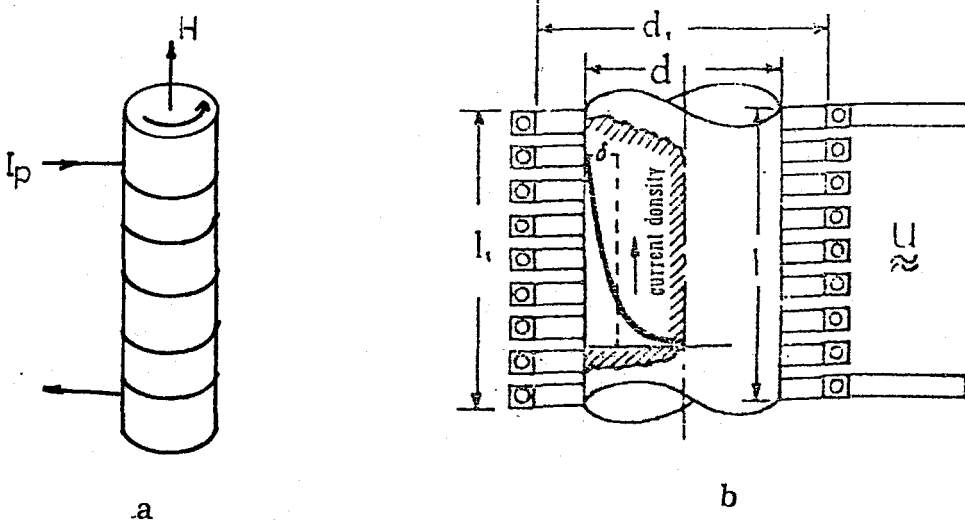
İşparçasına aktarılan güç P 'ye frekansa bağlıdır. Silindirik yapıya sahip malzemede verimli ısı işlem için işparçası çapının dalma derinliğine oranı 3.5 civarında seçilmesi idealdir.

II.3. TEMEL TANIMLAR

II.3.1. Dalma (Penetrasyon) Derinliği

Endüksiyonla ısı iletme prensibi şekil II.8a'da gösterilmiştir. Primer sarımdan geçen akım (I_p) ısınan malzemede ters yönde bir akım meydana getirir (I_s). Sekonder akımın magnetik alanı, primer akımın magnetik alanına ters yöndedir ve primer akımının malzeme üzerindeki etkisini dengeler. I_s akımının kesit boyunca dağılımı üniform değildir. Akım malzemenin yüzeyinde maksimumdur, merkeze gidildikçe exponansiyel olarak azalır. Akım yoğunluğunun yüzeydeki değerinin e^{-1} değerine düştüğü derinliğe penetrasyon derinliği denir. Nüfuz etme derinliği de denebilir.

Şekil II.8b'de akım yoğunluğunun bir değişimidir. Bu skineffect (kabuk olayı) olarak da bilinir.



Şekil II.8

Akım karakteristiği nüfus etme derinliği limitinde akar. Bu da ikinci devrenin boyutlarını belirler. Şöyle hesaplanır;

$$\delta = 50.3 \sqrt{\frac{\rho}{\mu_r f}} \text{ [cm]} \quad (\text{II.12})$$

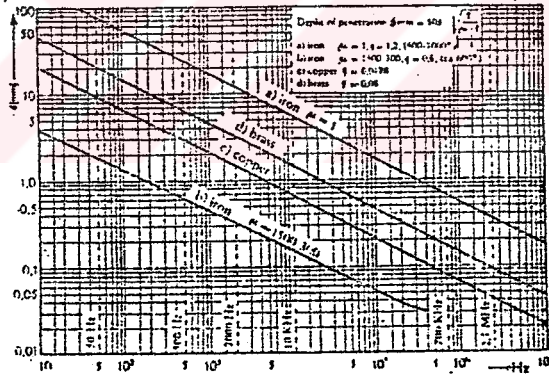
ρ : Özgül direnç $\Omega\text{mm}^2/\text{m}$

μ_r : Bağıl geçirgenlik

f : Frekans Hz.

Nüfuz etme derinliği iyi iletkenlerde (Cu veya Ag'de) ve yüksek geçirgenlik durumunda da (750 °C'nin altında demirde ör.) ve yüksek frekansta (10000 dv/sn) küçüktür.

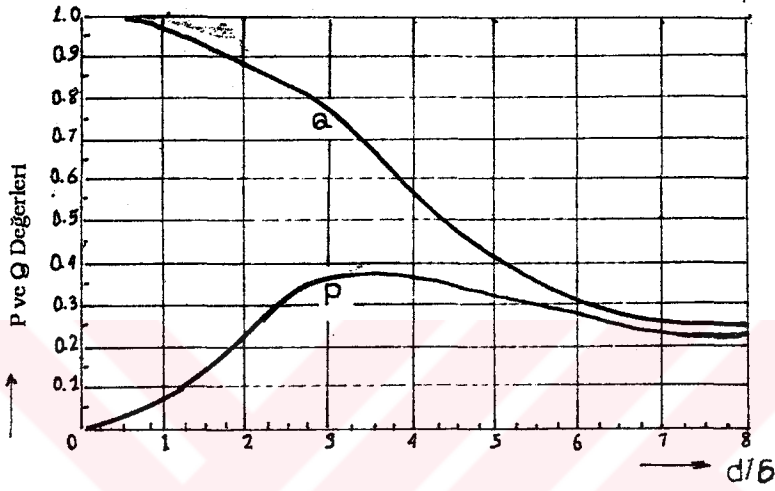
Nüfuz etme derinliği frekansın bir fonksiyonu olarak Şekil II.9'da birkaç metal için gösterilmiştir.



Şekil II.9

Nüfuz derinliğinin önemi grafikten kolaylıkla anlaşılabilir. En iyi enerji transferi malzemenin çapı nüfuz derinliği (δ)'nin yaklaşık 3.5 katı olduğunda gerçekleşir. Bu değerın altında spesifik (özümlü) verim hızla düşer. Bu değerın üstünde ise çekirdek kenar (sınır) bölgeden itibaren ısınırken zaman uzar (Şekil II.7'ye bak).

Bu etki çeşitli ölçülerdeki malzemenin aynı sarım içerisinde ekonomik olarak ısıtılması için mutlaka dikkate alınmalıdır. Bu aynı zamanda boş bir pota fırınının çalıştırılabilmesi için gereken minimum malzeme ölçülerinin belirlenmesinde de önemlidir. Derinliğin dalma derinliğine oranına göre P-Q değerleri aşağıdaki grafikte gösterilmiştir.



Şekil II.10

II.3.2. Elektriki Verimlilik

Elektriki verimlilik, malzemeye verilen ısının endüksiyon bobinindeki kayıplara oranına bağlıdır.

$$\eta_{ef} = \frac{\text{Termal Güç (Nw)}}{\text{Termal Güç (Nw) + Bobin Kayıpları (Nv)}} = \frac{1}{1 + \frac{Nv}{Nw}} = \frac{1}{1 + V} \quad (II.13)$$

W. Esmarch'a göre bobin kayıpları miktarı:

$$Nv = 8.1 \frac{d_1 \sqrt{f} \theta_1^2}{l_1} 10^{10} \text{ [kW]} \quad (II.14)$$

θ_1 : Primer alan

II.3.3. Termal Güç

Termal güç şu şekilde formüle edilmiştir;

$$N_w = 6.1QA\sqrt{\rho\mu f}\theta_1^2 10^{10} \text{ [kW]} \quad (\text{II.15})$$

Q : Yüzey oranı, kullanılan malzemenin boyutlarına bağlıdır.

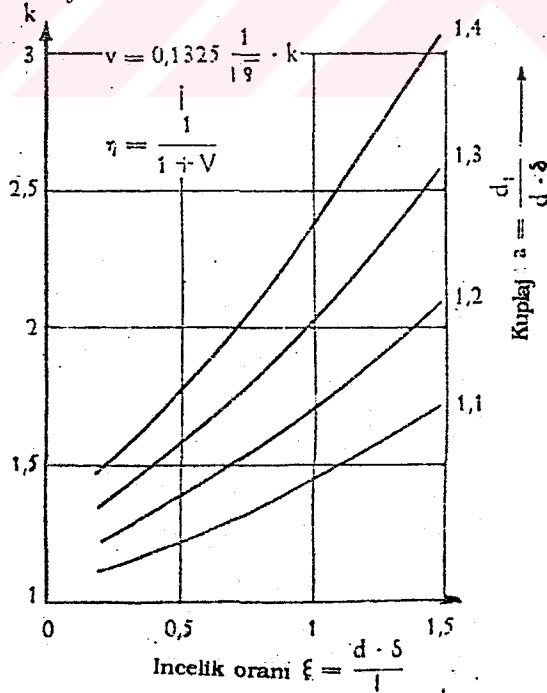
A : Karşılıklı endüksiyon faktörü, bobinin boyutlarına bağlıdır.

θ_1 : Primer alan (Amper dönüşü)

N_v ve N_w eşitliklerini II.13 eşitliğinde yerlerine koyarsak şunu buluruz;

$$\eta_{eF} = \frac{1}{1+V} = \frac{1}{1 + \frac{1}{\sqrt{\rho\mu}} \cdot \frac{4}{3} \cdot \frac{d_1}{l_1} \cdot \frac{1}{QA}} \quad (\text{II.16})$$

Bir endüksiyon fırının verimliliği yalnızca fırının geometrik oranlarına ve malzemenin (ρ ve μ) gibi sabitlerinin değerine bağlıdır. Penetrasyon derinliğine bağlı değildir. Çünkü $\delta \ll d_1$ 'dir. Verimliliği belirlemek için eğriler Şekil II.11'da verilmiştir.



Şekil II.11

II.3.4. Güç Faktörü

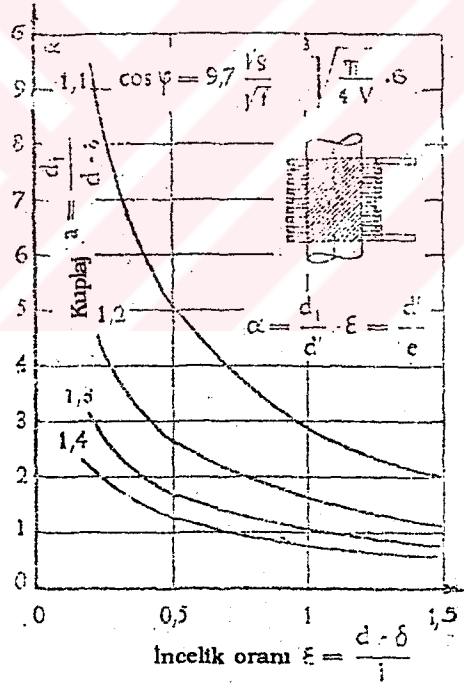
Enerjinin nakli temelde hava içinden geçebilecek magnetik alanı gerekli kılar. Ergitme amacıyla kullanılan endüksiyon fırınlarında gerekli olan reaktif güç görünür güçten biraz daha farklıdır. Bu durum aşağıdaki ifade ile gösterilebilir.

$$\cos\phi \approx \cot\phi = \frac{\text{Termal Güç } Nw}{\text{Reaktif Güç } Nb} \quad (\text{II.17})$$

Esmarch'a göre;

$$\cos\phi \approx \cot\phi = 100 \sqrt{\frac{\rho\mu}{f}} \cdot \frac{QA}{A_1} \quad (\text{II.18})$$

A_1 bir sarımın bir dönüşüne göre self endüktansdır (cm'de).



Şekil II.12

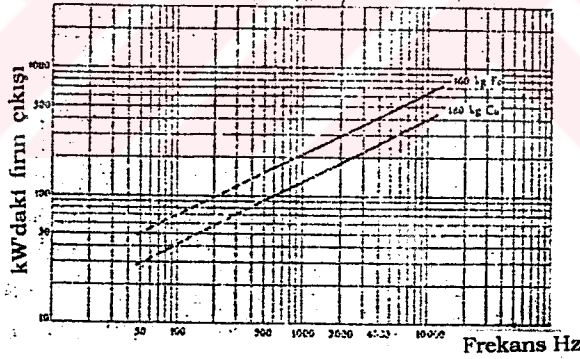
Şekil II.12 belirlenen güç faktörü için eğrileri gösterir. Burada geometrik oranlar QA 'nın içinde dikkate alınır ve ısıtılan malzemenin hacmiyle ilgilidir.

Elektrikli verimliliğini tersine güç faktörü geometrik oranlardan ve malzeme sabitlerinden ayrı olarak büyük ölçüde frekansa bağlıdır. Şebeke frekanslı fırınlarda ortalama güç faktörü 0.3 ile 0.1 arasında orta frekanslı fırınlarda ise 0.1 ile 0.03 arasında değişmektedir.

II.3.5. Endüklenmiş Güç

Magnetik alan tarafından malzemede meydana getirilen gerilim, magnetik alanın dalgalanma hızına ve sonuç olarak da frekansa bağlıdır. Meydana getirilecek (endüktif) güç, endüktif gerilime karşılık olduğundan sabit bir alan derecesinde daha çok güç transferi daha yüksek bir frekansla mümkündür. Bu ilişki (II.15) nolu eşitlikte gösterilmiştir.

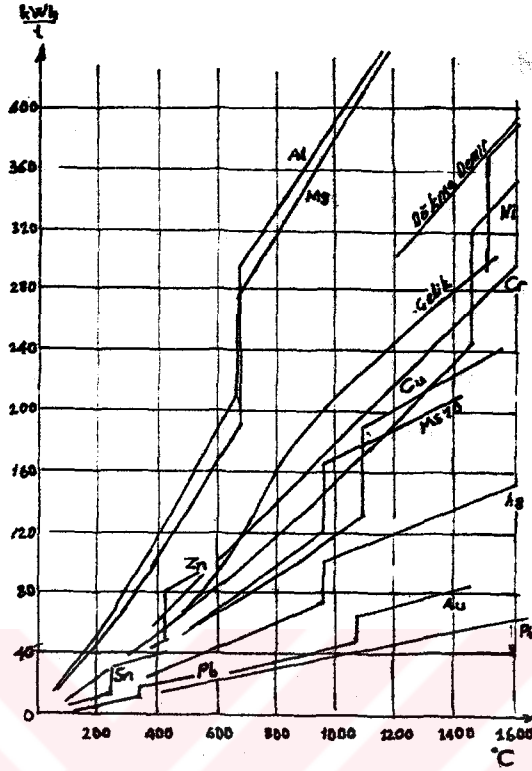
Şekil II.13'deki eğrilerde çeşitli frekanslarda sabit banyo karıştırılması ve yaklaşık 25 dm³ lük fırın hacmi varsayılarak demir ve bakıra transferler edilebilecek enerji gösterilmektedir.



Şekil II.13

II.3.6. Güç Sarfıyatı

Şekil II.14'de birçok metal için kullanışlı ısı miktarı gösterilmektedir (sıcaklığa göre). Isı miktarı istenilen ısıtma etkisine ulaşmak için gereken miktardır.



Şekil II.14

Faydalı enerjiyi parçaya nakletme sırasındaki kayıplar önemli ölçüde toplam verimliliği belirler.

- | | | |
|------------------------------------|---|------------------|
| (1) Bakır kayıpları | → | η elektriki |
| (2) Isı kayıpları | → | η termal |
| (3) Transfer kayıpları | → | η iletim |
| (4) Çevirici (konverter) kayıpları | → | η konverter |

$$\eta_{\text{top}} = \eta_{\text{el}} \cdot \eta_{\text{th}} \cdot \eta_{\text{trans}} \cdot \eta_{\text{conv}} \quad (\text{II.19})$$

Böylece güç sarfiyatı,

$$S_{\text{top}} = \frac{S_{\text{th}}}{\eta_{\text{top}}} \quad [\text{kWh/t}] \quad (\text{II.20})$$

Aylık güç sarfiyatı sürekli çalışma sırasında harcanan güce ve geri kalan süredeki ısıtma ve tutma kayıplarına bağlıdır. Depolama kayıpları endüksiyon fırınlarının çoğunda düşüktür. Bu yüzden aylık güç sarfiyatı yük için gerekli olandan yalnızca bir mikta fazladır (% 10 civarında).

II.3.7. İşparçası Boyutları

Kullanılan malzemede ısının gelişmesi endüksiyon akımına bağlıdır. Parça içindeki ısının dağılımı birinci ve sıfır dereceden Bessel fonksiyonlarına tıpatıp uyar (Bu fonksiyonların kompleks argümanı ile). Isı gelişmesi bu nedenle alan üzerinde üniform değildir. Fonksiyon parçanın çapı $d = 3.7 \delta$ olduğunda açıkça görülen bir maksimumla karakterize edilir. Eğer parçanın çapı bu boyuttan daha düşükse özgül ısınma (kW/kg) ve aynı zamanda ısının gelişmesi hızla azalır. Eğer çap daha büyükse etki daha az olur. Bu olay boş bir pota fırını ile başladığında bilhassa önemlidir.

II.3.8. Banyo Karıştırma

Elektromagnetik alan bütün malzemeleri, sistemin ısıyı emmesini azaltacak yönde mekanik gerilimlere maruz bırakılır. Bu mekanik kuvvetler (P) üç bileşene sahiptir.

$$P = P_{el} + P_{mag} + P_{rad} \quad (II.21)$$

Metallerin endüksiyonla ısıtılmasında elektrik alanının gerilim etkisi oldukça zayıf olan mukavemeti nedeniyle ihmal edilebilir. Magnetik kuvvet ise önemlidir.

$$\begin{aligned} P_{mag} &= \frac{1}{c} [jB] - \frac{1}{8\pi} H^2 \text{grad}\mu \\ &= 1.02 \frac{I_0^2}{\gamma \sigma^2} \cdot 10^8 \text{ [kg/cm}^2\text{]} \end{aligned} \quad (II.22)$$

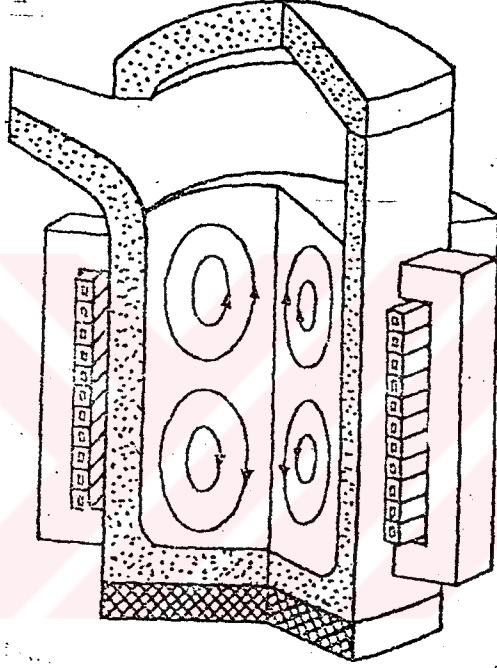
Bu kuvvet halka şeklindeki endüksiyon fırını içinde metalin bobin içerisindeki durumunu ilgilendiren çentik etkisi için belirleyicidir.

Pota fırınlarında hakim olan radyasyon basıncı metal banyosunu potanın duvarından ayırmaya çalışır.

$$P_{rad} = \frac{\epsilon\mu}{4\pi c} \cdot \frac{\delta}{\delta_t} EH = \frac{31.6}{\sqrt{pf}} \cdot N_t 10^{-4} \text{ [kg/cm}^2\text{]} \quad (II.23)$$

Eriyik bu radyal basınçtan sakınmak için dönmeye başlar bu arada banyo seviyesi yükselir. Bu hareket bir ölçüdür. Ve nakledilebilecek güç miktarının bir sınırıdır.

Bu kuvvet o derece güçlü olabilir ki malzeme bobin içinde Şekil II.15'de gösterildiği gibi yer değiştirebilir ve hatta dışarıya sıçralayabilir.

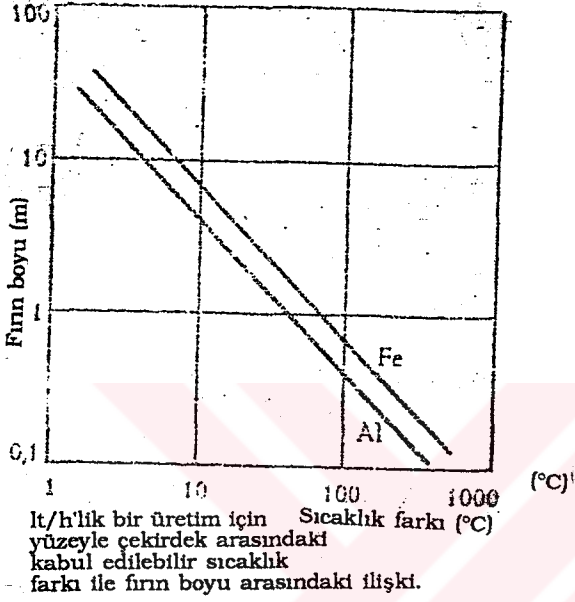


Şekil II.15

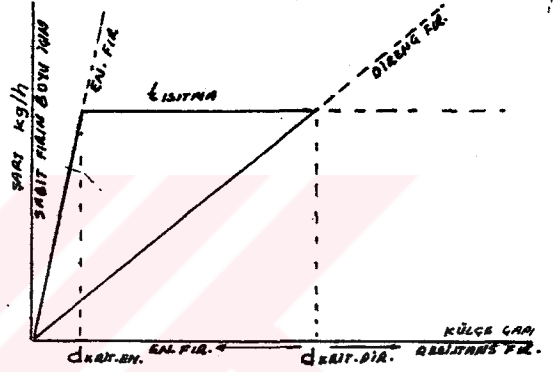
II.3.9. Külçe Isıtma

Isı temelde nüfuz derinliğinde oluşur. Yüzeyle çekirdek arasındaki sıcaklık farkının azalması için belli bir zaman periyodu (t_D) geçmesi gerekir. t_D çapın karesine, malzeme değerlerine ve müsaade edilebilir sıcaklık farkına (ΔQ) bağlıdır. Sabit bir bobin boyu ile ısıtılacak malzemenin ağırlığı ve ısıtma süresi (t_D) çapın karesi şeklinde değişir. Bu şekilde çapın etkisi dengelenmiş olur. Böylece çapdan bağımsız olarak belli bir verim için belli bir bobin uzunluğu gerekir. Bununla birlikte verilen bir malzeme için belirleyici olan

yalnız sıcaklıktır (Şekil II.16). Tabii olarak verim uygulanması mümkün olan enerji tarafından yönlendirilir (KW/m^2). Şekil II.17'da görüldüğü gibi bu son etki yalnızca aşırı küçük çaplarda dikkate alınmalıdır (Direnç fırınlarında tersinedir).



Şekil II.16



Şekil II.17

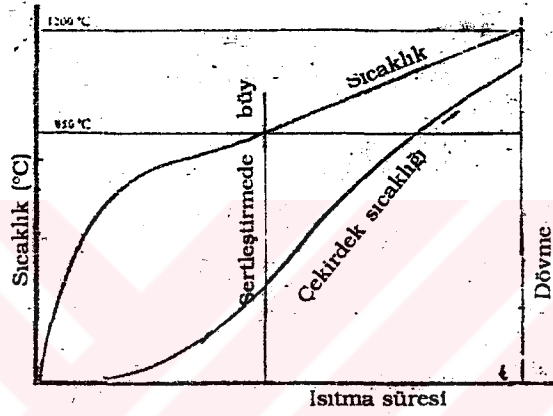
II.3.10. Yüzey Isıtma

Bu olay bir sertleştirme işlemi sırasında istenilen yüzey bölgelerinin ısıtılmasının sınırlanmasıdır. Bu ise dış yüzeyle çekirdek arasında büyük sıcaklık farkını gerektirir. Şekil II.18'de bir kütük ısıtılırken sıcaklığın nasıl yükseldiği gösterilmektedir. Enerji uygulandıkça sıcaklık farkı artar. Çünkü, dış yüzeyin sıcaklığı daha hızlı artar. İlave olarak, grafik üzerinde dövme işleminin yeteri kadar yapılabileceği sıcaklığa çekirdekte ulaşıldığı nokta işaretlenmiştir. Endüktif kaynakta da benzer düşünceler uygulanır. Enerji tasarrufu için yalnız kaynak işlemi yapılan alan ısıtılır.

Daha ileri uygulama alanları,

1. Extrüzyon preslerinde blok alıcıların ısıtılması.
2. Otoklav ve kazanların ısıtılması.
3. Kaynaklı eklemelerin ve dövmelemlerin gerilim giderme ve rekristalizasyonu amacıyla tavlama için.

gibi sıralanabilir.



Şekil II.18

III. ENDÜKSİYONLA ISITMA SİSTEMLERİ (Kullanılan güç Kaynakları)

III.1. ENDÜKSİYONLA ISITMA SPEKTRUMU

Bir işparçasının belirli bir güç sistemi ile verimli bir şekilde ısıtılıp ısıtılamıyacağı, işparçası malzemesinin elektriksel, magnetik özelliklerine, büyüklüğüne, ulaşılması istenen sıcaklık ve uygulanacak frekansa bağlıdır. Küçük çaptaki parçaların ısıtılması veya küçük çaplı fırınlarda metal ergitimi daha yüksek frekanslara ihtiyaç gösterir. Belirli bir frekansta ısıtılabilen veya ergitilebilen bir malzeme daha yüksek frekanslarda da ısıtılabilir veya ergitilebilir. Ancak belirli bir frekansta aşağıdaki tabloda verilen boyutlardan daha küçük boyutlardaki malzemelerin ısıtma veya ergitme verimi önemli ölçüde düşer.

Malzeme ve İşlem	Erişilecek sıcaklık °C	Frekans, Hz							
		Şebeke Frekansı	Motor-Jeneratör			Ark Osilatörü		Vakum Tüpü	
			60	1000	3000	1000	50000	200000	450000
P a r ç a ç a p ı m m									
ALUMİNYUM									
Ektrüzyon	510	81	20	11.5	6.4	2.8	1.4	0.9	0.45
Lehim	650	94	22	13.2	7.1	3.0	1.6	1.1	0.51
PİRİNC									
Yumuşak lehim	260	76	18	10.7	5.8	2.5	1.3	0.9	0.41
Gümüş lehim	650	91	22	12.9	7.1	3.0	1.6	1.0	0.51
Ergitme	950	104	25	14.7	8.1	3.6	1.8	1.2	0.56
BAKIR									
Ergitme	1090	84	21	11.9	6.6	3.0	1.5	1.0	0.45
KURSUN									
Ergitme	330	185	45	25	14.2	6.4	3.3	2.1	1.02
CELİK									
Gerilim Giderme	540	35	9	5.1	2.8	1.3	0.6	0.4	0.20
Sertleştirme	870	280	68	38	21.6	9.6	4.8	3.2	1.52
Dövme	1200	290	71	41	22.4	9.9	5.1	3.3	1.57
Ergitme	1510	295	74	43	22.9	10.2	5.1	3.4	1.60
ÇİNKO									
Lehim	260	91	22	12.7	7.1	3.0	1.6	1.0	0.51

Tablo-III.I. Verilen sıcaklıklarda etkili olarak ısıtılacak en küçük parça çapları

Verilen sıcaklıklarda etkili olarak ısıtılabilir en küçük parça çapları Hava aralığının seçimi için aşağıdaki tablo kullanılır.

Frekans										
50/60 Hz	1kHz	3khz	10 khz	450 khz						
İş parçası sıcaklığı °C										
550	850	1250	850	1250	850	1250	850	1250	12	
Hava aralığı (m)										
İş çapı 0-60 mm	25	25	50	50	62	50	62	50	62	6-25
İş çapı 60-125 mm	25	38	50	62	75					
İş çapı 125 - 250 mm	25	38	80	75	80					

Tablo III.2.

III.2. FREKANS SEÇİMİ

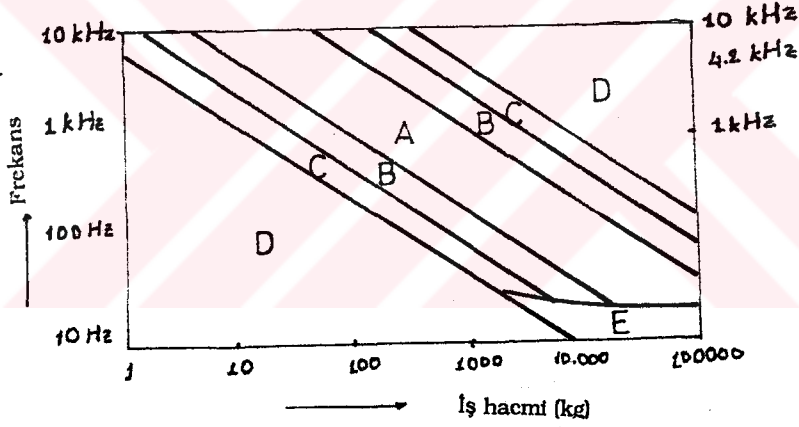
Endüstriyel uygulamalarda ısı işlem türüne göre frekans seçimi bu konudaki teorik yaklaşımdan farklıdır. İşlem görece malzemenin geometrik yapısı, demir kökenli metallerin Cruie sıcaklığına (760 °C) ulaştıkları zaman bağıl magnetik geçirgenliklerinin değişimi, özdirencin sıcaklığa bağımlı olması ve uygulama tipi frekans seçimini etkileyen temel faktörlerdir.

Ergitme fırınlarında frekans seçiminde, başta şebeke frekansında çalışıldı. Böylece ilk yatırım maliyeti düşük tutularak, bakım ve onarım işlemleri kolaylaştırılmıştı. Güçlü karıştırma etkisinden ötürü refraktör malzemeyi hızlı aşındırması ve çok sık pota onarımı gerektirmesi olumsuz yönleriydi. Bunun yanında, çelik ve özel alaşım hazırlanması gibi karıştırma etkisinin düzgün ısı ve metal dağılımına sebep olması nedeniyle olumlu değerlendirildiği alanlar vardır.

Artan hammadde fiyatları büyük kütlelerde hurda değerlendirilmesine yönelmesi güç faktörü düzeltilmesindeki kolaylıklar ve gelişim şebeke frekanslı ocakların yaygınlaşmasına yolaçmıştır.

Hurda parçacıklarının ebatlarının belirsiz olması, dalma etkisinden dolayı ocağın soğuktan işleme alınmasını zorlaştırır. İşe büyük parça yada ocak içerisinde ergimiş metal bırakılması ile başlanabilir. Ufak hurda beslemesi bu yüzden oldukça dikkat isteyen bir iştir. Ergitme hızı daha yüksek çalışma frekansına sahip fırınlara göre yavaştır. Yüksek çalışma frekanslarında ise kondansatör ve bobin kayıplarının artışı ile sistem içerisindeki enerji baralarında gerilim düşümü artışı verimliliğin düşmesine neden olur.

Bütün bu etkenler dikkate alınırsa ergitme ocaklarında iyi ve kötü yönleriyle dengeli bir çalışma frekansı seçimi, tasarımcının değerlendirmelerine bağlıdır. Bu konuda çalışmalar yapan inductotherm Corp.'nın iş çapına göre frekans seçimi için deneysel bulguları Şekil III.1'de gösterilmiştir.



Şekil III.1.

- A: Önerilen en iyi çalışma bölgesi
- B: Dikkatli tasarım ile çalışmak mümkündür
- C: Ergitme ocaklarında kullanılabilir fakat çalışmamalıdır
- D: Bu bölgede kesinlikle çalışılmamalıdır
- E: Belirsiz

Mevcut ergitme amaçlı fırınlarda kullanılan çalışma frekansı şebeke frekansı ile 10 kHz arasında değişmektedir.

Dövme işlemlerinde amaç malzeme yüzeyi ile merkezindeki ısı farkının oldukça az (20 °C - 30 °C) olacak şekilde kısa sürede 950 °C - 1260 °C arasında ısıtılmasıdır. Demir kökenli metallere işlem Curie sıcaklığının üzerinde gerçekleşmesi nedeniyle zorunlu olmamakla beraber Curie sıcaklığının altında ve üstünde iki değişik çalışma frekansı uygulaması verimli ısıtma için daha uygun bir seçim olmaktadır.

Demir kökenli metallere dövme işlemi için ısıtılmasında iş çaplarına göre önerilen çalışma frekansları tablo III.3'de verilmiştir.

İş Çapı (mm)	Çalışma frekansı	
	Curie Sıcak. Altında	Curie Sıcak Üzerinde
0-6	450 kHz	450 kHz
6-12	3 kHz	8-10 kHz
12-25	1 kHz	8-10 kHz
25-38	1 kHz	3-10 kHz
38-50	50/60 Hz	1-3 kHz
50-150	50/60 Hz	1 kHz
150'den daha büyük	50/60 Hz	50/60 Hz

Tablo III.3.

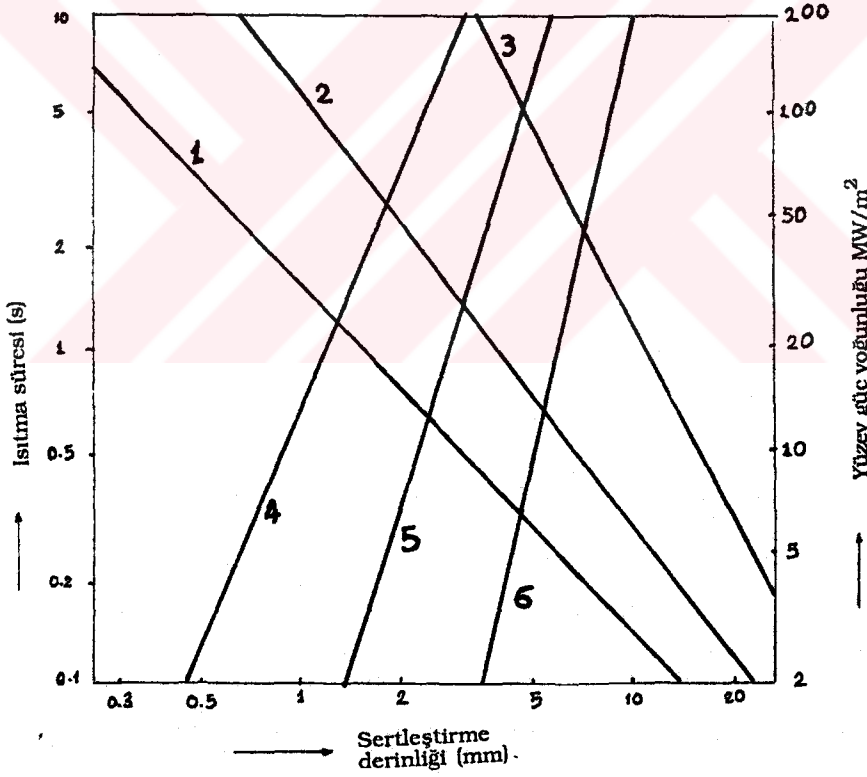
Demir dışı metallere bağlı magnetik geçirgenliğin metal saflığına bağlı fakat genelde 1'e eşit veya çok yakın olması nedeniyle çift çalışma frekansı uygulamasına gerek yoktur. Demir dışı metallere dövme işlemleri için ısıtılmasında iş çaplarına göre önerilen çalışma frekansları tablo III.4'de verilmiştir.

İş çapı	Çalışma Frekansı
0-12	450 kHz
12-25	10 kHz - 3 kHz
25-75	1 kHz
75'den büyük	50/60 Hz

Tablo III.4

Yüzey sertleştirme işlemlerinde amaç malzeme içi henüz soğuk iken yüzeyden belirli bir derinliğe kadar oldukça kısa sürede 900 °C ~ 950 °C sıcaklığa kadar ısıtılabilmesidir. Bu nedenle dalma derinliği, ısıtma süresi ve güç yoğunluğu yüzey sertleştirme işlemlerinde frekans seçimi için önemli etmenlerdir. Uygulamalarda çoğunlukla işlem malzeme yüzeyinden 0.25 mm ile 5 mm derinlikler arasında gerçekleştirildiğinden, dalma derinliğini azaltmak amacıyla önceki ısıtma türlerine göre daha yüksek çalışma frekansları kullanılmaktadır. Bu alandaki çalışmalar şok ısıtma üzerine yoğunlaşmış ve çoğunlukla radyo frekanslı ısıtıcılar kullanılmaktadır.

Sertleştirme derinliği, ısıtma süresi, yüzey güç yoğunluğu ve çalışma frekansı arasındaki ilişki şekil III.2'de verilmiştir.



1-2-3 Güç yoğunluğu eğrileri

4-5-6 ısıtma süresi eğrileri

Şekil III.2

Kaynak ile birleştirme işlemlerinde büyük güç yoğunluğu ve ısı odaklanması gereksinimlerinden ötürü radyo frekanslı (450 kHz) ısıtıcılar kullanılmaktadır.

Eğer birleştirilecek parçalar büyük ebadlarda ise orta frekans ısıtıcılarda kullanılır. Orta frekans ısıtıcıların kullanılması halinde bobin tur başına gerilim daha düşük olacağından, işparçası ile endüksiyon bobini yalıtımı daha kolay olacaktır.

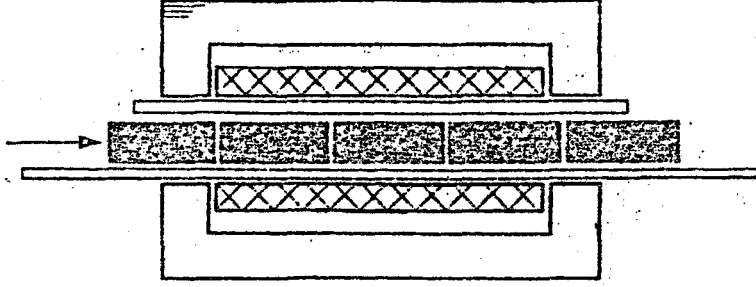
III.2.1. Şebeke Frekanslı Sistemler ve Frekans Üçleme Sistemi

III.2.1.1. Şebeke Frekanslı Sistemler (50/60 Hz)

Diğer sistemlere göre daha basit, bilhassa birkaç megawatt'ın üzerindeki güçlerde sistem maliyetinin daha ucuz olması, bakım ve onarımın kolay olması, büyük çaplı endüksiyon ısıtma uygulamalarında tercih edilen bir sistem olmasını sağlamıştır. Dalma derinliği işparçası özelliklerine göre 10 mm ile 100 mm arasında değişmektedir. Dalma derinliğinin büyük olması nedeniyle düzgün ısı dağılımı gerektiren büyük çaplı dövme işlemlerinde ve ergitme fırınlarında kullanılmaktadır. Küçük kütlelerin ısıtılması ve ergitilmesinde verim düşüktür. Verim ve işlem hızı yüksek frekanslı uygulamalara göre düşüktür. Güç ayarı hatları dengeleme ve kompanzasyon, kademeli transformatörler ve kondansatörlerle yapılır.

Şebeke frekanslı sistemlerde uygulama tipine bağımlı olarak soğuktan kalkındırma sorunları mevcuttur. Ergitmeden sonra ergimiş maddenin 2/3'ü kullanılır. 1/3'ü sistemin iyi çalışması için potada bırakılır. Şebeke frekanslı kompanzasyon kondansatörleri, yüksek frekanslı kondansatörlere göre çok pahalıdır. Bu yüzden 1 MWatt'dan küçük güçlerde, elektronik sistemlerle aralarında büyük fiyat farkı yoktur.

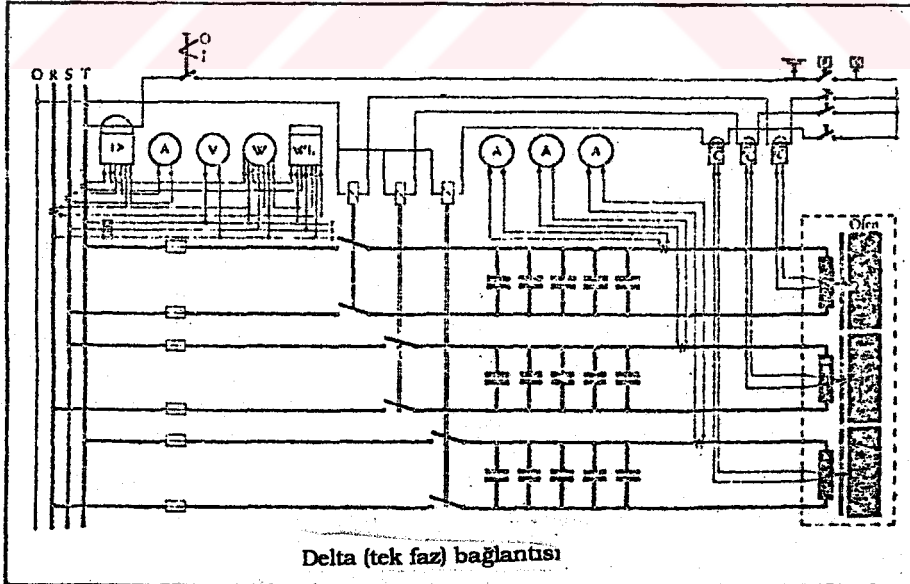
50 dev/saniyeli şebeke frekansında ısı işlem için genel şematik gösterim şekil III.3'dedir.



Şekil III.3

Şarj, şebeke frekans transformatorünün sekonder devresini oluşturur (Demir devrenin parçası ile). Şarj birinci sargının içine yerleştirilen termal olarak yalıtılmış koruyucu bir tüp içinde endüklendir. Bağlantı tek fazlı bir scott devesi yoluyla veya delta bağlantılı üç fazlı devre ile olur. Güç faktörü düzeltilmesi kapasitörle yapılır.

Bağlantısı:



Şekil III.4

Uygulamayla ilgili olarak aşağıdaki boyutlarda iř parçalarıyla çalışma en ekonomiktir.

Malzeme	Sıcaklıklar	Malzemenin çapı	Borunun et kalınlığı
Çelik	1100 °C	260 mm	75 mm
Çelik	760 °C	70 mm	20 mm
Bakır	700 °C	65 mm	18 mm
Aliminyum	500 °C	75 mm	21 mm
Pirinç	700 °C	130 mm	38 mm

TABLO III.5

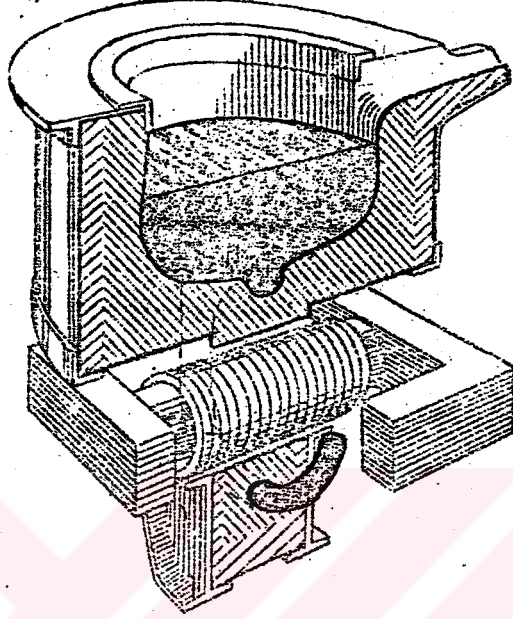
Avantajları:

Tek düze üretim, basit dizayn da uygundur. Hızlı çapaksız ısıtma, önemli ölçüde ekonomiktir. Basit yapısından dolayı; şebekeye direkt bağlandığından düşük güç sarfıyatı vardır. Üretim hattı boyunca fazla ilgi gerektirmez.

Dezavantajları:

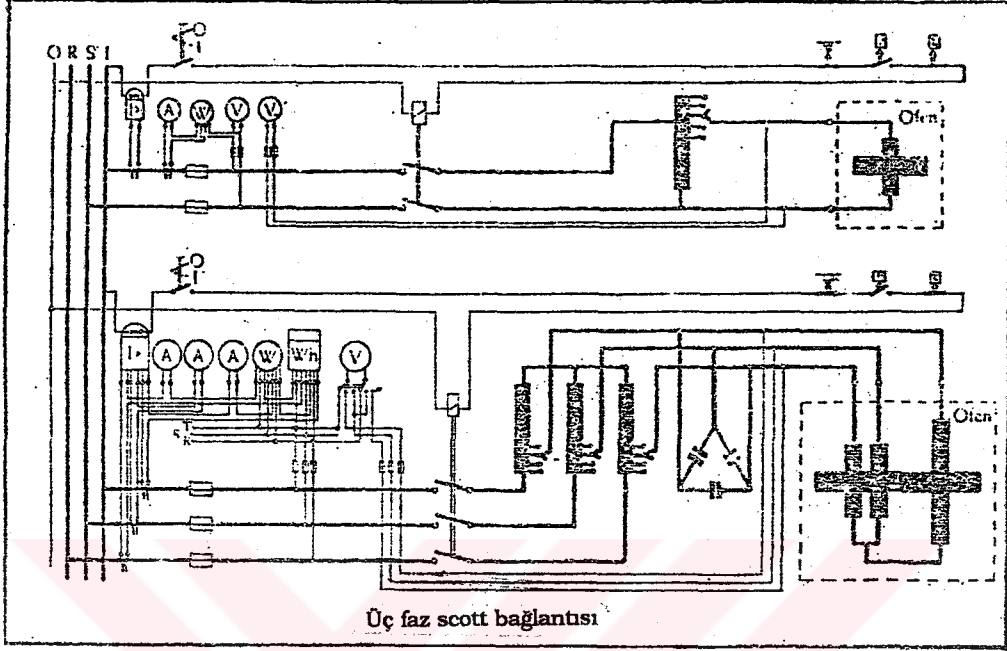
Boyutları nedeniyle sınırlı kullanım, sınırlı düzenleme imkanları seri bağlanmış transformatör yoksa söz konusu olur.

50 dev/saniyeli sebebe frekansında çalışan halka şekilli Endüksiyon fırını.

Prensip:

Şekil III.5

Transformatörün kapalı demir çekirdekli ikincil direnci bir halkadır. Primer bobin uçlara düzenleyici (regülatif) bir transformator yoluyla bağlanır. Isı halkadan ertitme çemberine nakil şeklinde (kondüksiyon) ve banyonun karıştırılması yoluyla geçer. Bu tip bir fırın yalnız bir alaşım için kullanılmalı veya alaşım oldukça seyrek değiştirilmelidir. Operasyon mümkün olduğunca devamlı olmalıdır.

Bağlantısı:

Şekil III.6

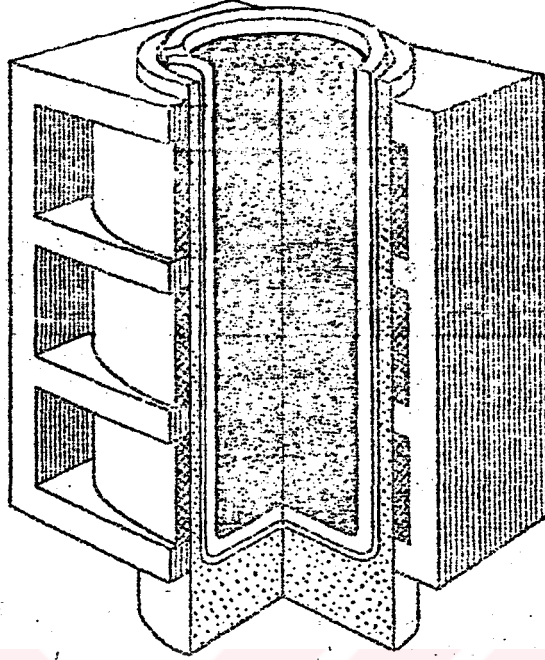
Avantajları:

Ergitme için düşük güç sarfıyatı, devamlı operasyonda oldukça ekonomik olması, düşük başlangıç maliyeti ve iyi güç faktörüdür.

Dezavantajları:

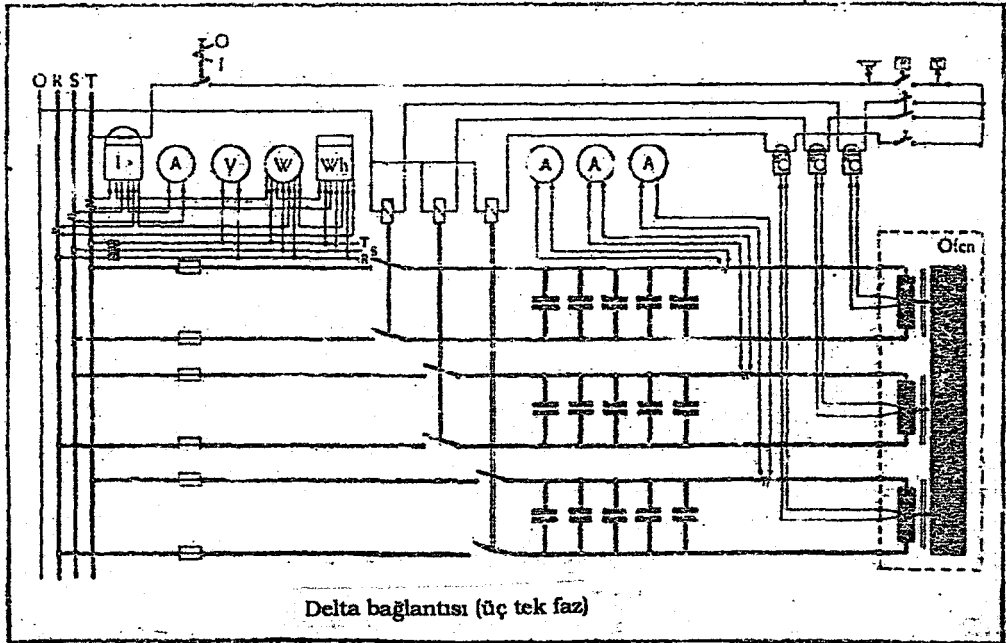
Tutma gücünün ergimenin henüz gerçekleşmediği dönemde yükseltilmesi gerekir. Halka içindeki malzeme katı ise soğuktan başlama zordur.

50 dev/saniyeli frekansta çalışan çelik potalı endüksiyon pota fırını

Prensip:

Şekil III.7

Pota üçfazlı bir transformatörün sekonder devresini temsil eder. Eddy akımı ile ısıtılır ve enerji şarja iletim (kondüksiyon) yoluyla nakledilir. Şebekeye üç fazlı bağlantı yapılır. Bir çelik veya demir pota gereklidir, 800 °C'ye kadar çıkan malzeme sıcaklıklarında birçok demir dışı metallerin ergitilmesi ve tutulması için uygundur.

Bağlantı:

Şekil III.8

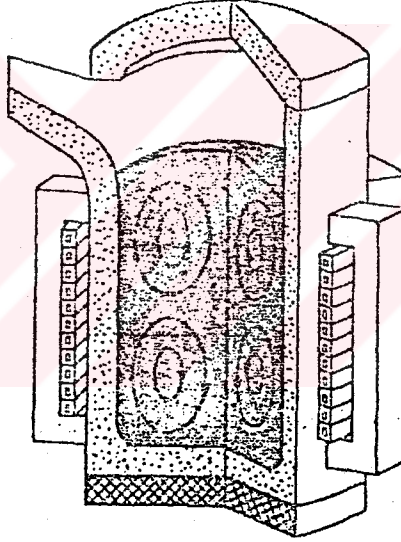
Avantajları:

Kolayca değiştirilebilen pota, büyük pota kapasitesi, uygun çalışma modu, yüksek ertme kapasitesi ve iyi güç faktörüdür.

Dezavantajları:

Sınırlı ertme sıcaklığı (800 °C) ve şarjın potanın çelik duvarı ile alaşım yapması tehlikesidir.

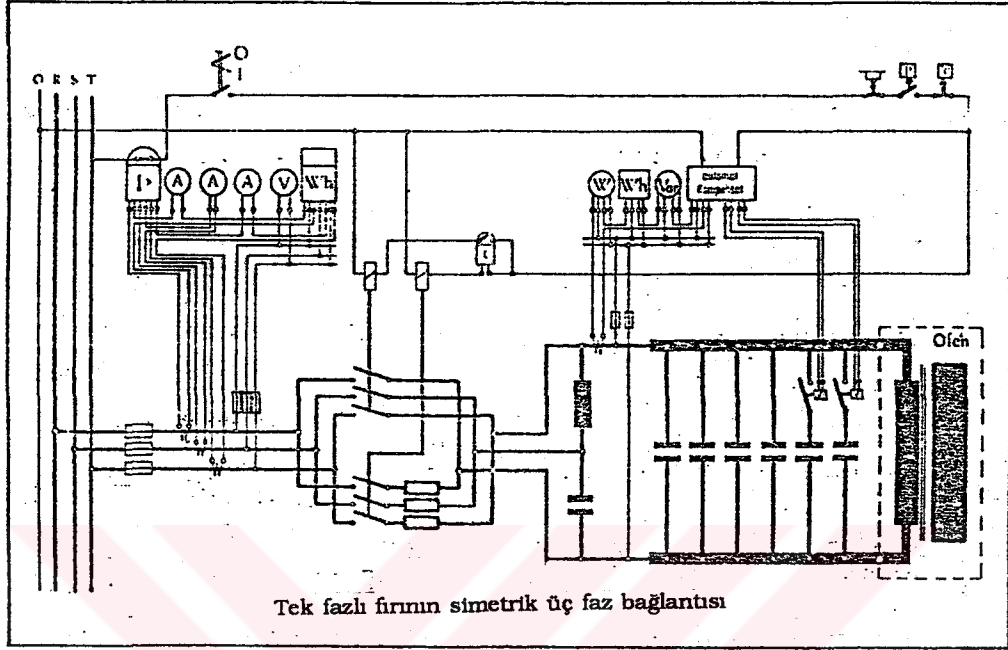
50 devir/saniye şebeke frekansında çalışacak seramik potalı endüksiyon pota fırını.

Prensip:

Şekil III.9

Şarj bir transformatörün sekonder direncini temsil eder ve enerjiyi doğrudan magnetik alandan alır (absorbe eder). Tek faz veya üç fazlı üç fazlı kaynağa bağlama dengeleme ekipmanı vasıtasıyla yapılabilir. Fırının güç faktörü bir kapasitör grubu vasıtasıyla geliştirilebilir.

İlk ertme için yalnızca iri veya ergimiş şarj yapılmalıdır. Talaş vs. ihtiyaç eden bir ince şarj ergimiş emme tabakasıyla yapılabilir.

Bağlantısı:

Şekil III.10

Avantajları:

Astarlı veya grafik pota kullanılabilir. Her iki potada kolayca değiştirilebilir. Çaişma metodu ekonomiktir. Belirli bir banyo karıştırması sağlanabilir. Direkt şebekeye bağlanabilir.

Dezavantajları:

Tanımlanan hacimden dolayı, ergitme kapasitesi sınırlıdır.

III.2.1.2. Frekans Üçleme Sistemi (150/180 Hz)

Frekans üçleme sistemleri, özel yapıda transformatörler ve filtreler kullanılarak üç faz şebeke frekanslı sistemde temel bileşenler süzülüp, üçüncü harmoniklerin toplamı tek faz kaynak şekline dönüştürülerek gerçekleştirilmektedir. Hareketli parça olmaması bakım ve onarımı azaltır. Büyük ve orta büyüklükte ergitme fırınları ile dövme işlemlerinde nadiren kullanılmaktadır. Tasarım güçlükleri ve işlem hızının düşük olması nedeniyle statik evirgeçlerin gelişiminden sonra bu sistem pek kullanılmamaktadır.

III.2.2. Orta Frekanslı Sistemler (500 Hz - 10 kHz)

III.2.2.1. Motor-Jeneratör Sistemleri (500 Hz - 10 kHz)

Endüksiyon ısıtıcıların seri üretime uyarlanabilmeleri daha küçük çaplarda ve hızlı ısıtma gerektiren işlemlerde kullanılma gereksinimleri çalışma frekansının yükseltilmesini gerektiriyordu. Bu amaçla asenkron motorlar ile sürülen, çıkış frekansları 500 Hz ile 10 kHz arası değişen jeneratörlerin kullanımı 1970'lerde yaygınlaştı. Motor-jeneratör grubu 500 kW'lık güçlere kadar kullanılabilir. Daha büyük güçlerde tek grup yerine birden fazla grup kullanılması gerekir. Güç ayarı ikaz akımı ayarlanarak yapılır. İlk yatırım maliyeti yüksektir. Hareketli parça çokluğu sık bakım ve onarım gerektirir. Sabit frekanslı olmaları nedeniyle güç faktörü düzeltilmesi, çalışma anında güç faktörü gözlenerek kondansatör gruplarının devreye alınıp çıkarılmalarıyla sağlanır. Demir kökenli metallerde, belirtilen çalışma frekansını sınırlarında dalma derinliği 1 mm ila 10 mm arasında değişmektedir.

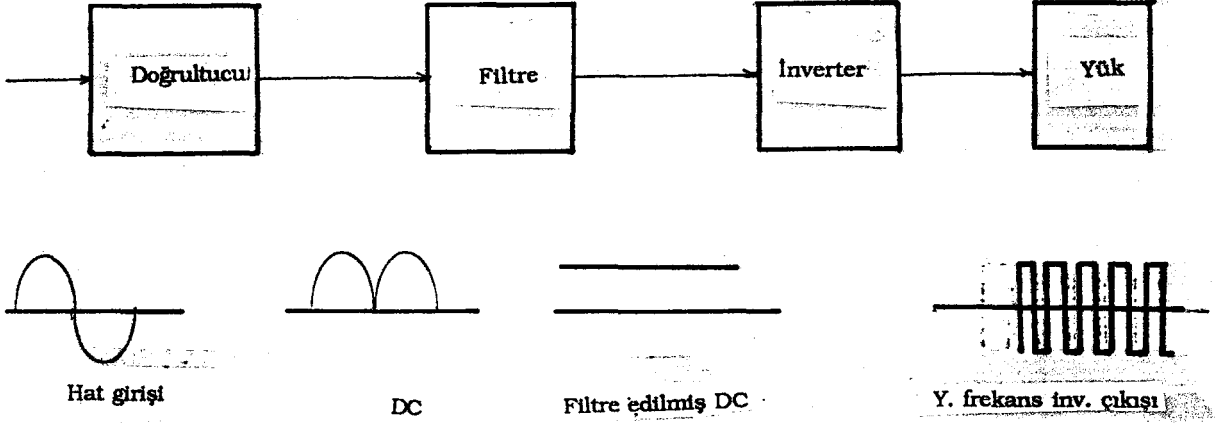
Güç kompanzasyonu kademeli olduğu için ara elemanlara ihtiyaç vardır. Verimleri düşüktür ve gürültülüdür. Arıza meydana geldiğinde onarımı uzun zaman gerektirir.

Statik evirgeçlerin yaygınlaşması ile motor jeneratör gruplarının kullanımını hızla azalmıştır.

III.2.2.2. Elektronik Sistemler (500 Hz - 50 kHz)

Şebeke frekansının yüksek frekanslara dönüşümü için en bilinen yol, AC gücü bir doğrultucu ile DC'ye ardından da bir inverter ile yüksek frekanslı bir AC'e çevirmektir. Doğrudan hat frekanslı AC gerilimden yüksek frekanslı AC gerilim elde edebilen sistemler de vardır.

Şekil III.11'de böyle bir sistemin blok diyagramı görülmektedir.



Şekil III.11

Böyle sistemlerin en büyük üstünlükleri güç ayarının ve güç kompanzasyonunun tam otomatik olarak yapılabilmesi ve kullanımının kolay olmasıdır. Bunun dışında az yer kaplamaları, sık bakım ve onarım gerektirmemeleri, değişen yük şartlarında çalışma frekansı değişimi ile kaynak yük empedans uyumu sağlayarak sürekli maksimum güç iletme olanağı, güç kontrolünün kolay olması ve % 90 verimin üzerine çıkılabilmesi kullanımlarını daha yaygın hale getirmiştir.

III.2.2.2.1. Tristörlü Sistemler

Özellikle 500 Hz ile 5 kHz arasındaki frekanslarda ve büyük güçlerde çok etkindir. Büyük akımlarda iletim kayıpları çok küçüktür. En büyük problemleri komütasyonları için, yük akımının kapama zamanı kadar kesilmesinin gerekmesidir. Hızlı tristörlerde bu süre 8-100 s arasındadır. Bu yüzden 5 kHz'in üzerindeki frekanslarda tristörü kullanmak zorlaşır.

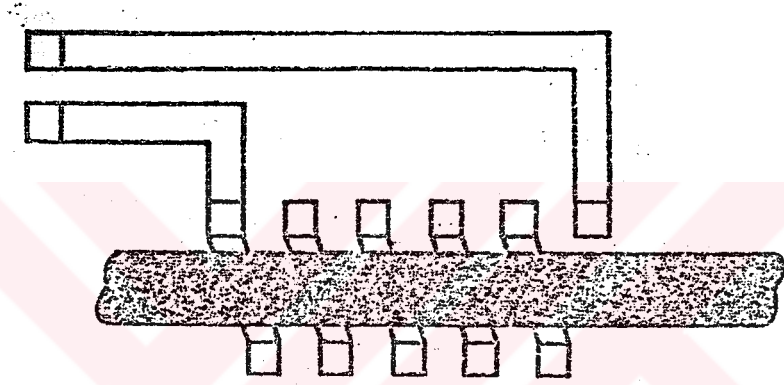
Endüksiyon fırınlarında yaygın olarak kullanılan tristörlü sistemler bir sonraki konu orta frekans inverter devreleri analizinde ayrıntılı olarak inceleneceği için burada üzerinde fazla durulmayacaktır.

III.2.2.2.2. Diğer Yarı İletkenli Sistemler

Bu sistemler genelde, 10 kHz'in üzerindeki frekanslarda çalışan küçük güçlü işlemlerdir. Satın sertleştirme ve kaynak amaçlı kullanılırlar. Güç transistörleri, GTO ve GÜÇ MOSFET'leri ile gerçekleştirilir.

III.2.2.3. Orta Frekansta Çok Kullanılan Fırın Tipleri

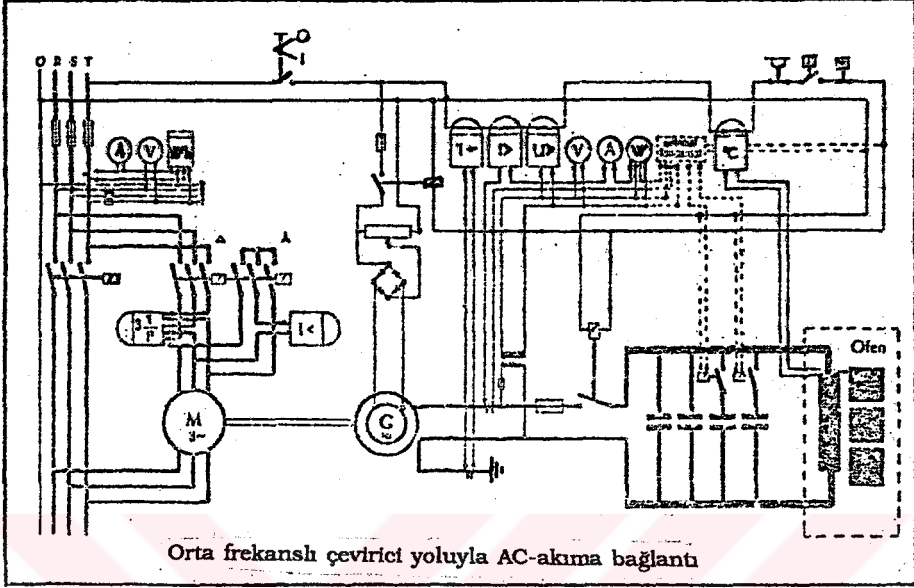
Orta frekansta ısıl işlem için Şekil III.12'de prensip şeması verilmiştir.



Şekil III.12

Prensip:

Metal şarjı, tek fazlı hava çekirdekli tansformatörün sekonder direnci olarak ısıtılır. Isıtma bölgesinin genişlemesi frekansa, enerji konsantrasyonuna ve endüksiyon süresine verilmiş boyutlarda bağlıdır. Dövme veya presleme işlemleri için komple ısıtmadan yüzey sertleştirme için yüzey ısıtmasına kadar bütün ara basamaklarda işlem mümkündür. Bir çevirici yoluyla üç fazlı bir kaynağa bağlantılıdır. Kapasitör bankı (yığını) yoluyla güç faktörü düzeltilmesi yapılır. Isıtma için en küçük boyutlar, en küçük yüzey sertleştirme derinliği 1.5-2 mm'dir.

Bağlantısı:

Şekil III.13

Avantajları:

Çapaksız ısıtma, mevcut boyutlara iyi uyum, gelişmiş regülasyon düzenlemeleri, sabit gerilim otomatik hale getirilerek ve otomatik zamanlama mekanizması yoluyla işlemlerin tekrarlanabilir olması, çok yönlü olarak üretim hattına kolayca yerleştirilebilir olmasıdır.

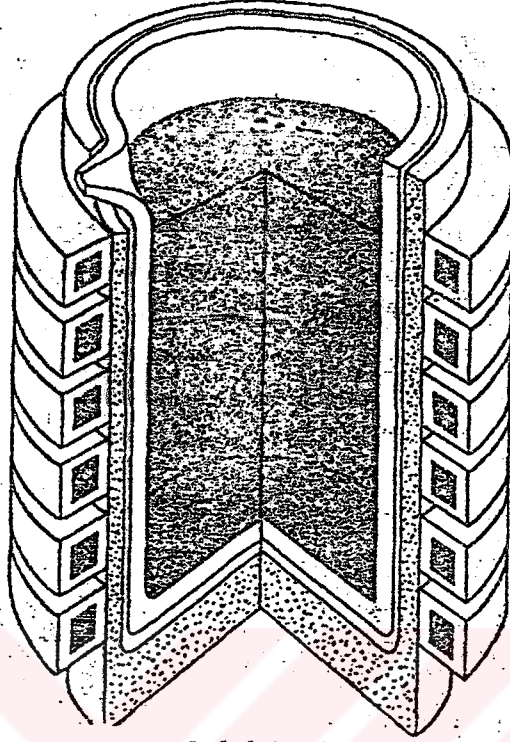
Çevirici ve ana şartel özel bir odaya yerleştirilmelidir.

Dezavantajları:

Bir çevirici (konvertör) gerektirmesidir.

500-10.000 devir/saniyeli orta frekanslı endüksiyon ısıtma fırını için;

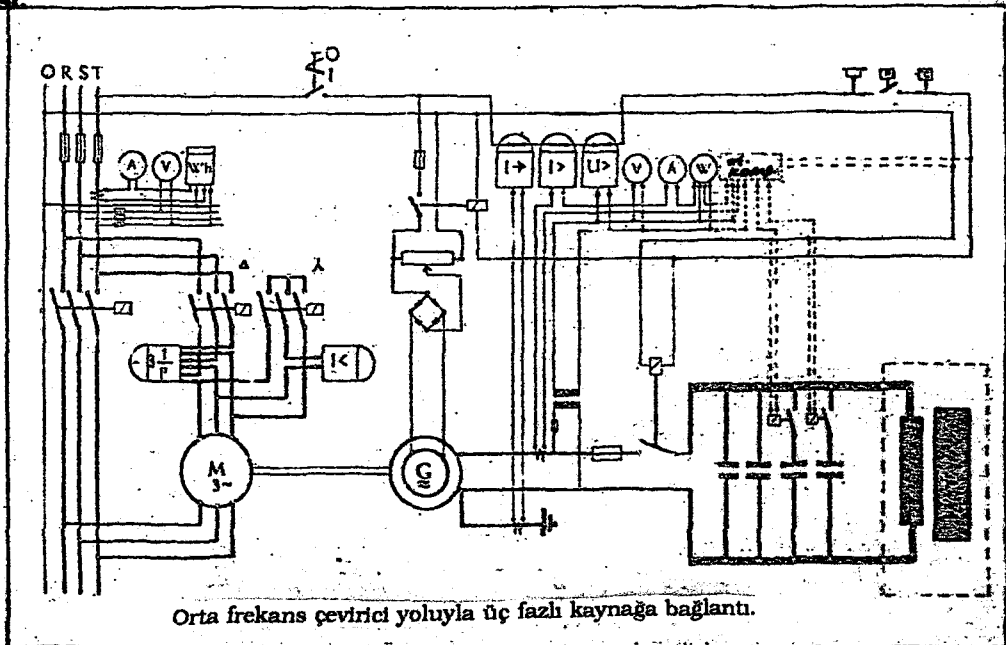
Prensip:



Şekil III.14

Şarj tek fazlı hava çekirdekli transformatörün sekonder sargısını temsil eder ve enerjiyi direkt magnetik alandan alır. Aktif güç orta frekanslı şebeke tarafından beslenen motorun çalıştırdığı jeneratörden alınır. Fırının reaktif gücünü bir kapasitör bankı sağlar.

Bağlantısı:



Şekil III.15

Avantajları:

Çok iyi güç düzenleme araçları ve sonuçta da çok iyi sıcaklık, iyi manyetik kuple tek fazlı sarım yoluyla sağlanır. Pota kolayca değiştirilebilir, çalışması ekonomiktir, soğuktan ergitime geçmek mümkündür ve bütün metal türleri ergitilebilir.

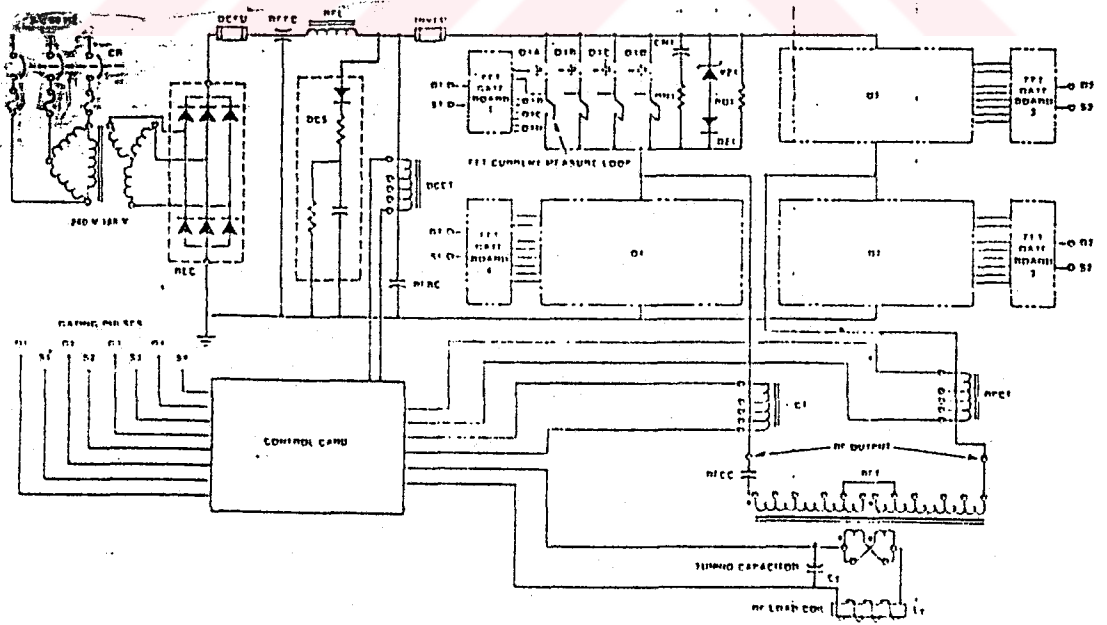
Dezavantajları:

Orta frekansta enerji üretmek için döner bir konverter (çevirici) seti gerektirmesidir.

III.2.3. Yüksek Frekanslı Sistemler (50 kHz ve Üzeri)

Radyo Frekanslı Sistemler (50 kHz - 10 MHz). Kaynak ile birleştirme ve 0.1 mm ile 2 mm arası dalma derinliklerinde yüzey sertleştirme işlemleri gibi yüksek ısıtma hızı gerektiren işlemlerde kullanılmaktadır. Güç kaynağı temelde (lamba) tüp kullanılarak c tipi titreşim üreticinden oluşturulmaktadır.

Şekil III.16'da endüksiyonla ısıtma için geliştirilmiş 1 kW'lık rezonans inverterin temel devresi görülüyor.



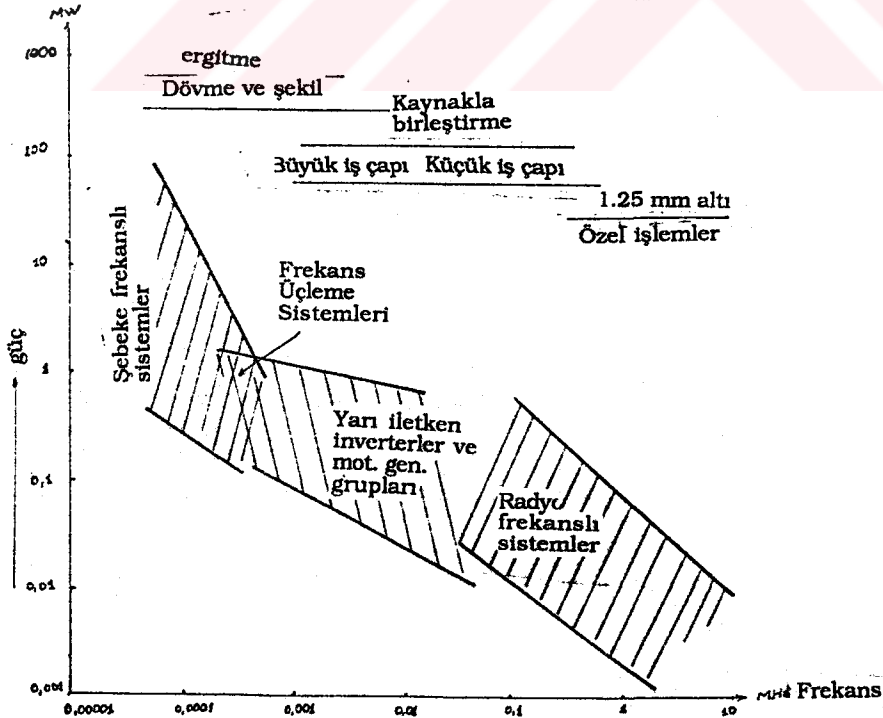
Şekil III.16

Daha yüksek güçler için paralel bağlı MOSFET transistörleri kullanılır.

Yüksek frekans anahtarlama kullanılan ISOFET, GaASFET gibi elemanlar anahtarlama hızı açısından güç MOSFET'ini asacak durumda olmalarına rağmen yüksek frekans anahtarlama en uygun eleman güç FET'leridir. RF güç MOSFET'leri 10 Mhz'e kadar frekanslarda anahtarlama yapabilir. Anahtarlama zamanlarda 50,100 ns civarındadır ve 500 kHz'e kadar frekanslarda büyük güç üretebilirler. IRF 450 gibi güç MOSFET'leriyle karşılaştırıldığında düşük güçlü elemanlardır.

MOSFET transistörleri endüksiyonla ısıtma uygulamaları için yarı iletken RF üreticilerinde kullanılmaktadır. Bu RF üretici 10 kHz ile 500 kHz arası frekanslarda tam güç çıkışına sahip bir yük rezonansını izleyen rezonans inverteridir. Çıkış güç seviyeleri endüksiyon bobini 200 kVA ve daha yukarısı için (400 V ve 600 A) kW seviyesindedir. Yarı iletken RF üretici endüstride daha çok bilinen düşük frekans güç inverterine benzer karakteristiklere sahiptir.

Endüksiyon ısıtma işlemlerinde kullanılan güç kaynakları, çalışma frekansları, güçleri ve kullanım alanlarına göre şekil III.17'de gösterilmiştir.



Şekil III.17

IV. ORTA FREKANS İNVERTER DEVRELERİ ANALİZİ

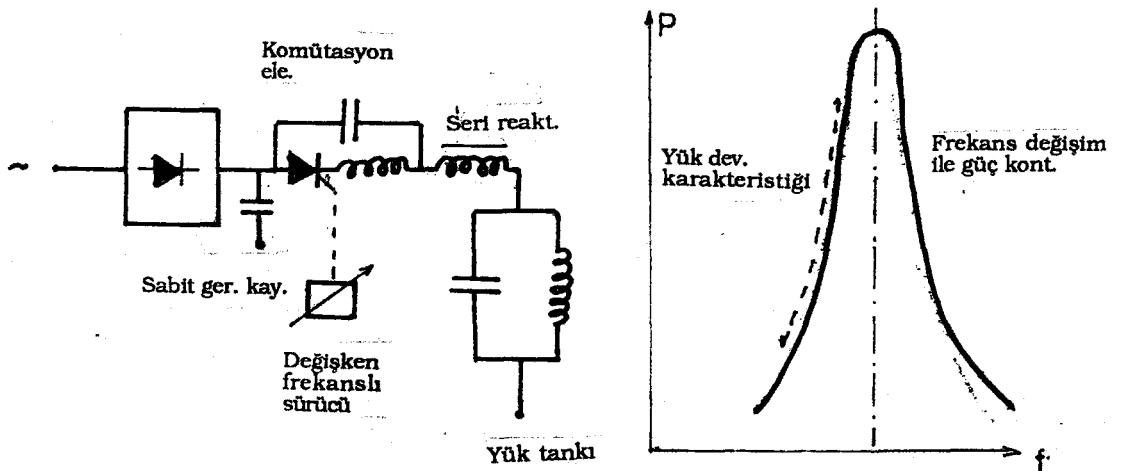
IV.1. GİRİŞ

Endüksiyonla ısıtma uygulamalarında kullanılan orta frekans statik güç konvertörleri temel olarak iki tiptir. Bunlar AC-DC-AC tip ve AC AC tip olarak sınıflandırılabilir.

Endüksiyon ısıtma işlemlerinin çoğunda kullanılan inverterler yük rezonanslı ve tarama frekanslı tiplerdir.

Tarama frekanslı inverter orta büyüklükte ısıtma ocaklarında motor-generatör sistemleri yerine yeni bir seçenek olarak geliştirilmiştir. İnverter çalışma frekansının yük rezonans frekansını takip etmesiyle değişen yük şartlarında kaynak-yük empedans uyumu sağlanmış olur. Bu yöntemle yüke sürekli maksimum güç aktarımı mümkündür. Geniş yük değişim sınırlarında çalışma olanağı sağlamasına rağmen güç kontrolünün yük kalite faktörüne (Q faktörü) bağımlı olması nedeniyle güç kontrolü sınırlıdır.

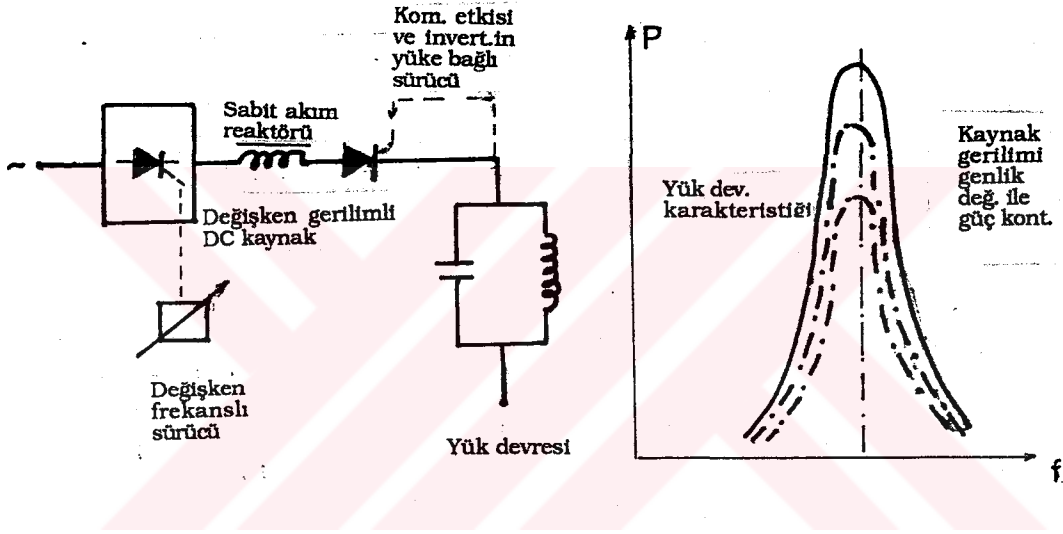
Tarama frekanslı inverter sistemi blok şeması ve güç kontrol yöntemi şekil IV.1'de verilmiştir.



Şekil IV.1

Komütasyon yük dışında elemanlar kullanılarak gerçekleştirilmektedir. Bu elemanlar üzerindeki kayıplar aynı ısıtıcının daha düşük yüklerde kullanılması halinde verimin düşmesine neden olur. Bu sebeple orta büyüklükte ve küçük çaplı fırınlar için yük rezonans inverleri karşıt bir seçenek olmuştur.

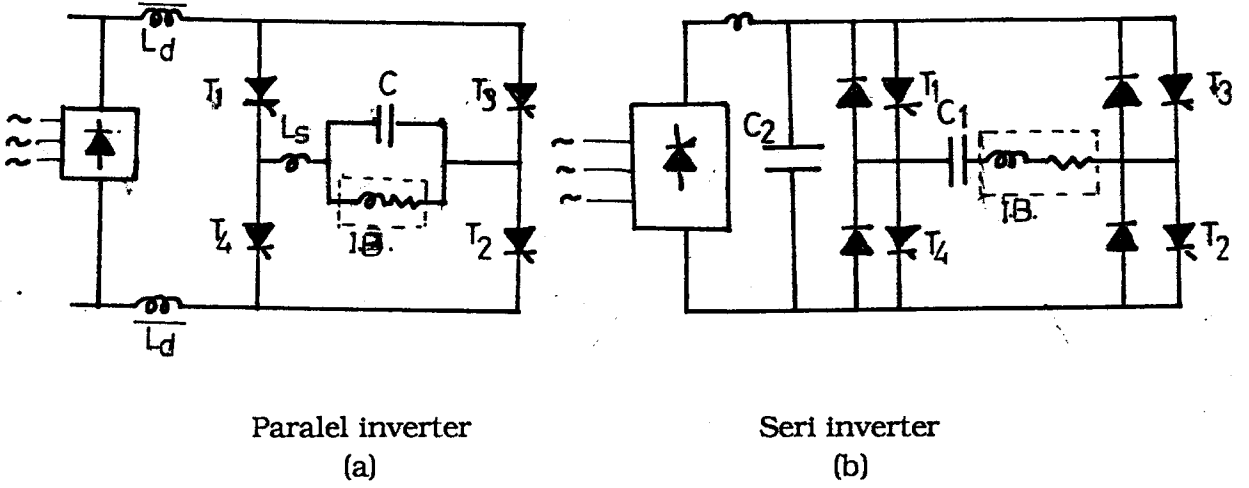
Yük rezonanslı inverler sistemi blok şeması ve güç kontrol yöntemi Şekil IV.2'de verilmiştir.



Şekil IV.2

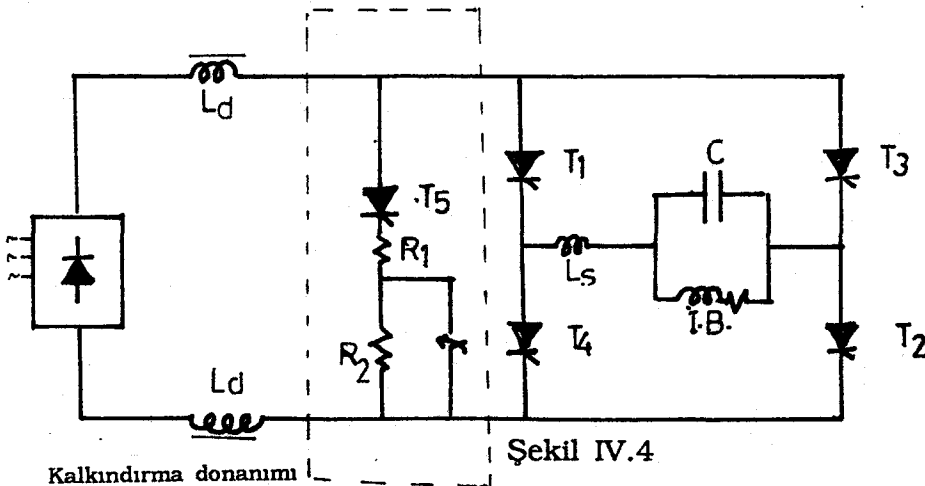
Bu sistemde güç kontrolü inverter besleme gerilimi genliğinin kontrolü ile sağlanır ve yük kalite faktöründen bağımsızdır. Komütasyon yük elemanları ile gerçekleştirildiğinden verim bir önceki kısımda anlatılan sisteme göre daha yüksektir. Geri besleme ile inverter çalışma frekansı, yük rezonans frekansını takip ederek değişen yük şartlarında sürekli kaynak-yük empedans uyumu sağlar. Değişen yük şartlarında yüke maksimum güç aktarımı gerçekleştirir.

Yük rezonans inverterini şekil IV.3 a ve b'deki gibi iki şekilde gerçekleştirmek mümkündür.



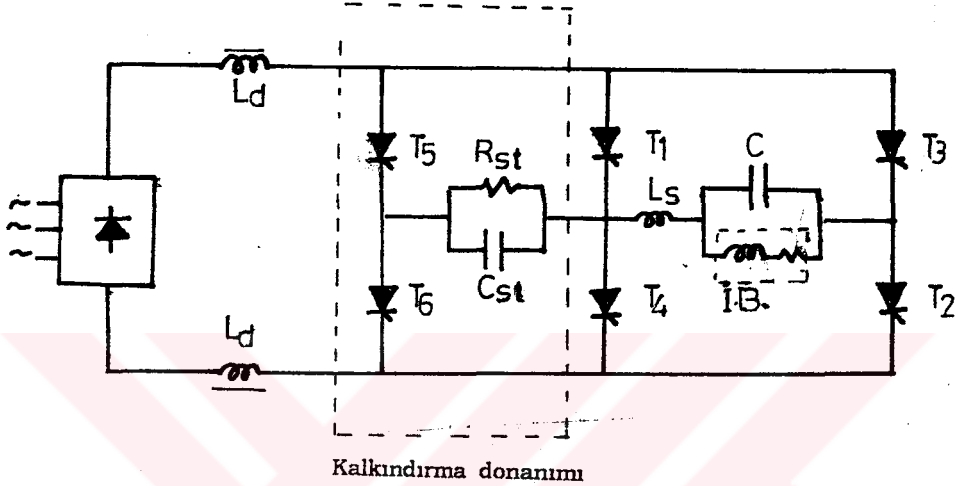
Şekil IV.3

Paralel inverter sabit akım beslemeli olup faz tristörlü doğrultmalı ve büyük bir akım reaktörü (L_d) ile sürülmektedir. Yükün tank devresi üzerinde gerilim dalga şekli sinüsoidal tristör akımı dalga şekli, kare dalgadır. L_d sabit akım reaktörü inverter sürülme akımında amaçlanan dalgalanma genliğine göre hesaplanır. Endüksiyon bobininin çekeceği reaktif gücün paralel kondansatör tarafından sağlanması nedeniyle tristör akımı endüksiyon bobini akımından azdır. Bu sistemin kendiliğinden kalkınması mümkün olmadığından, başlangıçtan normal çalışma koşulları sağlanıncaya kadar ek kalkındırma donanımına gerek vardır. Kalkındırma için şekil IV.4 ve Şekil IV.5'de iki örnek verilmiştir.



Kalkındırma donanımı

Şekil IV.4'de gösterilen devrede kalkınma için T_5-T_2 , T_3-T_6 , T_5-T_2 ... sırası ile tristör grupları ilettime alınıp, C kondansatörü üzerinde komütasyon için yeterli gerilim genliğine ulaşınca kadar bu işleme devam edilir, daha sonra T_1-T_2 , T_3-T_4 , T_1-T_2 ... sırası ile tristör grupları ilettime alınarak normal çalışmaya geçilir.

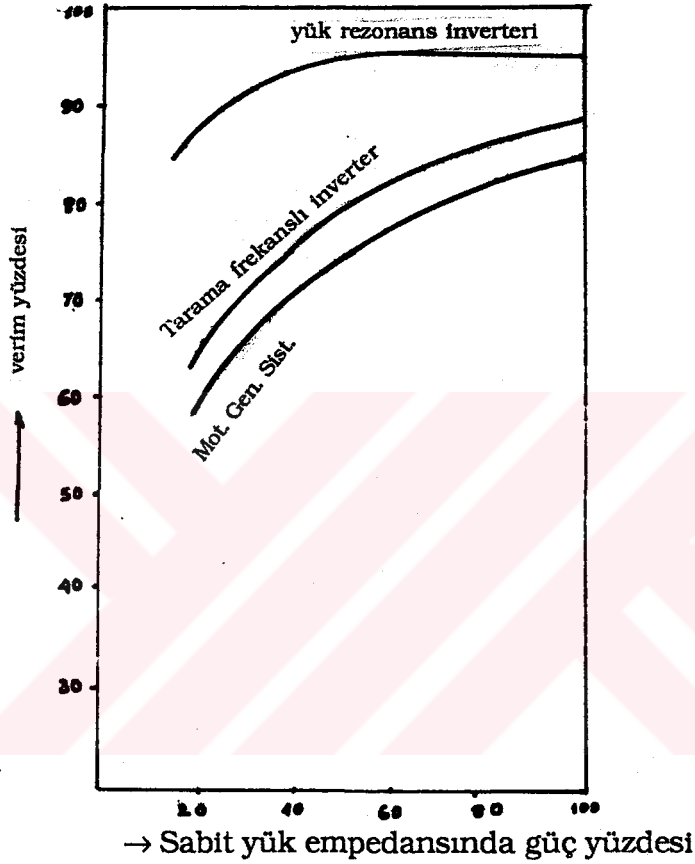


Şekil IV.5

Şekil IV.5'de gösterilen devrede başlangıçta T_5 tristörü ilettime alınır. $L_d-T_5-R_1-C_{st}$ üzerinden üstel artan akım akmaya başlayacaktır ($R_1 \ll LR_2$ olduğundan $L_d-T_5-R_1-R_2$ kaynak ve $C_{st}-R_2$ çevrimleri bu periyotta ihmal edilir). i_{L_d} inverter çalışma koşullarındaki genliğe ulaştığı an T_1-T_2 veya T_3-T_4 temel tristör gruplarından herhangi bir grup ilettime alınır. Bu anda yük gerilimi sıfır olduğundan, C_{st} kondansatörü üzerindeki gerilim R_1-T_5 -yük- C_{st} çevrimiyle boşalmaya çalışacak, böylece T_5 tristörü kesime zorlanacaktır. i_{L_d} akımının, inverter çalışma akımına eşitlenmesi koşulundan sonra T_1-T_2 , T_3-T_4 , T_1-T_2 ... sırası ile tristör grupları ilettime alınarak inverter normal çalışmasına geçirilir. T_5 tristörü susturulduğundan C_{st} kondansatörü R_2 direnci üzerinden boşalarak ikinci bir kalkınma işlemi için hazır duruma gelir.

Endüksiyon fırınlarında tarama frekanslı inverler ile yük rezonans frekanslı inverler arasındaki seçim; yük şartları, yük karakteristiğinin değişim sınırları, uygulama tipi ve verim dikkate alınarak yapılır.

Şekil IV.6'da tarama frekanslı, yük rezonans frekanslı inverter sistemleri ile motor-generatör grubu için sabit yük empedansı şartı altında çıkış güçlerine göre sistem verimlilikleri gösterilmiştir.



Şekil IV.6

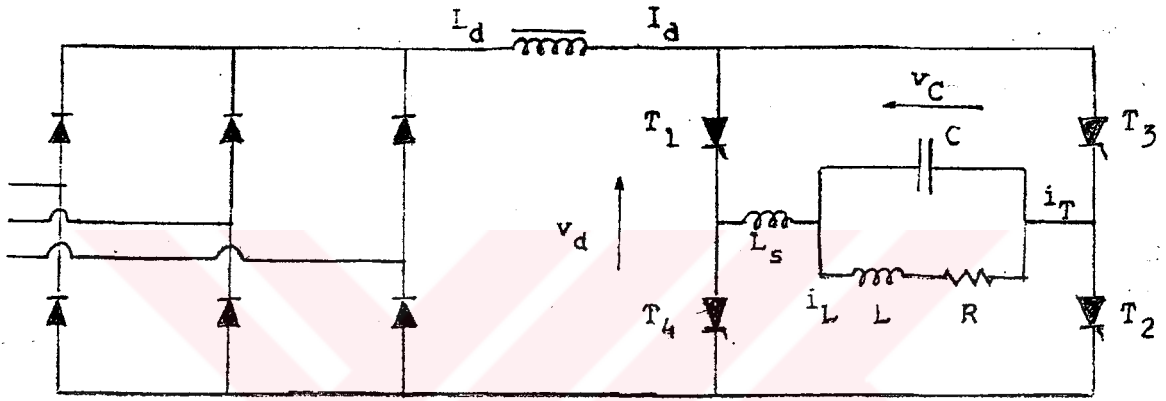
IV.2. DOĞRULTUCU-İNVERTER DEVRENİN ANALİZİ

IV.2.1. Devrinin Çalışma Şekli

AC'den DC'ye dönüşüm darbe kontrollü veya kontrolsüz köprü doğrultucu yoluyla gerçekleştirilebilir. Analiz için doğrultucunun çıkış gerilimi sabit kabul edilecektir.

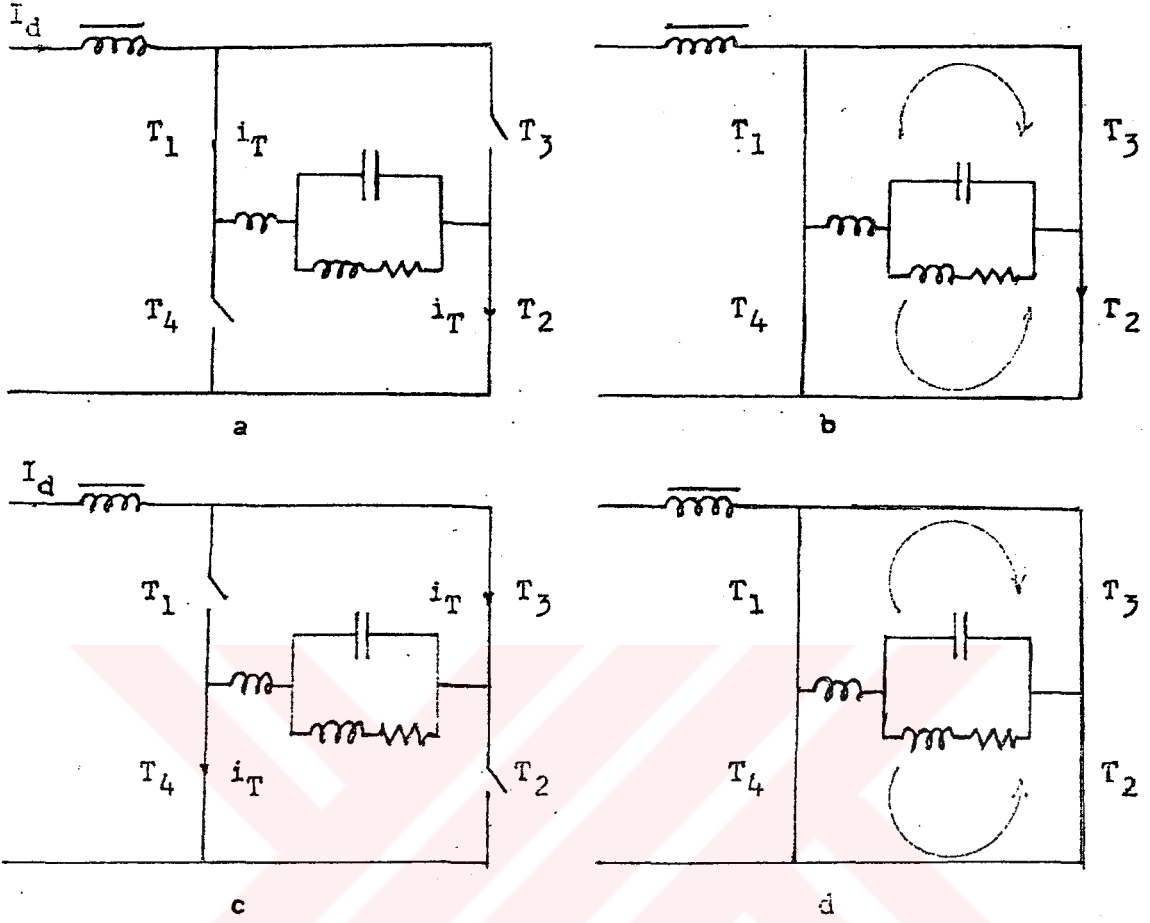
Geniş bir kararlı reaktör, L_d , doğrultucunun çıkışına yerleştirilir. Bu yolla hemen hemen doğrultucuyu sabit bir akım besler. Temel inverter dört

tristörden oluşur. Endüktans fırını bir L endüktansı ve bir R direnci ile modellenenebilir. Bir paralel kapasitör C ise fırına komütasyon için gerekli reaktif gücü sağlamak için bağlanır. Böyle bir doğrultucu-inverter temel devresi şekil IV.7'de gösterilmiştir.



Şekil IV.7. Doğrultucu-inverter devresi

Sürekli hal boyunca çalışmada; DC akım yük akımının alternatif biçimde tristörleri bir ve diğer yönde ateşlemesiyle sağlanır. Böylece alternatif yük akımı I_T , tristörlerin anahtarlarına frekansındaki doğru akım I_d 'ye tepe değeri eşit dikdörtgen dalga şeklini alır. Şekil IV.8, tristörleri ideal kabul edilen bir inverterin dört anahtarlama modunu gösterir.



Şekil IV.8. İnverterin dört anahtarlarına modu

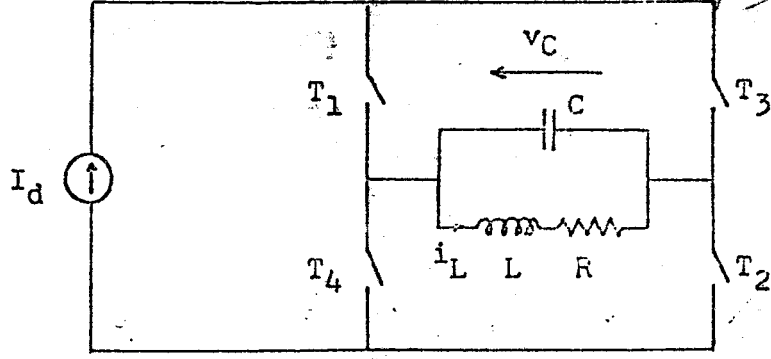
- 1 ve 2 thristörleri iletimde
- Komütasyon yönü 1 ve 2'den 3 ve 4'e
- 3 ve 4 thristörleri iletimde
- Komütasyon yönü 3 ve 4'ten 1 ve 2'ye.

IV.2.2. Sürekli Hal Çalışması

Sürekli hal çalışmasının analizi için, aşağıdaki kabuller yapılır.

- Tristörler ideal anahtar kabul edilir.
- Doğrultucu köprünün DC çıkışı kararlı (düzgün) reaktör L_d ile birlikte sabit bir akım kaynağı olarak kabul edilir.
- di/dt sınırlama endüktansı L_s önemsiz derecede küçük farzedilir.

Bu kabuller ışığında şekil IV.7'de verilen devre şekil IV.9'de gösterilen devreye dönüşür.



Şekil IV.9. Sürekli hal çalışması için eşdeğer devre

Şekil IV.9. Sürekli hal çalışması için eşdeğer devre iletimdeki T_1 ve T_2 'yi ele alalım ve ateşleme anında T_1 ve T_2 'nin başlangıç şartları şöyle olsun.

$$\begin{aligned} V_C(0) &= E_0 \\ I_L(0) &= -I_0 \end{aligned} \quad (IV.1)$$

verilen devrenin diferansiyel eşitlikleri aşağıdaki gibidir.

$$C \frac{dV_C(t)}{dt} = I_d - i_L(t) \quad (IV.2)$$

$$L \frac{di_L(t)}{dt} = V_C(t) - Ri_L(t)$$

Bunlar çözümlerse, yük gerilimi ve akımı için;

$$V_C(t) = RI_d - \frac{\omega_0}{\omega} e^{-\alpha t} \left[(E_0 + RI_d) \sin(\omega t + \psi) - \frac{I_d + I_0}{C\omega_0} \sin \omega t \right] \quad (IV.3)$$

$$i_L(t) = I_d - \frac{\omega_0}{\omega} e^{-\alpha t} \left[\sqrt{\frac{C}{L}} (E_0 + RI_d) \sin \omega t - (I_d + I_0) \sin(\omega t - \psi) \right] \quad (IV.4)$$

bulunur.

$$\text{Burada: } \alpha = \frac{R}{2L}, \quad \omega_0 = \frac{1}{\sqrt{LC}}, \quad \omega^2 = \omega_0^2 - \alpha^2, \quad \cos\psi = \frac{\alpha}{\omega_0}$$

Endüksiyon ısıtma yükünün Q faktörü ($\omega L/R$), 2.5 ile 20 arası olduğu için ayrıca bazı yaklaşımlar yapılabilir.

$$\frac{\omega_0}{\omega} = 1, \quad \psi = \frac{\pi}{2}$$

O zaman, eşitlikler aşağıdaki gibi verilebilir:

$$V_c(t) = RI_d - e^{-\alpha t} \left[(E_0 + RI_d) \cos \omega t - \frac{Id + I_0}{C\omega} \sin \omega t \right] \quad (\text{IV.5})$$

$$i_L(t) = Id - e^{-\alpha t} \left[\sqrt{\frac{C}{L}} (E_0 + RI_d) \sin \omega t + (Id + I_0) \cos \omega t \right] \quad (\text{IV.6})$$

Sürekli hal şartları altında, devre simetrik olduğu için, aşağıdaki şartlar tatmin edici olur.

$$i_L(T/2) = -i_L(0) = I_0 \quad (\text{IV.7})$$

$$V_c(T/2) = -V_c(0) = E_0 \quad (\text{IV.8})$$

$$i_L(T/2) = Id + e^{-\pi/2Q} (Id + I_0) = I_0 \quad (\text{IV.9})$$

$$V_c(T/2) = RI_d + e^{-\pi/2Q} (E_0 + RI_d) = E_0 \quad (\text{IV.10})$$

burada, $Q = \omega L/R$ 'dir.

$i_L(T/2)$ ve $V_c(T/2)$ eşitliklerinden, başlangıç şartları için aşağıdaki kabulleri yapabiliriz.

$$I_0 = K \cdot Id \quad (\text{IV.11})$$

$$E_0 = KRId \quad (\text{IV.12})$$

Burada, $K = \frac{1 + e^{-\pi/2Q}}{1 - e^{-\pi/2Q}}$ 'dur.

I_0 ve E_0 değerlerini (IV.5) ve IV.6) eşitliklerinde yerlerine yerleştirecek yük gerilimi ve akımı eşitlikleri aşağıdaki gibi olur.

$$V_c(t) = R \cdot I_d (1 - e^{-\omega t/2Q}(1+K) (\cos \omega t - Q \sin \omega t)) \quad (IV.13)$$

$$I_L(t) = I_d (1 - e^{-\omega t/2Q}((1+K) \cos \omega t + K/Q \sin \omega t)) \quad (IV.14)$$

Bu eşitlikler T_1 ve T_2 'nin iletim periyodu içi geçerlidir. T_3 ve T_4 'ün iletime uygun, bir sonraki yarım devir için, başlangıç şartları E_0 ve I_0 alınan uygulamada aynı eşitlikler geçerlidir. Analize uygun dalga şekilleri şekil IV.10'dadır. Bu dalga şekilleri thristörlerin ideal anahtar farzedildiği durumlarda geçerlidir.

Kapama zamanı çözümü $V_c(t_c) = 0$ çözümüyle verilen devre tarafından sağlanır. Bu da aşağıdaki eşitliğin çözümünü gerekli kılar.

$$(1+K) (\cos \omega t_c - Q \sin \omega t_c) - e^{\omega t_c/2Q} = 0 \quad (IV.15)$$

Fakat bu zaman devrenin osilasyon zamanına, ($\omega t_c < 0.35$), kıyasla küçük farzedilebileceği için aşağıdaki yaklaşımlar kabul edilebilir.

$$e^{-\alpha t_c} = 1,$$

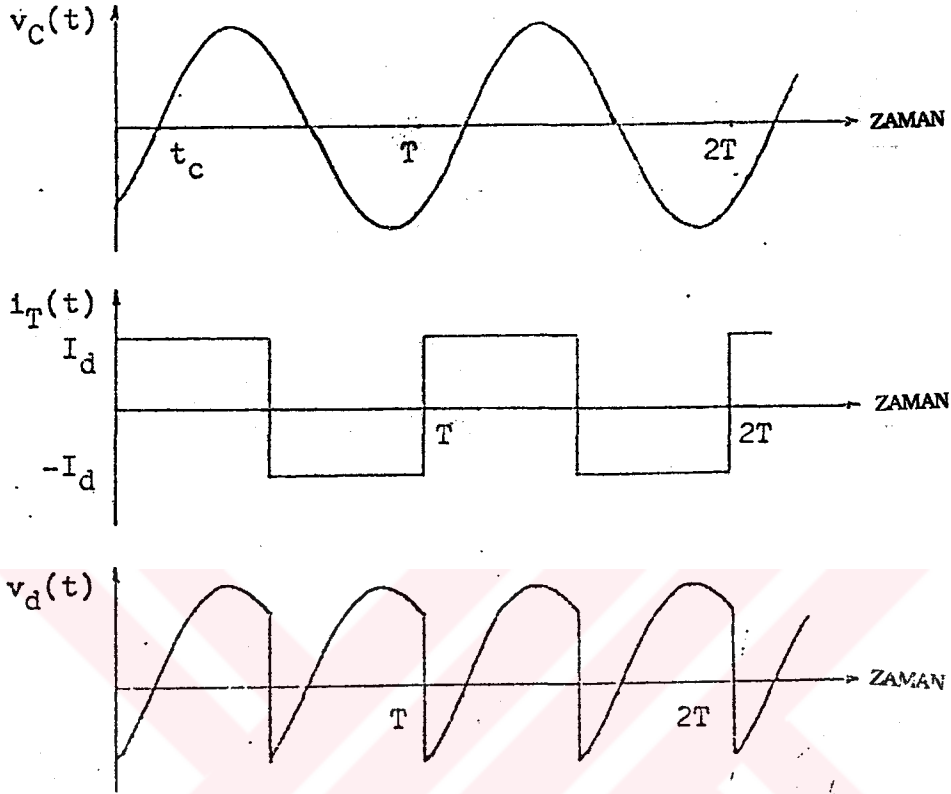
$$\sin \omega t_c = \omega t_c,$$

$$\cos \omega t_c = 1$$

O zaman, (IV.15) eşitliğinin çözümü:

$$\omega t_c = 1/2Q(1 + e^{-\pi/2Q}) \quad (IV.16)$$

olur.



Şekil IV.10 İnverter gerilimi ve akımının dalga şekilleri

- a) Çıkış yük gerilimi
- b) İnverter akımı
- c) İnverter giriş gerilimi

IV.2.3. Id Akımının Hesaplanması

Analiz üzerinde, sabit akım kaynağı yerine gerilim kaynağı E ve kararlı endüktör Ld yerleştirildiğini farzedelim. Sürekli hal boyunca Ld üzerindeki gerilim çıkış frekansının bir yarım devri sonunda sıfırdır. Bu şöyle formüle edilir:

$$E - R_d I_d - \frac{2}{T} \int_0^{T/2} V_c(t) dt = 0 \quad (IV.17)$$

Burada,

Rd: Reaktör Ld'nin iç direnci'dir. IV.17 eşitliğinin özümü Id'yi verir.

$$I_d = \frac{E}{R_d + R \left[1 + \frac{2}{\pi} (1 + K) Q \cos \frac{1}{Q} \right]} \quad (\text{IV.18})$$

ve eğer $R_d \ll R \left[1 + \frac{2}{\pi} (1 + K) Q \cos \frac{1}{Q} \right]$

ise o zaman;

$$I_d = \frac{E}{R \left[1 + \frac{2}{\pi} (1 + K) Q \cos \frac{1}{Q} \right]} \text{ olur.} \quad (\text{IV.19})$$

Analiz üzerinde ortaya çıkan R değeri uygulamanın tipine bağlıdır. Böylece, teorik olarak R'nin mümkün olan oranı hesaplanabilir.

Eğer Rd önemsizse o zaman Ld üzerindeki ani gerilim.

$$L_d \frac{di_d(t)}{dt} = E - V_c(t) \text{ olur.} \quad (\text{IV.20})$$

Vc (t)'nin değeri (IV.13) eşitliğinde yerleştirilirse, izleyen eşitlik kurulur.

$$L_d i_d = \left[(E - R I_d) t + (1 + K) Q R I_d \left(\frac{1}{\omega} \cos(\omega t - \frac{1}{Q}) \right) \right] + C_0 \quad (\text{IV.21})$$

C₀: İntegrasyon sabiti

(IV.21) eşitliğinin zamana göre türevi alınır ve sifira eşitlenirse, t₁ ve t₂'nin I_{dmax} ve I_{dmin}'e uygunluğu elde edilir.

$$t_1 = \frac{1}{\omega} \left[\frac{1}{Q} + \sin^{-1} \left(\frac{2}{\pi} \cos \frac{1}{Q} \right) \right]$$

$$t_2 = \frac{1}{\omega} (\pi - \omega t_1)$$

t_1 ve t_2 değerleri (IV.21) eşitliğinde yerlerine konulursa;

$$\frac{\omega L d}{R} = \frac{0.42(1+K)Q}{\gamma} \text{ olur.} \quad (\text{IV.22})$$

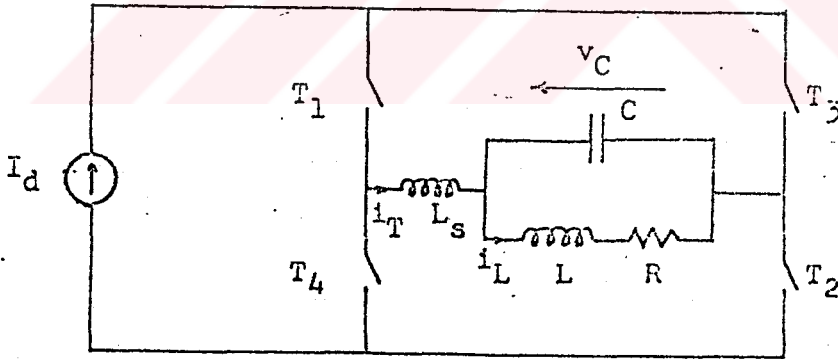
dalgalanma sabiti γ şöyledir:

$$\gamma = \frac{I_{d \max} - I_{d \min}}{I_d}$$

IV.2.4. L_s 'nin Etkisi

L_s 'nin bulunduğu eşdeğer devre şekil 45'dedir. L_s 'nin durumundan dolayı, thristörler derhal kapamaya geçemezler, böylece kısa bir zaman aralığı boyunca hep birlikte iletirler. İnverlerin çıkış akımı I_T daha fazla kare dalga olamaz.

İletimdeki L_1 ve L_2 'yi ele alalım ve T_3 ve T_4 'ün ateşleme anında başlangıç şartları aşağıdaki gibi verilmiş olsun:



Şekil IV.11. L_s 'nin bulunduğu eşdeğer devre;

$$I_T(0) = I_d$$

$$I_L(0) = I_o$$

$$V_c(0) = E_o$$

(IV.23)

Devrenin diferansiyel denklemleri kurulur;

$$L_s = \frac{di_T(t)}{dt} = -V_c(t)$$

$$L = \frac{di_L(t)}{dt} = V_c(t) - Ri_L(t) \quad (IV.24)$$

$$C = \frac{dV_c(t)}{dt} = i_T(t) - i_L(t)$$

Eşitliklerin çözümünde $L_s \ll L$ farzedilir.

$$i_T(t) = I_{oe}^{-R/Lt} + (I_d - I_o)\cos(1/\sqrt{L_s C})t - E_o\sqrt{C/L_s}\sin(1/\sqrt{L_s C})t \quad (IV.25)$$

$$V_c(t) = (I_d - I_o)\sqrt{L_s/C}\sin(1/\sqrt{L_s C})t + E_o\cos(1/\sqrt{L_s C})t \quad (IV.26)$$

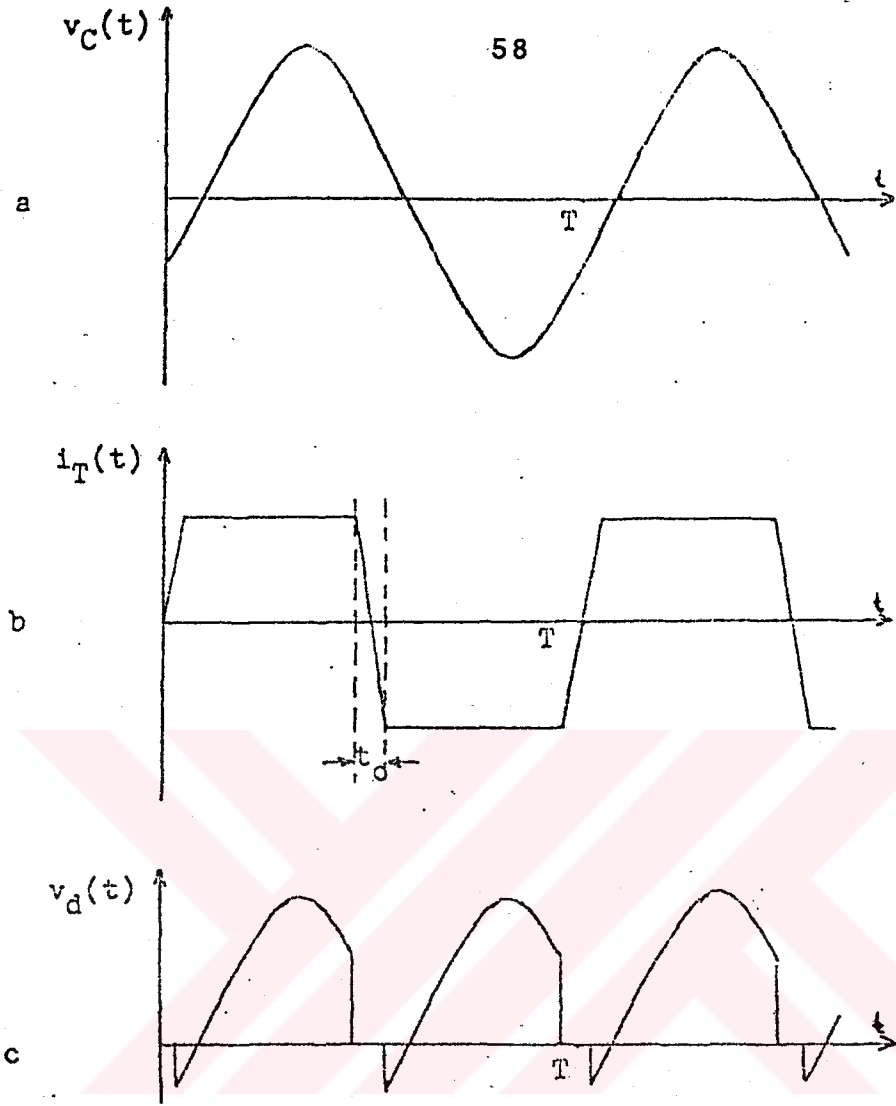
(IV.25 ve IV.26) eşitlikleri komütasyon periyodu için geçerlidir.

Aşma zamanı $\dot{I}_T(t_0) = -I_d$ 'nin çözümüyle verilir. Bu aşağıda verilen üstel eşitliğin çözümünü gerektirir.

$$I_{oe}^{-R/Lt_0} + (I_d - I_o)\cos(1/\sqrt{L_s C})t_0 - E_o\sqrt{C/L_s}\sin(1/\sqrt{L_s C})t_0 = -I_c \quad (IV.27)$$

L_s endüktörü tristor içindeki ani akım artışını sınırlamak için kullanılır. Fakat, diğer taraftan, o devrenin kapama zamanını azaltır, böylece çalışma frekansı maksimumundan küçük bir değere sınırlanmış olur.

L_s 'nin devreye girmesiyle Şekil IV.10'daki dalga Şekli Şekil IV.12'deki hali alır.



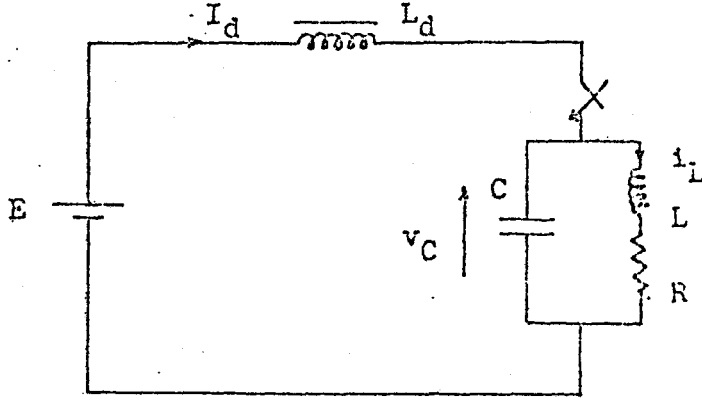
Şekil IV.12. İnvterler gerilim ve akımının L_s 'li dalga şekilleri

- a) Çıkış yük gerilimi
- b) İnvterter akımı
- c) İnvterter giriş gerilimi

IV.2.5. İnvterterin kalkınması

Bu amaç için; deverinin aniden kalkındığını düşünelim. Tristörlerin hiçbirisi henüz kalkınmamıştır. Köprü doğrultucunun çıkışını sabit gerilim kaynağı olarak düşünelim.

O zaman, tek bir darbe tristörlerden bir tanesine gönderilir. Sistemin eşdeğer devresi Şekil IV.13'dedir. Burada R_d ve R_c sırayla sabit reaktör ve yük bobininin iç dirençleridir.



Şekil IV.13 Kalkınmada eşdeğer devre

Şekilde verilen devrenin matematiksel modeli şudur:

$$L_d \frac{di_d(t)}{dt} = E - V_c(t) - R di_d(t)$$

$$L \frac{di_L(t)}{dt} = V_c(t) - (R + R_L) i_L(t)$$

$$C \frac{dV_c(t)}{dt} = i_d(t) - i_L(t)$$

(IV.28)

Başlangıç şartları da şöyledir:

$$V_c(0) = 0$$

$$i_L(0) = 0$$

$$i_d(0) = 0$$

(IV.29)

$L_d \gg L$ kabulüyle, (IV.28) eşitliklerinin kapasitör gerilimi için çözümü:

$$V_c(t) = \frac{E(R + R_L)}{R + R_L + R_d} \left(1 - e^{-\frac{R + R_L + R_d}{L_d} t} - \frac{EL}{L_d} e^{-\alpha_1 t} \cos \omega_1 t \right)$$

(IV.30)

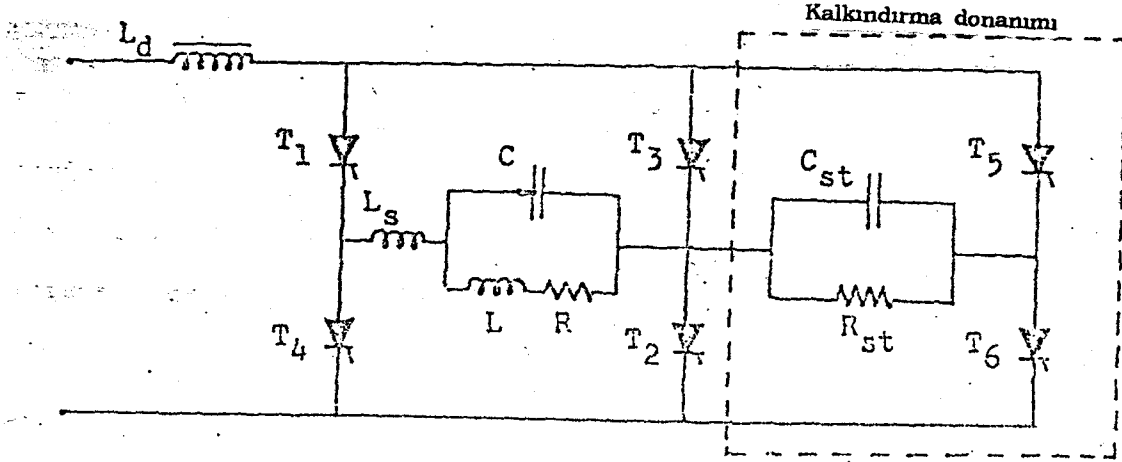
$$\alpha_1 = \frac{(R + R_L)L_d + R_d L}{2LL_d} \text{ ve } \omega_1 = \sqrt{\alpha_1^2 - \omega_0^2}$$

Kapasitör gerilimi değişiminin şekil IV.14'de gösterildiği ve eşitlik (IV.30)'de verildiği gibi olması halinde, kalkınma periyodunun en başında kapasitör gerilimi zaman sabiti $L_d/(R+R_L+R_d)$ 'ye eşit olarak yükselir. L_d büyük bir endüktans değere sahip olduğu için, şarj zamanı LC devresinin doğal osilasyonuyla kıyas edilirse göreceli olarak daha uzundur. Diğer taraftan R direnci hayali olduğundan, işparçasının ısınmaya hazırlanması ve eşdeğer devredeki akım değişikliklerinin ortaya çıkarılması yük içindeki akımı sifira indirir. Bobin sürekli hal konumuna gelir. Böylece sıfır başlama şartlarında kalkınma periyodu boyunca, kapasitörün şarj zamanı, zaman sabitini artırır. sonuç olarak, sürekli halde DC akım devrede akmaya başladığında, yük üzerindeki gerilim aşağıda verilen eşitlikteki değerde sabit farzedilir.

$$V_C(\infty) = \frac{R_L}{R_L + R_d} E \quad (IV.31)$$

$R_L \ll R_d$ olduğundan, bu gerilim değeri tristörleri komütasyona hazırlamak için yetersizdir. böylece kapasitörün uzun bir şarj zamanı olsa bile son gerilim kaynak geriliminin küçük bir çıkışı haline gelir.

Böylece, birinci devirde tristörlerin komutasyonuna yeter L_d içinden geçen sabit akım ayarını temin edecek bir kalkınma şekli gerekir. Bu çalışmada yardımcı kalkınma devresi Şekil IV.14'dedir. O iki yardımcı kapasitör ve dirençle paralel bağlı bir kapasitörden oluşur. İnverterin kalkınmasında ya 3 ve 6 ya da 2 ve 5 thristörleri önce ateşlenir. Bu yolla R_{st} içinden akmasına izin verilen akım, $L_d (R_{st}+R_d)$ 'e eşit olan zaman sabitini yükseltecektir.



Şekil IV.14 İnerler için kalkınma devresi

Sürekli durumda kapasitör üzerindeki gerilim

$$V_{C_{st}(\infty)} = \frac{R_{st}}{R_{st} + R_d} E \text{ olacaktır.} \quad (IV.32)$$

Kalkınma direnci, kapasitörün kalkınma gerilimini, çalışma frekansını dikkate almayarak, bilinen bir seviyeye sınırlar. L_d üzerinde sabit akımın oluşmasından sonra, dış bacaklardaki tristörler birkaç devir için ateşlenirler. Bu periyod boyunca Kalkınma kapasitörü iletimden çıkan tristörlerin kapasamasını temin eder. Ve sonuç olarak kompenzasyon kapasitörü uçlarında yeteri miktarda şarj temin edildiğinde kalkınma devresi çalışma dışı edilir.

Temel inverterler tristörlerinin ateşlenmesi ve inverterin çalışmaya kalkmasıyla 1. ve 2. tristörleri ile 3. ve 4. tristörleri Dönüşümlü olarak ateşlenirler.

IV.2.6. Devrenin Harmonik Analizi

Konverter farklı iki harmonikten oluşur: Doğrultucu ve inverter.

AC/DC dönüşümü için altı darbeli köprü doğrultucu kullanıldığı için giriş akımı 5., 7., 13., 17., 19., 23., 25.,... harmonikleri içerir. Akım harmo-

niklerinin genliği yaklaşık olarak esas dalğanın dizi numarasına bölünmesiyle elde edilene eşittir.

İnverterden gelen harmoniklerin hesabında şekil IV.12.c'yi gözönüne alalım. Üstüste konmuş (çakışmış) alternatif gerilim kararlı reaktör L_d uçlarında gözükür. DC devredeki harmoniklerin genliği aşağıdaki eşitlikten hesaplanabilir.

$$I_n = \frac{V_{dn}}{\omega_n L_d} \quad (IV.33)$$

Burada, n : harmoniklerin sıra numarası

Böylece harmoniklerin genliğinin hesaplanması gerilim harmoniklerinin genliğinin fouriyer analizi metoduyla hesaplanmasını gerektirir. Şekil IV.12.c'de verilen gerilim dalga şeklinin bir fouriyer analizi sadece çift harmoniklerin olduğunu göstermektedir.

$$V_d = \frac{2\bar{V}}{\pi} \cos \omega t_c + \frac{2\bar{V}}{\pi} \sum_{n=1}^{\infty} \left[\frac{1}{2n+1} (\cos(2n\omega(t + t_d) + \omega t_d)) + \frac{1}{2n-1} \cos(2n\omega(t + t_d) - \omega t_d) \right]$$

IV.34

Analizler, çok önemli akım harmoniklerinin inverter çıkış frekansının iki katına eşit olduğunu gösterir. Dahası, doğrultucudan alınan akım harmoniklerinin aksine, bu harmonikler sabit bir frekansa veya inverter çıkış akımının temel dalgasına göre belirlenen belli bir faz farkına sahip değildir. Sonuçta, DC devredeki akım harmoniklerinin genliğinin eşitlik (IV.33)'e göre L_d endüktansına bağlı olduğu görülür.

V. ENDÜKSİYON FIRINI BESLEME DEVRESİNİN KARAKTERİSTİKLERİ

V.1. İNCELEME

Bu konudaki mevcut geçerli bilgilerdeki gelişmeler öncelikle tek fazlı endüksiyon fırınlarında başarıyla gerçekleştirilmektedir.

Bu konuda motor-generatör gibi cihazlara değinilmeyecektir. Magnetik rezonasta çalışan cihazlar, inverterler ve osilatörlerin dengelenmesi çok fazlı beslendiği halde tek fazlı fırın bobini beslemesi gibi yapılmaktadır.

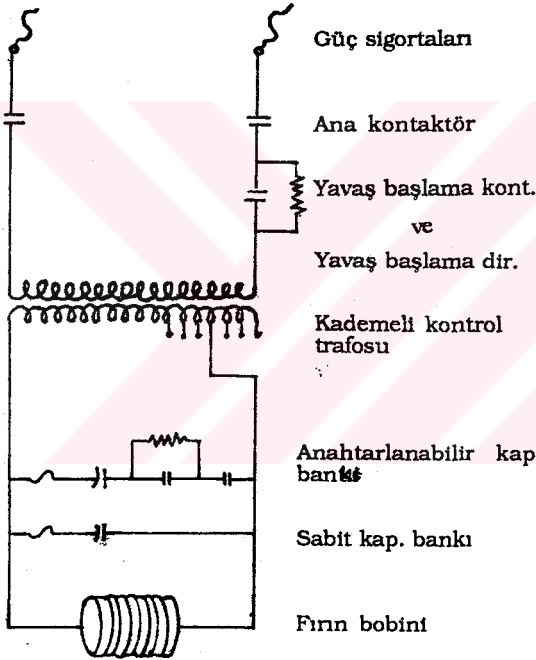
Tek fazlı sistem, iki hattan herbirine kolaylıkla ifade ve kontrol edilebi- len akım akışı sağlayan çok basit bir devredir. Hemen hemen tüm sistemle- rin orijinal donanımı endüksiyon bobinine uygun yeterli sekonder kapasitans ve güç faktörü üretim ünitelerinden ibarettir. Fırın bobinindeki değişik şartlarda kompanse yapabilmek için kapasitör bankı bölümlere ayrılmıştır.

Endüksiyon bobini ve ergimiş metal arasındaki magnetik bağlantı fırın içinde muhtelif değişiklikler oluşturmaktadır. Bu değişiklik sebepleri şunlardır:

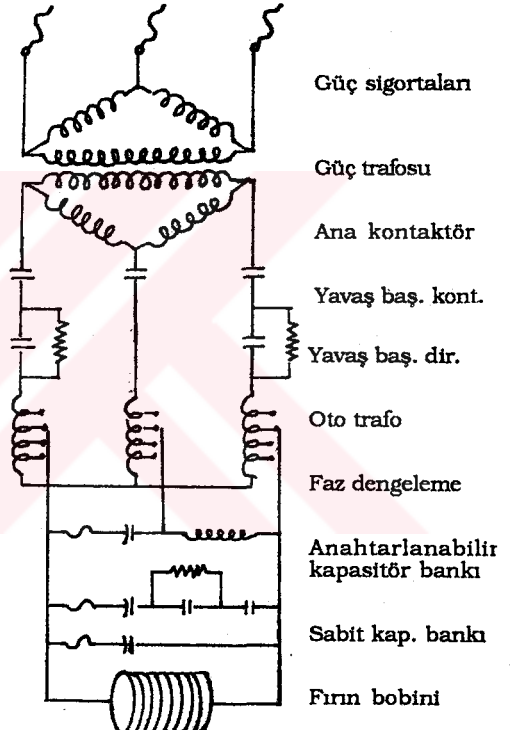
- a. Fırının normal sıcaklığından dolayı refraktör astar kalınlığının azal- ması.
- b. Fırındaki metal seviyesinde; dökme, yeniden şarj veya ergitme başlangıcı nedeniyle herhangi bir değişiklik.
- c. Sıcaklığın ve alaşımın bir fonksiyonu olarak metal şarjın elektrik özdirencinin değişimi.
- d. Metalin magnetik özelliklerinin, Curie sıcaklığının üzerinde ısıtılması sonucu, değişmesi.
- e. Fırın astar kalınlığının cüruf sıvanması sonucu artması.

Tek fazlı sistem güç faktörü sonuçlarının kolaylıkla kontrolüne izin verir ve böylece herhangi bir durum için verilen akım hattı, güç faktörü sayacı yoluyla gösterilen daha çok veya daha az kapasitörle kolaylıkla anahtarlanabilir.

Bobinin endüktansını azaltan astar aşınmaları ve yük bobin bağlantıları düzeltilmelidir. Bu da güç faktörü ünitesinde tutulması kullanışlı olabilen veya olmayabilen daha fazla kapasitör gerektirir. Eğer bu olay tek fazlı bir dizaynda oluşursa sadece gücü tam yük akımındaki seviyeyi aşmayacak şekilde azaltılmak gerekir (Şekil V.1'de).



Şekil V.1. Tipik tek fazlı güç devresi diyagramı

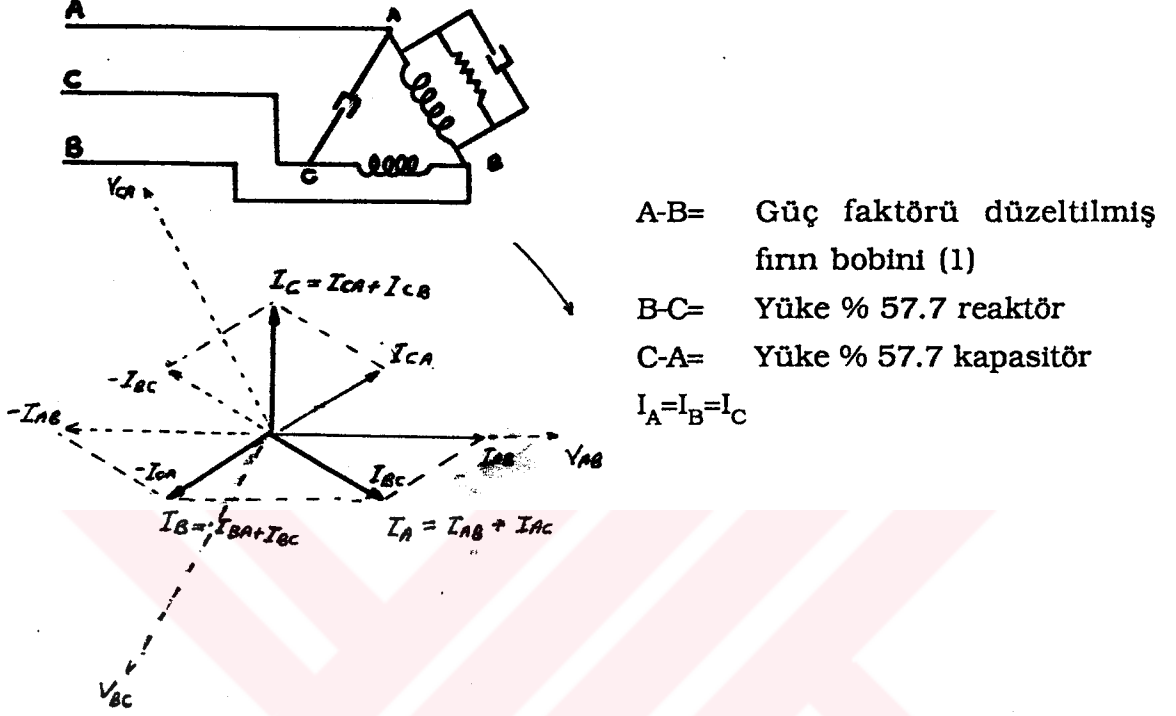


Şekil V.2. Tipik üç fazlı güç devresi diyagramı

Faz dengeleme tanziminde, fırın gücü oranında bir kapasitör bankı ikinci faz uçlarına bağlanır ve aynı oranlı reaktör de üçüncü faz uçlarına bağlanır. Eğer fırın fazı tam olarak birim güç faktöründe tutuluyorsa ve reaktör ve kapasitör tam uygun orantıda ise üç faz da eşit akım taşır.

Yukarıda üç fazlı sistemi gösteren bağlantı diyagramı Şekil V.2'de görülmektedir.

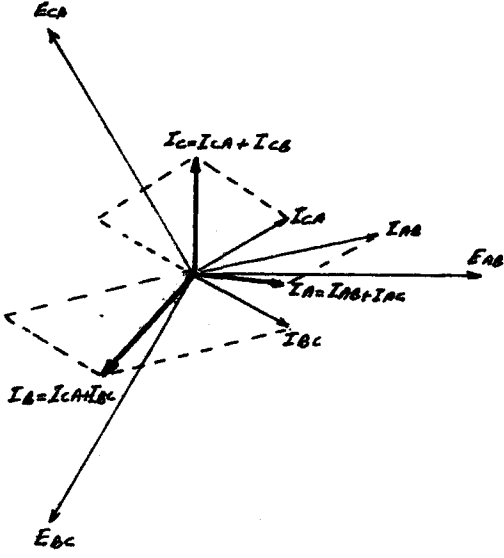
Bu üç fazlı devrenin vektör analizi şekil V.3'de gösteriliyor.



Şekil V.3. Fırın güç faktörü % 100

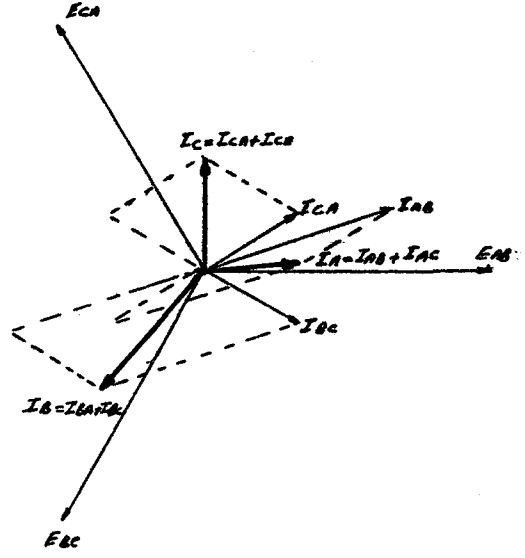
Fırın devresi güç faktörünün (A-B hattı) tam 1'de olduğu ve reaktör kVA değerinin ve kapasitör bankının; yükün kW oranının $0.577 (1/\sqrt{3})$ katı olduğu durumda bütün hat akımlarının (I_A , I_B ve I_C) aynı değerde olduğu görülebilir. Bunlar ideal şartlardır ve fırın belirli bir metal şarjı ile dolu ve astar kalınlığı istenilen değerde olduğunda bu şartlar sağlanır.

Eğer yükün güç faktörünün 1'den sapmasına izin verilirse hat akımlarında süratle büyük değişiklik olur. Şekil V.4 güç faktörünün sadece % 2.5 değişmesi durumunda hat akımları ilişkisini gösterir. Şekil V.5, V.6 ve V.7 güç faktörünün % 95'den % 80'e gerilemesi aşamalarında dengelenmemiş şartları gösterirler. Ayrıca tehlikeli biçimde dengelenmemiş duruma gelen akım değerleri üç fazlı trafonun bir bacağına tehlikeli biçimde ısınmasına sebep olacağı görülebilir.



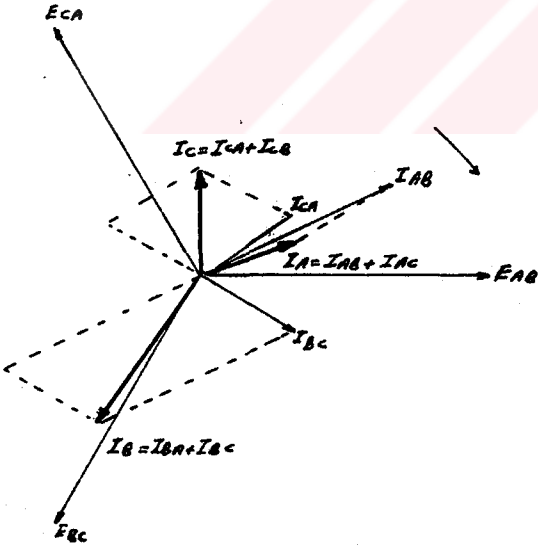
Şekil V.4. Fırının güç faktörü

0.975

 $I_A = \% 85$ dengeli $I_B = \% 122$ dengeli $I_C = \% 100$ dengeli

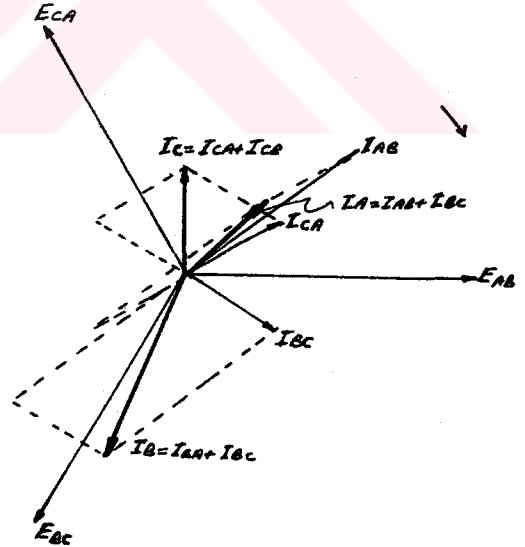
Şekil V.5. Fırının güç faktörü

0.95

 $I_A = \% 79.8$ dengeli $I_B = \% 132$ dengeli $I_C = \% 100$ dengeli

Şekil V.6. Fırının güç faktörü

0.90

 $I_A = \% 74.6$ dengeli $I_B = \% 145$ dengeli $I_C = \% 100$ dengeli

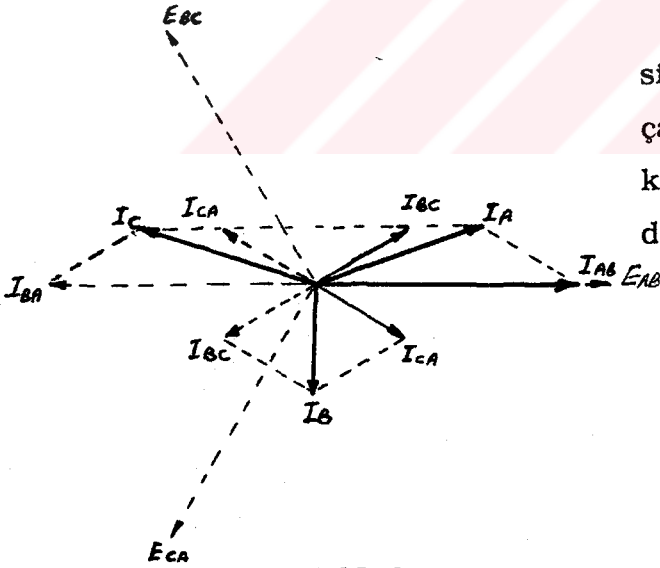
Şekil V.7. Fırının güç faktörü

0.80

 $I_A = \% 95.4$ dengeli $I_B = \% 180$ dengeli $I_C = \% 100$ dengeli

Bir önceki çizimler yoluyla gösterilen şartlar, dikkatli bir gözlemle devreye gereksiz olanlar kapatılarak veya yeni kapasitörler ekleyerek düzeltilebilir. Böylece otomatik olarak güç faktörünün ayarlanması optimum şartlar altında başarılabilir. Bununla birlikte düşük güç faktörü problemi sistemi etkileyen tek faktör değildir.

Seramik potalı fırındaki astar aşınması yükün bobine bağlantısı ile artmakta ve endüktanı ise düşmektedir. Bir dereceye kadar tam güç oranlı fırın projesindeki sonuçlar gerilim oranından azdır. Kapasitör bankı ve reaktörün kVA'sı dizayn ve uygulama gerilimi arasındaki farkın karesiyle azalır. Onların çıkışları kW'nın % 57.7'sından fazla değildir ve denge tekrar oluşur. Bu durum sonucunda oluşan dengesiz akımların pozisyonu şekil V.8'dedir.

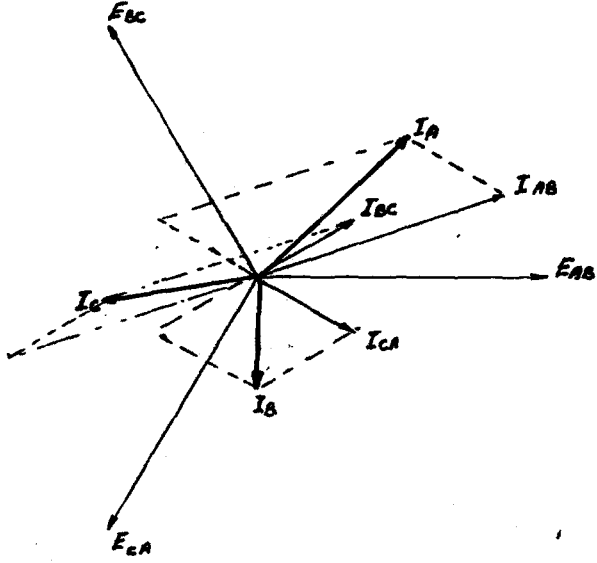


Faz dengelenme reaktör ve kapasitörü tam gerilimde ve tam güçte çalışmaya dizayn edilmiştir. Fakat eskimiş astarla tam güçte gerilim değerinin % 90'ı işletmededir.

- IA= Optimum 1'in % 82'si
- IB= Optimum 1'in % 100'ü
- IC= Optimum 1'in % 182'si

Şekil V.8.

Şekil V.9 komple şartların ulaştığı sonuçları gösterir.



Faz denge diyagramı,
Fırın güç faktörü= 0.90,
Fırın devremin tam sonucu 0.9xyeni
kaplama sonucu .

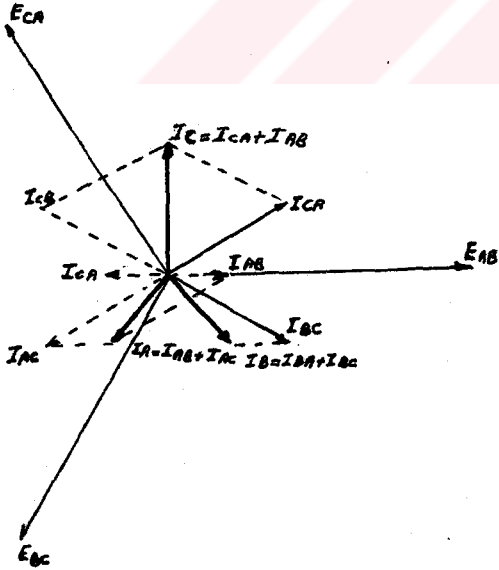
I_A = Optimum hat l'in % 179'u

I_B = Optimum hat l'in % 100'ü

I_C = Optimum hat l'in % 141'i

Şekil V.9

Hem bağlantı artması hemde güç faktörünün geri kalması şekil V.8'deki büyüklük kadar kötü olmayan akım üretimini birleştirir. Fakat bunların sonucunda faz bozulmaları büyükçedir.

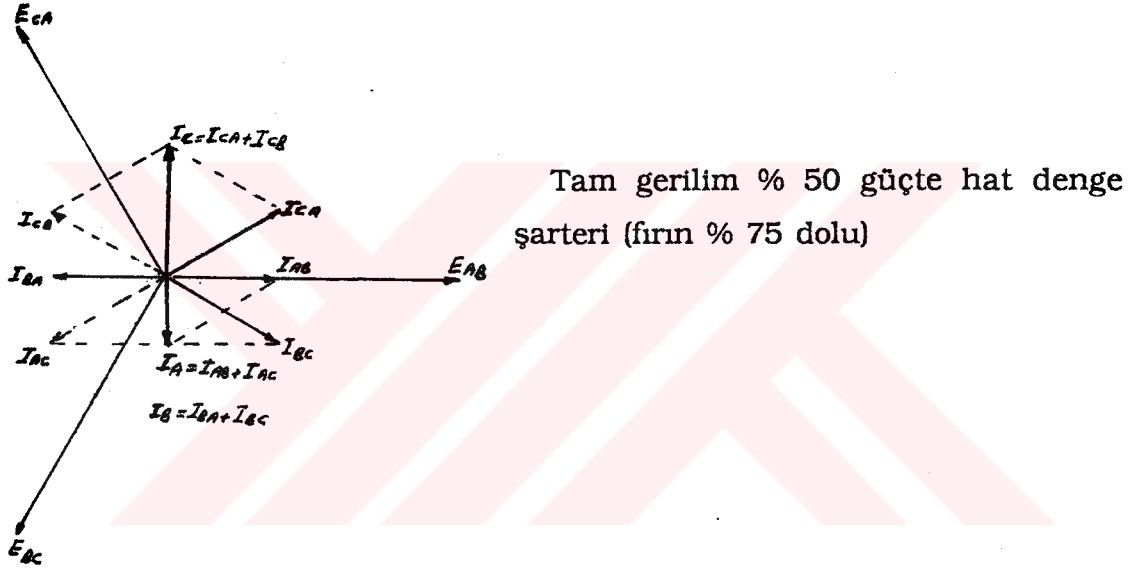


Tam gerilimde % 25 güçte hattın
denge şartları (Fırın % 50 dolu).

Şekil V.10

Fırının tamamen dolu olması durumunda diğer bir durum akım etkilemesidir. Bu fırının "de coupling"nin etkisidir ve bu yüzden bobin endüktansı artar. Sonuçta da verilen gerilim için güç azalır. Şekil V.10 fırının sadece % 50 dolu olduğunda birim güç faktöründe uygulanan dizayn gerilimi sonuçlarını gösterir.

Şekil V.11 % 75 dolu fırına tam gerilim uygulandığı durumda beklenmedik koşulların varolduğu görülebilir. Hat akımlarının faz ilişkileri A ve B hatlarının akım akışları gibi aynı zamanda aynı yöndedirler.

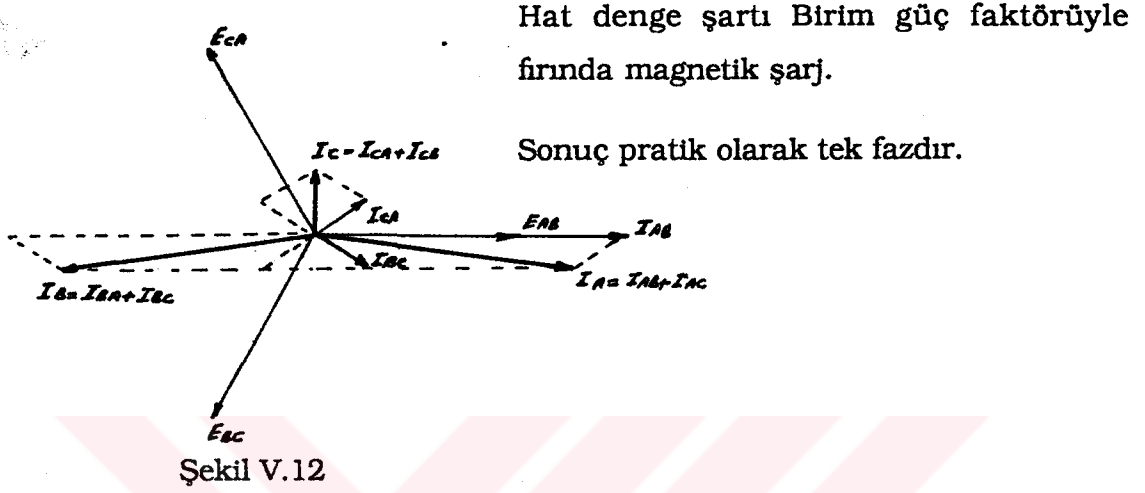


Şekil V.11

NOT: Akımın genliği Wye-Delta tipindeki üç fazlı trafodan alınan tek fazlı bir yükün aynısı ise.

Hattın dengesine etki eden bir diğer faktör de zamanın uzunluğudur. Genellikle fırının esas nüvesi pazartesi sabahları soğumuş durumdadır. Bu yüzden her zaman fırın boşken çalışmaya alınır. Büyükçe demir veya çelik bloğu fırına yerleştirilir ve güç verilir. Sabit kapasitörler çok sayıda olduğu için devre güç faktörünü kötü yönde etkiler. soğuk demir şarjının geçirgenliği bobin karakteristiklerinin değişmesine sebep olur, böylece bobin empedansı düşer. Bu yüzden yüksek bobin akımları düşük gerilim uy-

gulamasında ortaya çıkar. Bobin akımı çok yüksek durumda iken çok düşük bir çıkış dengeli fazla şebekeyi ayırır. bu Şekil V.12'de gösterilmiştir.



Esas ve amaç itibariyle bu tek fazlı bir yüküdür. Bu şart genellikle işletme durumundaki zayıf güç faktörüyle daha kötüleşir.

V.2. SONUÇ

Yukarıda yapılan bütün incelemeler geçicidir. Soğuk şarj eriyecek, fırın doldurulacak ve astar yenisiyle değiştirilecek, sonuçta muhtemelen operatör ve otomatik cihazla güç faktörü düzeltilecektir. Bu gibi olayların aynı anda olması zayıf bir ihtimaldir. Kapasitör bankları ve reaktörler üzerindeki sürekli kontrol ile bütün bu şartları yenmek mümkündür.

Elektrikle ergitme döküm endüstrisinde önemli bir uygulamadır. Birçok değişik durum için anında karar vermede bilgisayar kullanımı gereklidir. Faz akımlarının dengelenmesi şebekede bulunan tüm elemanların bilinmesi ve elektrik kayıplarının sürekli kontrolü ile mümkündür.

Faz dengeleme reaktör ve kapasitörleri yükün % 57.7 kW değerine sahip olmaktadır. Bundan daha önce söz edilmişti. Bu ayrıntılar sistemin iki fazındaki yük içindir. Fırın diğer faza bağlanmıştır. Yükün kW değerinin

yaklaşık 5 katı kapasitör bankı değerine haizdir. Fırın erimiş demirle dolu olduğu zaman bobin güç faktörünün % 20'si oranındaki güç faktörünü düzeltir. Bu oran fırında diğer metal ve alaşımların ergimesi durumunda daha düşüktür.

Kontaktör kapatıldığı zaman, çok büyük miktardaki kapasitör bankı fırını besleyen iki hat üzerinde kısa devre gibi gözükür. Hattaki akımlar besleme trafosunun empedansı ile sınırlanır. Tam yük akımının 15 katı kadar yükseklikteki geçici akımlar ölçülür. Bu şartlar lambaların titremesine ve TV resimlerinde daralmaya neden olur. Ancak bunlar sürekli problemler değildir.

Tam yükteki akımın 2 ila 4 katı kadar, başlangıç akımını sınırlayan seri bağlı direnç kullanmak yoluyla tek faz akımı azaltılır. Fakat bunların sonucunda direnç kademelerinin her bir adım ayarı iki ya da daha küçük tutulmak zorundadır. Fırın trafosu içinde güç değişiminden sonra her bir birim zamanda akım oluşur. Bu saatte birkaç defa olabilir.

Özet olarak faz dengelemesi fazlararasıdaki gerilim şartlarının diğer etkin cihazlarla giderilmek istenmesi olayıdır. Faz dengeleme aslında bir koruma değildir fakat sistemdeki kararsızlıkların giderilmesi için gereklidir.

Benzer sistemlerin çoğu tek fazlı yüke adapte edilmiştir. Tek faz kullanıma montaj ve çalışma kolaylıkları sağlar.

VI. ENDÜKSİYON FIRINI İÇİN BİR GÜÇ VE KONTROL DEVRESİ ANALİZİ

VI.1. GÜÇ DEVRESİ ANALİZİ

Şekil VI.1. VIP-POWER-TRAK tipi güç kaynağı şemasının basitleştirilmiş halidir. 460 nominal gerilimdeki üç fazlı güç kesiciye girer. kesici tarafına konan bir aşamalı trafo devre kesiciye küçük bir gerilim sağlar. Bu kontrol gerilimi bobin uyarma gerilimine kenetli küçük kapıya yönelir. Küçük kapı açıksa veya herhangi bir pano kesiciyle birlikte açık konumdaysa kesici akımı geçirir. Tüm akım geçiş panelleri kapalı değilse kesici açma konumuna gelmez.

Bu devre kesici normalin üzerinde akım artışından sonra 12 ilâ 20 milisaniye'deki hatalara kadar çalışabilir. Ancak, bu hızda çalışma bile güç ünitelerinden gelen hatalardan diyot ve tristörleri koruyamaz. Bir akım sınırlama reaktörü inverterin ateş almaması veya kısadevre olması durumuna karşı akım tepesinin başlangıcını geciktirmek için kullanılır. Akım tepesindeki bu gecikme diyot ve tristör akımlarının tolerans limitlerine ulaşmadan önce devrenin kesilmemesine fırsat verir. Güç kaynağının bu özelliği hızlı sigorta kullanımını gereksiz kılar. Ancak sigortalar devre kesicinin kötü çalışmasına karşı ve üç fazlı diyot doğrultucunun kısadevrelere karşı korunması için bir destekleme elemanı olarak kullanılabilir.

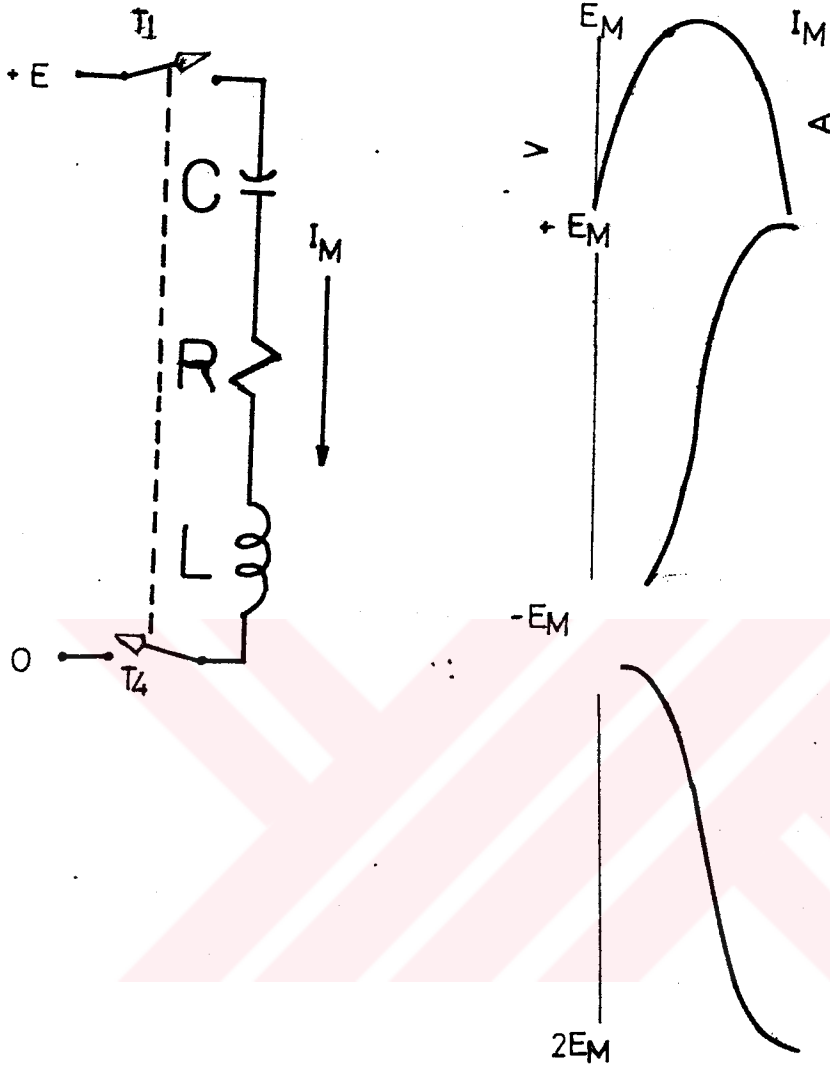
POWER-TRAK frekans dönüşümü bir AC-DC-AC metodudur. AC-DC-AC planındaki birinci hat AC-DC dönüşüm üçfazlı köprü doğrultucu yoluyla başlanır. Diyotlar etkin, karakteristik şekilde kontrol elemanı olarak sadece sembollerinde gösterildiği yönde akım akışına izin verirler. Üç fazlı köprünün çıkışı 360 Hz'lik üç fazlı tamdalga doğrultucunun dalga karakteristiğini içeren bir DC gerilimdir.

Her bir diyot uçlarındaki RC snubber devresi iletim içinde veya dışında diyotları bozacak şekilde oluşan istenmeyen yüksek frekansı bastırır. Üç fazlı köprü çıkışının filtrelenmesi, köprü ve inverter giriş arasındaki DC hatta oluşur. Şebeke filtresi bir sızdırma direnci, akım sınırlama reaktörü, deşarj diyodu ve bir ya da daha fazla filtre kapasitesinden oluşur.

Sızdırma direnci filtre kapasitesine deşarjda yardım eder. Sızdırma kalan gerilimi faaliyetin durmasından sonra 1 dakikadan az bir süre içinde 50 voltun altına indirir.

Akım sınırlama reaktörü; etkin devre kesicinin henüz kesme zamanına ulaşmamış durumda iken geçirdiği, hatalı şartlarda oluşarak diyot ve tristörlere zarar verebilecek olan akımı geciktirir. Filtre kapasitelerine paralel bağlı deşarj diyodu normal çalışma boyunca hiç akım taşımaz. Çünkü negatif uca bağlı anoduyla ters yönlüdür ve katodu da pozitif uca bağlıdır. Böylece ters bir şarj durumunda sağlanan düşük bir empedans deşarjı kapasitör uçlarında gösterir.

Inverter devresi için tristörlerin içdirençleri sıfır olan mükemmel anahtarlar olduğu düşünülebilir. Şekil VI.2 basit bir devredir. Kaynağın pozitif ucundan gelen akım 1.ci di/dt reaktörü içinden, T_1 , yükün R, L ve C'sine oradan T_4 , 4.cü di/dt reaktörüne ve kaynağın negatif ucuna ulaşır. T_1 ve T_4 tristörleri anahtarları vasıtasıyla yerleştirilmişlerdir ve birlikte çalışırlar. Basit bir RLC devresi şebeke gibi tipik bir DC gerilime geçici cevap verecektir. Tristör içindeki akım, iletimdeki tröstörü anahtarlama için gerekli minimum değer altına düşebilir. Tristor ters yönde iletmediği için kapasitör şarj yapamaz. Böylece endüktörün magnetik alanında ne enerji depolanabilir ne de devreden akım geçer. Devremizin güç tüketen bütün parçalarının direnci (bağlantı dirençleri bobin direnci, ısı üreten diğer paraların direnci) sıfırdan akımın bir darbesine kadar pozitif maksimum olur ve tekrar geri döner.

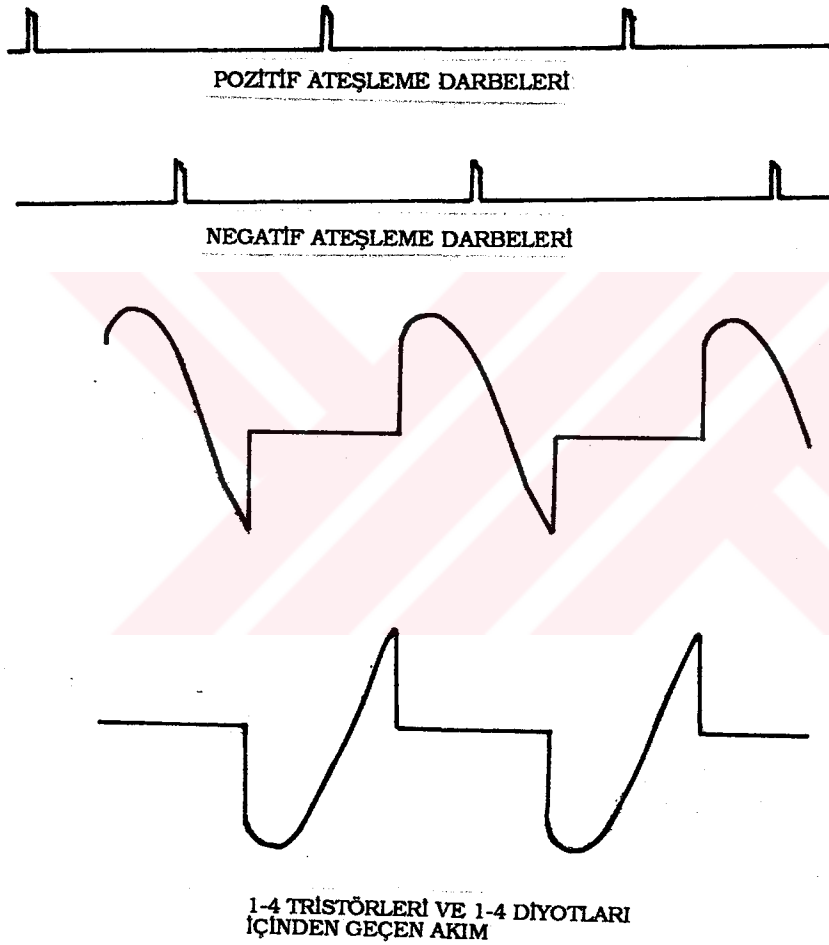


Şekil VI.2. RLC devrenin akım ve gerilim cevabı

Şayet 2 ve 3 tristörleri bu noktada kapılarına bir akım uygulanmışsa derhal ateş almama durumu oluşur. Tristörden oluşan T_4 anahtarı ilettime geçer. Çünkü onun akımı gerekli tutma akımının altına düşmüştür. Sönme durumunda kapamaz ve gerideki gerilimi destekleyemez. 4 tristörü kapı işareti olmaksızın yeniden kapayamaz, açık sonuç DC kaynaқта bir kısadevre oluşmasıdır. Tristör iletmeden düştüğü zaman, çok kısa bir zaman için gerilimin yeniden uygulanmasından korunmalıdır. Tutma zamanı kadar inverterdeki diyotla paralel olan tristörlerden her biri tutma zamanından biraz büyük yada eşit bir aralıkta ters yönde akım akışına izin verir. Bu aralık boyunca

tristör düşük gerilimden ve iletim diyotları ucundaki biraz ters yönlü görünen gerilim düşmesinden korunmalıdır.

Bu kapama zamanı veya minimum kilitleme zamanı inverler çalışmasındaki en önemli parametrelerden birini oluşturur. Tutma zamanının çok kısa olduğu durumda inverter çalışmaz ve devre kesici devreyi açar.



Şekil VI.3. Devre elemanlarının zaman ilişkileri

Şekil VI.3. Elemanların zaman ilişkilerini kapı darbelerini, onların tristör akımı dalga şekilleriyle ilişkisini ve primer izole trafonun üzerinde görünen dalga şeklini gösterir.

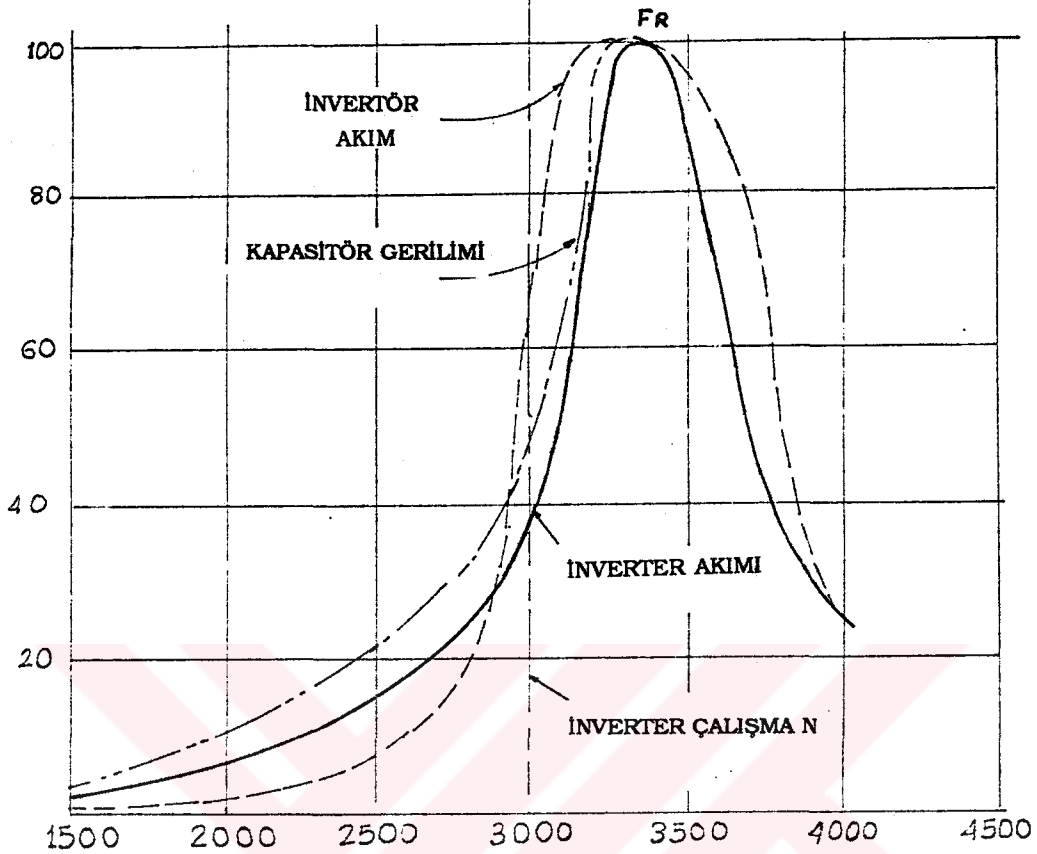
Bu konuda düzenlenecek devrelerin çoğu basit bir tristör ve diyot düzenlemeleri şeklindedir.

VI.2. KONTROL DEVRESİ ANALİZİ

Şekil VI.4'deki eğriler seri RLC devrenin frekans cevabıdır. Analiz amacıyla POWER-TRAK'ın ikincil veya fırın devresi; direnç, kapasite ve endüktans oluşturan bir seri devreye indirgenebilir. Bu eğriler kontrol prensiplerini açıklamakta yardımcı olur.

Tipik bir ısıtma boyunca bir VIP POWER-TRAK 175 kW-30 (3000 Hz'lik) inverterler soğuk şarjdan tam ısıtmaya, seri tankdaki kapasitansın beş aşamasında tam yükte geçilmesiyle geçer. Tam şarj ısıtması 2250 °F'dedir. Inverterler soğuk şarjla 2720 Hz'den 3010 Hz'e 17 kW güçte ulaşır. Frekansındaki bu artış fırın devresinin etkin endüktansındaki artışı kompanse eder. Bu endüktans oluşturan eğrilerin cevabının rezonans frekansındaki tepesini kaydırarak değiştirir. Hemen hemen 300 Hz'lik bu sağa kayma Şekil VI.4'ün bütün eğrilerinde görülebilir. Bu eğrilerin değişik bazı durumları olabilir, ancak biz bunları önemsemeyeceğiz.

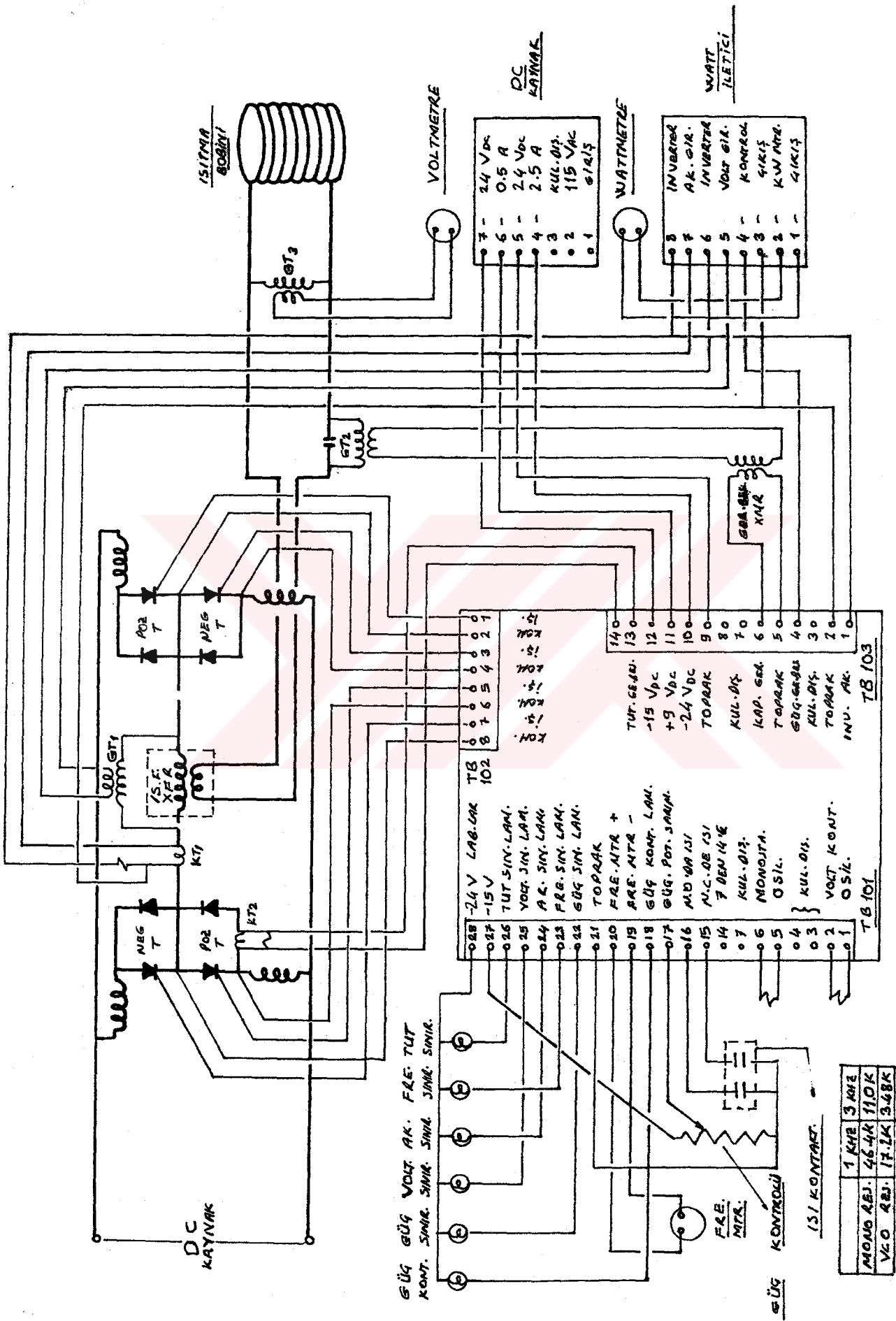
Şekil VI.4'deki eğriler halihazırda ısıtma noktasındaki özel statik bir durumu gösterir. Bu ısıtma noktası ve ısıtma boyunca diğer bütün noktalarda inverterin çalışma frekansındaki bir değişim, güç çıkışında, inverter akımında ve sekonder kapasitör geriliminde bir değişimle sonuçlanır. Böylece ısıtma devrindeki herhangi bir noktada gücün, gerilimin ve akımın, frekansın değişmesiyle kontrolü mümkündür.



Şekil VI.4 Seri RLC devrenin frekans cevabı

Rezonans frekansının altında, eğrinin inişinde, frekanstaki artış diğer parametrelerde artışla sonuçlanır, azalma da yine azalmayla sonuçlanır. İncelemlerin karakteristiği tepe bölgesinde ve ilerisinde çalışmayı önler. Tepe bölgesi yakınında (inverter çalışma frekansının doğal rezonans frekansına ulaştığı yerde) tristör kapama zamanı çok kısadır. Tristör kapama zamanı tümsek ilerisinde ve rezonans tepesinde tamamen gözüktür. Üstelik, seri uyum inverterleri daima rezonans tepesinin altında çalışırlar.

İdeal şartlarda tanımlanan çalışma noktası VI.4 şeklinde gösterilmiştir. Bu noktada POWER-TRAK inverteri; inverter akımı, kapasitör gerilimi ve frekansı ile gücü oranında çalışır. Bunlar izin verilen sınırlar dahilindedir. Fırın rezonans frekansı ve inverter çalışma frekansı arasındaki fark kapama zamanı, sağlayacak büyüklüklere bağlıdır. Hemen hemen daima özel sayıdaki aşamalı anahtarlanabilir kapasitörlerle fırın devresinin şartlara uyum sağlaması mümkündür.



GÜÇ GÜÇ VOLT AK. F.A.E. TUT
KONT. SİM. SİM. SİM. SİM. SİM.

MONO ABJ.	1 KHZ	3 KHZ
V.E.O	46.4K	110K
	17.2K	3.48K

GÜÇ KONTROLÜ
151 KONTROL

SEKİYE KONTROL DEVRESİ

EK

KELVİN FONKSİYONLARI

Diferansiyel eşitlik,

$$\frac{d^2 y}{dx^2} + \frac{1}{x} \cdot \frac{dy}{dx} - jk^2 y = 0 \quad (1)$$

bessel fonksiyonu terimlerinde çözüm;

$$y = AI_0(\sqrt{j} kx) + BK_0(\sqrt{j} kx) \quad (2)$$

$$I_0(\sqrt{j} kx) = \text{ber}(kx) + j \text{bei}(kx) \quad (3)$$

ve

$$K_0(\sqrt{j} kx) = \text{ker}(kx) + j \text{kei}(kx) \quad (4)$$

Kelvin fonksiyonlarının polinomal yaklaşımları şöyle yapılır;

($-8 \leq x \leq 8$) için

$$\begin{aligned} \text{ber } x &= 1 - 64(x/8)^4 + 113.77777 \ 774(x/8)^8 \\ &\quad - 32.36345 \ 653(x/8)^{12} + 2.64191 \ 397(x/8)^{16} \\ &\quad - .08349 \ 609 (x/8)^{20} + .00122 \ 552(x/8)^{24} \\ &\quad - .00000 \ 901(x/8)^{28} + \epsilon \quad |\epsilon| < 6 \times 10^{-9} \end{aligned}$$

$$\begin{aligned} \text{bei } x &= 16(x/8)^2 - 113.77777 \ 774(x/8)^6 \\ &\quad + 72.81777 \ 742(x/8)^{10} - 10.56765 \ 779(x/8)^{14} \\ &\quad + .52185 \ 615 (x/8)^{18} - .1103 \ 667(x/8)^{22} \\ &\quad + .00011 \ 346(x/8)^{26} + \epsilon \quad |\epsilon| < 6 \times 10^{-9} \end{aligned}$$

($0 < x \leq 8$) için;

$$\begin{aligned} \text{ker } x &= \ln(.5x) \text{ber } x + .25\pi \text{bei } x - .57721 \ 566 \\ &\quad - 59.05819 \ 744(x/8)^4 + 171.36272 \ 133(x/8)^8 \\ &\quad - 60.60977 \ 451(x/8)^{12} + 5.65539 \ 121 (x/8)^{16} \end{aligned}$$

$$\begin{aligned}
& - .19636\ 347\ (x/8)^{20} + .00309\ 699(x/8)^{24} \\
& - .00002\ 458(x/8)^{28} + \varepsilon\ |\varepsilon| < 1x10^{-8}
\end{aligned}$$

$$\begin{aligned}
\text{kei } x &= \ln(.5x)\ \text{bei } x - .25\pi\ \text{ber } x + 6.76454\ 936\ (x/8)^2 \\
& - 142.91827\ 687(x/8)^6 + 124.23569\ 650(x/8)^{10} \\
& - 21.30060\ 904(x/8)^4 + 1.17509\ 064(x/8)^{18} \\
& - .02695\ 875(x/8)^{22} + .00029\ 532(x/8)^{26} + \varepsilon \\
& |\varepsilon| < 3x10^{-9}
\end{aligned}$$

(-8 ≤ x ≤ 8) için;

$$\begin{aligned}
\text{ber}' x &= x[-4(x/8)^2 + 14.22222\ 222(x/8)^6 \\
& - 6.06814\ 810(x/8)^{10} + .66047\ 849(x/8)^{14} \\
& - .02609\ 253(x/8)^{18} + .00045\ 957(x/8)^{22} \\
& - .00000\ 394(x/8)^{26}] + \varepsilon\ |\varepsilon| < 2.1x10^{-8}
\end{aligned}$$

$$\begin{aligned}
\text{bei}' x &= x[.5 - 10.66666\ 666(x/8)^1 \\
& + 11.3777777\ 772(x/8)^8 - 2.31167\ 514(x/8)^{12} \\
& + .14677\ 204(x/8)^{16} - .00379\ 386(x/8)^{20} \\
& + .00004\ 609(x/8)^{24}] + \varepsilon\ |\varepsilon| < 7x10^{-8}
\end{aligned}$$

(0 < x ≤ 8) için;

$$\begin{aligned}
\text{ker}' x &= \ln(.5x)\ \text{ber}' x - x^{-1}\ \text{ber } x + .25\pi\ \text{bei}' x \\
& + x[-3.69113\ 734(x/8)^2 + 21.42034\ 017(x/8)^6 \\
& - 11.36433\ 272(x/8)^{10} + 1.41384\ 780(x/8)^{14} \\
& - .06136\ 358(x/8)^{18} + .00116\ 137(x/8)^{22} \\
& - .00001\ 075(x/8)^{26}] + \varepsilon\ |\varepsilon| < 8x10^{-8}
\end{aligned}$$

$$\begin{aligned}
\text{kei}' x &= -\ln(.5x)\ \text{bei}' x - x^{-1}\ \text{bei } x - .25\pi\ \text{ber}' x \\
& + x[.21139\ 217 - 13.39858\ 846(x/8)^4 \\
& + 19.41182\ 758(x/8)^8 - 4.65950\ 823(x/8)^{12} \\
& + .33049\ 424(x/8)^{16} - .00926\ 707(x/8)^{20} \\
& + .00011\ 997(x/8)^{24}] + \varepsilon\ |\varepsilon| < 7x10^{-8}
\end{aligned}$$

KAYNAKÇA

- 1- "İletken Potalı Fırının Etüdü" Prof. Remzi GÜLGÜN
- 2- J. Davies, P. Simpson Induction Heating Handbook, Mc Graw-Hill, Berkshire 1979
- 3- T. Mersin, M. Tüfekçi, "İndüksiyon Ergitme Teknolojisi" Engin müh.1., Ankara, 1981
- 4- G. Havas, R.A. SOMMER, A High Frequency Power Supply for Induction Heating and Melting, IEEE, Vol IECZ-17 No 4, June 1970
- 5- K.B. ZHAO, P.C. SEN, G. PREMCHANDRAN, A Thyristor Inverter for Medium-Frequency Induction Heating, IEEE Trans. IEA 31, No. 1, Feb. 1984, pp. 34-36
- 6- Y. Üçtuğ, Endüksiyonla Isıtma İçin Orta Sıklık Evirgeci, Y.L. Tezi ODTÜ, 1982
- 7- Herbert W. Zelle "Characteristics of Induction Furnace Supply circuits" Inducterm corporation, december 8, 1972 New Jersey
- 8- Gray, A. and Mathews, G.B., 1966. A Treatise in Bessel Functions, Doverpublications, Inc., New York
- 9- Sundberg Yangve, Static. Frequency Converters for Induction melting and Heating, AIEA Journal, 1974, Vol. 47, No. 1, pp. 9-6
- 10- Davies E.J. and Simpson P.G., Induction Heating for Industry, Electronics and Power, July 1979, Vo. 25, No. 7, pp. 508-515

- 11- Mc Murray William, A Constant Ture-off Truel Control for variable Frequency Tyristor Inverters, IEEE, Vol. IA-IJ, No. 5, September-October 1977
- 12- BBC Mains Frequency Induction Furnace melting Plants and Their Operation Under Special Power Supply Conditions, E.W. Nieweg and H.P. Schaub, Baden.
13. Ergün Balbozan "Endüksiyon Isıtma" YL Tezi 1984, İzmir



ÖZGEÇMİŞ

22 Aralık 1966 yılında HALKAPINAR'da doğdum. İlk ve orta öğrenimimi Aydın'da tamamladım.

Haziran 1990'da Yıldız Üniversitesi Elektrik Mühendisliği bölümünden mezun oldum. Aynı yıl Yıldız Üniversitesi Fen Bilimleri Enstitüsü'nde Elektrik Anabilim Dalında Yüksek Lisans öğrenimime başladım.

Halen Ankara'da Kredi ve Yurtlar Kurumu Genel Müdürlüğü'nde Elektrik Mühendisi olarak çalışıyorum. Ankara'da ikamet etmekteyim.

C.C. YÜKSEKÖĞRETİM MURULTU
GÖZMÜHÜRÜ MERKEZİ