

**EĞİTİM AMAÇLI GÜÇ ELEKTRONİĞİ  
BİLGİSAYAR PAKETİ GELİŞTİRİLMESİ**

**2014  
YÜKSEK LİSANS TEZİ  
BİLGİSAYAR MÜHENDİSLİĞİ**

**İbrahim ATLI**

**EĞİTİM AMAÇLI GÜÇ ELEKTRONİĞİ BİLGİSAYAR PAKETİ  
GELİŞTİRİLMESİ**

**İbrahim ATLI**

**Karabük Üniversitesi  
Fen Bilimleri Enstitüsü  
Bilgisayar Mühendisliği Yazılım Alanında  
Yüksek Lisans Tezi  
Olarak Hazırlanmıştır**

**KARABÜK  
Haziran 2014**

İbrahim ATLI tarafından hazırlanan “EĞİTİM AMAÇLI GÜÇ ELEKTRONİĞİ BİLGİSAYAR PAKETİ GELİŞTİRİLMESİ” başlıklı bu tezin Yüksek Lisans Tezi olarak uygun olduğunu onaylarım.

Prof. Dr. Mehmet AKBABA



Tez Danışmanı, Bilgisayar Mühendisliği Anabilim Dalı

Bu çalışma, jürimiz tarafından oy birliği ile Bilgisayar Mühendisliği Yazılım Anabilim Dalı Yüksek Lisans tezi olarak kabul edilmiştir. 25/ 06/ 2014

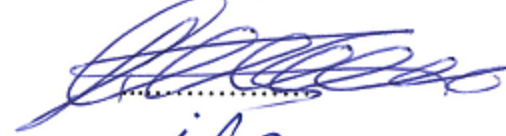
Ünvanı, Adı SOYADI (Kurumu)

İmzası

Başkan : Prof. Dr. Mehmet AKBABA (KBÜ)



Üye : Prof. Dr. Fatih V. ÇELEBİ (YBÜ)



Üye : Yrd. Doç. Dr. M. İlhami ORAK (KBÜ)



15.07/2014

KBÜ Fen Bilimleri Enstitüsü Yönetim Kurulu, bu tez ile, Yüksek Lisans derecesini onamıştır.

Prof. Dr. Mustafa BOZ

Fen Bilimleri Enstitüsü Müdürü



*“Bu tezdeki tüm bilgilerin akademik kurallara ve etik ilkelere uygun olarak elde edildiğini ve sunulduğunu; ayrıca bu kuralların ve ilkelerin gerektirdiği şekilde, bu çalışmadan kaynaklanmayan bütün atıfları yaptığımı beyan ederim.”*

İbrahim ATLI

## **ÖZET**

**Yüksek Lisans Tezi**

### **EĞİTİM AMAÇLI GÜÇ ELEKTRONİĞİ BİLGİSAYAR PAKETİ GELİŞTİRİLMESİ**

**İbrahim ATLI**

**Karabük Üniversitesi**

**Fen Bilimleri Enstitüsü**

**Bilgisayar Mühendisliği Anabilim Dalı**

**Tez Danışmanı:**

**Prof. Dr. Mehmet AKBABA**

**Haziran 2014, 61 sayfa**

Doğrultucu devreler güç elektroniği devreleri arasında önemli yer tutmaktadır. Bu devrelerin performans parametrelerini hesaplayan Matlab-Simulink, PSpice, EMTP, PSim gibi çok sayıda hazır paket program bulunmaktadır. Ancak bu paketlerin çoğu eğitim amaçlı olmaktan çok profesyonel amaçlıdır ve genellikle performans parametreleri nümerik olarak hesaplanır, sonuç bir programın çıktısında birer sayı olarak elde edilir. Bu yaklaşım güç elektroniği eğitimi alan öğrencilere yararlı olmakta fakat doğrultucu devrelerin çözümleri ile devrenin fiziksel davranışından kaynaklanan çalışma modları arasında açık bir ilişki kurmamaktadır. Bu çalışmada genelde üniversitelerde ders olarak gösterilen doğrultucu devreler ele alınmıştır ve bu devreler yukarıda bahsedilen firmaların yazılımlarında toplu olarak bir paket halinde sunulmamaktadır. Bu çalışmada hazırlanan pakette doğrultucu devreleri tek bir platformda toplanmış ve devrelerin çalışma modları analitik olarak analiz edilmiş, performans parametreleri ile çalışma modları arasında açık ilişkiler kurulmuştur.

Bu çalışmayı diğer çalışmalardan ayıran en önemli özellik anlaşılabilirliği arttırmak amacıyla devrelerin modlara ayrılarak sunulmasıdır. Böylece öğrenciler bu tip devrelerin çalışma prensibini kavramakta daha etkin olacaklar ve yorum yapabilme becerisi de kazanabileceklerdir. Hazırlanan paket program laboratuvar dersi veya laboratuvar dersine ön hazırlık için kullanılabilir.

**Anahtar Sözcükler** : Kontrollü doğrultucular, kontrolsüz doğrultucular, çalışma modları, performans parametreleri, kritik ateşleme açısı hesaplama, doğrultucu devrelerin analizi.

**Bilim Kodu** : 902.1.014

## **ABSTRACT**

**M. Sc. Thesis**

### **DEVELOPMENT OF EDUCATIONAL POWER ELECTRONICS COMPUTER PACKAGE**

**İbrahim ATLI**

**Karabük University**

**Graduate School of Natural and Applied Sciences**

**Department of Computer Engineering**

**Thesis Advisor:**

**Prof. Dr. Mehmet AKBABA**

**June 2014, 61 pages**

Rectifiers are important tools among power electronics circuits. There are a lot of computer software's that calculate performance parameters such as Matlab-Simulink, PSpice, EMTP, PSim. However most of them are not for educational purposes, they are generally used for professional purposes. Thus, these kinds of packages give results as a lump sum and in graphical form without further details. They are beneficial to the students who attend power electronic courses. However these packages do not provide a relation between physical behaviour of circuits and operating modes.

In software developed in this study, most of the circuits which are presented in undergraduate power electronics courses are combined together and presented as a single computer package. Circuits' modes are analytically analysed and a clear relationship between operating modes and performance parameters are presented in

the package. The main significance of this study as compared to existing counterparts is to increase understanding of circuits' behaviour by dividing the circuits into operating modes. By this way students are able to understand circuits' behaviour much easier and more efficiently. The package can also be used as a virtual laboratory tool.

**Key Word** : Controlled rectifiers, uncontrolled rectifiers, operating modes, performance parameters, critical firing angle, analysis of rectifiers.

**Science Code** : 902.1.014



## TEŞEKKÜR

Bu tez alıőmasının planlanmasında, araőtırılmasında, yürütölmesinde ve oluşumunda ilgi ve desteğini esirgemeyen, engin bilgi ve tecrübelerinden yararlandığım, yönlendirme ve bilgilendirmeleriyle alıőmamı bilimsel temeller ışığında őekillendiren sayın hocam Prof. Dr. Mehmet AKBABA'ya sonsuz teőekkürlerimi sunarım.

Sevgili aileme, eőim Aycan ATLI ve Karabük Üniversitesi'ndeki mesai arkadaşlarıma manevi hiçbir yardımı esirgemedен yanımda oldukları için tüm kalbimle teşekkür ederim.

## İÇİNDEKİLER

	<u>Sayfa</u>
KABUL.....	ii
ÖZET.....	iv
ABSTRACT.....	vi
TEŞEKKÜR.....	viii
İÇİNDEKİLER .....	ix
ŞEKİLLER DİZİNİ.....	xii
ÇİZELGELER DİZİNİ .....	xiv
SİMGELER VE KISALTMALAR DİZİNİ .....	xv
BÖLÜM 1. ....	1
GİRİŞ .....	1
1.1. GÜÇ ELEKTRONİĞİ UYGULAMA ALANLARI .....	2
1.2. GÜÇ ELEKTRONİĞİ DEVRELERİNİN SINIFLANDIRILMASI.....	2
1.3. ÇALIŞMADA ELE ALINAN KONULAR .....	3
1.4. KOMUTASYON DİYODU.....	5
BÖLÜM 2. ....	6
LİTERATÜR ÇALIŞMASI.....	6
BÖLÜM 3. ....	10
DEVRELERİN ANALİZİ .....	10
3.1. TEK FAZLI KONTROLSÜZ YARIM DALGA DOĞRULTUCU R DEVRESİ .....	11
3.2. TEK FAZLI KONTROLSÜZ YARIM DALGA DOĞRULTUCU R-L DEVRESİ.....	12
3.3. TEK FAZLI KONTROLSÜZ TAM DALGA DOĞRULTUCU R-L-E DEVRESİ.....	14
3.4. TEK FAZLI KONTROLSÜZ TAM DALGA DOĞRULTUCU R-L DEVRESİ.....	17

3.5. TEK FAZLI KONTROLLÜ YARIM DALGA DOĞRULTUCU R DEVRESİ.....	18
3.6. TEK FAZLI KONTROLLÜ YARIM DALGA DOĞRULTUCU R-L DEVRESİ.....	19
3.7. TEK FAZLI KONTROLLÜ YARIM DALGA DOĞRULTUCU R-L-FWD DEVRESİ.....	20
3.8. TEK FAZLI KONTROLLÜ TAM DALGA DOĞRULTUCU R-L DEVRESİ.....	21
3.9. TEK FAZLI AC KONTROL R-L DEVRESİ .....	23
3.10. TEK FAZLI KARE DALGA R-L EVİRİCİ DEVRESİ.....	24
3.11. TEK FAZLI QUASI KARE DALGA R-L EVİRİCİ DEVRESİ .....	26
3.12. ÜÇ FAZLI YARIM DALGA DOĞRULTUCU R-L DEVRESİ .....	28
3.13. ÜÇ FAZLI YARIM DALGA DOĞRULTUCU R-L-FWD DEVRESİ .....	30
3.14. ÜÇ FAZLI TAM DALGA DOĞRULTUCU R-L DEVRESİ.....	31
3.15. ÜÇ FAZLI TAM DALGA DOĞRULTUCU R-L-FWD DEVRESİ.....	32
3.16. ÜÇ FAZLI KONTROLLÜ YARIM DALGA DOĞRULTUCU R DEVRESİ.....	33
3.17. ÜÇ FAZLI KONTROLLÜ YARIM DALGA DOĞRULTUCU R-L DEVRESİ.....	34
3.18. ÜÇ FAZLI KONTROLLÜ YARIM DALGA DOĞRULTUCU R-L-FWD DEVRESİ.....	35
3.19. ÜÇ FAZLI YARIM KONTROLLÜ TAM DALGA DOĞRULTUCU R-L-FWD DEVRESİ.....	36
3.20. ÜÇ FAZLI TAM KONTROLLÜ TAM DALGA DOĞRULTUCU R-L DEVRESİ.....	38
BÖLÜM 4. ....	40
PAKET PROGRAM.....	40
4.1. GENEL BİLGİ .....	40
4.2. PAKET PROGRAMIN ARAYÜZÜ.....	41
4.2.1. Ana Ekran Görüntüsü .....	42
4.2.2. Benzetim (Simülasyon) Ekranı.....	43
4.3. PAKET PROGRAMIN ÖRNEKLER İLE KULLANIMI.....	45
4.3.1. Tek Fazlı Kontrollü R-L Devresinin Benzetimi .....	45

	<b><u>Sayfa</u></b>
4.3.2. Üç Fazlı Tam Kontrollü Tam Dalga Doğrultucu R-L Devresinin Benzetimi .....	50
4.3.3. Üç Fazlı Yarım Kontrollü Tam Dalga Doğrultucu R-L-FWD Devresinin Benzetimi .....	53
BÖLÜM 5. ....	56
SONUÇLAR VE YORUM.....	56
KAYNAKLAR .....	59
ÖZGEÇMİŞ .....	61

## ŞEKİLLER DİZİNİ

### Sayfa

Şekil 1.1. Güç elektroniği devrelerinin sınıflandırılması .....	3
Şekil 1.2. Doğrultucu devrelerinin sınıflandırılması .....	3
Şekil 1.3. Komutasyon diyodu .....	5
Şekil 2.1. Kontrollü yarım dalga doğrultucu .....	8
Şekil 3.1. Kontrolsüz yarım dalga R devresi .....	11
Şekil 3.2. Tek fazlı yarım dalga doğrultucu R-L devresi .....	12
Şekil 3.3. $\beta$ değeri .....	13
Şekil 3.4. Tek fazlı kontrolsüz tam dalga doğrultucu R-L-E devresi .....	14
Şekil 3.5. <i>I<sub>min</sub></i> ve <i>a<sub>min</sub></i> grafiksel gösterimi .....	16
Şekil 3.6. Tek fazlı kontrolsüz tam dalga doğrultucu R-L devresi .....	17
Şekil 3.7. Tek fazlı kontrollü yarım dalga doğrultucu R devresi .....	18
Şekil 3.8. Tek fazlı kontrollü yarım dalga doğrultucu R-L devresi .....	19
Şekil 3.9. Tek fazlı kontrollü yarım dalga doğrultucu R-L-FWD devresi .....	20
Şekil 3.10. Tek fazlı kontrollü tam dalga doğrultucu R-L devresi .....	22
Şekil 3.11. Tek fazlı alternatif akım kontrol R-L devresi .....	24
Şekil 3.12. Tek fazlı kare dalga R-L devresi .....	25
Şekil 3.13. Kare dalga çıkış akımı, minimum ve maksimum değerler .....	26
Şekil 3.14. Quasi kare dalga R-L evirici devresi .....	26
Şekil 3.15. Dört parçaya ayrılmış akımın grafiksel gösterimi .....	27
Şekil 3.16. Üç faz gerilim: <i>V<sub>an</sub></i> , <i>V<sub>bn</sub></i> , <i>V<sub>cn</sub></i> .....	28
Şekil 3.17. Üç fazlı kontrolsüz yarım dalga doğrultucu R-L devresi .....	29
Şekil 3.18. Üç fazlı yarım dalga doğrultucu R-L-FWD devresi .....	30
Şekil 3.19. Üç fazlı kontrolsüz tam dalga doğrultucu R-L devresi .....	31
Şekil 3.20. Üç fazlı tam dalga doğrultucu R-L-FWD devresi .....	32
Şekil 3.21. Üç fazlı kontrollü yarım dalga doğrultucu R devresi .....	33
Şekil 3.22. Üç fazlı kontrollü yarım dalga doğrultucu R-L devresi .....	34
Şekil 3.23. Üç fazlı kontrollü yarım dalga doğrultucu R-L-FWD devresi .....	35
Şekil 3.24. Üç fazlı yarım kontrollü tam dalga doğrultucu R-L devresi .....	36

Şekil 3.25. Numaralandırılmış akım denklemleri .....	37
Şekil 3.26. Üç fazlı tam kontrollü tam dalga doğrultucu R-L devresi .....	38
Şekil 4.1. Sınıflar arası ilişkiyi gösteren “sınıf diyagramı” .....	40
Şekil 4.2. Paket program arayüzü.....	41
Şekil 4.3.. Numaralandırılmış ana ekran .....	42
Şekil 4.4. Laboratuvar dokümanı .....	43
Şekil 4.5. Benzetim ekranı .....	43
Şekil 4.6.. Detay ekranının görüntüsü .....	44
Şekil 4.7.. Analiz sonuçlarının rapora dönüştürülmesi .....	45
Şekil 4.8.. Devrenin $V_m = 220V, f = 50Hz, R = 20\Omega, L = 50mH, \alpha = 20^\circ$ parametreleri ile benzetimi.....	47
Şekil 4.9.. R, L ve çıkış gerilimlerinin detaylı analizi.....	47
Şekil 4.10. Devre analiz sonuçlarının rapor haline dönüştürülmesi.....	48
Şekil 4.11. Devrenin $V_m = 220V, f = 50Hz, R = 20\Omega, L = 50mH, \alpha = 40^\circ$ parametreleri ile benzetimi.....	49
Şekil 4.12. Devre mod2’de çalışırken R ve L üzerindeki gerilimlerin detaylı incelenmesi.....	50
Şekil 4.13. Devrenin $V_m = 250V, f = 50Hz, R = 10\Omega, L = 50mH, \alpha = 30^\circ$ parametre değerleriyle analizi .....	51
Şekil 4.14. Devrenin $V_m = 250V, f = 50Hz, R = 10\Omega, L = 50mH, \alpha = 90^\circ$ parametre değerleriyle analizi .....	52
Şekil 4.15. Numaralandırılmış akım denklemlerinin gösterilmesi.....	53
Şekil 4.16. Devrenin $V_m = 300V, f = 50Hz, R = 30\Omega, L = 20mH, \alpha = 30^\circ$ parametre değerleriyle analizi .....	54
Şekil 4.17. R, L elemanları üstündeki gerilim ve çıkış gerilimi detayı.....	55

## ÇİZELGELER DİZİNİ

	<b><u>Sayfa</u></b>
Çizelge 3.1. Tristörlerin aktif iletim açıları.....	21
Çizelge 3.2. Diyot eşlerinin iletim açıları .....	32

## SİMGELER VE KISALTMALAR DİZİNİ

### SİMGELER

$\Omega$	: ohm (direnç birimi)
A	: amper
V	: volt
R	: direnç (ohm)
L	: indüktans (henry)
$\omega$	: radyan derece cinsinden frekans ( $2\pi f$ )
$\beta$	: iletim açısı (conduction angle)
$\alpha_c$	: kritik ateşleme açısı
$V_{an}, V_{bn}, V_{cn}$	: faz gerilimleri
$V_m$	: faz geriliminin tepe değeri
$V_L$	: faz arası gerilim ( $V_L = \sqrt{3/2} * V_m$ )



## **KISALTMALAR**

AC	: Alternatif Akım (Alternative Current)
DC	: Doğru Akım (Direct Current)
SCR	: Silikon Kontrollü Doğrultucu, Tristör (Silicon Controlled Rectifier)
UPS	: Kesintisiz Güç Kaynağı (Uninterruptable Power System)
MB	: Megabayt
GHz	: GigaHertz
RMS	: Etkin Değer (Root Mean Square)
MOSFET	: Mosfet Transistör (Metal–Oxide–Semiconductor Field-Effect Transistor)
IGBT	: Bipolar (Transistör Insulated Gate Bipolar Transistor)
HDVC	: Yüksek Gerilimli (Doğru Akım High Voltage Direct Current)
FWD	: Komutasyon (Diyotu Free Wheeling Diode)
EMTP	: Elektromanyetik Analiz Programı (ElectroMagnetic Transients Program)

## BÖLÜM 1

### GİRİŞ

Geliştirilen yazılımdaki devreler güç elektroniğinde kullanılan devrelerdir. Güç elektroniğine genel bir bakış yapacak olursak; güç elektroniği elektrik mühendisliğinde enerji ve elektronik bilim dalları arasında bir bilim dalıdır. Temelde bir kaynaktan yüke verilecek elektrik enerjisinin, yükün gerektirdiği uygun bir şekle sokulması ve denetlenmesi konularını inceler [1]. Güç elektroniğinin ilk çalışmaları AC'den DC'ye çevrim için yapılmıştır. Güç elektroniği çeviricileri elektrik enerjisinin şekil değiştirmesini gerektiren her yerde kullanılabilir. Bu yüzden kullanılabilir enerji aralığı miliwatt(mW) seviyelerinden (mobil cihazlar) megawatt (MW) seviyelerine (metrolara enerji sağlanması) kadar değişebilir. Klasik elektrikte elektrik akımı ve gerilim bilgi taşımak için kullanılırken, güç elektroniğinde elektriksel gücü taşımak veya kontrol etmek için kullanılırlar. Bu yüzden güç elektroniğinin ana kıstasları çok küçük güçlerle büyük güçleri kontrol etmek ve verim olarak tanımlanabilir [2].

Dönüştürme işlemleri güç elektroniğinin temelini oluşturmaktadır. Günümüzde dönüştürme işlemleri için diyot, tristör, transistör gibi yarı iletken malzemeler kullanılır. Bu malzemeler bulunmadan önce mekanik dönüştürücüler ve civa buharlı doğrultucular kullanılmıştır. Yarı iletken doğrultucular 1920-1930 yıllarında ortaya çıkmıştır. 1950 yılında ilk yarı iletken diyotlar yapılmış, 1957'de ise tristörler imal edilmiştir. Tristörlerin icadı güç elektroniğinde devrim yaratmıştır. 1974 yılında ilk mikroişlemcilerin piyasaya sürülmesiyle güç elektroniği alanında çalışanlara yeni ufuklar açılmış ve güç elektroniği dalı daha da gelişmiştir [3].

## 1.1. GÜÇ ELEKTRONİĞİ UYGULAMA ALANLARI

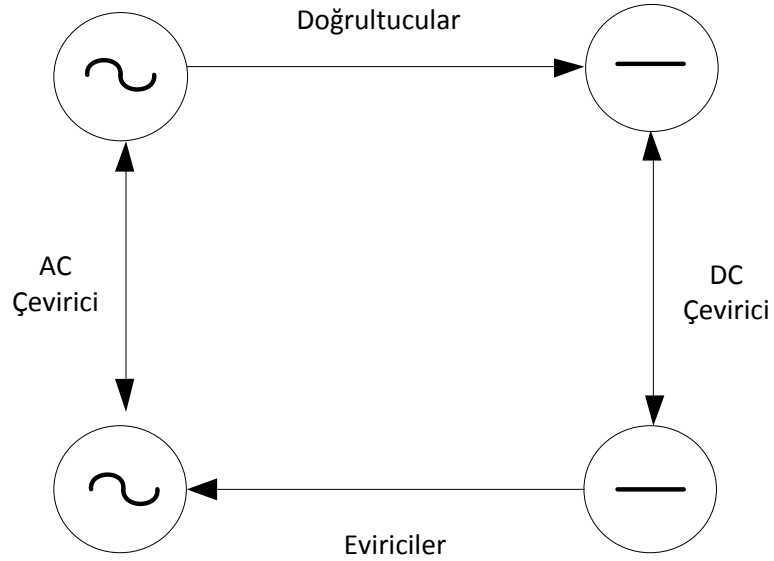
Güç elektroniğinin uygulama alanları güç kaynaklı sistemler, enerjinin aktif olarak kullanıldığı sistemler, endüstriyel süreçler, taşımacılık ve şebeke bağlantılı uygulamalar şeklinde 5 ana grupta toplanabilir.

Güç kaynaklı sistemler, elektrik enerjisinin bir şekilden diğer bir şekle genellikle diğer bir elektronik sistemi beslemek amacıyla elektriksel sinyalin dönüştürülmesi amacıyla taşıyan uygulamaları içerir. Hastaneler veya bilgisayar sistemlerinde kullanılan kesintisiz güç kaynakları bu gruba örnek gösterilebilir. Enerjinin aktif olarak kullanıldığı gruptaki sistemler AC veya DC, değişken veya sabit hızlı sistemler olabilir ve uygulama alanları, düşük servo motorlardan çok yüksek güçlü endüstriyel pompa sürücülerine kadar değişkendir [4]. Endüstriyel süreçler ise elektroliz ve metal kaplama gibi kimyasal süreçlerde kullanılan doğrultucular, endüksiyon fırınları, elektrik kaynak sistemleri gibi uygulamaları içerir. Taşımacılık grubunda ise duman ve hava kirliliğini azaltmak için büyük şehirlerde tercih edilen elektrikli araçların kullanımını arttırmaya yönelik uygulamalar bulunmaktadır. Elektrikli araçlarda güç elektroniğinin kullanıldığı akümülatör doldurma sistemleri kullanılmaktadır. Yüksek gerilimli DC (HVDC) hatları üzerinden yapılan güç iletim sistemleri ise şebeke-bağlantılı uygulamalar grubuna örnek gösterilebilir [5].

## 1.2. GÜÇ ELEKTRONİĞİ DEVRELERİNİN SINIFLANDIRILMASI

Bir kaynaktan alınarak bir yüke verilecek elektrik enerjisinin, yükün gerektirdiği uygun gerilim ve frekansa dönüştürülmesi için kullanılan güç elektroniği devrelerine genel olarak güç dönüştürücüleri denir. Dönüştürücülerde kontrol edilebilen doğrultucu kullanılması halinde enerji akışı istenildiği gibi ayarlanabilir. DC ve AC sistemleri arasında oluşturulabilecek dört dönüşüm aşağıdaki gibidir:

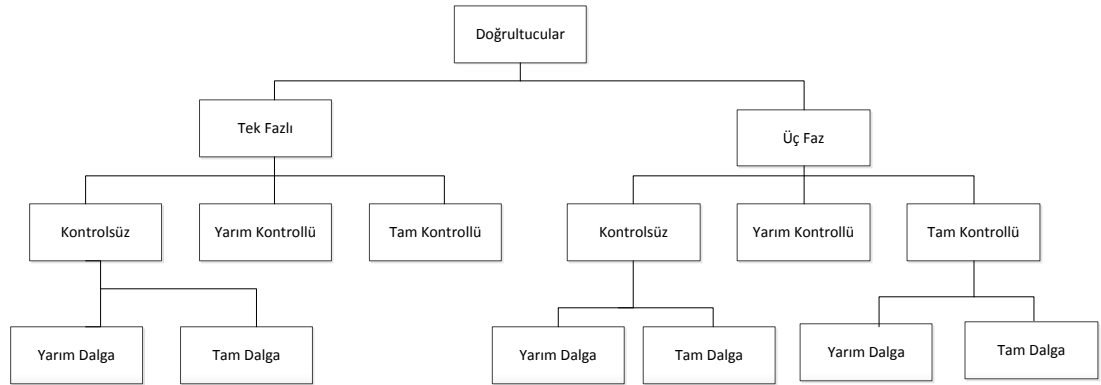
1. AC'den DC'ye (Doğrultucu)
2. AC'den AC'ye (Doğrultmayı Takip Eden Evirme)
3. DC'den AC'ye (Evirici)
4. DC'den DC'ye (Düzenleme)



Şekil 1.1. Güç elektroniği devrelerinin sınıflandırılması [5].

### 1.3. ÇALIŞMADA ELE ALINAN KONULAR

Bu çalışmada güç elektroniğinin önemli bir konusu olan doğrultucular ele alınmış ve eğitim amaçlı bir bilgisayar paket programı hazırlanmıştır. Paket programın konusu olan doğrultucular, alternatif akımı doğru akıma çevirmek için kullanılan bir veya daha fazla yarı iletken elemandan oluşan elektriksel devrelerdir. Bu tip devreler motor sürücü devrelerinden, evdeki küçük eşyalara kadar her yerde kullanılmaktadır. Bu yüzden güç elektroniği eğitimi alan kişiler için büyük önem arz etmektedir. Doğrultucular Şekil 1.2'deki gibi sınıflandırılabilir.



Şekil 1.2. Doğrultucu devrelerinin sınıflandırılması.

Çalışmanın birinci bölümünde ele alınan konular hakkında kısa bir giriş yapılmış ve genel anlamda güç elektroniğine değinilmiştir. İkinci bölümde akademik ve profesyonel alanda yapılan çalışmalara (literatür araştırması) yer verilmiş, bugüne kadar hazırlanan bilgisayar ortamı çalışmaları avantaj ve dezavantajlarından bahsedilmiştir. Çalışmalar genellikle doğrultucu devrelerin bilgisayar ortamında sanal uygulamalarının gerçekleştirildiği alanlardan seçilmiştir. Üçüncü bölümde yukarıdaki gibi sınıflandırılan doğrultucuların en sık karşılaşılan kombinasyonları oluşturulup analiz edilmiştir. Analizin kolay anlaşılır olması adına, devrelerin bazıları modlara ayrılmış ve çözümleri o şekilde sunulmuştur. Analizi yapılan devreler:

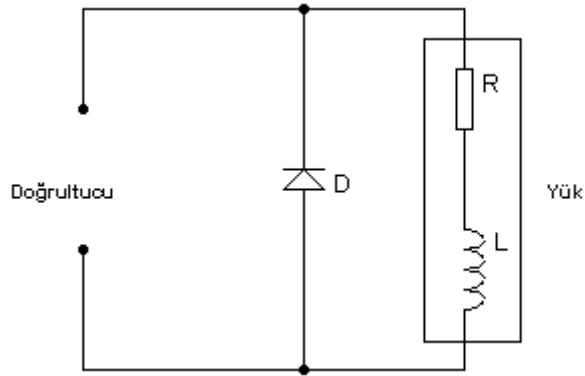
1. Tek Fazlı Kontrolsüz Yarım Dalga Doğrultucu R Devresi
2. Tek Fazlı Kontrolsüz Yarım Dalga Doğrultucu R-L Devresi
3. Tek Fazlı Kontrolsüz Tam Dalga Doğrultucu R-L-E Devresi
4. Tek Fazlı Kontrolsüz Tam Dalga Doğrultucu R-L Devresi
5. Tek Fazlı Kontrollü Yarım Dalga Doğrultucu R Devresi
6. Tek Fazlı Kontrollü Yarım Dalga Doğrultucu R-L Devresi
7. Tek Fazlı Kontrollü Yarım Dalga Doğrultucu R-L-FWD Devresi
8. Tek Fazlı Kontrollü Tam Dalga Doğrultucu R-L Devresi
9. Tek Fazlı AC Kontrol R-L Devresi
10. Tek Fazlı Kare Dalga Evirici (Inverter)
11. Tek Fazlı Quasi Kare Dalga Evirici
12. Üç Fazlı Yarım Dalga Doğrultucu R-L Devresi
13. Üç Fazlı Yarım Dalga Doğrultucu R-L-FWD Devresi
14. Üç Fazlı Tam Dalga Doğrultucu R-L Devresi
15. Üç Fazlı Tam Dalga Doğrultucu R-L-FWD Devresi
16. Üç Fazlı Kontrollü Yarım Dalga Doğrultucu R Devresi
17. Üç Fazlı Kontrollü Yarım Dalga Doğrultucu R-L Devresi
18. Üç Fazlı Kontrollü Yarım Dalga Doğrultucu R-L-FWD Devresi
19. Üç Fazlı Yarım Kontrollü Tam Dalga Doğrultucu R-L-FWD Devresi
20. Üç Fazlı Tam Kontrollü Tam Dalga Doğrultucu R-L Devresi'dir.

Çalışmanın dördüncü bölümünde, hazırlanan paket program hakkında bilgi verilmiştir. Paket programın arayüzü, kullanımı ve çıktıları seçilen birkaç örnek devre üstünden örneklendirilmiştir. Beşinci ve son bölümde ise paket programın çıktıları yorumlanmış, kullanım alanı ve şekli ile alakalı önerilerde bulunulmuştur.

#### 1.4. KOMUTASYON DİYODU

Analizi yapılan devrelerin bazılarında FWD (FreeWheeling Diode) ifadesi yer almaktadır. Yarı kontrollü, kontrolsüz çoğu devrede bu diyot bulunmaktadır. Bazı kaynaklarda ismi By-Pass diyot veya komutasyon diyodu olarak geçmektedir. İki önemli fonksiyonu vardır [6]:

1. Kullanılan yarı iletkenin kesime gittiği anlarda indüktansta biriken enerjiden dolayı akmakta olan akıma alternatif bir yol sağlamak,
2. Birinci maddenin doğal bir sonucu olarak çıkış alınan yük üstünde negatif gerilimin oluşmasını engellemek.



Şekil 1.3. Komutasyon diyodu.

## BÖLÜM 2

### LİTERATÜR ÇALIŞMASI

Laboratuvar çalışmaları derslerde teorik olarak öğretilen bilgilerin öğrenciler tarafından somutlaştırılarak iyice özümsemesi amacıyla uygulanmaktadırlar. Özellikle elektronik gibi günlük yaşamın birçok alanında uygulaması bulunan ve kuramsal olarak anlaşılması zor derslerin temel uygulamalarının öğrencilere tanıtılması, gerekli laboratuvar çalışmalarının gerçekleştirilmesi son derece önemlidir. Ancak bu çalışmalar esnasında malzeme yetersizliği, sınıf mevcudu veya deney yapım süresinin kısıtlılığı gibi problemler ortaya çıkmaktadır. Çıkan bu tür problemler ne yazık ki laboratuvar uygulamalarının etkinliğini azaltmaktadır. Gelişen teknoloji ile bilgisayar benzetimlerinin derslerde ve laboratuvar uygulamalarında kullanılması bu tür problemleri ortadan kaldırmakta ve öğrencinin başarısının artmasında etkili rol oynamaktadır [7]. Dokuz Eylül Üniversitesi Fizik Eğitimi Anabilim Dalı'nda kayıtlı 26 öğrenci üzerinde elektrik laboratuvarına ait bir deneyin bilgisayar benzetiminin başarımını test eden Zafer Tanel ve Fatih Önder adlı araştırmacılar çalışmalarında bilgisayar simülasyonu ile desteklenen laboratuvar dersinin öğrencilerin başarılarını arttırdığı sonucuna varmışlardır. Test uygulaması olarak yarım dalga ve tam dalga doğrultucu devrelerini kullanmışlardır [8].

Erkan Tanyıldızı ve Ahmet Orhan'ın birlikte hazırladıkları (2004) "Sanal Elektrik Makinaları Laboratuvarı İçin Fırçasız Doğru Akım Motoru Uygulaması" adlı başka bir çalışmada, sanal öğrenmenin (bilgisayar ortamında öğrenmenin) avantajlarından bahsetmişlerdir. Elektrik-Elektronik ve benzeri bölümlerde okuyan öğrencilere verilen eğitimin kalitesinin, yoğun teorik bilginin yanında pratik bilginin aktarımı ile sağlandığını savunmuşlardır. Eğitimde verilen teorik bilgilerin uygulamalar ile desteklenmesinin bilginin kalıcılığını arttırdığını fakat pratik becerileri kazanmak amacıyla yapılan uygulamaların pahalı laboratuvar sistemlerine gereksinim.

duyduğuna değinmişlerdir. Bunun yanında öğrencilerin can güvenliği nedeniyle, özellikle güç deneylerinde, tek başlarına çalışmalarının kısıtlılığından bahseden araştırmacılar oluşturulan sanal laboratuvarlar veya hazırlanan bilgisayar paketleri ile eğitimde zaman ve mekân kısıtlamaları gibi problemlerin aşılacağı sonucuna varmışlardır [9].

Bilgisayar ortamında hazırlanan bir başka çalışmada Khan ve arkadaşları diyotlu doğrultucuların dalga formu değişimlerinin izlenebildiği interaktif öğrenme sistemi geliştirmişlerdir. Çalışmanın sonucunda geliştirdikleri sistemin öğrencilerin konuyu kavramasında oldukça etkili olduğunu göstermişlerdir [10].

Teknolojik gelişmelere paralel olarak Güç Elektroniği ve Motor sürme devrelerinde geline yol, ders içeriklerinde yeni ilaveler yapılması ihtiyacını da doğurmuştur. Ders içeriklerinde, günden güne yapılan veya yapılacak olan ilave konuların ise öğrenciler tarafından daha iyi anlaşılması veya çabuk öğrenilmesi zorlaşmıştır. Bu nedenle Güç Elektroniği ve Motor sürme derslerinin bilişim teknolojilerinden destek alınarak verilmesinin faydalı olacağı görüşü yaygınlaşmıştır. Bu bağlamda Çetin Elmas ve Tuncay Yiğit laboratuvar dersi için hazırladıkları bilgisayar temelli eğitim setini test etmişler ve benzetim sonuçlarını gerçek değerleriyle karşılaştırma imkânı elde etmişlerdir. Hazırlanan yazılımın sonuçlarının gerçek sonuçları destekler nitelikte olduğunu göstermişlerdir [11].

Bilgisayar ortamında devrelerin benzetimi için kullanılan birçok yazılım bulunmaktadır. Bu yazılımların en yaygın kullanılanları Matlab-Simulink, PSpice ve PSim'dir. Bahsedilen yazılımlarda istenilen devre belli bir şablonda çizilir veya her bir elemanın bağlantı noktaları yazılır. Akademik çalışmalarda devrelerin benzetimi genellikle bu üç programdan biri ile yapılır.

Lisans seviyesinde güç elektroniği dersi alan öğrenciler, birçok güç elektroniği devresinin davranışını PSpice yazılımı kullanarak da kavrayabilir. Gerilim ve akım grafiklerini görebilir. Fourier analizini hesaplatırıp harmoniklerini inceleyebilir. Örneğin Şekil 2.1'deki tek fazlı kontrollü yarım dalga doğrultucu devresinin PSpice ortamında benzetimi için gerekli kod şu şekilde yazılabilir:



## HALF-WAVE RECTIFIER EXAMPLE

\*Simplified SCR model

.PARAM ALPHA = 60 ; delay angle of SCR

.PARAM DELAY { ALPHA/360/60 } PW = { 1/60-DELAY }

VS 1 0 SIN(0 170 60)

DSCR 1 2 DMOD ; diode part of SCR

SSCR 2 3 6 0 SMOD ; switch part of SCR

R 3 4 10

L 4 5 100MH IC = 0

VC 5 0 DC 50

VCONTROL 6 0 PULSE(-1 1 { DELAY } 1 US 1US { PW } { 1/60 ))

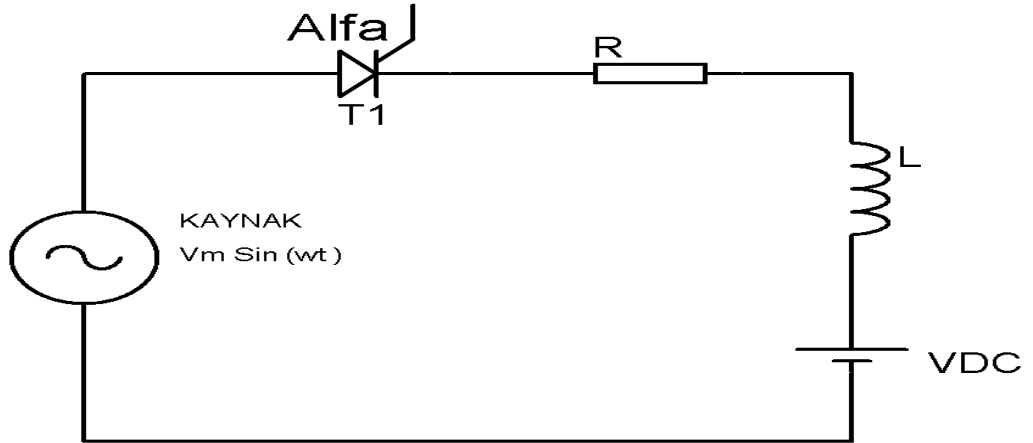
.MODEL DMOD ; default diode

.MODEL SMOD VSWITCH (RON = .001 VON = .001) ; voltage-controlled switch

.TRAN .1MS 16.67MS UIC ; transient analysis

.PROBE

.END [12]



Şekil 2.1. Kontrollü yarım dalga doğrultucu.

Benzer uygulamaların yapılabileceği yaygın olarak kullanılan bir başka yazılım da Matlab-Simulink programıdır. Matlab-Simulink güç elektroniği, elektrik makineleri, bulanık mantık ve yapay sinir ağları gibi araç kutuları ile oldukça gelişmiş bir yapıya sahiptir. Aynı şekilde güç elektroniği devrelerinin benzetimini yapmak amacıyla hazırlanmış diğer bir yazılım ise PSim'dir. Matlab-Simulink ve PSim aynı devrelerin

benzetimini yapmak kaydıyla devreyi modellemek için geçen zaman, doğruluk, işlevsellik, sonuçların kabul edilebilirliği ölçütleriyle karşılaştırılmıştır. Karşılaştırmanın sonucunda Matlab-Simulink platformu kontrol ve düzenleme devrelerine daha uygun olduğu görülmüştür. Bu sonuca nazaran PSim güç elektroniği devreleri için yapılmış olduğundan güç elektroniği benzetimleri daha hızlı ve güvenilir algoritmalar ile sonuca ulaşmış ve eğitim amaçlı olarak uygun bulunmuştur. Her iki yazılımın da güç elektroniği derslerinde kullanılması önerilmektedir [13].

Yapılan bir başka çalışmada Matlab ve Electronic WorkBench yazılımları tek fazlı kontrollü tam dalga doğrultucu devresi kullanılarak karşılaştırılmıştır. Araştırmacılar Electronic WorkBench yazılımı ile doğrultucuya R-L yükü bağlandığında birinci tristörden geçen akımın benzetiminin gerçeğinden farklı bir şekilde çıktığı sonucuna varmışlardır. Matlab ile hazırlanan benzetim çıktısının ise gerçeğe çok yakın olduğuna fakat programının fazla hesaplama zamanı gerektirmesi ve grafik editörünün kullanımının zahmetli olduğu kanısına varmışlardır [14].

Görüldüğü gibi PSim, Matlab-Simulink, PSpice, EMTP, Electronic WorkBench gibi yazılımlar ile çoğu devre analiz edilebilmektedir fakat öğrencilerin bu uygulamaları yapabilmesi için o programlama dilini ve yapısını bilmelerine ihtiyaçları vardır. Öğrencilerin bu programları öğrenmeleri ve analizler yapabilmeleri için belirli bir zaman çalışmaları gerekmektedir. Ayrıca MATLAB-Simulink gibi çok gelişmiş bir programlama dilinde bile hazır olarak bulunmayan özellikleri kullanıcı oluşturmak zorunda kalacaktır. Bu çalışmada hazırlanan paket programda ise öğrenci almış olduğu teorik bilgiler ışığında sadece hazır olan uygulamaya ait parametre değerlerini girerek sistemi analiz edebilecektir. Böylece öğrenci yukarıdaki yazılımları öğrenmek için geçen zamanı dersin gerekliliklerini kavramak için harcayabilecektir. Öğrencinin bu paket programı kullanabilmesi için ayrıca bir programlama dili bilmesine veya benzetim programları hakkında bilgisi olmasına gerek yoktur.

## BÖLÜM 3

### DEVRELERİN ANALİZİ

Güç elektroniği devrelerinin analizi yapılırken yoğun matematiksel işlemler gereklidir. Hal böyle olunca devrelerin çalışma prensiplerinin anlaşılması biraz daha karmaşık hale gelmektedir. Devrelerin analizinin daha anlaşılır bir formda sunmak amacıyla bazı devreler çalışma modlarına ayrılmış ve mod değişimlerinin olduğu kritik açı değerleri matematiksel olarak ifade edilmiştir.

Kritik ateşleme açısı, çalışma modlarına ayrılan devrelerde mod değişiminin olduğu, yük üzerinden akan akımı sürekli yapan en küçük açı değeridir ve  $\alpha_c$  sembolü ile gösterilir. Akımın sürekliliği olduğu farz edilip,  $\pi$  açısında aldığı değerın sıfır veya sıfırdan büyük olma şartının sağlandığı en küçük  $\alpha$  değeri kritik ateşleme açısının sayısal değerini verir. Yani  $i(\pi) \geq 0$  eşitsizliğini sağlayan en küçük  $\alpha$  değeri, kritik ateşleme açısı olan  $\alpha_c$ 'nin sayısal değeridir.

Devrelerin analizleri yapılırken sadece akım denklemleri bulunmuştur. Çünkü akım denklemi bilinen bir devrede ortalama akım, ortalama gerilim, dalgalanma faktörü, güç faktörü, akım ve gerilimin etkin değerleri gibi önemli performans parametreleri rahatlıkla türetilir. Örneğin direnç üstündeki gerilim  $i \cdot R$ , indüktans üstündeki gerilim  $L \cdot \frac{di}{dt}$  formülleri kullanılarak bulunabilir. Belli bir periyot boyunca akım denkleminin bilinmesi ile akım ve gerilimin ortalama ve etkin değerleri bilgisayar programına basit bir şekilde çözdürülebilir. Bir  $f(t)$  fonksiyonunun herhangi bir  $T_1 - T_2$  aralığındaki ortalama değeri 3.0.1'deki genel formülden, etkin değeri 3.0.2'deki genel formülden bulunabilir [15].

$$\text{OrtalamaDeğer} = \frac{1}{T_2 - T_1} \int_{T_1}^{T_2} f(t) dt \quad (3.1)$$

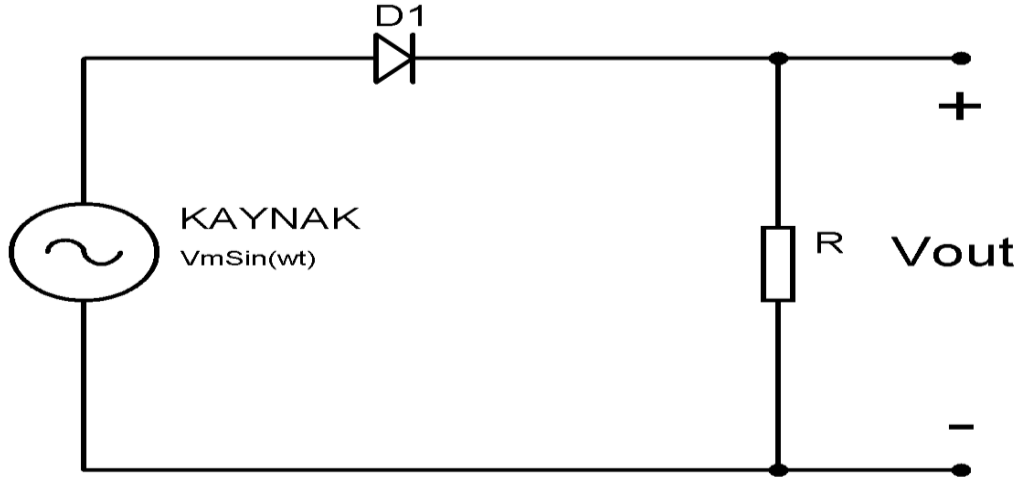
$$EtkinDeğer(RMS Değeri) = \sqrt{\frac{1}{T_2 - T_1} \int_{T_1}^{T_2} f^2(t) dt} \quad (3.2)$$

Akımın ve gerilimin etkin ve ortalama değerlerinin bulunduğu bir devrede dalgalanma faktörü ve güç faktörü parametreleri aşağıdaki formüllerden bulunur [15].

$$Güç Faktörü(Power Factor) = \frac{I_{rms}^2 * R}{V_{rms} I_{rms}} \quad (3.3)$$

$$Dalgalanma Faktörü(Ripple Factor) = \frac{\sqrt{V_{rms}^2 - V_{ort}^2}}{V_{ort}} \quad (3.4)$$

### 3.1. TEK FAZLI KONTROLSÜZ YARIM DALGA DOĞRULTUCU R DEVRESİ



Şekil 3.1. Kontrolsüz yarım dalga R devresi.

Doğrultucu devreleri arasında oluşturulabilecek en temel devrelerden biridir. Devrede enerji biriktiren herhangi bir devre elemanı bulunmadığı için akımın denklemi eşitlik 3.7'deki gibi diferansiyel hesaba gerek olmadan kolayca çözülebilmektedir. Devredeki diyot elemanın özelliği gereği akım sadece gerilimin pozitif olduğu periyodun ilk yarısında akacak, diğer yarısında kesilecektir. Bu yüzden devrenin bir çalışma modu vardır. Akım  $0 \leq \omega t \leq \pi$  arasında süreklidir.

$$V_m \sin(\omega t) = i * R \quad (3.5)$$

$$\omega = 2\pi f \quad (3.6)$$

$$i(\omega t) = V_m \sin(\omega t) / R, 0 \leq \omega t \leq \pi \quad (3.7)$$

### 3.2. TEK FAZLI KONTROLSÜZ YARIM DALGA DOĞRULTUCU R-L DEVRESİ

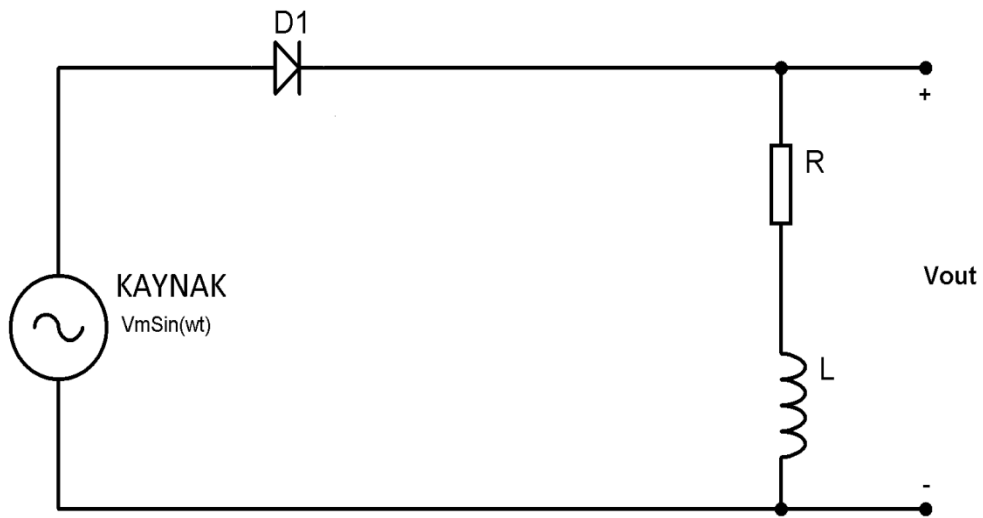
Tek Fazlı Kontrolsüz Yarım Dalga Doğrultucu R devresinde, akımın faz kaymasına sebep olan indüktans elemanının eklenmesiyle elde edilen Şekil 3.2'de görülen tek modlu olan devredir. Yük empedansının faz açısı( $\phi$ ) eşitlik 3.10'dan de görüleceği gibi kullanılan indüktans(L) ve frekans değerleri ile doğru, direnç değeri ile ters orantılıdır. Devre yine diyotun özelliği gereği  $0 \leq \omega t \leq \pi$  aralığında ilettime geçecek,  $\pi \leq \omega t \leq 2\pi$  aralığında akımın ters yönde akmasını engelleyecektir. Buna göre devrenin analizi şu şekilde yapılır:

$$V_m \sin(\omega t) = i * R + L * \frac{di}{dt} \quad (3.8)$$

$$Z = \sqrt{(\omega L)^2 + R^2} \quad (3.9)$$

$$\phi = \arctan \frac{\omega L}{R} \text{ olmak üzere;} \quad (3.10)$$

$$i(\omega t) = \frac{V_m}{Z} \sin(\omega t - \phi) + A_1 * e^{-\omega t / \tan(\phi)} \quad (3.11)$$



Şekil 3.2. Tek fazlı yarım dalga doğrultucu R-L devresi.

3.11'deki akım denkleminde bulunan  $A_1$  değişkeni  $i(0) = 0$  başlangıç koşulu bilgisi kullanılarak bulunur. Bu durumda  $A_1$  değişkeni için aşağıdaki denklemler yazılır.

$$i(0) = \frac{V_m}{Z} \sin(-\phi) + A_1 = 0 \quad (3.12)$$

$$A_1 = \frac{V_m}{Z} \sin(\phi) \quad (3.13)$$

Akım denklemi,  $A_1$  değişkeni yerine konularak tekrar eşitlik 3.14'deki formda yazılabilir. Burada bir parametre daha tanımlanacaktır. Bu parametre devredeki indüktanstan dolayı akımın iletim süresinin açısı değeri karşılığı olan  $\beta$ 'dir. Akım  $\pi$  açılardan sonra da  $wt = \beta$  oluncaya kadar yük üzerinden akmaya devam eder ve sonra kesilir. Dolayısıyla  $i(\beta) = 0$  eşitliği 3.14'deki denkleme koyularak  $\beta$  bulunabilir.

$$i(\omega t) = \frac{V_m}{Z} [\sin(\omega t - \phi) + \sin(\phi) * e^{-\omega t / \tan(\phi)}] \quad (3.14)$$

$$i(\beta) = \sin(\beta - \phi) + \sin(\phi) * e^{-\beta / \tan(\phi)} = 0 \quad (3.15)$$

3.15'deki denklem nümerik yöntemler yardımıyla çözülmektedir. Bu çalışmada kullanılan nümerik yöntemler Secant ve Newton Raphson metotlarıdır [16].  $\beta$  değerinin tam olarak karşılığı Şekil 3.3'e bakılarak daha iyi anlaşılabilir. Şekilden de görüleceği gibi yük üzerinden akan akım  $0 \leq \omega t \leq \beta$  aralığında iletimdedir, diğer değerlerde ise yük üzerinden akım geçmemektedir.



Şekil 3.3.  $\beta$  değeri.

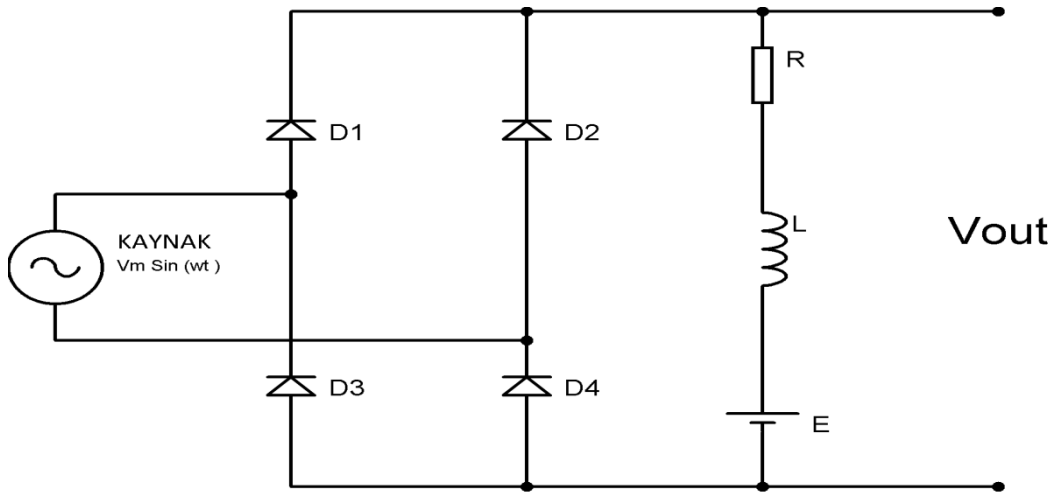
İletim açısı  $\beta$ 'nin değeri daha önce akademik çalışmalarda çalışılmış olup nümerik bir yöntemle gerek duyulmadan formülü çıkartılmıştır. Bu formül ile de  $\beta$ 'nin sayısal

değeri rahatlıkla bulunabilmektedir. İletim açısı  $\beta$ 'nın bulunabilmesi için önerilen formül aşağıda verilmiştir [17].

$$\beta = \pi(\pi - \alpha) \sqrt{\frac{(\pi - \alpha)(1.14 - 0.045 \tan^2 \phi) + 5 \tan \phi}{12(\tan \phi + \pi - \alpha)}}, \text{ diyot devreleri için } \alpha=0 \quad (3.16)$$

Yukarıdaki (3.16) eşitlik tek fazlı kontrollü doğrultucular için belirlenmiştir. Belirlenen bu formül aynı zamanda kontrolsüz doğrultucular için de kullanılabilir. Tristörlerin ateşleme açısı  $\alpha$  sıfır olduğunda, tristörler diyot gibi davranır. Bu bilgiye dayanarak  $\beta$  değeri yukarıdaki formülde  $\alpha=0$  değeri konularak kontrolsüz doğrultucu devreleri için de kullanılabilir.

### 3.3. TEK FAZLI KONTROLSÜZ TAM DALGA DOĞRULTUCU R-L-E DEVRESİ



Şekil 3.4. Tek fazlı kontrolsüz tam dalga doğrultucu R-L-E devresi.

Tek fazlı kontrolsüz tam dalga doğrultucu devresi 4 diyot ile oluşturulan bir devredir. Burada genelde yük kısmı motor devrelerini temsil etmek amacıyla R-L-E bileşenlerinden oluşmaktadır. Devredeki E bileşeni motor üzerinde oluşan zıt elektromotor kuvveti veya bataryayı temsil etmektedir. Doğrultucu devreleri arasında en sık karşılaşılanlardan biridir. Devre 3 çalışma moduna ayrılmıştır. Birinci mod yük üzerindeki akımın sürekli olma halindeki durum, ikinci mod yük üzerindeki akımın süreksiz olma halindeki durum ve üçüncü mod yük üzerindeki

akımın süreksiz olduğu fakat teorikte oluşup pratikte görülmeyen durumdur. Devrenin genel çizimi Şekil 3.4’de görülmektedir.

Devrenin analizi yapılacak olursa elde edilen eşitlik 1.dereceden çözüm sistemi gerektiren diferansiyel bir denklem içerecektir. Diferansiyel denklemin çözümü için ekstra bir eşitlik daha bilinmelidir. Bu eşitlik devrenin periyodu sayesinde tekrarlanan sinyaller yardımıyla elde edilir. Devrenin genel denklemi, E bir sabit değer olmak üzere eşitlik 3.17’deki şekliyle yazılabilir.

$$V_m \sin(\omega t) = R * i + L \frac{di}{dt} + E \quad (3.17)$$

$$Z = \sqrt{(\omega L)^2 + R^2} \quad (3.18)$$

$$\phi = \arctan \frac{\omega L}{R}, \omega = 2\pi f \quad (3.19)$$

$$i(\omega t) = \frac{V_m}{Z} \sin(\omega t - \phi) + A_1 * e^{-\omega t / \tan \phi} - \frac{E}{R} \quad (3.20)$$

$A_1$  değişkeni  $i(0) = i(\pi)$  bilgisi kullanılarak eşitlik 3.20’de yerine koyularak bulunabilir.  $A_1$  değişkeninin sadeleştirilmiş formu eşitlik 3.21’de yazılmıştır.

$$A_1 = \frac{2 * V_m * \sin \phi}{Z (1 - e^{-\pi / \tan \phi})} \quad (3.21)$$

Devrenin çalışma modlarının belirlenmesi  $I_o$  ve  $I_{min}$  parametrelerine bağlıdır.  $I_o$  değeri akımın  $i(0)$  için aldığı değer,  $I_{min}$  değeri ise akımın alabileceği en düşük değeridir. Akımın en düşük değerinin  $\alpha_{min}$  açısal değerinde oluştuğunu kabul edersek  $I_o$  ve  $I_{min}$  parametreleri için denklemler şu şekilde yazılabilir:

$$I_o = \frac{V_m}{Z} \sin(-\phi) + A_1 - \frac{E}{R} \quad (3.22)$$

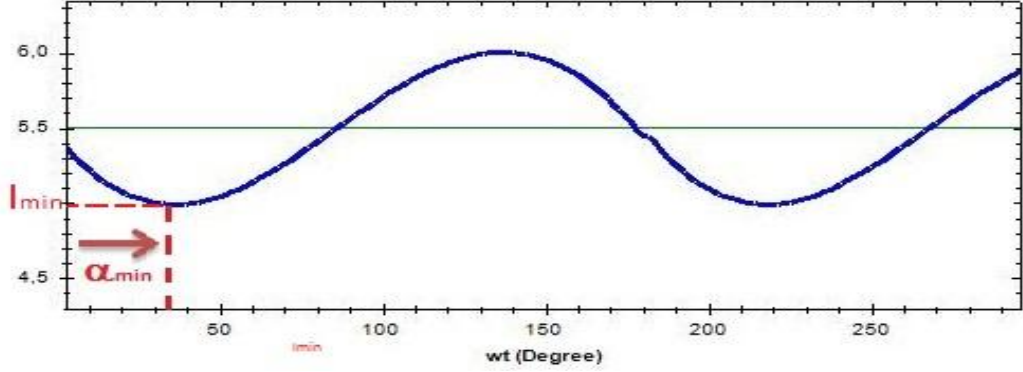
$$I_{min} = \frac{V_m}{Z} \sin(\alpha_{min} - \phi) + A_1 * e^{-\alpha_{min} / \tan \phi} - \frac{E}{R} \quad (3.23)$$

$$\cos(\alpha_{min} - \phi) - \frac{2 \cos \phi}{1 - e^{-\pi / \tan \phi}} = 0 \quad (3.24)$$

$\alpha_{min}$  bulunurken akım denklemin türevi sıfıra eşitlenir ve 3.24 eşitliği elde edilir. 3.24 eşitliği numerik yöntemlerle çözülebileceği gibi ikinci dereceden (quadratic)



denkleme dönüştürülüp de çözülebilir.  $\alpha_{min}$  değeri ikinci dereceden denkleme çevrilip aşağıdaki gibi çözülebilir [18].



Şekil 3.5.  $I_{min}$  ve  $\alpha_{min}$  grafiksel gösterimi.

$$\cos x \cong 1 - 0.44 * x^2, \quad 0 \leq x \leq \frac{\pi}{3} \quad (3.25)$$

$$\alpha_{min} = \frac{1.16 (B - \sqrt{B^2 - 4AC})}{2A} \quad (3.26)$$

$$A = 0.44 + \frac{0.55 * Q}{\tan^2 \phi} \quad (3.27)$$

$$B = 0.88 + \frac{1.25Q}{\tan \phi} \quad (3.28)$$

$$C = -1 + 0.44 Q^2 + Q \quad (3.29)$$

$$Q = \frac{2 \cos \phi}{1 - e^{-\pi / \tan \phi}} \quad (3.30)$$

Devrenin çalışma modu 3'e ayrılmıştır ve mod değişimlerine  $I_o$  ve  $I_{min}$  değerlerine göre karar verilmektedir.

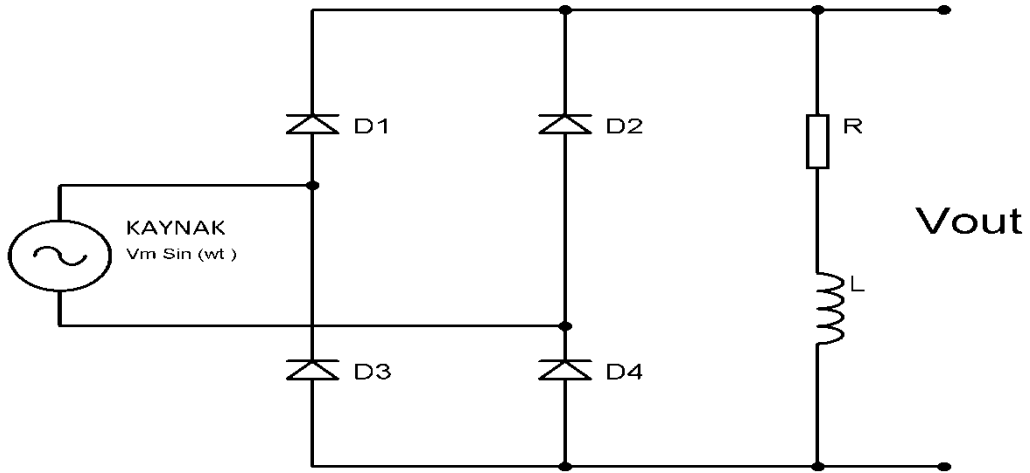
1. Mod1: Bu durum  $I_o \geq 0$  ve  $I_{min} \geq 0$  durumunda gerçekleşir. Yük üzerinden akan akım sürekli haldedir.
2. Mod2: Bu durum  $I_o < 0$  olması durumunda gerçekleşir. Yük üzerinden akan akım süreksizdir.
3. Mod3: Bu durum  $I_o \geq 0$  ve  $I_{min} < 0$  olduğu zaman geçerlidir. Mod3 teorikte vardır fakat pratikte böyle bir durum oluşmaz. Yük üzerinden akan akım süreksiz haldedir.

Mod değişimleri ile akımın ve gerilimin ortalama çıktı değerleri değişecek, dolayısıyla devreden elde edilen performans da değişecektir.

### 3.4. TEK FAZLI KONTROLSÜZ TAM DALGA DOğRULTUCU R-L DEVRESİ

Bu devre bölüm 3.3’de verilen “Tek Fazlı Kontrolsüz Tam Dalga Doğrultucu R-L-E Devresi” ile çözülebilmektedir. Çözümlerde  $E=0$  alınırsa devre R-L devresi gibi davranır. Bu yüzden tekrar çözüme ihtiyaç duyulmamıştır. Ancak bu devre için 2 çalışma modu bulunmaktadır.

1. Mod1:  $I_{min} \geq 0$  sağlandığında devrenin çalışma modu Mod1 olacaktır. Bu durumda yük üzerinden akan akımın süreklidir.
2. Mod2:  $I_{min} < 0$  olması durumunda devre Mod2’de çalışacaktır. Yük üzerinden akan akım süreksiz olup verim Mod1’e göre daha düşük çıkacaktır. Çalışma modları arasındaki geçişe karar vermeyi sağlayan  $I_{min}$  değişkeninin bulunuşu Bölüm 3.3’de verilmiştir.



Şekil 3.6. Tek fazlı kontrolsüz tam dalga doğrultucu R-L devresi.

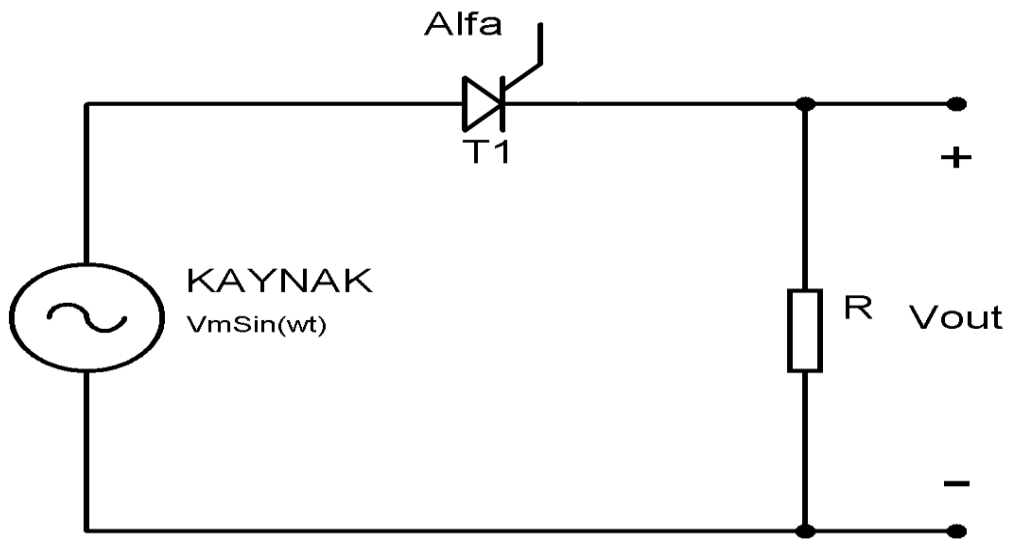
### 3.5. TEK FAZLI KONTROLLÜ YARIM DALGA DOĞRULTUCU R DEVRESİ

Kontrollü devreler diyot yerine tristör (SCR), MOSFET veya IGBT gibi yarı-iletken malzemeler kullanılarak tasarlanmaktadır. Bu malzemeler arasında çalışma frekansının düşük ve verimlilik bakımından tristörlerin daha iyi olması nedeniyle kontrollü devrelerde tristörler kullanılmıştır. Tristörler, diyotlara nazaran ateşleme açısı ile kontrol edilebilen yarı-iletkenlerdir. Çalışma prensibi ateşleme açısına kadar iletimin kesilmesi, ateşleme açından sonra ise iletimin sağlanması şeklindedir. Bir tristörün ateşleme açısı sıfıra (0) ayarlanarak diyot gibi kullanılabilir. Tristörlerin ateşleme açısı için kullanılan genel sembol  $\alpha$  olup çoğu kaynakta bu şekilde geçmektedir. Tek fazlı kontrollü yarım dalga doğrultucular için bir tristör kullanılmaktadır.

Yük üzerinden akan akım denkleminin çözümünde herhangi bir indüktans veya kapasitans elemanı olmadığı için diferansiyel çözüm gerektirecek bir durum yoktur. Devrenin analizi için genel bir denklem yazılmak istenirse:

$$V_m \sin(\omega t) = R * i \quad (3.31)$$

$$i(\omega t) = V_m \sin(\omega t) / R, \alpha \leq \omega t \leq \pi \quad (3.32)$$



Şekil 3.7. Tek fazlı kontrollü yarım dalga doğrultucu R devresi.

### 3.6. TEK FAZLI KONTROLLÜ YARIM DALGA DOĞRULTUCU R-L DEVRESİ

Tek Fazlı Kontrollü Yarım Dalga Doğrultucu R devresine seri bağlı indüktans (L) eklenerek oluşturulan devre tipidir (Şekil 3.8). Devreye indüktansın eklenmesiyle, analiz için birinci dereceden bir diferansiyel denklemin çözülmesi gereklidir. Tek tristör kullanılması sebebiyle gerilimin negatif kısmında iletim olmaz. Dolayısıyla tristörün ateşleme açısı  $\alpha$  ile gerilimin negatife geçtiği açı değeri  $\pi$  arasında tristör iletimdedir. Devrenin genel çözümü:

$$V_m \sin(\omega t) = i * R + L * \frac{di}{dt} \quad (3.33)$$

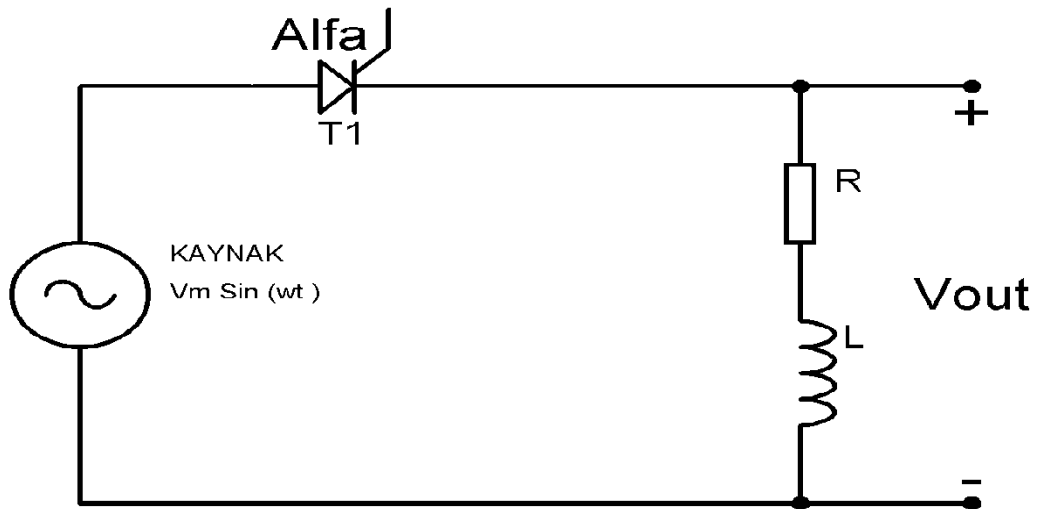
$$Z = \sqrt{(\omega L)^2 + R^2} \quad (3.34)$$

$$\phi = \arctan \frac{\omega L}{R} \quad (3.35)$$

$$i(\omega t) = \frac{V_m}{Z} \sin(\omega t + \alpha - \phi) + A_1 * e^{-\omega t / \tan \phi} \quad (3.36)$$

şeklindedir.  $A_1$  değişkenin değeri  $i(0) = 0$  başlangıç koşulu eşitlik 3.36'daki denkleme uygulanarak bulunur.  $A_1$  değişkenin değeri bulunduktan sonra akımın genel denklemini aşağıdaki biçimde tekrar yazılabilir.

$$i(\omega t) = \frac{V_m}{Z} [\sin(\omega t + \alpha - \phi) - \sin(\alpha - \phi) * e^{-\omega t / \tan \phi}], \quad \alpha \leq \omega t \leq \beta \quad (3.37)$$

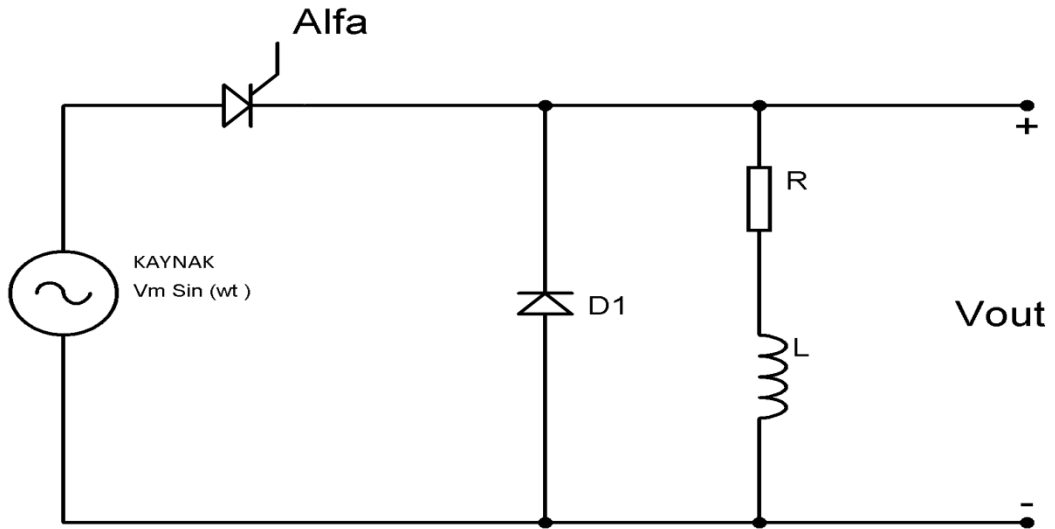


Şekil 3.8. Tek fazlı kontrollü yarım dalga doğrultucu R-L devresi.

İletim açısı  $\beta$  (conduction angle), eşitlik 3.16'da verilen formül yardımıyla bulunur ve bu değer  $\pi \leq \beta \leq 2\pi$  arasında bir değerdir. Eğer iletim açısı nümerik yöntemler kullanılarak çözülmek istenirse akımın denkleminin  $\pi$  ile  $2\pi$  arasındaki kökü bulunmalıdır.

Akım denkleminde de görüleceği gibi akım  $\alpha$  ile  $\beta$  açı değerleri arasında akmaktadır. Bu aralığın dışında akım akmaz. Dolayısıyla devrenin tek çalışma modu vardır. Tek çalışma modu bulunan devreler için kritik ateşleme açısı bulunmamaktadır.

### 3.7. TEK FAZLI KONTROLLÜ YARIM DALGA DOĞRULTUCU R-L-FWD DEVRESİ



Şekil 3.9. Tek fazlı kontrollü yarım dalga doğrultucu R-L-FWD devresi.

Devrelerdeki FWD (FreeWheelingDiode) son eki giriş bölümünde anlatılan doğal komutasyon diyotunu temsil etmektedir. Bazı kaynaklarda “Boşluk Diyotu” şeklinde de isimlendirilmektedir. Bu diyotun iki önemli işlevi vardır:

1. Tristör kesime gittiği anlarda indüktansta biriken enerjiden dolayı akmakta olan akıma alternatif bir yol sağlamak,
2. Birinci maddenin doğal bir sonucu olarak çıkış alınan yük üstünde negatif gerilimin oluşmasını engellemek.

Tristörün iletimi kesilse bile indüktansta depolanan enerji ile akım bir süre daha akmaya boşluk diyotu üzerinden akmaya devam edecektir.  $\pi$  açıl değerinden sonra akım eksponensiyel olarak azalır sifıra yaklaşacaktır. Devrenin genel cevabı 3.6.1'deki eşitlik ile aynıdır. Akımın genel denklemi 3.38'de verilmiştir.  $\pi$  ile  $2\pi$  arasında tristör iletimde olmasa bile, indüktansta depolanan enerji 3.39'daki eşitliğe göre devreye akım sağlayacaktır. Akımın  $i(\pi)$  değerinde sürekli olması dolayısıyla 3.38 ve 3.39 eşitliklerinde aynı sonuçlar çıkmalıdır. Buradan  $A_2$  değişkenin değeri kolaylıkla hesaplanabilir.

$$i(\omega t) = \frac{V_m}{Z} [\sin(\omega t + \alpha - \phi) - \sin(\alpha - \phi) * e^{-\omega t / \tan \phi}], \alpha \leq \omega t \leq \pi \quad (3.38)$$

$$i(\omega t) = A_2 * e^{-(\omega t - \pi) / \tan \phi}, \pi \leq \omega t \leq 2\pi \quad (3.39)$$

$$A_2 = \frac{V_m}{Z} [\sin(\pi + \alpha - \phi) - \sin(\alpha - \phi) * e^{-\pi / \tan \phi}] \quad (3.40)$$

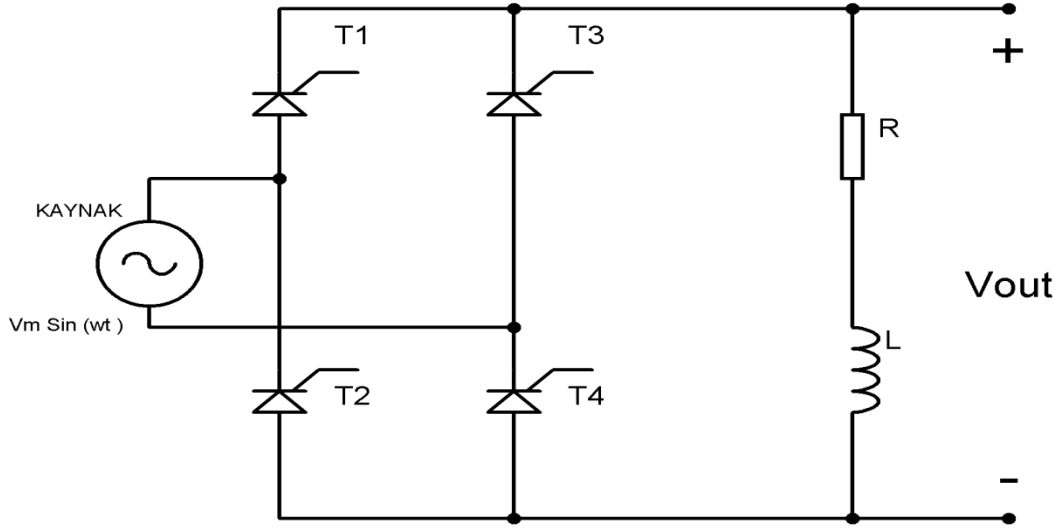
### 3.8. TEK FAZLI KONTROLLÜ TAM DALGA DOĞRULTUCU R-L DEVRESİ

Doğrultucu devrelerinde ana hedef saf bir doğru akım elde etmek veya istenilen özelliklere göre çıkış sinyalini değiştirmektir. Tam dalga doğrultucular ile yarım dalga doğrultucuların görevi temelde aynı olmasına karşın tam dalga doğrultucu kullanmanın avantajları vardır. Tam dalga doğrultucularda güç faktörünün daha büyük, dalgalanma faktörünün daha küçük olması en önemli avantajlar arasındadır. Tam dalga doğrultucular arasında bulunan tek fazlı kontrollü tam dalga doğrultucu devresi 4 tristör ile yapılmaktadır (Şekil 3.10). Eğer tristörlerin ateşleme açısı 0 (sıfır) olarak ayarlanırsa tristörler diyot görevi yapacak ve devre kontrolsüz tam dalga doğrultucu gibi çalışacaktır. Hangi tristörlerin hangi açı değerlerinde aktif oldukları Çizelge 3.1'den incelenebilir.

Çizelge 3.1. Tristörlerin aktif iletim açıları.

Açı Değerleri (°)	Aktif Tristör Eşleri
0° - 180°	T1 - T4
180° - 360°	T3 - T2

Tek fazlı kontrollü devrelerde kritik ateşleme açısı yük empedansının faz açısına eşittir. Buna göre kritik ateşleme açısı devredeki indüktans ve frekans ile doğru, direnç ile ters orantılı olarak değişmektedir.



Şekil 3.10. Tek fazlı kontrollü tam dalga doğrultucu R-L devresi.

Devrenin analizi kontrolsüz tam dalga doğrultucuya benzerdir. Analizde dikkat edilmesi gereken husus tristörün ateşleme açısı  $\alpha$ 'dır. Devrenin iki çalışma modu bulunmaktadır.

1. Mod1:  $\alpha \leq \alpha_c$  eşitliği sağlanırsa yük üzerinden akan akım sürekli haldedir. Devreden elde edilen verim Mod2'ye göre daha fazladır.
2. Mod2:  $\alpha \geq \alpha_c$  olduğunda yük üzerinden akan akım süreksiz olacaktır. Akım  $\alpha$  ile  $\beta$  açısı arasında 3.47'deki denkleme göre akacak, diğer aralıklarda sıfır olacaktır. İletim açısı  $\beta$ , 3.16'da verilen eşitlik ile bulunabilir.

Yük üzerinden akan akımın genel denklemi aşağıdaki gibi analiz edilebilir.

$$V_m \sin(\omega t) = i * R + L * \frac{di}{dt} \quad (3.41)$$

$$i(\omega t) = \frac{V_m}{Z} \sin(\omega t + \alpha - \phi) + A_1 * e^{-\omega t / \tan \phi} \quad (3.42)$$

Yük üzerinden akan akımın periyodu  $\pi$  olduğu için akım sinyali kendini  $\pi$  aralıklarla yenileyecektir. Bu durumda  $i(0) = i(\pi)$  bilgisi kullanılarak  $A_1$  değişkeni bulunur ve akım denklemi sürekli hal için eşitlik 3.44'deki halini alır.

$$\frac{V_m}{Z} \sin(\alpha - \phi) + A_1 = \frac{V_m}{Z} \sin(\pi + \alpha - \phi) + A_1 * e^{-\pi/\tan\phi} \quad (3.42)$$

$$A_1 = -\frac{2 \sin(\alpha - \phi)}{1 - e^{-\pi/\tan\phi}} \quad (3.43)$$

$$i(\omega t) = \frac{V_m}{Z} \left[ \sin(\omega t + \alpha - \phi) - \frac{2 \sin(\alpha - \phi)}{1 - e^{-\pi/\tan\phi}} * e^{-\omega t/\tan\phi} \right] \quad (3.44)$$

$\alpha_c < \alpha$  eşitsizliği sağlandığında devre Mod2'de çalışacaktır ve yük üzerinden akan akım süreksiz olacaktır. Akım denklemindeki  $A_2$  değişkeni,  $i(0)=i(\beta)=0$  eşitliklerinden biri kullanılarak bulunur.

$$i(0) = \frac{V_m}{Z} \sin(\alpha - \phi) + A_2 = 0 \quad (3.45)$$

$$A_2 = -\frac{V_m}{Z} \sin(\alpha - \phi) \quad (3.46)$$

$$i(\omega t) = \frac{V_m}{Z} \left[ \sin(\omega t - \phi) - \sin(\alpha - \phi) * e^{-\omega t/\tan\phi} \right], \alpha \leq \omega t \leq \beta \quad (3.47)$$

### 3.9. TEK FAZLI AC KONTROL R-L DEVRESİ

Tek fazlı AC kontrol devresi, alternatif akım kaynağından yüke aktarılan ortalama gücü, gerilimi ve akımı kontrol eden bir çeşit çeviricidir. İki tristör ile Şekil 3.11'deki gibi tasarlanan devre tristörün ateşleme " $\alpha$ " açısı ile kontrol edilebilmektedir. Ortalama akım, yük ve kaynak tarafında sıfırdır.

Alternatif akım kaynağının pozitif gerilim döngüsünde ( $0^\circ$ - $180^\circ$ ) T1 tristörü aktif iken, negatif gerilim döngüsünde ( $180^\circ$ - $360^\circ$ ) T2 tristörü aktif olur. Devrenin 3 çalışma modu vardır:

1. Mod1:  $\alpha > \phi$  ise yük üzerinden akan akım süreksiz olur. Akım süreksiz iken iletim açısı  $\beta$ , 3.16'da verilen formül yardımıyla bulunur.
2. Mod2:  $\alpha = \phi$  ise çıkış gerilimi sinüs olur. Çıkış akımı tam bir sinüs olması sebebiyle bazı kaynaklarda sinüs modu olarak geçmektedir.



3. Mod3:  $\alpha < \phi$  ise tek yönlü akım modunda çalışır. Burada akım sadece pozitif değerler alır.

Buna göre devrenin genel çözümü yapılacak olursa:

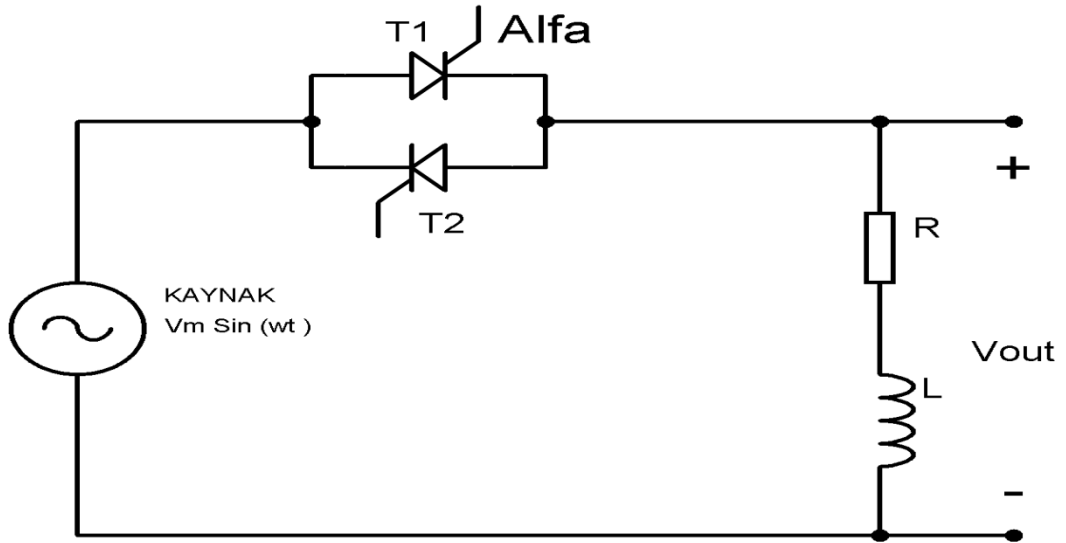
$$V_m \sin(\omega t) = i * R + L * \frac{di}{dt} \quad (3.48)$$

$$i(\omega t) = \frac{V_m}{Z} \sin(\omega t + \alpha - \phi) + A_1 * e^{-\omega t / \tan \phi}, \alpha \leq \omega t \leq \pi \quad (3.49)$$

$$i(\omega t) = - \left[ \frac{V_m}{Z} \sin(\omega t + \alpha - \phi) + A_1 * e^{-(\omega t - \alpha) / \tan \phi} \right], \pi + \alpha \leq \omega t \leq 2\pi \quad (3.50)$$

denklemleri elde edilir.  $A_1$  değişkeni,  $i(0)=0$  başlangıç koşulu kullanılarak bulunur.

$$A_1 = \frac{V_m}{Z} \sin(\alpha - \phi) \quad (3.51)$$

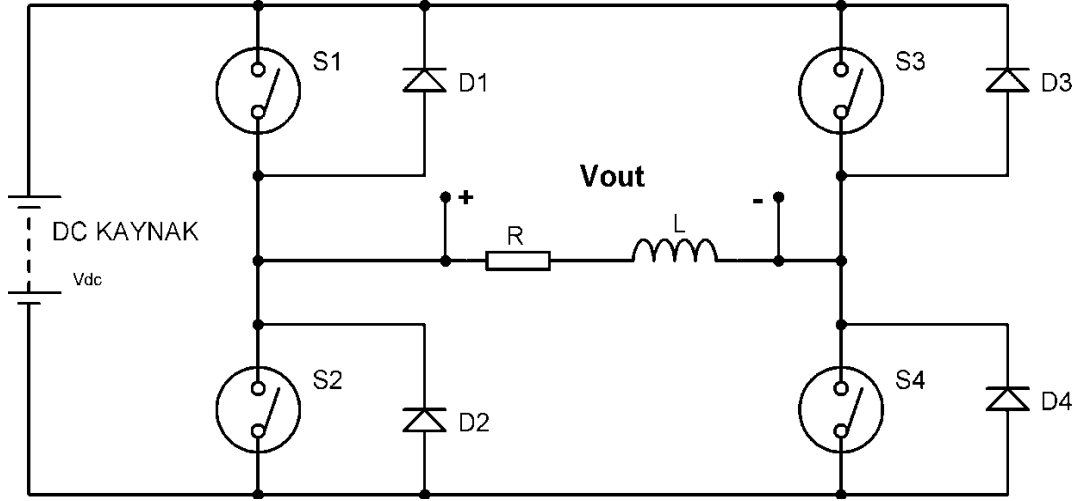


Şekil 3.11. Tek fazlı alternatif akım kontrol R-L devresi.

### 3.10. TEK FAZLI KARE DALGA R-L EVİRİCİ DEVRESİ

Eviriciler doğru akımı alternatif akıma çeviren elektronik devrelerdir. Daha net ifade etmek gerekirse doğru akım kaynağından alternatif akım kaynağına güç transferi yapan sistemlerdir. Eviricilerin hız ayarlı AC motor sürücüleri, kesintisiz güç kaynakları (UPS) ve otomobil bataryaları gibi birçok uygulama alanı vardır [19]. Bu

çalışmada eviricilerden Kare Dalga ve Quasi Kare Dalga evirici devreleri analiz edilip hazırlanan pakette sunulacaktır. Bu evirici devreler Şekil 3.12'deki gibi 4 anahtarlama elemanı ve 4 diyot ile yapılmaktadır. Anahtarlama zamanlarına göre farklı isimlendirilmektedir.



Şekil 3.12. Tek fazlı kare dalga R-L devresi.

Doğru anahtarlama tekniği ile alternatif akım oluşturulabilir. Bunun için S1 ve S4 anahtarları aynı anda kapalı iken S2 ve S3 anahtarları açık olmalıdır. Negatif gerilim oluşturulmak istenirse S2 ve S3 kapalı konumdayken S1 ve S4 açık konumda olmalıdır. Bu eşzamanlı davranış bozulursa evirici doğru çalışmayacaktır. Devrenin analizi yapılacak olursa:

$$i(t) = i_f(t) + i_n(t) \quad (3.52)$$

$$i(t) = \frac{V_{dc}}{R} + A * e^{-t/\tau}, 0 \leq t \leq T/2 \quad (3.53)$$

$$i(t) = -\frac{V_{dc}}{R} + B * e^{-(t-T/2)/\tau}, T/2 \leq t \leq T \quad (3.54)$$

$$\tau = \frac{L}{R} \quad (3.55)$$

A ve B değişkenleri Şekil 3.13'deki başlangıç koşulları kullanılarak bulunabilir. Bu koşullar  $i(0) = I_{min}$ ,  $i(T/2) = I_{max}$ 'tır. Dolayısıyla yeni denklemler aşağıdaki gibi olacaktır.

$$i(0) = \frac{V_{dc}}{R} + A = I_{min} \quad (3.56)$$

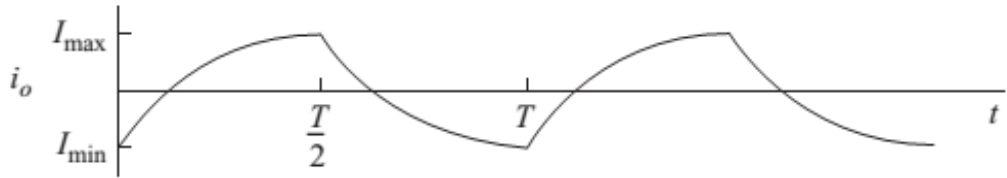
$$A = I_{min} - \frac{V_{dc}}{R} \quad (3.57)$$

$$i\left(\frac{T}{2}\right) = -\frac{V_{dc}}{R} + B = I_{max} \quad (3.58)$$

$$B = I_{max} + \frac{V_{dc}}{R} \quad (3.59)$$

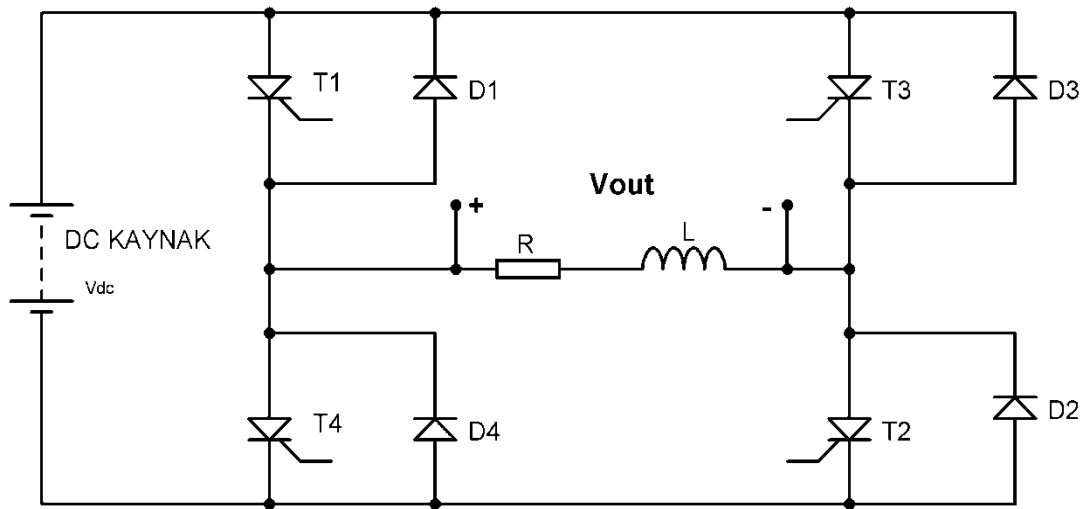
Akımın maksimum değeri ile minimum değeri büyüklük olarak aynı fakat işareti bakımından zıttır. Yani  $I_{max} = -I_{min}$  bilgisi kullanılarak bütün bilinmeyen değişkenler bulunup, akım denklemi oluşturulur.

$$I_{max} = -I_{min} = \frac{V_{dc}}{R} \left[ \frac{1 - e^{-T/(2\tau)}}{1 + e^{-T/(2\tau)}} \right] \quad (3.10.9)$$



Şekil 3.13. Kare dalga çıkış akımı, minimum ve maksimum değerler.

### 3.11. TEK FAZLI QUASI KARE DALGA R-L EVİRİCİ DEVRESİ



Şekil 3.14. Quasi kare dalga R-L evirici devresi.

Bu devre tek fazlı kare dalga eviricilerden farklı anahtarlama tekniği ile ayrılır. Quasi kare dalga eviricilerde anahtarlama kare dalga eviricilerdeki gibi simetrik değildir. Akım 4 parçaya ayrılmıştır. Birinci parça T1-T2 tristörlerinin iletimde olduğu  $t=0$  anındaki akımı gösterdiğini farz edelim. Buna göre ikinci parça T1 ve D3'ün birlikte aktif oldukları andaki akım, üçüncü parça T3-T4 tristörlerinin birlikte aktif oldukları andaki akım, dördüncü parça da T3-D1'in birlikte aktif oldukları akım olur. Buna göre yük üzerinden akan 4 parçaya bölünmüş akım denklemleri aşağıdaki gibi bulunur.

$$1. V_L > 0, 0 \leq t \leq t_1 \text{ aralığında } i_1(0) = -I_{P1}$$

$$R * i_1(t) + L * \frac{di_1(t)}{dt} = V_s \quad (3.60)$$

$$i_1(t) = \frac{V_s}{R} - \left( \frac{V_s}{R} + I_{P2} \right) * e^{-Rt/L} \quad (3.61)$$

$$2. V_L = 0, 0 \leq t \leq (t_2 - t_1) = \frac{\alpha}{\omega_c} \text{ aralığında } i_2(0) = I_{P2}, \omega_c = \text{Bakırın açılma hızı},$$

$$R * i_2(t) + L * \frac{di_2(t)}{dt} = 0 \quad (3.62)$$

$$i_2(t) = I_{P2} * e^{-Rt/L} \quad (3.63)$$

$$3. V_L = -V_s, 0 \leq t \leq t_3 - t_2 \text{ aralığında } i_3(0) = I_{P2}$$

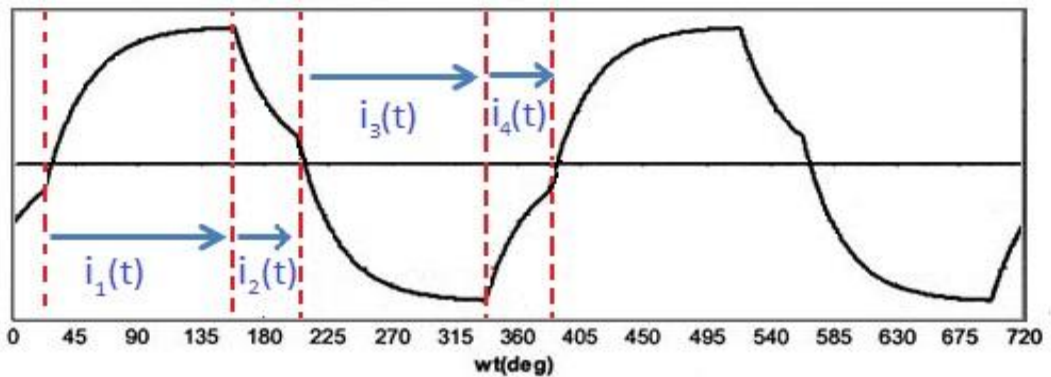
$$R * i_3(t) + L * \frac{di_3(t)}{dt} = -V_s \quad (3.64)$$

$$i_3(t) = -\frac{V_s}{R} + \left( \frac{V_s}{R} + I_{P2} \right) * e^{-Rt/L} \quad (3.65)$$

$$4. V_L = 0, i_4(0) = -I_{P1}$$

$$R * i_4(t) + L * \frac{di_4(t)}{dt} = 0 \quad (3.66)$$

$$i_4(t) = -I_{P1} * e^{-Rt/L} \quad (3.67)$$



Şekil 3.15. Dört parçaya ayrılmış akımın grafiksel gösterimi.

$I_{p1}$  ve  $I_{p2}$  sınır değerlerindeki eşitlikler kullanılarak bulunur. 3.68 ve 3.69'daki eşitlikler birleştirilerek  $I_{p1}$  ve  $I_{p2}$  değerleri aşağıdaki gibi bulunmuştur.

$$i_1(t_1) = i_2(0) = I_{p2} \quad (3.68)$$

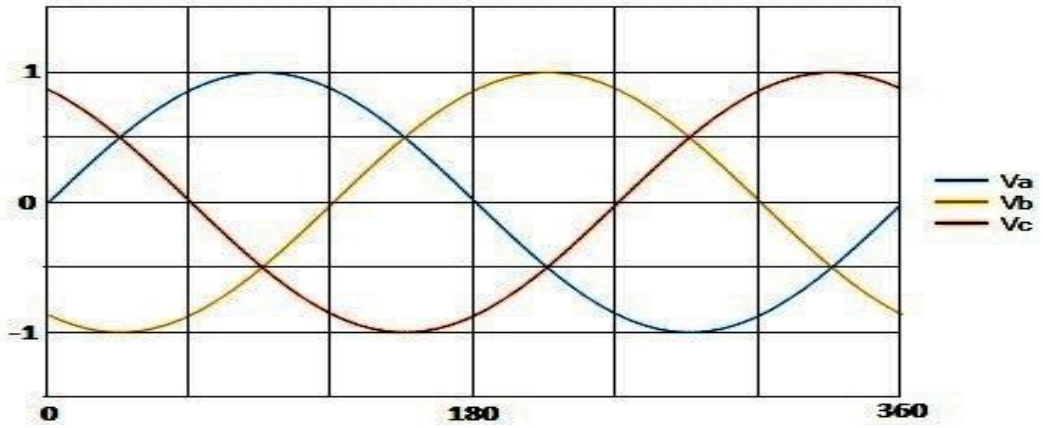
$$i_2\left(\frac{\alpha}{\omega_i}\right) = i_3(0) = I_{p1} \quad (3.69)$$

$$I_{p1} = \frac{V_s}{R} \left[ \frac{e^{-R\alpha/L\omega_i} - e^{-\left(\frac{R}{L}\right)\left(\frac{\alpha}{\omega_i} + t_1\right)}}{1 + e^{-\left(\frac{R}{L}\right)\left(\frac{\alpha}{\omega_i} - t_1\right)}} \right] \quad (3.70)$$

$$I_{p2} = \frac{V_s}{R} \left[ \frac{1 - e^{-Rt_1/L}}{1 + e^{-\left(\frac{R}{L}\right)\left(-t_1 + \frac{\alpha}{\omega_i}\right)}} \right] \quad (3.71)$$

### 3.12. ÜÇ FAZLI YARIM DALGA DOĞRULTUCU R-L DEVRESİ

Üç faz kaynak, aralarında  $120^\circ$  faz farkı olan 3 kaynağın birlikte kullanılması ile oluşturulur. Üç faz kaynağın çıkış sinyali Şekil 3.16'da görülebilir. Yarım dalga doğrultucu devresi her bir faz için bir diyot kullanma koşulu ile 3 diyot ile gerçekleştirilmektedir. Üç faz kaynaklı doğrultucularda yük faz arası geriliminde kaldığı için ortalama çıkış gerilimi tek fazlı doğrultuculara göre daha fazladır. Bu yüzden yüksek güç gerektiren uygulamalarda tercih edilirler.



Şekil 3.16. Üç faz gerilim:  $V_{an}, V_{bn}, V_{cn}$ .

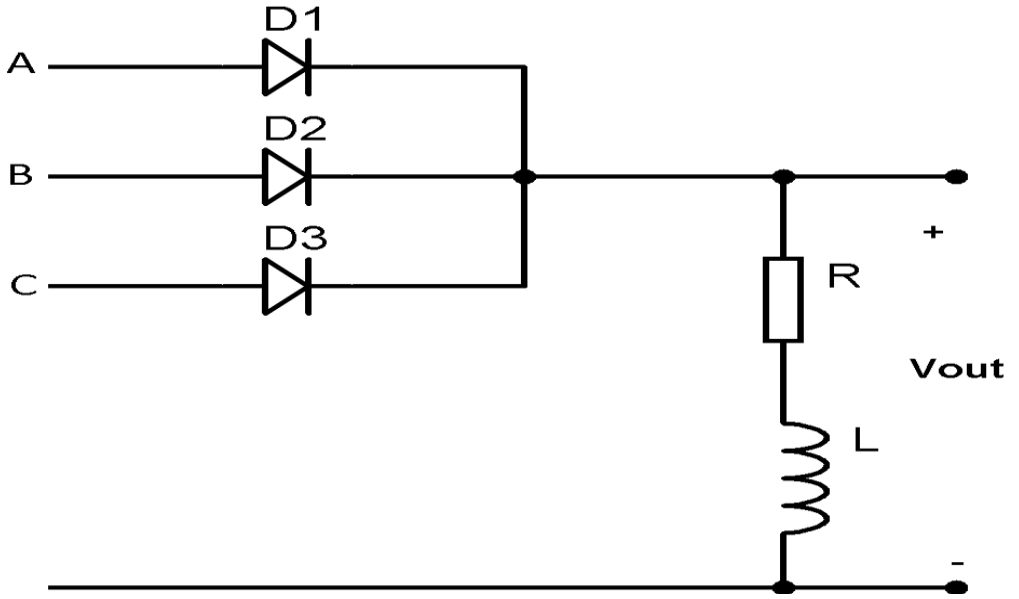
Tek fazlı yarım dalga doğrultucularında olduğu gibi üç fazlı yarım dalga doğrultucularında da negatif faz geriliminin olduğu kısımlar diyot tarafından engellenecek, sadece pozitif gerilimlerde diyotlar aktif olacaktır. Devrenin 2 çalışma

modu bulunmaktadır. Çalışma modları arasındaki geçişe eşitlik 3.72 ve 3.73'te verilen A ve B değişkenlerine göre karar verilmektedir [20].

1. Mod1:  $A \geq B$  ise yük üzerinden akan akım sürekli haldedir. Akımın sürekli modda olması transfer edilen gücü olumlu yönde etkilemektedir.
2. Mod2:  $A < B$  şartı sağlandığında yük üzerinden akan akım süreksiz olacaktır.  $\beta$  iletim açısı göstermek üzere, akım  $\beta$  açısız değerinden sonra belli bir süre sıfır olacaktır.

$$A = \sin\left(\frac{\pi}{6} - \phi\right) \quad (3.72)$$

$$B = -\frac{\sqrt{3}\sin(\phi)}{1 - e^{-2\pi/3\tan\phi}} \quad (3.73)$$



Şekil 3.17. Üç fazlı kontrolsüz yarım dalga doğrultucu R-L devresi.

Devrenin analizi yapıp akım denklemi çıkartılırsa:

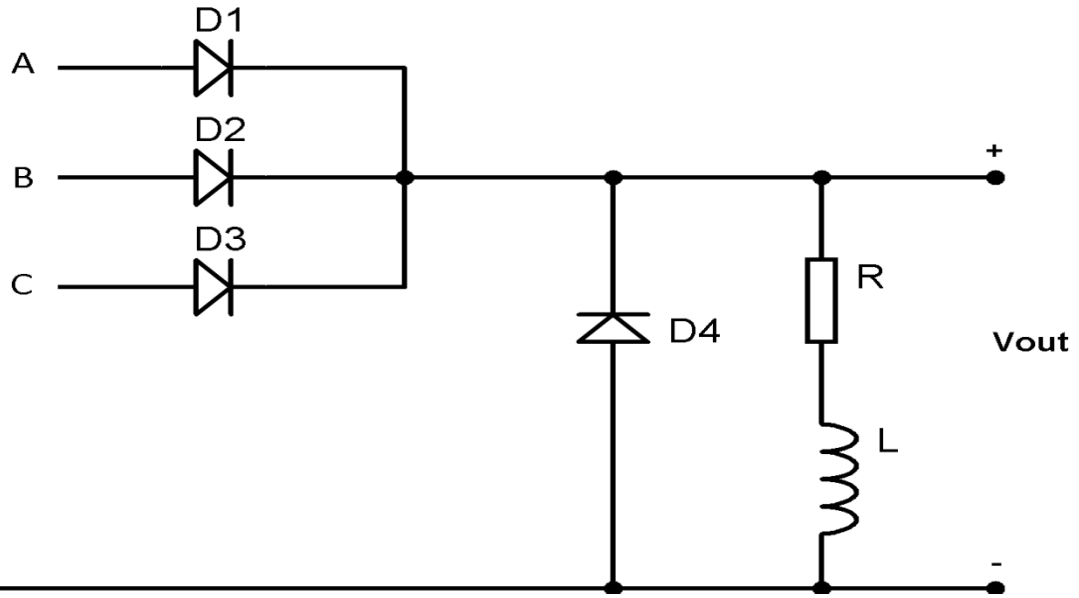
$$V_m \sin\left(\omega t + \frac{\pi}{6}\right) = R * i + L * \frac{di}{dt} \quad (3.74)$$

$$i(\omega t) = \frac{\sqrt{2}V_L}{Z\sqrt{3}} \sin\left(\omega t + \frac{\pi}{6} - \phi\right) + C * e^{-\omega t/\tan\phi} \quad (3.75)$$

Yüke uygulanan gerilim, faz arası gerilim olup büyüklüğü uygulanan gerilimin  $\sqrt{3}$  katı, periyodu  $\frac{2\pi}{3}$  olmaktadır. Periyot yük tarafında kaynak tarafının 2 katıdır. Bu nedenle  $\frac{\pi}{6}$  faz farkı oluşmaktadır. Bu bilgilere göre akım denklemindeki C değişkeni  $i(0) = i(\frac{2\pi}{3})$  eşitliği kullanılarak bulunabilir.

$$C = \frac{\sqrt{2}V_L}{Z} \frac{-\sin\phi}{(1-e^{-2\pi/3\tan\phi})} \quad (3.76)$$

### 3.13. ÜÇ FAZLI YARIM DALGA DOĞRULTUCU R-L-FWD DEVRESİ



Şekil 3.18. Üç fazlı yarım dalga doğrultucu R-L-FWD devresi.

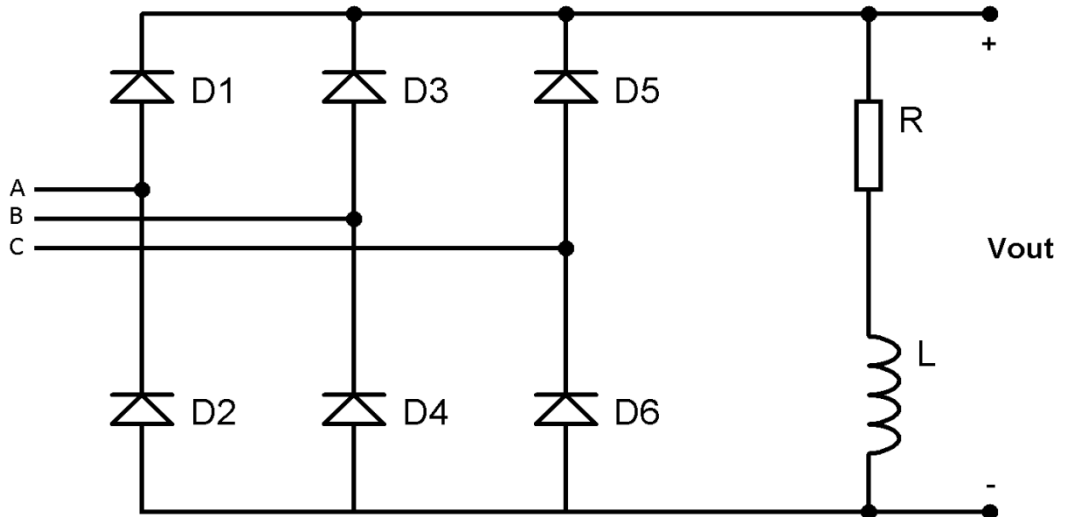
Üç Fazlı Yarım Dalga Doğrultucu R-L devresinin çıkış ucunda oluşan negatif gerilimi yok etmek için yüke paralel bir diyot bağlanmasıyla oluşturulan devredir. Devrenin 2 çalışma modu vardır ve analizi 3.12'deki devre ile aynıdır. Çıkış gerilimi negatif olduğunda diyot aktif olur ve çıkış gerilimi sıfıra eşitlenir. Akım eşitlik 3.77'deki denkleme göre dirençte güç harcadığı için eksponensiyel olarak azalma eğilimindedir.

$$i(\omega t) = A * e^{-\omega t/\tan\phi} \quad (3.77)$$

Buradaki A değişkeni çıkış geriliminin ilk negatif olduğu açı değerindeki akım değeridir ve paket program tarafından buldurulmaktadır.

### 3.14. ÜÇ FAZLI TAM DALGA DOĞRULTUCU R-L DEVRESİ

Üç fazlı tam dalga doğrultucu devresinde kontrol elemanı olmadığı için 6 diyot ile tasarlanmaktadır. İletime büyüklük olarak en fazla gerilimi veren diyotlar geçer. Tam dalga doğrultucularda çıkış geriliminin frekansı 3 faz kaynak geriliminin frekansının 6 katı olur. Bu yüzden akım denkleminin içinde  $\frac{\pi}{3}$  faz farkı bulunmaktadır. Yüke uygulanan gerilim ise Şekil 3.19'dan da görüldüğü gibi faz arası gerilimdir [21].



Şekil 3.19. Üç fazlı kontrolsüz tam dalga doğrultucu R-L devresi.

Hangi açı değerinde hangi diyotun ilettime geçildiği bilgisi Çizelge 3.2'de gösterilmiştir.

$$V_m \sin\left(\omega t + \frac{\pi}{3}\right) = R * i + L * \frac{di}{dt} \quad (3.78)$$

$$i(\omega t) = \frac{\sqrt{2}V_L}{Z} \sin\left(\omega t + \frac{\pi}{3} - \phi\right) + A * e^{-\omega t / \tan\phi} \quad (3.79)$$



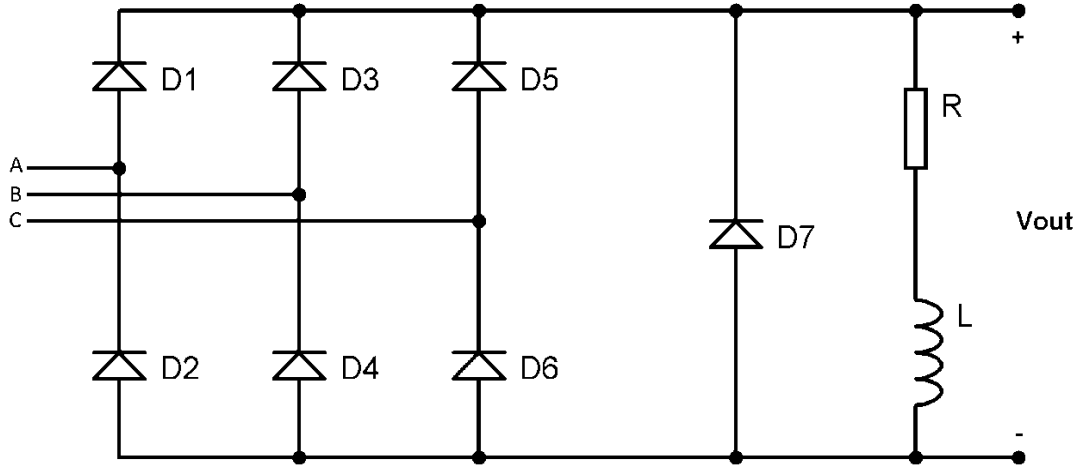
A değişkeni akımın periyodunun  $\frac{\pi}{3}$  bilgisinden yararlanılarak bulunur. Bu durumda  $i(0) = i(\frac{\pi}{3})$  olacaktır. Bilinen bu eşitlik 3.79’da yerine konularak A değişkeninin değeri bulunur.

$$A = \frac{\sqrt{2}V_L}{Z} \frac{\sin(\phi)}{1 - e^{-\pi/3 \tan \phi}} \quad (3.80)$$

Çizelge 3.2. Diyot eşlerinin iletim açıları.

Açı Değerleri (°)	Aktif Diyot Eşleri
0° -30° / 330° -360°	D4 – D1
30° -90°	D1 – D6
90° -150°	D6 – D3
150° -210°	D3 – D2
210° -270°	D2 – D5
270° -330°	D5 – D4

### 3.15. ÜÇ FAZLI TAM DALGA DOĞRULTUCU R-L-FWD DEVRESİ



Şekil 3.20. Üç fazlı tam dalga doğrultucu R-L-FWD devresi.

Devrenin çalışma prensibi “Üç Fazlı Tam Dalga Doğrultucu R-L Devresi” ile aynıdır. Fakat burada akım iki parçaya bölünmelidir. Birinci kısım 3.14’de bulunan

devre akımı, ikinci kısım komutasyon diyotu aktif iken yük üzerinden akan akımdır. Akım denklemlerini tekrar yazmak gerekirse:

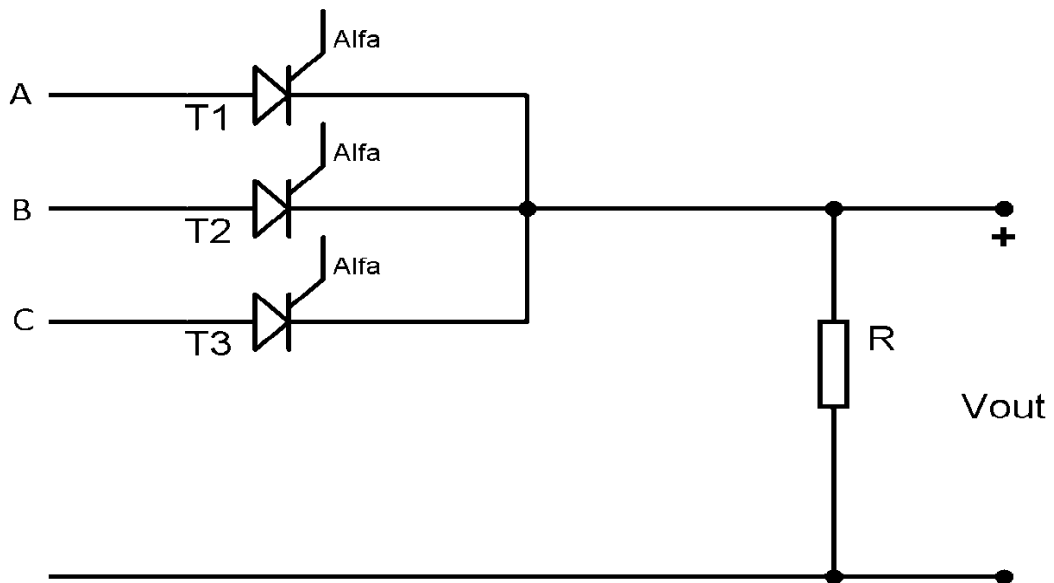
$$i_1(wt) = \frac{\sqrt{2}V_L}{Z} \left[ \sin \left( wt + \frac{\pi}{3} - \phi \right) + \frac{\sin(\phi)}{1 - e^{-\pi/3 \tan \phi}} * e^{-wt/\tan \phi} \right] \quad (3.81)$$

$$i_2(wt) = B * e^{-wt/\tan \phi} \quad (3.82)$$

olur. Devrenin periyodu boyunca çıkış geriliminin ilk negatif olduğu kısımda komutasyon diyotu aktif olacak ve akım o noktada sürekli olduğu için B değişkenin değeri oradan bulunabilecektir. B değişkeni paket program tarafından buldurulmuştur.

### 3.16. ÜÇ FAZLI KONTROLLÜ YARIM DALGA DOĞRULTUCU R DEVRESİ

Kontrollü doğrultucular tristörler ile yapılmakta ve tristörlerin ateşleme açısı  $\alpha$  ile kontrol edilmektedir. Sadece direnç ile yapılan bu tip doğrultucu devrelerinde yük üzerinden akan akım, çıkış geriliminin direnç değerine bölünmesi ile basit bir şekilde hesaplanabilir. Çıkış geriliminin bağlı olduğu noktalar hep faz arası gerilim olduğu için 3 faz kaynak gerilimi  $V_m$ 'nin  $\sqrt{3}$  katı büyüklüğündedir.

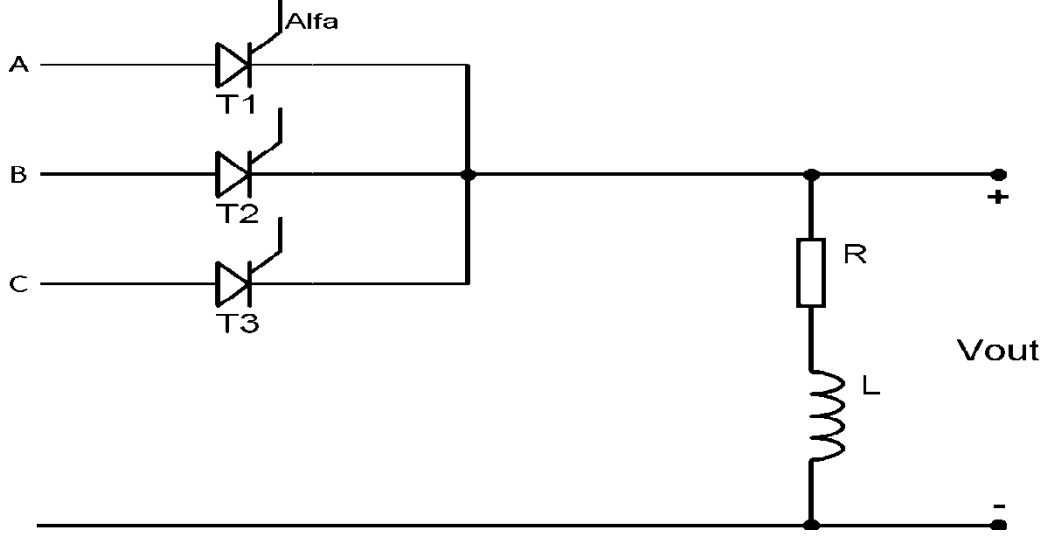


Şekil 3.21. Üç fazlı kontrollü yarım dalga doğrultucu R devresi.

$$V_m \sin(\omega t + \alpha + \frac{\pi}{6}) = R * i \quad (3.83)$$

$$i(\omega t) = \frac{V_L \sin(\omega t + \alpha + \frac{\pi}{6})}{R} \quad (3.84)$$

### 3.17. ÜÇ FAZLI KONTROLLÜ YARIM DALGA DOĞRULTUCU R-L DEVRESİ



Şekil 3.22. Üç fazlı kontrollü yarım dalga doğrultucu R-L devresi.

Kontrollü Yarım Dalga Doğrultucu R-L devresinin iki çalışma modu vardır. Çalışma modlarının değişimine 3.85'teki kritik açı hesaplaması ile karar verilmektedir [20]. Tristörün ateşleme açısı  $\alpha$  kritik açıdan küçük veya eşit ise devre Mod1'de, büyükse Mod2'de çalışacaktır.

1. Mod1:  $\alpha \leq \alpha_c$  ise devre sürekli akım modundadır. Aktarılan güç Mod2'ye göre daha yüksektir.
2. Mod2:  $\alpha > \alpha_c$  ise yük üzerinden akan akım süreksiz olacak ve devre Mod2 çalışacaktır.

$$\alpha_c = \tan^{-1} \left( \frac{\sin(\phi - \frac{\pi}{6}) - K * \sin \phi}{\cos(\phi - \frac{\pi}{6}) - K * \cos \phi} \right) \quad (3.85)$$

$$K = \frac{\sqrt{3}}{1 - e^{-2\pi/3 \tan \phi}} \quad (3.86)$$

[20]

Yük üzerinden akan akımın matematiksel analizi aşağıda yapılmıştır. Denklemlerde iki tane C değişkeni tanımlanmıştır. 3.89'daki C değişkeni devre Mod1'de çalışırken geçerlidir. Eğer devre süreksiz halde, yani Mod2'de çalışırsa C değişkeninin eşiti 3.90'daki eşitlik olacaktır.

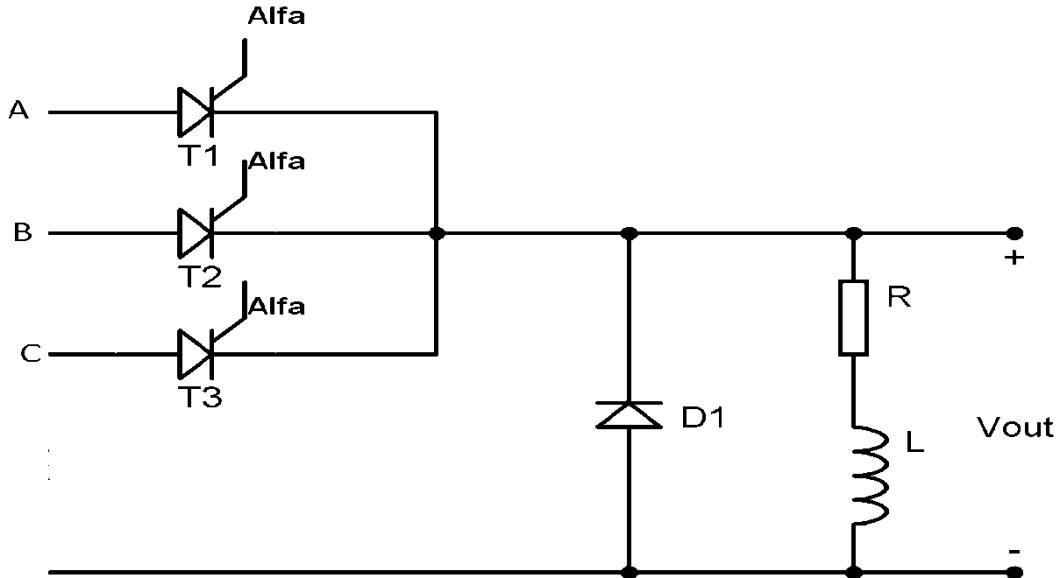
$$V_m \sin(\omega t + \alpha + \frac{\pi}{3}) = R * i + L * \frac{di}{dt} \quad (3.87)$$

$$i(\omega t) = \frac{\sqrt{2}V_L}{Z\sqrt{3}} \sin\left(\omega t + \alpha + \frac{\pi}{6} - \phi\right) + C * e^{-\omega t/\tan\phi} \quad (3.88)$$

$$C = -\frac{\sqrt{2}V_L}{Z\sqrt{3}} \frac{\sin(\alpha - \phi)}{1 - e^{-2\pi/3\tan\phi}}, \alpha \leq \alpha_c \quad (3.89)$$

$$C = -\frac{\sqrt{2}V_L}{Z\sqrt{3}} \sin(\alpha - \phi), \alpha > \alpha_c \quad (3.90)$$

### 3.18. ÜÇ FAZLI KONTROLLÜ YARIM DALGA DOĞRULTUCU R-L-FWD DEVRESİ



Şekil 3.23. Üç fazlı kontrollü yarım dalga doğrultucu R-L-FWD devresi.

Komutasyon diyotunun kontrollü yarım dalga doğrultucuya eklenmesiyle tasarlanan bu devre Mod2'de çalışırken çıkış geriliminin negatife düşmesine engel olur ve akım indüktansta toplanan enerji sayesinde bir süre daha diyot üzerinden akmaya devam eder. Devrenin analizi 3.17'deki devre ile aynıdır fakat akım denklemi Mod2'de çalışırken ikiye ayrılmalıdır.  $i_1(\omega t)$  çıkış geriliminin negatife düşmeden önceki akım

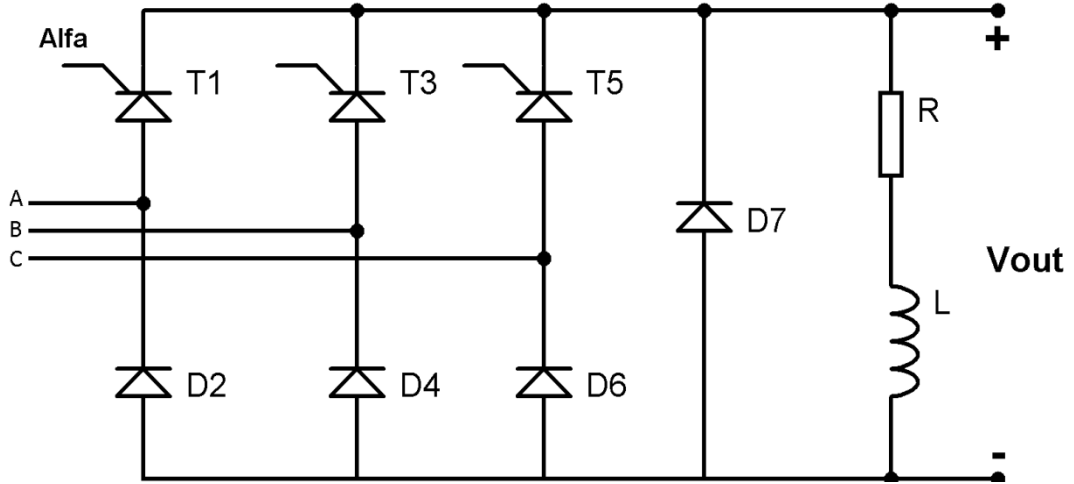
denklemini göstermek üzere,  $i_2(wt)$  komutasyon diyotunun aktif olduktan sonraki akım denklemini gösterirse eşitlikler 3.91 ve 3.92'deki formda sırasıyla yazılabilir.

$$i_1(wt) = \frac{\sqrt{2}V_L}{Z\sqrt{3}} \left[ \sin \left( wt + \alpha + \frac{\pi}{6} - \phi \right) - \sin (\alpha - \phi) * e^{-wt/\tan\phi} \right] \quad (3.91)$$

$$i_2(wt) = A * e^{-wt/\tan\phi} \quad (3.92)$$

3.92'deki A değişkeni akımın birinci kısımdan ikinci kısma geçişinin sürekli olduğu bilgisiyle bulunur. Örneğin çıkış gerilimi ilk olarak  $\gamma$  açısında negatife düşsün, o halde  $i_1(\gamma) = i_2(0)$  eşitliği kullanılarak A değişkeni bulunur.

### 3.19. ÜÇ FAZLI YARIM KONTROLLÜ TAM DALGA DOĞRULTUCU R-L-FWD DEVRESİ



Şekil 3.24. Üç fazlı yarım kontrollü tam dalga doğrultucu R-L devresi.

Üç Fazlı Yarım Kontrollü Tam Dalga Doğrultucu devresinin bir çalışma modu bulunmaktadır. Bu mod sürekli moddur. Devreye çıkış akımını sürekli tutmak için komutasyon diyotu konulmuştur. Şekil 3.24'deki devrede alttaki üçlünün tristör yerine diyot kullanılmasının avantajı küçük aç değerlerinde dalgalanma faktörünü yarıya indirmesidir. Tam kontrollü tam dalga doğrultucularda dalgalanma frekansı kullanılan alternatif akım kaynağının frekansının altı katı olurken, yarım kontrollü doğrultucularda dalgalanma frekansı kullanılan alternatif akım kaynağının üç katı olmaktadır [21].

$\alpha < 60^\circ$  gibi küçük açı kontrollerinde çıkış geriliminin negatif olma eğilimi yoktur. Bu yüzden  $60^\circ$ 'den küçük açı değerlerinde komutasyon diyotu aktif olmaz. Fakat  $\alpha > 60^\circ$  iken çıkış geriliminin döngü sırasında negatif olma eğilimi vardır. Komutasyon diyotu işte burada çıkış geriliminin negatif olmasını engelleyerek ilgili tristörü kapatmakta ve çıkış gerilimini sıfır yapmaktadır.

Yük üstünden akan akımın analizi yapılacak olursa:

$$V_m \sin\left(\omega t + \alpha + \frac{\pi}{3}\right) = R * i + L * \frac{di}{dt} \quad (3.93)$$

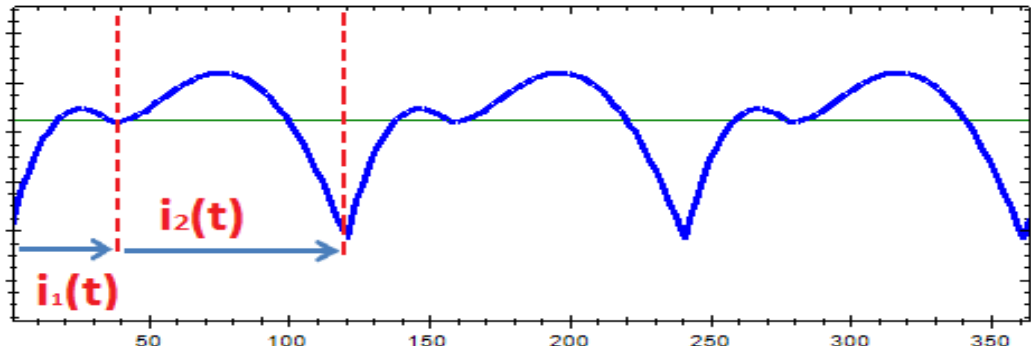
$$i_1(\omega t) = \frac{\sqrt{2}V_L}{Z} \sin\left(\omega t + \alpha - \phi + \frac{\pi}{3}\right) + A_1 * e^{-\omega t/\tan\phi} \quad (3.94)$$

$$i_2(\omega t) = \frac{\sqrt{2}V_L}{Z} \sin\left(\omega t - \phi + \frac{\pi}{3}\right) + A_2 * e^{-\omega t/\tan\phi} \quad (3.95)$$

$A_1$  ve  $A_2$  değişkenleri akımın sürekli ve periyotun  $\frac{\pi}{3}$  olduğu bilgisi kullanılarak bulunabilir. Bu bilgilerden aşağıdaki eşitlikler yazılır.

$$i_1(0) = i_2\left(\frac{\pi}{3} + \alpha\right) \quad (3.96)$$

$$i_1\left(\frac{\pi}{3} - \alpha\right) = i_2(0) \quad (3.97)$$



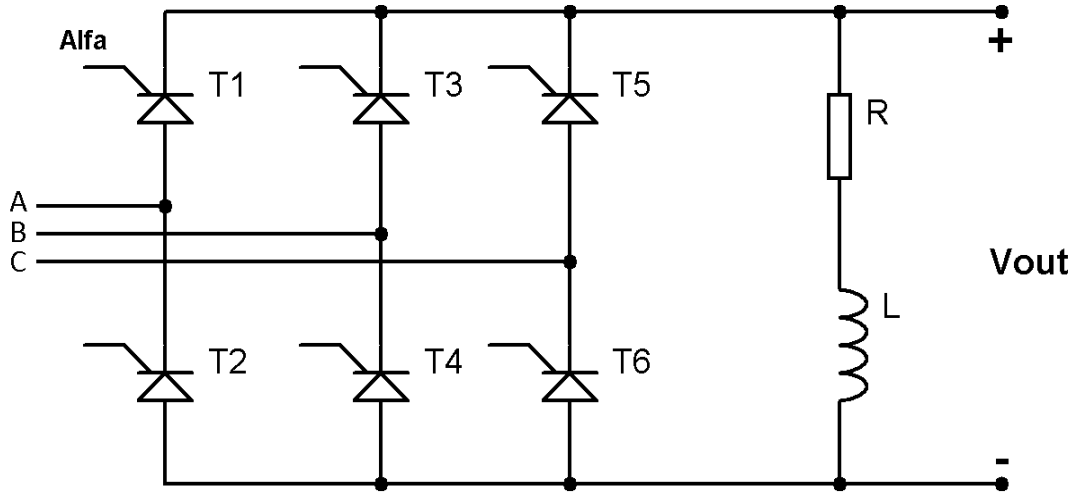
Şekil 3.25. Numaralandırılmış akım denklemleri.

Yukarıdaki iki eşitlik kullanılarak  $A_1$  ve  $A_2$  değişkenleri şu şekilde bulunmuştur.

$$A_1 = \frac{\sqrt{2}V_L \left[ \sin\phi * e^{-\left(\frac{\pi}{3} + \alpha\right)/\tan\phi} - \sin(\alpha - \phi) \right]}{Z(1 - e^{-2\pi/3\tan\phi})} \quad (3.98)$$

$$A_2 = \frac{V_L}{Z} \sin\phi + A_1 * e^{-(\frac{\pi}{3}-\alpha)/\tan\phi} \quad (3.99)$$

### 3.20. ÜÇ FAZLI TAM KONTROLLÜ TAM DALGA DOĞRULTUCU R-L DEVRESİ



Şekil 3.26. Üç fazlı tam kontrollü tam dalga doğrultucu R-L devresi.

Yüksek güç aktarımı gerektiren durumlarda tercih edilen bu devrede çıkış gerilimi 6 tristör ile kontrol edilmektedir. Devrenin periyodu  $\frac{\pi}{3}$  olup, devrenin iki çalışma modu vardır.

1. Mod1: Tristörün ateşleme açısı  $\alpha$  hesaplanan kritik ateşleme açısından  $\alpha_c$ 'den küçük veya eşit ise yük üzerinden akan akım sürekli olur. Mod1 akımın sürekli halde olduğu çalışma modudur.
2. Mod2: Eğer tristörün ateşleme açısı  $\alpha$  kritik ateşleme açısından büyük ise yükün üzerinden akan akım süreksiz olacaktır. Bu durumda devrenin çalışma modu Mod2 olacaktır.

Devrenin matematiksel analizinin denklemleri aşağıdaki yapılmıştır.

$$V_m \sin(\omega t + \alpha + \frac{\pi}{3}) = R * i + L * \frac{di}{dt} \quad (3.100)$$

$$i(wt) = \frac{\sqrt{2}V_L}{Z} \sin\left(wt + \alpha - \phi + \frac{\pi}{3}\right) + A * e^{-wt/\tan\phi} \quad (3.101)$$

A değişkeni akımın periyodik özelliği kullanılarak bulunur.

$$i(0) = i\left(\frac{\pi}{3}\right) \quad (3.102)$$

$$A = -\frac{\sqrt{2}V_L}{Z} \frac{\sin(\alpha - \phi)}{1 - e^{-\pi/3\tan\phi}} \quad (3.103)$$

Akım denklemini tekrar yazılmak istenirse:

$$i(wt) = \frac{\sqrt{2}V_L}{Z} \left[ \sin\left(wt + \alpha - \phi + \frac{\pi}{3}\right) - \frac{\sin(\alpha - \phi)}{1 - e^{-\pi/3\tan\phi}} * e^{-wt/\tan\phi} \right] \quad (3.104)$$

olur. Bölüm 4'te bu devre ile alakalı örnekler paket program kullanılarak çözülmüş ve devrenin çalışma modları arasındaki farklılıklar yorumlanmıştır. Mod değişiminin olduğu kritik açı değerinin matematiksel ifadesi aşağıda verilmiştir [20].

$$\alpha_c = \phi + \arctan\left(\frac{\sqrt{3}(1 - e^{-\pi/3\tan\phi})}{(1 + e^{-\pi/3\tan\phi})}\right) \quad (3.105)$$

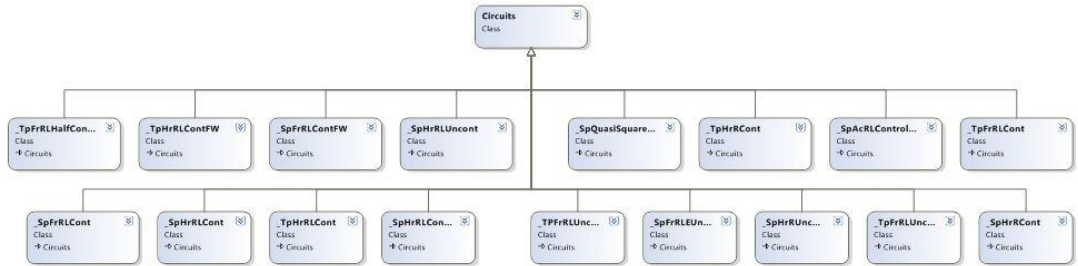


## BÖLÜM 4

### PAKET PROGRAM

#### 4.1. GENEL BİLGİ

Bu çalışmadaki paket program, nesneye yönelik programlama yaklaşımı ile hazırlanmıştır. Bölüm 3’de sunulan her bir devre, sınıflara ayrılarak diğer devrelerden bağımsız olarak tasarlanmıştır. Devrelerdeki ortak parametreler ayrı bir sınıfta toplanarak bir üst sınıf yazılmış ve yazılımın modülerliği artırılmıştır. Yazılan üst sınıf özelliklerini kalıtım(inheritance) yoluyla alt sınıflara aktarmakta, böylece aynı parametrelerin ve fonksiyonların her bir sınıf için tekrar tekrar yazılmasının önüne geçilmiştir. Paket programdaki sınıflar arası ilişkiyi gösteren sınıf diyagramı Şekil 4.1’de gösterilmiştir.



Şekil 4.1. Sınıflar arası ilişkiyi gösteren “sınıf diyagramı”.

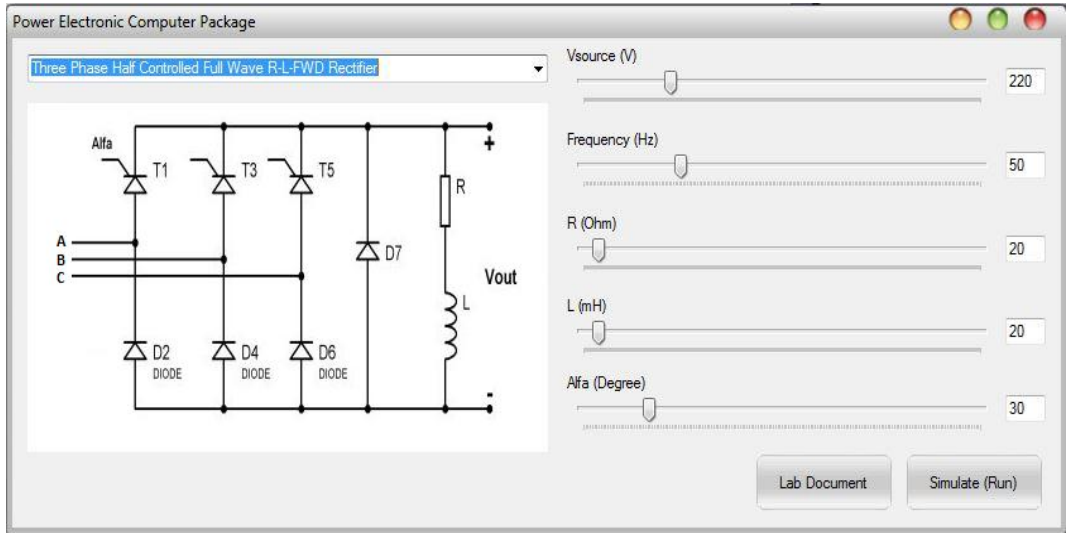
Devrenin analizi yapıldıktan sonra sonuçların yazdırılması işlemi üst sınıftaki “toString” metodu tarafından, akım denkleminin yazdırılması her bir devrenin içinde tanımlanan “toString” metodu ile yaptırılmıştır. Bu iki aynı yazılımlı fonksiyon nesneye yönelik programlama sayesinde “override” edilmiş olup her devre için özel olarak çalışmaktadır.

Microsoft Visual Studio ortamında masaüstü uygulaması olarak geliştirilmiştir. Paket

programda üniversitelerdeki derslerde eğitim amaçlı gösterilen ve en sık kullanılan 20 adet güç elektroniği devresi sunulmaktadır. Daha sonra ekstra bir devre eklenmek istenirse, sınıflar birbirinden bağımsız tasarlandığı için kolaylıkla pakete dâhil edilebilecektir.

Paket programda sunulan olanaklar, programın arayüzü ve nasıl kullanıldığı ile alakalı tüm bilgiler bu bölümde verilmiştir. Hazırlanan yazılım herhangi bir Windows İşletim sisteminde sorunsuz olarak çalışabilmektedir. Kurulum için en az 20MB alan, 1GHz işlemci ve 512MB hafızası olan bir sistem önerilmektedir.

#### 4.2. PAKET PROGRAMIN ARAYÜZÜ

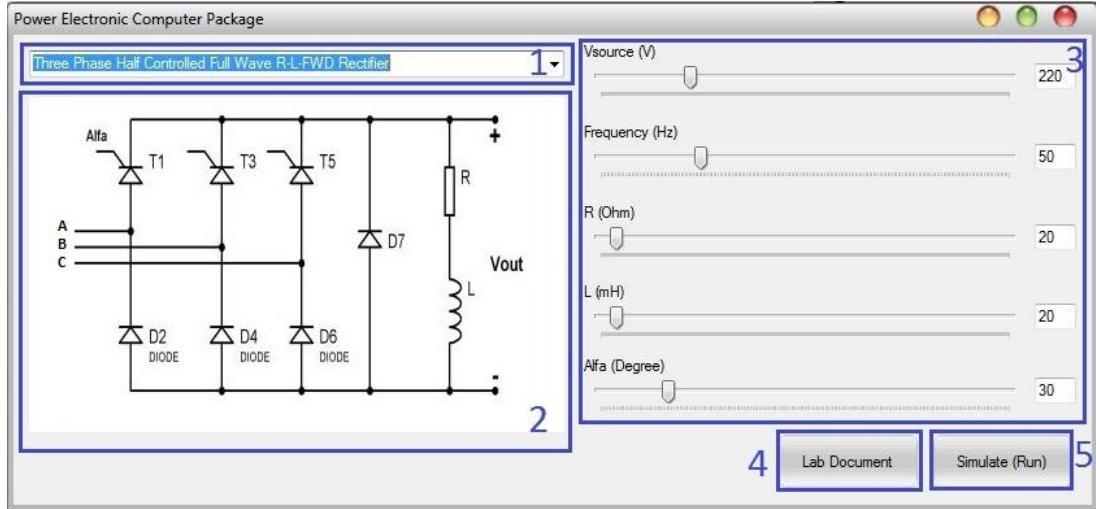


Şekil 4.2. Paket program arayüzü.

Bu bölümde, hazırlanan bilgisayar paketinin arayüzü anlatılacaktır. Paket programının kullanımının basit ve kullanılabilir olması amacıyla oldukça sade bir arayüz tercih edilmiştir. Programın oluşturulan ana ekranı Şekil 4.2'deki gibidir. Program İngilizce olarak hazırlandığından arayüzde kullanılan terimler İngilizce'dir.

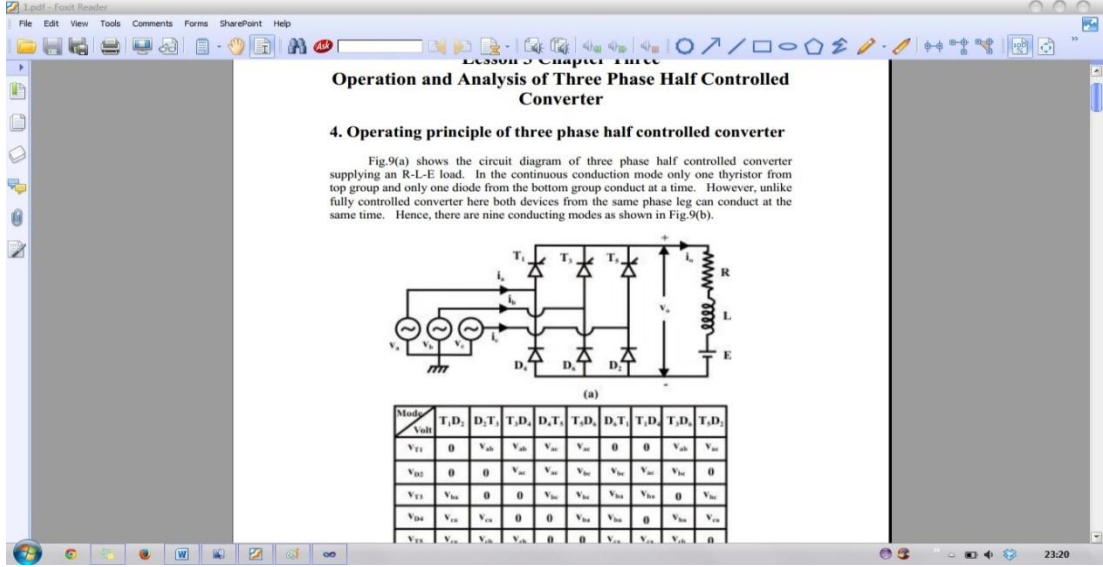
#### 4.2.1. Ana Ekran Görüntüsü

Programın ana ekran görüntüsü detaylı anlatım için Şekil 4.3’de gösterildiği gibi numaralandırılmıştır. 1 ile numaralandırılmış bölümde, paket programda sunulan 20 adet devrenin isimleri bulunmaktadır. Kullanıcı buradan analiz etmek istediği devreyi seçecek ve 2 ile numaralandırılmış bölümde de devrenin çizimini görecektir. Devre seçim işleminden sonra, devrenin değiştirilebilir tüm parametreleri sağ tarafta 3 ile numaralandırılış alanda çıkacaktır. Kullanıcı buradan istediği parametreleri istediği değerlere ayarlayıp 5 ile numaralandırılmış “Simulate (Run)” butonuna basarak devre ile alakalı tüm analizi tek platformda görebilecektir. 4 ile numaralandırılmış bölümde, seçilen devre ile alakalı laboratuvar dokümanı bulunmaktadır. Dokümanda seçilen devre ile alakalı bilgiler, alıştırmalar ve deneyler yer almaktadır. Üç fazlı kontrollü devre için çıkan laboratuvar dokümanı Şekil 4.4’de gösterilmiştir.



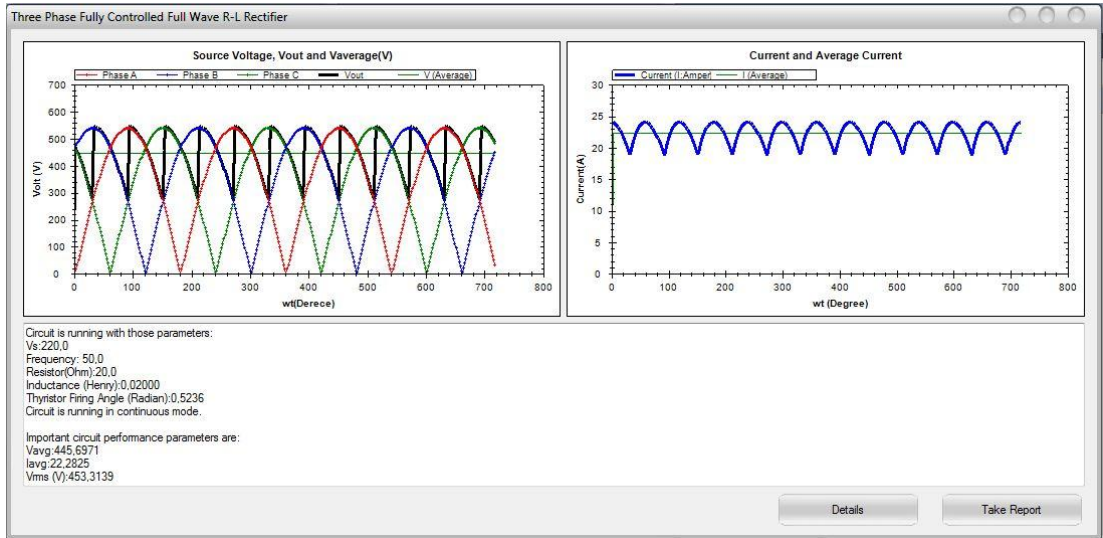
Şekil 4.3. Numaralandırılmış ana ekran.

Öğrenci isterse laboratuvar dokümanından devre ile ilgili önbilgileri okuyarak fikir sahibi olacak, daha sonra laboratuvar dokümanındaki alıştırmaları deneyerek pratik yapabilecektir. Böylece seçtiği devrenin davranışı hakkında yorum yapabilme yetisi kazanacaktır.



Şekil 4.4. Laboratuvar dokümanı.

#### 4.2.2. Benzetim (Simülasyon) Ekranı

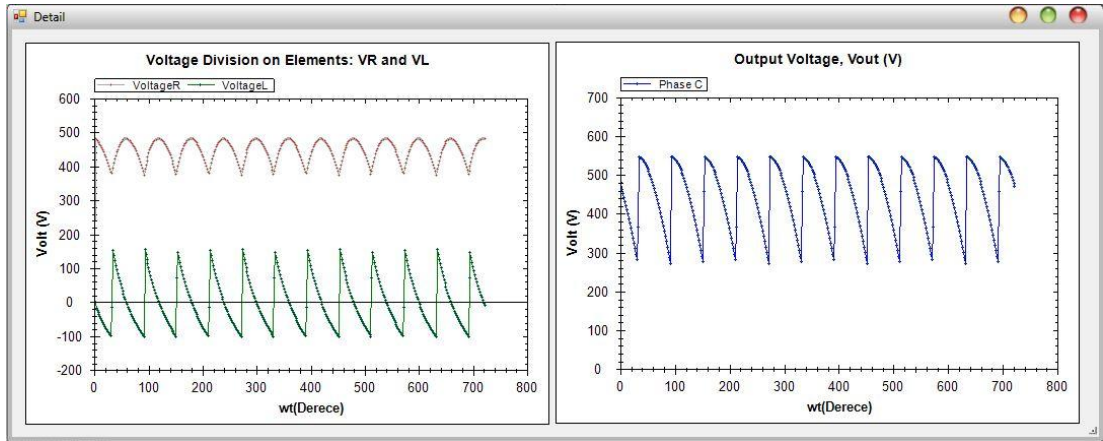


Şekil 4.5. Benzetim ekranı.

Ana ekrandaki “Simulate (Run)” butonuna tıklanıldığında çıkan, devrenin analiz sonuçlarının bulunduğu ekrandır. Benzetim ekranının sol üst köşesinde yer alan grafik kaynak gerilim(ler)inin, ortalama çıkış gerilimi ve çıkış geriliminin gösterildiği alandır. Yük üstünden akan akımın kendisi ve ortalama değeri ekranın sağ üst köşesindeki grafiksel alanda gösterilmiştir. Grafik sonuçları her bir devre için iki

periyot boyunca çizdirilmiştir. Bu sonuçlara daha yakından bakılmak istenirse grafikler üstünde çizilmiş alanlara yakınlaştırma ve uzaklaştırma özelliği eklenmiştir. Grafikselle alanların hemen altındaki bölümde yer alan boşlukta devrenin analiz sonuçları; hangi parametrelerle hangi modda çalıştığı, güç faktörü, dalgalanma faktörü, akımın ve gerilimin etkin ve ortalama değerleri, zaman sabiti, varsa kritik açı değeri ve akım denklemi bilgileri bulunmaktadır. Benzetim ekranının üç fazlı kontrollü devre için ekran görüntüsü Şekil 4.5'te gösterilmiştir.

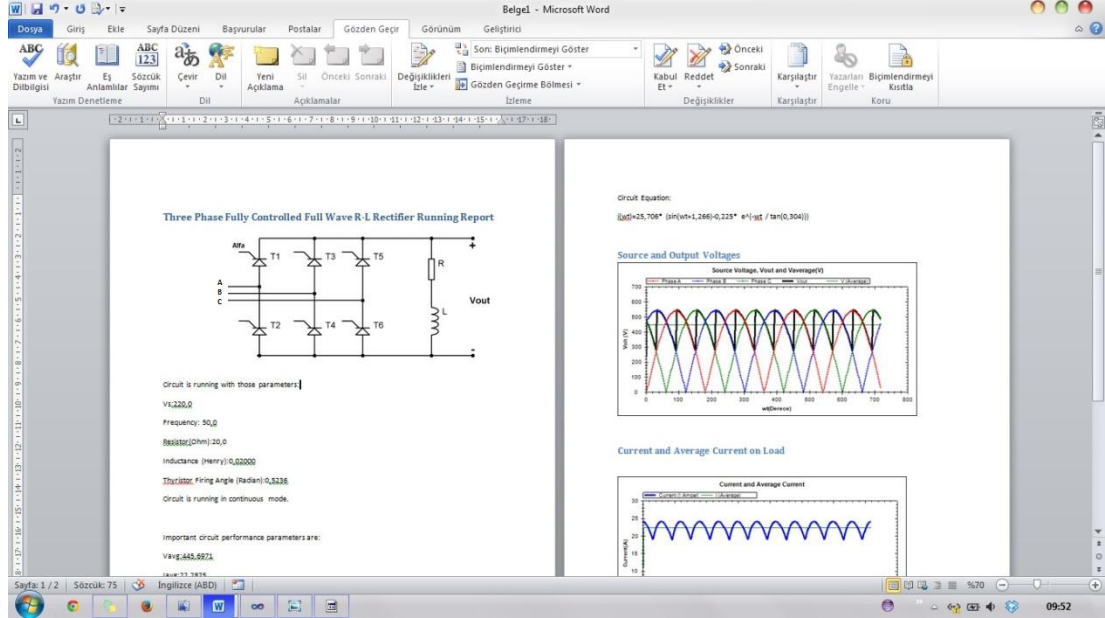
Devrenin daha detaylı analizini yapabilmek için benzetim ekranının alt köşesinde bulunan "Details" butonuna tıkladığında direnç ve indüktans üzerindeki gerilimin değişimini gösteren grafik formu çıkmaktadır. Bu grafikten direnç ve indüktansın hangi açı değerlerinde devreye nasıl tepki verdiği yorumlanabilmektedir. Dolayısıyla öğrenci bu grafiklere bakarak, devrenin dinamik davranışı hakkında yorumlar yapabilme, verimi ve performansı üzerine tahmin yürütebilme yeteneği kazanabilmektedir. Ekranın sağ tarafında gösterilen diğer grafikte ise çıkış gerilimi daha detaylı olarak gösterilmiştir. Detay ekranının görüntüsü Şekil 4.6'da gösterilmiştir.



Şekil 4.6. Detay ekranının görüntüsü.

Benzetim ekranının sağ alt köşesinde bulunan "Take Report" butonu ise devre sonuçlarının bir "Microsoft Word" belgesine aktarılması işlemi gerçekleştirir. Aktarılan bilgiler, hangi devrenin hangi parametrelerle çalıştırılıp, sonuçlarının neler olduğu bilgisidir. Grafikselle olarak görüntülenen bütün sonuçlar bu Word

dokümanına aktarılmaktadır. Raporu alınmış üç fazlı kontrollü devrenin ekran görüntüsü Şekil 4.7’de gösterilmiştir.



Şekil 4.7. Analiz sonuçlarının rapora dönüştürülmesi.

### 4.3. PAKET PROGRAMIN ÖRNEKLER İLE KULLANIMI

Bu bölümde paket programın kullanılması ve sonuçlarının irdelenmesi amacıyla üç adet örnek gösterilecektir. Birinci örnek “Tek Fazlı Kontrollü Tam Dalga Doğrultucu R-L Devresi”, ikinci örnek “Üç Fazlı Tam Kontrollü Tam Dalga Doğrultucu R-L Devresi”, üçüncü örnek “Üç Fazlı Yarım Kontrollü Tam Dalga Doğrultucu R-L-FWD Devresi” olarak seçilmiştir. Birinci ve ikinci örnekteki devrelerin iki modu, üçüncü örneğin tek modu bulunmaktadır. Bütün modlar için ayrı ayrı parametreler belirlenmiş ve çıktıları aşağıda sunulmuştur.

#### 4.3.1. Tek Fazlı Kontrollü R-L Devresinin Benzetimi

Bu devrenin 2 modu bulunmaktadır. Mod değişiminin olduğu açı değeri, üçüncü bölümde anlatılan kritik ateşleme açısı ile belirlenmektedir. Tristörün ateşleme açısı kritik ateşleme açısından büyük olursa yük üzerinden akan akım süreksiz halde (Mod2), küçük veya eşit olursa yük üzerinden akan akım sürekli halde (Mod1)

akacaktır. Devrenin  $V_m = 220V, f = 50Hz, R = 20\Omega, L = 50mH, \alpha = 20^\circ$  parametrelere değerleri ile analizi yapılacak olursa, kritik ateşleme açısı  $38,363^\circ$  olduğu için devrenin çalışma modu Mod1 ve yük üzerinden akan akım sürekli halde olacaktır. Akımın ve çıkış geriliminin grafiğine Şekil 4.8'den bakılabilir. Direnç ve indüktans üzerindeki gerilimin daha detaylı incelemesi işlemi "Details" butonuna basılarak yapılabilir (Şekil 4.9).

Benzetim sonucunda çıkan analiz raporu:

Circuit is running with those parameters:

Vs:220,0

Frequency: 50,0

Resistor (Ohm):20,0

Inductance (Henry):0,05000

Thyristor Firing Angle (Radian):0,3491

Circuit is running in continuous mode (Mod1).

Important circuit performance parameters are:

Vavg:132,1500

Iavg:6,5802

Vrms (V):156,4086

Irms (A):6,9054

Power Factor (P.F):0,8830

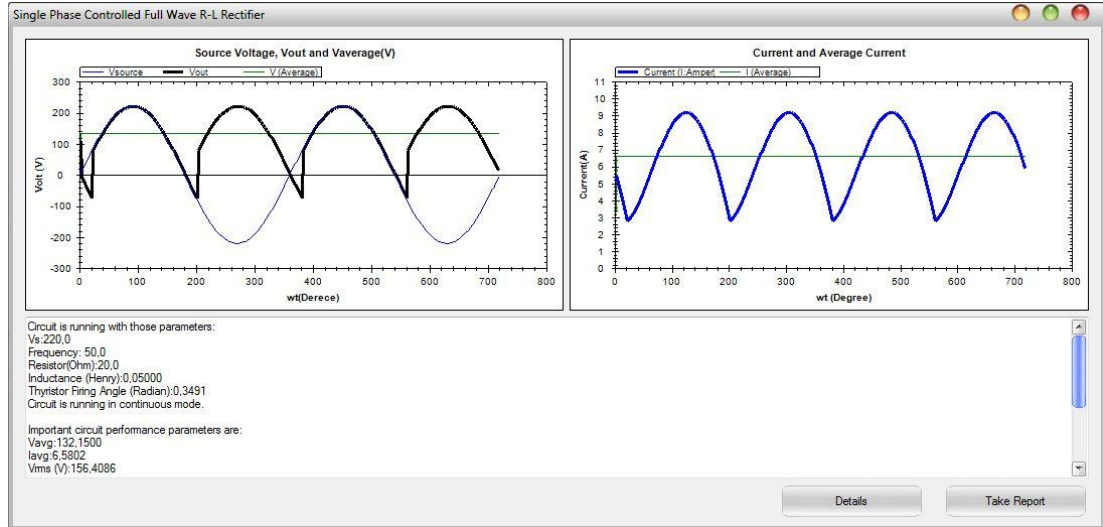
Ripple Factor: 7,2781%

Taho (Time Constant) 0,0025

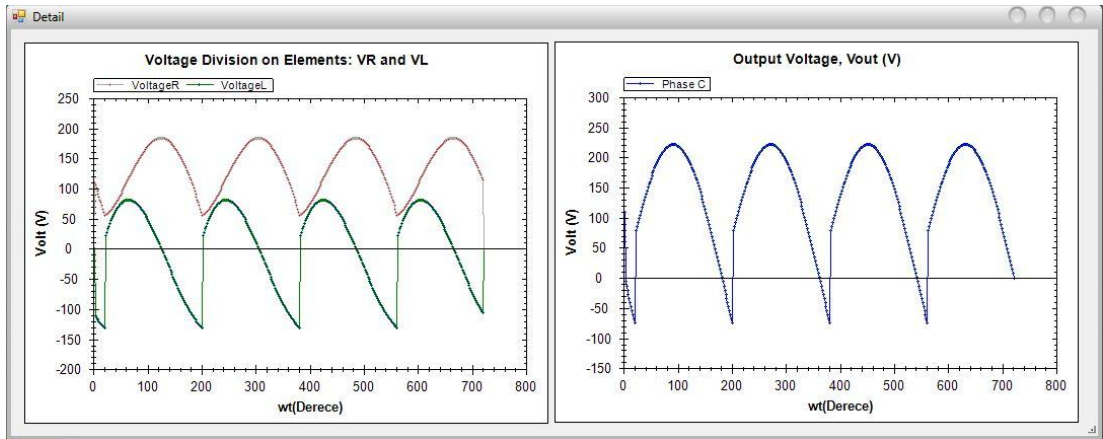
Alfa Critical=0,670 radian (38,363 Degree)

Current Equation:

$i(\omega t) = 8,651 * (\sin(\omega t + -0,317) + 0,635 * e^{-(\omega t / \tan(0,666))})$



Şekil 4.8. Devrenin  $V_m = 220V$ ,  $f = 50Hz$ ,  $R = 20\Omega$ ,  $L = 50mH$ ,  $\alpha = 20^\circ$  parametreleri ile benzetimi.



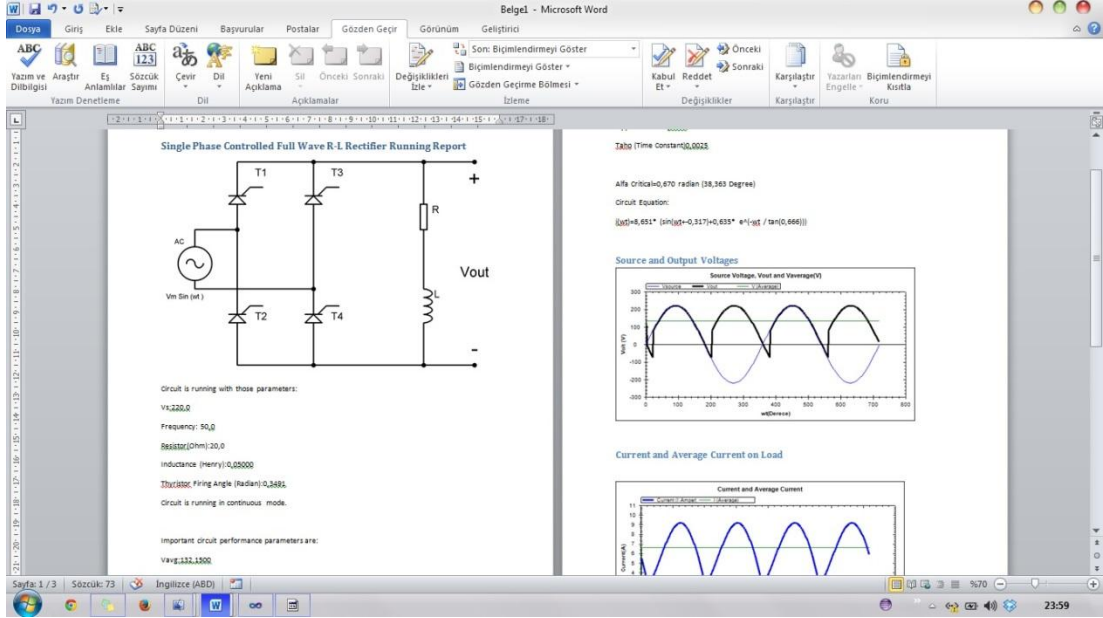
Şekil 4.9. R, L ve çıkış gerilimlerinin detaylı analizi.

Benzetim programı devrenin analiz raporunu bir Word dokümanına aktarabilmektedir. Bunun için benzetim ekranında “Take Report” butonuna basılmış ve çıkan rapor dokümanının ekran görüntüsü Şekil 4.10’da verilmiştir.

Devrenin analiz sonuçlarına bakıldığında kritik ateşleme açısının  $38,363^\circ$  olduğu görülmektedir. Devre analizi aynı değerlerle  $\alpha=40^\circ$  iken tekrar yapılırsa, tristörün ateşleme açısı  $\alpha$ , kritik ateşleme açısından büyük olması sebebiyle yük üzerinden akan akımın süreksiz olması gerekmektedir (Mod2). Devrenin  $V_m = 220V$ ,  $f = 50Hz$ ,  $R = 20\Omega$ ,  $L = 50mH$ ,  $\alpha = 40^\circ$  parametre değerleriyle benzetimi tekrar



yapılacak olursa yük üzerinden akan akımın Şekil 4.11'deki gibi süreksiz halde çıktığı görülür.



Şekil 4.10. Devre analiz sonuçlarının rapor haline dönüştürülmesi.

Devrenin Analiz Raporu:

Circuit is running with those parameters:

$V_s: 220,0$

Frequency: 50,0

Resistor (Ohm): 20,0

Inductance (Henry): 0,05000

Thyristor Firing Angle (Radian): 0,6981

Circuit is running in discontinuous mode (Mod2).

Important circuit performance parameters are:

$V_{avg}: 53,9532$

$I_{avg}: 2,7186$

$V_{rms} (V): 109,5521$

$I_{rms} (A): 4,2898$

Power Factor (P.F): 0,7832

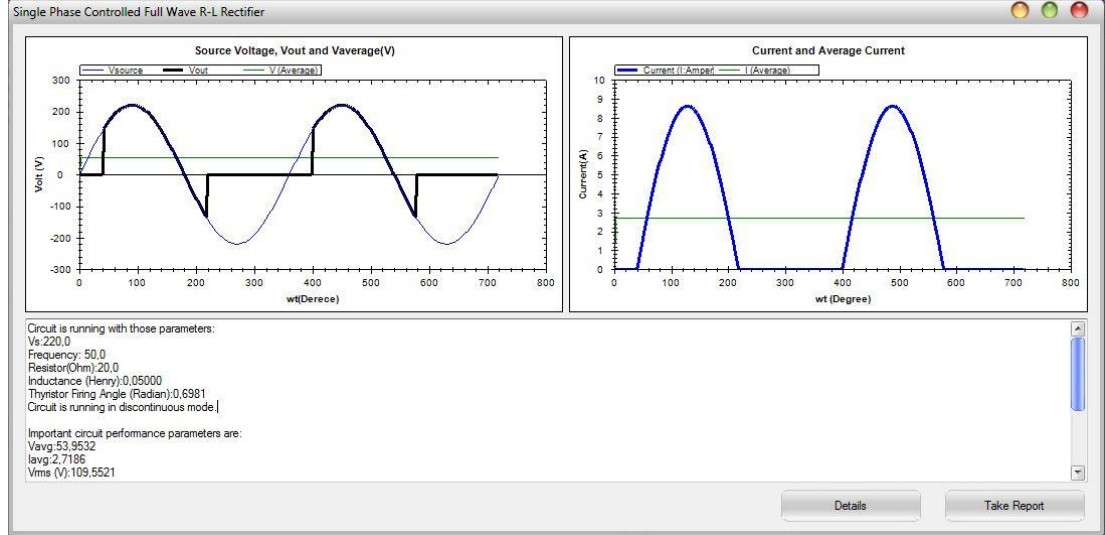
Ripple Factor: 12,9805%

Taho (Time Constant) 0,0025

Alfa Critical=0,670 radian (38,363 Degree)

Current Equation:

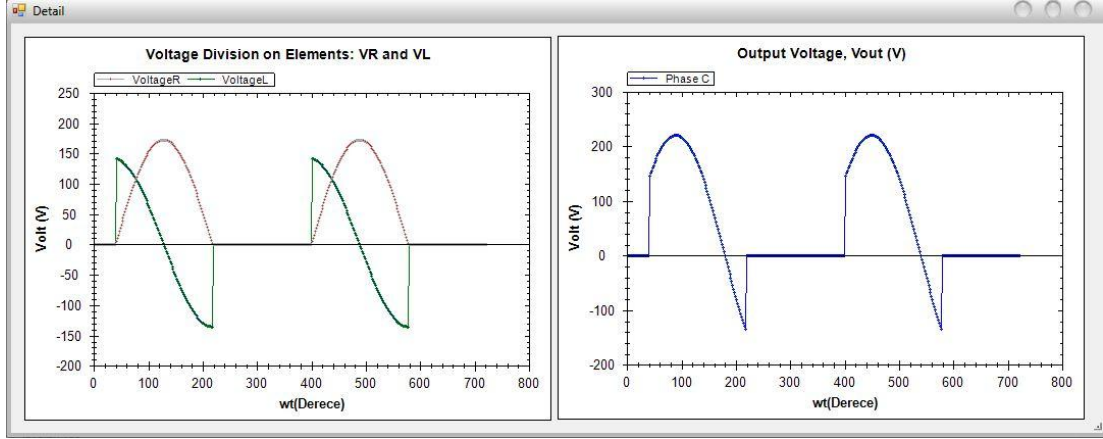
$$i(\omega t) = 8,651 * (\sin(\omega t - 0,666) - \sin(0,032)) * e^{-(\omega t - 0,698) / \tan(0,666)}$$



Şekil 4.11. Devrenin  $V_m = 220V$ ,  $f = 50Hz$ ,  $R = 20\Omega$ ,  $L = 50mH$ ,  $\alpha = 40^\circ$  parametreleri ile benzetimi.

Devredeki R ve L elemanları üstündeki gerilimin detaylı analizi incelenmek istenirse Şekil 4.11'deki benzetim ekranının alt köşesinde yer alan "Details" butonuna basılarak bu işlem gerçekleştirilebilir. Detay ekranının görüntüsü Şekil 4.12'de verilmiştir.

Mod1 ve Mod2 arasında yorum yapılacak olursa, akım sürekli iken güç faktörünün daha büyük, dalgalanma faktörünün daha küçük olduğu görülür. Aynı şekilde etkin ve ortalama değerler Mod1'de daha büyüktür. Yapılan bu analizlerin sonuçlarından da devrenin Mod1'de çalışırken elde edilen veriminin Mod2'ye göre daha fazla olduğu yorumlanır.



Şekil 4.12. Devre mod2’de çalışırken R ve L üzerindeki gerilimlerin detaylı incelenmesi.

### 4.3.2. Üç Fazlı Tam Kontrollü Tam Dalga Doğrultucu R-L Devresinin Benzetimi

Bu devrenin çalışma modu ikiye ayrılmıştır. Modlar arasındaki geçişe üçüncü bölümde anlatılan kritik ateşleme açısı ile karar verilmektedir. Devre  $V_m = 250V$ ,  $f = 50Hz$ ,  $R = 10\Omega$ ,  $L = 50mH$ ,  $\alpha = 30^\circ$  parametre değerleriyle analiz edildiğinde, kritik ateşleme açısı  $\alpha_c$ , tristörün ateşleme açısından  $\alpha$ ’dan küçük olduğu görülür. Bu nedenle devre yukarıdaki parametre değerleriyle analiz edilirse çalışma modu Mod1 ve yük üzerinden akan akım sürekli halde olur. Analiz sonucu çıkan benzetim ekranı Şekil 4.13’de gösterilmiştir.

Devrenin analiz sonuçları:

Circuit is running with those parameters:

Vs:250,0

Frequency: 50,0

Resistor (Ohm):10,0

Inductance (Henry):0,05000

Thyristor Firing Angle (Radian):0,5236

Circuit is running in continuous mode (Mod1).

Important circuit performance parameters are:

Vavg:506,3271

Iavg:50,6426

Vrms (V):514,4634

Irms (A):50,6491

Power Factor (P.F):0,9845

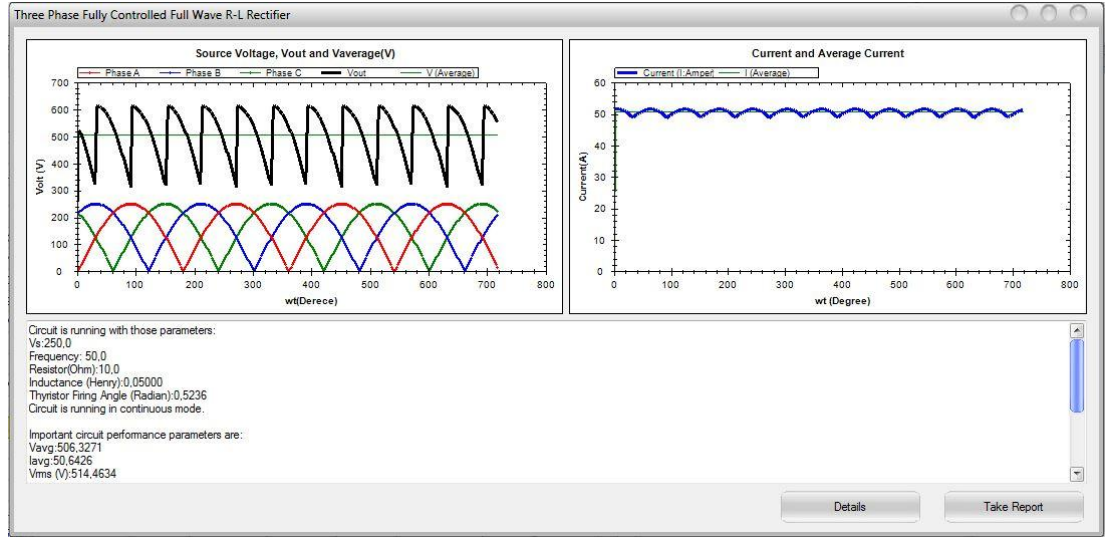
Ripple Factor: 4,0501%

Taho (Time Constant) 0,0050

Critical Firing Angle (Which causes Mod changes):86,1835(Degree)

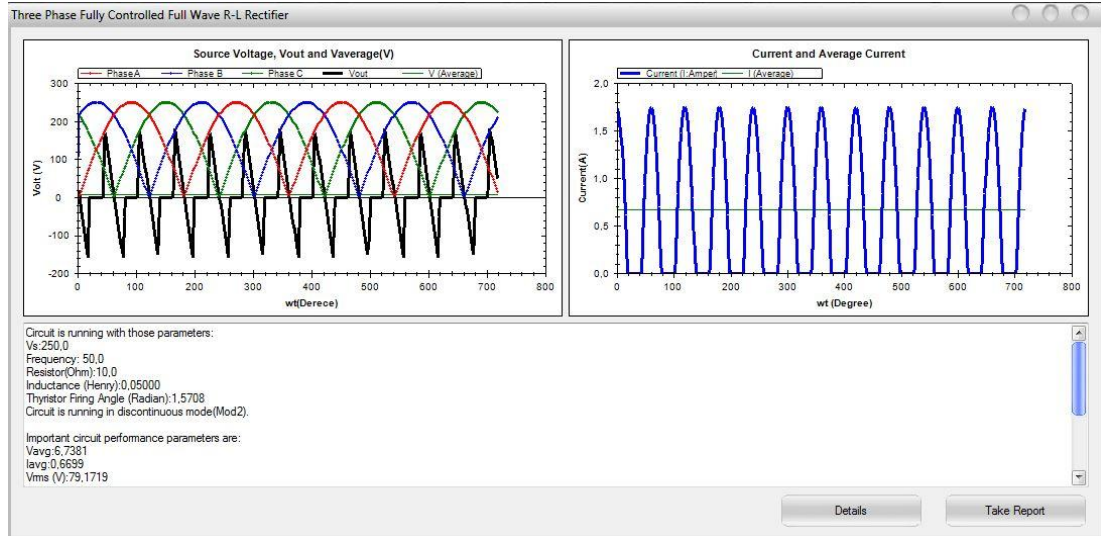
Current Equation:

$$i(\omega t)=32,886 * (\sin(\omega t+0,567)-0,950 * e^{(-\omega t / \tan(1,004))})$$



Şekil 4.13. Devrenin  $V_m = 250V, f = 50Hz, R = 10\Omega, L = 50mH, \alpha = 30^\circ$  parametre değerleriyle analizi.

Paket program, analiz raporunda yukarıdaki parametre değerleriyle kritik ateşleme açısı değerini  $86,1835^\circ$  olarak bulmuştur. Aynı parametrelerle  $\alpha = 90^\circ$  iken devrenin analizi tekrar yapılacak olursa, tristörün ateşleme açısı  $\alpha$ , kritik ateşleme açısından daha büyük olduğu için devre Mod2'de çalışmaya başlayacaktır. Analizin sonucu aşağıda gösterilmiştir.



Şekil 4.14. Devrenin  $V_m = 250V, f = 50Hz, R = 10\Omega, L = 50mH, \alpha = 90^\circ$  parametre değerleriyle analizi.

Devrenin analiz sonucu:

Circuit is running with those parameters:

Vs:250,0

Frequency: 50,0

Resistor (Ohm):10,0

Inductance (Henry):0,05000

Thyristor Firing Angle (Radian):1,5708

Circuit is running in discontinuous mode (Mod2).

Important circuit performance parameters are:

Vavg:6,7381

Iavg:0,6699

Vrms (V):79,1719

Irms (A):0,9682

Power Factor (P.F):0,1223

Ripple Factor: 30,3896%

Taho (Time Constant)=0,0050

Critical Firing Angle (Which causes Mod changes):86,1835 (Degree)

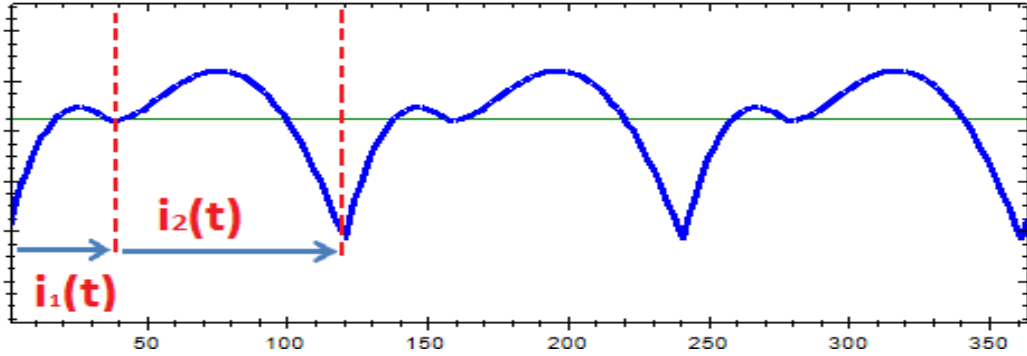
Current Equation:

$$i(\omega t) = 32,886 * (\sin(\omega t + 1,614) - 1,104 * e^{-(\omega t / \tan(1,004))})$$

Görüldüğü gibi hazırlanan paket program çalışma modları arasındaki geçişi göstermekte, böylece öğrenciye daha detaylı analiz ve daha iyi kavrama olanağı sağlamaktadır.

### 4.3.3. Üç Fazlı Yarım Kontrollü Tam Dalga Doğrultucu R-L-FWD Devresinin Benzetimi

Bu devrenin bir tane çalışma modu bulunmaktadır. Analizinin anlaşılması diğer devrelere göre biraz daha zordur. Yük üzerinden akan akım iki parçaya ayrılmış ve analiz sonucunda akım denklemleri paket program tarafından çıkartılmıştır. Birinci ve ikinci akım denklemlerinin grafiksel yorumu Şekil 4.15'te yapılmıştır.



Şekil 4.15. Numaralandırılmış akım denklemlerinin gösterilmesi.

Devrenin  $V_m = 300V, f = 50Hz, R = 30\Omega, L = 20mH, \alpha = 30^\circ$  parametre değerleriyle analizinin sonucu aşağıda verilmiş ve benzetim sonuç ekranı Şekil 4.16'da gösterilmiştir. Devrenin tek çalışma modu olduğu için kritik ateşleme açısı bu devre için bir anlam teşkil etmemektedir.

Devrenin analiz sonucu:

Circuit is running with those parameters:

Vs:300,0

Frequency: 50,0  
 Resistor (Ohm):30,0  
 Inductance (Henry):0,02000  
 Thyristor Firing Angle (Radian):0,5236  
 Circuit is running in one mode.

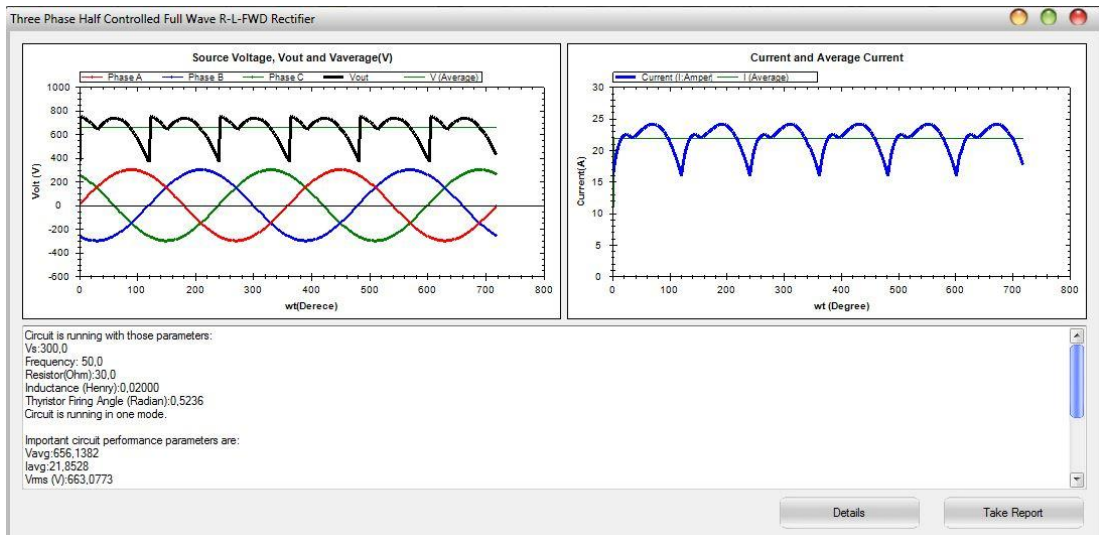
Important circuit performance parameters are:

Vavg:656,1382  
 Iavg:21,8528  
 Vrms (V):663,0773  
 Irms (A):21,9470  
 Power Factor (P.F):0,9930  
 Ripple Factor: 3,7352%  
 Taho (Time Constant)=0,0007

Circuit Equation:

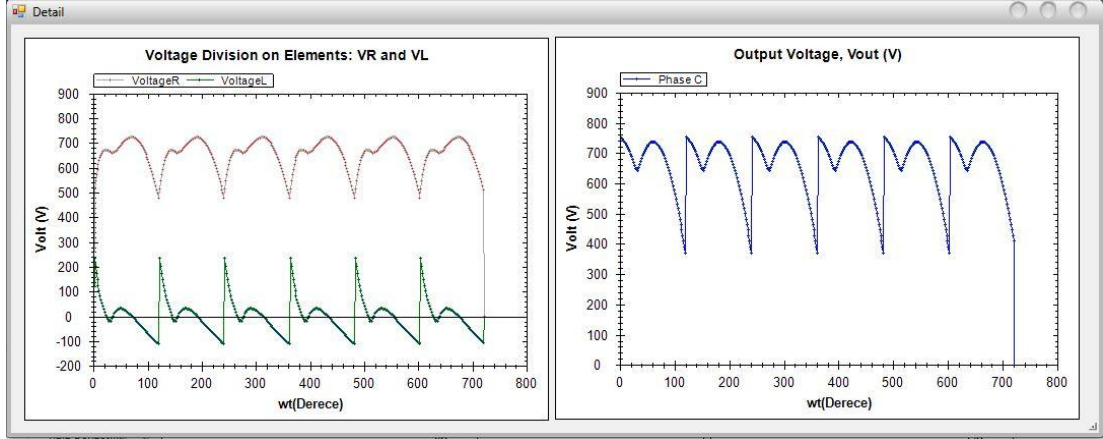
$$i_1(\omega t) = 23,975 * \sin(\omega t + 1,364) + -7,474 * e^{(-\omega t / \tan(0,206))}$$

$$i_2(\omega t) = 23,975 * \sin(\omega t + 0,841) + 4,301 * e^{(-\omega t / \tan(0,206))}$$



Şekil 4.16. Devrenin  $V_m = 300V, f = 50Hz, R = 30\Omega, L = 20mH, \alpha = 30^\circ$  parametre değerleriyle analizi.

Devredeki R, L elemanları üstündeki gerilim ve çıkış gerilimi, benzetim ekranındaki “Details” butonuna basılarak daha detaylı bir şekilde incelenebilir. Yukarıdaki parametrelerle yapılan analiz için detay ekran görüntüsü aşağıda verilmiştir.



Şekil 4.17. R, L elemanları üstündeki gerilim ve çıkış gerilimi detayı.

Analiz sonuçlarından da görüldüğü gibi akım denklemi iki parça şeklinde çıkmaktadır. Devrenin performansı hakkında yorum yapmak gerekirse, güç faktörünün 1'e yakın olması ve dalgalanma faktörünün tek fazlı devrelere göre düşük olması, üç fazlı devrelerin performansının tek fazlı devrelere göre daha iyi olduğu sonucuna ulaştırır.



## BÖLÜM 5

### SONUÇLAR VE YORUM

Mühendislik eğitiminde teorik ders içerikleri laboratuvar uygulamaları ile desteklenmektedir. Laboratuvarlar öğrencilerin derslerde öğrendikleri teorik bilgileri pratik bilgiye dönüştürmede ve mesleki deneyim kazandırmada oldukça etkilidir. Ancak gerçek ortamda yapılan deneylerin gerek laboratuvar kurulumunun pahalı araç gereçler içermesi, gerekse öğrencinin tek başına çalışmasının sakıncalar doğurması donanım, zaman ve mekân gibi değişik kısıtlamaları birlikte getirmiştir. Bu kısıtlamaların giderilmesi amacıyla teknolojik imkânlardan yararlanılarak yeni alternatif çözüm arayışları geliştirilmektedir. Bu alternatiflerin en başında bilgisayar destekli çözüm olan benzetim yazılımları hazırlamak gelmektedir.

Günümüzde bilgisayar kullanımı hızla artmaktadır. Bunun bir sonucu olarak bilgisayarlar birçok alanda olduğu gibi eğitim alanında da vazgeçilmez bir araç olarak hayatımızdaki yerini almıştır. Bilgisayarların eğitim alanında kullanılması daha çok benzetim uygulamalarıyla kaliteyi arttırmaya yönelik sanal uygulamaları içermektedir. Oluşturulan bu sanal ortamlar öğrenciye tekrar ve alıştırmaya, benzetim programları ile verileri çekici bir şekilde sunma gibi olanaklar sağlar. Bu çalışmada da Elektronik derslerinde gösterilen 20 adet temel doğrultucu devre, öğrenmeyi daha etkin kılmak amacıyla çalışma modlarına ayrılmış ve bilgisayar destekli benzetim yazılımı geliştirilmiştir.

Günümüzde hâlihazırda kullanılan benzer uygulamaların geliştirilebileceği, birçok yazılım mevcuttur. Matlab-Simulink, PSpice, PSim, EMTP gibi firmaların geliştirdiği yazılımlar ile yukarıdaki devrelerin analizleri yapılabilmektedir. Bu yazılımlar daha çok profesyonel amaçlı olup, sonuçlar doğrudan hiçbir yorum yapılmadan, çalışma modlarına ayrılmadan sayısal değer olarak gösterilir fakat

eğitim amaçlı düşünöldüğönde sadece sonuçların sayısal olarak gösterilmesi çoğu zaman iyi bir anlayış için yeterli olmamaktadır. Ayrıca bu uygulamaların kullanabilmesi için o yazılımın programlama dilini, yapısını veya tümce bilimini (sintaks, syntax) bilmeleri gerekmektedir. Bu yüzden öğrencilerin o programları öğrenebilmeleri ve istedikleri analizi yapabilmeleri için belirli bir zamana ihtiyaçları vardır. Bu çalışma ile öğrenciler almış oldukları teorik bilgiler ışığında, sadece bu amaç için özelleştirilmiş bu bilgisayar paketini ilgili parametre değerlerini girerek analizlerini yapabileceklerdir. Öğrencilerin ayrıca bir programlama dili bilmelerine gerek yoktur. Dolayısıyla yeni bir yazılım öğrenmek için ayrılacak vakit, problemi anlama ve kavramaya yönelik kullanılabilir olacaktır.

Bu çalışmanın literatüre kazandırdığı en önemli sonuç doğrultucu devrelerinin çalışma modlarına ayrılarak analizlerin daha anlaşılır bir platformda toplu olarak sunulmasıdır. Ayrıca şu ana kadar hazırlanan hiçbir uygulama yük üzerinden geçen akım denklemini vermemiştir. Çoğunlukla devrelerde sonsuz denecek büyüklükte indüktans olduğu varsayılmış, akımın sadece ortalama değeri göz önüne alınmıştır. Öğrenciler akımın gerçek şeklini göremediklerinden gerçek hayatta akımın gerçek şeklini görünce daha önce edindikleri bilgiler hakkında şüphe içinde olup çelişki yaşayacaklardır. Bu çalışma ile devreler çalışma modlarına ayrılarak akım denklemleri bulunmuş, devrenin tüm performans parametreleri hem rapor olarak hem de programın arayüzünde kullanıcılara sunulmuştur. Bunlara ek olarak bu çalışma ile öğrencilerin diğer programların detaylarını önceden bilme zorunluluğu ortadan kaldırılmış, bu sayede o programların fonksiyon ve metodlarını öğrenmek için harcadıkları zamanı tamamen konunun kavranması için kullanabilecekleri bir ortam sunulmuştur.

Hazırlanan eğitimsel bilgisayar paketi öğrencilerin eğitim kalitesini arttırmak amacıyla bir laboratuvar uygulaması olarak kullanılabilir gibi laboratuvar öncesi hazırlık için de kullanılabilir. Böylece öğrenci laboratuvar dersine ne yapacağını bilerek özgüveni artmış bir şekilde gelir. Bu uygulama laboratuvar dersi veya öncesi kullanılacağı için öğrencinin doğru cevabı bulana kadar yapmış olduğu hatalardan ne kendisi ne de cihazlar zarar görecektir.

Uzaktan eğitim uygulaması olan birçok üniversite için laboratuvar dersleri bir problem teşkil etmektedir. Çünkü uzaktan yapılan bir laboratuvar dersi uygulaması henüz yaygınlaşmamıştır. Hazırlanan bu bilgisayar paketi, uzaktan eğitim alan öğrencilere de laboratuvar uygulaması yapabilmelerine olanak sağlamaktadır.

Sonuç olarak bu eğitim paketiyle öğrencilerin güvenli bir şekilde zaman ve mekân kısıtlaması olmadan daha kaliteli, anlaşılabilir bir eğitim alması amaçlanmıştır. Bunun için herhangi bir programlama dili bilmeye gerek kalmadan basit bir arayüz ile bir yazılım geliştirilmiş ve anlaşılabilirliği arttırmak adına devreler çalışma modlarına ayrılmıştır. Bu uygulama laboratuvar imkânı olan üniversitelere laboratuvar öncesi hazırlık uygulaması olarak önerilmektedir.

## KAYNAKLAR

1. Mutlu, G., “Uzaktan erişimli güç elektroniği laboratuvarı”, Yüksek Lisans Tezi, *Gazi Üniversitesi Fen Bilimleri Enstitüsü*, Ankara, 1-10 (2012).
2. İnternet: Doğu Akdeniz Üniversitesi, Elektrik Elektronik Mühendisliği IEEE Kulübü Resmi Web Sitesi, “Güç Elektroniği Nedir?”, [http://ieee.emu.edu.tr/index.php?option=com\\_content&view=article&id=65:güec-elektronii-nedir-&catid=44:güec-elektronii-genel&Itemid=67](http://ieee.emu.edu.tr/index.php?option=com_content&view=article&id=65:güec-elektronii-nedir-&catid=44:güec-elektronii-genel&Itemid=67) (2013).
3. Okumuş, İ. H., “Güç elektroniği I”, Güç Elektroniği I Ders Notları, *Karadeniz Teknik Üniversitesi Elektrik-Elektronik Mühendisliği Bölümü*, Trabzon (2013).
4. Salehfar, H., “State-of the-art power electronics, electric drivers and renewable energy systems laboratories at the University of North Dakota” , *IEEE Power Engineering Society General Meeting*, North Dakota, USA, 261-265 (2005).
5. Bingöl, O., “Güç Elektroniği Ders Notları”, *Süleyman Demirel Üniversitesi, Elektrik-Elektronik Mühendisliği Bölümü*, Isparta (2014).
6. Rahimo, M. T., Semicond M., Chamund, D. J., and Shamma N. Y. A., “Analysis of the IGBT/freewheeling diode switching behaviour during turn-on in hard switching applications”, *Power Electronics and Variable Speed Drives, 1998. Seventh International Conference*, London, 381-386 (1998).
7. Bayhan, S., ve Demirbaş, Ş., “LabVIEW ile internet tabanlı sanal laboratuvar uygulaması”, *e-Journal of New World Sciences Academy*, 120-135 (2009).
8. Tanel, Z., ve Önder F., “Elektronik laboratuvarında bilgisayar simülasyonları kullanımının öğrenci başarısına etkisi: diyot deneyleri örneği” *Dokuz Eylül Üniversitesi Buca Eğitim Fakültesi Dergisi*, 27: 101-110 (2010).
9. Tanyıldızı, E. ve Orhan, A., “Sanal elektrik makinaları laboratuvarı için fırçasız doğru akım motoru uygulaması” *Elektrik Elektronik Bilgisayar Mühendisliği Sempozyumu, (ELECO 2004)*, Bursa, 117-121 (2004).
10. Khan, M. A., Siddiqui, A. W., ve Abdul-Majid, M., “Interactive learning for waveform dynamics of diode rectifiers and rc filter in dc power supply”, *34th Annual Conference of IEEE Industrial Electronics*, Orlando, Florida, 3530-3534 (2008).

11. Yiğit, T., ve Elmas, Ç., “Eviriciler için bilgisayar temelli eğitim laboratuvarı” **Gazi Üniversitesi Endüstriyel Sanatlar Eğitim Fakültesi Dergisi**, 21: 128-140 (2007).
12. Hart, D. W., “Circuit Simulation as an aid in teaching the principles of power electronics” **IEEE Transactions on Education**, 36 (1): 10-16 (1993).
13. Khader S., Hadad A., and Akram A. A., “The application of Psim & Matlab-Simulink in power electronics courses”, **IEEE Global Engineering Education Conference (EDUCON)**, Amman, Ürdün (Jordan), 118-121 (2011).
14. Işık, H., Özgönenel, O., ve Sungur, C., “Güç elektroniği devrelerinin benzeşiminde kullanılan bilgisayar teknikleri”, **Teknik-Online Dergi**, sayı: 3 (1), 9-13 (2004).
15. Hayt, W. H. ve Kemmerly, J. E., “Engineering Circuit Analysis 2nd ed.”, **Mc. Graw Hill**, New York, USA, 290-309 (1971).
16. Burden R. L. and Faires D. J., “Numerical analysis 9th ed.”, **Brooks/Cole Cengage Learning**, USA (2010).
17. Akbaba, M., Nassimi, S., and Qamber, I., “Accurate formula for the conduction angle of single phase voltage controllers and controlled rectifiers with inductive loads” **Modelling, Measurement & Control**, 3 (59): 41-46 (1995).
18. Adams, R. A., “Calculus A Complete Course 7th Ed.”, **Pearson**, Toronto, Canada, 536-548 (2010)
19. Hart, D. W., “Inverters”, Power Electronics, **Mc. Graw Hill**, New York, 331-340 (2010).
20. Akbaba, M., “Danışman ile ikili istişare”, Röportaj, **Karabük Üniversitesi Bilgisayar Mühendisliği Bölümü**, Karabük (2013).
21. Hart, D. W., “Three phase rectifiers”, Power Electronics, **Mc. Graw Hill**, New York, 144-150 (2010).

## **ÖZGEÇMİŞ**

İbrahim ATLI 1989 yılında Balıkesir’de doğdu; ilk ve orta öğretimini Manisa Akhisar Misak-ı Milli Ali Şefik İlköğretim okulunda tamamladı. 2003 yılında girdiği Akhisar Anadolu Lisesi Fen Bilimleri bölümünden 2007 yılında mezun oldu. Aynı yıl Eskişehir Anadolu Üniversitesi %100 İngilizce Elektrik-Elektronik Mühendisliği lisans programına yerleşti. 2008 yılında çift anadal programıyla Bilgisayar Mühendisliği Bölümü’nde eğitim gördü. 2012 yılında iki bölümden de mezun oldu. Aynı yıl ÖYP kapsamında Karabük Üniversitesi Bilgisayar Mühendisliği Bölümü Yazılım Anabilim Dalı’na araştırma görevlisi olarak atandı ve Bilgisayar Mühendisliği Bölümü’nde yüksek lisansa başladı. Şu anda Yıldırım Beyazıt Üniversitesi Bilgisayar Mühendisliği Bölümü’nde araştırma görevlisi olarak çalışmaktadır.

### **ADRES BİLGİLERİ**

Adres : Yıldırım Beyazıt Üniversitesi  
Bilgisayar Mühendisliği Bölümü  
Çankırı Cd. Çiçek Sk. No:3 Ulus / ANKARA

Tel : +90 (555) 720 2173

E-posta : iatli@ybu.edu.tr