



**T.C.**  
**Uludağ Üniversitesi**  
**Fen Bilimleri Enstitüsü**

**WEB TABANLI GÜÇ ELEKTRONİĞİ SANAL LABORATUVARI**

**Nedim Aktan YALÇIN**

**Yüksek Lisans Tezi**

**WEB TABANLI GÜÇ ELEKTRONİĞİ  
SANAL LABORATUVARI**

**Nedim Aktan YALÇIN**



T.C.  
ULUDAĞ ÜNİVERSİTESİ  
FEN BİLİMLERİ ENSTİTÜSÜ

**WEB TABANLI GÜÇ ELEKTRONİĞİ SANAL LABORATUVARI**

**Nedim Aktan YALÇIN**

Doç. Dr. Fahri VATANSEVER  
(Danışman)

YÜKSEK LİSANS TEZİ  
ELEKTRONİK MÜHENDİSLİĞİ ANABİLİM DALI

BURSA – 2014

**Her Hakkı Saklıdır**

## TEZ ONAYI

Nedim Aktan Yalçın tarafından hazırlanan “Web Tabanlı Güç Elektroniği Sanal Laboratuvarı” adlı tez çalışması aşağıdaki jüri tarafından oy birliği ile Uludağ Üniversitesi Fen Bilimleri Enstitüsü Elektronik Anabilim Dalı’nda **YÜKSEK LİSANS TEZİ** olarak kabul edilmiştir.

**Danışman** : Doç. Dr. Fahri VATANSEVER

<b>Başkan :</b>	Prof. Dr. Güneş YILMAZ Uludağ Üniversitesi Mühendislik Fakültesi Telekomünikasyon Anabilim Dalı	İMZA
<b>Üye :</b>	Doç. Dr. Fahri VATANSEVER Uludağ Üniversitesi Mühendislik Fakültesi Devreler ve Sistemler Anabilim Dalı	İMZA
<b>Üye :</b>	Yrd. Doç. Dr. Cemal HANİLÇİ Bursa Teknik Üniversitesi, Doğa Bilimleri Mimarlık ve Mühendislik Fakültesi Elektrik Elektronik Mühendisliği Anabilim Dalı	İMZA

**Yukarıdaki sonucu onaylarım**

**Prof. Dr. Ali Osman DEMİR**  
**Enstitü Müdürü**

.../.../....



**U.Ü. Fen Bilimleri Enstitüsü, tez yazım kurallarına uygun olarak hazırladığım bu tez çalışmada;**

- tez içindeki bütün bilgi ve belgeleri akademik kurallar çerçevesinde elde ettiğimi,
- görsel, işitsel ve yazılı tüm bilgi ve sonuçları bilimsel ahlak kurallarına uygun olarak sunduğumu,
- başkalarının eserlerinden yararlanılması durumunda ilgili eserlere bilimsel normlara uygun olarak atıfta bulunduğumu,
- atıfta bulunduğum eserlerin tümünü kaynak olarak gösterdiğimi,
- kullanılan verilerde herhangi bir tahrifat yapmadığımı,
- ve bu tezin herhangi bir bölümünü bu üniversite veya başka bir üniversitede başka bir tez çalışması olarak sunmadığımı

**beyan ederim.**

16/06/2014

**Nedim Aktan Yalçın**

## ÖZET

Yüksek Lisans Tezi

### WEB TABANLI GÜÇ ELEKTRONİĞİ SANAL LABORATUVARI

**Nedim Aktan YALÇIN**

Uludağ Üniversitesi

Fen Bilimleri Enstitüsü

Elektronik Mühendisliği Anabilim dalı

**Danışman:** Doç. Dr. Fahri VATANSEVER

Mühendislik eğitiminde, derste öğrenilen teorik bilgilerin uygulamaya dökülmesi, konuların kavranması açısından son derece önemlidir. Derste öğrenilen bilgilerin uygulamaya dökülmesi de daha çok laboratuvar çalışmalarıyla mümkün olmaktadır. Ancak laboratuvar imkânlarının kısıtlı olması, fiziksel olarak yüksek kurulum ve bakım maliyetleri gerektirmesi, yetersiz laboratuvar ekipmanlarından dolayı uygulama süresine ayrılan vaktin az olması, derse katılan kişi sayısının fazla olması gibi olumsuzluklar ortaya çıkabilmektedir. Bunları gidermek amacıyla yazılım tabanlı sanal laboratuvarlardan faydalanılabilmektedir.

Bu tez çalışmasında Elektrik-Elektronik Mühendisliği alanındaki Güç Elektroniği dersine yönelik sanal laboratuvar tasarımı gerçekleştirilmiştir. Bu sanal laboratuvar, güç elektroniği alanında beş ana konuyu içermektedir: doğrultucu devreleri, konvertörler, invertörler, frekans dönüştürücüler ve güç kaynakları. Doğrultucu devreleri modülü bir veya üç fazlı, yarım veya tam dalga, diyotlu veya tristörlü, omik veya endüktif yüklü devrelerden oluşmaktadır. Konvertörler modülü ideal kıyıcı ve buck, boost, buck-bost, devrelerinden oluşurken invertörler modülü kare ve boşluklu kare dalga ile darbe genlik modülasyonu ile çalışan devreleri içermektedir. Frekans dönüştürücü modülünde bir faz-bir faz ve üç faz-bir faz frekans dönüştürücü devreleri yer alırken güç kaynakları modülünde yedi adet farklı işaret gerilim üretici mevcuttur. Konu anlatımları ve animasyonlarla desteklenen sanal laboratuvar da rapor hazırlama, çevrimiçi destek gibi modüller de yer almaktadır.

**Anahtar Kelimeler:** Güç elektroniği, sanal laboratuvar, bilgisayar destekli mühendislik, bilgisayar destekli eğitim

**2014, xiv + 206 sayfa.**

## **ABSTRACT**

MSc Thesis

### **WEB BASED POWER ELECTRONIC VIRTUAL LABORATORY**

**Nedim Aktan YALÇIN**

Uludağ University  
Graduate School of Natural and Applied Sciences  
Department of Electronics Engineering

**Supervisor:** Assoc. Prof. Dr. Fahri VATANSEVER

It is extremely important to realize experiments of theoretical knowledge acquiring in the lectures for ensuring permanence of information in the field of electrical electronic engineering. Experimenting in the laboratories is the only way to reinforce informations which learned in courses. But this experimentations which carried out in real laboratories create some problems. The most important issues of experimenting in real laboratory are allocating less time for applications because of insufficient laboratory equipments, high range of participants in laboratory environment and construction cost of real laboratories. In this thesis, web based virtual power electronic laboratory is designed in order to overcome all these problems.

In this thesis, web based virtual laboratory is designed for power electronics courses in the field of electrical electronic engineering. The designed simulator contains five important topics about the field of power electronics, respectively, rectifiers, converters, inverters, frequency converters and power supplies. Rectifiers circuits comprise subcircuits which contain half wave rectifier-full wave rectifier connections, diode-thyristor based components, inductive-ohmic load types, single phase-three phase link. Converter section has four circuit simulations, respectively, buck, buck-boost, boost and ideal chopper circuit. Inverter simulations are based on modulation types which are square wave inverter, modified square wave inverter and pulse width modulation inverter. In Frequency converters section, single phase- single phase and three phase-single phase topology is prepared. Power supplies consist of seven different voltage generators. Besides, the simulator which is supported with lecture notes and circuit animation has features, such as preparing reports, online support, etc.

**Key words:** Power electronics, virtual laboratory, computer aided engineering, computer aided instruction

**2014, xiv + 206 pages.**

## **ÖNSÖZ VE TEŞEKKÜR**

Bu tezin oluşum sürecinde, derin bilgi ve tecrübeleriyle bana yol gösteren, zaman zaman çalışmamın tıkanıdığı yerlerde, güler yüzüyle ve yönlendirmeleriyle yeni ufukları keşfetmemi sağlayan, bilimsel çalışma disiplini aşıl原因, danışman hocam Sayın Doç. Dr. Fahri Vatansever'e teşekkürü bir borç bilirim. Hayatım boyunca, maddi ve manevi desteklerini esirgemeyen, her zaman yanımda olan aileme teşekkür ederim.

Nedim Aktan Yalçın

16/06/2014

# İÇİNDEKİLER

Sayfa

ÖZET .....	i
ABSTRACT .....	ii
ÖNSÖZ VE TEŞEKKÜR .....	iii
İÇİNDEKİLER .....	iv
SİMGELER VE KISALTMALAR DİZİNİ.....	vii
ŞEKİLLER DİZİNİ.....	viii
ÇİZELGELER DİZİNİ .....	xiv
1. GİRİŞ .....	1
2. KURAMSAL TEMELLER .....	11
2.1. Güç Elektroniği Elemanları.....	11
2.1.1. Diyot.....	11
2.1.2. Schottky diyot .....	13
2.1.3. Silikon kontrollü doğrultucular .....	14
2.1.4. Diyak .....	16
2.1.5. Triyak .....	17
2.1.6. Silikon kontrollü anahtar .....	18
2.1.7. Kapıdan tıkanabilen tristör .....	18
2.1.8. Bipolar jonksiyon transistör .....	18
2.1.9. Metal oksit yarıiletken alan etkili transistör.....	22
2.2. Doğrultucular .....	24
2.2.1. Bir fazlı doğrultucular .....	25
2.2.1.1. Diyotlu ve omik yüklü YDD.....	25
2.2.1.2. Tristörlü ve omik yüklü YDD .....	26
2.2.1.3. Diyotlu ve endüktif yüklü YDD.....	27
2.2.1.4. Tristörlü ve endüktif yüklü YDD .....	28
2.2.1.5. Diyot, SGD’li ve endüktif yüklü YDD .....	29
2.2.1.6. Tristör, SGD’li ve endüktif yüklü YDD .....	30
2.2.1.7. Diyotlu omik yüklü KD .....	31
2.2.1.8. Tristörlü ve omik yüklü KD .....	32
2.2.1.9. Diyotlu ve endüktif yüklü KD.....	33
2.2.1.10. Tristörlü ve endüktif yüklü KD.....	34
2.2.1.11. Diyot, SGD’li ve endüktif yüklü KD .....	35
2.2.1.12. Tristör, SGD’li ve endüktif yüklü KD .....	37
2.2.2. Üç fazlı doğrultucular .....	37
2.2.2.1. Üç fazlı kaynak ile omik yükte diyotlu doğrultucu.....	38
2.2.2.2. Üç fazlı kaynak ile endüktif yükte diyotlu doğrultucu.....	39
2.2.2.3. Üç fazlı kaynak ile omik yükte tristörlü doğrultucu .....	40
2.2.2.4. Üç fazlı kaynak ile endüktif yükte tristörlü doğrultucu .....	42
2.3. Konvertörler .....	43
2.3.1. DA DA kıyıcı devresi.....	44
2.3.2. Düşürücü (BUCK) konvertör .....	45
2.3.3. Yükseltici (BOOST) konvertör .....	48
2.3.4. Yükseltici düşürücü (BUCK-BOOST) konvertör.....	50
2.3.5. CUK konvertör.....	52

2.4. İnvörtörler.....	54
2.4.1. Bir fazlı yarım dalga invörtörler.....	55
2.4.2. Bir fazlı tam dalga invörtörler.....	62
2.4.3. DGM invörtörler.....	64
2.5. Frekans Dönüştürücüler.....	67
2.5.1. Bir faz-bir faz frekans dönüştürücüler.....	68
2.5.2. Üç faz-bir faz frekans dönüştürücüler.....	71
2.5.3. Üç faz-üç faz frekans dönüştürücüler.....	74
2.6. Güç Kaynakları.....	75
2.6.1. Fourier analizi.....	76
2.6.2. Harmonik analiz.....	79
2.6.3. Dirac delta fonksiyonu.....	79
2.6.4. Birim basamak fonksiyonu.....	80
2.6.5. Dikdörtgen fonksiyonu.....	81
2.6.6. Üçgen fonksiyonu.....	81
2.6.7. Rampa fonksiyonu.....	82
3. MATERYAL VE YÖNTEM.....	83
3.1. MATLAB Programı.....	87
3.1.1. MATLAB ile doğrultucu simülasyonu.....	88
3.1.2. MATLAB ile konvertör simülasyonu.....	92
3.1.3. MATLAB ile invörtör simülasyonu.....	97
3.1.4. MATLAB ile frekans dönüştürücü simülasyonu.....	98
3.1.5. MATLAB ile güç kaynağı simülasyonu.....	106
3.2. ASP.NET Programı.....	107
3.2.1. ASP.NET proje oluşturma.....	107
3.2.2. ASP.NET MATLAB ile bağlantı kurulumu.....	108
3.2.3. ASP.NET simülasyon programı sayfalarının hazırlanması.....	113
3.3. IIS.....	126
4. UYGULAMALAR.....	130
4.1. Doğrultucu Simülasyonları.....	130
4.1.1. Bir faz omik yükte diyot ile gerçekleştirilmiş YDD.....	130
4.1.2. Bir faz omik yükte tristör ile gerçekleştirilmiş YDD.....	131
4.1.3. Bir faz endüktif yükte diyot ile gerçekleştirilmiş YDD.....	131
4.1.4. Bir faz endüktif yükte tristör ile gerçekleştirilmiş YDD.....	131
4.1.5. Bir faz SGD ile endüktif yüklü diyot YDD.....	131
4.1.6. Bir faz SGD ile endüktif yüklü tristör YDD.....	133
4.1.7. Bir faz omik yüklü diyot ile gerçekleştirilmiş KD.....	139
4.1.8. Bir faz omik yüklü tristör ile gerçekleştirilmiş KD.....	139
4.1.9. Bir faz endüktif yüklü diyot ile gerçekleştirilmiş KD.....	139
4.1.10. Bir faz endüktif yüklü tristör ile gerçekleştirilmiş KD.....	142
4.1.11. Bir faz endüktif yüklü diyot ile gerçekleştirilmiş SGD'li KD.....	142
4.1.12. Bir faz endüktif yüklü tristör ile gerçekleştirilmiş SGD'li KD.....	142
4.1.13. Üç fazlı kaynak ile omik yükte diyotlu doğrultucu.....	146
4.1.14. Üç fazlı kaynak ile endüktif yükte diyotlu doğrultucu.....	146
4.1.15. Üç fazlı kaynak ile omik yükte tristörlü doğrultucu.....	147
4.1.16. Üç fazlı kaynak ile omik yükte tristörlü doğrultucu.....	147
4.2. Konvertör Simülasyonları.....	147
4.2.1. DA-DA kıyıcı devresi simülasyonu.....	153

4.2.2. Düşürücü (BUCK) konvertör simülasyonu.....	153
4.2.3. Yükseltici (BOOST) konvertör simülasyonu.....	155
4.2.4. Yükseltici düşürücü (BUCK-BOOST) konvertör simülasyonu.....	155
4.3. İntertör Simülasyonları.....	156
4.3.1. Omik yükte kare dalga invertör simülasyonu .....	156
4.3.2. Omik yükte boşluklu kare dalga invertör simülasyonu .....	156
4.3.3. Endüktif yükte kare dalga invertör simülasyonu .....	158
4.3.4. Endüktif yükte boşluklu kare dalga invertör simülasyonu.....	159
4.3.5. Omik yük dgm invertör simülasyonu.....	160
4.3.6. Endüktif yük DGM invertör simülasyonu.....	164
4.4. Frekans Dönüştürücü Simülasyonları .....	164
4.4.1. Omik yükte bir faz bir faz frekans dönüştürücü simülasyonu .....	164
4.4.2. Endüktif yükte bir faz bir faz frekans dönüştürücü simülasyonu .....	172
4.4.3. Omik yükte üç faz bir faz frekans dönüştürücü simülasyonu .....	172
4.4.4. Endüktif yükte üç faz bir faz frekans dönüştürücü simülasyonu .....	172
4.5. Güç Kaynakları Simülasyonları .....	181
4.5.1. Birim Basamak üretici simülasyonu.....	181
4.5.2. Kare dalga üretici simülasyonu .....	181
4.5.3. Parabol dalga üretici simülasyonu.....	181
4.5.4. Rampa üretici simülasyonu .....	182
4.5.5. Sinüsoidal dalga üretici simülasyonu .....	182
4.5.6. Üçgen dalga üretici simülasyonu.....	182
4.5.7. Üç fazlı sinüsoidal dalga üretici simülasyonu .....	182
5. SONUÇLAR VE TARTIŞMA .....	190
KAYNAKLAR .....	201
ÖZGEÇMİŞ .....	205

## SİMGELER VE KISALTMALAR DİZİNİ

### Simgeler

$\Delta$   
 $u$   
 $\Pi$   
 $\Lambda$   
 $\mathcal{F}$

### Açıklama

Dirac Delta Fonksiyonu Simgesi  
Birim Basamak Fonksiyonu Simgesi  
Dikdörtgen Fonksiyonu Simgesi  
Üçgen Fonksiyonu Simgesi  
Fourier Dönüşüm Simgesi

### Kısaltmalar

AA  
AG  
AFD  
BDÖ  
BJT  
CCM  
DA  
DCM  
DGM  
FD  
FET  
FS  
GTO  
HFD  
HF<sub>n</sub>  
KD  
KFS  
KK  
LD  
MOSFET  
PSRL  
RMS  
SCR  
SGD  
SCS  
SMTP  
TFD  
TLD  
TTL  
TTLIC  
VLSI  
VPwrLab  
YDD

### Açıklama

Alternatif Akım  
Anot Kapısı  
Ayrık Fourier Dönüşümü  
Bilgisayar Destekli Öğrenim  
Bipolar Jonksiyon Transistör  
Continous Conduction Mode  
Doğru Akım  
Discontinous Conduction Mode  
Darbe Genlik Modülasyonu  
Fourier Dönüşümü  
Alan Etkili Transistör  
Fourier Serisi  
Kapıdan Tıkanabilen Tristör  
Hızlı Fourier Dönüşümü  
n. Harmoniğin Harmonik Faktörü  
Köprü Doğrultucu  
Kompleks Fourier Serisi  
Katot Kapısı  
Laplace Dönüşümü  
Metal Oksit Yarıiletken Alan Etkili Transistör  
Power Semiconductor Research Laboratory  
Etkin Değer  
Silikon Kontrollü Doğrultucu  
Serbest Geçiş Diyotu  
Silikon Kontrollü Anahtar  
Elektronik Posta Gönderme Protokolü  
Ters Fourier Dönüşümü  
Ters Laplace Dönüşümü  
Transistor Transistor Logic  
Transistör Transistor Logic Integrated Circuit  
Geniş Ölçekli Tümeleşik Devre Tasarımı  
Virtual Power Laboratory  
Yarım Dalga Doğrultucu



## ŞEKİLLER DİZİNİ

Sayfa

Şekil 1.1. PSRL laboratuvarında dünyanın ilk $1m\Omega$ direnç değeri altındaki MOSFET'i (Shen 2010) .....	4
Şekil 1.2. Schmidt-Walter Sanal Laboratuvarı (Walter 2008).....	4
Şekil 1.3. ETH Zurich güç elektroniği sanal laboratuvarı (Kolar 2010).....	5
Şekil 1.4. Dourmouth Üniversitesi Sanal Laboratuvarı (Sullivan 2003) .....	6
Şekil 1.5. College of Engineering Ilha of Solterira Sanal Laboratuvarı (College of Engineering Ilha Solterira 2010).....	6
Şekil 1.6. Uzaktan ve sanal elektrik mühendisliği laboratuvarı kavramı (Nurse ve Abecassis 1999) .....	7
Şekil 1.7. Generic, Interactive, Virtual and Remote Electrical Engineering Laboratory ara yüz görünümü.....	8
Şekil 1.8. Lab Volt Virtual Laboratory donanımı (Shanku1 ve ark. 2011) .....	8
Şekil 1.9. Volt Virtual Laboratory sanal ölçme ortamı (Shanku1 ve ark. 2011) .....	9
Şekil 2.1. Diyot sembolü (solda) ve diyot yapısı (sağda) (Anwar 2002).....	12
Şekil 2.2. Diyot, gerilim-akım karakteristiği (Anwar 2002'den değiştirilerek alınmıştır) .....	13
Şekil 2.3(a) Schottky diyot temel yapısı (b) Schottky diyot devre sembolü (Skvarenina ve Anwar 2001'den değiştirilerek alınmıştır) .....	13
Şekil 2.4.(a) SCR'nin devre sembolü (b)SCR'nin yapısı .....	14
Şekil 2.5 SCR karakteristiği (Rajashakara 2001'den değiştirilerek alınmıştır) .....	15
Şekil 2.6 SCR söndürme devresi ve çalışma grafikleri.....	16
Şekil 2.7.(a) Diyak devre sembolü (b) Diyak'ın yapısı (Anwar 2002'den değiştirilerek alınmıştır).....	16
Şekil 2.8. Diyak karakteristiği (Anwar 2002'den değiştirilerek alınmıştır).....	17
Şekil 2.9. (a) Triyak sembolü (b) Triyak yapısı (Anwar 2002) .....	17
Şekil 2.10. Triyakın karakteristiği (Anwar 2002) .....	17
Şekil 2.11. (a) SCS sembolü (b) SCS iç yapısı (Anwar 2002).....	18
Şekil 2.12. (a) GTO sembolü (b) GTO yapısı (Anwar 2002'den değiştirilerek alınmıştır) .....	18
Şekil 2.13. (a) pnp transistör (b) npn transistör.....	19
Şekil 2.14. npn ve pnp transistör yapıları (Hrishikesan 2013'den değiştirilerek alınmıştır).....	19
Şekil 2.15. BJT gerilim-akım karakteristiği (Anwar 2002'den değiştirilerek alınmıştır) .....	20
Şekil 2.16. BJT'nin kutuplanması (Anwar 2002) .....	21
Şekil 2.17. BJT DA yük çizgisi (Anwar 2002'den değiştirilerek alınmıştır).....	22
Şekil 2.18. MOSFET'in yapısı (Barkhordarian 2002'de değiştirilerek alınmıştır) .....	22
Şekil 2.19. MOSFET akım gerilim karakteristiği (Barkhordarian 2002) .....	23
Şekil 2.20 MOSFET transfer karakteristiği (Barkhordarian 2002).....	23
Şekil 2.21 MOSFET devre sembolü (Barkhordarian 2002'den değiştirilerek alınmıştır) .....	23
Şekil 2.22. BJT ve MOS'ların akım gerilim sınırlamaları (Barkhordarian 2002'den değiştirilerek alınmıştır).....	24
Şekil 2.23. Omik yükte diyot ile tasarlanan YDD devresi.....	25

Şekil 2.24. Tristör ile tasarlanmış omik yükte YDD devresi .....	26
Şekil 2.25. Endüktif yükte diyot ile tasarlanmış YDD devresi .....	27
Şekil 2.26. Endüktif yüklü tristör ile gerçekleştirilmiş YDD devresi .....	29
Şekil 2.27. SGD'li diyotla gerçekleştirilmiş YDD devresi .....	29
Şekil 2.28. SGD'li tristör ile gerçekleştirilmiş endüktif yüklü YDD devresi .....	30
Şekil 2.29. Omik yüklü diyot ile gerçekleştirilmiş KD devresi .....	31
Şekil 2.30. Omik yüklü tristör ile gerçekleştirilmiş KD devresi.....	32
Şekil 2.31. Endüktif yüklü diyot ile gerçekleştirilmiş KD devresi .....	34
Şekil 2.32. Endüktif yüklü tristör ile gerçekleştirilmiş KD devresi.....	35
Şekil 2.33. Endüktif yüklü diyot ile gerçekleştirilmiş SGD'li KD devresi.....	36
Şekil 2.34. Endüktif yüklü tristör ile gerçekleştirilmiş SGD'li KD devresi .....	37
Şekil 2.35. Üç fazlı kaynak ile omik yükte diyotlu doğrultucu devresi .....	39
Şekil 2.36. Üç fazlı kaynak ile endüktif yükte diyotlu doğrultucu devresi.....	39
Şekil 2.37. Üç fazlı kaynak ile endüktif yükte tristörlü doğrultucu devresi .....	41
Şekil 2.38. Üç fazlı kaynak ile endüktif yükte tristörlü doğrultucu devresi .....	42
Şekil 2.39. Omik yükte kıyıcı devresi .....	45
Şekil 2.40. Buck Konvertör Devresi .....	46
Şekil 2.41. Buck konvertör devresi CCM durumu dalga şekilleri (Czarkowski 2001) ..	46
Şekil 2.42. Yükseltici (boost) konvertör devre şeması .....	49
Şekil 2.43. Yükseltici boost konvertör devresine ait CCM durumu çalışma grafikleri (Czarkowski 2001).....	49
Şekil 2.44. Buck boost konvertör devre şeması .....	50
Şekil 2.45. Buck boost konvertör elemanları üzerindeki dalga biçimleri (Czarkowski 2001) .....	51
Şekil 2.46. CUK Konvertör Devresi .....	52
Şekil 2.47. CUK konvertör üzerindeki elemanların dalga şekilleri (Czarkowski 2001) ..	52
Şekil 2.48. Bir fazlı invertör devresi (Gastli 2011).....	55
Şekil 2.49. Q1 transistörü iletim durumundayken devrenin çalışması(Gastli 2011'den değiştirilerek alınmıştır).....	56
Şekil 2.50. Q2 transistörü iletim durumundayken devrenin çalışması(Gastli 2011'den değiştirilerek alınmıştır).....	56
Şekil 2.51. Yük üzerinde görülen gerilim ve akım grafikleri (Gastli 2011'den değiştirilerek alınmıştır).....	57
Şekil 2.52. Endüktif yüklü bir fazlı invertör devresi (Gastli 2011) .....	58
Şekil 2.53. Endüktif yüklü invertörde Q1'in kesime geçmesi (Gastli 2011'den değiştirilerek alınmıştır).....	59
Şekil 2.54. Endüktif yüklü invertörde Q2'in kesime geçmesi (Gastli 2011'den değiştirilerek alınmıştır).....	59
Şekil 2.55. Çıkış akımının, diyot ve transistör durumlarına bağlı grafiği (Gastli 2011'den değiştirilerek alınmıştır).....	60
Şekil 2.56. Bir fazlı tam dalga invertör devresi (Gastli 2011) .....	62
Şekil 2.57. Q1, Q2 anahtarları iletimde, Q3,Q4 anahtarları kesimde iken yük üzerinde dolaşan akım. (Gastli 2011'den değiştirilerek alınmıştır).....	63
Şekil 2.58. Q3, Q4 anahtarları iletimde, Q1,Q2 anahtarları kesimde iken yük üzerinde dolaşan akım. (Gastli 2011'den değiştirilerek alınmıştır).....	63
Şekil 2.59. Endüktif yükte, Q1,Q2'nin kesime geçtiği ve Q3,Q4'ün daha ilettime geçmediği durumda yük üzerindeki akım. (Gastli 2011'den değiştirilerek alınmıştır) ..	63

Şekil 2.60. Endüktif yükte, Q3,Q4'ün kesime geçtiği ve Q1,Q2'nin daha iletme geçmediği durumda yük üzerindeki akım (Gastli 2011'den değiştirilerek alınmıştır) ...	64
Şekil 2.61. Anahtarlama elemanları, diyotlar ve akımın zamana göre değerlendirilmesi (Gastli 2011'den değiştirilerek alınmıştır) .....	64
Şekil 2.62. DGM karşılaştırıcı devresi .....	66
Şekil 2.63. DGM taşıyıcı sinyali (yeşil renkli) ve elde edilmek istenen invertör çıkış sinyali (kırmızı renkli) (Ece ve ark. 2010'dan değiştirilerek alınmıştır) .....	66
Şekil 2.64. Çıkıştaki DGM sinyal (Ece ve ark. 2010'dan değiştirilerek alınmıştır) .....	66
Şekil 2.65. Frekans dönüştürücü blok diyagramı (Ozpineci ve Tolbert 2013'den değiştirilerek alınmıştır) .....	68
Şekil 2.66. Bir faz-bir faz frekans dönüştürücü .....	69
Şekil 2.67. Bir faz-bir faz frekans dönüştürücü dalga biçimleri (a) Giriş gerilimi, (b) sıfır tetikleme açısında çıkış gerilimi, (c) Tetikleme açısı 60 derece iken çıkış gerilimi, (d) Değişken tetikleme açılarında çıkış gerilimi (Ozpineci ve Tolbert 2013'den değiştirilerek alınmıştır) .....	69
Şekil 2.68. Üç faz-bir faz yarım dalga frekans dönüştürücü (Ozpineci ve Tolbert 2013'den değiştirilerek alınmıştır) .....	72
Şekil 2.69. Üç faz-bir faz tam dalga frekans dönüştürücü (Ozpineci ve Tolbert 2013'den değiştirilerek alınmıştır) .....	72
Şekil 2.70. Üç faz-bir faz frekans dönüştürücü dalga biçimleri (a) Pozitif konvertör çıkış gerilimi, (b) Kosinüs zamanlama dalgaları, (c) Negatif konvertör çıkış gerilimi (Ozpineci ve Tolbert 2013'den değiştirilerek alınmıştır) .....	73
Şekil 2.71. Üç faz-üç faz yarım dalga frekans dönüştürücü devresi (Ozpineci ve Tolbert 2013) .....	75
Şekil 2.72. Üç faz-üç faz tam dalga frekans dönüştürücü (Ozpineci ve Tolbert 2013) ..	76
Şekil 3.1. Doğrultucular bölümü altbaşlıkları .....	85
Şekil 3.2. Konvertörler bölümü altbaşlıkları .....	85
Şekil 3.3. İnvörtörler bölümü altbaşlıkları .....	85
Şekil 3.4. Frekans dönüştürücüler bölümü alt başlıkları .....	86
Şekil 3.5. Güç kaynakları bölümü altbaşlıkları .....	86
Şekil 3.6. .NET ortamı için dll dosyasının hazırlanması .....	87
Şekil 3.7 :NET ortamına aktarılacak sınıf fonksiyon yapısı .....	89
Şekil 3.8. .NET ortamı için <i>webfigure()</i> fonksiyonunun yapısı .....	89
Şekil 3.9. Doğrultucu devreleri genel akış şeması .....	91
Şekil 3.10. Yerel ağ üzerinde doğrultucu devreleri simülasyonu ekran görüntüsü .....	94
Şekil 3.11. Konvertör devreleri genel algoritması .....	99
Şekil 3.12. Yerel ağ üzerinde konvertör devreleri simülasyonu ekran görüntüsü .....	100
Şekil 3.13. İnvörtör devreleri boşluklu kare dalga üretim algoritması .....	101
Şekil 3.14. İnvörtör devreleri DGM dalga üretim algoritması .....	102
Şekil 3.15. Yerel ağ üzerinde invertör devreleri simülasyonu ekran görüntüsü .....	103
Şekil 3.16. Frekans dönüştürücü devresi genel algoritması .....	104
Şekil 3.17. Yerel ağ üzerinde frekans dönüştürücü devreleri simülasyonu ekran görüntüsü .....	105
Şekil 3.18. Yerel ağ üzerinde güç kaynakları simülasyonu ekran görüntüsü .....	106
Şekil 3.19. Microsoft Visual Studio karşılama ekranı .....	108
Şekil 3.20. ASP.NET yeni proje oluşturma .....	108
Şekil 3.21. MWArray.dll ve WebFigureServices.dll dosyalarının eklenmesi .....	109

Şekil 3.22. MWArray ve WebFigureServices dosyalarının barındırdığı isim uzaylarının eklenmesi.....	110
Şekil 3.23. Üretilen dll dosyasının referans olarak eklenmesi.....	110
Şekil 3.24. Üretilen dll dosyasının barındırdığı isim uzayının eklenmesi .....	111
Şekil 3.25 Belirtilen isim uzayı altında bulunan sınıf, türetilen calis nesnesi ve bu nesnenin sahip olduğu fonksiyonlar.....	111
Şekil 3.26. Matlabta oluşan figürleri çekebilmek için web.config'in yapılandırılması..	111
Şekil 3.27. WebFigureControl aracı.....	112
Şekil 3.28. Matlab referanslar eklendikten sonra, ASP.NET üzerinde yazılan program. ....	112
Şekil 3.29. Simülasyon programı üye giriş ekranı .....	113
Şekil 3.30. Üye giriş ekranı sisteme giriş algoritması.....	114
Şekil 3.31. Üyelerin sisteme girişi için program kodları .....	114
Şekil 3.32. Simülasyon programı üye kayıt ekranı .....	115
Şekil 3.33. Üyelerin, access data base kaydı için tablo tasarımı.....	115
Şekil 3.34. Üye kaydı algoritması .....	116
Şekil 3.35. Üye kaydı program kodları .....	117
Şekil 3.36. Taslak.master sayfasının kod görünümü .....	118
Şekil 3.37. Taslak.master sayfasının tasarım görünümü.....	118
Şekil 3.38. İzinsiz kullanıcı girişi yönlendirme algoritması .....	118
Şekil 3.39. Taslak.master.cs'te izinsiz kullanıcı girişini engelleme .....	119
Şekil 3.40. Oturum bitirme algoritması.....	119
Şekil 3.41. Taslak.master.cs oturum bitirme program kodları.....	119
Şekil 3.42. Simülasyon grafiklerini kaydetme algoritması .....	121
Şekil 3.43. Taslak.master.cs simülasyon grafiklerini kaydetme program kodları .....	122
Şekil 3.44. Sayfa gereksinimine göre butonların görünürlüğünü değiştiren algoritma	122
Şekil 3.45. Taslak.master.cs butonların görünürlüğünü ayarlayan program kodları ....	123
Şekil 3.46. yorum.aspx'ten alınan ekran görüntüsü.....	123
Şekil 3.47. tinymce editörünün, yorum.aspx sayfasına eklenmesi .....	124
Şekil 3.48. Resim galerisi oluşturma algoritması .....	125
Şekil 3.49. yorum.aspx.cs resim galerisi oluşturma program kodları.....	125
Şekil 3.50. IIS'in Windows'a yüklenmesi .....	127
Şekil 3.51. IIS uygulama havuzu yapılandırılması, 32 bit uygulamalarının etkinleştirilmesi ve sitenin .NET v4.0'da programlandırıldığı belirtilmesi.....	127
Şekil 3.52. SMTP protokolü ile elektronik posta gönderilme algoritması.....	128
Şekil 3.53. Belirlenen uygulama havuzunu kullanan sitenin eklenmesi.....	129
Şekil 3.54. Kurulan sitenin yönetilmesi .....	129
Şekil 4.1. Omik yüklü diyot ile gerçekleştirilen devrenin ilgili parametrelerine ilişkin sonuçları .....	132
Şekil 4.2. Doğrultucu devrelerine ait genel animasyon görüntüsü .....	133
Şekil 4.3. Doğrultucu devreleri konu anlatım ekranına ait ekran görüntüsü .....	133
Şekil 4.4. Omik yükte tristör ile gerçekleştirilen YDD devresi simülasyon sonuçları .	134
Şekil 4.5. Endüktif yüklü diyot ile gerçekleştirilmiş YDD devresinin simülasyon sonuçları.....	135
Şekil 4.6. Endüktif. yüklü tristör ile gerçekleştirilmiş YDD devresinin simülasyon sonuçları.....	136
Şekil 4.7. SGD'li endüktif yüklü diyot ile gerçekleştirilmiş YDD devresi simülasyon sonuçları.....	137

Şekil 4.8. SGD'li endüktif yüklü tristör ile gerçekleştirilmiş YDD devresi simülasyon sonuçları .....	138
Şekil 4.9. Omik yüklü diyotlu KD devresi simülasyon sonuçları .....	140
Şekil 4.10. Omik yüklü tristörlü KD devresi simülasyon sonuçları .....	141
Şekil 4.11. Endüktif yüklü diyot ile gerçekleştirilmiş KD simülasyon sonuçları .....	143
Şekil 4.12. Endüktif yüklü tristör ile gerçekleştirilmiş KD devresi simülasyon sonuçları. ....	144
Şekil 4.13. Endüktif yüklü diyot ile gerçekleştirilmiş SGD'li KD devresi simülasyon sonuçları .....	145
Şekil 4.14. Endüktif yüklü tristör ile gerçekleştirilmiş SGD'li KD devresi simülasyon sonuçları .....	148
Şekil 4.15. Üç fazlı kaynak ile omik yükte diyotlu doğrultucu devresi simülasyon sonuçları .....	149
Şekil 4.16. Üç fazlı kaynak ile endüktif yükte diyotlu doğrultucu devresi simülasyon sonuçları .....	150
Şekil 4.17. Üç fazlı kaynak ile endüktif yükte tristörlü doğrultucu devresi simülasyon sonuçları .....	151
Şekil 4.18. Üç fazlı kaynak ile endüktif yükte tristörlü doğrultucu devresi giriş gerilimi .....	152
Şekil 4.19. Konvertör devrelerine ait genel animasyon görüntüsü .....	153
Şekil 4.20. Omik yükte kıyıcı devresi, giriş gerilimi (mavi renk) ve elde edilen ortalama çıkış gerilimi (yeşil renk) .....	154
Şekil 4.21. Konvertör devreleri konu anlatım ekranına ait ekran görüntüsü .....	154
Şekil 4.22. Buck konvertör devresi simülasyonu .....	157
Şekil 4.23. Simülasyonun çalıştırılması sonucunda elde edilen yük üzerindeki gerilim grafiği .....	158
Şekil 4.24. $D=0.3$ alınması durumunda yük üzerindeki gerilim .....	159
Şekil 4.25. Doluluk oranı 0,5 değerinde iken buck boost konvertör simülasyonu ve çıkış gerilimi .....	160
Şekil 4.26. Doluluk oranı 0,8 değerinde iken buck boost konvertör çıkış gerilimi .....	161
Şekil 4.27. İnvörtör devrelerine ait genel animasyon görüntüsü .....	161
Şekil 4.28. Doluluk oranı 0,2 değerinde iken buck boost konvertör çıkış gerilimi .....	162
Şekil 4.29. İnvörtör devreleri konu anlatım ekranına ait ekran görüntüsü .....	162
Şekil 4.30. Kare dalga invertörde bir periyot içerisinde omik yük üzerindeki gerilim ve akım .....	163
Şekil 4.31. Boşluklu kare dalga invertör devresinde bir periyot içerisinde omik yük üzerindeki gerilim ve akım .....	165
Şekil 4.32. Kare dalga invertörde bir periyot içerisinde endüktif yük üzerindeki gerilim ve akım .....	166
Şekil 4.33. Boşluklu kare dalga invertör devresinde iki periyot içerisinde endüktif yük üzerindeki gerilim ve akım .....	167
Şekil 4.34. DGM simülasyon sayfasının omik yükte çalıştırılması ve elde edilen sonuçlar .....	168
Şekil 4.35. DGM simülasyon sayfasının endüktif yükte çalıştırılması ve elde edilen sonuçlar .....	169
Şekil 4.36. Frekans dönüştürücü devrelerine ait genel animasyon görüntüsü .....	170
Şekil 4.37. Frekans dönüştürücü devreleri konu anlatım ekranına ait ekran görüntüsü .....	170

Şekil 4.38. Taşıyıcı 5kHz iken elde edilmek istenen sinyal, taşıyıcı sinyal, DGM sinyali ve yük akımı.....	171
Şekil 4.39. Omik yükte, 0 derece tetikleme açısındaki bir faz-bir faz frekans dönüştürücü simülasyon sonuçları .....	173
Şekil 4.40. Omik yükte, 30 derece tetikleme açısındaki bir faz-bir faz frekans dönüştürücü simülasyon sonuçları .....	174
Şekil 4.41. Endüktif yükte, 0 derece tetikleme açısındaki bir faz-bir faz frekans dönüştürücü simülasyon sonuçları .....	175
Şekil 4.42. Endüktif yükte, 30 derece tetikleme açısındaki bir faz-bir faz frekans dönüştürücü simülasyon sonuçları .....	176
Şekil 4.43. Üç faz-bir faz omik yüklü frekans dönüştürücü 0 derece tetiklemede simülasyon sonuçları .....	177
Şekil 4.44. Üç faz-bir faz omik yüklü frekans dönüştürücü 60 derece tetiklemede simülasyon sonuçları .....	178
Şekil 4.45. Üç faz-bir faz endüktif yüklü frekans dönüştürücü 0 derece tetiklemede simülasyon sonuçları .....	179
Şekil 4.46. Üç faz-bir faz endüktif yüklü frekans dönüştürücü 60 derece tetiklemede simülasyon sonuçları .....	180
Şekil 4.47. Simülasyon çalıştırılırken girilen değerler, THD ve grafikler .....	183
Şekil 4.48. Güç kaynakları simülasyonlarına ait konu anlatım ekranına ait ekran görüntüsü.....	184
Şekil 4.49. Simülasyon çalıştırılırken girilen değerler, THD ve grafikler .....	184
Şekil 4.50. Simülasyon çalıştırılırken girilen değerler, THD ve grafikler .....	185
Şekil 4.51. Simülasyon çalıştırılırken girilen değerler, THD ve grafikler .....	186
Şekil 4.52. Simülasyon çalıştırılırken girilen değerler, THD ve grafikler .....	187
Şekil 4.53. Simülasyon çalıştırılırken girilen değerler, THD ve grafikler .....	188
Şekil 4.54. Simülasyon çalıştırılırken girilen değerler ve THD.....	189
Şekil 5.1. VPwrLab simülatörüne ve değerlendirme anketine erişilen site .....	196
Şekil 5.2. VPwrLab değerlendirme anketi soruları .....	196
Şekil 5.3. Değerlendirme anketi sonuçları için genel ekran görüntüsü.....	197

## ÇİZELGELER DİZİNİ

### Sayfa

Çizelge 5.1. VPwrLab özelliklerinin diğer simülatörlerle karşılaştırılması.....	195
Çizelge 5.2. Anket soruları ve katılımcıların verdiği cevaplar .....	197

## 1. GİRİŞ

Elektronik mühendisliği eğitiminde derste edinilen teorik bilginin uygulamaya dönüştürülmesi, konuların kavranması açısından vazgeçilmez bir zorunluluktur. Öğrenciler derslerde öğrendikleri kuramsal bilgileri ancak laboratuvar ortamında uygulayarak pekiştirebilirler. Birçok deneyin farklı parametrelerle tekrarlanması, edinilen bilginin sınanarak kalıcı hale getirilmesini sağlamaktadır. Fakat bu uygulamaların gerçek laboratuvarlarda yapılması, eğitim kurumları, öğrenciler ve öğretim görevlileri açısından bir takım sorunlar teşkil etmektedir. Bu sorunların en önemlileri, öğrenciler için laboratuvarı etkin kullanamamaları, öğretim görevlileri için öğrencilere ayırabileceği zaman ve eğitim kurumları içinse laboratuvarların kurulum maliyetidir. Gelişen simülasyon ve uzaktan erişim yazılımlarına bağlı olarak, belirtilen problemleri ortadan kaldırmak amacıyla, internet ağı üzerinden erişilebilen sanal laboratuvarlar oluşturulmaya başlanmıştır.

Sanal laboratuvarlarda, öğrencilerin derse gelme zorunluluğunun bulunmaması, öğrenciler açısından bir takım getiriler sağlamaktadır. Bu getirilerin başında serbest çalışma imkânı gelir. Serbest çalışma imkânına sahip olan bir öğrenci, bu dersi en iyi öğrenebileceği zamanı seçme özgürlüğüne sahiptir (Djordjevic ve ark. 2005). Çalışma başlangıç zamanının seçimi, öğrencinin öğrendiği bilgileri kalıcı hale getirebilmesi açısından oldukça önemlidir. Çalışma zamanının öğrenci tarafından seçilmesinin öğrenciye bir başka katkısı, laboratuvar deneylerini arkadaşlarıyla tartışma süresini uzatmasıdır. Bu, sorgulayarak öğrenmeyi beraberinde getirir ve edinilen bilgilerin kalıcılığını sağlar.

Sanal laboratuvarlar, bilgisayar ortamında gerçekleştirilir. Bilgisayar ortamında gerçekleştirilen her deney kayıt edilebilir. Gerçek ortamda kayıtlar, gözlemcinin notlarına kalmışken, sanal ortamda bilgisayar programına bırakılır. Her gözlemci, kullandığı ölçü aleti ve yürüttüğü ölçüm tekniğiyle hata yapar ve bunların her gözlemci için farklı olması kaçınılmazdır. Bilgisayar ortamı da ölçüm hatası yapar ancak yapılan hata, bütün gözlemciler için aynıdır. Bu sayede deneylerdeki tutarlılığın artması sağlanmış olur. Bilgisayar ortamında gerçekleştirilme ve kayıt etme özelliği, çeşitli deneylerin sonuçlarının karşılaştırılmasına da imkân sağlar. Karşılaştırmalar sayesinde sistemlerin çalışma mantığı daha iyi bir şekilde anlaşılır. Yeni sistemler, eski sistemler



referans alınarak tasarlanabilir. Var olan sistemler, bilgisayar ortamında analiz edilerek daha da iyileştirilebilir. Karşılaştırma etkin öğrenme yollarından birisidir.

Sanal laboratuvar kullanımı eğitim kurumlarının da daha etkin bir şekilde kullanılmasını sağlamaktadır. Eğitim kurumları, gerçek laboratuvarlarda yer sıkıntısı yüzünden, sınırlı zaman aralığında sınırlı sayıda öğrenciye eğitim verebilmektedir. Bu durum konuların iyi kavranmamasına neden olur. Eğitim kurumlarının sanal laboratuvar ile desteklenmesinin olumlu bir katkısı da, yatırım maliyetini azaltmasıdır. Gerçek laboratuvarlara her zaman ihtiyaç vardır. Ancak bu ihtiyaç, bir güç elektroniği dersi incelendiğinde en fazla 3 bölümlük bir deneyle sınırlı kalmaktadır. Gereksiz yere, sanal ortamda daha iyi öğrenilebilecek deney setlerine para harcanması, eğitim kurumları için bir israftır. Bu yatırımlar, çok sayıda öğrenciye sınırlı sürede eğitim verme zorunluluğunu getirdiği için etkili bir yatırım değildir. Bu yatırımların sanal laboratuvar projelerine harcanması daha akıllıcadır. Sanal laboratuvarlar, hem geniş bir sürede, hem de çok sayıda öğrenciye bilgi aktarma imkânına sahiptir ve yatırım miktarı, gerçek laboratuvarlara göre oldukça düşüktür.

Sanal laboratuvarlar eğitimciler açısından da önemli bir öğretim sistemidir. Gerçek laboratuvarlarda, çok sayıda öğrenciye kısa sürede yoğun bilgi miktarı aktarmaya çalışmak oldukça zor bir iştir. Bu durum eğitimciler için oldukça yorucudur. Sanal laboratuvarlar, öğrencilere esnek çalışma olanağı sunduğu gibi eğitimcilere de öğrenciler üzerinde rahat bir denetim olanağı vermektedir. Kısa sürede, eğitimci birçok öğrencinin çalışma performansını yazılım üzerinden inceleyebilir ve değerlendirmelerini bilgisayar üzerinden yapılabilir. Bu not verme sürecini de kısaltmaktadır ve eğitimciye birçok öğrencisine bilgilerini doğru bir şekilde aktardığı için manevi bir tatmin de sağlamaktadır.

Gerçek güç elektroniği laboratuvarları söz konusu olduğunda, bazı deneylerin elektrik çarpması gibi güvenlik problemlerine yol açabileceği açıktır. Çünkü deney yapan öğrenciler; henüz öğrenme aşamasında oldukları için, yüksek güç deneylerini uygularken, ciddi hatalar yapabilirler. Bu hatalar can kaybına bile neden olabilir. Her ne kadar laboratuvar ortamına girmeden önce öğrenciler uyarılsa da veya bütün güvenlik önlemleri alınsa da, bu tür deneylerin sanal güç laboratuvarı ortamında yapılması daha az risk taşımaktadır (Balamuralithara ve Woods 2008). Yüksek güç deneylerinin sanal

güç laboratuvarı ortamında yapılması, gerçek güç laboratuvarlarındaki güvenlik problemini ortadan kaldırılır ve gerçek laboratuvarlarda çalışmak için öğrenciye ön hazırlık sağlar.

Uzaktan erişilebilen laboratuvarlar, bilgisayar destekli öğrenim (BDÖ) kapsamı içinde yer alır. BDÖ, teorik derslerin, bilgisayar ortamındaki uygulamalarla pekiştirilmesine katkı sağlamaktadır. Özellikle, konunun kavranması için yapılması gereken deney sayısının veya öğrenci sayısının fazla olması durumunda, bu sistemlerin kullanıldığı görülmektedir. Linn'in haberleşme sistemleri alanındaki (Linn 2012) ve Bhunia'nın sinyal işleme alanındaki (Bhunia ve ark. 2004) çalışmaları buna örnek olarak verilebilir. Bilgisayar destekli yazılımın bir alt konusu olarak ele alınabilen uzaktan erişilebilen laboratuvarlar, eğitim faaliyeti için özel bir arayüzle tasarlanırlar ve bu tür yazılımlar son zamanlarda oldukça yaygınlaşmaktadır. Mekândan ve zamandan bağımsız çalışma olanağını beraberinde getiren bu yazılımlar, ağ tabanlı olarak öğrencilerin hizmetine sunulmaktadır (Stefanovic ve ark. 2010, Bayilmis 2012).

Sanal güç elektroniği laboratuvarlarının örneklerini incelemek, bu laboratuvarlar hakkında genel bir bilgi edinilebilmesi açısından önemlidir. Bu çalışmalardan önemli olanları incelendiğinde, öncelikli olarak Central Florida Üniversitesi tarafından güç elektroniği eğitiminde yararlanmak üzere hazırlanan bir uygulama göze çarpmaktadır. Uygulama Java programlama dili kullanılarak geliştirilmiştir ve kullanıcı etkileşimine izin verilmiştir. Öncelikle temel tasarımların verildiği uygulamada, doğru akım-doğru akım (DA-DA) konvertörler ve invertörler konuları geniş bir çerçevede ele alınmıştır. Java appletlerinden oluşan bu uygulamalar ancak internete bağlı iken çalıştırılabilmektedir. Devre parametrelerinin değiştirilmesine izin verilen çalışmada, devre üzerindeki akımın geçtiği yol da grafiklerle eş zamanlı gözlenebilmektedir. Bu çalışmanın içerisinden bir ekran görüntüsü Şekil 1.1'de sunulmaktadır. Bir MOSFET'in yapısının açıklanması ile ilgili bir uygulamadan alınmıştır (Shen 2010).



Şekil 1.1. PSRL laboratuvarında dünyanın ilk 1mΩ direnç değeri altındaki MOSFET'i (Shen 2010)

Diğer bir çalışma Prof. Dr. Ing Heinz Schmidt – Walter tarafından hazırlanmıştır ve ücretsiz kullanılabilir. Prof. Dr. Ing. Heinz Schmidt-Walter tarafından yapılan bu çalışmada Java programlama dili kullanılarak güç elektroniği alanındaki DA-DA çeviriciler konusu incelenmiştir. Burada da kullanıcılara devre parametrelerini değiştirerek farklı çalışma durumlarını inceleyebilme olanağı sunulmuştur. Ancak uygulamada yalnızca devreye ait sinyallerdeki değişim gözlenmektedir. Devrede kalıcı durum ve geçici durum yanıtları incelenmemektedir. DA-DA çeviriciler konusu genel formüllere bağlı kalınarak hazırlanmış, ayrıntıya inilmemiştir. Bu sanal laboratuvar öğrenciye konuyu genel olarak kavratma amacı gütmektedir, ayrıntılı tasarım için kullanılma imkânı yoktur. Çalışma ile ilgili ekran görüntüsüne Şekil 1.2'de yer verilmiştir (Walter 2008).

**Design of Switch Mode Power Supplies**

[Switch Mode Power Supplies | Copyrights | What is that, everything!](#)

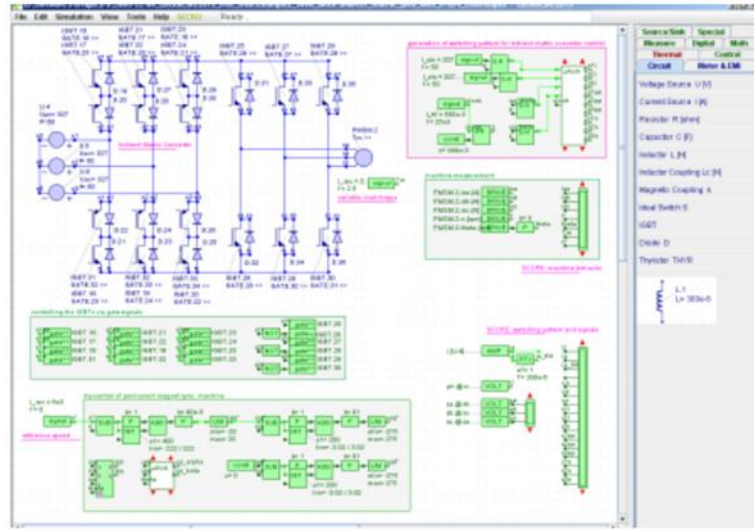
The following programs calculate the relevant currents and voltages for various switch mode power supplies and display these graphically. Furthermore the programs give suggestions for appropriate chocking coils and high frequency transformers.

Description	Type of power supply	Help
• a lower output voltage.	<a href="#">Buck Converter</a>	<a href="#">Help with the Buck-Step-down Converter</a>
• a higher output voltage.	<a href="#">Boost converter</a>	<a href="#">Help for the Boost converter</a>
• a negative voltage.	<a href="#">Buck-Boost converter</a>	<a href="#">Help for the Buck-Boost</a>
p to approx. 250 are possible.	<a href="#">Flyback converter</a>	<a href="#">Help for the Flyback converter</a>
p to approx. 100 W/Ans.	<a href="#">Simple Transistor Forward converter</a>	<a href="#">Help for the Simple Transistor Forward converter</a>

Şekil 1.2. Schmidt-Walter Sanal Laboratuvarı (Walter 2008)

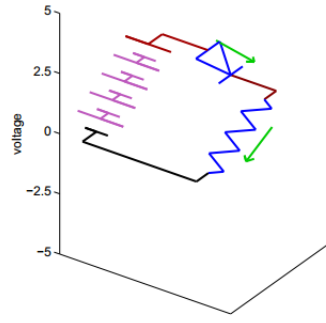
Bir başka çalışmada; Prof. Dr. Kolar, İsviçre ETH Zurich'te güç elektroniği derslerinin bir bölümünü sanal laboratuvar aracılığıyla vermektedir. İsviçre ETH Zurich'de

kullanıma sunulan bu çalışmada güç elektroniği dersinin temelleri Java appletleri ile anlatılmıştır. Java istemci bilgisayarda çalışan bir programlama dili olduğu için, bu çalışmada internet erişiminin sürekli olmasında zorunluluk bulunmamaktadır. Deney için kullanılacak devrenin istemci bilgisayara gönderilmesi ve yapılan çalışmanın raporunun ders sorumlusuna gönderilmesi esnasında internet bağlantısına ihtiyaç duyulmaktadır. Uygulama; İngilizce, Almanca, Fransızca, İspanyolca, Japonca, Çince olmak üzere birden fazla dilde kullanılabilir şekilde geliştirilmiştir. Java appletleri sınıfta ders anlatımında kullanılmak ve öğrencilere okuldan bağımsız çalışma ortamı sunmak üzere tasarlanmıştır. Uygulamaya ilişkin ekran görüntüsü Şekil 1.3’de görülmektedir (Kolar 2010).



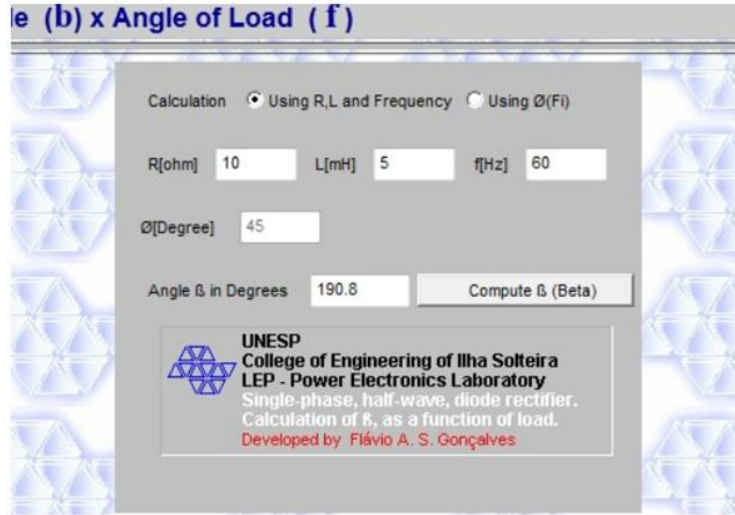
Şekil 1.3. ETH Zurich güç elektroniği sanal laboratuvarı (Kolar 2010)

Dourmouth üniversitesinde yapılan çalışmada ise 3 boyutlu animasyonlar kullanılmıştır. Bu üniversitede yapılan uygulamada güç elektroniği devrelerinin üç boyutlu simülasyonları geliştirilmiştir. Animasyonlar doğrultucular ve DA-DA çeviriciler devrelerine aittir ve MATLAB programında hazırlanmıştır. Simülasyonda üçüncü boyut, ilgili eleman üzerindeki gerilimi temsil etmek için kullanılmıştır. İstendiği takdirde, üçüncü boyut üzerinde akım yolları da gösterilebilmektedir. Öğrencinin ilgilendiği devre elemanı üzerinde çıkış gerilimini gösterilmesi eğitici bir amaç göstermektedir. Gerçekleştirilen uygulamaya ait ekran görüntüsü Şekil 1.4’de gösterilmiştir (Sullivan 2003).



Şekil 1.4. Dourmouth Üniversitesi Sanal Laboratuvarı (Sullivan 2003)

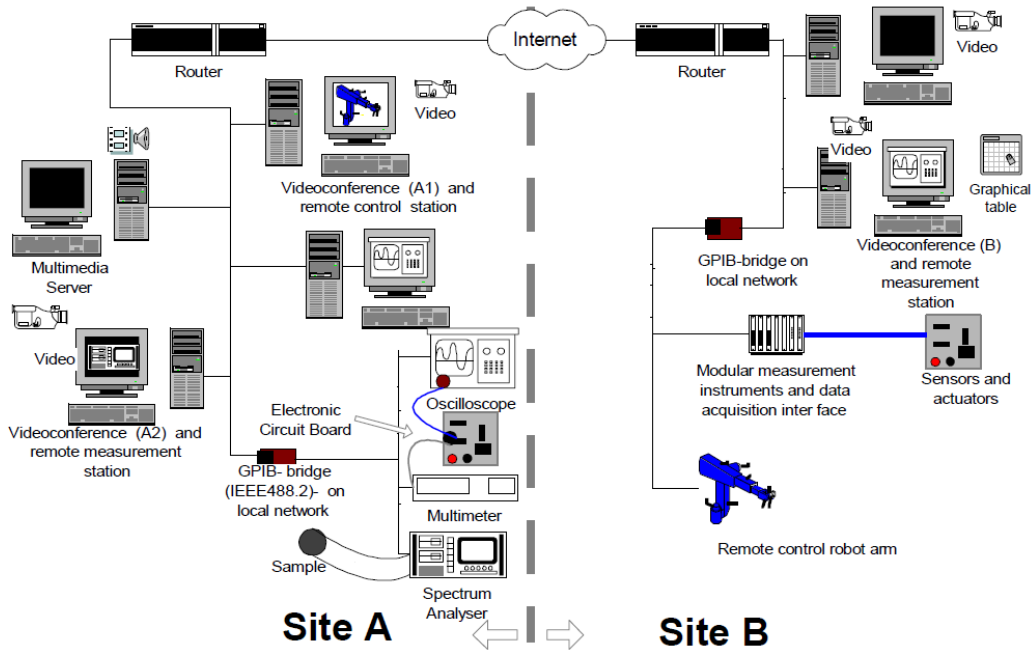
College of Engineering of Ilha Solterira tarafından gerçekleştirilen internetten erişilebilen uygulamada, güç elektroniğinin temel devreleri ve bu devrelerde kullanılan elemanların yapıları Java appletleri ile anlatılmıştır. Devrelerin kararlı durumlarının benzetimleri etkileşimli ve dinamik Java appletleri kullanılarak gerçekleştirilmiştir. İnternet üzerinden uzaktan eğitim uygulamalarının dışında sınıf ve laboratuvar çalışmalarında kullanıma yönelik olarak tasarlanmıştır. İncelenen bütün çalışmalarda devrelerin şekilleri üzerinde herhangi bir değişiklik yapılmasına izin verilmemiştir. Bu uygulamayı diğer uygulamalardan ayıran en önemli özellik, devrede kullanılacak yükün tipinin de kullanıcı tarafından belirlenebilmesidir. Bu uygulamaya ait ekran görüntüsü Şekil 1.5’de verilmektedir (College of Engineering Ilha Solterira 2010).



Şekil 1.5. College of Engineering Ilha of Solterira Sanal Laboratuvarı (College of Engineering Ilha Solterira 2010)

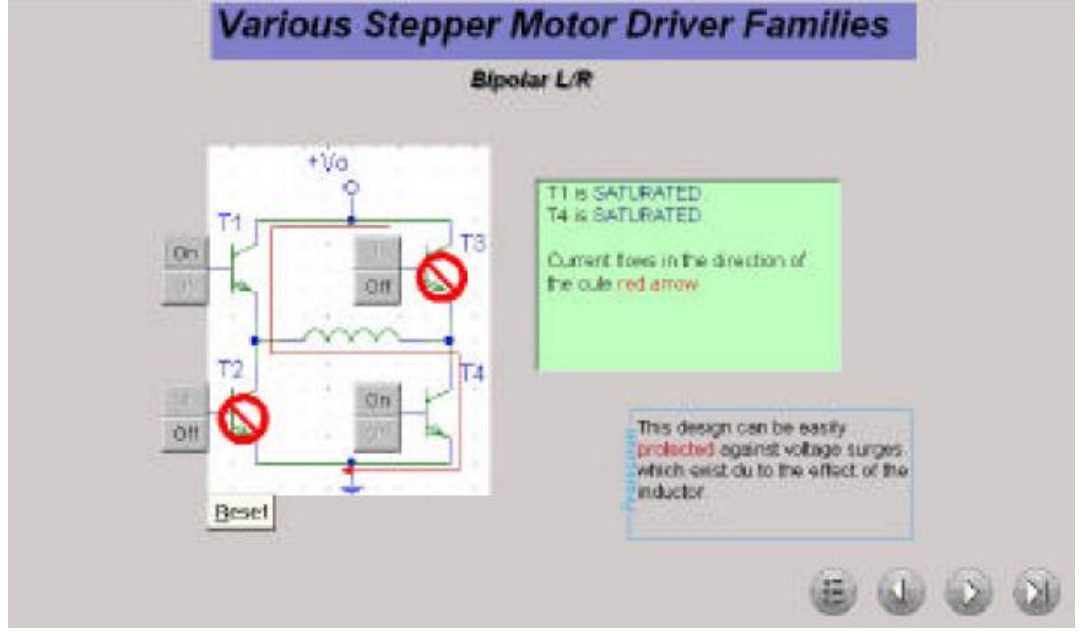
Bu noktaya kadar incelenen çalışmalar, sanal bir ortamda üretilen verileri, yine sanal ölçü aletleriyle incelemektedir. Buna karşılık gerçek bir laboratuvara; internet üzerinden

bağlanıp bu laboratuvarın gerçek deneylerinin sonuçlarını, bir yazılım ile bilgisayar üzerinde işleyen sanal laboratuvar çalışmaları da yapılmıştır (Tzafestas ve ark. 2006). Bu çalışmalardan biri, tamamen uzaktan eğitim veren bir üniversite olma iddiasıyla kurulmuş TELUQ üniversitesinde gerçekleştirilmiştir. Çalışma, uzaktan ve sanal elektrik mühendisliği laboratuvarı kavramının uygulanması amacıyla yapılmıştır. Uzaktan ve sanal elektrik mühendisliği laboratuvarı kavramı Şekil 1.6 'da gösterilmektedir (Nurse ve Abecassis 1999).



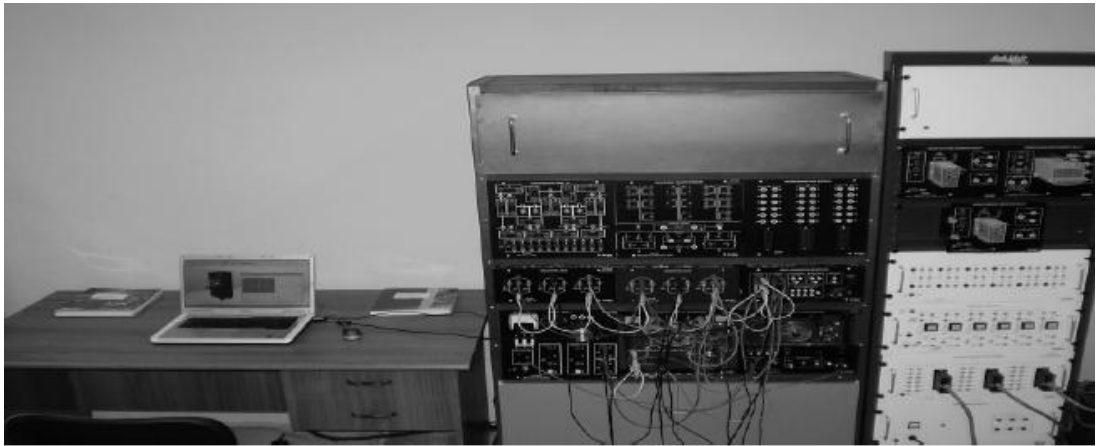
Şekil 1.6. Uzaktan ve sanal elektrik mühendisliği laboratuvarı kavramı (Nurse ve Abecassis 1999)

TELUQ üniversitesinde gerçekleştirilen çalışma, adım motorundan elde edilen verilerin sanal ortamda işlenmesi ile kullanıma sunulmuştur. Öğrenciler internet üzerinden adım motoruna komut vererek, deney için gerekli verileri alırlar ve bu verileri kişisel bilgisayarlarından eriştikleri tasarlanan sanal laboratuvar programında (Generic, Interactive, Virtual and Remote Electrical Engineering Laboratory) ilgili deney adımlarıyla değerlendirirler. Bunun sonucunda gerçek verilerden yola çıkıldığı için somut ve kalıcı öğrenme eylemi gerçekleştirilmiş olur. Tasarlanan programın ara yüzü, Şekil 1.7'de görülmektedir.

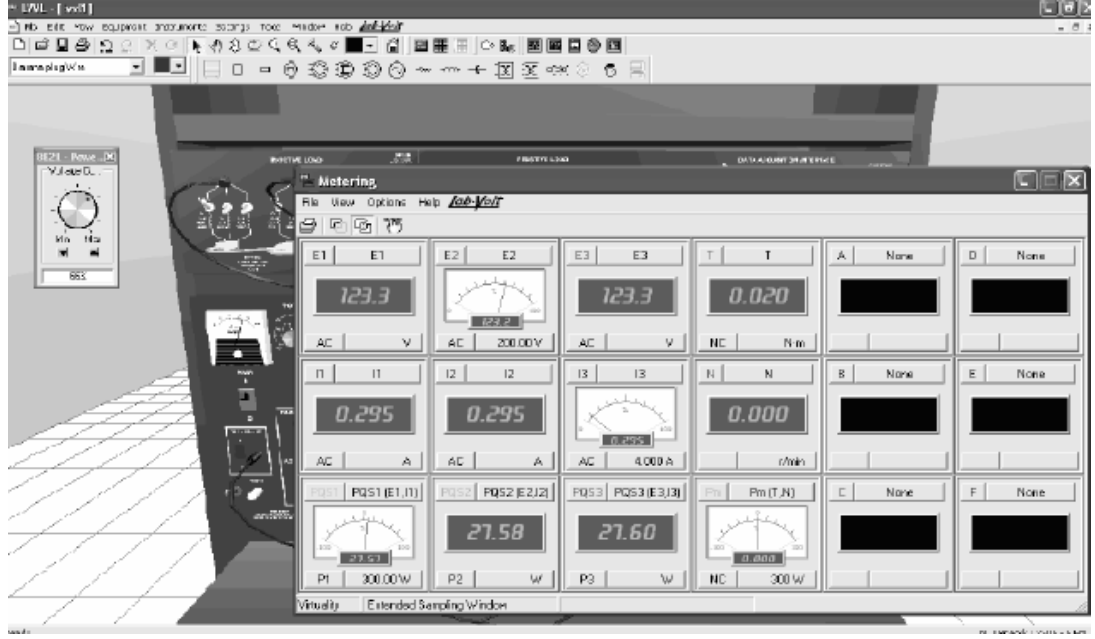


Şekil 1.7. Generic, Interactive, Virtual and Remote Electrical Engineering Laboratory ara yüz görünümü

Uzaktan ve sanal elektrik mühendisliği laboratuvarı ile ilgili yapılan çalışmalardan biri de Tirana Politeknik Üniversite'sinde gerçekleştirilmiştir. Bu çalışma da var olan laboratuvar modüllerini bilgisayar aracılığıyla kontrol etmekte ve bir yazılımla sanal ortamda deneyler gerçekleştirmektedir. Geliştirilen sisteme Lab Volt Virtual Laboratory ismi verilmiştir. Burada pasif güç elektroniği devre elemanları, üç fazlı sistemler, transformatörler ve elektrik motorlarının deneyleri yapılabilmektedir. Şekil 1.8'de sanal laboratuvarın donanımı görülmektedir. Şekil 1.9'da sistemin çalışması esnasında sanal ölçme sayfası gösterilmiştir (Shanku1 ve ark. 2011).



Şekil 1.8. Lab Volt Virtual Laboratory donanımı (Shanku1ve ark. 2011)



Şekil 1.9. Volt Virtual Laboratory sanal ölçme ortamı (Shanku1 ve ark. 2011)

Bu tezde; doğrultucu devreleri, konvertörler, invertörler, frekans dönüştürücüler ve güç kaynakları benzetimi yapılmıştır. Hazırlanan benzetim programının ismi Virtual Power Laboratory (VPwrLab) olarak belirlenmiştir. VPwrLab fiziksel bir ortamla etkileşimde değildir; bütün deneyler, sanal olarak gerçekleştirilmektedir. Yük tipi endüktif veya omik olan, köprü doğrultucu (KD) veya yarım dalga doğrultucu (YDD) özelliğine sahip, Serbest Geçiş Diyotu (SGD) ile kullanılabilen ve üç faz bir faz kaynak özelliğine sahip on altı adet doğrultucu devresi modellenmiştir. Doğrultucu devreleri, giriş gerilimi, yük gerilimi ve yük akımı özelliklerini grafiklerle gösterebilmekte, yük geriliminin ortalama ve etkin değerlerini kullanıcıya verebilmektedir. Konvertörler bölümünde kısıcı devresi, düşürücü konvertör, yükseltici konvertör, düşürücü-yükseltici konvertör benzetim sayfaları hazırlanmıştır. Kullanıcıya çıkış gerilimi grafik olarak sunulabilmekte, ayrıca çıkış geriliminin ortalama değeri ve dalgalanma gerilim değeri gösterilebilmektedir. Darbe Genlik Modülasyonu (Pulse Width Modulation, DGM), boşluklu kare dalga ve kare dalga tipinde, yük tipi ise endüktif veya omik olarak seçilebilen invertör devrelerinin benzetimi yapılmıştır. İnvirtörler bölümünde; giriş gerilimi, yük gerilimi ve yük akımı çizdirilebilmekte ve yük gerilim değerinin ortalama ve etkin değeri hesaplanabilmektedir. Üç faz-bir faz ve bir faz-bir faz frekans dönüştürücüleri, yük tipi omik veya endüktif olmak üzere ele alınmıştır. Giriş gerilimi ve çıkış gerilim ile akım grafikleri, frekans dönüştürücü devrelerinin benzetim sonucu olarak üretilebilmektedir.



Güç kaynakları simülasyonu bölümünde; üçgen dalga, parabol dalga, birim basamak dalga şekli, kare dalga, rampa biçimli dalga, sinüzoidal dalga ve üç fazlı sinüzoidal dalga olmak üzere yedi farklı güç kaynağı incelenmiştir. Güç kaynağı gerilim çizimleri, frekans spektrum grafikleri hızlı Fourier dönüşümü kullanılarak (HFD) elde edilebilmektedir. Simülasyonlar MATLAB ortamında hazırlanmış, daha sonra aspx tabanlı sayfalara referans yöntemi ile eklenerek ağ üzerinden kullanıma sunulmuştur. Ayrıca deney raporu hazırlamak, çevrimiçi destek alma gibi modüller de geliştirilen yazılıma dahil edilmiştir.

Geliştirilen VPwrLab sanal laboratuvarı Uludağ Üniversitesi Mühendislik Fakültesi Elektronik Mühendisliği bölümü öğrencilerinin kullanımına sunulmuş ve test edilmiştir. Öğrencilerin ankete verdikleri cevaplara göre iyileştirmeler yapılmıştır.

## **2. KURAMSAL TEMELLER**

Güç elektroniği sanal laboratuvarının hazırlanması, güç elektroniği devre elemanlarının ve bu elemanlarla gerçekleştirilen devrelerin kuramsal temellerinin anlaşılmasını gerektirir. Bu nedenle tezin bu bölümünde, ilgili eleman ve devrelerin çalışma prensipleri incelenecektir. Kuramsal olarak incelenen alt bölümler; güç elektroniği elemanları, güç kaynakları, doğrultucular, konvertörler, invertörler ve frekans dönüştürücüler kısımlarına ayrılmaktadır. Bu bölümde elde edilen devre çözümleri, simülasyonların gerçekleştirilmesi aşamalarında kullanılmıştır.

### **2.1. Güç Elektroniği Elemanları**

Güç elektroniği devrelerinin tasarımında, yarı iletken malzemelerden yapılmış güç elektroniği elemanlarından yararlanılmaktadır. Güç elektroniği elemanları, devrenin doğru ve hızlı çalışabilmesi açısından önemli rol oynarlar. Devrede kullanılan elemanlar; anahtarlama hızı, üzerlerine etkiyen gerilime dayanımları, akım taşıma kapasiteleri, anahtarlama işlemindeki verimleri, çalışma sırasında devreye verdikleri harmonik etkiler ve birçok durum açısından farklılık göstermektedir.

İncelenen alt bölümlerde kullanılan anahtarlama elemanları, ideal anahtarlar olarak kabul edilmiştir. Güç elektroniği simülatöründe tasarlanan devrelerin ideal anahtar kabulü ile modellenmesi; devrenin temel çalışma prensibinin, kullanılan anahtar çeşidinden bağımsız olmasını sağlamaktadır. Simülatörde kullanılan devrelerin çalışma ilkelerinin açıklanması böylelikle kolaylaşmıştır.

Güç elektroniği devrelerinde kullanılan güç elektroniği elemanları, pratik uygulamaları gerçeklerken çeşitli açılardan önem teşkil etmektedir. Bu bölümde, güç elektroniği elemanlarının içyapıları incelenerek matematiksel modelleri elde edilecek, devre gösterim sembolleri ve çalışma grafiklerine yer verilecek ve karakteristik özellikleri de açıklanacaktır.

#### **2.1.1. Diyot**

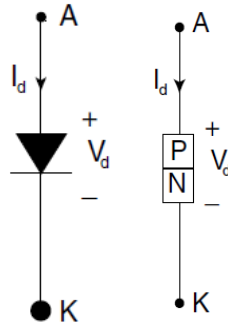
Güç diyotları, güç elektroniği devrelerinde önemli bir rol oynamaktadır. Temel olarak bir fazlı veya üç fazlı alternatif akım (AA) dalga biçimini DA dalga biçimine çevirmek amacıyla kullanılan kontrolsüz doğrultuculardır. Endüktif yüklerde akımın yönlendirilebilmesi için de kullanılır. Diyot için temel yapı malzemesi olarak genellikle

germanyum veya silikon kullanılır. Güç diyotlarında silikon daha çok tercih edilir; çünkü silikon diyotlar, germanyum diyotlara göre daha yüksek akım değerlerinde ve daha yüksek sıcaklarda çalışabilmektedirler. Yarıiletken diyotun sembolü

Şekil 2.1’de gösterilmiştir. İki ucu arasındaki gerilim ve geçirdiği akım sırasıyla  $V_d$  ve  $I_d$  olarak ifade edilmiştir.

Şekil 2.1 aynı zamanda diyotun yapısını da göstermektedir. Diyot, anot ve katot uçlarına sahiptir. pn jonksiyonu, p ve n tipi olmak üzere, iki tip yarıiletken malzemenin birleştirilmesiyle oluşturulmuştur. Anot ucu katot ucuna göre yüksek bir gerilime sahip olduğunda, diyot göreceli olarak düşük bir gerilimde akım iletmeye başlar. Bu durumda diyot ileri kutuplanmıştır. Katot ucu, anot ucuna göre yüksek bir gerilim seviyesine geldiğinde ise, pn jonksiyonu ters kutuplanmış olur ve akım akışı engellenir.

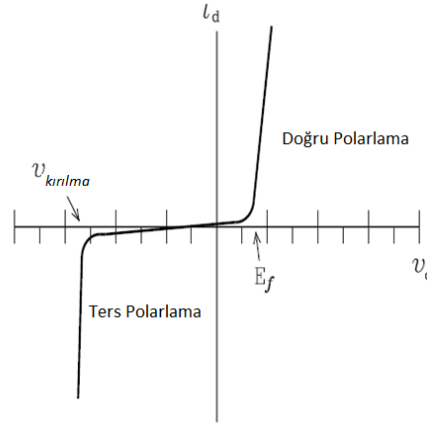
Şekil 2.1’deki ok sembolü, pratik olarak diyot iletimde iken akım akış yönünü göstermektedir.



Şekil 2.1. Diyot sembolü (solda) ve diyot yapısı (sağda) (Anwar 2002)

Diyotun akım-gerilim karakteristiği Şekil 2.2’de gösterilmiştir. Doğru polarlama bölgesinde iken anot katoda göre daha yüksek bir gerilim seviyesinde olduğu için diyot akım geçirecektir. Gerilimin değişimine göre akımın hızla yükseldiği nokta, (Şekil 2.2’de  $E_f$  ile gösterilen nokta) dirsek gerilimi olarak isimlendirilir. Silikon diyotlar için dirsek gerilimi 0,7V civarlarındadır. Dirsek geriliminin üzerindeki küçük gerilim değişimleri, diyot akımında yüksek akım değişimlerine neden olmaktadır. Eğer diyot akımı çok fazla yükselirse; açığa çıkan ısı, diyotun yapısını bozacaktır. Diyot ters polarlama bölgesinde çalışırken; kırılma gerilimini aşmayan gerilim bölgesinde ele alınan gerilim değerleri, sızıntı akımının akmasına sebep olur. Bu akım ihmal

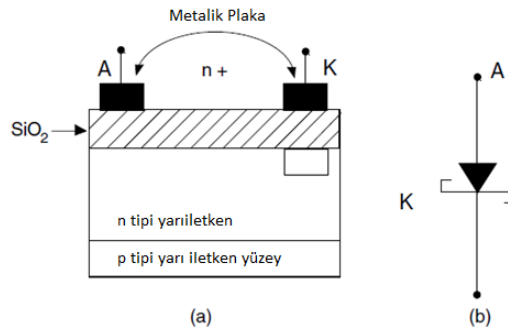
edilebilecek değerdedir. Eğer kırılma gerilimi geçilirse, diyot gerilimindeki ufak artışlar, buy akımların akmasına neden olur ve diyotun yapısı bozulur (Skvarenina ve Anwar 2001).



şekil 2.2. Diyot, gerilim-akım karakteristiği (Anwar 2002'den değiştirilerek alınmıştır)

### 2.1.2. Schottky diyot

Schottky diyot, aluminyum veya platinyum gibi metal bir plakaya n tipi yarıiletken bağlanılarak oluşturulur. Schottky diyotlar, yüksek hızlı anahtarlama gerektiren uygulamalar için tümleşik devrelerde sıklıkla kullanılırlar. Mikrodalga frekanslarında çalışan detektörler, yüksek hızlı anahtarlama uygulaması olarak örnek gösterilebilir. Schottky diyotu, pn jonksiyon diyotuna eş değer gerilim akım karakteristiğine sahiptir. Schottky diyotları, Transistor Transistor Logic (TTL) ailesine aittir ve standart Transistör Transistör Logic Integrated Circuit (TTLIC) iplerinin yayılma süresini azaltmak amacıyla tasarlanmışlardır. Schottky diyotun temel yapısı ve sembolü şekil 2.3'de gösterilmiştir (Skvarenina ve Anwar 2001).

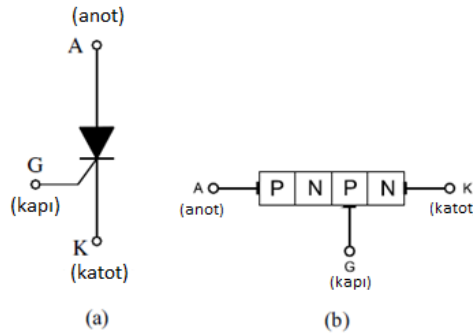


şekil 2.3(a) Schottky diyot temel yapısı (b) Schottky diyot devre sembolü (Skvarenina ve Anwar 2001'den değiştirilerek alınmıştır)

Schottky diyotun düşük gürültü karakteristiği, Doppler radar uygulamaları ve yüksek frekanslı detektör uygulamalarına benzer durumlar için ideal kılar. Schottky diyotun en önemli artlarından birisi de silikon diyotlara göre daha düşük gerilimde iletme geçmesidir. Ters kutuplanma durumunda; Schottky diyotun kırılma gerilimi ve kapasitans değeri, tek taraflı adım jonksiyonuna oldukça benzemektedir. Tek taraflı adım jonksiyonunda, yarı iletkendeki katkılama düzeyi kırılma gerilimini belirlemektedir. Diyot yüzeyinin saflığına bağlı olarak kırılma gerilimi, her zaman teorik hesaplanan değerden daha düşüktür (Anwar 2002).

### 2.1.3. Silikon kontrollü doğrultucular

Silikon Kontrollü Doğrultucular (SCR) güç elektroniği kontrol devrelerinde yaygın olarak kullanılırlar. Tristör olarak da adlandırılabilen SCR, elektrik akımını tek yönden iletmesinden dolayı bazen pnpn diyotu olarak isimlendirilir. Şekil 2.4 a, SCR'nin devre sembolünü göstermektedir. Anot (A), katot (K) ve kapı (G) olmak üzere üç ucu vardır. Anot ve katot güç uçları iken, kapı kontrol ucudur. Şekil 2.4 b'de SCR'nin yapısı görülmektedir.

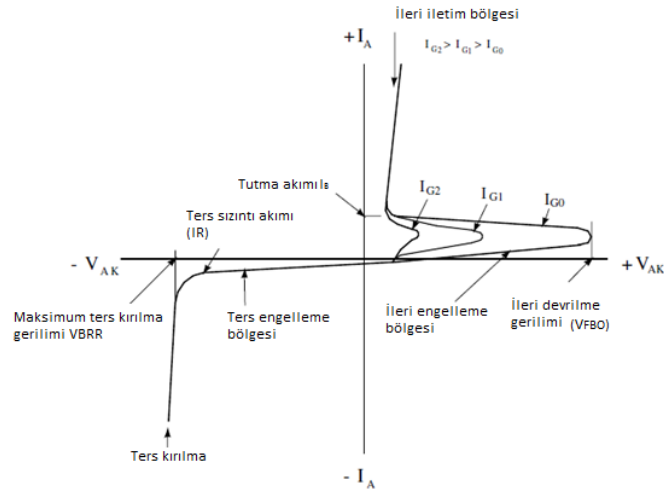


Şekil 2.4.(a) SCR'nin devre sembolü (b)SCR'nin yapısı

SCR'nin anodunun katodundan daha yüksek potansiyelde olduğu durumda, yani SCR ileri yönde kutuplandığında, en dıştaki pn jonksiyonu da iletim yönünde kutuplanmıştır. Ortadaki pn jonksiyonu ters kutuplanmıştır ve akım geçmemektedir. Eğer bu durumda küçük kapı akımı uygulanırsa, orta pn jonksiyonu da ileri kutuplanır ve eleman üzerinde daha büyük bir akımın akmasına izin verir. Bu durumda kapı akımı kesilse bile, SCR iletimde kalır. SCR ancak anot akımının tutma akımı olarak nitelendirilen  $I_H$ 'dan düşük bir seviyeye gelmesi ile kesime girer.

SCR'nin gerilim-akım karakteristiği Şekil 2.5'te gösterilmiştir. Eğer ileri yönde kutuplanma; ileri yönlü devrilme gerilimini ( $V_{FBO}$ ) aşarsa, SCR iletme geçer. İleri yönlü devrilme gerilimi  $V_{FBO}$ , kapı akımı  $I_G$  ile kontrol edilir. Eğer kapı katot pn jonksiyonu iletim yönünde kutuplanırsa, SCR kesimde iken ileri yönde devrilme gerilimi  $V_{FBO}$ 'dan daha küçük bir gerilim değerinde iletme geçer. Görüldüğü üzere iletim gerilimi ileri yönde devrilme geriliminden daha küçük değere geldikçe, akımda artış meydana gelmektedir. Daha düşük kapı akımlarında, iletim gerilimi düşük akım değerlerinde görece olarak yüksekken; anot akım artışı meydana geldikçe, diğer kapı akım değerleri ile aynı gerilim düzeyinde çalışma gerçekleşmektedir.

SCR ters kutuplandığında, küçük değerli ters sızıntı akımı  $I_R$  meydana gelir. Eğer ters kutuplanma gerilimi; ters kırılma gerilimine  $V_{BRR}$  kadar arttırılırsa, ters akım oldukça dik bir şekilde artar ve bu akım güvenli bir değere kadar sınırlandırılmazsa, SCR zarar görebilir (Skvarenina ve Anwar 2001).

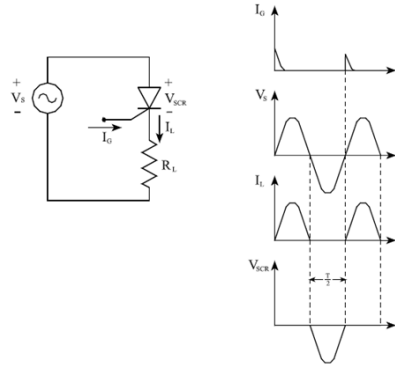


Şekil 2.5 SCR karakteristiği (Rajashekara 2001'den değiştirilerek alınmıştır)

SCR ileri yönde kutuplanmış ve kapı sinyali uygulanmış ise SCR iletme geçecektir. Anot akımı,  $I_H$ 'ı geçtiği zaman kapı kontrolü kaybedecektir. Bu noktadan sonra SCR'yi kesime uğratmanın tek yolu, anot gerilimini katoda göre negatif yaparak anot akımını  $I_H$  akım seviyesinin altına düşürmektir. SCR'yi kesime uğratma işlemi *komutasyon* olarak isimlendirilir.

Şekil 2.6'da, SCR komutasyon devresi gösterilmiştir. Bu tip komutasyon, *AA Hat komutasyonu* olarak isimlendirilir. Yük akımı  $I_L$ , kaynak geriliminin pozitif yarım

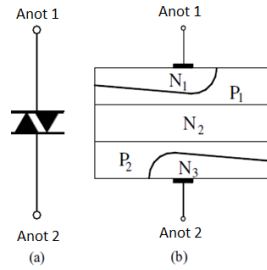
periyodunda akar. SCR kaynak geriliminin negatif yarı periyodunda ters kutuplanır. Eğer SCR'nin sönme zamanı, kaynak geriliminin negatif yarı periyodundan daha küçük ise sıfır kapı akımı uygulanması durumunda, SCR kesimde olacaktır (Anonim 2014).



Şekil 2.6 SCR söndürme devresi ve çalışma grafikleri

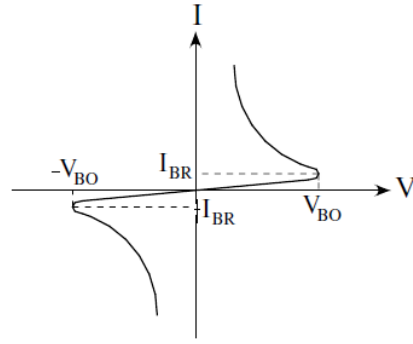
#### 2.1.4. Diyak

Diyak üç katmanlı, düşük gerilim ve düşük akımlı bir yarıiletken anahtardır. Diyakın sembolü, Şekil 2.7(a)'da ve yapısı Şekil 2.7(b)'de gösterilmiştir. Diyak, uygulanan gerilimin her iki polaritesinde de kesim durumundan iletim durumuna geçebilir.



Şekil 2.7.(a) Diyak devre sembolü (b) Diyak'ın yapısı (Anwar 2002'den değiştirilerek alınmıştır)

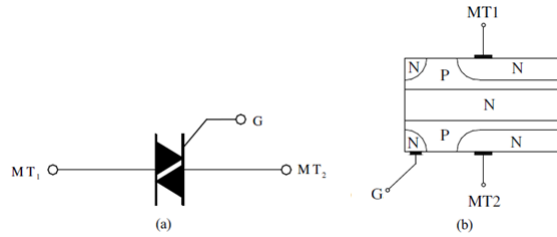
Diyakın gerilim-akım karakteristiği Şekil 2.8'de gösterilmiştir. Anot 1, Anot 2'ye göre daha pozitif olduğunda  $V_{BO}$  devrilme gerilimine kadar sızıntı akımı akar.  $V_{BO}$ 'ın ötesinde, diyak iletime geçer. Anot 2, Anot 1'e göre daha pozitif olduğunda, benzer olay oluşur. Diyak için devrilme geriliminin büyüklüğü, her iki yön için de yaklaşık olarak eşittir. Diyaklar genellikle, SCR ve triyak gibi daha büyük tristörleri tetiklemek için kullanılırlar (Anwar 2002).



Şekil 2.8. Diyak karakteristiği (Anwar 2002'den değiştirilerek alınmıştır)

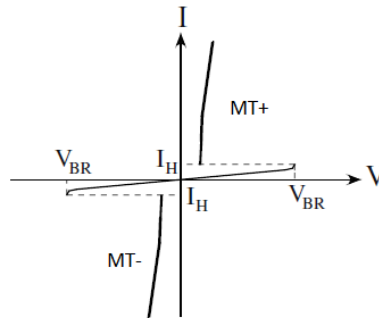
### 2.1.5. Triyak

Triyak üç uçlu yarıiletken anahtardır. İleri ve geri olmak üzere her iki yönde de ilettime geçebilir. Kapı sinyali, SCR'nin kapı sinyaline benzer bir şekilde kullanılır. Triyakin sembolü ve yapısı Şekil 2.9'da gösterilmiştir.



Şekil 2.9. (a) Triyak sembolü (b) Triyak yapısı (Anwar 2002)

Triyakin gerilim-akım karakteristiği Şekil 2.10'da gösterilmiştir. Triyakin devrilme gerilimi, kapıya pozitif veya negatif sinyal uygulanarak belirlenebilir. Kapı sinyalinin genliği arttıkça, devrilme gerilimi değeri azalır. Triyak bir kez ilettime geçtiğinde, kapı sinyali kaldırılrsa da triyak iletimde kalır. Triyakin kesime girebilmesi için iletim akımının, tutma akımı  $I_H$ 'nin altına düşmesi gereklidir (Anwar 2002).

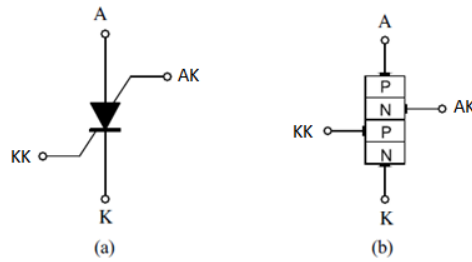


Şekil 2.10. Triyakin karakteristiği (Anwar 2002)



### 2.1.6. Silikon kontrollü anahtar

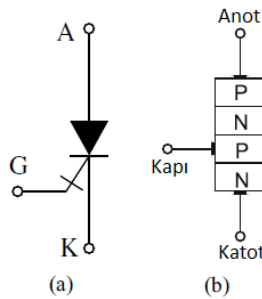
Silikon kontrollü anahtar (SCS) dört uçlu pnpn jonksiyonundan oluşmuş bir elemandır. SCS sembolü ve SCS yapısı Şekil 2.11’de gösterilmiştir. SCS, anot kapısı (AK) ve katot kapısı (KK) olarak isimlendirilen iki adet kapıya sahiptir. SCS, AG kapısına negatif bir sinyal uygulanarak ilettime geçirilebilir. SCS iletim durumuna geçtiğinde, anot kapısına pozitif sinyal veya katot kapısına negatif sinyal uygulanarak kesime geçirilebilir (Anwar 2002).



Şekil 2.11. (a) SCS sembolü (b) SCS iç yapısı (Anwar 2002)

### 2.1.7. Kapıdan tıkanabilen tristör

Kapıdan tıkanabilen tristör (GTO), pozitif kapı sinyali ile iletim durumuna geçirilebilen, yarıiletken anahtardır. Negatif kapı sinyali ile kesime geçirilebilmektedir. GTO sembolü ve yapısı Şekil 2.12’de gösterilmiştir. GTO’ların gerilim-akım grafikleri ve kesime geçme süreleri SCR’lerinkine göre düşük; ilettime geçme süreleri ise, SCR’lerinkiyle aynıdır (Anwar 2002).



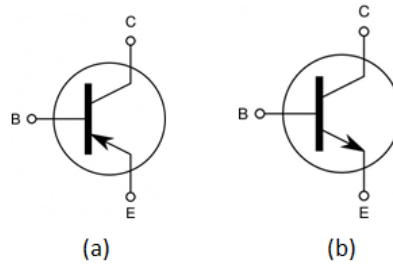
Şekil 2.12. (a) GTO sembolü (b) GTO yapısı (Anwar 2002’den değiştirilerek alınmıştır)

### 2.1.8. Bipolar jonksiyon transistör

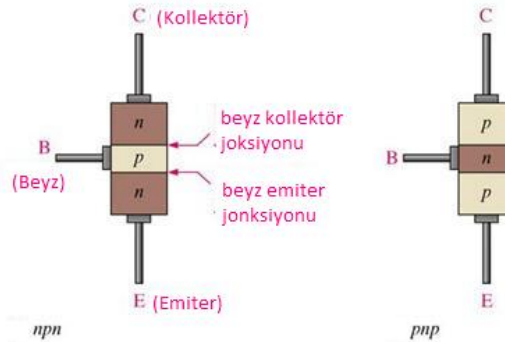
Bipolar jonksiyon transistörler (BJT’ler) güç elektroniği devrelerinde kritik bir rol oynarlar. Diğer güç elektroniği elemanları gibi BJT’ler de silikondan yapırlar. BJT’de silikon malzeme kullanımı; birkaç kilowatt mertebesinde gerçekleştirilen AA

uygulamalarda ortaya çıkan yüksek akım ve sıcaklık değerlerine, jonksiyonun dayanabilmesini sağlamaktadır.

BJT'ler, üç katmanlı eleman sınıfının bir üyesidir. Transistörün üç ayağı veya ucu; beyz, kollektör ve emetör olarak isimlendirilir. Bir başka açıdan, BJT'lerin birbirine karşılıklı bağlanmış iki pn diyottan oluştuğu söylenebilir. Transistörlerin iki tipi pnp ve npn olarak isimlendirilir. npn tipi transistörler pnp transistörlere göre daha yüksek akım gerilim oranına sahiptir ve güç çevrim uygulamalarında daha çok tercih edilmektedir. Transistör tipinin npn ya da pnp olduğunu anlamamanın en kolay yolu, devrede kullanılan sembolüne bakmaktır. Transistör tipi olan pnp ve npn devre sembolleri ve yapıları sırasıyla, Şekil 2.13 ve Şekil 2.14'de gösterilmiştir.



Şekil 2.13. (a) pnp transistör (b) npn transistör

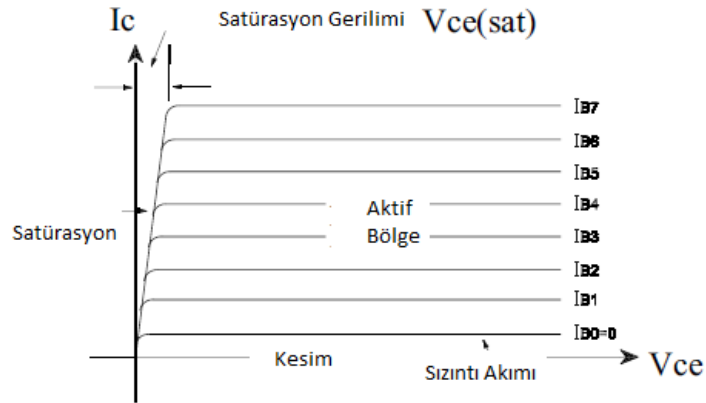


Şekil 2.14. npn ve pnp transistör yapıları (Hrishikesan 2013'den değiştirilerek alınmıştır)

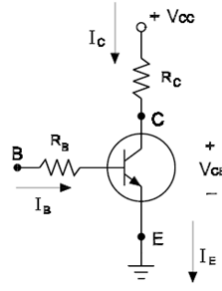
BJT'ler anahtar olarak kullanıldığında; yeterli beyz akımı sağlanarak, kaynaktan yüke doğru olan güç akışı kontrol edilir. Beyz emetör yolu boyunca sürülen ve korunmak zorunda olan bu küçük akım, kollektör emetör yolunu iletme geçirir. Beyz emetör yolundaki akımı kaldırmak, anahtarı kesim durumuna geçirir. Beyz emetör yolunda

küçük akımlar kontrol edilerek; kollektör emetör yolundaki büyük akımlar, kontrollü olarak taşınır (Skvarenina ve Anwar 2001).

BJT'nin gerilim-akım karakteristiği Şekil 2.15'de gösterilmiştir. Güç transistörleri, ideal anahtardan farklı özelliklere sahiptir ve güç elektroniği alanında başlıca kullanılan anahtarlama elemanlarından biridir. Bu tip uygulamalar için Şekil 2.16'da gösterilen ortak emetörlü bağlantı kullanılır. Bir transistörün üç çalışma bölgesi; kesimde olma, aktif bölgede olma ve satürasyona girme durumları göz önüne alınmalıdır. Beyz akımı  $I_B$  sıfırken, kollektör akımı  $I_C$  önemsenmeyecek kadar küçük değerlidir ve transistör kesimdedir. Transistör kesimde iken beyz-emetör ve kollektör-emetör gerilimleri ters kutuplanmıştır, dolayısıyla transistör açık anahtar gibi davranır. Beyz akımı  $I_B$ , satürasyon akımını belirler. Bu durum beyz akımının yükselmesine rağmen kollektör akımında bir artışın göstermediği noktada, transistör doyuma ulaştığı anda gerçekleşir. Satürasyonda, beyz-emetör ve kollektör-emetör jonksiyonları ileri kutuplanmıştır ve transistör kapalı anahtar gibi davranır. Transistörün aktif bölgesi yükseltici devre uygulamalarında kullanılır ve anahtarlama durumunun oluşmasından kaçınılır. Aktif bölgede, kollektör-beyz jonksiyonu ters kutuplanır ve beyz-emetör jonksiyonu ileri kutuplanır (Anwar 2002).



Şekil 2.15. BJT gerilim-akım karakteristiği (Anwar 2002'den değiştirilerek alınmıştır)



Şekil 2.16. BJT'nin kutuplanması (Anwar 2002)

BJT bir anahtarlama elemanı olarak kullanıldığında, kontrol devresi gerekli beyz akımını sağlar. Transistörün beyz akımı, iletim veya kesim durumunu belirler. Transistörün kollektör ve emetör uçları, güç uçları ile ilişkilidir.

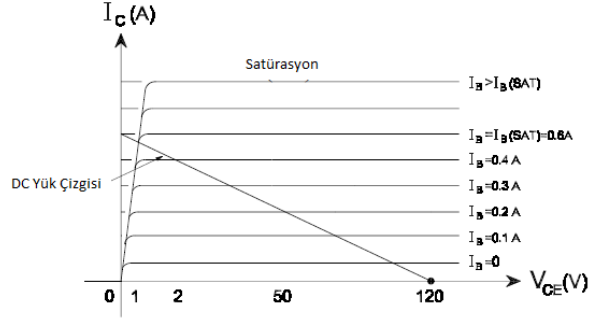
Transistörün DA yük çizgisi, mümkün olan bütün çalışma alanlarını belirtir ve Şekil 2.17'de gösterilmiştir. Çalışma noktası, yük çizgisi ile beyz akımının kesiştiği yerlerdir ve  $V_{CC}$  ile  $R_C$  değerleri ile belirlenir.

Transistör iletimde olduğunda, ideal çalışma noktası, kollektör akımı  $I_C$ 'nin,  $V_{CC}/R_C$ 'ye eşit olduğu ve  $V_{CE}$ 'nin sıfır olduğu bölgede oluşur. Gerçek çalışma noktası ise satürasyonda iken, beyz akımının yük çizgisiyle kesiştiği yerdir. Başka bir ifade ile beyz akımının satürasyondaki beyz akımına eşit olduğu noktadır. ( $I_B = I_{B(sat)}$ ). Bu noktada kollektör-emetör akımı azami değerini alırken, kollektör-emetör arasında  $V_{CE(sat)}$  olarak isimlendirilen asgari gerilim düşümü meydana gelir.

Transistör kesimde olduğunda; ideal çalışma noktası, kollektör akımı  $I_C$ 'nin sıfıra eşit olduğu ve kollektör-emetör gerilimi  $V_{CE}$ 'nin kaynak gerilimi  $V_{CC}$ 'ye eşit olduğu yerdedir. Kesim durumundaki gerçek çalışma noktası ise yük çizgisi ile beyz akımının sıfır olduğu noktanın kesiştiği yerdir. Kesim noktasında, kollektör akımı sızıntı akımına eşittir. Kirchoff gerilim yasasını çıkış çevresinde (çevriminde) uygulayarak, kollektör emetör gerilimi  $V_{CE}$  hesaplanabilir.

Satürasyon ve kesim arasındaki çalışma noktaları, aktif bölge olarak isimlendirilir. Aktif bölgede çalışma esnasında, kollektör akımı  $I_C$ 'nin ve kollektör emetör gerilimi  $V_{CE}$ 'nin görece yüksek olması nedeniyle yüksek güç tüketimi meydana gelir. Anahtarlama uygulamalarında makul bir çalışma için transistörü ilettime geçiren asgari beyz akımının

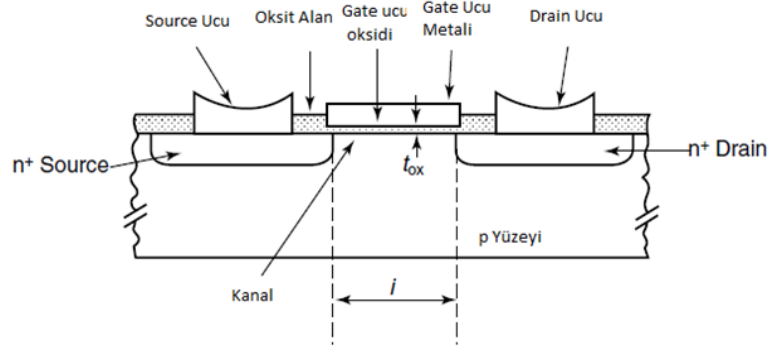
seçimi önemlidir, böylelikle hızlı açma-kapama sürelerine de yaklaşılmış olunur (Anwar 2002).



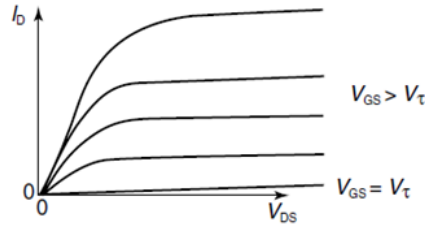
Şekil 2.17. BJT DA yük çizgisi (Anwar 2002'den değiştirilerek alınmıştır)

### 2.1.9. Metal oksit yarıiletken alan etkili transistör

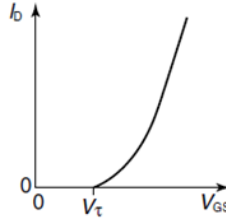
Metal oksit yarıiletken alan etkili transistörler (MOSFET), geniş ölçekli tümleşik devre tasarımında (VLSI) oldukça yaygın kullanılan aktif elemanlardır. MOSFET'in yapısı, akım-gerilim karakteristiği, transfer karakteristiği ve devre sembolü sırasıyla; Şekil 2.18, Şekil 2.19, Şekil 2.20, Şekil 2.21'de verilmektedir. MOSFET, yatay olarak konumlandırılabilir bir cihazdır ve tümleşik devrelere yerleştirilmeleri oldukça kolaydır. Yüksek güç seviyelerinde ciddi sınırlamaları vardır. Güç MOSFET'lerinin tasarımı, orijinal alan etkili transistörlere (FET'lere) dayanır ve 1970'lerin öncesindeki keşfine rağmen evrimsel olarak gelişmesi devam etmiştir. Güç MOSFET'lerinin imalatı; cihaz geometrisinin oldukça farklı olmasına rağmen, bugünün VLSI devrelerine çok benzemektedir. Güç MOSFET'leri, güç elektroniği uygulamalarında anahtar olarak kullanılmaktadır (Barkhordarian 2002).



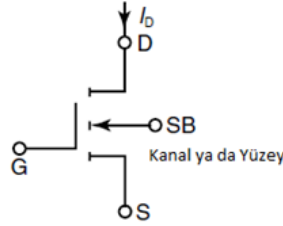
Şekil 2.18. MOSFET'in yapısı (Barkhordarian 2002'de değiştirilerek alınmıştır)



Şekil 2.19. MOSFET akım gerilim karakteristiği (Barkhordarian 2002)



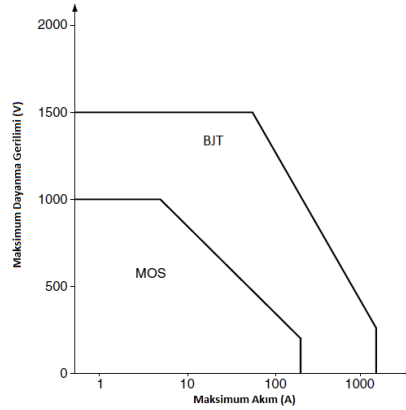
Şekil 2.20 MOSFET transfer karakteristiği (Barkhordarian 2002)



Şekil 2.21 MOSFET devre sembolü (Barkhordarian 2002'den değiştirilerek alınmıştır)

Güç MOSFET'inin geliştirilmesi, BJT'le rekabet edecek gerilim kontrollü anahtarların üretilme ihtiyacı ile olmuştur. Bir güç elemanın çalışma sınırlarının tam olarak tanımlanması mümkün olmasa da, kabaca en az 1A'lık bir akımı anahtarlayabilmesi beklenir. BJT'ler akım kontrollü elemanlardır ve yüksek güç uygulamalarında, cihazı iletimde tutabilmek için yüksek beyz akımı gerektirirler. Aynı zamanda BJT'lerin kesime hızlı geçebilmeleri için yüksek değerli ters beyz akımı gereklidir. BJT'lerin üretim teknikleri çok gelişmiş ve ucuz olmasına rağmen, bazı sınırlamalar yüzünden beyzlerini sürme devreleri oldukça karışık ve pahalıdır. BJT'lerin iki dezavantajı daha vardır. Bunlardan birincisi, BJT'lerde elektron ve deliklerin iletme katılmasıdır. Çoğunluk taşıyıcı zaman sürelerinde deliklerin varlığı, aynı boyutlarda ve aynı gerilim oranlarına sahip MOSFET'lere göre birkaç kat daha yavaş anahtarlama neden olmaktadır. BJT'lerin diğer dezavantajı ise, termal kaçaklarıdır. Birçok BJT paralel

bağlandığında BJT'lerin ısındıkça ileri gerilim düşümlerinin azalma olayı, bu durumun da akımın tek bir cihaz üzerine yönlendirilmesinden dolayı, sorunlara neden olmaktadır. Diğer yandan, güç MOSFET'leri çoğunluk taşıyıcı yüklerinin yanında, azınlık taşıyıcı enjeksiyonu içermeyen cihazlardır. MOSFET'ler anahtarlama kayıplarının önemli olduğu yüksek frekans uygulamalarında BJT'lere göre daha avantajlıdır ve yüksek güç uygulamalarında daha dayanıklıdır. Güç MOSFET'lerinin ileri yöndeki gerilim düşümleri, yükselen sıcaklıkla arttığı için güvenle paralel bağlanabilirler. Çünkü paralel kollara giren akım, kısa devre oluşturmaksızın diğer MOSFET'ler ile paylaşılacaktır. Buna rağmen MOSFET'lerin BJT'lere göre yüksek devrilme gerilimleri, yüksek güç uygulamalarında bazı hallerde BJT'lerin kullanılmasını gerektirebilir. Şekil 2.22, güç MOSFET'i ve BJT'nin akım gerilim sınırlamalarını göstermektedir. Yeni işlem teknikleri, materyaller ve yapılar ile bu sınırlamaların daha iyileştirilmesi beklenmektedir. Göreceli olarak yeni bir cihaz olan ve MOSFET'in yüksek frekans üstünlükleri ile BJT'nin yüksek güç altında düşük ileri gerilim üretme özelliğini birleştiren yalıtılmış kapılı transistör (IGBT)'ler günümüzde kullanılmaktadır (Barkhordarian 2002).



Şekil 2.22. BJT ve MOS'ların akım gerilim sınırlamaları (Barkhordarian 2002'den değiştirilerek alınmıştır)

## 2.2. Doğrultucular

Bu altbölümde, doğrultucu devrelerin matematiksel temelleri üzerinde duracaktır. Doğrultucuların simülasyonlarını oluşturabilmek için bu devrelerin kuramsal altyapılarının bilinmesi esastır. Doğrultucuların bir fazlı ve üç fazlı modellemeleri, alçak ve yüksek frekanslardaki davranışları teorik olarak bu bölümde incelenecektir. Doğrultucu çıkışına bağlanan yükün, yük üzerinden alınan gerilim ve akımı nasıl

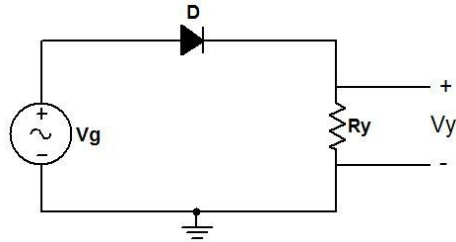
etkilediği de incelenecektir. Edinilen bu teorik birikim ile tezin uygulama bölümünde doğrultucu devrelerin benzetimi gerçekleştirilmektedir.

### 2.2.1. Bir fazlı doğrultucular

Bu bölümde bir fazlı bir alternatif kaynağı, DA dalga şekline dönüştürme teknikleri incelenmiştir. Dönüştürme, tristör veya diyot elemanlarıyla yapılabilir. Tristör elemanının kullanılması, devrenin tetikleme açısının ayarlanmasını sağlar. Bu devreler, yarı-iletken elemanların sayısı ve bağlantı şekline göre yarım dalga doğrultucu (YDD) veya köprü doğrultucu (KD) olarak çalıştırılabilir. Bu farklılıklar, istenilen niteliklerdeki DA dalga şeklinin elde edilmesi için kullanılacak seçimlerdir. Doğrultucu devreleri, çıkışlarına bağlanan yükün endüktif veya omik olarak seçilmesi konusunda da farklı kombinasyonlara imkân verir. Çıkışa bağlanan yük, DA dalga şeklindeki harmoniklerin değerlendirilebilmesi açısından önemlidir. Bu durumlar alt başlıklarda incelenecektir.

#### 2.2.1.1. Diyotlu ve omik yüklü YDD

Diyot; ileri yönde kutuplandığında akım geçiren, ters yönde kutuplandığında ise akım geçirmeyen bir devre elemanıdır. Burada incelenen diyot, ideal diyottur. İletimdeyken üzerine düşen gerilim sıfır iken, kesimdeyken üzerine düşen gerilim kaynak gerilimine eşittir. Omik yükte diyot ile gerçekleştirilen YDD devresi Şekil 2.23'de verilmiştir



Şekil 2.23. Omik yükte diyot ile tasarlanan YDD devresi

Devrenin matematiksel ifadeleri aşağıda verilmiştir (Shaffer 2007).

$$V_y = V_{Ry} = V_g, \quad V_g \geq 0 \quad (2.1)$$

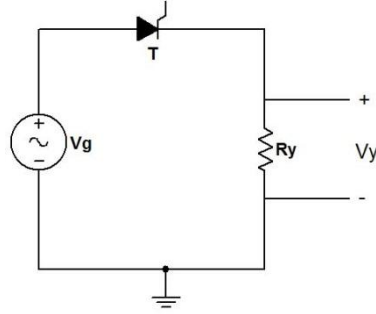


$$I_y = \frac{V_g}{V_{Ry}}, \quad V_g \geq 0 \quad (2.2)$$

$$I_y = 0, V_y = 0, \quad V_g < 0 \quad (2.3)$$

### 2.2.1.2. Tristörlü ve omik yüklü YDD

Tristör, üzerindeki gerilim pozitifken ve bu elemana bir tetikleme sinyali verilmiş ise ilettime geçer ve idealde üzerine düşen gerilim sıfırdır. Tristör kesimde ise üzerinde kaynak gerilimi görülecektir. Tristör ile gerçekleştirilmiş omik yüklü YDD devresi Şekil 2.24'de verilmiştir.



Şekil 2.24. Tristör ile tasarlanmış omik yükte YDD devresi

Devrenin matematiksel ifadeleri aşağıdaki gibidir (Shaffer 2007).

$$V_y = V_{Ry} = V_g, \quad V_g \geq 0 \text{ ve } V_{gk} > 0 \quad (2.4)$$

$$I_y = \frac{V_g}{V_{Ry}}, \quad V_g \geq 0 \text{ ve } V_{gk} > 0 \quad (2.5)$$

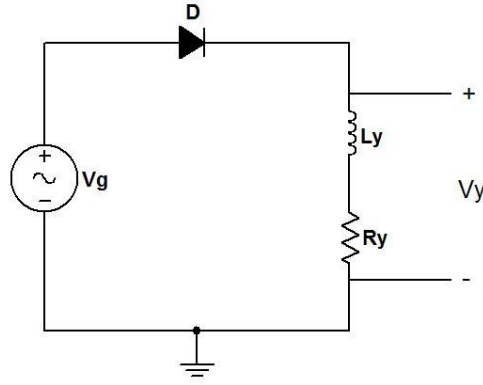
$$I_y = 0, \quad V_y = 0, \quad V_g < 0 \quad (2.6)$$

Burada  $V_g$  kaynak gerilimi,  $V_{gk}$  tristöre verilen tetikleme gerilimidir.  $V_g$  pozitif olduğu periyotta,  $V_{gk}$ 'nın bir kez uygulanması yeterlidir, sürekli pozitif kalmasına gerek yoktur.

### 2.2.1.3. Diyotlu ve endüktif yüklü YDD

Bu bölümde endüktif yüklü, diyot ile gerçekleştirilmiş YDD devresi incelenmiştir. Yük endüktif olduğu için, yük üzerindeki gerilim ve akım arasında faz farkı meydana gelecektir. Endüktans değerinin artması faz farkını arttıracaktır. Akımın devrede faz farkı ile dolaşması, giriş geriliminin negatif değerlere kadar etkin bir şekilde var olmasına neden olacaktır. Yüksek endüktans değerleri yük üzerinde negatif gerilim görülme süresini arttıracaktır (Sevinç 2013).

Endüktif yüklü diyot ile gerçekleştirilmiş YDD devresi Şekil 2.25’de gösterilmektedir.



Şekil 2.25. Endüktif yükte diyot ile tasarlanmış YDD devresi

Devrenin matematiksel denklemleri aşağıdaki gibidir (Shaffer 2007).

$$L \frac{dI_y}{dt} + RI_y = V_g, \quad I_y > 0, \alpha < \omega t < \beta \quad (2.7)$$

$$I_y(\omega t) \geq 0, \quad \alpha \leq \omega t \leq \beta \quad (2.8)$$

$$I_y(\omega t) = 0, \quad 0 < \omega t < \alpha \text{ ve } \beta < \omega t < 2\pi \quad (2.9)$$

Çıkış gerilimi eşitliği aşağıda tanımlanmıştır.

$$V_y = V_g, \alpha \leq \omega t \leq \beta \quad (2.10)$$

$$V_y = 0, 0 < \omega t < \alpha \text{ ve } \beta < \omega t < 2\pi \quad (2.11)$$

$\alpha$  ve  $\beta$ ,  $I_y(\alpha) = I_y(\beta) = 0$  sınır koşullarını sağlayan açı değerleridir (Shaffer 2007).

#### 2.2.1.4. Tristörlü ve endüktif yüklü YDD

Bu bölümde endüktif yüklü, tristör ile gerçekleştirilmiş YDD devresi incelenmiştir. Yük endüktif olduğu için, yük üzerindeki gerilim ve akım arasında faz farkı meydana gelecektir. Endüktans değerinin artması faz farkını arttıracaktır. Akımın devrede faz farkı ile dolaşması, giriş geriliminin negatif değerlere kadar etkin bir şekilde var olmasına neden olacaktır. Yüksek endüktans değerleri yük üzerinde negatif gerilim görülme süresini arttıracaktır (Sevinç 2013). Endüktif yüklü tristör ile gerçekleştirilmiş YDD Şekil 2.26'da gösterilmektedir.

Şekil 2.26'ya ait devre denklemleri aşağıda verilmiştir.

$$L \frac{dI_y}{dt} + RI_y = V_g, \quad I_y > 0, \alpha < \omega t < \beta \quad (2.12)$$

$$I_y(\omega t) \geq 0, \quad \alpha \leq \omega t \leq \beta \quad (2.13)$$

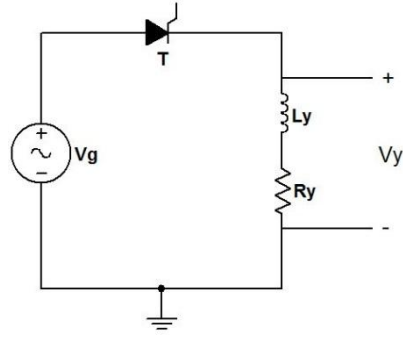
$$I_y(\omega t) = 0, \quad 0 < \omega t < \alpha \text{ ve } \beta < \omega t < 2\pi \quad (2.14)$$

Çıkış gerilimi eşitliği aşağıda tanımlanmıştır.

$$V_y = V_g, \alpha \leq \omega t \leq \beta \quad (2.15)$$

$$V_y = 0, 0 < \omega t < \alpha \text{ ve } \beta < \omega t < 2\pi \quad (2.16)$$

$\alpha$  ve  $\beta$ ,  $I_y(\alpha) = I_y(\beta) = 0$  sınır koşullarını sağlayan açı değerleridir (Sevinç 2013).

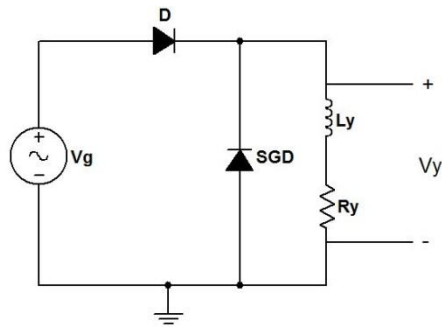


Şekil 2.26. Endüktif yüklü tristör ile gerçekleştirilmiş YDD devresi

### 2.2.1.5. Diyot, SGD'li ve endüktif yüklü YDD

Bu bölümde SGD ile gerçekleştirilmiş endüktif yüklü diyotlu YDD devresi incelenmiştir. Bu devrede yük akımı, SGD olmadan gerçekleştirilen devredeki ile aynıdır. Tek fark, yük geriliminin negatif değerlere düşmemesidir. Gerçekte SGD iletme geçtiği zaman  $-0,7V$  civarında bir negatif gerilim bulunur. Diyot ideal olarak düşünülüp devre gerçekleştirildiğinde negatif gerilime inme olmayacaktır. Gerilimin negatife düştüğü önceki devrelerde akımın pozitif olması, çekilen gücün şebekeye iade edilmesi anlamına gelmektedir. Bu durum reaktif gücün artmasına sebep olur. SGD kullanılan devrede, akımın pozitifken gerilim negatife düşmediği için reaktif güç azaltılmış olur (Sevinç 2013).

Endüktif yüklü SGD diyotlu, ideal diyot ile gerçekleştirilmiş YDD devresi Şekil 2.27'de gösterilmektedir.



Şekil 2.27. SGD'li diyotla gerçekleştirilmiş YDD devresi

Şekil 2.27'e ait devre denklemleri aşağıda verilmiştir.

$$L \frac{dI_y}{dt} + RI_y = V_g, \quad I_y > 0, \alpha < \omega t < \beta \quad (2.17)$$

$$I_y(\omega t) \geq 0, \quad \alpha \leq \omega t \leq \beta \quad (2.18)$$

$$I_y(\omega t) = 0, \quad 0 < \omega t < \alpha \text{ ve } \beta < \omega t < 2\pi \quad (2.19)$$

Çıkış gerilimi eşitliği aşağıda tanımlanmıştır.

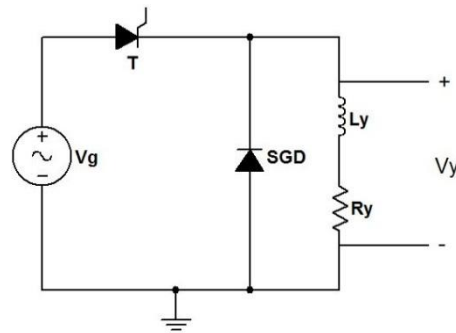
$$V_y = V_g, \alpha \leq \omega t \leq (\beta - \theta) \quad (2.20)$$

$$V_y = 0, 0 < \omega t < \alpha \text{ ve } \beta < \omega t < 2\pi \quad (2.21)$$

$\alpha$  ve  $\beta$ ,  $I_y(\alpha) = I_y(\beta) = 0$  sınır koşullarını sağlayan açı değerleridir.  $\theta$  değeri çıkış gerilimi  $V_y$ 'nin negatif değere düşmediğini göstermektedir,  $V_y$  hiçbir an negatif değildir.

#### 2.2.1.6. Tristör, SGD'li ve endüktif yüklü YDD

Bu bölümde SGD ile gerçekleştirilmiş, endüktif yüklü tristörlü YDD devresi incelenmiştir. Endüktif yüklü SGD'li tristör ile gerçekleştirilmiş YDD devresi Şekil 2.28'de gösterilmektedir.



Şekil 2.28. SGD'li tristör ile gerçekleştirilmiş endüktif yüklü YDD devresi

Şekil 2.28'e ait devre denklemleri aşağıda verilmiştir.

$$L \frac{dI_y}{dt} + RI_y = V_g, \quad I_y > 0, \alpha < \omega t < \beta \quad (2.22)$$

$$I_y(\omega t) \geq 0, \quad \alpha \leq \omega t \leq \beta \quad (2.23)$$

$$I_y(\omega t) = 0, \quad 0 < \omega t < \alpha \text{ ve } \beta < \omega t < 2\pi \quad (2.24)$$

Çıkış gerilimi eşitliği aşağıda tanımlanmıştır.

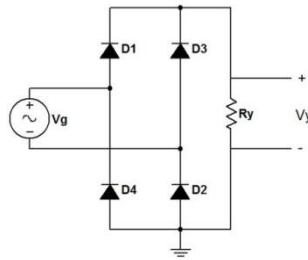
$$V_y = V_g, \alpha \leq \omega t \leq (\beta - \theta) \quad (2.25)$$

$$V_y = 0, 0 < \omega t < \alpha \text{ ve } \beta < \omega t < 2\pi \quad (2.26)$$

$\alpha$  ve  $\beta$ ,  $I_y(\alpha) = I_y(\beta) = 0$  sınır koşullarını sağlayan açı değerleridir.  $\alpha$  açı değerinin tristör tetikleme açısından küçük olamayacağına dikkat edilmelidir.  $\theta$  değeri çıkış gerilimi  $V_y$ 'nin negatif değere düşmediğini göstermektedir,  $V_y$  hiçbir an negatif değildir

### 2.2.1.7. Diyotlu omik yüklü KD

Bu bölümde, KD'ler incelenecektir. KD devreleri tam dalga doğrultma yapılmasına imkân vermektedir. YDD'lerin negatif alternansları geçirme özelliği bulunmamaktaydı. Ancak KD'lerde, Şekil 2.29'daki devreye göre, pozitif kaynak gerilimi D1 ve D2 diyotları üzerinden, negatif kaynak gerilimi ise D3 ve D4 diyotları üzerinden geçerek yüke ulaştırılmaktadır. Bu çalışma prensibine bağlı olarak yüke uygulanan gerilim her zaman pozitiftir. Bu devrede yük omik olduğundan, gerilim ve akım faz farkı olmaksızın, devre çıkışında gözlemlenir (Mohan ve ark. 2007).



Şekil 2.29. Omik yüklü diyot ile gerçekleştirilmiş KD devresi

Şekil 2.29'a ait devre denklemleri aşağıda verilmiştir

$$V_y = V_{Ry} = V_g, \quad V_g \geq 0 \quad (2.27)$$

$$V_y = V_{Ry} = -V_g, \quad V_g < 0 \quad (2.28)$$

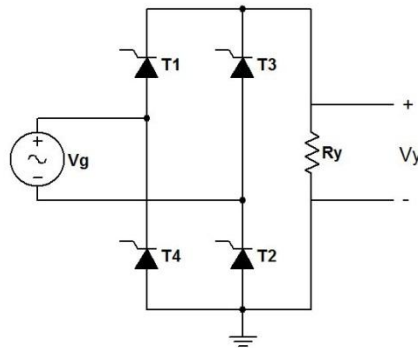
$$I_y = \frac{V_g}{V_{Ry}}, \quad V_g \geq 0 \quad (2.29)$$

$$I_y = -\frac{V_g}{V_{Ry}}, \quad V_g < 0 \quad (2.30)$$

Devre denklemlerinden de görüldüğü üzere giriş geriliminin negatif veya pozitif değeri için yüke her zaman pozitif gerilim aktarılmaktadır. Akımın tek bir yönde akması sağlanmaktadır.

#### 2.2.1.8. Tristörlü ve omik yüklü KD

Bu bölümde, KD'lerin incelenmesine devam edilecektir. Şekil 2.30'daki devreye göre, pozitif kaynak gerilimi T1 ve T2 tristörleri üzerinden, negatif kaynak gerilimi ise T3 ve T4 tristörleri üzerinden doğrultularak yüke ulaştırılmaktadır. Bu çalışma prensibine bağlı olarak yüke uygulanan gerilim her zaman pozitifdir. Bu devrede yük omik olduğundan, gerilim ve akım faz farkı olmaksızın, devre çıkışında gözlemlenir. Tristörlerin iletme geçebilmesi için T1 ve T2'nin giriş gerilimi pozitifken, T3 ve T4'ün ise giriş gerilimi negatifken tetiklenmesi gerekmektedir (Shaffer 2007).



Şekil 2.30. Omik yüklü tristör ile gerçekleştirilmiş KD devresi

Şekil 2.30'a ait devre denklemleri aşağıda verilmiştir

$$V_y = V_{Ry} = V_g, \quad V_g \geq 0 \text{ ve } T1, T2 \text{ için } V_{gk} > 0 \quad (2.31)$$

$$V_y = V_{Ry} = -V_g, \quad V_g < 0 \text{ ve } T3, T4 \text{ için } V_{gk} > 0 \quad (2.32)$$

$$I_y = \frac{V_g}{V_{Ry}}, \quad V_g \geq 0 \text{ ve } T1, T2 \text{ için } V_{gk} > 0 \quad (2.33)$$

$$I_y = -\frac{V_g}{V_{Ry}}, \quad V_g < 0 \text{ ve } T3, T4 \text{ için } V_{gk} > 0 \quad (2.34)$$

Devre denklemlerinden de görüldüğü üzere giriş geriliminin negatif veya pozitif değeri için yüke pozitif gerilim veya sıfır değerinde gerilim aktarılmaktadır.

#### 2.2.1.9. Diyotlu ve endüktif yüklü KD

Bu bölümde, omik yükte çalıştırılmış diyotlu KD devresinin bir sonraki adımı olarak endüktif yükte çalıştırılma durumu incelenecektir. Şekil 2.31'deki devreye göre, pozitif kaynak gerilimi D1 ve D2 diyotları üzerinden, negatif kaynak gerilimi ise D3 ve D4 diyotları üzerinden doğrultularak yüke ulaştırılmaktadır. Bu çalışma prensibine bağlı olarak yüke uygulanan gerilim her zaman pozitiftir. Bu devrede, yük endüktiftir ve gerilim uygulanması sürekli olacağı için, endüktansın değerine bağlı olarak akımın sıfırdan yüksek değerler alacağı açıktır (Shaffer 2007).

Şekil 2.31'e ait devre denklemleri aşağıda verilmiştir.

$$L \frac{dI_y}{dt} + RI_y = V_{dogrult} \quad (2.35)$$

$$V_{dogrult} = V_g, \quad 0 \leq \omega t < \frac{T}{2} \quad (2.36)$$

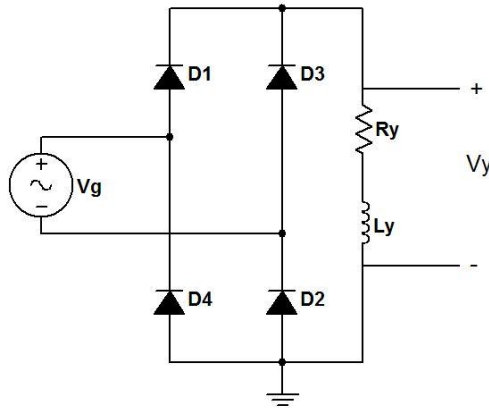
$$V_{dogrult} = -V_g, \quad \frac{T}{2} \leq \omega t < T \quad (2.37)$$



$$V_y = V_{dogrult} \quad (2.38)$$

$$T = \frac{2\pi}{\omega} \quad (2.39)$$

Burada  $V_{dogrult}$ , köprü diyot çıkışındaki gerilimdir, matematiksel ifadesi yukarıda verilmiştir.  $\omega$ , sinüzoidal işaretin açısal frekansıdır.  $I_y$  yük üzerinden geçen akım ve  $V_y$  yük üzerindeki gerilimdir.

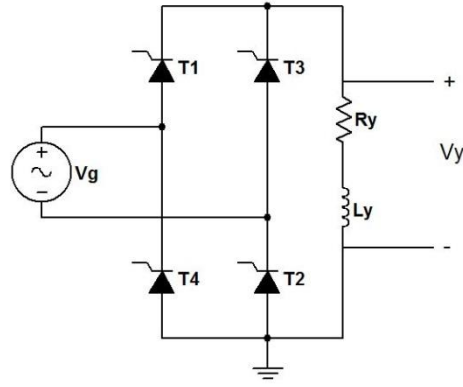


Şekil 2.31. Endüktif yüklü diyot ile gerçekleştirilmiş KD devresi

Devre denklemlerinden de görüldüğü üzere giriş geriliminin negatif veya pozitif değeri için yüke her zaman pozitif gerilim aktarılmaktadır.

#### 2.2.1.10. Tristörlü ve endüktif yüklü KD

Bu bölümde, omik yükte çalıştırılmış tristörlü KD devresinin bir sonraki adımı olarak endüktif yükte çalıştırılma durumu incelenecektir. Şekil 2.32'deki devrede, pozitif kaynak gerilimi T1 ve T2 diyotları üzerinden, negatif kaynak gerilimi ise T3 ve T4 diyotları üzerinden doğrultularak yüke ulaştırılmaktadır. Bu çalışma prensibine bağlı olarak, tristörün tetikleme açısı değişebileceğinden yüke uygulanan gerilim her zaman pozitif değildir. Akımın sıfır olduğu durumlarda, SGD diyotu kullanılmadığı için negatif gerilimler görülebilmektedir. Bu durum devrede reaktif gücün olduğunu göstermektedir (Sevinç 2013).



Şekil 2.32. Endüktif yüklü tristör ile gerçekleştirilmiş KD devresi

Şekil 2.32'deki devrenin denklemleri aşağıda verilmiştir.

$$I_y > 0, \quad \alpha \leq \omega t \leq \beta \quad (2.40)$$

$$L \frac{dI_y}{dt} + RI_y = V_{dogrult}, \quad I_y > 0 \quad (2.41)$$

$$V_{dogrult} = V_g, \quad \Delta_{tetikleme} \leq \omega t < \frac{T}{2} \quad (2.42)$$

$$V_{dogrult} = -V_g, \quad \Delta_{tetikleme} \leq \omega t < T \quad (2.43)$$

$$V_y = V_{dogrult} \quad (2.44)$$

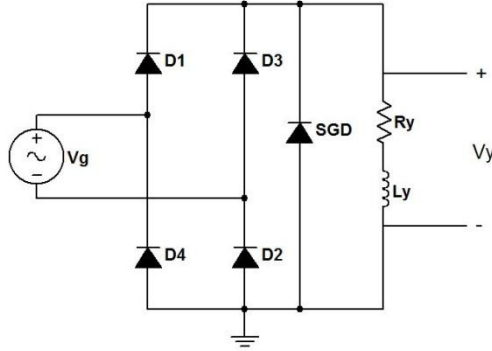
$$T = \frac{2\pi}{\omega} \quad (2.45)$$

Bu denklemlerde  $\Delta_{tetikleme}$ , tristörlerin tetikleme açısını  $\alpha$  ve  $\beta$ , yük akımı  $I_y$ 'nin sıfırdan büyük olduğu sınır değerlerini göstermektedir.

#### 2.2.1.11. Diyot, SGD'li ve endüktif yüklü KD

Bu bölümde, SGD kullanılmadan tasarlanmış bölüm 2.2.1.9'daki endüktif yüklü diyot ile gerçekleştirilmiş KD devresinin SGD ile modellenmesi incelenecektir. Bu modellemede yük geriliminin hiçbir zaman negatife düşmediği görülmektedir. SGD; yük gerilimi negatife düştüğünde oluşan reaktif gücü, aktif güce çevirmek amacıyla

kullanılan bir diyottur. Köprü diyot doğrultucu devrelerinde yük geriliminin negatife düşme durumu oluşmayacağı için SGD hiçbir zaman iletme geçemez ve devrede kullanılmayan bir eleman olarak kalır. Devrenin çalışması bölüm 2.2.1.9'daki gibidir. Şekil 2.33'de SGD'li endüktif yüklü KD devresi görülmektedir.



Şekil 2.33. Endüktif yüklü diyot ile gerçekleştirilmiş SGD'li KD devresi

Şekil 2.33'e ait devre denklemleri aşağıda verilmiştir (Shaffer 2007).

$$L \frac{dI_y}{dt} + RI_y = V_{dogrult} \quad (2.46)$$

$$V_{dogrult} = V_g, 0 \leq \omega t < \frac{T}{2} \quad (2.47)$$

$$V_{dogrult} = -V_g, \frac{T}{2} \leq \omega t < T \quad (2.48)$$

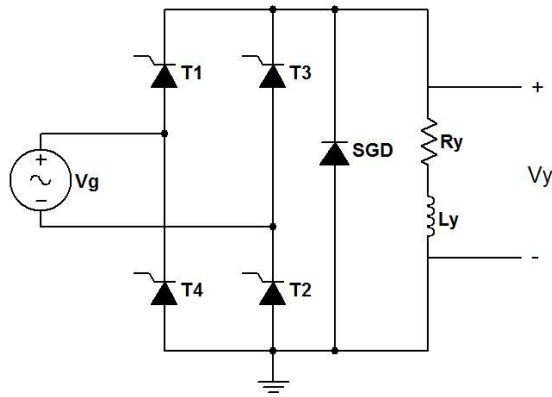
$$V_y = V_{dogrult} \quad (2.49)$$

$$T = \frac{2\pi}{\omega} \quad (2.50)$$

Burada  $V_{dogrult}$ , köprü diyot çıkışındaki gerilimdir, matematiksel ifadesi yukarıda verilmiştir.  $\omega$ , sinüzoidal işaretin açısal frekansıdır.  $I_y$  yük üzerinden geçen akım ve  $V_y$  yük üzerindeki gerilimdir. Devre denklemlerinden de görüldüğü üzere giriş geriliminin negatif veya pozitif değeri için yüke her zaman pozitif gerilim aktarılmaktadır.

### 2.2.1.12. Tristör, SGD'li ve endüktif yüklü KD

Bu bölümde, SGD kullanılmadan tasarlanmış bölüm 2.2.1.10'daki endüktif yüklü tristör ile gerçekleştirilmiş KD devresinin SGD ile modellenmesi incelenecektir. Bu modellemede görülmektedir ki, bölüm 2.2.1.10'daki devrede yük gerilimi, yüksek tristör tetikleme açıları için, bazı devrelerde negatif değerler almaktadır. SGD, yük gerilimi negatife düştüğünde oluşan reaktif gücü, aktif güce çevirmek amacıyla kullanılan bir diyottur. Tristörlü köprü diyot doğrultucu devrede yük geriliminin negatife düşme durumu oluştuğu için SGD yük geriliminin negatife geçmesini engeller ve bu noktalarda ilettime geçerek yük akımının değerini çok fazla olmamakla beraber bir miktar artırır. Devredeki reaktif güç, aktif güce çevrilmiş olur. Devrenin çalışması bölüm 2.2.1.10'dakine benzerdir. Şekil 2.34'de SGD'li endüktif yüklü tristörlü KD devresi görülmektedir (Sevinç 2013).



Şekil 2.34. Endüktif yüklü tristör ile gerçekleştirilmiş SGD'li KD devresi

### 2.2.2. Üç fazlı doğrultucular

Bu bölümde, üç fazlı bir alternatif kaynağı, DA dalga şekline dönüştürme teknikleri incelenmiştir. Bir fazlı alternatif kaynaklar, düşük ve orta güçlü sistemler için yeterlidir. Güç tüketimi, 15KW'ın üzerine çıktığı zaman üç fazlı veya çok fazlı giriş kaynağı sağlayan sistemlere ihtiyaç duyulmaktadır. Bu bölümdeki matematiksel incelemelerde, üç fazlı kaynakların yıldız bağlantı şeklinde ve yükün tek bir kolda olduğu sistemler incelenmiştir. Doğrultma işlemi, tristör veya diyot ile gerçekleştirilmiştir.

Tristör elemanının kullanılması, devrenin tetikleme açısının ayarlanmasını sağlar. Tristörlerin tetiklenme açısı, çıkıştaki DA dalga şeklinin genlik değerini ve üzerindeki harmonikleri etkilemektedir. Farklı tetikleme ve yük değerleri tercihleri, istenilen kalitedeki DA dalga şeklinin elde edilmesi için kullanılabilir seçimlerdir. Doğrultucu devreleri, çıkışlarına bağlanan yükün endüktif veya omik olarak seçilmesi konusunda da farklı kombinasyonlara imkân verir. Çıkışa bağlanan yük, DA dalga şeklindeki harmoniklerin süzülebilmesi açısından önemlidir. Bu durumlar alt başlıklarda incelenecektir.

### 2.2.2.1. Üç fazlı kaynak ile omik yükte diyotlu doğrultucu

Bu bölümde, üç fazlı yıldız bağlı kaynak, tek koldaki omik yüke diyotlar ile doğrultularak aktarılması incelenmiştir. Yük akımı ve gerilimi aynı fazdadır. Şekil 2.35'de devre bağlantısı gösterilmektedir. Devre denklemleri aşağıda tanımlanmıştır (Sevinç 2013).

$$V_y = V_{g1}, 0 \leq \omega t < \frac{T}{3} \quad (2.51)$$

$$V_y = V_{g2}, \frac{T}{3} \leq \omega t < \frac{2T}{3} \quad (2.52)$$

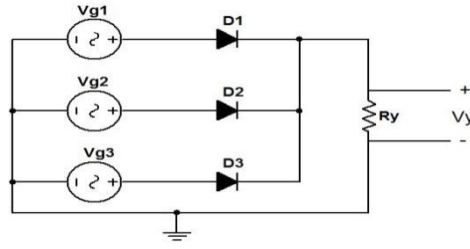
$$V_y = V_{g3}, \frac{2T}{3} \leq \omega t < T \quad (2.53)$$

$$I_y = \frac{V_{g1}}{R_y}, 0 \leq \omega t < \frac{T}{3} \quad (2.54)$$

$$I_y = \frac{V_{g2}}{R_y}, \frac{T}{3} \leq \omega t < \frac{2T}{3} \quad (2.55)$$

$$I_y = \frac{V_{g3}}{R_y}, \frac{2T}{3} \leq \omega t < T \quad (2.56)$$

Devre denklemlerinde T periyodu,  $\omega$  ise açısal frekansı göstermektedir.



Şekil 2.35. Üç fazlı kaynak ile omik yükte diyotlu doğrultucu devresi

Devre denklemlerinde

$$D1 \text{ diyotu, } \omega t = 30^0$$

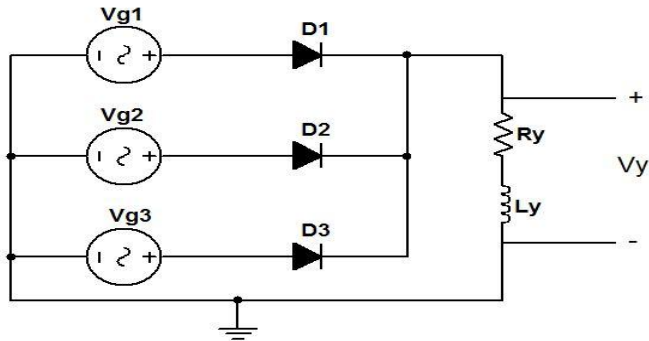
$$D2 \text{ diyotu, } \omega t = 150^0$$

$$D3 \text{ diyotu, } \omega t = 270^0$$

değerlerinde ilettime geçeceği açıktır (Sevinç 2013).

### 2.2.2.2. Üç fazlı kaynak ile endüktif yükte diyotlu doğrultucu

Bu bölümde, üç fazlı yıldız bağlı kaynak, tek koldaki endüktif yüke diyotlar ile doğrultularak aktarılması incelenmiştir. Yük akımı endüktansın da etkisi ile sabit duruma getirilmek istenmektedir. Endüktans, direnç ve çalışılan frekansa bağlı olarak harmonikler meydana gelmektedir. Bu harmoniklerin belirli bir düzeyde kalması tasarımcıların ilgilendiği konulardan birisidir. Simülasyon, devre parametrelerinin değiştirilmesine olanak sağlayarak, tasarımcıları bu yönde desteklemektedir. Şekil 2.36’da devre şekli gösterilmektedir.



Şekil 2.36. Üç fazlı kaynak ile endüktif yükte diyotlu doğrultucu devresi

Devreye ilişkin denklemler aşağıda verilmektedir.

$$V_y = V_{g1}, 0 \leq \omega t < \frac{T}{3} \quad (2.57)$$

$$V_y = V_{g2}, \frac{T}{3} \leq \omega t < \frac{2T}{3} \quad (2.58)$$

$$V_y = V_{g3}, \frac{2T}{3} \leq \omega t < T \quad (2.59)$$

$$L \frac{dI_y}{dt} + RI_y = V_{g1}, 0 \leq \omega t < \frac{T}{3} \quad (2.60)$$

$$L \frac{dI_y}{dt} + RI_y = V_{g2}, \frac{T}{3} \leq \omega t < \frac{2T}{3} \quad (2.61)$$

$$L \frac{dI_y}{dt} + RI_y = V_{g3}, \frac{2T}{3} \leq \omega t < T \quad (2.62)$$

Devre denklemlerinde T periyodu,  $\omega$  ise açılal frekansı göstermektedir. Devre denklemlerinde

$$D1 \text{ diyotu}, \omega t = 30^\circ$$

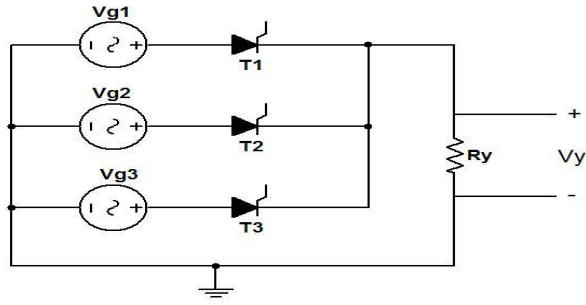
$$D2 \text{ diyotu}, \omega t = 150^\circ$$

$$D3 \text{ diyotu}, \omega t = 270^\circ$$

değerlerinde iletme geçeceği açıktır (Sevinç 2013).

### 2.2.2.3. Üç fazlı kaynak ile omik yükte tristörlü doğrultucu

Bu bölümde, üç fazlı yıldız bağlı kaynak, tek koldaki omik yüke tristörler ile doğrultularak aktarılması incelenmiştir. Yük akımı ve gerilimi aynı fazdadır. Şekil 2.37'de devresi gösterilmektedir.



Şekil 2.37. Üç fazlı kaynak ile endüktif yükte tristörlü doğrultucu devresi

Devre denklemleri aşağıda tanımlanmıştır:

$$V_y = V_{g1}, \delta_1 \leq \omega t < \frac{T}{3} \quad (2.63)$$

$$V_y = V_{g2}, \delta_2 \leq \omega t < \frac{2T}{3} \quad (2.64)$$

$$V_y = V_{g3}, \delta_3 \leq \omega t < T \quad (2.65)$$

$$I_y = \frac{V_{g1}}{R_y}, \delta_1 \leq \omega t < \frac{T}{3} \quad (2.66)$$

$$I_y = \frac{V_{g2}}{R_y}, \delta_2 \leq \omega t < \frac{2T}{3} \quad (2.67)$$

$$I_y = \frac{V_{g3}}{R_y}, \delta_3 \leq \omega t < T \quad (2.68)$$

Devre denklemlerinde  $\delta_1$ , T1 tristörünün tetiklenme açısını,  $\delta_2$ , T2 tristörünün tetiklenme açısını,  $\delta_3$ , T3 tristörünün tetiklenme açısını T periyodu,  $\omega$  ise açısal frekansı göstermektedir. Devre denklemlerinde

$$T1 \text{ tristörü, } \omega t = \delta_1$$

$$T2 \text{ tristörü, } \omega t = \delta_2$$

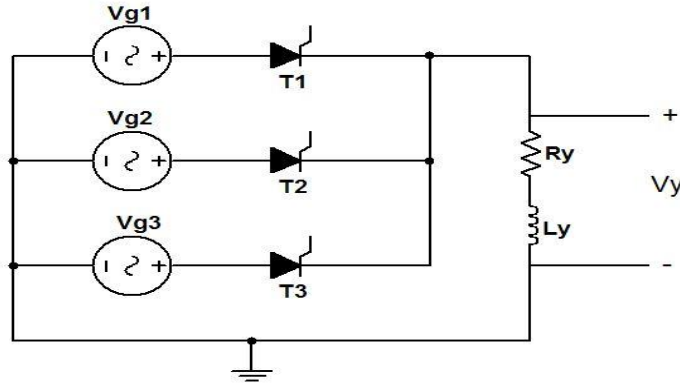


$T3$  tristörü,  $\omega t = \delta_3$

değerlerinde ilettime geçeceği açıktır (Sevinç 2013).

#### 2.2.2.4. Üç fazlı kaynak ile endüktif yükte tristörlü doğrultucu

Bu bölümde, üç fazlı yıldız bağlı kaynak, tek koldaki endüktif yüke tristörler ile doğrultularak aktarılması incelenmiştir. Yük akımı endüktansın da etkisi ile sabit duruma getirilmek istenmektedir. Tristörlerin tetikleme açıları, yük akımının değerine belirlemeye yardımcıdır. Buna ek olarak, endüktans, tristörlerin tetiklenme açıları, direnç ve çalışılan frekansa bağlı olarak harmonikler meydana gelmektedir. Şekil 2.38'de devre yapısı gösterilmektedir.



Şekil 2.38. Üç fazlı kaynak ile endüktif yükte tristörlü doğrultucu devresi

Devre denklemleri aşağıda tanımlanmıştır (Sevinç 2013).

$$V_y = V_{g1}, \delta_1 \leq \omega t < \frac{T}{3} \quad (2.69)$$

$$V_y = V_{g2}, \delta_2 \leq \omega t < \frac{2T}{3} \quad (2.70)$$

$$V_y = V_{g3}, \delta_3 \leq \omega t < T \quad (2.71)$$

$$L \frac{dI_y}{dt} + RI_y = V_{g1}, \delta_1 \leq \omega t < \frac{T}{3} \quad (2.72)$$

$$L \frac{dI_y}{dt} + RI_y = V_{g2}, \delta_2 \leq \omega t < \frac{2T}{3} \quad (2.73)$$

$$L \frac{dI_y}{dt} + RI_y = V_{g3}, \delta_3 \leq \omega t < T \quad (2.74)$$

Devre denklemlerinde  $\delta_1$ , T1 tristörünün tetiklenme açısını,  $\delta_2$  T2 tristörünün tetiklenme açısını,  $\delta_3$  T3 tristörünün tetiklenme açısını T periyodu,  $\omega$  ise açısal frekansı göstermektedir. Devre denklemlerinde

$$T1 \text{ tristörü, } \omega t = \delta_1$$

$$T2 \text{ tristörü, } \omega t = \delta_2$$

$$T3 \text{ tristörü, } \omega t = \delta_3$$

değerlerinde ilettime geçeceği açıktır.

### 2.3. Konvertörler

Modern elektronik sistemler; yüksek kalitede, küçük, az ağırlığa sahip, güvenilir ve efektif güç kaynaklarına ihtiyaç duyar. Doğru gerilimi veya akımı dönüştürmek amacıyla kullanılan gerilim ve akım bölücü prensibindeki güç regülatörleri verimsizdir. Bunun nedeni, çıkış gerilimlerinin giriş gerilimlerinden küçük olma zorunluluğu ve aynı zamanda düşük frekanslardaki transformator ve filtrelerin güç yoğunluğunun düşük olmasıdır. Lineer regülatörler, buna rağmen çok yüksek kalitede çıkış gerilimi üretirler. Esas uygulama alanları düşük güç seviyeleridir. Lineer regülatörlerdeki elektronik aygıtlar, aktif (lineer) bölgede çalışırlar, fakat daha yüksek güç seviyelerinde anahtarlama regülatörler kullanılırlar (Czarkowski 2001).

Anahtarlama regülatörler, güç elektroniği yarı iletken anahtarlarının açık ve kapalı olma durumlarını kullanarak çalışırlar. Düşük güç kaybı olmasından dolayı (iletim durumundayken anahtar üzerindeki düşük gerilim ve kesim durumundayken anahtar üzerindeki sıfır akımdan dolayı), anahtarlama regülatörler yüksek enerji dönüşümünü verimlilikle gerçekleştirirler (Czarkowski 2001).

Modern güç elektroniğinde anahtarlama elemanları, yüksek frekanslarda anahtarlama yapabilmektedir. İşlem frekansının daha yüksek olması, daha hafif transformatörlerin devrelere yerleştirilebilmesini ve filtrelerde bulunacak endüktans ve kapasitans değerlerinin daha küçük olmasını sağlamaktadır. Buna ek olarak konvertörlerin dinamik karakteristiği, yüksek çalışma frekanslarında gelişir. Kontrol döngüsünün bant genişliği genellikle çıkış filtresinin köşe frekansları ile belirlenir. Bu nedenle yüksek çalışma frekansları, yük akımı ve giriş gerilimindeki dinamik yanıtları elde edebilmeye izin verir (Czarkowski 2001).

DA-DA konvertörlerin fonksiyonları şunlardır:

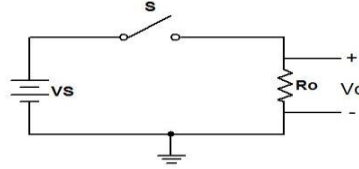
- Doğru giriş gerilimini, başka bir değerdeki doğru çıkış gerilimine çevirmek.
- Doğru çıkış gerilimini yük ve hat değişimlerine karşı regüle etmek.
- Doğru gerilim üzerindeki alternatif gerilim dalgalanmalarını belli bir düzeyin altına indirmek.
- Giriş kaynağı ve yük arasındaki izolasyonu sağlamak (bazı istisnalar hariç).
- Beslenen sistem ve giriş kaynağını elektromanyetik girişimden korumak.
- Ulusal ve uluslararası çeşitli güvenlik koşullarını sağlamak.

Tezin bu bölümünde öncelikli olarak DA sürücülerde kullanılan DA kıyıcılarla başlanılacaktır. DA kıyıcının çıkış gerilimi, anahtarın açma-kapama hızı ve bir açma-kapama periyodunda ne kadarlık sürede kapalı konumda kaldığı ile kontrol edilir. Bir açma-kapama periyodu içinde kapalı kalma süresinin periyoda oranı, doluluk oranı (duty cycle) olarak adlandırılır. Doluluk oranı, çıkış geriliminin darbe genişliğinin ayarlanması ile ilişkilidir. Buna DGM denilmektedir. DA-DA kıyıcılara ek olan filtreleme elemanları DGM DA-DA konvertörleri oluşturur. Dört temel DA-DA konvertör bulunmaktadır. Bunlar buck, boost, buck-boost ve cuk konvertörlerdir. Bu konvertörlerin popüler izole edilmiş biçimleri de kısaca tartışılmıştır. Konvertörlerin işlemleri, ideal yarı iletken aygıtlar ve komponentler varsayımları altında açıklanmıştır (Mohan, Undeland ve Robbins 2007).

### **2.3.1. DA DA kıyıcı devresi**

Şekil 2.39'da temel kıyıcı devresi görülmektedir. Bu devre,  $V_s$  genliğindeki DA giriş gerilimi, kontrol edilebilir S anahtarı ve  $R_0$  direncinin birbirlerine seri bağlanması ile

oluşturulmuştur. Birçok durumda, S anahtarı tek yönlü gerilim engelleme kabiliyetine ve yine tek yönlü akım iletebilme kabiliyetine sahiptir. Güç elektroniği anahtarları genellikle, güç MOSFET'leri, IGBT'ler, MCT'ler, güç BJT'leri ya da GTO'lar ile gerçekleştirilir (Czarkowski 2001).



Şekil 2.39. Omik yükte kısıyıcı devresi

Anahtar, doluluk oranı D süresince işlem yapmaktadır. Sabit anahtarlama frekansında giriş ve çıkış gerilimi arasında aşağıdaki eşitlikler geçerlidir.

$$T = \frac{1}{f} \quad (2.75)$$

$$D = \frac{t_{kapalı}}{t_{kapalı} + t_{açık}} = \frac{t_{on}}{T} \quad (2.76)$$

Çıkış geriliminin ortalama değeri

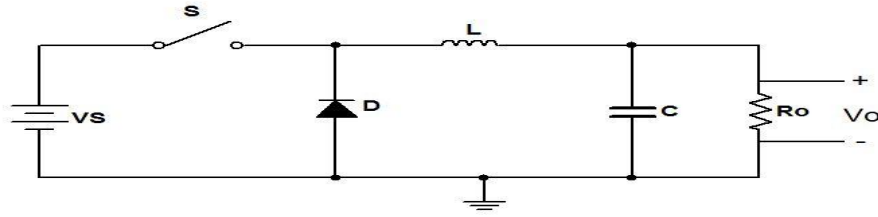
$$V_O = DV_S \quad (2.77)$$

ile verilmektedir. Görüldüğü gibi çıkış gerilimi, doluluk oranı D ayarlanarak regüle edilebilir. Ortalama çıkış gerilimi, her zaman giriş geriliminden daha küçüktür.

### 2.3.2. Düşürücü (BUCK) konvertör

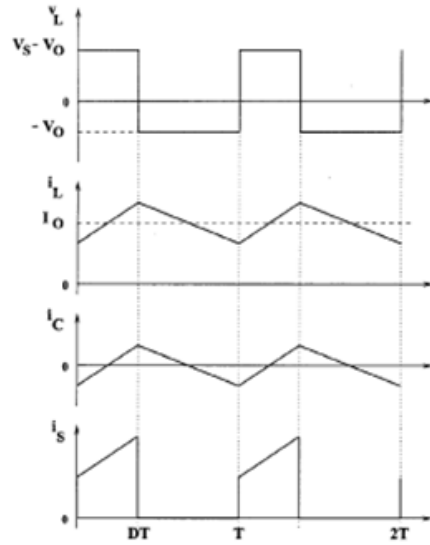
Düşürücü DA-DA konvertör, genellikle buck konvertör olarak bilinir ve Şekil 2.40'da gösterilmiştir. DA giriş gerilimi  $V_S$ , kontrol edilen S anahtarı, D diyotu, L filtre endüktansı, C kapasitörü ve  $R_0$  yük direncinden oluşmaktadır. Devre zaman boyutunda incelenirken, endüktans akımının hiçbir zaman sıfır olmaması halindeki konvertör durumu, CCM modu (continuous conduction mode, sürekli iletim durumu) olarak adlandırılır. S anahtarının iletimde olduğu durumda, D diyotunun ters kutuplandığı

Şekil 2.40'daki devrede gözlenebilir. S anahtarı kesimde olduğunda, diyot iletme geçer ve endüktansa akım sağlanır (Czarkowski 2001).



Şekil 2.40. Buck Konvertör Devresi

Endüktans gerilimi  $V_L$ , devre CCM durumundayken giriş gerilimi, çıkış gerilimi ve S anahtarının D doluluk oranı arasında ilişki türetilebilir. Faraday yasasına göre, endüktans üzerinde, anahtar iletimdeyken depolanan enerji, anahtar kesimdeyken üzerinde boşalan enerjiye eşit olmalıdır. Buck konvertör için (2.78) eşitliği geçerlidir.



Şekil 2.41. Buck konvertör devresi CCM durumu dalga şekilleri (Czarkowski 2001)

$$(V_s - V_o)DT = V_o(1 - D)T \quad (2.78)$$

Bundan dolayı çıkış geriliminin giriş gerilimine oranı olarak tanımlanan DA gerilim transfer fonksiyonu aşağıdaki gibi yazılabilir.

$$M_V = \frac{V_o}{V_S} = D \quad (2.79)$$

(2.79) denkleminde, çıkış geriliminin giriş geriliminden her zaman küçük olacağı görülmektedir.

DA-DA konvertörler, endüktans akımı  $i_L$ 'ye bağlı olarak iki ayrı durumda çalıştırılabilir. Buck konvertörün CCM çalışması daha önceden incelenmişti. Çıkış akımının ortalama değerinin düşük,  $R_o$  direncinin yüksek ve/veya  $f$  frekansının düşük olduğu durumda, konvertör DCM'de (discontinuous conduction mode, süreksiz iletim durumu) geçebilir. DCM'de, endüktans akımı anahtarlama periyodunun bir kısmında sıfır değerini alır. CCM'de yüksek verimlilik ve yarıiletken ile pasif komponentlerin etkin kullanımları için tercih edilir. DCM, çok özel durumlarda başlangıçta ve her bir anahtarlama periyodunun sonunda, endüktansın enerjisiz olmasının istendiği bazı kontrol uygulamalarında çalıştırılabilir. Bu iki modun aynı anda kullanımı ise karışık kontrol algoritmaları gerektirdiğinden yaygın değildir. Buck konvertörler için filtre endüktansının değeri, DCM ve CCM için sınırı belirler. Bu endüktans değerini belirleyen denklem aşağıda verilmiştir (Czarkowski 2001).

$$L_b = \frac{(1 - D)R}{2f} \quad (2.80)$$

$D=0,5$ ,  $R=10\Omega$ , ve  $f=100\text{kHz}$  karakteristik değerleri için endüktans sınır değeri  $L_b=0,25\mu\text{H}$  olmaktadır.  $L > L_b$  için konvertör CCM'de çalışır.

CCM durumunda  $i_L$  filtre endüktansı akımı üçgen şeklinde bir AA bileşenin üzerine binmiş  $I_o$  DA bileşeninden oluşmaktadır. Bu AA bileşenin hepsi filtre kapasitörü üzerinden  $i_c$  akımı olarak akar.  $i_c$  akımı, çıkış gerilimi  $V_o$  üzerinde küçük gerilim dalgalanmaları meydana getirir. Dalgalanma değerini, belirli bir  $V_r$  değeri altında, tepeden tepeye miktarını sınırlamak için filtre kapasitesi  $C$ , aşağıdaki eşitlikle elde edilen  $C_{min}$ 'den büyük olmalıdır.

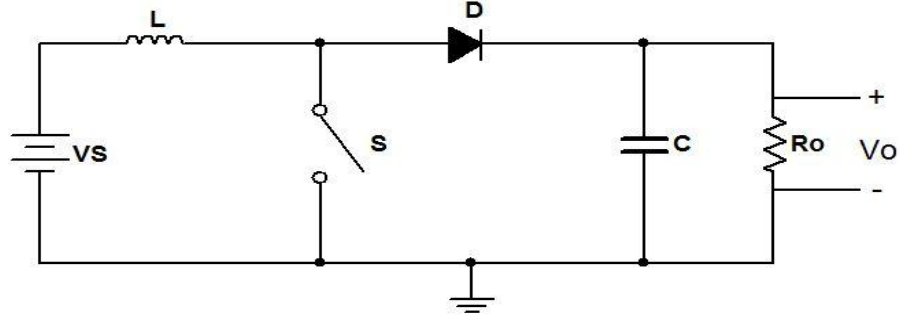
$$C_{min} = \frac{(1 - D)V_O}{8V_r L f^2} \quad (2.81)$$

$D=0.5$ ,  $V_r/V_O = 1\%$   $L=25\mu\text{H}$  ve  $f=100\text{kHz}$  olduğunda asgari kapasitans değeri  $C_{min} = 25\mu\text{F}$  olarak elde edilir.

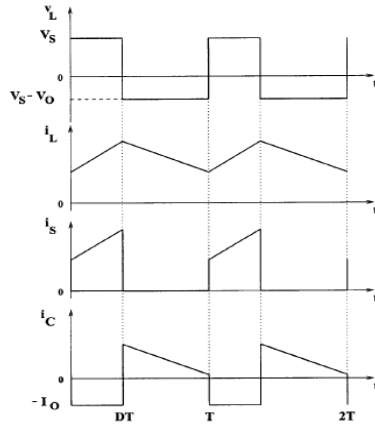
(2.80) ve (2.81) denklemleri Buck konvertör tasarımı için anahtar denklemlerdir. Giriş ve çıkış DA gerilimleri (dolayısıyla doluluk oranı  $D$ ) ve  $R_o$  yük direncinin oranı genellikle ön özelliklerle belirlenir. Tasarımcıdan genellikle  $f$  anahtarlama frekansı ve pasif bileşenler  $L$  ile  $C$ 'nin değerlerini belirlemesi beklenir. İlk olarak filtre endüktansı  $L$ 'nin CCM/DCM durumunda çalışmaya göre değeri belirlenir, daha sonra gerilim dalgalanması göz önüne alınarak filtre kapasitörü  $C$ 'nin değeri belirlenir. Konvertörlerin tasarım şıklığı ve düşük iletim kayıpları göz önüne alındığında, küçük pasif bileşenler kullanılması tercih edilir. Küçük pasif bileşenler, yüksek anahtarlama frekansı kullanılarak elde edilebilir. Anahtarlama frekansı ise kullanılan yarıiletken tipine göre sınırlıdır. Aynı zamanda kullanılan kapasitör ve endüktanstaki parazit etkiler de göz önüne alınmalıdır.

### 2.3.3. Yükseltici (BOOST) konvertör

Şekil 2.42, yükseltici konvertör devre şemasını göstermektedir. Bu devre,  $V_S$  giriş gerilimi,  $L$  yükseltici endüktansı, kontrol edilebilir  $S$  anahtarı,  $D$  diyotu,  $C$  filtre kapasitörü ve  $R_o$  yük direncinden oluşmaktadır. Endüktans akımının sürekli olduğu durum olan CCM halindeki yükseltici konvertörün dalga şekli, Şekil 2.43'de gösterilmektedir.  $S$  anahtarı kapalı olduğunda, yükseltici endüktans üzerindeki akım lineer olarak artar ve bu süre zarfında  $D$  diyotu kesimdedir.  $S$  anahtarı açıldığında, endüktans üzerinde saklanan enerji, diyot üzerinden çıkıştaki RC devresine uygulanır (Czarkowski 2001).



Şekil 2.42. Yükseltici (boost) konvertör devre şeması



Şekil 2.43. Yükseltici boost konvertör devresine ait CCM durumu çalışma grafikleri (Czarkowski 2001)

Yükseltici endüktans için Faraday yasası uygulandığında aşağıdaki eşitlik elde edilir.

$$V_S D T = (V_O - V_S)(1 - D)T \quad (2.82)$$

Bu eşitlikten DA gerilim transfer fonksiyonu aşağıdaki gibi bulunur:

$$M_V = \frac{V_O}{V_S} = \frac{1}{(1 - D)} \quad (2.83)$$

Boost konvertörün isminden ve (2.83) eşitliğinden de görüldüğü gibi çıkış geriliminin giriş geriliminden her zaman büyüktür.

Boost konvertörün CCM'de çalışabilmesi için,  $L > L_b$  olmalıdır,  $L_b$  aşağıdaki eşitlikten elde edilmektedir:



$$L_b = \frac{(1 - D)^2 DR}{2f} \quad (2.84)$$

D=0,5 R=10Ω ve f=100kHz için endüktansın sınır değeri  $L_b=6,25\mu\text{H}$  olarak hesaplanır.

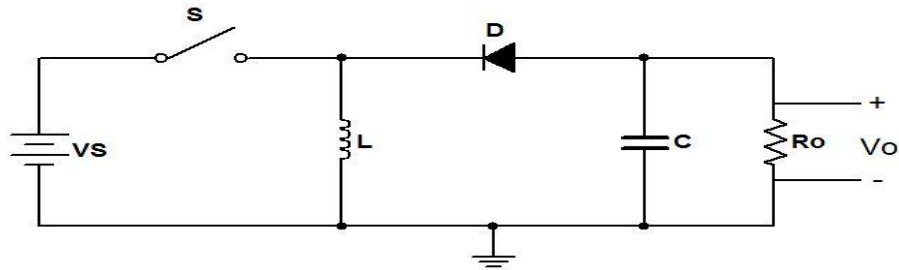
Şekil 2.43'de görüldüğü üzere, çıkıştaki RC devresine sağlanan akım süreksizdir. Dolayısıyla, çıkış gerilim dalgalandırmalarını sınırlandırmak için buck türevi konvertörlere kıyasla, daha büyük bir filtre kapasitesine ihtiyaç vardır. Filtre kapasitörü, diyot kesimde olduğunda yüke DA akım sağlamalıdır. Gerilim dalgalanması  $V_r$  olduğunda asgari filtre kapasitansı aşağıdaki denklem ile bulunur (Czarkowski 2001):

$$C_{min} = \frac{DV_o}{V_r R f} \quad (2.85)$$

D=0,5;  $V_r/V_o=1\%$ ; R=10Ω ve f=100kHz için boost konvertörün asgari kapasitans değeri  $C_{min}=50\mu\text{F}$  kadardır.

#### 2.3.4. Yükseltici düşürücü (BUCK-BOOST) konvertör

Buck-boost konvertörlerin izole edilmemiş (transformatörsüz) hali Şekil 2.44'de gösterilmiştir. Bu devre,  $V_s$  giriş gerilimi, L endüktansı, kontrol edilebilir S anahtarı, D diyotu, C filtre kapasitörü ve  $R_o$  yük direncinden oluşmaktadır. Anahtarın kapalı olması ile diyot kesimde kalırken endüktans akımı artmaktadır. Anahtar açık olduğunda, diyot üzerinden endüktans akımı dolaşarak devreyi tamamlar. RC paralel devresi ve L endüktansının bağlanması ile oluşan çıkış katındaki devrenin çözümünde, diyotun polaritesi dikkat edilecek en önemli noktadır.



Şekil 2.44. Buck boost konvertör devre şeması

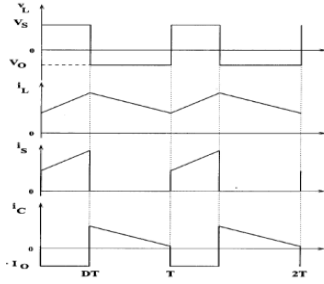
Buck-boost konvertörün dalga biçimleri, Şekil 2.45’de çizilmiştir. Kalıcı durum analizinde endüktans için Faraday yasasının uygulanması, aşağıdaki eşitliği verir:

$$V_S DT = -V_O(1 - D)T \quad (2.86)$$

Böylelikle buck-boost konvertörün DA gerilim transfer fonksiyonu

$$M_V = \frac{V_O}{V_S} = -\frac{D}{(1 - D)} \quad (2.87)$$

dir. Çıkış gerilimi  $V_O$ , devrenin toprağına göre negatiftir. Çıkış gerilimi, D’ye bağılı olarak giriş geriliminden büyük veya küçük olabilir. Özel durum olarak  $D=0,5$  için, çıkış geriliminin giriş gerilimine eşit olacağı görülmektedir.



Şekil 2.45. Buck boost konvertör elemanları üzerindeki dalga biçimleri (Czarkowski 2001)

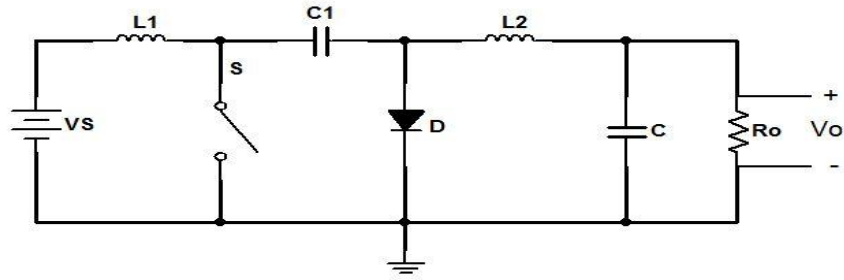
CCM ve DCM arasındaki sınırı endüktansın değeri belirler. Endüktansın sınır değeri aşağıdaki eşitlikle belirlenir:

$$L_b = \frac{(1 - D)^2 R}{2f} \quad (2.88)$$

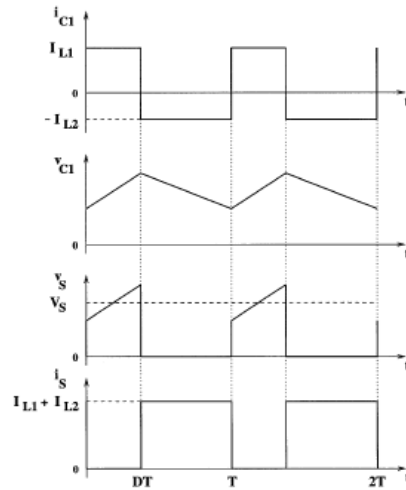
Konvertörün çıkış katının yapısı yükseltici konvertör devresinin çıkış katına benzemektedir. Diyotun ters yerleşiminden dolayı oluşan çıkıştaki zıt polarite tek farktır. Bu nedenle çıkış geriliminin dalgalanmasını kontrol eden azami kondansatör değeri (2.85) denklemiyle elde edilir.

### 2.3.5. CUK konvertör

CUK konvertör devresi Şekil 2.46'da gösterilmiştir. Bu devre,  $V_S$  giriş gerilimi,  $L_1$  giriş endüktansı, S kontrol edilebilir anahtarı,  $C_1$  enerji transfer kapasitörü, D diyotu,  $L_2$  filtre endüktansı, C filtre kapasitörü ve  $R_o$  yük direncinden oluşmaktadır. Bu topolojinin önemli bir avantajı, devrede fazla sayıda enerji depolayan eleman kullanılmasından dolayı giriş ve çıkışında sürekli enerji akışı sağlamasıdır. CUK konvertörün dezavantajları ise diyot, kapasitör ve anahtarın yüksek akıma maruz kalabilmesi ve enerji depolayan elemanların fazla kullanılmasından ötürü devrede ortaya çıkan reaktif güçtür. Şekil 2.47'de bu konvertörün temel dalga biçimleri görülmektedir. Anahtar kapalı duruma geçtiğinde, diyot kesimdedir ve  $C_1$  kapasitörü  $L_2$  endüktansı üzerinden boşalır. Anahtar açıldığında, diyot  $L_1$  ve  $L_2$  endüktanslarının akımını iletir, bu durumda,  $C_1$ ,  $L_1$  tarafından tekrar dolar.



Şekil 2.46. CUK Konvertör Devresi



Şekil 2.47. CUK konvertör üzerindeki elemanların dalga şekilleri (Czarkowski 2001)

Bu konvertörün DA gerilim transfer fonksiyonunu elde etmek için, kalıcı durum analizinde kapasitör üzerindeki akımın sıfır olduğu prensibi kullanılmalıdır.  $L_1$  ve  $L_2$  endüktanslarının, dalgalanma akımlarını ihmal edilebilecek kadar büyük olduklarında  $C_1$  kondansatörü kalıcı durum yanıtını verdiği için

$$I_{L2}DT = I_{L1}(1 - D)T \quad (2.89)$$

yazılabilir. Kayıpsız bir konvertör için aşağıdaki eşitlik geçerlidir:

$$P_S = V_S I_{L1} = -V_O I_{L2} = P_O \quad (2.90)$$

Bu iki eşitlik kullanılarak, CUK konvertörün DA gerilim transfer fonksiyonu

$$M_V = \frac{V_O}{V_S} = -\frac{D}{1 - D} \quad (2.91)$$

şeklinde bulunur. Bulunan gerilim transfer fonksiyonunun, buck-boost gerilim transfer fonksiyonu ile aynı olduğuna dikkat edilmelidir.

CCM ve DCM çalışma durumları aşağıdaki eşitlikler ile belirlenir:

$$L_{b1} = \frac{(1 - D)R}{2Df} \quad (2.92)$$

$$L_{b2} = \frac{(1 - D)R}{2f} \quad (2.93)$$

CUK konvertörün çıkış katı, BUCK konvertör ile benzerdir. Bu yüzden filtre kapasitörü için elde edilen denklem aşağıdadır:

$$C_{min} = \frac{(1 - D)V_O}{8V_r L_2 f^2} \quad (2.94)$$

$C_1$  kapasitöründeki gerilim dalgalanması aşağıdaki eşitlikle tahmin edilebilir:

$$V_{r1} = \frac{DV_o}{C_1 R_f} \quad (2.95)$$

CUK konvertörlerin izole (transformatörlü) tasarımları,  $C_1$  kondansatörünü ayırarak ve ayrılan bu kondansatörün devre ile arasında yüksek frekans transformatörü yerleştirilerek tasarlanabilir (Czarkowski 2001).

#### 2.4. İnvörtörler

Kendisine uygulanan doğru akım veya gerilimi, güç anahtarlama elemanlarıyla alternatif dalga akım veya gerilimine çeviren devrelere invertör denilmektedir. Endüstride yüksek frekanslı devreler olarak da bilinmektedir. Başlıca uygulama alanları arasında AA motor kontrolü, kesintisiz güç kaynakları, endüksiyonla ısıtma, rüzgâr ve güneş enerji sistemleri, değişken frekanslı uygulamalar ve benzeri alanlar bulunmaktadır. İnvörtörlerde kontrolün lineer olarak yapıldığı kabulü söz konusudur.

Temel olarak 5 farklı referans noktası belirleyerek invertörler sınıflandırılabilir:

- Besleme kaynağına göre
  - Gerilim kaynaklı invertörler (VSI)
  - Akım kaynaklı invertörler (CSI)
- Faz sayısına göre
  - Bir fazlı invertörler
  - Üç fazlı invertörler
- Kontrol türüne göre
  - Kare dalga invertörler
  - Boşluklu kısmi kare dalga invertörler
  - DGM invertörler
- İletim süresine göre
  - 180 derece iletimli invertörler
  - 120 derece iletimli invertörler
- Devre yapısına göre
  - Yarım köprü invertörler
  - Tam köprü invertörler
  - Push pull invertörler (Bodur 2010)

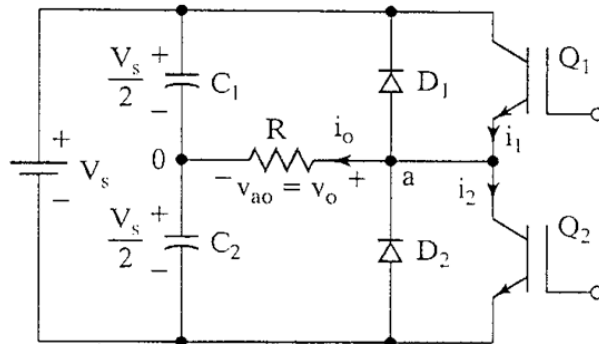
DGM ve gerilim kaynaklı invertörler, uygulamada daha sık kullanılmaktadır. Bu nedenle invertör devreleri üzerindeki incelemeler, gerilim kaynaklı invertörler üzerine yoğunlaşmıştır. Bir fazlı invertörlerin çalışma prensipleri incelenmiş ve çalışma

denklemleri türetilmiştir. Üç fazlı invertörler, bir fazlı invertörlerin AC dalga biçimindeki çıkışlarının faz farkı ile üretilmesi sonucu elde edilir. Faz farkının üretilmesi, gerekli zaman kayması ile anahtarlama oluşması ile mümkündür. Bir fazlı invertör devreleri ayrıntılarıyla incelendiği için, üç fazlı invertör devreleri üzerinde durulmamıştır.

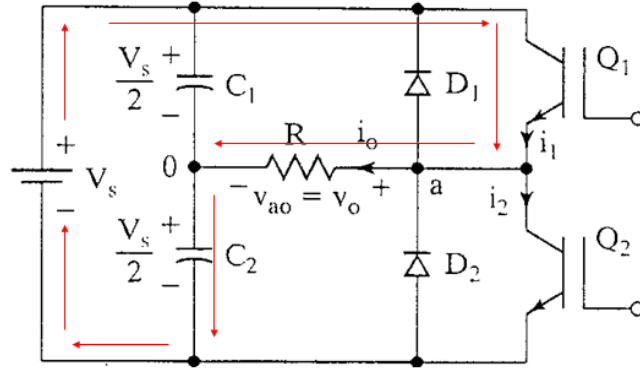
#### 2.4.1. Bir fazlı yarım dalga invertörler

Bu bölümde, bir fazlı invertör devreleri incelenecektir. Bu incelemenin sonucunda, bir fazlı invertör devresinin matematiksel modeli ortaya konulacak ve simülasyon programı için gereken altyapı hazırlanacaktır. Bunlara ek olarak, bir fazlı invertörün çalışma prensiplerinin ortaya konması, üç fazlı invertörlerin modellenmesi hususunda temel bilgiler sağlayacaktır. Şekil 2.48’de bir fazlı invertör devresi görülmektedir. Bu devre iki adet kıyıcı ve üç adet DA kaynak ucundan oluşmaktadır. Transistörler değişimli olarak iletim veya kesim durumuna geçmektedirler.

Q1’in iletimde, Q2’nin kesimde olduğu durum Şekil 2.49’da açıklanmaktadır.  $V_s$ , DA gerilimi, kondansatörleri  $\frac{V_s}{2}$  gerilim değerine kadar doldurur ve kondansatörlerin bulunduğu kol açık devre durumundadır. Q1 iletimde olduğu durumda, direnç yükü üzerinde belirtilen yönde,  $\frac{V_s}{2R}$  büyüklüğünde  $i_o$  akımı akacaktır (Espinoza C. 2001).

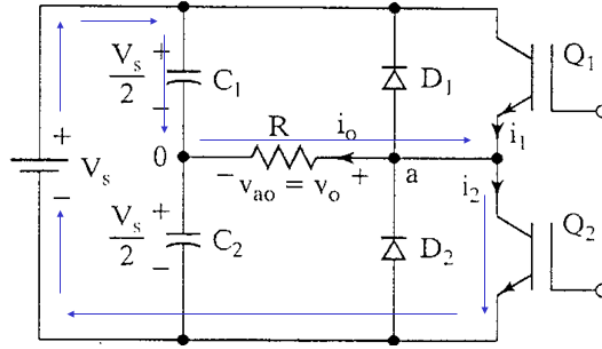


Şekil 2.48. Bir fazlı invertör devresi (Gastli 2011)



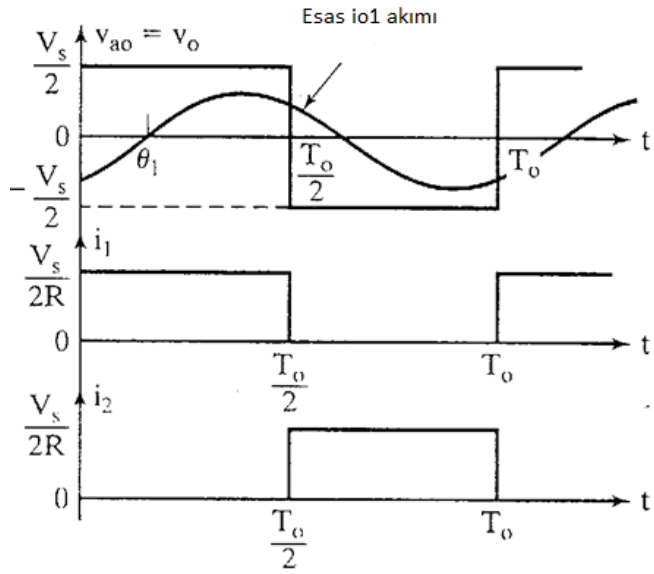
Şekil 2.49. Q1 transistörü iletim durumundayken devrenin çalışması(Gastli 2011'den değiştirilerek alınmıştır)

Şekil 2.50'de Q1'in kesimde, Q2'nin iletimde olduğu durum gösterilmektedir. Bu durumda,  $C_2$  kondansatörünün depoladığı  $\frac{V_s}{2}$  gerilimi Q2 üzerinden devreyi tamamlayacaktır. Bu sebeple R yükü üzerindeki akımın değeri  $i_o = -\frac{V_s}{2R}$  kadar olur (Espinoza C. 2001).



Şekil 2.50. Q2 transistörü iletim durumundayken devrenin çalışması(Gastli 2011'den değiştirilerek alınmıştır)

Q1 ve Q2'nin değişimli olarak  $T_o$  periyodu ile anahtarlanması sonucu Şekil 2.51'deki grafikler elde edilir. İlk grafik yük üzerinde görülen gerilimi, ikinci grafik  $0 - \frac{T_o}{2}$  süresince yük üzerinden akan akımı, üçüncü grafik ise  $\frac{T_o}{2} - T_o$  süresince yük üzerindeki akımı göstermektedir. Bu akımların iki grafikte de pozitif gösterilmelerinin sebebi, yönlerinin birbirine göre zıt olarak tanımlanmasıdır (Espinoza C. 2001).



Şekil 2.51. Yük üzerinde görülen gerilim ve akım grafikleri (Gastli 2011'den değiştirilerek alınmıştır)

Çıkış geriliminin RMS değeri

$$V_o = \sqrt{\frac{2}{T_o} \int_0^{\frac{T_o}{2}} \frac{V_s^2}{4} dt} = \frac{V_s}{2} \quad (2.96)$$

ani çıkış geriliminin Fourier seri (FS) açılımı

$$V_o = \frac{a_o}{2} + \sum_{n=1}^{\infty} (a_n \cos n\omega t + b_n \sin n\omega t), \quad (2.97)$$

$$a_o, a_n = 0 \quad (2.98)$$

$$b_n = \frac{1}{\pi} \left[ \int_{-\pi}^0 \frac{-V_s}{2} \sin n\omega t d(\omega t) + \int_0^{\pi} \frac{V_s}{2} \sin n\omega t d(\omega t) \right] \quad (2.99)$$



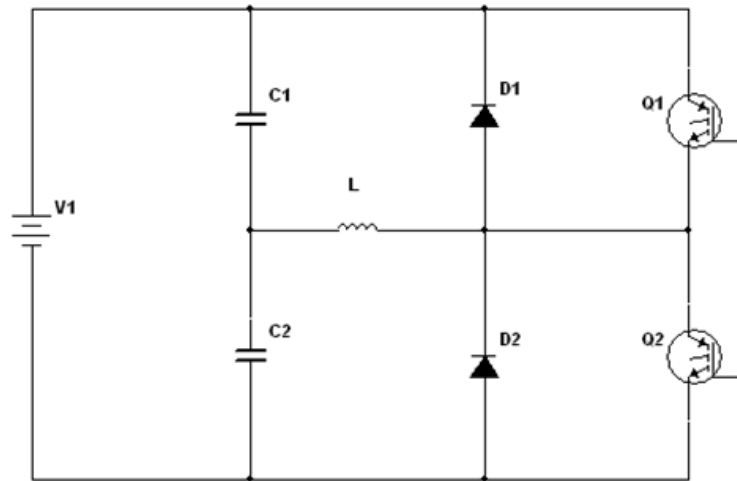
$$b_n = \frac{2V_s}{n\pi} , \quad n = 1,3,5, \dots \quad (2.100)$$

$$V_o = \sum_{n=1}^{\infty} \frac{2V_s}{n\pi} \sin n\omega t , \quad n = 1,3,5, \dots \quad (2.101)$$

ana bileşenin RMS değeri ise

$$V_{o1} = \frac{1}{\sqrt{2}} \frac{2V_s}{\pi} \quad (2.102)$$

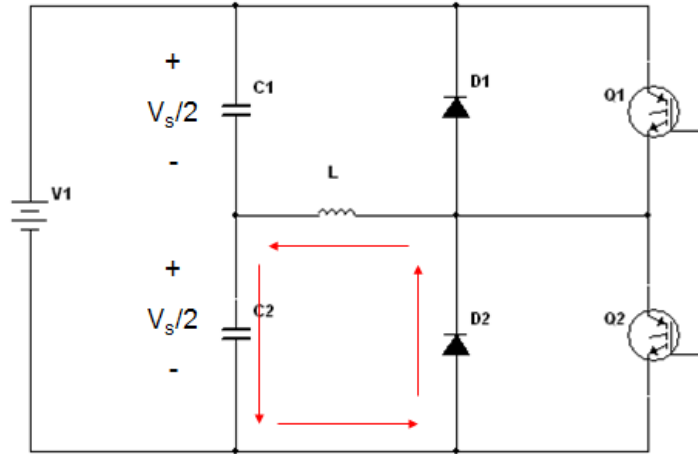
dir. Yükün endüktif değerinin fazla olduğu durumda akım değişimlerinin çok hızlı olmayacağı beklenen bir olaydır. Devrenin şeması Şekil 2.52’de verilmiştir.



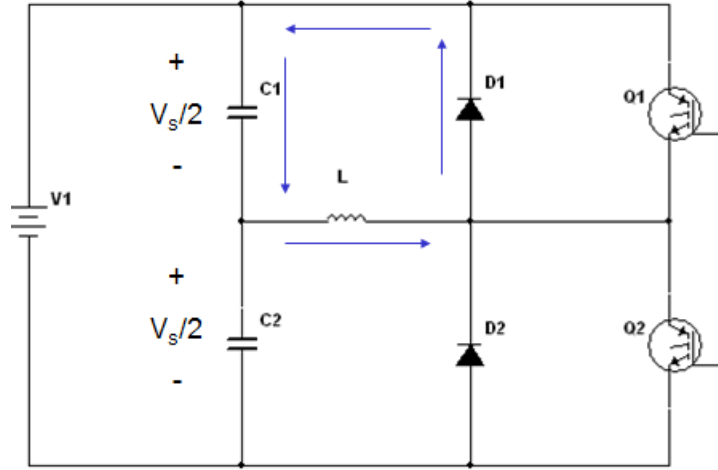
Şekil 2.52. Endüktif yüklü bir fazlı invertör devresi (Gastli 2011)

Bu devre, sadece omik yük içeren devreden farklı çalıştığı anlar incelendiğinde, iki kritik nokta ortaya çıkmaktadır. Birincisi Q1’in kesime geçtiği an  $\frac{T_0}{2}$  ve ikincisi Q2’nin kesime geçtiği an  $T_0$ ’dır. Bu anlarda devrenin durumu aşağıda incelenmiştir.

Şekil 2.53’deki ilk devrede Q1 kesime geçmiş ve diyot üzerindeki akım D2 diyotu üzerinden dengeye gelene kadar dolacaktır. Şekil 2.54’deki ikinci devrede ise Q2 kesime geçmiş ve akımın izleyeceği yol belirtilmiştir.

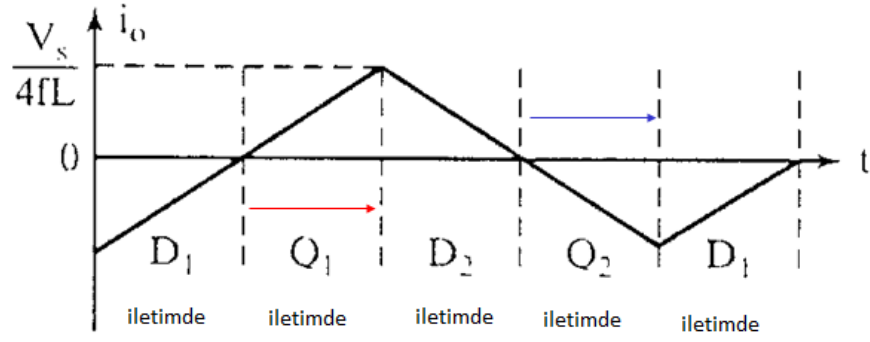


Şekil 2.53. Endüktif yüklü invertörde  $Q_1$ 'in kesime geçmesi (Gastli 2011'den değiştirilerek alınmıştır)



Şekil 2.54. Endüktif yüklü invertörde  $Q_2$ 'in kesime geçmesi (Gastli 2011'den değiştirilerek alınmıştır)

Şekil 2.55'de çıkış akımının diyot ve transistör durumlarına göre aldığı değerler gösterilmiştir. Bu durumda transistörlerin sadece bir periyodun dörtte birlik bir süresince iletimde kalması sağlanmıştır.



Şekil 2.55. Çıkış akımının, diyot ve transistör durumlarına bağlı grafiği (Gastli 2011'den değiştirilerek alınmıştır)

Yükün RL durumunda olması halinde çıkış akımının FS açılımı aşağıdaki gibi olmaktadır:

$$i_o = \frac{V_o}{Z} \quad (2.103)$$

$$i_o = \frac{V_o}{R + jn\omega L} \quad (2.104)$$

$$i_o = \sum_{n=1,3,5,\dots}^{\infty} \frac{2V_s}{n\pi\sqrt{R^2 + (n\omega L)^2}} \sin(n\omega t - \theta_n) \quad (2.105)$$

$$\theta_n = \tan^{-1} \left( \frac{n\omega L}{R} \right) \quad (2.106)$$

Birçok durumda kullanılabilir güç olarak tanımlanabilecek aktif çıkış güç denklemi aşağıda verilmektedir:

$$P_{o1} = V_{o1}I_{o1} \cos(\theta_1) = I_{o1}^2 R \quad (2.107)$$

$$P_{o1} = \left[ \frac{2V_s}{\sqrt{2}\pi\sqrt{R^2 + (n\omega L)^2}} \right]^2 R \quad (2.108)$$

Eğer invertörün kayıpsız olduğu varsayılırsa, yükün çektiği ortalama güç DA kaynağın ürettiği ortalama güce eşittir.

$$\int_0^T V_s(t) i_s(t) dt = \int_0^T V_o(t) i_o(t) dt \quad (2.109)$$

Endüktif yük için, akım yaklaşık olarak sinüzoidal olmaktadır ve çıkış geriliminin esas bileşeni yüke gücü aktarır. Aynı zamanda DA giriş gerilimi  $V_s$  değerini korur.

$$\int_0^T i_s(t) dt = \frac{1}{V_s} \int_0^T \sqrt{2} V_{o1} \sin(\omega t) \sqrt{2} I_o \sin(\omega t - \theta_1) dt = I_s \quad (2.110)$$

$$I_s = \frac{V_{o1}}{V_s} I_o \cos(\theta_1) \quad (2.111)$$

Sistem performans parametreleri olarak harmonik faktör ( $HF_n$ ), toplam harmonik distorsiyon (THD) ve bozulma faktörleri hesaplanabilir. n'inci harmoniğin harmonik faktörü  $HF_n$ , matematiksel olarak aşağıdaki gibi tanımlanır:

$$HF_n = \frac{V_{on}}{V_{o1}} , \quad n > 1 \quad (2.112)$$

Burada  $V_{on}$  n'inci harmonik bileşenin RMS değeri ve  $V_{o1}$  ana bileşenin RMS değeridir.

THD olarak gösterilen toplam harmonik bozulma, ana bileşen ile dalga şeklinin birbirine olan yakınlığını gösteren bir parametredir.

$$THD = \frac{1}{V_{o1}} \sqrt{\sum_{n=2,3,\dots}^{\infty} V_{on}^2} \quad (2.113)$$

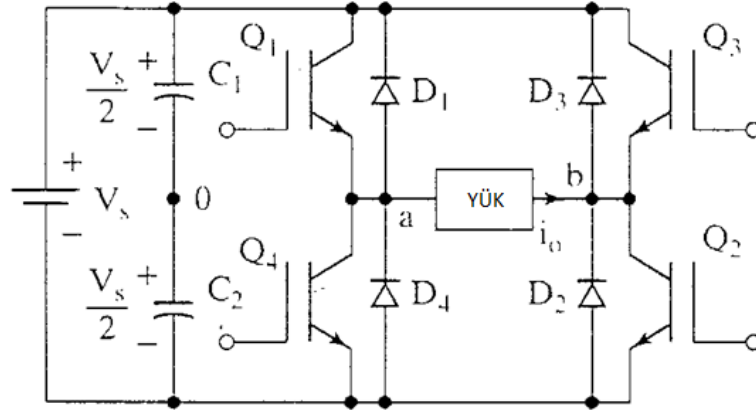
DF olarak gösterilen bozulma faktörü, belirli bir dalga şeklinde, ikinci derece zayıflamalardan sonra kalan, harmonik bozulma miktarına işaret etmektedir.

$$DF = \frac{1}{V_{o1}} \sqrt{\sum_{n=2,3,\dots}^{\infty} \left(\frac{V_{on}}{n^2}\right)^2} \quad (2.114)$$

$$DF_n = \frac{V_{on}}{V_{o1}n^2} \quad , \quad n > 1 \quad (2.115)$$

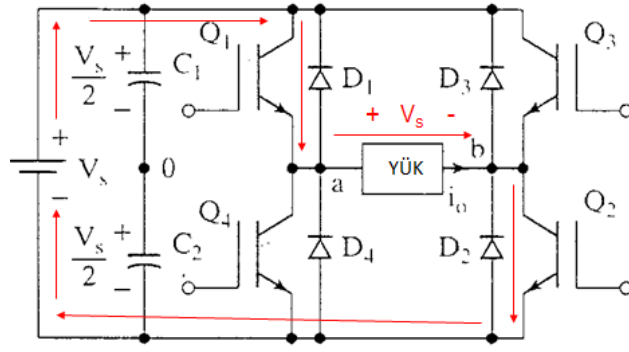
#### 2.4.2. Bir fazlı tam dalga invertörler

Bir fazlı tam köprü invertör devresi Şekil 2.56'da görülmektedir. Dört adet kıyıcı ve üç adet DA kaynak girişinden oluşmaktadır. Q1-Q2 ve Q3-Q4 anahtarları dönüşümlü olarak iletim ve kesime halinde olmaktadır. Her bir anahtar çifti, yük üzerinde ters kutuplu gerilim oluşturmaktadır.



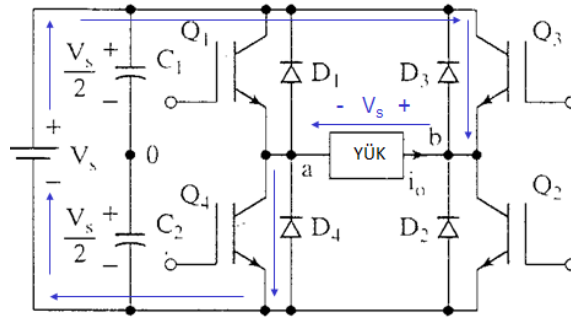
Şekil 2.56. Bir fazlı tam dalga invertör devresi (Gastli 2011)

İlk olarak, Q1-Q2 iletimde, Q3-Q4 kesimde olduğu durumda; DA kaynağın, iletime geçen anahtarlar üzerinden akım sağlayacağı göz önüne alındığında, yük üzerinde dolaşan akımın Şekil 2.57'de gösterildiği gibi olacağı açıktır.



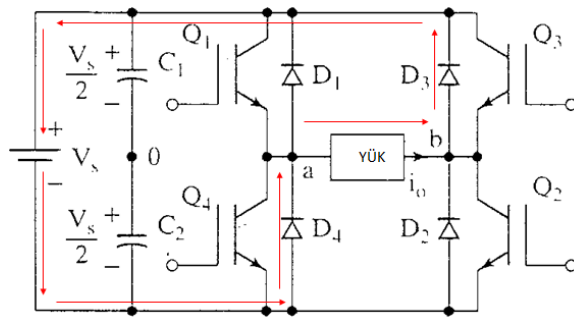
Şekil 2.57. Q1, Q2 anahtarları iletimde, Q3,Q4 anahtarları kesimde iken yük üzerinde dolaşan akım. (Gastli 2011'den değiştirilerek alınmıştır)

Q1 ve Q2 periyot içerisinde belirlenen süre kadar iletimde kaldıktan sonra Q3-Q4 anahtar çifti iletime geçecektir ve bu süre zarfında Q1-Q2 kesimde olacaktır. Bu durumda yük üzerinde dolaşan akım, Şekil 2.58'de gösterilmiştir.



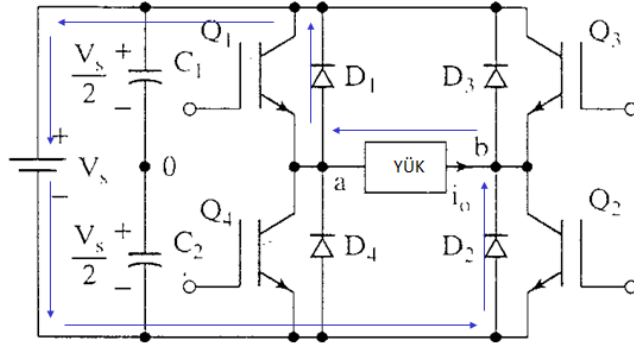
Şekil 2.58. Q3, Q4 anahtarları iletimde, Q1,Q2 anahtarları kesimde iken yük üzerinde dolaşan akım. (Gastli 2011'den değiştirilerek alınmıştır)

Yükün endüktif olduğu durumda ve bütün anahtarlar kesimde iken invertör devresinde, Şekil 2.59'da gösterildiği gibi bir akım dolaşır. Bu an, Q1-Q2'nin iletimdeyken birden kesime geçmesi ve Q3 ve Q4'ün henüz iletime geçmemiş olduğu durumdur.



Şekil 2.59. Endüktif yükte, Q1,Q2'nin kesime geçtiği ve Q3,Q4'ün daha iletime geçmediği durumda yük üzerindeki akım. (Gastli 2011'den değiştirilerek alınmıştır)

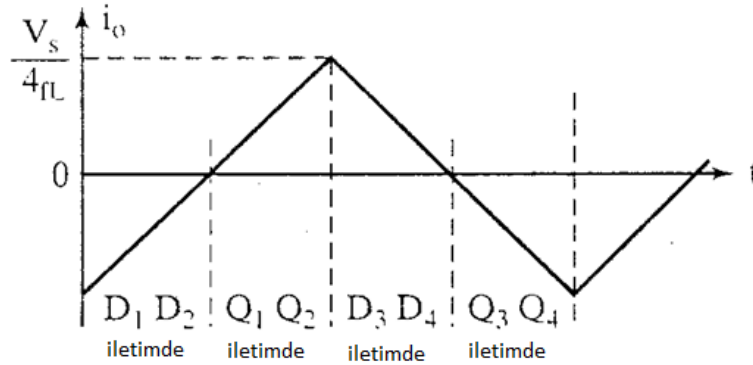
Q3-Q4'ün kesime geçtiği ve Q1-Q2'nin henüz ilettime geçmediği durumda, akım Şekil 2.60'da belirtilen yolu takip ederek devreyi tamamlayacaktır.



Şekil 2.60. Endüktif yükte, Q3,Q4'ün kesime geçtiği ve Q1,Q2'nin daha ilettime geçmediği durumda yük üzerindeki akım (Gastli 2011'den değiştirilerek alınmıştır)

Tam dalga invertör devrelerinde kullanılan diyotlar, anahtar çiftlerinin geçiş durumlarında, endüktif yük akımının hemen söndürülememesinden dolayı, anahtarlama elemanları üzerinde hasara sebebiyet vermesini önlemek amacıyla kullanılmaktadır (Espinoza C. 2001).

Endüktif yükte, anahtarlama elemanları diyot durumları ve yük üzerindeki akımın zaman göre değişim grafiği Şekil 2.61'de gösterilmiştir.



Şekil 2.61. Anahtarlama elemanları, diyotlar ve akımın zamana göre değerlendirilmesi (Gastli 2011'den değiştirilerek alınmıştır)

### 2.4.3. DGM invertörler

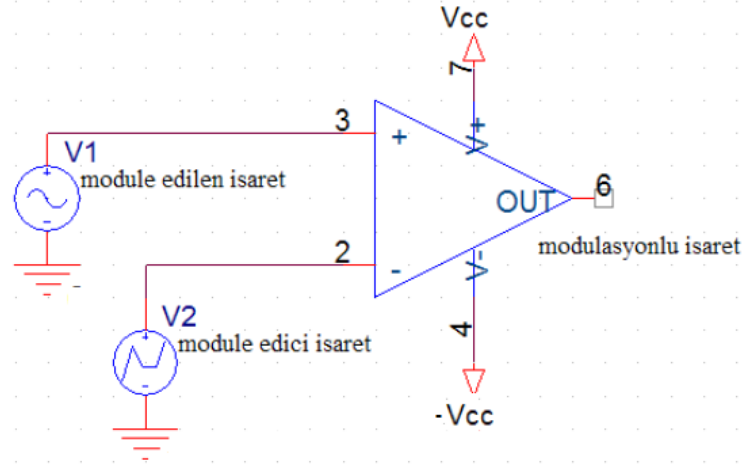
DGM invertör, darbe genişlik modülasyonu tekniğini kullanarak çıkışın genliğinin ve frekansının belirlenmesini sağlayan invertördür. Belirli bir frekanstaki sinyalin darbe periyot oranının, başka bir sinyal ile kontrol edilmesi esasına dayanır. Anahtarların açık

ya da kapalı olma süreleri, modüle edilmiş işaretin lojik değerlerine bağlı olarak ayarlanır. DGM ile sürülen bir invertörün çeşitli yönden üstünlükleri vardır. Bunlar arasında; çıkıştaki yükün sabit olmadığı negatif geri beslemeli bir güç uygulamasında hızlı ve etkin bir şekilde gerilimin istenen değerde tutulması, anahtarların etkin kullanılmasından dolayı anahtarlar üzerindeki kayıpların azalması ve böylelikle anahtarların kolay soğutulabilme olanağının bulunması sayılabilir.

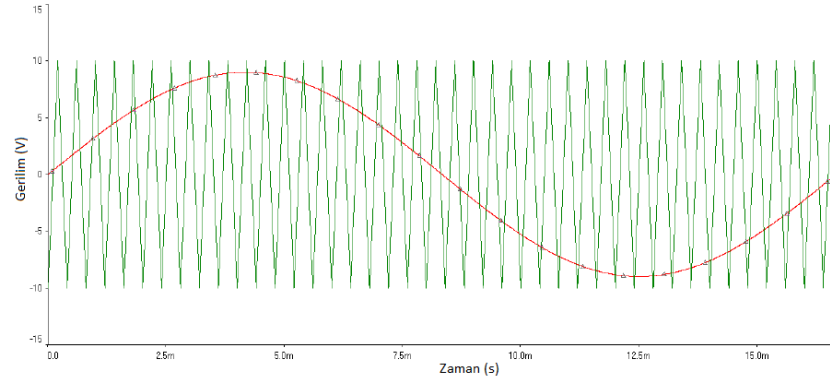
Darbe genişliği ile modüle edilmiş bir sinyal elde edebilmek için modüle edici yüksek frekanslı bir sinyale ihtiyaç vardır. İhtiyaç duyulan bu işarete *taşıyıcı işaret* adı verilir. Taşıyıcı işaretin genlik olarak, modüle edilecek işaretin tepe değerinden daha büyük ve taban değerinde daha küçük olması gerekmektedir. Frekans olarak ise, Nyquistic kriteri göz önüne alınarak, modüle edilecek sinyalin bant genişliğinin en az iki katı olması gerekir. Fakat pratikte daha yüksek frekanslar kullanılmaktadır. Çünkü modüle edilen işaret invertör çıkışında, yüksek harmonikleri sinyal üzerinden atmak amacıyla alçak geçiren filtreden geçirilecektir. Köşe frekanslarında iyi süzme yapabilen keskin frekans devrelerinin tasarımı güç ve masraflı olduğu için pratikte, taşıyıcı frekansının yüksek seçilmesi gereklidir. Şekil 2.62'de yaygın olarak kullanılan bir DGM karşılaştırıcı devresi gösterilmektedir. Bu devrenin modüle edici işaret kısmına genellikle testere dişi uygulanır. İntertör devrelerinde çıkışta sinüzoidal işaret elde edilmek istendiği için modüle edilen işaret kısmına çıkışta istenen frekansta sinüzoidal işaret uygulanır. Devrenin çıkışı, invertör devresindeki anahtarların iletim ve kesimde olma durumlarını gösteren bilgileri içermektedir. Karşılaştırıcıya giren küçük değerli işaretler, karşılaştırıcının çıkışında yüksek güçlü invertörün nasıl çalışacağına dair bilgileri invertör anahtarlarına bir mikrodenetleyici ile sağlayabilir. Anahtarlamalar sonucunda istenen frekansta sinüzoidal işaret, yüksek frekanslardaki harmonikleri süzmek amacıyla uygun bir alçak geçiren filtreden geçirilerek elde edilir. Çıkışın genliği istenen değerde değilse, bir transformatör ile uygun gerilim seviyesine sabitlenebilir (Ece ve ark. 2010).

Şekil 2.63'de DGM karşılaştırıcı girişine uygulanabilecek sinyaller gösterilmektedir ve Şekil 2.64'de ise karşılaştırıcının çıkışında elde edilen DGM işareti görülmektedir. Tam dalga invertörde, karşılaştırıcı çıkışındaki işaretin pozitif kısmı ilgili yönü kontrol eden anahtar çiftlerinin iletimde olacağını, negatif kısmı ise, zıt yönü kontrol eden anahtar çiftlerinin iletimde olacağını göstermektedir.

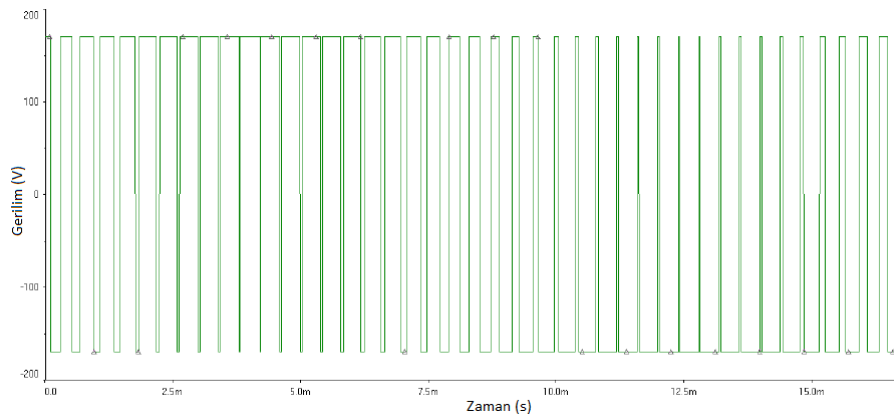




Şekil 2.62. DGM karşılaştırıcı devresi



Şekil 2.63. DGM taşıyıcı sinyali (yeşil renkli) ve elde edilmek istenen invertör çıkış sinyali (kırmızı renkli) (Ece ve ark. 2010'dan değiştirilerek alınmıştır)



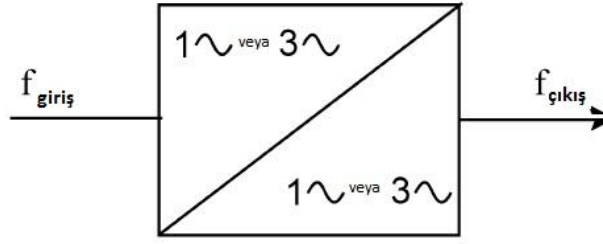
Şekil 2.64. Çıkıştaki DGM sinyali (Ece ve ark. 2010'dan değiştirilerek alınmıştır)

## 2.5. Frekans Dönüştürücüler

Tezin bu bölümünde, frekans dönüştürücülerin yapıları, matematiksel modellemeleri, çalışma prensipleri, kullanım alanları üzerinde durulmuştur. Frekans dönüştürme işlemi birkaç yolla gerçekleştirilebilir. Birincisi sinüzoidal dalga şekline sahip bir giriş sinyali, doğrultucu devreler ile zamanla değişmeyen sabit bir sinyale çevirmektir. Bunun ardından, doğrultulan sinyali bir invertör devresiyle farklı frekanstaki bir sinüzoidal işarete çevirmek mümkün olur. Bu tür frekans çevrim işleminde; giriş sinyalinin frekansı, tasarımcının tercihine bağlı olarak artırılıp azaltılabilir. Kullanılan devrenin parametrelerine bağlı olarak çıkış dalgasındaki harmonikler istenen değerin altında tutulabilir. Ayrıca, frekans dönüşüm işleminde, çıkış geriliminin genliğinin değiştirilmesi isteniyorsa, doğrultucu devreden sonra bir konvertör devresi yerleştirilebilir. Farklı olarak invertör çıkışındaki sinyalin genliği, transformatör kullanılarak da değiştirilebilir ancak kullanılan transformatörün konvertör devresine göre daha ağır olacağı göz önüne alınmalıdır (Ozpineci ve Tolbert 2013).

Doğrultucu devreler ve invertörler kullanılarak tasarlanan frekans değiştirici devreleri; tasarım problemlerini, üretim maliyetlerini ve verimsiz çalışma gibi sorunları beraberinde getirir. Bu sorunların önüne geçmek için belirli bir frekanstaki alternatif sinyali, özel anahtarlama yöntemleri kullanarak hiç doğrultmadan başka bir frekanstaki alternatif sinyale çevirmek mümkündür. Bu işlemi yapan devrelere *frekans dönüştürücüler* denilmektedir (Ozpineci ve Tolbert 2013).

Frekans dönüştürücü devreler faz girişi ve çıkışlarına göre gruplandırılabilir. Girişi bir fazlı, çıkışı bir fazlı olan frekans dönüştürücü devreleri bir faz-bir faz frekans dönüştürücü devreler olarak isimlendirilir. Girişi bir fazlı, çıkışı üç fazlı olan bir faz-üç faz frekans dönüştürücüler; girişi üç faz, çıkışı bir faz olan üç faz-bir faz frekans dönüştürücüler ve girişi üç faz çıkışı üç faz olan üç faz-üç faz frekans dönüştürücüler mevcuttur. Frekans dönüştürücünün blok diyagramı Şekil 2.65'de gösterilmiştir. Yapılan matematiksel incelemelerde, yaygın kullanım alanlarının bulunmasından dolayı, bir faz-bir faz frekans dönüştürücüler ve üç faz-bir faz frekans dönüştürücüler incelenmiştir (Chattopadhyay 2001).



Şekil 2.65. Frekans dönüştürücü blok diyagramı (Ozpineci ve Tolbert 2013'den değiştirilerek alınmıştır)

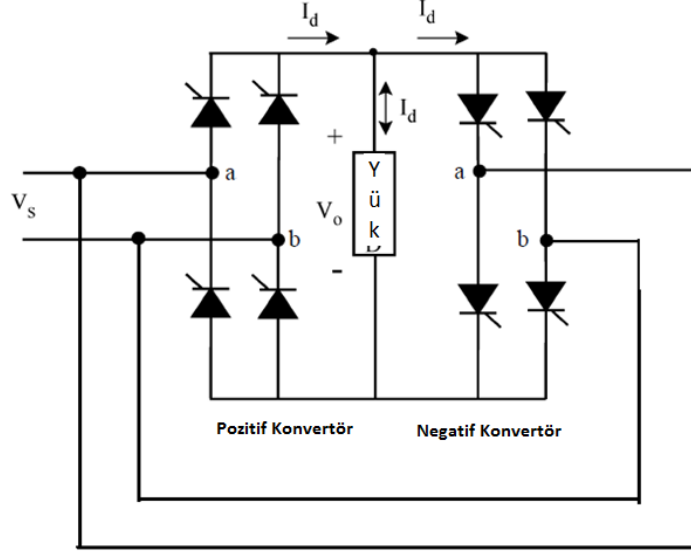
Frekans dönüştürücülerin uygulama alanlarına bakıldığında, fırın ısıtıcı lamba gibi omik yüklerde güç kontrolü amacıyla; vantilatör, küçük güçlü AA motor (fan, pompa, kompresör gibi) içeren sistemlerde hız kontrolü amacıyla; statik AA regülatörlerde gerilim kontrolü amacıyla ve statik AC şalterlerde devreyi açma ve kapama amacıyla birçok sahada yer aldığı görülmektedir. Yüksek güç gerektiren uygulamalar genellikle üç faz-bir faz frekans dönüştürücüler kullanılarak gerçekleştirilirken, küçük ve orta seviyeli güç gereksinimi olan uygulamalar bir faz-bir faz frekans dönüştürücüler kullanılarak gerçekleştirilir.

Frekans dönüştürücülerin uygulama alanları incelendiğinde, genellikle alternatif sinyallerle çalışan sistemlerin kontrol edilmesi üzerine yoğunlaşdığı gözlenmektedir. Frekans dönüştürücülerin bu noktada, sabit frekansta çalışan gerilim kontrolörlerinden üstün olduğu görülmektedir. Çünkü girişteki belirli bir frekanstaki sinüzoidal gerilim, sistem gereksinimine göre yüksek veya alçak frekansa çevrilerek, sinyalin ihtiva ettiği gücün değiştirilmesi kolaylıkla sağlanır. Bu dönüşümün ana prensibi, belirli bir frekanstaki gerilim dalgasının ardışık dilimlerinden, farklı bir frekanstaki alternatif gerilimin elde edilmesine dayanır ve ilk olarak 1920'de tasarlanmıştır. Fakat ticari uygulamalarının yaygınlaşması için silikon kontrollü doğrultucuların 1960'lardaki gelişiminin beklenmesi gerekmiştir (Chattopadhyay 2001).

### 2.5.1. Bir faz-bir faz frekans dönüştürücüler

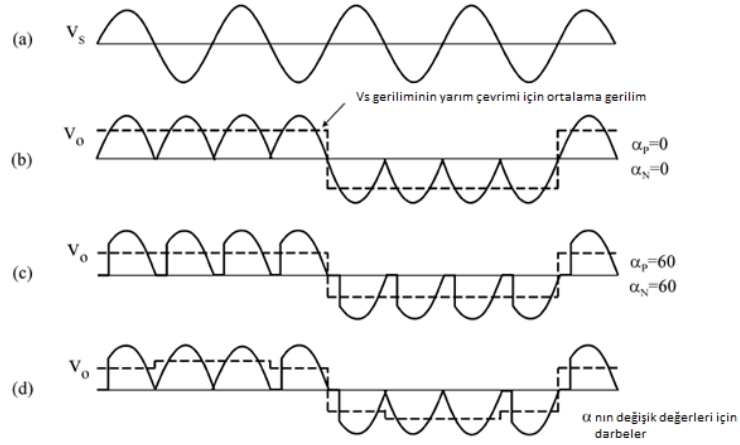
Bu bölümde, frekans dönüştürücülerin bir faz giriş ve bir faz çıkış sağlayan türlerinin incelemesi yapılacaktır. Bu inceleme sonunda, frekans dönüştürücülerinin tümünün temel çalışma prensibi ortaya koyulacaktır.

Bir faz giriş-bir faz çıkış frekans dönüştürücü devresinin şeması Şekil 2.66'da gösterilmiştir. Bu devre iki adet ters bağlanmış tam dalga doğrultucu devrelerinin bağlanmasından oluşmaktadır.



Şekil 2.66. Bir faz-bir faz frekans dönüştürücü

Şekil 2.67 bu konvertörün omik yükte çalışma sırasındaki dalga şekillerini göstermektedir (Ozpineci ve Tolbert 2013).



Şekil 2.67. Bir faz-bir faz frekans dönüştürücü dalga biçimleri (a) Giriş gerilimi, (b) sıfır tetikleme açısında çıkış gerilimi, (c) Tetikleme açısı 60 derece iken çıkış gerilimi, (d) Değişken tetikleme açılarında çıkış gerilimi (Ozpineci ve Tolbert 2013'den değiştirilerek alınmıştır)

$f_1$  frekanslı ve  $V_s$  genlikli giriş gerilimi Şekil 2.67(a)'da gösterilmiştir. Tetikleme açılarının pozitif konvertör için  $\alpha_p$  ve negatif konvertör için  $\alpha_n$  olarak isimlendirildiğın dikkat edilmelidir.

Çıkışta giriş frekansının dörtte birinin elde edilmek üzere, frekans dönüştürücünün çalıştırıldığı durumda  $V_s$ 'nin ilk iki periyodu süresince, pozitif konvertör yüke akım sağlayacaktır. Pozitif konvertör giriş gerilimini doğrultacaktır ve yük Şekil 2.67(b)'de görüldüğü gibi dört pozitif yarım çevrime sahip olacaktır.  $V_s$ 'nin sonraki iki periyodunda; negatif konvertör, pozitif konvertörün akım yönünün tersine yüke akım sağlayacaktır. Akımların dalga biçimleri Şekil 2.67'de gösterilmemiştir çünkü yük omik olduğu için, akımın dalga şekli gerilim ile aynı fazdadır, genliği direnç değerine bağlı olarak ölçeklenmiştir. Konvertörlerden biri çalıştığında, diğeri çalışmadığına dikkat edilmelidir. Böylelikle akımların birbirine karışmasının önüne geçilmiş olmaktadır.

Şekil 2.67(b)'de gösterilen  $V_o$  çıkış geriliminin frekansı giriş gerilimi  $V_s$ 'nin frekansının dörtte biridir.

$$\frac{f_{\text{çıkış}}}{f_{\text{giriş}}} = \frac{1}{4} \quad (2.116)$$

Bu yüzden bu sistem, *düşürücü frekans dönüştürücü* olarak isimlendirilir. Diğer yandan  $\frac{f_{\text{çıkış}}}{f_{\text{giriş}}} > 1$  matematiksel ifadesini sağlayan frekans dönüştürücüler, *arttırıcı frekans dönüştürücü* adını alırlar. Düşürücü frekans dönüştürücüler, arttırıcı frekans dönüştürücülere kıyasla uygulamada daha sıklıkla kullanılır. Bundan dolayı, simülâtörde sadece düşürücü frekans dönüştürücülerin tasarımı yapılmıştır.

$V_o$ 'ın frekansı, pozitif ve negatif konvertörlerin çalıştığı çevrim sayıları değiştirilerek ayarlanabilir. Bir faz frekans dönüştürücüler için elde edilecek  $f_{\text{çıkış}}$  frekansının belirli bir tamsayı katları,  $f_{\text{giriş}}$  frekansına eşit olacaktır.

Bir faz-bir faz frekans dönüştürücüler, tristörlerin belirli  $\alpha$  tetikleme açılarında yüke gerilim sağlarlar. Giriş geriliminin RMS değeri  $V$  olmak üzere çıkış geriliminin değeri aşağıdaki eşitlikle hesaplanır:

$$V_d = \frac{2\sqrt{2}}{\pi} V \cos(\alpha) \quad (2.117)$$

Her bir çevrimin doğru gerilim değeri, Şekil 2.67(d)'de görülmektedir.

Temel çıkış geriliminin tepe değeri aşağıdaki eşitlikle hesaplanmaktadır:

$$V_{o1}(t) = \frac{4}{\pi} \frac{2\sqrt{2}}{\pi} V \cos(\alpha) \quad (2.118)$$

Bu eşitlik temel çıkış geriliminin değerinin  $\alpha$  tetikleme açısına bağlı olduğunu göstermektedir. Şekil 2.67(d)'de  $\alpha$  değeri  $\pi/3$  değerine yükseltirse,  $V_{o1} = 0,5V_{do}$  olacaktır. Bu durum  $\alpha$  tetikleme açısının değiştirilmesiyle temel çıkış geriliminin kontrol edilebileceğini göstermektedir.

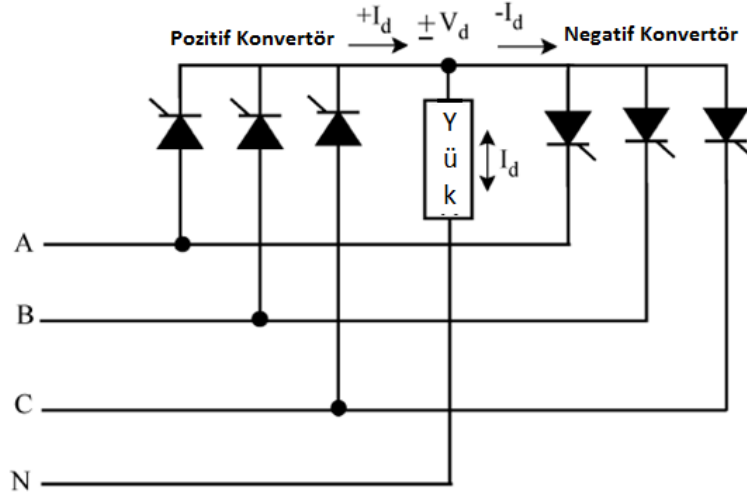
Sabit  $\alpha$  değeri, yüksek harmonikli adi bir çıkış geriliminin üretilmesine neden olmaktadır. Şekil 2.67(c) ve Şekil 2.67(d)'deki noktalı çizgiler, bir kare dalgayı göstermektedir. Kare dalga daha çok bir sinüs dalgasına benzetilebilirse, çıkıştaki harmonikler azaltılabilir. Bu yüzden  $\alpha$ , Şekil 2.67(d)'de görüldüğü gibi modüle edilmelidir. Şekil 2.67(d)'deki noktalı çizgiler, daha az harmonik içerir ve sinüs dalgasına daha çok benzemektedir. Farklı değerlerdeki  $\alpha$ 'lar ile elde edilecek çıkış geriliminde, daha az harmonik bulunacaktır.

### 2.5.2. Üç faz-bir faz frekans dönüştürücüler

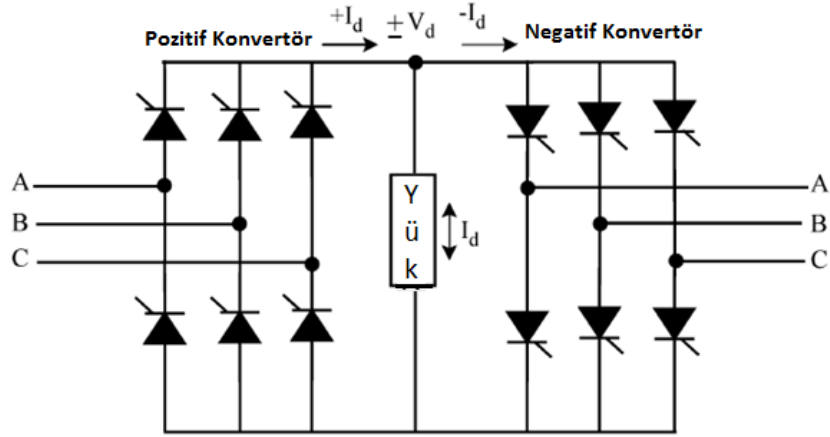
Bu bölümde, yüksek güç uygulamalarında sıklıkla kullanılan, üç faz-bir faz frekans dönüştürücü devrelerinin çalışması incelenmiştir. Elde edilen matematiksel bağıntılar ve yorumlar ile üç faz-bir faz frekans dönüştürücü simülasyonunun temel çalışma prensipleri hazırlanmıştır.

Temel olarak iki çeşit üç faz-bir faz frekans dönüştürücü vardır. Bunlar Şekil 2.68'de gösterilen yarım dalga frekans dönüştürücü ile Şekil 2.69'da gösterilen tam dalga frekans dönüştürücüdür. Bir faz-bir faz frekans dönüştürücülerde olduğu gibi üç faz-bir faz frekans dönüştürücülerde de yüke doğrultulmuş gerilim iletilir. Pozitif ve negatif konvertörlerin her ikisi de iki polaritede gerilim üretebilir, ancak pozitif konvertör

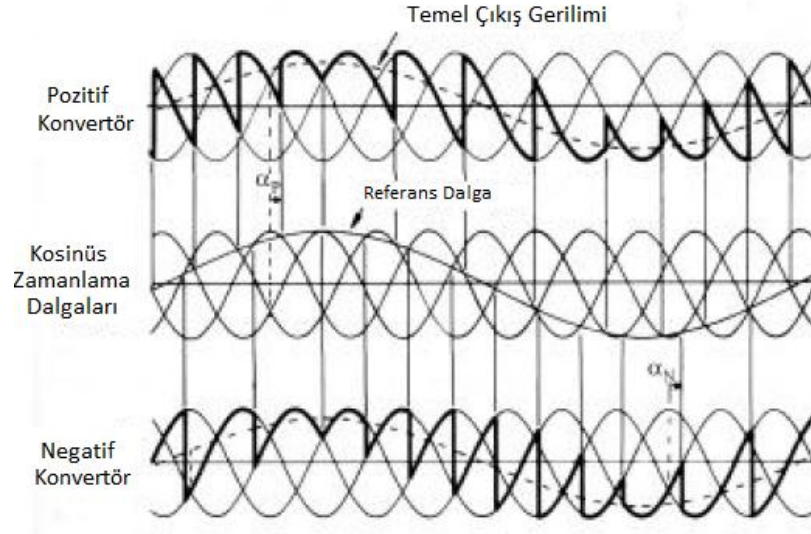
sadece pozitif akım sağlayabilir ve negatif konvertör sadece negatif akım sağlayabilir. Bu yüzden üç faz-bir faz frekans dönüştürücüler, dört durumlu çalışabilir: (+v, +i) (-v - i) doğrultma modu ve (+v -i) (-i +v) evrim (ters çevirme) modu. Çıkış geriliminin modülasyonu ve çıkış geriliminin temel hali Şekil 2.70'de gösterilmiştir.  $\alpha$  tetikleme açısı, harmonikleri optimize edebilmek için sinüzoidal olarak modüle edilmiştir.



Şekil 2.68. Üç faz-bir faz yarım dalga frekans dönüştürücü (Ozpineci ve Tolbert 2013'den değiştirilerek alınmıştır)



Şekil 2.69. Üç faz-bir faz tam dalga frekans dönüştürücü (Ozpineci ve Tolbert 2013'den değiştirilerek alınmıştır)



Şekil 2.70. Üç faz-bir faz frekans dönüştürücü dalga biçimleri (a) Pozitif konvertör çıkış gerilimi, (b) Kosinüs zamanlama dalgaları, (c) Negatif konvertör çıkış gerilimi (Ozpineci ve Tolbert 2013'den değiştirilerek alınmıştır)

Yük akımının polaritesi, pozitif veya negatif konvertörlerden hangisinin yüke gerilim sağladığını belirtmektedir. Pratik olarak pozitif konvertörün tetikleme açısı  $\alpha_p$  ve negatif konvertörün tetikleme açısı  $\alpha_n$  olarak isimlendirilmektedir. Akımın polaritesi değiştiğinde, yüke akım sağlayan bir önceki konvertör kapalıdır ve diğeri açıktır. Yük çıkış geriliminin sürekli bir fonksiyon olmasına ihtiyaç duyulmaktadır. Bu yüzden akım polaritesinin terslenmesi esnasında, konvertörlerin her ikisinin de sağladıkları ortalama gerilim, eşit olmalıdır. Aksi takdirde bir konvertörden diğerine anahtarlama, istenmeyen gerilim zıplamalarına sebep olacaktır. Bu sorundan korunmak için konvertörlerin her zaman aynı ortalama gerilim değerini üretmeleri sağlanmalıdır. Bundan dolayı tetikleme açıları için aşağıdaki koşul sağlanmalıdır.

$$\alpha_p + \alpha_n = \pi \quad (2.119)$$

$V_o$  gerilimi, temel gerilimin RMS değeri olmak üzere Şekil 2.70'deki temel çıkış geriliminin ifadesi aşağıdadır.

$$V_{o1}(t) = \sqrt{2}V_o \text{Sin}(\omega_o t) \quad (2.120)$$

Her hangi bir  $t_o$  anında ana, çıkış gerilimi aşağıdaki eşitlik ile bulunur.



$$V_{o1}(t_o) = \sqrt{2}V_o \text{Sin}(\omega_o t_o) \quad (2.121)$$

Şayet  $\alpha_p$  aşağıdaki koşulu sağlıyorsa, pozitif konvertör çıkış gerilimini sağlıyor demektir.

$$V_{o1}(t_o) = \sqrt{2}V_o \text{Sin}(\omega_o t_o) = V_{do} \text{Cos} \alpha_p \quad (2.122)$$

Denklemdaki  $V_o$  değeri aşağıdaki eşitlikle hesaplanır:

$$V_{do} = \sqrt{2}V_o \frac{p}{\pi} \text{Sin}\left(\frac{\pi}{p}\right) \quad (2.123)$$

Yarım dalga konvertör için  $p=3$  ve köprü konvertör için  $p=6$  değerini almaktadır.

Tetikleme açılarının hesaplandığı (2.119) denklemden aşağıdaki eşitlik yazılabilir:

$$V_{o1} = V_{do} \text{Cos}(\alpha_p) = -V_{do} \text{Sin}(\alpha_N) \quad (2.124)$$

Tetikleme açıları, 2.119, 2.120, 2.121 kullanılarak hesaplanabilir.

Üç faz bir faz tam dalga frekans dönüştürücü de aynı çalışma prensibi ile çalışır, aralarındaki tek fark bu frekans dönüştürücünün çıkış gerilimi hesaplanırken  $p=6$  değerini almasıdır.

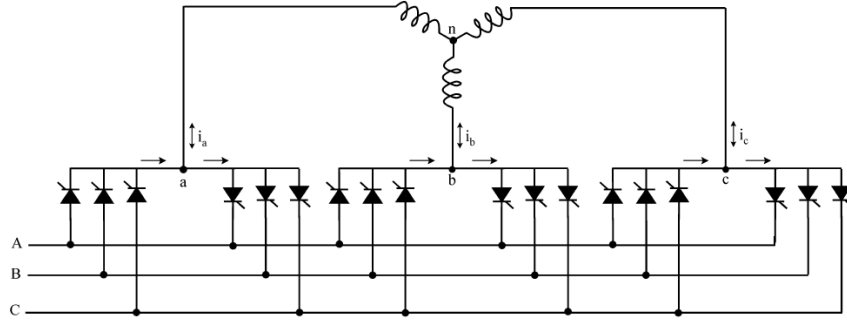
### 2.5.3. Üç faz-üç faz frekans dönüştürücüler

Bu bölümde; yüksek güç uygulamalarının özel bir bölümünde kullanılan üç faz-üç faz frekans dönüştürücüler, daha önceki bölümlerde yapılan incelemeler ışığında araştırılmıştır. Üç faz-üç faz frekans dönüştürücü devreleri, üç faz-bir faz frekans dönüştürücü devreleri ile matematiksel olarak ilişkilidir.

Üç faz-üç faz frekans dönüştürücü devresi, üç faz-bir faz frekans dönüştürücü devresinden türetilir. Eğer üç faz-bir faz frekans dönüştürücü çıkışındaki yük, yıldız veya üçgen bağlanırsa ve çıkış gerilimleri birbirlerini  $2\pi/3$  radyan faz farkı ile takip ediyorsa elde edilen devre, üç faz üç faz frekans dönüştürücü devresi adını

almaktadır. Üç faz-üç faz yıldız bağlı yüklü frekans dönüştürücü devresinin yarım ve tam dalga hali Şekil 2.71 ve Şekil 2.72’de gösterilmektedir.

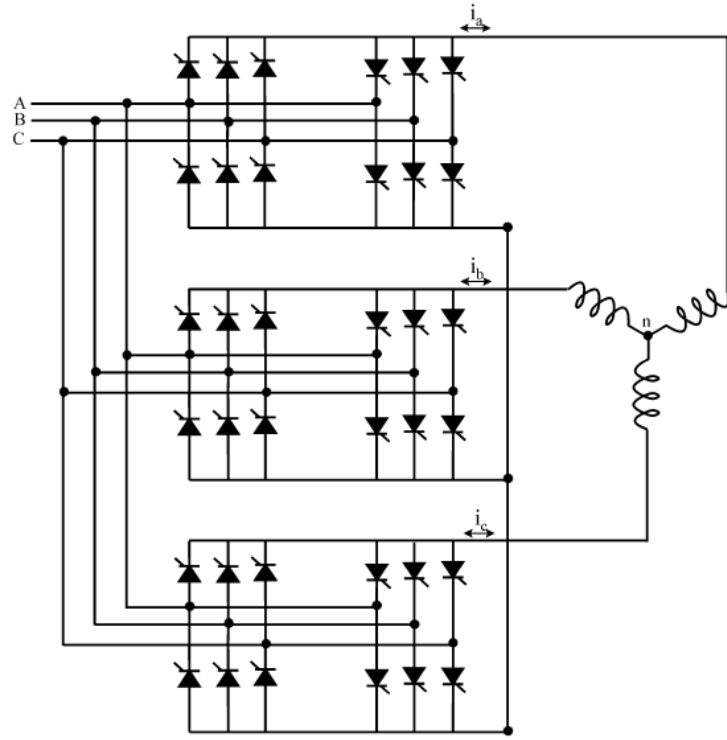
Eğer üç faz-üç faz frekans dönüştürücü devresi, yarım üç faz-bir faz yarım dalga frekans dönüştürücü devresi kullanılarak tasarlandıysa, üç faz-üç faz yarım dalga frekans dönüştürücü olarak isimlendirilir ve diğer bir adı da üç darbeli, on sekiz tristörlü konvertördür. Eğer frekans dönüştürücüler, üç faz-bir faz tam dalga frekans dönüştürücüler kullanılarak tasarlandıysa, üç faz-üç faz tam dalga frekans dönüştürücü devresi adını alır ve diğer bir adı da 6 darbeli, 36 tristörlü konvertördür. Çalışma prensipleri önceki anlatılan bölümlerdeki ile aynıdır.



Şekil 2.71. Üç faz-üç faz yarım dalga frekans dönüştürücü devresi (Ozpineci ve Tolbert 2013)

## 2.6. Güç Kaynakları

Bu bölümde, güç kaynağı sistemlerinin dalga şekillerinin benzetiminin yapılabilmesi için gerekli matematiksel temeller incelenmiştir. Güç kaynağı sistemlerinin kalitesini belirleyen toplam harmonik distorsiyon (THD) konusuna bu bölümde değinilmiştir. THD'nin anlaşılabilmesi için FS, kompleks Fourier serileri (Complex Fourier Series, KFS) ve Fourier dönüşümü (Fourier Transform, FD) konularına yer verilmiştir. Sinyalin frekans boyutundaki bilgilerinin ve THD ile ilişkilendirilmesinin sonrasında güç kaynaklarının çıkış sinyallerinin matematiksel analizinde öngörü sağlanabilmesi için, sinyaller ve sistemler konusunda önemli işaretlerin zaman ve frekans boyutundaki incelemeleri yapılmıştır. İncelenen sinyaller Dirac Delta fonksiyonu, birim basamak fonksiyonu, dikdörtgen fonksiyonu, üçgen fonksiyonu ve rampa fonksiyonudur. Burada elde edilen temel bilgiler ile güç kaynağı simülasyonu bölümünde, işaretlerin THD değerleri hesaplanabilecek, frekans spektrumu çizdirilebilecektir.



Şekil 2.72. Üç faz-üç faz tam dalga frekans dönüştürücü (Ozpineci ve Tolbert 2013)

### 2.6.1. Fourier analizi

Periyodik bir sinyal olan  $x(t)$  sinyali için FS açılımı aşağıdaki gibi yazılabilir:

$$x(t) = a_0 + \sum_{n=1}^{\infty} \left( a_n \cos\left(\frac{2\pi n t}{T_0}\right) + b_n \sin\left(\frac{2\pi n t}{T_0}\right) \right) \quad (2.125)$$

Burada  $T_0$  sinyalin periyodudur,  $f_0$  ile sinyalin frekansı,  $\omega_0$  ile de açısal frekansını göstermektedir.

$$T_0 = \frac{1}{f_0} \quad (2.126)$$

$$x(t) = x(t + T_0) \quad (2.127)$$

$$\omega_0 = 2\pi f_0 = \frac{2\pi}{T_0} \quad (2.128)$$

Denklem (2.128), denklem (2.125)'te yerine yazılırsa

$$x(t) = a_0 + \sum_{n=1}^{\infty} (a_n \cos(n\omega_0 t) + b_n \sin(n\omega_0 t)) \quad (2.129)$$

olur.  $a_0$ ,  $a_n$  ve  $b_n$  aşağıdaki eşitliklerle elde edilir (Chitode 2009):

$$a_0 = \frac{1}{T_0} \int_t^{t+T_0} x(t) dt \quad (2.130)$$

$$a_n = \frac{2}{T_0} \int_t^{t+T_0} x(t) \cos\left(\frac{2\pi n t}{T_0}\right) dt \quad (2.131)$$

$$b_n = \frac{2}{T_0} \int_t^{t+T_0} x(t) \sin\left(\frac{2\pi n t}{T_0}\right) dt \quad (2.132)$$

FS, Euler eşitliği kullanılarak aşağıdaki gibi KFS formunda yazılabilir (Chitode 2009):

$$x(t) = \sum_{k=-\infty}^{\infty} (X(k) e^{ik\omega_0 t}) \quad (2.133)$$

$$X(k) = \frac{1}{T} \int_t^{t+T} x(t) e^{-ik\omega_0 t} dt \quad (2.134)$$

FS'nin tanımlı olabilmesi için Dirichlet koşullarını sağlamalıdır.

FD, KFS'nin genelleştirilmiş halidir. Periyodik olmayan fonksiyonların, periyodunun sonsuz olduğu düşünülerek hesaplanır ve bu sinyallerin frekans bilgilerini matematiksel olarak gösterir. Aşağıda, FD ve ters Fourier dönüşümü (Inverse Fourier Transform, TFD) tanımları verilmiştir (Chitode 2009).

$$X(j\omega) = \int_{-\infty}^{\infty} x(t)e^{-j\omega t} dt \quad (2.135)$$

$$x(t) = \frac{1}{2\pi} \int_t^{t+T} X(j\omega)e^{j\omega t} d\omega \quad (2.136)$$

(2.135) denklemin de  $\omega = 2\pi f$  alınırsa bu denklem aşağıdaki biçimde de yazılabilir.

$$X(k) = \int_{-\infty}^{\infty} x(t)e^{-j2\pi f t} dt \quad (2.137)$$

Ayrık zamanlı Fourier dönüşümünün (Discrete Fourier Transform, AFD) özel bir uygulaması olan hızlı Fourier dönüşümü (Fast Fourier Transform, HFD), N noktalı ayrık zamanlı bir sinyal için hesaplama sayısını azaltan özel bir algoritmadır. Cooley ve Tukey'in 1965'de HFD algoritmasını ortaya koymalarından sonra, birçok HFD algoritması öne sürülmüştür. HFD genel olarak zamanda seyreltme ve frekansta seyreltme olmak üzere iki kümeye ayrılır. Cooley-Tukey algoritması, giriş dizisinin bit tersleme sırasına göre tekrar düzenler ve zaman boyutunda seyreltme yaparak çıkış dizisini elde eder. Bu algoritmadaki temel fikir; N uzunluğundaki dönüşümü, N/2 uzunluğa aşağıdaki eşitliği kullanarak indirgemektir. AFD ile N ayrık işarete sahip sinyal  $N^2$  işlem adımıyla hesaplanabilirken, HFD'de işlem adımı  $2N \log_2 N$  olmaktadır (Weisstein 2013).

$$\sum_{n=0}^{N-1} a_n e^{-2\pi i n k / N} \quad (2.138)$$

$$= \sum_{n=0}^{N/2-1} a_{2n} e^{-2\pi i (2n) k / N} + \sum_{n=0}^{N/2-1} a_{2n+1} e^{-2\pi i (2n+1) k / N}$$

$$= \sum_{n=0}^{N/2-1} a_n^{cift} e^{-\frac{2\pi ink}{N/2}} + e^{-2\pi ink/N} \sum_{n=0}^{N/2-1} a_n^{tek} e^{-\frac{2\pi ink}{N/2}}$$

$$k = 0,1,2 \dots N - 1$$

### 2.6.2. Harmonik analiz

THD; gerilim ya da akım dalga biçiminin bütün harmonik bileşenlerinin toplamının, ele alınan dalga biçiminin ana bileşenine göre kıyaslanması olarak tanımlanır. Aşağıda matematiksel tanımı verilmektedir (Associated Power Technologies 2014):

$$THD = \sum_{k=2}^n \frac{\sqrt{V_k}}{V_1} \quad (2.139)$$

### 2.6.3. Dirac delta fonksiyonu

Elektromotor kuvvetin direnç yüklü bir devreye, bir anahtar aracılığı ile çok kısa bir süre için etki ettiği durum göz önüne alındığında anahtarın hızlı bir şekilde kapanıp açılması, yüke bir anlık gerilim etkimesine neden olacaktır. Mühendislikte, bu tür durumlar, darbe olayını oluşturmaktadır.

Darbenin, k süresince 1/k şiddetinde uygulandığı varsayımı için aşağıdaki eşitlik geçerli olacaktır:

$$f_k(t - a) = \begin{cases} \frac{1}{k}, & a < t < a + k \\ 0, & \text{diğer durumlar} \end{cases} \quad (2.140)$$

Mekanik bir sistemde  $f_k$  kuvvet fonksiyonunun sıfır sonsuz aralığında integrali, bu fonksiyonun darbesi olarak isimlendirilir. Aşağıdaki  $I_k$  darbe ifadesi yazılabilir:

$$I_k = \int_0^{\infty} f_k(t - a) dt = 1 \quad (2.141)$$

Buradan hareketle, Dirac Delta fonksiyonu aşağıdaki denklem ile tanımlanır:

$$\delta(t - a) = \lim_{k \rightarrow 0} f_k(t - a) \quad (2.142)$$

Dirac Delta fonksiyonu, aynı zamanda birim darbe fonksiyonu olarak da isimlendirilir.

Dirac Delta fonksiyonu aşağıdaki özellikleri sağlamaktadır (Kreyzig 2011):

$$\delta(t - a) = \begin{cases} \infty, & t = 0 \\ 0, & \text{diğer durumlar} \end{cases} \quad (2.143)$$

$$\int_{-\infty}^{\infty} \delta(t) dt = 1 \quad (2.144)$$

$$\int_{-\infty}^{\infty} f(t) \delta(t - a) dt = f(a) \quad (2.145)$$

Birim darbe fonksiyonunun FD'si (2.146) eşitliğiyle bulunur (Weisstein 2013):

$$\int_{-\infty}^{\infty} \delta(t - a) e^{-2\pi i f t} dt = e^{-2\pi i f a} \quad (2.146)$$

#### 2.6.4. Birim basamak fonksiyonu

Birim basamak fonksiyonu, a sıfırdan büyük olmak üzere aşağıdaki şekilde tanımlanır (Kreyzig 2011):

$$u(t - a) = \begin{cases} 1, & t > a \\ 0, & t < a \end{cases} \quad (2.147)$$

Fonksiyonun  $t=a$  noktasında bir birim büyüklüğünde bir sıçrama yaptığı eşitlikten anlaşılabilir. Birim basamak fonksiyonunun FD'si (2.148) denkleminde verilmektedir (Weisstein 2013).

$$\int_{-\infty}^{\infty} u(t-a)e^{-2\pi ift} dt = \frac{1}{2} \left[ \delta(f) - \frac{i}{\pi f} \right] \quad (2.148)$$

### 2.6.5. Dikdörtgen fonksiyonu

Dikdörtgen fonksiyonu aşağıdaki şekilde tanımlanır (Weisstein 2013).

$$\Pi(t) = \begin{cases} 0, & |t| > \frac{1}{2} \\ \frac{1}{2}, & |t| = \frac{1}{2} \\ 1, & |t| < \frac{1}{2} \end{cases} \quad (2.149)$$

Dikdörtgen fonksiyonunun FD'si (2.150) eşitliğiyle verilmektedir (Weisstein 2013).

$$\int_{-\infty}^{\infty} \Pi(t)e^{-2\pi ift} dt = \text{sinc}(\pi f) \quad (2.150)$$

### 2.6.6. Üçgen fonksiyonu

Üçgen fonksiyonu aşağıdaki gibi tanımlanır.

$$\Lambda(t) = \begin{cases} 0, & |t| \geq 1 \\ 1 - |t|, & |t| < 1 \end{cases} \quad (2.151)$$

$$= \Pi(t) * \Pi(t)$$

$$= \Pi(t) * u\left(t + \frac{1}{2}\right) - \Pi(t) * u\left(t - \frac{1}{2}\right)$$

Üçgen fonksiyonunun, dikdörtgen fonksiyonunun konvolüsyonu olarak ifade edildiği (2.151) denkleminde belirtilmektedir. FD'nin konvolüsyon özelliğinden yararlanılarak, üçgen fonksiyonunun FD'si hesaplanabilir.



$$\int_{-\infty}^{\infty} \Lambda(t) e^{-2\pi i f t} dt = \mathcal{F}(\Pi(t)) \times \mathcal{F}(\Pi(t)) \quad (2.152)$$

$$= \text{sinc}(\pi f)^2$$

### 2.6.7. Rampa fonksiyonu

Rampa fonksiyonu aşağıdaki biçimde tanımlanır:

$$R(t) = tu(t) \quad (2.153)$$

Rampa fonksiyonunun FD'si (2.154) eşitliğiyle verilmiştir (Weisstein 2013).

$$\int_{-\infty}^{\infty} R(t) e^{-2\pi i f t} dt = \frac{i\delta'(f)}{4\pi} - \frac{1}{4\pi^2 f^2} \quad (2.154)$$

(2.154) numaralı denklemden,  $\delta'(f)$ , Dirac delta fonksiyonunun türevidir.

### 3. MATERYAL VE YÖNTEM

Bu bölümde, oluşturulan simülasyon programı için üzerinde çalışılan materyal ve izlenen yöntemler incelenmiştir. Bu iki unsurun harmanlanmasıyla ortaya çıkan simülasyon programının özellikleri ve kabiliyeti ortaya konmuştur. Ortaya konulan simülasyon programı varoluş sürecinde ortaya çıkan problemler tartışılmış, en uygun materyal ve efektif bir yöntem belirlenerek bu sorunların üstesinden gelinmiştir. Kullanılan materyaller ve başvurulan yöntemler en ince ayrıntısına kadar bu bölümde tartışılacaktır.

Bu süreçte çalışılan materyaller, izlenen yöntem ve hedeflenen programa bağlı olarak bir takım zorluklar ortaya çıkmaktadır. Çalışılan materyal ve izlenen yöntem seçilebilen parametrelerdir. Bu iki unsurun uygun seçimleri, ortaya çıkacak problemlerin zorluk seviyelerini kolaylaştırabilir ve hatta bazı problemleri ortadan kaldırılabılır. Örneğin materyal seçiminde kullanılan ASP.NET teknolojisi, gelişmiş bir ağ üzerinde simülasyon imkanı sağlarken MATLAB ise .NET çatısına destek vererek ve devre çözümü için birçok fonksiyonu hazır bulundurarak birçok problemi kolaylaştırır ve bazılarını ortadan kaldırır. Hedeflenen programın ise kendine özgü, değişmez ve mutlaka cevaplanması gereken bir takım zorlukları vardır. Bu zorlukları çözmek, en önemli meseledir.

Güç elektroniği simülatörü hazırlanırken karşılaşılan güçlükler aşağıdaki gibi sıralanabilir:

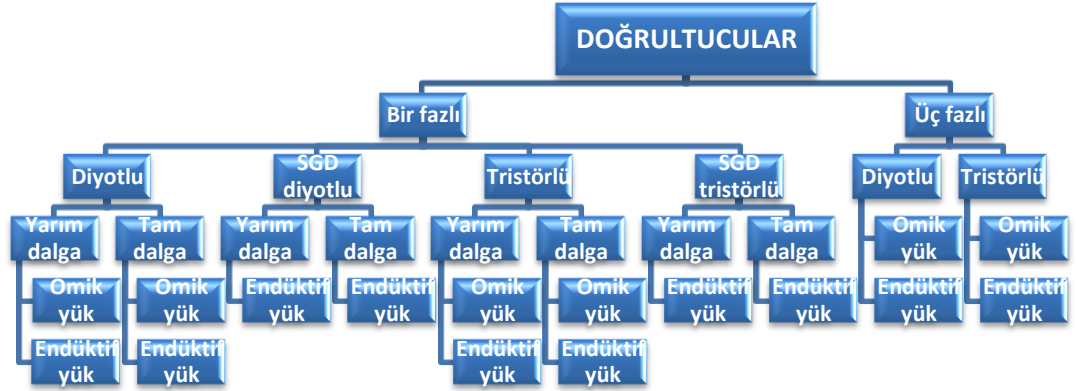
- Diyot ve tristör içeren devreler, bu elemanların açık ve kapalı olma durumlarına geçişlerde lineer olmayan davranışlar gösterir. MATLAB gibi bir programlama dili genellikle lineer devreleri benzetim ortamına taşıyan hazır fonksiyonlara sahiptir (Québec 2003). (Lineer olmayan devreleri SİMULİNK ortamında durum denklemleriyle çözebilmektedir, ancak .NET çatısı altına taşınmada bir takım problemlere gebedir). Bu tezde, lineer olmayan denklemleri çözen MATLAB fonksiyonları kullanılmamıştır. Bu lineer olmama durumunu, yazılımcı tarafından modellenmelidir.
- Benzetim süresi çok uzun olabilir. Örneğin tam dalga bir doğrultucu devresinde kullanılan yüke seri bağlı endüktansın değeri büyük ise, sistemin kalıcı durum yanıtını elde etmek için gerekli süre oldukça uzun olmalıdır. Fakat bu süreye

kıyasla devrede kullanılan yarı iletken elemanların anahtarlama süresi oldukça düşüktür. Bu durumda yüksek hesaplama hassasiyeti, yavaş çalışan bir simülasyona neden olurken, gerçekçi bir sonuç verecektir. Simülasyonun çalışma süresinin ve hassasiyetinin kullanıcıya bırakılması daha uygundur.

- Lineer olmayan elemanların bulunmasından dolayı, hiçbir zaman gerçeğe uygun simülasyon sonuçları elde edilemeyeceği, fakat en iyiye yaklaşılabilen şekilde tutulmalıdır (Mohan, Undeland ve Robbins 2007).

Simülasyon programı oluşturulurken çıkan ortak sorunlara değindikten sonra, simülasyon programlarının çeşitlerinden de bahsetmek gerekir. Temel olarak iki çeşit simülasyon programı mevcuttur. Bunlardan birincisi devre tabanlı simülasyon programları iken, ikincisi denklem tabanlı simülasyon programlarıdır. Devre tabanlı simülasyon programlarının gelişimi için uzun süre çalışmalar yapılmaktadır. Lineer devrelerin devre tabanlı simülasyonları kolaylıkla yapılabilmekteyken, lineer olmayan devrelerin devre tabanlı simülasyonu bir takım lineerleştirme adımı gerektirir. Lineerleştirme adımlarını yapabilen simülasyon programları da mevcuttur. Denklem tabanlı simülasyon programları, devre denklemini çözerek devreyi çalıştırır. Devre tabanlı simülasyonlar kadar pratik olmasa da, önemli avantajları söz konusudur. Devrenin en uygun çözümü tasarımcının elinde olacağı için, devre benzetiminin en iyi yolunu tasarımcı seçebilmektedir. Örneğin zaman boyutunda ifade edilen ayrık zamanlı bir devre denklemi, birçok matematiksel yöntemle çözülebilir. Tasarımcı, simülasyon sonuçlarını ayrıntılı veya hızlı ama sade olarak almak istiyorsa, uygun çözüm yöntemini seçerek devreyi benzetebilecektir (Mohan, Undeland ve Robbins 2007). Bu tezde, denklem tabanlı simülasyon programı hazırlanmıştır.

Simülasyon programının içerdiği bölümleri incelemek, kullanılan materyallerin ve takip edilen yöntemin nasıl şekillendiğini açıklamak açısından önemlidir. Program beş ana modülden oluşmaktadır. Bunlardan birincisi doğrultuculardır. Doğrultucular Şekil 3.1’de gösterildiği gibi alt bölümlere sahiptir. Doğrultucular bölümünde on altı adet devre incelenmiştir.



Şekil 3.1. Doğrultucular bölümü altbaşlıkları

Programın ikinci ana başlığı konvertörlerdir. Konvertörler, Şekil 3.2’de gösterildiği gibi bölümlere ayrılmıştır.



Şekil 3.2. Konvertörler bölümü altbaşlıkları.

Programın üçüncü ana başlığı invertörlerdir. İnvertörler Şekil 3.3’de gösterildiği gibi alt bölümlere ayrılmıştır.



Şekil 3.3. İnvertörler bölümü altbaşlıkları

Programın dördüncü ana başlığı frekans dönüştürücülerdir. Frekans dönüştürücüler Şekil 3.4’de gösterildiği gibi alt bölümlere ayrılmıştır.



Şekil 3.4. Frekans dönüştürücüler bölümü alt başlıkları.

Programın beşinci ana başlığı güç kaynaklarıdır. Güç kaynakları, Şekil 3.5’de görüldüğü gibi alt bölümlere ayrılmıştır.



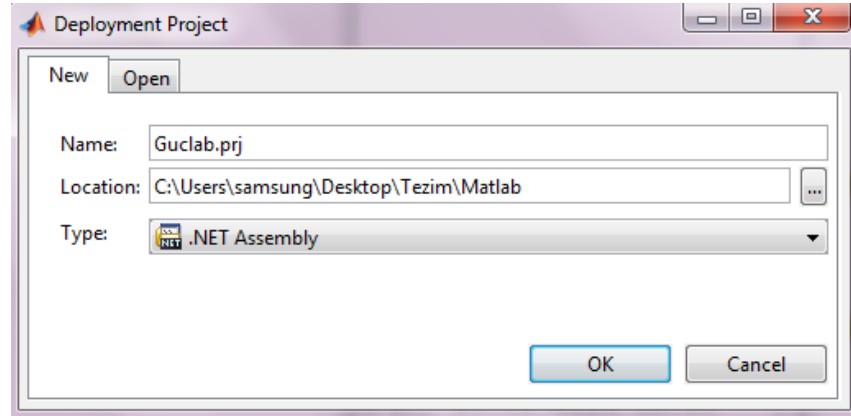
Şekil 3.5. Güç kaynakları bölümü altbaşlıkları.

İnternet üzerinden erişilebilen, birincil olarak eğitim ve ikincil olarak tasarım amaçlarını kapsayan simülasyon programı; MATLAB, ASP.NET, ISS ve Macromedia flash programları kullanılarak oluşturulmuştur. Simülasyon programını hazırlayabilmek için MATLAB programından yararlanılmış, eğitim animasyonları tasarlayabilmek için Macromedia Flash programı kullanılmış, internet sitesi düzenleyebilmek için ASP.NET programı üzerinde çalışılmış ve sistemi kullanıcılara aktarabilmek için IIS programından yayın yapılmıştır. Bu programların uygun yöntemlerle birleştirilmesi, sanal güç laboratuvarının hazırlanmasını sağlamıştır.

### 3.1. MATLAB Programı

MATLAB; programlama, nümerik hesaplamalar ve görüntüleme için etkileşimli bir ortama sahip yüksek seviyeli teknik hesaplama dildir. MATLAB kullanılarak veriler analiz edilebilir, algoritmalar geliştirilebilir ve yeni model ve uygulamalar hazırlanabilir. İçerisinde bulundurduğu araçlar, hazır matematiksel fonksiyonlar ve matris temeline dayanan dil mantığı, C/C++ ya da Java dillerine göre daha pratik çözümler sunmaktadır. Program çalışma hızı, kıyaslanan dillere göre yavaş olsa da, hazır paketler barındırması, bir konunun farklı açılardan, daha hızlı ve rahat bir şekilde analiz edilmesine imkân sağlamaktadır (Mathworks 2014).

Bu tezde MATLAB'ın kullanım amacı, güç elektroniği devrelerinin simülasyonlarının yapılmasıdır. Kuramsal temelleri incelenen devrelerin elde edilen matematiksel modelleri, MATLAB ortamında çözülmüş ve .NET çatısı altında dll dosyaları elde edilmiştir. Şekil 3.6, *deploytool* komutu ile .NET bileşeni elde etmeyi göstermektedir.



Şekil 3.6. .NET ortamı için dll dosyasının hazırlanması

.NET ortamı için hazırlanacak dll dosyaları, sınıf ve fonksiyon tanımlamalarını gerektirir. Çıktı olarak alınacak dll dosyaları için programın işlem yaptığı metotlar fonksiyon olarak belirlenmeli ve fonksiyon grupları bir devreyi temsil ettiğinden, sınıf olarak tanımlanmalıdır. Şekil 3.7, bahsedilen sınıf ve fonksiyon yapısını göstermektedir.

Şekil 3.7'de, diyot ile gerçekleştirilmiş KD devresi için bir sınıf oluşturulmuş ve bu sınıfın içine çalışma zamanında gereken fonksiyonlar eklenmiştir. Eklenen fonksiyonların, diğer sınıflardaki fonksiyonlarla aynı isimde olmaması gerekmektedir.

Aksi takdirde, MATLAB .NET bileşenini oluşturmaya çalışırken hata vermektedir (Mathworks 2011).

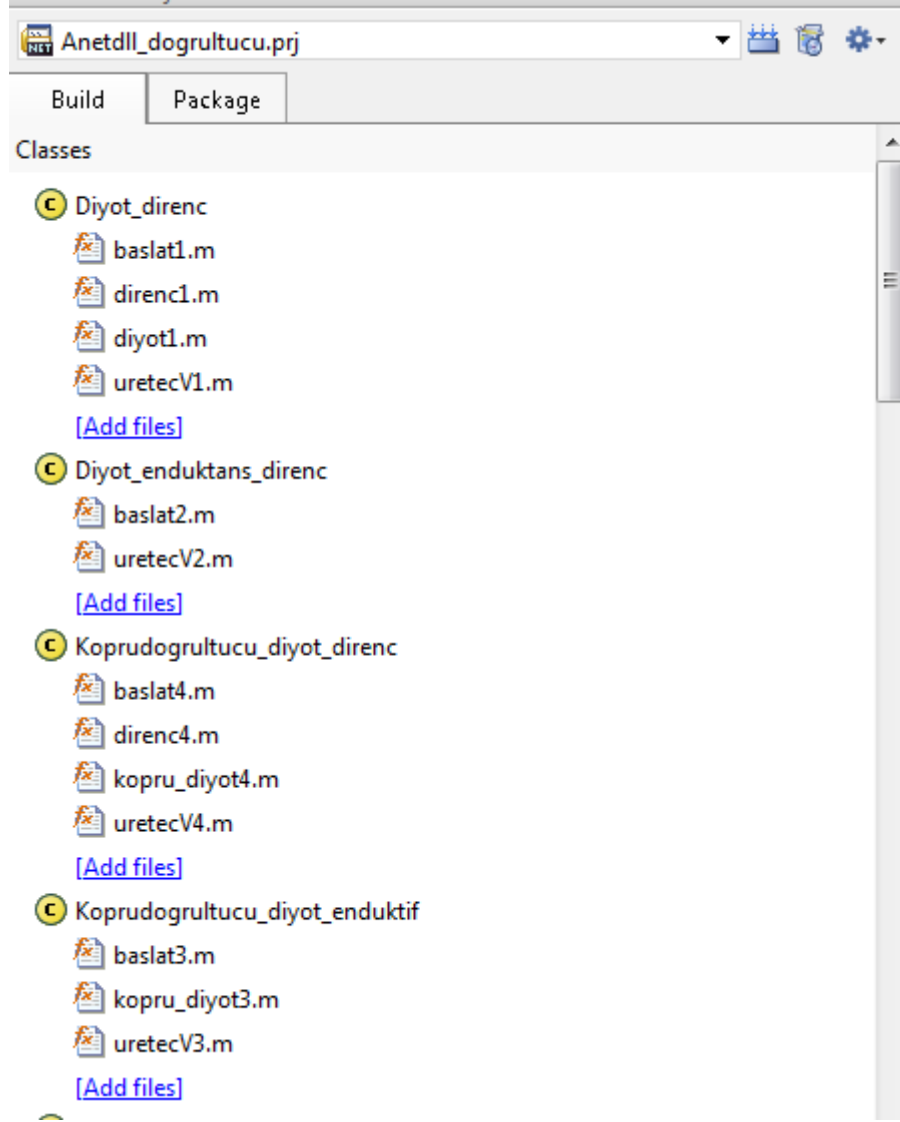
Devre simülasyonlarının çalıştırılması bir takım rutin işlemleri gerektirir. Bunlardan birincisi olan simülasyonların, .NET ortamına aktarılma işlemi için gereken dll dosyalarının oluşturulması üzerinde durulmuştur. Benzetimin çalışması sırasında gereken ikinci önemli ve tekrar eden işlem, çizim fonksiyonlarının çağrılması ve internet ortamında gösterilecek hale getirilmesidir. MATLAB ortamında *plot()* fonksiyonu ile çizdirilen devreler ilgili *figüre*, *webfigure()* fonksiyonu uygulanması ile .NET ortamından çağrılabilirler. Fonksiyon yapısı ve kullanımı Şekil 3.8’de gösterilmiştir (Mathworks 2011).

Devre fonksiyonlarının genel işlemlerinden bahsedildikten sonra, bu fonksiyonların özel işlemlerinin incelenmesi faydalı olacaktır. İlerleyen beş alt bölümde, devre fonksiyonlarının özel olarak MATLAB ortamında nasıl tasarlandıkları açıklanmıştır.

### **3.1.1. MATLAB ile doğrultucu simülasyonu**

MATLAB ortamında doğrultucu devrelerinin benzetimi yapılırken, MATLAB’ın sağladığı hazır algoritmalarından yararlanılmış ve aynı zamanda özgün algoritmalar yine bu ortamda yazılmıştır. Doğrultucu simülasyonları; giriş gerilimi, çıkış gerilimi ve çıkış akımını kullanıcıya grafiksel olarak sunarken, aynı zamanda çıkış gerilimini RMS ve ortalama değer olarak da kullanıcıya sonuç olarak vermektedir. Burada genel olarak, diyot ve tristör içeren devrelerin nasıl programlandığı üzerinde durulacak, genel algoritma üzerinde tartışılacak ve bu genel algorithmadan türetilen on altı devre denkleminin nasıl çözüldüğü açıklanacaktır.

En genel anlamda doğrultucu devreleri tasarlanırken karşılaşılan ilk problem; giriş kaynağındaki gerilimin, doğrultucu bloğundan geçerek yüke nasıl aktarılacağıdır. Bu aktarma tam dalga doğrultuculara ve YDD’lerde farklılık göstermektedir. Buradaki farklılık devrenin özel algoritmaya sahip olmasına neden olacaktır. Şekil 3.9’da doğrultucular için genel algoritma gösterilmiştir.



Şekil 3.7 :NET ortamına aktarılacak sınıf fonksiyon yapısı

```

fp1 = figure('Visible','off');
set(fp1,'name','Doğrultucu Devresi (Üç Fazlı Tristörlü Doğrultucu Omik Yükle)')...
,'numbertitle','off')
plot(t,ala,t,alb,t,alc)
grid on
title('\bfGiriş Gerilimi')
xlabel('\itZaman (s)')
ylabel('\itGerilim (V)')
df1=webfigure(fp1);
close(fp1);

```

Şekil 3.8. .NET ortamı için *webfigure()* fonksiyonunun yapısı

Doğrultucu devrelerinin özel devrelere ait çözüm devreleri, Şekil 3.9’da alt programlarla ifade edilmiştir. Alt programlar doğrultucu tipine ve yük tipine bağlı

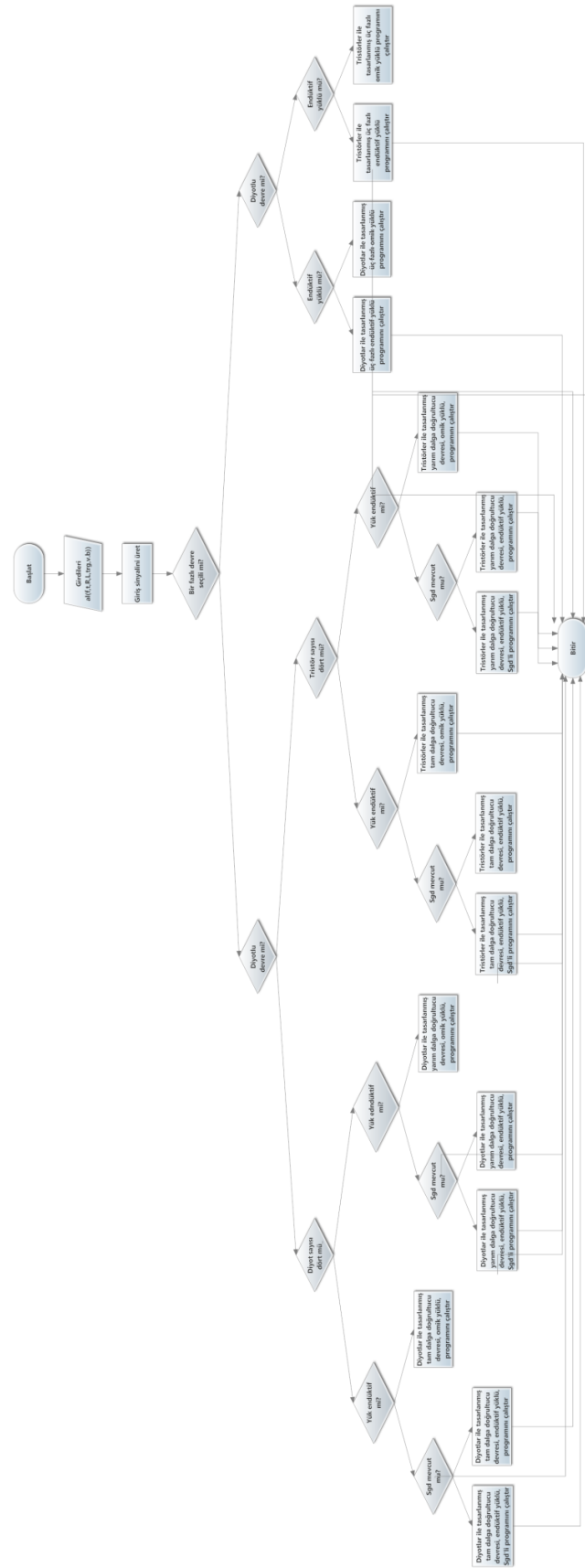


olarak ufak farklılıklar göstermektedir. Doğrultucu tipi, YDD veya KD olabilir. Doğrultucu tipleri düşünüldüğünde aynı zamanda, diyotlu doğrultucu veya tristörlü (genel adıyla faz kontrollü) doğrultucu olması da değerlendirilmiştir. Giriş gerilimi ve doğrultucu çıkışındaki gerilim, MATLAB programında, temel matris işlemleri ile tanımlanmıştır. Doğrultucu çıkışındaki gerilimin yüke aktarılması, omik, endüktif devrelerde ve SGD'li devrelerde bölüm 2.2'de elde edilen denklem çözümleri kullanılarak bulunurken, üç fazlı endüktif yüklü devrelerde yükteki gerilim, doğrultucu çıkışındaki gerilimin *lsim()* fonksiyonuna parametre olarak geçirilmesi ile elde edilmiştir.

Üç fazlı endüktif yüklü devrelerde sıklıkla kullanılan *lsim()* fonksiyonu, *tf()* fonksiyonu ile yaratılan sistemin transfer fonksiyonunu kullanarak, sistemin yanıtını verir. Sadece lineer sistemlerde veya lineerleştirilmiş sistemlerde kullanılır. Transfer fonksiyonunun, zaman ve giriş işaretiyle birlikte değerlendirilmesi sonucu, sistemin yanıtını zaman boyutunda vermektedir (Ljung 2000).

Transfer fonksiyonları, matematiksel olarak, sıfır başlangıç koşulları altında, sistem çıkışının Laplace Dönüşümünün (Laplace Transform, LD), sistem girişinin LD'sine oranı olarak ifade edilir. Giriş işaretinin LD'si alınarak, transfer fonksiyonu ile çarpılması sonucu, çıkış işaretinin LD formu elde edilir. Ters laplace dönüşümü (Inverse Laplace Transform, TLD) ile çıkış işaretinin zaman boyutundaki durumuna ulaşılır (Goyal ve Bakshi 2008).

Fonksiyon *lsim()*, devrenin transfer fonksiyonu çözümünü ve zaman boyutunda yanıtın elde edilmesi işlemini otomatik olarak yapmaktadır. Bu fonksiyon (*lsim()*) lineer devrelerde çalışmaktadır ve üç fazlı bir işaret kaynağına sahip devre içerisindeki anahtarlama elemanı, çok yüksek bir ters gerilimle karşılaşmayacağı için, işaret kaynağının  $2\pi/3$ 'lük faz farkıyla, devredeki anahtarlama elemanları tetiklenir ve MATLAB programında bu fazlarda sinyal üretildikten sonra *lsim()* fonksiyonu kullanılabilir.



Şekil 3.9. Doğrultucu devreleri genel akış şeması

Fonksiyon  $lsim()$ , bir faz, YDD, endüktif yüklü devrelerin çözümünde de kullanılmıştır. Yarım dalga olarak doğrultulan sinüzoidal işaret üretildikten sonra,  $lsim()$  fonksiyonuna transfer fonksiyonu ve zaman bilgisiyle birlikte verilir. Sistem incelendiğinde, çıkış direnç iken, giriş, direnç ve endüktans elemanına verilmektedir. Dolayısıyla denklem (3.1)'deki transfer fonksiyonuna sahiptir.

$$H(s) = \frac{R}{sL + R} \quad (3.1)$$

Sistem; YDD ile doğrultulmuş işareti, zaman sabiti  $\tau = \frac{L}{R}$  değerinin birden çok büyük olmaması durumunda  $lsim()$  fonksiyonuyla doğru bir biçimde simüle eder. Simülasyon sonucunda tek yapılması gereken, direnç üzerindeki akımın hesaplanması ve sıfırdan küçük olan değerlerinin basit bir komutla sıfıra eşitlenmesidir. Zaman sabiti değeri birden çok büyük olursa, simülasyon doğru sonuç vermeyecektir.

SGD'li doğrultucular ve KD'ler, bölüm 2.2'de verilen devre denklemlerine sadık kalınarak gerçekleştirilmiştir. Bunun için, devre denklemleri, gerektiği zaman türev ile çözülmüştür. Türevin gerekli olduğu durumlarda, denklem (3.2)'deki türev tanımına bağlı olarak, çok küçük bir  $\Delta$  adımı belirlenmiş ve ilgili akım veya gerilim fonksiyonunun tanımlı olduğu tüm noktalardaki türev değerleri, bu adım miktarına bağlı olarak hesaplanmıştır.

$$\frac{df(x)}{dx} = \lim_{\Delta \rightarrow 0} \frac{f(x + \Delta) - f(x - \Delta)}{\Delta} \quad (3.2)$$

Çözüm yönteminin bu şekilde belirlenmesi, KD çıkışlarında  $lsim()$  ile modellenmenin yanlış sonuç vermesi ve aynı şekilde SGD'li çözümlerde özel durumların oluşmasıdır.

Doğrultucu devrelerinin, yerel ağ üzerinde elde edilen örnek simülasyon ekran görüntüsü Şekil 3.10'da gösterilmiştir.

### 3.1.2. MATLAB ile konvertör simülasyonu

Bu bölümde MATLAB ile konvertör devrelerinin simülasyon ortamında tasarımı incelenecektir. Konvertörler; kıyıcı devresi, BUCK konvertör, BOOST konvertör ve

BUCK-BOOST konvertör devrelerinden oluşmaktadır. Çıkış olarak kullanıcıya, yük üzerindeki gerilimi çizdirmekte, yük üzerindeki ortalama gerilimi ve dalgalanma gerilimini vermektedir. Bu devreleri modellemek için özel yöntemler kullanılmıştır. Tasarımda kullanılan yöntemlerin ne kadar sağlıklı olduğu, bölüm 2.3'te elde edilen denklemlerin, tasarımda nasıl faydalar sağlayacağı burada tartışılacaktır. Son olarak simülasyonda kullanılan algoritma ortaya koyulacaktır.

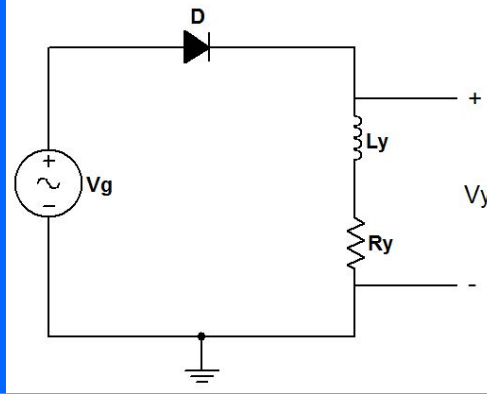
Konvertör devrelerinin kuramsal temellerinin incelenmesi, uygulama açısından simülasyon tasarımcısına kolaylık sağlamaktadır. Kuramsal temeller tartışılırken, konvertör devresinin CCM veya DCM durumuyla çalışabildiği belirtilmişti. Devrelerin transfer fonksiyonları tek tek bulunmuş ve genel değerler elde edilmişti. Bu denklemler, tasarımcıya CCM veya DCM durumlarında çıkış gerilimlerinin çizdirilmesi konusunda genel bilgi vermekle birlikte özel bilgi vermemektedir. Tasarımcı çıkış geriliminin elde edilmesi için, kendi geliştirildiği bir yöntemi kullanmaktadır.

Konvertör devreleri, lineer olmayan devreler olmalarına karşın, kullanılan anahtarın ideal olduğu varsayımı altında, iki adet lineer devrenin, anahtarın açık veya kapalı olması durumuna göre etkileşimli olarak çalıştığı devrelerdir. Anahtarın her açma ve kapama anında, devrede bulunan endüktans ve kapasitör gibi hafızaya sahip komponentler, üzerlerinde akım veya gerilim saklayarak yeni duruma geçecektir. Bu yeni duruma geçişlerin, döngü içerisinde çözümü, konvertör devresinin CCM durumunda geçici durum ve kalıcı durum yanıtını, DCM durumunda ise dalga şekillerini verecektir.

Döngü içerisindeki denklemler, MATLAB'ın sağladığı *ode45()* diferansiyel denklem çözücüsünü kullanmaktadır. Bu çözücü fonksiyon, diferansiyel denklemleri, belirli bir formatta alıp, belli aralık ve belli başlangıç koşulu altında çözümü geri döndürmektedir.

Konvertör devrelerini çözmekte kullanılacak *ode45()* metodu arka planda 4. dereceden Runge Kutta metodunu kullanmaktadır (Mathworks 2014). Yüksek dereceli türevlerin hesaplanmasına gerek duyulmadan, Taylor Serisinin doğruluğunu yakınsamaktadır. Denklem (3.3)'de bu Runge Kutta formüllerinin genel hali verilmiştir.

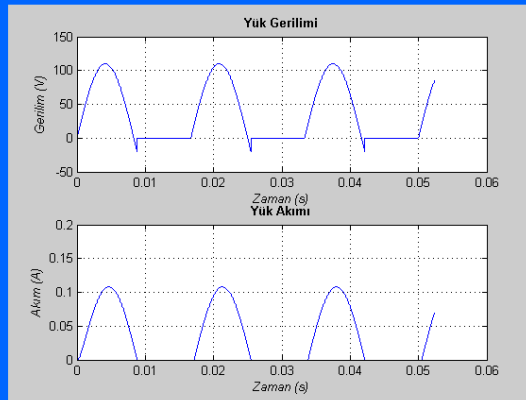
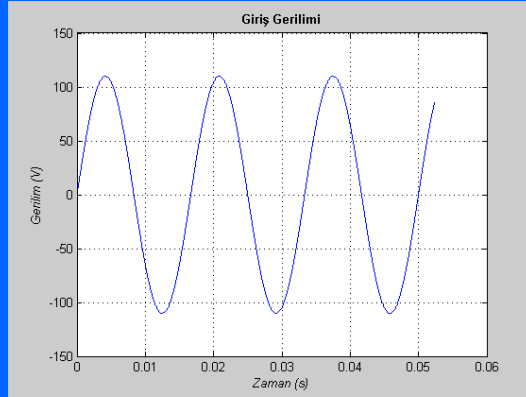
Endüktif Yük Diyot Yarı Dalgı Doğrultucu



Genlik (Vg): <input type="text" value="110"/> (V)	Frekans (f): <input type="text" value="60"/> (Hz)	Endüktans (Ly): <input type="text" value="0.5"/> (H)
Direnç (Ry): <input type="text" value="1000"/> (Ω)	Zaman ölçeği: <input type="text" value="2"/>	
<a href="#">Konu anlatımı Animasyon</a>		

Çalıştır

Çıkış genliği (Vy_ort): 34.7112(V)	Çıkış genliği (Vy_rms): 55.0375(V)
------------------------------------	------------------------------------



Birinci resmi kaydet

İkinci resmi kaydet

Şekil 3.10. Yerel ağ üzerinde doğrultucu devreleri simülasyonu ekran görüntüsü

$$y_{i+1} = y_i + \phi(x_i, y_i, h)h \quad (3.3)$$

Burada  $\phi(x_i, y_i, h)$  artım fonksiyonu diye adlandırılır ve aralık boyunca temsili türev olarak yorumlanabilir. Artım fonksiyonu denklem (3.4)'deki genel formda yazılabilir.

$$\phi(x_i, y_i, h)h = a_1k_1 + a_2k_2 + \dots + a_nk_n \quad (3.4)$$

Burada;  $a_1, a_2, \dots, a_n$ 'ler sabittir,  $k_1, k_2, \dots, k_n$ 'ler ise aşağıdaki gibi tanımlanır.

$$k_1 = f(x_i, y_i) \quad (3.5)$$

$$k_2 = f(x_i p_1 h, y_i + q_{11} k_1 h) \quad (3.6)$$

$$k_3 = f(x_i p_2 h, y_i + q_{21} k_1 h + q_{22} k_2 h) \quad (3.7)$$

$$k_n = f(x_i p_{n-1} h, y_i + q_{n-1,1} k_1 h + q_{n-1,2} k_2 h + \dots + q_{n-1,n-1} k_{n-1} h) \quad (3.8)$$

Burada p'ler ve q'lar sabittir (Chapra, et al. 2008).

Bu fonksiyonu kullanabilmek için, anahtar konumuna bağlı olarak devre denklemlerinin en genel hali bulunmalıdır.

Konvertör devrelerinin, anahtarın açık veya kapalı olduğu durumlar için devre denklemleri incelenirse Şekil 2.40 BUCK konvertör devresini göstermektedir. Anahtarın kapalı ve anahtarın açık olduğu durumlara ait denklemler aşağıdadır. Kapalı olduğu durum denklem (3.9) ve (3.10), açık olduğu durum ise denklem (3.11) ve denklem (3.12) ile ifade edilmiştir.

$$\frac{di_L}{dt} = \frac{-V_o}{L} + \frac{V_i}{L} \quad (3.9)$$

$$\frac{dV_o}{dt} = \frac{-V_o}{R_o C} + \frac{I_L}{C} \quad (3.10)$$

$$\frac{di_L}{dt} = \frac{-V_o}{L} \quad (3.11)$$

$$\frac{dV_o}{dt} = \frac{-V_o}{R_o C} + \frac{I_L}{C} \quad (3.12)$$

Şekil 2.42'de gösterilen BOOST konvertör devresinin, *ode45()* komutu ile çözülebilmesi için, gerekli devre denklemleri olarak denklem (3.13) ve denklem (3.14) anahtarın kapalı olduğu durum için, denklem (3.15) ve denklem (3.16) anahtarın açık olduğu durum için elde edilen eşitliklerdir.

$$V_i + V_o + L \frac{di_L}{dt} \quad (3.13)$$

$$i_L = \frac{V_o}{R_o} + C \frac{dV_o}{dt} \quad (3.14)$$

$$V_i + L \frac{di_L}{dt} = 0 \quad (3.15)$$

$$\frac{V_o}{R} = -C \frac{dV_o}{dt} \quad (3.16)$$

Şekil 2.44'de gösterilen BUCK-BOOST konvertör devresinin, *ode45()* komutu ile çözülebilmesi için, gerekli devre denklemleri olarak denklem (3.17) ve denklem (3.18) anahtarın kapalı olduğu durum için, denklem (3.19) ve denklem (3.20) anahtarın açık olduğu durum için elde edilen eşitliklerdir.

$$\frac{di_L}{dt} = \frac{V_i}{L} \quad (3.17)$$

$$\frac{di_L}{dt} = \frac{V_o}{L} \quad (3.18)$$

$$\frac{di_L}{dt} = \frac{V_o}{L} \quad (3.19)$$

$$\frac{dV_o}{dt} = -\frac{i_L}{C} - \frac{V_o}{R_o C} \quad (3.20)$$

Şekil 2.39'da gösterilen kıyıcı devresi, bir anahtar ve dirençten oluştuğu için, kuramsal temellerde elde edilen, DA transfer fonksiyonu ile modellenenabilir.

MATLAB üzerinde, konvertör devrelerinin *ode45()* ile modellenmesini sağlayan denklem takımları hazır olduğuna göre, konvertör devrelerinin genel algoritması ortaya konulmalıdır. Şekil 3.11'de konvertör devreleri genel algoritması görülmektedir.

Konvertör devrelerinin yerel ağ üzerinde örnek simülasyon ekran görüntüsü Şekil 3.12'de gösterilmiştir.

### 3.1.3. MATLAB ile invertör simülasyonu

Bu bölümde MATLAB ile invertör devrelerinin simülasyon ortamında tasarımı incelenecektir. Hazırlanan simülasyon kullanıcıya, yük üzerindeki gerilim ile akımı çizdirebilmekte, ortalama ve RMS gerilimi hesaplayabilmektedir. Simülasyon oluşturulurken, invertör çıkışındaki sinyali oluşturmak için ne gibi teknikler kullanıldığı, bu gerilimin yüke hangi yöntemlerle aktarıldığı ve MATLAB üzerinde hangi fonksiyonların çağrıldığı üzerinde durulacaktır. Bu devrelerin, kuramsal temelleri bölüm 2.4'te tartışılmıştır. Teorik aşamada tartışılan invertör konusu, tasarım aşamasında temel alınmaktadır.

Invertör bir dizi anahtarlama işlemi ile yüke gerilim aktarmaktadır. Kullanılan yöntemle göre çıkıştaki gerilim kare, boşluklu kare veya DGM dalga şeklindedir. Dikkat edilirse her bir dalga formu, bir öncekinin ilerlemiş halidir. Kare dalga işareti invertör için temel form iken boşluklu kare dalga, bazı noktalarda sıfır değeri alarak boşluk zamanı barındırır. Boşluklu kare dalganın böyle bir yapıya sahip olması, yükün tepe gerilim değerinin ayarlanmasına olanak verir. Bu iki dalga biçimi beraber düşünüldüğünde,



genlikte istenilen kontrolün elde edildiği ama frekansta etkin bir kontrolün gerçekleştirilmediği görülür. Frekans boyutunda etkin bir kontrolün gerçekleştirilebilmesi için DGM'ye ihtiyaç duyulmuştur. Darbe genlik modülasyonu, bir periyot içerisinde sinyalin darbe zamanlarını daha yüksek frekanslı bir taşıyıcı sinyale göre ayarlayarak, istenilen frekanslarda yük gerilimi oluşturabilir. Bu bölümde öncelikli olarak boşluklu kare dalga algoritması incelenecektir. Daha sonra DGM dalga algoritması verilecektir.

Boşluklu kare dalga algoritması Şekil 3.13'de verilmiştir. Normal kare dalganın boşluk zamanı sıfır olan bir boşluklu kare dalga olması sebebiyle, aynı zamanda kare dalga algoritması olarak da kullanılabilir.

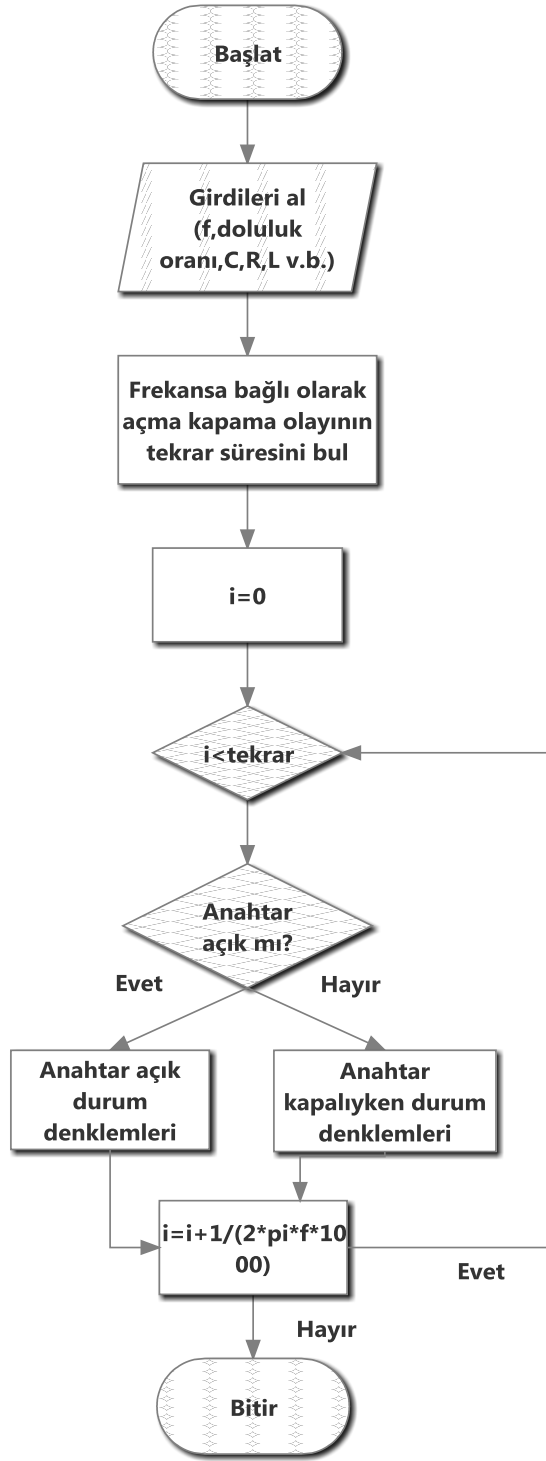
DGM invertörün yüke aktardığı dalganın elde edilmesini gösteren algoritma Şekil 3.14'de gösterilmiştir.

Invertör gerilimleri, Şekil 3.13 ve Şekil 3.14'deki algoritmalarla hesaplanmıştır. Hesaplanan gerilimler, yüke aktarılmıştır. Yük omik ise yük üzerindeki akım, gerilimin yüke bölünmesiyle hesaplanmıştır. Yük endüktif ise  $tf()$  fonksiyonuyla transfer fonksiyonu bulunmuş ve  $lsim()$  ile invertör çıkışındaki gerilime karşı üzerindeki akım hesaplanmıştır. Şekil 3.15'de invertöre ait örnek simülasyon ekran görüntüsü verilmiştir.

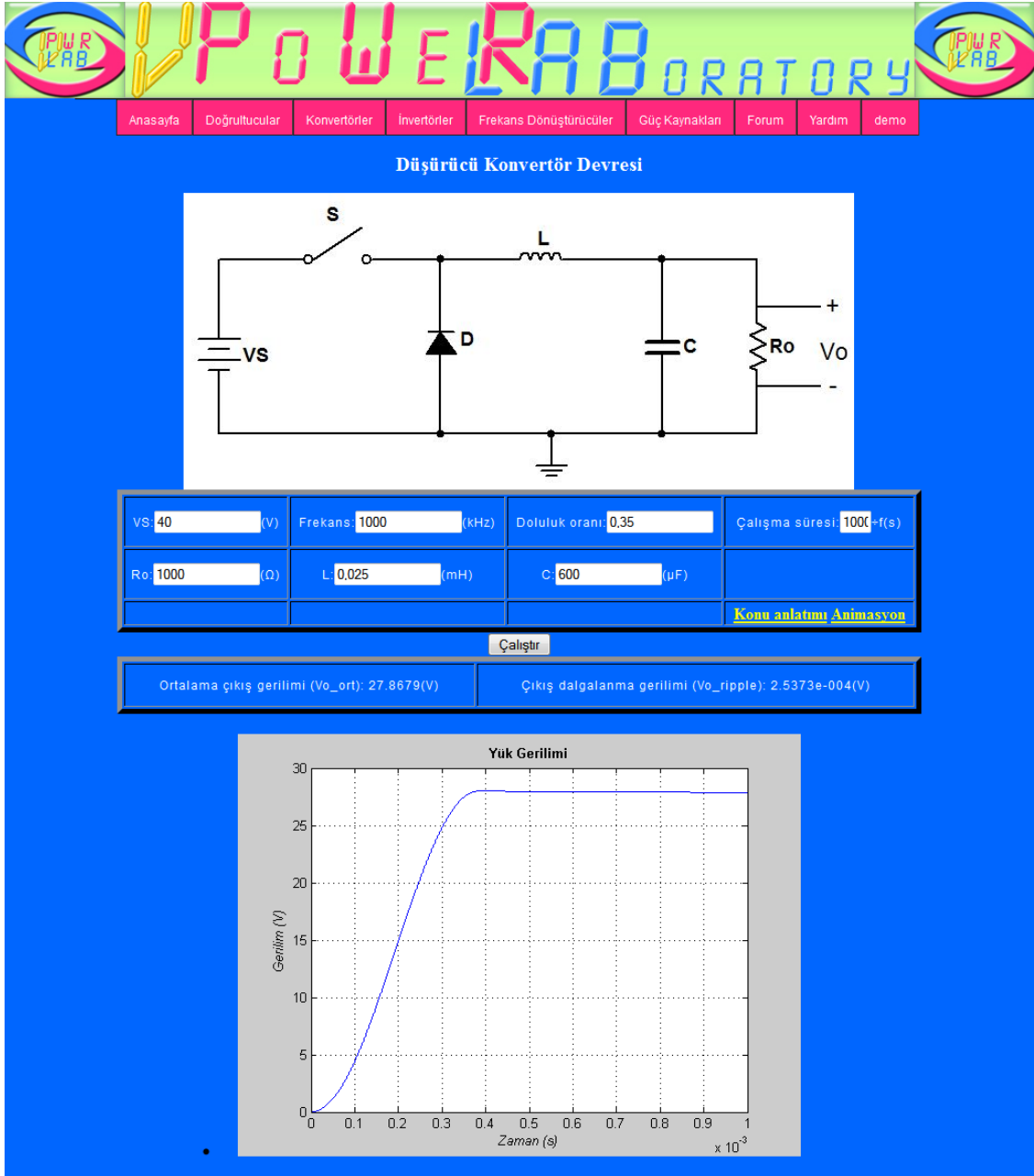
#### **3.1.4. MATLAB ile frekans dönüştürücü simülasyonu**

Bu bölümde MATLAB ile frekans dönüştürücü devrelerinin simülasyon ortamında tasarımı incelenecektir. Hazırlanan simülasyon, kullanıcıya giriş gerilimini, çıkış gerilimini ve çıkış akımını çizdirebilmektedir. Kuramsal temelleri bölüm 2.5'te tartışılan frekans dönüştürücü devresi; faz sayılarına göre bir faz-bir faz ve üç faz bir faz olarak tasarlanmıştır. Yük olarak ise, endüktif ve omik yüklü tasarımları yapılmıştır.

Şekil 3.16'da temel frekans dönüştürücü algoritması verilmiştir. Şekil 2.66'da, giriş frekansının yarıya düşürülmesi prensibine dayanan ve pozitif ve negatif konvertörleri bu esasa göre çalıştıran bir sistem mevcuttur. Simülasyon algoritması bu sistemi taklit eder.

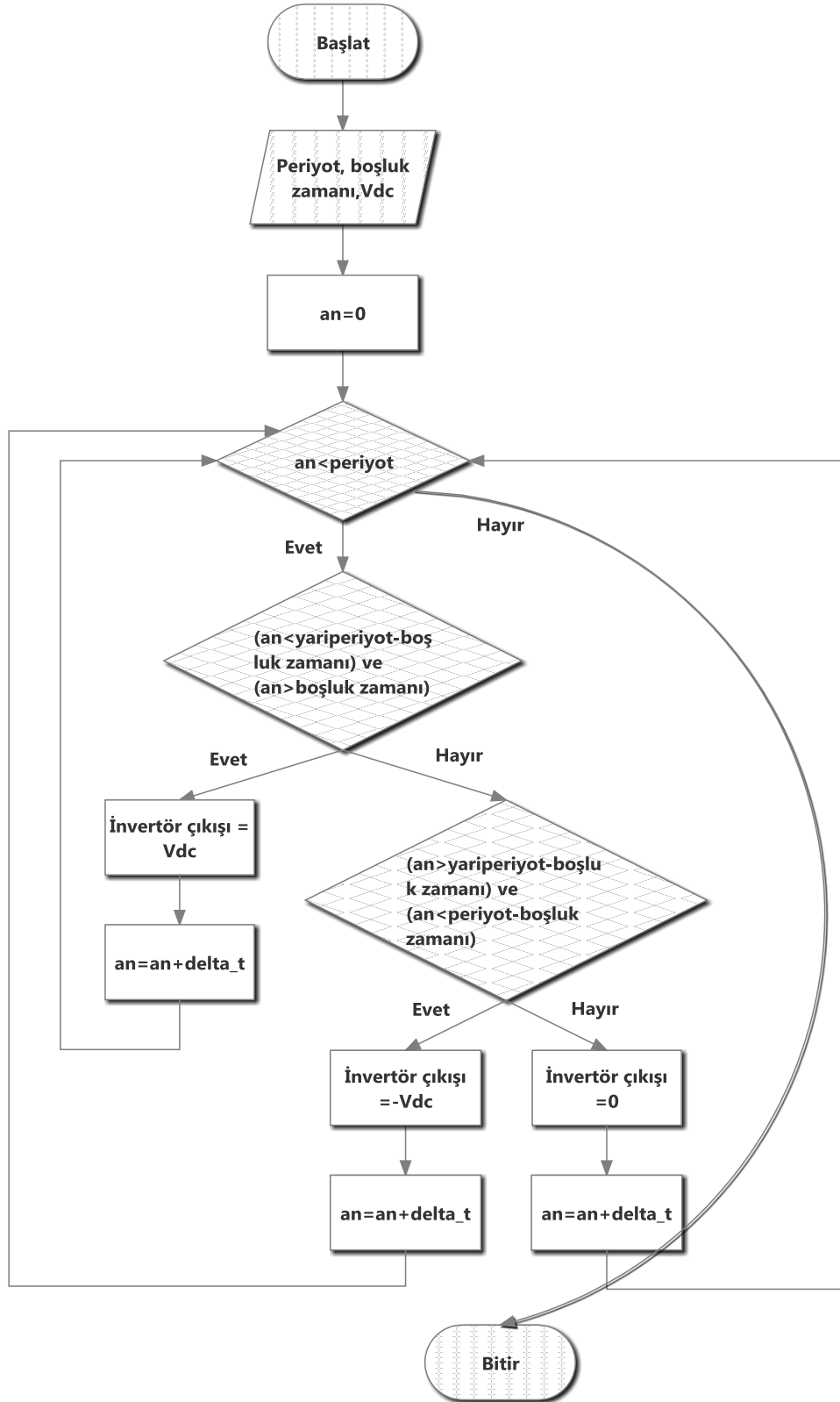


Şekil 3.11. Konvertör devreleri genel algoritması

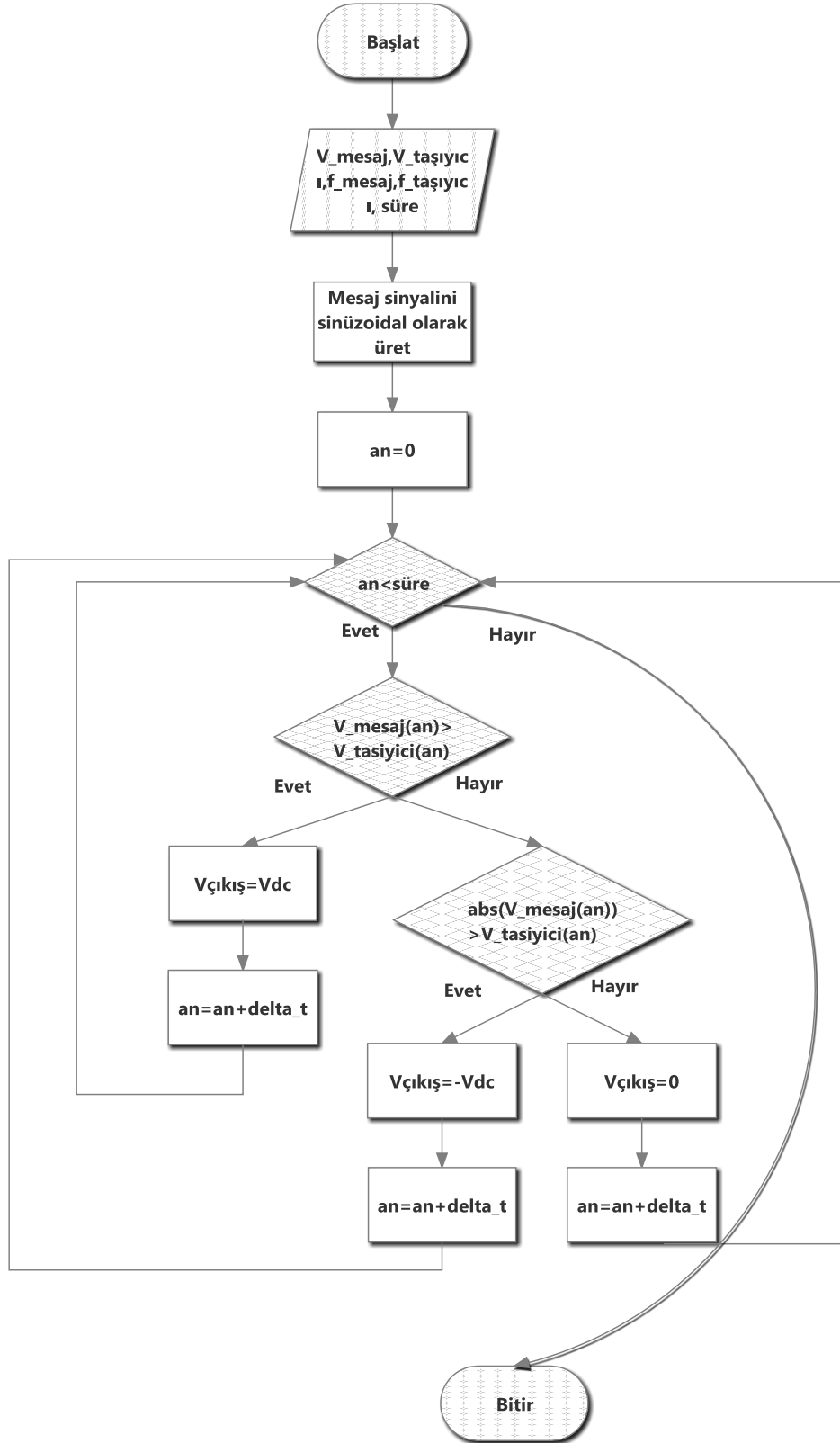


Şekil 3.12. Yerel ağ üzerinde konvertör devreleri simülasyonu ekran görüntüsü

Üç faz-bir faz frekans dönüştürücü devresinde sadece giriş gerilimi farklıdır, birbirinden yüz yirmi derece farklı olarak sinüsoidal bileşenlerin toplamını içerir. Temel çalışma prensibi aynıdır. Şekil 3.17’de frekans dönüştürücü devresi örnek simülasyon ekran görüntüsü görülmektedir.

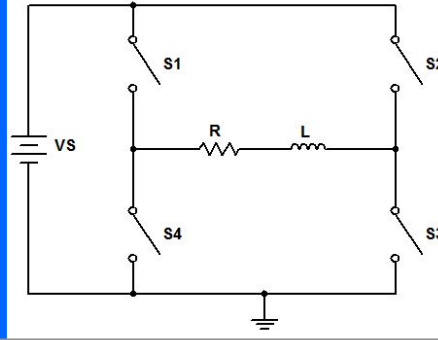


Şekil 3.13. İnvörtör devreleri boşluklu kare dalga üretim algoritması



Şekil 3.14. İnvörtör devreleri DGM dalga üretim algoritması

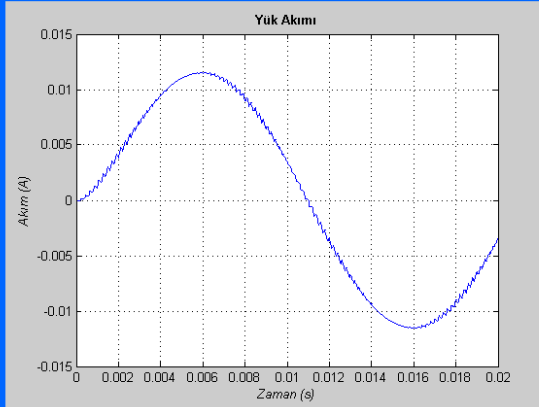
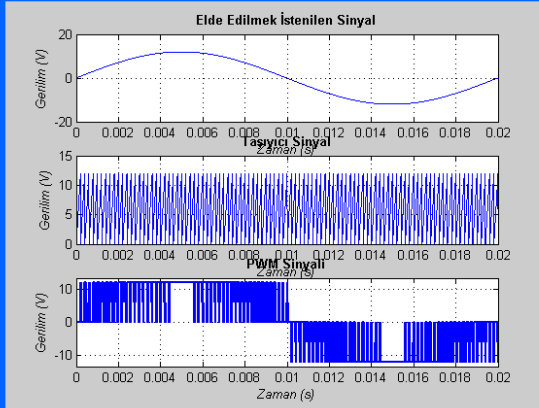
PWM İnterör



Çıkış gerilimi (Vo) <input type="text" value="12"/> (V)	Çıkış frekansı (fo) <input type="text" value="50"/> (Hz)	Direnç (R) <input type="text" value="1000"/> ( $\Omega$ )
Taşıyıcı gerilimi (Vc) <input type="text" value="24"/> (V)	Taşıyıcı frekansı (fo) <input type="text" value="5000"/> (Hz)	Endüktans (L) <input type="text" value="1"/> (mH)
<a href="#">Konu anlatımı Animasyon</a>		

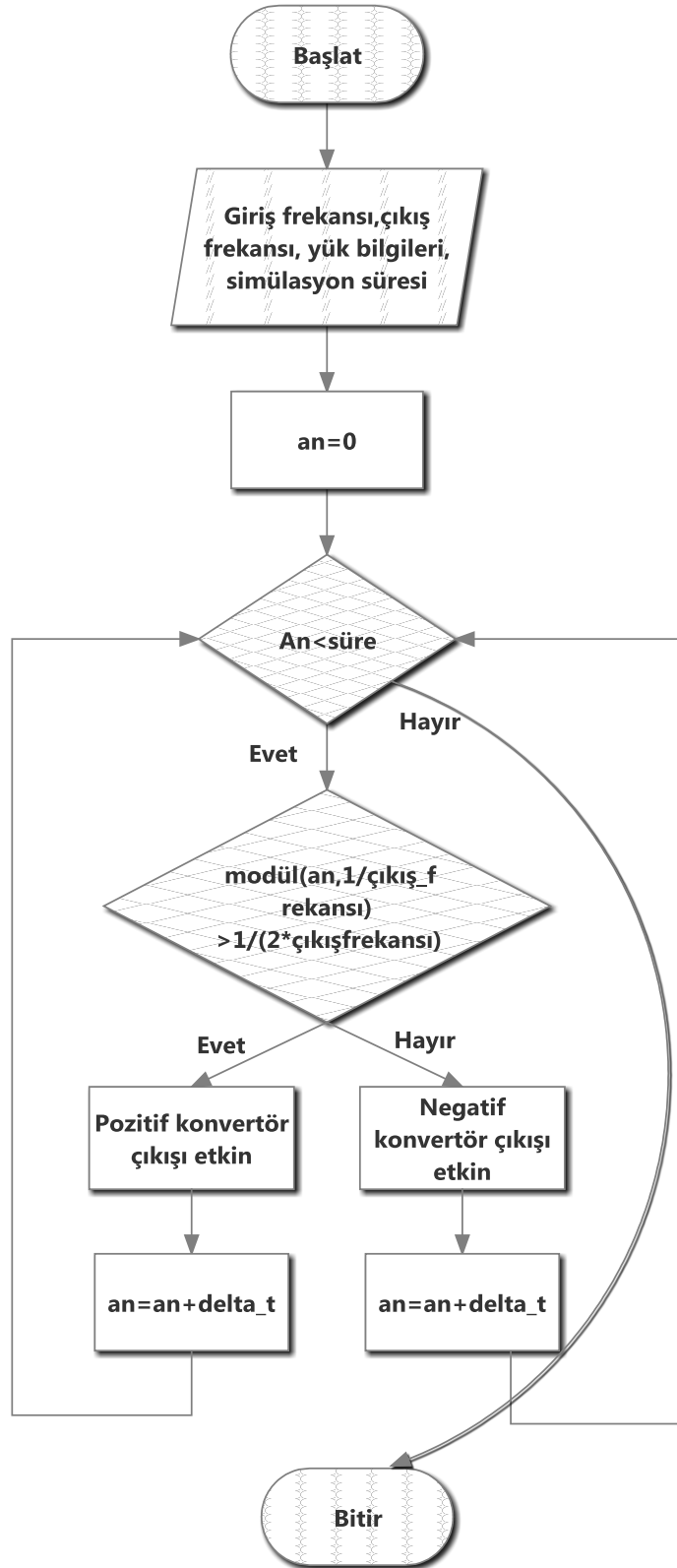
Çalıştır

Çıkış genliği (Vy_ort): 0.1738(V)	Çıkış genliği (Vy_rms): 8.1600(V)
-----------------------------------	-----------------------------------



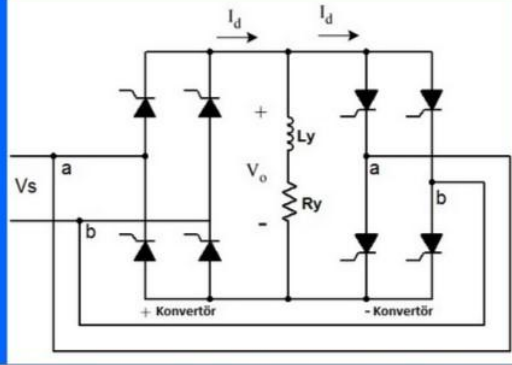
Birinci resmi kaydet İkinci resmi kaydet

Şekil 3.15. Yerel ağ üzerinde invertör devreleri simülasyonu ekran görüntüsü



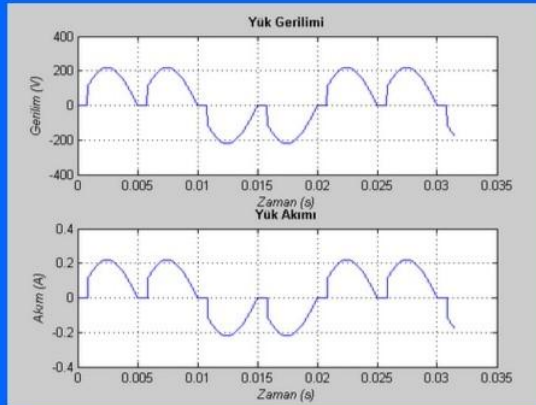
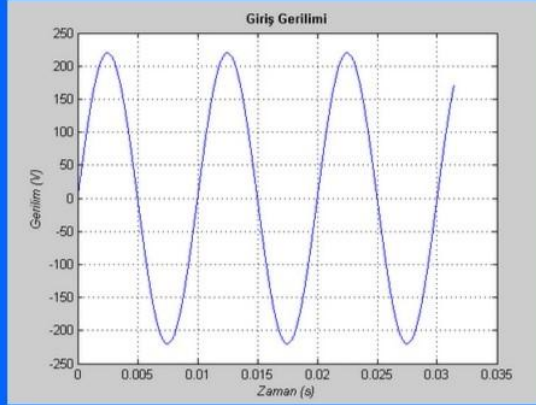
Şekil 3.16. Frekans dönüştürücü devresi genel algoritması

Endüktif Yüklü Frekans Dönüştürücü Devresi



Giriş genliği (Vs):	220 (V)	Giriş frekansı (fs):	100 (Hz)	Çıkış frekansı (fo):	50 (Hz)	Tetikleme açısı:	30 (°)
Endüktans (Ly):	1 (mH)	Direnç (Ry):	100 (Ω)	Zaman ölçeği:	2	<a href="#">Konu anlatımı</a> <a href="#">Animasyon</a>	

Çalıştır



Birinci resmi kaydet

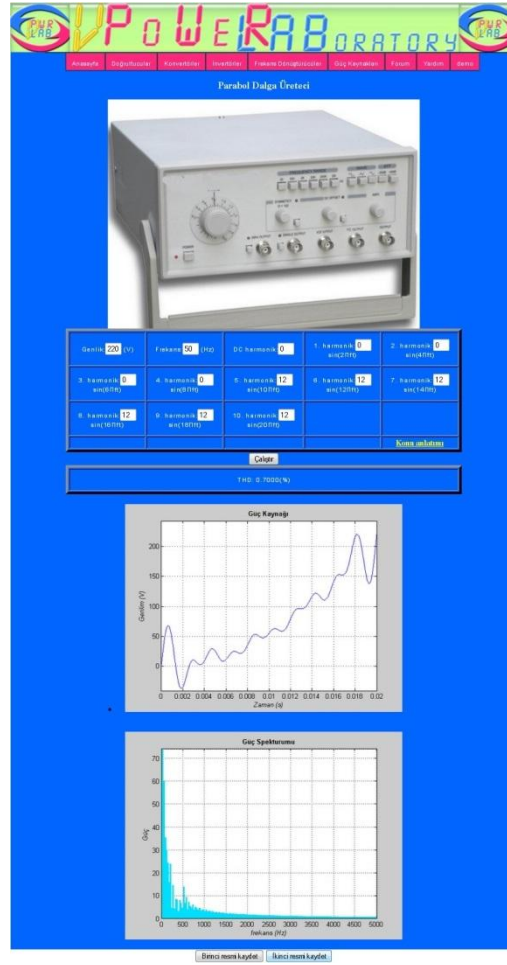
İkinci resmi kaydet

Şekil 3.17. Yerel ağ üzerinde frekans dönüştürücü devreleri simülasyonu ekran görüntüsü



### 3.1.5. MATLAB ile güç kaynağı simülasyonu

Güç kaynağı simülasyonlar, kuramsal temelleri bölüm 2.6’da verilmiş bilgiler kullanılarak gerçekleştirilmiştir. Bu bölümde hazırlanan simülasyonlar, kullanıcıya üretilen gerilimi zaman ve frekans boyutunda çizdirebilmektedir. Ayrıca çeşitli sinyaller için eklenen harmonikler de dikkate alınarak THD değerlerini gösterebilmektedir. Güç kaynağı simülasyonu için toplam yedi adet simülasyon gerçekleştirilmiştir. Sırasıyla birim basamak, kare, parabol, rampa, sinüsoidal, üçgen ve üç faz sinüsoidal dalga üreteçleri tasarlanmıştır. Simülasyondaki işaretlere, kullanıcı harmonikler ekleyebilmektedir. Aynı zamanda, kullanıcı elde ettiği sinyalin frekans boyutundaki bileşenlerini de inceleyebilmektedir. Güç üreteçleri sinyal genlikleri, temel matris işlemleri ile elde edilirken, sinyalin frekans boyutu için, HFD uygulanmıştır. Şekil 3.18’de güç kaynaklarına ait örnek simülasyon ekran görüntüsü gösterilmiştir.



Şekil 3.18. Yerel ağ üzerinde güç kaynakları simülasyonu ekran görüntüsü

### 3.2. ASP.NET Programı

ASP.NET (Active Server Pages) Microsoft tarafından üretilmiş bir ağ uygulama gelişimi teknolojisidir. Ağ üzerinden dinamik sayfalar, uygulamalar ve çeşitli hizmetler yaratılmasına olanak sağlar. .NET çatısı altında bulunmasından mütevellit, bu çatı altındaki bütün dilleri destekler. Çalışma zamanında, bu diller ortak bir dile çevrilir. Bu sayede birçok program geliştirici, ASP.NET uygulamalarını kolaylıkla geliştirebilir (Ladka 2003).

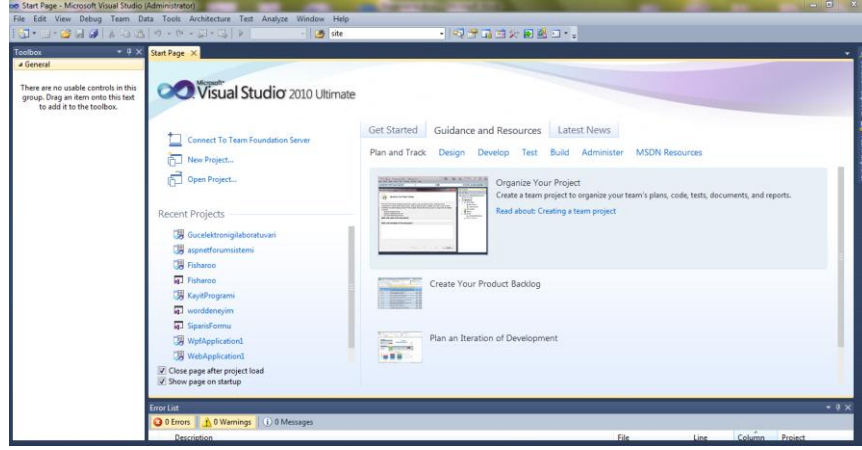
Simülasyon programının oluşturulmasında, ASP.NET aşağıdaki nedenlerden dolayı tercih edilmiştir.

- HTML5, CSS3 ve Java gibi en son teknolojilerle sorunsuz bir şekilde çalışması.
- .NET programlama dillerini desteklemesi dolayısıyla, başka bir programlama dilinden referansla alınan dll dosyalarını ağ üzerinde sorunsuzca çalıştırması.
- Bileşen temelli yazılım geliştirme için olay modellemelerini sağlaması ve bu olayları istemciye HTML formunda sorunsuz bir şekilde aktarması.
- Veri tabanı üzerinde güçlü işlevler barındırması
- *Master Pages* ile temel sayfa tasarımı ve bu sayfadan alt sayfalar türetilmesine olanak sağlaması (Sharp 2007)

Simülasyon programı için tasarlanan ASP.NET sayfaları, kullanıcılardan kayıt olma, üye girişi yapma, elektronik posta gönderme ve MATLAB ile iletişim kurma (referans yöntemi ile) işlemlerini gerçekleştirebilmektedir. Bu özelliklerin nasıl eklendiği alt bölümlerde açıklanmıştır.

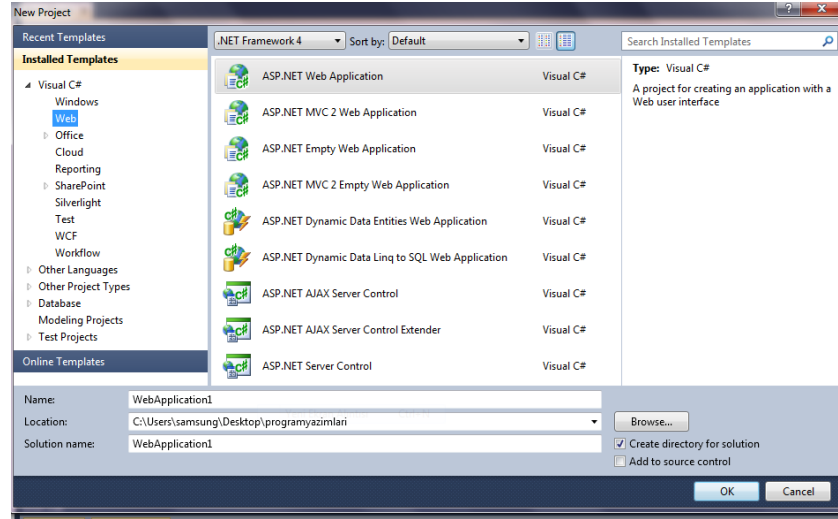
#### 3.2.1. ASP.NET proje oluşturma

ASP.NET programında bir ağ uygulaması geliştirmek için, Microsoft Visual Studio (Microsoft 2014) programı çalıştırılır. Microsoft Visual Studio programı açıldığı zaman ekran görüntüsü Şekil 3.19'daki gibi olur.



Şekil 3.19. Microsoft Visual Studio karşılama ekranı

Simülasyon programının gerçekleştirilebilmesi için, New Project bağlantısına tıklanarak, yeni bir proje oluşturulur. Gelen ekrandan ASP.NET Web Application seçilir. Ekran görüntüsü Şekil 3.20’de gösterilmiştir.

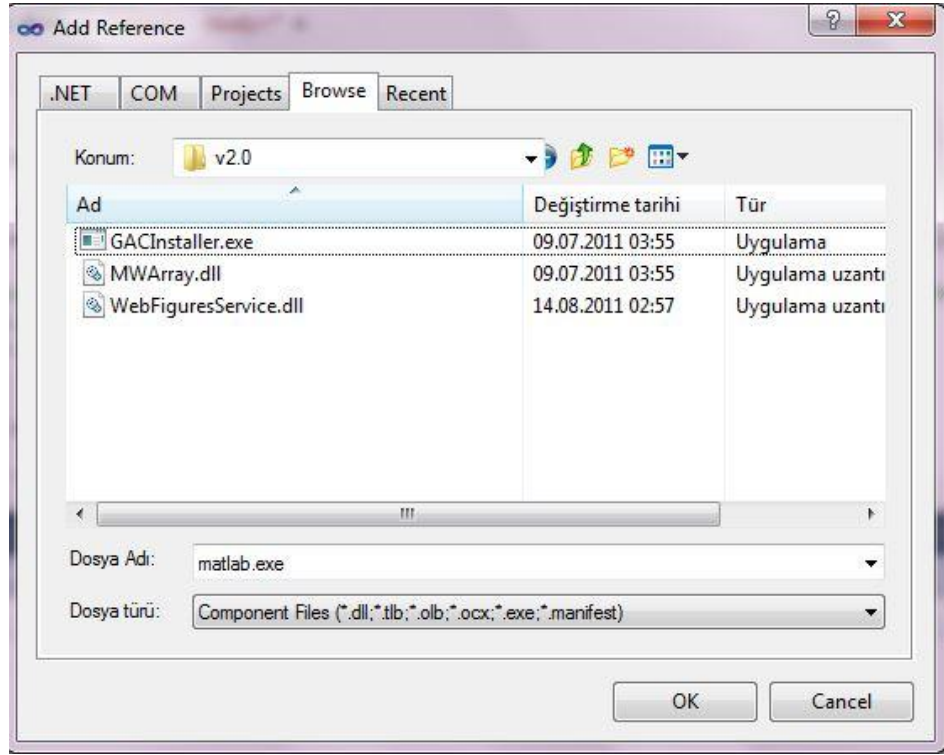


Şekil 3.20. ASP.NET yeni proje oluşturma

### 3.2.2. ASP.NET MATLAB ile bağlantı kurulumu

Bu bölümde, MATLAB’da oluşturulmuş dll dosyaları ile ASP.NET projesi üzerinden bağlantı kurulumu anlatılacaktır. Bağlantı kurulumunun açıklanması, MATLAB programı ile üretilen çıktılarla ilişkilidir.

ASP.NET'in MATLAB'ı internet üzerinde çalıştırabilmesi için ilk yapılması gereken, MATLAB programının yüklü olduğu dizinde bulunan \toolbox\dotnetbuilder\bin\win32\2.0 klasörü altındaki MWArray.dll ve WebFigureServices.dll dosyalarının, oluşturulan proje'nin referanslar kısmına eklenilmesidir (Colak ve ark. 2011). Bu dosyaların referans olarak eklenmesi, Şekil 3.21'de gösterilmiştir.



Şekil 3.21. MWArray.dll ve WebFigureServices.dll dosyalarının eklenmesi

Referanslara eklenen MWArray.dll dosyası, MATLAB üzerinde temel matris işlemlerinin ve bazı fonksiyonlarının çalıştırılmasını sağlarken, WebFigureServices.dll dosyası, MATLAB üzerinde üretilen çizimlerin, web ortamına aktarılmasını, bu resimlerin kaydedilmesini ve çeşitli ağ teknolojisi hizmetlerini sunmaktadır (Güney ve ark. 2011). Bu dosyalar eklendikten sonra, ilgili .aspx dosyası kodlanırken, .cs dosyalı yazılım dosyasına, isim uzayı olarak Şekil 3.22'de gösterildiği gibi eklenmelidir.

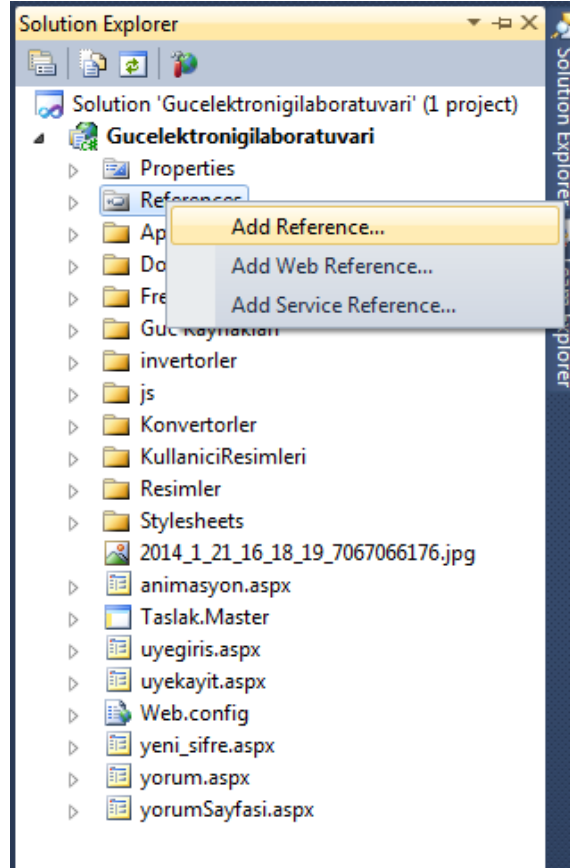
```

using System;
using System.Collections.Generic;
using System.Linq;
using System.Web;
using System.Web.UI;
using System.Web.UI.WebControls;
using MathWorks.MATLAB.NET.Arrays;
using MathWorks.MATLAB.NET.WebFigures;
using AnetdII_dogrultucu;
namespace Gucelektronigilaboratuvari.Dogrultucular

```

Şekil 3.22. MWArray ve WebFigureServices dosyalarının barındırdığı isim uzaylarının eklenmesi

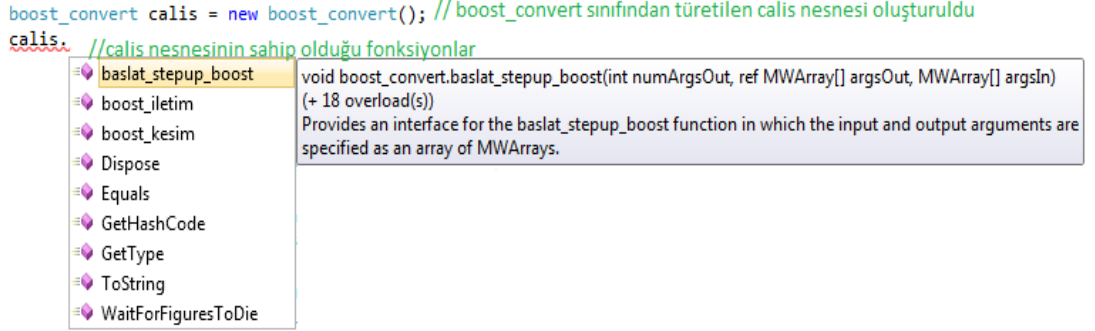
MATLAB üzerinde, *deploytool* komutu ile Şekil 3.6 ve Şekil 3.7’de bahsedildiği gibi üretilen dll dosyaları, projeye referans olarak eklenmelidir. Eklenen bu dll dosyaları, isim uzayına direktif olarak girildikten sonra MATLAB üzerinde kullanıcı tarafından yazılmış sınıflar ve fonksiyonlara erişim imkânı doğmaktadır. Şekil 3.23’de, ilgili dosyanın referanslara aktarımı, Şekil 3.24’de isim uzayı tanımı ve Şekil 3.25’de barındırdığı sınıflar, oluşturulan nesne ve bu nesnenin fonksiyonları görülmektedir.



Şekil 3.23. Üretilen dll dosyasının referans olarak eklenmesi

```
using MathWorks.MATLAB.NET.WebFigures;
using MathWorks.MATLAB.NET.Arrays;
using konvertor;
```

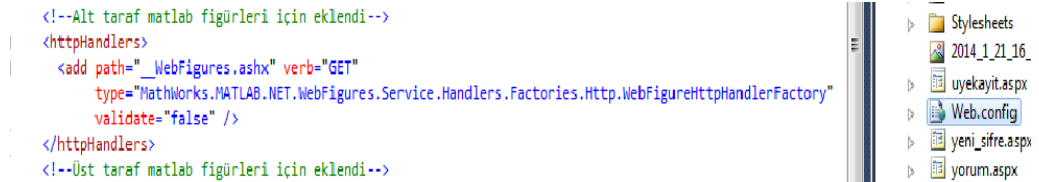
Şekil 3.24. Üretilen dll dosyasının barındırdığı isim uzayının eklenmesi



Şekil 3.25 Belirtilen isim uzayı altında bulunan sınıf, türetilen calis nesnesi ve bu nesnenin sahip olduğu fonksiyonlar

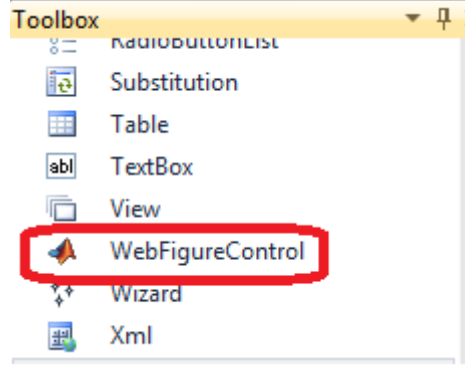
MWArray.dll dosyasının, simülasyona kazandırdığı nitelikler genel olarak ASP:NET üzerinden MATLAB'a argüman geçirmek veya MATLAB'tan ASP:NET'e argüman aktarmaktır (Dikshit 2005). WebFigureServices.dll ise web ortamında, MATLAB'da yapılan çizimleri göstermek için kullanılmıştır.

MATLAB üzerinde çizimleri ASP.NET'e *webfigure()* fonksiyonuyla oluşturulmuş dll dosyalarının tanıtılması gerektiği bölüm 3.1'de gösterilmiştir. Şimdi ASP.NET'in bu çizimleri alabilmesi için gerekli konfigürasyonlardan söz edilecektir. Bunun için ilk düzenleme Web.config dosyası altındadır. Oluşturulacak sitenin yapılandırma ayarlarından sorumlu olan bu dosyaya Şekil 3.26'da gösterildiği gibi kodlar eklenir.



Şekil 3.26. Matlabta oluşan figürleri çekebilmek için web.config'in yapılandırılması

Yazılan bu kodlar sonucunda, aspx uzantılı sayfaların edevat kutusu bölümünde WebFigureControl aracı eklenmiş olur. Bununla ilgili ekran görüntüsü Şekil 3.27'de verilmiştir.



Şekil 3.27. WebFigureControl aracı

WebFigureServices.dll ve MWArray.dll dosyalarının hangi amaç için kullandığının açıklandığı bu bölümde son olarak ASP.NET üzerinde yazılan bir kodun, MATLAB ile birlikte nasıl çalıştığını göstereyim. Şekil 3.28 incelensin.

```
protected void Button1_Click(object sender, EventArgs e)
{
    double kis, A, f, f_konv, R, L, trg;
    kis = Convert.ToDouble(TextBox1.Text);
    A = Convert.ToDouble(TextBox2.Text);
    f = Convert.ToDouble(TextBox3.Text);
    f_konv = Convert.ToDouble(TextBox4.Text);
    R = Convert.ToDouble(TextBox5.Text);
    L = Convert.ToDouble(TextBox6.Text)*0.001;
    trg = Convert.ToDouble(TextBox7.Text);

    Senduktifcyclo calistir = new Senduktifcyclo();
    MWArray[] cizim = calistir.cevrime_enduktif(2, kis, A, f, f_konv, R, L, trg);
    WebFigureControl1.WebFigure = new WebFigure(cizim[0]);
    WebFigureControl2.WebFigure = new WebFigure(cizim[1]);
}
```

Şekil 3.28. Matlab referanslar eklendikten sonra, ASP.NET üzerinde yazılan program.

Şekil 3.28’de, genel olarak Senduktifcyclo isimindeki sınıf için calistir adında bir nesne oluşturuluyor, daha sonra bu nesnenin altında bulunan cevrime\_enduktif() fonksiyonu çağrılıyor. Kodlamaya dikkat edildiğinde, (aynı zamanda Şekil 3.25’de çıkan fonksiyon açıklaması incelendiğinde) fonksiyona ilk geçirilen ifade, dönmesi beklenen parametre sayısıdır. Diğer parametreler MWArray[] tipinde olmalıdır. Ancak C#’teki double türü, MATLAB’daki MWArray[] türüne karşılık gelmektedir. Dönüş değeri incelendiğinde, yine MWArray[] tipinde olduğu görülür. Döndürülen değer cizim ismiyle saklanmıştır ve MATLAB’daki plot komutuyla elde edilen figürleri göstermektedir.

WebFigureControl'lerin aspx uzantılı sayfaya eklenmesinden sonra, WebFigureControl1 ve WebFigureControl2 isminde iki nesne bulunur. Bu nesnelerin WebFigure özellikleri, cizim[0] ve cizim[1] ile doldurularak, MATLAB'daki çizimler, ASP.NET ortamına aktarılmış olur.

### 3.2.3. ASP.NET simülasyon programı sayfalarının hazırlanması

Hazırlanan simülasyon programında; hedeflenen eğitim ve tasarım amacına ulaşılabilmesi, iyi bir tasarımı zorunlu kılar. İyi tasarlanan bir program; kullanıcıyı yormaz, gereksiz ayrıntılarla uğraştırmaz ve ilgi odağı olunan konunun sadelikle değerlendirilmesini sağlar.

Simülasyon programı, kayıtsız olan kullanıcıların sistemde işlem yapmasına imkân vermemektedir. Bunun için, bir kayıt ol bölümü bulunmaktadır. Her kullanıcı sisteme giriş yaptığında, ismini ve numarasını karşısında görmektedir. Kullanıcılar deneylerini, ilgili sayfaya giderek gerçekleştirirken, deneylerle ilgili resimleri kaydedebilmektedir. Kaydedilen resimler, yorum sayfası bölümünde elde edilip, dersin hocasına elektronik posta yoluyla gönderilebilmektedir.

Programın giriş ekranı, öğrenci numarası ve şifre kısmından oluşur. Sisteme kayıtlı olmayan kullanıcılar ise yeni üye kaydı, bağlantısına tıklayarak yeni üye kaydı yapabilirler. Programın giriş ekranı Şekil 3.29'da gösterilmiştir.



Şekil 3.29. Simülasyon programı üye giriş ekranı

Üye giriş ekranının çalışması, Şekil 3.30'daki algoritma ile ve Şekil 3.31'deki program ile gerçekleştirilmiştir.



Kullanıcılar, sisteme kayıtlı değilse kayıt olmaları gerekmektedir. Kullanıcılardan kayıt olurlarken herkes için eşsiz bir bilgi olduğu bilinen öğrenci numaraları, isimleri ve soy isimleri, şifreleri ve iletişim bilgilerini elde edebilmek için elektronik posta adresleri istenmektedir. Üye kayıt ekranı Şekil 3.32’da gösterilmiştir.



Şekil 3.30. Üye giriş ekranı sisteme giriş algoritması

```

protected void btngiris_Click(object sender, EventArgs e)
{
    OleDbConnection db_baglanti;
    OleDbCommand db_komut;
    db_baglanti = new OleDbConnection("Provider=Microsoft.ACE.OLEDB.12.0; DATA Source=" + Server.MapPath
("AppData/uyelerim.accdb"));
    db_baglanti.Open();
    string sorgu = "SELECT COUNT(*) FROM uyeler WHERE ogrenci_no=@ogrenci_no and sifre=@sifre";
    db_komut = new OleDbCommand(sorgu, db_baglanti);
    db_komut.Parameters.Add("@ogrenci_no", OleDbType.VarChar).Value = txtogrenci_no.Text;
    db_komut.Parameters.Add("@sifre", OleDbType.VarChar).Value = txtsifre.Text;
    int kayitsayisi = (int)db_komut.ExecuteScalar();
    db_baglanti.Close();
    if (kayitsayisi <= 0)
    {
        this.lbldurum.ForeColor = System.Drawing.Color.Red;
        this.lbldurum.Text = "Öğrenci numarası veya şifre Yanlış";
    }
    else
    {
        Session["ogrenci_no"] = txtogrenci_no.Text;
        Response.Redirect("~/Dogrultucular/diyot_enduktans_direnc.aspx");
    }
    db_baglanti.Dispose();
}

```

Şekil 3.31. Üyelerin sisteme girişi için program kodları



Şekil 3.32. Simülasyon programı üye kayıt ekranı

Üye kayıtları, accdb (access data base) uzantılı dosyada saklanmaktadır. Üyelerim.accdb ismiyle kayıtlı bulunan dosyanın, tasarım ekran görüntüsü Şekil 3.33'tedir.

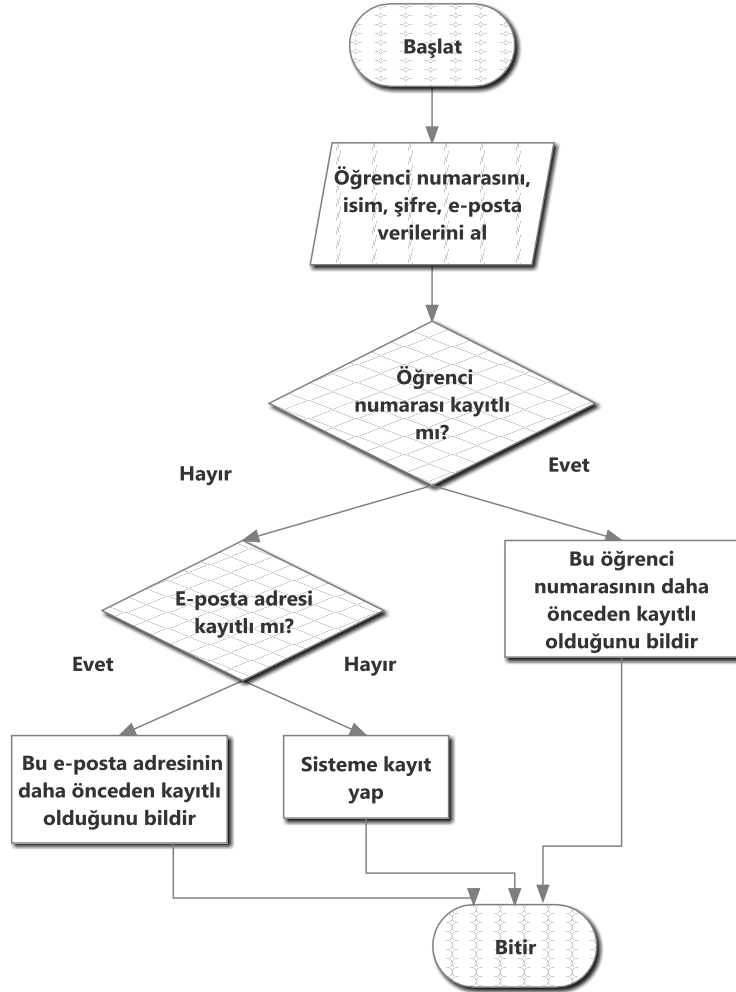
uyeler	
Alan Adı	Veri Türü
ogrenci_no	Metin
uyeadı	Metin
sifre	Metin
eposta	Metin

Şekil 3.33. Üyelerin, access data base kaydı için tablo tasarımı

Üye kayıt ekranının algoritması ile program kodları Şekil 3.34'de ve Şekil 3.35'de gösterilmektedir.

Programın, üye kayıt ve üye giriş ekranları anlatıldıktan sonra, program içeriği ile ilgili kısımları incelenmelidir. Program, birçok devre simülasyonundan oluştuğu için, aynı sayfa yapılarının tekrar etmesi gerektiğini düşünmek yanlış olmaz. İçeriği değişen fakat blok olarak düşünüldüğünde aynı kalan sayfaları oluşturmak için ASP.NET, yazılım geliştiricilere, Master Page kavramını sunmaktadır. Master Page'ler birçok sayfanın kendi yapısından türeyen ana sayfa olarak düşünülebilirler. Bu projede taslak.master isimli bir sayfa tasarlanmıştır. Programın, menü çubuğu, stillendirme bağlantıları, java bağlantıları hep taslak.master sayfası üzerinden yapılmıştır. Taslak.master, içeriği boş

olarak bırakılan dört adet contentplaceholder denetimi ile tasarlanmıştır. Bunlardan, birinci contentplaceholder denetimine html dosyasının başlığı getirilirken, ikincisine devre resmi, üçüncüsüne devreyi yöneten butonlar ve girdiler son olarak dördüncüsüne ise, MATLAB programından gelen verileri çizdirecek, webfigurecontroller için bir alan bırakılmıştır. Taslak.master dosyasının kod görünümü Şekil 3.36'da ve tasarım görünümü Şekil 3.37'dedir.



Şekil 3.34. Üye kaydı algoritması

```

protected void btnkayit_Click(object sender, EventArgs e)
{
    OleDbConnection db_baglanti;
    OleDbCommand db_komut;
    db_baglanti = new OleDbConnection("Provider=Microsoft.ACE.OLEDB.12.0; DATA Source=" + Server.MapPath
("AppData/uyelerim.accdb"));
    db_baglanti.Open();
    /*** Üye öğrenci numarası kontrol ediliyor... ***/
    string sorgu = "SELECT COUNT(*) FROM uyeler WHERE ogrenci_no=@ogrenci_no";
    db_komut = new OleDbCommand(sorgu, db_baglanti);
    db_komut.Parameters.Add("@ogrenci_no", OleDbType.VarChar).Value = txtogrencino.Text;
    int kayitsayisi = (int)db_komut.ExecuteScalar();
    if (kayitsayisi >= 1)
    {
        this.lbdurum.ForeColor = System.Drawing.Color.Red;
        this.lbdurum.Text = "Bu öğrenci numarası sistemde kayıtlıdır...";
        return;
    }
    /*** e-posta adresi kontrol ediliyor... ***/
    sorgu = "SELECT COUNT(*) FROM uyeler WHERE eposta=@eposta";
    db_komut = new OleDbCommand(sorgu, db_baglanti);
    db_komut.Parameters.Add("@eposta", OleDbType.VarChar).Value = txtEmail.Text;
    kayitsayisi = (int)db_komut.ExecuteScalar();
    if (kayitsayisi >= 1)
    {
        this.lbdurum.ForeColor = System.Drawing.Color.Red;
        this.lbdurum.Text = "e-posta adresi kullanılıyor...";
        return;
    }
}

/*** Yeni Üye Kaydetme ***/
sorgu = "INSERT INTO uyeler (ogrenci_no,uyeadı,sifre,eposta) VALUES (@ogno,@uyeadı,@sifre,@eposta)";
db_komut = new OleDbCommand(sorgu, db_baglanti);
db_komut.Parameters.Add("@ogno", OleDbType.VarChar).Value = txtogrencino.Text;
db_komut.Parameters.Add("@uyeadı", OleDbType.VarChar).Value = txtuyeadı.Text;
db_komut.Parameters.Add("@sifre", OleDbType.VarChar).Value = txtsifre.Text;
db_komut.Parameters.Add("@eposta", OleDbType.VarChar).Value = txtEmail.Text;
db_komut.ExecuteNonQuery();
db_baglanti.Close();
db_baglanti = null;
this.pnlRegister.Visible = false;
this.pnlFinish.Visible = true;
}
}

```

Şekil 3.35. Üye kaydı program kodları

Taslak.master sayfası, sadece sayfa tasarımı ve kodlaması açısından değil, aynı zamanda bu sayfada çalıştırılacak program parçalarının belirlenmesi açısından da önemlidir. Üye giriş ekranında, doğrulama alan bir kullanıcı, sistem ana sayfasına yönlendirilir. Fakat kullanıcı girişi yapmayan bir kişi, farklı sayfalardan sisteme girmeye çalışırsa, sistem bu kullanıcıyı, yine üye girişi yapmaya zorlamalıdır. Bu zorlama, Taslak.master ile gerçekleştirilir. Bu zorlamayı yapan algoritma Şekil 3.38’de, kodlar ise Şekil 3.39’da gösterilmiştir. Program kodlarının, Taslak.master.cs’te sayfanın yüklenme olayı içerisine yazılması gerektiğine dikkat edilmelidir.

Taslak.master sayfası, üye girişini kontrol edebildiği gibi, üye çıkış işlemi de bu sayfadan yapılmaktadır. Şekil 3.40’da üye çıkış algoritması ve Şekil 3.41’de üye çıkış program kodları gösterilmiştir. Program kodlarının, Taslak.master.cs sayfasında bulunan bir nesnenin tıklanma olayı içerisine yazılması gerektiğine dikkat edilmelidir.

```

</div>
<div id="DevreResmi">
  <asp:ContentPlaceHolder ID="DevreResmiContent" runat="server">

    </asp:ContentPlaceHolder>
  </div>

  <div id="Butonlar">
    <asp:ContentPlaceHolder ID="ButonlarContent" runat="server">
    </asp:ContentPlaceHolder>
  </div>
  <div id="Figurler">
    <asp:ContentPlaceHolder ID="FigurlerContent" runat="server">

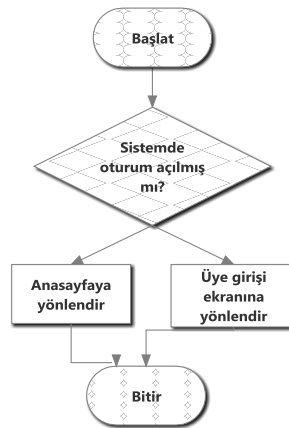
    </asp:ContentPlaceHolder>
  </div>
  </div>
  <div id="ResimKayit">
    <asp:Button ID="Kayit1" runat="server" Text="Birinci resmi kaydet"
      onclick="Kayit1_Click" />
    <asp:Button ID="Kayit2" runat="server" Text="İkinci resmi kaydet"
      onclick="Kayit2_Click" />
  </div>
</form>
</body>
</html>

```

Şekil 3.36. Taslak.master sayfasının kod görünümü



Şekil 3.37. Taslak.master sayfasının tasarım görünümü



Şekil 3.38. İzinsiz kullanıcı girişi yönlendirme algoritması

```

protected void Page_Load(object sender, EventArgs e)
{
    if (Session["ogrenci_no"] != null)
    {
        ogrenci_numarasi = Session["ogrenci_no"].ToString();
        lit_og_no.Text = ogrenci_numarasi;
        OleDbConnection db_baglanti;
        OleDbCommand db_komut;
        db_baglanti = new OleDbConnection("Provider=Microsoft.ACE.OLEDB.12.0; DATA Source=" +
Server.MapPath("~/AppData/uyelerim.accdb"));
        db_baglanti.Open();
        string sorgu = "SELECT uyeadi FROM uyeler WHERE ogrenci_no=@ogrenci_no";
        db_komut = new OleDbCommand(sorgu, db_baglanti);
        db_komut.Parameters.Add("@ogrenci_no", OleDbType.VarChar).Value = Session
["ogrenci_no"].ToString();
        OleDbDataReader oku = db_komut.ExecuteReader();
        if (oku.Read())
        {
            ogrenci_adi = oku[0].ToString();
        }
        lit_ogrenci.Text = ogrenci_adi;
    }
    else
    {
        Response.Redirect("~/uyegiris.aspx");
    }
}

```

Şekil 3.39. Taslak.master.cs'te izinsiz kullanıcı girişini engelleme



Şekil 3.40. Oturum bitirme algoritması

```

protected void HtmlAnchor_Click(Object sender, EventArgs e)
{
    Session.Abandon();
    Response.Redirect("~/uyegiris.aspx");
}

```

Şekil 3.41. Taslak.master.cs oturum bitirme program kodları

Kullanıcılar simülasyon programını çalıştırdıklarında, inceledikleri devrelerin giriş ve çıkış parametrelerine ait grafikleri, web sayfasında görürler. Bu grafiklerin kaydedilebilir olması, eğitim ve tasarım amaçları için büyük faydalar sağlamaktadır. Ayrıca deney sonunda bu grafiklere ait yorumları, ders sorumlusuna göndermeleri de gerektiğinden bu grafiklerin kaydedilmeleri şarttır. Kayıt işlemi, bütün sayfalar için

benzer özelliklerde olduğundan, bu işlem Taslak.master sayfasından yapılmaktadır. Şekil 3.42’de bu işleme ait algoritma ve Şekil 3.43’de Taslak.master.cs’teki program kodları gösterilmiştir. Program kodlarının, taslak.master.cs’te ilgili butonun tıklanması olayı içerisine yazılması gerektiğine dikkat edilmelidir.

Simülasyon sonuçlarını resim olarak kaydetme işleminde Taslak.master sayfasından türetilen alt sayfaların içerisinde genellikle iki adet (WebFigureControl1 ve WebFigureControl2) WebFigureControl kullanılmıştır. Bazı sayfalarda, WebFigureControl2 bulunmazken, bazı sayfalarda hiçbiri bulunmayabilir. Bu yüzden, Şekil 3.43’de, seksen yedinci satırda bu kontrolün var olup olmadığı denetlenmiştir. Bu kontrolün yapılmaması, ilgili bileşenin olmaması durumunda hata döndürecektir. Bu önlem seksen yedinci satırda alınmıştır. Doksan altıncı satırda ise, çekilen WebFigureControl’ün grafik içerip içermediği kontrolü yapılmış ve bu kontrolden dönen sonuca göre kayıt işlemi gerçekleştirilmiştir. Bu kontrolün yapılmaması, grafik döndürülmemesi durumunda kullanıcıya hata olarak yansıtılırdı, ancak bu kontrol ile böyle doğacak bir sorunun önüne geçilmiştir. WebFigureControl2 için, aynı algoritmanın ve aynı program kodlarının sadece isim değişikliği ile yazılacağı açıktır.

Taslak.master sayfasından türeyen sayfalarda, bazı durumlarda iki adet, bazı durumlarda bir adet resim kaydetmek gerekirken, nadiren ise, resim kaydetme durumu olmayabilir. Bu tür durumlarda, resim kaydı yapan butonların kullanıcıdan gizlenmesi, görünüm açısından daha hoş olacaktır. Bu işlemin algoritması Şekil 3.44’de ve kodları Şekil 3.45’de verilmiştir. Program kodlarının, Taslak.master.cs’te sayfanın yüklenme olayı içerisine yazılması gerektiğine dikkat edilmelidir.

Kullanıcılar, Taslak.master sayfasından türeyen yorum.aspx sayfası ile dersin sorumlusuna, elektronik posta ile deney sonuçlarını gönderebilmektedirler. Bunun için yorum.aspx sayfasına bazı özellikler eklenmiştir. Bunlardan birincisi, ücretsiz olarak elde edilen ve metin biçimlendirmeye olanak sağlayan TINYMCE editörüdür. İkinci özellik, sunucu üzerinde kaydedilen resimlerin, yorum.aspx sayfasına resim galerisi olarak geri getiren programdır. Üçüncüsü ise, smtp.gmail.com üzerinden ücretsiz mail gönderebilme özelliğidir. Yorum yazımı ile ilgili, yorum.aspx sayfasının ekran görüntüsü Şekil 3.46’da verilmiştir.



Şekil 3.42. Simülasyon grafiklerini kaydetme algoritması

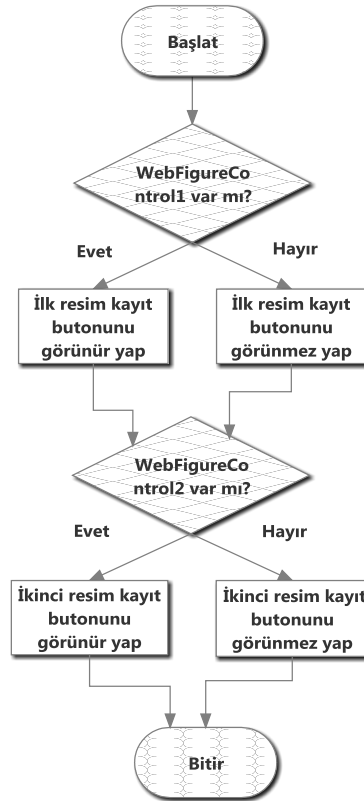


```

87     MathWorks.MATLAB.NET.WebFigures.Service.WebFigureControl figural =
(MathWorks.MATLAB.NET.WebFigures.Service.WebFigureControl)FigurlerContent.FindControl("WebFigureControl1");
88
89     if (figural != null)
90     {
91         Random r = new Random();
92         int sayi = r.Next(1000000, 100000000);
93         string tarih = DateTime.Now.Year.ToString() + "-" + DateTime.Now.Month.ToString() + "-" +
DateTime.Now.Day.ToString() + "-" + DateTime.Now.Hour.ToString() + "-" + DateTime.Now.Minute.ToString() + "-" +
DateTime.Now.Second.ToString() + "-" + DateTime.Now.Millisecond.ToString() + sayi.ToString();
94
95         WebFigureRenderer renderer = new WebFigureRenderer();
96         if (figural.WebFigure != null)
97         {
98             figural.WebFigure.FigureData.Clone();
99             WebFigureRenderParameters param = new WebFigureRenderParameters(figural.WebFigure);
100            System.Drawing.Image resim = renderer.RenderToImage(param);
101
102            if (!Directory.Exists(Server.MapPath("~/KullaniciResimleri\\"+lit_og_no.Text)))
103            {
104                Directory.CreateDirectory(Server.MapPath("~/KullaniciResimleri\\"+lit_og_no.Text));
105            }
106            string dizin = "~/KullaniciResimleri\\" + lit_og_no.Text + "\\" + tarih + ".jpg";
107            resim.Save(Server.MapPath("~/KullaniciResimleri\\" + lit_og_no.Text + "\\" + tarih +
".jpg"), System.Drawing.Imaging.ImageFormat.Jpeg);
108        }
109    }

```

Şekil 3.43. Taslak.master.cs simülasyon grafiklerini kaydetme program kodları



Şekil 3.44. Sayfa gereksinimine göre butonların görünürlüğünü değiştiren algoritma

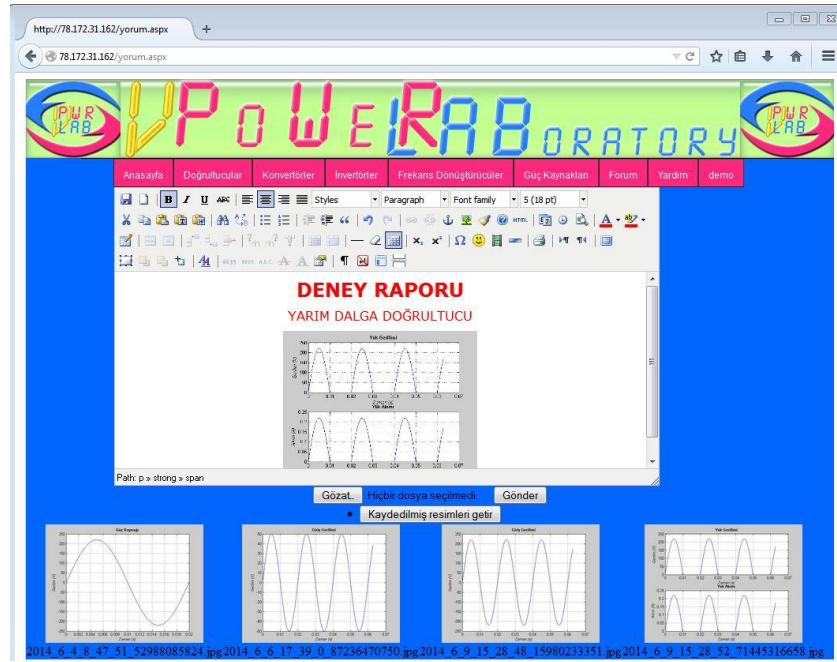
```

//Butonların durumu
MathWorks.MATLAB.NET.WebFigures.Service.WebFigureControl figur1_varmi =
(MathWorks.MATLAB.NET.WebFigures.Service.WebFigureControl)FigurlerContent.FindControl("WebFigureControl1");
if (figur1_varmi == null)
{
    Kayit1.Visible = false;
}
else
{
    Kayit1.Visible = true;
}

MathWorks.MATLAB.NET.WebFigures.Service.WebFigureControl figur2_varmi =
(MathWorks.MATLAB.NET.WebFigures.Service.WebFigureControl)FigurlerContent.FindControl("WebFigureControl2");
if (figur2_varmi == null)
{
    Kayit2.Visible = false;
    Kayit1.Text = "Resmi kaydet";
}
else
{
    Kayit2.Visible = true;
}

```

Şekil 3.45. Taslak.master.cs butonların görünürlüğünü ayarlayan program kodları



Şekil 3.46. yorum.aspx'ten alınan ekran görüntüsü

Metin biçimlendirme amacıyla kullanılan TINYMCE editörü, Java özellikleri kullanılarak oluşturulmuş ücretsiz bir yazılımdır. Daha önceden sunucu üzerinde kaydedilmiş resimleri de çekebilene tinymce, istemci bilgisayarlardan çekilen, resimleri gösterememektedir. Bahsedilen editörün kullanılması için eklenmesi gereken kodlar Şekil 3.47'de verilmiştir (tinymce 2014).

```

<script type="text/javascript" src="/js/tiny_mce/tiny_mce.js?ver=2.9.2" ></script>
<script type="text/javascript">
tinyMCE.init(
  // General options
  mode: "textareas",
  theme: "advanced",
  plugins: "save,pagebreak,style,layer,table,save,advhr,advimage,advlink,emotions,help,spell,insertdatetime,insertdatetime,preview,media,searchreplace,print,contextmenu,paste,directionality,fullscreen,noneditable,visualchars,nonbreaking,advhr,autosave,template";

  // Theme options
  theme_advanced_buttons1: "save,newdocument, |, bold,italic,underline,strikeThrough, |, justifyLeft,justifyCenter,justifyRight,justifyFull,styleselect,fontselect,fontcolorselect",
  theme_advanced_buttons2: "text,undo,paste,pastetext,pasteword, |, search,replace, |, bullist,numlist, |, outdent,indent,blockquote, |, undo,redo, |, link,unlink,anchor,image,cleanup,help,code, |, insertdate,inserttime,preview, |, fullscreen,backcolor",
  theme_advanced_buttons3: "tablecontrols, |, hr,removeformat,visualaid, |, tab,wp, |, checklist,emotions,insertImage,media,advhr, |, print, |, ltr,rtl, |, fullscreen",
  theme_advanced_buttons4: "undo,redo,paste,redo_undo,advhr, |, styleselect, |, ltr,rtl,advimage,advlink, |, visualchars,nonbreaking,template,pagebreak",
  theme_advanced_toolbar_location: "top",
  theme_advanced_toolbar_align: "left",
  theme_advanced_statusbar_location: "bottom",
  theme_advanced_resizing: true;

  // Example content CSS (should be your site CSS)
  content_css: "css/content.css";

  // Drop lists for link/image/media/template dialogs
  template_external_list_url: "lists/template_list.js",
  external_link_list_url: "lists/link_list.js",
  external_image_list_url: "lists/image_list.js",
  media_external_list_url: "lists/media_list.js";

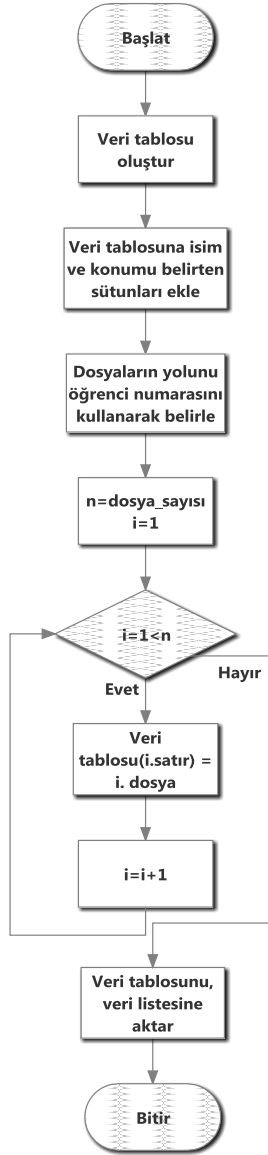
  // Replace values for the template plugin
  template_replace_values: {
    username: "Tom Dyer",
    staffid: "991234"
  }
);
</script>
</asp:Content>
<asp:Content ID="Content2" ContentPlaceHolderID="FormViewContent" runat="server">
<!-- <table border="1" style="width:100%; border-collapse: collapse;" -->
<tr>
 <asp:Text ID="txt1" runat="server" /> |
```

Şekil 3.47. tinyMCE editörünün, yorum.aspx sayfasına eklenmesi

Programaya kaydedilen simülasyon grafik resimleri, kullanıcının öğrenci numarası ile ilgili bir dizinde tutulduğu Şekil 3.42’deki algorithmada belirtilmişti. Şimdi bu dizinde, kayıtlı bulunan resimlerin, resim galerisi olarak, yorum.aspx sayfasına nasıl çekilebileceği üzerinde durulacaktır. Öğrenci numarası ile isimlendirilen bir klasöre kaydedilen simülasyon resimleri, kaydın yapıldığı zaman ve rastgele üretilen bir numara ile, özel bir isime sahip olacaktır ve bu benzersiz isimlendirme ile sorunsuzca resim galerisi oluşturulabilecektir. Şekil 3.48’de bu işlemin algoritması, Şekil 3.49’da ise ilgili kod parçası gösterilmiştir.

Ders sorumlusuna, elektronik posta ile deney raporlarını göndermek, yorum.aspx sayfasının yaptığı üçüncü ve son önemli özelliktir. Kullanıcılar rapor gönderirken, TINYMCE programının özelliklerinden yararlanabileceği gibi, aynı zamanda kendi bilgisayarlarında gelişmiş kelime işlemci programlarından ürettikleri çıktıları da elektronik postalarına ekleyerek, dersin sorumlusuna iletebilmektedir.

Bu adımlar izlendikten sonra site sunucuda kurulmuş olur. Sitenin başlangıç sayfasını ayarlama (Varsayılan belge), sitenin başlatılması, durdurulması ve birçok özelliği IIS yöneticisi programı kullanılarak yapılabilir. Şekil 3.54’de site yönetimi için ekran görüntüsü görülmektedir.



Şekil 3.48. Resim galerisi oluşturma algoritması

```

protected void rescek_Click(object sender, EventArgs e)
{
    DataTable dt = new DataTable();
    dt.Columns.AddRange(new DataColumn[2] { new DataColumn("Name"), new DataColumn("Url") });
    string[] files = System.IO.Directory.GetFiles(Server.MapPath("~/KullaniciResimleri\\") +
    ((Taslak)this.Master).ogrenci_numarasi+"\\", "*");
    foreach (string file in files)
    {
        dt.Rows.Add(System.IO.Path.GetFileName(file), "~/KullaniciResimleri\\" + ((Taslak)
this.Master).ogrenci_numarasi + "\\ "+
        System.IO.Path.GetFileName(file));
    }

    DataList1.DataSource = dt;
    DataList1.DataBind();
}
}

```

Şekil 3.49. yorum.aspx.cs resim galerisi oluşturma program kodları

Elektronik posta gönderme işlemi, Elektronik Posta Gönderme Protokolü (Simple Mail Transfer Protocol, SMTP) protokolü ile gerçekleştirilmiştir. SMTP protokolü, temel olarak sunucu tarafından kendi kimliğini belirterek iletişime başlar. İstemci, hangi SMTP sağlayıcısının kullanıldığını ve gönderici kimlik bilgisini çözer. Mesaj sorunsuz bir şekilde iletildiğinde, oturum sonlandırılır. Bu protokol bilgisayarın beş yüz seksen yedi numaralı portunu kullanır. Elektronik posta göndermek için ilgili program algoritması Şekil 3.52’de verilmiştir (Rhoton 2000).

### **3.3. IIS**

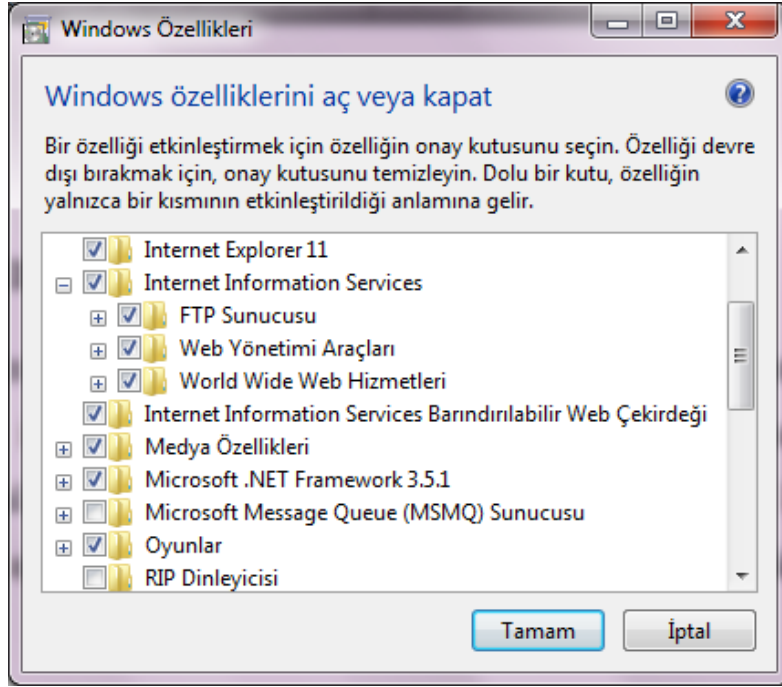
IIS (Internet Information Services ) Microsoft firması tarafından, Windows NT işletim sistemi ailesi için oluşturulmuş, genişletilebilir bir web sunucusudur. Bu projede .aspx uzantılı dosyaların internet üzerinden yayınlanması amacıyla kullanılmıştır. Ayrıca birbirine bağlı yerel ağ üzerindeki bilgisayarlara da yayın yapılabilmektedir (Stanek 2008).

Windows üzerinde standart olarak yüklü gelmemektedir. Bu hizmetten yararlanabilmek için, denetim masası altında, programlar ve özellikler kısmına girilerek Windows özelliklerini aç veya kapat kısmına gelinir. Buradan IIS ilgili bölüm, Şekil 3.50’de gösterildiği gibi seçilir ve yükleme gerçekleştirilir.

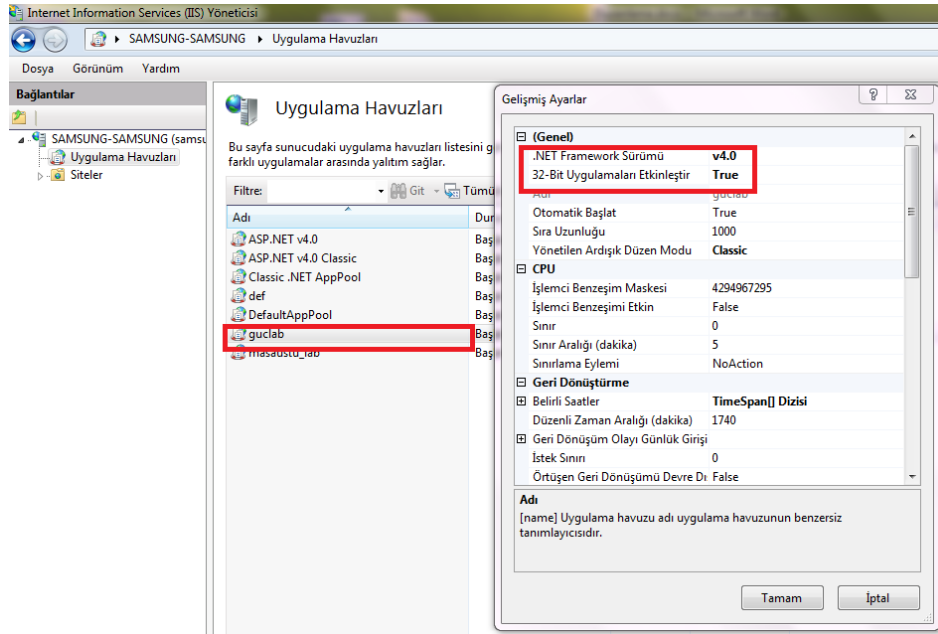
Bu tezde MATLAB’ın 32 bitlik sürümü kullanılmıştır. Sunucu bilgisayar ise 64 bit işletim sistemine sahiptir. IIS’te bu durum düzenlenmez ise, MWArray çalışma ortamı ve bu ortamın bağımlı olduğu dosyalar, yüklenemeyecektir. 32 bitlik MATLAB sürümünün uygulama havuzuna tanıtılması gerekmektedir. Bunun için IIS yöneticisi başlatılır ve uygulama havuzu bölümüne sağ tıklanarak, ilgili özelliklere sahip havuz sisteme eklenir. Sisteme eklenen havuzun çalışma özellikleri daha sonra da değiştirilebilir. Şekil 3.51’de Uygulama havuzunun gelişmiş özellikleri, 32 bitte çalıştırılacak bir çalışma ortamına sahip olduğu ve sitenin .NET 4.0 çatısı altında programlandığı belirtilmektedir.

Uygulama havuzu oluşturulduktan sonra, IIS yöneticisi programında, siteler bölümüne sağ tıklanarak site ekle seçeneği seçilir. Buradan, gelen ekranda, sitenin uygulama havuzunun daha önceden belirlediğimiz ayarlara göre tasarlanmış uygulama havuzunu

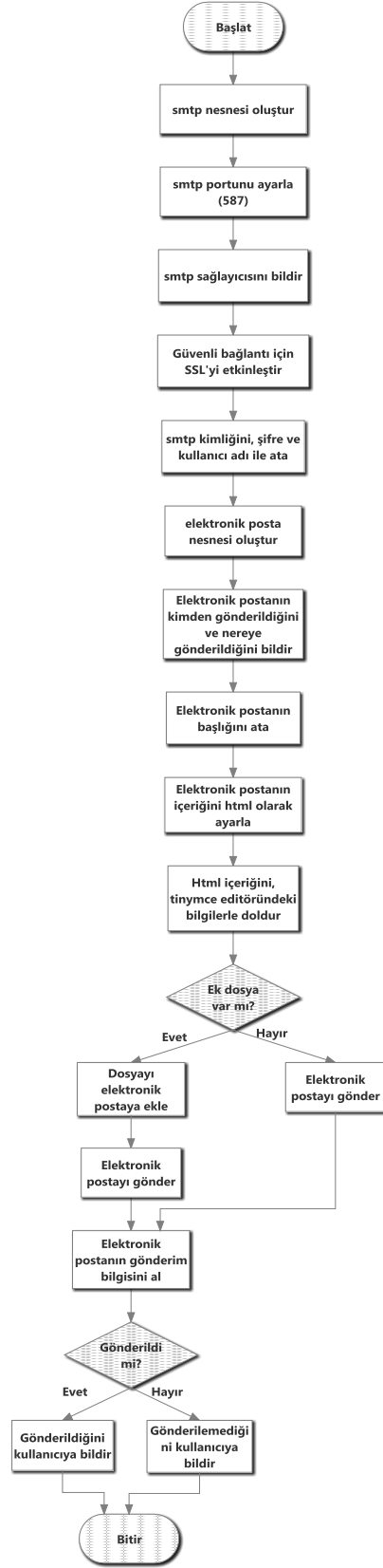
referans alması gerekmektedir. Sitenin bulunduğu dizin, kullanacağı port ve diğer ayarlar, gelen ekranda yapılmalıdır. Şekil 3.53, sitenin eklenme adımı gösterilmektedir.



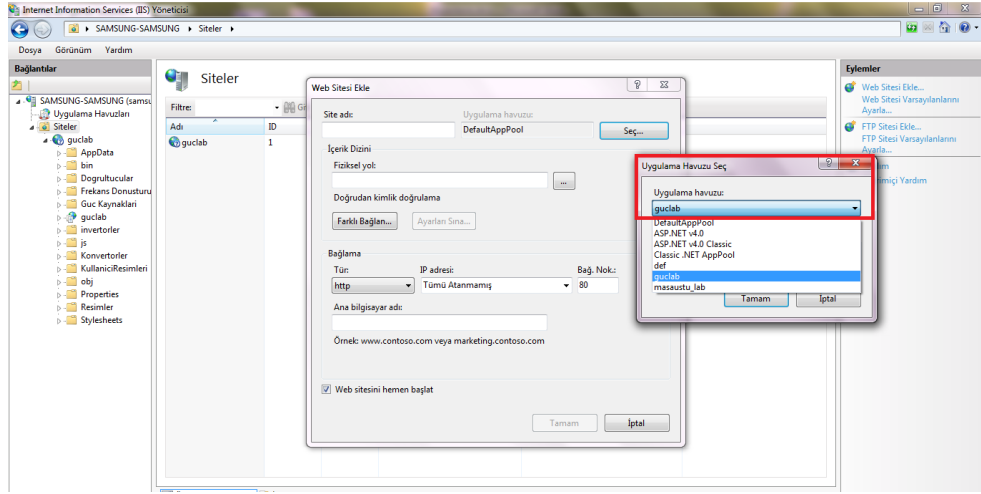
Şekil 3.50. IIS'in Windows'a yüklenilmesi



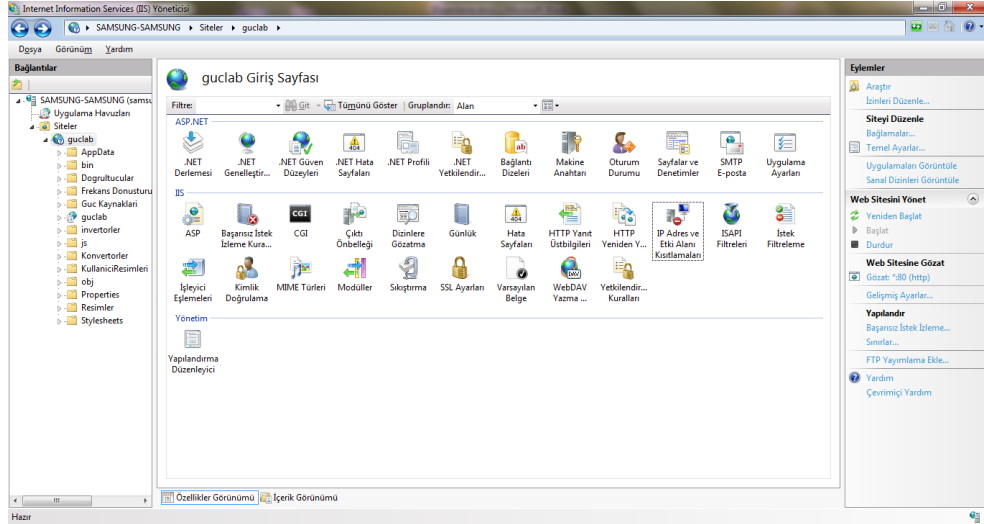
Şekil 3.51. IIS uygulama havuzu yapılandırılması, 32 bit uygulamalarının etkinleştirilmesi ve sitenin .NET v4.0'da programlandırıldığının belirtilmesi



Şekil 3.52. SMTP protokolü ile elektronik posta gönderilme algoritması



Şekil 3.53. Belirlenen uygulama havuzunu kullanan sitenin eklenmesi



Şekil 3.54. Kurulan sitenin yönetilmesi



## **4. UYGULAMALAR**

Bu bölümde, önceki bölümde kullanılan materyaller ve izlenen yöntemlerle hazırlanan simülasyon programının uygulamaları yapılmıştır. Benzetimi tasarlanan bütün devreler, lineer olmayan davranış göstermektedir. Çünkü güç elektroniği elemanlarından en az bir çeşit bileşen barındırmaktadır. Öğrenim ve tasarım gereksinimlerini aynı anda karşılayan bu simülatör sırasıyla; doğrultucular, konvertörler, invertörler, frekans dönüştürücüler ve güç kaynakları sistemlerinin benzetimini yapabilmektedir. Gerçekleştirilen deneylerde, kullanıcı tarafından girilen parametreler altında, çıkış ve giriş grafikleri kullanıcıya sunulmaktadır. Kullanıcı elde ettiği parametreleri yorumlayarak öğrenme faaliyetini gerçekleştirebilirken, aynı zamanda daha iyi bir tasarım için gerekli nicelikleri, deneme yanılma yoluyla elde edebilmektedir.

### **4.1. Doğrultucu Simülasyonları**

Bu bölümde doğrultucu devrelerin, diyot ve tristör ile benzetimi üzerinde duracaktır. Doğrultucuların bir fazlı, üç fazlı modellemeleri, alçak ve yüksek frekanslardaki davranışları simülatörde tasarlanmıştır. Eğitim simülatörünün bu bölümünde, kullanıcıların tipik bir doğrultucu devresinin nasıl işlediğini kavraması, farklı uygulamaları için farklı doğrultucu devrelerinin uygulanmasında, hangi sistemin daha doğru olacağına karar vermesi ve bu simülatör ile bir devre tasarlayabilmesi amaçlanmıştır.

#### **4.1.1. Bir faz omik yükte diyot ile gerçekleştirilmiş YDD**

Bu bölümde, bölüm 2.2.1.1'de matematiksel incelemesi yapılan devrenin, simülasyonu gerçekleştirilmiştir.

Devrenin çalışması için kullanıcı tarafından birtakım parametreler girilmelidir. Bu parametreler ile devre analiz edilebilecektir. Bu parametrelerden zaman ölçeği parametresi, devrenin ne kadar süre ile çalıştırılacağını belirtir. Bu değer yüksek girilmesi, devrenin geçici durum tepkisinin incelenmesini kolaylaştırır. Zaman ölçeği değerinin düşük girilmesi ise uzun süreli bir devre çalışmasının kalıcı durum çıktılarını gösterecektir, standart olarak zaman ölçeği parametresi 2 olarak program içerisinde tanımlanmıştır. Zaman ölçeği parametresinin birimsiz olduğuna dikkat edilmelidir. Diğer parametreler; giriş kaynağına ait genlik ve frekans ve direnç değerleridir.

Şekil 4.1’de Zaman ölçeği 2, giriş genliği 220V, kaynak frekansı 50 Hz ve yük direnci 1000Ω parametreleri ile gerçekleştirilen deney sonuçları gösterilmektedir.

Doğrultucu devrelerine ait, genel animasyon ve konu anlatımı görüntüleri, sırasıyla Şekil 4.2 ve Şekil 4.3’de verilmiştir.

#### **4.1.2. Bir faz omik yükte tristör ile gerçekleştirilmiş YDD**

Burada, bölüm 2.2.1.2’de matematiksel olarak incelenen devrenin simülasyonu yapılmıştır. Devrenin diğer parametreleri, kaynak gerilimi, frekansı; Yük direnci ve tristör tetikleme açısıdır.

Şekil 4.4’de kaynak gerilimi 220V, frekansı 50Hz, tristör tetikleme açısı  $60^0$  ve yük direnci 1000Ω ile gerçekleştirilen deney sonuçları görülmektedir.

#### **4.1.3. Bir faz endüktif yükte diyot ile gerçekleştirilmiş YDD**

Burada, bölüm 2.2.1.3’de matematiksel olarak incelenen devrenin simülasyonu yapılmıştır.

Devrenin diğer parametreleri, kaynak gerilimi, frekansı ile yük direnci ve endüktansdır.

Şekil 4.5’de kaynak gerilimi 220V, frekansı 50Hz, yük direnci 1000Ω ve yük endüktansı 1H ile gerçekleştirilen deney sonuçları görülmektedir.

#### **4.1.4. Bir faz endüktif yükte tristör ile gerçekleştirilmiş YDD**

Burada, bölüm 2.2.1.4’de matematiksel olarak incelenen devrenin simülasyonu yapılmıştır. Devrenin parametreleri, kaynak gerilimi, frekansı; tristör tetikleme açısı ile yük direnci ve endüktansdır.

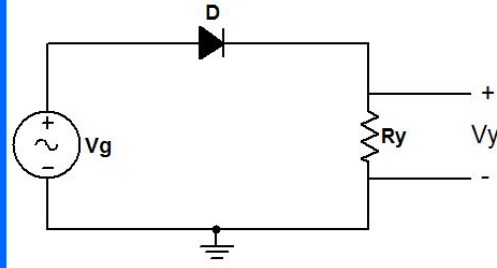
Şekil 4.6’da kaynak gerilimi 220V, frekansı 50Hz, tristör tetikleme açısı  $60^0$  ve yük direnci 1000Ω ve yük endüktansı 1H ile gerçekleştirilen deney sonuçları görülmektedir.

#### **4.1.5. Bir faz SGD ile endüktif yüklü diyot YDD**

Burada, bölüm 2.2.1.5’de matematiksel olarak incelenen devrenin simülasyonu yapılmıştır. Devrenin parametreleri, kaynak gerilimi, frekansı ile yük direnci ve endüktansdır.

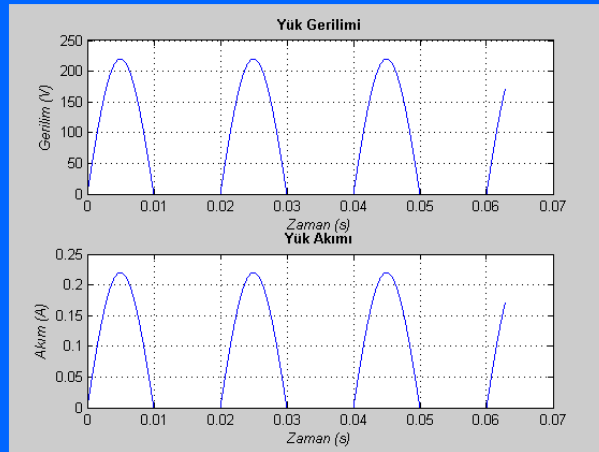
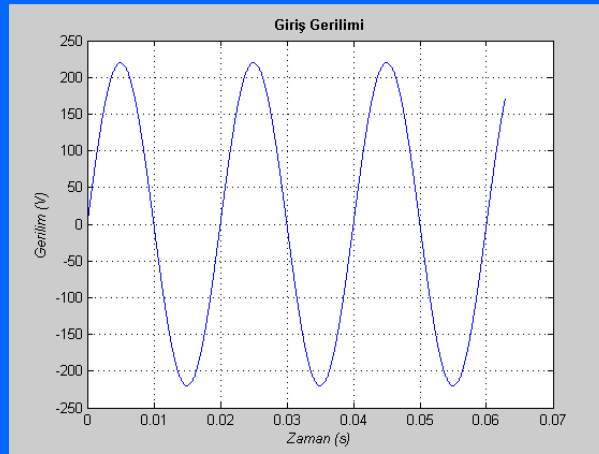
Şekil 4.7’de kaynak gerilimi 220V, frekansı 50Hz, yük direnci 1000Ω ve yük endüktansı 10H ile gerçekleştirilen deney sonuçları görülmektedir.

**Omik Yük Diyot Yarı Dalgı Doğrultucu Devresi**

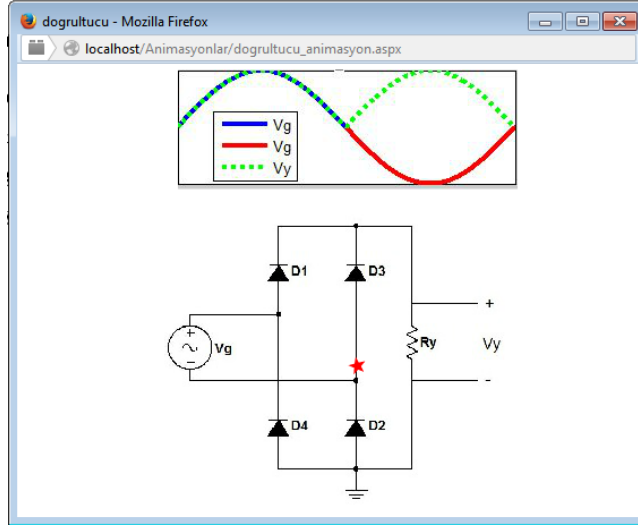


Genlik (Vg): <input type="text" value="220"/> (V)	Frekans (f): <input type="text" value="50"/> (Hz)	Direnç (Ry): <input type="text" value="1000"/> (Ω)	Zaman ölçeği: <input type="text" value="2"/>
<a href="#">Konu anlatımı</a> <a href="#">Animasyon</a>			

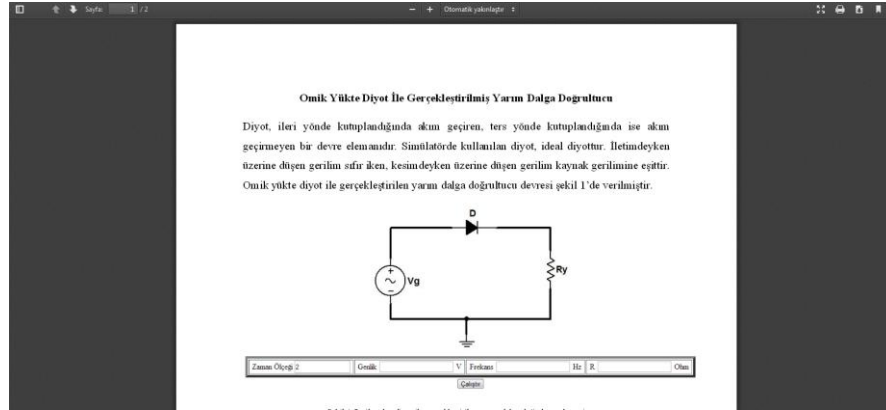
Çıkış genliği (Vy_ort): 70.0282(V)	Çıkış genliği (Vy_rms): 110.0000(V)
------------------------------------	-------------------------------------



Şekil 4.1. Omik yüklü diyot ile gerçekleştirilen devrenin ilgili parametrelerine ilişkin sonuçları



Şekil 4.2. Doğrultucu devrelerine ait genel animasyon görüntüsü



Şekil 4.3. Doğrultucu devreleri konu anlatım ekranına ait ekran görüntüsü

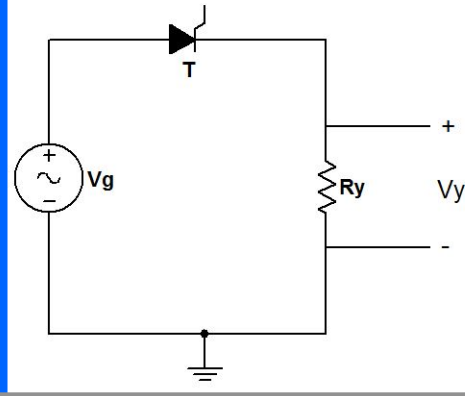
#### 4.1.6. Bir faz SGD ile endüktif yüklü tristör YDD

Burada, bölüm 2.2.1.6'da matematiksel olarak incelenen devrenin simülasyonu yapılmıştır. Devrenin parametreleri, kaynak gerilimi, frekansı; tristör tetikleme açısı ile yük direnci ve endüktansdır.

Şekil 4.8'de zaman ölçeği 1, kaynak gerilimi 220V, frekansı 50Hz, tristör tetikleme açısı  $90^0$ , yük direnci  $1000\Omega$  ve yük endüktansı 10H ile gerçekleştirilen deney sonuçları görülmektedir.

Akım kalıcı durumda 0,02A'den biraz fazla tepe değerine sahiptir. Şekil 4.7'de ise tepe gerilimi 0,06A'den biraz fazlaydı. Bu farklılığın tristörün, 90 derece faz farkıyla diyotlu devreye göre geç tetiklenmesi sağlanarak elde edildiğine dikkat edilmelidir.

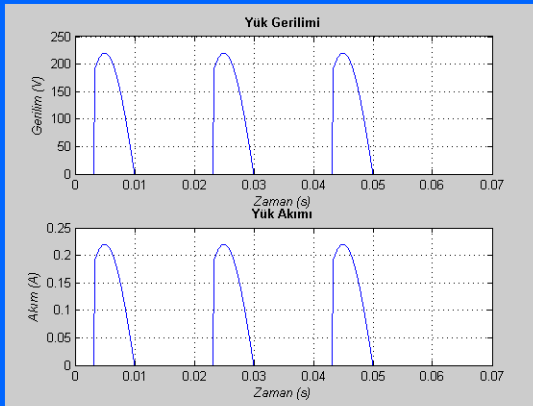
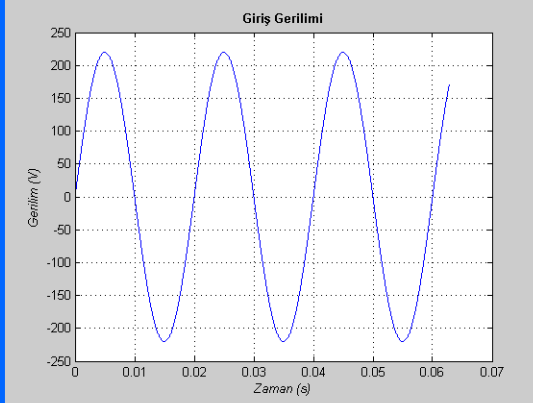
Omik Yük Tristör Yarı Dalgı Doğrultucu



Genlik (Vg): 220 (V)	Frekans (f): 50 (Hz)	Direnç (Ry): 1000 (Ω)
Tetikleme açısı: 60 (°)	Zaman ölçeği: 2	<a href="#">Konu anlatımı</a> <a href="#">Animasyon</a>

Çalıştır

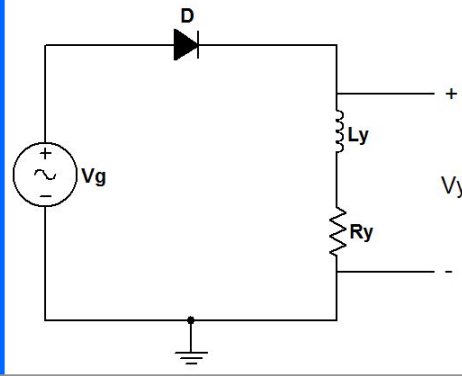
Çıkış genliği (Vy_ort): 52.5243(V)	Çıkış genliği (Vy_rms): 98.6663(V)
------------------------------------	------------------------------------



Birinci resmi kaydet İkinci resmi kaydet

Şekil 4.4. Omik yükte tristör ile gerçekleştirilen YDD devresi simülasyon sonuçları

Endüktif Yük Diyot Yarı Dalgı Doğrultucu

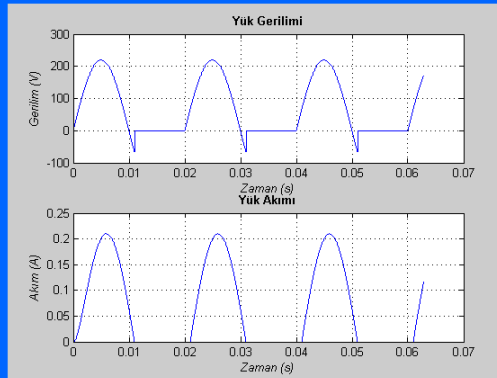
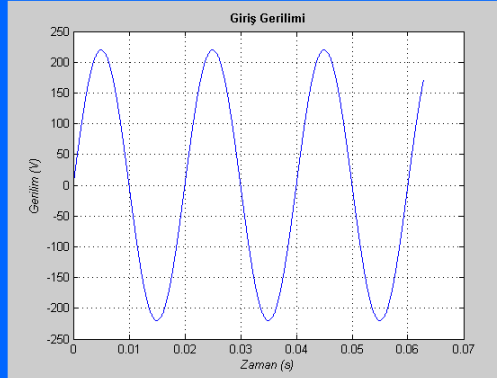


Genlik (Vg): <input type="text" value="220"/> (V)	Frekans (f): <input type="text" value="50"/> (Hz)	Endüktans (Ly): <input type="text" value="1"/> (H)
Direnç (Ry): <input type="text" value="1000"/> ( $\Omega$ )	Zaman ölçeği: <input type="text" value="2"/>	<a href="#">Konu anlatımı Animasyon</a>

Çalıştır

Çıkış genliği (Vy\_ort): 68.4183(V)

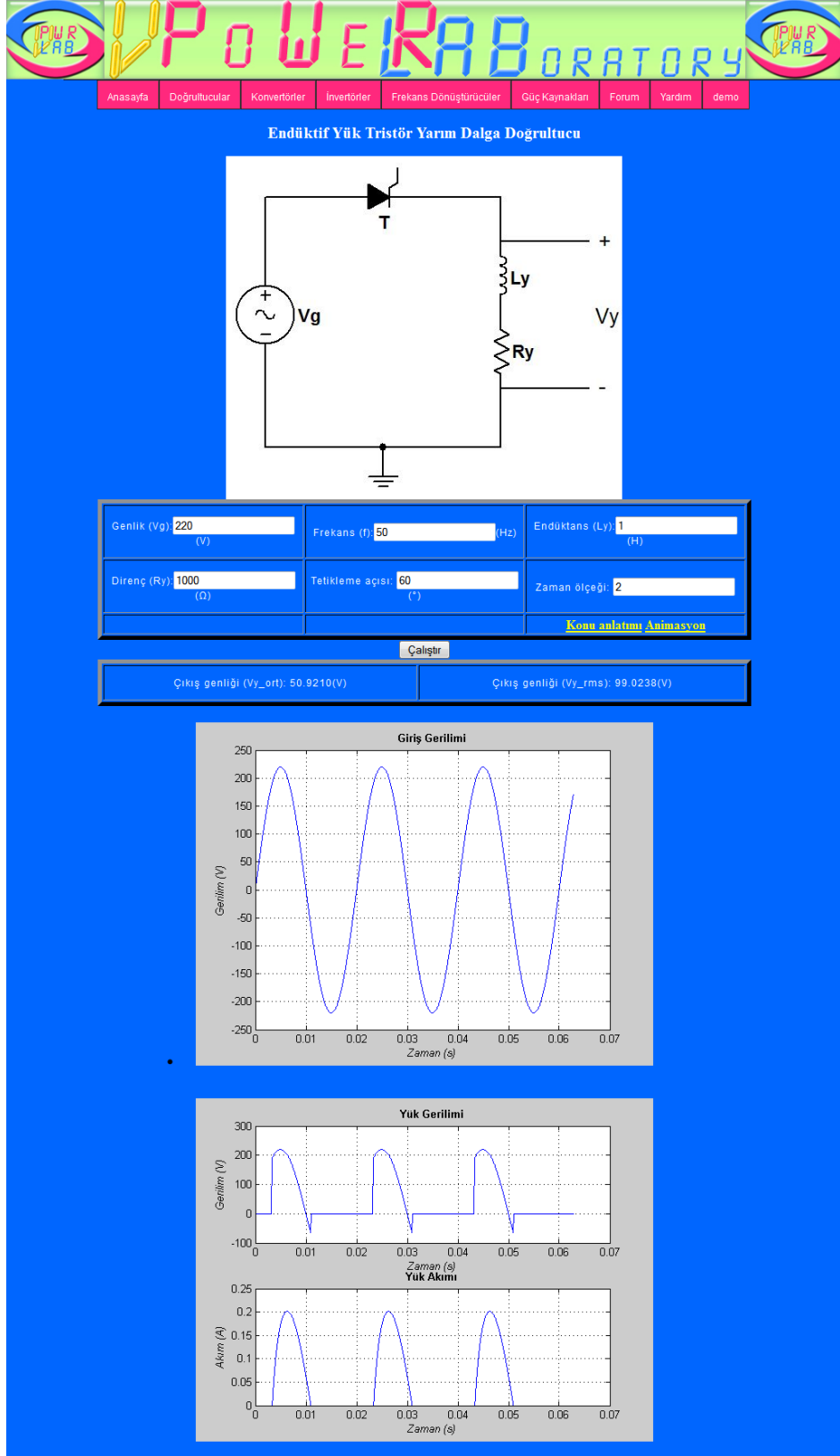
Çıkış genliği (Vy\_rms): 110.3227(V)



Birinci resmi kaydet

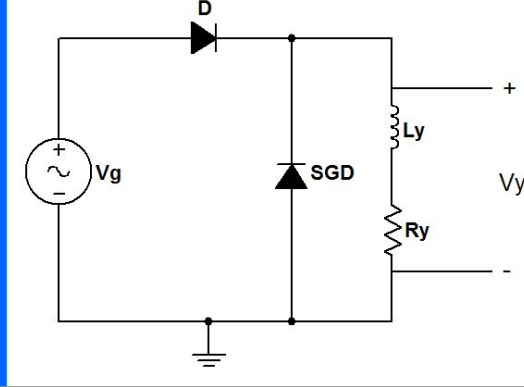
İkinci resmi kaydet

Şekil 4.5. Endüktif yüklü diyot ile gerçekleştirilmiş YDD devresinin simülasyon sonuçları



Şekil 4.6. Endüktif. yüklü tristör ile gerçekleştirilmiş YDD devresinin simülasyon sonuçları

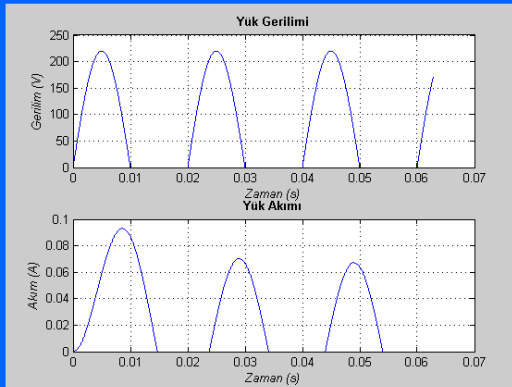
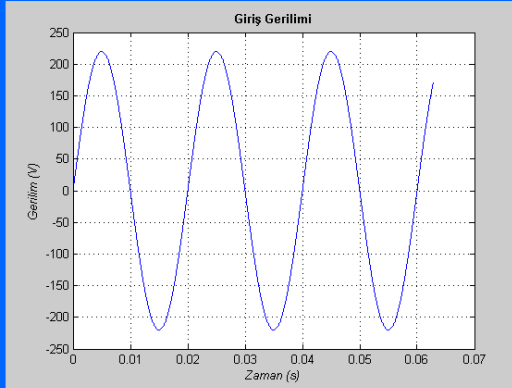
Serbest Geçiş Diyotlu Diyot Yarım Dalgı Doğrultucu



Genlik (Vg):	220 (V)	Frekans (f):	50 (Hz)	Endüktans (Ly):	10 (H)
Direnç (Ry):	1000 (Ω)	Zaman ölçeği:	2	<a href="#">Konu anlatımı Anımsayın</a>	

Çalıştır

Çıkış genliği (Vy_ort): 70.0282(V)	Çıkış genliği (Vy_rms): 110.0000(V)
------------------------------------	-------------------------------------

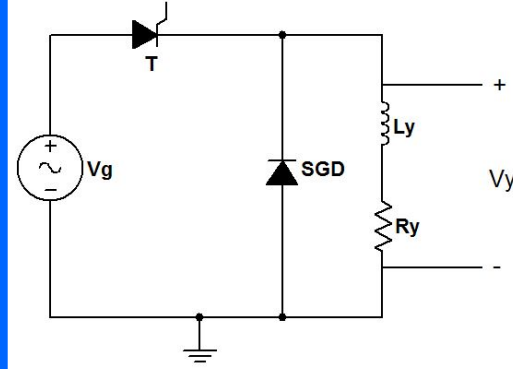


Birinci resmi kaydet İkinci resmi kaydet

Şekil 4.7. SGD'li endüktif yüklü diyot ile gerçekleştirilmiş YDD devresi simülasyon sonuçları



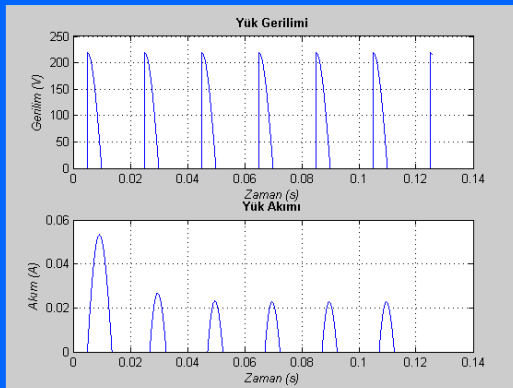
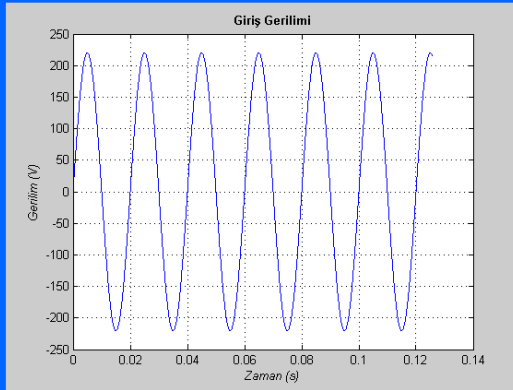
Serbest Geçiş Diyotlu Tristör Yarı Dalgı Doğrultucu



Genlik (Vg): <input type="text" value="220"/> (V)	Frekans (f): <input type="text" value="50"/> (Hz)	Endüktans (Ly): <input type="text" value="10"/> (H)
Direnç (Ry): <input type="text" value="1000"/> (Ω)	Tetikleme açısı: <input type="text" value="90"/> (°)	Zaman ölçeği: <input type="text" value="1"/>
<a href="#">Konu anlatımı Animasyon</a>		

Çalıştır

Çıkış genliği (Vy_ort): 35.0031(V)	Çıkış genliği (Vy_rms): 77.7662(V)
------------------------------------	------------------------------------



Birinci resmi kaydet

İkinci resmi kaydet

Şekil 4.8. SGD'li endüktif yüklü tristör ile gerçekleştirilmiş YDD devresi simülasyon sonuçları

#### **4.1.7. Bir faz omik yüklü diyot ile gerçekleştirilmiş KD**

Burada, bölüm 2.2.1.7'da matematiksel olarak incelenen devrenin simülasyonu yapılmıştır. Devrenin parametreleri, kaynak gerilimi, frekansı ve yük direncidir.

Şekil 4.9'da kaynak gerilimi 220V, frekansı 50Hz ve yük direnci 1000Ω ile gerçekleştirilen deney sonuçları görülmektedir. Devrenin yük akımı ve gerilimi çizimler incelendiğinde faz farkının bulunmadığı görülmektedir.

#### **4.1.8. Bir faz omik yüklü tristör ile gerçekleştirilmiş KD**

Burada, bölüm 2.2.1.8'de matematiksel olarak incelenen devrenin simülasyonu yapılmıştır. Devrenin parametreleri, kaynak gerilimi, frekansı, tristörlerin tetikleme açısı ve yük direncidir.

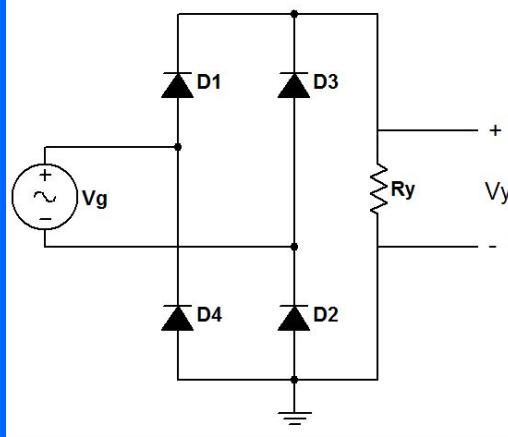
Şekil 4.10'da kaynak gerilimi 220V, frekansı 50Hz tristör tetikleme açıları 90° ve yük direnci 1000Ω ile gerçekleştirilen deney sonuçları görülmektedir. Devrenin yük akımı ve gerilimi çizimleri incelendiğinde faz farkının bulunmadığı görülmektedir.

#### **4.1.9. Bir faz endüktif yüklü diyot ile gerçekleştirilmiş KD**

Burada, bölüm 2.2.1.9'da matematiksel olarak incelenen devrenin simülasyonu yapılmıştır. Devrenin parametreleri, kaynak gerilimi, frekansı ile yük direnci ve endüktansdır.

Şekil 4.11'de kaynak gerilimi 220V, frekansı 500Hz, yük direnci 500Ω ve yük endüktansı 0,7H ile gerçekleştirilen deney sonuçları görülmektedir. Şekil 4.11 incelendiğinde, yük akımının, kalıcı duruma gelmesi kadar bir yükselme zamanı geçirdiği ve kalıcı durumda istenilen sabit bir düzeyden bir miktar sapma ile akımın doğrultulduğu görülmektedir. Burada yükselme zamanını ve kalıcı durumdaki sapma miktarını endüktans değeri ve direnç değeri etkilemektedir. Çalışılan frekansın da etkisi önemlidir. Tasarımcı program sayesinde, istenilen kalıcı durum yanıtını ve yükselme zamanını ayarlayabilecektir. Buna bağlı olarak beklenen ölçütlere uygun devreler tasarlanabilecektir.

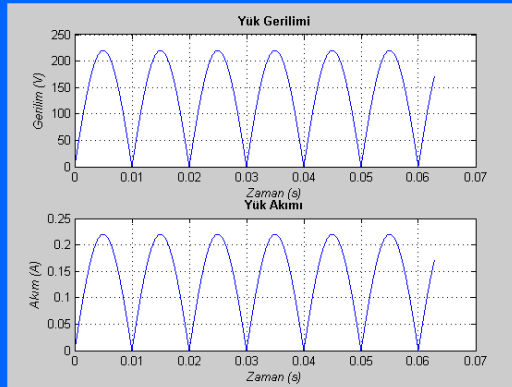
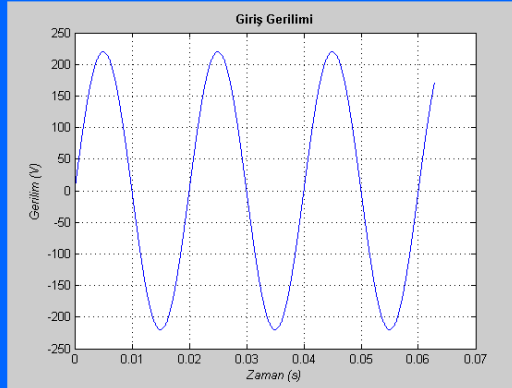
Omik Yük Diyot Köprü Doğrultucu



Genlik (Vg) <input type="text" value="220"/> (V)	Frekans (f) <input type="text" value="50"/> (Hz)	Direnç (Ry) <input type="text" value="1000"/> (Ω)	Zaman ölçeği <input type="text" value="2"/>
<a href="#">Konu anlatımı Animasyon</a>			

Çalıştır

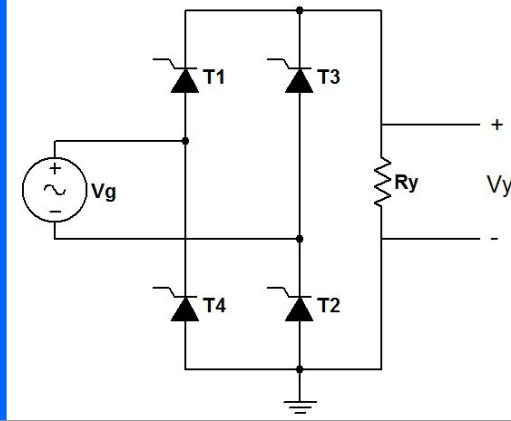
Çıkış genliği (Vy_ort): 140.0563(V)	Çıkış genliği (Vy_rms): 155.5635(V)
-------------------------------------	-------------------------------------



[Birinci resmi kaydet](#) [İkinci resmi kaydet](#)

Şekil 4.9. Omik yüklü diyotlu KD devresi simülasyon sonuçları

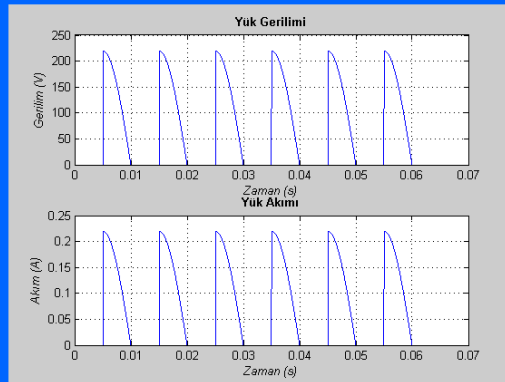
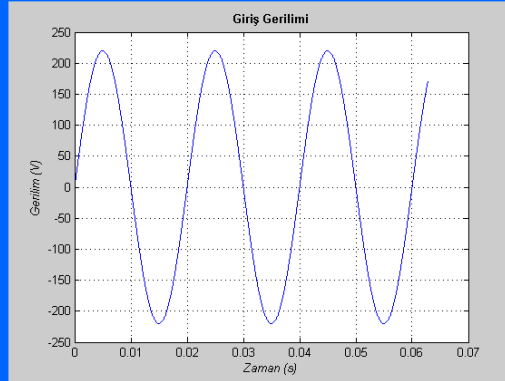
Omik Yük Tristör Köprü Doğrultucu



Genlik ( $V_g$ )	220 (V)	Frekans ( $f$ )	50 (Hz)	Direnç ( $R_y$ )	1000 ( $\Omega$ )
Tetikleme açısı	90 ( $^\circ$ )	Zaman ölçeği:	2	<a href="#">Konu anlatımı Animasyon</a>	

Çalıştır

Çıkış genliği ( $V_{y\_ort}$ ): 70.0062(V)	Çıkış genliği ( $V_{y\_rms}$ ): 109.9780(V)
--	---



Birinci resmi kaydet İkinci resmi kaydet

Şekil 4.10. Omik yüklü tristörlü KD devresi simülasyon sonuçları

#### **4.1.10. Bir faz endüktif yüklü tristör ile gerçekleştirilmiş KD**

Burada, bölüm 2.2.1.10'da matematiksel olarak incelenen devrenin simülasyonu yapılmıştır. Devrenin parametreleri, kaynak gerilimi, frekansı, tristör tetikleme açısı ile yük direnci ve endüktansdır.

Bu devre ile gerçekleştirilecek deneyde, yük akımının zaman zaman sıfıra düştüğü ve tetikleme açısının büyük, devre parametrelerinin yetersiz olmasından kaynaklanan, yük geriliminin negatif değerler aldığı durumu örneklemek amacıyla uygun değerler ile simülasyon çalıştırılacaktır.

Simülasyon için, kaynak gerilimi 220V, frekansı 50Hz, tristör tetikleme açısı 90 derece, yük direnci  $1000\Omega$  ve yük endüktansı 1H alınarak program çalıştırılsın. Bu örnek ile ilgili şekiller Şekil 4.12'de gösterilmektedir. Simülasyonun sonuç grafikleri olan Şekil 4.12'deki grafiklerden görüldüğü üzere, yük gerilimi negatife düşmüştür, bunun nedeni, yük akımının devrede var olmasına rağmen, tetiklemenin geç olması sebebiyle yükün beslenememesidir. Yükün negatif gerilimi üzerinde tuttuğu ve üzerinden akım geçirdiği anlar, devrede reaktif gücün bulunduğu anlardır.

#### **4.1.11. Bir faz endüktif yüklü diyot ile gerçekleştirilmiş SGD'li KD**

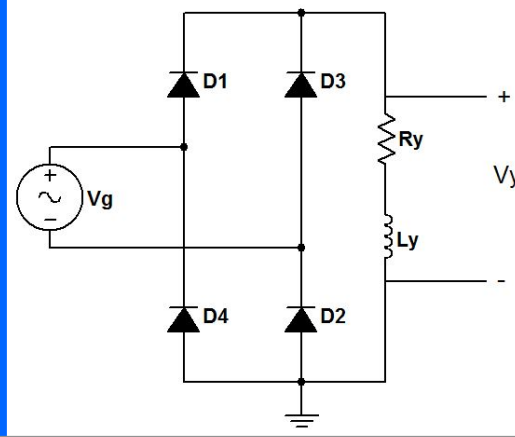
Burada, bölüm 2.2.1.11'de matematiksel olarak incelenen devrenin simülasyonu yapılmıştır. Devrenin parametreleri, kaynak gerilimi, frekansı ile yük direnci ve endüktansdır.

Şekil 4.13'de kaynak gerilimi 220V, frekansı 500Hz, yük direnci  $500\Omega$  ve yük endüktansı 0,7H ile gerçekleştirilen deney sonuçları görülmektedir.

#### **4.1.12. Bir faz endüktif yüklü tristör ile gerçekleştirilmiş SGD'li KD**

Burada, bölüm 2.2.1.12'de matematiksel olarak incelenen devrenin simülasyonu yapılmıştır. Devrenin parametreleri, kaynak gerilimi, frekansı, tristör tetikleme açısı ile yük direnci ve endüktansdır.

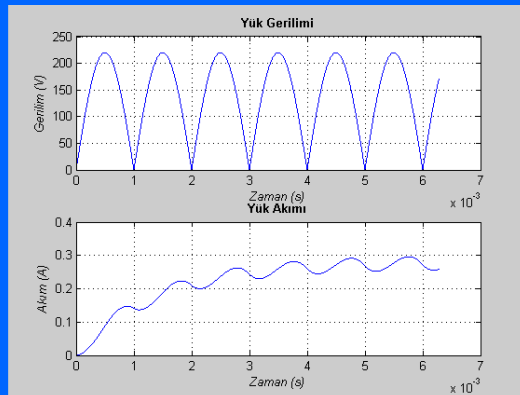
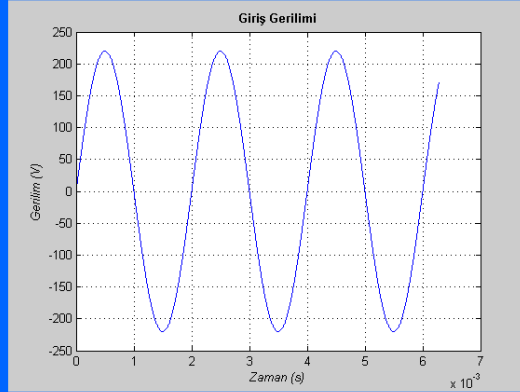
Endüktif Yük Diyot Köprü Doğrultucu



Genlik (Vg): 220 (V)	Frekans (f): 500 (Hz)	Direnç (Ry): 500 (Ω)
Endüktans (Ly): 0,7 (H)	Zaman ölçeği: 2	
<a href="#">Konu anlatımı Animasyon</a>		

Çalıştır

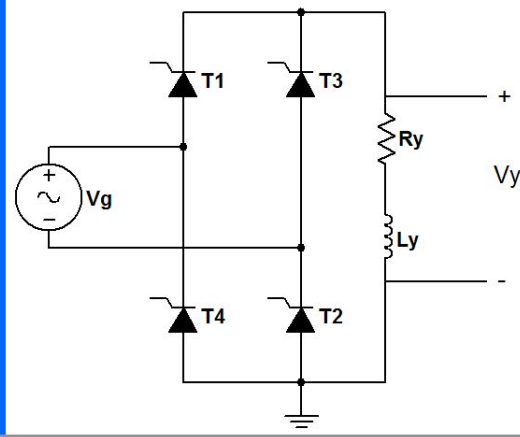
Çıkış genliği (Vy_ort): 140.0563(V)	Çıkış genliği (Vy_rms): 155.5635(V)
-------------------------------------	-------------------------------------



Birinci resmi kaydet İkinci resmi kaydet

Şekil 4.11. Endüktif yüklü diyot ile gerçekleştirilmiş KD simülasyon sonuçları

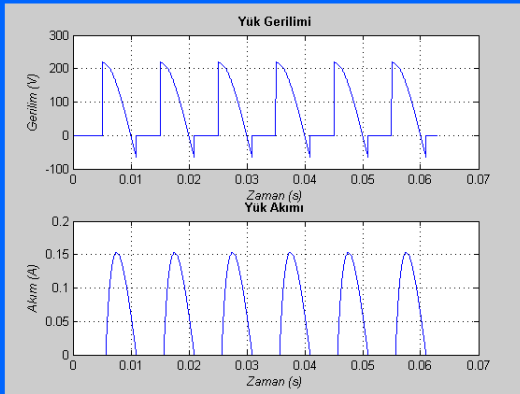
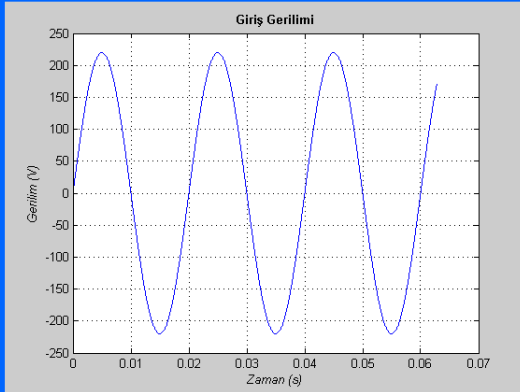
Endüktif Yük Tristör Köprü Doğrultucu



Genlik (Vg): 220 (V)	Frekans (f): 50 (Hz)	Direnç (Ry): 1000 (Ω)
Endüktans (Ly): 1 (H)	Tetikleme açısı: 90 (°)	Zaman ölçeği: 2
<a href="#">Konu anlatımı</a> <a href="#">Animasyon</a>		

Çalıştır

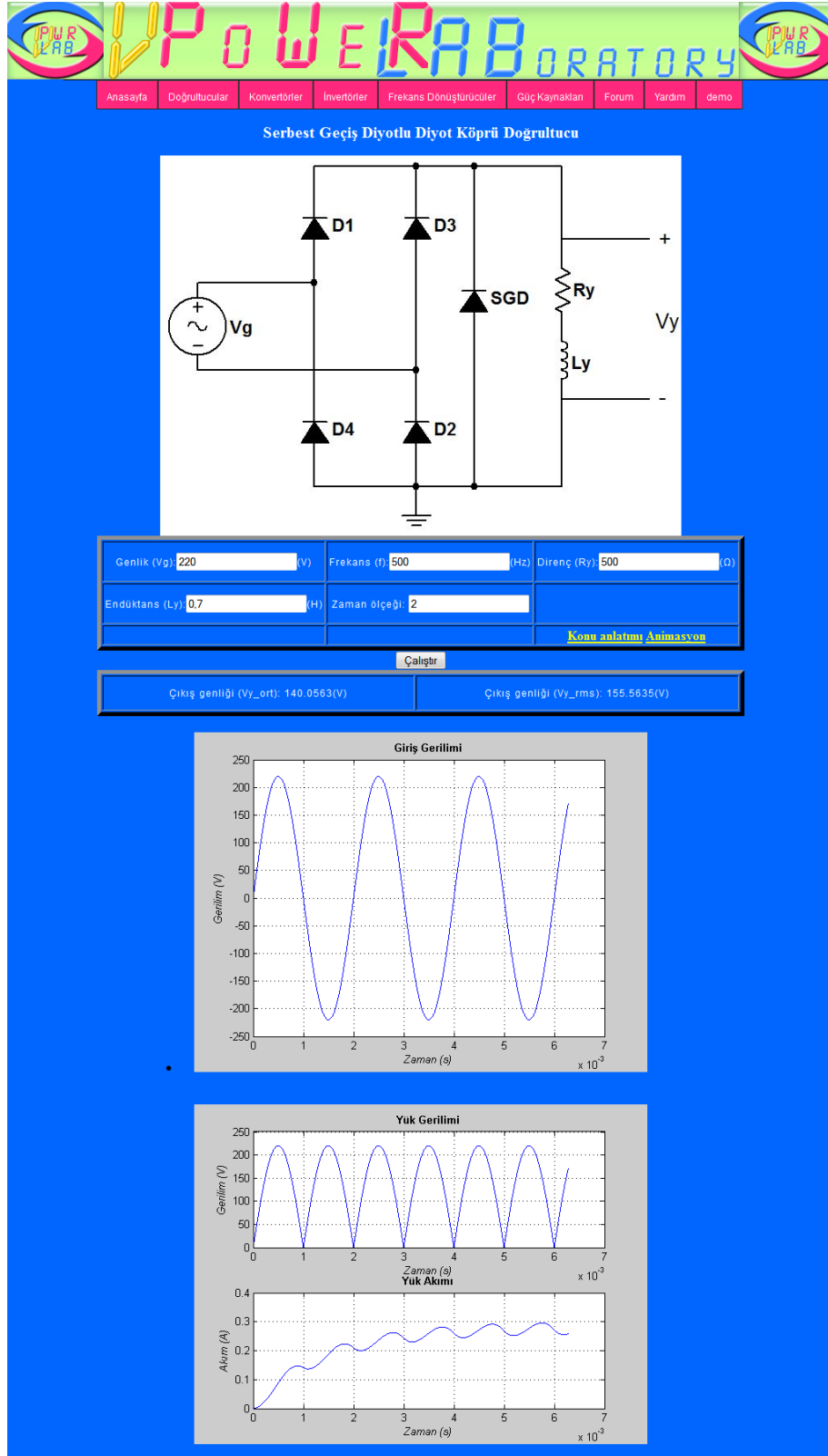
Çıkış genliği (Vy_ort): 66.8780(V)	Çıkış genliği (Vy_rms): 110.5955(V)
------------------------------------	-------------------------------------



Birinci resmi kaydet

İkinci resmi kaydet

Şekil 4.12. Endüktif yüklü tristör ile gerçekleştirilmiş KD devresi simülasyon sonuçları.



Şekil 4.13. Endüktif yüklü diyot ile gerçekleştirilmiş SGD'li KD devresi simülasyon sonuçları



Bu devre ile gerçekleştirilecek deneyde, yük akımının, tristör tetikleme açısının yüksek olduğu durumlarda zaman zaman sıfıra düştüğü gözlenmektedir. SGD kullanılmadığı durumlarda, yük geriliminin negatif olduğu incelenmiştir. Bu devrede SGD kullanılarak yük geriliminin negatif olması önlenecektir. Bu durum devredeki reaktif gücü yok edecek ve yük akımının ufak bir ölçüde artmasına neden olacaktır.

Simülasyon için, kaynak gerilimi 220V, frekansı 50Hz, tristör tetikleme açısı 90 derece, yük direnci 1000 $\Omega$  ve yük endüktansı 1H alınarak program çalıştırılsın. Bu değerler bölüm 4.1.10 ile aynı değerlerdir, bu sayede karşılaştırma imkânı sağlanacaktır. Bu örnek ile ilgili sonuçlar Şekil 4.14'de gösterilmektedir. Şekil 4.14'de görüldüğü üzere yük gerilimi hiçbir zaman negatif olmaz ve yük akımı Şekil 4.12'ye göre tepe değeri olarak ve sönümlenme süresi olarak bir miktar artış göstermektedir. Bu grafikler, reaktif gücün yok edildiğini ve aktif güç olarak yüke aktarıldığını göstermektedir.

#### **4.1.13. Üç fazlı kaynak ile omik yükte diyotlu doğrultucu**

Burada, bölüm 2.2.2.1'de matematiksel olarak incelenen devrenin simülasyonu yapılmıştır. Devrenin parametreleri, kaynak gerilimi, frekansı ve yük direncidir.

Şekil 4.15'de kaynak gerilimi 220V, frekansı 50Hz ve yük direnci 1000 $\Omega$  ile gerçekleştirilen deney sonuçları görülmektedir. Giriş frekansının 50Hz olduğu düşünüldüğünde ve önceki deneyler karşılaştırıldığında, yük üzerinden geçen akımın ve yük üzerindeki gerilimin, 0,02s'lik periyot içerisindeki durumu, devredeki yükün, bir fazlı tam dalga veya omik yüklü YDD'lerden daha fazla güç tükettiğini göstermektedir. Böylece üç fazlı sistemlerin yüksek güç gerektiren uygulamalarda kullanılmasının sebebi, simülasyon ile gözlenebilmiş olmaktadır.

#### **4.1.14. Üç fazlı kaynak ile endüktif yükte diyotlu doğrultucu**

Burada, bölüm 2.2.2.2'de matematiksel olarak incelenen devrenin simülasyonu yapılmıştır. Devrenin parametreleri, kaynak gerilimi, frekansı, yük direnci ve endüktansıdır.

Şekil 4.16'da kaynak gerilimi 220V, frekansı 50Hz, yük direnci 1000 $\Omega$  ve yük endüktansı 5H ile gerçekleştirilen deney sonuçları görülmektedir. Giriş frekansının 50Hz olduğu düşünüldüğünde ve önceki deneyler karşılaştırıldığında, yük üzerinden geçen akımın ve yük üzerindeki gerilimin, 0,02s'lik periyot içerisindeki durumu,

Devredeki yükün, bir fazlı tam dalga veya endüktif yüklü YDD'lerden daha fazla güç tükettiğini göstermektedir. Böylece üç fazlı sistemlerin yüksek güç gerektiren uygulamalarda kullanılmasının sebebi, simülasyon ile gözlenebilmiş olmaktadır.

#### **4.1.15. Üç fazlı kaynak ile omik yükte tristörlü doğrultucu**

Burada, bölüm 2.2.2.3'de matematiksel olarak incelenen devrenin simülasyonu yapılmıştır.

Devrenin parametreleri, kaynak gerilimi, frekansı, tristörlerin tetikleme açıları ve yük direncidir.

Şekil 4.17'de kaynak gerilimi 220V, frekansı 50Hz, T1 tristörü tetikleme açısı 90 derece, T2 tristörü tetikleme açısı 60 derece, T3 tristörü tetikleme açısı 30 derece ve yük direnci  $1000\Omega$  ile gerçekleştirilen deney sonuçları görülmektedir.

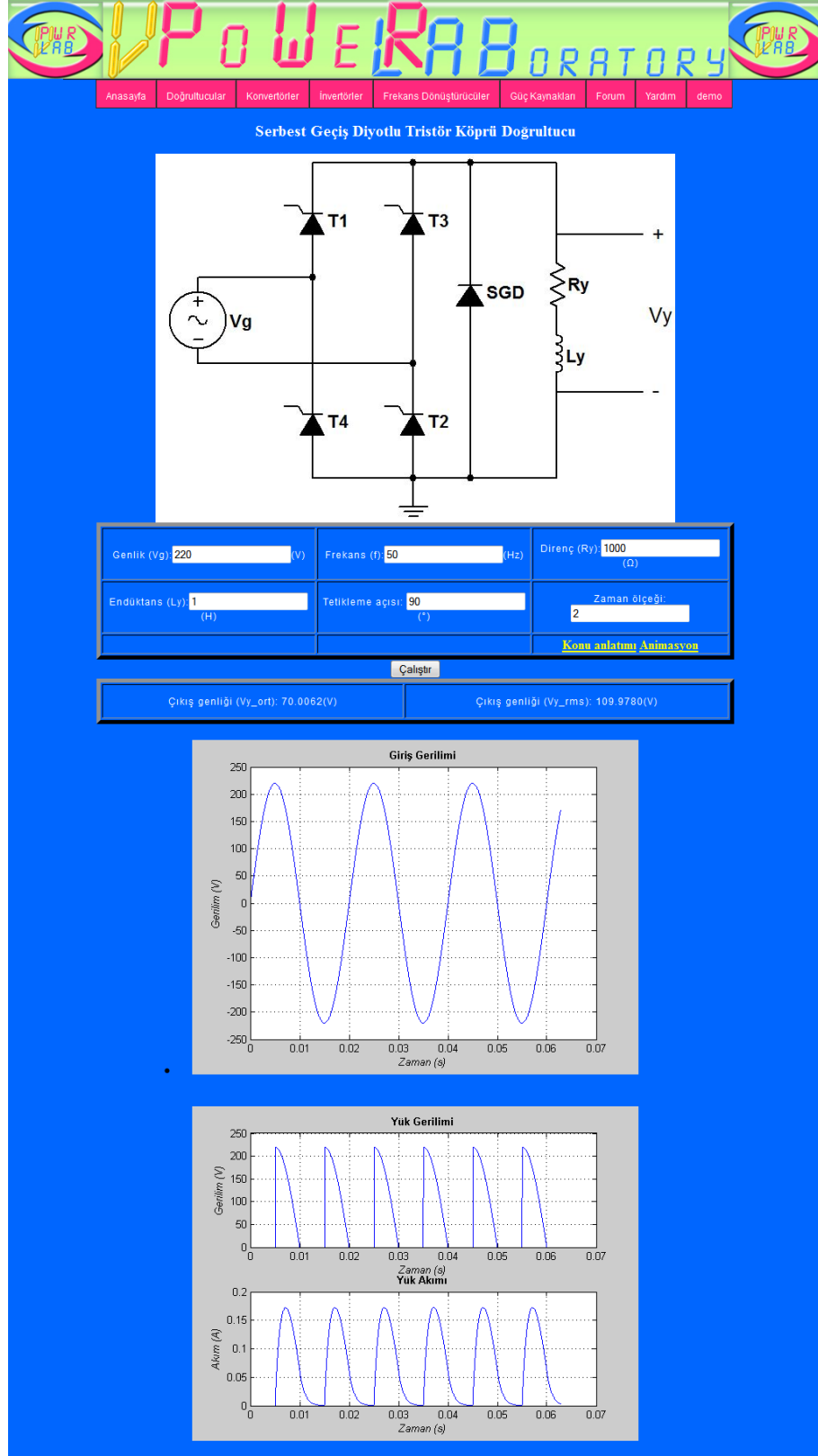
#### **4.1.16. Üç fazlı kaynak ile omik yükte tristörlü doğrultucu**

Burada, bölüm 2.2.2.4'de matematiksel olarak incelenen devrenin simülasyonu yapılmıştır. Devrenin parametreleri, kaynak gerilimi, frekansı, tristörlerin tetikleme açıları yük direncidir ve endüktansdır.

Şekil 4.18'de kaynak gerilimi 220V, frekansı 50Hz, T1 tristörü tetikleme açısı 90 derece, T2 tristörü tetikleme açısı 0 derece, T3 tristörü tetikleme açısı 30 derece, yük direnci  $1000\Omega$  ve yük endüktansı 5H ile gerçekleştirilen deney sonuçları görülmektedir.

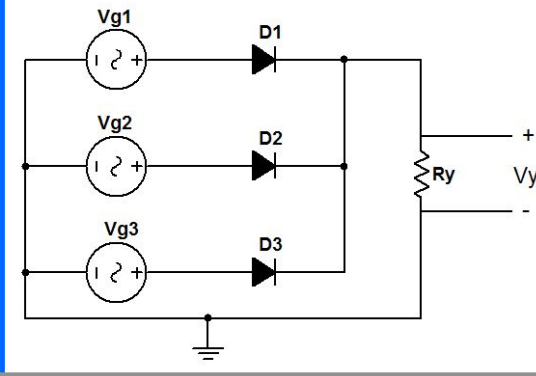
### **4.2. Konvertör Simülasyonları**

Tezin bu aşamasında, bölüm 2.3'de kuramsal temelleri anlatılan konvertör devrelerinin simülasyonları oluşturulmuştur. Çalışma mantığı, DA-DA kıyıcı benzetiminde açıklanan konvertör simülasyonları; BUCK, BOOST ve BUCK-BOOST konvertör topolojilerini de sanal ortamda gerçekleyebilmektedir. Öğrenci, anahtarlama hızının, filtreleme kondansatörlerinin ve yükseltme veya düşürme işlemleri içerisinde görev yapan pasif elemanların, bu süreçte nasıl davrandığını anlayabilecek ve var olan tasarım tekniklerini özümseyecektir. Bu devre sistemlerinin, deneyler yoluyla sınanması bu bölümün konusudur.



Şekil 4.14. Endüktif yüklü tristör ile gerçekleştirilmiş SGD'li KD devresi simülasyon sonuçları

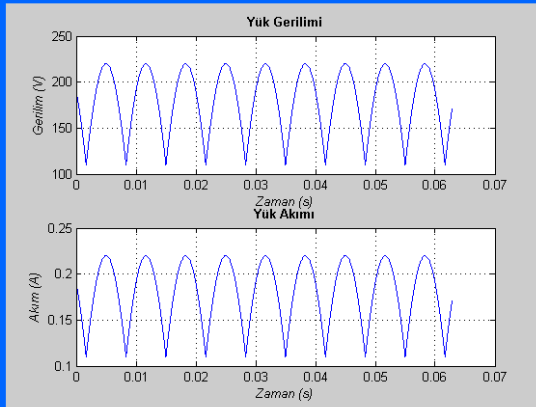
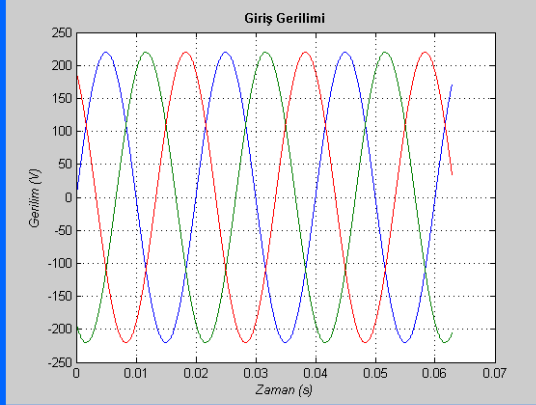
Omik Yük Üç Faz Diyot Doğrultucu



Genlik (Vg): 220 (V)	Frekans (f): 50 (Hz)	Direnç (Ry): 1000 (Ω)	Zaman ölçeği: 2
<a href="#">Konu anlatımı Animasyon</a>			

Çalıştır

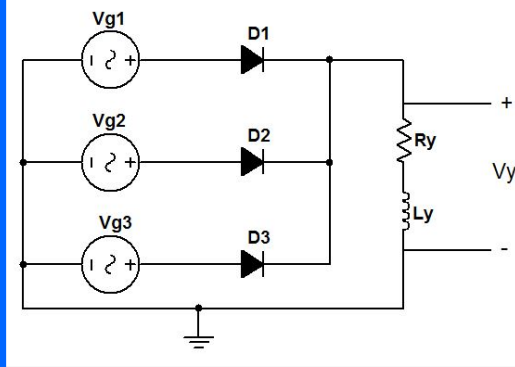
Çıkış genliği (Vy_ort): 181.9385(V)	Çıkış genliği (Vy_rms): 184.9503(V)
-------------------------------------	-------------------------------------



Birinci resmi kaydet İkinci resmi kaydet

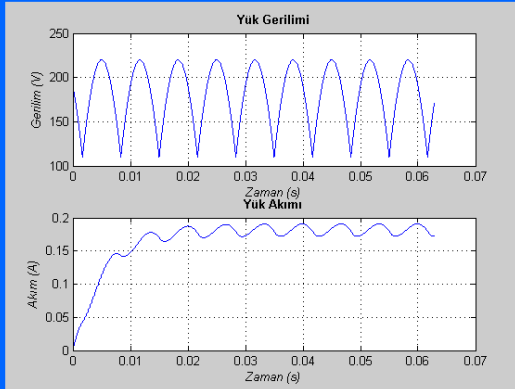
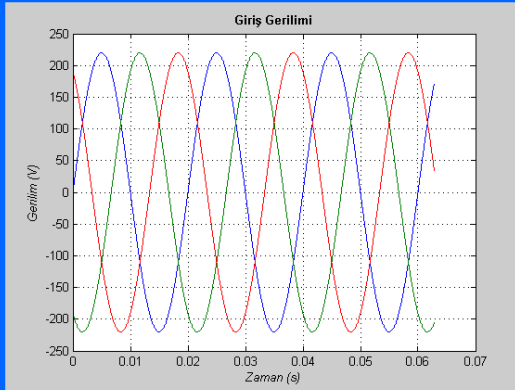
Şekil 4.15. Üç fazlı kaynak ile omik yükte diyotlu doğrultucu devresi simülasyon sonuçları

Endüktif Yük Üç Faz Diyot Doğrultucu

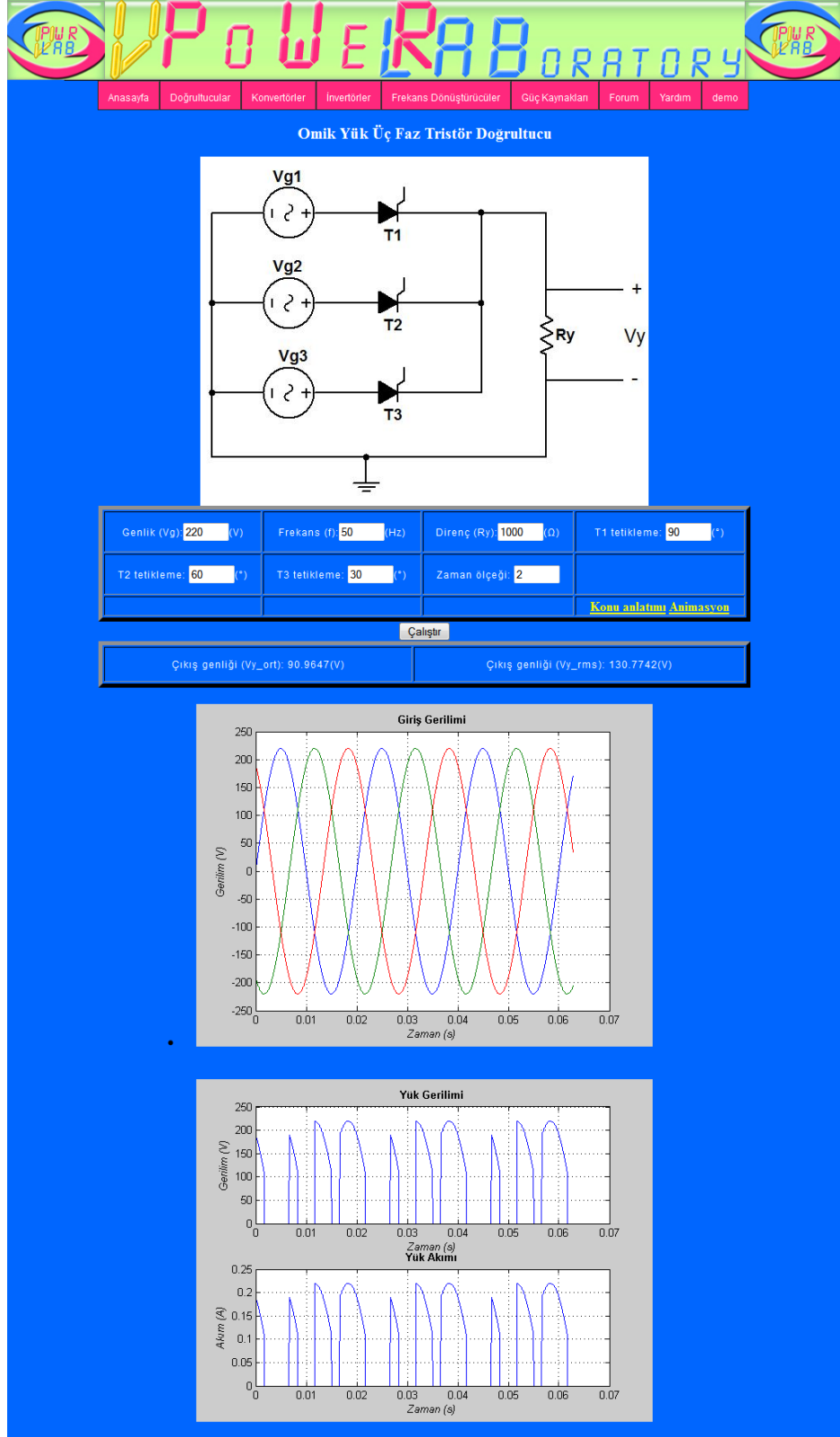


Genlik (Vg): <input type="text" value="220"/> (V)	Frekans (f): <input type="text" value="50"/> (Hz)	Direnç (Ry): <input type="text" value="1000"/> (Ω)
Endüktans (Ly): <input type="text" value="5"/> (H)	Zaman ölçeği: <input type="text" value="2"/>	<a href="#">Konu anlatımı Animasyon</a>

Çıkış genliği (Vy_ort): 181.9385(V)	Çıkış genliği (Vy_rms): 184.9503(V)
-------------------------------------	-------------------------------------

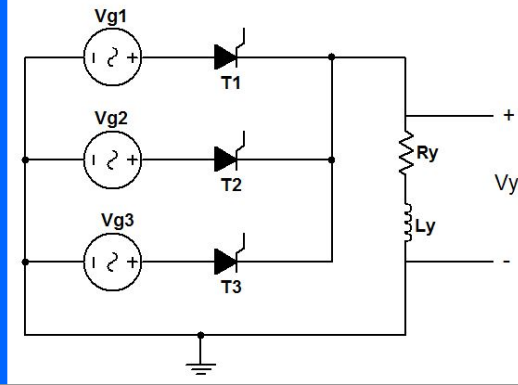


Şekil 4.16. Üç fazlı kaynak ile endüktif yükte diyotlu doğrultucu devresi simülasyon sonuçları



Şekil 4.17. Üç fazlı kaynak ile endüktif yükte tristörlü doğrultucu devresi simülasyon sonuçları

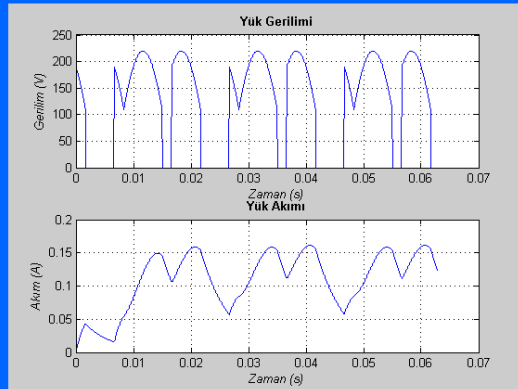
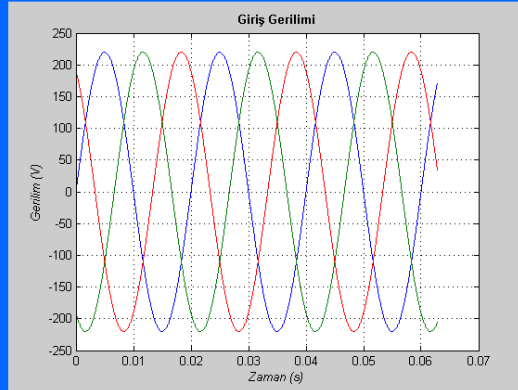
Endüktif Yük Üç Faz Tristör Doğrultucu



Genlik (Vg) <input type="text" value="220"/> (V)	Frekans (f) <input type="text" value="50"/> (Hz)	Direnç (Ry) <input type="text" value="1000"/> (Ω)	Endüktans (Ly) <input type="text" value="5"/> (H)
T1 tetikleme <input type="text" value="90"/> (°)	T2 tetikleme <input type="text" value="0"/> (°)	T3 tetikleme <input type="text" value="30"/> (°)	Zaman ölçeği <input type="text" value="2"/>
<a href="#">Konu anlatımı Anımsayın</a>			

Çalıştır

Çıkış genliği (Vy_ort): 121.2933(V)	Çıkış genliği (Vy_rms): 151.0100(V)
-------------------------------------	-------------------------------------



[Birinci resmi kaydet](#) [ikinci resmi kaydet](#)

Şekil 4.18. Üç fazlı kaynak ile endüktif yükte tristörlü doğrultucu devresi giriş gerilimi

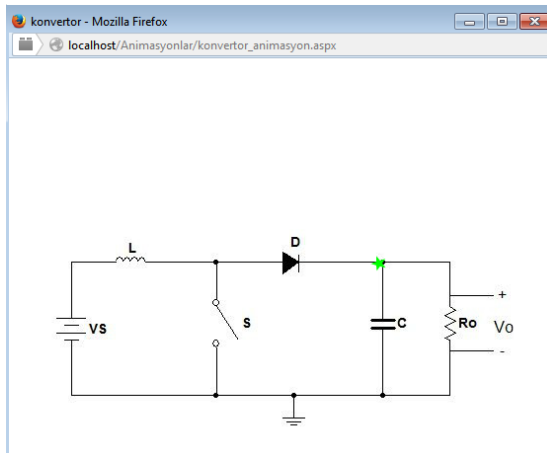
#### 4.2.1. DA-DA kıyıcı devresi simülasyonu

Burada, bölüm 2.3.1'de matematiksel olarak incelenen devrenin simülasyonu yapılmıştır. Tezin bu bölümü için, omik yükte bir kıyıcı devresi tasarlanmıştır. Devrenin giriş parametreleri, doluluk oranı  $D$ , anahtarlama periyodu  $T$  ve giriş gerilimidir. Doluluk oranı 0,4; anahtarlama periyodu 0,001 ve giriş gerilimi 24V alınarak elde edilen ortalama gerilim aşağıdaki Şekil 4.20'da gösterilmiştir. Konvertör devrelerine ait, genel animasyon ve konu anlatımı görüntüleri, sırasıyla Şekil 4.19 ve Şekil 4.21'de verilmiştir.

#### 4.2.2. Düşürücü (BUCK) konvertör simülasyonu

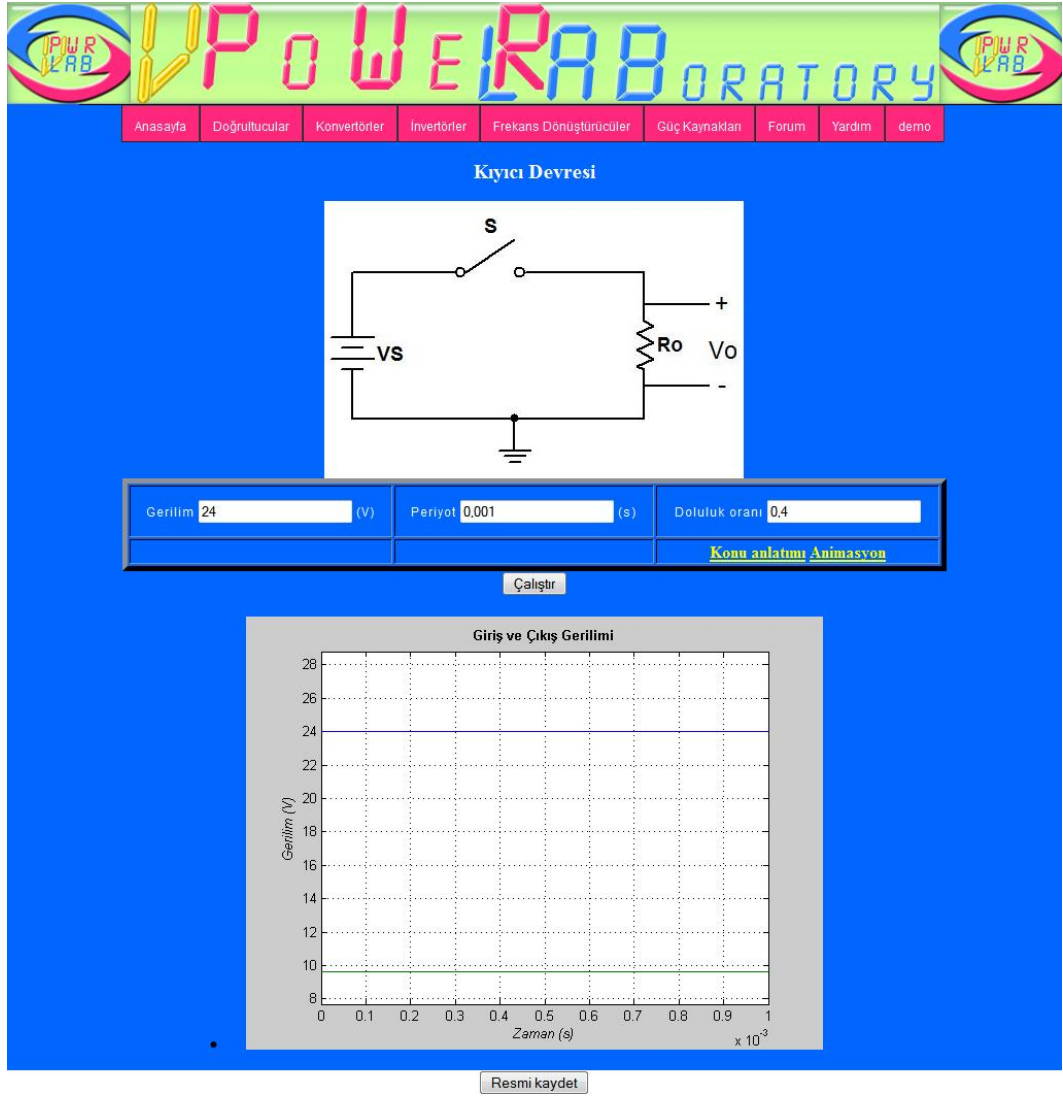
Burada, bölüm 2.3.2'de matematiksel olarak incelenen devrenin simülasyonu yapılmıştır. CCM ile çalışan bir BUCK konvertör devresinin sanal laboratuvar uygulaması gerçekleştirilmesinde anahtarlama frekansı  $f=100\text{kHz}$ , doluluk oranı 0,5, giriş gerilimi 24V, yük direnci  $1000\Omega$ , endüktans  $25\mu\text{H}$  ve filtre kondansatörü  $200\mu\text{F}$  alınarak gerçekleştirilen BUCK konvertör devresinin simülasyon sayfası Şekil 4.22'de gösterilmiştir.

Şekil 4.22'den görüldüğü üzere 24V'luk giriş gerilimi, yaklaşık 18V değerine düşürülmüştür. Simülasyonda kullanılan değerler, önceden hesaplanan sınır değerlerine sadık kalınarak gerçekleştirilmiştir. Endüktans değeri  $25\mu\text{H}$  seçilirken, kapasitör değeri sınır değeri olarak hesaplanan  $25\mu\text{F}$ 'tan büyük seçilmiştir. Devre simülasyonunun çıkış grafiğinden, tepeden tepeye dalgalanma değerinin, giriş gerilim değerinin %1'inin altında olduğu anlaşılmaktadır.

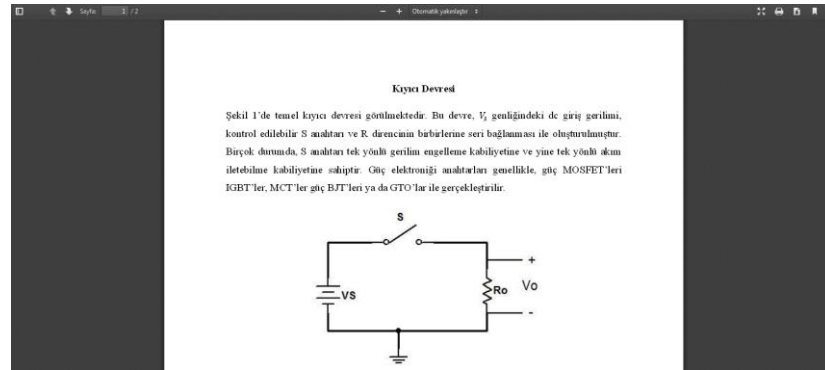


Şekil 4.19. Konvertör devrelerine ait genel animasyon görüntüsü





Şekil 4.20. Omik yükte kıyıcı devresi, giriş gerilimi (mavi renk) ve elde edilen ortalama çıkış gerilimi (yeşil renk)



Şekil 4.21. Konvertör devreleri konu anlatım ekranına ait ekran görüntüsü

#### 4.2.3. Yükseltici (BOOST) konvertör simülasyonu

Burada, bölüm 2.3.3'de matematiksel olarak incelenen devrenin simülasyonu yapılmıştır. Bölüm 2.3.3'den türetilen eşitlikler ve giriş gerilimi 12V, doluluk oranı 0,5, direnç  $10\Omega$ , anahtarlama frekansı 100kHz, endüktans  $7\mu\text{H}$  ve filtre kondansatörü  $100\mu\text{F}$  alınarak yük üzerindeki gerilim grafiği Şekil 4.23'de gösterilmiştir.

Devrenin topolojisi gereği çıkış gerilimi negatif olarak elde edilmiştir. Arttırıcı konvertör bu değerler göz önüne alındığında giriş gerilimini iki kat yükseltmektedir. Doluluk oranı 0,5 yerine daha küçük bir değer alınsa idi, çıkış geriliminin daha da yükseleceği açıktır. Çünkü S anahtarının iletimde olduğu süre azalacak, yükseltici endüktans devreyi daha uzun süre besleyebilecektir. Bu durumda yükseltici endüktansın biraz daha geç olarak dolacağı ve dolayısıyla sistemin kalıcı duruma gelme süresinin artacağı söylenebilir. Doluluk oranının azalması, bağlı gerilim dalgalanmasını düşürecektir. Başka bir deyişle, elde edilen dalgalanma gerilimi daha büyük olsa da, bu dalgalanma geriliminin, çıkış gerilimine oranı daha küçük olacaktır. Bunun sebebi, minimum kondansatör değerinin bulunduğu formülle (denklem (2.85)) açıklanır. Şekil 4.24'de aynı değerlerde sadece  $D=0,3$  alınması halinde yük gerilim grafiği gösterilmektedir.

#### 4.2.4. Yükseltici düşürücü (BUCK-BOOST) konvertör simülasyonu

Burada, bölüm 2.3.4'de matematiksel olarak incelenen devrenin simülasyonu yapılmıştır. BUCK BOOST konvertör devresini, simülasyonda çalıştırıldığında giriş gerilimi 12V, yük direnci  $1\Omega$ , endüktans değeri  $350\mu\text{H}$ , kapasitör değeri  $200\mu\text{F}$ , anahtarlama frekansı  $f=19\text{kHz}$  olarak seçilmiştir. İlk olarak 0,5 doluluk oranı için, çıkış geriliminin yapısını Şekil 4.25'de gösterilmiştir.

Şekil 4.25'de doluluk oranı 0,5 iken elde edilen çıkış gerilimi, BUCK BOOST konvertörün denklem (2.87) ile ifade edilen, DA gerilim transfer fonksiyonundan da görüleceği gibi, giriş gerilimine eşittir.  $D=0,8$  iken elde edilen çıkış gerilimi Şekil 4.26'da gösterilmektedir. Çıkış gerilimi buck boost konvertör, denklem (2.87)'nin öngördüğü değerde, 48V'da sabit kalmaktadır.

Son olarak BUCK BOOST konvertörün, giriş gerilimini düşürücü özelliğini inceleyelim. Bunun için doluluk oranını  $D=0,2$  olarak alalım. Şekil 4.28'de, giriş

geriliminin 0,25 katının çıkış gerilimi olarak elde edildiği görülmektedir ve bunun BUCK-BOOST konvertörün DA gerilim transfer fonksiyonunu ifade eden denklem (2.87) ile de doğrulanabileceği açıktır.

### **4.3. İnvörtör Simülasyonları**

Bu bölümde, bir fazlı tam dalga invörtörlerin simülasyonları sunulmuştur. Simülasyonlar, bölüm 2.4'te türetilen eşitlikler göz önüne alınarak gerçekleştirilmiştir. Simülasyon omik yükte çalışmayı ve endüktif yükte çalışmayı desteklemektedir. İlk olarak kare dalga invörtörler üzerinde durulacaktır. Boşluklu veya boşluksuz olma durumlarında, çıkışta elde edilmek istenen sinyale ne kadar yaklaşıldığı tartışılacaktır. Buradan hareketle, DGM invörtörlerin yapısı benzetim ortamında incelenecek ve istenen sinüzoidal bileşenin temel bileşenine hangisinin daha çok yaklaştığı gözlemlenecektir.

#### **4.3.1. Omik yükte kare dalga invörtör simülasyonu**

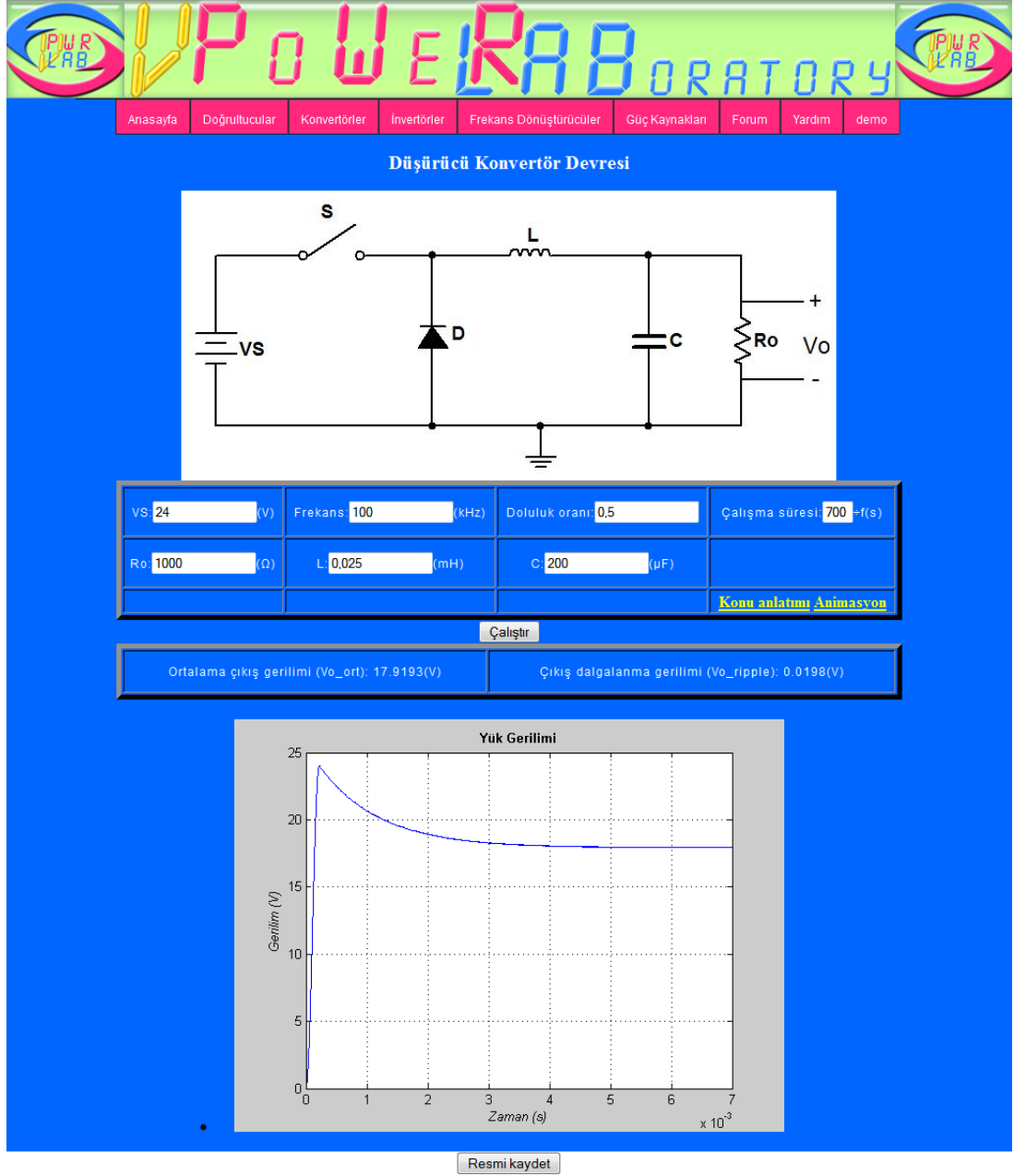
Güç elektroniği simülasyonunun bu bölümü için, omik yükte kare dalga invörtör devresi gerçekleştirilmiştir.

Periyot 20ms, giriş gerilimi 24V ve direnç değeri R'nin 1k $\Omega$  olarak alındığı durumda yük üzerinde görülen gerilimin ve yük üzerinde geçen akımın grafikleri Şekil 4.30'de gösterilmektedir.

İnvörtör devrelerine ait genel animasyon ve konu anlatımı görüntüleri, sırasıyla Şekil 4.27 ve Şekil 4.29'da verilmiştir.

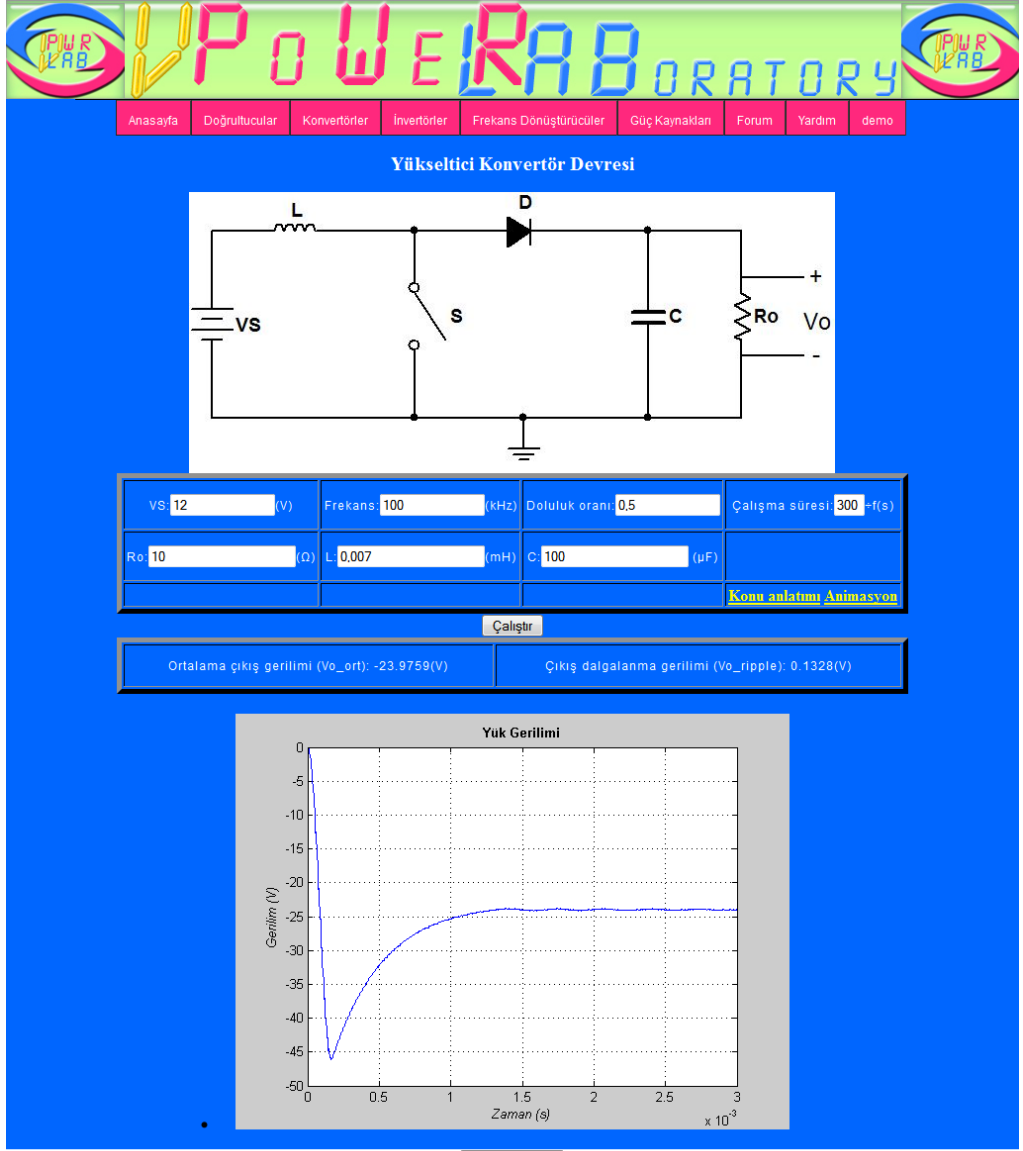
#### **4.3.2. Omik yükte boşluklu kare dalga invörtör simülasyonu**

Simülatörün bu bölümü için boşluklu kare dalga invörtör devresi, omik yükte gerçekleştirilmiştir. Boşluklardan ötürü bir boşluk zamanı (başka bir ifadeyle ölü zaman) söz konusudur. Omik yüklü durumda, boşluk zamanı süresince çıkışta bir gerilim gözlenmeyecektir.



Şekil 4.22. Buck konvertör devresi simülasyonu

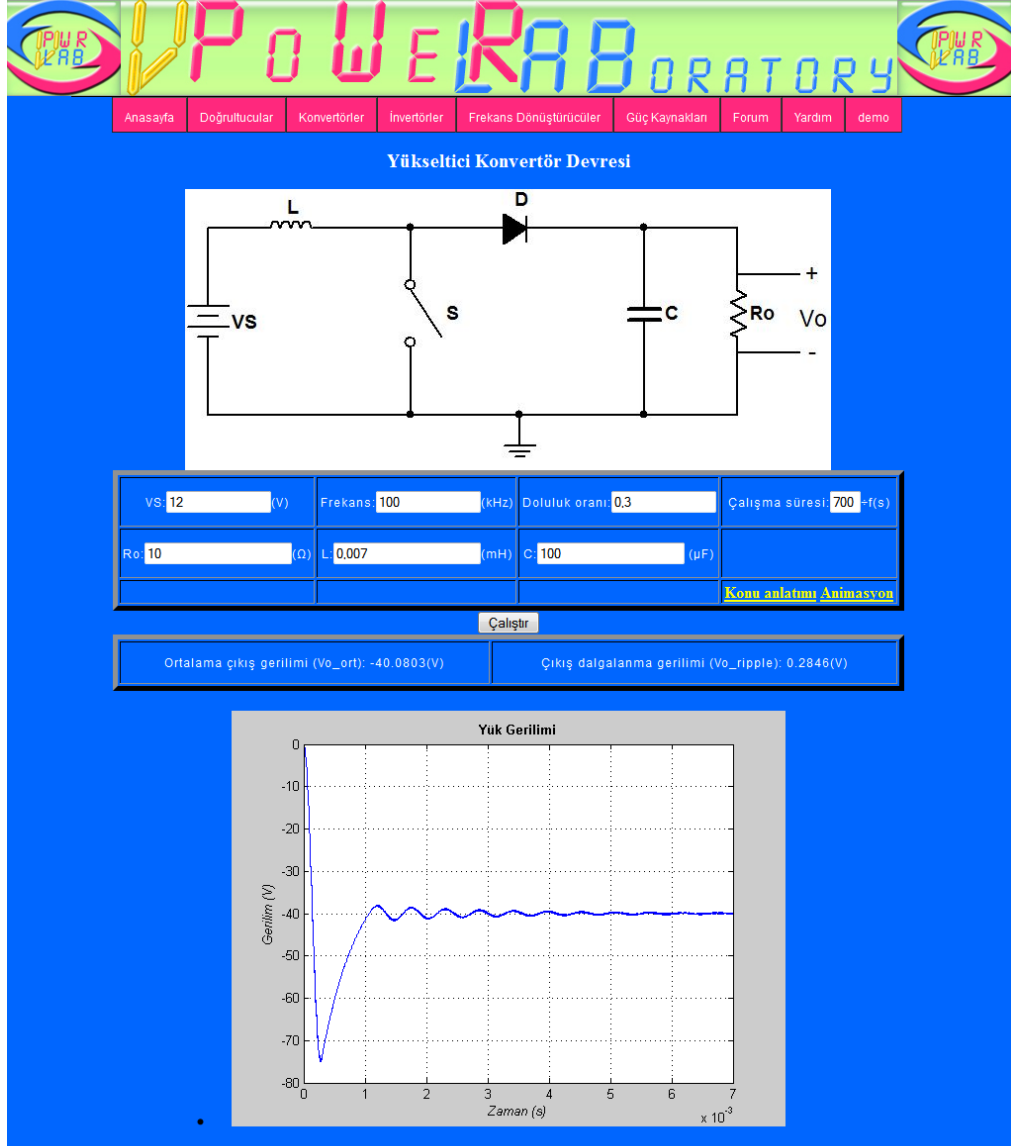
Boşluklu kare dalga devresi simülasyon programında gerçekleştirilsin. Bunun için periyot 20ms, yük direnci 1000Ω, kaynak gerilimi 12V ve boşluk zamanı 8ms olarak seçilsin. Yük üzerindeki gerilim ve yük üzerinden geçen akımın grafikleri sırasıyla Şekil 4.31’de gösterilmiştir. 8ms’lik Ölü zaman süresinin 2ms’lik dört eş parçaya ayrılarak anahtarların iletim ve kesim durumlarına göre simülasyon tarafından otomatik olarak yerleştirildiği Şekil 4.31’den görülmektedir.



Şekil 4.23. Simülasyonun çalıştırılması sonucunda elde edilen yük üzerindeki gerilim grafiği

#### 4.3.3. Endüktif yükte kare dalga invertör simülasyonu

Simülasyonun bu bölümü için, kare dalga invertör devresi, endüktif yükte gerçekleştirilmiştir. Periyot 20ms, giriş gerilimi 12V direnç değeri 1Ω ve endüktans değeri 1H olarak alındığı durumda yük üzerinde görülen gerilimin ve yük üzerinde geçen akımın grafikleri sırasıyla Şekil 4.32’de gösterilmektedir.

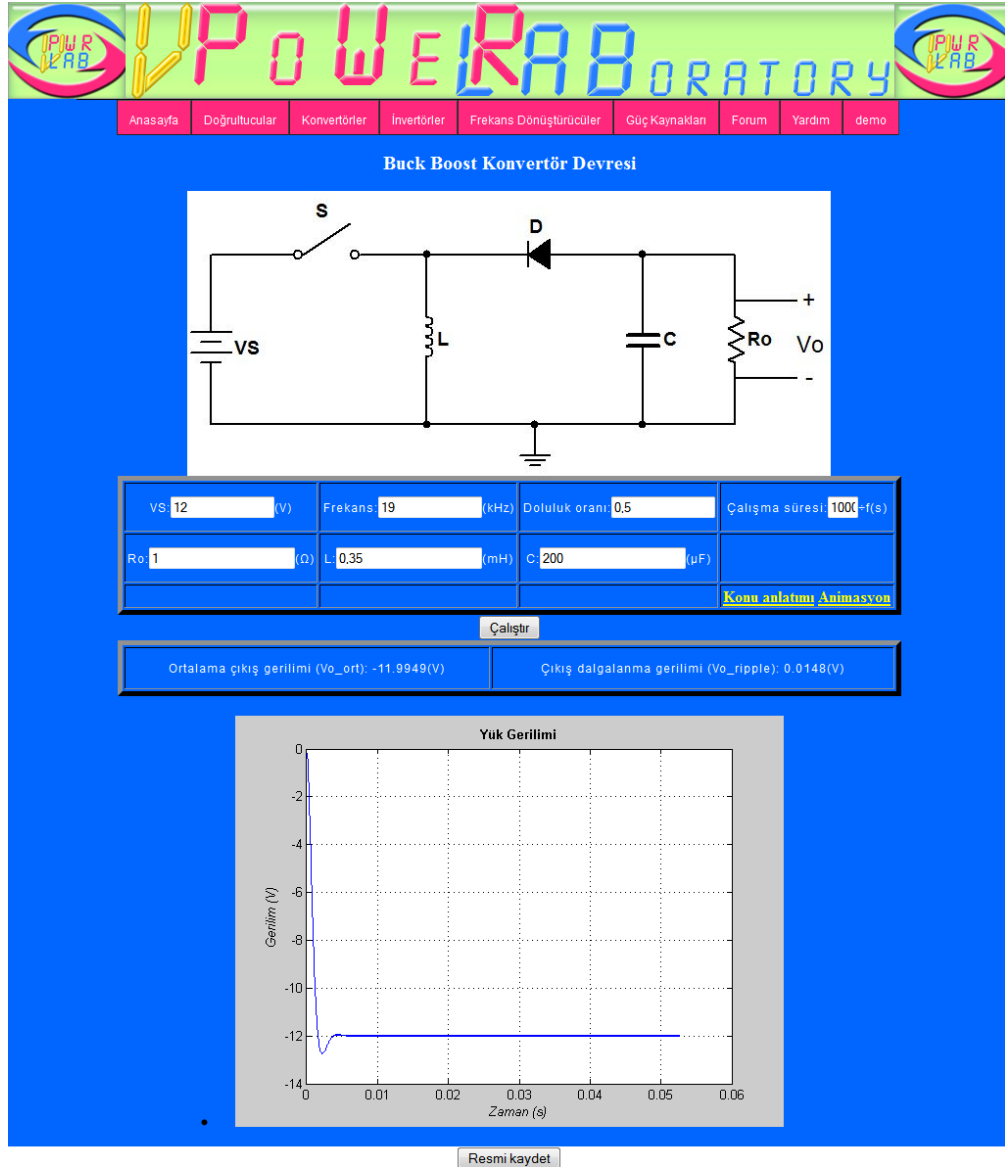


Şekil 4.24.  $D=0.3$  alınması durumunda yük üzerindeki gerilim

#### 4.3.4. Endüktif yükte boşluklu kare dalga invertör simülasyonu

Simülâtörün bu bölümü için boşluklu kare dalga invertör devresi, endüktif yük durumu için gerçekleştirilmiştir. Omik yüklü durumun aksine, ölü zaman süresince, yükün endüktif olmasından ötürü yük üzerinde akımın bulunduğu gözlemlenir.

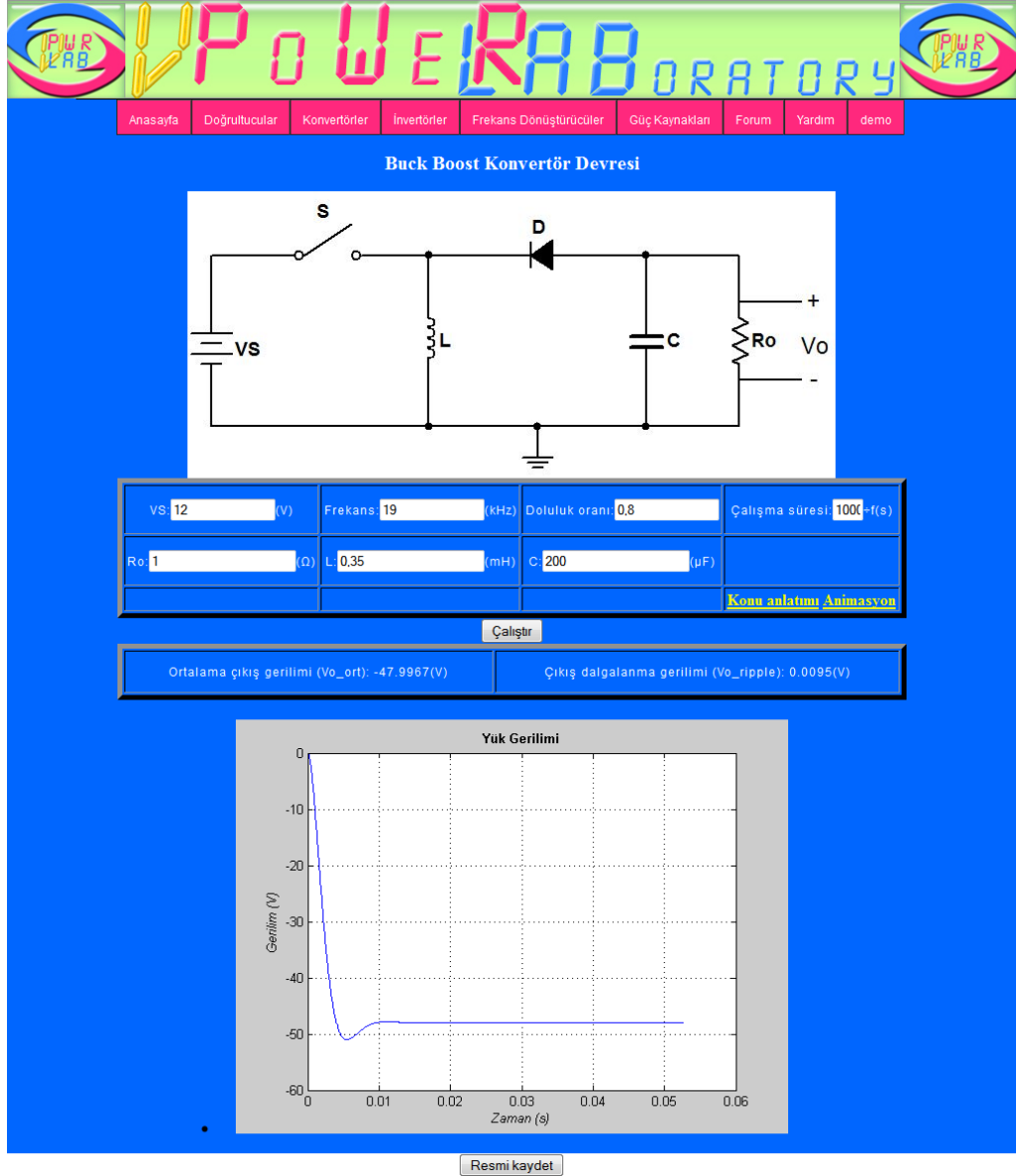
Boşluklu kare dalga devresi simülasyon programında endüktif yük ile gerçekleştirilsin. Bunun için periyot 20ms, yük direnci  $R = 1\Omega$ , endüktans değeri  $L = 1H$ , kaynak gerilimi  $V_S = 12V$  ve ölü zaman süresi 8ms olarak seçilsin. Yük üzerindeki gerilim ve yük üzerinden geçen akımın grafikleri sırasıyla Şekil 4.33’de gösterilmiştir.



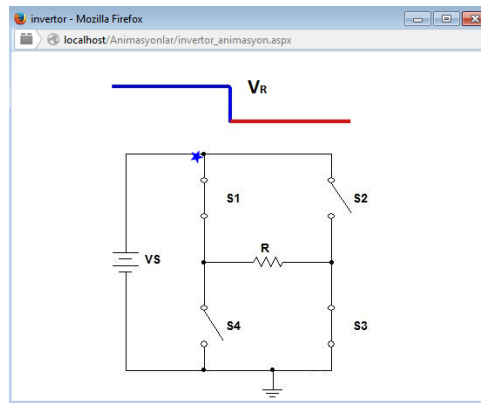
Şekil 4.25. Doluluk oranı 0,5 değerinde iken buck boost konvertör simülasyonu ve çıkış gerilimi

#### 4.3.5. Omik yük dgm invertör simülasyonu

Simulatörün bu bölümü için DGM invertör devresi, omik yükte gerçekleştirilmiştir. Çıkış genliği 220V, çıkış frekansı 50Hz, yük direnci 1000 $\Omega$ , taşıyıcı genliği 220V, taşıyıcı frekansı 500Hz parametreleri için simülasyondan elde edilen sonuçlar Şekil 4.34'de gösterilmiştir. Endüktans değerinin 0H olarak girildiğine ve bu şekilde devrenin omik yüklü davranışının elde edildiğine dikkat edilmelidir.

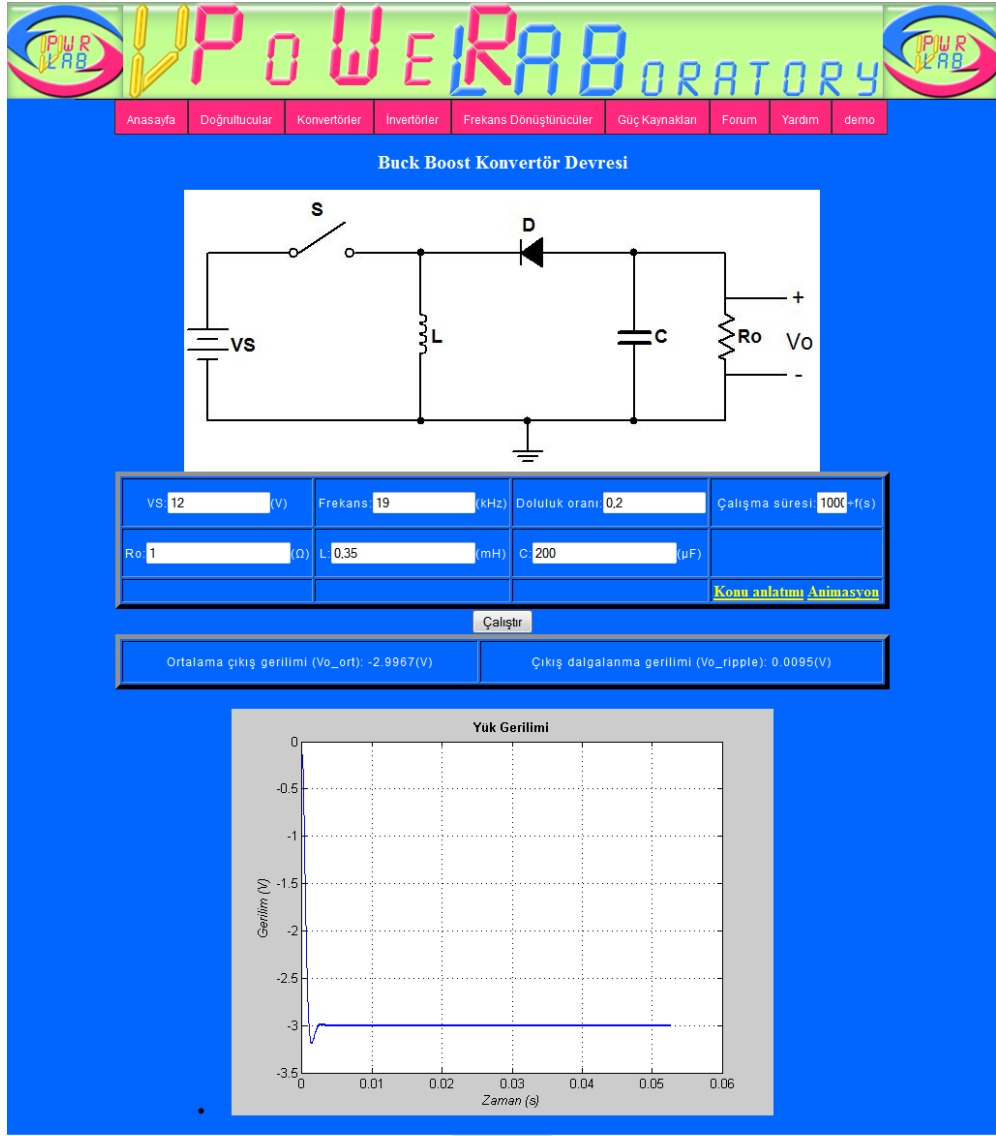


Şekil 4.26. Doluluk oranı 0,8 değerinde iken buck boost konvertör çıkış gerilimi

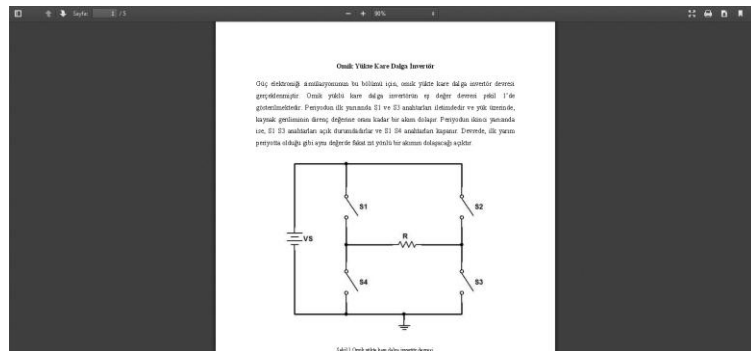


Şekil 4.27. İnvörtör devrelerine ait genel animasyon görüntüsü



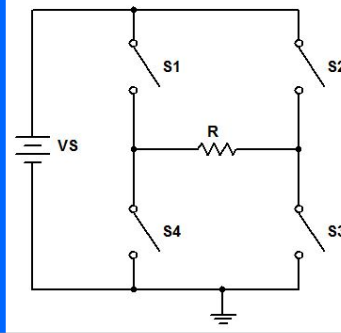


Şekil 4.28. Doluluk oranı 0,2 değerinde iken buck boost konvertör çıkış gerilimi

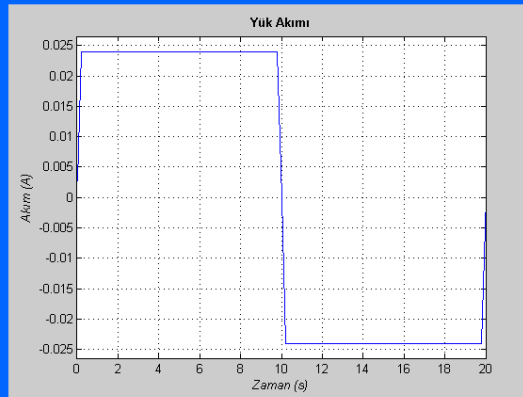
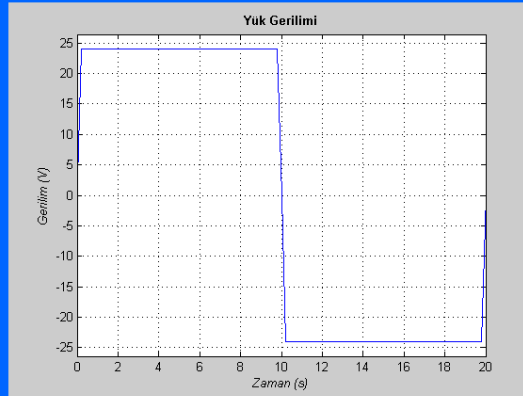


Şekil 4.29. İnvörtör devreleri konu anlatım ekranına ait ekran görüntüsü

Omik Yükte Kare Dalga İnterör



Genlik (VS): 24 (V)	Direnç (R): 1000 ( $\Omega$ )	Periyot: 20 (ms)
Ölü zaman (Boşluk zamanı): 0 (ms)		
<a href="#">Konu anlatımı Animasyon</a>		
<input type="button" value="Çalıştır"/>		
Çıkış genliği (Vy_ort): 0(V)		Çıkış genliği (Vy_rms): 23.6409(V)



Şekil 4.30. Kare dalga invertörde bir periyot içerisinde omik yük üzerindeki gerilim ve akım.

#### **4.3.6. Endüktif yük DGM invertör simülasyonu**

Simülâtörün bu bölümü için DGM invertör devresi, endüktif yükte gerçekleştirilmiştir. Hazırlanan DGM invertör simülasyonu; Vçıkış 220V, Vtaşıyıcı 240V, fçıkış 50 Hz, ftaşıyıcı 500Hz, R 2k $\Omega$ , L 1mH değerleri için çalıştırıldığında, DGM sinyali ve yük üzerindeki akım Şekil 4.35’de gösterilmiştir.

Şekil 4.35’deki yük akımı sinyalinin alçak geçiren bir filtreden geçirilerek üzerindeki yüksek dereceli harmoniklerin giderilebileceğine dikkat edilmelidir. Fakat yüksek dereceli harmonik sayısının fazla olmasının verimi düşüreceği açıktır.

DGM için gerçekleştirilen simülasyonun sadece taşıyıcı frekansının 500Hz’ten 5kHz’e çıkarılması durumunda çıkış akımının nasıl değişeceği. Şekil 4.38’da incelenmiştir, DGM sinyalini ve yük akımı gösterilmektedir.

Şekil 4.38’dan, taşıyıcı frekansının artması sayesinde, çıkış akımının sinüzoidal biçime daha çok benzediği görülmektedir. Yüksek dereceli harmonikler, akım üzerinde mevcut olmakla birlikte, genlikleri düşüktür. Alçak geçiren bir filtre ile süzülebilirler ve invertör devresi, yüksek dereceli harmoniklerin düşük genlikte olmasından dolayı, görece yüksek verimlilikle çalışacaktır.

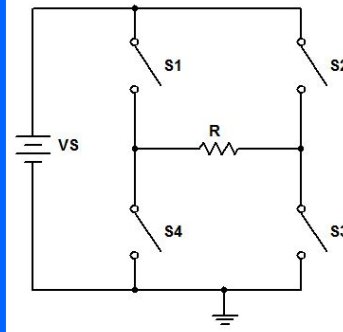
#### **4.4. Frekans Dönüştürücü Simülasyonları**

Tezin bu bölümünde, bölüm 2.5’te matematiksel temelleri incelenen frekans dönüştürücü devrelerinin simülasyonları gerçekleştirilmiştir. Gerçekleştirilen simülasyonlar, frekans dönüştürücülerin faz sayılarına göre ve besledikleri yüke göre gruplandırılmıştır.

##### **4.4.1. Omik yükte bir faz bir faz frekans dönüştürücü simülasyonu**

Bu bölümde, omik yüklü bir faz bir faz frekans dönüştürücü simülasyonu gerçekleştirilmiştir. Giriş gerilimi 220V, giriş frekansı 200Hz, çıkış frekansı 50Hz, yük direnci 1k $\Omega$  ve tetikleme açısı 0 derece için, sonuçlar Şekil 4.39’de gösterilmiştir.

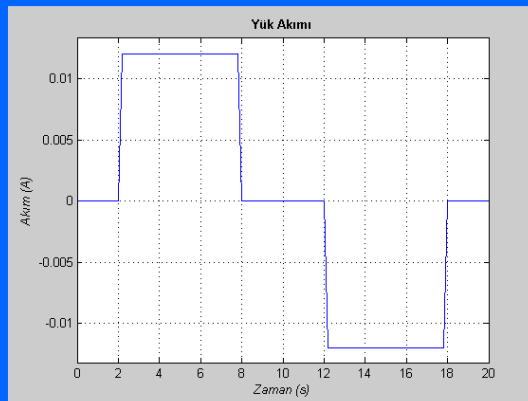
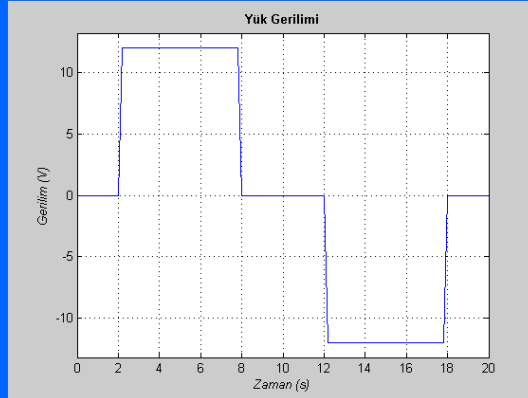
Omik Yükte Kare Dalga İnterör



Genlik (VS): 12 (V)	Direnç (R): 1000 ( $\Omega$ )	Periyot: 20 (ms)
Ölü zaman (Boşluk zamanı): 8 (ms)		
<a href="#">Konu anlatımı Animasyon</a>		

Çalıştır

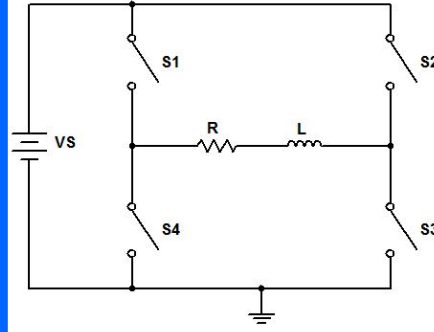
Çıkış genliği (Vy_ort): 0(V)	Çıkış genliği (Vy_rms): 9.0936(V)
------------------------------	-----------------------------------



Birinci resmi kaydet | İkinci resmi kaydet

Şekil 4.31. Boşluklu kare dalga invertör devresinde bir periyot içerisinde omik yük üzerindeki gerilim ve akım

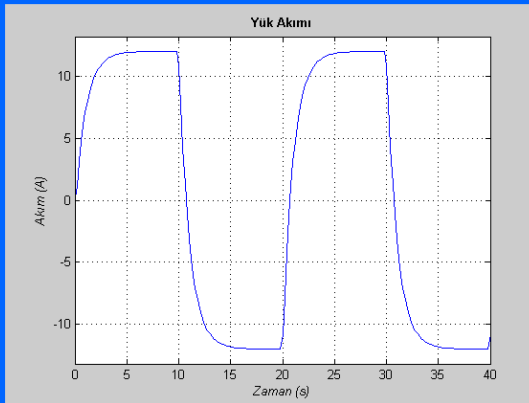
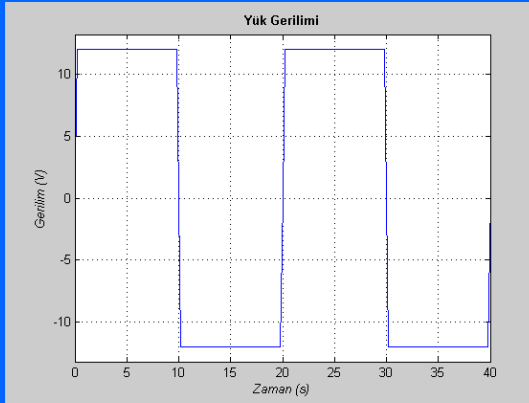
Endüktif Yükte Kare Dalga İntörör



Genlik (VS): <input type="text" value="12"/> (V)	Direnç (R): <input type="text" value="1"/> ( $\Omega$ )	Endüktans (L): <input type="text" value="1000"/> (mH)
Periyot: <input type="text" value="20"/> (ms)	Ölü zaman (Boşluk zamanı): <input type="text" value="0"/> (ms)	<a href="#">Konu anlatımı Animasyon</a>

Çalıştır

Çıkış genliği ( $V_{y\_ort}$ ): 0.2444(V)	Çıkış genliği ( $V_{y\_rms}$ ): 10.7713(V)
---	--

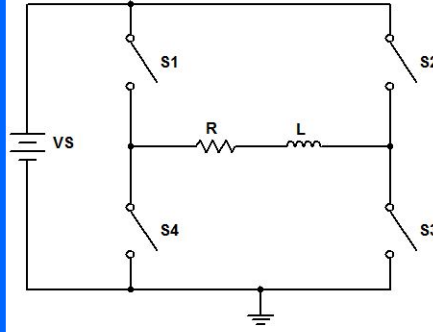


Birinci resmi kaydet

İkinci resmi kaydet

Şekil 4.32. Kare dalga invertörde bir periyot içerisinde endüktif yük üzerindeki gerilim ve akım.

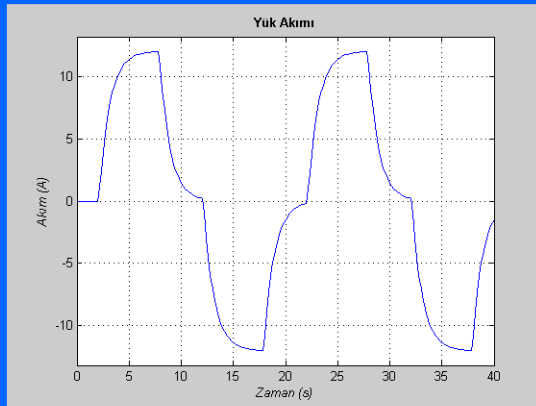
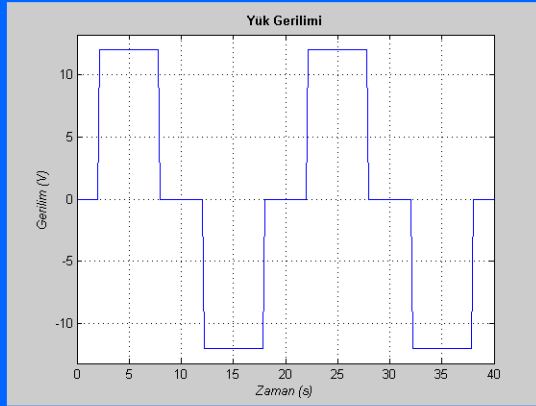
Endüktif Yükte Kare Dalga İnterör



Genlik (VS): 12 (V)	Direnç (R): 1 (Ω)	Endüktans (L): 1000 (mH)
Periyot: 20 (ms)	Ölü zaman (Boşluk zamanı): 8 (ms)	<a href="#">Konu anlatımı Animasyon</a>

Çalıştır

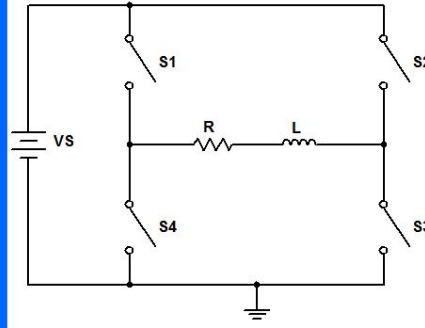
Çıkış genliği (Vy_ort): 0.0330(V)	Çıkış genliği (Vy_rms): 8.2819(V)
-----------------------------------	-----------------------------------



Birinci resmi kaydet İkinci resmi kaydet

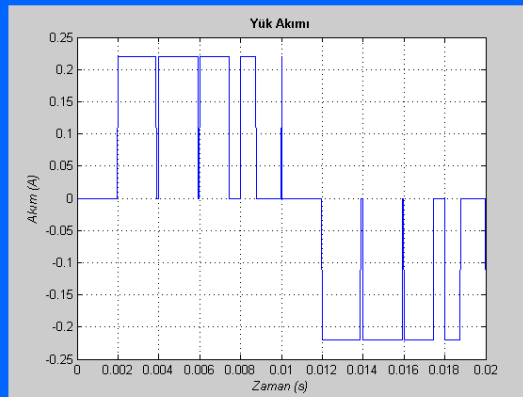
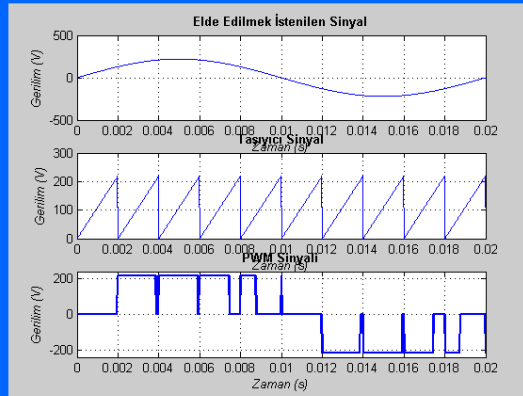
Şekil 4.33. Boşluklu kare dalga invertör devresinde iki periyot içerisinde endüktif yük üzerindeki gerilim ve akım

### PWM İnvertör

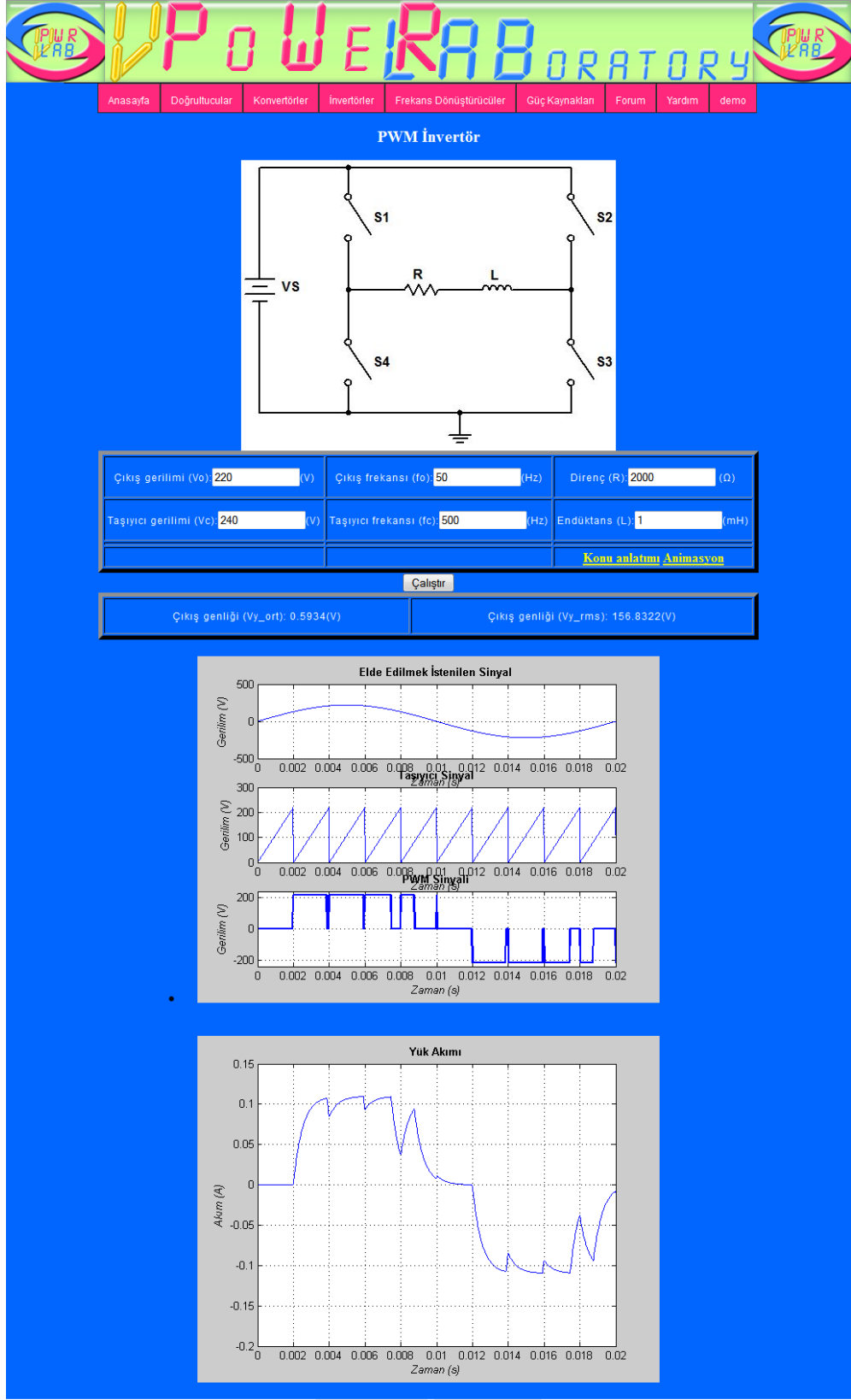


Çıkış gerilimi (Vo): <input type="text" value="220"/> (V)	Çıkış frekansı (fo): <input type="text" value="50"/> (Hz)	Direnç (R): <input type="text" value="1000"/> (Ω)
Taşıyıcı gerilimi (Vc): <input type="text" value="220"/> (V)	Taşıyıcı frekansı (fc): <input type="text" value="500"/> (Hz)	Endüktans (L): <input type="text" value="0"/> (mH)
<input type="button" value="Çalıştır"/>		<a href="#">Konu anlatımı</a> <a href="#">Animasyon</a>

Çıkış gerilimi (Vy_ort): 0(V)	Çıkış gerilimi (Vy_rms): 170.8929(V)
-------------------------------	--------------------------------------



Şekil 4.34. DGM simülasyon sayfasının omik yükte çalıştırılması ve elde edilen sonuçlar

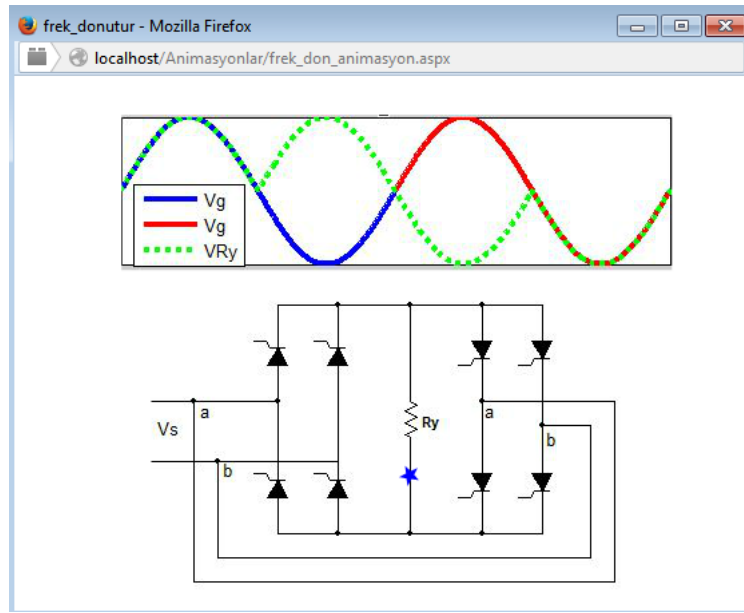


Şekil 4.35. DGM simülasyon sayfasının endüktif yükte çalıştırılması ve elde edilen sonuçlar

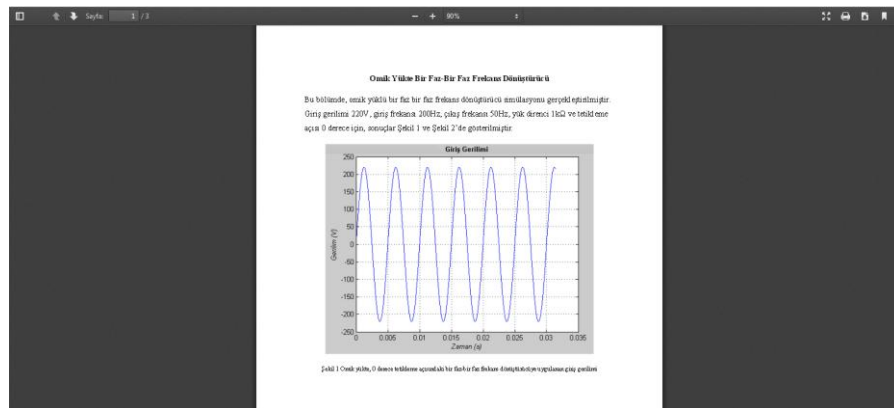


Omik yükte tetikleme açısının devrenin çıkış grafiğini nasıl etkilediğini araştırmak için, tetikleme açısı 30 derece olarak belirlensin. Sanal laboratuvarında, girişe Şekil 4.39'deki giriş sinyali uygulanırken ve gerçekleştirilen deneyde sadece tetikleme açısı 30 dereceye çıkartıldığında, yük üzerinden geçen akım ve yük üzerindeki gerilimin grafiği, Şekil 4.40'de gösterilmektedir.

Frekans dönüştürücü devrelere ait, genel animasyon ve konu anlatımı görüntüleri, sırasıyla Şekil 4.36 ve Şekil 4.37'da verilmiştir.

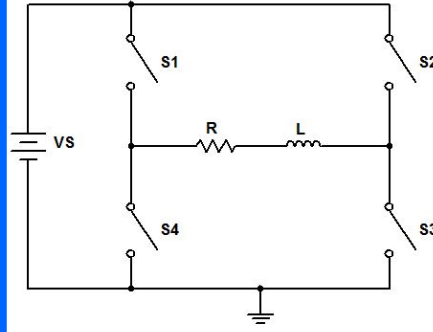


Şekil 4.36. Frekans dönüştürücü devrelere ait genel animasyon görüntüsü



Şekil 4.37. Frekans dönüştürücü devreleri konu anlatım ekranına ait ekran görüntüsü

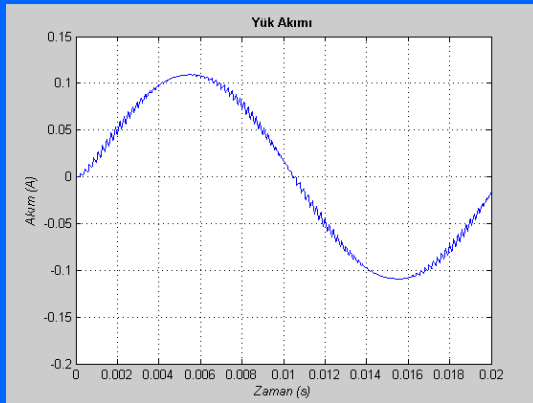
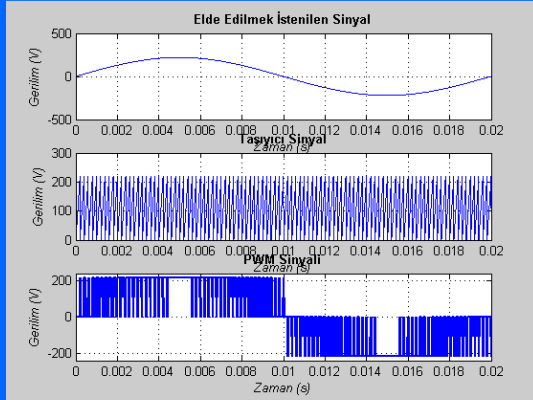
PWM İnvörter



Çıkış gerilimi (Vo): <input type="text" value="220"/> (V)	Çıkış frekansı (fo): <input type="text" value="50"/> (Hz)	Direnç (R): <input type="text" value="2000"/> ( $\Omega$ )
Taşıyıcı gerilimi (Vc): <input type="text" value="240"/> (V)	Taşıyıcı frekansı (fc): <input type="text" value="5000"/> (Hz)	Endüktans (L): <input type="text" value="1"/> (mH)
<a href="#">Konu anlatımı Animasyon</a>		

Çalıştır

Çıkış gerilimi (Vy_ort): 0.8650(V)	Çıkış gerilimi (Vy_rms): 154.6455(V)
------------------------------------	--------------------------------------



[Birinci resmi kaydet](#) [İkinci resmi kaydet](#)

Şekil 4.38. Taşıyıcı 5kHz iken elde edilmek istenen sinyal, taşıyıcı sinyal, DGM sinyali ve yük akımı

#### **4.4.2. Endüktif yükte bir faz bir faz frekans dönüştürücü simülasyonu**

Bu bölümde, omik yüklü bir faz bir faz frekans dönüştürücü simülasyonu gerçekleştirilmiştir. Giriş gerilimi 220V, giriş frekansı 100Hz, çıkış frekansı 50Hz, yük direnci  $100\Omega$  endüktans değeri 100 mH ve tetikleme açısı 0 derece için, giriş gerilimi, yük üzerindeki gerilim ve yük üzerinden geçen akım Şekil 4.41’de, gösterilmiştir.

Endüktif yükte tetikleme açısının devrenin çıkış grafiğini nasıl etkilediğini araştırmak için tetikleme açısını 30 derece olarak belirleyelim. Sanal laboratuvarında, giriş Şekil 4.41’deki giriş gerilimi uygulanırken ve gerçekleştirilen deneyde sadece tetikleme açısı 30 dereceye çıkartıldığında, yük üzerinden geçen akım ve yük üzerindeki gerilimin grafiği, Şekil 4.42’de gösterilmektedir.

#### **4.4.3. Omik yükte üç faz bir faz frekans dönüştürücü simülasyonu**

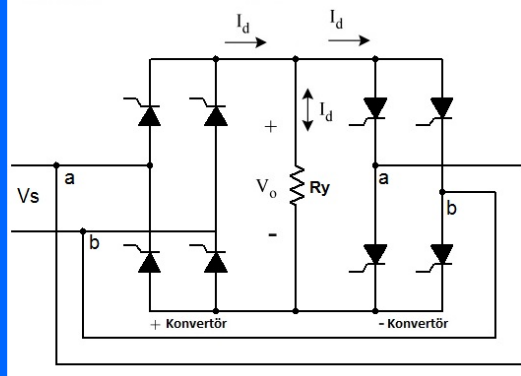
Bu bölümde yüksek güç uygulamalarında sıklıkla kullanılan, üç faz-bir faz frekans dönüştürücü devrelerinin omik yük besleme halinde benzetimi yapılmıştır. Devrenin parametreleri; giriş genliği 220V, giriş frekansı 200Hz, çıkış frekansı 50Hz, yük direnci  $1k\Omega$ , a-b-c fazı tristör tetikleme açıları 0 derece olarak seçildiği durumda simülasyon sonuçları Şekil 4.43’de gösterilmiştir. Endüktans değerinin 0H olarak girildiğine ve bu şekilde devrenin omik yüklü davranışının elde edildiğine dikkat edilmelidir.

Şekil 4.43’de sonuçları elde edilen devrenin giriş parametrelerinden tetikleme açıları 60 derece olarak değiştirildiğinde ve diğer parametreleri aynı kaldığında, yük üzerindeki gerilim ve yük üzerinden geçen akım Şekil 4.44’de gösterilmektedir.

#### **4.4.4. Endüktif yükte üç faz bir faz frekans dönüştürücü simülasyonu**

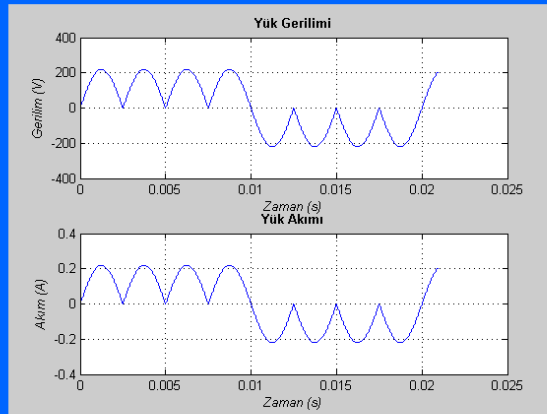
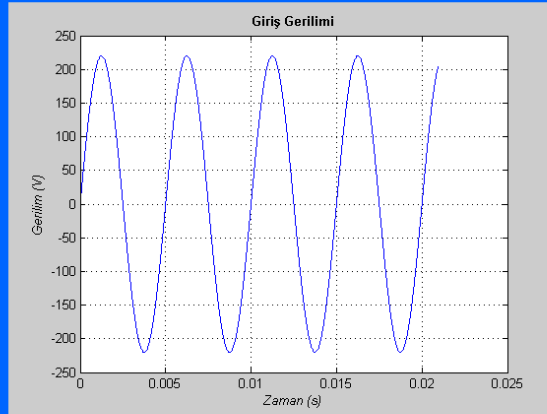
Bu bölümde yüksek güç uygulamalarında sıklıkla kullanılan, üç faz-bir faz frekans dönüştürücü devrelerinin endüktif yük besleme halinde, benzetimi yapılmıştır. Devrenin parametreleri; giriş genliği 220V, giriş frekansı 100Hz, çıkış frekansı 50Hz, yük direnci  $100\Omega$ , endüktans değeri 100mH, a-b-c fazı tristör tetikleme açıları 0 derece olarak seçildiği durumda giriş gerilimi, yük üzerindeki gerilim ve yük üzerinden geçen akım Şekil 4.45’de gösterilmiştir.

Omik Yüklü Frekans Dönüştürücü Devresi



Giriş genliği (Vs): 220 (V)	Giriş frekansı (fs): 200 (Hz)	Çıkış frekansı (fo): 50 (Hz)
Tetikleme açısı: 0 (°)	Direnç (Ry): 1000 (Ω)	Zaman ölçeği: 1.5
<a href="#">Konu anlatımı</a> <a href="#">Animasyon</a>		

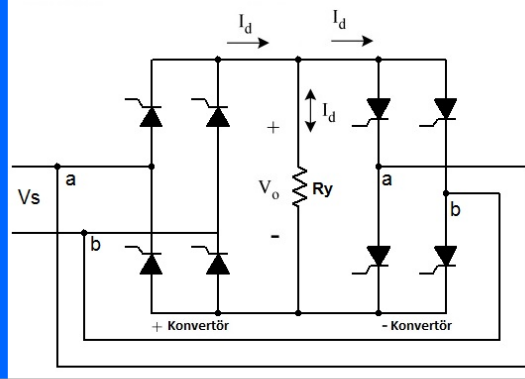
Çalıştır



Birinci resmi kaydet İkinci resmi kaydet

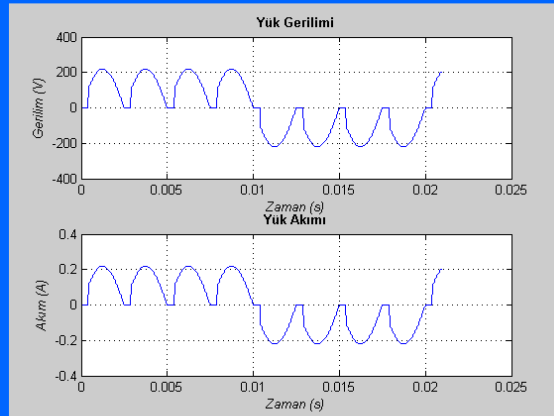
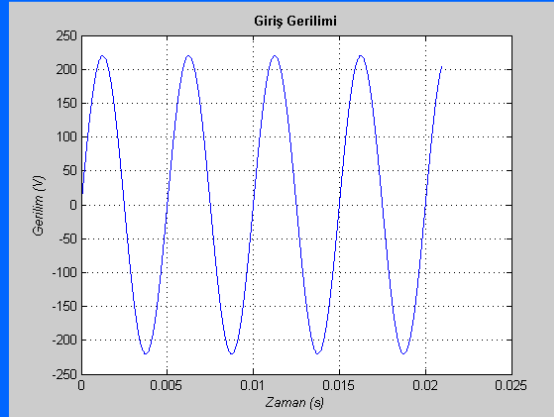
Şekil 4.39. Omik yükte, 0 derece tetikleme açısındaki bir faz-bir faz frekans dönüştürücü simülasyon sonuçları

Omik Yüklü Frekans Dönüştürücü Devresi



Giriş genliği (Vs): 220 (V)	Giriş frekansı (fs): 200 (Hz)	Çıkış frekansı (fo): 50 (Hz)
Tetikleme açısı: 30 (°)	Direnç (Ry): 100 (Ω)	Zaman ölçeği: 1.5
<a href="#">Konu anlatımı Animasyon</a>		

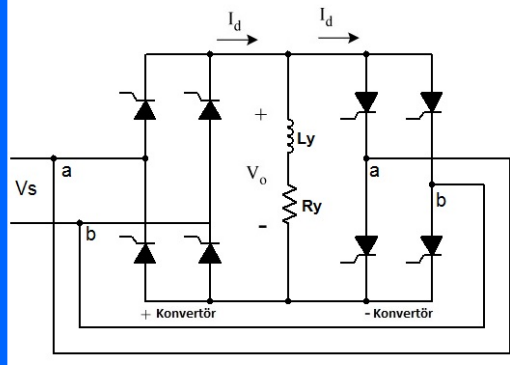
Çalıştır



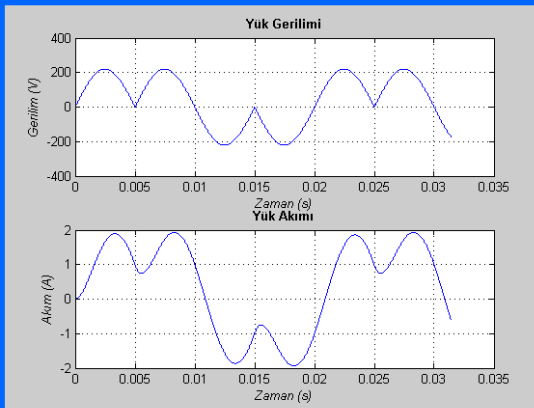
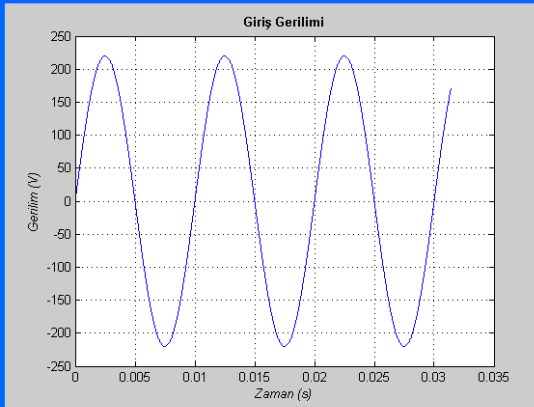
Birinci resmi kaydet İkinci resmi kaydet

Şekil 4.40. Omik yükte, 30 derece tetikleme açısındaki bir faz-bir faz frekans dönüştürücü simülasyon sonuçları

**Endüktif Yüklü Frekans Dönüştürücü Devresi**

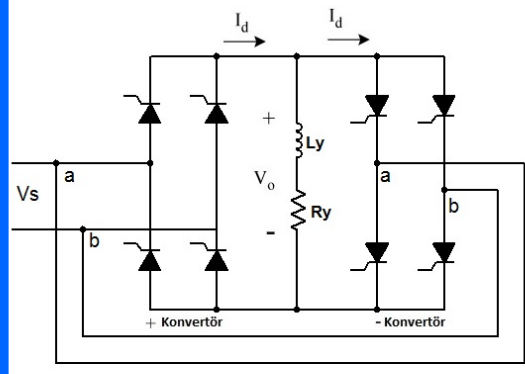


Giriş genliği (Vs): <input type="text" value="220"/> (V)	Giriş frekansı (fs): <input type="text" value="100"/> (Hz)	Çıkış frekansı (fo): <input type="text" value="50"/> (Hz)	Tetikleme açısı: <input type="text" value="0"/> (°)
Endüktans (Ly): <input type="text" value="100"/> (mH)	Direnç (Ry): <input type="text" value="100"/> (Ω)	Zaman ölçeği: <input type="text" value="2"/>	
			<a href="#">Konu anlatımı</a> <a href="#">Animasyon</a>



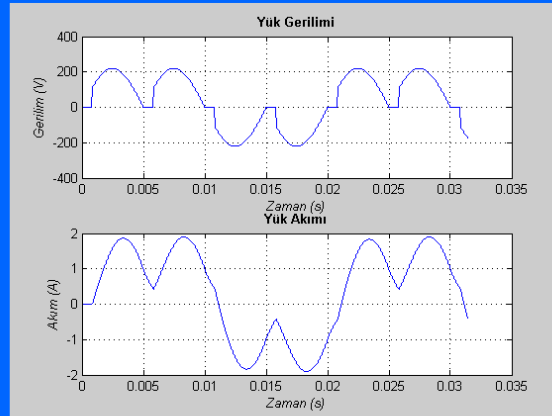
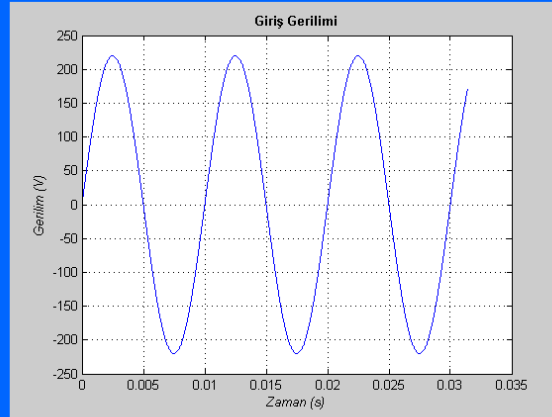
Şekil 4.41. Endüktif yükte, 0 derece tetikleme açısındaki bir faz-bir faz frekans dönüştürücü simülasyon sonuçları

Endüktif Yüklü Frekans Dönüştürücü Devresi



Giriş genliği (Vs): 220 (V)	Giriş frekansı (fs): 100 (Hz)	Çıkış frekansı (fo): 50 (Hz)	Tetikleme açısı: 30 (°)
Endüktans (Ly): 100 (mH)	Direnç (Ry): 100 (Ω)	Zaman ölçeği: 2	
			<a href="#">Konu anlatımı Animasyon</a>

Çalıştır

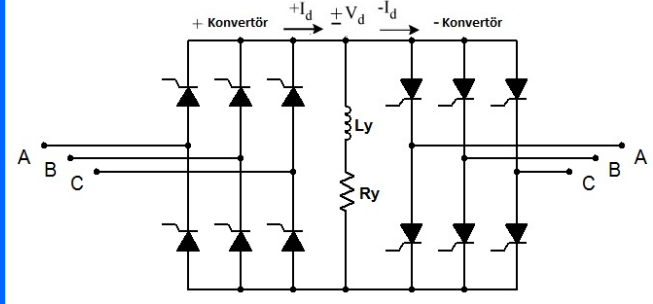


Birinci resmi kaydet

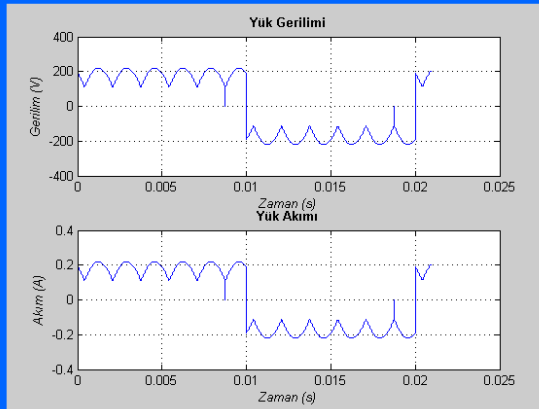
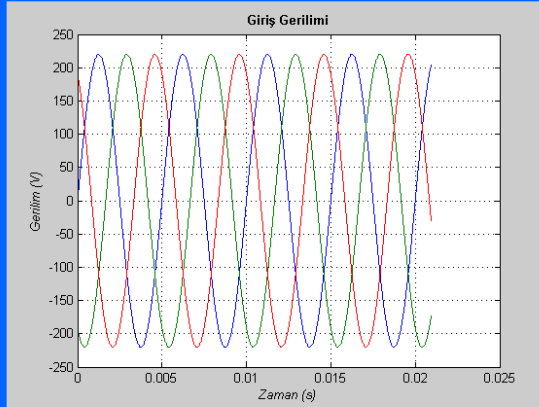
İkinci resmi kaydet

Şekil 4.42. Endüktif yükte, 30 derece tetikleme açısındaki bir faz-bir faz frekans dönüştürücü simülasyon sonuçları

Üç Faz Bir Faz Frekans Dönüştürücü Devresi



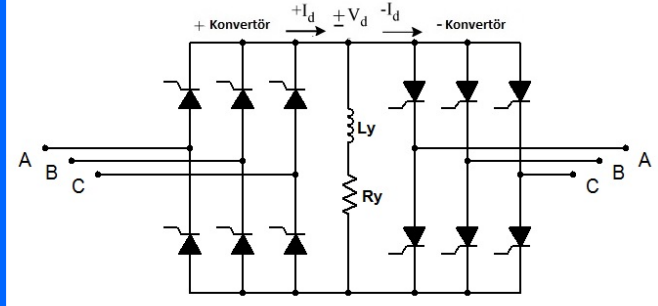
Giriş genliği: <input type="text" value="220"/> (V)	Giriş frekansı: <input type="text" value="200"/> (Hz)	Çıkış frekansı: <input type="text" value="50"/> (Hz)
Tetikleme açısı a: <input type="text" value="0"/> (°)	Tetikleme açısı b: <input type="text" value="0"/> (°)	Tetikleme açısı c: <input type="text" value="0"/> (°)
Endüktans (Ly): <input type="text" value="0"/> (mH)	Direnç (Ry): <input type="text" value="1000"/> (Ω)	Zaman ölçeği: <input type="text" value="1.5"/>
<a href="#">Konu anlatımı Animasyon</a>		



Şekil 4.43. Üç faz-bir faz omik yüklü frekans dönüştürücü 0 derece tetiklemede simülasyon sonuçları

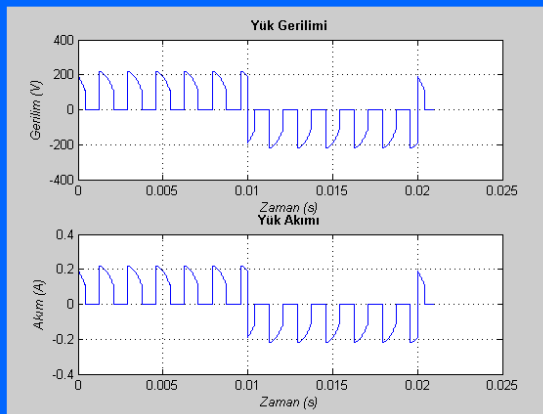
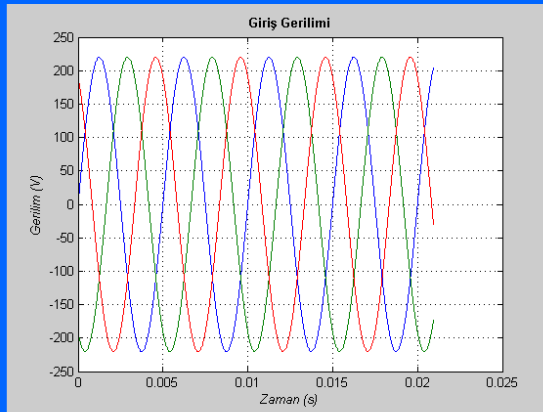


Üç Faz Bir Faz Frekans Dönüştürücü Devresi



Giriş genliği: 220 (V)	Giriş frekansı: 200 (Hz)	Çıkış frekansı: 50 (Hz)
Tetikleme açısı a: 60 (°)	Tetikleme açısı b: 60 (°)	Tetikleme açısı c: 60 (°)
Endüktans (Ly): 0 (mH)	Direnç (Ry): 1000 (Ω)	Zaman ölçeği: 1.5
<a href="#">Konu anlatımı Animasyon</a>		

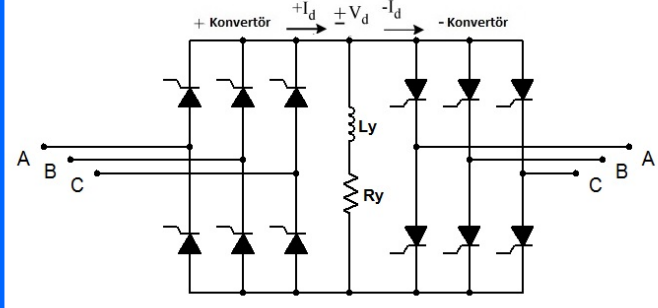
Çalıştır



Birinci resmi kaydet İkinci resmi kaydet

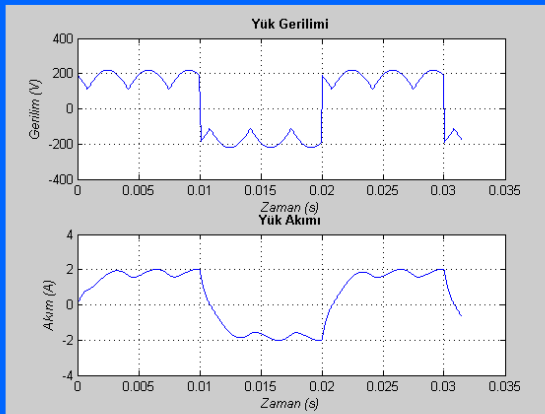
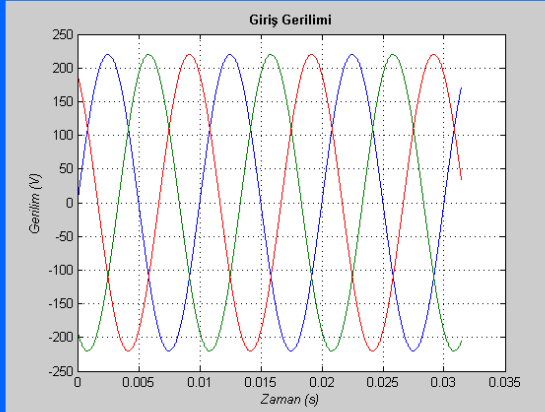
Şekil 4.44. Üç faz-bir faz omik yüklü frekans dönüştürücü 60 derece tetiklemede simülasyon sonuçları

Üç Faz Bir Faz Frekans Dönüştürücü Devresi



Giriş genliği: 220 (V)	Giriş frekansı: 100 (Hz)	Çıkış frekansı: 50 (Hz)
Tetikleme açısı a: 0 (°)	Tetikleme açısı b: 0 (°)	Tetikleme açısı c: 0 (°)
Endüktans (Ly): 100 (mH)	Direnç (Ry): 100 (Ω)	Zaman ölçeği: 2
<a href="#">Konu anlatımı</a> <a href="#">Animasyon</a>		

Çalıştır

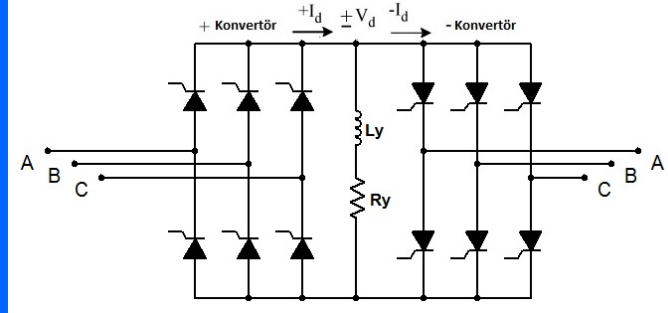


Birinci resmi kaydet

İkinci resmi kaydet

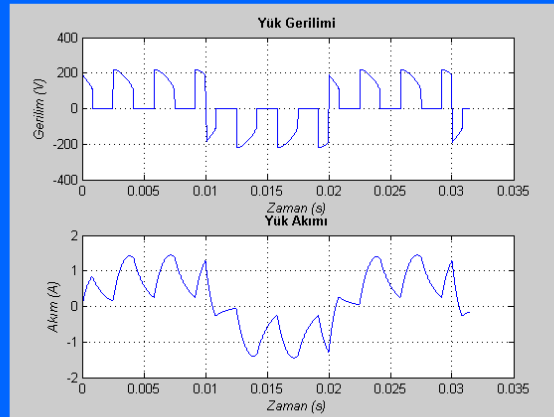
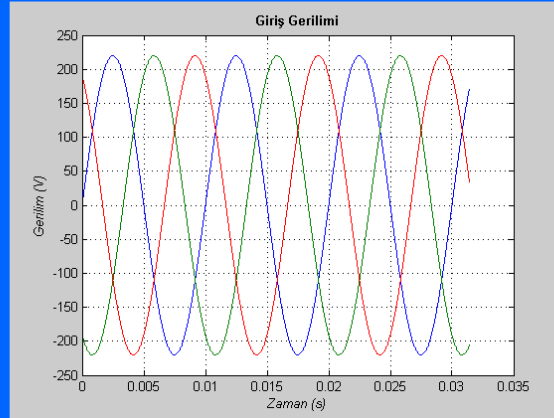
Şekil 4.45. Üç faz-bir faz endüktif yüklü frekans dönüştürücü 0 derece tetiklemede simülasyon sonuçları

Üç Faz Bir Faz Frekans Dönüştürücü Devresi



Giriş genliği: 220 (V)	Giriş frekansı: 100 (Hz)	Çıkış frekansı: 50 (Hz)
Tetikleme açısı a: 60 (°)	Tetikleme açısı b: 60 (°)	Tetikleme açısı c: 60 (°)
Endüktans (Ly): 100 (mH)	Direnç (Ry): 100 (Ω)	Zaman ölçeği: 2
<a href="#">Konu anlatımı Animasyon</a>		

Çalıştır



Birinci resmi kaydet

İkinci resmi kaydet

Şekil 4.46. Üç faz-bir faz endüktif yüklü frekans dönüştürücü 60 derece tetiklemede simülasyon sonuçları

Şekil 4.45’de sonuçları elde edilen devrenin, giriş parametrelerinden tetikleme açıları 60 derece olarak değiştirildiğinde ve diğer parametreleri aynı kaldığında, yük üzerindeki gerilim ve yük üzerinden geçen akım Şekil 4.46’da gösterilmektedir.

#### **4.5. Güç Kaynakları Simülasyonları**

Bu bölümde, endüstride yaygın olarak kullanılan, güç kaynağı çıkış işaretlerinin benzetimi yapılmıştır. Birim basamak, rampa, sinüsoidal, kare, parabol, üçgen ve üç faz sinüzoidal dalga olarak çıkış alınabilen güç kaynaklarının, hem zaman, hem de frekans boyutunda çizimleri kullanıcıya sunulmuştur. Bu fonksiyonların üzerlerine, harmonik işaretler eklenebilmektedir ve ayrıca, toplam harmonik bozulma, kullanıcıya rakamsal olarak verilebilmektedir.

##### **4.5.1. Birim Basamak üretici simülasyonu**

Bu bölümde birim basamak üretici simülasyonu gerçekleştirilmiştir. Giriş genliği 24V ve frekansı 50Hz olarak seçilmiş, giriş frekansının dokuz ve on katı büyüklüğündeki frekansa; 0,1V genliğinde harmonikler eklenerek simülasyon çalıştırılmıştır. Şekil 4.47’de birim basamak üreticine girilen değerler ile beraber bulunan THD, işaretin zaman ve frekans boyutundaki grafiği gösterilmiştir. Güç kaynakları simülasyonlarına ait konu anlatımı ekran görüntüsü Şekil 4.48’de verilmiştir.

##### **4.5.2. Kare dalga üretici simülasyonu**

Bu bölümde kare dalga üretici simülasyonu gerçekleştirilmiştir. Giriş genliği 24V ve frekansı 50Hz olarak seçilmiş, giriş frekansının beş katı büyüklüğünde 0,1V ve on katı büyüklüğündeki frekansa; 1V genliğinde harmonikler eklenerek simülasyon çalıştırılmıştır. Şekil 4.49’da kare dalga üreticine girilen değerler ile beraber bulunan THD, işaretin zaman ve frekans boyutundaki grafiği gösterilmiştir.

##### **4.5.3. Parabol dalga üretici simülasyonu**

Bu bölümde parabol dalga üretici simülasyonu gerçekleştirilmiştir. Giriş genliği 24V ve frekansı 50Hz olarak seçilmiş, giriş frekansının üç ve beş katı büyüklüğündeki frekansa; 2V genliğinde harmonikler eklenerek simülasyon çalıştırılmıştır. Şekil 4.50’de parabol dalga üreticine girilen değerler ile beraber bulunan THD, işaretin zaman ve frekans boyutundaki grafiği gösterilmiştir.

#### **4.5.4. Rampa üretici simülasyonu**

Bu bölümde rampa üretici simülasyonu gerçekleştirilmiştir. Giriş genliği 24V ve frekansı 50Hz olarak seçilmiş, giriş frekansının beş katı büyüklüğündeki frekansa; 1V genliğinde harmonik eklenerek simülasyon çalıştırılmıştır. Şekil 4.51'de rampa üreticisine girilen değerler ile beraber bulunan THD, işaretin zaman ve frekans boyutundaki grafiği gösterilmiştir.

#### **4.5.5. Sinüsoidal dalga üretici simülasyonu**

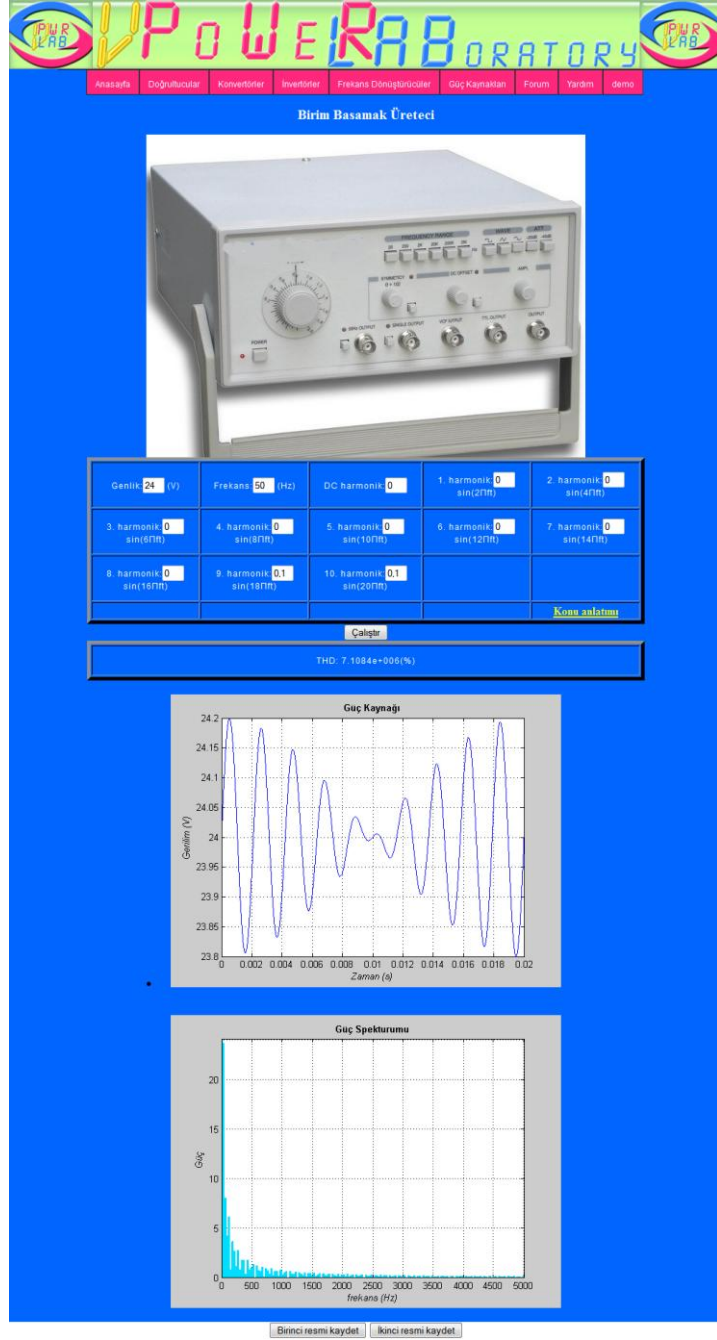
Bu bölümde sinüsoidal dalga üretici simülasyonu gerçekleştirilmiştir. Giriş genliği 220V ve frekansı 50Hz olarak seçilmiş, giriş frekansının üç katı büyüklüğündeki frekansa; 5V genliğinde harmonik eklenerek simülasyon çalıştırılmıştır. Şekil 4.52'de sinüsoidal dalga üreticisine girilen değerler ile beraber bulunan THD ve işaretin zaman boyutundaki grafiği gösterilmiştir.

#### **4.5.6. Üçgen dalga üretici simülasyonu**

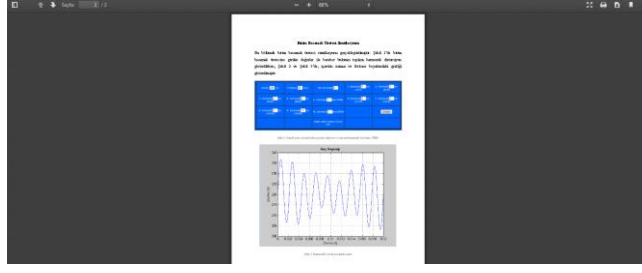
Bu bölümde üçgen dalga üretici simülasyonu gerçekleştirilmiştir. Giriş genliği 24V ve frekansı 50Hz olarak seçilmiş, giriş frekansının üç ve beş katı büyüklüğündeki frekansa; 2V genliğinde harmonikler eklenerek simülasyon çalıştırılmıştır. Şekil 4.53'de üçgen dalga üreticisine girilen değerler ile beraber bulunan THD, işaretin zaman ve frekans boyutundaki grafiği gösterilmiştir.

#### **4.5.7. Üç fazlı sinüsoidal dalga üretici simülasyonu**

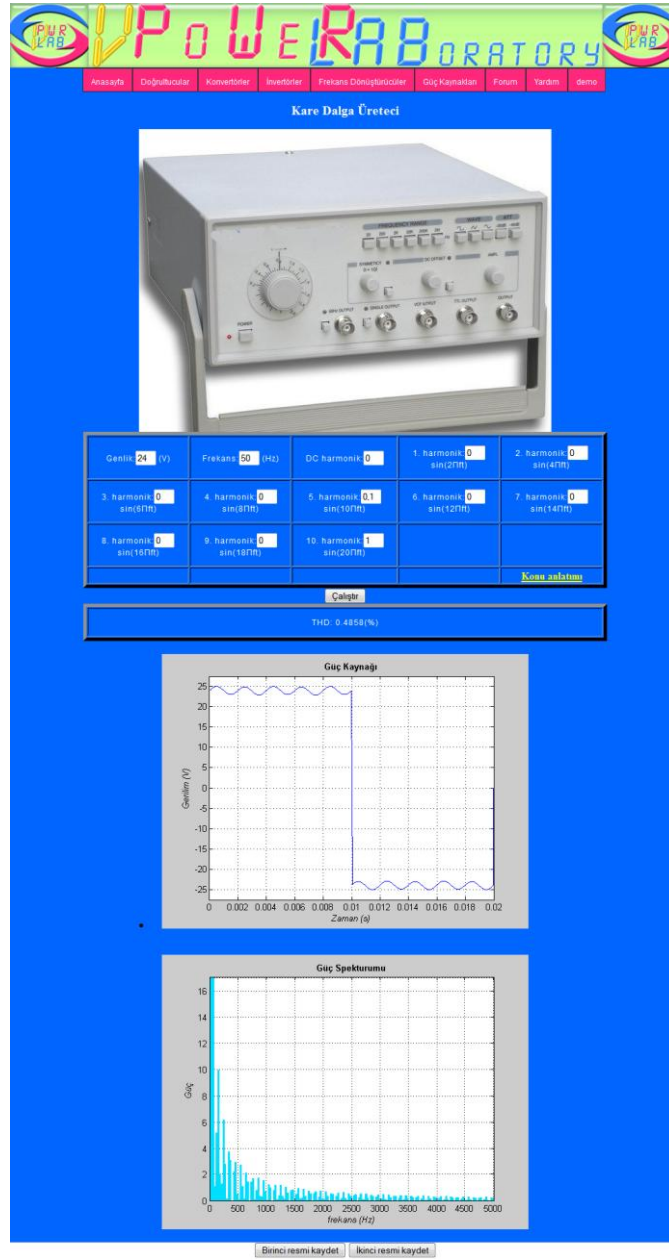
Bu bölümde üç fazlı sinüsoidal dalga üretici simülasyonu gerçekleştirilmiştir. Giriş genliği 220V ve frekansı 50Hz olarak seçilmiş, giriş frekansının üç katı ve beş katı büyüklüğündeki frekansa; 5V genliğinde harmonik eklenerek simülasyon çalıştırılmıştır. Şekil 4.54'de üç fazlı sinüsoidal dalga üreticisine girilen değerler ile beraber bulunan THD ve işaretin zaman boyutundaki grafiği gösterilmiştir.



Şekil 4.47. Simülasyon çalıştırılırken girilen değerler, THD ve grafikler



Şekil 4.48. Güç kaynakları simülasyonlarına ait konu anlatım ekranına ait ekran görüntüsü



Şekil 4.49. Simülasyon çalıştırılırken girilen değerler, THD ve grafikler



# POWER LAB



[Anasayfa](#) | [Doğrultucular](#) | [Konvertörler](#) | [İnvertörler](#) | [Frekans Dönüştürücüler](#) | [Güç Kaynakları](#) | [Forum](#) | [Yardım](#) | [demo](#)

## Parabol Dalga Üretici



Genlik: <input type="text" value="24"/> (V)	Frekans: <input type="text" value="50"/> (Hz)	DC harmonik: <input type="text" value="0"/>	1. harmonik: <input type="text" value="0"/> sin(2πft)
2. harmonik: <input type="text" value="0"/> sin(4πft)	3. harmonik: <input type="text" value="2"/> sin(6πft)	4. harmonik: <input type="text" value="0"/> sin(8πft)	5. harmonik: <input type="text" value="2"/> sin(10πft)
6. harmonik: <input type="text" value="0"/> sin(12πft)	7. harmonik: <input type="text" value="0"/> sin(14πft)	8. harmonik: <input type="text" value="0"/> sin(16πft)	9. harmonik: <input type="text" value="0"/> sin(18πft)
10. harmonik: <input type="text" value="0"/> sin(20πft)	<a href="#">Konu anlatımı</a>		

THD: 0.6812(%)

**Güç Kaynağı**

**Güç Spektrumu**

|

Şekil 4.50. Simülasyon çalıştırılırken girilen değerler, THD ve grafikler





Şekil 4.51. Simülasyon çalıştırılırken girilen değerler, THD ve grafikler

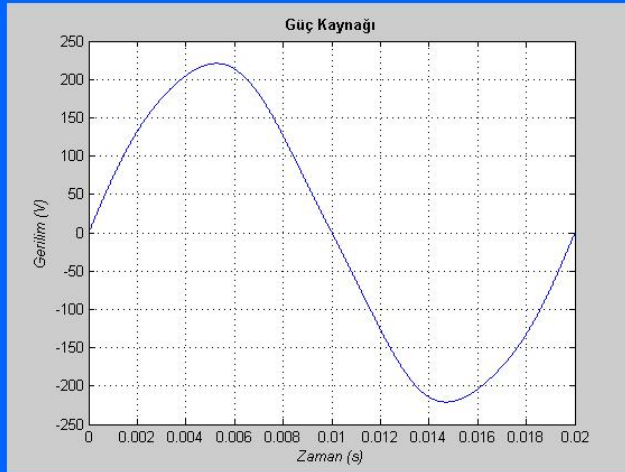
Sinüzoidal Dalga Üretici



Genlik: 220 (V)	Frekans: 50 (Hz)	DC harmonik: 0	1. harmonik: 0 sin(4Πft)	2. harmonik: 0 sin(6Πft)
3. harmonik: 5 sin(8Πft)	4. harmonik: 0 sin(10Πft)	5. harmonik: 0 sin(12Πft)	6. harmonik: 0 sin(14Πft)	7. harmonik: 0 sin(16Πft)
8. harmonik: 0 sin(18Πft)	9. harmonik: 0 sin(20Πft)	10. harmonik: 0 sin(22Πft)		
				<a href="#">Konu anlatımı</a>


Çalıştır

THD: 0.0227(%)




Resmi kaydet

Şekil 4.52. Simülasyon çalıştırılırken girilen değerler, THD ve grafikler




# PIWR LAB



[Anasayfa](#) | [Doğrultucular](#) | [Konvertörler](#) | [İnvertörler](#) | [Frekans Dönüştürücüler](#) | [Güç Kaynakları](#) | [Forum](#) | [Yardım](#) | [demo](#)

## Üçgen Dalga Üretici



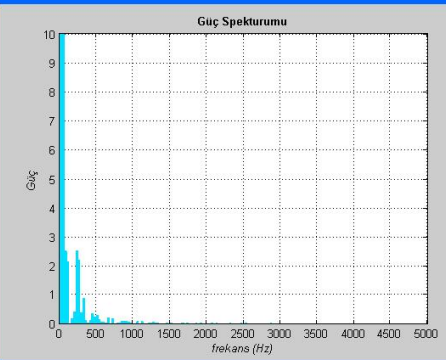
Genlik: <input type="text" value="24"/> (V)	Frekans: <input type="text" value="50"/> (Hz)	DC harmonik: <input type="text" value="0"/>	1. harmonik: <input type="text" value="0"/> sin(2πft)	2. harmonik: <input type="text" value="0"/> sin(4πft)
3. harmonik: <input type="text" value="2"/> sin(6πft)	4. harmonik: <input type="text" value="0"/> sin(8πft)	5. harmonik: <input type="text" value="2"/> sin(10πft)	6. harmonik: <input type="text" value="0"/> sin(12πft)	7. harmonik: <input type="text" value="0"/> sin(14πft)
8. harmonik: <input type="text" value="0"/> sin(16πft)	9. harmonik: <input type="text" value="0"/> sin(18πft)	10. harmonik: <input type="text" value="0"/> sin(20πft)		<a href="#">Konu anlatımı</a>

THD: 0.1516(%)

### Güç Kaynağı



### Güç Spekturumu



Şekil 4.53. Simülasyon çalıştırılırken girilen değerler, THD ve grafikler

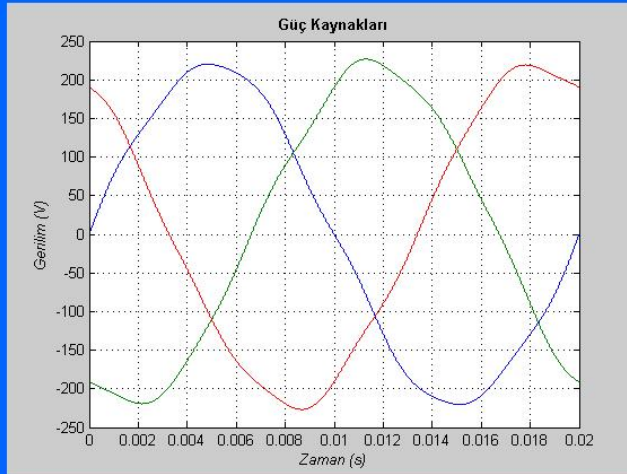
Üç Fazlı Sinüsoidal Dalga Üretici



Genlik: <input type="text" value="220"/> (V)	Frekans: <input type="text" value="50"/> (Hz)	DC harmonik: <input type="text" value="0"/>	1. harmonik: <input type="text" value="0"/> sin(4πft)	2. harmonik: <input type="text" value="0"/> sin(8πft)
3. harmonik: <input type="text" value="5"/> sin(8πft)	4. harmonik: <input type="text" value="0"/> sin(10πft)	5. harmonik: <input type="text" value="5"/> sin(12πft)	6. harmonik: <input type="text" value="0"/> sin(14πft)	7. harmonik: <input type="text" value="0"/> sin(16πft)
8. harmonik: <input type="text" value="0"/> sin(18πft)	9. harmonik: <input type="text" value="0"/> sin(20πft)	10. harmonik: <input type="text" value="0"/> sin(22πft)		
				<a href="#">Konu anlatımı</a>

Çalıştır

THD: 0.0321(%)



Resmi kaydet

Şekil 4.54. Simülasyon çalıştırılırken girilen değerler ve THD

## 5. SONUÇLAR VE TARTIŞMA

Bu tezde, güç elektroniği derslerinde edinilen teorik bilgilerin uygulamaya dökülebilmesi ve bu sayede edinilen birikimin kalıcılığının sağlanması için web tabanlı güç elektroniği sanal laboratuvarı tasarlanmıştır. Öğrencilerin derslerde öğrendikleri teorik bilgileri pekiştirebilmelerinin tek yolunun, konuyla ilgili deney yapımlarıyla doğru orantılı olduğu gerçeği göz önüne alınarak gerçekleştirilen çalışmada; bu ihtiyaçlarının, uzaktan erişilebilen sanal bir laboratuvar tasarlanarak karşılanması amaç edinilmiştir. Çalışma için bu amacı ortaya çıkaran nedenler; eğitim kurumları, öğrenciler ve öğretim görevlilerinin gerçek laboratuvarlarda karşı karşıya kaldıkları sorunlarla ilişkilidir. Bu sorunların başlıcaları, öğrenciler açısından, laboratuvarın etkin kullanılmaması; öğretim görevlileri açısından, öğrencilere ayırabilecekleri sürenin gerçek laboratuvarlarda kısıtlı olması ve eğitim kurumları açısından ise gerçek laboratuvarların kurulum maliyetidir. Bu tezde, adı geçen problemlerin ortadan kaldırılabilmesi için gelişmiş benzetim yapıları kurmayı sağlayan MATLAB programından yararlanılmıştır. Sistemin uzaktan erişilebilir olmasını sağlamak amacıyla ASP.NET teknolojisi kullanılmıştır. MATLAB ile üretilen simülasyon yapılarının .dll dosyası olarak ASP.NET ortamına aktarılması sonucunda, uzaktan erişime imkan veren güç elektroniği sanal laboratuvarı tasarlanmıştır.

Gerçekleştirilen çalışma; öğrencilerin eğitim kurumuna gelmeden, laboratuvar faaliyetini yapabilmelerini sağlamaktadır. Bu sayede geliştirilen uygulamayı kullanan öğrencilerin, serbest çalışma olanağına sahip olduğu söylenebilir. Serbest çalışma; öğrencinin laboratuvar dersini en iyi öğrenebileceği zamanı kendisinin belirleyerek, daha iyi bir öğrenme etkinliğinin gerçekleştirilmesini garanti eder. Çalışma zamanını özgürce belirlemek, öğrenciye konuyu arkadaşlarıyla uzun uzun tartışma olanağı verir. Böylelikle tasarlanan yazılımın; öğrenciye ikinci bir getiri olarak, sorgulayarak öğrenme fırsatını sunduğu söylenebilir.

Tasarlanan sanal laboratuvar, gerçekleştirilen deneylerin sonuçlarını kaydedebilmektedir ve kaydedilen veriyi yorum sayfası altında, ders sorumlusuna gönderebilmektedir. Bu kayıt, iki türlü gerçekleştirilebilmektedir. Kullanıcı simülasyon sonucu dönen grafikleri ilgili butona basarak kaydeder ve yorum sayfası bölümünden kaydettiği grafiği çağırabilir. İkinci yol olarak, simülasyon sonucu dönen grafiği ve

üretilen veriyi, bir kelime işlemci programına aktararak düzenleyebilir ve yorum sayfası bölümünden simülasyon programına yükleyebilir. Tasarlanan sanal laboratuvarlarda kaydedilen deney verilerinin, gerçek laboratuvarlardakilerine kıyasla, nesneliğe daha yakın olduğu söylenebilir. Çünkü gerçek laboratuvarlarda, deney verileri gözlemci notlarına bırakılmıştır fakat tasarlanan sanal laboratuvarlarda, her işlem bilgisayar yazılımıyla kontrol edilir. Gerçek laboratuvarlarda, gözlemci hataları ve ölçü aletlerinden kaynaklanan hatalar, aynı deneylerden farklı sonuç alınmasına sebep olmaktadır ve bu durum öğretim görevlisinin değerlendirme yapması için ek süre ayırmasını gerektirmektedir. Eğer gerçek laboratuvarlarda, deney sıklığı fazla değilse ve bulunan sonuçlar birbirinden ciddi oranda farklı ise, deney sonuçlarının değerlendirilmesinin öğretim görevlileri açısından oldukça meşakkatli olacağı da açıktır. Tasarlanan sanal laboratuvar, deney sonuçlarında spekülasyona yer vermeksizin, sonuçları objektif bir biçimde öğretim görevlisine aktarır. Burada bilgisayarların da hesaplama hatası yapabileceğini, fakat bu hatanın bütün kullanıcılar için aynı olacağını, dolayısıyla hatalı deneylerin kolayca tespit edilebileceğini belirtmek doğru olacaktır.

Tasarlanan simülatörün verileri kaydedebilme özelliği, çalışılan devrenin geliştirilebilmesi açısından, gerçek laboratuvarlara göre üstünlük sağlamaktadır. Devrenin parametreleri değiştirilerek, devreyle ilgili belirli özellikler (örneğin, konvertör çıkışındaki filtre kondansatörünün değişik değerlerinde elde edilen gerilim dalgalanması) iyileştirilebilir ve kayıtlı olan eski verilere erişilerek kıyas yapılabilir. Öğrenci veya kullanıcı, gerçek hayatta tasarlayacağı devrenin parametrelerini yine tasarlanan simülatörün veri kaydedebilme özelliğinden yararlanarak, seçebilme imkânına sahiptir. Ancak, bilgisayarda meydana gelebilecek hatalar (örneğin kesme hatası sonucu yanlış sonuç üretilmesi) gibi sorunları da dikkate alarak, sistemin temel matematiksel formüllerini, yorumlaması da gerekmektedir. Kullanıcı devre denklemlerini, tasarlanan sanal laboratuvarın, konu anlatımı kısımlarından inceleyebilir.

Gerçekleştirilen sanal laboratuvar yazılımı, güç elektroniği derslerinde, eğitim kurumlarının etkin bir biçimde kullanılmasına yardımcı olmaktadır. Eğitim kurumlarının çok sayıda öğrenciye uzaktan erişimle eğitim vermesini bir nebze olsun olanaklı kılan bu çalışma, gerçek laboratuvarlarda ortaya çıkan yer sıkıntısı sorununu aşmaya yardımcı olmaktadır. Gerçekleştirilen yazılımın, eğitim kurumlarının uzaktan

erişilebilmesine sağladığı katkıyı arttırabilmek için, güçlü web sunucuların kullanılması gerekmektedir. Bu sayede hızlı ve etkin hizmet sunulmuş olur. Tasarlanan simülâtörün eğitim kurumlarına verebileceği diğer katkı ise, gerçek laboratuvarların kurulum maliyetinden çok daha ucuza üretilmesidir. Bu güç elektroniği dersleri için uygulamaların maliyetinin düşürülebileceğini göstermektedir.

Bu tezde tasarlanan web tabanlı güç elektroniği sanal laboratuvarı, ilgili dersin uygulamasından sorumlu öğretim görevlileri için de kolaylıklar sağlamaktadır. Simülâtör çevrimiçi destek verebilme özelliğine sahiptir. Bu sayede öğrenci, ilgili deneyi gerçekleştirirken, dersin hocasına takıldığı yerlerle ilgili sorular sorabilir. Böylelikle gerçek laboratuvarlarda ortaya çıkan, az zamanda yoğun bilgi aktarma zorunluluğu ortadan kalkar ve bilgilerin anlaşılır bir biçimde sunulmasına yardımcı olunur. Öğrenci ve öğretim görevlisi, aynı anda çevrim içi olmadığı durumlarda, öğrenci, yorum sayfasını kullanarak ilgili soruları gönderebilir. Benzer şekilde, simülâtörün rapor gönderebilme özelliği kullanılarak, ders sorumlusunun laboratuvar incelemelerini kısa sürede yapması sağlanır. Öğrencilerinin yaptığı deneyleri öğretim görevlisinin karşılaştırmalı incelemesi, not dağılımının hızlı ve adil bir biçimde olmasına katkı sağlamaktadır.

Gerçek güç elektroniği laboratuvarlarında ortaya çıkabilen elektrik çarpması, yangın gibi can güvenliği problemleri, bu laboratuvarlarda deney yapan tecrübesiz öğrenciler için tehlike teşkil etmektedir. Bu tezde gerçekleştirilen web tabanlı güç elektroniği sanal laboratuvarı, yazılım ortamında deney yapma olanağı verdiği için, tecrübesiz öğrencilere daha uygun bir çalışma ortamıdır. Öğrenciler, sanal laboratuvarında bir yandan konuları öğrenirken, diğer yandan devrelerde oluşan yüksek gerilim ve akımları inceleyerek, gerçek güç laboratuvarlarında çalışma yapmadan önce bir altyapıya sahip olurlar. Konu anlatım bölümlerinde de, ilgili devrelerin, hangi güç seviyeleri altında çalıştığı öğrencilere açıklanmaktadır. Bunların farkına varan öğrenci, hem gerçek laboratuvarlarda, hem de ileride çalışacağı mühendislik işlerinde, dikkatli olmayı ve çalışmalarını ciddiyetle yapmayı öğrenmiş olur. Bu kazanım öğrenciler için meslek hayatlarındaki en önemli birikimlerden bir tanesidir.

Tasarlanan güç elektroniği laboratuvarı, ilgili animasyonlar ve konu anlatımları ile desteklenmiş beş altbölümden oluşmaktadır. Doğrultucu devreleri, konvertörler,

invertörler, frekans dönüştürücüler ve güç kaynakları benzetimlerini barındıran bu altbölümler, öğrencilerin konuları kavramaları açısından, adım adım incelenmiştir. Örneğin, doğrultucu devreleri, diyotlu YDD omik yük ile başlar, daha sonra, diyotlu KD omik yüklüken incelenir, aynı yük tipinin tristörlü devrelerine geçiş yapılır. Devre topolojileri YDD'den KD'ye ve gerçekleştirilen elemanlar diyottan tristöre doğru değişirken, yük tipi de omik yükten endüktif yüke doğru geçmektedir. Benzer mantıkla üç fazlı doğrultucular da tasarlanmıştır. Frekans dönüştürücüler, bir faz- bir faz biçiminden, üç faz-bir faz biçimine doğru geçerken, yük tipi, her bir devre için omik veya endüktif olarak seçilebilir. Invertör devreleri tasarlanırken de, aşamalarla inceleme yöntemi seçilmiştir. Modülasyonlar, kare dalga, boşluklu kare dalga ve DGM şeklinde gelişen sıraya göre incelenirken, yük tipi diğer devrelere benzer biçimde, her bir modülasyon için omik ve endüktif olarak belirlenmiştir. Konvertör benzetimleri, basit kıyıcı devresinin genel mantığını kavratmakla başlamaktadır. Bundan hareketle, buck, boost ve buck-boost konvertör devrelerinin incelenmesi sırasıyla yapılmıştır. Güç kaynakları bölümünde, yedi adet gerilim üretici, zaman ve frekans boyutunda incelenmiş, bozucu etkilerin katılmasına imkân verilmiş ve THD değerleri kullanıcıya gösterilerek benzetim tamamlanmıştır. Gerçekleştirilen güç elektroniği sanal laboratuvarının altbölümleri, sadece simülatör devrelerinin tasarımı açısından benzerlik göstermemektedir. Alt bölümler arasında yatay benzerlik de bulunmaktadır. Örneğin, frekans dönüştürücü devreleri, doğrultucu devrelerinin, pozitif ve negatif konvertör isimleri verilerek ve seçime göre doğrultma yapılarak uyarlanmış halidir. Animasyonlarla bu durum kullanıcıya sunulmuştur. Konvertör devreleri ve invertör devreleri arasında da bir paralellik mevcuttur. Bu paralellik, anahtarların açma kapama durumlarında, akımın dolaşacağı yön ile ilgilidir. Animasyonlarla, invertör ve konvertör devrelerinde akımın nasıl dolaştığı belirtilmiştir. Kullanıcı buradaki benzerlikleri görerek, yeni devreleri oluşturabilme konusunda esinlenebilir.

Tasarlanan güç elektroniği simülatörü, sadece önceden tasarlanmış devreleri benzetebilmektedir. Ancak yazılım aşamasının geliştirilmesinde, devrelerin parametreleri alt fonksiyonlarla yazıldığı için, var olmayan devrelerin tasarımı da bu programın sonraki sürümlerinde yapılabilir. Örneğin Şekil 3.25'te listelenen birinci fonksiyon, boost konvertörü başlatırken, ikinci ve üçüncü fonksiyonlar, ilgili konvertörün iletim ve kesim denklemlerini modeller. Programın MATLAB altında,



iletim ve kesim fonksiyonlarını sırayla çağırarak ve devredeki hafızalı elemanların iletim ve kesim durumunda doğru değerleri almasını sağlayarak çalışmaktadır. Buna benzer bir mantık diğer dört altbölüm içinde geçerlidir. Özet olarak simülatördeki devreler bir bütün olarak değil, anlamlı bir büyük resim oluşturan küçük parçalarla tasarlanmıştır. Böylece, bu tezde sadece belirli devreleri çözen simülatör, ileride verilen herhangi bir devreyi analiz etme yönünde geliştirilebilir.

Tasarlanan simülatörün benzetimlerinin geçerliliği tartışılacak olursa, doğrultucu devrelerinde zaman sabiti  $\tau = \frac{L}{R}$  değerinin 1'den çok büyük olmadığı durumlarda, doğru sonuç verildiği sonucuna ulaşılır. Yani endüktans değeri, direnç değerinden oldukça büyük seçilmemelidir. Konvertör devreleri incelendiğinde, CCM çalışma durumunun oldukça başarılı modellendiği görülür. Fakat DCM çalışma durumunda, konvertör devreleri Runge-Kutta nümerik analiz yöntemine göre çözüldüğü için, boost konvertörde, sonsuza yakınsayan süreksiz fonksiyon biçimleri ortaya çıkabilmektedir. Bu Runge-Kutta yönteminin tuzaklarından biridir ve bundan kurtulma yolları mevcuttur. Konvertör çalışma aralığının denetlenmesi, yani CCM ve DCM'nin boost konvertör için denetlenmesi, bu tür problemlerin önüne geçecektir. Ancak bu tezde bu denetim yapılmamıştır. Diğer benzetimlerde, devre denklemlerinden ötürü bu tür problemlerle karşılaşılacaktır. İnvörtör ve frekans dönüştürücü benzetimleri, yine doğrultucu benzetimlerindeki gibi, zaman sabitinin bir değerinden çok büyük seçilmesi durumunda, benzetim sonuçlarını yüksek hatayla döndürmektedir. Zaman sabitinin, bir değeri ve altında seçilmesi durumunda, simülatör daha sağlıklı sonuçlar döndürmektedir. Güç kaynağı simülasyonlarında, sonuçlar normal olarak döndürülebilmektedir. Bütün simülasyonlar için, web tabanlı simülatörün çalıştırılacağı sunucu bilgisayarın hafıza kapasitesi ile azami benzetim süresi belirlenir ve yine bu sunucu bilgisayarın performansı ile benzetimden sonuç alma hızı sınırlanır.

Bu tezde, web tabanlı güç elektroniği sanal laboratuvarı, güç elektroniği laboratuvar derslerinde kullanılmaya üzere tasarlanmıştır. Öncelikle benzetilecek devre denklemleri oluşturulmuş, daha sonra MATLAB ortamında gerçekleştirilmiştir. MATLAB'dan elde edilen .dll dosyaları, ASP.NET ortamına aktarılarak, yazılımın ağ tabanlı olması sağlanmış ve çeşitli özellikler eklenerek güç elektroniği derslerinde sanal laboratuvar olarak kullanılabilir hale getirilmiştir.

Geliştirilen VPwrLab güç elektroniği sanal laboratuvarının özellikleri ve bu konu üzerinde tasarlanmış diğer çalışmalarla karşılaştırma tablosu, Çizelge 5.1’de verilmektedir.

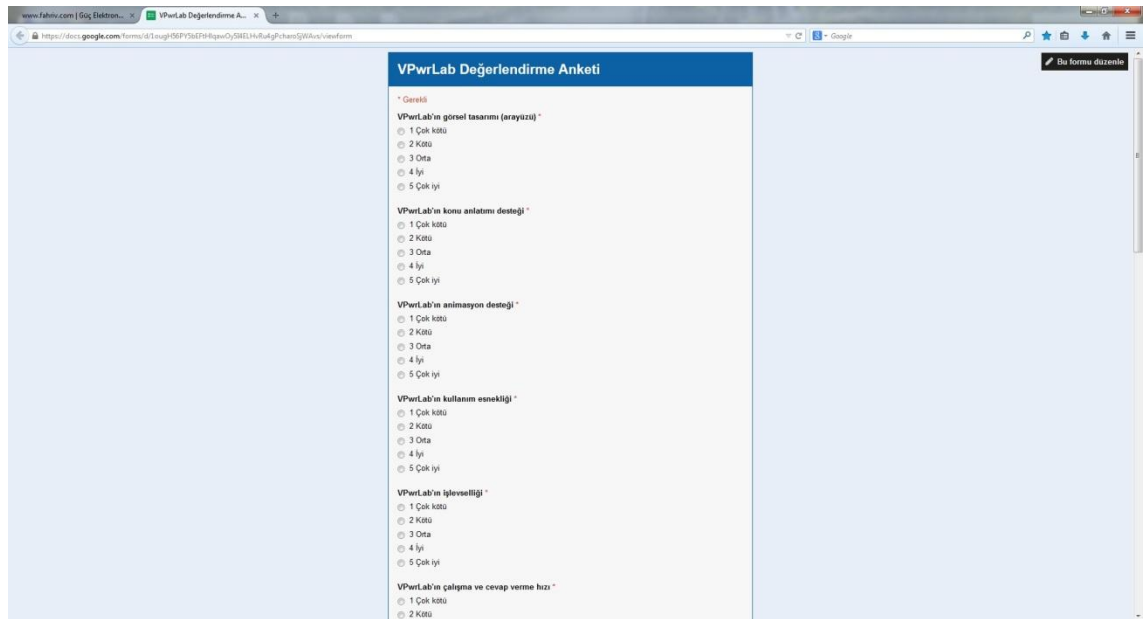
Çizelge 5.1. VPwrLab özelliklerinin diğer simülatörlerle karşılaştırılması

Özellikler	Simülatörler					
	Shen 2010	Walter 2008	Kolar 2010	Sullivan 2003	College of Engineering Ilha Solterira 2010	VPwrLab
Doğrultucular			✓	✓	✓	✓
Konvertörler	✓	✓	✓	✓		✓
İnvertörler	✓		✓			✓
Frekans dönüştürücüler						✓
Güç kaynakları						✓
Geçici durum analizi	✓				✓	✓
Tasarım	✓	✓	✓	✓		✓
Sanayi uygulama	✓					
Çevrimdışı çalışma		✓	✓		✓	✓
Rapor desteği			✓			✓
Çevrimiçi destek						✓
Konu anlatımı		✓	✓			✓
Animasyon			✓	✓		✓
Grafiksel sonuçlar	✓	✓	✓	✓	✓	✓
Çoklu dil desteği			✓			✓

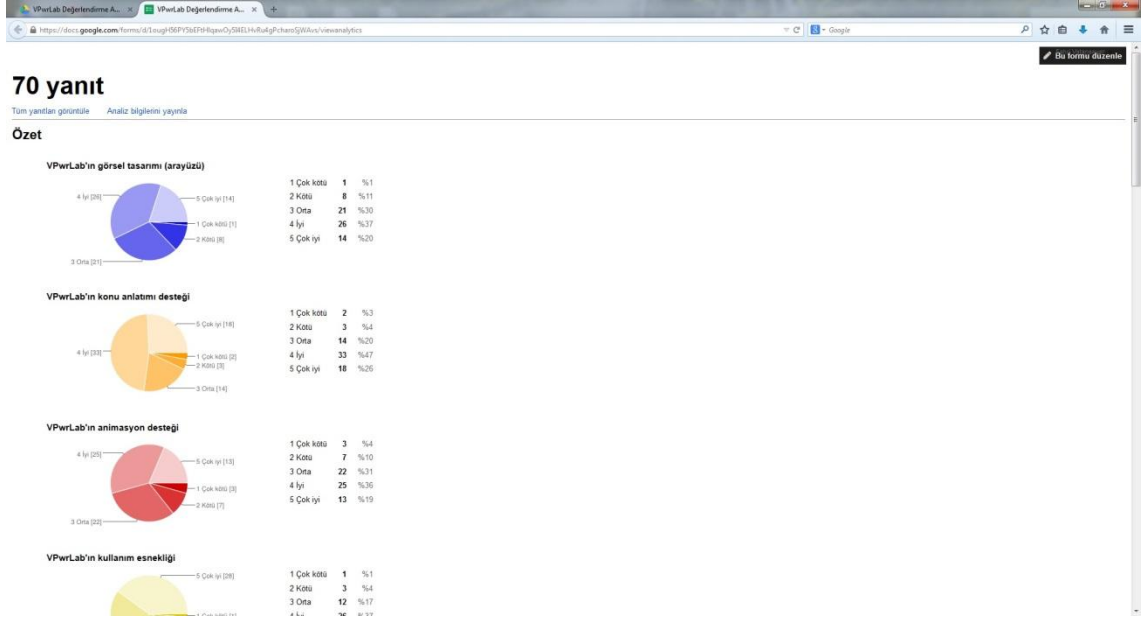
Geliştirilen VPwrLab simülâtörü, Uludağ Üniversitesi Mühendislik Fakültesi Elektrik-Elektronik Mühendisliği bölümü öğrencilerinin kullanıma sunulması için test edilmiştir. Öğrencilerden, VPwrLab'ı kullandıktan sonra anket doldurmaları istenmiştir. Ankete 70 öğrenci katılmıştır. Şekil 5.1'de VPwrLab programının ve anketinin yayınlandığı internet sayfası, Şekil 5.2'de erişilen bağlantıdaki anket soruları ve Şekil 5.3'de anket sonuçlarının ön izlemesi verilmiştir.



Şekil 5.1. VPwrLab simülâtörüne ve değerlendirme anketine erişilen site



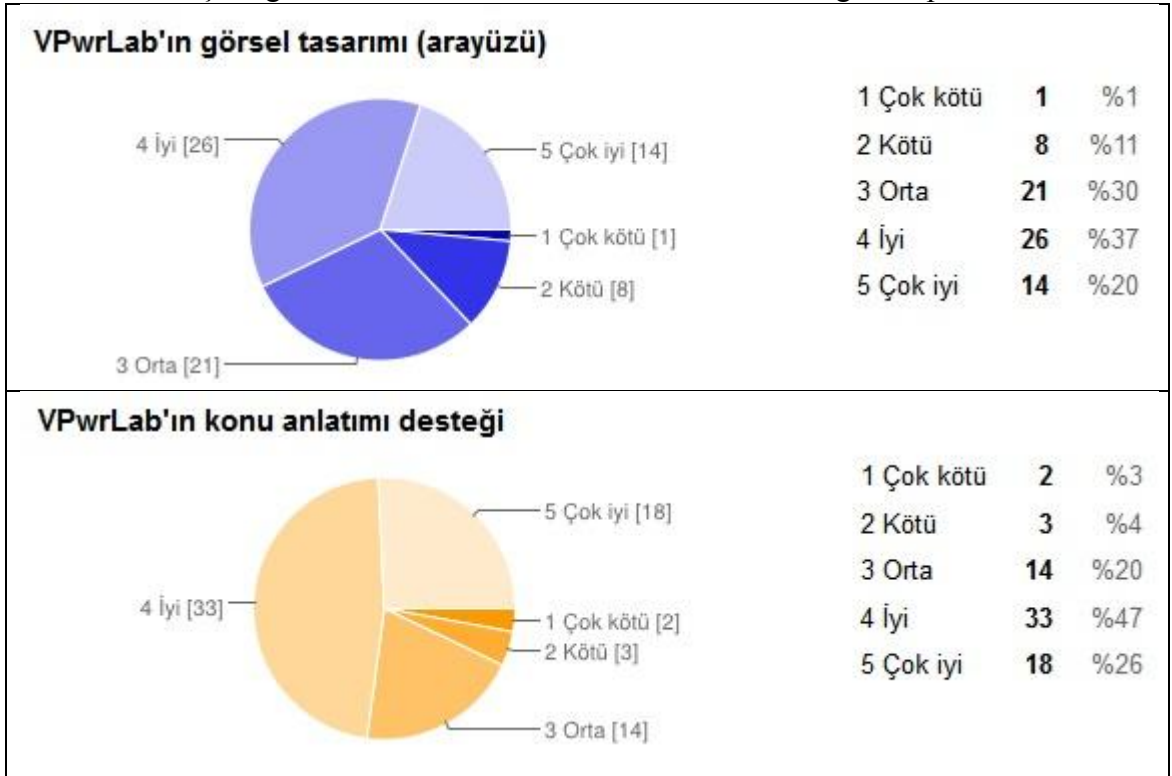
Şekil 5.2. VPwrLab değerlendirme anketi soruları



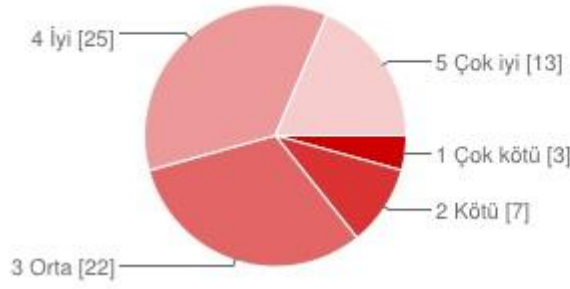
Şekil 5.3. Değerlendirme anketi sonuçları için genel ekran görüntüsü

Çizelge 5.2'de ankette sorulan sorulara karşılık katılımcıların(öğrencilerin) verdiği cevaplar yüzdelerle dilimlerle grafiksel olarak gösterilmektedir. Anket sonuçlarında geliştirilen yazılımın başarılı olduğu açıkça görülmektedir.

Çizelge 5.2. Anket soruları ve katılımcıların verdiği cevaplar

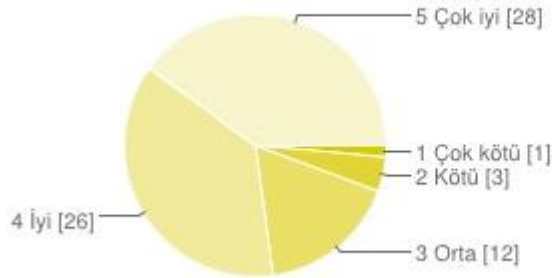


### VPwrLab'ın animasyon desteği



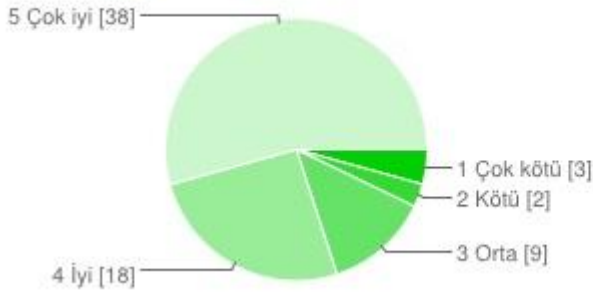
Kategori	Sayı	Oran (%)
1 Çok kötü	3	%4
2 Kötü	7	%10
3 Orta	22	%31
4 İyi	25	%36
5 Çok iyi	13	%19

### VPwrLab'ın kullanım esnekliği



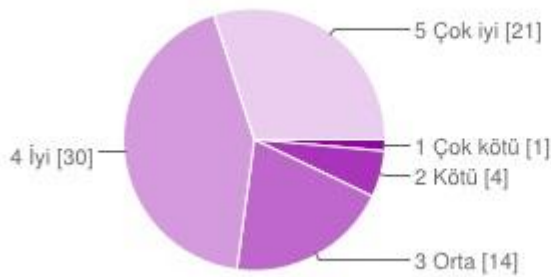
Kategori	Sayı	Oran (%)
1 Çok kötü	1	%1
2 Kötü	3	%4
3 Orta	12	%17
4 İyi	26	%37
5 Çok iyi	28	%40

### VPwrLab'ın işlevselliği



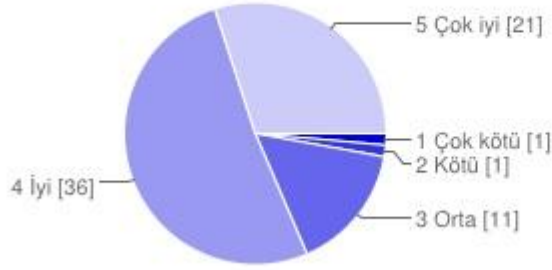
Kategori	Sayı	Oran (%)
1 Çok kötü	3	%4
2 Kötü	2	%3
3 Orta	9	%13
4 İyi	18	%26
5 Çok iyi	38	%54

### VPwrLab'ın çalışma ve cevap verme hızı



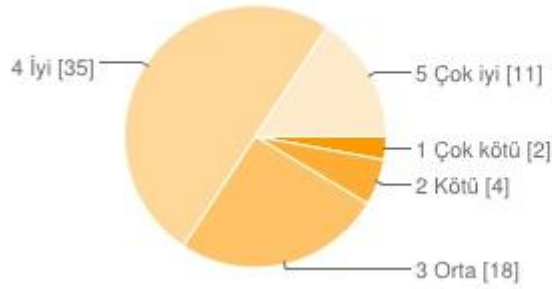
Kategori	Sayı	Oran (%)
1 Çok kötü	1	%1
2 Kötü	4	%6
3 Orta	14	%20
4 İyi	30	%43
5 Çok iyi	21	%30

### VPwrLab'ın deney raporu hazırlama ve gönderme modülü



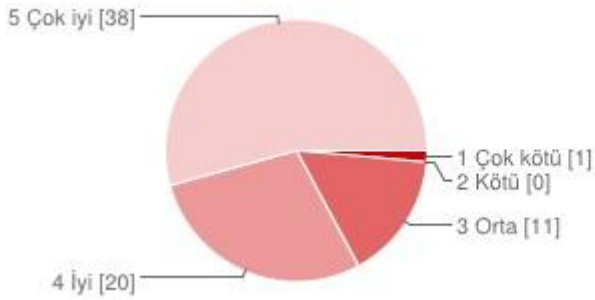
Rating	Count	Percentage
1 Çok kötü	1	%1
2 Kötü	1	%1
3 Orta	11	%16
4 İyi	36	%51
5 Çok iyi	21	%30

### VPwrLab'ın çevrimiçi destek modülü



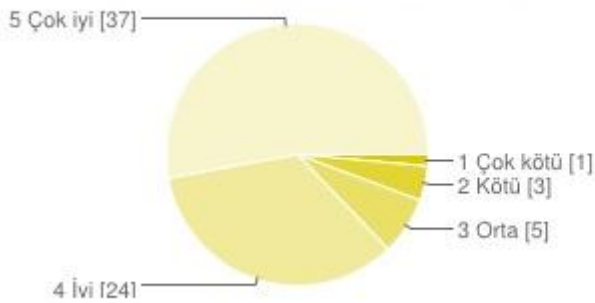
Rating	Count	Percentage
1 Çok kötü	2	%3
2 Kötü	4	%6
3 Orta	18	%26
4 İyi	35	%50
5 Çok iyi	11	%16

### VPwrLab'ın genel katkısı



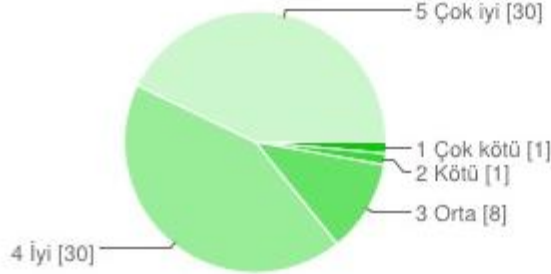
Rating	Count	Percentage
1 Çok kötü	1	%1
2 Kötü	0	%0
3 Orta	11	%16
4 İyi	20	%29
5 Çok iyi	38	%54

### VPwrLab, güç elektroniği devrelerinin öğrenilmesinde ve kavranılmasında sağladığı kolaylık



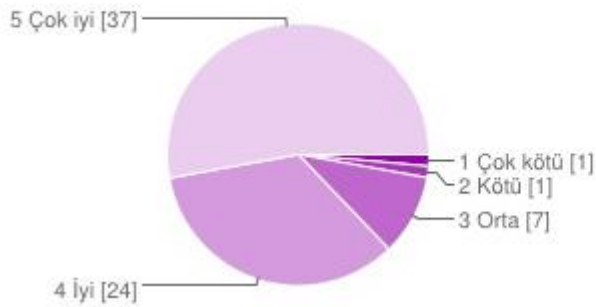
Rating	Count	Percentage
1 Çok kötü	1	%1
2 Kötü	3	%4
3 Orta	5	%7
4 İyi	24	%34
5 Çok iyi	37	%53

**Sınıf ortamındaki teorik sunumlara karşın VPwrLab'daki güç elektroniği devrelerinin görsel sunumlarının animasyonlar, konu anlatımları vb.) anlaşılabilirliği**



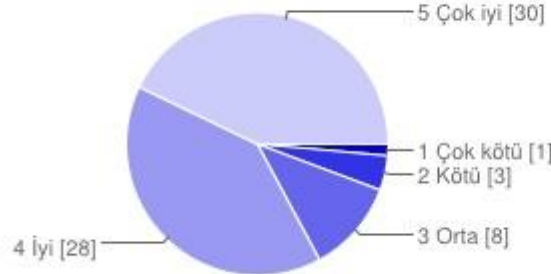
Değerlendirme	Sayı	Oran (%)
1 Çok kötü	1	%1
2 Kötü	1	%1
3 Orta	8	%11
4 İyi	30	%43
5 Çok iyi	30	%43

**Klasik laboratuvar ortamlarının zaman sınırlamasına karşın VPwrLab sanal laboratuvardaki esnek zaman kullanımının katkısı**



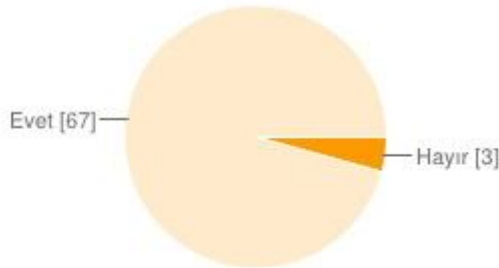
Değerlendirme	Sayı	Oran (%)
1 Çok kötü	1	%1
2 Kötü	1	%1
3 Orta	7	%10
4 İyi	24	%34
5 Çok iyi	37	%53

**VPwrLab'ın pratik bilgilere/çalışmalara katkısı**



Değerlendirme	Sayı	Oran (%)
1 Çok kötü	1	%1
2 Kötü	3	%4
3 Orta	8	%11
4 İyi	28	%40
5 Çok iyi	30	%43

**Mühendislik eğitimin diğer mesleki derslerinde VPwrLab gibi yazılımların olmasını ister misiniz?**



Değerlendirme	Sayı	Oran (%)
Hayır	3	%4
Evet	67	%96

## KAYNAKLAR

**Anonim, 2008.** Tristör Nedir. <http://www.diyot.net/tristor1.htm>-(Erişim tarihi: 02.04.2014).

**Anonim, 2011.** Conversion of m (MATLAB source code) file to .NET component in the form of dll (Dynamic Link Library) file using MATLAB. [https://www.mathworks.com/matlabcentral/answers/uploaded\\_files/5510/MATLAB%20-%20C%23%20interfacing.pdf](https://www.mathworks.com/matlabcentral/answers/uploaded_files/5510/MATLAB%20-%20C%23%20interfacing.pdf)-(Erişim tarihi: 06.01.2013).

**Associated Power Technologies, 2011.** Total Harmonic Distortion and Effects in Electrical Power Systems. <http://www.aspowertechnologies.com/resources/pdf/Total%20Harmonic%20Distortion.pdf>-(Erişim tarihi: 03.02.2014).

**Anwar, S. 2001.** Diodes : Power Electronics Handbook Industrial Electronics Series, Ed.: Skvarenina T. L., CRC Press, West Lafayette, Indiana, pp: 25-30.

**Anwar, S. 2001.** Schottky Diodes : Power Electronics Handbook Industrial Electronics Series, Ed.: Skvarenina T. L., CRC Press, West Lafayette Indiana, pp: 31-33.

**Anwar, S. 2001.** Thyristors : Power Electronics Handbook Industrial Electronics Series, Ed.: Skvarenina T. L., CRC Press, West Lafayette Indiana, pp: 34-44.

**Anwar, S. 2001.** Power Bipolar Junction Transistors : Power Electronics Handbook Industrial Electronics Series, Ed.: Skvarenina T. L., CRC Press, West Lafayette Indiana, pp: 44-61.

**Balamuralithara, B., Woods, P. C. 2008.** Virtual laboratories in engineering education the simulation lab and remote lab. *Comput. Appl. Eng. Educ.*, 17(1): 108-118.

**Barkhordarian., V. 2001.** MOSFETs : Power Electronics Handbook Industrial Electronics Series, Ed.: Skvarenina T. L., CRC Press, West Lafayette Indiana, pp: 61-71.

**Bayilmis, C. 2012.** Development of a Web-based educational interface using MATLAB builder NE with WebFigures for digital modulation techniques. *Comput. Appl. Eng. Educ.*, 20: 604-610.

**Bitar, S.J. Crowley, I. F., Leung, H.F. 2011.** PWM Techniques Pure Sine Wave Inverter. [http://www.wpi.edu/Pubs/E-project/Available/E-project-042711-190851/unrestricted/PWM\\_Techniques\\_final.pdf](http://www.wpi.edu/Pubs/E-project/Available/E-project-042711-190851/unrestricted/PWM_Techniques_final.pdf)-(Erişim tarihi: 03.31.2014).

**Bhunja, C., Giri, S., Kar, S., Haldar, S., Purkait, P. 2004.** A low cost PC-based virtual oscilloscope. *IEEE Trans. Educ.*, 47(2): 295-299.

**Chapra, S. C., Canale, R. P., Heperkan, H. (Çevirmen), Kesgin, U. (Çevirmen) 2008.** Yazılım ve Programlama Uygulamalarıyla Mühendisler için Sayısal Yöntemler. Literatür Yayınları, İstanbul, 1004s.

**Chattopadhyay, A. K. 2001.** AC AC Converters: Power Electronics Handbook. Ed.: Rashid, M.H., Academic Press, 2001, Canada, pp: 307-331.



- Chitode, J.S. 2009.** Signals and Systems Technical Publications. Pune, India, 535 pp.
- Colak, I., Irmak, E., Kabalci, E., Issi, F. 2011.** Design and implementation of a remote laboratory platform using MATLAB builder for NE. *Comput. Appl. Eng. Educ.*, DOI: 10.1002/cae.21553.
- College of Engineering Ilha of Solterira, 2010.** College of Engineering Ilha Solterira Power Electronics Laboratory. <http://www.feis.unesp.br/#!/dee->(Erişim tarihi: 12.04.2013).
- Czarkowski, D. 2001.** DC DC Converters: Power Electronics Handbook, Ed.: Rashid M. H., Academic Press, Canada , pp: 211-224.
- Dikshit, A., Wu, D. Wu, C., Zhao, W. 2005.** An online interactive simulation system for medical imaging education. *Comput. Med. Imag.*, 29: 395-404.
- Djordjevic, J., Nikolic, B., Milenkovic, A. 2005.** FlexibleWeb-based educational system for teaching computer architecture and organization. *IEEE Trans. Educ.*, 48(2): 264-273.
- Espinoza C., José R. 2001.** Inverters: Power Electronics Handbook, Ed.: Rashid, H.M., Academic Press, Canada, pp: 225-267.
- Gastli, A., 2011.** Advanced Power Electronics.  
[http://ape.gastli.info/Chapter4/APE\\_CH4.pdf](http://ape.gastli.info/Chapter4/APE_CH4.pdf)-(Erişim tarihi: 03.31.2014).
- Goyal, S.C., Bakshi U.A. 2008.** Principles of Control Systems. Technical publications pune, Pune , 996 pp.
- Güney, E., Ekşi, Z., Çakıroğlu, M. 2011.** WebECG: A novel ECG simülatör based on MATLAB Web Figure. *Adv. Eng. Softw.*, DOI: 10.1016/j.advengsoft. 2011.09.005.
- Hacı, B. 2010.** Güç Elektroniği. Birsen Yayınevi, İstanbul, 410 s.
- Hrishikesan S. 2013.** <http://www.electronicsandcommunications.com/2013/04/npn-and-pnp-transistor-structure.html>-(Erişim tarihi: 03.02.2014).
- Kolar, J.W., 2010.** Interactive Power Electronics Seminar (iPES).  
<http://www.ipes.ethz.ch>-(Erişim tarihi: 02.02.2014).
- Kreyzig E., Kreyzig H., Norminton H. 2011.** Laplace Transforms:. Advanced Engineering Mathematics. Ed.: Hoboken, S. C., Wiley & Sons Inc., pp: 204-253.
- Ladka,P. 2003.** ASP.NET for Web Designers. New Riders Publishing, USA, 624 pp.
- Lennart, L. 2000.** System Identification Toolbox. Mathworks, Natick, Massachusetts, 368 pp.
- Linn, Y. 2012.** An ultra-low cost wireless communications systems laboratory for education and research. *IEEE Trans. Educ.*, 55(2): 169-179.
- Mathworks, 2014.** Ordinary Differential Equations.  
<http://www.mathworks.com/help/matlab/ref/ode45.html>-(Erişim tarihi: 03.19.2014).

- Mathworks, 2014.** The language of technical computing. <http://www.mathworks.com/products/matlab->(Erişim tarihi: 03.19.2014).
- Mathworks, 2014.** Web, example guide. [http://www.mathworks.com/help/pdf\\_doc/compiler/example\\_guide.pdf-](http://www.mathworks.com/help/pdf_doc/compiler/example_guide.pdf-)(Erişim tarihi: 06.01.2012).
- Microsoft, 2014.** Visual Studio. <http://msdn.microsoft.com/tr-tr->(Erişim tarihi: 03.01.2014).
- Mohan, N., Undeland, T. M., Robbins, W. P., Tuncay N. (Çevirmen),, Göktaşan, M. (Çevirmen), Boğosyan S. (Çevirmen), 2007.** Güç Elektroniği, İstanbul, Literatür Yayınları, 874 s.
- Nurse, E., Abecassis, A. 1999.** Design of a Generic, Interactive Virtual and Remote Electrical Engineering, *ASEE/IEEE*,12c6:18-23.
- Ozpineci, M.,Tolbert, L. M., 2011.** Cycloconverters. <http://www.uv.es/emaset/iep00/descargas/cycloconvertertutorial.pdf->(Erişim tarihi: 08.08.2013).
- Québec, Hydro. 2013.** SimPowerSystems. Natick, Massachusetts, Mathworks, 620 pp.
- Rajashekara, K. 2001.** Overview : Power Electronics Handbook Industrial Electronics Series. Ed.: Skvarenina T. L., CRC Press, West Lafayette, Indiana, pp: 18-25.
- Rhoton, J. 2000.** Programmer's Guide to Internet Mail. Butterworth-Heinemann, Waltham, Massachusetts, 291 pp.
- Sevinç, A., 2012.** Doğrultucular. <http://www.atasevinc.net/ge/Dogrultucular.pdf->(Erişim tarihi: 02.07.2014).
- Shaffer, R. 2007.** Fundamentals of Power Electronics with Matlab. Charles River Media, Boston, Massachusetts, 384 pp.
- Shanku1, N., Sharko G., Prifti E. 2011.** Toward Virtual Real Laboratory on Electric Power, *International Journal of Pure and Applied Sciences and Technology*, 4(2): 85-97.
- Sharp, J.,Tezcan Ü. (Çevirmen) 2009.** Visual C# 2008 Adım Adım. Arkadaş Yayınevi, Ankara, 696 s.
- Shen, Z. J. 2010.** Power Semiconductor Research Laboratory <http://eecs.ucf.edu/~johnshen->(Erişim tarihi: 02.12.2013).
- Stanck, W.R. 2008.** Internet Information Services (IIS) Administrator's Pocket Consultant. Microsoft Press, Washington, USA, 544 pp.
- Stefanovic, M., Matijevic, M., Cvijetkovic, V., Simic, V. 2010.** Web-based laboratory for engineering education. *Comput. Appl. Eng. Educ.*, 18: 526-536.

**Sullivan, Charles R. 2003.** Three-Dimensional Animations of Power-Electronics Circuits Visualize Voltage and Current. *IEEE Power Electronics Specialists Conference* 34(3): 1210-1214.

**Tinymce, 2013.** Tinymce <http://www.tinymce.com>-(Erişim tarihi: 12.27.2013).

**Tzafestas, C.S., Palaiologou N., Alifragis, M. 2006.** Virtual and remote robotic laboratory Comparative experimental evaluation. *IEEE Trans. Educ.*, 49(3): 264-273.

**Walter- Schmidt, I. H., 2008.** Design of Switch Mode Power Supplies. <http://schmidt-walter.eit.h-da.de/smpe/smpe.html>-(Erişim tarihi: 02.02.2014).

**Weisstein, E. W., 2013.** Fast Fourier Transform. <http://mathworld.wolfram.com/FastFourierTransform.html>-(Erişim tarihi: 03.03.2013).

**Weisstein, E. W., 2013.** Fourier Transform Heaviside Function. <http://mathworld.wolfram.com/FourierTransformHeavisideStepFunction.html>-(Erişim tarihi: 03.03.2013).

**Weisstein, E. W., 2013.** Fourier Transform Delta Function. <http://mathworld.wolfram.com/FourierTransformDeltaFunction.html>-(Erişim tarihi: 03.03.2013).

**Weisstein, E. W., 2013.** Rectangular function. <http://mathworld.wolfram.com/RectangleFunction.html>-(Erişim tarihi: 03.03.2013).

**Weisstein, E. W., 2013.** Fourier Transform rectangular function. <http://mathworld.wolfram.com/FourierTransformRectangleFunction.html>-(Erişim tarihi: 03.03.2013).

**Weisstein, E. W., 2013.** Triangular function. <http://mathworld.wolfram.com/TriangleFunction.html>-(Erişim tarihi: 03.03.2013).

**Weisstein, E. W., 2013.** Ramp Function <http://mathworld.wolfram.com/RampFunction.html>-(Erişim tarihi:03.03.2013)

## ÖZGEÇMİŞ

Adı Soyadı : Nedim Aktan Yalçın  
Doğum Yeri ve Tarihi : Zonguldak 22/03/1988  
Yabancı Dili : İngilizce  
Eğitim Durumu (Kurum ve Yıl)  
Lise : Çankaya Lisesi (2002-2005)  
Lisans : Zonguldak Karaelmas Üniversitesi (2005-2010)  
Çalıştığı Kurumlar ve Yıl : 2012-2013 U. Ü. E.E. Müh. (Kısmi Zamanlı Öğrenci)  
2013- U.Ü. E.E. Müh. (Araştırma Görevlisi)  
İletişim (e-posta) : aktanyalcin@uludag.edu.tr  
Yayımları **F. Vatansver, N.A. Yalçın, 2012.** İşlemsel Kuvvetlendiricili Matematiksel Simülatör Tasarımı, Bursa, ELECO'2012, pp. 717-721  
**N.A. Yalçın, F. Vatansver, 2013.** Design of Operational Amplifier Simulator, Sakarya, 1st International Symposium on Innovative Technologies in Engineering and Science, ISITES2013, pp. 1039-1044  
**F. Vatansver, N.A. Yalcin, 2014.** Doğrultucu Devre Elemanlarının Genetik Algoritmalarla Optimizasyonu, Karabük, 2nd International Symposium on Innovative Technologies in Engineering and Science, ISITES2014, pp. 229-232