

**KOCAELİ ÜNİVERSİTESİ
FEN BİLİMLERİ ENSTİTÜSÜ**

**ELEKTRİK MÜHENDİSLİĞİ
ANABİLİM DALI**

YÜKSEK LİSANS TEZİ

**İNDÜKSİYONLA ISITMA SİSTEMİNİN İNCELENMESİ VE
SİMÜLASYONU**

AYŞE TUĞBA YAPICI

KOCAELİ 2018

KOCAELİ ÜNİVERSİTESİ
FEN BİLİMLERİ ENSTİTÜSÜ
ELEKTRİK MÜHENDİSLİĞİ
ANABİLİM DALI

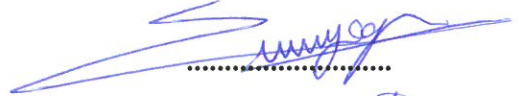
YÜKSEK LİSANS TEZİ

İNDÜKSİYONLA ISITMA SİSTEMİNİN İNCELENMESİ VE
SİMÜLASYONU

AYŞE TUĞBA YAPICI

Prof. Dr. Nurettin ABUT
Danışman, Kocaeli Üniversitesi
Dr. Öğrt. Üyesi E. Mustafa YEĞİN
Jüri Üyesi, Kocaeli Üniversitesi
Dr. Öğrt. Üyesi M. Server FIRAT
Jüri Üyesi, Sakarya Üniversitesi


.....


.....


.....

Tezin Savunulduğu Tarih: 29.06.2018

ÖNSÖZ VE TEŞEKKÜR

İndüksiyon ısıtma sistemi ile ilgili olarak hazırlanan tez çalışmamın her aşamasında gerekli tüm desteğini en başından beri bana sağlayan çok değerli Hocam Sayın Prof. Dr. Nurettin Abut'a saygı ve teşekkürlerimi sunarım. Aynı şekilde her daim desteğini esirgemeyen Kocaeli Üniversitesi Elektrik Mühendisliği bölüm hocalarıma da ayrı ayrı teşekkür ederim.

Ayrıca tez hazırlama sürecinde maddi manevi tüm desteklerinden ötürü çok değerli aileme teşekkürü bir borç bilirim.

Haziran - 2018

Ayşe Tuğba YAPICI

İÇİNDEKİLER

ÖNSÖZ VE TEŞEKKÜR	i
İÇİNDEKİLER	ii
ŞEKİLLER DİZİNİ.....	iv
SİMGELER VE KISALTMALAR DİZİNİ	vi
ÖZET.....	viii
ABSTRACT	ix
GİRİŞ	1
1. GENEL BİLGİLER.....	2
1.1. Çalışmanın Amacı.....	2
2. İNDÜKSİYON ISITMA SİSTEMLERİ	3
2.1. İndüksiyon Isıtma Sistemleri Genel Bilgi	3
2.2. İndüksiyon ve İndüksiyon ile Isıtma	4
2.3. İndüksiyonla Isıtma Prensipleri.....	5
2.4. İndüksiyonla Isıtma Sistemlerinin Tarihsel Gelişimi	6
2.5. İndüksiyonla Isıtma Sistemlerinin Üstünlükleri	6
2.6. Joule ve Histerezis Kayıpları	7
2.7. Bobin-İş Parçası Elektrik Modeli.....	8
2.7.1. Seri ve paralel model	8
2.7.2. Eşdeğer direnç ve endüktans.....	11
2.8. Verim	13
2.8.1. Dalma derinliği	13
2.8.2. Bobin-iş parçası bağlantısı	15
2.9. Gerekli güç tahmini ve hesabı.....	16
2.9.1. Güç gereksinimi	16
2.9.2. Isıtma bobini	18
3. İNDÜKSİYON ISITMA SİSTEMLERİNİN MODELLENMESİ	20
3.1. Giriş.....	20
3.2. Analitik Yöntem.....	20
3.3. Sayısal Yöntem	23
3.3.1. Elektromanyetik indüksiyon	23
3.3.2. Sayısal çözümlenme yöntemleri	24
4. İNDÜKSİYON ISITMA SİSTEMLERİNDE EVİRİCİLER.....	26
4.1. Giriş.....	26
4.2. Dönüştürücüler için Rezonans Devreleri	27
4.3. Gerilim Beslemeli Seri Rezonans Eviriciler	28
4.3.1. Gerilim beslemeli seri rezonans evirici frekansı.....	29
4.3.2. Güç faktörü	33
4.3.3. İş parçasındaki güç.....	36
4.3.4. Geçiş analizi	36
4.3.5. Pratik uygulamalar için ek hususlar	42
4.4. Akım Beslemeli Paralel Rezonans Eviriciler.....	43
4.4.1. Rezonans frekansı	44
4.4.2. Güç faktörü	48
4.4.3. İş parçasındaki güç.....	50

4.4.4. Geçiş analizi.....	50
4.4.5. Pratikteki uygulamalar için ek hususlar.....	57
4.5. Diğer Durumlar.....	57
4.6. Güç Yarı İletkenleri.....	59
5. İNDÜKSİYON ISITMA UYGULAMASI.....	62
5.1. Genel Bilgi.....	62
5.2. Seri Rezonans Eviricili İndüksiyon Isıtma.....	62
5.3. Uygulama Devresi ve Simülasyon Sonuçları.....	64
6. SONUÇLAR VE ÖNERİLER.....	70
KAYNAKLAR.....	73
EKLER.....	75
KİŞİSEL YAYINLAR VE ESERLER.....	78
ÖZGEÇMİŞ.....	79

ŞEKİLLER DİZİNİ

Şekil 2.1.	Bobinin içerisinden ve etrafından geçen manyetik alan çizgileri	4
Şekil 2.2.	İndüksiyon ısıtma genel blok gösterimi	5
Şekil 2.3.	Bobin-iş parçası.....	9
Şekil 2.4.	Bobin-iş parçası elektrik modelleri	9
Şekil 2.5.	İş parçası üzerinde indüklenen akım	14
Şekil 3.1.	Bobin-iş parçası seri elektrik modeli.....	21
Şekil 4.1.	İndüksiyon ısıtma sistemi.....	26
Şekil 4.2.	Seri ve paralel tank.....	27
Şekil 4.3.	Seri tank ve gerilim beslemeli seri rezonans evirici.....	29
Şekil 4.4.	Transfer fonksiyonu $H_s(w)$ Bode Analizi	32
Şekil 4.5.	$H_s(w)$ 'nin 3 farklı Q değeri için Bodeanalizi.....	34
Şekil 4.6.	$R_{eq} = 15\Omega$ için tanktaki gerilim ve akım	35
Şekil 4.7.	$R_{eq} = 5\Omega$ için tanktaki gerilim ve akım	35
Şekil 4.8.	$R_{eq} = 1\Omega$ için tanktaki gerilim ve akım	35
Şekil 4.9.	Gerilim beslemeli seri rezonans evirici	37
Şekil 4.10.	Rezonans frekansta çıkış dalga şekilleri.....	37
Şekil 4.11.	Rezonans frekansta iletim sırası.....	38
Şekil 4.12.	Rezonans frekans altında çıkış dalga şekilleri.....	38
Şekil 4.13.	Rezonans frekans altında iletim sırası.....	39
Şekil 4.14.	Rezonans frekans üzerinde çıkış dalga şekilleri.....	40
Şekil 4.15.	Rezonans frekans üzerinde iletim sırası	41
Şekil 4.16.	Paralel tank ve akım beslemeli paralel rezonans tank.....	43
Şekil 4.17.	$H_s(w)$ Bode Analizi.....	46
Şekil 4.18.	Seri ve paralel iş parçası modeli ile paralel tank	46
Şekil 4.19.	Seri $H_p(w)$ ve paralel $H_p(w)$ 'nin transfer fonksiyonu $Q=0,76$ için Bode Analizi.....	47
Şekil 4.20.	Seri $H_p(w)$ ve Paralel $H_p(w)$ 'nin transfer fonksiyonu $Q=3,84$ için Bode Analizi.....	48
Şekil 4.21.	$Q=0,76$ ve $R_{eq}=3\Omega$ için tank akım ve gerilim	49
Şekil 4.22.	$Q=3,84$ ve $R_{eq}=1\Omega$ için tank akım ve gerilimi	49
Şekil 4.23.	Akım beslemeli paralel evirici devresi	51
Şekil 4.24.	Sıfır faz kaymasında çıkış dalga biçimleri	52
Şekil 4.25.	Sıfır faz kaymasında iletim sırası	52
Şekil 4.26.	Kapasitif anahtarlama tank akım gerilimi	53
Şekil 4.27.	Sıfır faz kayması üzerinde çıkış dalga biçimleri	53
Şekil 4.28.	Sıfır faz kayması frekans değeri üzerinde iletim sırası	54
Şekil 4.29.	Endüktif anahtarlama tank akım-gerilimi	55
Şekil 4.30.	Sıfır faz kayması altında çıkış dalga biçimleri	55
Şekil 4.31.	Sıfır faz kayması frekans değeri altında iletim sırası	56
Şekil 4.32.	Evirici köprülerinin paralel ve seri bağlantıları.....	58
Şekil 4.33.	IGBT/MOSFET gerilim- frekans aralığına göre seçimi	61
Şekil 5.1.	İndüksiyon ısıtma sistemi blok diyagram.....	63
Şekil 5.2.	Bobin-iş parçası ve seri rezonans tank modellemesi.....	63

Şekil 5.3. Seri rezonans eviricili indüksiyon ısıtma devresi Matlab Simulink modeli	64
Şekil 5.4. İndüksiyon ısıtma giriş gerilimi	64
Şekil 5.5. Doğrultulmuş gerilim	64
Şekil 5.6. Evirici Gate sürme sinyali	65
Şekil 5.7. Seri rezonans evirici	65
Şekil 5.8. Seri rezonans evirici çıkış dalga formları.....	66
Şekil 5.9. Seri rezonans evirici geçiş sırası	66
Şekil 5.10. Seri rezonans evirici çıkış akım ve gerilimi	67
Şekil 5.11. İş parçasında oluşan güç.....	68
Şekil 5.12. Tristör ve Mosfet akım-gerilimi	68
Şekil 5.13. Bastırma devre kullanılmadan ve kullanılarak harmonik analizi.....	69

SİMGELER VE KISALTMALAR DİZİNİ

A_w	: İş parçası kesit alanı, (cm^2)
A_a	: Boşluğun kesit alanı, (cm^2)
B	: Manyetik akı yoğunluğu, (Wb/m^2)
c	: Malzemenin ortalama sıcaklık değeri, ($^{\circ}\text{C}$)
D	: Elektrik yer değiştirme alanı, (C/m^2)
d_c	: Bobin iç çapı, (cm)
d_w	: İş parçası çapı, (cm)
E	: Elektrik alan, (V/m)
f	: Frekans, (Hz)
f_{sw}	: Anahtarlama frekansı, (Hz)
f_r	: Rezonans frekans, (Hz)
H	: Manyetik alan yoğunluğu, (A/m)
I	: Akım, (A)
i_{tank}	: Evirici çıkış akımı, (A)
J	: Akım yoğunluğu, (A/mm^2)
K_R	: Parçanın eşdeğer çapı ile dalma derinliği arasındaki elektrik yolunun değişimini dikkate alan faktör
L	: Bobin, (H)
L_c	: Bobin uzunluğu, (cm)
L_w	: İş parçası uzunluğu, (cm)
L_a	: Boşluk endüktansı, (H)
L_c	: Bobin endüktansı, (H)
L_w	: İş parçası endüktansı, (H)
m	: İş parçası kütlesi, (kg)
μ	: Manyetik geçirgenlik, (H/m)
μ_0	: Boşluğun manyetik geçirgenliği, (H/m)
N_c	: Sarım sayısı
η_T	: Toplam verim, (%)
$\eta_{\text{ısı}}$: Isıl verim, (%)
$\eta_{\text{elektriksel}}$: Elektriksel verim, (%)
P_c	: Dönüştürücü gücü, (W)
$P_{\text{ısılkayıplar}}$: İş parçası yüzeyi ısı kayıpları, (W)
P_{reaktif}	: Reaktif güç, (VAR)
P_{aktif}	: Aktif güç, (W)
p	: Malzemenin özdirenci, (Ωm)
ρ_w	: İş parçası özdirenci, (Ωm)
ρ_c	: Bobin özdirenci, (Ωm)
$P_{\text{iş}}$: İş parçası gücü, (W)
Q	: Güç faktörü
Q_{paralel}	: Paralel iş parçası- bobin modeli güç faktörü
Q_{seri}	: Seri iş parçası- bobin modeli güç faktörü
R	: Direnç, (Ω)
$R_{\text{eş}}$: Eşdeğer direnç, (Ω)
$R_{\text{eşparalel}}$: Paralel iş parçası- bobin modeli eşdeğer direnci, (Ω)

$R_{eşseri}$: Seri iş parçası- bobin modeli eşdeğer direnci, (Ω)
R_s	: Parçanın yüzeysel direnci, (Ω)
R_w	: İş parçası direnci, (Ω)
R_c	: Bobin direnci, (Ω)
r_w	: İş parçasının yarıçapı, (cm)
r_c	: Bobin iç yarıçapı, (cm)
S	: Görünür güç, (VA)
$S_{ısıtılmış}$: Isıtılmış yüzey, (cm^2)
T_{ilk}	: İlk sıcaklık, ($^{\circ}C$)
T_{son}	: Son sıcaklık, ($^{\circ}C$)
t	: Gerekli ısıtma süresi, (s)
U	: Gerilim, (V)
U_e	: Kaynak gerilimi, (V)
u_L	: Rezonans endüktör gerilimi, (V)
u_c	: Rezonans kapasitör gerilimi, (V)
u_{Req}	: Eşdeğer direnç gerilimi, (V)
u_{tank}	: Evirici çıkış gerilimi, (V)
W_n	: Sönüm süzdoğal frekans, (rad/s)
W_{faz0}	: Faz kaymasının sıfır olduğu frekans, (rad/s)
$Z_{eşseri}$: Seri iş parçası- bobin modeli empedansı, (Ω)
$Z_{eşparalel}$: Paralel iş parçası- bobin modeli empedansı, (Ω)
ρ_w	: İş parçasının elektriksel direnci, (Ωm)
δ	: Dalma derinliği, (mm)
δ_c	: Bobin dalma derinliği, (mm)
δ_w	: İş parçası dalma derinliği, (mm)
ζ	: Sönüm oranı

Kısaltmalar

AC	: Alternatif Akım
BJT	: Bipolar Junction Transistor (Bipolar Jonksiyonlu Transistör)
DC	: Doğru Akım
IGBT	: Insulated Gate Bipolar Transistor (İzole Kapılı Bipolar Transistör)
MOSFET	: Metal Oxide Semiconductor Field Transistor (Metal Oksit Yarıiletken Alan Etkili Transistör)
PWM	: Darbe Genişlik Modülasyonu
ZCS	: Sıfır Akım Anahtarlama
ZVS	: Sıfır Gerilim Anahtarlama

İNDÜKSİYONLA ISITMA SİSTEMİNİN İNCELENMESİ VE SİMÜLASYONU

ÖZET

Bu tez çalışmasında indüksiyon ısıtma uygulaması üzerinde durulmuştur. Sistemden genel olarak bahsedilmiştir. Sistemin evirici kısmı biraz daha detaylı anlatılmış daha sonra sistem simülasyonu ile anlatılanların desteklenmesi amaçlanmıştır. Metal ısıtma ve eritmenin oluşturduğu çevresel zararı en aza indirmesi nedeniyle günümüzde oldukça fazla tercih edilmektedir. Gelişen teknoloji ve kontrol yöntemlerindeki yeniliklerle güç kontrol topolojileri ve bu devrelerin analizleri ile performans ve verimde iyileştirmeler yapılmaktadır. Bunlara ek olarak yapılan yenilikler ile birlikte maliyet içinde alınan olumlu sonuçlarla metal eritme ve ısıtma için indüksiyonla ısıtma daha çok tercih edilmektedir. Çalışmada modelleme yapılmış, çözüm yöntemleri sunulmuş ve Matlab Simulink ile simülasyonu yapılmıştır. Uygulama öncesi yapılan bu ön hazırlıkların gerçek uygulama yapacaklar için fayda sağlaması amaçlanmıştır.

Anahtar Kelimeler: IGBT, İndüksiyon Isıtma, Rezonans Evirici.

INVESTIGATION AND SIMULATION OF INDUCTION HEATING SYSTEM

ABSTRACT

In this thesis study, induction heating application is dwelled on. The system has been mentioned generally. The inverter part of the system is explained in more detail, and then it is intended to support what is described by the system simulation. With this method, the environmental damages caused by the metal heating and melting are decreasing very much and it is highly preferred. Power control topologies with innovations in developing technology and control methods and improvements in performance and efficiency with analysis of these circuits are made. In addition to these, with together innovations, induction heating is more preferred for metal melting and heating with positive results in cost. In the study, modeling are done, solution methods are presented and, simulated with Matlab Simulink. It is aimed to that these preliminary preparations, will be beneficial for before real implementation.

Keywords: IGBT, Induction Heating, Resonance Inverter.

GİRİŞ

Günümüzde teknolojik gelişmelerin hızına yetişmenin neredeyse imkansız olduğu düşünüldüğünde, tüketilen kaynaklar yeni kaynak arayışlarına ve daha ekonomik daha verimli ve çevreye daha az zarar veren yöntemleri keşfetmeye itmiştir. Bu çalışmada tercih edilen indüksiyon ısıtmanın bulunuşu çok eski zamanlara dayansa da gelişimi bulunuşundan sonra uzun zamana yayılarak gerçekleşmiştir. Aslında indüksiyon ısıtma uygulama sisteminin en temeli incelenecek olunursa, alternatif gerilimden faydalanarak çalışan sistemler üzerinden yola çıkılmıştır denilebilir. Bu sistemlerin temeli ise Michael Faraday'ın magnetik indüksiyon temeline dayanmaktadır. Bu teorinin keşfi transformatör, motor, generatör gibi alternatif gerilim kullanarak çalışan elektrik makinelerinin yaygınlaşmasını sağlamıştır. Bu elektrik makinelerinden transformatör yapısının temel çalışma prensibi incelendiğinde primer kısmında oluşturulan alternatif akımın sekonder kısımda meydana getirdiği gerilimin kullanılmasına dayanmaktadır. Bu işlem sırasında hem transformatör için hem de diğer elektrik makineleri için magnetik alandan kaynaklanan ısı bu sistemler için istenmeyen bir durum olmuştur. Ancak bu elektrik makineleri için istenmeyen histeresis ve joule kayıplarından meydana gelen sıcaklık aslında indüksiyon ısıtma uygulamaları için en temel unsur olmuştur.

İlk olarak da bahsettiğimiz üzere tükenen kaynaklar, temiz yöntem arayışı ve teknolojik gelişmeler insanoğlunu sürekli yeni arayışlar içinde bulmaya yöneltmiştir. İndüksiyon ısıtmanın ilk temelleri de bahsedildiği üzere çok eskilere dayansa da o dönemler için kullanıma çok elverişli bulunmuyordu. Bunun temel sebeplerinden örnek vermek gerekecek olunursa, bu sistemler için en önemli kısımlardan birisi olan evirici kısmında kullanılan yarı iletkenleri de içinde barındıran kontrol yöntemlerindeki teknolojik gelişmelerin yakın zamana dayanmasıdır. Daha önceleri maliyet olarak çok yüksek olan ve fazla verim sağlamayan sistem daha sonraları yarı iletken teknolojisinin göstermiş ve göstermekte olduğu gelişmeler sayesinde maliyeti düşmüş ve sistem için gerekli olan güç kaynağı için de maliyet düşürülmüş, verim artmış ve temiz bir enerji kaynağı olarak güç elektroniğinin imkanlarından faydalanılmıştır.

1. GENEL BİLGİLER

Çalışmanın giriş kısmında çalışmanın keşfi ile ilgili kısaca bilgi verilmiştir. Bu kısımda ise daha ilerideki bölümlerde biraz daha detaylandırılacak kısımlar için çok genel bir giriş yapılarak indüksiyon ısıtma için en temel seviyede fikir oluşturulması hedeflenmektedir. Sistemin anlaşılabilirliğini kolaylaştırmak için bazı kavramlar ve hesaplamalardan bahsedilecektir.

1.1. Çalışmanın Amacı

İndüksiyon ısıtma sistemleri uzun zaman alan gelişme aşamalarına rağmen son zamanlarda bu gelişme oldukça aşama kaydetmiş verim artmış ve maliyet düşürülmüştür. Tüm bunlar göz önüne alındığında bu gelişmeler dikkate alınarak kullanım alanları artmıştır. Sanayi alanında tercih edilmesinin yanında ev tipi ısıtma uygulamalarında da oldukça fazla tercih edilmeye başlanmıştır. Bu çalışmada ise indüksiyon ısıtma uygulamaları, bu konu üzerinde özellikle yeni çalışma yapacaklar için temel oluşturacak seviyede sistemin tanıtımını yapmak ve daha sonra evirici kısmını biraz daha detaylı olarak ele alarak anlatmak hedeflenmiştir. Sistemin anlaşılabilirliğini kolaylaştırmak adına anlatılan kısımların yapılan simülasyon çalışması ile desteklenmesi hedeflenmiştir.

2. İNDÜKSİYON ISITMA SİSTEMLERİ

2.1. İndüksiyon Isıtma Sistemleri Genel Bilgi

İndüksiyon ısıtma sistemlerinin temeli 1831 yılında Michael Faraday'ın elektromagnetik indüksiyonu keşfetmesi ile başlamış, başta transformatörler olmak üzere birçok manyetik tasarım uygulamalarında kullanılmıştır. İndüksiyon ısıtma işleminin de temeli bu elektromagnetik indüksiyona bağlı olarak, elektriği iletebilen malzemelerin, bu malzemelerde oluşturulan eddy akımları tarafından meydana gelen sıcaklıktan fayda sağlamak için yapılan bir ısıtma yöntemidir.

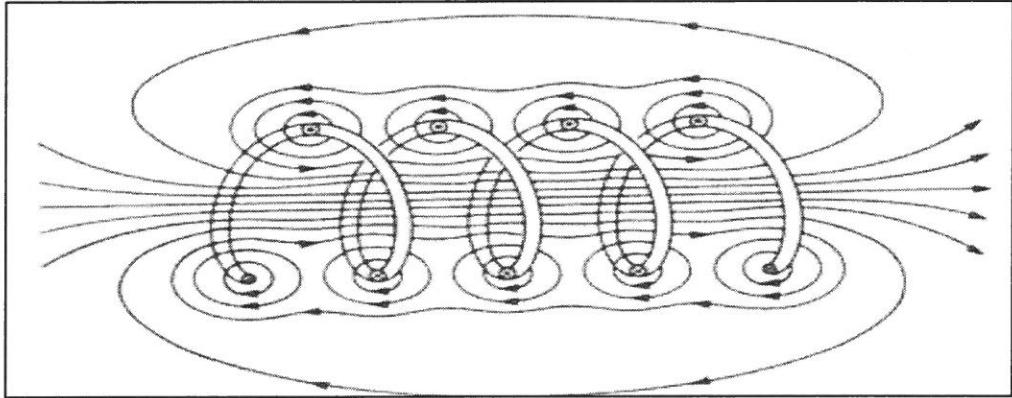
Diğer ısıtma sistemleri ile kıyaslandığında (örneğin gaz-yağ yakıtlı fırınlar) daha hızlı ısıtma, daha fazla enerji tasarrufu, daha yüksek üretim oranı gibi avantajları bulunmaktadır. İndüksiyon ısıtma uygulamaları için geliştirilen sayısal ve analitik yöntemlerin yanı sıra bu sistemlerde maliyetin düşürülmesi için yapılan çalışmalar ve uygulama alanları (mutfak, eritme gibi) yayılmasına sebep olmuştur [1].

Çalışmanın ikinci bölümünde amaç indüksiyon ısıtma işleminin kavranılabilirliğini kolaylaştırmak için bazı tanımlar ve bilinmesi gereken hesaplamalardan bahsedilerek diğer bölümler için altyapı oluşturmaktır. Çalışmanın ikinci bölüm başlıklarından genel olarak bahsedilecek olunursa; ilk olarak Bölüm 2.2 kısmında indüksiyon kavramından bahsedilmiştir ve indüksiyonla ısıtmaya genel bir bakış açısı ile bakılmış, daha sonra Bölüm 2.3 kısmında indüksiyon ısıtmanın çalışma prensibinden bahsedilerek genel bir fikir oluşturulmak istenmiştir. Bölümün 2.4 kısmında ise bu konunun tarihçesi ve bu zamana kadar yapılan çalışmalardan genel olarak bahsedilmiş, 2.5 kısmında ise indüksiyon ısıtmanın üstünlüklerinden, 2.6 kısmında indüksiyon ısıtma işleminin sağlanması için ihtiyaç duyulan temel ilkelerinden (joule ve histeresis kayıpları) bahsedilmiştir. Daha sonra ise 2.7 kısmında çalışma için kolaylık sağlamak adına yapılan modelleme örneklerinden bahsedilmiş daha sonra ise Bölümün 2.8 kısmında ise sadece indüksiyon uygulamalarında bir ölçüt olmayıp, yapılan her tasarım için başarı ölçüsü olarak kullanılan verim hesabından, indüksiyon ısıtma uygulamaları için bu hesaplamada etkisi olan faktörlerden bahsedilmiş ve son

olarak da 2.9 kısmında sistem için gerekli güç hesabından ve bu hesaplama için gerekli olan faktörlerden bahsedilmiştir.

2.2. İndüksiyon ve İndüksiyon ile Isıtma

İndüksiyon ve indüksiyon ısıtma ayrı ayrı düşünüldüğünde ilk olarak indüksiyon nedir ve indüksiyon ısıtma bu olayın neresindedir diye konuya bakılacak olunursa; indüksiyon olayı sonucu indüksiyon ısıtma sistemi geliştirilmiştir. İndüksiyon olayı temelde iletken bir malzemedен değişen akım geçirildiği sürece olurken, indüksiyon ısıtma işlemi ise indüksiyon olayını içine alan bir sistemdir. Bu sistemde bir bobin kullanılarak bobinde oluşturulan indüksiyon olayı ile bobin içerisine yerleştirilen iş parçasının oluşturulan sıcaklık ile ısıtılması sağlanmaktadır. İndüksiyonda bahsedilen iletken malzemedен geçirilen değişken akım, burada bobin üzerinden geçtiği sürece bobin içerisinde ve etrafında bir manyetik alan oluşturur [2]. Bobin içerisine bu manyetik alandan etkilenecek yakınlıkta bir iletken (iş parçası) yerleştirilerek indüksiyon ısıtma olayı gerçekleşmektedir.



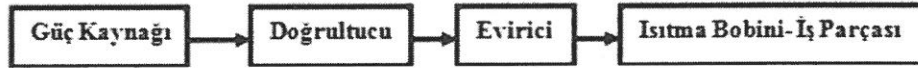
Şekil 2.1. Bobinin içerisinden ve etrafından geçen manyetik alan çizgileri

İndüksiyon olayında manyetik alanın yönü akımın yönüne bağlı, bu durum indüksiyon ısıtma için düşünüldüğünde bobin üzerinden geçen alternatif akım, manyetik alanın yönünün alternatif akım frekansı ile aynı hızda değişmesine sebep olacaktır ve bu nedenle frekans ayarı oldukça önemlidir. Bu olay indüksiyon ısıtma üzerinde anlatılacak olunursa; iletken malzemedен yapılmış iş parçası değişken bir alana maruz bırakıldığında üzerinde gerilim indüklenmesi meydana gelmekte (Faraday Kanunu) ve indüklenen bu gerilim elektron akışına sebep olmaktadır. İş parçası üzerinden akan bu akım bobindeki akıma ters yönlüdür. Buradan da

anlaşılacağı üzere bobindeki akımın frekansını kontrol edebildiğimiz sürece iş parçası üzerindeki akımı da kontrol edebiliriz. Malzeme üzerinden akım geçirebildiğimiz sürece, elektronların hareketine karşı bir direnç oluşur (Lenz Kanunu) ve oluşan bu direnci biz meydana gelen sıcaklık olarak görmekteyiz (Joule Isıtma etkisi). Bütün bu anlatılanlara bakılarak indüksiyon ısıtma için ihtiyacımız olan en temel iki unsur değişen bir manyetik alan oluşturmak ve bu manyetik alan içerisine ısıtılmak istenen iletken (elektriksel olarak) malzemeyi yerleştirmektir [3].

2.3. İndüksiyonla Isıtma Prensibi

Bir önceki kısımda bahsedildiği üzere indüksiyon ısıtmada temel rol oynayan ısıtma bobini seçimi oldukça önemlidir. Isıtılmak istenen malzemeye bağlı olarak bobin üzerinden geçirilecek akımda aynı önemi taşımaktadır. Bu malzemeye bağlı olarak uygun frekansta akım çekilmesi gerekmektedir. Uygun frekanstaki akımı sağlayacak güç kaynağına ihtiyaç duyulmaktadır [4].



Şekil 2.2. İndüksiyon ısıtma genel blok gösterimi

Şekil 2.2’de görüldüğü gibi güç kaynağından başlayarak iş parçası ve ısıtma bobinine kadar olan sistemin güç dönüştürücü devreleri kullanılarak blok diyagramı görülmektedir. Şekilde ilk olarak güç kaynağından elde edilen alternatif gerilim doğrultucu ile doğru gerilime dönüştürülür [5]. Daha sonra elde edilen doğru gerilim evirici aracılığı ile ısıtma işlemi için gerekli olan frekanstaki alternatif gerilime dönüştürülür [5]. Isıtma bobini içerisine yerleştirilen iş parçası bobin tarafından üretilen manyetik alana maruz kalır [6]. Böylece iş parçası üzerinde gerilim indüklendiği için eddy akımları oluşur [6]. Parça üzerinde harcanan güç $I_{eddy}^2 R$ şeklinde ısı olarak açığa çıkmaktadır. Normalde elektrik devrelerinde istenmeyen bu ısı indüksiyon ısıtma sistemlerinde ısıtma işlemini sağlamaktadır. İndüksiyon ısıtmada eddy akımlarının yanı sıra histerezis kayıplarının da etkisi vardır (değeri eddy akımlarına göre küçük olduğu için hesaplamalarda ihmal edilebilir).

2.4. İndüksiyonla Isıtma Sistemlerinin Tarihsel Gelişimi

Elektromagnetik indüksiyon 1831 yılında Faraday tarafından bulunmuştur. Bulunan bu elektromagnetik indüksiyon, indüksiyon ısıtmanın temelini oluşturmaktadır. Faraday yasasına göre bir iletken üzerinden değişen bir akım geçirildiğinde, bu iletkenin etkilenebilecek yakınlıkta bulunan diğer bir iletkenin gerilim indüklenmesi meydana gelir ve genellikle motorlarda ve trafo sargılarında bu indüklenmeden dolayı meydana gelen ısı genellikle istenmeyen bir durum iken indüksiyon ısıtma olayı tam olarak bu ısıdan faydalanarak gerçekleşmektedir.

İndüksiyon ısıtma ile ilgili ilk çalışmalar teorik olarak yapılmış fakat 1900'lü yıllarda ticari olarak uygulamalar yapılmaya başlanmıştır [7]. İlk çalışmalar ergitme ocakları ile başlamıştır, daha sonra indüksiyon fırınları geliştirilmiş ancak bununla beraber karşılaşılan problemler ve bunlara aranan çözümlerle beraber gün gün bu sistemler üzerinde gelişmeler olmasını sağlamıştır [7].

İndüksiyon ısıtma ilk kullanılmaya başlandığında günün teknolojik imkanlarından dolayı maliyet olarak yüksek sistemlerdi ancak gelişen teknoloji ve kontrol yöntemlerindeki yeniliklerle bağlantılı olarak yarı iletken teknolojisindeki gelişmeler ile bu sorun önemli ölçüde azaltılmış oldu. Günümüzde de verimli, güvenli ve temiz olması gibi birçok avantajından dolayı oldukça fazla tercih edilmektedir.

2.5. İndüksiyonla Isıtma Sistemlerinin Üstünlükleri

İndüksiyon ısıtma diğer ısıtma türleri ile kıyaslandığı zaman daha fazla verim sağladığı için günümüzde yaygın olarak kullanılmaktadır. İndüksiyon ısıtmanın avantajlarını maddeler halinde sıralanacak olursa:

- Isıtılacak malzemenin sadece istediğimiz kısmını ısıtabiliriz.
- Metallerin ısıtılma süresi kısadır, ısıtma süreleri kısaldığından indüksiyon ısıtma artan üretim ve düşük maliyet anlamına gelir ve işlem hızlı olduğu için otomatik üretim açısından oldukça elverişlidir.
- Diğer ısıtma sistemlerinde (gaz-yağ yakıtlı fırınlar) olduğu gibi çevreye zarar verebilecek maddeler kullanılmadığı için daha temiz ve daha güvenilirdir.

Yukarıda bahsettiğimiz durumlardan dolayı günümüzde endüstride (eritme, kaynak, haddeleme...) kullanımına ek olarak ev uygulamalarında da (mutfakta tencere vb. ısıtma, su ısıtma işlemi, şofben...) kullanımı yaygınlaşmaya başlamıştır.

2.6. Joule ve Histerezis Kayıpları

Bir indüksiyon ısıtma sisteminde varılmak istenen nokta, ısıtılacak olan parça için ki bu parça iş parçası olarak da adlandırılabilir, gerekli sıcaklığın oluşturulmasıdır. İşlemin bu son aşamasına ulaşılan kadar çeşitli evrelerden geçilmektedir ve bunların anlaşılabilirliğini sağlamak için deri etkisi, malzemenin öz direnci, ısı transferi gibi bilinmesi gereken temel faktörler vardır. Bu faktörlere ek olarak iş parçasının ısıtılması için oluşacak sıcaklığın meydana gelmesini sağlayacak kayıplar olarak adlandırılan histerezis ve joule kayıplarının nasıl oluştuğunun bilinmesi gerekmektedir.

İndüksiyon ısıtma olayı iki enerji kaybına dayanmaktadır. Bunlar joule ve histerezis etkisi nedeni ile meydana gelen kayıplardır:

1. Joule Etkisi Nedeniyle Meydana Gelen Kayıplar: Bir indüksiyon bobinine alternatif gerilim uygulandığında, indüksiyon bobininde bir alternatif akım meydana gelmektedir ve bu akımın oluşturduğu manyetik alan(Amper Yasası) iş parçası üzerinde manyetik alana karşı koyan gerilim üretir (Lenz Kanunu). Bu gerilimin iş parçası üzerinde oluşturduğu akıma eddy ya da Foucault akımı denilmektedir. Eddy akımı orijinal akım ile aynı frekansta fakat ters yöndedir. Oluşan Eddy akımı Joule etkisi aracılığıyla iş parçası üzerinde ısı meydana getirir [8].

2.Histerezis Etkisi Nedeniyle Meydana Gelen Kayıplar: Bu kayıplar ferromanyetik malzemeler aynı ya da farklı yönde magnetize edildiğine dipoller arasında meydana gelen sürtünmeden kaynaklanır. Ferromanyetik malzemelerde Curie sıcaklıklarının (malzemenin paramanyetik hale geçtiğindeki sıcaklığı) altında görülmektedir [9].

İndüksiyon ısıtma uygulamalarının çoğunda, histerezis kayıpları eddy akımlarına oranla oluşan sıcaklığın çok küçük bir kısmını temsil etmektedir. Bu nedenle eddy akımları indüksiyon ısıtmadaki enerji kaybının büyük kısmını oluşturduğu için indüksiyon ısıtmada üzerinde en çok durulan konulardan birisidir ve bazı durumlarda histerezis etkisi ile meydana gelen kayıplar ihmal edilebilir.

2.7. Bobin-İş Parçası Elektrik Modeli

Birçok mühendislik alanında fiziksel bir olguyu incelerken gerçek durumlara benzer bir model oluşturmak gereklidir. Bu modelin amacı gerçek problemi basitçe formülleştirmektir. Böylelikle çalışma için deney ve hata süreci olmamaksızın inceleme yapmak sağlanmış olur.

İndüksiyon ısıtma durumunda ise, bu model oluşturma durumu sistemde sonuç için çok önemli değişikliklere sebebiyet vermeyecek şekilde farklı sadeleştirmeler ve varsayımlara bağlı olarak birçok farklı model oluşmasına neden olmuştur. Elektrik mühendisleri için tasarlanmış modellerde bobin-ış parçası sistemi indüktörler ve dirençlerle modellenmiştir.

Çalışmanın bu kısmında, 2.7.1’de iki adet eşdeğer elektrik modeli elemanların birbiri ile bağlantı şekline göre gösterilmiştir. Bu model sadeleştirmeye bağlı olarak bobin-ış parçası sisteminin direnç ve indüktör ile eşdeğer hale indirgenerek sadeleşmiş halidir ve kısım 2.7.2’de ise seçilen bu elemanlar daha detaylı açıklanmış ve formülle gösterilmiştir.

2.7.1. Seri ve paralel model

Genellikle bobin-ış parçası bir indüktör(L) ve eşdeğer bir direnç ($R_{eş}$) ile elektriksel olarak modellenir. Eşdeğer direnç iş parçasını, indüktör indüksiyon ısıtma bobinini temsil etmektedir. Bu bobin ve iş parçasının değerleri sistemde kullanılacak malzeme seçimine, bu parçaların geometrisine, sistemin frekansına ve diğer parametrelere bağlıdır.

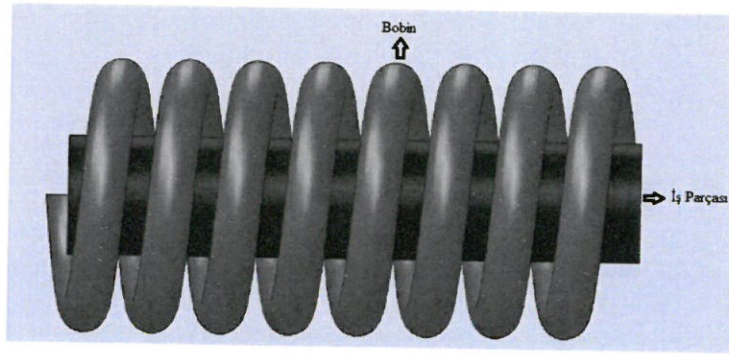
Elektriksel model için bobin ve iş parçasını temsil eden seri ve paralel model olmak üzere başlıca iki model bulunmaktadır.

Seri Model: İndüksiyon ısıtmada dahil olmak üzere yapılan çalışmalarda amaç daha fazla verim elde etme üzerine yoğunlaşmaktadır. Yapılan çalışmaların günlük hayatta kullanılabilirliğini ölçmek için verimi en yüksek olarak sağlayan yöntemler tercih edilir. Bu nedenle bu çalışmada seçilecek model için verim hesabı üzerinden ilerlenilmiştir.

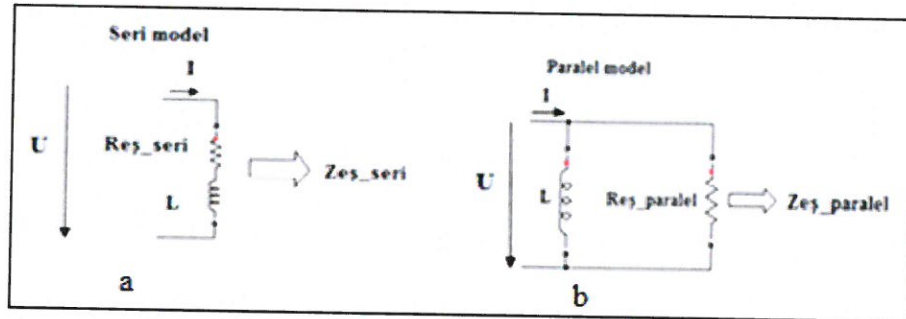
Güç faktörü(Q) herhangi bir sistemde verim konusu için kullanılan parametredir ve sistemi daha etkili kullanmak için yardımcı olur. Bu faktör sistemin reaktif güç (manyetik alan oluşmasına neden olan güç) ve aktif gücü (sistemde kullanılan asıl güç) arasındaki oran olarak Denklem (2.1)'deki gibi;

$$Q = \frac{P_{\text{reaktif}}}{P_{\text{aktif}}} \quad (2.1)$$

Olarak tanımlanır.



Şekil 2.3. Bobin-iş parçası



Şekil 2.4. Bobin-iş parçası elektrik modelleri

Şekil 2.3'de gösterilen bobin-iş parçası katı modelinin Şekil 2.4'de elektriksel olarak modellenmiş hali gösterilmektedir.

Şekil 2.4 (a) da görüldüğü gibi seri model yapısında bobin indüktans ile ve iş parçası eşdeğer direnç ile temsil edilmiş ve birbirine seri bağlanmıştır. Güç formülü Denklem (2.2)'de olduğu gibi;

$$S = I^2 \overline{Z_{eş_seri}} = I^2 (R_{eş_seri} + j\omega L) \quad (2.2)$$

şeklindedir.

Güç faktörü ise Denklem (2.3)'de olduğu gibi;

$$Q_{\text{seri}} = \frac{|P_{\text{reaktif}}|}{P_{\text{aktif}}} = \frac{wL}{R_{\text{eş_seri}}} \quad (2.3)$$

ifade edilir.

Denklem (2.3) incelendiğinde seri model kullanılarak yapılan çalışma için indüktans ve direnç değerleri seçimi ile verim artırma konusu üzerinde çalışılabilir. Seçilen iş parçası temsili direnç değeri azaltılarak verim artırılabilir.

Paralel Model: Şekil 2.4 (b) de görüldüğü gibi paralel modelde indüktans ve eşdeğer direnç birbirine paralel bağlanmıştır ve güç formülü Denklem (2.4)'de olduğu gibi;

$$S = \frac{U^2}{Z_{\text{eş_paralel}}} = U^2 \left(\frac{1}{R_{\text{eş_paralel}}} + \frac{1}{jwL} \right) \quad (2.4)$$

şeklindedir.

Güç faktörü ise Denklem (2.5)'de olduğu gibi;

$$Q_{\text{paralel}} = \frac{1/wL}{1/R_{\text{eş_paralel}}} = \frac{R_{\text{eş_paralel}}}{wL} \quad (2.5)$$

şeklindedir.

Seri modelde olduğu gibi paralel model içinde verim konusunda Denklem (2.5) incelenerek çalışma yapılabilir. Paralel model seri modelden farklı olmasına rağmen, güç faktörünün rezonans frekansta benzer olduğu gözlemlenmiştir. Bu durumdan yola çıkılarak her iki modelin güç faktörü için Denklem (2.6)'da ki gibi;

$$Q = Q_{\text{paralel}} = Q_{\text{seri}} \quad (2.6)$$

eşitliği kullanılabilir.

İki model arasında birinden diğerine geçiş yapmak için Denklem (2.7)'deki;

$$R_{\text{eş_paralel}} = R_{\text{eş_seri}} Q^2 \quad (2.7)$$

eşitlik kullanılabilir.

Bu iki model arasında üzerinde çalışmak için tercih etme konusunda, hesaplama kolaylığı, bobin ve eşdeğer direnç üzerindeki akımın eşit olması gibi özelliklerinden dolayı daha çok seri model tercih edilir.

2.7.2. Eşdeğer direnç ve endüktans

Çalışmanın bu kısmında bir önceki kısımda bahsedilen seri ve paralel modelde kullanılan direnç ve bobin elemanlarından ve hesaplamalarından bahsedilmiştir.

Eşdeğer Direnç: Eşdeğer direnç iş parçasını temsil etmekte ve iş parçası da indüksiyon ısıtma sistemlerinde bobindeki alternatif akıma maruz kalarak üzerinde oluşan eddy akımları ile oluşan sıcaklıkla ısınır. İndüksiyon ısıtmanın bu çalışma prensibi göz önünde tutularak iş parçası için üzerindeki tüm eddy akımları kadar ısıyayar sonucu elde edilebilir. Yani kısaca bu durum için eddy akımları, iş parçasındaki yayılan gücü temsil eder denilebilir. Eşdeğer direnç Denklem (2.8)'de gösterildiği gibi;

$$R_{eş}^1 = R_s K_R S_{ısıtımış} \frac{N_c^2}{l_w^2} \quad (2.8)$$

eşitliği ile hesaplanır.

R_s parçanın yüzeysel direncidir, iş parçasının elektriksel direnci ρ_w ve dalma derinliğinin δ_w ile Denklem (2.9)'da ki;

$$R_s = \frac{\rho_w}{\delta_w} \quad (2.9)$$

eşitlik şeklinde hesaplanabilir.

K_R parçanın yarıçapı ile dalma derinliği arasındaki elektrik yolunun değişiminin dikkate alındığı faktördür ve Denklem (2.10)'da gösterildiği gibi;

¹ $R_{eş}$ direnci hesaplaması için Maxwell denklemlerinden yararlanılmıştır ve bobin uzun bir selenoid olarak hesaplamalar yapılmıştır.

$$K_R = 1 - e^{-\frac{2r_w}{\delta_w}} \quad (2.10)$$

şeklinde hesaplanır.

r_w : İş parçasının yarıçapıdır.

$S_{\text{ısıtılmış}}$: Isıtılmış yüzeyi temsil eder. Genellikle parçanın çevre uzunluğu ile kendi uzunluğunun çarpımı şeklinde hesaplanır.

l_w : İş parçası uzunluğudur.

N_c : İndüksiyon sarım sayısıdır.

Isıtılmış yüzey ve R_s değerleri yerine yazılarak Denklem (2.8)'de düzenleme yapılarak Denklem (2.11)'deki eşitlik;

$$R_{eş} = K_R N_c^2 \rho_w \frac{2\pi r_w}{\delta_w l_w} \quad (2.11)$$

şeklinde elde edilir.

Bobin sarım sarısı, iş parçası uzunluğu, seçilen iş parçasının elektriksel direnci, dalma derinliği vb. gibi indüksiyon ısıtmanın etkilendiği birçok faktör dikkate alınarak elde edilen iş parçası temsili eşdeğer direnç formülü Denklem (2.11)'de gösterilmiştir.

Bobin: Bobin-iş parçası ikilisinde bobin için yapılan modellemelerde indüktör bobini temsil etmektedir. Burada kullanılan bobin içi boş hava nüveli bobindir. Hava nüveli bobin için Denklem (2.12)'de görüldüğü gibi;

$$L \approx \frac{10\pi\mu_0 N_c^2 r_c^2}{9r_c + 10l_c} = 3,9410^{-5} \frac{d_c^2 N_c^2}{18d_c + 40l_c} \quad (2.12)$$

şeklinde hesaplama yapılır.

L : bobinin değeridir.

l_c : bobin uzunluğudur.

r_c : bobin iç yarıçapı ve

d_c : ise çaptır.

μ_0 boşluğun manyetik geçirgenliğidir ve değeri ise $4\pi 10^{-7} \text{H/m}$ 'dir.

Bobin ve iş parçasının belirli bir şekli yoktur herhangi bir şekle sahip olabilir ve iş parçasının bobin ile daha kolay bağlantı sağlaması yani bobindeki manyetik alandan etkilenmesi için genellikle bobinin içerisine yerleştirilmektedir [10]. Denklem (2.12)'de indüksiyon bobinini temsil eden indüktans için uzunluğuna, yarıçapına, manyetik geçirgenliğine bağlı olarak yaklaşık bir hesaplama gösterilmiştir. Ancak burada gösterilen denklemin dışında bu indüktans değeri indüktans-iş parçası geometrisine, iş parçasının malzemesine ve sıcaklığa bağlı olarak değişir.

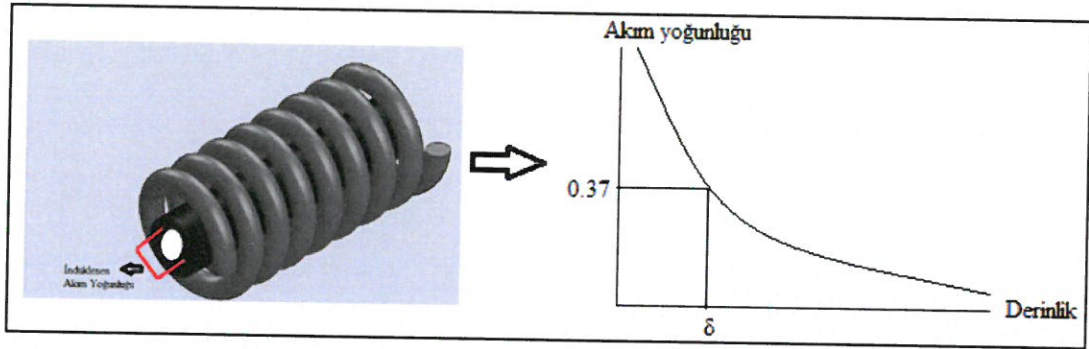
2.8. Verim

Yapılan her tasarımda başarı ölçüsü olarak verim hesabı oldukça önemlidir. Bu hesaplama her tasarım için tasarımda etkin rol alan parametreler hesaba katılarak yapılmaktadır. İndüksiyon ısıtma uygulamalarında verimi maksimum olarak elde edebilmek için, ilk olarak bobine kadar olan kısma bakılarak değişen frekansla ihtiyaca bağlı olarak yüksek frekansı ve alternatif akım ya da gerilimi en az kayıpla elde edebilme ve ikinci olarak da bobinden malzemeye sağlıklı bir şekilde ısı transferinin gerçekleştirmek gerekmektedir. İndüksiyon ısıtma uygulamalarında amaç ısıtılmak istenen malzemede sıcaklığın en az kayıpla maksimum olarak oluşturulmasıdır. Bu nedenle ısı transferi oldukça önemlidir ve homojen bir ısıtma işlemi için ısının malzemenin her yerine eşit yayılması hedeflenmektedir. Bu homojen dağılımı sağlamak konusunda bobinden iş parçasına enerji transferi verimliliği oldukça önemli rol almaktadır. Bir indüksiyon ısıtma sistemi tasarımı iyi yapılmazsa bu iletimin verimi oldukça düşük olabilir. Tasarım kriterlerine ek olarak verimi oluk etkisi, halka etkisi, yakınlık etkisi gibi konularda etkilemektedir. Ancak indüksiyon ısıtmada, sistemin frekansı ve indüktör-iş parçası geometrisi verimi etkileyen iki temel parametredir. Uygun frekans seçimi ve bobin geometrisi tasarımın başarısını belirleyebilir.

2.8.1. Dalma derinliği

İndüksiyon ısıtmada verimi etkileyen önemli faktörlerden birisi olarak uygun frekans sağlanması konusundan bahsedilmiştir. Bu frekansın seçimi olarak rezonans frekans ve dalma derinliği parametreleri uygun frekans seçiminde etkin olarak rol almaktadır. İndüksiyon ısıtma ile ilgili genel bilgilerin verildiği önceki kısımlarda bahsedildiği üzere, indüksiyon ısıtma uygulamalarında iş parçasına ısı aktarımı yapabilmek için

bobin üzerinde bir magnetik alan oluşturulduğundan bahsedilmiş ve iş parçası da bu manyetik alana maruz bırakılarak eddy akımlarının oluşması sağlanmaktadır. Bu akımların iş parçasındaki dağılımı düzgün değildir ve daha çok merkezden dışa doğru yani yüzeye yakın yerlerde daha yoğundur. Bu duruma dalma derinliği denilir. Bu yoğunluğun farklılıkları ise frekansa ve iş parçasının öz direncine bağlıdır. Ayrıca bu dalma derinliği çalışılacak alan ile bağlantılı olarak malzemenin ne kadar ısıtılmak istenmesi ile ayarının yapılması gerekir.



Şekil 2.5. İş parçası üzerinde indüklenen akım

Şekil 2.5 incelendiğinde, iş parçasındaki akımın eksponansiyel olarak azaldığı ve akımın değerinin yüzeyde yoğunlaşarak değerinin %37'sine düştüğü görülür. Dalma derinliği δ , Denklem (2.13)'de görüldüğü gibi;

$$\delta = \sqrt{\frac{2\rho}{\mu\omega}} = 503 \sqrt{\frac{\rho}{\mu_r f}} \quad (2.13)$$

şeklinde hesaplanabilir.

δ : dalma derinliği

f: akım frekansı

ω : açısal frekans ($\omega=2\pi f$)

ρ : malzemenin öz direncidir.

μ_r : malzemenin manyetik geçirgenliği ile ilgilidir, ($\mu=\mu_r\mu_0$, boşlukta değeri $\mu_0=4\pi 10^{-7}$ H/m'dir.

Yüksek dalma derinliğinde (düşük frekansta), eddy akımları karşıt yönlü olduğu için normal akımlarla birbirini etkisiz hale getirebilir. Bu durumda, iş parçasındaki ısı azalır ve böylece ısıtma işleminin verimliliği azalmış olur. Bu bağlamda eddy

akımlarının etkisiz hale getirilmeyeceği bir frekansa ihtiyaç duyulur ve böylelikle yüksek verim sağlanmış olur [11].

Dalma derinliği değerinin indüksiyon ısıtma konusundaki etkisine verilen formüller üzerinden bakılacak olunursa, ilk olarak Denklem (2.13) incelendiğinde frekans ve dalma derinliği ilişkisi için frekansın artırılması ile dalma derinliğinin azaldığı görülmektedir. Denklem (2.10) incelendiğinde dalma derinliğinin azalması ile K_R değerinin arttığı görülür. Denklem (2.11)'de verilen $R_{e\zeta}$ formülünde dalma derinliğinin azalması ve K_R değerinin artması ile iş parçasını temsil eden $R_{e\zeta}$ değeri artar ve üzerinden daha az akım geçmesi ile oluşacak güç azalmış olur.

İndüksiyon ısıtma olayında ısıtmayı gerçekleştirirken verim konusuna dikkat edilmesi hususundan bahsedilmiştir. Dalma derinliği konusunun ısıtma işleminde verim kısmına etkisi incelenecek olunursa verimi olumlu ya da olumsuz olarak etkilediği noktaya ulaşmak gerekmektedir. Üzerinde çalışma yapılan her konu için alt ve üst sınırlar belirleyici olabilir ve bu nedenle kritik sınırlar olarak adlandırılabilir. Dalma derinliğinin indüksiyon ısıtma işlemine katkı sağlayabilmesi için verimi düşürmemesi gerekmekte ve bu nedenle kritik önem sağlayan noktaları belirlenmelidir. Frekans dalma derinliğinin ilişkisinin ters orantısından bahsedilmiştir. Burada frekansın belirli bir değerin altına düşmesi durumunda artan dalma derinliği ve azalan eddy akımı durumunda verimin düştüğü noktadaki frekans kritik frekanstır.

2.8.2. Bobin-iş parçası bağlantısı

İndüksiyon ısıtmanın en son aşaması bobindeki alternatif akım ile iş parçası üzerinde oluşturulan akımlar ile sıcaklık meydana getirmektir. Olayın temeli meydana gelecek bu sıcaklığa bağlı olduğu için bobin-iş parçası uyumu oldukça önemlidir. Buradaki uyumdan kastedilen sistemi en verimli hale getirecek yakınlığı ve magnetik alandan simetrik olarak faydalanılacak pozisyonu sağlamaktır. Bobin-iş parçası arasındaki bağlantıda daha verimli bir iletişim için çaplarının birbirine yakın olması önemlidir. Bu yakınlığın önemi belirtilecek olunursa, bobinin iç çapı ile iş parçası arasındaki mesafe yine kadar yakın tutarsak, bobindeki magnetik alan çizgilerine iş parçası daha fazla maruz kalacak ve daha fazla eddy akımı oluşacak ve bu da daha fazla enerji yani daha fazla verim anlamına gelir. Burada dikkat edilmesi gereken bir husus ise yakınlığı mümkün olduğunca fazla tutmak ancak iki malzeme arasında kısa devreden

kaçınmak için birbirine değmemesini sağlamaktır. Yani mutlaka bir boşluk bırakılması gerekmektedir. Buna ek olarak bobin-iş parçası için oluşabilecek kısa devreden kaçınmak için ısıya dayanıklı malzeme tercih edilebilir ancak bu malzeme kullanımında ise ısı transfer işleminde verimi azaltma hususuna dikkat edilmelidir. Tercih edilen malzemelerin kalınlığı ısı transferini olumsuz etkileyebilir.

2.9. Gerekli güç tahmini ve hesabı

Bu çalışmada dahil olmak üzere yapılan tüm uygulamalar için bir model oluşturma gerekliliğinden önceki kısımlarda bahsedilmişti. Bu oluşturulan modeller gerçekte yapılmak istenen çalışmalar için gerekli olan hesaplamaları, maliyeti ve hatta günümüzde yapılan modellerin simülasyonları ile gerçek sonuçlara oldukça yakın sonuçlar elde etmek mümkündür. İndüksiyon ısıtma uygulamaları için de uygulama çalışması öncesi hesaplanması ve bilinmesi gereken en önemli değerlerden birisi bize gereken frekans değerini sağlayacak güç kaynağını belirlemek ve sistemin aşamaları için gereken güç tahminini yapmaktır.

Sisteme uygun şekil ve malzemeden oluşan iş parçası ve oluşturulmak istenen sıcaklık belirlendikten sonra işlem frekansı, bobin uzunluğu ve rezonans tankı besleyen dönüştürücü için gerekli olan güç hesabı yapılmalıdır.

2.9.1. Güç gereksinimi

Bir iş parçasını belli bir sıcaklığa kadar ısıtmak için gereken güç Denklem (2.14)'de görüldüğü gibi;

$$P_{i\dot{s}} = \frac{mc(T_{son} - T_{ilk})}{t} \quad (2.14)$$

şeklinde bulunabilir.

$P_{i\dot{s}}$: İş parçasının gücüdür.

m : iş parçasının kütesidir.

T_{son} ve T_{ilk} : başlangıç ve son sıcaklıkların ortalama değerleridir.

c : malzemenin belirli bir sıcaklığının ortalama değeridir.

t : gerekli ısıtma süresidir.

Bazen de gerekli güç hesabı yapmak için ısı kavramı ile gerekli güç hesabı Denklem (2.15)'de görüldüğü gibi;

$$P_w = \rho_r HC \quad (2.15)$$

yapılabilir.

Isı kavramı: HC [kWh/kg]

ρ_r : kg/h'deki üretimdir.

P_w 'nin parçayı ısıtmak için gereken gücü temsil ettiğini göz önünde bulundurursak, dönüştürücülerin sağlaması gereken güç, kayıplardan dolayı daha büyüktür. Dönüştürücünün etkin gücü Denklem (2.16)'da görüldüğü gibi;

$$P_c = \frac{P_w}{\eta_T} \quad (2.16)$$

şeklinde bulunabilir.

$$\eta_T = \eta_{\text{ısı}} \times \eta_{\text{elektriksel}} \quad (2.17)$$

$\eta_{\text{ısı}}$: ısı verimdir.

$\eta_{\text{elektriksel}}$: elektriksel verimdir.

Dönüştürücü gücü hesabında bahsedilen ısı verim ve elektriksel verim kavramlarına kısaca bakılacak olunursa;

Isıl Verim: Yüzey kayıplarını içermektedir. Bu kayıplar ısıya dayanıklı malzemenin sağladığı izolasyon sayesinde azalabilir ancak elektriksel kayıpların artmasına neden olabilecek elektromagnetik bağlantının bozulmasını engellemek için dikkatlice tasarlanmalıdır. Denklem (2.18)'de görüldüğü gibi;

$$\eta_{\text{ısı}} = \frac{P_w}{P_w + P_{\text{ısılkayıplar}}} \quad (2.18)$$

şeklinde hesaplanır. Burada görülen ısı kayıplar Denklem (2.19)'da görüldüğü gibi;

$$P_{\text{ısılkayıplar}} = 3,74 \times 10^{-4} \frac{I_c}{\log\left(\frac{d_c}{d_w}\right)} \quad (2.19)$$

şeklinde hesaplanır.

$P_{\text{ısılkayıplar}}$: Yüzey boyunca ısı kayıplar

d_c ve d_w : Bobin ve iş parçası çapı

l_c : Bobin uzunluğu

Elektriksel Verim: Elektriksel verim bobindeki kayıpları (çevrim ve yüzeyindeki) temsil eder. Denklem (2.20)'de görüldüğü gibi;

$$\eta_{\text{elektriksel}} = \frac{1}{1 + \frac{d_c - \delta_c}{d_w - \delta_w} \sqrt{\frac{\rho_c}{\mu_r \rho_c}}} \quad (2.20)$$

şeklinde hesaplanır.

δ_w ve δ_c : iş parçası ve bobinin dalma derinliğidir.

ρ_w ve ρ_c : iş parçası ve bobinin öz direncidir.

μ_r : iş parçasının manyetik geçirgenliğidir.

2.9.2. Isıtma bobini

İndüksiyon ısıtma işleminde seçilecek bobin oldukça önemlidir. Isıtılacak malzemeye göre şekillendirilmelidir ve ısıtma işlemi için gerekli olan bobin uzunluğunun bilinmesi gerekmektedir. Bobin uzunluğu konusu üzerinde durulması gerekmektedir. Isıtma işlemi için seçilen bobin ne kadar uzun olursa bobin sarım sayısı da o kadar fazla olur ve bu da Denklem (2.11)'e bakılarak iş parçası için hesaplanan eşdeğer direnç değerinin azalması anlamına gelir. Bu gerekli olan miktar güç için daha az akım ve daha az kayıp anlamına gelir. Ters durum için bobin ne kadar kısa olursa, daha az sayıda sarım olur ve Denklem (2.11)'de eşdeğer direnç formülüne bakılarak daha yüksek bir eşdeğer direnç olur. Sonuç olarak bir miktar güç vermek için, daha fazla akım gerekmektedir ve bu bobinde daha fazla kayıp demektir. Bu sonuçlar değerlendirildiğinde bobin uzunluğu ile orantılı güç gereksinimine ihtiyaç vardır.

Genellikle endüstriyel uygulamalarda ısıtma bobinini su ile soğutma işlemi tercih edilir. Eğer akım yüksekse, soğutma sisteminin büyük olması gerekir. Kalın parçalarda bobin uzunluğundan (sürekli işlemde) veya parçanın ısıtılma süresi (statik

süreçte) parçanın merkezine ısı yayılma süresi ile belirlenmesinden dolayı diğer hususlarda dikkate alınmalıdır. Eğer güç yüksek ve parçanın bobin içindeki süresi düşükse, yüzey sıcaklığı artar ancak merkez hızlı ısınmaz. Bu koşullar altında ısıtma homojen gerçekleşmez ve iş parçasında mekanik basınç oluşabilir.

3. İNDÜKSİYON ISITMA SİSTEMLERİNİN MODELLENMESİ

3.1. Giriş

Bir önceki bölümde sistemlerin uygulama öncesi davranışlarını gerçek uygulama aşamasına geçmeden önce incelemek için model tasarlama öneminden bahsedilmiş ve indüksiyon uygulama için bir model tasarımı üzerinde durulmuştu. Model tasarımı gerçekleştirildikten sonra diğer önemli bir aşama bu model üzerinde yapılacak olan çözüm yöntemleridir. İndüksiyon ısıtma sistemlerine uygulanan farklı çözüm yöntemleri vardır ve bunlar analitik ve sayısal yöntemler olmak üzere iki ana başlıkta toplanabilir.

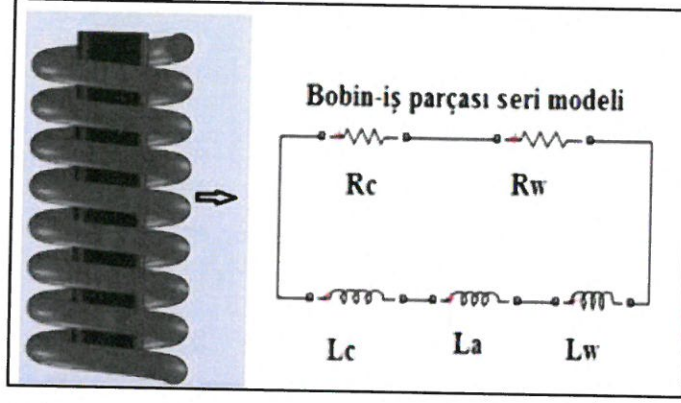
İndüksiyon ısıtma modellemesinin çözüm yöntemlerinden analitik yöntem için bir önceki bölümde bobin-iş parçası, bir indüktans ve direnç kullanılarak modellenmiş ve hesaplamaları yapılmıştır. Analitik yöntem için yapılan bu hesaplamalar oluşturulan model için gerçekçi sonuçlar verebilir ancak gerçek uygulamalar için daha yakın sonuçlar alınabilecek yöntemlere başvurulmalıdır.

Çalışmanın bu bölümünde, 3.2 kısmında bir önceki bölüme göre daha kompleks bir analitik yöntem gösterilmiştir. Ancak analitik yöntemler ne kadar kompleks hale getirilse de daha kesin sonuçlar elde edebilmek için sayısal yöntemlere başvurmak gerekir. Bu nedenle bölümün 3.3 kısmında ise bu sayısal yöntemlerden bahsedilmiştir.

3.2. Analitik Yöntem

İndüksiyon ısıtmada yapılan modellemede çözüm yöntemlerinden birisi olan analitik yöntem için bir önceki başlıkta oldukça basit bir yaklaşımla çözümlenme yapılmıştı. Modellemesi yapılan sistem için birçok analitik çözüm vardır. Bu bölümde bir önceki analitik çözüme göre ek parametreler eklenerek daha kompleks bir modelleme yapılmıştır. Burada yapılan modellemede indüksiyon ısıtma sisteminin trafo sistemi ile benzerliğinden yola çıkılmıştır.

Şekil 3.1’de bu benzerlikten faydalanılarak yapılan modelleme gösterilmiştir. Şekildeki R_w iş parçası direncini, R_c bobin direncini, L_a boşluk indüktansını, L_w iş parçası endüktansını, L_c bobin endüktansını temsil etmektedir.



Şekil 3.1. Bobin-iş parçası seri elektrik modeli

Şekil 3.1’de görüldüğü gibi bir önceki analitik yöntemden farklı olarak bobin direnci, boşluk indüktansı, iş parçası indüktansı gibi parametreler eklenmiştir.

Bir iş parçasını ısıtan bobinin şekildeki parametreleri Denklem (3.1), (3.2), (3.3), (3.4), (3.5)’de görüldüğü gibi;

$$R_w = K(\mu_w p A_w) \quad (3.1)$$

$$R_c = K(k_r \pi r_c \delta_c) \quad (3.2)$$

$$L_a = K \left(\frac{A_a}{2\pi f} \right) \quad (3.3)$$

$$L_w = K \left(\frac{\mu_w p A_w}{2\pi f} \right) \quad (3.4)$$

$$L_c = \frac{R_c}{2\pi f} \quad (3.5)$$

şeklinde hesaplanabilir.

K bir sabittir ve Denklem (3.6)’da ki gibi;

$$K = \frac{2\pi f \mu_0 N_c^2}{l_c} \quad (3.6)$$

şeklinde bulunur.

N_c : bobinin sarım sayısıdır ve l_c bobin uzunluğudur.

A_w : iş parçasının kesit alanıdır ve Denklem (3.7)'de görüldüğü gibi;

$$A_w = \pi r_w^2 \quad (3.7)$$

şeklinde bulunur.

r_w : iş parçasının yarıçapıdır.

A_a : boşluğun m^2 cinsinden kesit alanıdır ve Denklem (3.8)'de görüldüğü gibi;

$$A_a = \pi(r_c^2 - r_w^2) \quad (3.8)$$

şeklinde hesaplanır.

r_c : bobinin iç yarıçapıdır.

μ_w : iş parçasının manyetik geçirgenliğidir, (boyutsal olarak $\mu = \mu_w \times \mu_0$ ve $4\pi 10^{-7} H/m$)

p ve q : boyutsal faktörlerdir.

δ_c : bobindeki dalma derinliğidir.

f : frekanstır.

k_r : sarımlar arasındaki boşluğu dikkate alan bir düzeltme faktörüdür ve bu değer 1 ile 1,5 arasındadır.

Bunlar dikkate alındığında verim Denklem (3.9)'da görüldüğü gibi;

$$\eta_{\text{elektriksel}} = \frac{R_w l_c^2}{(R_c + R_w) l_c^2} = \frac{R_w}{R_c + R_w} \quad (3.9)$$

şeklinde hesaplanabilir.

İndüksiyon ısıtma uygulamasının trafo ile benzetilerek modellenmesinin yapıldığı bu kısımda, bir önceki model için eklenen parametreler ile biraz daha karmaşık olduğu görülmektedir. Bu analitik yöntemlere bakıldığında başlangıç olarak çözüme yönelik alt yapı oluşturma ve genel bir fikir sağlama açısından kullanışlı olabilir ancak diğer bir çözümleme yöntemi olan sayısal yöntemler daha ile daha iyi sonuçlar alınmaktadır.

3.3. Sayısal Yöntem

İndüksiyon ısıtma uygulamaları kullanılmaya başlandığı ilk dönemlerden bu yana analitik yöntemler kullanılmış ancak sistemin gelişen teknoloji ile daha karmaşık bir hal alması ile analitik yöntemler yetersiz kalmaya başlamıştır. Bilgisayarların yayılmaya başlaması ve hızlı bir şekilde gelişme göstermesi ile sayısal yöntemlerin de kullanılması yaygınlaşmıştır. Ticari yazılımların geliştirilmesi ve simülasyon imkanlarının oluşması ile bu yöntem daha da değerli olmuştur ve devam eden gelişmeler ile daha da önem kazanması beklenmektedir.

Çalışmanın bu bölümünde, kısım 3.3.1’de indüksiyon ısıtma sistemi problemlerinde kullanılan genel elektromagnetik formüller kısaca verilmiştir ve daha sonra kısım 3.3.2’de indüksiyon ısıtma sistemi problemleri için sayısal analizde kullanılan farklı çözüm yöntemlerinden bahsedilmiştir.

3.3.1. Elektromanyetik indüksiyon

Elektromanyetik davranış Maxwell eşitliği ile tanımlanır ve Denklem (3.10), (3.11), (3.12), (3.13)’de görüldüğü gibi;

$$\nabla \times E = -(\frac{dB}{dt}) \quad (3.10)$$

$$\nabla \times H = -(\frac{dD}{dt}) + J \quad (3.11)$$

$$\nabla D = -\rho \quad (3.12)$$

$$\nabla B = 0 \quad (3.13)$$

eşitlikleri kullanılır.

Denklemin diferansiyel formunda B manyetik akı yoğunluğu, H manyetik alan yoğunluğu, E elektrik alan, J akım yoğunluğu, D elektrik yer değiştirme alanıdır.

Genellikle üç genel elektromagnetik alan tanımlanır:

- Statik alanlar: Zaman bağımlılığı ihmal edilir[12].

- Frekans domaininde alanlar: Zaman bağımlılığı tek bir açısız frekanstaki sinüsoidal fonksiyonlar aracılığıyla değerlendirilir. Maxwell denklemleri genellikle elektro ve magnetostatik formülasyona indirgenir [12].
- Zaman domaininde alanlar: Zaman alanı dikkate alınır. Maxwell denklemleri genellikle elektro ve magnetostatik formülasyona indirgenir [12].

Bu üç durumda incelendiğinde, indüksiyon ısıtmada sayısal simülasyonların çoğunun frekans alanında yapıldığı ve magnetostatik yaklaşım kullanıldığı görülmektedir. Sürülme akımı (D'den kaynaklanan), iletim akımları (J) ile karşılaştırıldığında daha küçük olduğu kabul edilerek Denklem (3.11)'de görüldüğü gibi;

$$\nabla \times H = -J \quad (3.14)$$

eşitliği şeklinde elde edilir.

Hesaplanan fiziksel değerler sinüsoidal zamanla değişmekte ve karmaşık şekilleri ifade etmede kullanılır, problemin çözümünü elde etmede kullanılan denklemler ise zamandan bağımsızdır. Bu nedenle Denklem (3.10)'dan Denklem (3.15)'de görüldüğü gibi;

$$\nabla \times E = -j\omega B \quad (3.15)$$

elde edilir.

3.3.2. Sayısal çözümleme yöntemleri

İndüksiyon ısıtma problemlerinde kullanılan çok sayıda sayısal yöntem vardır. En sık kullanılan yöntemler sonlu farklar yöntemi, sonlu elemanlar yöntemi, sınırlı elemanlar yöntemidir. Elektromagnetik sayısal modellemenin çözümünde diferansiyel ve integral yöntemleri olmak üzere iki temel yöntem vardır.

Diferansiyel yöntemler, elektromanyetik korunum denklemlerinin diferansiyel yaklaşımını kullanarak problemi çözmektedir. Bunlar içinde en yaygın kullanılanı sonlu elemanlar yöntemi ve sonlu farklar yöntemidir. Sonlu farklar yöntemi, türevleri eşdeğer sonlu fark yaklaşımları ile değiştirilerek yaklaşık diferansiyel denklem çözme yönteminden oluşur. İlk olarak, incelenecek nesne çalışmak istediğimiz noktalarda ızgara sistemi oluşturularak ayrıştırılır. Daha sonra işlemin diferansiyel denklemleri,

çözümleri ızgara noktalarına ilişkilendiren sonlu fark denklemi ile yaklaştırılır. Son olarak problem belirlenen sınır ya da başlangıç koşulları dikkate alınarak çözülür. Sonlu fark metoduna benzer şekilde, sonlu elemanlar yöntemi de çözüm bölgesinin elemanlara ayrılmasına ve düğümlerinde deneme fonksiyonlarının çözümüne dayanan sayısal teknik yöntemlerinden biridir. Sonlu elemanlar yönteminin sonlu farklar yöntemine göre avantajı karmaşık geometrili ve sınırlı koşullu analizlerin üstesinden gelmesidir. Ancak sonlu fark yönteminin uygulanması daha kolaydır.

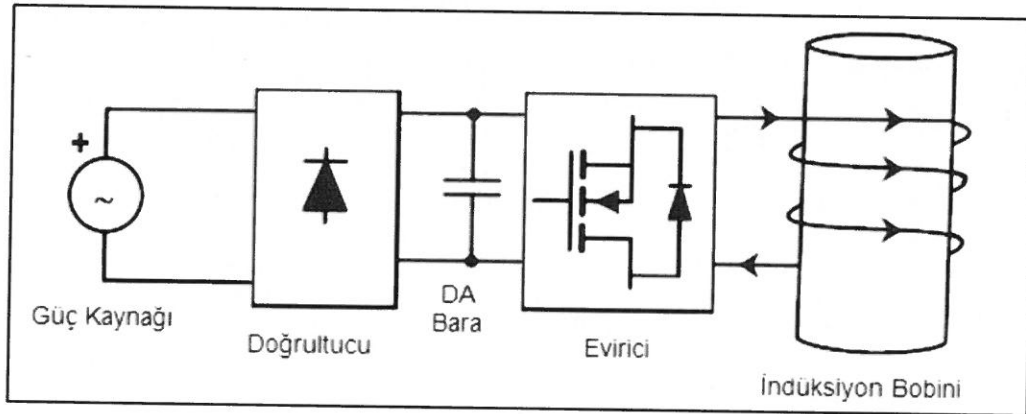
İntegral yöntemlerinde problem, elektromagnetik parametrelerin integral formülasyonudur. İntegral yöntemlerde, sınırlı elemanlar yöntemi ve ortak empedans yöntemi gibi sayısal yöntemleri kullanabiliriz. Sınırlı elemanlar yöntemi, sonlu fark metodu ve sonlu elemanlar metodunun büyük bir ağa ihtiyaç duyacağı uzun sistemler için kullanılır ve diferansiyel yöntemlerle kombinasyonu iyi sonuçlar verir.

İndüksiyon ısıtma problemlerinin kendine özgü yöntemi yoktur, duruma bağlı olarak bir veya ikinci bir sayısal yöntem kullanılır.

4. İNDÜKSİYON ISITMA SİSTEMLERİNDE EVİRİCİLER

4.1. Giriş

İndüksiyon ısıtma sistemi aşamaları Şekil 4.1’de görüldüğü gibidir. İndüksiyon ısıtma uygulamaları için iki adet güç dönüştürücüsü kullanılmaktadır. İlk olarak doğrultucu ile şebekeden gelen gerilim doğrultulur ve daha sonra indüksiyon ısıtma uygulamasının en önemli aşamalarından olan frekans değişimi ve alternatif akım ya da gerilimin oluşturulduğu evirici ile dönüşüm işlemi yapılır. İndüksiyon ısıtmada sıcaklık, bobinde dolaşan değişken akım vasıtasıyla elde edilen değişen bir manyetik alan tarafından üretilen eddy akımları tarafından üretilir. Bobinde meydana gelecek yüksek frekans ve magnetik alanı oluşturduğu için evirici indüksiyon ısıtmada çok önemlidir. Bobinde yüksek değişen bir akıma sahip olmak için indüktör ile seri veya paralel bir kondansatörden oluşan bir salınım devresi kullanılmaktadır. Rezonans tank olarak da bilinen bu salınım devresi, genellikle rezonans tankın frekansına, gücüne ve türüne bağlı olan bir dönüştürücü ile beslenir.

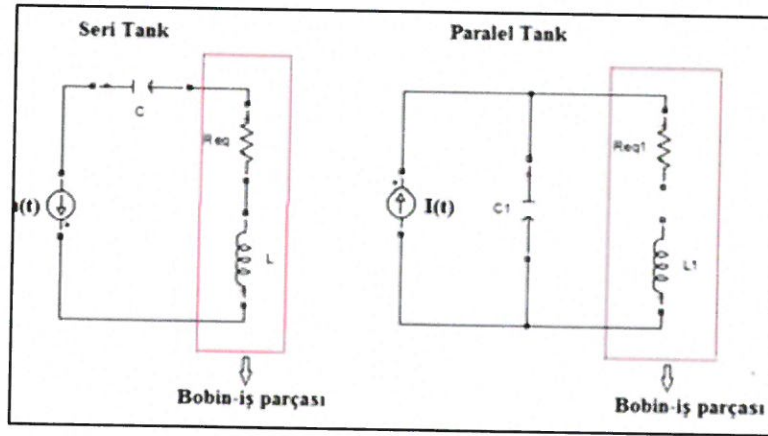


Şekil 4.1. İndüksiyon ısıtma sistemi

İndüksiyon ısıtma dönüştürücülerinin sınıflandırmasını yapmak için bir çok kriter vardır. Şekil 4.2’de görüldüğü gibi, bunlardan birisi de, dönüştürücüleri rezonans tankın türüne göre sınıflandırmaktır; burada en temel topolojiler seri ve paralel tanklara dayanan topolojilerdir. Bu iki topoloji için yük rezonanslı eviricilerde rezonans bağlantı şekline göre akım ya da gerilim beslemeli olarak ikiye ayrılır.

Bu tanklara bağlı dönüştürücüler seri bağlantıda gerilim beslemeli seri rezonans eviriciler ve paralel bağlantıda ise akım beslemeli paralel rezonans eviricilerdir.

Bu bölümde, indüksiyon ısıtma dntrcleri ile ilgili temel kavramlar ve bunlara bağlı topolojiler tanıtılmaktadır. Öncelikle, üzerinde durulacak olan seri rezonans evirici ve paralel rezonans evirici mantığının daha iyi anlaşılması için rezonans olayına kısaca değinip, gerilim beslemeli seri rezonans inverter ve akım beslemeli paralel rezonans inverter yapıları ve tankları, diğer yapıları ve indüksiyon ısıtma alanında kullanılan temel kavramları anlamak adına temel oluşturduğu için Bölüm 4.2 ve 4.3'te kapsamlı olarak sunulmuştur. İlk önce teorik çalışmalar için ideal devre yapısı olarak incelenip daha sonra pratik uygulamalar için bazı ek hususlar gösterilecektir.



Şekil 4.2. Seri ve paralel tank

Şekil 4.2'de görldğu gibi rezonans tankta seri ve paralel bağlanmış rezonans devreleri görülmektedir. Burada Req iş parçasını, L ise bobini temsil etmekte ve bunlara seri ve paralel olarak bağlanan kondansatör ile rezonans yapısı oluşturulmaktadır.

4.2. Dntrcler için Rezonans Devreleri

İndüksiyon ısıtma uygulamaları rezonans g dntrclerin en çok kullanıldığı uygulamalardandır [13]. Rezonans devresinde bobin ve kondansatör kullanılarak rezonans durumu meydana gelmektedir. Kısaca bu durumun avantajına bakılacak olunursa, kullanılan bobin ve kondansatörler bir filtre görevi görmektedir ve böylelikle kayıplar azaltılmaktadır. Rezonans durumunda bobin ve kondansatör

değeri birbirine eşit olur ve akım ve gerilim aynı fazdadır. Rezonans durumunda elde edilen akım değeri en yüksek değerine ulaştığı için çalışma frekansı olarak rezonans frekans seçilmektedir. Rezonans devrelerin seri ya da paralel olma durumu elemanların bağlantı şekli ile ilgilidir. Rezonans devrelerinin seri ya da paralel olması durumunda avantaj ve dezavantajları bulunmakla beraber seçilmesi tamamen uygulamaya sağladığı avantajlar ve maliyet gibi konularla ilgilidir.

Rezonans devre mantığı temelde yüksek frekanstan dolayı meydana gelebilecek anahtarlar kayıplarını en aza indirmektir ve bunun için de çeşitli anahtarlama teknikleri bulunmaktadır. Konu gerilim beslemeli seri rezonans ve akım beslemeli paralel inverter olarak ele alınmadan önce anlaşılabilirliği arttırmak için çok kısaca bu tekniklerden bahsedilecek olunursa 2 alt başlık altında incelenebilir:

- 1.Sıfır Akım Anahtarlama (ZCS)
- 2.Sıfır Gerilim Anahtarlama (ZVS)

Sıfır Akım Anahtarlama: Sıfır akım anahtarlama olayının mantığına bakılacak olunursa rezonans akımın sıfır olduğu durumlarda anahtarlama elemanı iletim ya da yalıtımdadır.

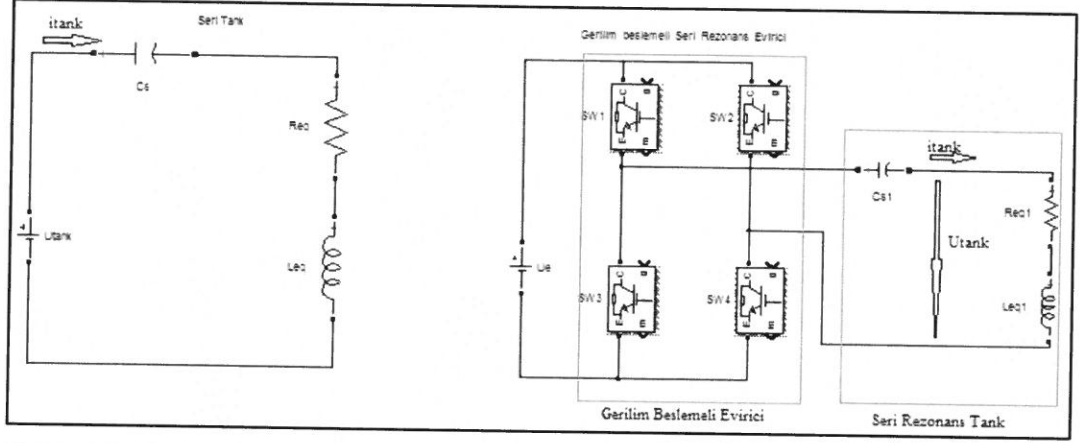
Sıfır Gerilim Anahtarlama: Aynı şekilde sıfır gerilim anahtarlama olayının mantığı da gerilimin sıfır olduğu durumlarda anahtarlama elemanı iletim ya da yalıtımdadır.

4.3. Gerilim Beslemeli Seri Rezonans Eviriciler

Gerilim beslemeli seri rezonans eviricilerde güç kaynağından paralel bağlı kondansatör ile sağlanan DC gerilim, evirici girişinde gerilim ara devresi ile gerilim beslemesini sağlamaktadır [14]. Rezonans devresi de devreye seri bağlanan R-L-C elemanlarından oluşmaktadır. Devreye bağlanan seri bobin ve kondansatör durumundan dolayı tank bir akım kaynağı gibi davranır ve kullanılan evirici gerilim beslemeli eviricidir. Bu da eviricinin sabit bir gerilim kaynağı ile beslendiği anlamına gelir. Şekil 4.3'de, bir seri tank ve ideal bir gerilim beslemeli seri rezonans evirici gösterilmiştir.

Yüksek güçlü uygulamaların çoğunda, kullanılan evirici H-köprüsüdür. Bu topolojinin kullanılmasının sebebi belirli bir gerilim (U_c) için daha az akım ile aynı

gücü iletmesidir. Burada kullanılan dönüştürücülerin gücü de yüksek olduğu için H-köprü yapısı kullanılmaktadır.



Şekil 4.3. Seri tank ve gerilim beslemeli seri rezonans evirici

Şekil 4.3'de görüldüğü gibi gerilim beslemeli eviricinin aynı bacağına iki adet olmak üzere 4 adet anahtarlama elemanı kullanılmıştır. Ancak aynı evirici bacağındaki iki anahtar aynı anda açılmaz, aksi takdirde kısa devre meydana gelir [15]. Bu anahtarlardan birinin kapatılması ile diğerinin açılması arasında geçen süre, ölü zaman olarak adlandırılır.

Gerilim beslemeli rezonans devre yapısının daha detaylı anlatıldığı alt başlıklarda eviricinin çalışma topolojileri anlatılmakta ve kontrolü ile ilgili bazı kavramlar tanıtılmaktadır. İlk olarak, bölümün 4.2.1 ve 4.2.2 kısmında, rezonans frekansın gerilim beslemeli seri rezonans evirici için hesaplaması yapılmakta ve güç faktörünün gerilim beslemeli seri rezonans eviricilerdeki etkisi sunulmaktadır. Daha sonra bölümün 4.2.3 kısmında iş parçasına iletilen gücü hesaplamak için temel denklemler gösterilmekte ve 4.2.4 kısmında, rezonans frekansta ve rezonans frekans dışındaki durumlar açıklanmaktadır. Son olarak, bölüm 4.2.5 kısmında bazı ek hususlardan bahsedilmiştir.

4.3.1. Gerilim beslemeli seri rezonans evirici frekansı

Rezonans devre kullanımının işlem için sağlayacağı faydadan bir önceki kısımda bahsedilmişti. Bu durumun gerilim beslemeli seri rezonans evirici açısından önemi; rezonans durumunda evirici ile elde edilen akım ile güç kaynağından yüke maksimum güç aktarılmış olmasıdır. Rezonans frekansın sağladığı avantaj yüksek

frekans uygulamaları için daha verimli elemanların kullanılmasının tercih edilmesi ve indüktörde yüksek akım ya da gerilim oluşturmasıdır.

Gerilim beslemeli seri rezonans evirici için gerekli hesaplamaları yapmak gerekmektedir. Şekil 4.3'deki gerilim beslemeli seri rezonans eviricinin RLC devresi ile, Denklem (4.1)'de görüldüğü gibi;

$$u_{\text{tank}} = u_{R_{\text{eq}}} + u_L + u_C = R_{\text{eq}} i_{\text{tank}} + L \frac{di_{\text{tank}}}{dt} + \frac{1}{C} \int i_{\text{tank}} dt \quad (4.1)$$

eşitliği elde edilir.

Başlangıç koşulları sıfıra eşitlenerek Laplace dönüşümü ile Denklem (4.2)'de görüldüğü gibi;

$$u_{\text{tank}}(s) = R_{\text{eq}} I_{\text{tank}}(s) + sL I_{\text{tank}}(s) + \frac{1}{sC} I_{\text{tank}}(s) \quad (4.2)$$

eşitliği elde edilir.

Sistemin transfer fonksiyonu Denklem (4.3)'de görüldüğü gibi;

$$H_s(s) = \frac{I_{\text{tank}}(s)}{U_{\text{tank}}(s)} = \frac{sC}{s^2LC + sCR_{\text{eq}} + 1} = sC \frac{w_n^2}{s^2 + 2\zeta w_n s + w_n^2} \quad (4.3)$$

şeklinde elde edilir.

Bu ikinci dereceden sistemin kökleri Denklem (4.4)'de görüldüğü gibi;

$$s_1, s_2 = -\zeta w_n \mp j w_n \sqrt{1 - \zeta^2} \quad (4.4)$$

olarak elde edilir.

w_n , sistemin sönümsüz doğal frekansdır ve Denklem(4.5)'de görüldüğü gibi;

$$w_n = \frac{1}{\sqrt{LC}} \quad (4.5)$$

olarak elde edilir.

ζ : sönüm oranıdır ve Denklem(4.6)'da görüldüğü gibi;

$$\zeta = \frac{R_{eq}}{2} \sqrt{\frac{C}{L}} = \frac{R_{eq}}{2\omega_n L} \quad (4.6)$$

olarak elde edilir.

Denklem (4.3)'ü frekans alanına aktararak Denklem (4.7) ve (4.8);

$$H_s(s)|_{s=j\omega} = \frac{j\omega C}{1 - \omega^2 LC + j\omega CR_{eq}} \quad (4.7)$$

$$|H_s(\omega)| = \frac{C}{\sqrt{(CR_{eq})^2 + (\omega LC - 1/\omega)^2}} \quad (4.8)$$

eşitlikleri elde edilir.

Denklem (4.8)'in türevini alarak Denklem (4.9)'da görüldüğü gibi;

$$\frac{d|H_s(\omega)|}{d\omega} = C \left[-\frac{1}{2} \left[(CR_{eq})^2 + \left(\omega LC - \frac{1}{\omega} \right)^2 \right]^{3/2} \left[2\omega L^2 C^2 - 2 \frac{1}{\omega^3} \right] \right] \quad (4.9)$$

eşitliği elde edilir. Denklem (4.10)'da ise rezonans frekans;

$$\omega_r = \frac{1}{\sqrt{LC}} \quad (4.10)$$

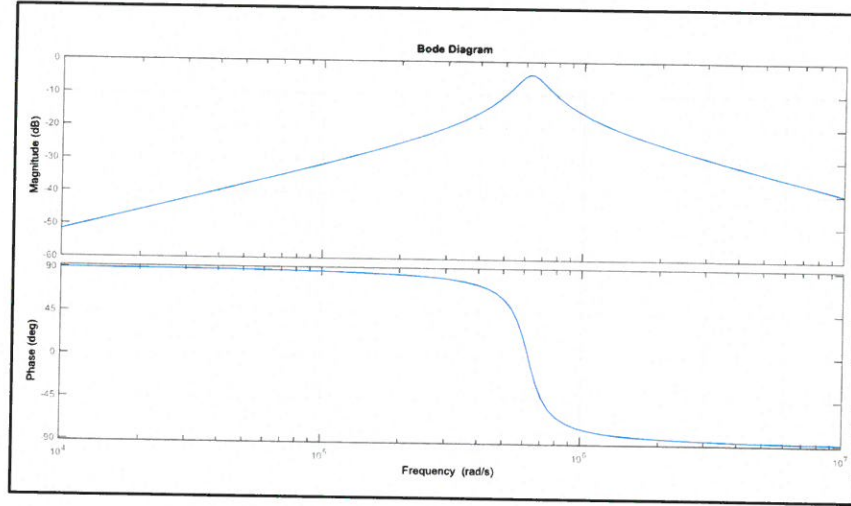
olarak elde edilmiştir.

Bu durumda, rezonans frekans ω_r , sönümsüz doğal frekansa ω_n 'ye eşittir ve bu frekanstaki transfer fonksiyonu Denklem (4.11)'de görüldüğü gibi;

$$H_s(\omega_r) = \frac{I_{\text{tank}}(\omega_r)}{U_{\text{tank}}(\omega_r)} = \frac{1}{R_{eq}} \quad (4.11)$$

olarak elde edilir.

Rad/s deki frekans ω ile gösterilir ve hesaplamalarda dikkate alınan frekans budur. Hz deki frekans f ile gösterilir. Bu frekanslar arasındaki ilişki $\omega = 2\pi f$ dir.



Şekil 4.4. Transfer fonksiyonu $H_s(w)$ Bode Analizi

Şekil 4.4'de, transfer fonksiyonu $H_s(w)$ 'nin Bode Analizi gösterilmektedir. $H_s(w)$ 'nin Bode Analizi incelendiğinde, rezonans frekansa karşılık gelen değerde tek bir maksimum nokta olduğu görülmektedir. Bode Analizi'ni yaptığımız $H_s(w)$ Denklem (4.11)'de görüldüğü gibi empedansın tersidir. Bode Analizi'nde maksimum değer rezonans frekansa denk gelmektedir ve buradaki empedans minimum olmaktadır. Bu analizin indüksiyon ısıtma evirici açısından değerlendirilmesinde maksimum noktadaki rezonans frekansta çalışılırsa minimum empedans ile maksimum akım sağlanmış ve iş parçasına yüksek güç aktarımı ile sıcaklık oluşturulmuş olunur sonucuna varılır.

Rezonans durumunda endüktif ve kapasitif kısım birbirini yok eder ve empedans değeri R_{eq} değerine eşit olur. Böylelikle akım ve gerilimin aynı fazda olması sağlanarak kayıpların azaltılması ve yüksek güçlü uygulamalar için yüksek çalışma frekansının elde edilmesi sağlanmış olur.

Teorik olarak kayıpsız yapıldığı kabul edilen bu uygulamalarda, kayıpların meydana geldiği sert anahtarlama karşılık yumuşak anahtarlama yapılması tercih edilir. Bu bölümün giriş kısmında da kısaca bahsedildiği üzere anahtarlama ile ilgili sıfır gerilim anahtarlama ve sıfır akım anahtarlama olmak üzere iki anahtarlama mekanizması vardır.

4.3.2. Güç faktörü

Güç faktöründen Bölüm 2’de sisteminin reaktif ve aktif gücü arasındaki oran olarak bahsedilmişti. Bu bölümde, güç faktörünün gerilim beslemeli seri rezonans evirici ile ilişkisi incelenmiştir. Gerilim beslemeli seri rezonans evirici için bir önceki kısımda çıkışta maksimum akım ile iş parçasında sıcaklık oluşturulmak istendiğinden ve güç faktörünün verim hesabındaki öneminden bahsedilmişti. Bu nedenle bu kısımda da gerilim beslemeli evirici için bu iki konu arasındaki bağlantı incelenmiştir. Bu bağlantı için güç faktörü ile akım dalga formu arasındaki ilişki incelenmiş ve yapılan simülasyon ile etkisi gösterilmek istenmiştir.

Güç faktörü ve akım dalga formu arasındaki ilişki:

Güç faktörünün reaktif gücün aktif güce oranı olduğundan bahsedilmiş seri rezonans devreler için bu oranın nasıl bulunduğu gösterilmişti. Bu kısımda ise eviricinin rezonans frekansta çalıştığı varsayıldığı için gösterilen denklemler bu frekansa uygun olarak yazıldığında Denklem (4.12)’de görüldüğü gibi güç faktörü;

$$Q = \frac{|P_{\text{rect}}|}{P_{\text{act}}} = \frac{\omega_r L}{R_{\text{eq}}} = \frac{1}{\omega_r C R_{\text{eq}}} \quad (4.12)$$

olarak elde edilir. Bu denklemi Denklem (4.6)'daki sönüm oranı hesaplamasındaki rezonans ve doğal frekansın seri tanklar için eşit olduğu hesaba katılarak birleştirildiğinde Denklem (4.13)'de görüldüğü gibi;

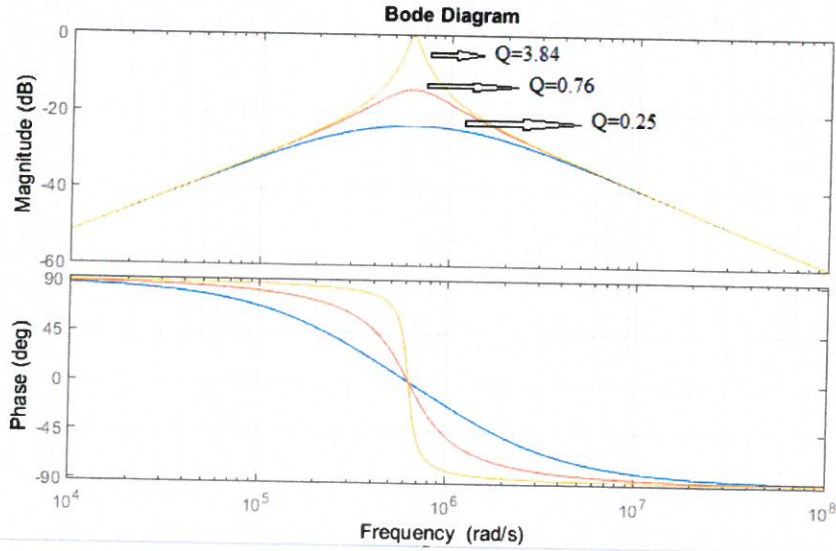
$$Q = \frac{1}{2\zeta} \quad (4.13)$$

eşitliği elde edilir.

Tankın RLC devresi ikinci dereceden bir sistem olduğundan, Denklem (4.4) incelendiğinde köklerin sanal kısmının artırılıp, gerçek kısmı azaltıldıkça daha sönümsüz ve salınımlı hale geldiği görülebilir. Dolayısıyla Denklem (4.4)'ü dikkate alarak, salınımlı bir devreye sahip olmak için $\zeta < 1$ olarak seçilmelidir. Çünkü bu durumda sanal kısım artırılarak salınımlı bir devre elde edilebilir. $\zeta = 0$ olması durumunda sistem sönümsüzdür. Denklem (4.13)'e bakıldığında, güç faktörü, bir

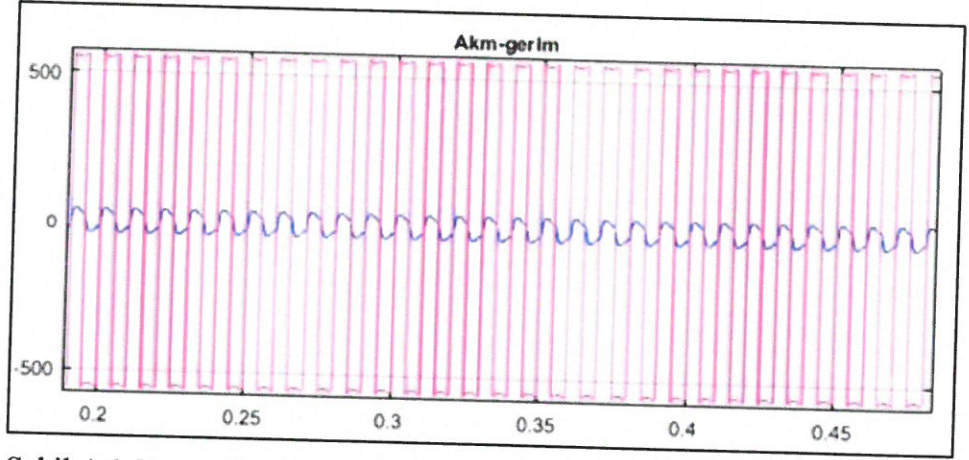
sistemin nasıl sönümlü olduğu konusunda bir fikir verir. Q değeri ne kadar yüksekse ζ değeri o kadar sıfıra yakın ve sistem de daha sönümsüzdür [9].

Şekil 4.5’de, farklı güç faktörü değerlerinin sistem için davranışını incelemek adına Bode Analizi yapılmıştır. Burada farklı güç faktörü değerlerini elde ederken, rezonans frekansta çalışıldığı için, R_{eq} değerleri değiştirilmiştir. Üç farklı R_{eq} değeri için üç farklı güç faktörü değeri elde edilmiştir. Bu değişen R_{eq} değerleri için Denklem (4.3) kullanılarak elde edilen 3 farklı güç faktörü için $H_s(w)$ n’in Bode Analizi gösterilmektedir. Bu üç farklı değer için yapılan hesaplamalarda R_{eq} değerleri için $1\Omega, 5\Omega$ ve 15Ω değerleri seçilerek bu değerlere denk gelen güç faktörleri hesaplanmıştır. 15Ω için Q değeri 0,25, 5Ω için Q 0,76 ve 1Ω için ise 3,84 olarak bulunmuştur. R_{eq} değeri arttıkça Q değeri azalmaktadır. Şekil 4.5’de görüldüğü gibi Q değerinin azalması sönüm oranının artması çıkış şeklinin sinüsoidalden uzaklaşması demektir.

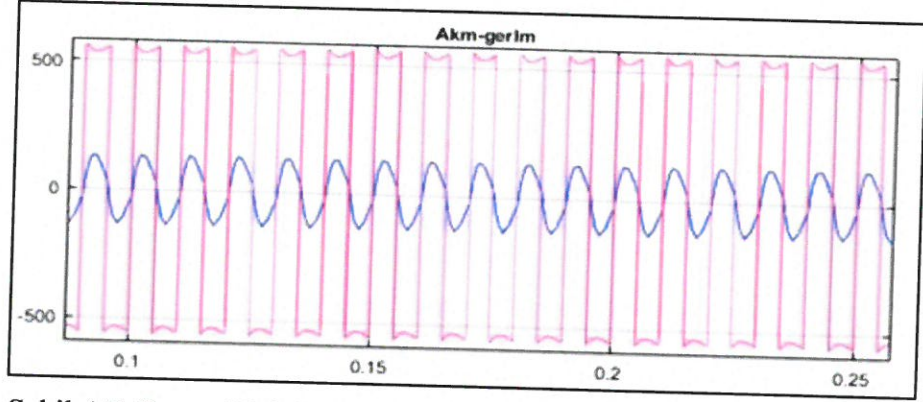


Şekil 4.5. $H_s(w)$ 'nin 3 farklı Q değeri için Bodeanalizi

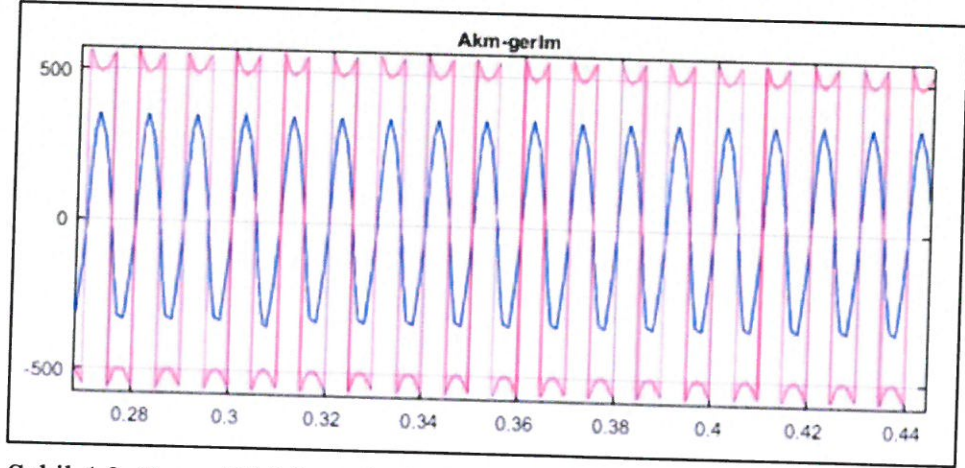
Farklı üç R_{eq} değeri ile gerilim beslemeli seri rezonans evirici için simülasyon sonuçları elde edilmiştir. Böylelikle çıkışta elde edilen akım şekli ile güç faktörü ve sönüm oranının akım ilişkisi gözlemlenebilir.



Şekil 4.6. $R_{eq} = 15\Omega$ için tanktaki gerilim ve akım



Şekil 4.7. $R_{eq} = 5\Omega$ için tanktaki gerilim ve akım



Şekil 4.8. $R_{eq} = 1\Omega$ için tanktaki gerilim ve akım

Şekil 4.6, 4.7 ve 4.8'de görüldüğü gibi değişen R_{eq} değerleri için evirici akım-gerilim sonuçları elde edilmiştir. R_{eq} değeri arttıkça çıkış akımının sinüsoidalden uzaklaştığı görülmektedir. Buradan anlaşılan, R_{eq} değeri azaldıkça güç faktörü artar ve sönüm oranı azalır. Bu da daha az harmonik görülmesi demektir. Sonuç olarak rezonans frekansta güç faktörü ile iyi bir filtreleme yapılabileceği görülmektedir.

4.3.3. İş parçasındaki güç

Daha önceki bölümlerde yapılan modellemelerde iş parçası Req ile temsil edilmişti, bu nedenle güç hesabı;

$$P=I_{\text{tank}}^2 R_{\text{eq}} = \frac{U_{\text{Req}}^2}{R_{\text{eq}}} \quad (4.19)$$

Bu eşitlik incelendiğinde güç (P^1) için kontrolün gerilim kaynağı ile sağlanabileceği sonucuna varılabilir.

4.3.4. Geçiş analizi

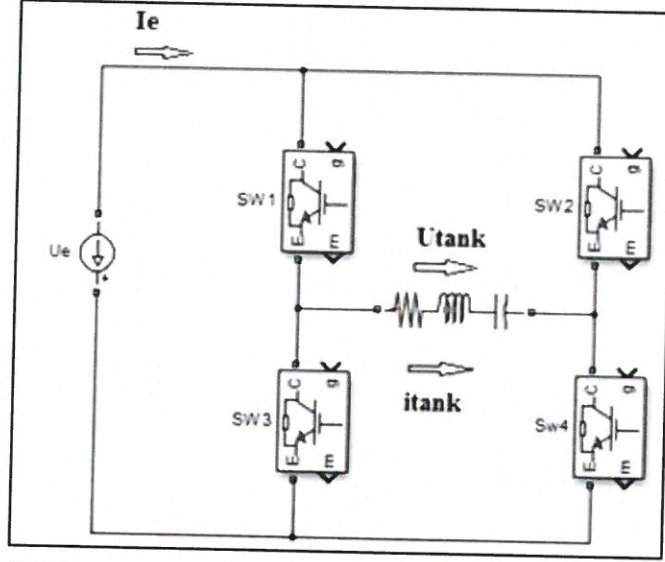
Rezonans frekans için daha önceki bölümlerde en uygun frekans olarak bahsedilmişti. Bu frekansta indüksiyon ıstıma işlemi için yüke maksimum güç aktarılabilceğini ve kayıplarında azaltılabileceğinden bahsedilmişti. Ancak tüm bunlar teorik hesaplamalar için doğru sonuç veriyor olsa da pratikteki uygulamalar için bu durum geçerli olmayabilir. Bu nedenle pratikteki uygulamalar için bazen bu frekansın biraz altında veya üzerinde çalışmak gerekebilir. Bu bölümün alt başlıklarında sırası ile bu çalışma durumları ele alınacaktır.

Şekil 4.9'da, açıklamalar sırasında kullanılan değişkenleri gösteren bir gerilim beslemeli seri rezonans eviricinin basit bir şeması sunulmuştur. Şekil 4.10, 4.11, 4.12, 4.13, 4.14 ve 4.15'de tank üzerindeki akım-gerilim, anahtar akım-gerilimi ve gate sinyalleri gösterilmektedir. Gerilim beslemeli seri rezonans evirici durumunda kısa devreyi önlemek için, aynı evirici bacağındaki iki anahtarın aynı anda iletilmediğine dikkat edilmelidir. Bu bölümde, ölü zaman ihmal edilir ve herhangi bir gecikme olmaksızın anahtarların açıldığı ve kapatıldığı varsayılmaktadır.

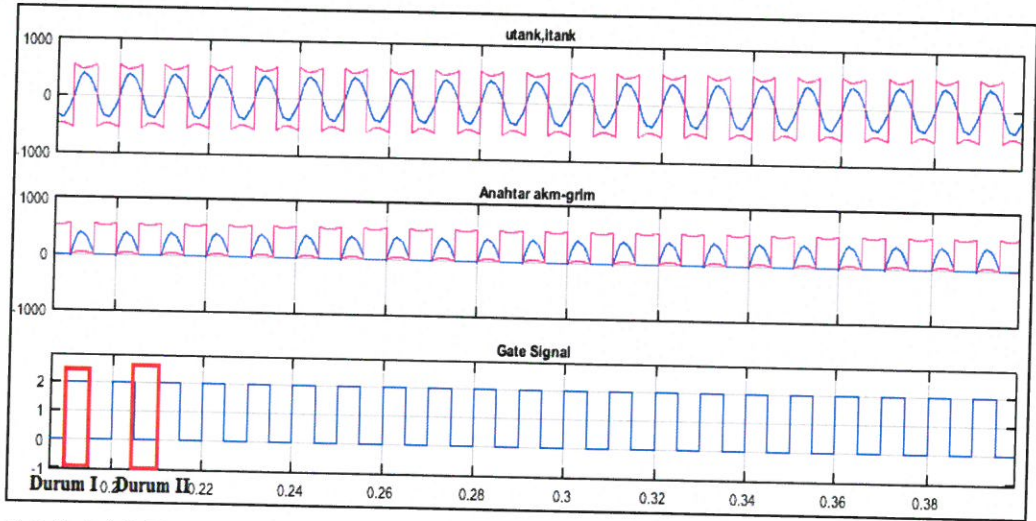
Rezonans frekansta geçiş ($f_{\text{sw}}=f_r$):

¹Burada yapılan hesaplama Bölüm 2.7'de yapılan modelleme içindir. Bölüm 3.2'de yapılan modelleme için güç hesabında modeldeki diğer değerler eklenmelidir.

Şekil 4.10'da, rezonans frekansta bir evirici için iletim sırası gösterilmektedir. Geçiş işlemi için iki durum vardır. Birinci durum SW1 ve SW4 anahtarlarının iletimde olma durumu, ikincisi ise SW2 ve SW3 anahtarlarının iletimde olma durumudur.

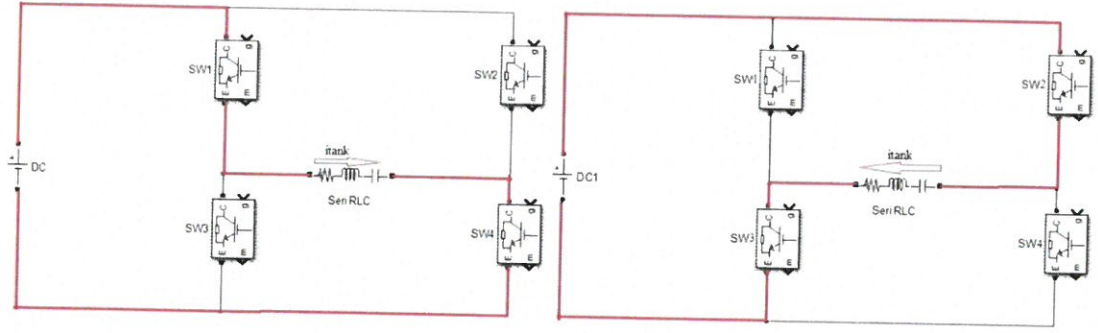


Şekil 4.9. Gerilim beslemeli seri rezonans evirici



Şekil 4.10. Rezonans frekansta çıkış dalga şekilleri

Şekil 4.10'da çıkış dalga formlarına bakılarak komütasyon sırası Şekil 4.11'deki gibi elde edilir.



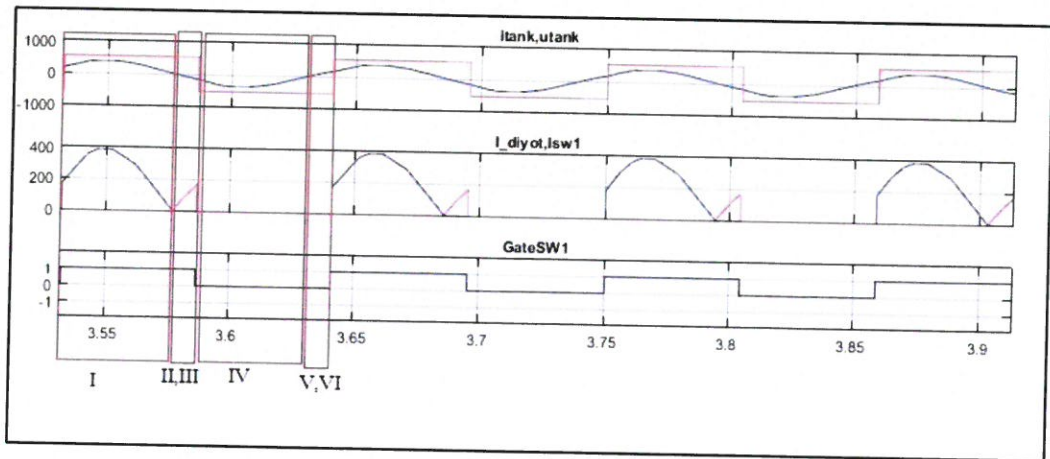
Şekil 4.11. Rezonans frekansta iletim sırası

Anahtarlama kayıpları için ideal durum budur, ancak pratikte mükemmel rezonansa sahip olma olasılığı düşüktür. Bu nedenle, diğer durumların da pratikteki uygulamalar açısından incelenmesi gerekmektedir.

Kapazitif anahtarlama ($f_{sw} < f_r$):

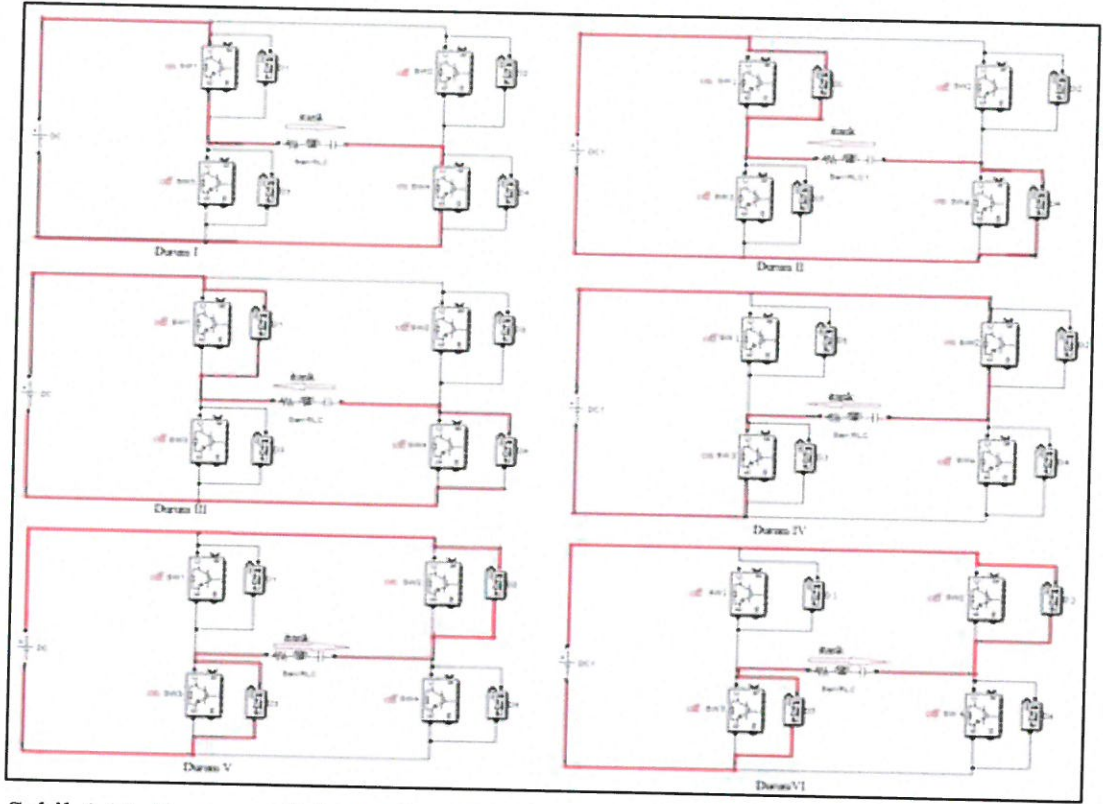
Kapazitif anahtarlama durumunda devre kapasitif özellik gösterir ve bu durumda akım gerilimden daha ileridedir.

Şekil 4.12'de, rezonans frekansın altına geçildiğinde oluşan dalga formları ve bunlara karşılık gelen durumlar gösterilmektedir. Akım-gerilim grafiği incelendiğinde akımın gerilimden daha önde olduğu görülebilir.



Şekil 4.12. Rezonans frekans altında çıkış dalga şekilleri

Şekil 4.12'de çıkış dalga formlarına bakılarak komütasyon sırası Şekil 4.13'deki gibi elde edilir.



Şekil 4.13. Rezonans frekans altında iletim sırası

- Durum I: SW1 ve SW4'ün iletime, D1 ve D3 diyotlarının kesime geçtiği durumdur.
- Durum II: SW1 ve SW4'ün iletimden çıkmak üzere olduğu durumdur. Rezonans akımının yük akımına eşit olduğunda itank yön değişir. Rezonans gerçekleştiğinde SW1 ve SW4'ün ters paralel D1 ve D2 diyotları iletime girer.
- Durum III: SW1 ve SW4 anahtarlarının ters paralel diyotların iletime geçmesi ile sıfır akım altında kesime geçtiği durumdur.
- Durum IV: SW2 ve SW3'ün iletime, D2 ve D4 diyotlarının kesime geçtiği durumdur.
- Durum V: SW2 ve SW3'ün iletimden çıkmak üzere olduğu durumdur. Rezonans akımının yük akımına eşit olduğunda itank yön değişir. Rezonans gerçekleştiğinde SW2 ve SW3'ün ters paralel D1 ve D3 diyotları iletime girer.
- Durum VI: SW2 ve SW3 anahtarlarının ters paralel diyotların iletime geçmesi ile sıfır akım anahtarlama ile kesime geçtiği durumdur.

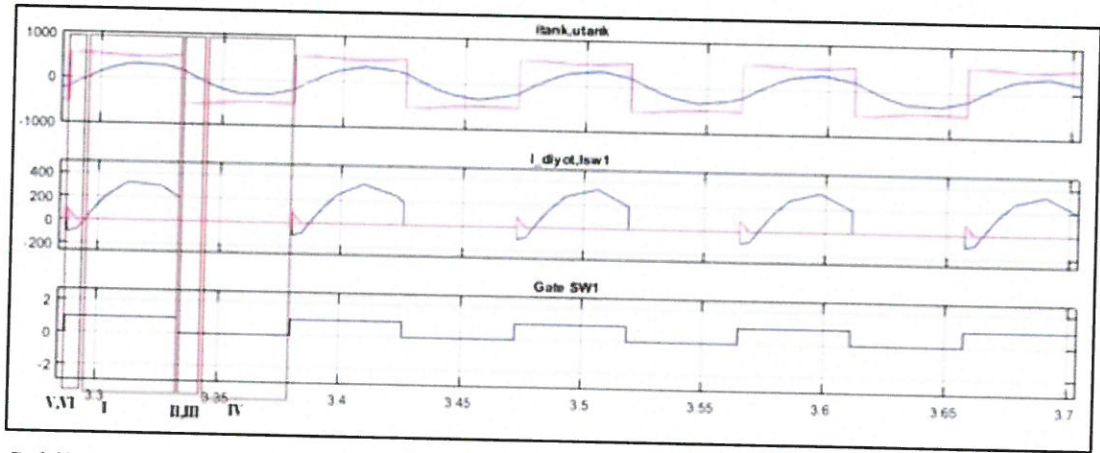
Kapasitif anahtarlamaadaki durumlar incelendiğinde, diyotların kapatılması ve anahtarların açılması sert ancak diyotların açılması ve anahtarların kapatılması

yumuşaktır [9]. Kapasitif anahtarlama da anahtarlar ZCS ile kapanır, diyotlar ZVS ile açılır. Diyotların sert kapanışından kaynaklanan sorunlardan birisi, büyük kurtarma akımlarının gerilim sıçraması oluşturabilmesidir. Bu, elektromanyetik parazitlerin, kayıpların artmasına, yarı iletkenlerin zarar görmesine sebep olur. Dolayısıyla, mümkünse kapasitif anahtarlama yapılmamalıdır [9].

Endüktif anahtarlama ($f_{sw} > f_r$):

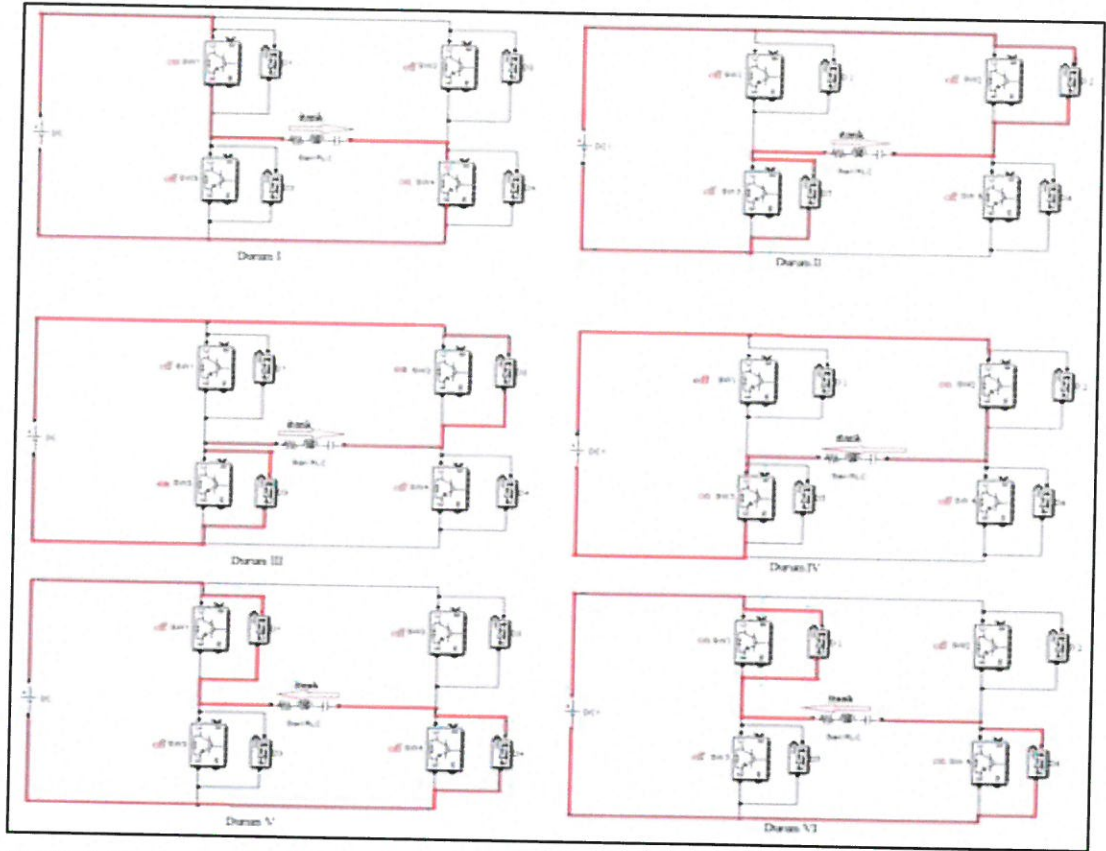
Endüktif anahtarlama durumuna bakılırsa devre endüktif özellik gösterir ve bu durumda gerilim akımdan daha ileridedir. Yani gerilimin geçişi akımdan daha önce olur.

Şekil 4.14'de, rezonans frekansın üstüne geçildiğinde oluşan dalga formları ve bunlara karşılık gelen durumlar gösterilmektedir. Akım-gerilim grafiği incelendiğinde akım ve gerilimin tepe noktalarına bakılarak gerilimin akımdan daha önde olduğu görülebilir.



Şekil 4.14. Rezonans frekans üzerinde çıkış dalga şekilleri

Şekil 4.14'de çıkış dalga formlarına bakılarak komütasyon sırası Şekil 4.15'deki gibi elde edilir.



Şekil 4.15. Rezonans frekans üzerinde iletim sırası

- Durum I: SW1 ve SW4 iletimde olduğu durumdur.
- Durum II: SW1 ve SW4 kesime geçtiği ve D2 ve D3 diyotlarının iletime geçtiği durumdur.
- Durum III: Akım SW2 ve SW3 ters paralel diyotlarından akmaktadır, SW2 ve SW3 ZVS ile iletime geçer.
- Durum IV: Rezonans akımı yük akımına eşit olduğunda itank yön değiştirir. D2 ve D3 diyotları sıfır akım anahtarlama ile kesime geçer. Akım SW2 ve SW3 anahtarlarından akmaktadır.
- Durum V: SW2 ve SW3 yalıtım durumuna ve D1 ve D4 diyotları iletim durumuna geçer.
- Durum VI: Akım SW1 ve SW4 anahtarlarının antiparalel diyotlarından akmaktadır. SW1 ve SW4 anahtarları ZVS ile iletime geçer.

Kapasitif anahtarlamanın aksine, diyotların açılması ve anahtarların kapatılması sert ancak diyotların kapatılması ve anahtarların açılması yumuşaktır. Endüktif anahtarlama anahtarlar ZVS ile iletimde, diyotlar ZCS ile yalıtımdadır. Kusursuz

rezonansa girme olasılığı düşük ve antiparalel diyotların sert kapanmasından kaynaklanan problemler göz önüne alındığında, genellikle rezonans frekansın üzerinde çalışılması önerilmektedir [9]. Bu koşullar altında, tek yönlü gerilim kapasitesine sahip anahtarların, çift yönlü akım kapasitesinin kullanılmasının zorunlu olduğuna dikkat edilmelidir, böylece antiparalel diyotlar kullanılması gereklidir [16].

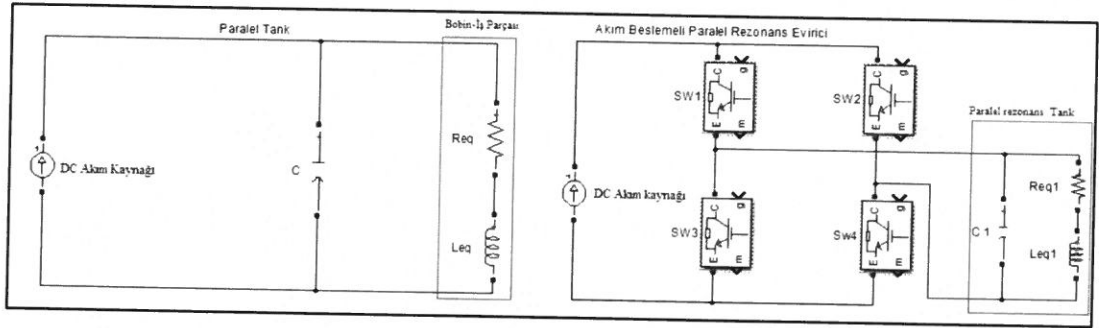
4.3.5. Pratik uygulamalar için ek hususlar

Şimdiye kadar teorik uygulamalara yönelik kabuller varsayılarak ya da ihmaller yapılarak hesaplamalar ve çizimler yapılmış, ideal kaynaklara sahip ideal bir devre varsayılmıştır. Ancak gerçek uygulamalar için hesaba katılması gereken durumlar vardır. Belki tek başına çok büyük kayıp olarak gözükmeyen, ihmal edilen durumlar bir araya geldiğinde gözle görülebilir kayıplara neden olabilir. Bu bahsedilen durumun indüksiyon ısıtma uygulamaları için olan kısmına değinmek gerekirse, gerilim beslemeli seri rezonans evirici için şimdiye kadar olan kısımda ihmaller yapılmış bazı durumlar hesaba katılmamış, ideal olarak kabuller yapılmıştır. Ancak atlanan bu kısımlar evirici performansı için belirleyici olabilir. Gerilim beslemeli seri rezonans için önem taşıyan ve hesaba katılması gereken durumlara atlanan ölü zaman ve parazit bileşenler örnek verilebilir.

Ayrıca evirici performansını iyileştirmek adına yarıiletkenler aracılığıyla yüksek akımlara bağlı olarak yük ile dönüştürücü arasında ortaya çıkan transformatör eklenebilir. Devreye eklenen bu empedans uyumu transformatörü maliyet olarak artışa neden olmaktadır. İndüksiyon ısıtma uygulamalarında iş parçasında yüksek sıcaklık oluşturulmak istenir. Bu nedenle bobinde buna bağlı olarak yüksek akım üretilir ve rezonans tankta yüksek akım oluşur. Rezonans tanktaki bu akım eviricideki akımdan fazla ve evirici gerilimi akıma göre düşüktür. Bu durumda eviricide yüksek akım düşük gerilimden dolayı kayıpların artmasına ve gerilim düşümüne neden olur. Sisteme eklenen bu trafo ile gerilim kontrolü trafonun dönüşüm oranı ile primer-sekonder kısmında istenilen şekilde yapılabilir ve istenmeyen bu durumlar kısmen de olsa engellenmiş olabilir. Kısa vadede sistem maliyeti açısından pek uygun görünmese de uzun vadede sistemin verimliliği açısından fayda sağlanacağı düşünülmektedir.

4.4. Akım Beslemeli Paralel Rezonans Eviriciler

Akım beslemeli paralel rezonans eviricilerde güç kaynağına seri bağlanan bobin ile sağlanan DC akım, evirici girişinde akım ara devresi ile akım beslemesini sağlamaktadır [14]. Rezonans devresi de devreye paralel bağlanan R-L-C elemanlarından oluşmaktadır. Devreye bağlanan paralel bobin ve kondansatör durumundan dolayı tank bir gerilim kaynağı gibi davranır ve kullanılan evirici akım beslemeli eviricidir. Bu da eviricinin sabit bir akım kaynağı ile beslendiği anlamına gelir. Şekil 4.13'de, bir paralel tank ve ideal bir akım beslemeli paralel rezonans evirici gösterilmiştir.



Şekil 4.16. Paralel tank ve akım beslemeli paralel rezonans tank

Akım beslemeli eviricide, aynı evirici bacağındaki anahtarlar çakışmalıdır, anahtarlar akımda tek yönlü, gerilimde iki yönlü olmalıdır. Anahtarlara seri diyotlar eklenmesi tavsiye edilir, eklenmezse kapasitör deşarj olur. Gerilim beslemeli seri rezonans eviricilere benzer şekilde, akım beslemeli paralel rezonans eviricilerde de, gücü kontrol altına almanın çeşitli yolları vardır. Bu bölümde, gücün kaynağın akımını değiştirerek kontrol edildiği varsayılmaktadır.

Akım beslemeli paralel rezonans eviriciden bahsedilen bu bölümde, gerilim beslemeli seri rezonans bölümünde anlatılan işlem sırası bu yönteme uyarlanarak anlatılmış ve iki sistem arasındaki benzerlik ve farklılardan bahsedilmeye çalışılmıştır. Bölümün 4.4.1 kısmında, rezonans frekans paralel tanklar için bulunmuş, güç faktörleri için seri tanklarla benzerlikleri ifade edilmiştir. Daha sonra, Bölüm 4.4.2 kısmında, güç faktörünün akım beslemeli paralel rezonans eviricilerdeki etkisi sunulmuştur. Daha sonra Bölüm 4.4.3'te iş parçasına iletilen gücü hesaplamak için temel denklemler gösterilmiştir. Daha sonra, Bölüm 4.4.4'te, sıfır faz kaymasında ve

dışındaki durumlar için komütasyon sırası gösterilmiştir. Son olarak, Bölüm 4.4.5'te bazı ek hususlardan bahsedilmiştir.

4.4.1. Rezonans frekansı

Akım beslemeli paralel rezonans eviricilerde Şekil 4.13'deki RLC devresi için Denklem (4.20), (4.21), (4.22), (4.23)'de görüldüğü gibi;

$$i_{\text{tank}} = i_C + i_L \quad (4.20)$$

$$i_C = C \frac{du_{\text{tank}}}{dt} \quad (4.21)$$

$$i_L = \frac{1}{L} \int u_L dt \quad (4.22)$$

$$u_{\text{tank}} = u_L + u_{\text{Req}} \quad (4.23)$$

eşitlikleri elde edilmiştir.

Başlangıç koşulları sıfır olan Laplace dönüşümü kullanılarak, Denklem (4.24)'de görüldüğü gibi;

$$I_{\text{tank}}(s) = I_C(s) + I_L(s) = sCU_{\text{tank}} + (U_{\text{tank}}/sL + R_{\text{eq}}) \quad (4.24)$$

eşitliği elde edilmiştir.

İkinci dereceden denklemin elde edilmesi için Denklem (4.25)'de görülen;

$$H_p(s) = \frac{U_{\text{tank}}(s)}{I_{\text{tank}}(s)} = \frac{sL + R_{\text{eq}}}{s^2LC + sCR_{\text{eq}} + 1} = (sL + R_{\text{eq}}) \frac{w_n^2}{s^2 + 2\zeta w_n s + w_n^2} \quad (4.25)$$

eşitlik kullanılmıştır.

Bu ikinci dereceden sistemin kökü Denklem(4.4)'te gerilim beslemeli seri rezonans evirici için bulunanlarla aynıdır. Bu durumda, Denklem (4.5) ve (4.6)'de gösterilen sönümsüz doğal frekans (w_n) ve sönüm oranı (ζ) ile de aynı tanımlar kullanılır. Denklem (4.25)'i frekans alanına aktararak Denklem (4.26)'da görüldüğü gibi;

$$H_p(s) \Big|_{s=jw} = \frac{R_{\text{eq}}}{(1-w^2LC)^2 + (wCR_{\text{eq}})^2} + j \frac{w(L-CR_{\text{eq}}^2 - w^2L^2C)}{(1-w^2LC)^2 + (wCR_{\text{eq}})^2} \quad (4.26)$$

eşitliği elde edilir. Sistemin rezonans frekansı Denklem (4.27)'de görüldüğü gibi;

$$\omega_r = \frac{\sqrt{C \sqrt{2LCR_{eq}^2 + L^2 - C^2 R_{eq}^2}}}{LC} \quad (4.27)$$

olarak elde edilir.

Endüktans iş parçası sisteminin seri modeli için (Bölüm 2.7.1) güç faktörünün tanımını göz önünde bulundurarak Denklem (4.27), Denklem (4.28)'de görüldüğü gibi;

$$\omega_r = \omega_n \sqrt{\sqrt{\frac{2}{Q^2} + 1} - \frac{1}{Q^2}} \quad (4.28)$$

olur.

ω_{faz0} akım ve gerilim arasındaki faz kaymasındaki frekans olarak düşünüldüğünde, Denklem (4.28)'in sanal kısmı bu frekansta sıfır olmalıdır. Bu nedenle, ω_{faz0} Denklem (4.29)'da görüldüğü gibi;

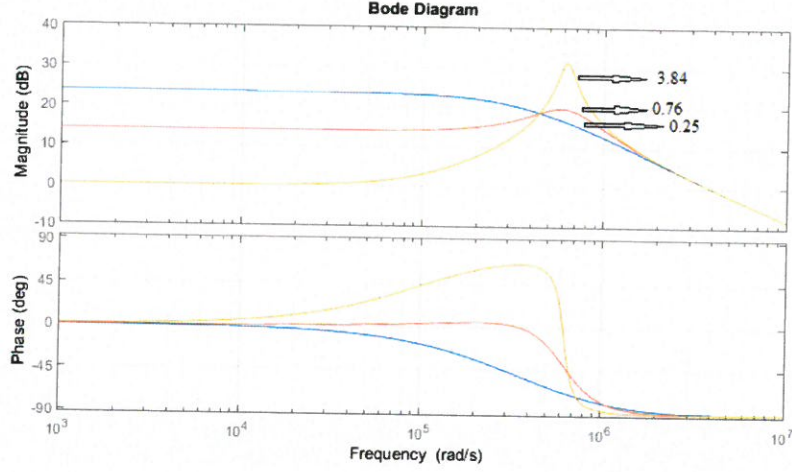
$$\omega_{faz0} = \sqrt{\frac{L - CR_{eq}^2}{L^2 C}} = \omega_n \sqrt{1 - \frac{1}{Q^2}} \quad (4.29)$$

olur.

Denklem (4.28) ve (4.29) farklı olmasına rağmen, bu fark yüksek Q değerleri için ihmal edilebilir, çünkü her ikisinin de değerleri yaklaşık sönümsüz doğal frekansa eşittir.

Akım beslemeli paralel rezonans eviricide, gerilim beslemeli seri rezonans devresinin tersi olarak çıkışta akım yerine gerilimin sinüzoidal olması beklenir. Burada da gerilim beslemeli eviricideki gibi güç faktörü önemli rol almaktadır. Ancak burada akım kontrolü için değil tek fark olarak gerilim kontrolü için önemlidir. Şekil 4.14'de değişen güç faktörleri için Bode Analizi yapılmıştır. Burada da endüktans ve kapasitans değerleri eşit olduğu için güç faktörü değişimi R_{eq} değerleri değiştirilerek sağlanmıştır. Gerilim beslemeli eviricide alınan üç farklı R_{eq}

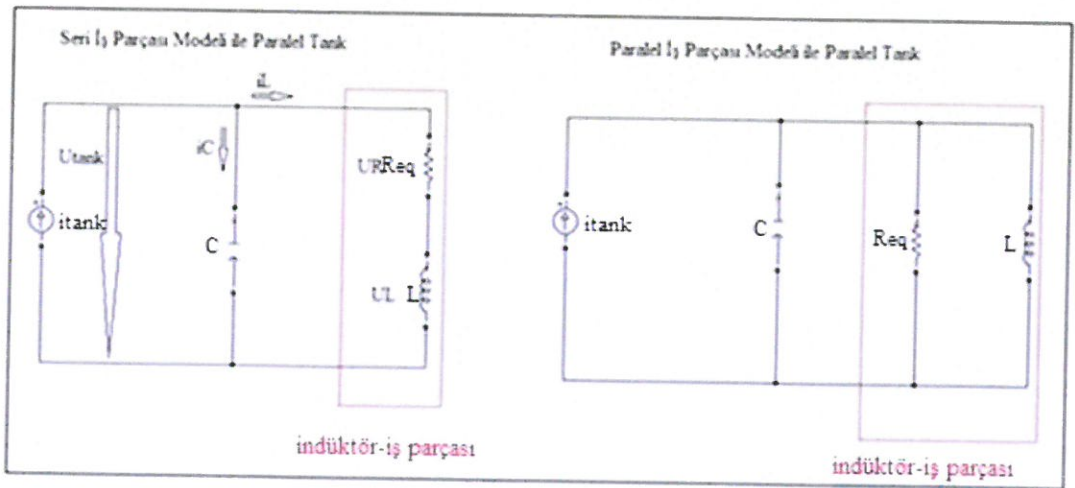
için hesaplanan üç farklı Q değeri ile aynı değerlerle Bode Analizi Şekil 4.14'de akım beslemeli evirici için gösterilmektedir.



Şekil 4.17. $H_s(\omega)$ Bode Analizi

Şekil 4.14 incelendiğinde artan R_{eq} değeri ile azalan güç faktörü sonucunda oluşan şeklin sinüsoidalden uzak olduğu ve yüksek güç faktörü tercih edilmesinin gerekliliği görülmektedir.

Şimdiye kadar yapılan işlemlerde bobin ve iş parçası adına çalışmanın 2.7.1 kısmında bahsedilen iki adet bobin-iş parçası modellemesinden biri olan seri model yapısı uygulandı. Şekil 4.15'de görüldüğü gibi, bobin-iş parçası kısmının kendi içinde paralel bağlanması ile de elde edilebilir.



Şekil 4.18. Seri ve paralel iş parçası modeli ile paralel tank

Şekil 4.15 incelendiğinde bobin-iş parçası bağlantısı adına seri ve paralel model farkı görülebilir. Seri modelde rezonans tanka bağlı olan bobin-iş parçası birbirine seri bağlı, paralel modelde ise rezonans tanka bağlı bobin-iş parçası birbirine paralel bağlanmıştır. Bu model için elde edilecek transfer fonksiyon eşitliği Denklem (4.30)'da görüldüğü gibi;

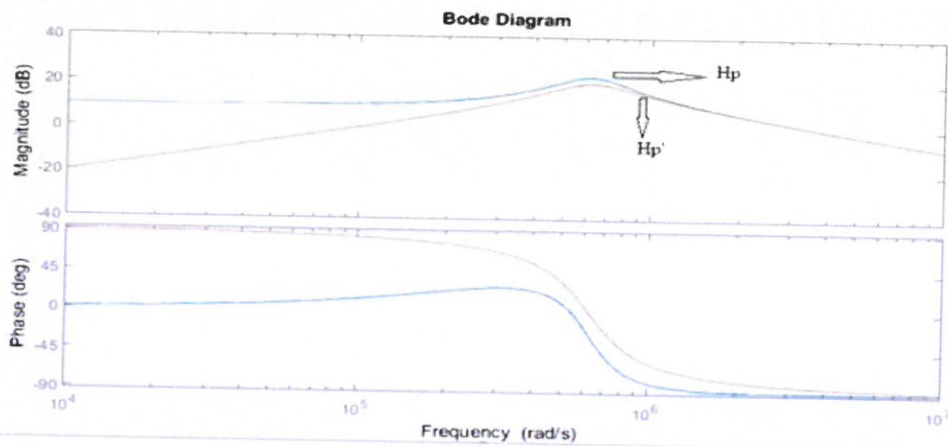
$$H_p(s) = \frac{U_{\text{tank}}(s)}{I_{\text{tank}}(s)} = \frac{sLR_{\text{eq}}}{s^2LCR_{\text{eq}} + sL + R_{\text{eq}}} \quad (4.30)$$

olur.

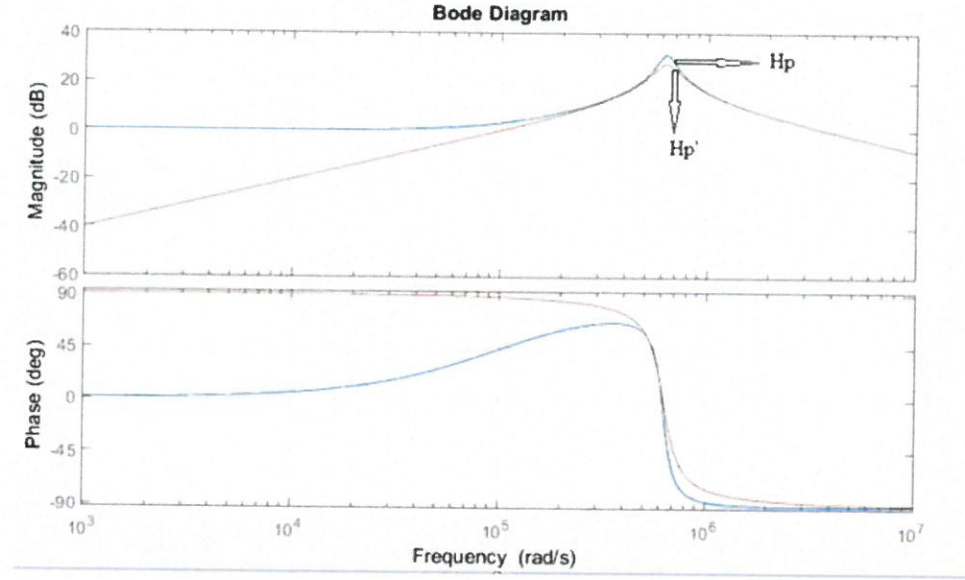
Bu indüktör-iş parçası sisteminin paralel modelini kullanmanın yararı, rezonans frekans ω_r 'nin, faz kaymanın sıfır olduğu frekansda (ω_{faz0}) ve sönümsüz doğal frekans ω_n 'nin eşit olmasıdır [3,8]. Bu frekans Denklem (4.31)'de görüldüğü gibi;

$$\omega_r = \omega_{\text{faz0}} = \omega_n = \frac{1}{\sqrt{LC}} \quad (4.31)$$

olarak hesaplanır. Bobin-iş parçası seri ve paralel bağlantı hakkında kıyas yapabilmek için her iki modelin aynı güç değerleri için Bode Analizleri Şekil 4.16 ve Şekil 4.17'de görülmektedir. Burada H_p seri model transfer fonksiyonu ile H_p' paralel model transfer fonksiyonu ile Bode Analizi'ni göstermektedir. Şekil 4.16 için güç faktörü 0,76, Şekil 4.17 için güç faktörü 3,84 olarak alınmıştır.



Şekil 4.19. Seri $H_p(\omega)$ ve paralel $H_p'(\omega)$ 'nin transfer fonksiyonu $Q=0,76$ için Bode Analizi



Şekil 4.20. Seri $H_p(\omega)$ ve Paralel $H_p(\omega)$ 'nin transfer fonksiyonu $Q=3,84$ için Bode Analizi

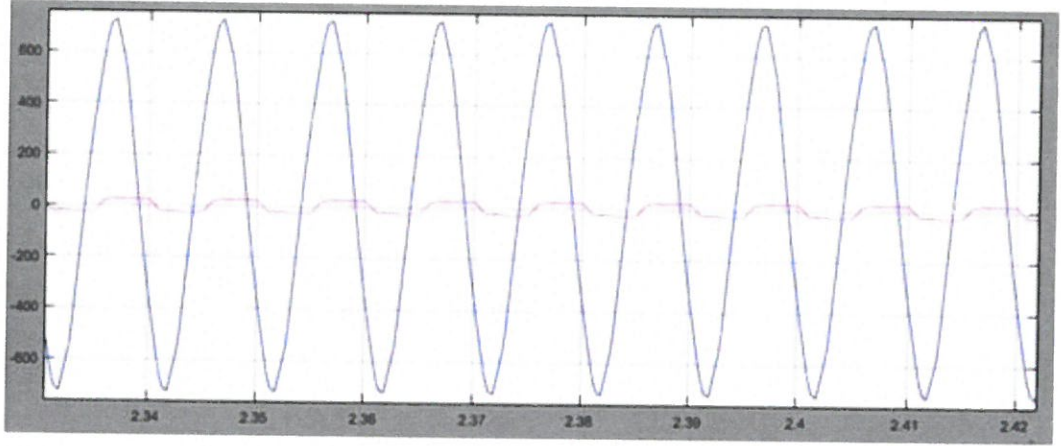
Şekil 4.16 ve Şekil 4.17'de görüldüğü gibi bobin-iş parçasının seri ve paralel bağlantısı için Bode Analizi benzer sonuçlar vermiş, artan güç faktörü ile benzerliğin daha da artmıştır.

4.4.2. Güç faktörü

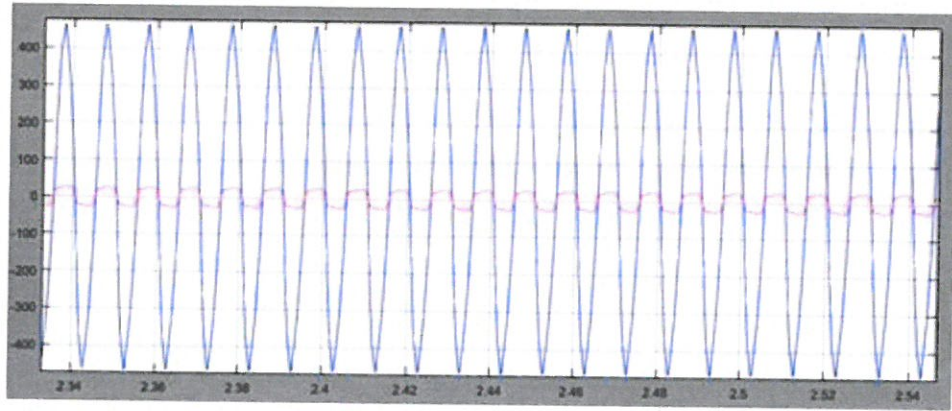
Güç faktöründen Kısım 2.7.1'de bobin-iş parçası sisteminin reaktif ve aktif gücü arasındaki oran olarak bahsedilmiştir. Bu bölümde, güç faktörünün akım beslemeli paralel rezonans evirici ile ilişkisi incelenmiştir. Akım beslemeli rezonans evirici için çıkış gerilimi önemlidir. Bu nedenle bu kısımda da akım beslemeli inverter için bu iki konu arasındaki bağlantı incelenmiştir. Bu iki konu bağlantısı için, güç faktörü ile gerilim dalga formu arasındaki ilişki açıklanmış ve yapılan simülasyon ile etkisi gösterilmek istenmiştir.

Güç Faktörü ve Gerilim:

Bir önceki bölümde ve gerilim beslemeli evirici durumunda, güç faktörü için reaktif gücün aktif güce oranı olarak eşitlik verilmişti. Akım beslemeli evirici durumunda da gerilim beslemeli evirici de olduğu gibi sistemin tank kısmı rezonans frekansta oldukça iyi sonuç veren bir filtre gibi davranır. Akım beslemeli eviricilerde, gerilim beslemeli eviricinin tersine akım kare dalga formunda gerilim ise sinüzoidaldir.



Şekil 4.21. $Q=0,76$ ve $Re_q=3\Omega$ için tank akım ve gerilim



Şekil 4.22. $Q=3,84$ ve $Re_q=1\Omega$ için tank akım ve gerilimi

Akım beslemeli paralel rezonans devresi için Şekil 4.18 ve 4.19'da devre simülasyonu yapılarak evirici akım-gerilim çıkışları Re_q değerleri değiştirilerek elde edilen iki farklı güç faktörü değeri için gözlemlenmiştir. Elde edilen sonuçlar ile güç faktörünün sistem filtresi için nasıl sonuç verdiği gözlemlenmiştir. İki şekil incelendiğinde, Şekil 4.18'de daha düşük güç faktörü ile elde edilen sonuçta gerilim sinüzoidalden biraz uzaktır. Şekil 4.19'a bakıldığında ise güç faktörü değeri daha yüksek ve çıkış gerilimi daha fazla sinüzoidale yakındır. Bunun nedeni olarak söylendiği üzere yüksek güç faktörü ile daha iyi filtre sağlanmış ve böylelikle çıkış gerilimindeki harmonik bileşen azaltılmıştır.

Bu iki şekil incelendiğinde Şekil 4.18'de, gerilim çıkışının sinüzoidalden uzak olmanın yanı sıra faz kayması olduğu da gözlemlenir. Şekil 4.19 da ise faz kayması yok ve çıkış gerilimi daha da sinüzoidale yakındır. Bu faz kayması konusunda rezonans frekans başlığında bahsedildiği üzere, güç faktörü değeri arttıkça w_r ve w_{faz0}

değeri birbirine yakın olur ve faz kayması gözükmez. Güç faktörü azaldıkça w_r ve w_{faz0} değerleri farklı olur ve bu nedenle faz kayması görülür.

4.4.3. İş parçasındaki güç

Daha önceki bölümlerde yapılan modellemelerde iş parçası R_{eq} ile temsil edilmişti. Bu nedenle güç hesabı Denklem (4.32)'de görüldüğü gibi;

$$P=I_L^2 R_{eq} \quad (4.32)$$

olarak elde edilir. Bu eşitlik incelendiğinde güç (P^1) için kontrolün akım kaynağı ile sağlanabileceği sonucuna varılabilir.

4.4.4. Geçiş analizi

Gerilim beslemeli evirici başlığında da bahsedildiği üzere, rezonans frekans için daha önceki bölümlerde çalışma için en uygun frekans olarak bahsedilmişti. Bu frekansta iş parçasına aktarılan gücün maksimum olduğundan ve güç faktörü değerinin yüksek olması ile kayıpların oldukça azatlığından bahsedilmişti. Ancak daha öncede bahsedildiği üzere, bunlar teorik hesaplamalar için doğru sonuç veriyor olsa da pratikteki uygulamalar için bu durum geçerli olmayabilir. Bu nedenle pratikteki uygulamalar için bazen bu frekansın biraz altında veya üzerinde çalışmak gerekebilir. Gerilim beslemeli seri rezonans evirici için yapılan analizde, rezonans frekansı f_r , referans olarak kullanılmıştır. Ancak gerilim beslemeli eviricilerden farklı olarak dikkat edilmesi gereken bir husus ise, akım beslemeli paralel rezonans eviricide rezonans frekans, akım ve gerilim arasındaki faz kaymasının sıfır olduğu frekanstan farklıdır. Bu nedenle bu bölüm için referans olarak seçilen frekans f_{faz0} 'dır. Ancak unutulmaması gereken bir noktada yüksek güç faktörü değerleri için f_r ve f_{faz0} frekansları, pratikte eşittir. Bu bölümün alt başlıklarında ise, pratik uygulamalar için referans seçilen f_{faz0} frekansta, altında ve üzerinde çalışma durumları ele alınacaktır.

¹ Burada yapılan hesaplama Bölüm 2.7'de yapılan modelleme içindir. Bölüm 3.2'de yapılan modelleme için güç hesabında modeldeki diğer değerler eklenmelidir.

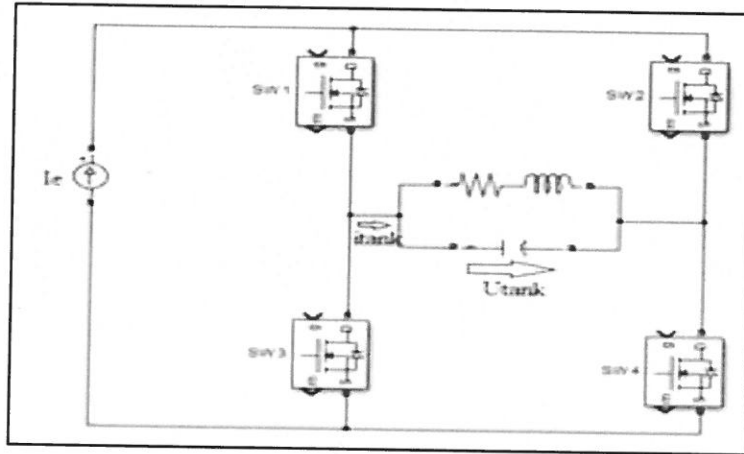
Şekil 4.20’de, açıklamalar sırasında kullanılan değişkenleri gösteren bir akım beslemeli paralel rezonans evirici şekli gösterilmiştir. Şekil 4.24, 4.26 ve 4.29’da tank üzerindeki akım ve gerilim gösterilmektedir.

Akım beslemeli paralel rezonans eviricide, aynı evirici bacağındaki iki anahtarı aynı anda açılmaz, aksi takdirde akım devresi açılır ve aşırı gerilim oluşur. Bu durumda, çakışma, aynı evirici bacağındaki iki anahtarın da açıldığı zamandır. Bu bölümde çakışma zamanı ihmal edilir ve komütasyonda açma ve kapanma da herhangi bir gecikme olmadan ideal kabul edilir.

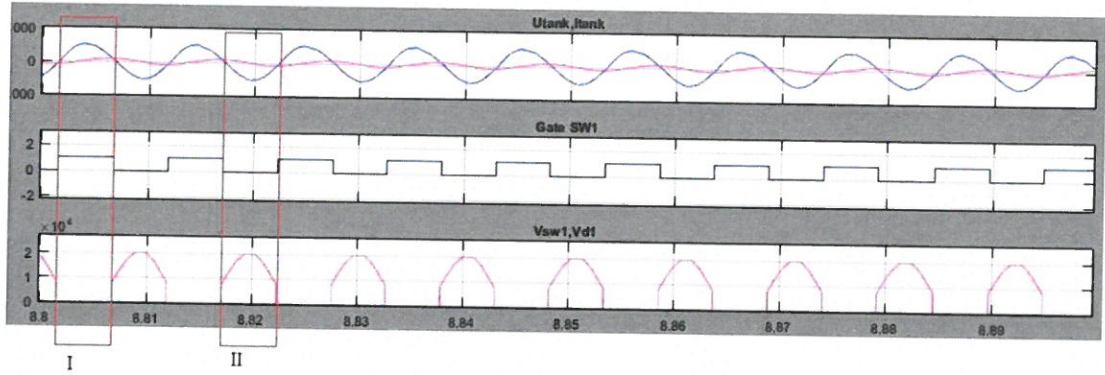
Sıfır Faz Kaymasında Geçiş ($f_{sw}=f_{faz0}$):

Şekil 4.23’de evirici referans frekansı seçilen f_{faz0} ’da geçiş sırası gösterilmektedir. Geçiş işlemi için iki durum vardır. Birinci durum SW1 ve SW4 anahtarlarının iletimde olma durumu, ikincisi ise SW2 ve SW3 anahtarlarının iletimde olma durumudur.

Gerilim beslemeli seri rezonans eviricilerin tersine, akım beslemeli eviricilerde anahtarların üst üste gelmesi göz önüne alındığında, SW1 ve SW4 kapanmadan önce SW2 ve SW3 açılır.

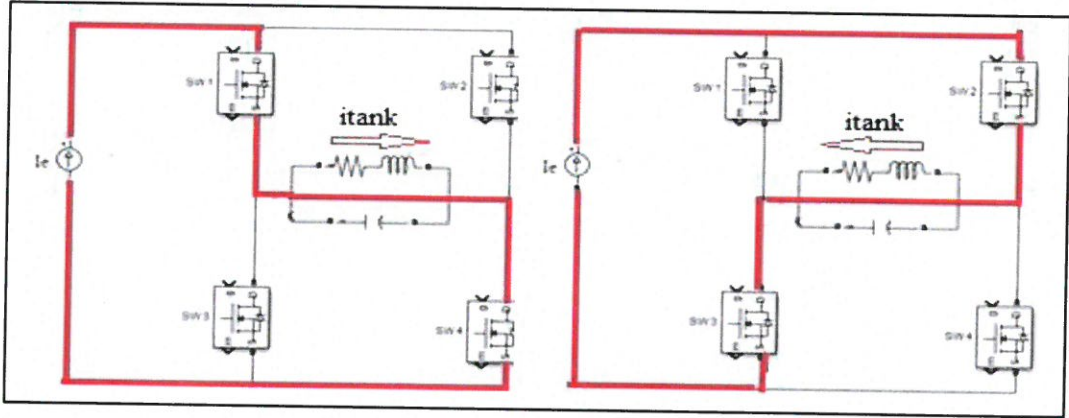


Şekil 4.23. Akım beslemeli paralel evirici devresi



Şekil 4.24. Sıfır faz kaymasında çıkış dalga biçimleri

Şekil 4.24'de çıkış dalga formlarına bakılarak komütasyon sırası Şekil 4.25'deki gibi elde edilir.



Şekil 4.25. Sıfır faz kaymasında iletim sırası

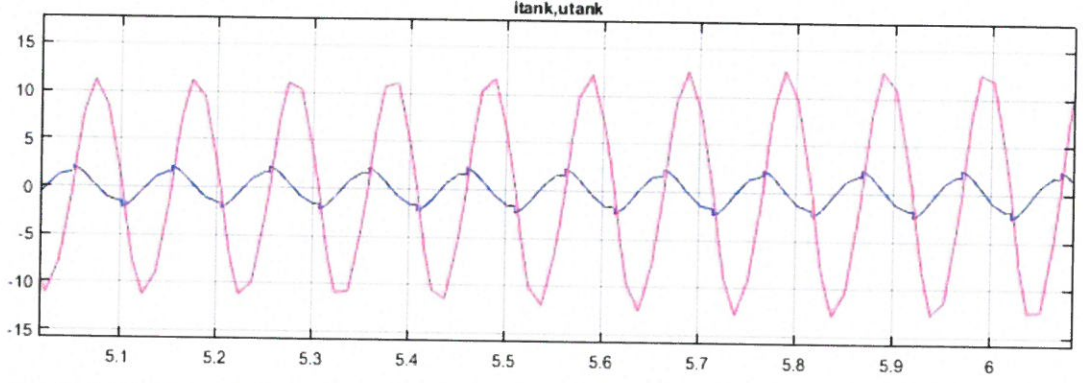
Anahtarlama kayıpları için ideal durum budur, ancak mükemmel rezonansa sahip olma olasılığı düşüktür. Bu nedenle, diğer durumların da pratikteki uygulamalar açısından incelenmesi gerekmektedir.

Kapasitif anahtarlama ($f_{sw} > f_{faz0}$):

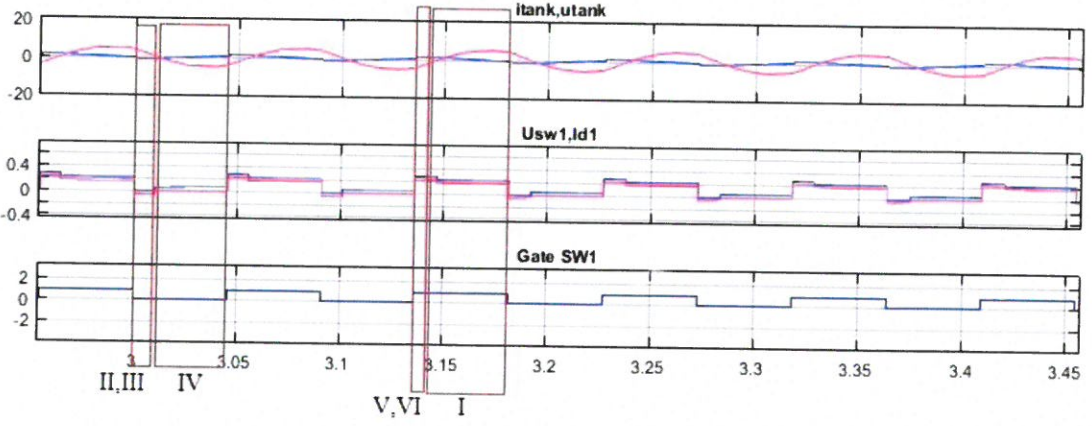
Kapasitif özellik daha öncede bahsedildiği üzere, akımın gerilimden daha önde olduğu durumdur. Akım beslemeli seri rezonans eviricide, gerilim beslemeli paralel rezonans eviriciden farklı olarak kapasitif durum referans olarak seçilen frekansın üzerinde gerçekleşir.

Şekil 4.23'de, f_{faz0} değerinin üzerinde anahtarlama frekansı ile geçiş durumunda çıkış dalga şekilleri buna denk gelen olay dizisi gösterilmektedir. Şekil 4.22'de akım ve

gerilim grafiği incelendiğinde akımın gerilimden önde olduğu görölmektedir ve bu da sistemin kapasitif özellik göstermesinden kaynaklanmaktadır.

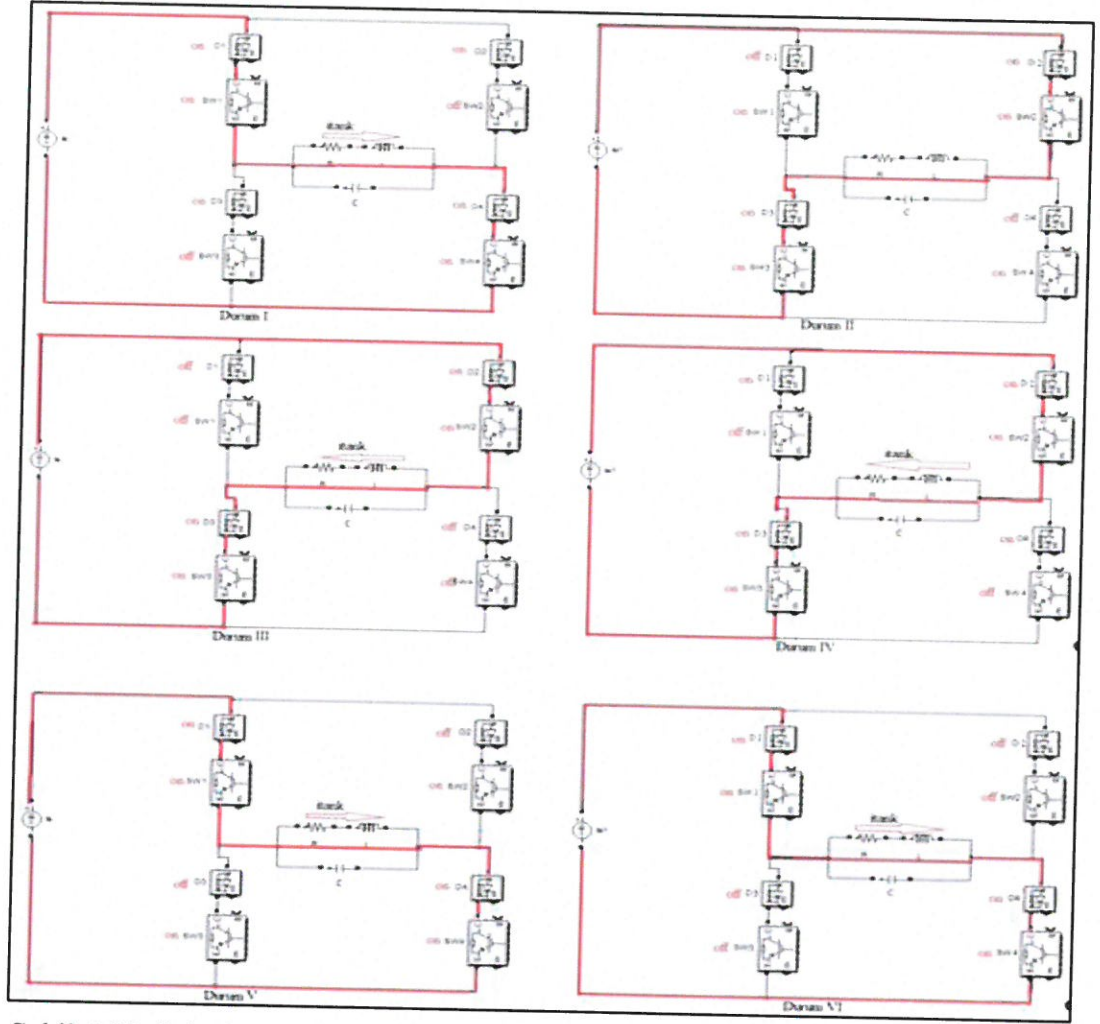


Şekil 4.26. Kapasitif anahtarlama tank akım gerilimi



Şekil 4.27. Sıfır faz kayması üzerinde çıkış dalga biçimleri

Şekil 4.27'de çıkış dalga formlarına bakılarak komütasyon sırası Şekil 4.28'deki gibi elde edilir.



Şekil 4.28. Sıfır faz kayması frekans değeri üzerinde iletim sırası

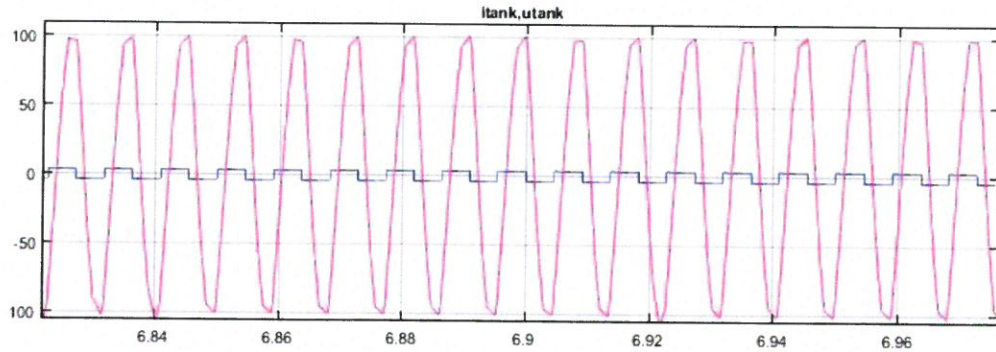
- Durum I: SW1 ve SW4 anahtarları iletimdedir. Sıfır gerilim anahtarlama ile D2 ve D3 diyotları açılmıştır.
- Durum II: SW2 ve SW3 anahtarları iletimdedir. D1 ve D4 diyotları yalımdadır.
- Durum III: SW1 ve SW4 anahtarları sıfır akım anahtarlama ile yalıtım durumuna geçer.
- Durum IV: D1 ve D4 diyotları iletimdedir.
- Durum V: SW1 ve SW4 anahtarları iletimde, D2 ve D3 diyotları yalımdadır.
- Durum VI: SW2 ve SW3 sıfır akım anahtarlama ile yalımdadır.

Bu durumda, diyotların kapatılması ve anahtarların açılması sert ancak diyotların açılması ve anahtarların kapatılması yumuşaktır [9]. Akım beslemeli paralel rezonans evirici için kapasitif anahtarlama diyotlar sıfır gerilim anahtarlama ile açılır, anahtarlar sıfır akım anahtarlama ile kapanmaktadır. Gerilim beslemeli seri rezonans

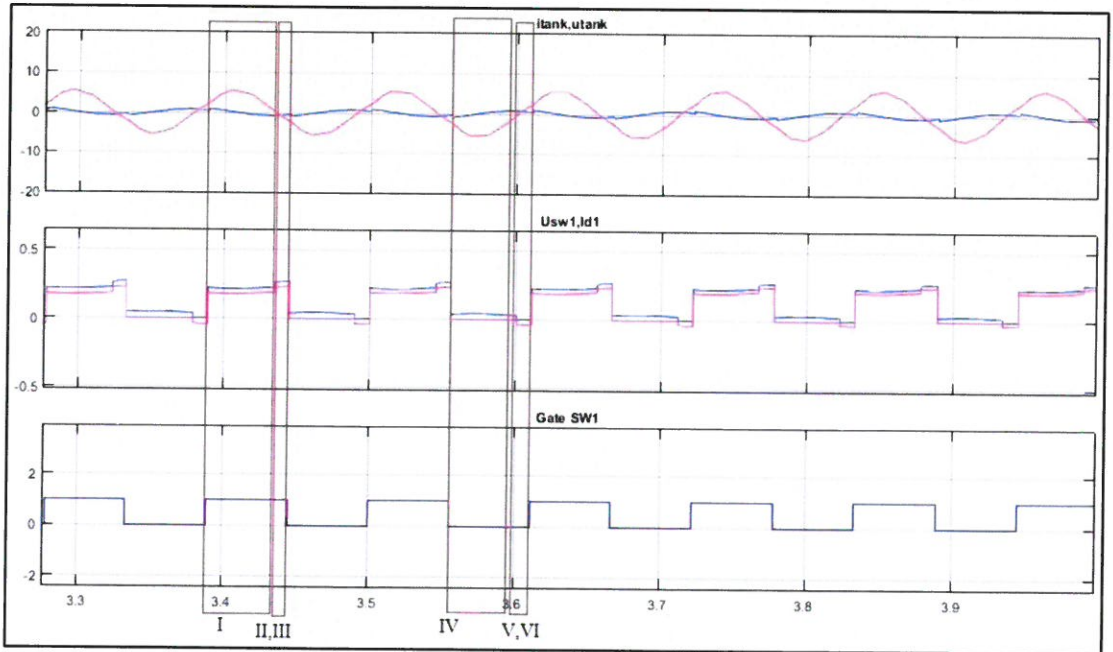
eviricideki kapasitif anahtarlamaya benzer şekilde, bu durumdan kaçınılmalıdır; aksi halde, antiparalel diyotun kurtarma akımları, büyük tepe gerilim sıçramaları oluşturabilir.

Endüktif anahtarlama($f_{sw} < f_{faz0}$):

Daha öncede bahsedildiği üzere, endüktif durumda gerilim akımdan daha ileridedir. Yani gerilimin geçişi akımdan daha önce olur. Şekil 4.24'de, f_{faz0} değerinin altında anahtarlama frekansı ile komütasyon durumunda çıkış dalga şekilleri buna denk gelen olay dizisi gösterilmektedir. Şekil 4.24'de görüldüğü gibi akım ve gerilim grafiği incelendiğinde akımın gerilimden geride ve bu da sistemin endüktif özellik göstermesinden kaynaklanmaktadır.

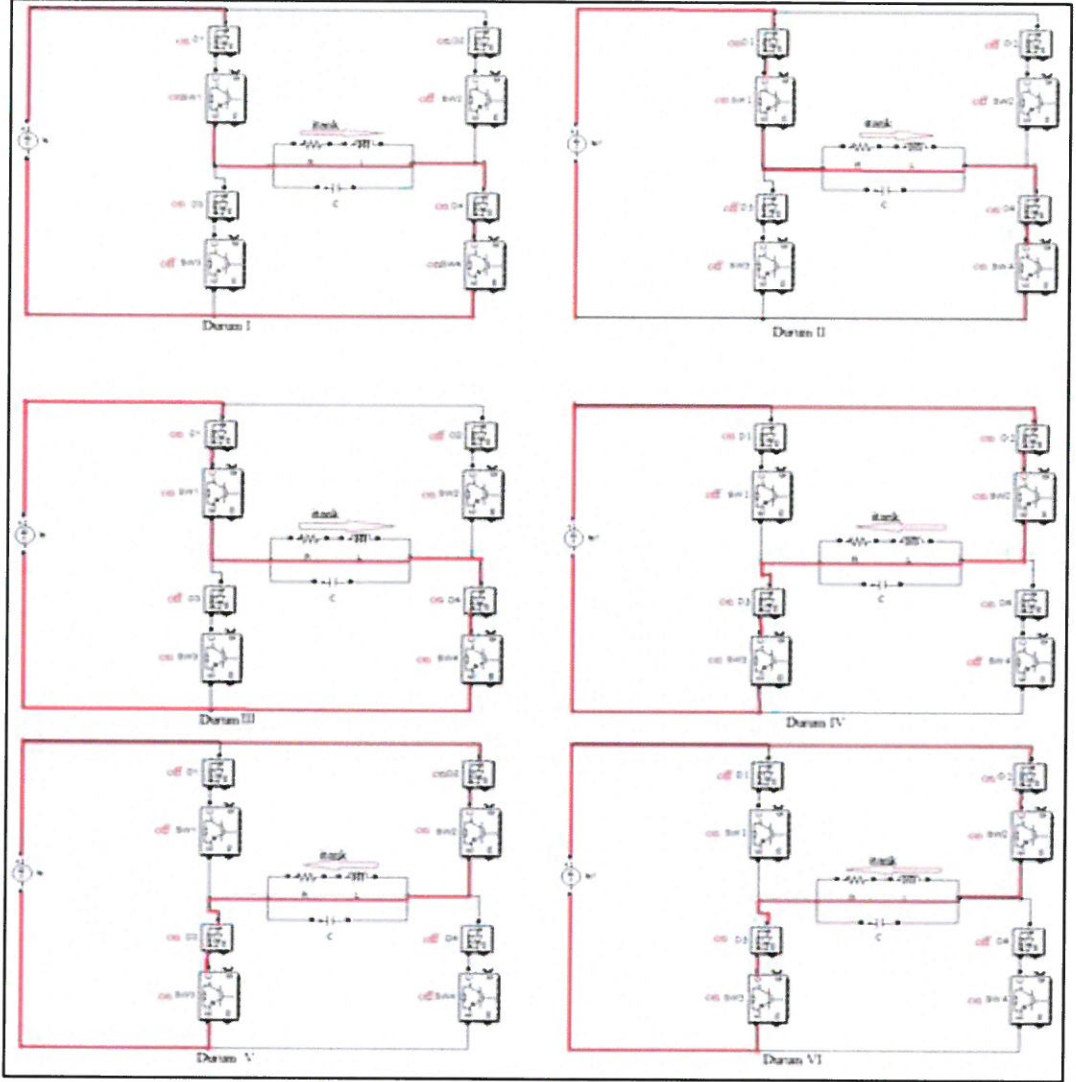


Şekil 4.29. Endüktif anahtarlama tank akım-gerilimi



Şekil 4.30. Sıfır faz kayması altında çıkış dalga biçimleri

Şekil 4.30'da çıkış dalga formlarına bakılarak komütasyon sırası Şekil 4.31'deki gibi elde edilir.



Şekil 4.31. Sıfır faz kayması frekans değeri altında iletim sırası

- Durum I: SW2 ve SW3 yalıtım durumuna geçmiştir. SW1 ve SW4 iletimdedir.
- Durum II: D2 ve D3 sıfır akım anahtarlama ile yalıtımdadır.
- Durum III: Sıfır gerilim anahtarlama ile SW2 ve SW3 iletim durumuna geçmiştir.
- Durum IV: SW1 ve SW4 yalıtımdadır. D2 ve D3 iletimdedir.
- Durum V: D1 ve D4 sıfır akım anahtarlama ile yalıtımdadır.
- Durum VI: SW1 ve SW4 sıfır gerilim anahtarlama ile iletimdedir.

Önceki durumun aksine, diyotların açılması ve anahtarların kapatılması sert ancak diyotların kapatılması ve anahtarların açılması yumuşaktır [9]. Akım beslemeli

paralel rezonans evirici için endüktif anahtarlama diyotlar sıfır akım anahtarlama ile kapanır, anahtarlar sıfır gerilim anahtarlama ile açılmaktadır. Parazit bileşenleri hesaba katmadığımız zaman, endüktif anahtarlama kapasitifden daha iyidir, çünkü antiparalel diyotların sert kapatılmasından kaynaklanan problemlerden kaçınılmaktadır.

4.4.5. Pratikteki uygulamalar için ek hususlar

Akım beslemeli paralel rezonans evirici için şu ana kadar bahsedilen kısımda ideal varsayımlar yapılarak hesaplamalar yapılmıştı. Ancak pratikteki uygulamalar için dikkate alınması gereken, sistemin performansını etkileyen bazı hususlar olabilir.

Akım beslemeli paralel rezonans evirici için önem taşıyan ve hesaba katılması gereken durumlara, atlanan çakışan zaman ve parazit bileşenler örnek verilebilir. Akım beslemeli paralel rezonans evirici performansını iyileştirmek için dikkat edilmesi gereken bir konu olan aşırı gerilim oluşmasıdır.

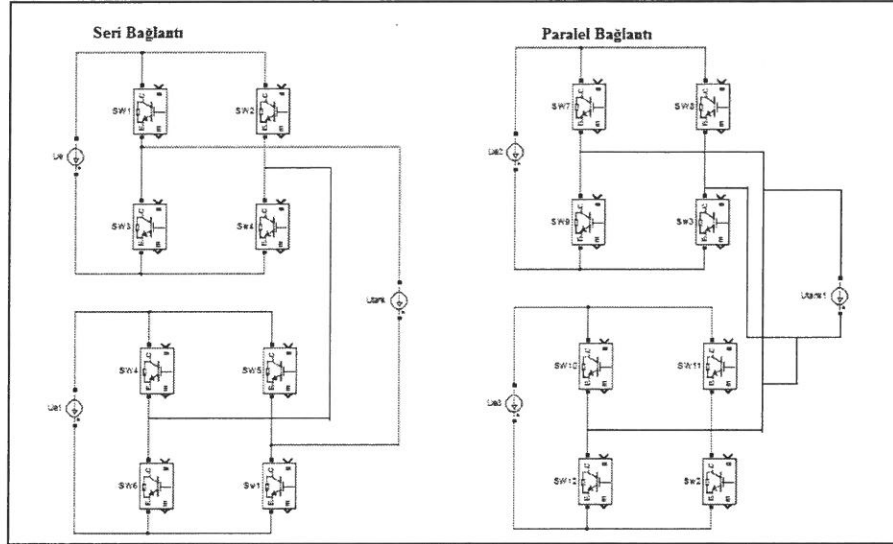
Akım beslemeli paralel rezonans evirici için şimdiye kadar İenin her zaman kapalı olduğu kabul edilmişti ancak bazı durumlarda, anahtarlarda oluşabilecek bir arıza gibi, İe için açılma durumu söz konusu olabilir ve bu da evirici için istenmeyen bir durum olan aşırı gerilim durumunu oluşturabilir. Akım beslemeli paralel eviricilerde, eviriciyi besleyen akım devresi açıldığında, meydana gelen bu aşırı gerilim yükselmesi için tedbir alınması gerekmektedir. Bu aşırı gerilimi taşıyabilecek ve geciktirerek zaman kazandıracak dayanıklılıktaki kapasitörler sisteme ilave edilebilir.

4.5. Diğer Durumlar

İndüksiyon ısıtma uygulamalarının çalışma boyunca üzerinde durulan kısmı olan evirici için açıklamalar yapılırken en temel iki topolojisi üzerinde durulmuştur. Ancak temelde bu yapılardan yola çıkılarak birçok varyasyon oluşturulmuştur. Bu kısımda ise bu varyasyonlar detaylı olarak ele alınmayacak ancak kısaca yer verilecektir.

Şimdiye kadar olan kısımlarda evirici için temel olan gerilim beslemeli seri rezonans evirici ve akım beslemeli paralel evirici topolojileri üzerinde durulmuş ancak bu sistemler üzerinden geliştirilen ve uygun olan durumlar için daha iyi sonuçlar

verebilen yapılar geliştirilmiştir. Bu duruma bir örnek vermek gerekirse, daha önce tanıtımı yapılan temel evirici yapılarının seri ya da paralel bağlanmasına dayanan yapılar gösterilebilir. Eviricileri bu şekilde bağlamanın amacı, çıkışta çift frekans elde etmek istenilen ya da daha fazla güç elde edilmesi gereken ya da akım-gerilim dayanımının azaltılmak istendiği durumlar olabilir.



Şekil 4.32. Evirici köprülerinin paralel ve seri bağlantıları

Şekil 4.26'da eviricilerin seri ya da paralel bağlanmasına dayanan yapılar gösterilmektedir. Ayrıca seri-paralel rezonans eviriciler içinde çeşitli alternatifler geliştirilmiştir. İki elemanla oluşturulan tanklar için her iki rezonansı birleştiren üç elemanlı tanklar geliştirilmiştir.

İndüksiyon ısıtma uygulamaları eviricilerinden seri ve paralel tank yapısına sahip sistemler daha önceden bahsedilen bazı dezavantajlarından alternatif seçeneklerin araştırılması gündeme gelmiştir. Daha öncede bahsedilen bu dezavantajlardan kısaca bahsedilecek olursa, gerilim beslemeli seri rezonans evirici devresi için akımın yükten fazla olması bir transformatör kullanılmasını gerektirirken, akım beslemeli paralel rezonans evirici için ise akım yükteki akımdan oldukça düşüktür ve gerilim yükselmesi nedeni ile koruma devresi gerekir. Her iki durum içinde yapılan iyileştirmeler maliyeti artırır ve verimi düşürebilir. Bahsedilen bu olumsuz durumlar için alternatif olarak üç elemanlı tank sistemleri geliştirilmiştir.

Üç elemanlı tank kullanılan eleman ve bunların bağlantı şekillerine göre isimlendirilebilir. Şimdiye kadar L-C elemanlarının seri ve paralel bağlanmasına dayanan rezonans durumlarından bahsedilmiştir. Üç elemanlı tanklarda bu iki elemana ek olarak bağlanan indüktör ve kapasitör ile LLC, LCL gibi rezonans durumları oluşturulabilir ve isimlendirilebilir.

Üç elemanlı tank kullanarak sağlanan rezonans ile avantajlarından yükün endüktif davranması ile kendiliğinden sağlanmış olan kısa devre koruması örnek gösterilebilir. Bu durum bobin-iş parçası kısmında meydana gelen kısa devre olaylarının oldukça yaygın olduğu indüksiyon ısıtma uygulamaları için oldukça önemlidir. Kısa devre olması durumunda eşdeğer endüktans ve direnç azalır ve geçiş işlemi frekansı sabit kalırken rezonans frekans ani bir yükseliş gösterir ve buda sistemin şartlarına göre geçiş işleminin endüktif ya da kapasitif gerçekleşmesi anlamına gelir. Akım beslemeli paralel rezonans eviricide bu kısa devre durumunda oluşan ani rezonans frekans yükselmesi durumu ile meydana gelen yarı iletkenlerde oluşan zarardan kaçınmak adına sisteme ek olarak aşırı gerilim koruma sistemi gerekmektedir. Gerilim beslemeli seri rezonans eviricilerde ise problem kısa devre durumunda meydana gelen kapasitif çalışma durumundan kaynaklanmaktadır. Üç elemanlı tank kullanılarak kendiliğinden sağlanan kısa devre koruması ile bu durumların önüne geçilebilir.

4.6. Güç Yarı İletkenleri

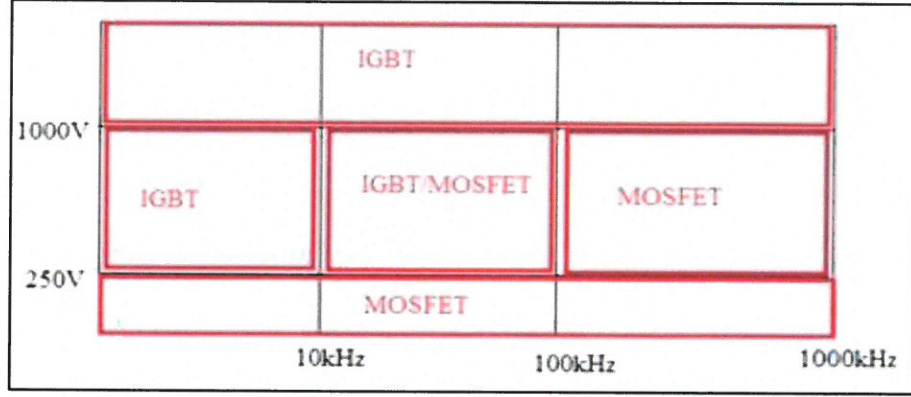
Günümüz teknolojisi birçok alanda olduğu gibi güç elektroniği alanında ve buna bağlı olarak yarı iletken teknolojisinde oldukça fazla aşama kaydetmiştir. Genel olarak kullanılan anahtarlama elemanları tristör, BJT (Bipolar jonksiyonlu transistör), MOSFET (Metal oksit yarıiletken alan etkili transistör), IGBT (İzole kapılı bipolar transistör) gibi elemanlardır. Kontrollü olma özelliklerinden dolayı genellikle indüksiyon ısıtma uygulamalarında MOSFET ve IGBT kullanılmaktadır. Bu nedenle de bu bölümde bu iki kontrollü anahtarlama elemanı üzerinde durulmaktadır.

Gerilim beslemeli seri rezonans eviricilerin yapısal çalışmasından dolayı, evirici anahtarlarının gerilimde tek yönlü olması, akımda iki yönlü olması gerekir. Akım beslemeli paralel rezonans eviricilerde ise akımda tek yönlü, gerilimde iki yönlü

olması gerekmektedir. Bu nedenle, günümüzde 1 MW ve 600 kHz'e kadar olan çoğu uygulamada, MOSFET'ler ve IGBT'ler sıklıkla kullanılmaktadır. MOSFET'lerin kullanımı, IGBT'lerin daha yüksek anahtarlama kayıpları nedeniyle genellikle kullanılmadığı 150 kHz'in üzerindeki frekanslardaki uygulamalarda tercih edilir. Rezonans devreler de bu kayıpları azaltmak için kullanılmaktadır.

Daha önceki bölümlerde pratikteki uygulamalar için bazı durumlarda rezonans değerinin üzerinde ya da altındaki bazı değerlerde çalışma durumunun kaçınılmaz olduğundan bahsedilmişti. Genellikle böyle bir durum olduğunda (ani gerilim yükselmesi ya da elektromanyetik parazitler gibi) rezonans değerinin üstünde çalışılmak istense de kapasitif anahtarlama kaçınılmaz bazı durumlar olabilir. Buna bir örnek verilecek olunursa bobin-iş parçası kısmı için, bobin-iş parçası teması olması durumunda kısa devre meydana gelir ve bu durumda daha öncede bahsedildiği üzere endüktans değeri ve direnç değeri azalır, rezonans frekans aniden yükselir. Bu da tankın rezonans frekansı arttığı ve sistem hala eski frekansta çalışmaya devam ettiği yani kapasitif anahtarlama olduğu anlamına gelir. Kapasitif anahtarlama ile ilgili olarak, MOSFET'ler IGBT'lerden daha fazla bu duruma duyarlıdır.

MOSFET ve IGBT yapıları oldukça benzerdir. Kullanım açısından tercihi kullanım alanına bağlı olarak frekans ve gerilime bakılarak tercih edilmektedir [17]. Frekans olarak bakıldığında IGBT'ler gate ucu için düşük güç gerektirir ve 100 kHz e kadar olan uygulamalarda tercih edilirken, MOSFET'ler daha yüksek frekanslı uygulamalarda daha kullanışlı bulunmaktadır. Gerilim olarak bakılırsa, 1000V üzeri uygulamalar için IGBT tercih edilirken, 250 V altı uygulamalarda MOSFET tercih edilmektedir. 250 V ile 1000V arası uygulamalarda maliyet, boyut, hız, termal etkiler gibi kriterlere bağlı olarak her ikisi de seçilebilir. Hem frekans hem gerilim aralığı hesaba katılarak ortak bir sonuç çıkarmak için Şekil 4.27'ye bakılabilir.



Şekil 4.33. IGBT/MOSFET gerilim- frekans aralığına göre seçimi

Sonuç olarak her iki anahtarlama elemanın da birçok kritere bağlı olarak birbirine üstünlükleri olabilir. Ancak günümüz teknolojisindeki gelişmeler ve IGBT üzerinde yapılan çalışmalar hem performans hem de maliyet anlamında olumlu sonuçlar vermektedir. Bununla birlikte aynı durum MOSFET'ler içinde geçerli olmakla yapılan son çalışmalar ile MOSFET'lerde oldukça hızlı anahtarlama imkanı vermektedir.

5. İNDÜKSİYON ISITMA UYGULAMASI

5.1. Genel Bilgi

Yapılan tüm çalışmalarda gerçek uygulama aşamasına geçmeden önce yapılacak çalışmanın davranışını önceden incelemek ve ona göre yöntemler geliştirmek gerekmektedir. Bu nedenle gerçek sisteme benzer modellemeler yapılarak, bu modellerin davranışları ve çözüm yöntemleri üzerinde çalışılarak uygulama öncesi sistem davranışı hakkında fikir edinilebilir. Buna bağlı olarak önlemler alınabilir ya da sistem verimi artırma konusu üzerinde çalışılabilir.

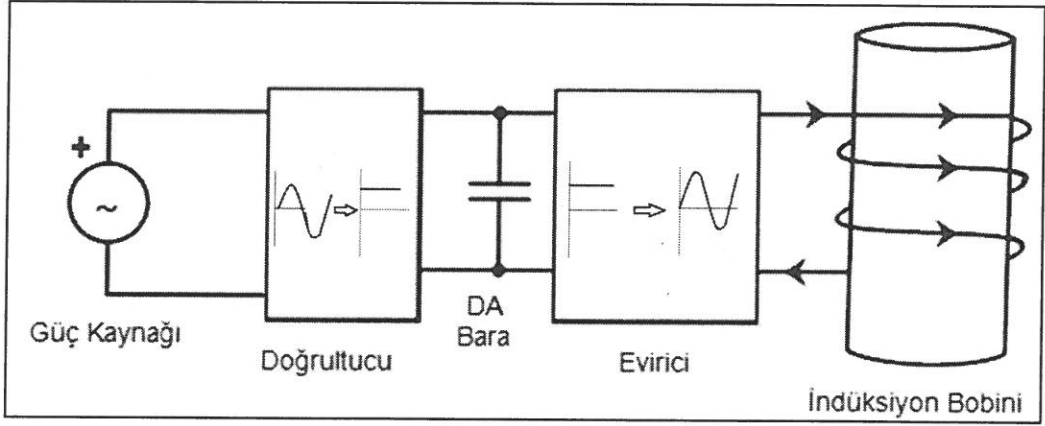
İndüksiyon ısıtma uygulamalarında uygulama aşamasına geçmeden önceki ön hazırlık kısmı için yapılan çalışmada üç aşama takip edilmiştir. İlk olarak indüksiyon ısıtma sistemi evirici kısmı için gerçeğine benzer şekilde olabilecek modeller için birkaç modelleme gösterilmiştir. Daha sonra oluşturulan modellerin çözüm yöntemlerinden bahsedilmiştir. Son olarak ise çözüm yöntemlerinde bahsedilen sayısal yöntemlerle bağlantılı olarak gelişen bilgisayar teknolojisine bağlı olarak geliştirilen programlardan birisi olan Matlab Simulink ile simülasyon yapılmıştır. Yapılan simülasyon çalışması ile alınan sonuçların teorik olarak anlatılanları desteklemesi amaçlanmıştır.

5.2. Seri Rezonans Eviricili İndüksiyon Isıtma

Yapılan çalışmada indüksiyon ısıtma uygulamalarında anahtarlama kayıplarını azaltmak için rezonans devre kullanımı gereksiniminden bahsedilmiş ve rezonans devreleri iki topoloji olarak ele alınmıştır. Çalışmanın bu kısmında bu iki topolojiden seri rezonans evirici topolojisi ile indüksiyon ısıtma sistemi Matlab Simulink ortamında simüle edilmiştir. Elde edilen sonuçların uygulama devreleri için uygunluğu tartışılmıştır.

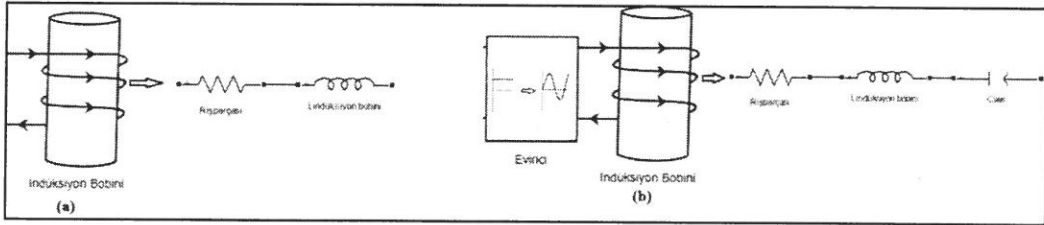
Statik frekans dönüştürücüler, endüstride indüksiyon ısıtma ve eritme tesisatları için orta frekanslı bir güç kaynağı olarak yaygın bir şekilde uygulanmaktadır [18].

İndüksiyon ısıtmada AC-AC dönüştürücü devresinde bir doğrultucu ve frekans kontrollü akım ya da gerilim kaynaklı bir evirici ile iki dönüşüm işlemi gerçekleştirilmiş olur. İlk olarak girişten alınan AC gerilim doğrultucu ile DC gerilime dönüştürülür [19]. Daha sonra elde edilen bu DC gerilim DC-AC dönüştürücü üzerinden yüksek frekanslı rezonans devreye uygulanır [20].



Şekil 5.1. İndüksiyon ısıtma sistemi blok diyagram

Şekil 5.1'de görüldüğü gibi indüksiyon ısıtma bobini evirici ile bağlantılıdır.



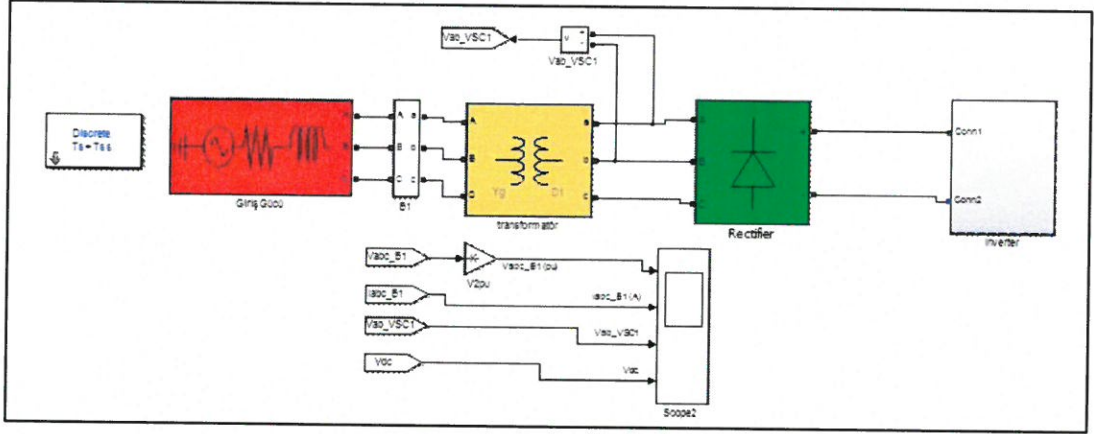
Şekil 5.2. Bobin-iş parçası ve seri rezonans tank modellemesi

Şekil 5.2(a)'da bobin iş-parçasının sistem simülasyonunda kullanılmış modellemesi gösterilmektedir. Şekil 5.2(b)'de ise eviricide rezonans yapının bobin iş-parçası bağlantısının simülasyonda kullanılan modellemesi gösterilmektedir. Burada eviricide seri rezonans, bobin iş parçasına seri bağlanan kondansatör ile sağlanmıştır [21].

Yapılan simülasyon çalışmasında seri rezonans evirici topoloji kullanıldığı için akım besleme yerine gerilim besleme kullanılmış, genellikle seri bağlantıda tercih edilen H-Köprü yapısı kullanılmış, anahtarlama elemanı olarak MOSFET tercih edilmiştir.

5.3. Uygulama Devresi ve Simülasyon Sonuçları

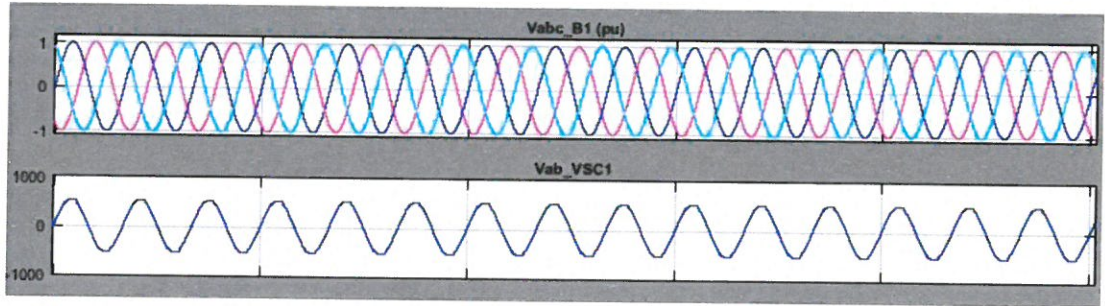
Yapılan simülasyon çalışması MATLAB Simulink ortamında gerçekleştirilmiştir. Simülasyon Devresi Şekil 5.3'de görüldüğü gibi;



Şekil 5.3. Seri rezonans eviricili indüksiyon ısıtma devresi Matlab Simulink modeli

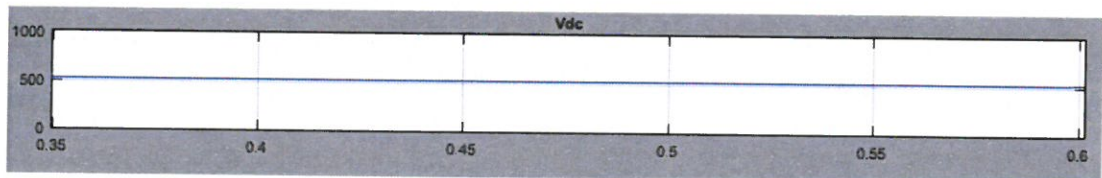
şeklinde yapılmıştır. Yapılan çalışmanın simülasyon sonuçları giriş gücünden başlayarak iki dönüşüm işlemi için sırasıyla gösterilmiştir.

Simülasyon Sonuçları;



Şekil 5.4. İndüksiyon ısıtma giriş gerilimi

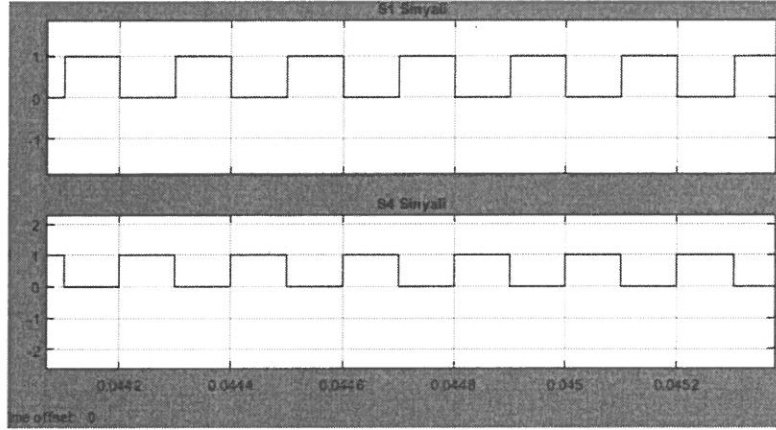
Şekil 5.4'de görüldüğü gibi sistemin girişine 500V AC gerilim uygulanmıştır.



Şekil 5.5. Doğrultulmuş gerilim

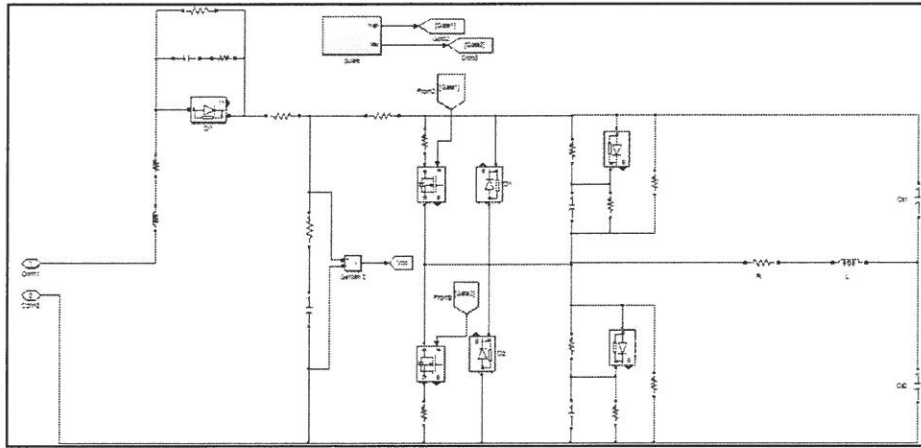
Şekil 5.5'de görüldüğü gibi İndüksiyon ısıtmanın ilk dönüşüm işlemi olan doğrultucu ile girişte uygulanan AC gerilim doğrultularak DC gerilim elde edilmiştir. Şuana

kadar alınan simülasyon sonuçları evirici aşamasına gelene kadar elde edilmiş değerlerdir. Evirici kısmı sistemin ikinci dönüşüm aşamasının gerçekleştiği dönüştürücüdür. Evirici kısmında anahtarlar sürme sinyalleri ile aktif edilerek gerilim beslemesi olan DC sinyal AC ye dönüştürülür. Böylelikle elde edilen yüksek frekanslı AC sinyal rezonans devreye uygulanır.

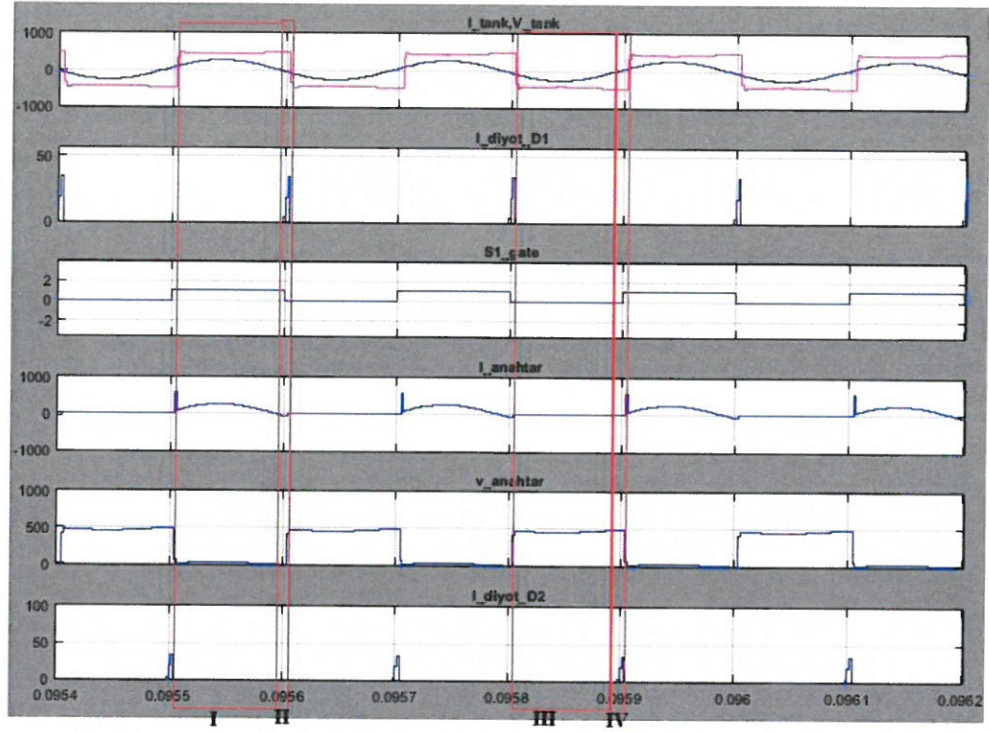


Şekil 5.6. Evirici gate sürme sinyali

Şekil 5.6'da görüldüğü gibi sistemin eviricisinde anahtarlama elemanları 5kHz frekanslı kare dalga ile sürülmektedir. Böylelikle frekans değişimi de bu aşamada gerçekleştirilmiştir. Aktif olan anahtarların iletme girmesi ve buna bağlı olarak meydana gelen rezonans durumu belli işlem sırası ile gerçekleşmektedir.

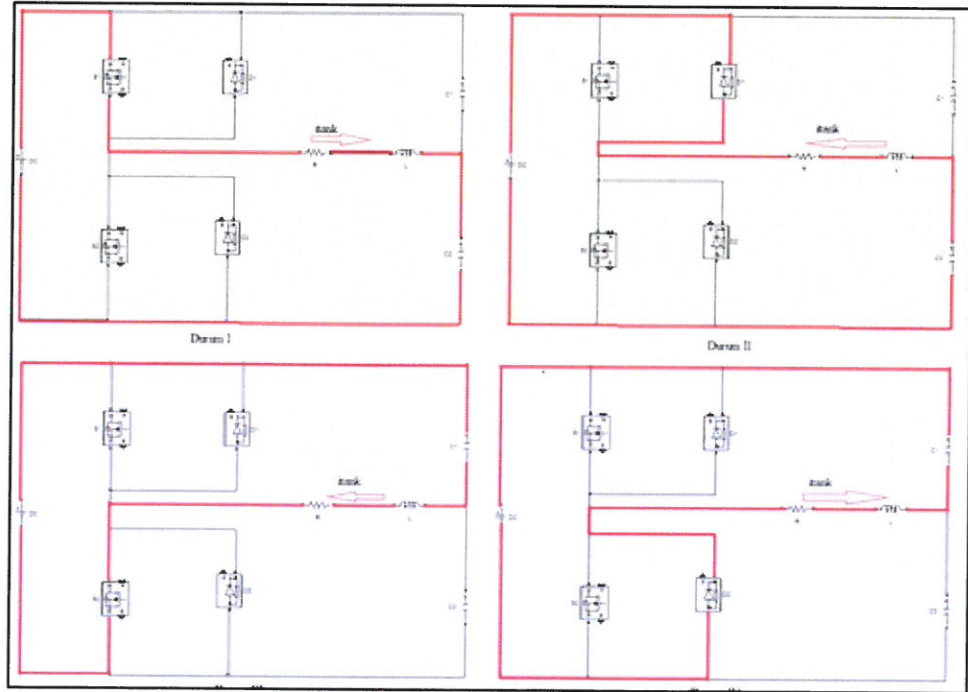


Şekil 5.7. Seri rezonans evirici



Şekil 5.8. Seri rezonans evirici çıkış dalga formları

Şekil 5.8’de çıkış dalga formlarına bakılarak komütasyon sırası Şekil 5.9’daki gibi elde edilir.

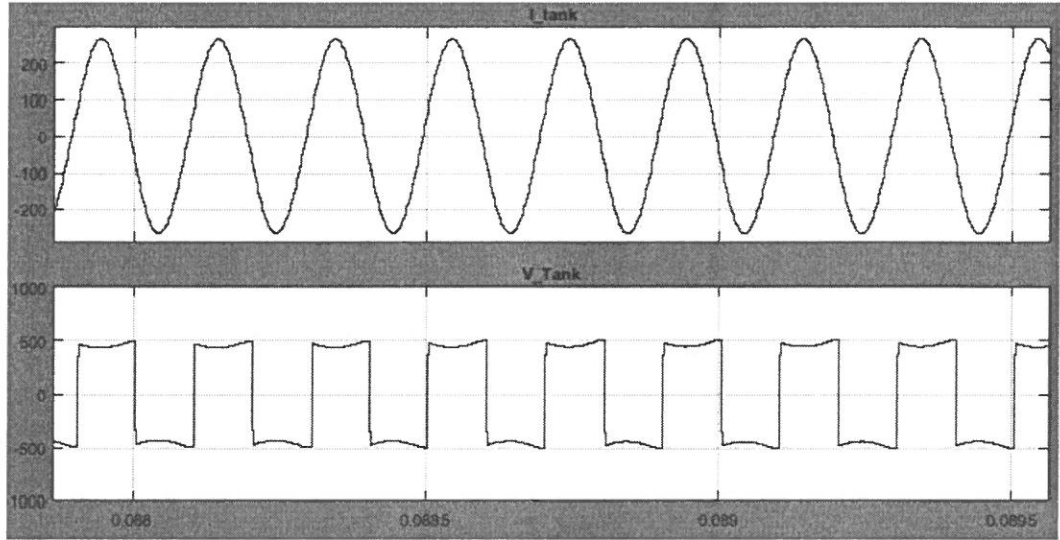


Şekil 5.9. Seri rezonans evirici geçiş sırası

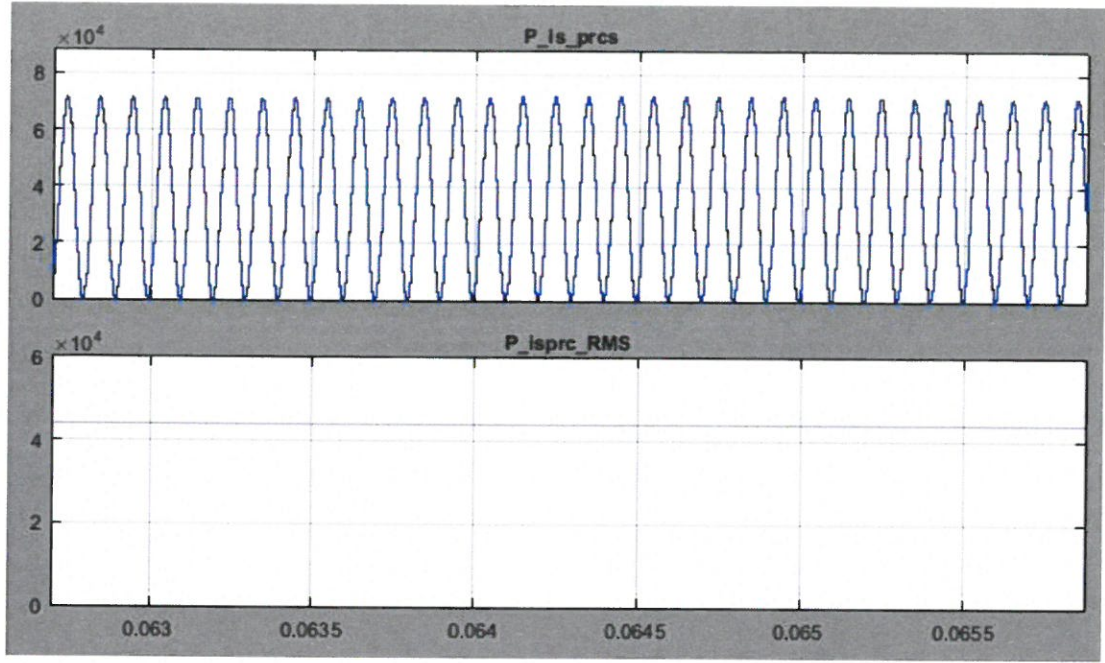
- Durum I: S1 anahtarı ZVS ile iletimdedir. Bobin doğru gerilim kaynağından enerji depolar [16].
- Durum II: ZCS ile S1 anahtarı iletimden çıkar, akım yön değiştirmiştir. Antiparaleldiyodu D1 iletimdedir. Bobinde biriken enerji C2 kondansatörü üzerinden deşarj olmaktadır. Bu süreçte devredeki eşdeğer direnç ile enerji ısıya dönüşür [16].
- Durum III: S2 anahtarı ZVS ile iletimdedir.
- Durum IV: ZCS ile S2 anahtarı iletimden çıkar, akım yön değiştirir. Antiparaleldiyodu D2 iletimdedir. Bobinde biriken enerji C1 kondansatörü üzerinden deşarj olur.

Şekil 5.8’de gerilim beslemeli seri rezonans evirici anahtarlama elemanları geçiş sırası gösterilmiştir.

Gerilim Beslemeli Seri rezonans evirici ile çıkışta maksimum akım ile iş parçasında meydana gelen sıcaklıkla ısıtma işlemi yapılmak istenir. Şekil 5.9’da görüldüğü gibi oldukça yüksek bir akım AC olarak elde edilmiş, evirici girişindeki 500 V DC besleme gerilimi 500 V AC gerilim olarak elde edilmiştir.



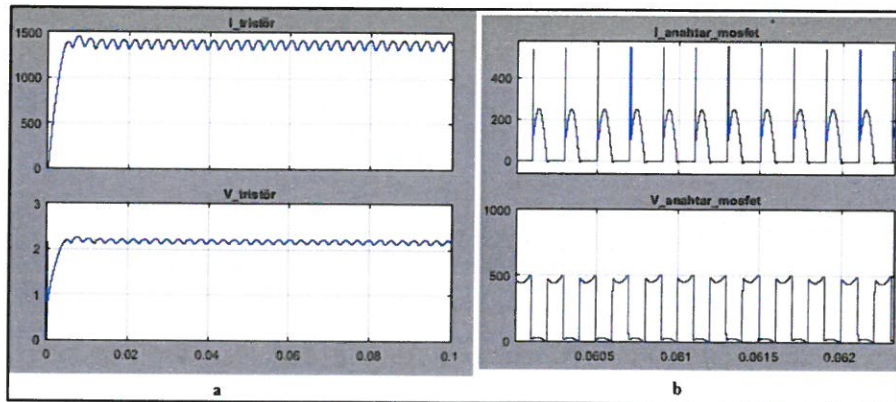
Şekil 5.10. Seri rezonans evirici çıkış akım ve gerilimi



Şekil 5.11. İş parçasında oluşan güç

Şekil 5.10'da görüldüğü gibi iş parçası üzerinde yüksek güç oluşumu sağlanmıştır. İndüksiyon ısıtmada ısıtma işlemi iş parçası üzerinde oluşturulan yüksek güç ile meydana gelen sıcaklık ile oluşmaktadır.

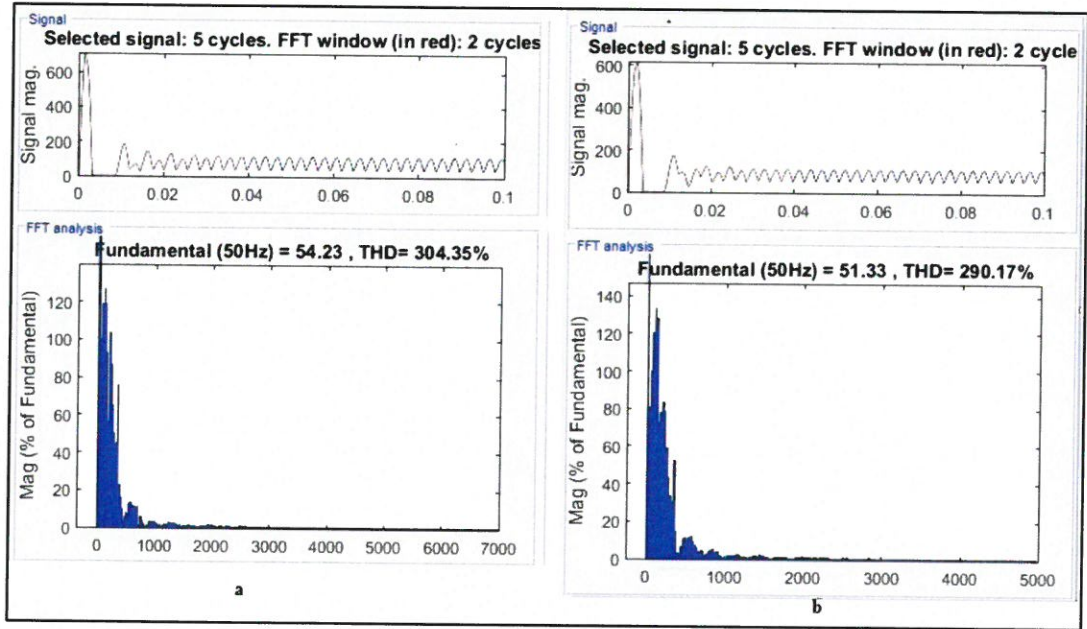
Yapılan çalışmada tristör anahtarlama elamanları yerine günümüzde IGBT/MOSFET tercih edildiğinden bahsedilmiş, sistemin frekans ve gerilim değerine göre IGBT ya da MOSFET tercih edilmesi gerektiği söylenmişti. Simülasyon çalışmasında kullanılan MOSFET anahtarlama elemanlı devre tristör anahtarlama elemanı ile denenmiş ve her iki anahtarlama elemanı akım ve gerilim sonuçları alınmıştır.



Şekil 5.12. Tristör ve Mosfet akım-gerilimi

Şekil 5.9(a)'da aynı devre için Mosfet yerine tristör kullanılarak elde edilen akım-gerilim dalda formu, Şekil 5.9(b)'de ise Mosfet kullanılarak elde edilen sonuçlar görülmektedir. Her iki anahtarlama elemanı için aynı devre sonuçlarına bakılarak tristör anahtarlama elemanı üzerinde çok yüksek akımlar olduğu görülmektedir. Mosfet anahtarlama elemanının kontrollü olma özelliği burada görülerek anahtarlama kayıpları için kullanıma daha elverişli olduğu gözlemlenir.

Yapılan simülasyon çalışmasında rezonans bastırma devreleri kullanılarak anahtarlama elemanlarının sıfır gerilim ile bastırma devresindeki anahtarlama elemanının ise sıfır akımda çalışması sağlanarak harmoniklerin azaltılması ile ideal sinüs formulu akımı elde etmektir [22]. Yapılan çalışmada bastırma devreleri ve bu devreler olmadan harmonik analizi yapılmıştır.



Şekil 5.13. Bastırma devre kullanılmadan ve kullanılarak harmonik analizi

Şekil 5.12(a)'da bastırma devresi kullanılmadan ve Şekil 5.12(b)'de ise bastırma devresi kullanılarak elde edilen harmonik analizleri görülmektedir. Her iki sonuç da incelendiğinde bastırma devresi kullanılarak harmonik oranı biraz da olsa azaltılmıştır.

6. SONUÇLAR VE ÖNERİLER

Metal ısıtma ve eritmenin zorlu ve çevreye verdiği zarardan dolayı günümüzde temiz çevre konusunda oluşan hassasiyete uygunluğu ve metal ısıtma ve eritme konusunda sağlamış olduğu avantajdan dolayı indüksiyon ısıtma günümüzde oldukça fazla tercih edilmektedir. Büyük güçlü indüksiyon fırınlarına ek olarak artık mutfak tipi uygulamaları ile kullanım alanı genişlemiştir.

Tezde çalışma konusu olan indüksiyon ısıtma alanında çalışacak olanlar için bütünlük sağlaması ve anlaşılabilirliği kolaylaştırmak üzere olası çözüm yöntemleri incelenmiştir. Konunun daha rahat anlaşılabilmesi için bilinmesi gereken bazı kavramlar ve tanımlardan bahsedildikten sonra konu üzerinde gerçek uygulama çalışması yapmak isteyenler için, uygulama öncesi sistemin davranışını gözlemlemede kolaylık sağlaması açısından indüksiyon ısıtma uygulaması için modelleme konusundan bahsedilmiş, bobin-iş parçası ikilisinin elektrik modeline örnekler sunulmuştur. Bu modellemeler üzerinden sistem çözümü konusundan bahsedilmiştir. Sistem çözümü için analitik çözüm yöntemi için ilk başlarda çözüme katkı sağlamış olsa da geliştirilen yeni ve karmaşık sistemler için yetersiz kalması nedeniyle sayısal yöntemlerin daha kesin çözümler sağladığından bahsedilmiş ve bilgisayar teknolojisindeki gelişmelere bağlı olarak kullanılan ticari yazılımlar ve simülasyonlarla sayısal yöntemler daha da değer kazanmıştır. Bu çalışmada da orta frekans büyük güçlü indüksiyon fırınlarında tristör anahtarlama elemanı ile tasarlanan eviricilere alternatif olabilecek, kullanım alanına göre frekans ve gerilime bağlı olarak seçilen IGBT/MOSFET anahtarlama elemanları kullanılan evirici ile sistemin simülasyonları ve sonuçları gösterilmiştir.

İndüksiyon ısıtma sistemi aşamalarından bahsedilmiş, giriş gücü seçiminden başlayarak iki dönüşüm işlemi olduğu vurgulanmıştır. Bu dönüşüm işlemlerinden ilki doğrultucu ile yapılan ve ikincisi ise evirici ile yapılan dönüşüm işlemidir.

İndüksiyon ısıtma AC/AC dönüşümün olduğu bir sistemdir. Evirici kısmı son dönüşüm işleminin ve ısıtma işleminin gerçekleştiği işlem basamağı olduğu için

işlemin bu kısmı detaylandırılmıştır. Evirici beslemesine göre iki başlık olarak ele alınmış ve bu başlıklar ile bağlantılı olarak rezonans devreleri ile incelenmiştir. İlk olarak gerilim beslemeli seri rezonans topolojisinden bahsedilmiş daha sonra ise akım beslemeli paralel rezonans topolojisinden bahsedilmiştir. Sistemin uygulama kısmında ise gerilim beslemeli seri rezonans eviriciyi kapsayan indüksiyon ısıtma sistemi Matlab Simulink ortamında simüle edilmiş ve elde edilen sonuçların çalışma boyunca anlatılanları desteklemesi amaçlanmıştır. Alınan simülasyon sonuçları incelendiğinde ise girişe uygulanmış olan 60 Hz AC 500 V giriş geriliminin ilk dönüşüm işlemi ile DC 500 V olarak doğrultulduğu gözlemlenmiştir. Daha sonra bu doğrultulmuş olan gerilim evirici girişine bağlanan kondansatör ile evirici beslemesi olarak kullanılmıştır. İşlemin evirici kısmında ise DC baradan alınan enerji yüke aktarılır. Ancak eviricide yük kısmında bulunan R-L-C elemanlarından R iş parçasını, L indüksiyon bobinini temsil ettiği için aktarılan bu enerji ile bobinde manyetik alan oluşturulur. Böylelikle oluşan bu manyetik alanla bobin içerisine yerleştirilen iş parçası bu alana maruz kalarak ısıtma işlemi gerçekleştirilir. Yapılan çalışmada alınan sonuçlar incelendiğinde eviricide frekans değişimi ile 5 kHz AC akım- gerilim elde edildiği gözlemlenmektedir.

Yapılan çalışmada çıkışta ideal sinüs şeklini yakalayabilmek için iş parçasını temsil eden eşdeğer direnç değeri mümkün olduğunca küçük değerde seçilerek (1Ω) güç faktörü artışı ile sistem daha sönümsüz ve salınımlı hale getirilerek sinüs şekline daha çok yaklaşmak mümkün olmuştur.

Seri rezonans yapısı kullanılarak, rezonans yapının sağlamış olduğu sıfır gerilimde anahtarların iletme geçme, sıfır akım anahtarlama ile iletimden çıkma özelliği ile anahtar kayıplarını azaltması beklenmektedir. Rezonans yapıda R-L-C elemanları seri bağlanmıştır. Seri rezonanstaki iki ya da tek elemanla çıkışta sinüs şekli elde edilmektedir. Seri rezonansın sağlamış olduğu bu daha az yarı iletken kullanımı ile daha az sürücü devresi kullanılır. Böylelikle boyutun küçülmesi ve buna bağlı olarak maliyetin azalması beklenmektedir.

Yapılan çalışmada giriş gerilimi 500V ve çalışma frekansı 5kHz olduğu için anahtarlama elemanı olarak MOSFET seçilmiştir. Ancak daha fazla giriş gerilimi

uygulanacak çalışmalar için bu frekansta IGBT kullanılması önerilir. Artan gerilimler için IGBT önerilirken artan frekanslar için MOSFET önerilmektedir.

Yapılan çalışma ile eviricide kullanılan pasif filtre elemanları ile harmoniklerin azaltılması beklenmektedir. Ayrıca MOSFET'lerin Source'una seri direnç bağlanarak anahtarların aşırı yük akımına karşı korunması amaçlanmaktadır. Bunlara ek olarak anahtarlar yalıtımda iken aşırı gerilimden korumak için snubber devreleri kullanılmıştır. Yapılan harmonik analizi ile bastırma devrelerinin katkı sağladığı gözlemlenmiştir. Daha etkili sonuç almak için aktif filtre kullanılması önerilebilir.

İndüksiyon ısıtma uygulamalarında daha fazla verim almak için indüksiyon bobininin iş parçasına uygun olarak şekillendirilmesi ve kısa devreye imkan vermeyecek kadar olabilecek en yakın mesafeye yerleştirilmelidir.

Yapılan çalışmada sistemin çıkış gücü kontrolü, anahtarların iletimde kalma süresi için anahtarlama frekansı ile ayrıca giriş gücü değiştirilerek yapılabilir.

Yapılan simülasyon çalışması ile elde edilen sonuçlar; orta frekans büyük güçlü bir indüksiyon fırınında yapılan çalışmanın gerçek bir indüksiyon ısıtma uygulaması için kullanıma uygun olduğunu göstermektedir. Simülasyonu yapılan çalışma ile gerçek uygulamalar için rezonans devre kullanılarak seçilen anahtarlama elemanı ile en az kayıpla verimi yüksek, çevre temizliğine uygun ve ısıtma süresinin kısa olması beklenerek uygunluğu bilgisayar ortamında gözlemlenmiştir. Isıtma işlemi için gerçek uygulamalarda dikkate alınması gereken önemli bir unsur ise iş parçası için seçilecek malzemedir. Isıtılmak istenen malzemenin kalınlığı, ağırlığı ve malzemenin türüne bağlı olarak öz direnci, geçirgenliği vb. gibi etkenler ısıtma işlemi için gereken uygun sıcaklığın belirlenmesinde önemli rol alacaktır.

KAYNAKLAR

- [1] Zinn S., Semiatin S. L., Elements of Induction Heating - Design, Control and Applications, *ASM International, Electronic Power Research Institute, Metals Park*, DOI: 10.1361/eoih1988p001.
- [2] Sazak B. S., Design of A 500W Resonant Induction Heating, *Pamukkale University Journal of Engineering Science*, 1999, **5**(1), 871-878.
- [3] Yıldız M. N., Alan İ., 2,2kW'lık İndüksiyonlu Sıvı Isıtıcı Tasarımı ve Denenmesi, *Makine Teknolojileri Elektronik Dergisi*, 2006, **3**(3), 11-23,.
- [4] Bal G., Öncü S., Börekçi S., Kendinden Tetiklemeli İndüksiyon Isıtıcı Tasarımı ve Deneysel Uygulaması, *Gazi Üniversitesi Mühendislik Mimarlık Fakültesi Dergisi*, 2011, **26**(4), 771-776.
- [5] Efteli Y., Alan İ., Yüksek Frekans İndüksiyon Kaynak Makinesi Tasarımı, *ELECO 2012 Elektrik - Elektronik ve Bilgisayar Mühendisliği Sempozyumu*, Bursa, Türkiye, 29 Kasım - 01 Aralık 2012.
- [6] Akkaya R., Anadol M. A., Akım Beslemeli Paralel Rezonans İnverterli Bir İndüksiyonlu Isıtma Uygulaması, *Elektrik- Elektronik-Bilgisayar Mühendisliği 10. Ulusal Kongresi*, Kocaeli, 18-21 Eylül 2003.
- [7] Çetin S., Bir Fazlı Bir İndüksiyon Isıtma Sistemi Analizi ve Dizaynı, Yüksek Lisans Tezi, Pamukkale Üniversitesi, Fen Bilimleri Enstitüsü, Pamukkale, 2005,196991.
- [8] Öncü S., Bir Fazlı Yüksek Verimli Ev Tipi Bir İndüksiyon Isıtma Sistemi, Yüksek Lisans Tezi, Pamukkale Üniversitesi, Fen Bilimleri Enstitüsü, Pamukkale, 2005,167481.
- [9] Segura G. M., Induction Heating Converter's Design, Control and Modeling Applied to Continuous Wire Heating, Doctoral Thesis, Segura University Politecnica de Catalunya, Departament d'Enginyeria Electrica, Barcelona, 2012.
- [10] Dereci S., İndüksiyonla Isıtma Sistemlerinin İncelenmesi ve Bir Uygulama Devresinin Gerçekleştirilmesi, Yüksek Lisans Tezi, Yıldız Teknik Üniversitesi, Fen Bilimleri Enstitüsü, İstanbul, 2010, 29683.
- [11] Altıntaş A., İndüksiyon Bobin Tasarımında Kullanılan İletken Türlerinin Sıvı Isıtıcı Performansına Etkilerinin Araştırılması, *Marmara Fen Bilimleri Dergisi*, 2016, **28**(4), 49-58,.
- [12] Benderskaya G., Numerical Methods for Transient Field-Circuit Coupled Simulations Based on the Finite Integration Technique and a Mixed Circuit

Formulation, Darmstadter Dissertation, Master Thesis, Department of Electrical Engineering and Information, Technology of the Technical University of Darmstadt, Darmstadt, 2007.

- [13] Shaikh A. H. A. R., Akireddy S. K., Simulation of MOSFET Based Inverter for Induction Heating in MATLAB, *International Journal of Science and Research*, 2103,4(11), 28-31.
- [14] Nil M., Demir M., Çakır B., Eviricilerde Yumuşak Geçiş Tekniklerinin İncelemesi, MTBF Analizi ve Harmoniklerin Azaltılmasında Kullanılan Yöntemler, *Elektrik-Elektronik ve Bilgisayar Sempozyumu*, Elazığ, 5-7 Ekim 2011.
- [15] Nithya R., Anila Ms. N. P., Mohan Mr. J., Analysis of Series Resonant Inverter using Hysteresis Current Control, *International Journal of Engineering Trends and Technology*, 2014, 8(2), 87-92.
- [16] Anadol M. A., Akkaya R., İndüksiyonlu Isıtma Uygulaması için Akım Beslemeli Paralel Rezonans Devreli Bir Inverterin Simülasyonu ve Gerçekleştirilmesi, *Selçuk- Teknik Dergisi*, 2012, 11(2), 82-95.
- [17] Soni R. R., Patel H. D., Patel N. D., Rathod M., Hardware Implementation of MOSFET Based High Frequency Inverter for Induction Heating, *Journal of Information, Knowledge and Research in Electrical Engineering*, 2013,2(2), 326-330.
- [18] Bal G., Öztürk N., Comparison of Sinusoidal PWM Zero Current Transition Inverter with Resonant Link Inverter, *5th International Advanced Technologies Symposium*, Karabük, 13-15 May 2009.
- [19] Samathal M., Usha P., Dual Mode Resonant Converter for Induction Heating System, *International Journal of Electrical, Electronics and Data Communication*, 2013, 1(7), 54-57.
- [20] Altıntaş A., Yıldız M. N., Kızılkaya İ., İndüksiyon Isıtma Prensipli ile Çalışan Mikro kontrol Denetimli Bir Sıvı Isıtıcısı Tasarımı, *Dumlupınar Üniversitesi Fen Bilimleri Enstitüsü Dergisi*, 2012, 29, 45-52.
- [21] Kumar A., Sadhu M., Das N., Kumar Sadhu P., Roy D., Ganguly A., A Survey on High-Frequency Inverter and Their Power Control Techniques for Induction Heating Applications, *Journal of Power Technologies*, 2007, 97(3), 201-213.
- [22] Öztürk N., Sıfır Akım Anahtarlama Tek Fazlı Evirici Benzetimi, *Politeknik Dergisi*, 2006, 9(3), 153-160.

EKLER

EK-A

Yapılan çalışmada bode analizi için Matlab Programı kullanılmıştır.

Matlab Programı Şekil 4.4 için;

```
>>clearall
closeall
s=tf('s');
C=0.26*10^-6;
L=9.78*10^-6;
>> R=1Ω;
>> G=(s*C)/((s^2*L*C)+(s*C*R)+1);
bode(G);
grid;
```

Matlab Programı Şekil 4.5 için;

```
>>clearall
closeall
s=tf('s');
C=0.26*10^-6;
L=9.78*10^-6;
>> R1=15;
>> R2=5;
>> R3=1;
>> G1=(s*C)/((s^2*L*C)+(s*C*R1)+1);
G2=(s*C)/((s^2*L*C)+(s*C*R2)+1);
G3=(s*C)/((s^2*L*C)+(s*C*R3)+1);
bode(G1,G2,G3);
grid;
```

Matlab Programı Şekil 4.14 için;

```
>>clearall
closeall
s=tf('s');
C=0.26*10^-6;
L=9.78*10^-6;
R1=15;
R2=5;
R3=1;
Hp1=((s*L)+R1)/((s^2*L*C)+(s*C*R1)+1);
Hp2=((s*L)+R2)/((s^2*L*C)+(s*C*R2)+1);
Hp3=((s*L)+R3)/((s^2*L*C)+(s*C*R3)+1);
bode(Hp1,Hp2,Hp3);
grid;
```

Matlab Programı Şekil 4.16 için;

```

clearall
closeall
s=tf('s');
C=0.26*10^-6;
L=9.78*10^-6;
Req=3;
>> Req2=10;
>> Hp1=((s*L)+Req)/((s^2*L*C)+(s*C*Req)+1);
>> Hp2=(s*L*Req2)/((s^2*L*C*Req2)+(s*L)+Req2);
>>bode(Hp1,Hp2);
>>grid

```

Matlab Programı Şekil 4.17 için;

```

>>clearall
closeall
s=tf('s');
C=0.26*10^-6;
L=9.78*10^-6;
>>Req=1;
>> Req2=24;
>> Hp1=((s*L)+Req)/((s^2*L*C)+(s*C*Req)+1);
Hp2=(s*L*Req2)/((s^2*L*C*Req2)+(s*L)+Req2);
bode(Hp1,Hp2);
grid

```


KİŞİSEL YAYINLAR VE ESERLER

Yapıcı A.T., Abut N., İndüksiyonla Isıtma Uygulamaları için Bir Seri Rezonans İnverter Topolojisi ve Simülasyonu, *Kocaeli Fen Bilimleri Dergisi*, 2018, 1(1), (Kabul edilmiştir).

ÖZGEÇMİŞ

1988 yılında Kırşehir’de doğdu. İlk orta ve lise eğitimini Kocaeli’de tamamladı. 2009 yılında girdiği Zonguldak Bülent Ecevit Üniversitesi Elektrik-Elektronik Mühendisliğini Bölümü’nden 2014 yılında mezun oldu. 2015 yılından beri Kocaeli Üniversitesi Fen Bilimleri Enstitüsü, Elektrik Mühendisliği Bölümü’nde Yüksek Lisans öğrenimine devam etmektedir.