

**KOCAELİ ÜNİVERSİTESİ  
FEN BİLİMLERİ ENSTİTÜSÜ**

**ELEKTRİK MÜHENDİSLİĞİ ANABİLİM DALI**

**YÜKSEK LİSANS TEZİ**

**FARKLI DOĞRULTUCU YAPILARININ ÇEŞİTLİ YÜK  
DURUMLARI ALTINDAKİ HARMONİKLERİNİN  
İNCELENMESİ VE LİNEER MODELLERİN ELDE EDİLMESİ**

**EZGİ ÜNVERDİ AĞLAR**

**KOCAELİ 2014**

**KOCAELİ ÜNİVERSİTESİ**  
**FEN BİLİMLERİ ENSTİTÜSÜ**

**ELEKTRİK MÜHENDİSLİĞİ ANABİLİM DALI**

**YÜKSEK LİSANS TEZİ**


**FARKLI DOĞRULTUCU YAPILARININ ÇEŞİTLİ YÜK**  
**DURUMLARI ALTINDAKİ HARMONİKLERİNİN**  
**İNCELENMESİ VE LİNEER MODELLERİN ELDE EDİLMESİ**

**EZGİ ÜNVERDİ AĞLAR**

**Doç.Dr. Ali Bekir YILDIZ**  
**Danışman, Kocaeli Üniv.**

**Prof.Dr. Bekir ÇAKIR**  
**Jüri Üyesi, Kocaeli Üniv.**

**Yrd.Doç.Dr. A. Hülya OBDAN**  
**Jüri Üyesi, Yıldız Teknik Üniv.**

  
.....

  
.....

  
.....

**Tezin Savunulduğu Tarih: 09.07.2014**

## ÖNSÖZ VE TEŞEKKÜRLER

Kalite, hayatın her alanında karşımıza çıkan ve hayat standartlarını belirleyen en önemli faktördür. Günümüzde enerji kaynaklarının sınırlı oluşu, mevcut sistemleri yürütmeye karşılaşılan yüksek maliyetler, yenilenebilir enerji türlerinden yeterli seviyede yararlanılamaması, enerji sektöründe kaliteyi popüler hale getirmiştir. Her ne kadar enerji üretimindeki bazı problemlerin önüne geçilse de enerji, özellikle tüketici tarafına verimsiz ulaştığında sistemde birçok problemler meydana gelecektir. Harmonik problemleri, kaliteli bir enerjiyi engelleyen en büyük faktörlerdir. Özellikle ciddi harmonik mertebelerinin olduğu sistemlerde, doğru yapılamayan harmonik analizler ciddi tehlikelere yol açmaktadır.

Bu çalışmada, en önemli harmonik kaynaklarından olan, AA/DA dönüştürücüler için yeni bir eşdeğer devre modeli ileri sürülmüştür. Modelde, gerçek ve doğru bir harmonik analizi için, dönüştürücü sisteminin hem AA hem de DA tarafındaki akımın düzgün olmayan yapısı göz önüne alınmıştır. Ayrıca AA/DA dönüştürücüsü bir anahtarlama devresi olmasına rağmen, ileri sürülen modelle söz konusu devre harmonikler açısından doğrusal bir devreye dönüştürülmüştür. İleri sürülen eşdeğer devre modelinin test edilmesi amacıyla, modelden elde edilen benzetim sonuçları ile gerçek devreye ait deneysel sonuçlar karşılaştırılmış ve sonuçların birbirleri ile uyumlu olduğu gözlemlenmiştir.

İnsani ve ahlaki değerleriyle hayatı ilk gününden beri omuzlamamda, dik durabilmemde en büyük pay sahibi olan ve evlatları olmaktan onur duyduğum annem Fatma ÜNVERDİ ile babam Sami ÜNVERDİ'ye, gece çalışmalarımda kahvemi eksik etmeyen kuzenim Meryem ÖZTÜRK'e ve tabiki beni sabırla, bıkmadan destekleyen sevgili eşim Ahmet AĞLAR'a teşekkürlerimi ve şükranlarımı sunarım.

Akademik hayatımın başlangıcı sayılan bu tez çalışmasının araştırılmasında, yürütülmesinde ve oluşturulmasında, her adımda, ilgi ve desteğini esirgemeyen, bilgi ve tecrübelerinden yararlandığım, yönlendirmeleriyle ve bilgilendirmeleriyle bana yol gösterici olan Sayın danışmanım Doç. Dr. Ali Bekir YILDIZ hocama ne kadar teşekkür etsem azdır. Ayrıca, yüksek lisans yaptığım süreçte gerek bilgisiyle, gerek manevi desteğiyle yardımını esirgemeyen çalışma arkadaşım Sayın Arş. Grv. İbrahim Gürsu TEKDEMİR'e, diğer tüm çalışma arkadaşlarıma ve saygıdeğer hocalarıma teşekkür ederim.

Yaptığım bu çalışmanın, yapılacak yeni çalışmalara yol gösterici olmasını, araştırmacılarda ilgi uyandırmasını temenni ederim.

Temmuz - 2014

Ezgi ÜNVERDİ AĞLAR

## İÇİNDEKİLER

ÖNSÖZ VE TEŞEKKÜRLER.....	i
İÇİNDEKİLER .....	ii
ŞEKİLLER DİZİNİ.....	v
TABLolar DİZİNİ .....	xi
SİMGELER DİZİNİ VE KISALTMALAR .....	xii
ÖZET.....	xv
ABSTRACT .....	xvi
GİRİŞ .....	1
1. HARMONİKLER .....	5
1.1. Harmonik Büyüklüklere Ait Tanımlar ve Kavramlar .....	6
1.1.1. Sinüsoidal olmayan durumda elektriksel büyüklükler .....	6
1.1.2. Toplam harmonik distorsiyonu (THD) .....	7
1.1.3. Toplam talep distorsiyonu (TTD) .....	8
1.1.4. Şekil faktörü .....	8
1.1.5. Tepe faktörü .....	8
1.1.6. Transformatör k-faktörü .....	9
1.1.7. Distorsiyon güç faktörü .....	9
1.2. Harmonik Kaynakları .....	10
1.3. Harmoniklerin Meydana Getirdiği Etkiler .....	11
1.4. Harmonik Standartları .....	16
1.5. Harmoniklerin Filtrelenmesi .....	18
1.5.1. Pasif filtreler .....	18
1.5.2. Aktif filtreler .....	20
2. SİNÜSOİDAL OLMAYAN DALGALAR VE ANALİZİ.....	22
2.1. Fourier Serisi .....	22
2.2. Dalga Biçimlerinde Simetri.....	24
2.3. Çeşitli Dalgaların Fourier Serisi Olarak İfadeleri .....	27
2.3.1. Yarım dalga doğrultulmuş sinüs dalgası .....	27
2.3.2. Çift yönlü kare dalga .....	28
2.3.3. Tam dalga doğrultulmuş sinüs dalgası .....	29
2.3.4. Tek yönlü kare dalga .....	29
2.3.5. Üçgen dalga.....	30
2.3.6. Testere dişi dalga.....	30
2.4. Devre Analizi Uygulamaları .....	31
3. DOĞRULTUCULAR / AA-DA DÖNÜŞTÜRÜCÜLER .....	34
3.1. Doğrultucuların Sınıflandırılması .....	35
3.1.1. Kontrolsüz doğrultucular.....	36
3.1.1.1. Bir fazlı yarım dalga kontrolsüz doğrultucu .....	37
3.1.1.2. İki fazlı yarım dalga kontrolsüz doğrultucu.....	40
3.1.1.3. Üç fazlı yarım dalga kontrolsüz doğrultucu.....	43
3.1.1.4. Bir fazlı tam dalga kontrolsüz doğrultucu .....	46
3.1.1.5. İki fazlı tam dalga kontrolsüz doğrultucu .....	48
3.1.1.6. Üç fazlı tam dalga kontrolsüz doğrultucu.....	51

3.1.2. Kontrollü doğrultucular .....	54
3.1.2.1. Bir fazlı yarım dalga kontrollü doğrultucu .....	55
3.1.2.2. İki fazlı yarım dalga kontrollü doğrultucu .....	58
3.1.2.3. Üç fazlı yarım dalga kontrollü doğrultucu .....	62
3.1.2.4. Bir fazlı tam dalga kontrollü doğrultucu .....	68
3.1.2.5. İki fazlı tam dalga kontrollü doğrultucu .....	72
3.1.2.6. Üç fazlı tam dalga kontrollü doğrultucu .....	76
3.2. Doğrultucu Devrelerinin Genel Değerlendirilmesi .....	81
4. TÜM DOĞRULTUCU DEVRELERİ İÇİN İLERİ SÜRÜLEN HARMONİKEŞDEĞER DEVRE MODELİ .....	83
4.1. Geleneksel Eşdeğer Devre Modeli .....	84
4.2. İleri Sürülen Eşdeğer Devre Modeli .....	85
4.3. Doğrultucu Devrelerinin Eşdeğer Devre Modelinin Elde Edilmesi .....	92
4.3.1. Bir fazlı yarım dalga kontrolsüz doğrultucu için model parametreleri .....	92
4.3.2. İki fazlı yarım dalga kontrolsüz doğrultucu için model parametreleri .....	94
4.3.3. Üç fazlı yarım dalga kontrolsüz doğrultucu için model parametreleri .....	96
4.3.4. Bir fazlı tam dalga kontrolsüz doğrultucu için model parametreleri .....	98
4.3.5. İki fazlı tam dalga kontrolsüz doğrultucu için model parametreleri .....	100
4.3.6. Üç fazlı tam dalga kontrolsüz doğrultucu için model parametreleri .....	102
4.3.7. Bir fazlı yarım dalga kontrollü doğrultucu için model parametreleri .....	104
4.3.8. İki fazlı yarım dalga kontrollü doğrultucu için model parametreleri .....	107
4.3.9. Üç fazlı yarım dalga kontrollü doğrultucu için model parametreleri .....	109
4.3.10. Bir fazlı tam dalga kontrollü doğrultucu için model parametreleri .....	111
4.3.11. İki fazlı tam dalga kontrollü doğrultucu için model parametreleri .....	114
4.3.12. Üç fazlı tam dalga kontrollü doğrultucu için model parametreleri .....	116
5. İLERİ SÜRÜLEN EŞDEĞER DEVRE MODELİNİN TEST EDİLMESİ .....	119
5.1. Deneysel ve Benzetim Sonuçları .....	120
5.1.1. Bir fazlı yarım dalga kontrolsüz doğrultucu uygulama devresi .....	121
5.1.2. Üç fazlı yarım dalga kontrolsüz doğrultucu uygulama devresi .....	124
5.1.3. Bir fazlı tam dalga kontrolsüz doğrultucu uygulama devresi .....	128
5.1.4. Üç fazlı tam dalga kontrolsüz doğrultucu devresi .....	132
5.1.5. Bir fazlı yarım dalga kontrollü doğrultucu devresi .....	136
5.1.6. Üç fazlı yarım dalga kontrollü doğrultucu devresi .....	140
5.1.7. Bir fazlı tam dalga kontrollü doğrultucu devresi .....	144
5.1.8. Üç fazlı tam dalga kontrollü doğrultucu devresi .....	148
5.2. Örnek Bir Doğrultucu Devresi İçin Sonuçların Karşılaştırılması .....	152
6. SONUÇLAR VE ÖNERİLER .....	156

KAYNAKLAR .....	158
KİŞİSEL YAYIN VE ESERLER .....	162
ÖZGEÇMİŞ .....	163

## ŞEKİLLER DİZİNİ

Şekil 1.1.	Temel ve harmonik bileşenler.....	5
Şekil 1.2.	Seri pasif filtre devre uygulaması .....	18
Şekil 1.3.	Paralel Filtreler a) Tek ayarlı filtre, b) Çift ayarlı filtre.....	19
Şekil 1.4.	Sönümlü filtreler, a) 1. derece, b) 2. derece, c) 3. derece, d) C tipi .....	20
Şekil 1.5.	Paralel aktif filtrenin şematik gösterimi.....	21
Şekil 1.6.	Seri aktif filtrenin şematik gösterimi .....	21
Şekil 2.1.	Çift fonksiyon simetriye sahip örnek fonksiyonlar.....	25
Şekil 2.2.	Tek fonksiyon simetriye sahip örnek fonksiyonlar.....	25
Şekil 2.3.	Yarım dalga simetriye sahip örnek fonksiyonlar .....	26
Şekil 2.4.	Yarım dalga doğrultulmuş sinüs dalgası.....	27
Şekil 2.5.	Çift yönlü kare dalga.....	28
Şekil 2.6.	Tam doğrultulmuş sinüs dalgası .....	29
Şekil 2.7.	Tek yönlü kare dalga.....	30
Şekil 2.8.	Üçgen dalga .....	30
Şekil 2.9.	Testere dişi dalga .....	31
Şekil 2.10.	a) Doğrusal bir devre, b) Eşdeğer devre modeli .....	32
Şekil 3.1.	Temel Dönüştürücüler .....	34
Şekil 3.2.	Doğrultucuların temel blok şeması (Bodur,2012) .....	36
Şekil 3.3.	Doğrultucuların sınıflandırılması (Bodur, 2012).....	36
Şekil 3.4.	Bir faz yarım dalga kontrolsüz doğrultucu devresi.....	37
Şekil 3.5.	Bir fazlı yarım dalga kontrolsüz doğrultucuya a) direnç, b) endüktif yük, c) akım kaynağı bağlı olması durumunda temel dalga şekilleri .....	38
Şekil 3.6.	İki fazlı yarım dalga kontrolsüz doğrultucu devresi .....	40
Şekil 3.7.	İki fazlı yarım dalga kontrolsüz doğrultucuya a) direnç, b) endüktif yük, c) akım kaynağı bağlı olması durumunda temel dalga şekilleri .....	41
Şekil 3.8.	Üç fazlı yarım dalga kontrolsüz doğrultucu devresi .....	43
Şekil 3.9.	Üç fazlı yarım dalga kontrolsüz doğrultucuya a) direnç, b) endüktif yük, c) akım kaynağı bağlı olması durumunda temel dalga şekilleri .....	44
Şekil 3.10.	Bir fazlı tam dalga kontrolsüz doğrultucu devresi .....	46
Şekil 3.11.	Bir fazlı tam dalga kontrolsüz doğrultucuya a) direnç, b) endüktif yük, c) akım kaynağı bağlı olması durumunda temel dalga şekilleri .....	47
Şekil 3.12.	İki fazlı tam dalga kontrolsüz doğrultucu devresi .....	48
Şekil 3.13.	İki fazlı tam dalga kontrolsüz doğrultucuya a) direnç, b) endüktif yük, c) akım kaynağı bağlı olması durumunda temel dalga şekilleri .....	49
Şekil 3.14.	Üç fazlı tam dalga kontrolsüz doğrultucu devresi .....	51

Şekil 3.15.	Üç fazlı tam dalga kontrolsüz doğrultucuya a) direnç, b) endüktif yük, c) akım kaynağı bağlı olmasında temel dalga şekilleri .....	52
Şekil 3.16.	Bir fazlı yarım dalga kontrollü doğrultucu devresi.....	55
Şekil 3.17.	Bir fazlı yarım dalga kontrollü doğrultucuya a) direnç, b) endüktif yük, c) akım kaynağı bağlı olmasında temel dalga şekilleri .....	55
Şekil 3.18.	İki fazlı yarım dalga kontrollü doğrultucu devresi .....	58
Şekil 3.19.	İki fazlı yarım dalga kontrollü doğrultucunun a) direnç, b) endüktif yük, c) akım kaynağı bağlı olmasında temel dalga şekilleri .....	59
Şekil 3.20.	Üç fazlı yarım dalga kontrollü doğrultucu devresi .....	63
Şekil 3.21.	Üç fazlı yarım dalga kontrollü doğrultucunun a) direnç, b) endüktif yük, c) akım kaynağı bağlı olmasında temel dalga şekilleri .....	63
Şekil 3.22.	Bir fazlı tam dalga kontrollü doğrultucu devresi .....	68
Şekil 3.23.	Bir fazlı tam dalga kontrollü doğrultucunun a) direnç, b) endüktif yük, c) akım kaynağı bağlı olmasında temel dalga şekilleri .....	69
Şekil 3.24.	İki fazlı tam dalga kontrollü doğrultucu devresi.....	72
Şekil 3.25.	İki fazlı tam dalga kontrollü doğrultucunun a) direnç, b) endüktif yük, c) akım kaynağı bağlı olmasında temel dalga şekilleri .....	73
Şekil 3.26.	Üç fazlı tam dalga kontrollü doğrultucu devresi .....	76
Şekil 3.27.	Üç fazlı tam dalga kontrollü doğrultucunun a) direnç, b) endüktif yük, c) akım kaynağı bağlı olmasında temel dalga şekilleri .....	77
Şekil 4.1.	Tam dalga kontrolsüz doğrultucu devresi.....	84
Şekil 4.2.	AA taraftaki $i_a(t)$ için geleneksel devre modeli .....	84
Şekil 4.3.	Geleneksel duruma ilişkin dalga şekilleri a)Yük gerilimi ve akımı, b) kaynak gerilimi ve akımı .....	85
Şekil 4.4.	Düzgün olmayan yük durumuna ilişkin dalga şekilleri a)Yük gerilimi ve akımı, b) Kaynak gerilimi ve akımı.....	85
Şekil 4.5.	Yüke uygulanan eşdeğer gerilim kaynağı $v_d(t)$ .....	86
Şekil 4.6.	Fourier serisine ilişkin eşdeğer gerilim kaynakları.....	87
Şekil 4.7.	AA kısma ait harmonik model.....	89
Şekil 4.8.	Doğrultucu devresine ait ileri sürülen tam harmonik eşdeğer devre modeli .....	90
Şekil 4.9.	Temel bileşen eşdeğer devre modeli.....	91
Şekil 4.10.	Harmonik bileşen eşdeğer devre modeli.....	91
Şekil 4.11.	DA bileşen eşdeğer devre modeli .....	92
Şekil 5.1.	TQ NE9023 tristör ve diyot eğitim seti .....	119
Şekil 5.2.	Fluke 435-II güç kalite analizörü.....	119
Şekil 5.3.	Bir fazlı yarım dalga kontrolsüz doğrultucu devresine ait benzetim sonuçları a) giriş gerilimi $v_a(t)$ , çıkış gerilimi $v_d(t)$ , b) çıkış gerilimi $v_d(t)$ ve çıkış akımı $i_d(t)$ , c) giriş gerilimi $v_a(t)$ ve giriş akımı $i_a(t)$ .....	121



Şekil 5.4.	Bir fazlı yarım dalga kontrolsüz doğrultucu devresine ait deneysel sonuçlar a) giriş gerilimi $v_a(t)$ , çıkış gerilimi $v_d(t)$ , b) çıkış gerilimi $v_d(t)$ ve çıkış akımı $i_d(t)$ , c) giriş gerilimi $v_a(t)$ ve giriş akımı $i_a(t)$ .....	122
Şekil 5.5	Bir fazlı yarım dalga kontrolsüz doğrultucunun eşdeğer devresine ait a) çıkış gerilimi temel bileşeni $v_{df}(t)$ ve harmonik bileşeni $v_{dh}(t)$ , b) giriş akımı temel bileşeni $i_{af}(t)$ ve harmonik bileşeni $i_{ah}(t)$ .....	123
Şekil 5.6.	Bir fazlı yarım dalga kontrolsüz doğrultucuya ait a) $v_d(t)$ harmonik spektrumu b) $i_a(t)$ harmonik spektrumu .....	123
Şekil 5.7.	Bir fazlı yarım dalga kontrolsüz doğrultucunun deneysel sonuçlarına ait a) çıkış gerilimi temel bileşeni $v_{df}(t)$ ve harmonik bileşeni $v_{dh}(t)$ , b) giriş akımı temel bileşeni $i_{af}(t)$ ve harmonik bileşeni $i_{ah}(t)$ .....	124
Şekil 5.8.	Üç fazlı yarım dalga kontrolsüz doğrultucu devresine ait benzetim sonuçları a) giriş gerilimleri $v_a(t)$ , $v_b(t)$ , $v_c(t)$ ve çıkış gerilimi $v_d(t)$ , b) çıkış gerilimi $v_d(t)$ ve çıkış akımı $i_d(t)$ , c) giriş gerilimi $v_a(t)$ ve giriş akımı $i_a(t)$ .....	125
Şekil 5.9.	Üç fazlı yarım dalga kontrolsüz doğrultucu devresine ait deneysel sonuçlar a) giriş gerilimi $v_a(t)$ , $v_b(t)$ , $v_c(t)$ ve çıkış gerilimi $v_d(t)$ , b) çıkış gerilimi $v_d(t)$ ve çıkış akımı $i_d(t)$ , c) giriş gerilimi $v_a(t)$ ve giriş akımı $i_a(t)$ .....	126
Şekil 5.10.	Üç fazlı yarım dalga kontrolsüz doğrultucunun eşdeğer devresine ait a) çıkış gerilimi temel bileşeni $v_{df}(t)$ ve harmonik bileşeni $v_{dh}(t)$ , b) giriş akımı temel bileşeni $i_{af}(t)$ ve harmonik bileşeni $i_{ah}(t)$ .....	127
Şekil 5.11.	Üç fazlı yarım dalga kontrolsüz doğrultucuya ait a) $v_d(t)$ harmonik spektrumu b) $i_a(t)$ harmonik spektrumu .....	127
Şekil 5.12.	Üç fazlı yarım dalga kontrolsüz doğrultucunun deneysel sonuçlarına ait a) çıkış gerilimi temel bileşeni $v_{df}(t)$ ve harmonik bileşeni $v_{dh}(t)$ , b) giriş akımı temel bileşeni $i_{af}(t)$ ve harmonik bileşeni $i_{ah}(t)$ .....	128
Şekil 5.13.	Bir fazlı tam dalga kontrolsüz doğrultucu devresine ait benzetim sonuçları a) giriş gerilimi $v_a(t)$ , çıkış gerilimi $v_d(t)$ , b) çıkış gerilimi $v_d(t)$ ve çıkış akımı $i_d(t)$ , c) giriş gerilimi $v_a(t)$ ve giriş akımı $i_a(t)$ .....	129
Şekil 5.14.	Bir fazlı tam dalga kontrolsüz doğrultucu devresine ait deneysel sonuçlar a) giriş gerilimi $v_a(t)$ , çıkış gerilimi $v_d(t)$ , b) çıkış gerilimi $v_d(t)$ ve çıkış akımı $i_d(t)$ , c) giriş gerilimi $v_a(t)$ ve giriş akımı $i_a(t)$ .....	130
Şekil 5.15.	Bir fazlı tam dalga kontrolsüz doğrultucunun eşdeğer devresine ait a) çıkış gerilimi temel bileşeni $v_{df}(t)$ ve harmonik bileşeni $v_{dh}(t)$ , b) giriş akımı temel bileşeni $i_{af}(t)$ ve harmonik bileşeni $i_{ah}(t)$ .....	131
Şekil 5.16.	Bir fazlı tam dalga kontrolsüz doğrultucuya ait a) $v_d(t)$ harmonik spektrumu b) $i_a(t)$ harmonik spektrumu.....	131

Şekil 5.17.	Bir fazlı tam dalga kontrolsüz doğrultucunun deneysel sonuçlarına ait a) çıkış gerilimi temel bileşeni $v_{df}(t)$ ve harmonik bileşeni $v_{dh}(t)$ , b) giriş akımı temel bileşeni $i_{af}(t)$ ve harmonik bileşeni $i_{ah}(t)$ .....	132
Şekil 5.18.	Üç fazlı tam dalga kontrolsüz doğrultucu devresine ait benzetim sonuçları a) giriş gerilimleri ve çıkış gerilimi $v_d(t)$ , b) çıkış gerilimi $v_d(t)$ ve çıkış akımı $i_d(t)$ , c) giriş gerilimi $v_a(t)$ ve giriş akımı $i_a(t)$ .....	133
Şekil 5.19.	Üç fazlı tam dalga kontrolsüz doğrultucu devresine ait deneysel sonuçlar a) çıkış gerilimi $v_d(t)$ , b) çıkış gerilimi $v_d(t)$ ve çıkış akımı $i_d(t)$ , c) giriş gerilimi $v_a(t)$ ve giriş akımı $i_a(t)$ .....	134
Şekil 5.20.	Üç fazlı tam dalga kontrolsüz doğrultucunun eşdeğer devresine ait a) çıkış gerilimi temel bileşeni $v_{df}(t)$ ve harmonik bileşeni $v_{dh}(t)$ , b) giriş akımı temel bileşeni $i_{af}(t)$ ve harmonik bileşeni $i_{ah}(t)$ .....	135
Şekil 5.21.	Üç fazlı tam dalga kontrolsüz doğrultucuya ait a) $v_d(t)$ harmonik spektrumu b) $i_a(t)$ harmonik spektrumu.....	135
Şekil 5.22.	Üç fazlı tam dalga kontrolsüz doğrultucunun deneysel sonuçlarına ait a) çıkış gerilimi temel bileşeni $v_{df}(t)$ ve harmonik bileşeni $v_{dh}(t)$ , b) giriş akımı temel bileşeni $i_{af}(t)$ ve harmonik bileşeni $i_{ah}(t)$ .....	136
Şekil 5.23.	Bir fazlı yarım dalga kontrollü doğrultucu devresine ait benzetim sonuçları a) giriş gerilimi $v_a(t)$ , çıkış gerilimi $v_d(t)$ , b) çıkış gerilimi $v_d(t)$ ve çıkış akımı $i_d(t)$ , c) giriş gerilimi $v_a(t)$ ve giriş akımı $i_a(t)$ .....	137
Şekil 5.24.	Bir fazlı yarım dalga kontrollü doğrultucu devresine ait deneysel sonuçlar a) giriş gerilimi $v_a(t)$ , çıkış gerilimi $v_d(t)$ , b) çıkış gerilimi $v_d(t)$ ve çıkış akımı $i_d(t)$ , c) giriş gerilimi $v_a(t)$ ve giriş akımı $i_a(t)$ .....	138
Şekil 5.25.	Bir fazlı yarım dalga kontrollü doğrultucunun eşdeğer devresine ait a) çıkış gerilimi temel bileşeni $v_{df}(t)$ ve harmonik bileşeni $v_{dh}(t)$ , b) giriş akımı temel bileşeni $i_{af}(t)$ ve harmonik bileşeni $i_{ah}(t)$ .....	139
Şekil 5.26.	Bir fazlı yarım dalga kontrollü doğrultucuya ait a) $v_d(t)$ harmonik spektrumu b) $i_a(t)$ harmonik spektrumu.....	139
Şekil 5.27.	Bir fazlı yarım dalga kontrollü doğrultucunun deneysel sonuçlarına ait a) çıkış gerilimi temel bileşeni $v_{df}(t)$ ve harmonik bileşeni $v_{dh}(t)$ , b) giriş akımı temel bileşeni $i_{af}(t)$ ve harmonik bileşeni $i_{ah}(t)$ .....	140
Şekil 5.28.	Üç fazlı yarım dalga kontrollü doğrultucu devresine ait benzetim sonuçları a) giriş gerilimi $v_a(t)$ , çıkış gerilimi $v_d(t)$ , b) çıkış gerilimi $v_d(t)$ ve çıkış akımı $i_d(t)$ , c) giriş gerilimi $v_a(t)$ ve giriş akımı $i_a(t)$ .....	141
Şekil 5.29.	Üç fazlı yarım dalga kontrollü doğrultucu devresine ait deneysel sonuçlar a) giriş gerilimi $v_a(t)$ , çıkış gerilimi $v_d(t)$ , b) çıkış gerilimi $v_d(t)$ ve çıkış akımı $i_d(t)$ , c) giriş gerilimi $v_a(t)$ ve giriş akımı $i_a(t)$ .....	142

Şekil 5.30.	Üç fazlı yarım dalga kontrollü doğrultucunun eşdeğer devresine ait a) çıkış gerilimi temel bileşeni $v_{df}(t)$ ve harmonik bileşeni $v_{dh}(t)$ , b) giriş akımı temel bileşeni $i_{af}(t)$ ve harmonik bileşeni $i_{ah}(t)$ .....	143
Şekil 5.31.	Üç fazlı yarım dalga kontrollü doğrultucuya ait a) $v_d(t)$ harmonik spektrumu b) $i_a(t)$ harmonik spektrumu.....	143
Şekil 5.32.	Üç fazlı yarım dalga kontrollü doğrultucu uygulama devresine ait a) çıkış gerilimi temel bileşeni $v_{df}(t)$ ve harmonik bileşeni $v_{dh}(t)$ b) giriş akımı temel bileşeni $i_{af}(t)$ ve harmonik bileşeni $i_{ah}(t)$ .....	144
Şekil 5.33.	Bir fazlı tam dalga kontrollü doğrultucu devresine ait benzetim sonuçları a) giriş gerilimi $v_a(t)$ , çıkış gerilimi $v_d(t)$ , b) çıkış gerilimi $v_d(t)$ ve çıkış akımı $i_d(t)$ , c) giriş gerilimi $v_a(t)$ ve giriş akımı $i_a(t)$ .....	145
Şekil 5.34.	Bir fazlı tam dalga kontrollü doğrultucu devresine ait deneysel sonuçlar a) giriş gerilimi $v_a(t)$ , çıkış gerilimi $v_d(t)$ , b) çıkış gerilimi $v_d(t)$ ve çıkış akımı $i_d(t)$ , c) giriş gerilimi $v_a(t)$ ve giriş akımı $i_a(t)$ .....	146
Şekil 5.35.	Bir fazlı tam dalga kontrollü doğrultucunun eşdeğer devresine ait a) çıkış gerilimi temel bileşeni $v_{df}(t)$ ve harmonik bileşeni $v_{dh}(t)$ , b) giriş akımı temel bileşeni $i_{af}(t)$ ve harmonik bileşeni $i_{ah}(t)$ .....	147
Şekil 5.36.	Bir fazlı tam dalga kontrollü doğrultucuya ait a) $v_d(t)$ harmonik spektrumu b) $i_a(t)$ harmonik spektrumu.....	147
Şekil 5.37.	Bir fazlı tam dalga kontrollü doğrultucunun deneysel sonuçlarına ait a) çıkış gerilimi temel bileşeni $v_{df}(t)$ ve harmonik bileşeni $v_{dh}(t)$ , b) giriş akımı temel bileşeni $i_{af}(t)$ ve harmonik bileşeni $i_{ah}(t)$ .....	148
Şekil 5.38.	Üç fazlı tam dalga kontrollü doğrultucu devresine ait benzetim sonuçları a) giriş gerilimi $v_a(t)$ , çıkış gerilimi $v_d(t)$ , b) çıkış gerilimi $v_d(t)$ ve çıkış akımı $i_d(t)$ , c) giriş gerilimi $v_a(t)$ ve giriş akımı $i_a(t)$ .....	149
Şekil 5.39.	Üç fazlı tam dalga kontrollü doğrultucu devresine ait deneysel sonuçlar a) giriş gerilimi $v_a(t)$ , çıkış gerilimi $v_d(t)$ , b) çıkış gerilimi $v_d(t)$ ve çıkış akımı $i_d(t)$ , c) giriş gerilimi $v_a(t)$ ve giriş akımı $i_a(t)$ .....	150
Şekil 5.40.	Üç fazlı tam dalga kontrollü doğrultucunun eşdeğer devresine ait a) çıkış gerilimi temel bileşeni $v_{df}(t)$ ve harmonik bileşeni $v_{dh}(t)$ , b) giriş akımı temel bileşeni $i_{af}(t)$ ve harmonik bileşeni $i_{ah}(t)$ .....	151
Şekil 5.41.	Üç fazlı tam dalga kontrollü doğrultucuya ait a) $v_d(t)$ harmonik spektrumu b) $i_a(t)$ harmonik spektrumu.....	151
Şekil 5.42.	Üç fazlı tam dalga kontrollü doğrultucunun deneysel sonuçlarına ait a) çıkış gerilimi temel bileşeni $v_{df}(t)$ ve harmonik bileşeni $v_{dh}(t)$ , b) giriş akımı temel bileşeni $i_{af}(t)$ ve harmonik bileşeni $i_{ah}(t)$ .....	152

- Şekil 5.43. Bir fazlı tam dalga kontrolsüz doğrultucu devresinin deneysel sonuçları ile benzetim sonuçlarının karşılaştırması  
a) çıkış gerilimi  $v_d(t)$ , b) çıkış akımı  $i_d(t)$ , c) giriş akımı  $i_a(t)$  ..... 153
- Şekil 5.44. Bir fazlı tam dalga kontrolsüz doğrultucu devresinin deneysel sonuçları ile benzetim sonuçlarının karşılaştırması a) çıkış geriliminin temel bileşeni  $v_{df}(t)$  b) çıkış geriliminin harmonik bileşeni  $v_{dh}(t)$  c) giriş akımının temel bileşeni  $i_{af}(t)$  d) giriş akımının harmonik bileşeni  $i_{ah}(t)$  ..... 154

## **TABLolar DİZİNİ**

Tablo 1.1. Akım için harmonik sınırları .....	17
Tablo 1.2. Gerilim için harmonik sınırları .....	17
Tablo 2.1. Simetri durumlarında trigonometrik Fourier katsayıları.....	26

## SİMGELER DİZİNİ VE KISALTMALAR

$A_n$	: Üstel Fourier serisine ait n. terim
$a_n$	: Tirgonometrik Fourier serisine ait n. terim
$a_0$	: Tirgonometrik Fourier serisine ait sabit terim
$b_n$	: Tirgonometrik Fourier serisine ait n. terim
$C$	: Kapasitans, (F)
$c_n$	: Tirgonometrik Fourier serisine ait n. terim
$c_0$	: Tirgonometrik Fourier serisine ait sabit terim
$D$	: Distorsiyon gücü, (VAd)
$f$	: Frekans, ( $s^{-1}$ )
$f_r$	: Rezonans frekansı, ( $s^{-1}$ )
$f(t)$	: Periyodik bir fonksiyon
$i(t)$	: Zamana bağlı akım, (A)
$I_a$	: Giriş akımının DA bileşeni, (A)
$i_a$	: a fazına ait giriş akımı, (A)
$i_{af}$	: Giriş akımının temel bileşeni, (A)
$i_{ah}$	: Giriş akımının harmonik bileşeni, (A)
$i_b$	: b fazına ait giriş akımı, (A)
$i_c$	: c fazına ait giriş akımı, (A)
$I_d$	: Akım Kaynağı, (A)
$i_d$	: Çıkış akımı, (A)
$i_{df}$	: Çıkış akımının temel bileşeni, (A)
$i_{dh}$	: Çıkış akımının harmonik bileşeni, (A)
$I_{ef}$	: Etkin (efektif) akım, (A)
$I_L$	: Maksimum talep edilen yük akımı, (A)
$I_n$	: Nominal Akım, (A)
$I_0$	: Akımın DA bileşeni, (A)
$i_{sa}$	: Geleneksel duruma ilişkin kaynak akımı, (A)
$I_{SC}$	: Maksimum kısa devre akımı, (A)
$k_c$	: Tepe faktörü
$k_f$	: Şekil faktörü
$L$	: Endüktans, (H)
$L_s$	: Kaynak Endüktansı, (H)
$L_y$	: Yük empedansı, ( $\Omega$ )
$n$	: Harmonik mertebesi
$n_r$	: Rezonanstaki harmonik mertebesi
$P$	: Aktif güç, (W)
$p(t)$	: Zamana bağlı aktif güç, (W)
$P_{ek}$	: Ek Güç kaybı, (W)
$pf$	: Güç faktörü
$pf_{dist}$	: Distorsiyon güç faktörü
$pf_{toplam}$	: Toplam güç faktörü
$Q$	: Reaktif güç, (VAr)
$R$	: Direnç, ( $\Omega$ )

$R_n$	: n. harmonik frekansındaki iletim sistemi omik direnci, ( $\Omega$ )
$R_s$	: Kaynak iç direnci, ( $\Omega$ )
$R_y$	: Yük direnci, ( $\Omega$ )
$S$	: Görünür Güç, (VA)
$T$	: Periyot, (s)
$v(t)$	: Zamana bağlı gerilim, (V)
$V_0$	: Gerilimin doğru akım bileşeni, (V)
$V_m$	: Gerilimin tepe değeri, (V)
$V_n$	: Nominal Gerilim, (V)
$V_a$	: Giriş geriliminin DA bileşeni, (V)
$v_a$	: a fazına ait giriş gerilimi, (V)
$v_{af}$	: Giriş geriliminin temel bileşeni, (V)
$v_{ah}$	: Giriş geriliminin harmonik bileşeni, (V)
$v_b$	: b fazına ait giriş gerilimi, (V)
$v_c$	: c fazına ait giriş gerilimi, (V)
$V_d$	: Çıkış geriliminin DA bileşeni, (V)
$v_d$	: Çıkış gerilimi, (V)
$v_{df}$	: Çıkış geriliminin temel bileşeni, (V)
$v_{dh}$	: Çıkış geriliminin harmonik bileşeni, (V)
$v_i$	: Doğrultucu giriş gerilimi, (V)
$v_{id}$	: Doğrultucu giriş geriliminin harmonik bileşeni, (V)
$v_{if}$	: Doğrultucu giriş geriliminin temel bileşeni, (V)
$v_{i0}$	: Doğrultucu giriş geriliminin DA bileşeni, (V)
$X_C$	: Kapasitif reaktans, ( $\Omega$ )
$X_{Cn}$	: n. harmonikteki kapasitif reaktans, ( $\Omega$ )
$X_L$	: Endüktif reaktans, ( $\Omega$ )
$X_{Ln}$	: n. harmonikteki endüktif reaktans, ( $\Omega$ )
$X_r$	: Rezonans anındaki reaktans, ( $\Omega$ )
$Z$	: Empedans, ( $\Omega$ )
$\omega$	: Açısal frekans, (rad/s)
$\omega_r$	: Açısal rezonans frekans, (rad/s)
$\theta_n$	: n. dereceden harmonik gerilimin faz açısı, (rad)
$\delta_n$	: n. dereceden harmonik akımının faz açısı, (rad)
$\varphi_n$	: n. dereceden faz açısı, (rad)
$\alpha$	: Tetikleme açısı, (rad)
$\beta$	: Komütasyona girmede gecikme açısı, (rad)
$\Delta V_n$	: n. harmonik bileşeninin oluşturduğu gerilim düşümü, (V)

### Kısaltmalar

AA	: Alternatif Akım
BJT	: Bipolar Junction Transistor (Bipolar Jonksiyon Transistör)
DA	: Doğru Akım
$D_{SG}$	: Serbest Geçiş Diyodu,
GTO	: Gate Turn-Off Thyristor (Kapıdan Söndürmeli Tristör)
HD	: Tekil Harmonik Distorsiyon
HVDC	: High-Voltage, Direct Current (Doğru Akım İletim Hattı)

IEEE	: Institute of Electrical and Electronics Engineers (Elektrik ve Elektronik Mühendisleri Enstitüsü)
IGBT	: Insulated Gate Bipolar Transistor (İzole Kapalı Bipolar Transistör)
MCT	: MOS-Controlled Thyristor (MOS Kontrollü Tristör)
MOSFET	: Metal Oxide Semiconductor Field Effect Transistor (Metal Oksit Alan Yarıiletken Alan Etkili Transistör )
N	: Şebeke Nötr Hattı
SCR	: Silicon-Controlled Rectifier (Tristörler)
THD	: Toplam Harmonik Distorsiyon
THD <sub>v</sub>	: Toplam Harmonik Gerilim Distorsiyonu
THD <sub>i</sub>	: Toplam Harmonik Akım Distorsiyonu
TTD	: Toplam Talep Distorsiyonu



## FARKLI DOĞRULTUCU YAPILARININ ÇEŞİTLİ YÜK DURUMLARI ALTINDAKİ HARMONİKLERİNİN İNCELENMESİ VE LİNEER MODELLERİN ELDE EDİLMESİ

### ÖZET

Güç elektroniği dönüştürücüleri anahtarlama işlevlerinden dolayı, genel olarak, harmonik üreten düzeneklerdir. Harmoniklerin tüm sisteme yaptığı olumsuz etkilerin belirlenmesinde ve önlenmesinde, harmonik üreten kaynakların ve lineer olmayan yüklerin doğru bir şekilde modellenmesi önem kazanır. Anahtarlama devrelere ilişkin olarak, belli şartlar altında geçerli olan çeşitli harmonik modeller öne sürülmüştür.

Bu çalışmada, en önemli harmonik kaynaklarından olan, AA/DA dönüştürücüler için yeni bir harmonik eşdeğer devre modeli ileri sürülmüştür. Modelde, gerçek ve doğru bir harmonik analizi için, dönüştürücü sisteminin hem AA hem de DA tarafındaki akımın düzgün olmayan yapısı göz önüne alınmıştır. Ayrıca AA/DA dönüştürücüsü bir anahtarlama devresi olmasına rağmen ileri sürülen modelle, söz konusu devre harmonikler açısından doğrusal bir devreye dönüştürülmüştür. İleri sürülen eşdeğer devre modelinin test edilmesi amacıyla, modelden elde edilen benzetim sonuçları ile gerçek devreye ait deneysel sonuçlar karşılaştırılmış ve sonuçların birbirleri ile uyumlu olduğu gözlemlenmiştir.

**Anahtar Kelimeler:** AA/DA Dönüştürücüler, Eşdeğer Devre Modeli, Fourier Analizi, Harmonikler.

## **OBTAINING LINEAR MODELS AND STUDY HARMONICS RELATED TO DIFFERENT RECTIFIER CONSTRUCTIONS UNDER VARIOUS LOAD CONDITIONS**

### **ABSTRACT**

Power electronic converters are generally harmonic generating systems because of their switching process. It is very important to model correctly harmonic generating sources and nonlinear loads in order to specify and avoid the negative effects of harmonics on the entire system. Various harmonic models valid for some conditions are proposed for switching circuits.

In this study, a new harmonic equivalent circuit model is proposed for AC/DC converters which are one of the most important harmonic generating sources. For exact and accurate harmonic analysis, in the model, nonuniform waveforms relating to both AC side current and DC side current of converter system are considered. Also, although the AC/DC converters are switching circuits, the model converts the switching circuit into a linear circuit with regards to harmonics. In order to test the proposed equivalent circuit model, the simulation results relating to the model and experimental results are compared. It is observed that both of the results are compatible.

**Keywords:** AC/DC Converters, Equivalent Circuit Model, Fourier Analysis, Harmonics.

## GİRİŞ

Harmonik çalışmalarının amacı, sistemin belirli noktalarında oluşan gerilim ve/veya akım dalga şeklindeki bozunumu belirlemektir. Mevcut sistemde harmonik üreten cihazların varlığı veya aşırı ölçülen bozunumlar, harmonik incelemeleri zorunluluk haline getirmiştir (Chang ve Liu, 2003).

Harmonik çalışmalarındaki önemli adımlardan birisi, harmonik üreten kaynakların karakterize edilmesi ve modellenmesidir. Genel olarak, başlıca harmonik üreten kaynaklar aşağıdaki gibi kategorize edilebilir.

- Anahtarlama işlevi nedeniyle harmonik üreten cihazlar; En sık güç elektroniği cihazlarında görülmektedir. (IEEE PES harmonik çalışma grubu, 2001)
- Doğrusal olmayan uç karakteristikleri nedeniyle harmonik üreten elemanlar; Transformatörler, AA ark fırınları vb. (Dommel ve diğ., 1986), (Lian ve diğ., 2004).
- Yukarıda bahsedilen her iki türü de içeren hibrit cihazlar; Elektronik balastlı floresan lambalar ve DA ark fırınları gibi (Fuentes ve diğ., 2000), (Wichakool ve diğ., 2009).
- Stator ve alan sargıları arasındaki harmonik etkileşim ve sinüsoidal olmayan akı dağılımından dolayı harmonik üreten döner makineler (Zhang, 2000).

Elektrik sistemlerinde AA/DA dönüştürücüler en önemli harmonik kaynaklarından biridir. AA/DA dönüştürücülerin doğru bir harmonik analizi son yıllarda daha önemli bir konu haline gelmiştir. Birçok harmonik model, güç elektroniği cihazlarının ürettiği harmoniklerin temsili için önerilmiştir (Chang ve Liu, 2003), (Tanaka ve Akagi, 1993), (Medora ve Kusko, 2000). Bu modeller frekans domenine ve zaman domenine dayandırılarak kategorize edilebilir. Frekans domeni modelleri, akım kaynağı modeli, transfer fonksiyon modeli, Norton eşdeğer devre modeli, harmonik domen modeli ve 3-darbe modeli olarak kendi içinde sınıflandırılır. Zaman domeni modelleri ise, diferansiyel denklem takımı ve durum uzay modeli olarak gruplandırılır.

En yaygın model, genliği ve faz açısı belirli olan bir harmonik akım kaynağı ile modellemedir. Her bir harmonik için frekans domeni düğüm denklemleri, admitans matrisleri aracılığı ile şebeke gerilim harmoniklerinin hesaplanmasında kullanılır.

Tüm harmonik gerilimleri zaman domenine çevrildikten sonra Süperpozisyon yöntemi kullanılarak toplam harmonik gerilim bulunur. Bu model hem dengeli hem de dengesiz AA/DA dönüştürücü sistemlerinde kullanılabilir (Ortmeyer, 1984), (Pileggi ve diğ.,1981), (Mahmoud ve Shoultz,1982). Eğer sistem tek bir AA/DA dönüştürücü içeriyorsa, akım kaynağının faz açısını ihmal edilip sadece genliğinin kullanılması yeterlidir. Ancak birçok AA/DA dönüştürücü eşzamanlı olarak sistemde mevcutsa, akım kaynağının faz açılarının kullanımı önem arz etmektedir. Akım kaynağı metodunun avantajı sonucun iteratif yöntemler kullanılmadan doğrudan elde edilmesi ve etkin bir sonuç vermesidir. Dezavantajı ise AA/DA dönüştürücü tarafından üretilen harmonik akımının temsilinde kullanılan tipik harmonik spektrumun, şebeke ile AA/DA dönüştürücü arasındaki etkileşimi göz ardı etmesidir. Bu da tipik olmayan çalışma modu durumlarında yeterli değerlendirme yapmaya engel olur. Bu tipik olmayan çalışma durumları kısmı yüklenme, gerilimde aşırı harmonik bozunum, dengesiz şebeke koşulları olarak örneklenebilir.

Larsen ve diğ. (1989) modülasyon teorisini temel alan bir transfer fonksiyon modeli sunmuşlardır. Buradaki iki transfer fonksiyonu, AA/DA dönüştürücünün DA ve AA tarafını temsil etmektedir. Bu fonksiyonlar, AA/DA dönüştürücünün giriş gerilim bozunumunu ve DA çıkış akımındaki harmonik bileşenleri içermekle birlikte, tetikleme açısını ve komütasyon örtüşmesini de içermektedir. Jalali ve Lasseter (1994) ile Rajagopal ve Quaicoe (1993), dönüştürücünün farklı çalışma noktalarında DA sistem ve AA şebeke arasındaki etkileşimi lineer şekle dönüştürecek transfer fonksiyon modeline dayalı etkili bir teknik önermişlerdir.

İteratif harmonik analizinde, genellikle AA/DA dönüştürücü, her iterasyonda sabit bir akım kaynağı olarak gösterilir. Daha iyi bir yakınsama için, AA/DA dönüştürücünün Norton eşdeğeri kullanılabilir. Xu ve diğerleri (1994) üç faz harmonik Norton eşdeğer devre modelini geliştirmiş ve yüksek gerilim doğru akım hattına ait AA/DA dönüştürücünün dengesiz ve bozunumlu giriş şartları altında modelini çıkarmışlardır. Yazarlar ayrıca AA ve DA motor sürücülerinin modellenmesi için de modeli genişletmişlerdir. Bu model çeşitli sürücü çalışma koşullarına uygundur (Xu ve diğ.,1998), ( Xu ve diğ.,1999).

Harmonik domen modelinde, AA/DA dönüştürücü sürekli halde genel olarak lineer olmayan denklem takımı olarak tanımlanır. Smith ve diğerleri (1995) tarafından öne sürülen modelde, AA/DA dönüştürücünün on iki anahtarlama dizi geçişi gözlemlenerek analiz yapılmış ve her bir durum için karmaşık harmonik fazörler aracılığı ile iletim ve komütasyon aralıkları tanımlanmıştır. Daha sonra ise anahtarlama durumlarını temsil eden lineer olmayan uyumsuzluk denklemleri Newton metoduyla çözümlenmiştir. Böylelikle AA/DA dönüştürücünün uygulanan gerilime cevabı, harmonik domen eğrisi olarak karakterize edilmiştir. Bu model, ilkel olarak AA giriş geriliminin sadece bir çevrimini içermektedir ve sadece ana harmoniklerin analizinde kullanılmaktadır. Eğer gerekliyse bu model sürekli durumda, ara harmoniklerin çözümlenmesi için birçok çevrim boyunca sürekli durumda genişletilebilir (Smith ve diğ.,1995), (Bathurst ve diğ.,1999).

Shore ve diğerleri (1989), yüksek gerilim doğru akım (HVDC) iletim hattında AA/DA dönüştürücünün kaçak kapasitans akım yolu olması halinde üç darbe modelini incelemiştir. Giriş gerilimi ideal kabul edilirse, altı darbeleri AA/DA dönüştürücünün DA kısmının gerilimi, iki tane 3-darbe gerilim kaynağına ayrıştırılabilir. Ayrıca 3-darbe model temel alınarak, dengesiz ve bozunumlu bir giriş gerilimine sahip olan yüksek gerilim doğru akım iletim hattındaki AA/DA dönüştürücüye ait harmonik transferine ait analitik bir çözüm Sadek ve Pereira (1999) tarafından incelenmiştir.

Zaman domeninde, AA/DA dönüştürücü, diferansiyel denklem takımı veya durum denklemleri olarak ifade edilebilir. Bu denklemlerin çözümünden sonra, AA/DA dönüştürücünün giriş akımına ait harmonik spektrum, genellikle hızlı Fourier dönüşümü gibi bir Fourier metoduyla bulunmaktadır (Baghzouz, 1993), (Rice, 1994), (Perkins ve Iravani, 1997), (Grotzbach ve Ried, 1997). Bu model genellikle, harmonik güç akışı analizi için frekans domeni modeli ile bütünleştirir veya güç sistemini içeren zaman domeni benzetiminde kullanılır (Xia ve Heydt, 1982), (Sharma ve diğ., 1991).

Carpinelli ve diğerleri (1994) ise, değişken sistem frekans empedansı içeren durum uzay modelini sunmuşlardır. Yakınsamayı geliştirmek için iteratif harmonik analizi kullanılabilir.

Yukarıda, güç elektroniği cihazları için geliştirilmiş birçok harmonik model incelenmiştir. Doğru bir güç sistemi analizi için, harmonik kaynağının uygun şekilde

modellenmesi önemlidir. Model seçiminde bir fikir birliği olmasa da, cihaz ve güç sistemi arasındaki etkileşimin dikkate alınması gerekmektedir.

Dönüştürücülerin harmoniklere bağlı incelemelerinde, geleneksel olarak DA tarafındaki akım düzgün olarak varsayılmıştır, harmonik derecesi ve büyüklüğü basitçe hesaplanmıştır. Ancak gerçek ve doğru bir harmonik analizi için, dönüştürücü sisteminin hem AA hem de DA tarafındaki akımın düzgün olmayan yapısı göz önüne alınmalıdır.

Tez çalışmasında, gerçek ve doğru bir harmonik analizi için, dönüştürücü sisteminin hem AA hem de DA tarafındaki akımın düzgün olmayan yapısı göz önüne alınmıştır. Ayrıca AA/DA dönüştürücüsü bir anahtarlama devresi olmasına rağmen, ileri sürülen modelle söz konusu devre harmonikler açısından doğrusal bir devreye dönüştürülmüştür.

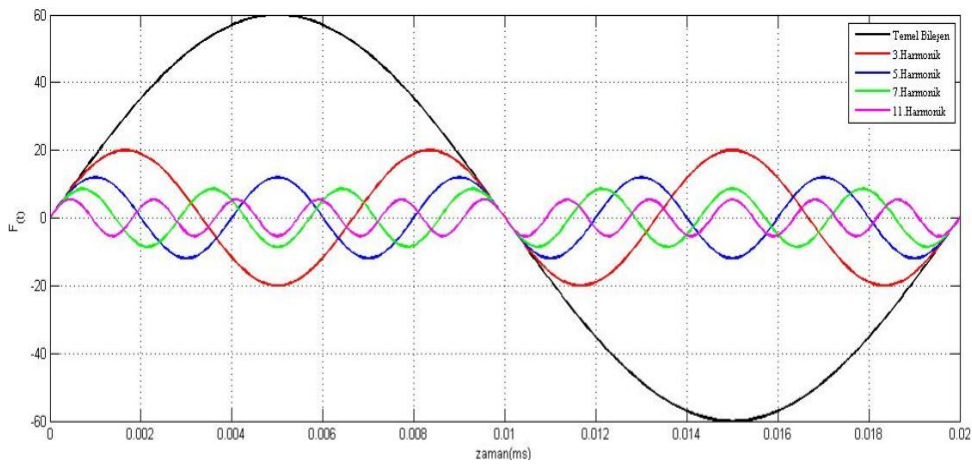
İncelemeler ve modelin geliştirilmesi, bir fazlı tam dalga kontrolsüz doğrultucu devresi üzerinde gerçekleştirilmiştir. Daha sonra elde edilen sonuçlar, tüm doğrultucu devre türlerine uyarlanmıştır. Öncelikle referans alınan doğrultucu devresine ait geleneksel eşdeğer devre incelenmiştir. Daha sonra ise, AA taraftaki akım harmoniklerinin ve DA taraftaki gerilim harmoniklerinin ifadesine dayalı olarak yeni harmonik eşdeğer devre modeli ileri sürülmüştür.

Tezin bölümleri şu şekilde özetlenebilir: Birinci bölümde; harmonikler hakkında genel bilgiler verilmiştir. Ayrıca harmonik içeren sistemlerdeki büyüklükler tanımlanmış, harmonik kaynakları, harmoniklerin meydana getirdiği etkiler, harmonik standartları ve harmoniklerin filtrelenme yöntemlerinden bahsedilmiştir. İkinci bölümde; ileri sürülen modele temel oluşturan, Fourier seri açılımının elde edilmesine değinilmiş ve çeşitli dalgaların Fourier seri açılımları verilmiştir. Üçüncü bölümde; tüm doğrultucu türleri açıklanmış ve her yük durumu (omik, endüktif, akım kaynağı) için giriş gerilimine/akımına ve çıkış gerilimine/akımına ait Fourier seri ifadeleri elde edilmiştir. Dördüncü bölümde, ileri sürülen harmonik eşdeğer devre modeli verilmiştir. Son bölümde, tüm doğrultucu türlerine ait deneysel ve benzetim sonuçları verilere, ileri sürülen eşdeğer devre modelinin geçerliliği test edilmiştir. Ayrıca referans alınan doğrultucu devresine ait benzetim ve deneysel sonuçlar karşılaştırılmıştır.

## 1. HARMONİKLER

Elektrik enerji sistemlerinde, elektrik enerjisinin üretilmesi, iletilmesi ve dağıtılması sırasında, akım ve gerilimin temel frekans (50 Hz-60 Hz) seviyelerinde salınması ve sinüs eğrisine çok benzer bir formda olması istenir. Ancak lineer olmayan yükler (doğrultucular, eviriciler, kesintisiz güç kaynakları, manyetik devrelerin doyum bölgesinde çalışması vs.) şebekeden sinüs formunda olmayan akım çekilmesine neden olur. Bu akım, temel bileşen akımı ve harmonik akımı olarak tanımladığımız ve temel bileşenin üzerine eklenen, temel frekansın tam katları olan bileşenlerden oluşur. Harmonik akımının varlığı, şebeke empedansında yaratacağı gerilim düşümünden dolayı şebeke geriliminin bozulmasına dolayısı ile gerilim harmoniğinin de oluşmasına neden olacaktır.

Bu anlamda harmonik en basit haliyle, temel frekansın tam katları olan sinusoidal akım ve gerilimler şeklinde tanımlanabilir. Uygulamada en çok 3., 5., 7., 11. ve 13. harmoniklerle karşılaşılır. Ancak 11. ve 13. harmoniklerin genlikleri ana bileşene göre çok küçük olduğundan özel haller dışında önemsenmezler. Elektrikli cihazlara en büyük zararı 5 kHz'den küçük olan harmoniklerin verdiği kabul edilmektedir (Adak, 2003). Şekil 1.1'de bir tam periyot boyunca temel bileşen ve bazı harmonik bileşenlerin gösterimi verilmiştir.



Şekil 1.1. Temel ve harmonik bileşenler

## 1.1. Harmonik Büyüklüklere Ait Tanımlar ve Kavramlar

Genellikle, güç sistem çalışmaları için tanımlanan elektriksel büyüklükler, sinüsoidal sürekli halde geçerli olacak şekilde tanımlanmıştır. Ancak lineer olmayan elemanlardan dolayı harmonikler söz konusu olduğunda, bu elektriksel büyüklüklerin yeniden tanımlanması gerekli hale gelmektedir.

Harmonik büyüklükler, enerji kalitesi ile doğrudan ilişkili olan büyüklüklerdir. Değerleri ne kadar küçük olursa, enerji tesislerinde akım ve gerilim değeri sinüs eğrisine o kadar yakın olur.

### 1.1.1. Sinüsoidal olmayan durumda elektriksel büyüklükler

Harmonik bileşeni içeren, gerilim ve akımın ani değerleri sırasıyla Denklem (1.1) ve (1.2)'deki gibi ifade edilebilir. Ani güç ise Denklem (1.3)'de verilmiştir.

$$v(t) = V_0 + \sum_{n=1}^{\infty} v_n(t) = V_0 + \sum_{n=1}^{\infty} \sqrt{2} V_n \sin(n\omega_1 t + \theta_n) \quad (1.1)$$

$$i(t) = I_0 + \sum_{n=1}^{\infty} i_n(t) = I_0 + \sum_{n=1}^{\infty} \sqrt{2} I_n \sin(n\omega_1 t + \delta_n) \quad (1.2)$$

$$p(t) = v(t)i(t) \quad (1.3)$$

Yukarıda verilen ani akım, gerilim ve güç ifadelerini göz önüne alacak olursak, sırasıyla etkin gerilim ve etkin akım Denklem (1.4) ve (1.5)'deki gibi ifade edilebilir.

$$V = \sqrt{\frac{1}{T} \int_0^T v(t)^2 dt} = \sqrt{\left( V_0^2 + \sum_{n=1}^{\infty} V_n^2 \right)} \quad (1.4)$$

$$I = \sqrt{\frac{1}{T} \int_0^T i(t)^2 dt} = \sqrt{\left( I_0^2 + \sum_{n=1}^{\infty} I_n^2 \right)} \quad (1.5)$$

Aktif, reaktif ve görünür güç ise sırasıyla Denklem (1.6), (1.7) ve (1.8)'deki gibidir.

$$P = V_0 I_0 + \sum_{n=1}^{\infty} V_n I_n \cos(\theta_n - \delta_n) \quad (1.6)$$



$$Q = \sum_{n=1}^{\infty} V_n I_n \sin(\theta_n - \delta_n) \quad (1.7)$$

$$S = VI = \sqrt{\left( V_0^2 + \sum_{n=1}^{\infty} V_n^2 \right)} \sqrt{\left( I_0^2 + \sum_{n=1}^{\infty} I_n^2 \right)} \quad (1.8)$$

Denklem (1.8)'deki görünür güç ifadesi aynı zamanda aktif güç (P), reaktif güç (Q) ve distorsiyon güç (D) cinsinden Denklem (1.9)'daki gibi ifade edilebilir.

$$S^2 = P^2 + Q^2 + D^2 \quad (1.9)$$

Distorsiyon gücü, aktif olmayan bir güç olup saf sinüsoidal devrelerde sıfırdır. Güç faktörü ise, Alternatif akım (AA) güç sistemlerinde çekilen akımın bir yük tarafından ne kadar verimlilikle kullanıldığını göstermektedir. Sinüsoidal veya sinüsoidal olmayan durum ayrımı gözetmeksizin güç faktörü Denklem (1.10)'daki gibidir.

$$\text{pf} = \frac{P}{S} \quad (1.10)$$

### 1.1.2. Toplam harmonik distorsiyonu (THD)

Harmonik bileşenlerin ana bileşene göre seviyesini belirlemede kullanılan ve sinüsoidal formdan uzaklaşmanın derecesini belirten THD akım ve THD gerilim değerleri sırasıyla Denklem (1.11) ve (1.12)'deki ifadelerden yararlanılarak bulunur.

$$\text{THD}_V = \frac{\sqrt{\sum_{n=2}^{\infty} V_n^2}}{V_1} \quad (1.11)$$

$$\text{THD}_I = \frac{\sqrt{\sum_{n=2}^{\infty} I_n^2}}{I_1} \quad (1.12)$$

Görüldüğü gibi THD, harmonik bileşenlerin etkin değerlerinin, temel bileşenin etkin değerine oranıdır ve genelde yüzde olarak ifade edilmektedir. Saf sinüsoidal bir dalga için THD sıfırdır.

Benzer olarak, n. harmonik mertebesi için tekil harmonik distorsiyonu sırasıyla Denklem (1.13) ve (1.14)'deki gibidir.

$$HD_{V_n} = \frac{V_n}{V_1} \quad (1.13)$$

$$HD_{I_n} = \frac{I_n}{I_1} \quad (1.14)$$

### 1.1.3. Toplam talep distorsiyonu (TTD)

Çekilen yük akımına ait distorsiyonu belirlemede kullanılır. Toplam talep distorsiyonu Denklem (1.15) ile belirlenir.

$$TTD = \frac{\sqrt{\sum_{n=2}^{\infty} I_n^2}}{I_L} \quad (1.15)$$

$I_L$  yük tarafından, sistemin ortak bağlantı noktasından çekilen, temel frekanslı maksimum akımdır. Bu akım 12 ay boyunca talep edilen akımların matematiksel ortalamasını göstermektedir. TTD kavramı, IEEE 'Standart 519' uygulamasında özellikle belirtilmiştir (Kocatepe ve diğ., 2003).

### 1.1.4. Şekil faktörü

Şekil faktörü, herhangi bir dalga için, Denklem (1.16)'daki gibi tanımlanır. Sinüsoidal bir dalga için bu değer  $k_f=1,11$  değerine eşittir.

$$k_f = \frac{\text{Etkin Değer}}{\text{Ortalama Değer}} \quad (1.16)$$

### 1.1.5. Tepe faktörü

Tepe Faktörü, akım ve gerilimin tepe değeri ile etkin değeri arasında tanımlanan bir büyüklüktür. Denklem (1.17) ile hesaplanabilir. İçinde harmonik bulundurmayan sinüsoidal bir dalga için bu değer  $k_c=\sqrt{2}$ 'dir.

$$k_c = \frac{\text{Tepe Değer}}{\text{Temel Bileşenin Etkin Değer}} \quad (1.17)$$

### 1.1.6. Transformator k-faktörü

k-faktörü, harmonik akımlar mevcut olduğu zaman standart transformatorlerin yüklenme kapasitesindeki azalma miktarlarını hesaplamak için kullanılan bir kavramdır. 500 kVA'nın altındaki transformatörler için tanımlanmıştır. Lineer olmayan yükleri besleyen bir transformator için k faktörü aşağıdaki gibidir.

$$k = \sum_{n=1} \left( n \frac{I_n}{I_1} \right)^2 \quad (1.18)$$

### 1.1.7. Distorsiyon güç faktörü

Gerilim ve akım, harmonik içerdiğinde etkin değerleri Denklem (1.19) ve (1.20)'deki gibi de ifade edilebilir.

$$V = V_1 \sqrt{1 + \left( \frac{\text{THD}_V}{100} \right)^2} \quad (1.19)$$

$$I = I_1 \sqrt{1 + \left( \frac{\text{THD}_I}{100} \right)^2} \quad (1.20)$$

Aynı biçimde toplam güç faktörü Denklem (1.10)'dan yola çıkarak Denklem (1.21)'deki gibi ifade edilebilir.

$$\text{pf}_{\text{toplam}} = \frac{P}{S} = \frac{P}{V_1 I_1 \sqrt{1 + \left( \frac{\text{THD}_V}{100} \right)^2} \sqrt{1 + \left( \frac{\text{THD}_I}{100} \right)^2}} \quad (1.21)$$

Bu eşitlik aynı zamanda Denklem (1.22) ile de verilebilir. Burada ilk terim  $\cos(\theta_1 - \delta_1)$ , kayma güç faktörü ve ikinci terim  $\text{pf}_{\text{dist}}$  distorsiyon güç faktörü olarak bilinir. Kayma güç faktörü, 1'den büyük olamayacağından her zaman,  $\text{pf}_{\text{dist}} < \text{pf}_{\text{toplam}}$  olacaktır.

$$\text{pf}_{\text{toplam}} = \cos(\theta_1 - \delta_1) \text{pf}_{\text{dist}} \quad (1.22)$$

## 1.2. Harmonik Kaynakları

Harmonikler çeşitli nedenlerle ortaya çıkarlar. Bunların başında devrenin manyetiksel ve elektriksel lineersizliği gelir. Generatör, transformatör ve bobin gibi demir çekirdek içeren cihazlarda aşırı akı yoğunluğundan dolayı doyması, devrenin manyetik lineersizliğine örnek verilebileceği gibi, yarıiletken kullanarak sinüsoidal gerilimin şeklinin değiştirilmesi, devrenin elektriksel lineersizliğine örnek verilebilir. Eğer kullanıcının manyetik ya da elektrik devresi lineer, fakat bu kullanıcıyı besleyen gerilim harmonikli ise, kullanıcının çektiği akım da harmonikli olacaktır (Arrillaga ve Watson, 2003). Sonuç olarak harmonik, kaynak tarafındaki harmonikli gerilim etkisinden ya da kullanıcının, lineer olmayan bir devreye sahip olmasından dolayı meydana gelir (Karakaş ve diğ., 2005).

Bir sistemin harmonik bileşenlerinin ortaya konması ve daha temel tanımlama yapılabilmesi için, sistemdeki harmonik kaynakları aşağıdaki gibi kategorize edilebilir.

-Anahtarlama işlevi sırasında harmonik üreten cihazlar; En sık güç elektroniği cihazlarında görülmektedir (IEEE PES harmonik çalışma grubu, 2001).

-Kendi doğrusal olmayan gerilim-akım karakteristikleri nedeniyle harmonik üreten elemanlar; Transformatörler, reaktörler, AA ark fırınları vb. (Dommel ve diğ., 1986), (Lian ve diğ., 2004).

-Yukarıda bahsedilen her iki türü de içeren hibrit cihazlar; Elektronik balastlı floresan lambalar ve doğru akım (DA) ark fırınları gibi (Fuentes ve diğ., 2000), (Wichakool ve diğ., 2009).

-Stator ve alan sargıları arasındaki harmonik etkileşim ve sinüsoidal olmayan akı dağılımından dolayı harmonik üreten döner makinalar (Zhang, 2000).

Harmoniklere neden olan başlıca elemanlar ise aşağıdaki gibi sıralanabilir.

- Dönüştürücüler,
- Transformatörler,
- Generatörler,
- Ark fırınları,
- Statik VAR kompanzatorlar,
- Fotovoltaik sistemler,

- Bilgisayarlar,
- Kesintisiz güç kaynakları,
- Anahtarlamalı güç kaynakları,
- Elektrikli ulaşım sistemleri,
- Yüksek gerilim doğru akım (HVDC) iletim sistemleri,
- Gaz deşarj prensibiyle çalışan aydınlatma elemanları,
- Elektronik Balastlar

### **1.3. Harmoniklerin Meydana Getirdiği Etkiler**

Günümüzde lineer olmayan elemanların yaygın bir biçimde kullanılması, güç sistemlerine giderek artan bir oranda harmonik akımlarının enjekte edilmesine neden olmaktadır. Harmonik akımları sadece yüklerin dalga şekillerine bozucu etkilerde bulunmayıp aynı zamanda, güç sistemlerinde ve güç sistemlerine bağlı olan elemanlar üzerinde de olumsuz etkiler meydana getirmektedir. Teknik ve ekonomik açıdan pek çok etkisi olan harmoniklerin bu etkilerinin bilinmesi hem enerji kalitesi açısından hem de işletmenin sürekliliği açısından son derece önemlidir.

Harmoniklerin güç sistemleri üzerinde açtığı problemler genel olarak;

- Enerji sistemindeki elemanlarda kayıpların artması,
- Gerilim düşümünün artması,
- Kompanzasyon tesislerinin aşırı reaktif yüklenmesi,
- Kontrol devrelerinde çalışma bozuklukları,
- Generatör ve şebeke geriliminin dalga şeklinin bozulması,
- Endüksiyon tipi sayaçlarda yanlış ölçmeler,
- Dönen makinalarda moment salınımlarının oluşması,
- Rezonans oluşması,
- Koruma elemanlarının yanlış çalışması,
- Mikroişlemcilerin hatalı çalışması,
- Güç faktörünün bozulması,
- Sesli ve görüntülü iletişim cihazlarında parazit oluşumu,
- Transformatörlerin aşırı ısınması,
- Yalıtım malzemelerinin zorlanması ve delinmesi

olarak sıralanabilir. Harmoniklerin bazı elemanlar üzerindeki etkileri ise ayrıntılı olarak aşağıda incelenmiştir.

a) Transformatörler üzerindeki etkileri: Transformatörler harmoniklerden iki şekilde etkilenmektedir. Birincisi, akım harmoniklerinin sonucunda, bakır kayıpları ve kaçak akı kayıplarındaki artış, ikincisi ise, gerilim harmonikleri sonucunda demir kayıplarındaki artıştır. Bu kayıp artışları sonucunda transformatörlerde ek ısınmalar meydana gelmektedir.

b) Motorlar ve generatörler üzerindeki etkileri: Harmonikler, döner makinelerde demir ve bakır kaybını dolayısıyla makine ısısını artırmaktadır. Aynı zamanda harmonik, döner makinelerin veriminin ve momentinin düşmesine sebep olacaktır. Bu nedenle sinüsoidal beslemeli bir motora göre daha gürültülü ve titreşimli çalışacaktır.

c) İletkenler üzerindeki etkileri: Harmonik akımlar, iletkenlerde ısınmanın dolayısıyla kayıpların artmasına neden olmaktadır. Harmonik akımları iletkenlerde ısınmaya iki şekilde yol açmaktadır. Bunlardan birincisi 'deri olayı' dır. Bu olay bilinen akımın, iletkenin dış yüzeyine doğru yoğunlaşmasıyla etkin direncin artmasıdır. İkinci etki ise, tek fazlı yükleri besleyen 3 fazlı 4 telli sistemlerin nötr iletkenlerinin büyük akımlarla yüklenmesidir.

Temel frekanstaki dengeli 3 fazlı bir sistemde, akımların toplamı sıfır olduğundan nötr iletkeninden akım geçmemektedir. Ancak harmonik içeren 3 fazlı sistemlerde, üçüncü seviyeden harmonikler nötr iletkeninde birbirlerini güçlendirmektedir. Bu nedenle nötr akımının değeri, faz akımının 1,7 katına kadar çıkabilmektedir.

d) Dirençler ve reaktanslar üzerindeki etkileri: Harmonik bileşenlerin seviyesi arttıkça frekans değerleri de artmaktadır. Frekansın artması sonucu, iletkenlerde 'deri olayı' oluşmakta, dolayısıyla iletkenin etkin kullanılan kesiti azalmaktadır. İletkenin sinüsoidal akımdaki temel bileşen direnci  $R_1$ 'e, her bir harmonik bileşen için  $R_n$  direnci eklenmektedir. Birçok durumda harmonikler nedeniyle oluşan ilave dirençler ihmal edilmekle beraber detaylı analizlerde hesaba katılmalıdır.

Elektrik şebekelerinin ve elemanlarının modellenmesinde oldukça geniş yer tutan reaktanslar için şu yorumlar yapılabilir. Temel bileşendeki değeri  $X_L$  olan bir endüktif reaktans, n.harmonikte,

$$X_{Ln} = nX_L \quad (1.23)$$

olacaktır. Benzer şekilde, temel bileşendeki değeri  $X_c$  olan bir kapasitif reaktans ise n.harmonikte, Denklem (1.24)'deki değeri almaktadır.

$$X_{cn} = \frac{X_c}{n} \quad (1.24)$$

e) Kondansatörler üzerindeki etkileri: Harmoniklerden dolayı oluşan olumsuzluklar sistemlerde ilk olarak kondansatörlerde görülmektedir. Kondansatöre harmonik bileşenleri olan bir gerilim uygulandığında, kondansatörde aşırı gerilim oluşacaktır. Bunun sonucunda da dielektrik malzeme zorlanmaya maruz kalacağından kondansatörlerin ömrü kısalacak veya tamamı ile tahrip olacaktır.

f) Enerji iletim sistemleri üzerindeki etkileri: Harmonik akımların varlığı, bu grupta iki temel etkiyi meydana getirmektedir. Birincisi iletim hattı boyunca çeşitli devre elemanları üzerinde gerilim düşümü oluşturmaktadır. Akımın n. harmonik bileşeninin oluşturduğu gerilim düşümü,

$$|\Delta V_n| = |I_n| |Z_n| \quad (1.25)$$

olarak ifade edilir. Harmoniklerin oluşturduğu ikinci etki ise, akım dalga şeklinin artan etkin değerinin sebep olduğu,

$$P_{ek} = \sum_{n=2}^{\infty} I_n^2 R_n \quad (1.26)$$

ek kayıplardır. Burada  $I_n$ , n. harmonik bileşen akımını,  $R_n$  ise n. harmonik frekansındaki iletim sistemi omik direncini göstermektedir.

g) Devre kesicileri ve sigortalar üzerindeki etkileri: Harmonikler, devre kesicilerin ve sigortaların akım kesme performansını etkilemektedir. Ayrıca harmonik elemanlar, devre kesiciler ve sigortalarda ısınmayı ve kayıpları artırır. Böylece sürekli hal akım

taşıma kapasiteleri azalır ve izolasyon malzemelerinin ömrü kısalmır. Buna ek olarak, akım geçişlerinde saf sinüsoidal dalgaya göre daha yüksek bir değişim hızına yol açmakta ve akım kesme işlevi zorlaşmaktadır.

h) Güç faktörü üzerindeki etkileri: Güç faktörü kısaca gücü kullanabilme mertebesi olarak tanımlanabilir. Bilindiği gibi aktif güç P, Görünür güç S olmak üzere, güç faktörü pf,

$$pf = \frac{P}{S} \quad (1.27)$$

ile ifade edilmektedir. Harmonik içermeyen sinüsoidal bir sistemde güç faktörü, Denklem (1.28) şeklinde iken harmonik içeren bir sistemde güç faktörü, Denklem (1.29) şeklindeki gibi ifade edilir.

$$pf = \frac{P}{S} = \frac{V_1 I_1 \cos(\theta_1)}{V_1 I_1} = \cos(\theta_1) \quad (1.28)$$

$$pf = \frac{P}{S} = \frac{V_1 I_1 \cos(\theta_1)}{V_1 I_{ef}} = \frac{I_1}{I_{ef}} \cos(\theta_1) \quad (1.29)$$

$I_1/I_{ef}$  değeri birden küçük olacağı için, harmonik içeren durumda güç faktörü daha küçük olacaktır.

1) Harmoniklerin rezonans etkisi: Rezonans olayları, enerji kalitesinin azalmasına neden olan ve sistemin sürekliliği açısından risk oluşturan en önemli etkenlerdendir. Telsiz ve radyo gibi bazı cihazların çalışması rezonans prensibine göre olmasına karşın, enerji sisteminde rezonans oluşması sistemde aşırı gerilim ve aşırı akım gibi bazı problemlere ve enerji akışının kesilmesine neden olabilmektedir. Bu amaçla enerji sistemleri tasarımı yapılırken, sistem temel frekansta rezonansa girmeyecek şekilde tasarlanmaktadır. Ancak sistemde akım-gerilim karakteristiği lineer olmayan eleman varsa bunların ürettiği harmonik frekansları sistemi etkilemekte ve herhangi bir harmonik frekansında sistem rezonansa girebilmektedir.

Bir elektrik devresinde, endüktif reaktans ve kapasitif reaktans değerlerinin eşitliği sonucu rezonans meydana gelir. Elektrik devrelerinde seri rezonans ve paralel rezonans olmak üzere iki çeşit rezonans oluşmaktadır.



Seri rezonans durumunda devre empedansı düşüktür ve devreye düşük genlikli bir gerilim uygulansa bile devreden yüksek genlikli rezonans akımları akacaktır. Seri R,L,C elemanlarından meydana gelen devrede, empedans ifadesi Denklem (1.30) şeklindedir;

$$\underline{Z}=R+ j\omega L+\frac{1}{j\omega C}=R+ j(X_L-X_C) \quad (1.30)$$

Kaynak gerilimine ait açısıl frekans  $\omega_r$  olmak üzere rezonans frekansı  $f_r$ ,

$$\omega_r L=\frac{1}{\omega_r C} \quad (1.31)$$

$$f_r=\frac{1}{2\pi\sqrt{LC}} \quad (1.32)$$

şeklindedir. Seri R, L, C devresine harmonik içeren bir  $V_n$  gerilimi uygulandığında, devreden harmonikli bir akım geçer. Bu durumda süperpozisyon teoremi kullanılarak devre her bir harmonik mertebesi için ayrı ayrı incelenerek sonuç elde edilir. Harmonikli durumda devre elemanları aşağıdaki gibi tanımlanır. Burada, devre büyüklükleri sırasıyla n. harmonik için omik direnç, endüktif reaktans ve kapasitif reaktanstır.

$$R_n=R \quad (1.33)$$

$$X_{L_n}=nX_L=n\omega L \quad (1.34)$$

$$X_{C_n}=\frac{X_C}{n} \quad (1.35)$$

Harmonik bileşenlerin göz önünde bulundurulması halinde Denklem (1.30)'da verilen eşdeğer empedans denklemi, Denklem (1.36)'daki gibi gösterilebilir.

$$\underline{Z}_n=R_n+jX_{L_n}-jX_{C_n}=R_n+j\left(n\omega L-\frac{1}{n\omega C}\right) \quad (1.36)$$

Rezonans anında endüktansa ve kapasiteye ait reaktans değerleri  $X_r$ , Denklem (1.37)'deki gibi ifade edilir. Seri rezonans esnasında devrenin empedansı, sadece dirençten oluşur.

$$X_r = \sqrt{\frac{L}{C}} \quad (1.37)$$

Paralel rezonans durumunda ise devrede empedansı çok büyüktür. Devreye düşük genlikli bir akım uygulansa bile devre elemanları uçlarında yüksek genlikli, tehlikeli rezonans gerilimleri meydana gelir. Paralel R, L, C elemanlarından meydana gelen bir devrede empedans ifadesi Denklem (1.38) şeklindedir.

$$Z = \frac{-jRX_L X_C}{R(X_L - X_C) - jX_L X_C} \quad (1.38)$$

Harmonik bileşenlerin göz önünde bulundurulması halinde Denklem (1.38)'de verilen empedans denklemi, Denklem (1.39)'daki gibi gösterilebilir. Paralel rezonans durumunda devrenin empedansı yine seri rezonanstaki gibi sadece dirençten oluşmaktadır.

$$Z = \frac{-jRX_L X_C}{R(nX_L - \frac{X_C}{n}) - jX_L X_C} \quad (1.39)$$

Seri ve paralel rezonanstaki harmonik mertebesi  $n_r$ , Denklem (1.40)'daki gibi bulunur.

$$n_r = \frac{1}{\omega\sqrt{LC}} \quad (1.40)$$

Bir sistemde rezonans oluşması, arıza ve hasarlara yol açabilir. Devre elemanlarında özellikle kondansatörlerde izolasyon zorlanmaları ve dielektrik malzeme delinmeleri meydana gelir. Harmonik gerilimlerin yükselmesine bağlı olarak tüketiciye verilen gerilimin dalga şekli ve dolayısıyla enerji kalitesi bozulur (Yang ve diğ. 2009).

#### 1.4. Harmonik Standartları

Harmoniklerin güç sistemlerine olan olumsuz etkilerinden kaçınmak için harmoniklerin sınırlandırılması gereklilik haline gelmiştir. Harmoniklerin

sınırlandırılması için çeşitli standartlar mevcuttur. Özellikle IEEE (International Electrical Electronics Engineers) tarafından getirilen sınırlamalar hem akım hem de gerilim harmoniklerini kapsamaları nedeniyle daha etkin ve sınırlayıcı olmaktadır (Haplin, 2005). IEEE'nin harmonik sınır standartları Tablo 1.1 ve Tablo 1.2'de verilmiştir (Blooming ve Carnovale, 2006).

Tablo 1.1. Akım için harmonik sınırları

$V_n < 69 \text{ kV}$						
$I_{sc}/I_L$	$n < 11$	$11 \leq n < 17$	$17 \leq n < 23$	$23 \leq n < 35$	$35 \leq n$	THD (%)
$I_{sc}/I_L < 20$	4,0	2,0	1,5	0,6	0,3	5,0
$20 < I_{sc}/I_L < 50$	7,0	3,5	2,5	1,0	0,5	8,0
$50 < I_{sc}/I_L < 100$	10,0	4,5	4,0	1,5	0,7	12,0
$100 < I_{sc}/I_L < 1000$	12,0	5,5	5,0	2,0	1,0	15,0
$I_{sc}/I_L > 1000$	15,0	7,0	6,0	2,5	1,4	20,0
$69 \text{ kV} < V_n < 161 \text{ kV}$						
$I_{sc}/I_L < 20$	2,0	1,0	0,8	0,3	0,2	2,5
$20 < I_{sc}/I_L < 50$	3,5	1,8	1,3	0,5	0,3	4,0
$50 < I_{sc}/I_L < 100$	5,0	2,3	2,0	0,8	0,4	6,0
$100 < I_{sc}/I_L < 1000$	6,0	2,8	2,5	1,0	0,5	7,5
$I_{sc}/I_L > 1000$	7,5	3,5	3,0	1,3	0,7	10,0
$V_n > 161 \text{ kV}$						
$I_{sc}/I_L < 20$	2,0	1,0	0,8	0,3	0,2	2,5
$20 < I_{sc}/I_L < 50$	3,0	1,5	1,2	0,5	0,2	4,0

\*IEEE Standart 519-1992 'den alınmış değerlerdir.  $I_{sc}$  ; maksimum kısa devre akımı,  $I_L$  ; maksimum talep edilen yük akımı.

Tablo 1.2. Gerilim için harmonik sınırları

Bara gerilimi ( $V_n$ )	Tekil harmonik büyüklüğü (%)	Toplam Harmonik Distorsiyonu THD <sub>v</sub> (%)
$V_n < 69 \text{ kV}$	3,0	5,0
$69 \text{ kV} < V_n < 161 \text{ kV}$	1,0	2,5
$V_n > 161 \text{ kV}$	1,0	1,5

\*IEEE Standart 519-1992'den alınmış değerlerdir.

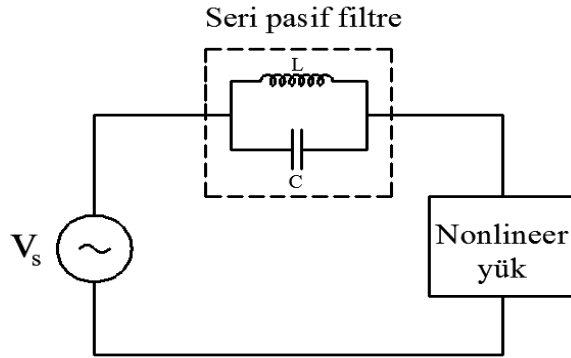
## 1.5. Harmoniklerin Filtrelenmesi

Tasarım aşamasında harmoniklere karşı alınacak önlemlerle ve buna ilave olarak eklenecek bazı özel devrelerle, harmonikler engellenebilmektedir. Bu özel devrelere, 'harmonik filtre' adı verilir. Filtrelerin kullanım amaçları, bir veya birden fazla istenilmeyen harmonik derecesinin olumsuz etkisini azaltmak veya ortadan kaldırmaktır. Pasif ve aktif filtreler olmak üzere iki çeşit harmonik filtre mevcuttur.

### 1.5.1. Pasif filtreler

Pasif filtreler; sistemde, kaynak ile alıcı arasına yerleştirilen ve istenen frekanstaki bileşenleri yok etmek için bobin, kondansatör ve bazı durumlarda direnç gibi pasif elemanlar kullanılarak oluşturulan devrelerdir. Pasif filtrelerde amaç, yok edilmek istenen harmonik bileşen frekansında rezonansa gelecek bobin ve kondansatör değerlerini belirlemektir. Her bir harmonik için onu rezonansa getirecek ayrı bir filtre uygulanması gerekmektedir (Çelik, 2008). Pasif filtreler, bağlantı şekline göre seri ve paralel filtreler olarak ikiye ayrılırlar.

Seri Filtreler: Adından da anlaşılacağı gibi, harmonik kaynağı ile şebeke arasına seri olarak bağlanır ve ayarlı frekanstaki harmonik akışına yüksek empedans gösterir. Seri filtre uygulamasına örnek bir devre Şekil 1.2'de gösterilmiştir.



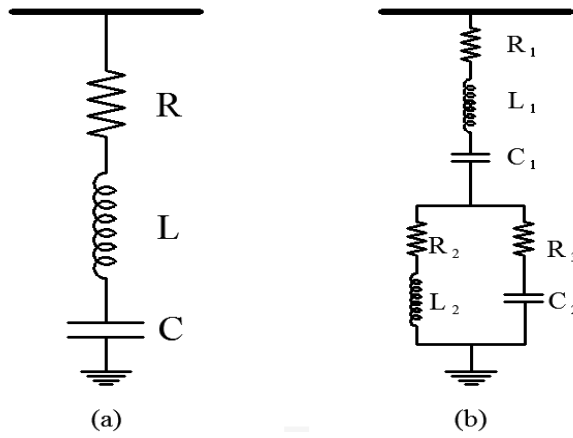
Şekil 1.2. Seri pasif filtre devre uygulaması

Seri filtreler uygulamada; AA motor sürücü devrelerinin ve yüksek güçlü AA/DA dönüştürücülerin girişine bağlanır. Seri filtrelerin uygulanmasındaki zorluklar; tüm yük akımının filtre üzerinden geçmesi, hat gerilimleri için yalıtım zorunluluğu ve hatta gerilim düşümüne neden olması şeklinde sıralanabilir (Tunçalp ve Sucu, 2006).

Paralel filtreler: Harmonik kaynağı ile şebeke arasına paralel olarak bağlanırlar. Bu tip filtrelerde amaç, düşük bir empedans yoluyla istenmeyen harmonik akımların filtre üzerinden geçmesini sağlamaktır. Bu nedenle paralel filtreler harmonik akımına çok düşük bir empedans göstermek için, filtrelenmek istenen harmonik frekansına yakın değerlerde rezonansa gelecek şekilde tasarlanırlar. Ayrıca paralel filtreler güç faktörünü düzeltmede de kullanılabilir. Paralel filtrelere örnek olarak tek ayarlı filtreler, çift ayarlı filtreler ve sönümlü filtreler verilebilir.

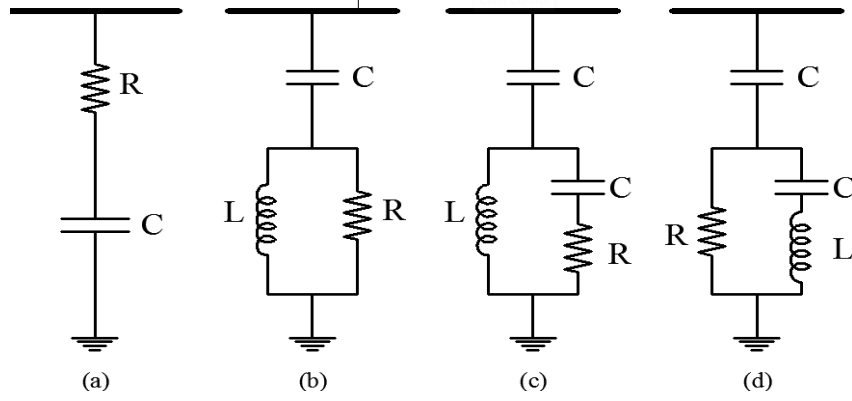
Tek ayarlı filtreler, bant geçiren filtreler olarak da adlandırılabilirler. Ayarlandığı tek bir frekans değeri için rezonansa gelerek düşük empedans gösterirler ve böylelikle istenmeyen bileşenin hattan saptırılması sağlanır. Bu filtreler, seri RLC devresinden meydana gelmektedir (Şekil 1.3.a).

Çift ayarlı filtreler, iki farklı harmonik bileşenini elimine edebilirler. Tek ayarlı filtreler gibi ayarlanan frekans değerlerinde rezonansa gelerek, süzme işlemini gerçekleştirirler. Örnek bir devre Şekil 1.3.b’de gösterilmiştir.



Şekil 1.3. Paralel Filtreler a) Tek ayarlı filtre, b) Çift ayarlı filtre

Sönümlü filtreler ise, yüksek mertebeli harmoniklerin süzülmesi için kullanılmaktadır. Bu nedenle yüksek geçiren filtre olarak adlandırılırlar. Buna göre, bu filtreler yüksek frekansa küçük empedans, düşük frekansa da yüksek empedans gösterirler. Şekil 1.4’de çeşitli sönümlü filtreler gösterilmiştir (Chih-ju ve diğ, 2000).



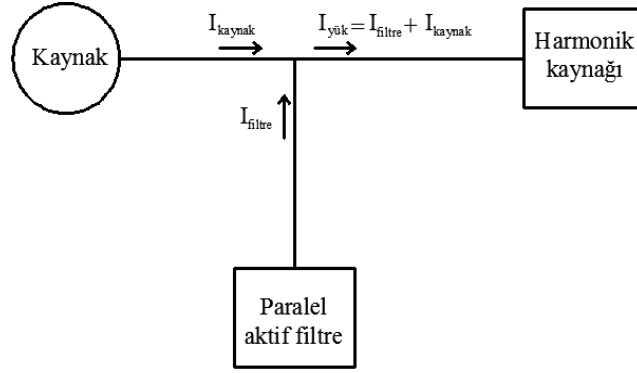
Şekil.1.4. Sönümlü filtreler, a) 1. derece, b) 2. derece, c) 3. derece, d) C tipi

### 1.5.2. Aktif filtreler

Aktif filtreler, doğrusal olmayan yükün çekeceği temel bileşen dışındaki akımı karşılamak amacıyla kullanılmaktadır. Sistemde bulunan harmoniklerle aynı genlikte fakat ters fazda bir akımı sisteme enjekte ederler ve böylelikle harmoniklerin şebekeden çekilmemesi sağlanır. Aktif filtreler yapı olarak, güç elektroniği anahtarlama elemanları ve sistemdeki harmonikleri tanımlayan ve anahtarlama işlemini gerçekleyen çeşitli kontrol düzeneklerinden oluşmaktadır.

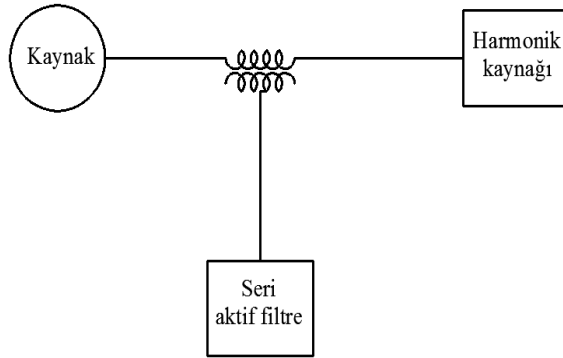
Pasif filtrelere oranla maliyetli olmasına karşın birçok üstünlükleri mevcuttur. Başlıca üstünlükleri, tüm harmonik bileşenlerin kontrolünün mümkün olması, aynı zamanda reaktif güç kompanzasyonunu sağlaması, gerilim ve akım dengesizliklerinin giderilmesi ve şebeke empedansından etkilenmemesi olarak sıralanabilir (Dugan ve diğ., 2012). Aktif filtreler, seri ve paralel olarak bağlanabilmektedir.

Paralel aktif filtreler, uygulanması en kolay filtrelerdir. Bu filtreler, lineer olmayan yüklerin ürettiği harmonikli akımları bastırmak ve/veya reaktif gücün kompanzasyonu için kullanılırlar. Sonuç olarak, paralel aktif güç filtresi kaynak akımlarını neredeyse sinüzoidal ve faz gerilimleri ile aynı fazda olmasını sağlarlar. Şekil 1.5’de paralel filtrenin bir sisteme bağlantısının şematik gösterimi yer almaktadır (Akagi, 2005).



Şekil 1.5. Paralel aktif filtrenin şematik gösterimi

Seri aktif filtreler ise, Şekil 1.6'daki gibi sisteme akım transformatörü üzerinden bağlanır ve gerilim harmoniklerinin filtrelenmesini sağlar (Lee ve diğ., 2004).



Şekil 1.6. Seri aktif filtrenin şematik gösterimi

## 2. SİNÜSOİDAL OLMAYAN DALGALAR VE ANALİZİ

Lineer olmayan elemanlar ile sinüsoidal olmayan kaynaklardan en az birinin sistemde bulunması halinde, sistemdeki akım ve gerilim dalga şekillerinin bozulduğu bilinmektedir. Joseph Fourier, bozulan bu periyodik dalga şekillerinin, çeşitli genlik ve faz açlarına sahip sinüsoidal dalgaların toplamı şeklinde ifade etmiştir. Bu şekilde elde edilen seriye “Fourier serisi”, bu seri elemanlarına da “Fourier bileşenleri” denir.

### 2.1. Fourier Serisi

Herhangi bir periyodik dalganın Fourier serisine açılabilmesi için Dirichlet koşulları olarak bilinen koşulların sağlanması yeterlidir. Bu koşullar aşağıdaki gibi sıralanabilir (De La Rose, 2006).

- ✓ Periyodik bir  $f(t)$  fonksiyonu eğer süreksiz bir fonksiyon ise, T periyodu boyunca sonlu sayıda süreksizlik noktası içermesi,
- ✓ T periyodu boyunca  $f(t)$  fonksiyonunun sonlu bir ortalama değer alması,
- ✓ T periyodu boyunca  $f(t)$  fonksiyonunun sonlu sayıda minimum ve maksimum noktasının bulunması,

Bu durumda, Dirichlet koşulunu sağlayan herhangi bir  $f(t)$  fonksiyonunun trigonometrik olarak ifadesi, Denklem (2.1)'deki gibidir.

$$f(t) = a_0 + \sum_{n=1}^{\infty} [a_n \cos(n\omega_0 t) + b_n \sin(n\omega_0 t)] \quad (2.1)$$

Denklem (2.1) daha basit bir şekilde Denklem (2.2)'deki gibi ifade edilebilir.

$$f(t) = c_0 + \sum_{n=1}^{\infty} [c_n \sin(n\omega_0 t + \varphi_n)] \quad (2.2)$$

$$c_0 = a_0, \quad c_n = \sqrt{a_n^2 + b_n^2}, \quad \varphi_n = \tan^{-1} \left( \frac{a_n}{b_n} \right) \quad (2.3)$$



Bu denklemlerde; ‘n’ pozitif tam sayı olmakla birlikte harmonik mertebesi, ‘t’ bağımsız değişken, ‘a<sub>0</sub>, c<sub>0</sub>’ sabit terimler (ortalama değer), ‘a<sub>n</sub>, b<sub>n</sub>, c<sub>n</sub>’ fonksiyonun n. dereceden Fourier katsayıları, ‘φ<sub>n</sub>’ ise n. dereceden faz açısıdır.

Dirichlet koşullarını sağlayan f(t) periyodik işareti, trigonometrik serilerin bir türü olan üstel Fourier serisi ile de ifade edilebilir. Üstel seri Denklem (2.4)’de verilmiştir.

$$f(t) = \sum_{n=-\infty}^{\infty} A_n e^{jn\omega t} \quad (2.4)$$

Fourier katsayılarının hesaplanması; Denklem (2.1) ve (2.4)’de yer alan a<sub>n</sub>, b<sub>n</sub>, A<sub>n</sub> katsayıları, analitik yöntemle aşağıdaki formüllerle bulunur.

$$a_0 = \frac{1}{T} \int_0^T f(t) dt \quad (2.5)$$

$$a_n = \frac{2}{T} \int_0^T f(t) \cos(n\omega t) dt \quad (2.6)$$

$$b_n = \frac{2}{T} \int_0^T f(t) \sin(n\omega t) dt \quad (2.7)$$

$$A_n = \frac{1}{T} \int_0^T f(t) e^{-jn\omega t} dt \quad (2.8)$$

Denklem (2.5), (2.6), (2.7) ve (2.8)’deki eşitliklerde, integral değişkeni ωt alınarak denklemler aşağıdaki biçimde de ifade edilebilir.

$$a_0 = \frac{1}{2\pi} \int_0^{2\pi} f(\omega t) d\omega t \quad (2.9)$$

$$a_n = \frac{1}{\pi} \int_0^{2\pi} f(\omega t) \cos(n\omega t) d\omega t \quad (2.10)$$

$$b_n = \frac{1}{\pi} \int_0^{2\pi} f(\omega t) \sin(n\omega t) d\omega t \quad (2.11)$$

$$A_n = \frac{1}{2\pi} \int_0^{2\pi} f(\omega t) e^{-jn\omega t} d\omega t \quad (2.12)$$

$a_0$ , işaretin ortalama değerine eşit olduğundan, bu katsayı genellikle gözlem yoluyla elde edilmektedir. Ayrıca üstel serinin katsayısı  $A_n$  ve trigonometrik serinin katsayıları  $a_n$ ,  $b_n$  arasında aşağıdaki bağıntılar mevcuttur.

$$A_n = \frac{1}{2}(a_n - jb_n), \quad A_{-n} = \frac{1}{2}(a_n + jb_n) \quad (2.13)$$

$$a_n = 2\text{Re}(A_n), \quad b_n = -2\text{Im}(A_n) \quad (2.14)$$

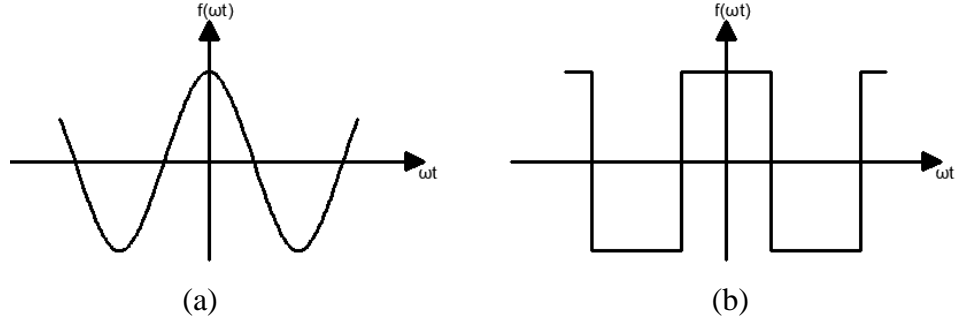
## 2.2. Dalga Biçimlerinde Simetri

Analizi yapılan periyodik bir fonksiyonun Fourier serisine açılımında terimlerin hepsi bulunmayabilir. Bu durum, fonksiyonun taşıdığı belirli bir simetriden kaynaklanır. Genelde dalganın şekline bakılarak doğrudan simetri özelliği görülebilmektedir. Ayrıca çeşitli matematiksel yöntemlerde kullanılabilir. Başlıca simetri türleri; çift fonksiyon simetri, tek fonksiyon simetri, yarım dalga simetri olarak sıralanabilir.

Simetri özelliği, Fourier seri elemanlarının hesaplanmasında büyük kolaylık sağlamaktadır. Örneğin çift fonksiyon simetri taşıyan bir işaretle, sinüslü terimlerin olmadığı bilinmektedir. Bu sayede, Denklem (2.1)'deki sinüslü terimlerin katsayısı olan  $b_n$ 'nin hesaplanmasına gerek kalmayacaktır. Sadece  $a_n$  katsayısının hesaplanması yeterli olacaktır.

➤ Çift fonksiyon simetri;

$f(x)$  fonksiyonu,  $f(-x) = f(x)$  özelliğine sahipse çift fonksiyondur. İki ya da daha fazla çift fonksiyonun toplamı ya da çarpımı yine çift fonksiyon olup, bir sabitin eklenmesi durumunda yine fonksiyon çift olarak kalır. Şekil 2.1'de görüldüğü üzere, çift fonksiyon simetriye sahip fonksiyonlar, düşey eksene göre simetriktir. Fonksiyonun Fourier açılımında, sinüslü terimler yoktur. Yalnızca kosinüslü terimler vardır. Bazen sabit terim de bulunabilmektedir.

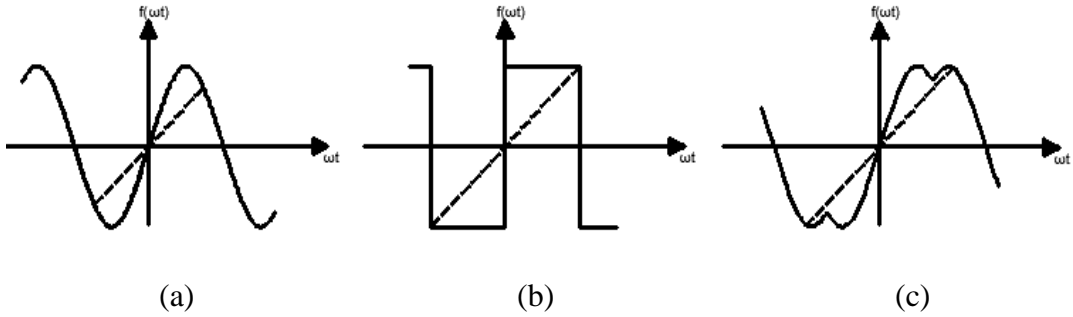


Şekil 2.1. Çift fonksiyon simetriye sahip örnek fonksiyonlar

➤ Tek fonksiyon simetri;

$f(x)$  fonksiyonu,  $f(-x) = -f(x)$  özelliğine sahipse tek fonksiyondur. İki ya da daha fazla tek fonksiyonun toplamı yine tek fonksiyon olup, bir sabitin eklenmesi durumunda fonksiyonun tekliği bozulur. İki tek fonksiyonun çarpımı, bir çift fonksiyondur.

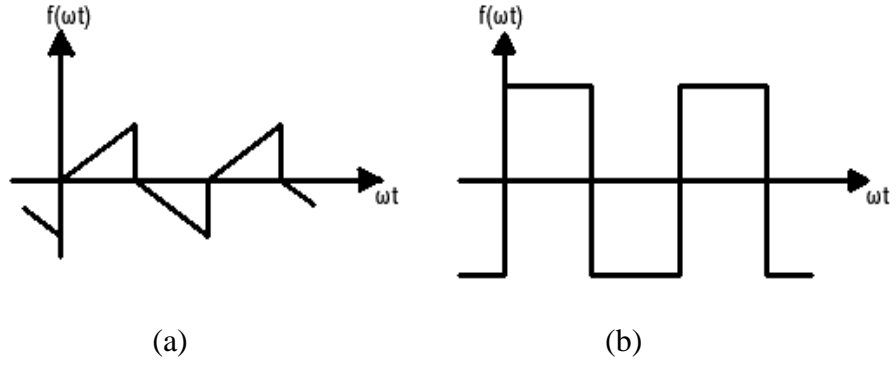
Bu fonksiyonlar, başlangıç noktasına göre simetriktir. Fonksiyonun Fourier açılımında, kosinüslü terimler yoktur. Yalnızca sinüslü terimler vardır. Şekil 2.2’de görülen işaretler, tek fonksiyon simetri özelliğine sahip işaretlere örnek gösterilebilir. Fourier serisinde sabit terim yoktur.



Şekil 2.2. Tek fonksiyon simetriye sahip örnek fonksiyonlar

➤ Yarım dalga simetri;

Eğer,  $T$  periyot olmak üzere,  $f(x) = -f(x+T/2)$  özelliğine sahip ise, bu periyodik  $f(x)$  fonksiyonu yarım dalga simetriye sahiptir. Fonksiyon yatay eksen boyunca sağa veya sola  $T/2$  kadar kaydırılıp, yatay eksen etrafında döndürüldüğünde eğriler birbiri ile çakışıyorsa yarım dalga simetri vardır. Buna ait Fourier analizinde integral 0 ile  $\pi$  arasında alınıp sonuç 2 ile çarpılır. Fourier serisinde sabit terim yoktur. Yalnız tek harmonikli bileşenler vardır. Şekil 2.3’deki işaretler, yarım dalga simetri özelliğine sahip işaretlere örnek gösterilebilir.



Şekil 2.3. Yarım dalga simetriye sahip örnek fonksiyonlar

Yukarıda bahsedilen simetri durumları aynı zamanda üstel Fourier seri açılımında da kolaylık sağlamaktadır. Bir çift işaretin üstel Fourier serisinin katsayıları sadece gerçek sayılardan oluşur. Benzer şekilde, bir tek işaretin üstel Fourier serisinin katsayıları sadece sanal sayılardan oluşur (Navhi ve Edminister, 2002).

Simetri durumları, genel olarak Tablo 2.1'deki gibi özetlenebilir.

Tablo 2.1. Simetri durumlarında trigonometrik Fourier katsayıları

Fonksiyonun özelliği	Matematiksel ifadesi	Fourier katsayısı
Çift fonksiyon simetri	$f(-\omega t) = f(\omega t)$	$a_0 = \frac{1}{2\pi} \int_0^{2\pi} f(\omega t) d\omega t$
		$a_n = \frac{1}{\pi} \int_0^{2\pi} f(\omega t) \cos(n\omega t) d\omega t$
		$b_n = 0$
Tek fonksiyon simetri	$f(-\omega t) = -f(\omega t)$	$a_0 = 0$
		$a_n = 0$
		$b_n = \frac{1}{\pi} \int_0^{2\pi} f(\omega t) \sin(n\omega t) d\omega t$

Tablo 2.1. (Devam) Simetri durumlarında trigonometrik Fourier katsayıları

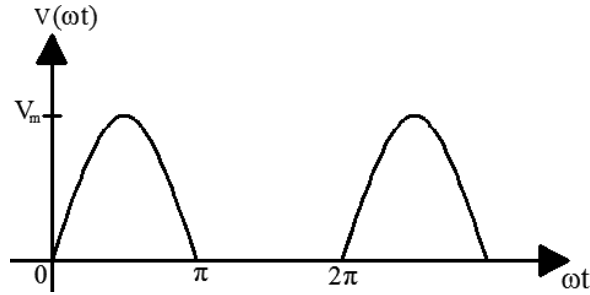
Yarım dalga simetri	$f(\omega t) = -f(\omega t + \pi)$	$a_0 = 0$
		$a_n = 0 \quad b_n = 0 \quad \left. \vphantom{a_n} \right\} n=\text{çift ise}$
		$a_n = \frac{1}{\pi} \int_0^{2\pi} f(\omega t) \cos(n\omega t) d\omega t \quad \left. \vphantom{a_n} \right\} n = \text{tek ise}$
		$b_n = \frac{1}{\pi} \int_0^{2\pi} f(\omega t) \sin(n\omega t) d\omega t \quad \left. \vphantom{b_n} \right\} n = \text{tek ise}$

### 2.3. Çeşitli Dalgaların Fourier Serisi Olarak İfadeleri

Çeşitli dalgaların Fourier serisi olarak ifadelerinin bilinmesi, işaretin kullanılacağı devrelerde analizin hızlı bir şekilde sonuçlanmasında büyük kolaylık sağlamaktadır. Aşağıda bazı temel dalgaların Fourier serisi olarak ifadeleri verilmiştir. Ayrıca ilk iki dalga şeklinin Fourier serisine açılımı adım adım incelenmiştir.

#### 2.3.1. Yarım dalga doğrultulmuş sinüs dalgası

Şekil 2.4'de verilen yarım dalga doğrultulmuş sinüs dalgasında herhangi bir simetri yoktur. Bundan dolayı  $a_n$ ,  $b_n$  katsayılarının her birinin bulunması gerekmektedir.



Şekil 2.4. Yarım dalga doğrultulmuş sinüs dalgası

$$a_0 = \frac{1}{2\pi} \int_0^{\pi} V_m \sin \omega t d\omega t = \frac{1}{2\pi} \int_0^{\pi} V_m \sin \omega t d\omega t = \frac{V_m}{2\pi} \left( -\cos \omega t \Big|_0^{\pi} \right) = \frac{V_m}{\pi} \quad (2.15)$$

$$a_n = \frac{1}{\pi} \int_0^{\pi} V_m \sin \omega t \cos(n\omega t) d\omega t = \frac{V_m}{\pi} \left[ \frac{-\cos (n+1)\omega t}{n+1} + \frac{\cos (n-1)\omega t}{n-1} \right]_0^{\pi} \quad (2.16)$$

$$a_n = 0 \quad \left. \vphantom{a_n} \right\} n = \text{çift} \quad a_n = -\frac{2V_m}{\pi(n^2 - 1)} \quad \left. \vphantom{a_n} \right\} n = \text{tek}$$

$$b_n = \frac{1}{\pi} \int_0^{\pi} V_m \sin \omega t \sin(n\omega t) d\omega t = \frac{V_m}{\pi} \left[ \frac{-\sin(n+1)\omega t}{n+1} + \frac{\sin(n-1)\omega t}{n-1} \right]_0^{\pi} \quad (2.17)$$

$$b_n = 0 \quad \left. \vphantom{b_n} \right\} n \neq 1$$

$n=1$  için Denklem (2.17) tanımsız olduğundan,  $b_1$  katsayısının ayrı hesaplanması gerekmektedir.

$$b_1 = \frac{1}{\pi} \int_0^{\pi} V_m \sin \omega t \sin(\omega t) d\omega t = \frac{V_m}{\pi} \left[ \frac{1}{2} \left( 1 - \frac{\sin 2\omega t}{2} \right) \right]_0^{\pi} \quad (2.18)$$

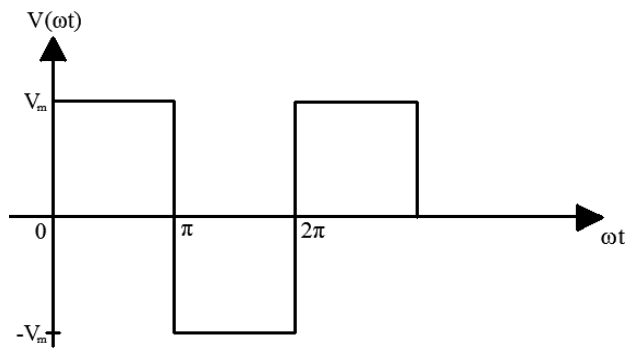
$$b_1 = \frac{V_m}{2} \quad \left. \vphantom{b_1} \right\} n = 1$$

Elde edilen katsayılar Denklem (2.1)'de yerine konulduğunda, yarım dalga doğrultulmuş sinüs dalgasının Fourier seri açılımı Denklem (2.19)'daki gibi elde edilir.

$$v(t) = \frac{V_m}{\pi} + \frac{V_m}{2} \sin \omega t - \frac{2V_m}{\pi} \sum_{n=2,4,6,\dots}^{\infty} \left[ \frac{1}{(n^2-1)} \cos(n\omega t) \right] \quad (2.19)$$

### 2.3.2. Çift yönlü kare dalga

Şekil 2.5'de verilen çift yönlü kare dalga, tek fonksiyon simetri ve yarım dalga simetri özelliğine sahiptir. Bundan dolayı,  $a_0$  ve  $a_n$  katsayıları sıfır olmakla birlikte,  $b_n$  katsayıları  $n$  çift iken sıfırdır.



Şekil 2.5. Çift yönlü kare dalga

$$a_0 = 0 \quad (2.20)$$

$$a_n = 0 \quad (2.21)$$

$$b_n = \frac{2}{\pi} \int_0^{\pi} V_m \sin(n\omega t) d\omega t = \frac{2V_m}{\pi} \left[ \frac{-\cos(n\omega t)}{n} \right]_0^{\pi}$$

$$b_n = 0 \quad \left. \vphantom{b_n} \right\} n = \text{çift}$$

$$b_n = \frac{4V_m}{n\pi} \quad \left. \vphantom{b_n} \right\} n = \text{tek}$$
(2.22)

Elde edilen katsayılar Denklem (2.1)'de yerine konulduğunda, çift yönlü kare dalganın Fourier seri açılımı Denklem (2.23)'deki gibi elde edilir.

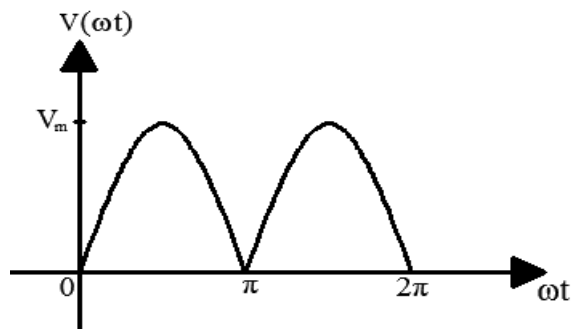
$$v(t) = \frac{4V_m}{\pi} \sum_{n=1,3,5,\dots}^{\infty} \left[ \frac{\sin(n\omega t)}{n} \right]$$
(2.23)

Görüldüğü gibi fonksiyonun simetri özelliğini kullanmak, işlemlerde kolaylık sağlamıştır.

### 2.3.3. Tam dalga doğrultulmuş sinüs dalgası

Şekil 2.6'da verilen tam dalga doğrultulmuş sinüs dalgası, çift fonksiyon simetri özelliğine sahiptir ve  $b_n$  katsayıları sıfırdır. Fourier seri açılımı Denklem (2.24)'de verilmiştir.

$$v(t) = \frac{2V_m}{\pi} - \frac{4V_m}{\pi} \sum_{n=2,4,6,\dots}^{\infty} \left[ \frac{1}{(n^2 - 1)} \cos(n\omega t) \right]$$
(2.24)

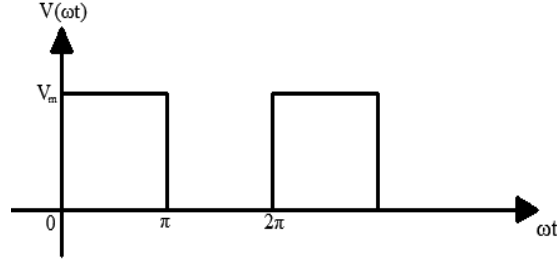


Şekil 2.6. Tam doğrultulmuş sinüs dalgası

### 2.3.4. Tek yönlü kare dalga

Şekil 2.7'de verilen dalganın Fourier seri açılımı Denklem (2.25)'de verilmiştir. Dalga çift fonksiyon simetri özelliğine sahiptir. Bundan dolayı sadece sinüslü terimler mevcuttur.

$$v(t) = \frac{V_m}{2} + \frac{2V_m}{\pi} \sum_{n=1,3,5,\dots}^{\infty} \left[ \frac{\sin(n\omega t)}{n} \right] \quad (2.25)$$

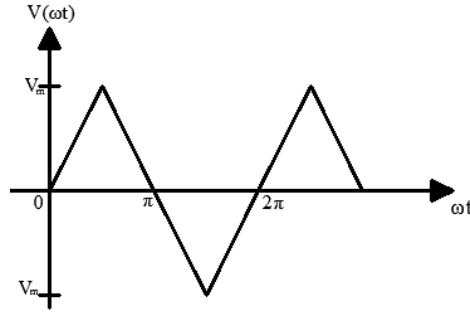


Şekil 2.7. Tek yönlü kare dalga

### 2.3.5. Üçgen dalga

Şekil 2.8’de verilen üçgen dalga, tek fonksiyon simetri ve yarım dalga simetri özelliğine sahiptir. Bundan dolayı,  $a_0$  ve  $a_n$  katsayıları sıfır olmakla birlikte,  $b_n$  katsayıları  $n$  çift iken sıfırdır. Bu dalgaya ait Fourier seri açılımı Denklem (2.26)’da verilmiştir.

$$v(t) = \frac{8V_m}{\pi^2} \sum_{n=1,3,5,\dots}^{\infty} \left( \frac{\sin(n\omega t)}{n^2} \right) \quad (2.26)$$



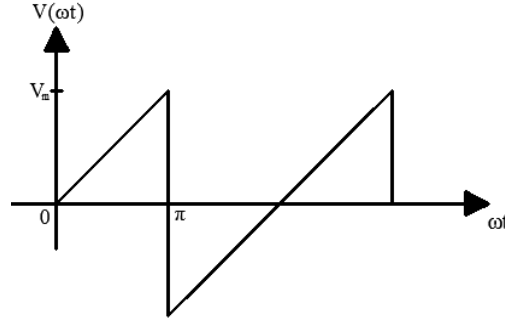
Şekil 2.8. Üçgen dalga

### 2.3.6. Testere dişi dalga

Şekil 2.9’da testere dişi dalga gösterilmiştir. Dalganın Fourier seri açılımı aşağıda verilmiştir. Dalga tek fonksiyon simetri özelliğine sahiptir.

$$v(t) = \frac{V_m}{\pi} \left[ \frac{\pi}{2} - \sum_{n=1,2,3,\dots}^{\infty} \left( \frac{\sin(n\omega t)}{n} \right) \right] \quad (2.27)$$





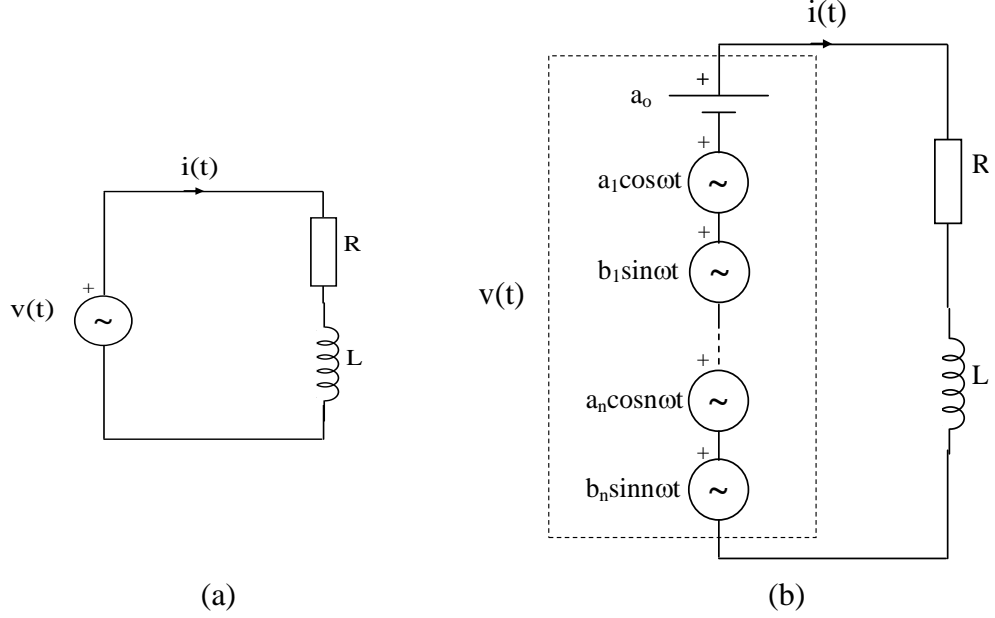
Şekil 2.9. Testere dişi dalga

#### 2.4. Devre Analizi Uygulamaları

Sabit ve sinüsoidal kaynaklara karşı devrelerin cevaplarının bulunmasında, kaynak büyüklükleri tek bir fonksiyonla ifade edilebilir ( $v(t) = V$ ,  $v(t) = V_m \sin \omega t$ ). Bu iki kaynak türüne ilişkin ifadeler, devrelerin tam tepkilerinin ( $0 < t < \infty$ ) belirlenmesinde kullanılabilirler. Ancak kare dalga, doğrultulmuş tek/çift darbeli sinüs dalga, testere dişi dalga gibi bazı periyodik işaretler, tek bir fonksiyonla ancak bölgesel olarak tanımlanabilirler ( $0 < t < T$  aralığı gibi). Dolayısıyla bu tür ifadeler, işaretleri tanımlayabilmekle birlikte, devrelerin tam tepkilerinin ifade edilmesinde kullanılamazlar. Ancak, bölgesel olarak tepkilerin bulunmasına imkan tanır. Eğer periyodik bir işaret, sonlu veya sonsuz sayıda sinüsoidal fonksiyonların toplamı biçiminde tanımlanabilirse, doğrusal devrelerin sinüsoidal olmayan uyarımlara tepkisi, Süperpozisyon teoremi yardımıyla belirlenebilir. Fourier serisi ile analiz, bu tür sorunların çözümünü kolaylaştırmaktadır.

Bölüm 2.1’de ifade edildiği gibi, Dirichlet koşullarını sağlayan herhangi bir periyodik dalga Fourier serisine açılabilir. Doğrusal bir devreye uygulanan gerilimin Fourier serisi ile ifade edilmesi durumunda, Süperpozisyon teoremi uyarınca, akım serisinde de aynı harmonik terimleri elde edilir. Bu durum, Şekil 2.10’da görülmektedir. Devreye uygulanan  $v(t)$  gerilimi Denklem (2.28)’de verilmiştir. Şekil 2.10.a’da doğrusal devredeki kaynağın Fourier serisi açılımındaki her bir terim, Şekil 2.10.b’de tek bir kaynak ile gösterilebilir. Devrenin her  $n\omega$  harmonik frekansındaki eşdeğer empedansı, o harmonikteki akımı hesaplamak için kullanılır. Her bir tepkinin toplamıyla elde edilen akım,  $i(t)$ , uygulanan gerilime karşı devrenin toplam tepkisini verir (Navhi ve Edminister, 2002).

$$v_d(t) = a_0 + \sum_{n=1}^{\infty} [a_n \cos(n\omega t) + b_n \sin(n\omega t)] \quad (2.28)$$



Şekil 2.10. a) Doğrusal bir devre, b) Eşdeğer devre modeli

Devrenin her  $n\omega$  harmonik frekansındaki eşdeğer empedansı aşağıda verilmiştir.

$$\begin{aligned} \tilde{Z}_0 &= R \\ \tilde{Z}_1 &= R + jX_{L1} = |Z_1| \angle \varphi_1 \\ &\dots \\ &\dots \\ \tilde{Z}_n &= R + jX_{Ln} = |Z_n| \angle \varphi_n \end{aligned} \quad (2.29)$$

Her bir kaynağa ilişkin akım bileşenleri Denklem (2.30)'daki gibi bulunur.

$$\begin{aligned} I_0 &= \frac{a_0}{R} \\ i_1(t) &= \frac{a_1}{|Z_1|} \cos(\omega t - \varphi_1) + \frac{b_1}{|Z_1|} \sin(\omega t - \varphi_1) \\ &\dots \\ &\dots \\ i_n(t) &= \frac{a_n}{|Z_n|} \cos(n\omega t - \varphi_n) + \frac{b_n}{|Z_n|} \sin(n\omega t - \varphi_n) \end{aligned} \quad (2.30)$$

Her bir tepkinin toplamıyla elde edilen akım, uygulanan gerilime karşı devrenin toplam tepkisini verir.

$$i(t) = \frac{a_0}{R} + \sum_{n=1}^{\infty} \left[ \frac{a_n}{|Z_n|} \cos(n\omega t - \varphi_n) + \frac{b_n}{|Z_n|} \sin(n\omega t - \varphi_n) \right] \quad (2.31)$$

Yukarıda verilen analizi bir örnekle detaylandıralım (Kasapoğlu, ). Şekil 2.10.a'daki  $v(t)$  gerilim kaynağı Şekil 2.7'de yer alan tek yönlü kare dalga olsun. Denklem (2.32)'de, tek yönlü kare dalganın Fourier seri açılımı tekrardan verilmiştir.

$$v(t) = \frac{V_m}{2} + \frac{2V_m}{\pi} \sum_{n=1,3,5,\dots}^{\infty} \left[ \frac{\sin(n\omega t)}{n} \right] \quad (2.32)$$

Burada yer alan her bir terim, Şekil 2.10.b'de gösterildiği gibi tek bir kaynağı temsil etmektedir. Bu durumda Süperpozisyon teoremi uygulanırsa, her bir kaynağa ilişkin akım tepkisi elde edilir. Bu tepkilerin toplamı, devreden akan toplam akımı verir.

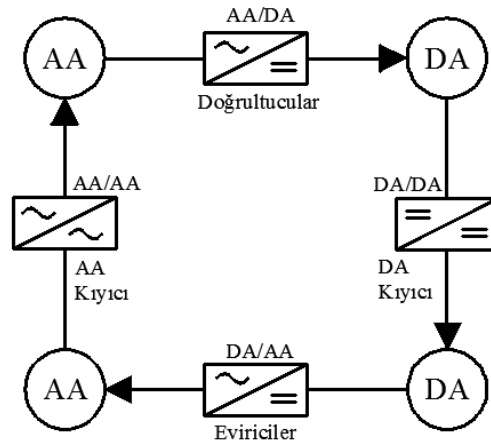
$$\begin{aligned} n = 0 & \rightarrow V_0 = \frac{V_m}{2} & \rightarrow I_0 = \frac{V_m}{2R} \\ n = 1 & \rightarrow v_1(t) = \frac{2V_m}{\pi} \sin(\omega t) & \rightarrow i_1(t) = \frac{2V_m}{\pi \sqrt{R^2 + (\omega L)^2}} \sin(\omega t - \varphi_1) \\ n = 3 & \rightarrow v_3(t) = \frac{2V_m}{3\pi} \sin(3\omega t) & \rightarrow i_3(t) = \frac{2V_m}{3\pi \sqrt{R^2 + (3\omega L)^2}} \sin(3\omega t - \varphi_3) \\ n = 5 & \rightarrow v_5(t) = \frac{2V_m}{5\pi} \sin(5\omega t) & \rightarrow i_5(t) = \frac{2V_m}{5\pi \sqrt{R^2 + (5\omega L)^2}} \sin(5\omega t - \varphi_5) \\ & \dots & \\ & \dots & \\ n = n & \rightarrow v_n(t) = \frac{2V_m}{n\pi} \sin(n\omega t) & \rightarrow i_n(t) = \frac{2V_m}{n\pi \sqrt{R^2 + (n\omega L)^2}} \sin(n\omega t - \varphi_n) \end{aligned} \quad (2.33)$$

Süperpozisyon teoremi uygulanarak, tek yönlü kare dalga uygulanan doğrusal RL devresinden akan toplam akım belirlenir. Sonuç Denklem (2.34)'de gösterildiği gibi elde edilir.

$$i(t) = \frac{V_m}{2R} + \frac{2V_m}{\pi} \sum_{n=1,3,5,\dots}^{\infty} \frac{\sin(n\omega t - \varphi_n)}{n \sqrt{R^2 + (n\omega L)^2}} \quad (2.34)$$

### 3. DOĞRULTUCULAR / AA-DA DÖNÜŞTÜRÜCÜLER

Güç dönüştürücüleri, elektrik enerji şekillerini birbirine çeviren devrelerdir. Enerji şekilleri arasında, dört temel dönüşüm ve bu dönüşümleri gerçekleştiren dört temel devre mevcuttur (Bodur, 2012). Bu devre yapıları, alternatif akım (AA) ve doğru akım (DA) türündeki elektrik enerjisini birbirlerine veya kendi içinde farklı şekillere ve seviyelere sahip bir yapıya dönüştürme işlemini gerçekleştirir. Dört temel devre Şekil 3.1’de görülen diyagramla özetlenmiştir.



Şekil 3.1. Temel Dönüştürücüler

AA/DA dönüştürücüler (doğrultucular veya redresörler), belirli genliğe, frekansa ve faz sayısına sahip bir AA gerilimi, belirli bir genlikteki DA gerilime dönüştürmektedir. Doğal komütasyonlu olan bu dönüştürücü devreleri, tristör veya diyotlarla gerçekleştirilirler. Uygulama alanları, DA motor kontrolü, akümülatör şarjı, elektrolizle kaplama, DA güç kaynakları, DA kısıyıcı ile eviricilerin beslenmesi vb. DA uygulamaları olarak sıralanabilir.

DA/DA dönüştürücüler (DA kısıyıcı veya DA gerilim ayarlayıcı), belirli değerdeki bir DA gerilimi, belirli değere sahip başka bir DA gerilime dönüştürmektedir. Zorlamalı komütasyonlu olan bu dönüştürücüler, bipolar jonksiyon transistör (BJT), metal oksit yarıiletken alan etkili transistör (MOSFET), izole kapılı bipolar transistör (IGBT), kapı söndürmeli tristör (GTO), MOS kontrollü tristör (MCT) gibi tam kontrollü yarı iletken elemanlarla gerçekleştirilebilirler.

Ancak yüksek güç gerektiren uygulamalarda, ilave söndürme devreleriyle birlikte tristörler (SCR) kullanılmaktadır (Abut, 2004). Uygulama alanları, DA motor kontrolü, akümülatör şarjı, elektrolizle kaplama, DA güç kaynakları, eviricilerin beslenmesi, elektronik balastlar, DA röleleri ve kontaktörleri vb. DA uygulamaları olarak sıralanabilir.

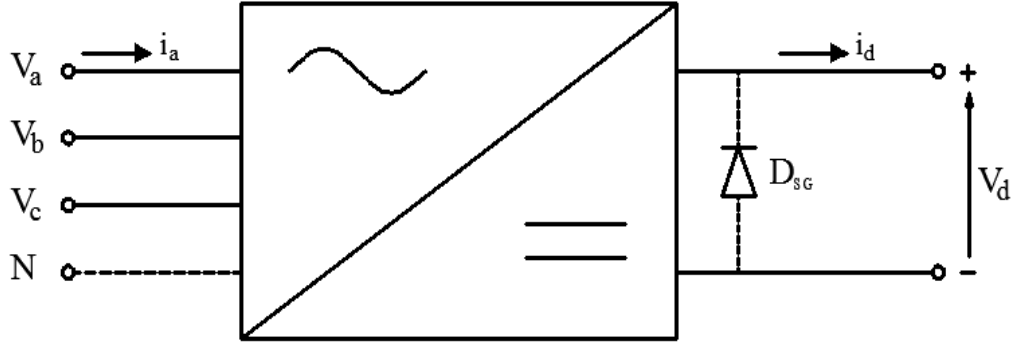
DA/AA dönüştürücüler (eviriciler), belirli değerdeki bir DA gerilimi, belirli genliğe, frekansa ve faz sayısına sahip bir AA gerilime dönüştürürler. Zorlamalı komütasyonlu olan bu devrelerde eleman seçimi DA kısıcılardaki gibidir. Uygulama alanları, AA motor kontrolü, endüksiyonla ısıtma, elektronik balastlar, kesintisiz güç kaynakları, AA güç kaynakları vb. AA uygulamaları olarak sıralanabilir.

AA/AA dönüştürücüler (AA kısıcı veya AA gerilim ayarlayıcı ), frekans ve faz sayısı sabit kalmak üzere, sadece AA gerilimin etkin değerini kontrol eder. Doğal komütasyonlu olan bu dönüştürücü devreleri, ısı ve ışık kontrolü, endüksiyonla ısıtma, statik var kompanzasyonu, aktif filtreler, AA röleler, kontaktörler ve AA güç kaynakları gibi AA uygulamalarında kullanılırlar (Bodur, 2012). Yine bu türe giren ve doğrudan frekans dönüştürücü olarak adlandırılan devreler, AA gerilimin etkin değeri başta olmak üzere, frekans ve faz sayısını da değiştirerek başka bir AA gerilime dönüştürürler. Bunlar çok düşük devirlerde çalışan ağır iş makinelerinin kontrolünde kullanılırlar.

AA şebekeyle bağlantılı olan AA/DA ve AA/AA dönüştürücülerde, anahtarlama elemanı olarak kullanılan tristörler sinüsoidal olan akımın sıfır geçiş anlarında doğal olarak sönerler. Bu nedenle bu dönüştürücüler doğal komütasyonlu olarak adlandırılır. Tristörlerin zorla söndürülmesini gerektiren diğer dönüştürücüler ise zorlamalı komütasyonlu olarak tanımlanır.

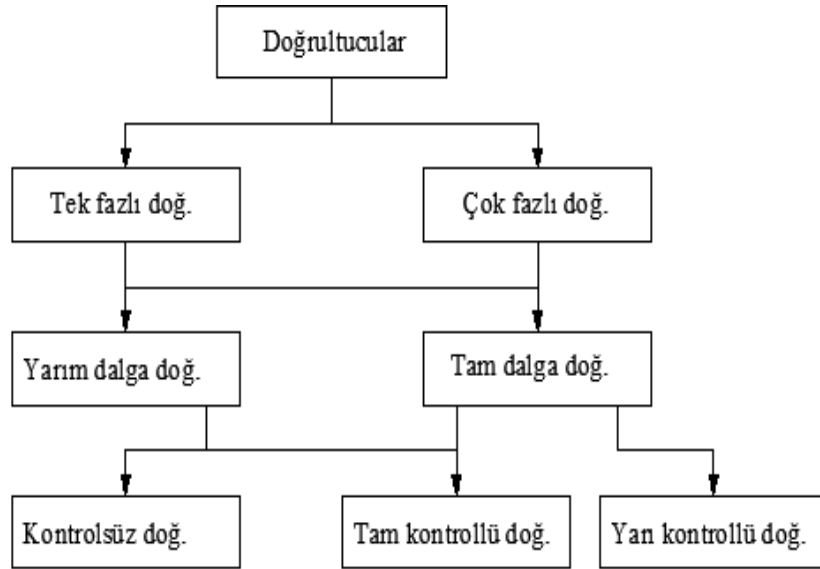
### **3.1. Doğrultucuların Sınıflandırılması**

Doğrultucular, yukarıda bahsedildiği gibi, genel olarak AA gerilimini DA gerilimine dönüştürmektedir. Doğrultuculara ait temel blok şeması Şekil 3.2'deki gibi gösterilebilir. Burada  $v_a(t)$ ,  $v_b(t)$ ,  $v_c(t)$  sırasıyla a, b, c fazlarına ait giriş faz gerilimleri,  $v_d(t)$  çıkış gerilimi,  $i_a(t)$  'a' fazına ait giriş akımı,  $i_d(t)$  çıkış akımı, N şebeke nötr hattı,  $D_{SG}$  ise serbest geçiş diyotudur.



Şekil 3.2. Doğrultucuların temel blok şeması (Bodur,2012)

Doğrultucular, faz sayısına, doğrultulan dalga sayısına ve kontrol şekline göre sınıflandırılırlar. Faz sayısı açısından; tek fazlı doğrultucular ve çok fazlı doğrultucular, doğrultulan dalga sayısına açısından; yarım dalga doğrultucular ve tam dalga doğrultucular, kontrol açısından; kontrolsüz doğrultucular, kontrollü doğrultucular ve yarı kontrollü doğrultucular olarak detaylandırılabilir. Bu sınıflandırma, Şekil 3.3'deki şemada gösterilmiştir.



Şekil 3.3. Doğrultucuların sınıflandırılması (Bodur, 2012)

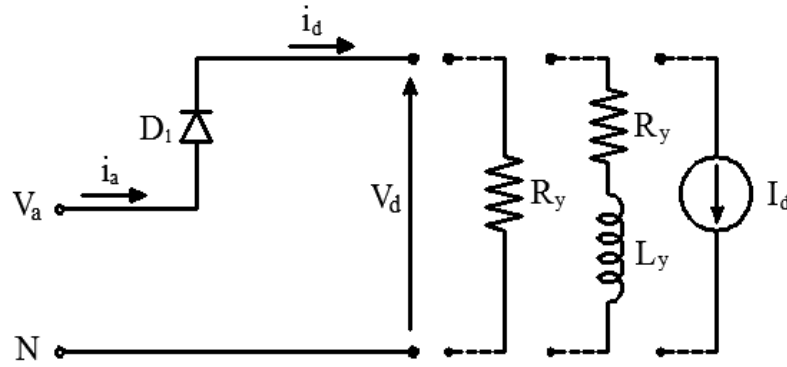
### 3.1.1. Kontrolsüz doğrultucular

Kontrolsüz doğrultucularda kullanılan temel güç elemanı diyottur. Diyot, kontrolsüz bir güç elemanı olduğu için, bu doğrultucuya böyle bir isim verilmiştir. Çıkış gerilimi sabit doğru gerilimdir.

Alt başlıklarda, tüm kontrolsüz doğrultucuların farklı yükler ( $R_y$ ,  $R_y-L_y$ ,  $I_d$ ) altında davranışları incelenecektir. Yükün endüktif olduğu incelemelerde,  $L_y$  değeri yeterince büyük olmayan bir endüktans olarak alınmış ve temel dalga şekilleri buna göre elde edilmiştir. Büyük değerli endüktans ise akım kaynağı olarak modellenmiştir. Tüm devrelerdeki diyotlar ideal kabul edilmiştir. Her bir yük durumunda, temel dalga şekillerine ait Fourier açılımları verilmiştir. Tezde ileri sürülen harmonik eşdeğer devre modeli (Bölüm 4) bu seri açılımlarına dayanmaktadır.

### 3.1.1.1. Bir fazlı yarım dalga kontrolsüz doğrultucu

Bir fazlı yarım dalga kontrolsüz doğrultucuya ait devre şeması Şekil 3.4’de verilmiştir. Devrede  $v_a(t)=V_m \sin(\omega t)$  olup kaynak gerilimi,  $i_a(t)$  kaynak akımı,  $v_d(t)$  doğrultulmuş çıkış gerilimi,  $i_d(t)$  ise çıkış akımıdır.



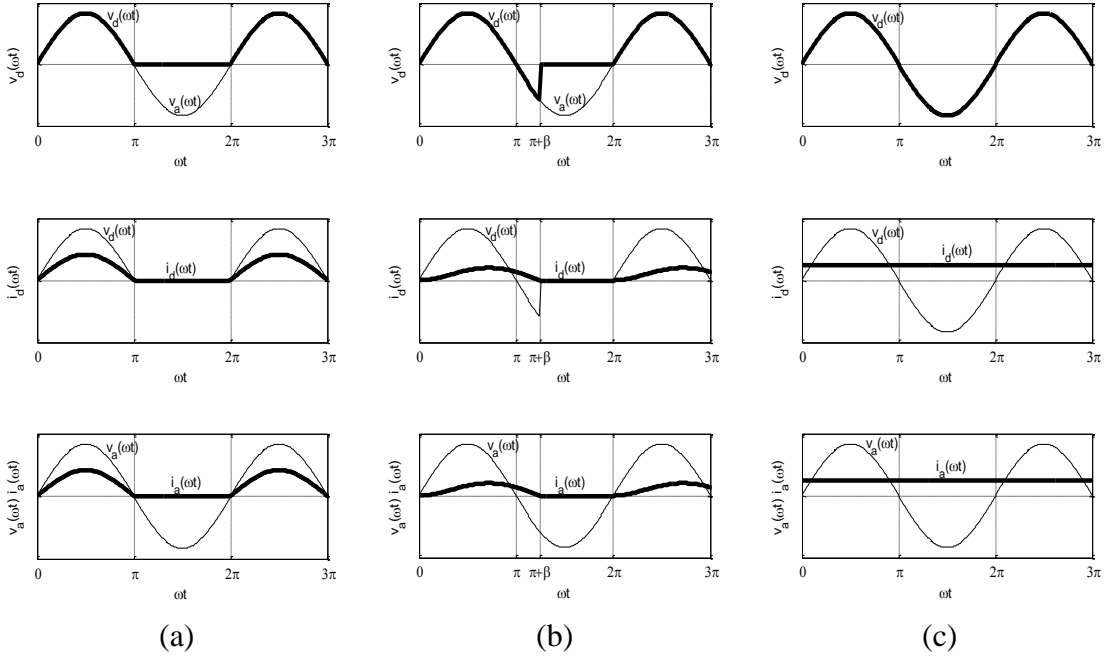
Şekil 3.4. Bir faz yarım dalga kontrolsüz doğrultucu devresi

a) Yükün direnç olması durumu;

Şekil 3.4’de yükün  $R_y$  direnç yükü olması durumunda,  $0 < \omega t < \pi$  aralığında, anot gerilimi pozitif olan  $D_1$  diyotu iletime kutuplanır ve çıkış gerilimi giriş gerilimine eşit olur.  $\pi < \omega t < 2\pi$  aralığında ise, anot gerilimi negatif olan  $D_1$  diyotu kesime kutuplanır ve çıkış gerilimi sıfır olur. Çıkış gerilimi Denklem (3.1)’deki gibi ifade edilebilir.

$$v_d(t) = \begin{cases} v_a & | 0 < \omega t < \pi & D_1 \text{ iletimde} & v_a > 0 \\ 0 & | \pi < \omega t < 2\pi & D_1 \text{ kesimde} & v_a < 0 \end{cases} \quad (3.1)$$

Şekil 3.5a’da yükün direnç olması durumunda devreye ait temel dalga şekilleri görülmektedir. Bu temel dalgalar, giriş gerilimi  $v_a(t)$ , çıkış gerilimi  $v_d(t)$ , çıkış akımı  $i_d(t)$ , ve giriş akımı  $i_a(t)$ ’dir.



Şekil 3.5. Bir fazlı yarım dalga kontrolsüz doğrultucuya a) direnç, b) endüktif yük, c) akım kaynağı bağlı olması durumunda temel dalga şekilleri

Bu yük durumuna ait dalga şekillerinin Fourier seri açılımları Denklem (3.2) ve (3.3)'de verilmiştir. Çözüm aşamaları ise Bölüm 2.3'de bulunmaktadır.

$$v_d(t) = \frac{V_m}{\pi} + \frac{V_m}{2} \sin \omega t - \frac{2V_m}{\pi} \sum_{n=2,4,6,\dots}^{\infty} \left[ \frac{1}{(n^2 - 1)} \cos(n\omega t) \right] \quad (3.2)$$

$$i_d(t) = i_a(t) = \frac{V_m}{\pi R_y} + \frac{V_m}{2R_y} \sin \omega t - \frac{2V_m}{\pi R_y} \sum_{n=2,4,6,\dots}^{\infty} \left[ \frac{1}{(n^2 - 1)} \cos(n\omega t) \right] \quad (3.3)$$

b) Yükün endüktif olması durumu;

Endüktansta biriken enerjiden dolayı, Şekil 3.5.b'de gösterildiği gibi  $\pi+\beta$  anına kadar akım akışı devam eder. Endüktansta biriken enerjinin bitmesiyle,  $\pi+\beta$ 'da kesime giren diyot  $2\pi$  anında tekrardan iletme girecektir. Bu nedenle  $\pi$ 'den  $\pi+\beta$  anına kadar negatif değer alan çıkış gerilimi, omik duruma göre daha düşük ortalama değere sahiptir. Çıkış gerilimi Denklem (3.4)'deki gibi ifade edilebilir. Buradaki  $\beta$ , zaman sabiti  $\tau$ 'ya bağlı komitasyona girme açısındaki gecikmeyi ifade etmektedir.

$$v_d(t) = \begin{cases} V_a & 0 < \omega t < \pi + \beta & D_1 \text{ iletimde} \\ 0 & \pi + \beta < \omega t < 2\pi & D_1 \text{ kesimde} \end{cases} \quad (3.4)$$



Yükün endüktif olması durumunda devreye ait temel dalga şekilleri Şekil 3.5b’de verilmiştir. Bu durumda;

$$\underline{Z}_n = R_y + jX_{L_y,n} = R_y + jn\omega L_y = |Z_n| \angle \varphi_n \quad (3.5)$$

$$|Z_n| = \sqrt{R_y^2 + X_{L_y,n}^2} \quad (3.6)$$

$$\varphi_n = \tan^{-1} \frac{n\omega L_y}{R_y} \quad (3.7)$$

$$\underline{I}_d = \frac{\underline{U}_d}{\underline{Z}} = \frac{|U_d| \angle 0}{|Z_n| \angle \varphi_n} = \left| \frac{U_d}{Z_n} \right| \angle -\varphi_n \quad \rightarrow \quad i_d(t) = \left| \frac{U_d}{Z_n} \right| \sin(\omega t - \varphi_n) \quad (3.8)$$

olmak üzere temel dalga şekillerinin Fourier seri açılımları sırayla Denklem (3.9), (3.10) ve (3.11)’deki gibi elde edilir.

$$v_d(t) = \frac{V_m}{2\pi} \left\{ \begin{aligned} & \left( (1 - \cos(\pi + \beta)) - \frac{1}{2}(\cos 2\beta - 1) \cos \omega t + \left( \pi + \beta - \frac{\sin 2\beta}{2} \right) \sin \omega t + \right. \\ & \sum_{n=2,3,4,\dots}^{\infty} \left( -\frac{\cos(n+1)(\pi + \beta)}{n+1} + \frac{\cos(n-1)(\pi + \beta)}{n-1} - \frac{2}{n^2-1} \right) \cos n\omega t + \\ & \left. \sum_{n=2,3,4,\dots}^{\infty} \left( -\frac{\sin(n+1)(\pi + \beta)}{n+1} + \frac{\sin(n-1)(\pi + \beta)}{n-1} \right) \sin n\omega t \right\} \quad (3.9) \end{aligned} \right.$$

$$i_d(t) = \frac{V_m}{2\pi} \left\{ \begin{aligned} & \left[ \frac{1 - \cos(\pi + \beta)}{R_y} - \frac{\cos 2\beta - 1}{2\sqrt{R_y^2 + (\omega L_y)^2}} \cos(\omega t - \varphi_1) + \right. \\ & \left. \left( \pi + \beta - \frac{\sin 2\beta}{2} \right) \frac{1}{\sqrt{R_y^2 + (\omega L_y)^2}} \sin(\omega t - \varphi_1) + \right. \\ & \sum_{n=2,3,4,\dots}^{\infty} \left( -\frac{\cos(n+1)(\pi + \beta)}{n+1} + \frac{\cos(n-1)(\pi + \beta)}{n-1} - \frac{2}{n^2-1} \right) \frac{\cos(n\omega t - \varphi_n)}{\sqrt{R_y^2 + (n\omega L_y)^2}} + \\ & \left. \sum_{n=2,3,4,\dots}^{\infty} \left( -\frac{\sin(n+1)(\pi + \beta)}{n+1} + \frac{\sin(n-1)(\pi + \beta)}{n-1} \right) \frac{\sin(n\omega t - \varphi_n)}{\sqrt{R_y^2 + (n\omega L_y)^2}} \right] \end{aligned} \right\} \quad (3.10)$$

$$i_a(t) = i_d(t) \quad (3.11)$$

c) Yükün akım kaynağı olması durumu;

Bu durumda,  $0 < \omega t < \pi$  aralığında, anot gerilimi pozitif olan  $D_1$  diyotu iletimdedir. Çıkış gerilimi, kaynak gerilimine eşittir.  $\pi < \omega t < 2\pi$  aralığında ise anot gerilimi negatif olmasına rağmen, yük akımının sürekli olması nedeniyle  $D_1$  diyotu iletimde kalır ve çıkış gerilimi yine kaynak gerilimine eşit olur. Çıkış gerilim ifadesi Denklem (3.12)'de verilmiştir. Temel dalga şekilleri ise Şekil 3.5.c'de gösterilmiştir.

$$v_d = \begin{cases} V_a & | \quad 0 < \omega t < \pi \quad D_1 \text{ iletimde} \\ V_a & | \quad \pi < \omega t < 2\pi \quad D_1 \text{ iletimde} \end{cases} \quad (3.12)$$

$v_d(t)$ ,  $i_d(t)$  ve  $i_a(t)$  'nin Fourier seri açılımı Denklem (3.13) ve (3.14)'de mevcuttur.

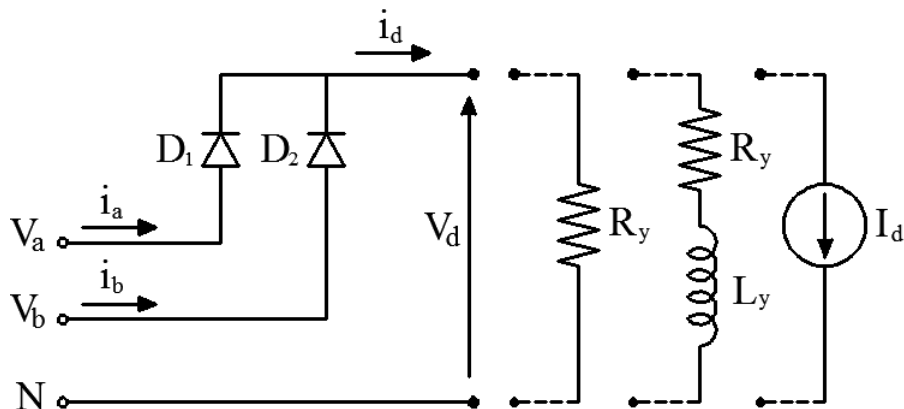
$$v_d(t) = V_m \sin \omega t \quad (3.13)$$

$$i_d(t) = i_a(t) = I_d \quad (3.14)$$

Bir fazlı yarım dalga kontrolsüz doğrultucu devresi saç kurutma makinası, üniversal motor gibi düşük güçlü cihazlarda, ikinci bir güç kademesi amacıyla kullanılmaktadır. Ancak, şebekeden çekilen akımda büyük ölçüde harmonikler mevcuttur.

### 3.1.1.2. İki fazlı yarım dalga kontrolsüz doğrultucu

Şekil 3.6'da iki fazlı yarım dalga kontrolsüz doğrultucuya ait devre şeması görülmektedir.



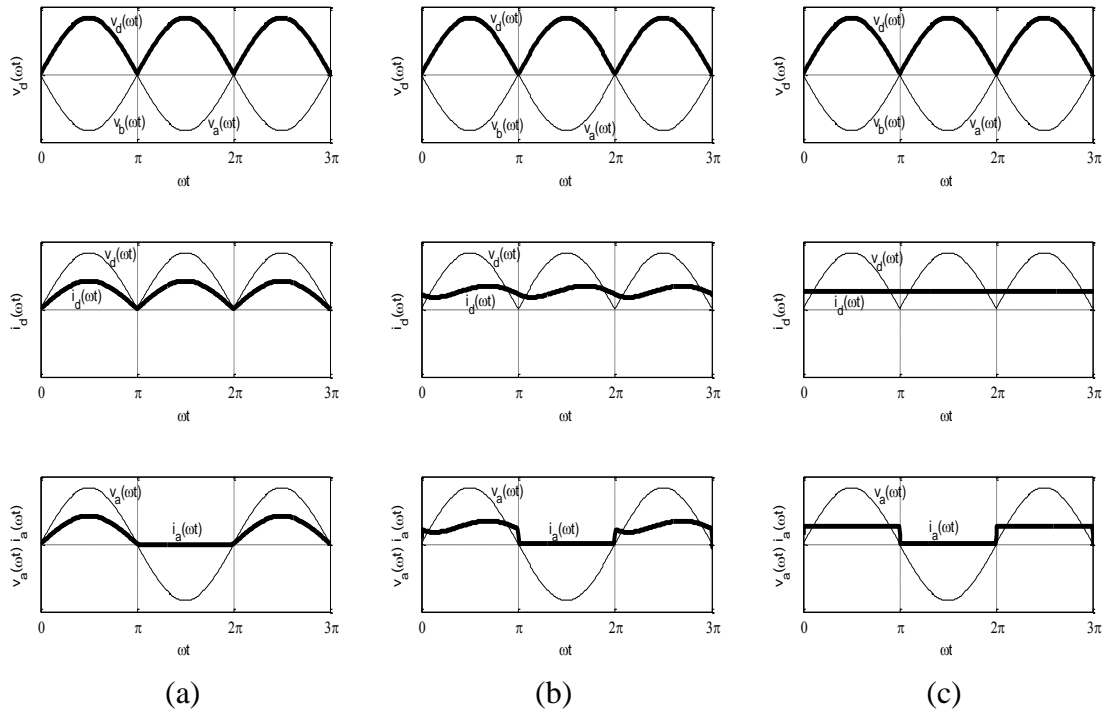
Şekil 3.6. İki fazlı yarım dalga kontrolsüz doğrultucu devresi

Doğrultucunun çıkış uçlarına herhangi bir yükün bağlı olması durumunda, anot gerilimi daha büyük olan diyot iletimdeyken, diğer diyot kesimde kalır. İki diyotun

birlikte iletimde kalması mümkün değildir. Devrede  $0 < \omega t < \pi$  aralığında,  $V_{ab} > 0$  olduğundan  $D_1$  diyotu iletimde,  $D_2$  diyotu kesimdedir ve çıkış gerilimi  $V_a$  şebeke gerilimine eşittir.  $\pi < \omega t < 2\pi$  aralığında ise,  $V_{ba} > 0$  olduğundan  $D_2$  diyotu iletimde,  $D_1$  diyotu kesimdedir ve çıkış gerilimi  $V_b$  faz gerilimine eşittir. Bu durum, Denklem (3.15)'deki gibi ifade edilir.

$$V_d = \begin{cases} V_a & | 0 < \omega t < \pi & D_1 \text{ iletimde} & V_{ab} > 0 \\ V_b & | \pi < \omega t < 2\pi & D_2 \text{ iletimde} & V_{ba} > 0 \end{cases} \quad (3.15)$$

Her üç yük durumu için temel dalga şekilleri Şekil 3.7'de verilmiştir. Görüldüğü gibi çıkış geriliminde, şebekenin bir periyodu için 2 darbe oluşmaktadır. Şebekeden çekilen akım ise, direnç yükü için sinüsoidal, endüktif yük için bozunumlu, akım kaynağı yükü için kare dalga şeklindedir.



Şekil 3.7. İki fazlı yarım dalga kontrolsüz doğrultucuya a) direnç, b) endüktif yük, c) akım kaynağı bağlı olması durumunda temel dalga şekilleri

Yukarıda görüldüğü gibi çıkış gerilimi yükten bağımsızdır ve Fourier seri açılımı, Denklem (3.16)'da ifade edilmiştir.

$$v_d(t) = \frac{2V_m}{\pi} - \frac{4V_m}{\pi} \sum_{n=2,4,6,\dots}^{\infty} \left[ \frac{1}{(n^2 - 1)} \cos(n\omega t) \right] \quad (3.16)$$

a) Yükün direnç olması durumu;

Bu durumda; çıkış akımı ve 'a' fazından çekilen giriş akımının Fourier seri açılımları sırasıyla Denklem (3.17) ve (3.18)'de verilmiştir.

$$i_d(t) = \frac{2V_m}{\pi R_y} - \frac{4V_m}{\pi R_y} \sum_{n=2,4,6\dots}^{\infty} \left[ \frac{1}{(n^2-1)} \cos(n\omega t) \right] \quad (3.17)$$

$$i_a(t) = \frac{V_m}{\pi R_y} + \frac{V_m}{2R_y} \sin \omega t - \frac{2V_m}{\pi R_y} \sum_{n=2,4,6\dots}^{\infty} \left[ \frac{1}{(n^2-1)} \cos(n\omega t) \right] \quad (3.18)$$

b) Yükün endüktif olması durumu;

Bu durumda, çıkış akımı  $i_d(t)$  Denklem (3.5), (3.6), (3.7) ve (3.8)'de verilen eşitlikler yardımıyla, Denklem (3.19) şeklinde ifade edilir.

$$i_d(t) = \frac{2V_m}{\pi R_y} - \frac{4V_m}{\pi} \sum_{n=2,4,6\dots}^{\infty} \left[ \frac{1}{(n^2-1)\sqrt{R_y^2 + (n\omega L_y)^2}} \cos(n\omega t - \varphi_n) \right] \quad (3.19)$$

'a' fazından çekilen giriş akımı, Denklem (3.20)'de ifade edilmiştir. Burada yer alan k çarpanı,  $v_a(t)$  geriliminin pozitif alternansında '1', negatif alternansında '0' değerini alır. Bu çarpanın kullanılma nedeni, giriş akımının yük akımının tek alternansını içermesidir.

$$i_a(t) = \frac{V_m}{\pi R_y} + \frac{4V_m}{\pi^2 R_y} \sum_{n=1,3,5\dots}^{\infty} \left[ \frac{\sin(n\omega t)}{n} \right] + k \frac{4V_m}{\pi} \sum_{n=2,4,6\dots}^{\infty} \left[ \frac{-1}{(n^2-1)\sqrt{R_y^2 + (n\omega L_y)^2}} \cos(n\omega t - \varphi_n) \right] \quad (3.20)$$

c) Yükün akım kaynağı olması durumu;

Bu durumda, giriş ve çıkış akımı aşağıda verildiği gibidir.

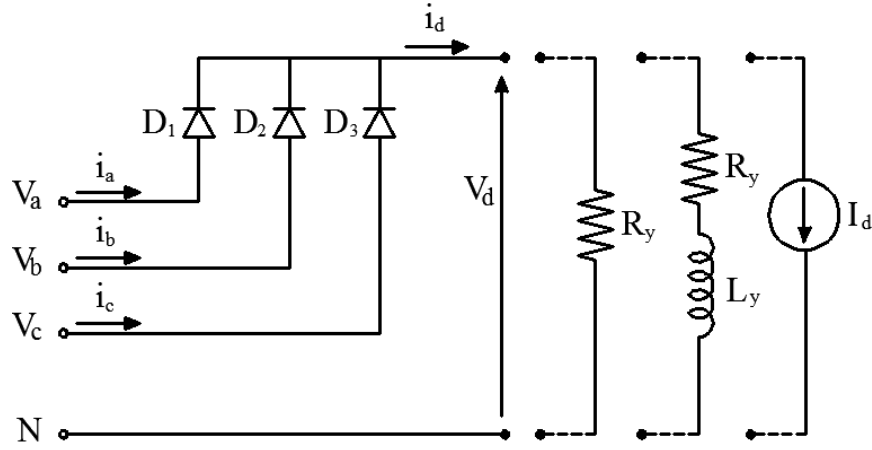
$$i_d(t) = I_d \quad (3.21)$$

$$i_a(t) = \frac{I_d}{2} + \frac{2I_d}{\pi} \sum_{n=1,3,5\dots}^{\infty} \left[ \frac{\sin(n\omega t)}{n} \right] \quad (3.22)$$

Şebekeden çekilen akım büyük ölçüde harmonik içermektedir. Bu devre özellikle DA gerilim kaynakları ve DA gerilim düzenleyicilerinde kullanılmaktadır.

### 3.1.1.3. Üç fazlı yarım dalga kontrolsüz doğrultucu

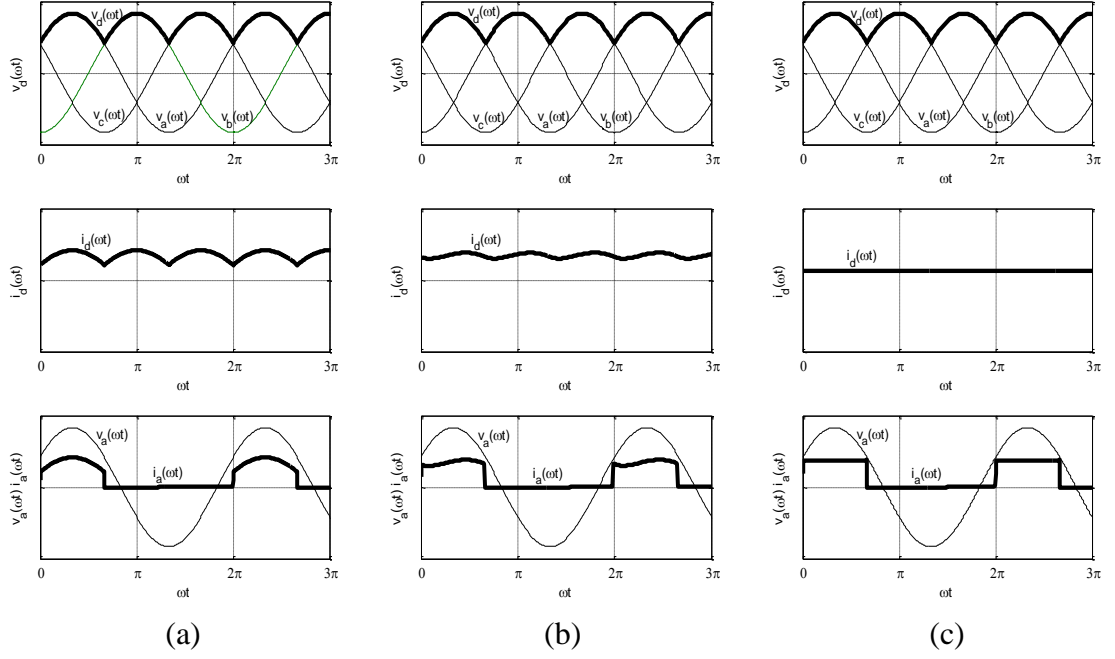
Şekil 3.8’de üç fazlı yarım dalga kontrolsüz doğrultucuya ait devre şeması görülmektedir.



Şekil 3.8. Üç fazlı yarım dalga kontrolsüz doğrultucu devresi

Devrede anot gerilimi daha büyük olan diyot iletimde olurken diğer diyotlar kesimde kalmaktadırlar. Devrede,  $0 < \omega t < 2\pi/3$  aralığında,  $V_a > V_b$  ve  $V_a > V_c$  olduğundan  $D_1$  diyotu iletimde,  $D_2$  ve  $D_3$  diyotları kesimdedir ve çıkış gerilimi  $V_a$  gerilimine eşittir.  $2\pi/3 < \omega t < 4\pi/3$  aralığında  $V_b > V_a$  ve  $V_b > V_c$  olduğundan  $D_2$  diyotu iletimde,  $D_1$  ve  $D_3$  diyotları kesimdedir ve çıkış gerilimi  $V_b$ 'ye eşittir. Aynı şekilde  $4\pi/3 < \omega t < 2\pi$  aralığında  $V_c$  gerilimi diğerlerine göre büyük olduğundan  $D_3$  diyotu iletimde  $D_1$  ve  $D_2$  diyotları kesimdedir ve çıkış gerilimi  $V_c$ 'ye eşittir. Bu durum, Denklem (3.23)'deki gibi ifade edilebilir. Her bir yük durumu için temel dalga şekilleri Şekil 3.9'de verilmiştir.

$$v_d(t) = \left\{ \begin{array}{lll} V_a & | & 0 < \omega t < 2\pi/3 \quad D_1 \text{ iletimde} \quad V_{ab} > 0 \text{ ve } V_{ac} > 0 \\ V_b & | & 2\pi/3 < \omega t < 4\pi/3 \quad D_2 \text{ iletimde} \quad V_{bc} > 0 \text{ ve } V_{ba} > 0 \\ V_c & | & 4\pi/3 < \omega t < 2\pi \quad D_3 \text{ iletimde} \quad V_{ca} > 0 \text{ ve } V_{cb} > 0 \end{array} \right\} \quad (3.23)$$



Şekil 3.9. Üç fazlı yarım dalgı kontrolsüz doğrultucuya a) direnç, b) endüktif yük, c) akım kaynağı bağılı olması durumunda temel dalgı şekilleri

Yükten bağımsız olan çıkış geriliminin Fourier seri açılımı, Denklem (3.24)'deki gibidir.

$$v_d(t) = \frac{3\sqrt{3}V_m}{\pi} \left[ \frac{1}{2} + \sum_{n=3,6,9\dots}^{\infty} \left( \frac{1}{(n^2-1)} \cos(n\omega t + \pi) \right) \right] \quad (3.24)$$

a) Yükün direnç olması durumu;

Bu durumda,  $i_d(t)$  ve  $i_a(t)$ 'nin Fourier seri açılımları, sırasıyla Denklem (3.25) ve (3.26)'da verilmiştir.

$$i_d(t) = \frac{3\sqrt{3}V_m}{\pi R_y} \left[ \frac{1}{2} + \sum_{n=3,6,9\dots}^{\infty} \left( \frac{1}{(n^2-1)} \cos(n\omega t + \pi) \right) \right] \quad (3.25)$$

$$\begin{aligned}
i_a(t) = & \frac{\sqrt{3}V_m}{2\pi R_y} + \frac{V_m}{R_y} \left( \frac{\sqrt{3}}{8\pi} + \frac{1}{6} \right) \cos \omega t + \frac{V_m}{R_y} \left( \frac{\sqrt{3}}{6} + \frac{3}{8\pi} \right) \sin \omega t \\
& - \frac{\sqrt{3}V_m}{4\pi R_y} \sum_{n=2,4,5,7,\dots}^{\infty} \left[ \frac{\sin \frac{2(1+n)\pi}{3} \sin \frac{2(1-n)\pi}{3} \cos \frac{2(1+n)\pi}{3}}{1+n} - \frac{\sin \frac{2(1-n)\pi}{3} \cos \frac{2(1+n)\pi}{3}}{1-n} + \frac{\cos \frac{2(1+n)\pi}{3}}{\sqrt{3}(1+n)} \right] \sin n\omega t \\
& + \frac{\sqrt{3}V_m}{4\pi R_y} \sum_{n=2,4,5,7,\dots}^{\infty} \left[ \frac{\cos \frac{2(1+n)\pi}{3} \cos \frac{2(1-n)\pi}{3} \sin \frac{2(1+n)\pi}{3}}{1+n} - \frac{\cos \frac{2(1-n)\pi}{3} \sin \frac{2(1+n)\pi}{3}}{1-n} + \frac{\sin \frac{2(1+n)\pi}{3}}{\sqrt{3}(1+n)} \right] \cos n\omega t \\
& + \frac{\sqrt{3}V_m}{4\pi R_y} \sum_{n=2,4,5,7,\dots}^{\infty} \left[ \frac{\cos \frac{2(1-n)\pi}{3} + \frac{2}{\sqrt{3}(1-n)}}{\sqrt{3}(1-n)} + \frac{2}{\sqrt{3}(n^2-1)} \right] \sin n\omega t \\
& + \frac{\sqrt{3}V_m}{4\pi R_y} \sum_{n=2,4,5,7,\dots}^{\infty} \left[ \frac{\sin \frac{2(1-n)\pi}{3} - \frac{2}{(n^2-1)}}{\sqrt{3}(1-n)} - \frac{2}{(n^2-1)} \right] \cos n\omega t
\end{aligned} \tag{3.26}$$

b) Yükün endüktif olması durumu;

Bu durumda, yük akımı  $i_d(t)$ , Denklem (3.5), (3.6), (3.7) ve (3.8)'de verilen eşitlikler kullanılarak Denklem (3.27)'deki gibi elde edilmiştir.

$$i_d(t) = \frac{3\sqrt{3}V_m}{\pi} \left[ \frac{1}{2R_y} + \sum_{n=3,6,9,\dots}^{\infty} \left( \frac{1}{(n^2-1)\sqrt{R_y^2 + (n\omega L_y)^2}} \cos(n\omega t + \pi - \phi_n) \right) \right] \tag{3.27}$$

'a' fazından çekilen giriş akımı ise, Denklem (3.28)'de ifade edilmiştir. Burada yer alan  $k$  çarpanı,  $v_a(t)$  geriliminin diğer faz gerilimlerinden büyük olduğu  $0 < \omega t < 2\pi/3$  aralığında '1',  $2\pi/3 < \omega t < 2\pi$  aralığında '0' değerini alır. Bu çarpanın kullanılma nedeni, giriş akımının yük akımının sadece 1/3'ünü içermesidir.

$$\begin{aligned}
i_a(t) = & \frac{3\sqrt{3}V_m}{\pi^2 R_y} \left[ \frac{\pi}{3} + \sum_{n=1,2,4,5,7,\dots}^{\infty} \sin \left( n \frac{2\pi}{3} \right) \frac{\cos n\omega t}{n} \right. \\
& \left. - \sum_{n=1,2,4,5,7,\dots}^{\infty} \left( \cos \left( n \frac{2\pi}{3} \right) - 1 \right) \frac{\sin n\omega t}{n} \right] \\
& + k \left[ \frac{3\sqrt{3}V_m}{\pi} \sum_{n=3,6,9,\dots}^{\infty} \left( \frac{1}{(n^2-1)\sqrt{R_y^2 + (n\omega L_y)^2}} \cos(n\omega t + \pi - \phi_n) \right) \right]
\end{aligned} \tag{3.28}$$

c) Yükün akım kaynağı olması durumu;

Bu durumda, giriş ve çıkış akımı, Denklem (3.29) ve (3.30) şeklindedir.

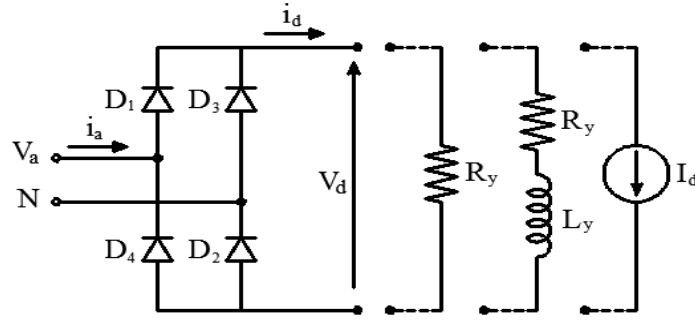
$$i_d(t) = I_d \quad (3.29)$$

$$i_a(t) = \frac{I_d}{3} \left[ 1 + \frac{1}{\pi} \sum_{1,2,4,5,7,\dots}^{\infty} \sin\left(n \frac{2\pi}{3}\right) \frac{\cos n\omega t}{n} - \sum_{1,2,4,5,7,\dots}^{\infty} \left( \cos\left(n \frac{2\pi}{3}\right) - 1 \right) \frac{\sin n\omega t}{n} \right] \quad (3.30)$$

Çıkış geriliminde, şebekenin bir periyodu boyunca 3 darbe oluşur ve yine büyük ölçüde harmonik içermektedir. Bu devre özellikle DA motor kontrolünde kullanılmaktadır.

### 3.1.1.4. Bir fazlı tam dalga kontrolsüz doğrultucu

Bir fazlı tam dalga kontrolsüz doğrultucuya ait devre şeması Şekil 3.10'da verilmiştir. Şekilde  $D_1$  ve  $D_3$  diyotları pozitif (üst) sıra elemanı olarak adlandırılırken,  $D_2$  ve  $D_4$  diyotları negatif (alt) sıra elemanı olarak adlandırılırlar.



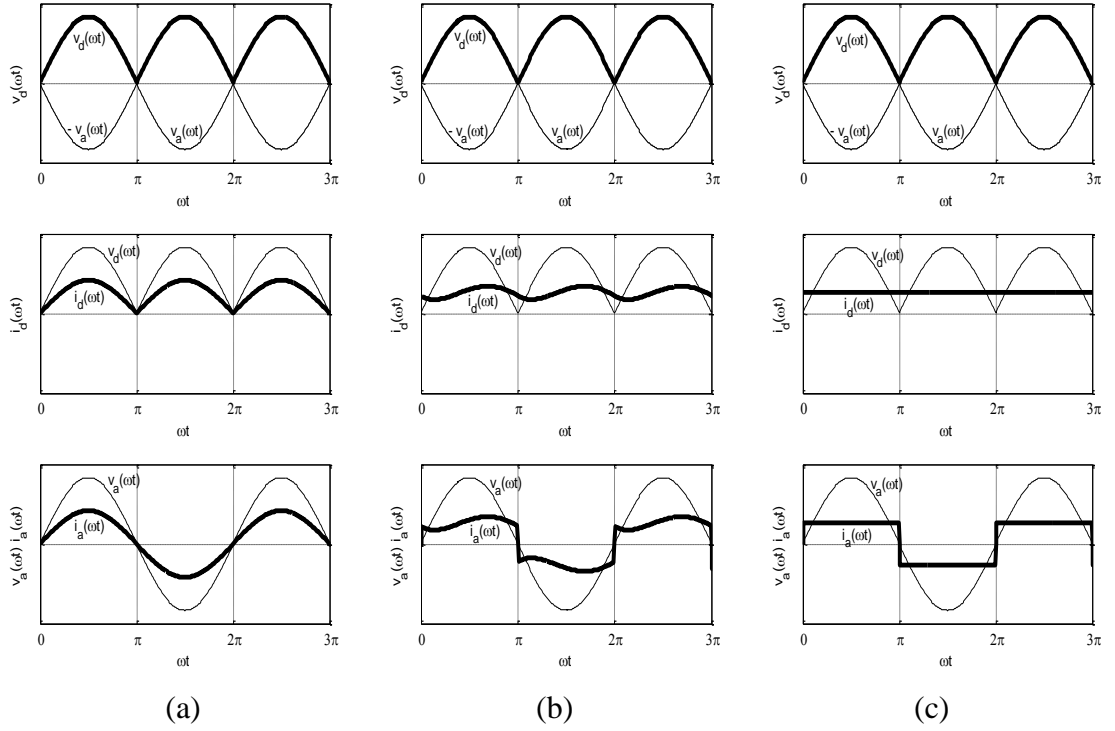
Şekil 3.10. Bir fazlı tam dalga kontrolsüz doğrultucu devresi

Yükten bağımsız olarak,  $0 < \omega t < \pi$  aralığında,  $V_a > 0$  olduğundan pozitif sıradaki  $D_1$  diyotu ile negatif sıradaki  $D_2$  diyotu iletimdedir ve çıkış gerilimi  $V_a$  gerilimine eşittir. Aynı şekilde,  $\pi < \omega t < 2\pi$  aralığında,  $V_a < 0$  olduğundan pozitif sıradaki  $D_3$  diyotu ile negatif sıradaki  $D_4$  diyotu iletimdedir ve çıkış gerilimi  $-V_a$  gerilimine eşittir. Bu durum aşağıdaki gibi özetlenebilir.

$$v_d(t) = \begin{cases} V_a & | 0 < \omega t < \pi \quad D_1 \text{ ve } D_2 \text{ iletimde} \\ -V_a & | \pi < \omega t < 2\pi \quad D_3 \text{ ve } D_4 \text{ iletimde} \end{cases} \quad (3.31)$$

Denklem (3.31)'den görüldüğü gibi, pozitif ve negatif sıradaki diyotlar  $180^\circ$  eşit aralıklarla ve sırayla iletimde kalırlar. Ancak aynı faza ait iki diyot aynı anda iletimde olamaz. Devreye ait temel dalga şekilleri Şekil 3.11'de verilmiştir.





Şekil 3.11. Bir fazlı tam dalga kontrolsüz doğrultucuya a) direnç, b) endüktif yük, c) akım kaynağı bağlı olması durumunda temel dalga şekilleri

Çıkış geriliminin, yükten bağımsız Fourier seri açılımı, Denklem (3.32)'de verilmiştir.

$$v_d(t) = \frac{2V_m}{\pi} - \frac{4V_m}{\pi} \sum_{n=2,4,6,\dots}^{\infty} \left[ \frac{1}{(n^2 - 1)} \cos(n\omega t) \right] \quad (3.32)$$

a) Yükün direnç olması durumu;

Bu durumda, yük akımı,  $i_d(t)$ , Denklem (3.33)'de verilmiştir. Giriş akımında harmonik yoktur ve kaynak geriliminin dirence bölümüne eşittir.  $i_a(t)$  akımı, Denklem (3.34)'de ifade edilmiştir.

$$i_d(t) = \frac{2V_m}{\pi R_y} - \frac{4V_m}{\pi R_y} \sum_{n=2,4,6,\dots}^{\infty} \left[ \frac{1}{(n^2 - 1)} \cos(n\omega t) \right] \quad (3.33)$$

$$i_a(t) = \frac{V_m}{R_y} \sin(\omega t) \quad (3.34)$$

b) Yükün endüktif olması durumu;

Bu durumda, yük akımı,  $i_d(t)$ , Denklem (3.5), (3.6), (3.7) ve (3.8)'de verilen eşitlikler kullanılarak Denklem (3.35)'deki gibi elde edilmiştir.

$$i_d(t) = \frac{2V_m}{\pi} \left\{ \frac{1}{R_y} - \sum_{n=2,4,6,\dots}^{\infty} \left( \frac{2}{n^2-1} \right) \left( \frac{1}{\sqrt{R_y^2 + (n\omega L_y)^2}} \right) \cos(n\omega t - \varphi_n) \right\} \quad (3.35)$$

Şebekeden çekilen akım,  $i_a(t)$ , ise Şekil 3.11.b'de görüldüğü gibi yük akımı  $i_d(t)$ 'nin çift yönlü halidir ve  $k = \pm 1$  olmak üzere aşağıdaki gibi ifade edilebilir (Yıldız ve Unverdi, 2014).

$$i_a(t) = \frac{8V_m}{\pi^2 R_y} \sum_{n=1,3,5,\dots}^{\infty} \frac{\sin(n\omega t)}{n} + k \frac{2V_m}{\pi} \sum_{n=2,4,6,\dots}^{\infty} \left( \frac{-2}{n^2-1} \right) \left( \frac{1}{\sqrt{R_y^2 + (n\omega L_y)^2}} \right) \cos(n\omega t - \varphi_n) \quad (3.36)$$

c) Yükün akım kaynağı olması durumu;

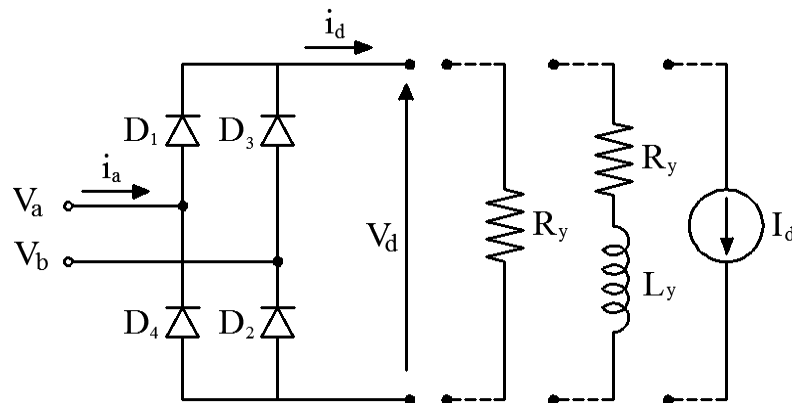
Bu durumda, giriş ve çıkış akımı aşağıda verildiği gibidir.

$$i_d(t) = I_d \quad (3.37)$$

$$i_a(t) = \frac{4I_d}{\pi} \sum_{n=1,3,5,\dots}^{\infty} \frac{\sin(n\omega t)}{n} \quad (3.38)$$

### 3.1.1.5. İki fazlı tam dalga kontrolsüz doğrultucu

İki fazlı tam dalga kontrolsüz doğrultucuya ait devre şeması Şekil 3.12'de verilmiştir. Şekilde  $D_1$  ve  $D_3$  diyotları pozitif (üst) sıra elemanı olarak adlandırılırken,  $D_2$  ve  $D_4$  diyotları negatif (alt) sıra elemanı olarak adlandırılırlar.

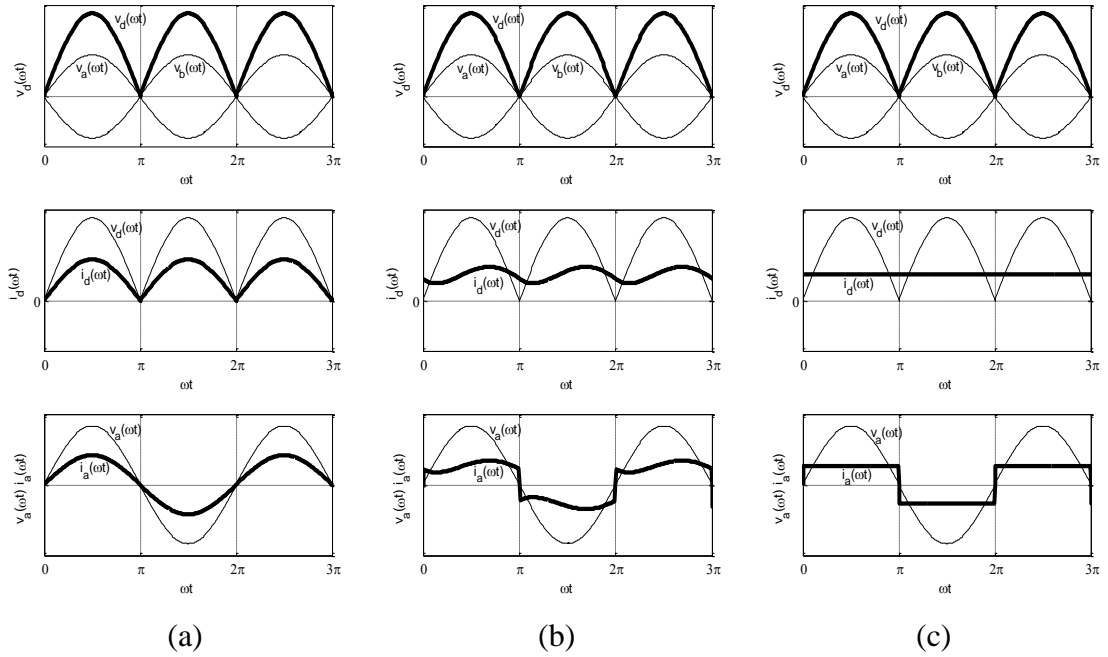


Şekil 3.12. İki fazlı tam dalga kontrolsüz doğrultucu devresi

Yükten bağımsız olarak,  $0 < \omega t < \pi$  aralığında,  $V_{ab} > 0$  olduğundan pozitif sıradaki  $D_1$  diyotu ile negatif sıradaki  $D_2$  diyotu iletimdedir ve çıkış gerilimi  $V_{ab}$  gerilimine eşittir. Aynı şekilde,  $\pi < \omega t < 2\pi$  aralığında,  $V_{ab} < 0$  olduğundan pozitif sıradaki  $D_3$  diyotu ile negatif sıradaki  $D_4$  diyotu iletimdedir ve çıkış gerilimi  $V_{ba}$  gerilimine eşittir. Bu durum aşağıdaki gibi özetlenebilir.

$$V_d(t) = \begin{cases} V_{ab} & | 0 < \omega t < \pi \quad D_1 \text{ ve } D_2 \text{ iletimde} \\ V_{ba} & | \pi < \omega t < 2\pi \quad D_3 \text{ ve } D_4 \text{ iletimde} \end{cases} \quad (3.39)$$

Denklem (3.39)'dan görüldüğü gibi, pozitif ve negatif sıradaki diyotlar  $180^\circ$  eşit aralıklarla ve sırayla iletimde kalırlar. Ancak aynı faza ait iki diyot aynı anda iletimde olamaz. Devreye ait temel dalga şekilleri Şekil 3.13'de verilmiştir.



Şekil 3.13. İki fazlı tam dalga kontrolsüz doğrultucuya a) direnç, b) endüktif yük, c) akım kaynağı bağlı olması durumunda temel dalga şekilleri

Doğrultucu uçlarına farklı yükler bağlı olsa da çıkış gerilimi, yüke bağlı değildir ve Fourier seri açılımı, Denklem (3.40)'daki gibidir.

$$V_d(t) = \frac{4V_m}{\pi} - \frac{8V_m}{\pi} \sum_{n=2,4,6,\dots}^{\infty} \left[ \frac{1}{(n^2 - 1)} \cos(n\omega t) \right] \quad (3.40)$$

a) Yükün direnç olması durumu;

Bu durumda, yük akımı,  $i_d(t)$ , Denklem (3.41)'de verilmiştir. Giriş akımı,  $i_a(t)$ 'de harmonik yoktur ve Denklem (3.42) şeklinde ifade edilebilir.

$$i_d(t) = \frac{4V_m}{\pi R_y} - \frac{8V_m}{\pi R_y} \sum_{n=2,4,6,\dots}^{\infty} \left[ \frac{1}{(n^2-1)} \cos(n\omega t) \right] \quad (3.41)$$

$$i_a(t) = \frac{2V_m}{R_y} \sin(\omega t) \quad (3.42)$$

b) Yükün endüktif olması durumu;

Bu durumda, yük akımı,  $i_d(t)$ , Denklem (3.5), (3.6), (3.7) ve (3.8)'de verilen eşitlikler kullanılarak Denklem (3.43)'deki gibi elde edilmiştir.

$$i_d(t) = \frac{4V_m}{\pi} \left\{ \frac{1}{R_y} - \sum_{n=2,4,6,\dots}^{\infty} \left( \frac{2}{n^2-1} \right) \left( \frac{1}{\sqrt{R_y^2 + (n\omega L_y)^2}} \right) \cos(n\omega t - \phi_n) \right\} \quad (3.43)$$

Şebekeden çekilen akım,  $i_a(t)$  ise Şekil 3.13.b'de görüldüğü gibi yük akımı  $i_d(t)$ 'nin çift yönlü halidir ve  $k = \pm 1$  olmak üzere aşağıdaki gibi ifade edilebilir.

$$i_a(t) = \frac{16V_m}{\pi^2 R_y} \sum_{n=1,3,5,\dots}^{\infty} \frac{\sin(n\omega t)}{n} + k \frac{4V_m}{\pi} \sum_{n=2,4,6,\dots}^{\infty} \left( \frac{-2}{n^2-1} \right) \left( \frac{1}{\sqrt{R_y^2 + (n\omega L_y)^2}} \right) \cos(n\omega t - \phi_n) \quad (3.44)$$

c) Yükün akım kaynağı olması durumu;

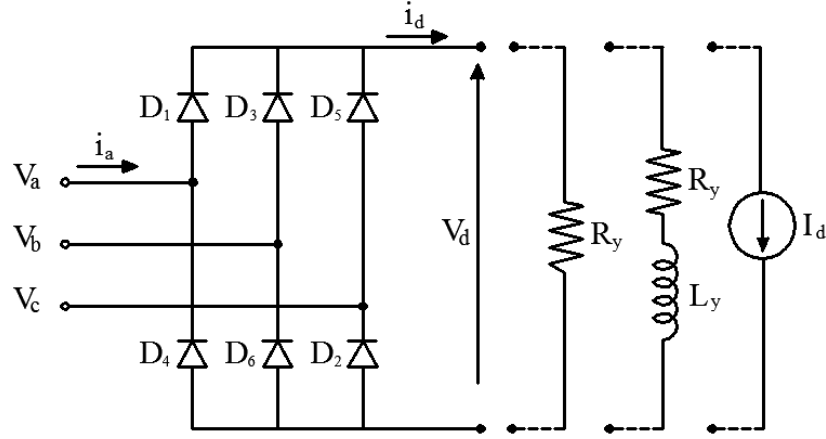
Bu durumda, giriş ve çıkış akımı aşağıda verildiği gibidir.

$$i_d(t) = I_d \quad (3.45)$$

$$i_a(t) = \frac{4I_d}{\pi} \sum_{n=1,3,5,\dots}^{\infty} \frac{\sin(n\omega t)}{n} \quad (3.46)$$

### 3.1.1.6. Üç fazlı tam dalga kontrolsüz doğrultucu

Üç fazlı tam dalga kontrolsüz doğrultucuya ait devre şeması Şekil 3.14’de verilmiştir. Şekilde  $D_1$ ,  $D_3$  ve  $D_5$  diyotları pozitif (üst) sıra elemanı olarak adlandırılırken,  $D_2$ ,  $D_4$  ve  $D_6$  diyotları negatif (alt) sıra elemanı olarak adlandırılırlar.

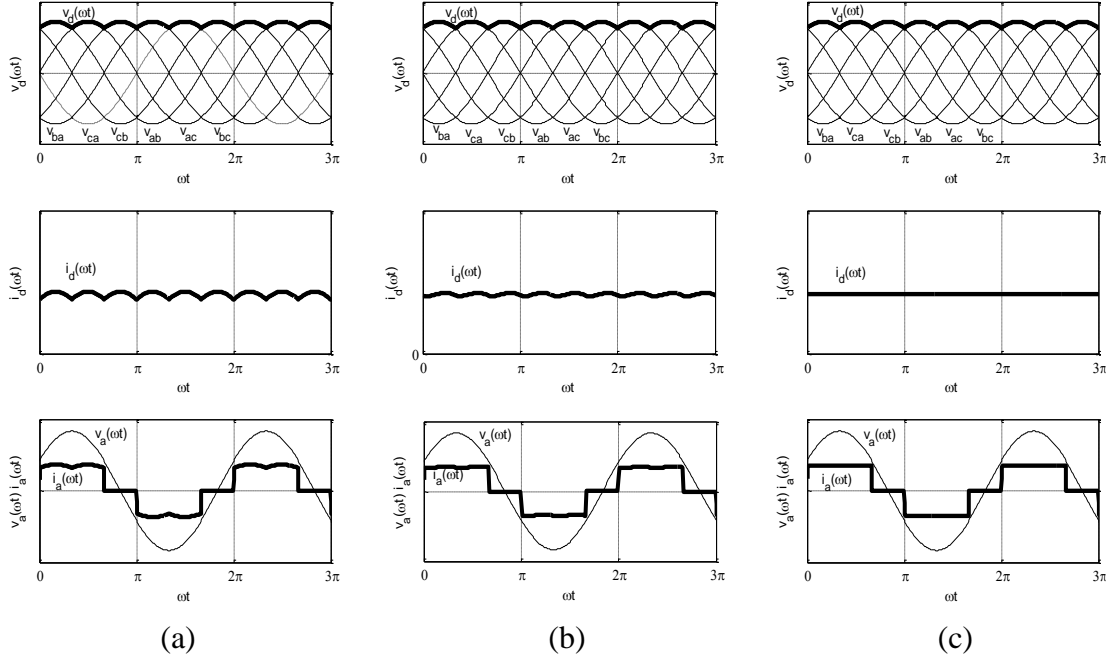


Şekil 3.14. Üç fazlı tam dalga kontrolsüz doğrultucu devresi

Devrede, pozitif ve negatif sıradaki diyotlar  $120^\circ$  eşit aralıklarla ve sırayla iletimde kalırlar. Ancak aynı faza ait iki diyot aynı anda iletimde kalmaz. Buna ek olarak, bir faza ait bir pozitif eleman iletim aralığı diğer iki faza ait olan negatif elemanlarla eşit olarak paylaşılır. Örneğin  $D_3$  diyotu,  $60^\circ$  aralıkla  $D_4$  ve  $60^\circ$  aralıkla  $D_2$  diyotu ile birlikte iletimde kalmaktadır. Bu durumda, çıkış geriliminde, temel frekansın bir periyodu boyunca 6 darbe oluşacaktır. Bu altı darbeleri çıkış gerilimi aşağıdaki eşitliklerle özetlenebilir.

$$v_d(t) = \begin{cases} V_{ab} & | 0 < \omega t < \pi/3 & D_1 \text{ ve } D_6 \text{ iletimde} \\ V_{ac} & | \pi/3 < \omega t < 2\pi/3 & D_1 \text{ ve } D_2 \text{ iletimde} \\ V_{bc} & | 2\pi/3 < \omega t < 3\pi/3 & D_3 \text{ ve } D_2 \text{ iletimde} \\ V_{ba} & | 3\pi/3 < \omega t < 4\pi/3 & D_3 \text{ ve } D_4 \text{ iletimde} \\ V_{ca} & | 4\pi/3 < \omega t < 5\pi/3 & D_5 \text{ ve } D_4 \text{ iletimde} \\ V_{cb} & | 5\pi/3 < \omega t < 6\pi/3 & D_5 \text{ ve } D_6 \text{ iletimde} \end{cases} \quad (3.47)$$

Devreye ait temel dalga şekilleri Şekil 3.15’de verilmiştir. Görüldüğü gibi diğer kontrolsüz doğrultuculara göre, çıkış gerilimindeki dalgalanmanın en az olduğu doğrultucu tipidir.



Şekil 3.15. Üç fazlı tam dalga kontrolsüz doğrultucuya a) direnç, b) endüktif yük, c) akım kaynağı bağlı olması durumunda temel dalga şekilleri

Yükten bağımsız olan çıkış geriliminin, Fourier seri açılımı, Denklem (3.48)'deki gibidir.

$$v_d(t) = \frac{3\sqrt{3}V_m}{\pi} \left[ 1 + \sum_{n=6,12,18,\dots}^{\infty} \left( \frac{2}{(n^2-1)} \cos(n\omega t + \pi) \right) \right] \quad (3.48)$$

a) Yükün direnç olması durumu;

Bu durumda, yük akımı,  $i_d(t)$ , Denklem (3.49)'daki gibidir. Giriş akımı,  $i_a(t)$ , ise Denklem (3.52)'deki gibi ifade edilebilir. Buradaki  $A_n$  ve  $B_n$  katsayıları Denklem (3.50) ve (3.51)'de verilmiştir.

$$i_d(t) = \frac{3\sqrt{3}V_m}{\pi R_y} \left[ 1 + \sum_{n=6,12,18,\dots}^{\infty} \left( \frac{2}{(n^2-1)} \cos(n\omega t + \pi) \right) \right] \quad (3.49)$$

$$A_n = \left[ \begin{array}{l} \frac{1}{4} \left( \frac{\cos(1+n)\pi/3}{1+n} - \frac{\cos(1-n)\pi/3}{1-n} - \frac{2}{1-n^2} - \frac{\cos(1+n)4\pi/3}{1+n} \right) + \\ \left( \frac{\cos(1-n)4\pi/3}{1-n} + \frac{\cos(1+n)\pi}{1+n} + \frac{\cos(1-n)\pi}{1-n} \right) \\ \frac{1}{2} \left( \frac{\cos(1+n)2\pi/3}{1+n} - \frac{\cos(1-n)2\pi/3}{1-n} + \frac{\cos(1+n)\pi/3}{1+n} \right) + \\ \left( \frac{\cos(1+n)\pi/3}{1-n} - \frac{\cos(1+n)5\pi/3}{1+n} - \frac{\cos(1-n)5\pi/3}{1-n} \right) + \\ \left( \frac{\cos(1+n)4\pi/3}{1+n} + \frac{\cos(1+n)4\pi/3}{1-n} \right) \\ \frac{\sqrt{3}}{4} \left( \frac{\sin(1+n)\pi/3}{1+n} + \frac{\sin(1-n)\pi/3}{1-n} + \frac{\sin(1+n)4\pi/3}{1+n} \right) + \\ \left( \frac{\sin(1-n)4\pi/3}{1-n} \right) \end{array} \right] \quad (3.50)$$

$$B_n = \left[ \begin{array}{l} -\frac{1}{4} \left( \frac{\sin(1+n)\pi/3}{1+n} - \frac{\sin(1-n)\pi/3}{1-n} + \frac{\sin(1+n)4\pi/3}{1+n} \right) + \\ \left( \frac{\sin(1-n)4\pi/3}{1-n} \right) \\ -\frac{1}{2} \left( \frac{\sin(1+n)2\pi/3}{1+n} - \frac{\sin(1-n)2\pi/3}{1-n} - \frac{\sin(1+n)\pi/3}{1+n} \right) + \\ \left( \frac{\sin(1+n)\pi/3}{1-n} + \frac{\sin(1+n)5\pi/3}{1+n} - \frac{\sin(1-n)5\pi/3}{1-n} \right) + \\ \left( \frac{\sin(1+n)4\pi/3}{1+n} + \frac{\sin(1+n)4\pi/3}{1-n} \right) \\ \frac{\sqrt{3}}{4} \left( \frac{\cos(n+1)\pi/3}{n+1} - \frac{\cos(n-1)\pi/3}{n-1} + \frac{2n}{n^2-1} - \frac{\cos(n+1)4\pi/3}{n+1} \right) + \\ \left( \frac{\cos(n-1)4\pi/3}{n-1} + \frac{\cos(n+1)\pi}{n+1} - \frac{\cos(n-1)\pi}{n-1} \right) \end{array} \right] \quad (3.51)$$

$$i_a(t) = \frac{V_m}{\pi R_y} \left[ \left( \frac{\pi\sqrt{3}}{6} + \frac{3}{4} \right) \cos \omega t + \left( \frac{\pi\sqrt{3}}{2} + \frac{3}{16} \right) \sin \omega t + \sum_{n=5,7,11,13..}^{\infty} A_n \cos n\omega t + \sum_{n=5,7,11,13..}^{\infty} B_n \sin n\omega t \right] \quad (3.52)$$

b) Yükün endüktif olması durumu;

Bu durumda, çıkış akımı,  $i_d(t)$ , Denklem (3.5), (3.6), (3.7) ve (3.8) yardımıyla Denklem (3.53) şeklinde ifade edilir.

$$i_d(t) = \frac{3\sqrt{3}V_m}{\pi} \left[ \frac{1}{R_y} + \sum_{n=6,12,18..}^{\infty} \left( \frac{2}{(n^2-1)\sqrt{R_y^2 + (n\omega L_y)^2}} \cos(n\omega t + \pi - \varphi_n) \right) \right] \quad (3.53)$$

'a' fazından çekilen giriş akımı  $i_a(t)$ , Denklem (3.54)'de ifade edilmiştir. Burada yer alan  $k$  çarpanı,  $v_a(t)$  geriliminin, diğer faz gerilimlerinden büyük olduğu  $0 < \omega t < 2\pi/3$  aralığında '1', diğer faz gerilimlerinden küçük olduğu  $\pi < \omega t < 5\pi/3$  aralığında '-1' değerini alır.  $2\pi/3 < \omega t < \pi$  ve  $5\pi/3 < \omega t < 2\pi$  aralıklarında ise aktif olan faz olmadığından '0' değerini alır. Bu çarpanın kullanılma nedeni, giriş akımının yük akımının sadece belirli kısımlarını içermesidir.

$$i_a(t) = \frac{3\sqrt{3}V_m}{\pi^2 R_y} \sum_{n=1,5,7,11\dots}^{\infty} \left[ \begin{aligned} & \left( \sin\left(n\frac{2\pi}{3}\right) - \sin\left(n\frac{5\pi}{3}\right) \right) \frac{\cos n\omega t}{n} \\ & - \left( \cos\left(n\frac{2\pi}{3}\right) - \cos\left(n\frac{5\pi}{3}\right) - 1 + \cos n\pi \right) \frac{\sin n\omega t}{n} \end{aligned} \right] \quad (3.54)$$

$$+ k \frac{3\sqrt{3}V_m}{\pi} \left[ \sum_{n=6,12,18\dots}^{\infty} \left( \frac{2}{(n^2-1)\sqrt{R_y^2 + (n\omega L_y)^2}} \cos(n\omega t + \pi - \varphi_n) \right) \right]$$

c) Yükün akım kaynağı olması durumu;

Bu durumda, giriş ve çıkış akımı aşağıda verildiği gibidir.

$$i_d(t) = I_d \quad (3.55)$$

$$i_a(t) = \frac{I_d}{\pi} \sum_{n=1,5,7,11\dots}^{\infty} \left[ \begin{aligned} & \left( \sin\left(n\frac{2\pi}{3}\right) - \sin\left(n\frac{5\pi}{3}\right) \right) \frac{\cos n\omega t}{n} \\ & - \left( \cos\left(n\frac{2\pi}{3}\right) - \cos\left(n\frac{5\pi}{3}\right) - 1 + \cos n\pi \right) \frac{\sin n\omega t}{n} \end{aligned} \right] \quad (3.56)$$

### 3.1.2. Kontrollü doğrultucular

Kontrollü doğrultucularda kullanılan temel güç elektroniği elemanı tristörlerdir. Bu devreler hem doğrultucu hem evirici modunda çalışabilirler. Ancak serbest geçiş diyodu varsa evirici olarak çalışamazlar. Evirici olarak çalışma, DA tarafta biriken enerjinin AA şebekeye aktarılabilmesi açısından oldukça önemlidir. Çıkış geriliminin değeri tetikleme açısıyla ayarlanabilmektedir.

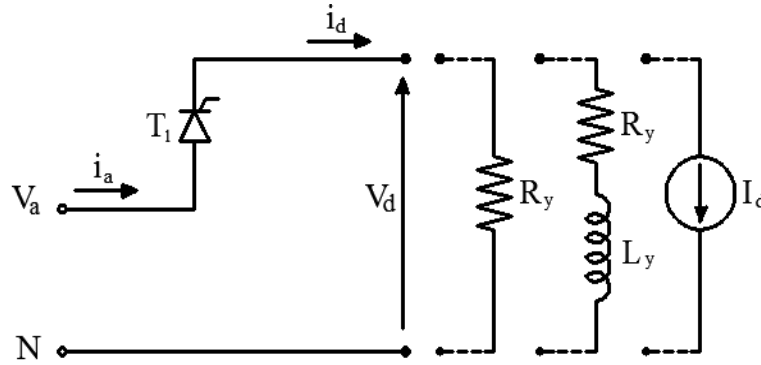
Alt başlıklarda, tüm kontrollü doğrultucuların farklı yükler ( $R_y$ ,  $R_y-L_y$ ,  $I_d$ ) altında davranışları incelenecektir. Yükün endüktif olduğu incelemelerde,  $L_y$  değeri yeterince büyük olmayan bir endüktans olarak alınmış ve temel dalga şekilleri buna göre elde



edilmiştir. Büyük değerli endüktans ise akım kaynağı olarak modellenmiştir. Tüm devrelerdeki diyotlar ideal kabul edilmiştir

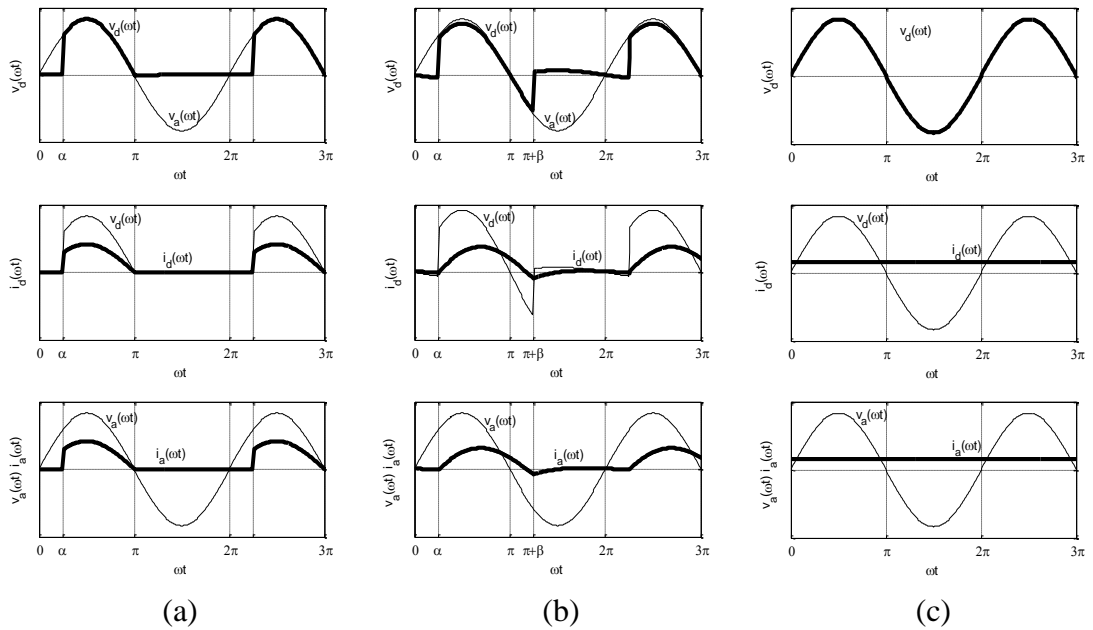
### 3.1.2.1. Bir fazlı yarım dalga kontrollü doğrultucu

Bir fazlı yarım dalga kontrollü doğrultucuya ait devre şeması Şekil 3.16'da verilmiştir. Bir fazlı yarım dalga kontrolsüz doğrultucu devresindeki diyotun yerini tristör almıştır.



Şekil 3.16. Bir fazlı yarım dalga kontrollü doğrultucu devresi

Bu devrede,  $T_1$  tristörünün sinyalleri  $0 < \omega t < \pi$  aralığında kontrol edilebilir. Bu aralıkta herhangi bir  $\alpha$  anında tetiklenen  $T_1$  iletime girerek yük akımını üstlenir ve çıkış gerilimi giriş gerilimine eşit olur.



Şekil 3.17. Bir fazlı yarım dalga kontrollü doğrultucuya a) direnç, b) endüktif yük, c) akım kaynağı bağlı olması durumunda temel dalga şekilleri

\* $T_1$  için tetikleme açısı  $\alpha_1$  45 derece alınmıştır.

a) Yükün direnç olması durumu;

Bu durumda, sıfır geçiş anında tristör doğal olarak söner, dolayısı ile  $\pi < \omega t < 2\pi$  aralığında kesimdedir ve çıkış gerilimi sıfır olur. Bu durum, Denklem (3.57)'deki gibi ifade edilebilir. Temel dalga şekilleri ise Şekil 3.17.a'da gösterilmiştir.

$$v_d(t) = \begin{cases} 0 & | & 0 < \omega t < \alpha & \text{iletim yok} & V_a > 0 \\ V_a & | & \alpha < \omega t < \pi & T_1 \text{ iletimde} & V_a > 0 \\ 0 & | & \pi < \omega t < 2\pi & \text{iletim yok} & V_a < 0 \end{cases} \quad (3.57)$$

Direnç yükü bağlı durum için Şekil 3.17.a yardımıyla bulunabilecek çıkış gerilimi  $v_d(t)$ , çıkış akımı  $i_d(t)$  ve giriş akımı  $i_a(t)$ 'nin Fourier seri açılımları sırasıyla Denklem (3.58) ve (3.59)'da verilmiştir.

$$v_d(t) = \frac{V_m}{2\pi} \left[ \begin{aligned} & \left( (1 + \cos \alpha) + \frac{1}{2} (\cos 2\alpha - 1) \cos \omega t + (\pi - \alpha + \frac{1}{2} \sin 2\alpha) \sin \omega t \right) \\ & + \sum_{n=2,3,4}^{\infty} \left[ \frac{-\cos(n+1)\pi}{n+1} - \frac{\cos(1-n)\pi}{1-n} \right] \cos n\omega t \\ & + \sum_{n=2,3,4}^{\infty} \left[ \frac{\cos(n+1)\alpha}{n+1} + \frac{\cos(1-n)\alpha}{1-n} \right] \cos n\omega t \\ & + \sum_{n=2,3,4}^{\infty} \left[ \frac{\sin(n+1)\alpha}{n+1} - \frac{\sin(1-n)\alpha}{1-n} \right] \sin n\omega t \end{aligned} \right] \quad (3.58)$$

$$i_d(t) = i_a(t) = \frac{V_d(t)}{R_y} \quad (3.59)$$

b) Yükün endüktif olması durumu;

Bu durumda,  $\pi < \omega t < 2\pi$  aralığında, akımın devamlılığı  $\pi + \beta$  anına kadar endüktansta biriken enerji tarafından sağlanır. Endüktansta biriken enerjinin bitmesiyle  $\pi + \beta$  anında kesime giren tristör  $2\pi$  anında tekrardan ilettime kutuplu olarak  $\alpha$  tetiklemesini bekler. Çıkış gerilimi Denklem (3.60)'daki gibi ifade edilebilir. Temel dalga şekilleri ise Şekil 3.17.b'de gösterilmiştir.

$$v_d(t) = \begin{cases} 0 & | & 0 < \omega t < \alpha & \text{iletim yok} \\ V_a & | & \alpha < \omega t < \pi + \beta & T_1 \text{ iletimde} \\ 0 & | & \pi + \beta < \omega t < 2\pi & \text{iletim yok} \end{cases} \quad (3.60)$$

Şekil 3.17.b yardımıyla bulunabilecek çıkış gerilimi  $v_d(t)$ , çıkış akımı  $i_d(t)$  ve giriş akımı  $i_a(t)$ 'nin Fourier seri açılımları sırasıyla Denklem (3.61), (3.62) ve (3.63)'de verilmiştir.

$$v_d(t) = \frac{V_m}{2\pi} \left[ \begin{aligned} & (\cos \alpha - \cos(\pi + \beta)) + \frac{1}{2} (\cos 2\alpha - \cos 2\beta) \cos \omega t \\ & + (\beta - \alpha + \frac{1}{2} (\sin 2\alpha - \sin 2\beta)) \sin \omega t \\ & + \sum_{n=2,3,4}^{\infty} \left[ \begin{aligned} & \frac{\cos(n+1)(\pi + \beta)}{n+1} - \frac{\cos(1-n)(\pi + \beta)}{1-n} \\ & + \frac{\cos(n+1)\alpha}{n+1} + \frac{\cos(1-n)\alpha}{1-n} \end{aligned} \right] \cos n\omega t \\ & + \sum_{n=2,3,4}^{\infty} \left[ \begin{aligned} & \frac{\sin(n+1)(\pi + \beta)}{n+1} + \frac{\sin(1-n)(\pi + \beta)}{1-n} \\ & + \frac{\sin(n+1)\alpha}{n+1} - \frac{\sin(1-n)\alpha}{1-n} \end{aligned} \right] \sin n\omega t \end{aligned} \right] \quad (3.61)$$

$$i_d(t) = \frac{V_m}{2\pi} \left[ \begin{aligned} & \frac{(\cos \alpha - \cos(\pi + \beta))}{R_y} + \frac{(\cos 2\alpha - \cos 2\beta)}{2\sqrt{R_y^2 + (\omega L_y)^2}} \cos(\omega t - \phi_1) \\ & + \frac{(\pi + \beta - \alpha + \frac{1}{2} (\sin 2\alpha - \sin 2\beta))}{\sqrt{R_y^2 + (\omega L_y)^2}} \sin(\omega t - \phi_1) \\ & + \sum_{n=2,3,4}^{\infty} \left[ \begin{aligned} & \frac{\cos(n+1)(\pi + \beta)}{n+1} - \frac{\cos(1-n)(\pi + \beta)}{1-n} \\ & + \frac{\cos(n+1)\alpha}{n+1} + \frac{\cos(1-n)\alpha}{1-n} \end{aligned} \right] \frac{\cos(n\omega t - \phi_n)}{\sqrt{R_y^2 + (n\omega L_y)^2}} \\ & + \sum_{n=2,3,4}^{\infty} \left[ \begin{aligned} & \frac{\sin(n+1)(\pi + \beta)}{n+1} + \frac{\sin(1-n)(\pi + \beta)}{1-n} \\ & + \frac{\sin(n+1)\alpha}{n+1} - \frac{\sin(1-n)\alpha}{1-n} \end{aligned} \right] \frac{\sin(n\omega t - \phi_n)}{\sqrt{R_y^2 + (n\omega L_y)^2}} \end{aligned} \right] \quad (3.62)$$

$$i_a(t) = i_d(t) \quad (3.63)$$

c) Yükün akım kaynağı olması durumu;

Bu durumda,  $0 < \omega t < 2\pi$  aralığında anot gerilimi negatif olmasına rağmen yük akımının sürekli. Bu nedenle  $T_1$  diyotu iletimde kalır ve çıkış gerilimi yine kaynak gerilimine eşit olur. Çıkış gerilim ifadesi Denklem (3.64)'de verilmiştir. Temel dalga şekilleri ise Şekil 3.17.c'de gösterilmiştir.

$$v_d(t) = \begin{cases} V_a & 0 < \omega t < \alpha \quad \text{iletim yok} \\ V_a & \alpha < \omega t < 2\pi \quad T_1 \text{ iletimde} \end{cases} \quad (3.64)$$

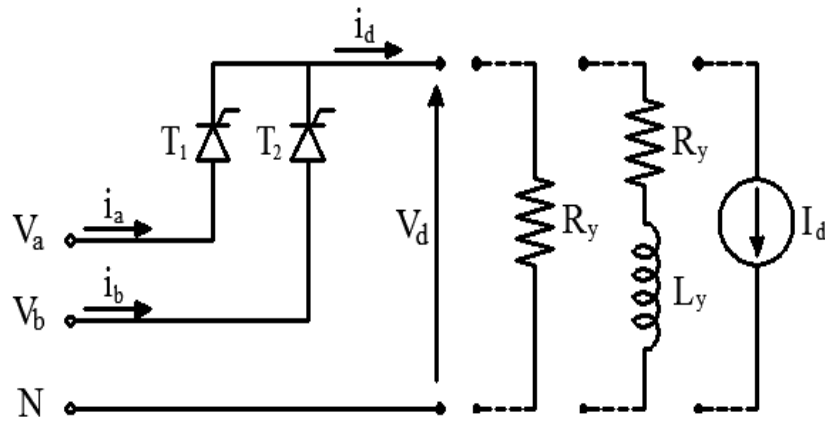
Yükün akım kaynağı olması durumunda çıkış gerilimi  $v_d(t)$ , çıkış akımı  $i_d(t)$  ve giriş akımı  $i_a(t)$ 'nin Fourier seri açılımları Denklem (3.65) ve (3.66)'da verilmiştir.

$$v_d(t) = V_m \sin \omega t \quad (3.65)$$

$$i_a(t) = i_d(t) = I_d \quad (3.66)$$

### 3.1.2.2. İki fazlı yarım dalga kontrollü doğrultucu

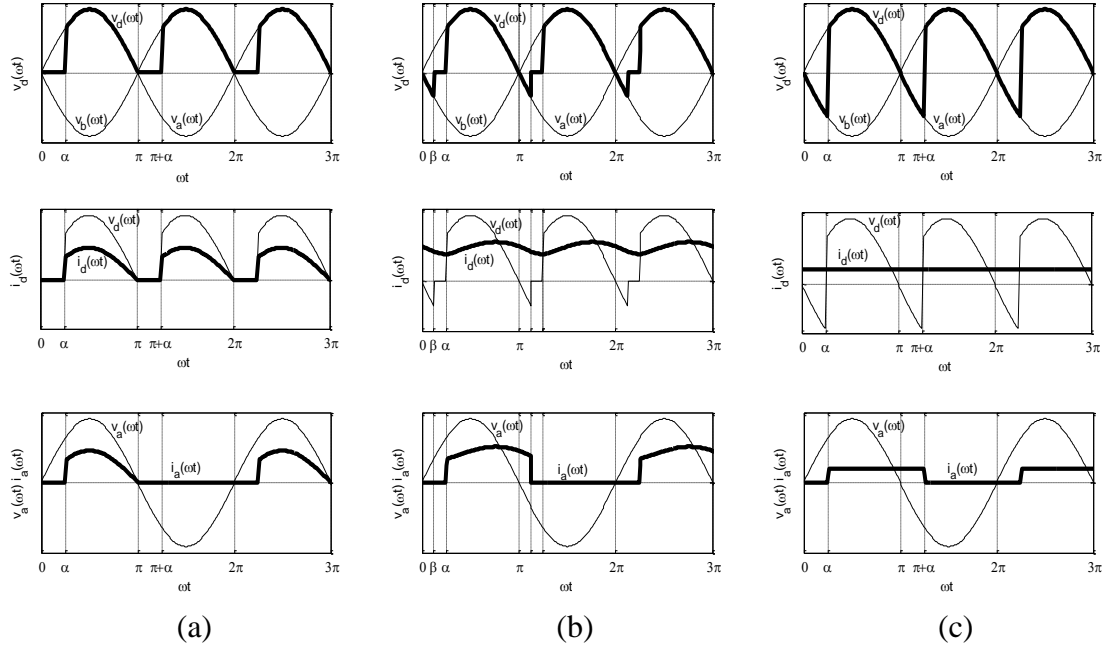
İki fazlı yarım dalga kontrollü doğrultucuya ait devre şeması Şekil 3.18'de verilmiştir.



Şekil 3.18. İki fazlı yarım dalga kontrollü doğrultucu devresi

Faz kontrolünde prensip olarak, doğrultucuların iletim ve kontrol aralıkları fazlar arası gerilimlere göre belirlenir. Ancak, iki fazlı sistemde faz farkı  $180^\circ$  olduğundan, bütün faz ve fazlar arası gerilimler birbirinin tersidir ve hepsinin sıfır geçiş anları  $\omega t$  ekseninde kesişir. Bu nedenle tek ve iki fazlı sistemlerin kontrolünde, faz kontrol sinyallerinin sadece bir faza göre üretilmesi yeterli olmaktadır.

Bu devrede, bir fazlı yarım dalga kontrolsüz doğrultucuda olduğu gibi  $T_1$  tristörünün sinyalleri  $V_a > V_b$  olduğu  $0 < \omega t < \pi$  aralığında kontrol edilebilir. Bu aralıkta herhangi bir  $\alpha$  anında tetiklenen  $T_1$  iletime girerek yük akımını üstlenir ve önceden iletimde ise  $T_2$  kesime girer. Paralel şekilde  $T_2$  tristörünün sinyalleri  $V_b > V_a$  olduğu  $\pi < \omega t < 2\pi$  aralığında kontrol edilebilir.



Şekil 3.19. İki fazlı yarım dalga kontrollü doğrultucunun a) direnç, b) endüktif yük, c)akım kaynağı bağlı olması durumunda temel dalga şekilleri

\* $T_1$  ve  $T_2$  için tetikleme açıları 45 derece alınmıştır.

a) Yükün direnç olması durumu;

Bu durumda, elemanların iletim aralığına göre, çıkış gerilimi  $v_d(t)$  Denklem (3.67)'deki gibi ifade edilebilir. Temel dalga şekilleri ise Şekil 3.19.a'da gösterilmiştir.

$$v_d(t) = \left. \begin{array}{l|l|l} 0 & 0 < \omega t < \alpha & \text{iletim yok} \\ V_a & \alpha < \omega t < \pi & T_1 \text{ iletimde} \\ 0 & \pi < \omega t < \pi + \alpha & \text{iletim yok} \\ V_b & \pi + \alpha < \omega t < 2\pi & T_2 \text{ iletimde} \end{array} \right\} \quad (3.67)$$

Şekil 3.19.a'da görüldüğü gibi direnç yükünde,  $\alpha$  anında tetiklenerek ilettime giren  $T_1$  tristörü,  $\pi$  anında akımın sıfır olmasıyla kesime girer. Benzer şekilde  $\pi + \alpha$  anında ilettime gören  $T_2$  tristörü  $2\pi$  anında kesime girer. Bu durumda çıkış gerilimi  $v_d(t)$ , çıkış akımı  $i_d(t)$  ve giriş akımı  $i_a(t)$ 'nin Fourier seri açılımları sırasıyla Denklem (3.68), (3.69) ve (3.70)'de ifade edilmiştir.

$$v_d(t) = \frac{V_m}{2\pi} \left[ \begin{array}{l} 2(1 + \cos \alpha) + \sum_{n=2,4,6,\dots}^{\infty} \left[ \begin{array}{l} \frac{\sin(n+1)\alpha}{n+1} - \frac{\sin(1-n)\alpha}{1-n} \\ - \frac{\sin(n+1)(\alpha + \pi)}{n+1} \\ + \frac{\sin(1-n)(\alpha + \pi)}{1-n} \end{array} \right] \sin n\omega t \\ \sum_{n=2,4,6,\dots}^{\infty} \left[ \begin{array}{l} - \frac{\cos(n+1)\pi}{n+1} - \frac{\cos(1-n)\pi}{1-n} \\ + \frac{\cos(n+1)\alpha}{n+1} + \frac{\cos(1-n)\alpha}{1-n} + \frac{2n}{n^2-1} \\ - \frac{\cos(n+1)(\alpha + \pi)}{n+1} - \frac{\cos(1-n)(\alpha + \pi)}{1-n} \end{array} \right] \cos n\omega t \end{array} \right] \quad (3.68)$$

$$i_d(t) = \frac{V_d(t)}{R_y} \quad (3.69)$$

$$i_a(t) = \frac{V_m}{2\pi R_y} \left[ \begin{array}{l} (1 + \cos \alpha) + \frac{1}{2}(\cos 2\alpha - 1) \cos \omega t + (\pi - \alpha + \frac{1}{2} \sin 2\alpha) \sin \omega t \\ + \sum_{n=2,4,6,\dots}^{\infty} \left[ \begin{array}{l} - \frac{\cos(n+1)\pi}{n+1} - \frac{\cos(1-n)\pi}{1-n} \\ + \frac{\cos(n+1)\alpha}{n+1} + \frac{\cos(1-n)\alpha}{1-n} \end{array} \right] \cos n\omega t \\ + \sum_{n=2,4,6,\dots}^{\infty} \left[ \begin{array}{l} \frac{\sin(n+1)\alpha}{n+1} - \frac{\sin(1-n)\alpha}{1-n} \end{array} \right] \sin n\omega t \end{array} \right] \quad (3.70)$$

b) Yükün endüktif olması durumu;

Bu durumda, elemanların iletim aralığına göre  $v_d(t)$  çıkış gerilimi Denklem (3.71)'deki gibi ifade edilebilir. Temel dalga şekilleri ise Şekil 3.19.b'de gösterilmiştir.

$$v_d(t) = \left\{ \begin{array}{l} V_b \mid 0 < \omega t < \beta \quad T_2 \text{ iletimde} \\ 0 \mid \beta < \omega t < \alpha \quad \text{iletim yok} \\ V_b \mid \alpha < \omega t < \pi + \beta \quad T_1 \text{ iletimde} \\ 0 \mid \pi + \beta < \omega t < \pi + \alpha \quad \text{iletim yok} \\ V_b \mid \pi + \alpha < \omega t < 2\pi \quad T_2 \text{ iletimde} \end{array} \right\} \quad (3.71)$$

Şekil 3.19.b'de görüldüğü gibi yine  $\alpha$  anında tetiklenerek ilettime giren  $T_1$  tristörü, endüktansta biriken bir miktar enerji ile  $\pi + \beta$  anına kadar iletimde kalacak ve endüktans enerjisinin bitmesiyle tekrardan kesime girecektir. Benzer şekilde  $\pi + \alpha$

anında tetiklenen  $T_2$  tristörü,  $2\pi+\beta$  anına kadar iletimde kalacak ve endüktans enerjisinin bitmesiyle tekrardan kesime girecektir. Bu durumda çıkış gerilimi  $v_d(t)$  ve çıkış akımı  $i_d(t)$ 'nin Fourier seri açılımları sırasıyla Denklem (3.73), (3.74)'de verilmiştir.

$$A_n = \begin{bmatrix} -\frac{\cos(n+1)(\beta + \pi)}{n+1} + \frac{\cos(n+1)\alpha}{n+1} \\ -\frac{\cos(1-n)(\beta + \pi)}{1-n} + \frac{\cos(1-n)\alpha}{1-n} \\ -\frac{\cos(n+1)(\alpha + \pi)}{n+1} + \frac{\cos(n+1)\beta}{n+1} \\ -\frac{\cos(1-n)(\alpha + \pi)}{1-n} + \frac{\cos(1-n)\beta}{1-n} \end{bmatrix} \quad B_n = \begin{bmatrix} -\frac{\sin(n+1)(\beta + \pi)}{n+1} + \frac{\sin(n+1)\alpha}{n+1} \\ \frac{\sin(1-n)(\beta + \pi)}{1-n} - \frac{\sin(1-n)\alpha}{1-n} \\ -\frac{\sin(n+1)(\alpha + \pi)}{n+1} + \frac{\sin(n+1)\beta}{n+1} \\ \frac{\sin(1-n)(\alpha + \pi)}{1-n} - \frac{\sin(1-n)\beta}{1-n} \end{bmatrix} \quad (3.72)$$

$$v_d(t) = \frac{V_m}{2\pi} \left[ 2(\cos \alpha + \cos \beta) + \sum_{n=2,4,6,\dots}^{\infty} A_n \cos n\omega t + B_n \sin n\omega t \right] \quad (3.73)$$

$$i_d(t) = \frac{V_m}{2\pi} \left[ \frac{2}{R_y} (\cos \alpha + \cos \beta) + \sum_{n=2,4,6,\dots}^{\infty} \left( \frac{A_n}{\sqrt{R_y^2 + (n\omega L_y)^2}} \cos(n\omega t - \varphi_n) + \frac{B_n}{\sqrt{R_y^2 + (n\omega L_y)^2}} \sin(n\omega t - \varphi_n) \right) \right] \quad (3.74)$$

Giriş akımı  $i_a(t)$ 'nin Fourier seri açılımı, Denklem (3.76)'da verilmiştir. Burada yer alan  $k$  çarpanı,  $T_1$  tristörünün iletimde olduğu  $\alpha < \omega t < \pi+\beta$  aralığında '1',  $0 < \omega t < \alpha$  ve  $\pi+\beta < \omega t < 2\pi$  aralığında '0' değerini alır. Bu çarpanın kullanılma nedeni, giriş akımının yük akımının belirli kısımlarını içermesidir.

$$i_a(t) = \frac{V_m}{2\pi} \left[ \frac{2 \cos \alpha}{R_y} + \frac{4 \cos \alpha}{\pi R_y} \sum_{n=1,3,5}^{\infty} \left( \frac{\sin n(\pi + \beta) - \sin n \alpha}{n} \cos n\omega t + \frac{\cos n(\pi + \beta) - \cos n \alpha}{n} \sin n\omega t \right) + k \sum_{n=2,4,6,\dots}^{\infty} \left( \frac{A_n}{\sqrt{R_y^2 + (n\omega L_y)^2}} \cos(n\omega t - \varphi_n) + \frac{B_n}{\sqrt{R_y^2 + (n\omega L_y)^2}} \sin(n\omega t - \varphi_n) \right) \right] \quad (3.75)$$

c) Yükün akım kaynağı olması durumu;

Bu durumda, elemanların iletim aralığına göre, çıkış gerilimi  $v_d(t)$ , Denklem (3.76)'daki gibi ifade edilebilir. Temel dalga şekilleri ise Şekil 3.19.c'de gösterilmiştir.

$$v_d(t) = \begin{cases} V_b & | & 0 < \omega t < \alpha & & T_2 \text{ iletimde} \\ V_a & | & \alpha < \omega t < \pi + \alpha & & T_1 \text{ iletimde} \\ V_b & | & \pi + \alpha < \omega t < 2\pi & & T_2 \text{ iletimde} \end{cases} \quad (3.76)$$

Şekil 3.19.c'de görüldüğü gibi, yine  $\alpha$  anında tetiklenerek ilettime giren  $T_1$  tristörü, akımın sürekli olması nedeniyle  $\pi + \alpha$  anında  $T_2$  tristörü tetikleninceye kadar iletimde kalır. Benzer şekilde  $\pi + \alpha$  anında tetiklenerek ilettime giren  $T_2$  tristörü,  $2\pi + \alpha$  anında  $T_1$  tristörü tetiklenmesiyle kesime girer. Bu durumda çıkış gerilimi  $v_d(t)$ , çıkış akımı  $i_d(t)$  ve giriş akımı  $i_a(t)$ 'nin Fourier seri açılımları sırasıyla Denklem (3.77), (3.78) ve (3.79)'da verilmiştir.

$$v_d(t) = \frac{V_m}{\pi} \left[ \begin{aligned} & 2 \cos \alpha + \sum_{n=2,4,6}^{\infty} \left[ \frac{-\cos(n+1)(\alpha + \pi) + \cos(n+1)\alpha}{n+1} + \frac{\cos(1-n)(\alpha + \pi) + \cos(1-n)\alpha}{1-n} \right] \cos n\omega t \\ & + \sum_{n=2,4,6}^{\infty} \left[ \frac{-\sin(n+1)(\alpha + \pi) + \sin(1-n)(\alpha + \pi)}{n+1} + \frac{\sin(1-n)(\alpha + \pi)}{1-n} \right] \sin n\omega t \end{aligned} \right] \quad (3.77)$$

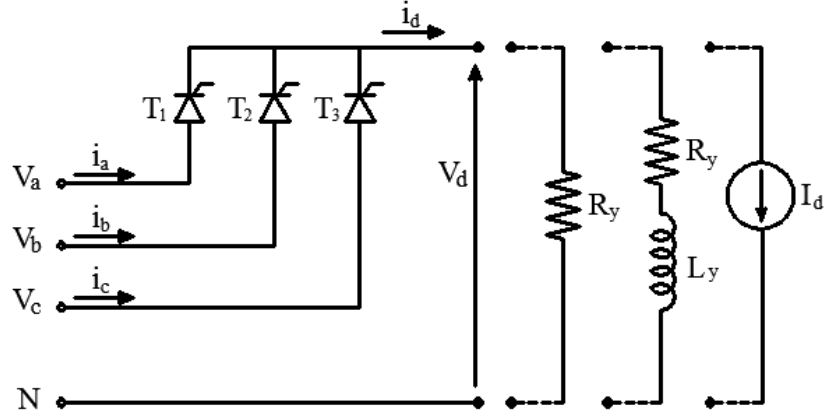
$$i_d(t) = I_d \quad (3.78)$$

$$i_a(t) = \frac{I_d}{2} + \frac{I_d}{\pi} \sum_{n=1,3,5,\dots}^{\infty} \left( \frac{\sin n(\pi + \alpha) - \sin n\alpha}{n} \cos n\omega t + \frac{\cos n(\pi + \alpha) - \cos n\alpha}{n} \sin n\omega t \right) \quad (3.79)$$

### 3.1.2.3. Üç fazlı yarım dalga kontrollü doğrultucu

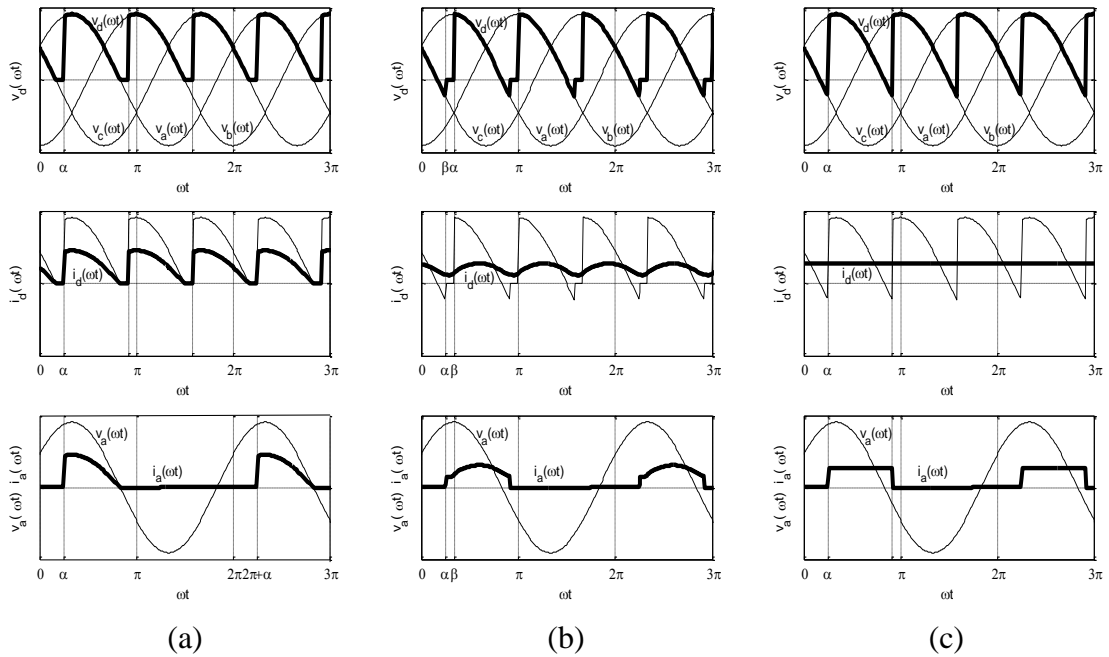
Üç fazlı yarım dalga kontrollü doğrultucuya ait devre şeması Şekil 3.20'de verilmiştir. Üç fazlı yarım dalga kontrolsüz doğrultucu devresindeki diyotların yerini burada tristörler almıştır. Tristörler yine akımı eşit aralıklarla ve sırayla geçirecektirler. Ancak, elemanların akım aktarma anları, tetikleme sinyalleri ile diyotlu devrelere göre  $\alpha$  kadar geciktirilebilir. Tetikleme gecikmesi denilen bu açı daima 0 ile  $\pi$  aralığında kontrol edilebilir.





Şekil 3.20. Üç fazlı yarım dalga kontrollü doğrultucu devresi

Bu devrede, kontrol aralıkları fazlar arası gerilime bağlı olarak  $\pi$  ve bu aralıklar arasındaki faz farkı  $2\pi/3$ 'dür. Bu durumda tristörlerin sırasıyla kontrol aralıkları,  $T_1$  için  $0 < \alpha < \pi$ ,  $T_2$  için  $2\pi/3 < \alpha < 2\pi/3 + \pi$  ve  $T_3$  için  $4\pi/3 < \alpha < 4\pi/3 + \pi$  şeklindedir. Ancak yükün direnç olması durumunda istisnai olarak kontrol aralığı  $\pi/6 < \alpha < 5\pi/6$  aralığındadır.



Şekil 3.21. Üç fazlı yarım dalga kontrollü doğrultucunun a) direnç, b) endüktif yük, c) akım kaynağı bağlı olması durumunda temel dalga şekilleri

\* $T_1, T_2$  ve  $T_3$  için tetikleme açıları 45 derece alınmıştır.

a) Yükün direnç olması durumu;

Bu durumda, elemanların iletim aralığına göre, çıkış gerilimi  $v_d(t)$ , Denklem (3.80)'deki gibi ifade edilebilir. Temel dalga şekilleri ise Şekil 3.21.a'da gösterilmiştir.

$$v_d(t) = \left. \begin{array}{l} V_c \mid 0 < \omega t < \pi/6 \\ 0 \mid \pi/6 < \omega t < \alpha \\ V_a \mid \alpha < \omega t < 5\pi/6 \\ 0 \mid 5\pi/6 < \omega t < 4\pi/6 + \alpha \\ V_b \mid 4\pi/6 + \alpha < \omega t < 9\pi/6 \\ 0 \mid 9\pi/6 < \omega t < 8\pi/6 + \alpha \\ V_c \mid 8\pi/6 + \alpha < \omega t < 2\pi \end{array} \right\} \begin{array}{l} T_3 \text{ iletimde} \\ \text{iletim yok} \\ T_1 \text{ iletimde} \\ \text{iletim yok} \\ T_2 \text{ iletimde} \\ \text{iletim yok} \\ T_3 \text{ iletimde} \end{array} \quad (3.80)$$

Şekil 3.21.a’da görüldüğü gibi direnç yükünde,  $\alpha$  anında tetiklenerek ilettime giren  $T_1$  tristörü,  $5\pi/6$  anında akımın sıfır olmasıyla kesime girer. Benzer şekilde  $4\pi/6 + \alpha$  anında ilettime gören  $T_2$  tristörü  $9\pi/6$  anında,  $8\pi/6 + \alpha$  anında ilettime gören  $T_3$  tristörü  $13\pi/6$  anında kesime girer. Bu durumda çıkış gerilimi  $v_d(t)$ , çıkış akımı  $i_d(t)$  ve giriş akımı  $i_a(t)$ ’nın Fourier seri açılımları Denklem (3.81) ile (3.88) arasında verilen eşitliklerde  $\beta=0$  alınarak sırasıyla Denklem (3.89), (3.90) ve (3.91)’deki gibi elde edilmiştir.

$$a_{n1} = -\frac{\sqrt{3}}{4\pi} \left[ -\frac{\cos(n+1)(\beta + \pi/6)}{n+1} + \frac{\cos(1-n)(\beta + \pi/6)}{1-n} + \frac{1}{1-n} + \frac{1}{1+n} \right] \\ + \frac{1}{4\pi} \left[ \frac{\sin(n+1)(\beta + \pi/6)}{n+1} + \frac{\sin(1-n)(\beta + \pi/6)}{1-n} \right] \quad (3.81)$$

$$a_{n2} = \frac{\sqrt{3}}{4\pi} \left[ -\frac{\cos(n+1)(\beta + 5\pi/6)}{n+1} + \frac{\cos(n+1)\alpha}{n+1} \right] \\ - \frac{\cos(1-n)(\beta + 5\pi/6)}{1-n} + \frac{\cos(1-n)\alpha}{1-n} \quad (3.82) \\ + \frac{1}{4\pi} \left[ \frac{\sin(n+1)(\beta + 5\pi/6)}{n+1} - \frac{\sin(n+1)\alpha}{n+1} \right] \\ + \frac{\sin(1-n)(\beta + 5\pi/6)}{1-n} - \frac{\sin(1-n)\alpha}{1-n}$$

$$a_{n3} = -\frac{1}{2\pi} \left[ \frac{\sin(n+1)(\beta + 3\pi/2)}{n+1} + \frac{\sin(1-n)(\beta + 3\pi/2)}{1-n} \right] \\ - \frac{\sin(n+1)(\alpha + 2\pi/3)}{n+1} - \frac{\sin(1-n)(\alpha + 2\pi/3)}{1-n} \quad (3.83)$$

$$a_{n4} = -\frac{\sqrt{3}}{4\pi} \left[ \frac{\cos(n+1)(\alpha + 4\pi/3)}{n+1} + \frac{\cos(1-n)(\alpha + 4\pi/3)}{1-n} - \frac{1}{n+1} - \frac{1}{1-n} \right] \\ + \frac{1}{4\pi} \left[ -\frac{\sin(n+1)(\alpha + 4\pi/3)}{n+1} - \frac{\sin(1-n)(\alpha + 4\pi/3)}{1-n} \right] \quad (3.84)$$

$$b_{n1} = \frac{1}{4\pi} \left[ -\frac{\cos(n+1)(\beta + \pi/6)}{n+1} - \frac{\cos(n-1)(\beta + \pi/6)}{n-1} + \frac{1}{n-1} + \frac{1}{1+n} \right] \\ + \frac{\sqrt{3}}{4\pi} \left[ \frac{\sin(n+1)(\beta + \pi/6)}{n+1} - \frac{\sin(1-n)(\beta + \pi/6)}{1-n} \right] \quad (3.85)$$

$$b_{n2} = \frac{1}{4\pi} \left[ -\frac{\cos(n+1)(\beta + 5\pi/6)}{n+1} + \frac{\cos(n-1)\alpha}{n-1} \right] \\ - \frac{\sqrt{3}}{4\pi} \left[ \frac{\sin(n+1)(\beta + 5\pi/6)}{n+1} + \frac{\sin(n+1)\alpha}{n+1} + \right. \\ \left. - \frac{\sin(1-n)(\beta + 5\pi/6)}{1-n} + \frac{\sin(1-n)\alpha}{1-n} \right] \quad (3.86)$$

$$b_{n3} = -\frac{1}{2\pi} \left[ -\frac{\cos(n+1)(\beta + 3\pi/2)}{n+1} - \frac{\cos(n-1)(\beta + 3\pi/2)}{n-1} \right] \\ + \frac{\cos(n+1)(\alpha + 2\pi/3)}{n+1} + \frac{\cos(n-1)(\alpha + 2\pi/3)}{n-1} \quad (3.87)$$

$$b_{n4} = \frac{\sqrt{3}}{4\pi} \left[ -\frac{\sin(n+1)(\alpha + 4\pi/3)}{n+1} + \frac{\sin(1-n)(\alpha + 4\pi/3)}{1-n} \right] \\ + \frac{1}{4\pi} \left[ -\frac{\cos(n+1)(\alpha + 4\pi/3)}{n+1} + \frac{\cos(n-1)(\alpha + 4\pi/3)}{n-1} \right] \quad (3.88)$$

$$v_d(t) = V_m \left[ \frac{\sqrt{3}}{4\pi} \cos \alpha - \frac{1}{4\pi} \sin \alpha + \left( \frac{5}{6} - \frac{\alpha}{\pi} + \frac{\sqrt{3}}{4\pi} \cos 2\alpha + \frac{7}{16\pi} \sin 2\alpha \right) \cos \omega t \right] \\ + \left( \frac{1}{8\pi} \cos 2\alpha \right) \sin \omega t + \sum_{n=2,3,4,\dots}^{\infty} \left[ (a_{n1} + a_{n2} + a_{n3} + a_{n4}) \cos n\omega t \right. \\ \left. + (b_{n1} + b_{n2} + b_{n3} + b_{n4}) \sin n\omega t \right] \quad (3.89)$$

$$i_d(t) = \frac{V_d(t)}{R_y} \quad (3.90)$$

$$\begin{aligned}
i_a(t) = & -\frac{\sqrt{3}V_m}{2\pi R_y} \left( \cos\left(\frac{5\pi}{6} + \beta\right) - \cos \alpha \right) + \frac{V_m}{2\pi R_y} \left( \sin\left(\frac{5\pi}{6} + \beta\right) - \sin \alpha \right) \\
& + \frac{V_m}{4\pi R_y} \left[ \begin{array}{l} \frac{5\pi}{6} + \beta - \alpha - \frac{\sqrt{3}}{2} \cos\left(\frac{5\pi}{3} + 2\beta\right) + \\ \frac{1}{2} \sin\left(\frac{5\pi}{6} + \beta\right) + \frac{\sqrt{3}}{2} \cos 2\alpha - \frac{1}{2} \sin 2\alpha \end{array} \right] \cos \omega t \\
& + \frac{V_m}{4\pi R_y} \left[ \begin{array}{l} \frac{5\sqrt{3}\pi}{6} + \sqrt{3}(\beta - \alpha) - \frac{1}{2} \cos\left(\frac{5\pi}{3} + 2\beta\right) + \\ \frac{1}{2} \cos 2\alpha + -\frac{1}{2} \sin\left(\frac{5\pi}{6} + \beta\right) + \frac{1}{2} \sin 2\alpha \end{array} \right] \sin \omega t \\
& + \frac{V_m}{R_y} \sum_{n=2,3,4,\dots}^{\infty} [a_{n2} \cos n\omega t + b_{n2} \sin n\omega t]
\end{aligned} \tag{3.91}$$

b) Yükün endüktif olması durumu;

Bu durumda, elemanların iletim aralığına göre, çıkış gerilimi  $v_d(t)$  Denklem (3.92)'deki gibi ifade edilebilir. Temel dalga şekilleri ise Şekil 3.21.b'de gösterilmiştir.

$$v_d(t) = \left. \begin{array}{ll} V_c & | \quad 0 < \omega t < \beta + \pi/6 & T_3 \text{ iletimde} \\ 0 & | \quad \beta + \pi/6 < \omega t < \alpha & \text{iletim yok} \\ V_a & | \quad \alpha < \omega t < 5\pi/6 + \beta & T_1 \text{ iletimde} \\ 0 & | \quad 5\pi/6 + \beta < \omega t < 4\pi/6 + \alpha & \text{iletim yok} \\ V_b & | \quad 4\pi/6 + \alpha < \omega t < 9\pi/6 + \beta & T_2 \text{ iletimde} \\ 0 & | \quad 9\pi/6 + \beta < \omega t < 8\pi/6 + \alpha & \text{iletim yok} \\ V_c & | \quad 8\pi/6 + \alpha < \omega t < 2\pi & T_3 \text{ iletimde} \end{array} \right\} \tag{3.92}$$

Şekil 3.21.b'de görüldüğü gibi yine  $\alpha$  anında tetiklenerek ilettime giren  $T_1$  tristörü, endüktansta biriken bir miktar enerji ile  $5\pi/6 + \beta$  anına kadar iletimde kalacak ve endüktans enerjisinin bitmesiyle tekrardan kesime girecektir.  $4\pi/6 + \alpha$  anında tetiklenen  $T_2$  tristörü ise,  $9\pi/6 + \beta$  anına kadar iletimde kalacak ve endüktans enerjisinin bitmesiyle tekrardan kesime girecektir. Benzer şekilde,  $8\pi/6 + \alpha$  anında tetiklenen  $T_3$  tristörü,  $13\pi/6 + \beta$  anına kadar iletimde kalacak ve endüktans enerjisinin bitmesiyle tekrardan kesime girecektir. Bu durumda çıkış gerilimi  $v_d(t)$ , çıkış akımı  $i_d(t)$  ve giriş akımı  $i_a(t)$ 'nin Fourier seri açılımları, Denklem (3.81) ile (3.88) arasında verilen eşitlikler yardımıyla sırasıyla Denklem (3.93), (3.94) ve (3.95)'deki gibi elde edilir.

$$v_d(t) = V_m \left[ \begin{aligned} & \frac{\sqrt{3}}{4\pi} \cos \beta + \frac{\sqrt{3}}{4\pi} \cos \alpha - \frac{1}{4\pi} \sin \alpha + \left( \frac{1}{8\pi} \cos 2\alpha \right) \sin \omega t \\ & + \left( \frac{5}{6} + \frac{\beta - \alpha}{\pi} + \frac{\sqrt{3}}{4\pi} \cos 2\alpha + \frac{7}{16\pi} \sin 2\alpha + \frac{\sqrt{3}}{8\pi} \cos 2\beta - \frac{5}{8\pi} \sin 2\beta \right) \cos \omega t \\ & + \sum_{n=2,3,4,\dots}^{\infty} \left[ (a_{n1} + a_{n2} + a_{n3} + a_{n4}) \cos n\omega t + \right. \\ & \left. (b_{n1} + b_{n2} + b_{n3} + b_{n4}) \sin n\omega t \right] \end{aligned} \right] \quad (3.93)$$

$$i_d(t) = \frac{\sqrt{3}V_m}{4\pi R_y} \left( \cos \beta + \cos \alpha - \frac{\sqrt{3}}{3} \sin \alpha \right) + \frac{V_m}{8\pi} \cos 2\alpha \frac{\sin(\omega t - \varphi_1)}{\sqrt{R_y^2 + (\omega L)^2}} \\ + \frac{V_m}{\pi} \left( \frac{5\pi}{6} + \beta - \alpha + \frac{\sqrt{3}}{4} \cos 2\alpha + \frac{7}{16} \sin 2\alpha + \frac{\sqrt{3}}{8} \cos 2\beta - \frac{5}{8} \sin 2\beta \right) \frac{\cos(\omega t - \varphi_1)}{\sqrt{R_y^2 + (\omega L)^2}} + \quad (3.94) \\ + \sum_{n=2,3,4,\dots}^{\infty} \frac{V_m}{\sqrt{R_y^2 + (n\omega L_y)^2}} \left[ (a_{n1} + a_{n2} + a_{n3} + a_{n4}) \cos(n\omega t - \varphi_n) + \right. \\ \left. (b_{n1} + b_{n2} + b_{n3} + b_{n4}) \sin(n\omega t - \varphi_n) \right]$$

$$i_a(t) = \frac{3V_m}{2\pi^2 R_y} \left( 1 + \cos\left(\alpha + \frac{\pi}{6}\right) \right) \left[ \sum_{n=1,2,4,5,7,\dots}^{\infty} \left[ \left( \left( \sin n\left(\frac{5\pi}{6} + \beta\right) - \sin n\alpha \right) \frac{\cos n\omega t}{n} + \right. \right. \right. \quad (3.95) \\ \left. \left. \left( \cos n\alpha - \cos n\left(\frac{5\pi}{6} + \alpha\right) \right) \frac{\sin n\omega t}{n} \right) \right. \right. \\ \left. \left. + \left( \frac{5\pi}{12} + \frac{\beta - \alpha}{2} \right) \right] \right] \\ + k \sum_{n=2,3,4,\dots}^{\infty} \frac{1}{\sqrt{R_y^2 + (n\omega L_y)^2}} \left[ (a_{n1} + a_{n2} + a_{n3} + a_{n4}) \cos(n\omega t - \varphi_n) + \right. \\ \left. (b_{n1} + b_{n2} + b_{n3} + b_{n4}) \sin(n\omega t - \varphi_n) \right]$$

c) Yükün akım kaynağı olması durumu;

Bu durumda, elemanların iletim aralığına göre,  $v_d(t)$  çıkış gerilimi, Denklem (3.96)'daki gibi ifade edilebilir. Temel dalga şekilleri ise Şekil 3.21.c'de gösterilmiştir.

$$v_d(t) = \left\{ \begin{array}{ll} V_c & | \quad 0 < \omega t < \alpha \quad T_3 \text{ iletimde} \\ V_a & | \quad \alpha < \omega t < 2\pi/3 + \alpha \quad T_1 \text{ iletimde} \\ V_b & | \quad 2\pi/3 + \alpha < \omega t < 4\pi/3 + \alpha \quad T_2 \text{ iletimde} \\ V_c & | \quad 4\pi/3 + \alpha < \omega t < 6\pi/3 \quad T_3 \text{ iletimde} \end{array} \right\} \quad (3.96)$$

Şekil 3.21.c'de görüldüğü gibi, yine  $\alpha$  anında tetiklenerek ilettime giren  $T_1$  tristörü, akımın sürekli olması nedeniyle  $2\pi/3 + \alpha$  anında  $T_2$  tristörü tetiklenene kadar iletimde kalır. Benzer şekilde  $2\pi/3 + \alpha$  anında tetiklenerek ilettime giren  $T_2$  tristörü,  $4\pi/3 + \alpha$  anında  $T_3$  tristörü tetiklenmesiyle kesime girer. Bu durumda çıkış gerilimi  $v_d(t)$ , çıkış

akımı  $i_d(t)$  ve giriş akımı  $i_a(t)$ 'nin Fourier seri açılımları Denklem (3.81) ile (3.88) arasında verilen eşitliklerde  $\beta=\alpha-\pi/6$  alınarak sırasıyla Denklem (3.97), (3.98) ve (3.99)'daki gibi elde edilir.

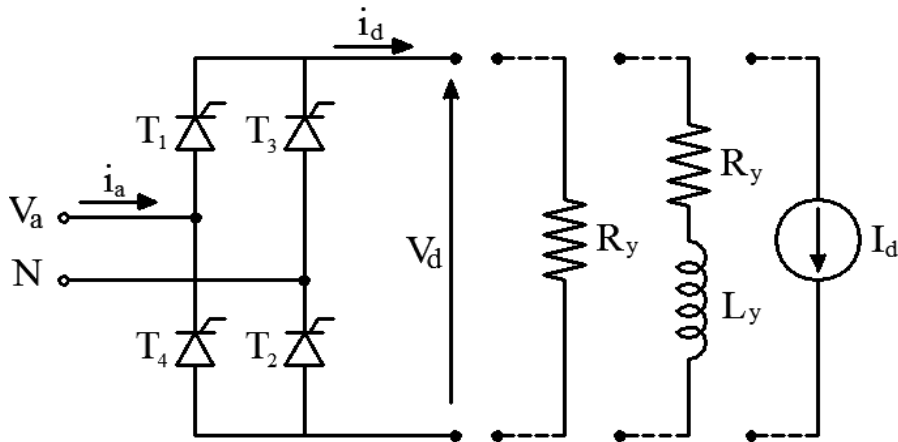
$$v_d(t) = V_m \left[ \begin{aligned} & \frac{\sqrt{3}}{2\pi} \cos \alpha - \frac{1}{4\pi} \sin \alpha + \left( \frac{1}{8\pi} \cos 2\alpha \right) \sin \omega t \\ & + \left( \frac{5}{6} + \frac{3\sqrt{3}}{8} \cos 2\alpha - \frac{3}{16} \sin 2\alpha \right) \cos \omega t \\ & + \sum_{n=2,3,4,\dots}^{\infty} \left[ (a_{n1} + a_{n2} + a_{n3} + a_{n4}) \cos n\omega t + \right. \\ & \left. (b_{n1} + b_{n2} + b_{n3} + b_{n4}) \sin n\omega t \right] \end{aligned} \right] \quad (3.97)$$

$$i_d(t) = I_d \quad (3.98)$$

$$i_a(t) = \frac{I_d}{3} + \frac{I_d}{\pi} \sum_{n=1,2,4,5,7,\dots}^{\infty} \left( \begin{aligned} & \frac{\sin n(\frac{2\pi}{3} + \alpha) - \sin n\alpha}{n} \cos n\omega t + \\ & \frac{\cos n\alpha - \cos n(\frac{2\pi}{3} + \alpha)}{n} \sin n\omega t \end{aligned} \right) \quad (3.99)$$

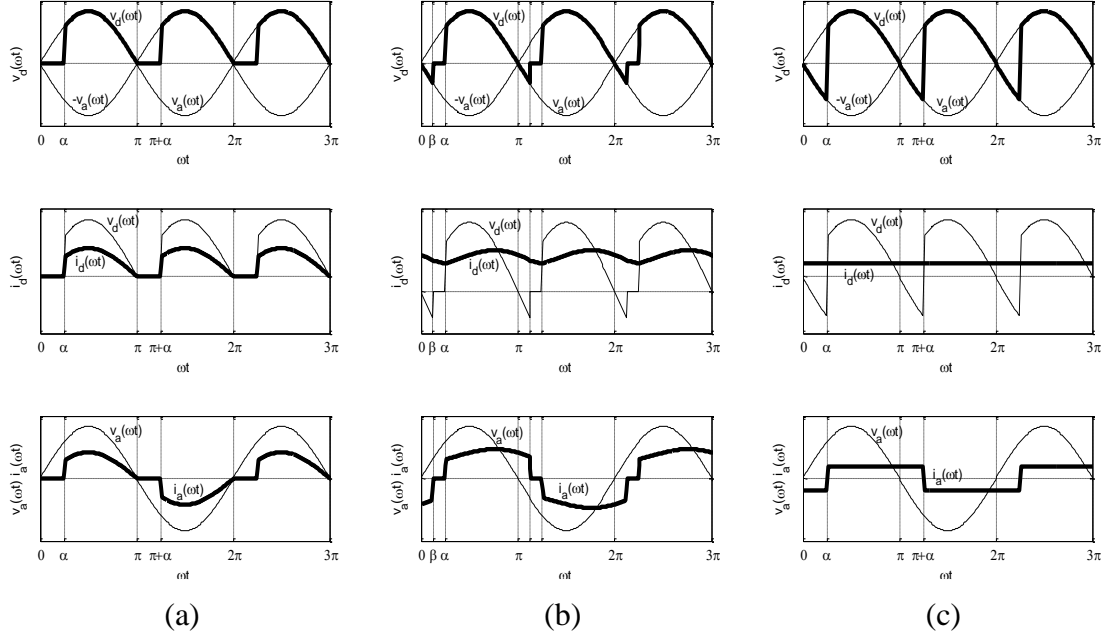
### 3.1.2.4. Bir fazlı tam dalga kontrollü doğrultucu

Bir fazlı tam dalga kontrollü doğrultucuya ait devre şeması Şekil 3.22'de verilmiştir. Bir fazlı tam dalga kontrolsüz doğrultucu devresindeki diyotların yerini burada tristörler almıştır.



Şekil 3.22. Bir fazlı tam dalga kontrollü doğrultucu devresi

Kontrol ve iletim aralıkları, yarım dalga kontrollü doğrultucu ile aynıdır. Ancak,  $0 < \omega t < \pi$  aralığında üretilen tetikleme sinyali,  $T_1$  pozitif sıra elemanına ile birlikte  $T_2$  negatif sıra elemanına da uygulanır. Aynı şekilde  $\pi < \omega t < 2\pi$  aralığında üretilen tetikleme sinyali,  $T_3$  pozitif sıra elemanına ile birlikte  $T_4$  negatif sıra elemanına da uygulanır.



Şekil 3.23. Bir fazlı tam dalga kontrollü doğrultucunun a) direnç, b) endüktif yük, c) akım kaynağı bağlı olması durumunda temel dalga şekilleri

\* $T_1, T_2$  ve  $T_3$  için tetikleme açıları 45 derece alınmıştır.

a) Yükün direnç olması durumu;

Bu durumda, elemanların iletim aralığına göre, çıkış gerilimi  $v_d(t)$  Denklem (3.100)'deki gibi ifade edilebilir. Temel dalga şekilleri ise Şekil 3.23.a'da gösterilmiştir.

$$v_d(t) = \left. \begin{array}{l|ll} 0 & 0 < \omega t < \alpha & \text{iletim yok} \\ V_a & \alpha < \omega t < \pi & T_1 \text{ ve } T_2 \text{ iletimde} \\ 0 & \pi < \omega t < \pi + \alpha & \text{iletim yok} \\ -V_a & \pi + \alpha < \omega t < 2\pi & T_3 \text{ ve } T_4 \text{ iletimde} \end{array} \right\} \quad (3.100)$$

Çıkış gerilimi  $v_d(t)$ , çıkış akımı  $i_d(t)$  ve giriş akımı  $i_a(t)$ 'nin Fourier seri açılımları sırasıyla Denklem (3.101), (3.102) ve (3.103)'de verilmiştir.

$$v_d(t) = \frac{V_m}{2\pi} \left[ \begin{array}{l} 2(1 + \cos \alpha) + \sum_{n=2,4,6,\dots}^{\infty} \left[ \begin{array}{l} \frac{\sin(n+1)\alpha}{n+1} - \frac{\sin(1-n)\alpha}{1-n} \\ \frac{\sin(n+1)(\alpha + \pi)}{n+1} \\ + \frac{\sin(1-n)(\alpha + \pi)}{1-n} \end{array} \right] \sin n\omega t \\ \sum_{n=2,4,6,\dots}^{\infty} \left[ \begin{array}{l} -\frac{\cos(n+1)\pi}{n+1} - \frac{\cos(1-n)\pi}{1-n} \\ + \frac{\cos(n+1)\alpha}{n+1} + \frac{\cos(1-n)\alpha}{1-n} - \frac{2}{n^2-1} \\ -\frac{\cos(n+1)(\alpha + \pi)}{n+1} - \frac{\cos(1-n)(\alpha + \pi)}{1-n} \end{array} \right] \cos n\omega t \end{array} \right] \quad (3.101)$$

$$i_d(t) = \frac{V_d(t)}{R_y} \quad (3.102)$$

$$i_a(t) = \frac{V_m}{2\pi R_y} \left[ \begin{array}{l} (\cos 2\alpha - 1) \cos \omega t + (2\pi - 2\alpha + \sin 2\alpha) \sin \omega t \\ + \sum_{n=3,5,7}^{\infty} \left[ \begin{array}{l} -\frac{\sin(n+1)(\alpha + \pi)}{n+1} + \frac{\sin(n+1)\alpha}{n+1} \\ + \frac{\sin(1-n)(\alpha + \pi)}{1-n} - \frac{\sin(1-n)\alpha}{1-n} \end{array} \right] \sin n\omega t \\ + \sum_{n=3,5,7}^{\infty} \left[ \begin{array}{l} -\frac{\cos(n+1)(\alpha + \pi)}{n+1} - \frac{\cos(n+1)\pi}{n+1} \\ -\frac{\cos(1-n)(\alpha + \pi)}{1-n} + \frac{\cos(n+1)\alpha}{n+1} \\ + \frac{\cos(1-n)\alpha}{1-n} - \frac{2}{n^2-1} - \frac{\cos(1-n)\pi}{1-n} \end{array} \right] \cos n\omega t \end{array} \right] \quad (3.103)$$

b) Yükün endüktif olması durumu;

Bu durumda, elemanların iletim aralığına göre, çıkış gerilimi  $v_d(t)$  Denklem (3.104)'teki gibi ifade edilebilir. Temel dalga şekilleri Şekil 3.23.b'de gösterilmiştir.

$$v_d(t) = \left\{ \begin{array}{ll} -V_a & | \quad 0 < \omega t < \beta & T_3 \text{ ve } T_4 \text{ iletimde} \\ 0 & | \quad \beta < \omega t < \alpha & \text{iletim yok} \\ V_a & | \quad \alpha < \omega t < \pi + \beta & T_1 \text{ ve } T_2 \text{ iletimde} \\ 0 & | \quad \pi + \beta < \omega t < \pi + \alpha & \text{iletim yok} \\ -V_a & | \quad \pi + \alpha < \omega t < 2\pi & T_3 \text{ ve } T_4 \text{ iletimde} \end{array} \right\} \quad (3.104)$$



Çıkış gerilimi  $v_d(t)$ , çıkış akımı  $i_d(t)$  ve giriş akımı  $i_a(t)$ 'nin Fourier seri açılımları sırasıyla Denklem (3.106), (3.107) ve (3.108)'de verilmiştir.

$$A_n = \begin{bmatrix} -\frac{\cos(n+1)(\beta + \pi)}{n+1} + \frac{\cos(n+1)\alpha}{n+1} \\ -\frac{\cos(1-n)(\beta + \pi)}{1-n} + \frac{\cos(1-n)\alpha}{1-n} \\ -\frac{\cos(n+1)(\alpha + \pi)}{n+1} + \frac{\cos(n+1)\beta}{n+1} \\ -\frac{\cos(1-n)(\alpha + \pi)}{1-n} + \frac{\cos(1-n)\beta}{1-n} \end{bmatrix}, B_n = \begin{bmatrix} -\frac{\sin(n+1)(\beta + \pi)}{n+1} + \frac{\sin(n+1)\alpha}{n+1} \\ \frac{\sin(1-n)(\beta + \pi)}{1-n} - \frac{\sin(1-n)\alpha}{1-n} \\ -\frac{\sin(n+1)(\alpha + \pi)}{n+1} + \frac{\sin(n+1)\beta}{n+1} \\ +\frac{\sin(1-n)(\alpha + \pi)}{1-n} - \frac{\sin(1-n)\beta}{1-n} \end{bmatrix} \quad (3.105)$$

$$v_d(t) = \frac{V_m}{2\pi} \left[ 2(\cos \alpha + \cos \beta) + \sum_{n=2,4,6\dots}^{\infty} A_n \cos n\omega t + B_n \sin n\omega t \right] \quad (3.106)$$

$$i_d(t) = \frac{V_m}{2\pi} \left[ \frac{2}{R_y} (\cos \alpha + \cos \beta) + \sum_{n=2,4,6\dots}^{\infty} \left( \frac{A_n}{\sqrt{R_y^2 + (n\omega L_y)^2}} \cos(n\omega t - \varphi_n) + \frac{B_n}{\sqrt{R_y^2 + (n\omega L_y)^2}} \sin(n\omega t - \varphi_n) \right) \right] \quad (3.107)$$

$$i_a(t) = \left[ \frac{2V_m}{\pi^2 R_y} \cos \alpha \sum_{n=1,3,5\dots}^{\infty} \left( \frac{\sin n(\pi + \alpha) - \sin n\alpha}{n} + \frac{\sin n(\pi + \beta) - \sin n\beta}{n} \right) \cos n\omega t + \left( \frac{-\cos n(\pi + \alpha) + \cos n\alpha}{n} - \frac{-\cos n(\pi + \beta) + \cos n\beta}{n} \right) \sin n\omega t \right] + k \frac{V_m}{2\pi} \sum_{n=2,4,6\dots}^{\infty} \left( \frac{A_n}{\sqrt{R_y^2 + (n\omega L_y)^2}} \cos(n\omega t - \varphi_n) + \frac{B_n}{\sqrt{R_y^2 + (n\omega L_y)^2}} \sin(n\omega t - \varphi_n) \right) \quad (3.108)$$

c) Yükün akım kaynağı olması durumu;

Bu durumda, elemanların iletim aralığına göre, çıkış gerilimi  $v_d(t)$ , Denklem (3.109)'daki gibi ifade edilebilir. Temel dalga şekilleri ise Şekil 3.23.c'de gösterilmiştir.

$$v_d(t) = \left\{ \begin{array}{ll} -V_a & | \quad 0 < \omega t < \alpha \quad T_3 \text{ ve } T_4 \text{ iletimde} \\ V_a & | \quad \alpha < \omega t < \pi + \alpha \quad T_1 \text{ ve } T_2 \text{ iletimde} \\ -V_a & | \quad \pi + \alpha < \omega t < 2\pi \quad T_3 \text{ ve } T_4 \text{ iletimde} \end{array} \right\} \quad (3.109)$$

Çıkış gerilimi  $v_d(t)$ , çıkış akımı  $i_d(t)$  ve giriş akımı  $i_a(t)$ 'nin Fourier seri açılımları sırasıyla Denklem (3.110), (3.111) ve (3.112)'de verilmiştir.

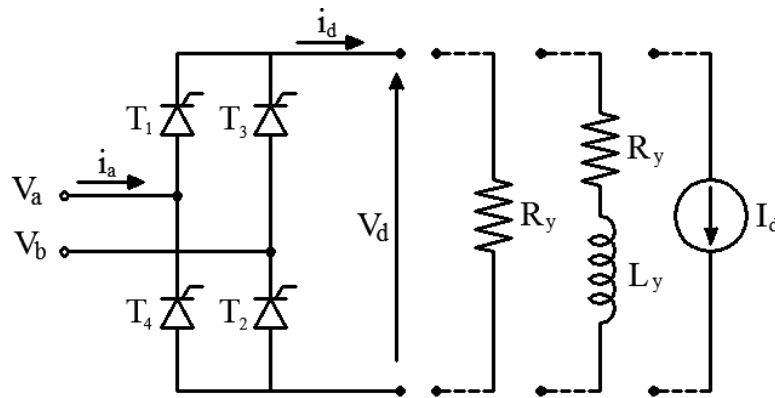
$$v_d(t) = \frac{V_m}{\pi} \left[ \begin{aligned} & 2 \cos \alpha + \sum_{n=2,4,6}^{\infty} \left[ \frac{-\cos(n+1)(\alpha + \pi) + \cos(n+1)\alpha}{n+1} + \frac{\cos(n+1)\alpha}{n+1} \right] \cos n\omega t \\ & + \sum_{n=2,4,6}^{\infty} \left[ \frac{-\sin(n+1)(\alpha + \pi) + \sin(1-n)(\alpha + \pi)}{n+1} + \frac{\sin(1-n)(\alpha + \pi)}{1-n} \right] \sin n\omega t \\ & + \sum_{n=2,4,6}^{\infty} \left[ \frac{\sin(n+1)\alpha}{n+1} - \frac{\sin(1-n)\alpha}{1-n} \right] \sin n\omega t \end{aligned} \right] \quad (3.110)$$

$$i_d(t) = I_d \quad (3.111)$$

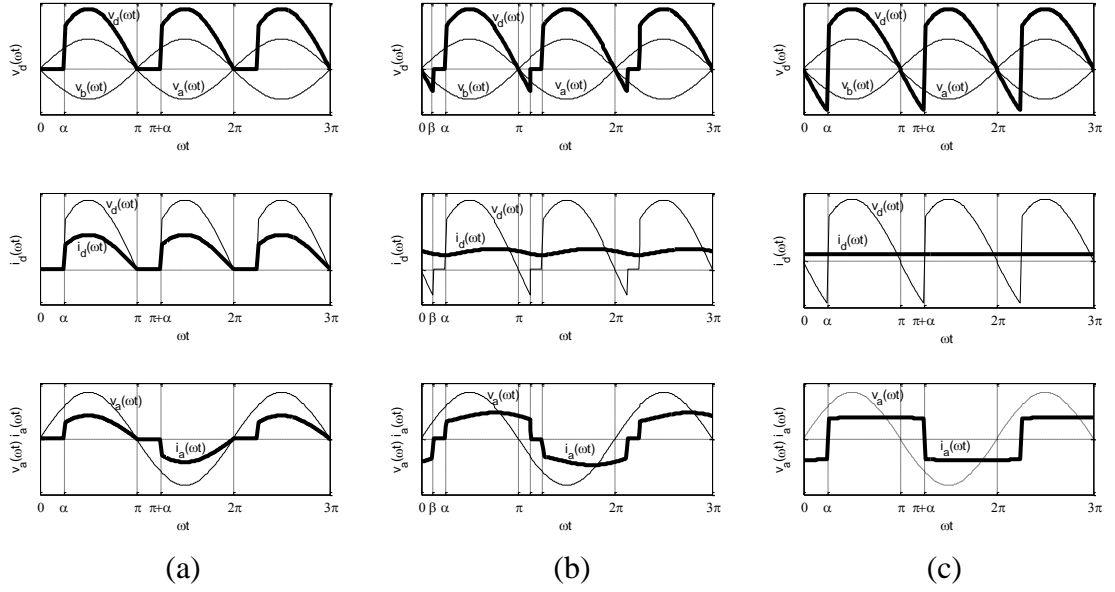
$$i_a(t) = \frac{2I_d}{\pi} \sum_{n=1,3,5,\dots}^{\infty} \left( \begin{aligned} & \frac{\sin n(\pi + \alpha) - \sin n \alpha}{n} \cos n\omega t + \\ & \frac{-\cos n(\pi + \alpha) + \cos n \alpha}{n} \sin n\omega t \end{aligned} \right) \quad (3.112)$$

### 3.1.2.5. İki fazlı tam dalga kontrollü doğrultucu

İki fazlı tam dalga kontrollü doğrultucuya ait devre şeması Şekil 3.24'de verilmiştir. İki fazlı tam dalga kontrolsüz doğrultucu devresindeki diyotların yerini burada tristörler almıştır. Kontrol ve iletim aralıkları, bir fazlı tam dalga kontrollü doğrultucu ile aynıdır.



Şekil 3.24. İki fazlı tam dalga kontrollü doğrultucu devresi



Şekil 3.25. İki fazlı tam dalga kontrollü doğrultucunun a) direnç, b) endüktif yük, c) akım kaynağı bağlı olması durumunda temel dalga şekilleri

\* $T_1, T_2$  ve  $T_3$  için tetikleme açıları 45 derece alınmıştır.

a) Yükün direnç olması durumu;

Bu durumda, elemanların iletim aralığına göre, çıkış gerilimi  $v_d(t)$ , Denklem (3.113)'deki gibi ifade edilebilir. Temel dalga şekilleri ise Şekil 3.25.a'da gösterilmiştir.

$$v_d(t) = \left\{ \begin{array}{l|l|l} 0 & 0 < \omega t < \alpha & \text{iletim yok} \\ V_{ab} & \alpha < \omega t < \pi & T_1 \text{ ve } T_2 \text{ iletimde} \\ 0 & \pi < \omega t < \pi + \alpha & \text{iletim yok} \\ V_{ab} & \pi + \alpha < \omega t < 2\pi & T_3 \text{ ve } T_4 \text{ iletimde} \end{array} \right\} \quad (3.113)$$

Çıkış gerilimi  $v_d(t)$ , çıkış akımı  $i_d(t)$  ve giriş akımı  $i_a(t)$ 'nin Fourier seri açılımları sırasıyla Denklem (3.114), (3.115) ve (3.116)'da ifade edilmiştir.

$$v_d(t) = \frac{V_m}{\pi} \left[ \begin{array}{l} 2(1 + \cos \alpha) + \sum_{n=2,4,6\dots}^{\infty} \left[ \begin{array}{l} \frac{\sin(n+1)\alpha}{n+1} - \frac{\sin(1-n)\alpha}{1-n} \\ - \frac{\sin(n+1)(\alpha + \pi)}{n+1} \\ + \frac{\sin(1-n)(\alpha + \pi)}{1-n} \end{array} \right] \sin n\omega t \\ \sum_{n=2,4,6\dots}^{\infty} \left[ \begin{array}{l} -\frac{\cos(n+1)\pi}{n+1} - \frac{\cos(1-n)\pi}{1-n} \\ + \frac{\cos(n+1)\alpha}{n+1} + \frac{\cos(1-n)\alpha}{1-n} - \frac{2}{n^2-1} \\ - \frac{\cos(n+1)(\alpha + \pi)}{n+1} - \frac{\cos(1-n)(\alpha + \pi)}{1-n} \end{array} \right] \cos n\omega t \end{array} \right] \quad (3.114)$$

$$i_d(t) = \frac{V_d(t)}{R_y} \quad (3.115)$$

$$i_a(t) = \frac{V_m}{\pi R_y} \left[ \begin{array}{l} (\cos 2\alpha - 1) \cos \omega t + (2\pi - 2\alpha + \sin 2\alpha) \sin \omega t \\ + \sum_{n=5,7,9}^{\infty} \left[ \begin{array}{l} -\frac{\sin(n+1)(\alpha + \pi)}{n+1} + \frac{\sin(n+1)\alpha}{n+1} \\ + \frac{\sin(1-n)(\alpha + \pi)}{1-n} - \frac{\sin(1-n)\alpha}{1-n} \end{array} \right] \sin n\omega t \\ + \sum_{n=5,7,9}^{\infty} \left[ \begin{array}{l} -\frac{\cos(n+1)(\alpha + \pi)}{n+1} - \frac{\cos(n+1)\pi}{n+1} \\ - \frac{\cos(1-n)(\alpha + \pi)}{1-n} + \frac{\cos(n+1)\alpha}{n+1} \\ + \frac{\cos(1-n)\alpha}{1-n} - \frac{2}{n^2-1} - \frac{\cos(1-n)\pi}{1-n} \end{array} \right] \cos n\omega t \end{array} \right] \quad (3.116)$$

b) Yükün endüktif olması durumu;

Bu durumda, elemanların iletim aralığına göre, çıkış gerilimi  $v_d(t)$ , Denklem (3.117)'deki gibi ifade edilebilir. Temel dalga şekilleri ise Şekil 3.25.b'de gösterilmiştir.

$$v_d(t) = \left\{ \begin{array}{ll} V_{ba} & 0 < \omega t < \beta \quad T_3 \text{ ve } T_4 \text{ iletimde} \\ 0 & \beta < \omega t < \alpha \quad \text{iletim yok} \\ V_{ab} & \alpha < \omega t < \pi + \beta \quad T_3 \text{ ve } T_4 \text{ iletimde} \\ 0 & \pi + \beta < \omega t < \pi + \alpha \quad \text{iletim yok} \\ V_{ba} & \pi + \alpha < \omega t < 2\pi \quad T_3 \text{ ve } T_4 \text{ iletimde} \end{array} \right\} \quad (3.117)$$

Çıkış gerilimi  $v_d(t)$ , çıkış akımı  $i_d(t)$  ve giriş akımı  $i_a(t)$ 'nin Fourier seri açılımları sırasıyla Denklem (3.118), (3.119) ve (3.120)'de ifade edilmiştir.  $A_n$  ve  $B_n$  için Denklem (3.105)'deki ifadeler geçerlidir.

$$v_d(t) = \frac{V_m}{\pi} \left[ 2(\cos \alpha + \cos \beta) + \sum_{n=2,4,6\dots}^{\infty} A_n \cos n\omega t + B_n \sin n\omega t \right] \quad (3.118)$$

$$i_d(t) = \frac{V_m}{\pi} \left[ \frac{2}{R_y} (\cos \alpha + \cos \beta) + \sum_{n=2,4,6\dots}^{\infty} \left( \frac{A_n}{\sqrt{R_y^2 + (n\omega L_y)^2}} \cos(n\omega t - \phi_n) + \frac{B_n}{\sqrt{R_y^2 + (n\omega L_y)^2}} \sin(n\omega t - \phi_n) \right) \right] \quad (3.119)$$

$$i_a(t) = \left[ \frac{4V_m}{\pi^2 R_y} \cos \alpha \sum_{n=1,3,5\dots}^{\infty} \left( \frac{\sin n(\pi + \alpha) - \sin n \alpha + \sin n(\pi + \beta) - \sin n \beta}{n} \cos n\omega t + \frac{-\cos n(\pi + \alpha) + \cos n \alpha - \cos n(\pi + \beta) + \cos n \beta}{n} \sin n\omega t \right) + k \frac{V_m}{\pi} \sum_{n=2,4,6\dots}^{\infty} \left( \frac{A_n}{\sqrt{R_y^2 + (n\omega L_y)^2}} \cos(n\omega t - \phi_n) + \frac{B_n}{\sqrt{R_y^2 + (n\omega L_y)^2}} \sin(n\omega t - \phi_n) \right) \right] \quad (3.120)$$

c) Yükün akım kaynağı olması durumu;

Bu durumda, elemanların iletim aralığına göre, çıkış gerilimi  $v_d(t)$ , Denklem (3.121)'deki gibi ifade edilebilir. Temel dalga şekilleri ise Şekil 3.25.c'de gösterilmiştir.

$$v_d(t) = \left\{ \begin{array}{ll} V_{ba} & | \quad 0 < \omega t < \alpha \quad T_3 \text{ ve } T_4 \text{ iletimde} \\ V_{ab} & | \quad \alpha < \omega t < \pi + \alpha \quad T_1 \text{ ve } T_2 \text{ iletimde} \\ V_{ba} & | \quad \pi + \alpha < \omega t < 2\pi \quad T_3 \text{ ve } T_4 \text{ iletimde} \end{array} \right\} \quad (3.121)$$

Çıkış gerilimi  $v_d(t)$ , çıkış akımı  $i_d(t)$  ve giriş akımı  $i_a(t)$ 'nin Fourier seri açılımları sırasıyla Denklem (3.122), (3.123) ve (3.124)'de ifade edilmiştir.

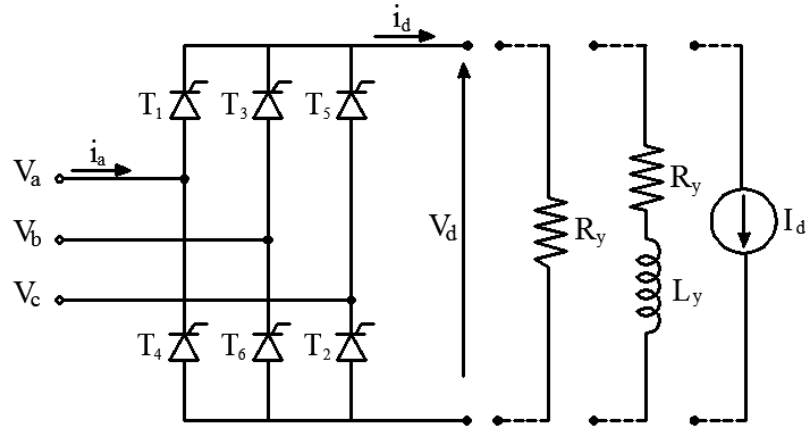
$$v_d(t) = \frac{2V_m}{\pi} \left[ 2 \cos \alpha + \sum_{n=2,4,6}^{\infty} \left[ \frac{-\cos(n+1)(\alpha + \pi) + \cos(n+1)\alpha}{n+1} + \frac{\cos(n+1)\alpha}{n+1} \right] \cos n\omega t \right. \\ \left. + \sum_{n=2,4,6}^{\infty} \left[ \frac{-\sin(n+1)(\alpha + \pi) + \sin(1-n)(\alpha + \pi)}{n+1} + \frac{\sin(1-n)(\alpha + \pi)}{1-n} \right] \sin n\omega t \right] \quad (3.122)$$

$$i_d(t) = I_d \quad (3.123)$$

$$i_a(t) = \frac{2I_d}{\pi} \sum_{n=1,3,5,\dots}^{\infty} \left( \frac{\sin n(\pi + \alpha) - \sin n\alpha}{n} \cos n\omega t + \frac{-\cos n(\pi + \alpha) + \cos n\alpha}{n} \sin n\omega t \right) \quad (3.124)$$

### 3.1.2.6. Üç fazlı tam dalga kontrollü doğrultucu

Üç fazlı tam dalga kontrollü doğrultucuya ait devre şeması Şekil 3.25’de verilmiştir. Üç fazlı tam dalga kontrolsüz doğrultucu devresindeki diyotların yerini burada tristörler almıştır.



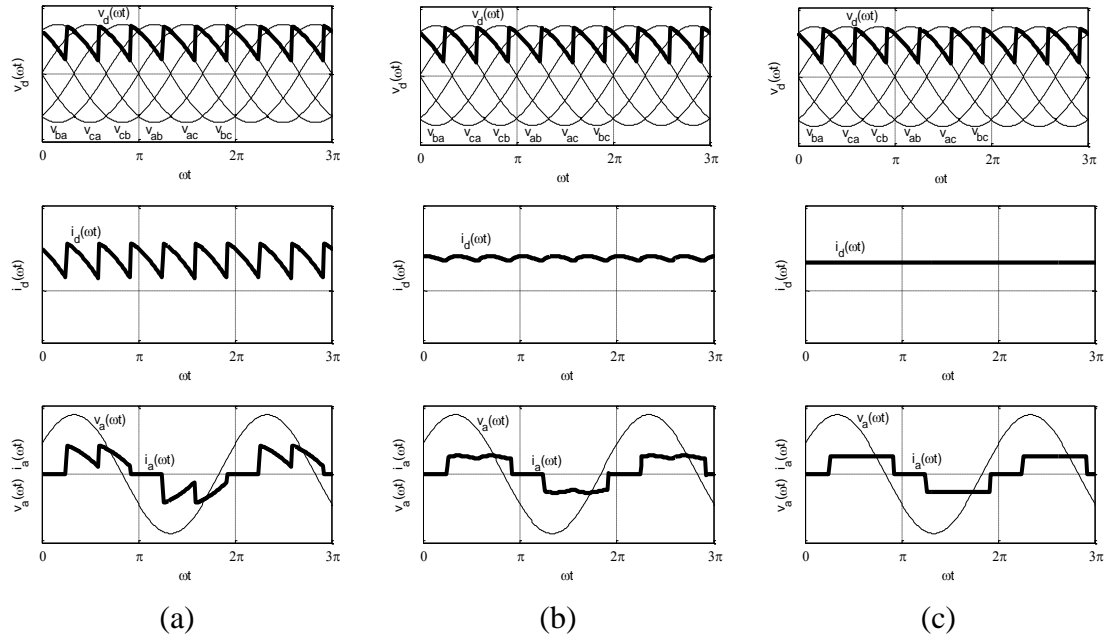
Şekil 3.26. Üç fazlı tam dalga kontrollü doğrultucu devresi

Tristörler yine eşit aralıklarla ve sırayla iletimde kalırlar. Pozitif ve negatif sıradan sadece birer eleman iletimde kalır ve aynı faza ait iki eleman birlikte iletimde kalmaz. Ayrıca, bir faza ait bir pozitif eleman iletim aralığını, diğer iki faza ait negatif elemanlarla eşit olarak paylaşır. Çıkış geriliminde, şebekenin bir periyodu boyunca yine 6 darbe oluşur. Ancak, elemanların akım aktarma anları, tetikleme sinyalleri ile

diyotlu devrelere göre  $\alpha$  kadar geciktirilebilir. Tetikleme gecikmesi denilen bu açı daima 0 ile  $\pi$  aralığında kontrol edilebilir.

Bu devrede, kontrol aralıkları fazlar arası gerilime bağlı olarak  $\pi$  ve bu aralıklar arasındaki faz farkı  $2\pi/3$ 'dür. O halde tristörlerin sırasıyla kontrol aralıkları, yüke bağlı olmaksızın Denklem (3.125)'de özetlenmiştir.

$$\left. \begin{array}{l} 0 < \alpha < 0 + \pi \quad T_1 \text{ için } v_{ac} > 0 \\ \pi/3 < \alpha < \pi/3 + \pi \quad T_2 \text{ için } v_{cb} < 0 \\ 2\pi/3 < \alpha < 2\pi/3 + \pi \quad T_3 \text{ için } v_{ba} > 0 \\ 3\pi/3 < \alpha < 3\pi/3 + \pi \quad T_4 \text{ için } v_{ac} < 0 \\ 4\pi/3 < \alpha < 4\pi/3 + \pi \quad T_5 \text{ için } v_{cb} > 0 \\ 5\pi/3 < \alpha < 5\pi/3 + \pi \quad T_6 \text{ için } v_{ba} < 0 \end{array} \right\} \quad (3.125)$$



Şekil 3.27. Üç fazlı tam dalga kontrollü doğrultucunun a) direnç, b) endüktif yük, c) akım kaynağı bağlı olması durumunda temel dalga şekilleri

\* $T_1, T_2$  ve  $T_3$  için tetikleme açıları 45 derece alınmıştır.

Şekil 3.27'de görüldüğü gibi  $\alpha=45^\circ$ 'de bütün yükler için, çıkış gerilimi  $v_d(t)$  aynıdır ve Fourier seri açılımı Denklem (3.126) ile (3.133) arasında verilen eşitlikler cinsinden Denklem (3.134)'de ifade edilmiştir.

$$a_{n1} = -\frac{1}{4\pi} \left[ -\frac{\cos(n+1)\alpha}{n+1} + \frac{\cos(1-n)\alpha}{1-n} + \frac{1}{1-n} + \frac{1}{1+n} \right] + \frac{\sqrt{3}}{4\pi} \left[ \frac{\sin(n+1)\alpha}{n+1} + \frac{\sin(1-n)\alpha}{1-n} \right] \quad (3.126)$$

$$a_{n_2} = \frac{1}{4\pi} \left[ \frac{-\frac{\cos(n+1)(\alpha + \pi/3)}{n+1} + \frac{\cos(n+1)\alpha}{n+1}}{-\frac{\cos(1-n)(\alpha + \pi/3)}{1-n} + \frac{\cos(1-n)\alpha}{1-n}} \right] + \frac{\sqrt{3}}{4\pi} \left[ \frac{\frac{\sin(n+1)(\alpha + \pi/3)}{n+1} - \frac{\sin(n+1)\alpha}{n+1}}{+\frac{\sin(1-n)(\alpha + \pi/3)}{1-n} - \frac{\sin(1-n)\alpha}{1-n}} \right] \quad (3.127)$$

$$a_{n_3} = -\frac{1}{2\pi} \left[ \frac{-\frac{\cos(n+1)(\alpha + 2\pi/3)}{n+1} - \frac{\cos(1-n)(\alpha + 2\pi/3)}{1-n}}{+\frac{\cos(n+1)(\alpha + \pi/3)}{n+1} + \frac{\cos(n-1)(\alpha + \pi/3)}{n-1}} \right] \quad (3.128)$$

$$a_{n_4} = \frac{1}{4\pi} \left[ \frac{-\frac{\cos(n+1)(\pi)}{n+1} + \frac{\cos(n+1)(\alpha + 2\pi/3)}{n+1}}{-\frac{\cos(1-n)(\pi)}{1-n} + \frac{\cos(1-n)(\alpha + 2\pi/3)}{1-n}} \right] \quad (3.129)$$

$$-\frac{\sqrt{3}}{4\pi} \left[ \frac{-\frac{\sin(1-n)(\alpha + 2\pi/3)}{1-n} - \frac{\sin(n+1)(\alpha + 2\pi/3)}{n+1}}{\quad} \right]$$

$$b_{n_1} = \frac{\sqrt{3}}{4\pi} \left[ -\frac{\cos(n+1)\alpha}{n+1} - \frac{\cos(n-1)\alpha}{n-1} + \frac{1}{n-1} + \frac{1}{1+n} \right] \quad (3.130)$$

$$+ \frac{1}{4\pi} \left[ \frac{\sin(n+1)\alpha}{n+1} - \frac{\sin(1-n)\alpha}{1-n} \right]$$

$$b_{n_2} = \frac{\sqrt{3}}{4\pi} \left[ \frac{-\frac{\cos(n+1)(\alpha + \pi/3)}{n+1} + \frac{\cos(n-1)\alpha}{n-1}}{-\frac{\cos(n-1)(\alpha + \pi/3)}{n-1} + \frac{\cos(n+1)\alpha}{n+1}} \right] \quad (3.131)$$

$$-\frac{1}{4\pi} \left[ \frac{\frac{\sin(n+1)(\alpha + \pi/3)}{n+1} - \frac{\sin(n+1)\alpha}{n+1}}{\frac{\sin(1-n)(\alpha + \pi/3)}{1-n} + \frac{\sin(1-n)\alpha}{1-n}} \right]$$

$$b_{n_3} = -\frac{1}{2\pi} \left[ \frac{\frac{\sin(n+1)(\alpha + 2\pi/3)}{n+1} - \frac{\sin(1-n)(\alpha + 2\pi/3)}{1-n}}{-\frac{\sin(n+1)(\alpha + \pi/3)}{n+1} + \frac{\sin(1-n)(\alpha + \pi/3)}{1-n}} \right] \quad (3.132)$$

$$b_{n_4} = -\frac{\sqrt{3}}{4\pi} \left[ \frac{-\frac{\cos(n+1)\pi}{n+1} + \frac{\cos(n-1)(\alpha + 2\pi/3)}{n-1}}{+\frac{\cos(n+1)(\alpha + 2\pi/3)}{n+1} - \frac{\cos(n-1)\pi}{n-1}} \right] \quad (3.133)$$

$$-\frac{1}{4\pi} \left[ \frac{\frac{\sin(1-n)(\alpha + 2\pi/3)}{1-n} - \frac{\sin(n+1)(\alpha + 2\pi/3)}{n+1}}{\quad} \right]$$



$$v_d(t) = V_m \left[ \frac{3\sqrt{3}}{\pi} \cos \alpha + \sum_{n=6,12,18,\dots}^{\infty} \left[ (a_{n1} + a_{n2} + a_{n3} + a_{n4}) \cos n\omega t + (b_{n1} + b_{n2} + b_{n3} + b_{n4}) \sin n\omega t \right] \right] \quad (3.134)$$

a) Yükün direnç olması durumu;

Bu durumda, çıkış akımı  $i_d(t)$  Denklem (3.135)'de ifade edilmiştir. Giriş akımı  $i_a(t)$  ise Denklem (3.136), (3.137)'de verilen eşitlikler cinsinden Denklem (3.138)'de ifade edilmiştir.

$$i_d(t) = \frac{V_d(t)}{R_y} \quad (3.135)$$

$$A_n = \left[ \begin{array}{l} \frac{1}{4\pi} \left[ \begin{array}{l} -\frac{\cos(n+1)(\alpha + \pi/3)}{n+1} + \frac{\cos(n+1)\alpha}{n+1} + 2\frac{\cos(1-n)(\alpha + 2\pi/3)}{1-n} \\ + \frac{\cos(1-n)(\alpha + \pi/3)}{1-n} + \frac{\cos(1-n)\alpha}{1-n} + 2\frac{\cos(n+1)(\alpha + 2\pi/3)}{n+1} \end{array} \right] \\ + \frac{\sqrt{3}}{4\pi} \left[ \begin{array}{l} \frac{\sin(n+1)(\alpha + \pi/3)}{n+1} - \frac{\sin(n+1)\alpha}{n+1} \\ + \frac{\sin(1-n)(\alpha + \pi/3)}{1-n} - \frac{\sin(1-n)\alpha}{1-n} \end{array} \right] \\ - \frac{1}{2\pi} \left[ \begin{array}{l} \frac{\sin(n+1)(\alpha + 2\pi/3)}{n+1} - \frac{\sin(1-n)(\alpha + 2\pi/3)}{1-n} \\ - \frac{\sin(n+1)(\alpha + \pi/3)}{n+1} + \frac{\sin(1-n)(\alpha + \pi/3)}{1-n} \end{array} \right] \end{array} \right] \quad (3.136)$$

$$B_n = \left[ \begin{array}{l} \frac{\sqrt{3}}{4\pi} \left[ \begin{array}{l} -\frac{\cos(n+1)(\alpha + \pi/3)}{n+1} + \frac{\cos(n-1)\alpha}{n-1} \\ -\frac{\cos(n-1)(\alpha + \pi/3)}{n-1} + \frac{\cos(n+1)\alpha}{n+1} \end{array} \right] \\ - \frac{1}{4\pi} \left[ \begin{array}{l} \frac{\sin(n+1)(\alpha + \pi/3)}{n+1} - \frac{\sin(n+1)\alpha}{n+1} \\ - \frac{\sin(1-n)(\alpha + \pi/3)}{1-n} + \frac{\sin(1-n)\alpha}{1-n} \\ + 2\frac{\sin(n+1)(\alpha + 2\pi/3)}{n+1} - 2\frac{\sin(1-n)(\alpha + 2\pi/3)}{1-n} \end{array} \right] \end{array} \right] \quad (3.137)$$

$$i_a(t) = \frac{V_m}{R_y} \left[ \begin{aligned} & \frac{\sqrt{3}}{4\pi} \left( \frac{3}{4} \sin 2\alpha - \frac{3\sqrt{3}}{4} \cos 2\alpha + \frac{\pi}{3} \right) \cos \omega t \\ & + \frac{1}{4\pi} \left( \frac{3\sqrt{3}}{8} \sin 2\alpha + \frac{3}{2} \cos 2\alpha \right) \sin \omega t \\ & + \sum_{n=5,7,11\dots}^{\infty} [A_n \cos n\omega t + B_n \sin n\omega t] \end{aligned} \right] \quad (3.138)$$

b) Yükün endüktif olması durumu;

Bu durumda, çıkış akımı  $i_d(t)$  ve giriş akımı  $i_a(t)$ 'nin Fourier seri açılımları sırasıyla Denklem (3.139) ve (3.140)'da verilmiştir.

$$i_d(t) = \left[ \begin{aligned} & \frac{3\sqrt{3} V_m \cos \alpha}{\pi R_y} \\ & + \sum_{n=6,12,18\dots}^{\infty} \frac{V_m}{\sqrt{R_y^2 + (n\omega L_y)^2}} \left[ \begin{aligned} & (a_{n1} + a_{n2} + a_{n3} + a_{n4}) \cos(n\omega t - \varphi_n) \\ & + (b_{n1} + b_{n2} + b_{n3} + b_{n4}) \sin(n\omega t - \varphi_n) \end{aligned} \right] \end{aligned} \right] \quad (3.139)$$

$$i_a(t) = \frac{3\sqrt{3} V_m \cos \alpha}{\pi^2 R_y} \sum_{n=1,3,5\dots}^{\infty} \frac{1}{n} \left[ \begin{aligned} & \left( \begin{aligned} & \sin n(\alpha + 2\pi/3) + \sin n(\alpha + 5\pi/3) \\ & + \sin n\alpha \cos n\pi - \sin n\alpha \end{aligned} \right) \cos n\omega t - \\ & \left( \begin{aligned} & \cos n(\alpha + 2\pi/3) + \cos n(\alpha + 5\pi/3) \\ & + \cos n\alpha \cos n\pi - \cos n\alpha \end{aligned} \right) \sin n\omega t \end{aligned} \right] \quad (3.140)$$

$$+ k \sum_{n=6,12,18\dots}^{\infty} \frac{V_m}{\sqrt{R_y^2 + (n\omega L_y)^2}} \left[ \begin{aligned} & (a_{n1} + a_{n2} + a_{n3} + a_{n4}) \cos(n\omega t - \varphi_n) \\ & + (b_{n1} + b_{n2} + b_{n3} + b_{n4}) \sin(n\omega t - \varphi_n) \end{aligned} \right]$$

c) Yükün akım kaynağı olması durumu;

Bu durumda, çıkış akımı  $i_d(t)$  ve giriş akımı  $i_a(t)$ 'nin Fourier seri açılımları sırasıyla Denklem (3.141) ve (3.142)'de verilmiştir.

$$i_d(t) = I_d \quad (3.141)$$

$$i_a(t) = \frac{I_d}{\pi} \sum_{n=1,3,5\dots}^{\infty} \frac{1}{n} \left[ \begin{aligned} & \left( \begin{aligned} & \sin n(\alpha + 2\pi/3) + \sin n(\alpha + 5\pi/3) \\ & + \sin n\alpha \cos n\pi - \sin n\alpha \end{aligned} \right) \cos n\omega t - \\ & \left( \begin{aligned} & \cos n(\alpha + 2\pi/3) + \cos n(\alpha + 5\pi/3) \\ & + \cos n\alpha \cos n\pi - \cos n\alpha \end{aligned} \right) \sin n\omega t \end{aligned} \right] \quad (3.142)$$

### 3.2. Doğrultucu Devrelerinin Genel Değerlendirilmesi

Doğrultucular, AA gerilimi DA gerilime dönüştüren, faz kontrol yöntemi ile kontrol edilen, doğal komitasyonlu ve en yaygın kullanılan güç dönüştürücüleridir. Kontrolsüz olan doğrultucular diyotlarla, kontrollü olan doğrultucular ise tristörler ile gerçekleştirilirler.

Yarım dalga doğrultucularda, sadece pozitif veya negatif sıra elemanları kullanılır ve nötre göre pozitif veya negatif bir gerilim üretilir. Tam dalga doğrultucularda ise, hem pozitif hem de negatif sıra elemanları kullanılır, nötrsüz olarak toplam bir gerilim elde edilir ve bu gerilim ortalama olarak yarım dalga geriliminin iki katıdır (Bodur, 2012).

Prensip olarak kontrolsüz doğrultucularda, pozitif sıra elemanlarından anot gerilimi daha büyük olanı iletimde kalır ve çıkış gerilimi bu elemanın ait olduğu faz gerilimine eşit olur. Negatif sıra elemanlarından katot gerilimi daha küçük olan iletimde kalır ve çıkış gerilimi bu elemanın ait olduğu faz gerilimine eşit olur. Tam dalgada, pozitif ve negatif sıradan birer eleman iletimde kalır, ancak aynı faza ait iki eleman birlikte iletimde kalmaz, çıkış gerilimi fazlar arası gerilime eşit olur. Kontrolsüz doğrultucularda çıkış gerilimi maksimum değerinde sabittir ve yüke bağlı değildir. Kontrollü doğrultucularda ise çıkış gerilimi,  $\alpha$  tetikleme açısı ile ayarlanabilir ve yüke bağlıdır. Omik yüklü kontrollü doğrultucularda çıkış gerilimi negatif bir alana sahip değildir ve sadece AA şebeke tarafından DA yük beslenir. Çıkış akımı sürekli kabul edilen kontrollü doğrultucularda ise, çıkış geriliminde negatif alanlar oluşabilir. Tek yönlü olabilen bu akım pozitif kabul edildiğine göre, enerji akışı gerilim pozitif iken AA şebekeden DA yüke doğru ve gerilim negatif iken DA yükten AA şebekeye doğrudur (Bodur, 2012).

Doğrultucularda AA şebekeden çekilen faz akımı, büyük ölçüde harmonik içermektedir. Kontrolsüz doğrultucularda faz farkı oluşmamasına rağmen, kontrollü doğrultucularda, kontrol açısına bağlı olarak bir faz farkı oluşur ve şebekeden reaktif güç çekilir.

Doğrultucular endüstriyel uygulamalarda, başka bir DA-AA dönüştürücü veya DA-DA dönüştürücünün girişi olabileceği gibi, doğrudan bir DA motorunun veya bir akümülatörün şarjında kullanılabilir. Bu tez çalışmasında doğrultucuların çıkışında

yük olarak omik ( $R_y$ ), endüktif ( $R_y-L_y$ ) ve akım kaynaklı ( $I_d$ ) durumları ele alınmıştır. Bu yüklere ilişkin ifadeler verilmiştir. Bunun dışında, akümülatör şarjı gibi sabit gerilimli yük durumları da olabilir.

#### **4. TÜM DOĞRULTUCU DEVRELERİ İÇİN İLERİ SÜRÜLEN HARMONİK EŞDEĞER DEVRE MODELİ**

Güç elektroniği cihazları için geliştirilmiş birçok harmonik model mevcuttur. Ancak doğru bir güç sistemi analizi için, harmonik kaynağının uygun şekilde modellenmesi önemlidir. Model seçiminde bir fikir birliği olmasa da, cihaz ve güç sistemi arasındaki etkileşimin dikkate alınması gerekmektedir.

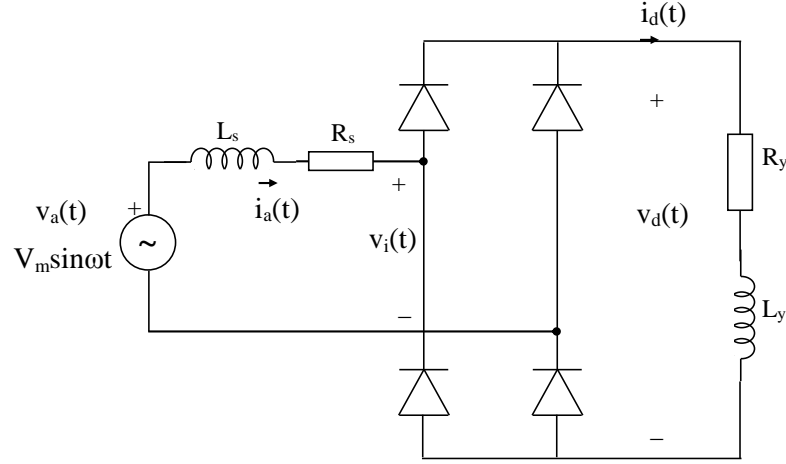
Dönüştürücülerin harmoniklere bağlı incelemelerinde, geleneksel olarak DA tarafındaki akım düzgün olarak varsayılmıştır, harmonik derecesi ve büyüklüğü basitçe hesaplanmıştır. Ancak gerçek ve doğru bir harmonik analizi için, dönüştürücü sisteminin hem AA hem de DA tarafındaki akımın düzgün olmayan yapısı göz önüne alınmalıdır.

Tez çalışmasında, gerçek ve doğru bir harmonik analizi için, dönüştürücü sisteminin hem AA hem de DA tarafındaki akımın düzgün olmayan yapısı göz önüne alınmıştır. Ayrıca AA/DA dönüştürücüsü bir anahtarlama devresi olmasına rağmen, ileri sürülen modellerde söz konusu devre harmonikler açısından doğrusal bir devreye dönüştürülmüştür.

İncelemeler ve modelin geliştirilmesi, bir fazlı tam dalga kontrolsüz doğrultucu devresi üzerinde gerçekleştirilmiştir. Daha sonra elde edilen sonuçlar, tüm doğrultucu devre türlerine uyarlanmıştır. Öncelikle referans alınan doğrultucu devresine ait geleneksel eşdeğer devre incelenecektir. Daha sonra ise, AA taraftaki akım harmoniklerinin ve DA taraftaki gerilim harmoniklerinin ifadesine dayalı olarak yeni harmonik eşdeğer devre modeli ileri sürülecektir.

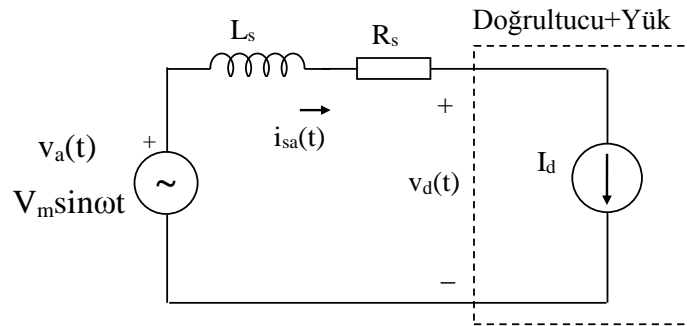
#### 4.1. Geleneksel Eşdeğer Devre Modeli

Yarıiletken anahtarlama elemanları kullanılan AA/DA dönüştürücüler, anahtarlama davranışlarından dolayı harmonik üretmektedirler. Geleneksel eşdeğer devre modeli Şekil 4.1’de verilen bir faz tam dalga kontrolsüz doğrultucu devresi ile açıklanacaktır.



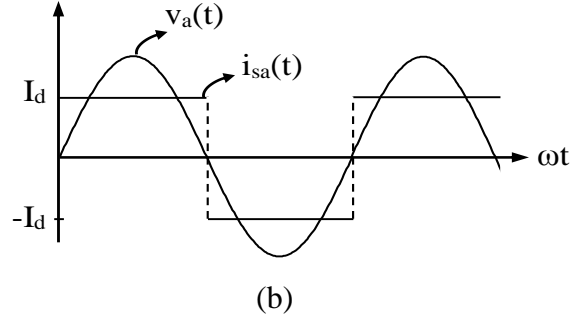
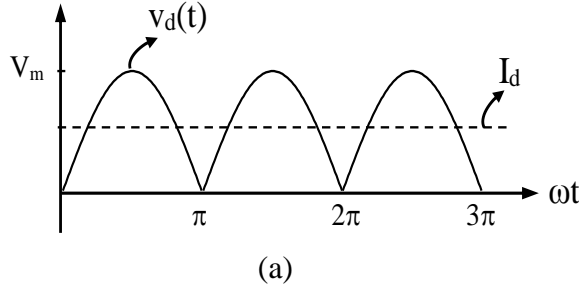
Şekil 4.1. Tam dalga kontrolsüz doğrultucu devresi

Tam dalga kontrolsüz doğrultucu devresinde,  $v_d(t)$  çıkış gerilimidir ve yükten bağımsızdır.  $i_a(t)$  kaynak akımı,  $i_d(t)$  yük akımının çift taraflı formudur. Şekil 4.2’de  $i_{sa}(t)$  olarak gösterilmiştir. Geleneksel eşdeğer devre modelinde, DA tarafta kullanılan düzeltme reaktöründen dolayı doğrultucu tarafından üretilen harmonik akımı sabit olarak kabul edilir. Sabit bir yük akımı durumunda, doğrultucu harmonikler açısından ideal bir akım kaynağı ( $I_d$ ) olarak Şekil 4.2’deki gibi modellenir.



Şekil 4.2. AA taraftaki  $i_a(t)$  için geleneksel devre modeli

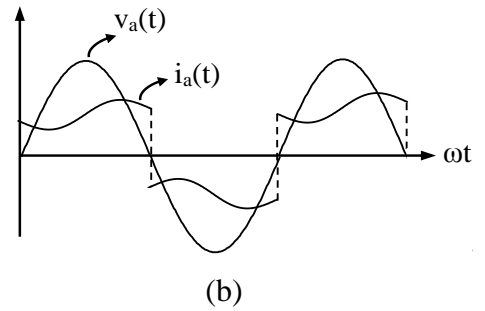
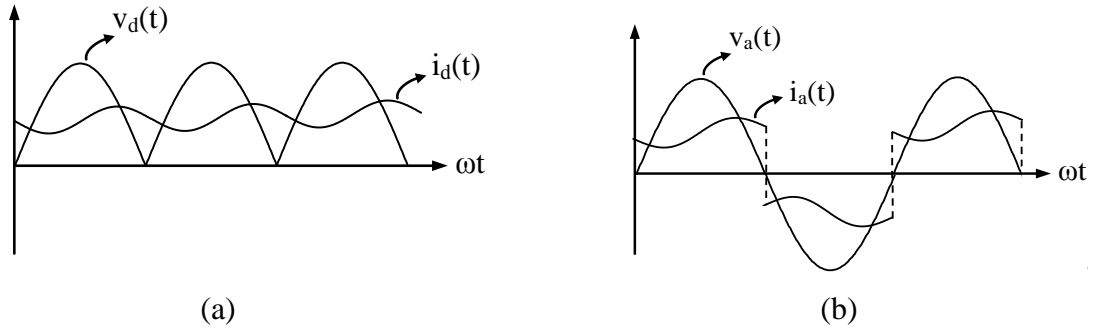
Şekil 4.2’e ait geleneksel durumdaki yük gerilimi/akımı ve kaynak gerilimi/akımı Şekil 4.3’de verilmiştir.



Şekil 4.3. Geleneksel duruma ilişkin dalga şekilleri a)Yük gerilimi ve akımı, b) kaynak gerilimi ve akımı

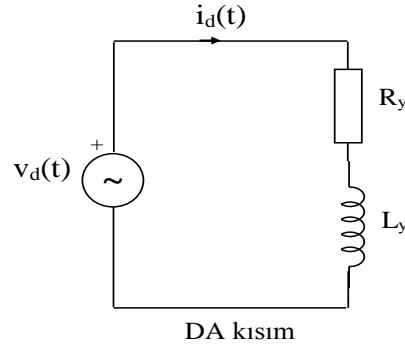
#### 4.2. İleri Sürülen Eşdeğer Devre Modeli

Doğrultucuya ait geleneksel modelde, kaynak ve yük akımı, sabit ve düzgün kabul edilmiştir. Oysa ki genel bir durumda, yük ve kaynak akımı Şekil 4.4’de gösterildiği gibi düzgün olmayabilir. Ayrıca doğrultucu devrelerinde, AA tarafta akım harmoniklerinin olmasının yanında, DA tarafta da gerilim harmonikleri mevcuttur. Tam ve genel bir analiz için, düzgün yapıya sahip olmayan her iki büyüklüğe ait harmoniklerin modellenmesi gereklidir. Bu amaçla, düzgün olmayan akım harmonikleri ve gerilim harmonikleri içeren yeni bir eşdeğer devre ileri sürülmüştür. İleri sürülen model, kaynak akımının ve yük geriliminin/akımının dalga şekline Fourier seri açılımının uygulanmasına dayanmaktadır.



Şekil 4.4. Düzgün olmayan yük durumuna ilişkin dalga şekilleri a) Yük gerilimi ve akımı, b) Kaynak gerilimi ve akımı

İlk olarak, Şekil 4.1'deki doğrultucu devresinin DA kısmındaki çıkış gerilim harmoniklerini ele alalım. Doğrultucu devrelerinde, istenilen dalga şeklini elde etmek için AA kaynak bir dizi anahtarlama işlevinden geçirilir. Buradaki AA kaynak ve anahtarlama elemanlarının birleşimi bir eşdeğer kaynak ile temsil edilebilir. Bu şekilde temsil edilmesi birçok avantaj sağlamaktadır. En önemli avantajı, yeni devre lineerdir ve bu sayede anahtarların karmaşık yapısından ve lineer olmayan yapıdan kaçınılmıştır. Devrenin analizinde Süperpozisyon yöntemi, Laplace dönüşümü veya diğer farklı lineer devre analizi teknikleri kullanılabilir. Süperpozisyon yöntemi temel alındığında, doğrultucu devresinin her bir harmonik mertebesi için gerilim ve akım Fourier serisi ile çözülür. Şekil 4.5'de yüke uygulanan eşdeğer kaynak  $v_d(t)$  görülmektedir.



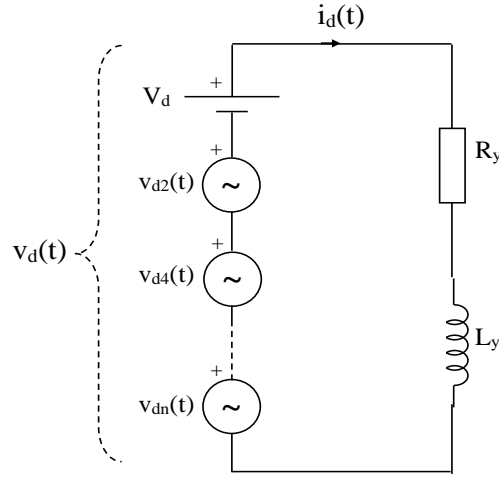
Şekil 4.5. Yüke uygulanan eşdeğer gerilim kaynağı  $v_d(t)$

Eşdeğer gerilim kaynağı  $v_d(t)$ , yüke uygulanan gerilimin temel bileşenini ve harmonik bileşenini içerir. Eşdeğer devreye ait dalga şekli, Şekil 4.3.a' da verilmiştir. Bu dalga şekline ait Fourier seri açılımı trigonometrik formda, daha önce Denklem (3.36)'da verildiği şekliyle aşağıdaki gibi tekrardan ifade edilebilir.

$$v_d(t) = \frac{2V_m}{\pi} - \frac{4V_m}{\pi} \sum_{n=2,4,6,\dots}^{\infty} \left[ \frac{1}{(n^2 - 1)} \cos(n\omega t) \right] \quad (4.1)$$

Fourier serisinin her bir bileşeni, bir gerilim kaynağına karşılık gelir ve bu kaynaklar Şekil 4.6'daki gibi  $V_d$ ,  $v_{d2}(t)$ ,  $v_{d4}(t)$ ,  $\dots$ ,  $v_{dn}(t)$  ile sembolize edilir. Burada  $V_d$  ortalama yük gerilimi,  $v_{d2}(t)$   $\omega_2$  frekansına ait AA kaynak,  $v_{d4}(t)$   $\omega_4$  frekansına ait AA kaynak,  $v_{dn}(t)$   $\omega_n$  frekansına ait AA kaynaktır.





Şekil 4.6. Fourier serisine ilişkin eşdeğer gerilim kaynakları

Şimdi ise, Şekil 4.1’de yer alan doğrultucu devresinin AA kısmındaki kaynak akımını düşünelim. Bu amaçla, ilk olarak DA taraftaki yük akımı tanımlanmalıdır. Çünkü kaynak akımı, yük akımının çift yönlü formuna sahiptir. Genel bir model elde etmek amacıyla, düzgün olmayan yük akımı,  $i_d(t)$ , Fourier serisi ile aşağıdaki gibi ifade edilebilir. Burada ki  $\varphi_n$ , Denklem (4.3)’de verilmiştir.

$$i_d(t) = \frac{2V_m}{\pi} \left\{ \frac{1}{R_y} - \sum_{n=2,4,6,\dots}^{\infty} \left( \frac{2}{n^2-1} \right) \left( \frac{1}{\sqrt{R_y^2 + (n\omega L_y)^2}} \right) \cos(n\omega t - \varphi_n) \right\} \quad (4.2)$$

$$\varphi_n = \tan^{-1} \frac{n\omega L_y}{R_y} \quad (4.3)$$

Denklem (4.2), endüktans değerinin yeterince büyük olması yani geleneksel modeldeki gibi yük akımının düzgün olması durumunda Denklem (4.4)’e eşittir.

$$i_d(t) = I_d = \frac{2V_m}{\pi R_y} \quad (4.4)$$

Denklem (4.2)’deki düzgün olmayan yük akımı  $i_d(t)$ , Denklem (4.5)’de ifade edildiği gibi ayrıştırılabilir. Burada  $I_d$ , DA bileşen (ortalama akım),  $i_{df}(t)$  yük akımının temel bileşeni ve  $i_{dh}(t)$  yük akımının harmonik bileşenleridir.

$$i_d(t) = I_d + i_{df}(t) + i_{dh}(t) \quad (4.5)$$

$$I_d = \frac{2V_m}{\pi R_y} \quad (4.6)$$

$$i_{df}(t) = 0 \quad (4.7)$$

$$i_{dh}(t) = \frac{2V_m}{\pi} \sum_{n=2,4,6,\dots}^{\infty} \left( \frac{2}{n^2-1} \right) \left( \frac{-1}{\sqrt{R_y^2 + (n\omega L)^2}} \right) \cos(n\omega t - \varphi_n) \quad (4.8)$$

AA taraftaki kaynak akımı  $i_a(t)$ , yük akımı  $i_d(t)$ 'ye bağlıdır. Dönüştürücünün DA tarafının akımı, tek yönlü doğrultulmuş bir akım olmasına rağmen, AA taraftaki akım Şekil 4.4' de gösterildiği gibi çift yönlüdür. Diğer bir deyişle, kaynak akımı yük akımının çift yönlü formuna sahiptir. Düzgün olmayan kaynak akımını ifade edebilmek için öncelikle, Şekil 4.3.b'deki düzgün yük akımına odaklanalım. Buradaki dikdörtgen dalga,  $i_{sa}(t)$ , Fourier serisi ile aşağıdaki şekilde ifade edilebilir.

$$i_{sa}(t) = \frac{4I_d}{\pi} \sum_{n=1,3,5,\dots}^{\infty} \frac{\sin(n\omega t)}{n} = \frac{8V_m}{\pi^2 R_y} \sum_{n=1,3,5,\dots}^{\infty} \frac{\sin(n\omega t)}{n} \quad (4.9)$$

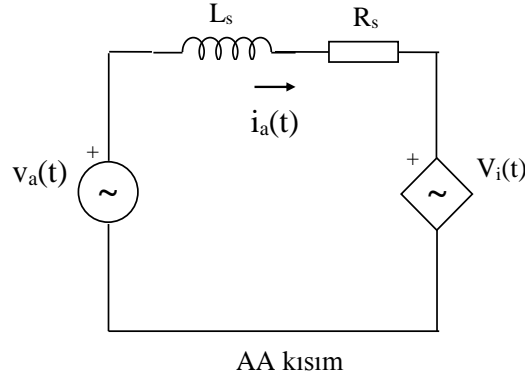
Düzgün olmayan kaynak akımının tam ifadesi, Denklem (4.11)'de verilmiştir. Burada,  $k=\pm 1$ ' dir. Yük akımı  $i_d(t)$ , kaynak akımı  $i_a(t)$ 'nin doğrultulmuş şekline sahiptir. Pozitif alternansta  $i_a(t)$ ,  $i_d(t)$  ile aynı olduğundan  $k=1$  alınır. Negatif alternansta ise  $i_a(t)$ ,  $i_d(t)$ 'nin tersi olduğundan  $k=-1$  alınır. Denklem (4.11)'den görüldüğü gibi düzgün olmayan kaynak akımı, hem tek hem de çift harmonikleri içermektedir.

$$i_a(t) = i_{sa}(t) + k i_{dh}(t) \quad (4.10)$$

$$i_a(t) = \frac{8V_m}{\pi^2 R_y} \sum_{n=1,3,5,\dots}^{\infty} \frac{\sin(n\omega t)}{n} + k \frac{2V_m}{\pi} \sum_{n=2,4,6,\dots}^{\infty} \left( \frac{2}{n^2-1} \right) \left( \frac{-1}{\sqrt{R_y^2 + (n\omega L)^2}} \right) \cos(n\omega t - \varphi_n) \quad (4.11)$$

Şimdi dönüştürücünün giriş gerilimi,  $v_i(t)$ 'i ele alalım.  $v_i(t)$  gerilimi kaynak akımına, dolayısı ile yük akımına bağlıdır. Şekil 4.7'de görüldüğü gibi akım kontrollü gerilim kaynağı olarak modellenmiş ve kontrol büyüklüğü kaynak akımı olarak alınmıştır.

Yük/kaynak akımı düzgün bir dalga şekline sahip olmadığından,  $v_i(t)$  gerilimi de düzgün bir dalga şekline sahip değildir.



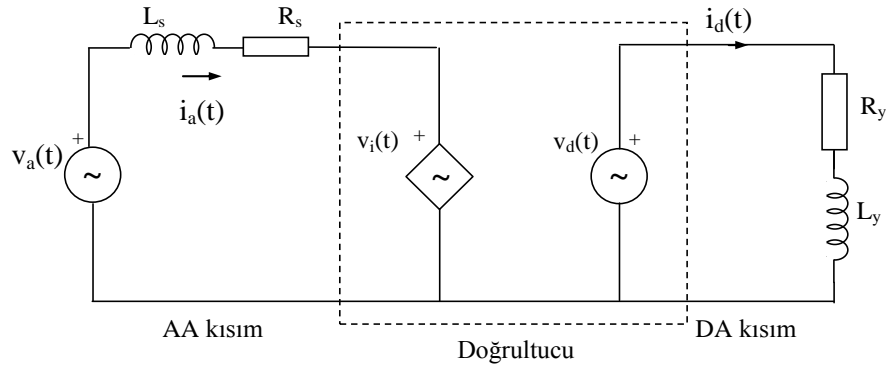
Şekil 4.7. AA kısma ait harmonik model

$$v_i(t) = v_a(t) - R_s i_a(t) - L_s \frac{di_a(t)}{dt} \quad (4.12)$$

$$v_i(t) = v_a(t) - k \left\{ \sum_{n=1,3,5,\dots}^{\infty} \left( R_s + \frac{L_s}{n\omega} \right) \frac{8\sqrt{2}V_m}{n\pi^2 R_y} \sin(n\omega t + \frac{\pi}{4}) + \frac{2\sqrt{2}V_m}{\pi} \sum_{n=2,4,6,\dots}^{\infty} \left( R_s + \frac{L_s}{n\omega} \right) \left( \frac{2}{n^2 - 1} \right) \left( \frac{1}{\sqrt{R_y^2 + (n\omega L_y)^2}} \right) \sin(n\omega t - \phi_n - \frac{\pi}{4}) \right\} \quad (4.13)$$

Pek çok uygulamada, kaynak iç direnci ve iç endüktansı olan  $R_s$  ve  $L_s$  ihmal edilmiştir. Bu nedenle  $v_i(t)$  gerilimi, doğrudan şebeke gerilimi  $v_a(t)$ 'ye eşit kabul edilmektedir. Tez çalışmasında, genel bir model elde etmek için  $R_s$  ve  $L_s$  dikkate alınmıştır.

Artık, düzgün olmayan yapıya sahip AA kısmı harmonik akımlarını ve DA kısmı harmonik akımlarını/gerilimlerini içeren, genel durumu gösteren modeli elde edebiliriz. Bu amaçla, Şekil 4.5 ve Şekil 4.7'nin birleştirilmesiyle Şekil 4.8'deki tam harmonik eşdeğer devre modeli elde edilmiştir.



Şekil 4.8. Doğrultucu devresine ait ileri sürülen tam harmonik eşdeğer devre modeli

Bu devre, hem AA hem de DA tarafı içerdiğinden, doğrultucu devresinin tam harmonik analizi için uygun bir modeldir. Üstelik bu yaklaşımla, harmonikler açısından anahtarlamalı devre lineer bir devreye dönüştürülmüştür. Böylece herhangi bir devre analizi yöntemiyle doğrultucu devre analiz edilebilir.

Harmonik incelemeler açısından, tam eşdeğer devre modeli temel bileşen devresi, harmonik bileşen devresi ve DA bileşen devresi olmak üzere üç ayrı alt devreye ayrılabilir. Buna ilişkin denklemler aşağıda verilmiştir.

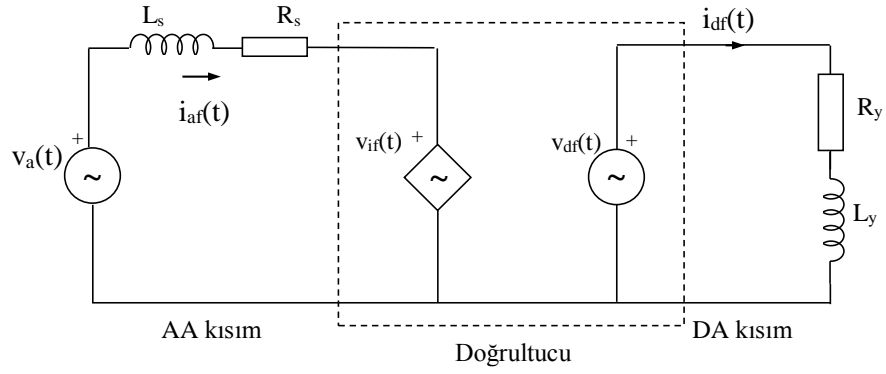
$$v_d(t) = V_d + v_{df}(t) + v_{dh}(t) \quad (4.14)$$

$$i_d(t) = I_d + i_{df}(t) + i_{dh}(t) \quad (4.15)$$

$$i_a(t) = I_a + i_{af}(t) + i_{ah}(t) \quad (4.16)$$

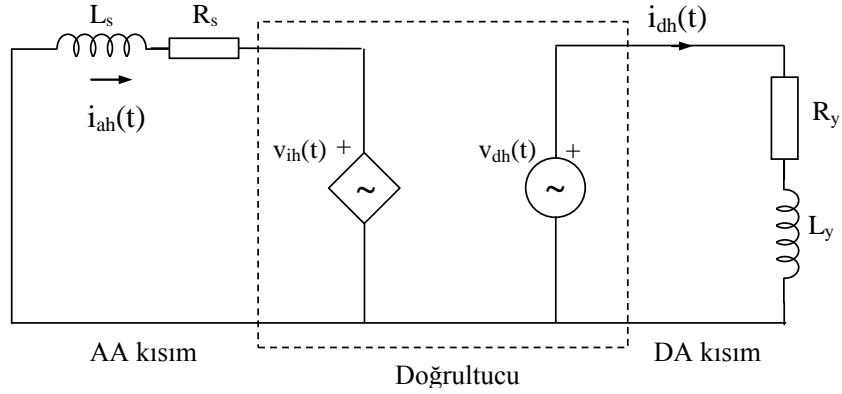
$$v_i(t) = V_i + v_{if}(t) + v_{ih}(t) \quad (4.17)$$

İlk olarak, doğrultucunun AA ve DA kısmına ait temel bileşen devresini elde edelim. Bu durumda, modeldeki bağımlı gerilim kaynağı  $v_i(t)$ 'nin ve gerilim kaynağı  $v_d(t)$ 'nin temel harmonik bileşenleri olan  $v_{if}(t)$  ve  $v_{df}(t)$  dikkate alınır. Kaynak gerilimi  $v_a(t)$  ise değişmeden aynı kalır. Denklem (4.1)'e göre,  $v_d(t)$  çift harmoniklerden oluştuğu için  $v_{df}(t)=0$ 'dır. Temel bileşen devre modeli Şekil 4.9'da verilmiştir.



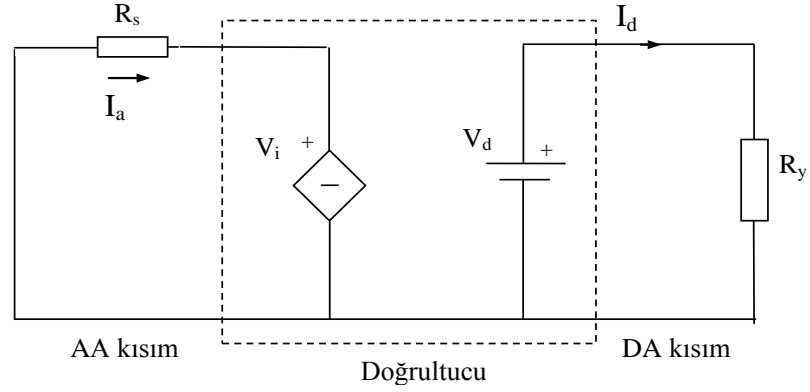
Şekil 4.9. Temel bileşen eşdeğer devre modeli

Harmonik bileşen eşdeğer devresini elde etmek için, Şekil 4.8'deki kaynak gerilimi  $v_a(t)=0$  ve harmonik gerilim kaynağının temel bileşeni  $v_{if}(t)=0$  alınır. Şekil 4.10'da harmonik bileşen eşdeğer devre modeli görülmektedir.  $v_{ih}(t)$  and  $v_{dh}(t)$ , harmoniklere bağlı kaynakları temsil etmektedir. Bu lineer devre ile doğrultucunun istenen harmonik bileşenleri elde edilebilir.



Şekil 4.10. Harmonik bileşen eşdeğer devre modeli

DA bileşen eşdeğer devre modeli Şekil 4.11'de verilmiştir. Kaynak gerilimi  $v_a(t)=0$ 'dır. Kaynak iç endüktansı  $L_s$  ve yük endüktansı  $L_y$  kısa devre davranışı gösterecektir. Bağımlı kaynağın DA bileşenleri dikkate alınır.



Şekil 4.11. DA bileşen eşdeğer devre modeli

### 4.3. Doğrultucu Devrelerinin Eşdeğer Devre Modelinin Elde Edilmesi

Şekil 4.8, 4.9, 4.10 ve 4.11’de ileri sürülen eşdeğer devre modelleri, bir fazlı tam dalga kontrolsüz doğrultucu devresi için elde edilmiştir. Ancak elde edilen sonuçlar, Bölüm 3’de incelenen tüm doğrultucu türlerine uyarlanabilir. İleri sürülen eşdeğer devre modelinde yer alan eleman değerleri, doğrultucunun türüne bağlı olarak, kaynak akımının ve yük geriliminin Fourier seri açılımına göre değişiklik göstermektedir. Modele ilişkin devre parametreleri, farklı doğrultucu tipleri için aşağıda verilmiştir. Genel ifadeler elde etmek amacıyla, eleman değerleri endüktif yük durumu için verilmiştir. Ancak  $L_y=0$  veya  $L_y=\infty$  alınarak, eşdeğer devre modeli sırasıyla, direnç yükü veya akım kaynağı yükü durumları için uygun bir modele dönüştürülebilir.

#### 4.3.1. Bir fazlı yarım dalga kontrolsüz doğrultucu için model parametreleri

Şekil 4.8’de verilen tam eşdeğer devre modelindeki devre parametreleri, bir fazlı yarım dalga kontrolsüz doğrultucu devresi için aşağıda verilmiştir. Bu değerler, Bölüm 3’deki ilgili Fourier seri açılımından alınmıştır.

$$v_d(t) = \frac{V_m}{2\pi} \left\{ \begin{aligned} & \left( (1 - \cos(\pi + \beta)) - \frac{1}{2}(\cos 2\beta - 1) \cos \omega t + \left( \pi + \beta - \frac{\sin 2\beta}{2} \right) \sin \omega t + \right. \\ & \sum_{n=2,3,4,\dots}^{\infty} \left( -\frac{\cos(n+1)(\pi + \beta)}{n+1} + \frac{\cos(n-1)(\pi + \beta)}{n-1} - \frac{2}{n^2 - 1} \right) \cos n\omega t + \\ & \left. \sum_{n=2,3,4,\dots}^{\infty} \left( -\frac{\sin(n+1)(\pi + \beta)}{n+1} + \frac{\sin(n-1)(\pi + \beta)}{n-1} \right) \sin n\omega t \right\} \quad (4.18) \end{aligned} \right.$$

$$i_d(t) = \frac{V_m}{2\pi} \left\{ \begin{aligned} & \left[ \frac{1 - \cos(\pi + \beta)}{R_y} - \frac{\cos 2\beta - 1}{2\sqrt{R_y^2 + (\omega L_y)^2}} \cos(\omega t - \varphi_1) + \right. \\ & \left. \left( \pi + \beta - \frac{\sin 2\beta}{2} \right) \frac{1}{\sqrt{R_y^2 + (\omega L_y)^2}} \sin(\omega t - \varphi_1) + \right. \\ & \sum_{n=2,3,4,\dots}^{\infty} \left( \frac{-\cos(n+1)(\pi + \beta)}{n+1} + \frac{\cos(n-1)(\pi + \beta)}{n-1} - \frac{2}{n^2 - 1} \right) \frac{\cos(n\omega t - \varphi_n)}{\sqrt{R_y^2 + (n\omega L_y)^2}} + \\ & \left. \sum_{n=2,3,4,\dots}^{\infty} \left( -\frac{\sin(n+1)(\pi + \beta)}{n+1} + \frac{\sin(n-1)(\pi + \beta)}{n-1} \right) \frac{\sin(n\omega t - \varphi_n)}{\sqrt{R_y^2 + (n\omega L_y)^2}} \right\} \quad (4.19) \end{aligned} \right.$$

$$i_a(t) = i_d(t) \quad (4.20)$$

$$v_i(t) = v_a(t) - R_s i_a(t) - L_s \frac{di_a(t)}{dt} \quad (4.21)$$

Şekil 4.9, Şekil 4.10 ve Şekil 4.11’de verilen temel bileşen devre modeli, harmonik bileşen devre modeli ve DA bileşen devre modeline ait devre parametreleri, Denklem (4.14), (4.15), (4.16) ve (4.17)’de verilen eşitlikler kullanılarak elde edilmiştir. Buna göre temel bileşen devre parametreleri;

$$v_{df}(t) = \frac{V_m}{2\pi} \left\{ -\frac{1}{2} (\cos 2\beta - 1) \cos \omega t + \left( \pi + \beta - \frac{\sin 2\beta}{2} \right) \sin \omega t \right\} \quad (4.22)$$

$$i_{df}(t) = \frac{V_m}{2\pi} \left\{ \begin{aligned} & \left[ -\frac{(\cos 2\beta - 1)}{2\sqrt{R_y^2 + (\omega L_y)^2}} \cos(\omega t - \varphi_1) + \right. \\ & \left. \left( \pi + \beta - \frac{\sin 2\beta}{2} \right) \frac{1}{\sqrt{R_y^2 + (\omega L_y)^2}} \sin(\omega t - \varphi_1) \right] \end{aligned} \right\} \quad (4.23)$$

$$i_{af}(t) = i_{df}(t) \quad (4.24)$$

$$v_{if}(t) = v_a(t) - R_s i_{af}(t) - L_s \frac{di_{af}(t)}{dt} \quad (4.25)$$

Harmonik bileşen devre parametreleri, Denklem (4.26), (4.27), (4.28) ve (4.29)’da verilmiştir.

$$v_{dh}(t) = \frac{V_m}{2\pi} \left\{ \begin{array}{l} \sum_{n=2,3,4,\dots}^{\infty} \left( -\frac{\sin(n+1)(\pi+\beta)}{n+1} + \frac{\sin(n-1)(\pi+\beta)}{n-1} \right) \sin n\omega t + \\ \sum_{n=2,3,4,\dots}^{\infty} \left( -\frac{\cos(n+1)(\pi+\beta)}{n+1} + \frac{\cos(n-1)(\pi+\beta)}{n-1} - \frac{2}{n^2-1} \right) \cos n\omega t \end{array} \right\} \quad (4.26)$$

$$i_{dh}(t) = \frac{V_m}{2\pi} \left\{ \begin{array}{l} \sum_{n=2,3,4,\dots}^{\infty} \left( -\frac{\sin(n+1)(\pi+\beta)}{n+1} + \frac{\sin(n-1)(\pi+\beta)}{n-1} \right) \frac{\sin(n\omega t - \varphi_n)}{\sqrt{R_y^2 + (n\omega L_y)^2}} + \\ \sum_{n=2,3,4,\dots}^{\infty} \left( -\frac{\cos(n+1)(\pi+\beta)}{n+1} + \frac{\cos(n-1)(\pi+\beta)}{n-1} - \frac{2}{n^2-1} \right) \frac{\cos(n\omega t - \varphi_n)}{\sqrt{R_y^2 + (n\omega L_y)^2}} \end{array} \right\} \quad (4.27)$$

$$i_{ah}(t) = i_{dh}(t) \quad (4.28)$$

$$v_{ih}(t) = -R_s i_{ah}(t) - L_s \frac{di_{ah}(t)}{dt} \quad (4.29)$$

DA bileşen devre parametreleri, Denklem (4.30), (4.31) ve (4.32)'de verilmiştir.

$$V_d = \frac{V_m}{2\pi} (1 - \cos(\pi + \beta)) \quad (4.30)$$

$$I_d = I_a = \frac{V_m}{2\pi R_y} (1 - \cos(\pi + \beta)) \quad (4.31)$$

$$V_i = -R_s I_a \quad (4.32)$$

### 4.3.2. İki fazlı yarım dalga kontrolsüz doğrultucu için model parametreleri

Şekil 4.8'de verilen tam eşdeğer devre modelindeki devre parametreleri, iki fazlı yarım dalga kontrolsüz doğrultucu devresi için aşağıda verilmiştir. Bu değerler, Bölüm 3'deki ilgili Fourier seri açılımından elde edilmiştir.

$$v_d(t) = \frac{2V_m}{\pi} - \frac{4V_m}{\pi} \sum_{n=2,4,6,\dots}^{\infty} \left[ \frac{1}{(n^2-1)} \cos(n\omega t) \right] \quad (4.33)$$



$$i_d(t) = \frac{2V_m}{\pi R_y} - \frac{4V_m}{\pi} \sum_{n=2,4,6,\dots}^{\infty} \left[ \frac{1}{(n^2 - 1)\sqrt{R_y^2 + (n\omega L_y)^2}} \cos(n\omega t - \phi_n) \right] \quad (4.34)$$

$$i_a(t) = \frac{V_m}{\pi R_y} + \frac{4V_m}{\pi^2 R_y} \sum_{n=1,3,5,\dots}^{\infty} \left[ \frac{\sin(n\omega t)}{n} \right] + k \frac{4V_m}{\pi} \sum_{n=2,4,6,\dots}^{\infty} \left[ \frac{-1}{(n^2 - 1)\sqrt{R_y^2 + (n\omega L_y)^2}} \cos(n\omega t - \phi_n) \right] \quad (4.35)$$

$$v_i(t) = v_a(t) - R_s i_a(t) - L_s \frac{di_a(t)}{dt} \quad (4.36)$$

Şekil 4.9, Şekil 4.10 ve Şekil 4.11’de verilen temel bileşen devre modeli, harmonik bileşen devre modeli ve DA bileşen devre modeline ait devre parametreleri, Denklem (4.14), (4.15), (4.16) ve (4.17)’de verilen eşitlikler kullanılarak elde edilmiştir. Temel bileşen devre parametreleri;

$$v_{df}(t) = 0 \quad (4.37)$$

$$i_{df}(t) = 0 \quad (4.38)$$

$$i_{af}(t) = \frac{4V_m}{\pi^2 R_y} \sin(\omega t) \quad (4.39)$$

$$v_{if}(t) = v_a(t) - R_s i_{af}(t) - L_s \frac{di_{af}(t)}{dt} \quad (4.40)$$

Harmonik bileşen devre parametreleri, Denklem (4.41), (4.42), (4.43) ve (4.44)’de verilmiştir.

$$v_{dh}(t) = -\frac{4V_m}{\pi} \sum_{n=2,4,6,\dots}^{\infty} \left[ \frac{1}{(n^2 - 1)} \cos(n\omega t) \right] \quad (4.41)$$

$$i_{dh}(t) = -\frac{4V_m}{\pi} \sum_{n=2,4,6,\dots}^{\infty} \left[ \frac{1}{(n^2 - 1)\sqrt{R_y^2 + (n\omega L_y)^2}} \cos(n\omega t - \phi_n) \right] \quad (4.42)$$

$$i_{ah}(t) = \sum_{n=3,5,7,\dots}^{\infty} \frac{4V_m}{\pi^2 R_y} \left[ \frac{\sin(n\omega t)}{n} \right] + k \frac{4V_m}{\pi} \sum_{n=2,4,6,\dots}^{\infty} \left[ \frac{-1}{(n^2-1)\sqrt{R_y^2 + (n\omega L_y)^2}} \cos(n\omega t - \varphi_n) \right] \quad (4.43)$$

$$v_{ih}(t) = -R_s i_{ah}(t) - L_s \frac{di_{ah}(t)}{dt} \quad (4.44)$$

DA bileşen devre parametreleri, Denklem (4.45), (4.46), (4.47) ve (4.48)'de verilmiştir.

$$V_d = \frac{2V_m}{\pi} \quad (4.45)$$

$$I_d = \frac{2V_m}{\pi R_y} \quad (4.46)$$

$$I_a = \frac{V_m}{\pi R_y} \quad (4.47)$$

$$V_i = -R_s I_a \quad (4.48)$$

### 4.3.3. Üç fazlı yarım dalga kontrolsüz doğrultucu için model parametreleri

Şekil 4.8'de verilen tam eşdeğer devre modelindeki devre parametreleri, üç fazlı yarım dalga kontrolsüz doğrultucu devresi için aşağıda verilmiştir. Bu değerler, Bölüm 3'deki ilgili Fourier seri açılımından elde edilmiştir.

$$v_d(t) = \frac{3\sqrt{3}V_m}{\pi} \left[ \frac{1}{2} + \sum_{n=3,6,9,\dots}^{\infty} \left( \frac{1}{(n^2-1)} \cos(n\omega t + \pi) \right) \right] \quad (4.49)$$

$$i_d(t) = \frac{3\sqrt{3}V_m}{\pi} \left[ \frac{1}{2R_y} + \sum_{n=3,6,9,\dots}^{\infty} \left( \frac{1}{(n^2-1)\sqrt{R_y^2 + (n\omega L_y)^2}} \cos(n\omega t + \pi - \varphi_n) \right) \right] \quad (4.50)$$

$$i_a(t) = \frac{3\sqrt{3}V_m}{\pi^2 R_y} \left[ \frac{\pi}{3} + \sum_{n=1,2,4,5,7,\dots}^{\infty} \sin\left(n \frac{2\pi}{3}\right) \frac{\cos n\omega t}{n} - \sum_{n=1,2,4,5,7,\dots}^{\infty} \left( \cos\left(n \frac{2\pi}{3}\right) - 1 \right) \frac{\sin n\omega t}{n} \right] \quad (4.51)$$

$$+ k \left[ \frac{3\sqrt{3}V_m}{\pi} \sum_{n=3,6,9,\dots}^{\infty} \left( \frac{1}{(n^2 - 1) \sqrt{R_y^2 + (n\omega L_y)^2}} \cos(n\omega t + \pi - \varphi_n) \right) \right]$$

$$v_i(t) = v_a(t) - R_s i_a(t) - L_s \frac{di_a(t)}{dt} \quad (4.52)$$

Şekil 4.9, Şekil 4.10 ve Şekil 4.11’de verilen temel bileşen devre modeli, harmonik bileşen devre modeli ve DA bileşen devre modeline ait devre parametreleri, Denklem (4.14), (4.15), (4.16) ve (4.17)’de verilen eşitlikler kullanılarak elde edilmiştir. Temel bileşen devre parametreleri;

$$v_{df}(t) = 0 \quad (4.53)$$

$$i_{df}(t) = 0 \quad (4.54)$$

$$i_{af}(t) = \frac{3\sqrt{3}V_m}{\pi^2 R_y} \left( \frac{\sqrt{3}}{2} \cos \omega t - \frac{3}{2} \sin \omega t \right) \quad (4.55)$$

$$v_{if}(t) = v_a(t) - R_s i_{af}(t) - L_s \frac{di_{af}(t)}{dt} \quad (4.56)$$

Harmonik bileşen devre parametreleri, Denklem (4.57), (4.58), (4.59) ve (4.60)’da verilmiştir.

$$v_{dh}(t) = \frac{3\sqrt{3}V_m}{\pi} \sum_{n=3,6,9,\dots}^{\infty} \left( \frac{1}{(n^2 - 1)} \cos(n\omega t + \pi) \right) \quad (4.57)$$

$$i_{dh}(t) = \frac{3\sqrt{3}V_m}{\pi} \sum_{n=3,6,9,\dots}^{\infty} \left( \frac{1}{(n^2 - 1) \sqrt{R_y^2 + (n\omega L_y)^2}} \cos(n\omega t + \pi - \varphi_n) \right) \quad (4.58)$$

$$i_{ah}(t) = \frac{3\sqrt{3}V_m}{\pi^2 R_y} \left[ \sum_{n=2,4,5,7\dots}^{\infty} \sin\left(n \frac{2\pi}{3}\right) \frac{\cos n\omega t}{n} - \sum_{n=2,4,5,7\dots}^{\infty} \left( \cos\left(n \frac{2\pi}{3}\right) - 1 \right) \frac{\sin n\omega t}{n} \right] + k \left[ \frac{3\sqrt{3}V_m}{\pi} \sum_{n=3,6,9\dots}^{\infty} \left( \frac{1}{(n^2-1)\sqrt{R_y^2 + (n\omega L_y)^2}} \cos(n\omega t + \pi - \phi_n) \right) \right] \quad (4.59)$$

$$v_{ih}(t) = -R_s i_{ah}(t) - L_s \frac{di_{ah}(t)}{dt} \quad (4.60)$$

DA bileşen devre parametreleri, Denklem (4.61), (4.62), (4.63) ve (4.64)'de verilmiştir.

$$V_d = \frac{3\sqrt{3}V_m}{2\pi} \quad (4.61)$$

$$I_d = \frac{3\sqrt{3}V_m}{2\pi R_y} \quad (4.62)$$

$$I_a = \frac{\sqrt{3}V_m}{\pi R_y} \quad (4.63)$$

$$V_i = -R_s I_a \quad (4.64)$$

#### 4.3.4. Bir fazlı tam dalga kontrolsüz doğrultucu için model parametreleri

Şekil 4.8'de verilen tam eşdeğer devre modelindeki devre parametreleri, bir fazlı tam dalga kontrolsüz doğrultucu devresi için aşağıda verilmiştir. Bu değerler, Bölüm 3'deki ilgili Fourier serisi açılımından elde edilmiştir.

$$v_d(t) = \frac{2V_m}{\pi} - \frac{4V_m}{\pi} \sum_{n=2,4,6\dots}^{\infty} \left[ \frac{1}{(n^2-1)} \cos(n\omega t) \right] \quad (4.65)$$

$$i_d(t) = \frac{2V_m}{\pi} \left\{ \frac{1}{R_y} - \sum_{n=2,4,6\dots}^{\infty} \left( \frac{2}{n^2-1} \right) \left( \frac{1}{\sqrt{R_y^2 + (n\omega L_y)^2}} \right) \cos(n\omega t - \phi_n) \right\} \quad (4.66)$$

$$\begin{aligned}
i_a(t) &= \frac{8V_m}{\pi^2 R_y} \sum_{n=1,3,5,\dots}^{\infty} \frac{\sin(n\omega t)}{n} \\
&+ k \frac{2V_m}{\pi} \sum_{n=2,4,6,\dots}^{\infty} \left( \frac{-2}{n^2 - 1} \right) \left( \frac{1}{\sqrt{R_y^2 + (n\omega L_y)^2}} \right) \cos(n\omega t - \varphi_n)
\end{aligned} \tag{4.67}$$

$$v_i(t) = v_a(t) - R_s i_a(t) - L_s \frac{di_a(t)}{dt} \tag{4.68}$$

Şekil 4.9, Şekil 4.10 ve Şekil 4.11’de verilen temel bileşen devre modeli, harmonik bileşen devre modeli ve DA bileşen devre modeline ait devre parametreleri, Denklem (4.14), (4.15), (4.16) ve (4.17)’de verilen eşitlikler kullanılarak elde edilmiştir. Temel bileşen devre parametreleri;

$$v_{df}(t) = 0 \tag{4.69}$$

$$i_{df}(t) = 0 \tag{4.70}$$

$$i_{af}(t) = \frac{8V_m}{\pi^2 R_y} \sin(n\omega t) \tag{4.71}$$

$$v_{if}(t) = v_a(t) - R_s i_{af}(t) - L_s \frac{di_{af}(t)}{dt} \tag{4.72}$$

Harmonik bileşen devre parametreleri, Denklem (4.73), (4.74), (4.75) ve (4.76)’da verilmiştir.

$$v_{dh}(t) = -\frac{4V_m}{\pi} \sum_{n=2,4,6,\dots}^{\infty} \left[ \frac{1}{(n^2 - 1)} \cos(n\omega t) \right] \tag{4.73}$$

$$i_{dh}(t) = -\frac{2V_m}{\pi} \sum_{n=2,4,6,\dots}^{\infty} \left( \frac{2}{n^2 - 1} \right) \left( \frac{1}{\sqrt{R_y^2 + (n\omega L_y)^2}} \right) \cos(n\omega t - \varphi_n) \tag{4.74}$$

$$i_{ah}(t) = \frac{8V_m}{\pi^2 R_y} \sum_{n=3,5,7,\dots}^{\infty} \frac{\sin(n\omega t)}{n} + k \frac{2V_m}{\pi} \sum_{n=2,4,6,\dots}^{\infty} \left( \frac{-2}{n^2 - 1} \right) \left( \frac{1}{\sqrt{R_y^2 + (n\omega L_y)^2}} \right) \cos(n\omega t - \varphi_n) \quad (4.75)$$

$$v_{ih}(t) = -R_s i_{ah}(t) - L_s \frac{di_{ah}(t)}{dt} \quad (4.76)$$

DA bileşen devre parametreleri, Denklem (4.77), (4.78), (4.79) ve (4.80)'de verilmiştir.

$$V_d = \frac{2V_m}{\pi} \quad (4.77)$$

$$I_d = \frac{2V_m}{\pi R_y} \quad (4.78)$$

$$I_a = 0 \quad (4.79)$$

$$V_i = 0 \quad (4.80)$$

#### 4.3.5. İki fazlı tam dalga kontrolsüz doğrultucu için model parametreleri

Şekil 4.8'de verilen tam eşdeğer devre modelindeki devre parametreleri, iki fazlı tam dalga kontrolsüz doğrultucu devresi için aşağıda verilmiştir. Bu değerler, Bölüm 3'deki ilgili Fourier serisi açılımından elde edilmiştir.

$$v_d(t) = \frac{4V_m}{\pi} - \frac{8V_m}{\pi} \sum_{n=2,4,6,\dots}^{\infty} \left[ \frac{1}{(n^2 - 1)} \cos(n\omega t) \right] \quad (4.81)$$

$$i_d(t) = \frac{4V_m}{\pi} \left\{ \frac{1}{R_y} - \sum_{n=2,4,6,\dots}^{\infty} \left( \frac{2}{n^2 - 1} \right) \left( \frac{1}{\sqrt{R_y^2 + (n\omega L_y)^2}} \right) \cos(n\omega t - \varphi_n) \right\} \quad (4.82)$$

$$i_a(t) = \frac{16V_m}{\pi^2 R_y} \sum_{n=1,3,5,\dots}^{\infty} \frac{\sin(n\omega t)}{n} + k \frac{4V_m}{\pi} \sum_{n=2,4,6,\dots}^{\infty} \left( \frac{2}{n^2-1} \right) \left( \frac{-1}{\sqrt{R_y^2 + (n\omega L_y)^2}} \right) \cos(n\omega t - \varphi_n) \quad (4.83)$$

$$v_i(t) = v_a(t) - R_s i_a(t) - L_s \frac{di_a(t)}{dt} \quad (4.84)$$

Şekil 4.9, Şekil 4.10 ve Şekil 4.11’de verilen temel bileşen devre modeli, harmonik bileşen devre modeli ve DA bileşen devre modeline ait devre parametreleri, Denklem (4.14), (4.15), (4.16) ve (4.17)’de verilen eşitlikler kullanılarak elde edilmiştir. Temel bileşen devre parametreleri;

$$v_{df}(t) = 0 \quad (4.85)$$

$$i_{df}(t) = 0 \quad (4.86)$$

$$i_{af}(t) = \frac{16V_m}{\pi^2 R_y} \sin(n\omega t) \quad (4.87)$$

$$v_{if}(t) = v_a(t) - R_s i_{af}(t) - L_s \frac{di_{af}(t)}{dt} \quad (4.88)$$

Harmonik bileşen devre parametreleri, Denklem (4.89), (4.90), (4.91) ve (4.92)’de verilmiştir.

$$v_{dh}(t) = -\frac{8V_m}{\pi} \sum_{n=2,4,6,\dots}^{\infty} \left[ \frac{1}{(n^2-1)} \cos(n\omega t) \right] \quad (4.89)$$

$$i_{dh}(t) = \frac{4V_m}{\pi} \sum_{n=2,4,6,\dots}^{\infty} \left( \frac{2}{n^2-1} \right) \left( \frac{-1}{\sqrt{R_y^2 + (n\omega L_y)^2}} \right) \cos(n\omega t - \varphi_n) \quad (4.90)$$

$$i_{ah}(t) = \frac{16V_m}{\pi^2 R_y} \sum_{n=3,5,7,\dots}^{\infty} \frac{\sin(n\omega t)}{n} - k \frac{4V_m}{\pi} \sum_{n=2,4,6,\dots}^{\infty} \left( \frac{2}{n^2-1} \right) \left( \frac{1}{\sqrt{R_y^2 + (n\omega L_y)^2}} \right) \cos(n\omega t - \varphi_n) \quad (4.91)$$

$$v_{ih}(t) = -R_s i_{ah}(t) - L_s \frac{di_{ah}(t)}{dt} \quad (4.92)$$

DA bileşen devre parametreleri, Denklem (4.93), (4.94), (4.95) ve (4.96)'da verilmiştir.

$$V_d = \frac{4V_m}{\pi} \quad (4.93)$$

$$I_d = \frac{4V_m}{\pi R_y} \quad (4.94)$$

$$I_a = 0 \quad (4.95)$$

$$V_i = 0 \quad (4.96)$$

#### 4.3.6. Üç fazlı tam dalga kontrolsüz doğrultucu için model parametreleri

Şekil 4.8'de verilen tam eşdeğer devre modelindeki devre parametreleri, üç fazlı tam dalga kontrolsüz doğrultucu devresi için aşağıda verilmiştir. Bu değerler, Bölüm 3'deki ilgili Fourier seri açılımından elde edilmiştir.

$$v_d(t) = \frac{3\sqrt{3}V_m}{\pi} \left[ 1 + \sum_{n=6,12,18,\dots}^{\infty} \left( \frac{2}{(n^2-1)} \cos(n\omega t + \pi) \right) \right] \quad (4.97)$$

$$i_d(t) = \frac{3\sqrt{3}V_m}{\pi} \left[ \frac{1}{R_y} + \sum_{n=6,12,18,\dots}^{\infty} \left( \frac{2}{(n^2-1)\sqrt{R_y^2 + (n\omega L_y)^2}} \cos(n\omega t + \pi - \varphi_n) \right) \right] \quad (4.98)$$



$$i_a(t) = \frac{3\sqrt{3}V_m}{\pi^2 R_y} \sum_{n=1,5,7,11\dots}^{\infty} \left[ \left( \sin\left(n \frac{2\pi}{3}\right) - \sin\left(n \frac{5\pi}{3}\right) \right) \frac{\cos n\omega t}{n} \right. \\ \left. - \left( \cos\left(n \frac{2\pi}{3}\right) - \cos\left(n \frac{5\pi}{3}\right) - 1 + \cos n\pi \right) \frac{\sin n\omega t}{n} \right] \\ + k \frac{3\sqrt{3}V_m}{\pi} \left[ \sum_{n=6,12,18\dots}^{\infty} \left( \frac{2}{(n^2-1)\sqrt{R_y^2 + (n\omega L_y)^2}} \cos(n\omega t + \pi - \phi_n) \right) \right] \quad (4.99)$$

$$v_i(t) = v_a(t) - R_s i_a(t) - L_s \frac{di_a(t)}{dt} \quad (4.100)$$

Şekil 4.9, Şekil 4.10 ve Şekil 4.11’de verilen temel bileşen devre modeli, harmonik bileşen devre modeli ve DA bileşen devre modeline ait devre parametreleri, Denklem (4.14), (4.15), (4.16) ve (4.17)’de verilen eşitlikler kullanılarak elde edilmiştir. Temel bileşen devre parametreleri;

$$v_{df}(t) = 0 \quad (4.101)$$

$$i_{df}(t) = 0 \quad (4.102)$$

$$i_{af}(t) = \frac{3\sqrt{3}V_m}{\pi^2 R_y} (\sqrt{3} \cos \omega t + 3 \sin \omega t) \quad (4.103)$$

$$v_{if}(t) = v_a(t) - R_s i_{af}(t) - L_s \frac{di_{af}(t)}{dt} \quad (4.104)$$

Harmonik bileşen devre parametreleri, Denklem (4.105), (4.106), (4.107) ve (4.108)’de verilmiştir.

$$v_{dh}(t) = \frac{3\sqrt{3}V_m}{\pi} \sum_{n=6,12,18\dots}^{\infty} \left( \frac{2}{(n^2-1)} \cos(n\omega t + \pi) \right) \quad (4.105)$$

$$i_{dh}(t) = \frac{3\sqrt{3}V_m}{\pi} \sum_{n=6,12,18\dots}^{\infty} \left( \frac{2}{(n^2-1)\sqrt{R_y^2 + (n\omega L_y)^2}} \cos(n\omega t + \pi - \phi_n) \right) \quad (4.106)$$

$$i_{ah}(t) = \frac{3\sqrt{3}V_m}{\pi^2 R_y} \sum_{n=5,7,11,\dots}^{\infty} \left[ \begin{aligned} & \left( \sin\left(n\frac{2\pi}{3}\right) - \sin\left(n\frac{5\pi}{3}\right) \right) \frac{\cos n\omega t}{n} \\ & - \left( \cos\left(n\frac{2\pi}{3}\right) - \cos\left(n\frac{5\pi}{3}\right) - 1 + \cos n\pi \right) \frac{\sin n\omega t}{n} \end{aligned} \right] \quad (4.107)$$

$$+ k \frac{3\sqrt{3}V_m}{\pi} \left[ \sum_{n=6,12,18,\dots}^{\infty} \left( \frac{2}{(n^2-1)\sqrt{R_y^2 + (n\omega L_y)^2}} \cos(n\omega t + \pi - \varphi_n) \right) \right]$$

$$v_{ih}(t) = -R_s i_{ah}(t) - L_s \frac{di_{ah}(t)}{dt} \quad (4.108)$$

DA bileşen devre parametreleri, Denklem (4.109), (4.110), (4.111) ve (4.112)'de verilmiştir.

$$V_d = \frac{3\sqrt{3}V_m}{\pi} \quad (4.109)$$

$$I_d = \frac{3\sqrt{3}V_m}{\pi R_y} \quad (4.110)$$

$$I_a = 0 \quad (4.111)$$

$$V_i = 0 \quad (4.112)$$

#### 4.3.7. Bir fazlı yarım dalga kontrollü doğrultucu için model parametreleri

Şekil 4.8'de verilen tam eşdeğer devre modelindeki devre parametreleri, bir fazlı yarım dalga kontrollü doğrultucu devresi için aşağıda verilmiştir. Bu değerler, Bölüm 3'deki ilgili Fourier serisi açılımından elde edilmiştir.

$$v_d(t) = \frac{V_m}{2\pi} \left[ \begin{aligned} & (\cos \alpha - \cos(\pi + \beta)) + \frac{1}{2}(\cos 2\alpha - \cos 2\beta) \cos \omega t \\ & + (\beta - \alpha + \frac{1}{2}(\sin 2\alpha - \sin 2\beta)) \sin \omega t \\ & + \sum_{n=2,3,4}^{\infty} \left[ \begin{aligned} & \frac{-\cos(n+1)(\pi + \beta) - \cos(1-n)(\pi + \beta)}{n+1} + \frac{\cos(1-n)(\pi + \beta)}{1-n} \\ & + \frac{\cos(n+1)\alpha}{n+1} + \frac{\cos(1-n)\alpha}{1-n} \end{aligned} \right] \cos n\omega t \\ & + \sum_{n=2,3,4}^{\infty} \left[ \begin{aligned} & \frac{-\sin(n+1)(\pi + \beta) + \sin(1-n)(\pi + \beta)}{n+1} + \frac{\sin(1-n)(\pi + \beta)}{1-n} \\ & + \frac{\sin(n+1)\alpha}{n+1} - \frac{\sin(1-n)\alpha}{1-n} \end{aligned} \right] \sin n\omega t \end{aligned} \right] \quad (4.113)$$

$$i_d(t) = \frac{V_m}{2\pi} \left[ \begin{aligned} & \frac{(\cos \alpha - \cos(\pi + \beta))}{R_y} + \frac{(\cos 2\alpha - \cos 2\beta)}{2\sqrt{R_y^2 + (\omega L_y)^2}} \cos(\omega t - \phi_1) \\ & + \frac{(\pi + \beta - \alpha + \frac{1}{2}(\sin 2\alpha - \sin 2\beta))}{\sqrt{R_y^2 + (\omega L_y)^2}} \sin(\omega t - \phi_1) \\ & + \sum_{n=2,3,4}^{\infty} \left[ \begin{aligned} & \frac{-\cos(n+1)(\pi + \beta) - \cos(1-n)(\pi + \beta)}{n+1} + \frac{\cos(1-n)(\pi + \beta)}{1-n} \\ & + \frac{\cos(n+1)\alpha}{n+1} + \frac{\cos(1-n)\alpha}{1-n} \end{aligned} \right] \frac{\cos(n\omega t - \phi_n)}{\sqrt{R_y^2 + (n\omega L_y)^2}} \\ & + \sum_{n=2,3,4}^{\infty} \left[ \begin{aligned} & \frac{-\sin(n+1)(\pi + \beta) + \sin(1-n)(\pi + \beta)}{n+1} + \frac{\sin(1-n)(\pi + \beta)}{1-n} \\ & + \frac{\sin(n+1)\alpha}{n+1} - \frac{\sin(1-n)\alpha}{1-n} \end{aligned} \right] \frac{\sin(n\omega t - \phi_n)}{\sqrt{R_y^2 + (n\omega L_y)^2}} \end{aligned} \right] \quad (4.114)$$

$$i_a(t) = i_d(t) \quad (4.115)$$

$$v_i(t) = v_a(t) - R_s i_a(t) - L_s \frac{di_a(t)}{dt} \quad (4.116)$$

Şekil 4.9, Şekil 4.10 ve Şekil 4.11’de verilen temel bileşen devre modeli, harmonik bileşen devre modeli ve DA bileşen devre modeline ait devre parametreleri, Denklem (4.14), (4.15), (4.16) ve (4.17)’de verilen eşitlikler kullanılarak elde edilmiştir. Temel bileşen devre parametreleri;

$$v_{df}(t) = \frac{V_m}{2\pi} \left[ \frac{1}{2}(\cos 2\alpha - \cos 2\beta) \cos \omega t + (\pi + \beta - \alpha + \frac{1}{2}(\sin 2\alpha - \sin 2\beta)) \sin \omega t \right] \quad (4.117)$$

$$i_{df}(t) = \frac{V_m}{2\pi} \left[ \begin{array}{l} \frac{(\cos 2\alpha - \cos 2\beta)}{2\sqrt{R_y^2 + (\omega L_y)^2}} \cos(\omega t - \varphi_1) + \\ \frac{(\pi + \beta - \alpha + \frac{1}{2}(\sin 2\alpha - \sin 2\beta))}{\sqrt{R_y^2 + (\omega L_y)^2}} \sin(\omega t - \varphi_1) \end{array} \right] \quad (4.118)$$

$$i_{af}(t) = i_{df}(t) \quad (4.119)$$

$$v_{if}(t) = v_a(t) - R_s i_{af}(t) - L_s \frac{di_{af}(t)}{dt} \quad (4.120)$$

Harmonik bileşen devre parametreleri, Denklem (4.121), (4.122), (4.123) ve (4.124)'de verilmiştir.

$$v_{dh}(t) = \frac{V_m}{2\pi} \left[ \begin{array}{l} + \sum_{n=2,3,4}^{\infty} \left[ \begin{array}{l} \frac{\cos(n+1)(\pi + \beta)}{n+1} - \frac{\cos(1-n)(\pi + \beta)}{1-n} \\ + \frac{\cos(n+1)\alpha}{n+1} + \frac{\cos(1-n)\alpha}{1-n} \end{array} \right] \cos n\omega t \\ + \sum_{n=2,3,4}^{\infty} \left[ \begin{array}{l} \frac{\sin(n+1)(\pi + \beta)}{n+1} + \frac{\sin(1-n)(\pi + \beta)}{1-n} \\ + \frac{\sin(n+1)\alpha}{n+1} - \frac{\sin(1-n)\alpha}{1-n} \end{array} \right] \sin n\omega t \end{array} \right] \quad (4.121)$$

$$i_{dh}(t) = \frac{V_m}{2\pi} \left[ \begin{array}{l} + \sum_{n=2,3,4}^{\infty} \left[ \begin{array}{l} \frac{\cos(n+1)(\pi + \beta)}{n+1} - \frac{\cos(1-n)(\pi + \beta)}{1-n} \\ + \frac{\cos(n+1)\alpha}{n+1} + \frac{\cos(1-n)\alpha}{1-n} \end{array} \right] \frac{\cos(n\omega t - \varphi_n)}{\sqrt{R_y^2 + (n\omega L_y)^2}} \\ + \sum_{n=2,3,4}^{\infty} \left[ \begin{array}{l} \frac{\sin(n+1)(\pi + \beta)}{n+1} + \frac{\sin(1-n)(\pi + \beta)}{1-n} \\ + \frac{\sin(n+1)\alpha}{n+1} - \frac{\sin(1-n)\alpha}{1-n} \end{array} \right] \frac{\sin(n\omega t - \varphi_n)}{\sqrt{R_y^2 + (n\omega L_y)^2}} \end{array} \right] \quad (4.122)$$

$$i_{ah}(t) = i_{dh}(t) \quad (4.123)$$

$$v_{ih}(t) = -R_s i_{ah}(t) - L_s \frac{di_{ah}(t)}{dt} \quad (4.124)$$

DA bileşen devre parametreleri, Denklem (4.125), (4.126) ve (4.127)'de verilmiştir.

$$V_d = \frac{V_m}{2\pi} (\cos \alpha - \cos(\pi + \beta)) \quad (4.125)$$

$$I_d = I_a = \frac{V_m}{2\pi R_y} (\cos \alpha - \cos(\pi + \beta)) \quad (4.126)$$

$$V_i = -R_s I_a \quad (4.127)$$

#### 4.3.8. İki fazlı yarım dalga kontrollü doğrultucu için model parametreleri

Şekil 4.8’de verilen tam eşdeğer devre modelindeki devre parametreleri, iki fazlı yarım dalga kontrollü doğrultucu devresi için aşağıda verilmiştir. Bu değerler, Bölüm 3’deki ilgili Fourier seri açılımından elde edilmiştir.  $A_n$  ve  $B_n$  katsayıları Denklem (3.72)’de mevcuttur.

$$v_d(t) = \frac{V_m}{2\pi} \left[ 2(\cos \alpha + \cos \beta) + \sum_{n=2,4,6,\dots}^{\infty} (A_n \cos n\omega t + B_n \sin n\omega t) \right] \quad (4.128)$$

$$i_d(t) = \frac{V_m}{2\pi} \left[ \frac{2}{R_y} (\cos \alpha + \cos \beta) + \sum_{n=2,4,6,\dots}^{\infty} \left( \frac{A_n}{\sqrt{R_y^2 + (n\omega L_y)^2}} \cos(n\omega t - \varphi_n) + \frac{B_n}{\sqrt{R_y^2 + (n\omega L_y)^2}} \sin(n\omega t - \varphi_n) \right) \right] \quad (4.129)$$

$$i_a(t) = \frac{V_m}{2\pi} \left[ \frac{2 \cos \alpha}{R_y} + \frac{4 \cos \alpha}{\pi R_y} \sum_{n=1,3,5,\dots}^{\infty} \left( \frac{\sin n(\pi + \beta) - \sin n \alpha}{n} \cos n\omega t + \frac{\cos n(\pi + \beta) - \cos n \alpha}{n} \sin n\omega t \right) + k \sum_{n=2,4,6,\dots}^{\infty} \left( \frac{A_n}{\sqrt{R_y^2 + (n\omega L_y)^2}} \cos(n\omega t - \varphi_n) + \frac{B_n}{\sqrt{R_y^2 + (n\omega L_y)^2}} \sin(n\omega t - \varphi_n) \right) \right] \quad (4.130)$$

$$v_i(t) = v_a(t) - R_s i_a(t) - L_s \frac{di_a(t)}{dt} \quad (4.131)$$

Şekil 4.9, Şekil 4.10 ve Şekil 4.11’de verilen temel bileşen devre modeli, harmonik bileşen devre modeli ve DA bileşen devre modeline ait devre parametreleri, Denklem

(4.14), (4.15), (4.16) ve (4.17)'de verilen eşitlikler kullanılarak elde edilmiştir. Temel bileşen devre parametreleri;

$$v_{df}(t) = 0 \quad (4.132)$$

$$i_{df}(t) = 0 \quad (4.133)$$

$$i_{af}(t) = \frac{V_m}{2\pi} \left[ \frac{4 \cos \alpha}{\pi R_y} \left( \frac{(\sin(\pi + \beta) - \sin \alpha) \cos \omega t +}{(\cos(\pi + \beta) - \cos \alpha) \sin \omega t} \right) \right] \quad (4.134)$$

$$v_{if}(t) = v_a(t) - R_s i_{af}(t) - L_s \frac{di_{af}(t)}{dt} \quad (4.135)$$

Harmonik bileşen devre parametreleri, Denklem (4.136), (4.137), (4.138) ve (4.139)'da verilmiştir.

$$v_{dh}(t) = \frac{V_m}{2\pi} \sum_{n=2,4,6,\dots}^{\infty} (A_n \cos n\omega t + B_n \sin n\omega t) \quad (4.136)$$

$$i_{dh}(t) = \frac{V_m}{2\pi} \sum_{n=2,4,6,\dots}^{\infty} \left( \frac{\frac{A_n}{\sqrt{R_y^2 + (n\omega L_y)^2}} \cos(n\omega t - \varphi_n)}{+ \frac{B_n}{\sqrt{R_y^2 + (n\omega L_y)^2}} \sin(n\omega t - \varphi_n)} \right) \quad (4.137)$$

$$i_{ah}(t) = \frac{V_m}{2\pi} \left[ \frac{4 \cos \alpha}{\pi R_y} \sum_{n=3,5,7,\dots}^{\infty} \left( \frac{\frac{\sin n(\pi + \beta) - \sin n \alpha}{n} \cos n\omega t +}{\frac{\cos n(\pi + \beta) - \cos n \alpha}{n} \sin n\omega t} \right) \right. \\ \left. + k \sum_{n=2,4,6,\dots}^{\infty} \left( \frac{\frac{A_n}{\sqrt{R_y^2 + (n\omega L_y)^2}} \cos(n\omega t - \varphi_n)}{+ \frac{B_n}{\sqrt{R_y^2 + (n\omega L_y)^2}} \sin(n\omega t - \varphi_n)} \right) \right] \quad (4.138)$$

$$v_{ih}(t) = -R_s i_{ah}(t) - L_s \frac{di_{ah}(t)}{dt} \quad (4.139)$$

DA bileşen devre parametreleri, Denklem (4.140), (4.141), (4.142) ve (4.143)'de verilmiştir.

$$V_d = \frac{V_m}{\pi} (\cos \alpha + \cos \beta) \quad (4.140)$$

$$I_d = \frac{V_m}{\pi R_y} (\cos \alpha + \cos \beta) \quad (4.141)$$

$$I_a = \frac{V_m}{\pi R_y} \cos \alpha \quad (4.142)$$

$$V_i = -R_s I_a \quad (4.143)$$

#### 4.3.9. Üç fazlı yarım dalga kontrollü doğrultucu için model parametreleri

Şekil 4.8'de verilen tam eşdeğer devre modelindeki devre parametreleri, üç fazlı yarım dalga kontrollü doğrultucu devresi için aşağıda verilmiştir. Bu değerler, Bölüm 3'deki ilgili Fourier seri açılımından elde edilmiştir. Denklemlerde yer alan  $a_{n1}$ ,  $a_{n2}$ ,  $a_{n3}$ ,  $a_{n4}$ ,  $b_{n1}$ ,  $b_{n2}$ ,  $b_{n3}$ ,  $b_{n4}$  katsayıları Denklem (3.81) ile (3.88) arasında verilmiştir.

$$v_d(t) = V_m \left[ \begin{aligned} & \frac{\sqrt{3}}{4\pi} \cos \beta + \frac{\sqrt{3}}{4\pi} \cos \alpha - \frac{1}{4\pi} \sin \alpha + \left( \frac{1}{8\pi} \cos 2\alpha \right) \sin \omega t \\ & + \left( \frac{5}{6} + \frac{\beta - \alpha}{\pi} + \frac{\sqrt{3}}{4\pi} \cos 2\alpha + \frac{7}{16\pi} \sin 2\alpha + \frac{\sqrt{3}}{8\pi} \cos 2\beta - \frac{5}{8\pi} \sin 2\beta \right) \cos \omega t \\ & + \sum_{n=2,3,4,\dots}^{\infty} \left[ \begin{aligned} & (a_{n1} + a_{n2} + a_{n3} + a_{n4}) \cos n\omega t + \\ & (b_{n1} + b_{n2} + b_{n3} + b_{n4}) \sin n\omega t \end{aligned} \right] \end{aligned} \right] \quad (4.144)$$

$$\begin{aligned} i_d(t) &= \frac{\sqrt{3}V_m}{4\pi R_y} \left( \cos \beta + \cos \alpha - \frac{\sqrt{3}}{3} \sin \alpha \right) + \frac{V_m}{8\pi} \cos 2\alpha \frac{\sin(\omega t - \varphi_1)}{\sqrt{R_y^2 + (\omega L)^2}} \\ &+ \frac{V_m}{\pi} \left( \frac{5\pi}{6} + \beta - \alpha + \frac{\sqrt{3}}{4} \cos 2\alpha + \frac{7}{16} \sin 2\alpha + \frac{\sqrt{3}}{8} \cos 2\beta - \frac{5}{8} \sin 2\beta \right) \frac{\cos(\omega t - \varphi_1)}{\sqrt{R_y^2 + (\omega L)^2}} + \\ &+ \sum_{n=2,3,4,\dots}^{\infty} \frac{V_m}{\sqrt{R_y^2 + (n\omega L)^2}} \left[ \begin{aligned} & (a_{n1} + a_{n2} + a_{n3} + a_{n4}) \cos(n\omega t - \varphi_n) + \\ & (b_{n1} + b_{n2} + b_{n3} + b_{n4}) \sin(n\omega t - \varphi_n) \end{aligned} \right] \end{aligned} \quad (4.145)$$

$$i_a(t) = \frac{3V_m}{2\pi^2 R_y} \left(1 + \cos\left(\alpha + \frac{\pi}{6}\right)\right) \left[ \sum_{n=1,2,4,5,7,\dots}^{\infty} \left( \left( \sin n\left(\frac{5\pi}{6} + \beta\right) - \sin n\alpha \right) \frac{\cos n\omega t}{n} + \left( \cos n\alpha - \cos n\left(\frac{5\pi}{6} + \alpha\right) \right) \frac{\sin n\omega t}{n} \right) \right] \quad (4.146)$$

$$+ k \sum_{n=2,3,4,\dots}^{\infty} \frac{1}{\sqrt{R_y^2 + (n\omega L)^2}} \left[ (a_{n1} + a_{n2} + a_{n3} + a_{n4}) \cos(n\omega t - \varphi_n) + (b_{n1} + b_{n2} + b_{n3} + b_{n4}) \sin(n\omega t - \varphi_n) \right]$$

$$v_i(t) = v_a(t) - R_s i_a(t) - L_s \frac{di_a(t)}{dt} \quad (4.147)$$

Şekil 4.9, Şekil 4.10 ve Şekil 4.11’de verilen temel bileşen devre modeli, harmonik bileşen devre modeli ve DA bileşen devre modeline ait devre parametreleri, Denklem (4.14), (4.15), (4.16) ve (4.17)’de verilen eşitlikler kullanılarak elde edilmiştir. Temel bileşen devre parametreleri;

$$v_{df}(t) = V_m \left[ \left( \frac{1}{8\pi} \cos 2\alpha \right) \sin \omega t + \left( \frac{5}{6} + \frac{\beta - \alpha}{\pi} + \frac{\sqrt{3}}{4\pi} \cos 2\alpha + \frac{7}{16\pi} \sin 2\alpha + \frac{\sqrt{3}}{8\pi} \cos 2\beta - \frac{5}{8\pi} \sin 2\beta \right) \cos \omega t \right] \quad (4.148)$$

$$i_{df}(t) = \frac{V_m}{8\pi} \cos 2\alpha \frac{\sin(\omega t - \varphi_1)}{\sqrt{R_y^2 + (\omega L)^2}} + \frac{V_m}{\pi} \left( \frac{5\pi}{6} + \beta - \alpha + \frac{\sqrt{3}}{4} \cos 2\alpha + \frac{7}{16} \sin 2\alpha + \frac{\sqrt{3}}{8} \cos 2\beta - \frac{5}{8} \sin 2\beta \right) \frac{\cos(\omega t - \varphi_1)}{\sqrt{R_y^2 + (\omega L)^2}} \quad (4.149)$$

$$i_{af}(t) = \frac{3V_m}{2\pi^2 R_y} \left(1 + \cos\left(\alpha + \frac{\pi}{6}\right)\right) \left[ \left( \sin\left(\frac{5\pi}{6} + \beta\right) - \sin \alpha \right) \cos \omega t + \left( \cos \alpha - \cos\left(\frac{5\pi}{6} + \alpha\right) \right) \sin \omega t \right] \quad (4.150)$$

$$v_{if}(t) = v_a(t) - R_s i_{af}(t) - L_s \frac{di_{af}(t)}{dt} \quad (4.151)$$

Harmonik bileşen devre parametreleri, Denklem (4.152), (4.153), (4.154) ve (4.155)’de verilmiştir.



$$v_{dh}(t) = \sum_{n=2,3,4,\dots}^{\infty} V_m \left[ \begin{array}{l} (a_{n1} + a_{n2} + a_{n3} + a_{n4}) \cos n\omega t \\ + (b_{n1} + b_{n2} + b_{n3} + b_{n4}) \sin n\omega t \end{array} \right] \quad (4.152)$$

$$i_{dh}(t) = \sum_{n=2,3,4,\dots}^{\infty} \frac{V_m}{\sqrt{R_y^2 + (n\omega L)^2}} \left[ \begin{array}{l} (a_{n1} + a_{n2} + a_{n3} + a_{n4}) \cos(n\omega t - \varphi_n) + \\ (b_{n1} + b_{n2} + b_{n3} + b_{n4}) \sin(n\omega t - \varphi_n) \end{array} \right] \quad (4.153)$$

$$i_{ah}(t) = \frac{3V_m}{2\pi^2 R_y} \left( 1 + \cos\left(\alpha + \frac{\pi}{6}\right) \right) \left[ \sum_{n=2,4,5,7,\dots}^{\infty} \left( \begin{array}{l} \left( \sin n\left(\frac{5\pi}{6} + \beta\right) - \sin n\alpha \right) \frac{\cos n\omega t}{n} + \\ \left( \cos n\alpha - \cos n\left(\frac{5\pi}{6} + \alpha\right) \right) \frac{\sin n\omega t}{n} \end{array} \right) \right] \quad (4.154)$$

$$+ k \sum_{n=2,3,4,\dots}^{\infty} \frac{1}{\sqrt{R_y^2 + (n\omega L)^2}} \left[ \begin{array}{l} (a_{n1} + a_{n2} + a_{n3} + a_{n4}) \cos(n\omega t - \varphi_n) + \\ (b_{n1} + b_{n2} + b_{n3} + b_{n4}) \sin(n\omega t - \varphi_n) \end{array} \right]$$

$$v_{ih}(t) = -R_s i_{ah}(t) - L_s \frac{di_{ah}(t)}{dt} \quad (4.155)$$

DA bileşen devre parametreleri, Denklem (4.156), (4.157), (4.158) ve (4.159)'da verilmiştir.

$$V_d = \frac{\sqrt{3}V_m}{4\pi} \cos \beta + \frac{\sqrt{3}V_m}{4\pi} \cos \alpha - \frac{V_m}{4\pi} \sin \alpha \quad (4.156)$$

$$I_d = \frac{\sqrt{3}V_m}{4\pi R_y} \cos \beta + \frac{\sqrt{3}V_m}{4\pi R_y} \cos \alpha - \frac{V_m}{4\pi R_y} \sin \alpha \quad (4.157)$$

$$I_a = \frac{3V_m}{2\pi^2 R_y} \quad (4.158)$$

$$V_i = -R_s I_a \quad (4.159)$$

#### 4.3.10. Bir fazlı tam dalga kontrollü doğrultucu için model parametreleri

Şekil 4.8'de verilen tam eşdeğer devre modelindeki devre parametreleri, bir fazlı tam dalga kontrollü doğrultucu devresi için aşağıda verilmiştir. Bu değerler, Bölüm 3'deki ilgili Fourier serisi açılımından elde edilmiştir.  $A_n$  ve  $B_n$  katsayıları Denklem (3.105)'de mevcuttur.

$$v_d(t) = \frac{V_m}{2\pi} \left[ 2(\cos \alpha + \cos \beta) + \sum_{n=2,4,6,\dots}^{\infty} A_n \cos n\omega t + B_n \sin n\omega t \right] \quad (4.160)$$

$$i_d(t) = \frac{V_m}{2\pi} \left[ \frac{2}{R_y} (\cos \alpha + \cos \beta) + \sum_{n=2,4,6,\dots}^{\infty} \left( \frac{A_n}{\sqrt{R_y^2 + (n\omega L_y)^2}} \cos(n\omega t - \varphi_n) + \frac{B_n}{\sqrt{R_y^2 + (n\omega L_y)^2}} \sin(n\omega t - \varphi_n) \right) \right] \quad (4.161)$$

$$i_a(t) = \left[ \frac{2V_m}{\pi^2 R_y} \cos \alpha \sum_{n=1,3,5,\dots}^{\infty} \left( \frac{\sin n(\pi + \alpha) - \sin n \alpha + \sin n(\pi + \beta) - \sin n \beta}{n} \cos n\omega t + \frac{-\cos n(\pi + \alpha) + \cos n \alpha - \cos n(\pi + \beta) + \cos n \beta}{n} \sin n\omega t \right) + k \frac{V_m}{2\pi} \sum_{n=2,4,6,\dots}^{\infty} \left( \frac{A_n}{\sqrt{R_y^2 + (n\omega L_y)^2}} \cos(n\omega t - \varphi_n) + \frac{B_n}{\sqrt{R_y^2 + (n\omega L_y)^2}} \sin(n\omega t - \varphi_n) \right) \right] \quad (4.162)$$

$$v_i(t) = v_a(t) - R_s i_a(t) - L_s \frac{di_a(t)}{dt} \quad (4.163)$$

Şekil 4.9, Şekil 4.10 ve Şekil 4.11’de verilen temel bileşen devre modeli, harmonik bileşen devre modeli ve DA bileşen devre modeline ait devre parametreleri, Denklem (4.14), (4.15), (4.16) ve (4.17)’de verilen eşitlikler kullanılarak elde edilmiştir. Temel bileşen devre parametreleri;

$$v_{df}(t) = 0 \quad (4.164)$$

$$i_{df}(t) = 0 \quad (4.165)$$

$$i_{af}(t) = \frac{2V_m}{\pi^2 R_y} \cos \alpha \left( \begin{array}{l} (\sin(\pi + \alpha) - \sin \alpha + \sin(\pi + \beta) - \sin \beta) \cos n\omega t + \\ (-\cos n(\pi + \alpha) + \cos n \alpha - \cos n(\pi + \beta) + \cos n \beta) \sin n\omega t \end{array} \right) \quad (4.166)$$

$$v_{if}(t) = v_a(t) - R_s i_{af}(t) - L_s \frac{di_{af}(t)}{dt} \quad (4.167)$$

Harmonik bileşen devre parametreleri, Denklem (4.168), (4.169), (4.170) ve (4.171)'de verilmiştir.

$$v_{dh}(t) = \frac{V_m}{2\pi} \sum_{n=2,4,6\dots}^{\infty} (A_n \cos n\omega t + B_n \sin n\omega t) \quad (4.168)$$

$$i_{dh}(t) = \frac{V_m}{2\pi} \sum_{n=2,4,6\dots}^{\infty} \left( \frac{A_n}{\sqrt{R_y^2 + (n\omega L_y)^2}} \cos(n\omega t - \phi_n) + \frac{B_n}{\sqrt{R_y^2 + (n\omega L_y)^2}} \sin(n\omega t - \phi_n) \right) \quad (4.169)$$

$$i_{ah}(t) = \left[ \frac{2V_m}{\pi^2 R_y} \cos \alpha \sum_{n=3,5,7\dots}^{\infty} \left( \frac{\sin n(\pi + \alpha) - \sin n \alpha}{n} \cos n\omega t + \frac{\sin n(\pi + \beta) - \sin n \beta}{n} \sin n\omega t \right) + k \frac{V_m}{2\pi} \sum_{n=2,4,6}^{\infty} \left( \frac{A_n}{\sqrt{R_y^2 + (n\omega L_y)^2}} \cos(n\omega t - \phi_n) + \frac{B_n}{\sqrt{R_y^2 + (n\omega L_y)^2}} \sin(n\omega t - \phi_n) \right) \right] \quad (4.170)$$

$$v_{ih}(t) = -R_s i_{ah}(t) - L_s \frac{di_{ah}(t)}{dt} \quad (4.171)$$

DA bileşen devre parametreleri, Denklem (4.172), (4.173), (4.174) ve (4.175)'de verilmiştir.

$$V_d = \frac{V_m}{\pi} (\cos \alpha + \cos \beta) \quad (4.172)$$

$$I_d = \frac{V_m}{\pi R_y} (\cos \alpha + \cos \beta) \quad (4.173)$$

$$I_a = 0 \quad (4.174)$$

$$V_i = 0 \quad (4.175)$$

### 4.3.11. İki fazlı tam dalga kontrollü doğrultucu için model parametreleri

Şekil 4.8’de verilen tam eşdeğer devre modelindeki devre parametreleri, iki fazlı tam dalga kontrollü doğrultucu devresi için aşağıda verilmiştir. Bu değerler, Bölüm 3’deki ilgili Fourier seri açılımından elde edilmiştir.  $A_n$  ve  $B_n$  katsayıları Denklem (3.105)’de mevcuttur.

$$v_d(t) = \frac{V_m}{\pi} \left[ 2(\cos \alpha + \cos \beta) + \sum_{n=2,4,6\dots}^{\infty} A_n \cos n\omega t + B_n \sin n\omega t \right] \quad (4.176)$$

$$i_d(t) = \frac{V_m}{\pi} \left[ \frac{2}{R_y} (\cos \alpha + \cos \beta) + \sum_{n=2,4,6\dots}^{\infty} \left( \frac{A_n}{\sqrt{R_y^2 + (n\omega L_y)^2}} \cos(n\omega t - \varphi_n) + \frac{B_n}{\sqrt{R_y^2 + (n\omega L_y)^2}} \sin(n\omega t - \varphi_n) \right) \right] \quad (4.177)$$

$$i_a(t) = \left[ \frac{4V_m}{\pi^2 R_y} \cos \alpha \sum_{n=1,3,5\dots}^{\infty} \left( \frac{\sin n(\pi + \alpha) - \sin n \alpha}{n} + \frac{\sin n(\pi + \beta) - \sin n \beta}{n} \cos n\omega t + \frac{-\cos n(\pi + \alpha) + \cos n \alpha}{n} - \frac{-\cos n(\pi + \beta) + \cos n \beta}{n} \sin n\omega t \right) + k \frac{V_m}{\pi} \sum_{n=2,4,6\dots}^{\infty} \left( \frac{A_n}{\sqrt{R_y^2 + (n\omega L_y)^2}} \cos(n\omega t - \varphi_n) + \frac{B_n}{\sqrt{R_y^2 + (n\omega L_y)^2}} \sin(n\omega t - \varphi_n) \right) \right] \quad (4.178)$$

$$v_i(t) = v_a(t) - R_s i_a(t) - L_s \frac{di_a(t)}{dt} \quad (4.179)$$

Şekil 4.9, Şekil 4.10 ve Şekil 4.11’de verilen temel bileşen devre modeli, harmonik bileşen devre modeli ve DA bileşen devre modeline ait devre parametreleri, Denklem (4.14), (4.15), (4.16) ve (4.17)’de verilen eşitlikler kullanılarak elde edilmiştir. Temel bileşen devre parametreleri;

$$v_{df}(t) = 0 \quad (4.180)$$

$$i_{df}(t) = 0 \quad (4.181)$$

$$i_{af}(t) = \frac{4V_m}{\pi^2 R_y} \cos \alpha \left( \begin{array}{l} (\sin(\pi + \alpha) - \sin \alpha + \sin(\pi + \beta) - \sin \beta) \cos n\omega t + \\ (-\cos n(\pi + \alpha) + \cos n \alpha - \cos n(\pi + \beta) + \cos n \beta) \sin n\omega t \end{array} \right) \quad (4.182)$$

$$v_{if}(t) = v_a(t) - R_s i_{af}(t) - L_s \frac{di_{af}(t)}{dt} \quad (4.183)$$

Harmonik bileşen devre parametreleri, Denklem (4.184), (4.185), (4.186) ve (4.187)'de verilmiştir.

$$v_{dh}(t) = \frac{V_m}{\pi} \sum_{n=2,4,6,\dots}^{\infty} (A_n \cos n\omega t + B_n \sin n\omega t) \quad (4.184)$$

$$i_{dh}(t) = \frac{V_m}{\pi} \sum_{n=2,4,6,\dots}^{\infty} \left( \begin{array}{l} \frac{A_n}{\sqrt{R_y^2 + (n\omega L_y)^2}} \cos(n\omega t - \varphi_n) \\ + \frac{B_n}{\sqrt{R_y^2 + (n\omega L_y)^2}} \sin(n\omega t - \varphi_n) \end{array} \right) \quad (4.185)$$

$$i_{ah}(t) = \left[ \begin{array}{l} \frac{4V_m}{\pi^2 R_y} \cos \alpha \sum_{n=1,3,5,\dots}^{\infty} \left( \begin{array}{l} \frac{\sin n(\pi + \alpha) - \sin n \alpha}{n} \cos n\omega t + \\ \frac{\sin n(\pi + \beta) - \sin n \beta}{n} \cos n\omega t + \\ -\cos n(\pi + \alpha) + \cos n \alpha \\ -\cos n(\pi + \beta) + \cos n \beta \end{array} \right) \sin n\omega t \\ + k \frac{V_m}{\pi} \sum_{n=2,4,6,\dots}^{\infty} \left( \begin{array}{l} \frac{A_n}{\sqrt{R_y^2 + (n\omega L_y)^2}} \cos(n\omega t - \varphi_n) \\ + \frac{B_n}{\sqrt{R_y^2 + (n\omega L_y)^2}} \sin(n\omega t - \varphi_n) \end{array} \right) \end{array} \right] \quad (4.186)$$

$$v_{ih}(t) = -R_s i_{ah}(t) - L_s \frac{di_{ah}(t)}{dt} \quad (4.187)$$

DA bileşen devre parametreleri, Denklem (4.188), (4.189), (4.190) ve (4.191)'de verilmiştir.

$$V_d = \frac{2V_m}{\pi}(\cos \alpha + \cos \beta) \quad (4.188)$$

$$I_d = \frac{2V_m}{\pi R_y}(\cos \alpha + \cos \beta) \quad (4.189)$$

$$I_a = 0 \quad (4.190)$$

$$V_i = 0 \quad (4.191)$$

#### 4.3.12. Üç fazlı tam dalga kontrollü doğrultucu için model parametreleri

Şekil 4.8’de verilen tam eşdeğer devre modelindeki devre parametreleri, üç fazlı tam dalga kontrollü doğrultucu devresi için aşağıda verilmiştir. Bu değerler, Bölüm 3’deki ilgili Fourier seri açılımından elde edilmiştir. Denklemlerde yer alan  $a_{n1}$ ,  $a_{n2}$ ,  $a_{n3}$ ,  $a_{n4}$ ,  $b_{n1}$ ,  $b_{n2}$ ,  $b_{n3}$ ,  $b_{n4}$  katsayıları Denklem (3.126) ile (3.133) arasında verilmiştir.

$$v_d(t) = V_m \left[ \begin{aligned} & \frac{3\sqrt{3}}{\pi} \cos \alpha + \left( \frac{\sqrt{3}}{16\pi} \sin 2\alpha + \frac{3}{8\pi} \cos 2\alpha - \frac{1}{4\pi} \right) \cos \omega t \\ & + \left( \frac{3}{4\pi} \sin 2\alpha + \frac{3\sqrt{3}}{8\pi} \cos 2\alpha + \frac{\alpha}{\pi} \right) \sin \omega t \\ & + \sum_{n=2,3,4,\dots}^{\infty} \left[ (a_{n1} + a_{n2} + a_{n3} + a_{n4}) \cos n\omega t \right. \\ & \left. + (b_{n1} + b_{n2} + b_{n3} + b_{n4}) \sin n\omega t \right] \end{aligned} \right] \quad (4.192)$$

$$i_d(t) = \left[ \begin{aligned} & \frac{3\sqrt{3} V_m}{\pi R_y} \cos \alpha + \left( \frac{\sqrt{3}}{16\pi} \sin 2\alpha + \frac{3}{8\pi} \cos 2\alpha - \frac{1}{4\pi} \right) \frac{V_m}{\sqrt{R_y^2 + (\omega L_y)^2}} \cos(\omega t - \varphi_1) \\ & + \left( \frac{3}{4\pi} \sin 2\alpha + \frac{3\sqrt{3}}{8\pi} \cos 2\alpha + \frac{\alpha}{\pi} \right) \frac{V_m}{\sqrt{R_y^2 + (\omega L_y)^2}} \sin(\omega t - \varphi_1) + \\ & \sum_{n=2,3,4,\dots}^{\infty} \frac{V_m}{\sqrt{R_y^2 + (n\omega L_y)^2}} \left[ (a_{n1} + a_{n2} + a_{n3} + a_{n4}) \cos(n\omega t - \varphi_n) \right. \\ & \left. + (b_{n1} + b_{n2} + b_{n3} + b_{n4}) \sin(n\omega t - \varphi_n) \right] \end{aligned} \right] \quad (4.193)$$

$$i_a(t) = \frac{3\sqrt{3}V_m \cos \alpha}{\pi^2 R_y} \sum_{n=1}^{\infty} \frac{1}{n} \left[ \begin{array}{l} \left( \sin n(\alpha + 2\pi/3) + \sin n(\alpha + 5\pi/3) \right) \cos n\omega t - \\ \left( \cos n(\alpha + 2\pi/3) + \cos n(\alpha + 5\pi/3) \right) \sin n\omega t \end{array} \right] \quad (4.194)$$

$$+ k \sum_{n=2,3,4,\dots}^{\infty} \frac{V_m}{\sqrt{R_y^2 + (n\omega L_y)^2}} \left[ \begin{array}{l} (a_{n1} + a_{n2} + a_{n3} + a_{n4}) \cos(n\omega t - \varphi_n) \\ + (b_{n1} + b_{n2} + b_{n3} + b_{n4}) \sin(n\omega t - \varphi_n) \end{array} \right]$$

$$v_i(t) = v_a(t) - R_s i_a(t) - L_s \frac{di_a(t)}{dt} \quad (4.195)$$

Şekil 4.9, Şekil 4.10 ve Şekil 4.11’de verilen temel bileşen devre modeli, harmonik bileşen devre modeli ve DA bileşen devre modeline ait devre parametreleri, Denklem (4.14), (4.15), (4.16) ve (4.17)’de verilen eşitlikler kullanılarak elde edilmiştir. Temel bileşen devre parametreleri;

$$v_{df}(t) = V_m \left[ \begin{array}{l} \left( \frac{\sqrt{3}}{16\pi} \sin 2\alpha + \frac{3}{8\pi} \cos 2\alpha - \frac{1}{4\pi} \right) \cos \omega t \\ + \left( \frac{3}{4\pi} \sin 2\alpha + \frac{3\sqrt{3}}{8\pi} \cos 2\alpha + \frac{\alpha}{\pi} \right) \sin \omega t \end{array} \right] \quad (4.196)$$

$$i_{df}(t) = \left[ \begin{array}{l} \left( \frac{\sqrt{3}}{16\pi} \sin 2\alpha + \frac{3}{8\pi} \cos 2\alpha - \frac{1}{4\pi} \right) \frac{V_m}{\sqrt{R_y^2 + (\omega L_y)^2}} \cos(\omega t - \varphi_1) \\ + \left( \frac{3}{4\pi} \sin 2\alpha + \frac{3\sqrt{3}}{8\pi} \cos 2\alpha + \frac{\alpha}{\pi} \right) \frac{V_m}{\sqrt{R_y^2 + (\omega L_y)^2}} \sin(\omega t - \varphi_1) \end{array} \right] \quad (4.197)$$

$$i_{af}(t) = \frac{3\sqrt{3}V_m \cos \alpha}{\pi^2 R_y} \left[ \begin{array}{l} (\sin(\alpha + 2\pi/3) + \sin(\alpha + 5\pi/3) - 2\sin \alpha) \cos \omega t - \\ (\cos(\alpha + 2\pi/3) + \cos(\alpha + 5\pi/3) - 2\cos \alpha) \sin \omega t \end{array} \right] \quad (4.198)$$

$$v_{if}(t) = v_a(t) - R_s i_{af}(t) - L_s \frac{di_{af}(t)}{dt} \quad (4.199)$$

Harmonik bileşen devre parametreleri, Denklem (4.198), (4.199), (4.200) ve (4.201)’de verilmiştir.

$$v_{dh}(t) = \sum_{n=2,3,4,\dots}^{\infty} V_m \left[ \begin{array}{l} (a_{n1} + a_{n2} + a_{n3} + a_{n4}) \cos n\omega t + \\ (b_{n1} + b_{n2} + b_{n3} + b_{n4}) \sin n\omega t \end{array} \right] \quad (4.200)$$

$$i_{dh}(t) = \left[ \sum_{n=2,3,4,\dots}^{\infty} \frac{V_m}{\sqrt{R_y^2 + (n\omega L_y)^2}} \left[ (a_{n1} + a_{n2} + a_{n3} + a_{n4}) \cos(n\omega t - \varphi_n) + (b_{n1} + b_{n2} + b_{n3} + b_{n4}) \sin(n\omega t - \varphi_n) \right] \right] \quad (4.201)$$

$$i_{ah}(t) = \frac{3\sqrt{3}V_m \cos \alpha}{\pi^2 R_y} \sum_{n=2,3,4}^{\infty} \frac{1}{n} \left[ \begin{array}{l} \left( \sin n(\alpha + 2\pi/3) + \sin n(\alpha + 5\pi/3) \right) \cos n\omega t - \\ \left( \cos n(\alpha + 2\pi/3) + \cos n(\alpha + 5\pi/3) \right) \sin n\omega t \end{array} \right] \quad (4.202)$$

$$+k \sum_{n=2,3,4,\dots}^{\infty} \frac{V_m}{\sqrt{R_y^2 + (n\omega L_y)^2}} \left[ (a_{n1} + a_{n2} + a_{n3} + a_{n4}) \cos(n\omega t - \varphi_n) + (b_{n1} + b_{n2} + b_{n3} + b_{n4}) \sin(n\omega t - \varphi_n) \right]$$

$$v_{ih}(t) = -R_s i_{ah}(t) - L_s \frac{di_{ah}(t)}{dt} \quad (4.203)$$

DA bileşen devre parametreleri, Denklem (4.204), (4.205), (4.206) ve (4.207)'de verilmiştir.

$$V_d = \frac{3\sqrt{3}}{\pi} \cos \alpha \quad (4.204)$$

$$I_d = \frac{3\sqrt{3}}{\pi R_y} \cos \alpha \quad (4.205)$$

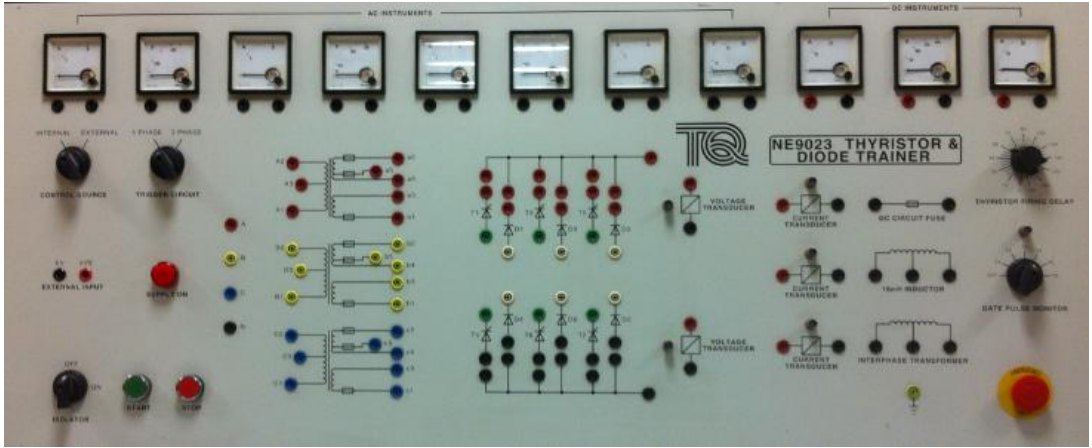
$$I_a = 0 \quad (4.206)$$

$$V_i = 0 \quad (4.207)$$



## 5. İLERİ SÜRÜLEN EŞDEĞER DEVRE MODELİNİN TEST EDİLMESİ

Bu bölümde, ileri sürülen eşdeğer devre modelini test etmek amacıyla benzetim sonuçları ve gerçek devrelerin deneysel sonuçları mukayese edilmiştir. Eşdeğer devre modelinin benzetim sonuçları MATLAB programı kullanılarak, gerçek devreye ait deneysel sonuçlar ise 'TQ NE9023 tristör ve diyot eğitim seti' kullanılarak elde edilmiştir. Deney setine ve ölçüm için kullanılan cihaza ait görseller sırasıyla Şekil 5.1 ve Şekil 5.2'de verilmiştir.



Şekil 5.1. TQ NE9023 tristör ve diyot eğitim seti



Şekil 5.2. Fluke 435-II güç kalite analizörü

## 5.1. Deneysel ve Benzetim Sonuçları

Bölüm 4’de detayları verilen eşdeğer devre modeli, genel durumu ifade etmek amacıyla, hem kaynak hem de yük tarafında düzgün yapıya sahip olmayan harmonikler için ileri sürülmüştür. Bu amaçla, deneysel sonuçlar da endüktif yük durumları için elde edilmiştir. Tüm deneylerde kullanılan eleman ve kaynak değerleri;  $R_y: 95 \Omega$ ,  $L_y: 160 \text{ mH}$ ,  $U_m: 92 \text{ V}$ ,  $f = 50\text{Hz}$ ’dir.

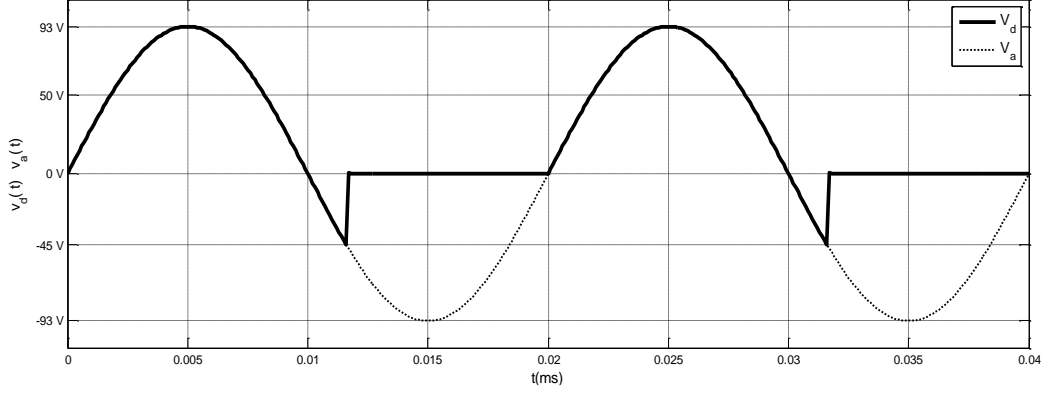
Tüm doğrultucu devreleri için; giriş gerilimi  $v_a(t)$ , çıkış gerilimi  $v_d(t)$ , giriş akımı  $i_a(t)$  ve çıkış akımı  $i_d(t)$  değerleri incelenmiştir. Bu değerlere ilişkin hem benzetim sonuçları hem de deneysel sonuçlar aşağıda sırasıyla verilmiştir. Benzetim sonuçları, ilgili denklemlerin kullanılmasıyla tam eşdeğer devre modelinden (Şekil 4.8) elde edilmiştir. Deneysel sonuçlar ise deney seti ve güç kalitesi analizörü ile alınmıştır.

Genel olarak, güç kalitesi analizörleri dalga şekillerinin harmonik spektrumlarının incelenmesine imkan tanır. Herhangi bir dalga şeklinin temel bileşeninin ve harmonik bileşenlerinin ayrı ayrı zamana bağlı değişimlerini doğrudan göstermezler. Buna karşın, ileri sürülen eşdeğer devre modeli ile doğrultucu devresindeki bir dalga şekline ait istenen temel bileşen, harmonik bileşen/ bileşenlerinin zamana bağlı değişimleri ayrı ayrı elde edilebilmektedir. Bu da, ileri sürülen modelin üstünlüğünü göstermektedir.

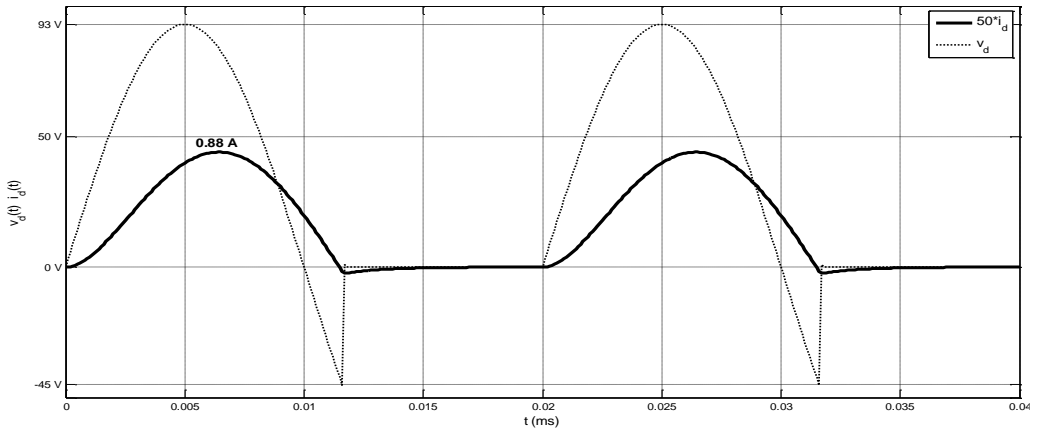
Uygulamada genellikle, doğrultucuların giriş akımı ( $i_a(t)$ ) ve çıkış gerilimine ( $v_d(t)$ ) ilişkin harmonik analizleri önemsenir. Bu nedenle, bu iki büyüklüğe ait hem deneysel hem de eşdeğer devre modelinden elde edilen temel bileşen ve harmonik bileşen sonuçları ayrı ayrı verilmiştir. Benzetim sonuçları ilgili denklemlerin kullanılmasıyla, Şekil 4.9’deki temel bileşen eşdeğer devre modelinden ve Şekil 4.10’deki harmonik bileşen eşdeğer devre modelinden elde edilmiştir. Deneysel olarak ölçülen bu iki büyüklüğe ait harmonik spektrumları verilmiştir. Temel bileşen ve harmonik bileşenlerin zamana bağlı değişimleri doğrudan elde edilemediğinden, harmonik spektrumlarındaki genlik ve faz bilgileri MATLAB programı üzerinde değerlendirilerek deneysel ölçümlere ilişkin istenen sonuçlar elde edilebilmiştir.

### 5.1.1. Bir fazlı yarım dalga kontrolsüz doğrultucu uygulama devresi

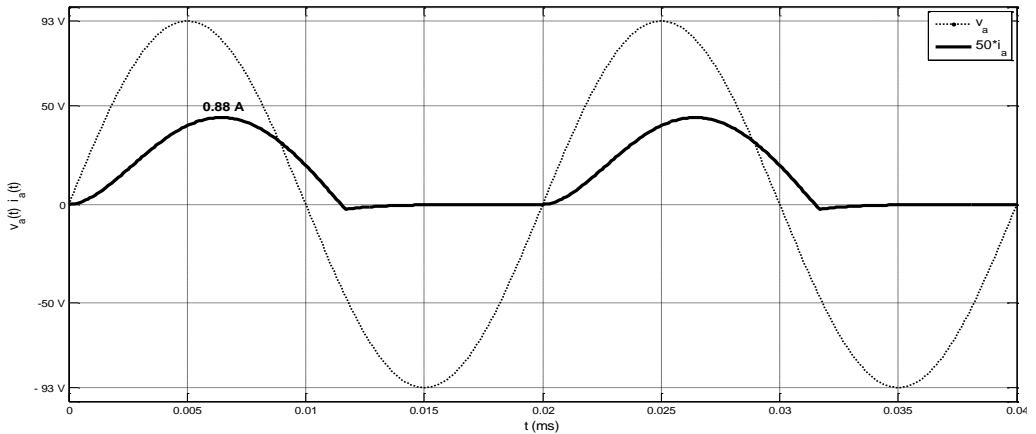
Bir fazlı yarım dalga kontrolsüz doğrultucu devresine ait benzetim sonuçları ve deneysel sonuçlar sırasıyla Şekil 5.3 ve Şekil 5.4'de verilmiştir.



(a)

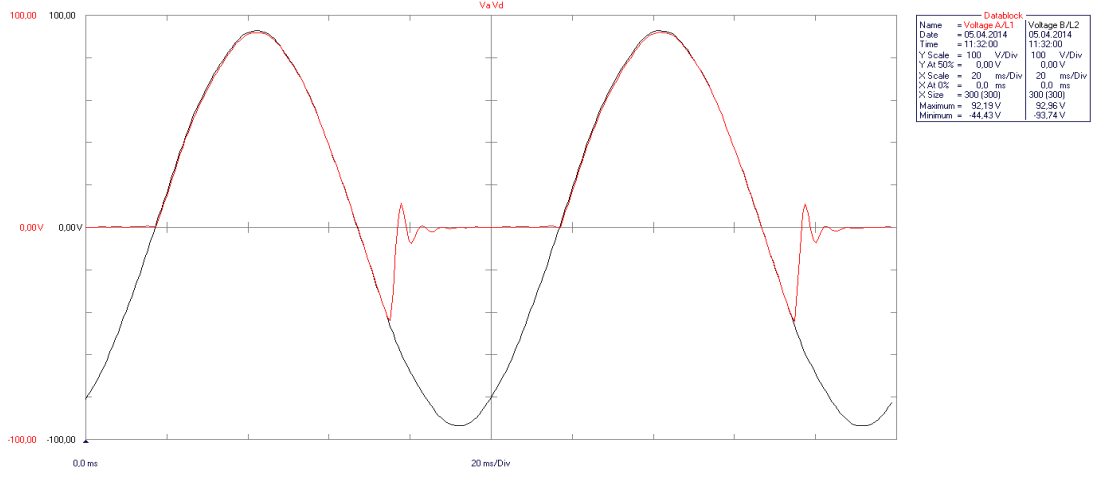


(b)

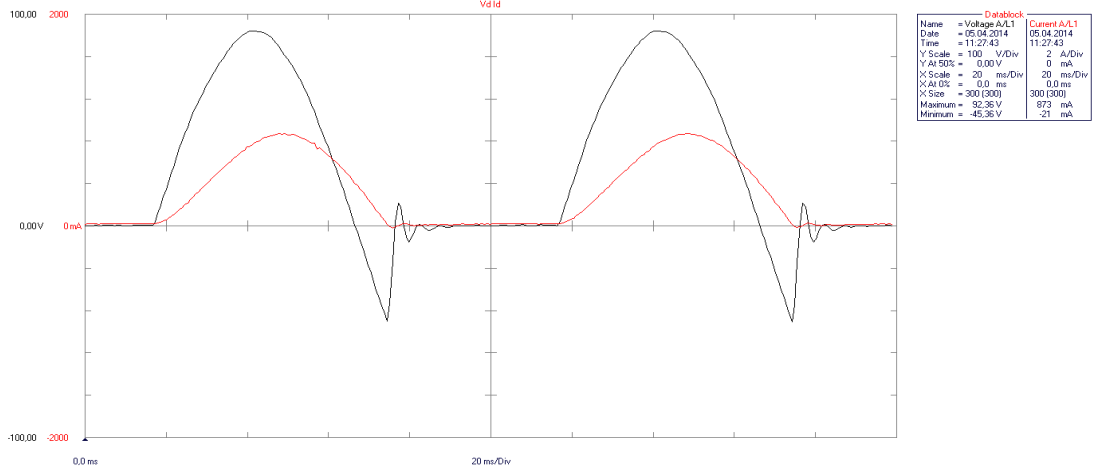


(c)

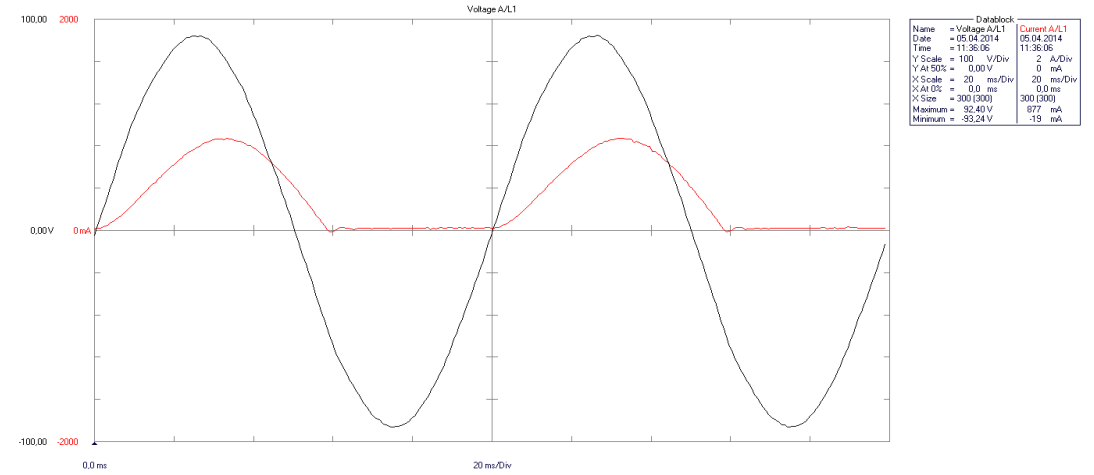
Şekil 5.3. Bir fazlı yarım dalga kontrolsüz doğrultucu devresine ait benzetim sonuçları a) giriş gerilimi  $v_a(t)$  ve çıkış gerilimi  $v_d(t)$ , b) çıkış gerilimi  $v_d(t)$  ve çıkış akımı  $i_d(t)$ , c) giriş gerilimi  $v_a(t)$  ve giriş akımı  $i_a(t)$



(a)



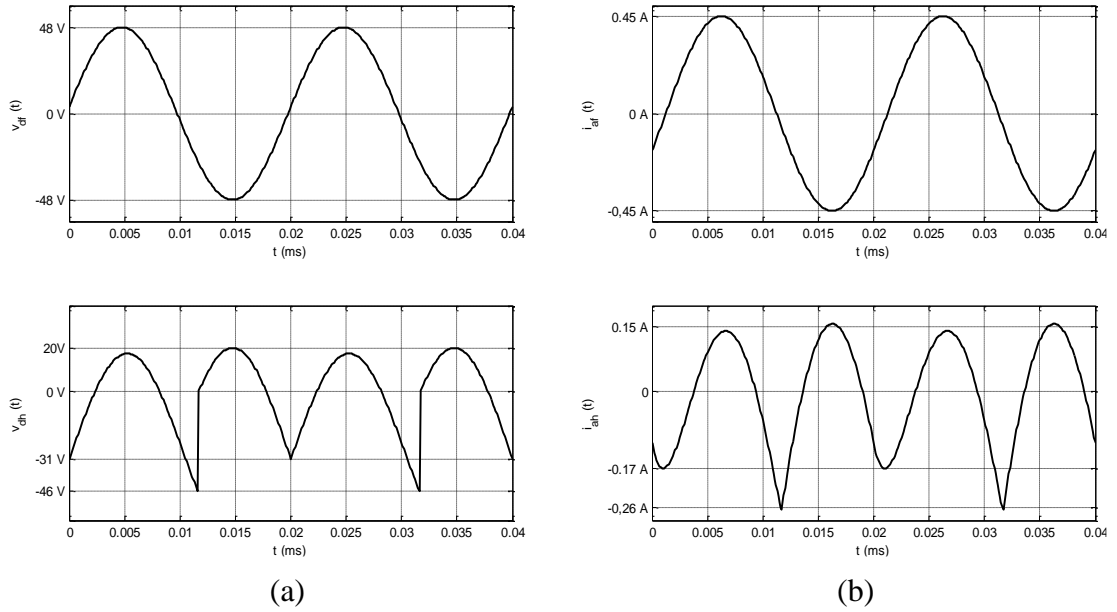
(b)



(c)

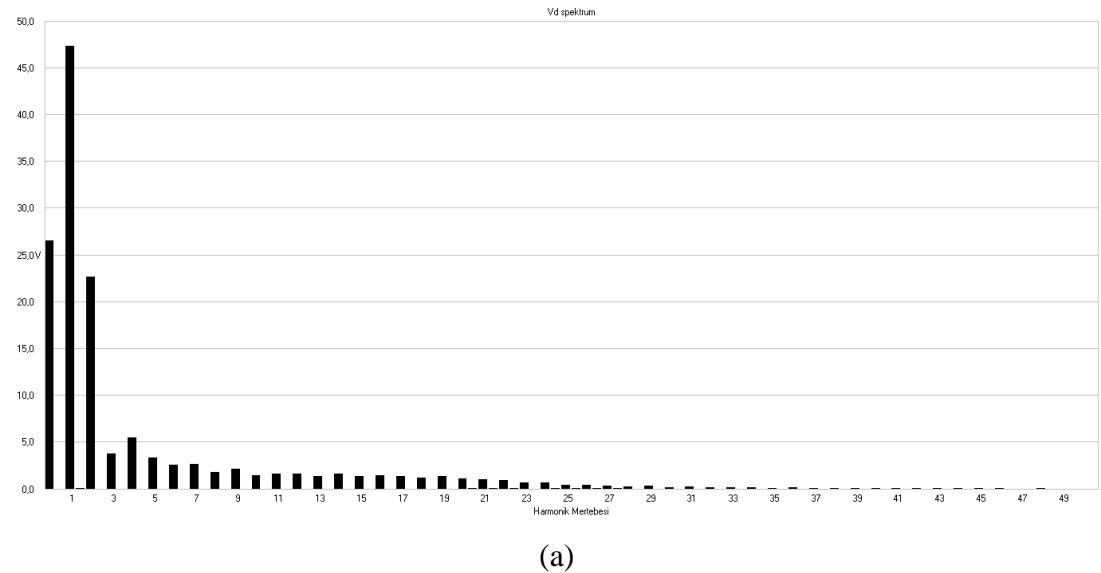
Şekil 5.4. Bir fazlı yarı dalg kontrolsüz doğrultucu devresine ait deneysel sonuçlar  
a) giriş gerilimi  $v_a(t)$  ve çıkış gerilimi  $v_d(t)$ , b) çıkış gerilimi  $v_d(t)$  ve çıkış akımı  $i_d(t)$ ,  
c) giriş gerilimi  $v_a(t)$  ve giriş akımı  $i_a(t)$

Giriş akımı  $i_a(t)$  ve çıkış gerilimi  $v_d(t)$ 'e ait, eşdeğer devre modellerinden elde edilen temel bileşen ve harmonik bileşen büyüklükleri Şekil 5.5'de verilmiştir.

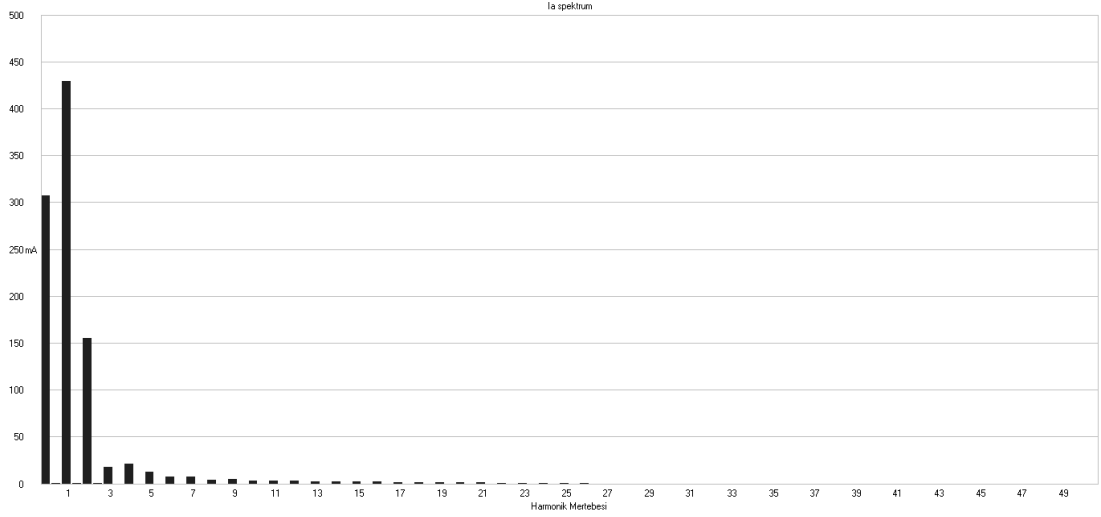


Şekil 5.5. Bir fazlı yarım dalga kontrolsüz doğrultucunun eşdeğer devresine ait a) çıkış gerilimi temel bileşeni  $v_{df}(t)$  ve harmonik bileşeni  $v_{dh}(t)$ , b) giriş akımı temel bileşeni  $i_{af}(t)$  ve harmonik bileşeni  $i_{ah}(t)$

Giriş akımı  $i_a(t)$  ve çıkış gerilimi  $v_d(t)$ 'e ait, deneysel olarak ölçülen harmonik spektrumlar Şekil 5.6'da verilmiştir.



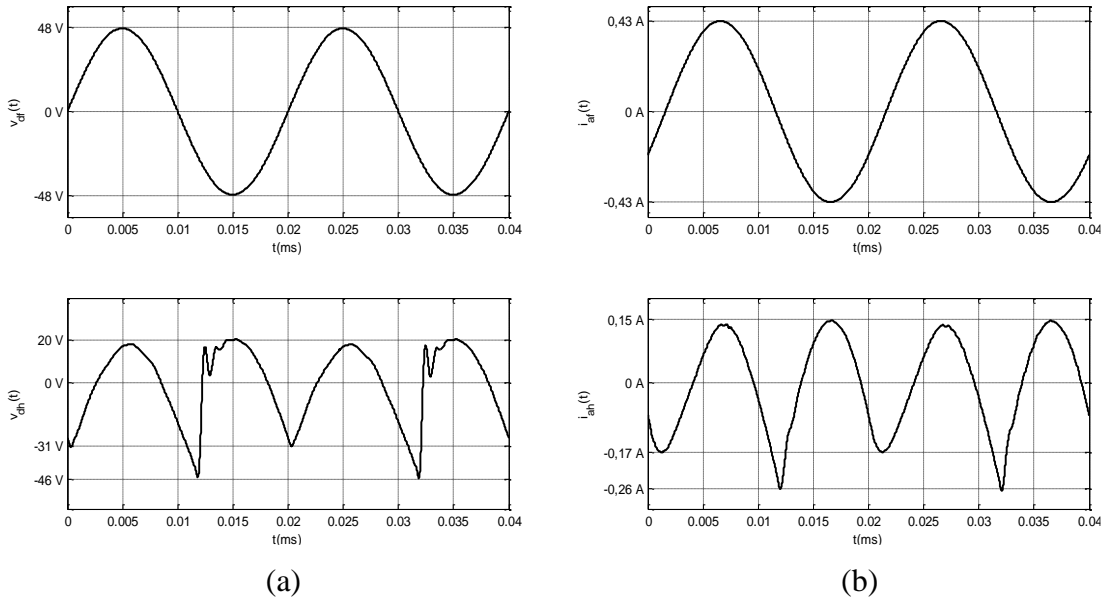
Şekil 5.6. Bir fazlı yarım dalga kontrolsüz doğrultucuya ait a)  $v_d(t)$  harmonik spektrumu b)  $i_a(t)$  harmonik spektrumu



(b)

Şekil 5.6. (Devam) Bir fazlı yarım dalga kontrolsüz doğrultucuya ait a)  $v_d(t)$  harmonik spektrumu b)  $i_a(t)$  harmonik spektrumu

Bu spektrumlara dayalı olarak elde edilen giriş akımı  $i_a(t)$  ile çıkış gerilimi  $v_d(t)$ 'nin deneysel temel bileşen ve harmonik bileşen büyüklükleri Şekil 5.7'de verilmiştir.



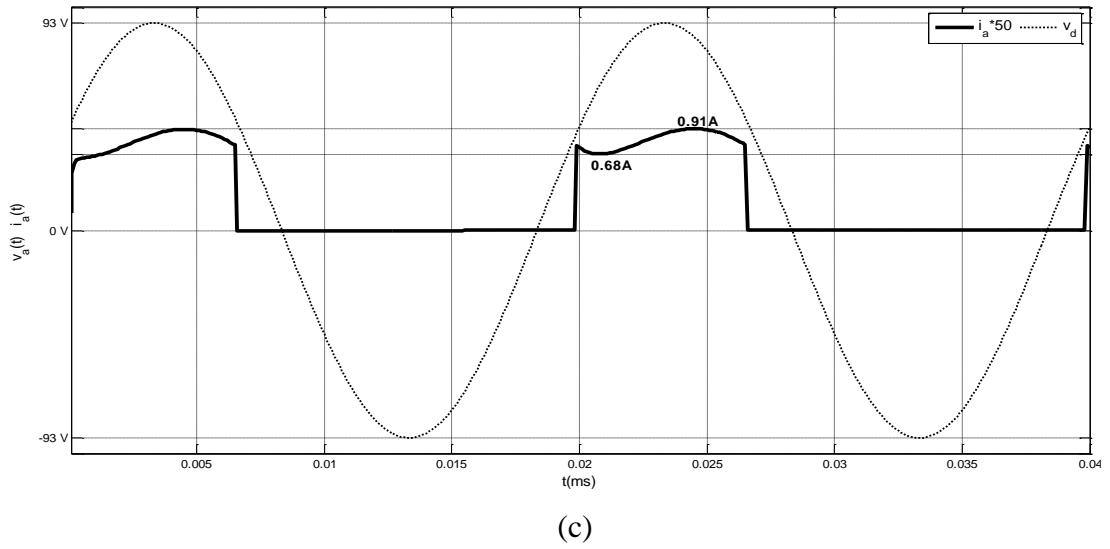
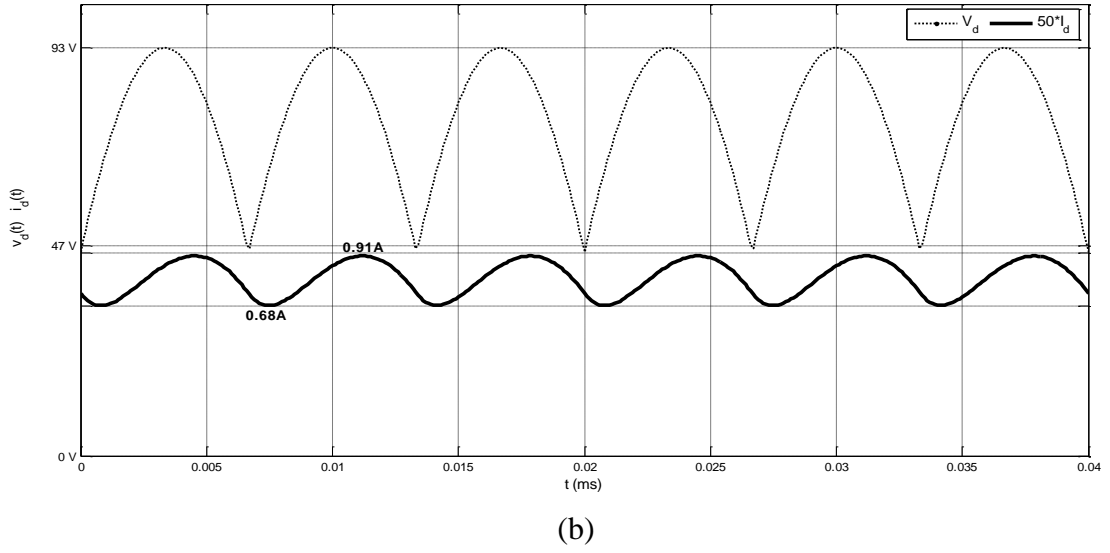
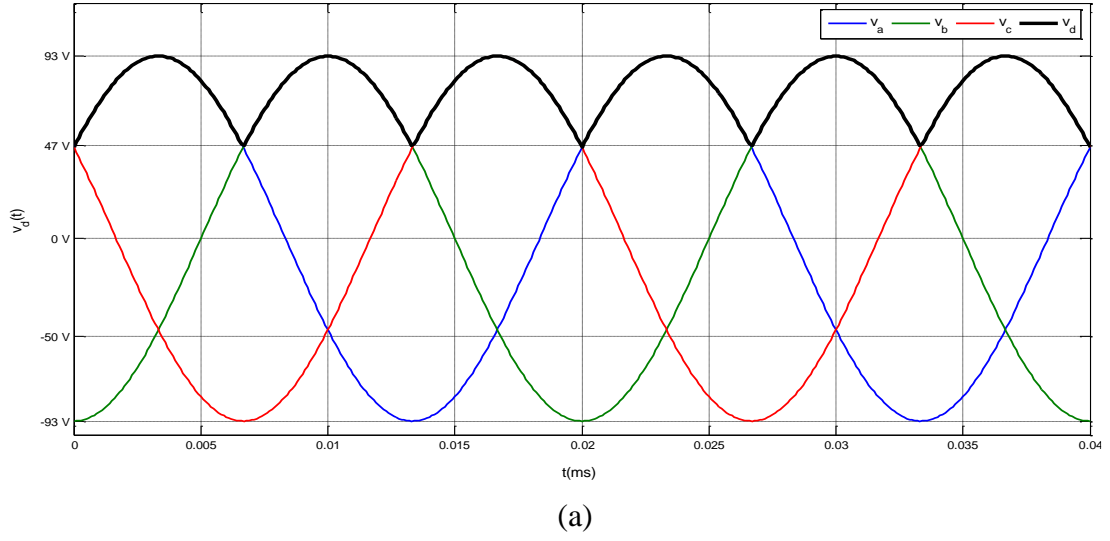
(a)

(b)

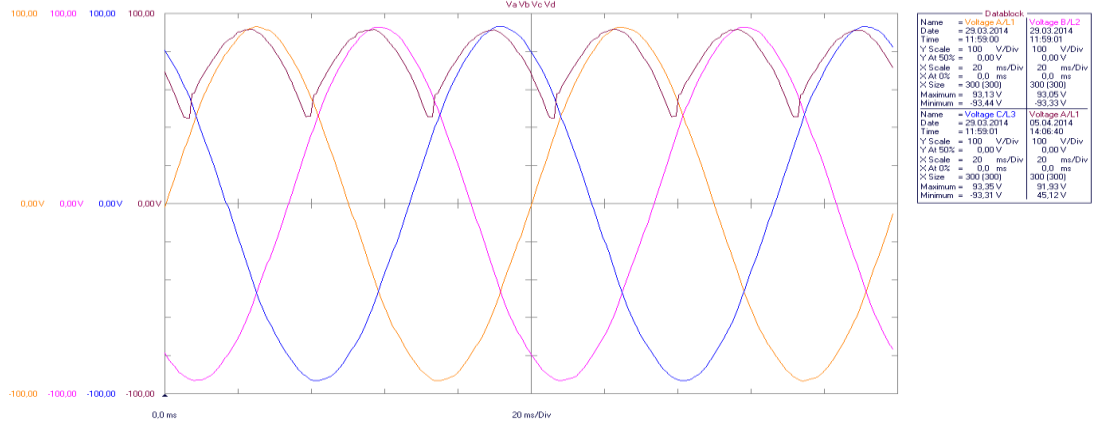
Şekil 5.7. Bir fazlı yarım dalga kontrolsüz doğrultucunun deneysel sonuçlarına ait a) çıkış gerilimi temel bileşeni  $v_{df}(t)$  ve harmonik bileşeni  $v_{dh}(t)$ , b) giriş akımı temel bileşeni  $i_{af}(t)$  ve harmonik bileşeni  $i_{ah}(t)$

### 5.1.2. Üç fazlı yarım dalga kontrolsüz doğrultucu uygulama devresi

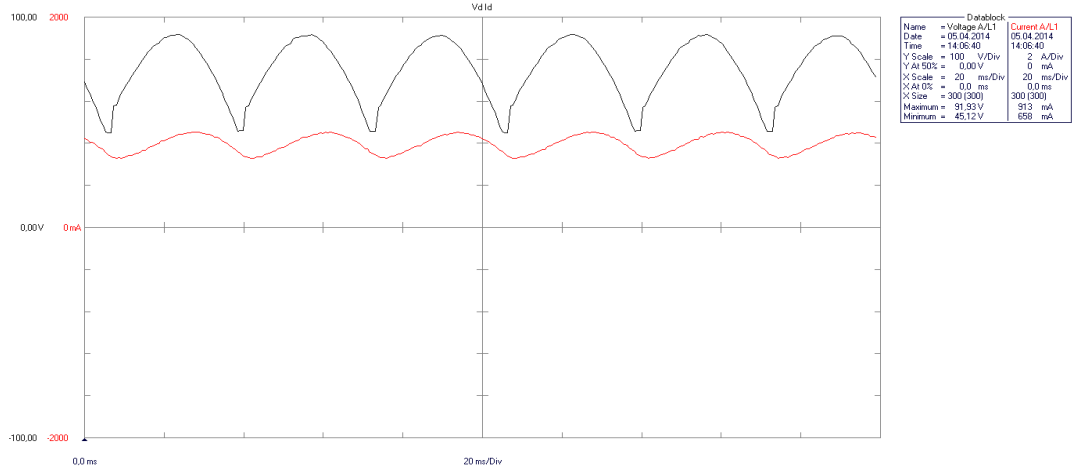
Üç fazlı yarım dalga kontrolsüz doğrultucu devresine ait benzetim sonuçları ve deneysel sonuçlar sırasıyla Şekil 5.8 ve Şekil 5.9'da verilmiştir.



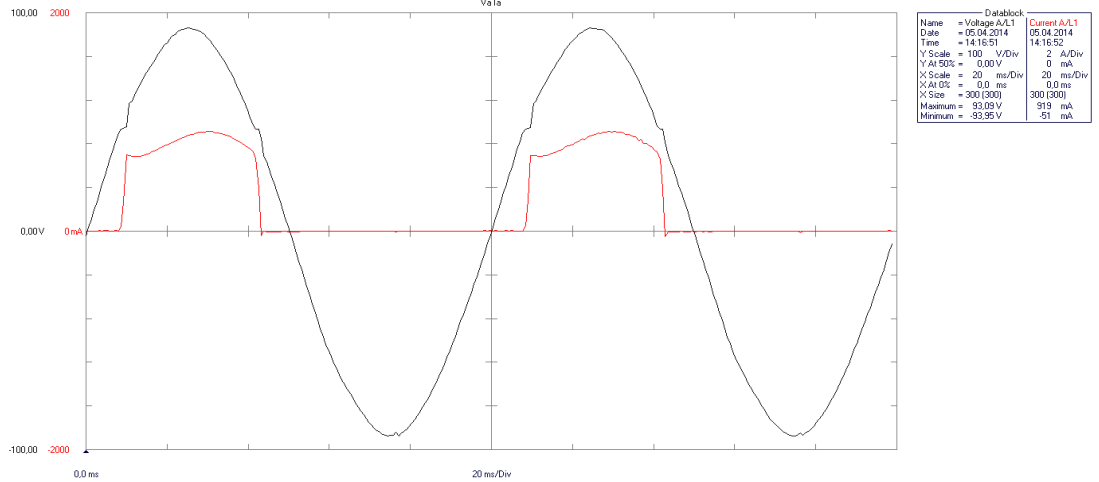
Şekil 5.8. Üç fazlı yarım dalga kontrolsüz doğrultucu devresine ait benzetim sonuçları  
a) giriş gerilimleri  $v_a(t)$ ,  $v_b(t)$ ,  $v_c(t)$  ve çıkış gerilimi  $v_d(t)$ , b) çıkış gerilimi  $v_d(t)$  ve çıkış akımı  $i_d(t)$ , c) giriş gerilimi  $v_a(t)$  ve giriş akımı  $i_a(t)$



(a)



(b)

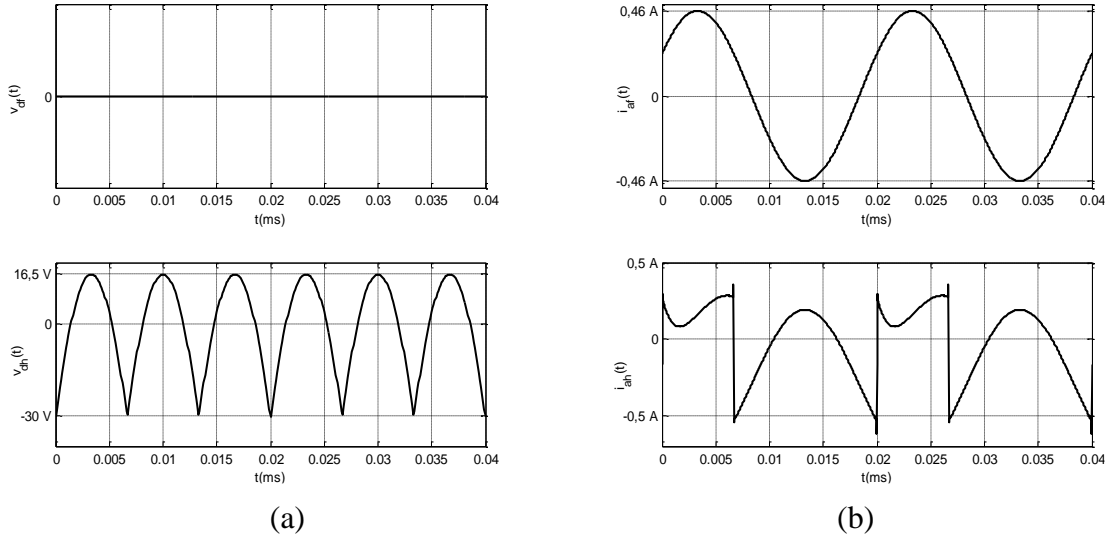


(c)

Şekil 5.9. Üç fazlı yarım dalga kontrolsüz doğrultucu devresine ait deneysel sonuçlar  
a) giriş gerilimi  $v_a(t)$ ,  $v_b(t)$ ,  $v_c(t)$  ve çıkış gerilimi  $v_d(t)$ , b) çıkış gerilimi  $v_d(t)$  ve çıkış akımı  $i_d(t)$ , c) giriş gerilimi  $v_a(t)$  ve giriş akımı  $i_a(t)$

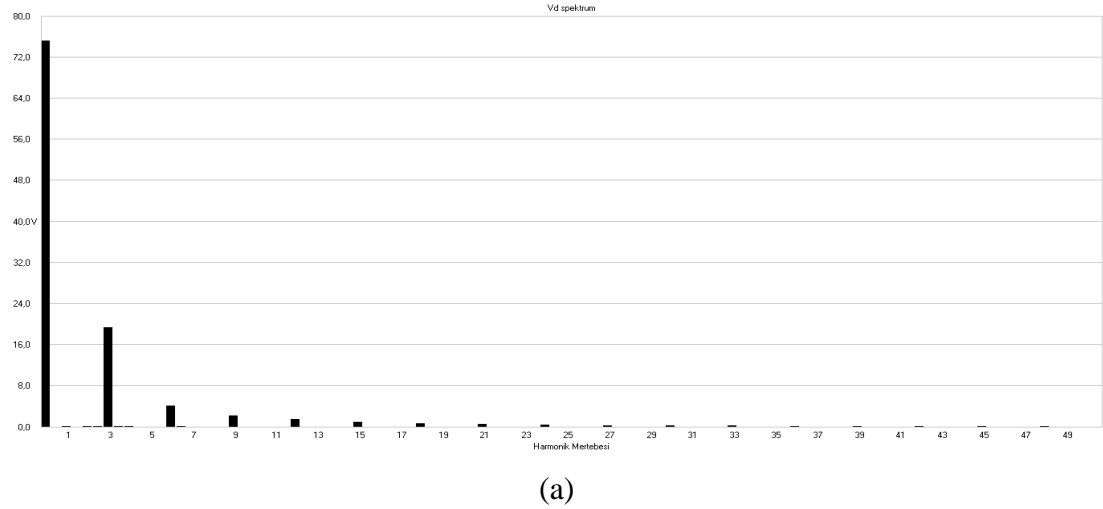


Giriş akımı  $i_a(t)$  ve çıkış gerilimi  $v_d(t)$ 'e ait, eşdeğer devre modellerinden elde edilen temel bileşen ve harmonik bileşen büyüklükleri Şekil 5.10'da verilmiştir.

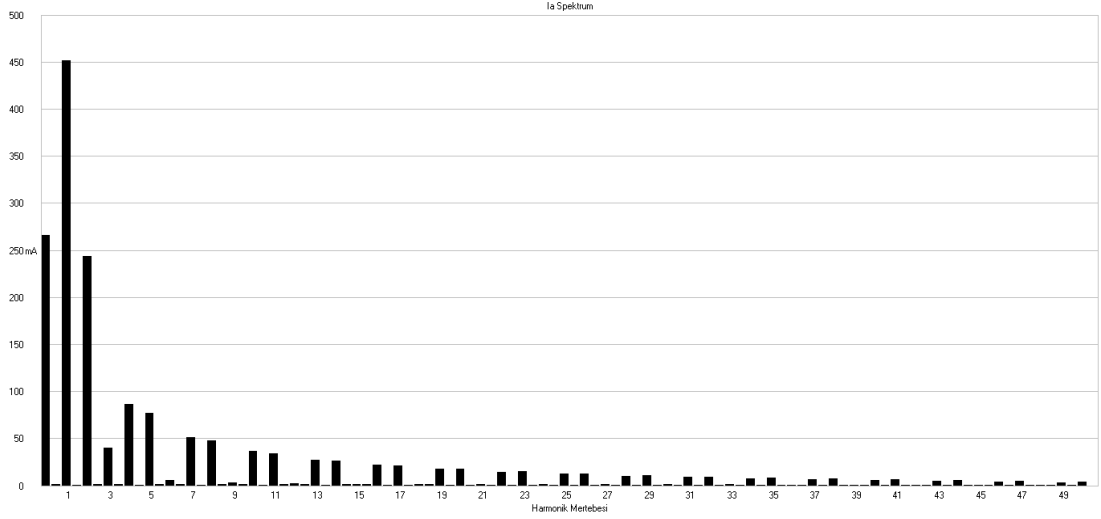


Şekil 5.10. Üç fazlı yarım dalga kontrolsüz doğrultucunun eşdeğer devresine ait a) çıkış gerilimi temel bileşeni  $v_{df}(t)$  ve harmonik bileşeni  $v_{dh}(t)$ , b) giriş akımı temel bileşeni  $i_{af}(t)$  ve harmonik bileşeni  $i_{ah}(t)$

Giriş akımı  $i_a(t)$  ve çıkış gerilimi  $v_d(t)$ 'e ait, deneysel olarak ölçülen harmonik spektrumlar Şekil 5.11'de verilmiştir.



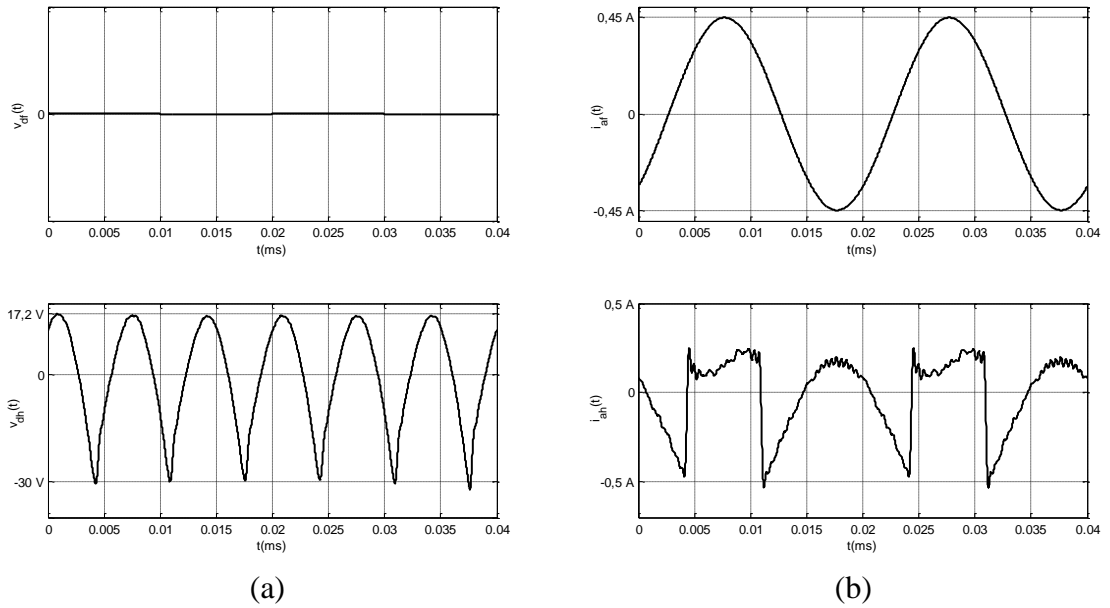
Şekil 5.11. Üç fazlı yarım dalga kontrolsüz doğrultucuya ait a)  $v_d(t)$  harmonik spektrumu b)  $i_a(t)$  harmonik spektrumu



(b)

Şekil 5.11. (Devam) Üç fazlı yarım dalga kontrolsüz doğrultucuya ait a)  $v_d(t)$  harmonik spektrumu b)  $i_a(t)$  harmonik spektrumu

Bu spektrumlara dayalı olarak elde edilen giriş akımı  $i_a(t)$  ile çıkış gerilimi  $v_d(t)$ 'nin deneysel temel bileşen ve harmonik bileşen büyüklükleri Şekil 5.12'de verilmiştir.



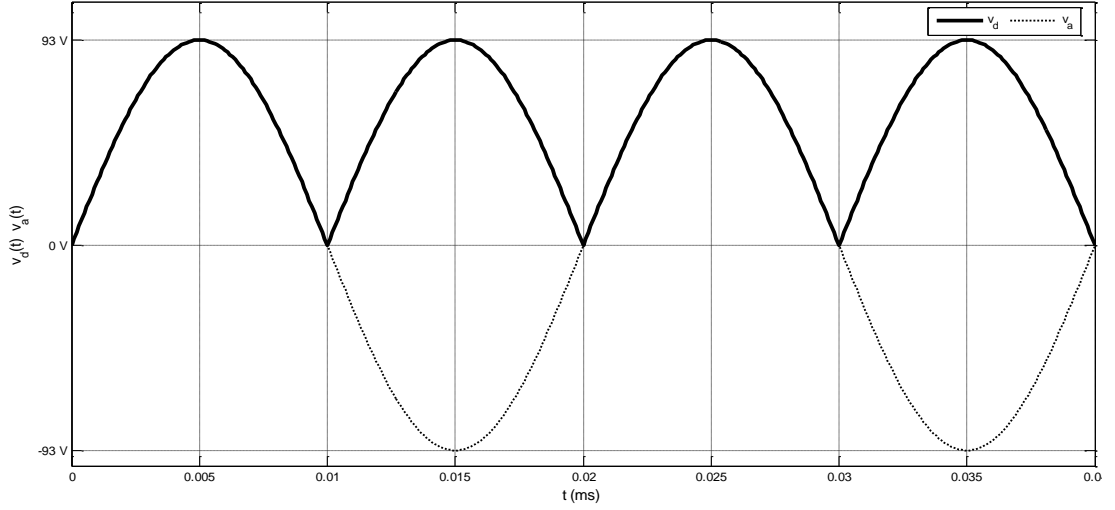
(a)

(b)

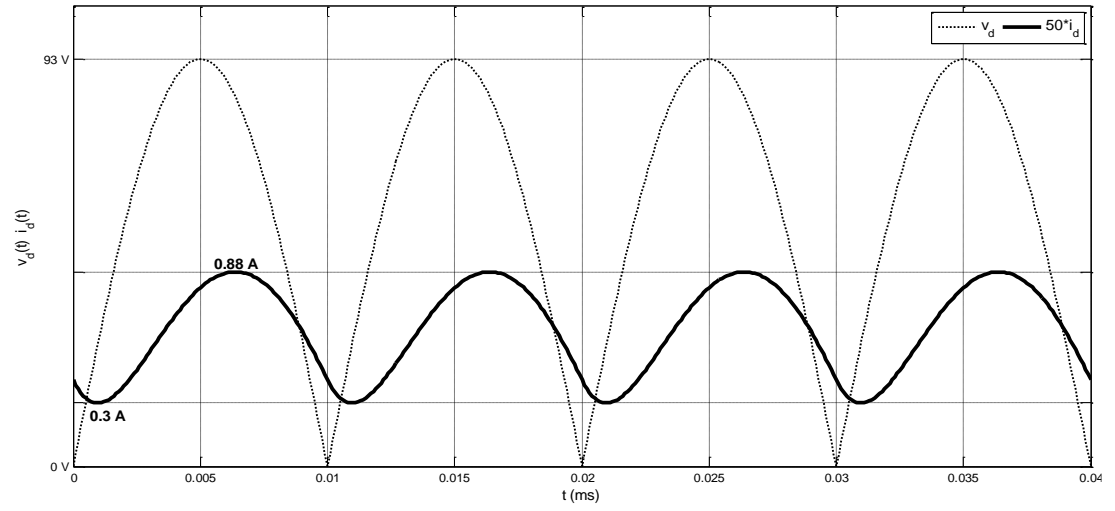
Şekil 5.12. Üç fazlı yarım dalga kontrolsüz doğrultucunun deneysel sonuçlarına ait a) çıkış gerilimi temel bileşeni  $v_{df}(t)$  ve harmonik bileşeni  $v_{dh}(t)$ , b) giriş akımı temel bileşeni  $i_{af}(t)$  ve harmonik bileşeni  $i_{ah}(t)$

### 5.1.3. Bir fazlı tam dalga kontrolsüz doğrultucu uygulama devresi

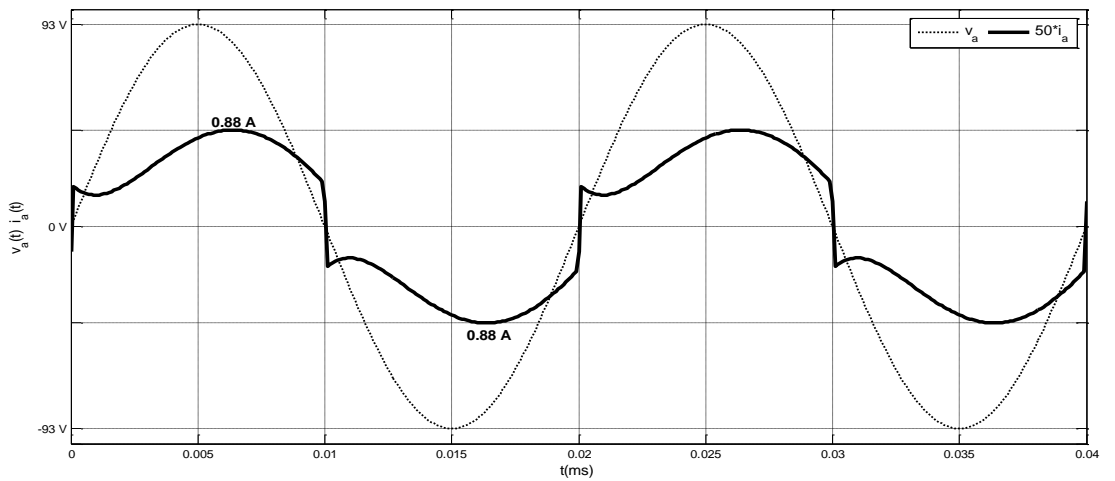
Bir fazlı tam dalga kontrolsüz doğrultucu devresine ait benzetim sonuçları ve deneysel sonuçlar sırasıyla Şekil 5.13 ve Şekil 5.14'de verilmiştir.



(a)

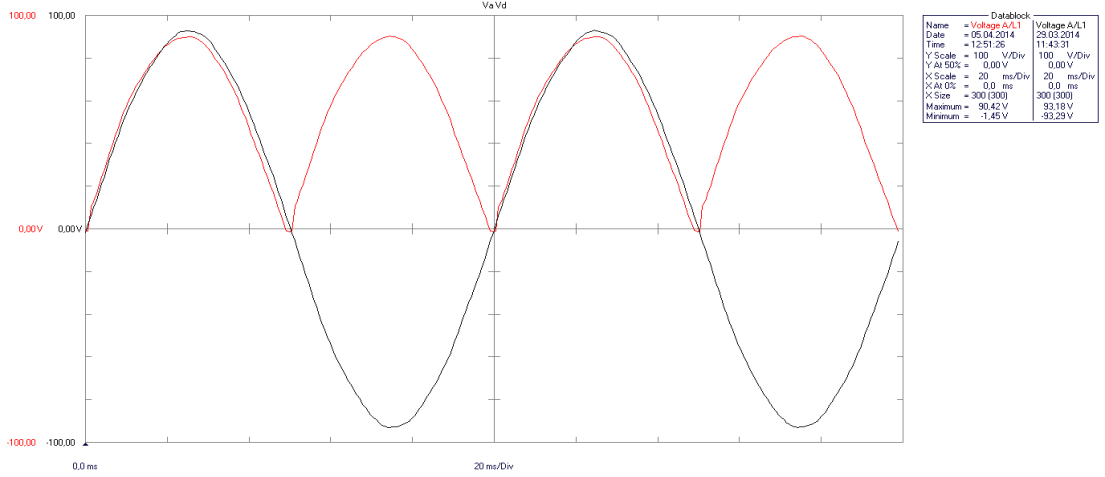


(b)

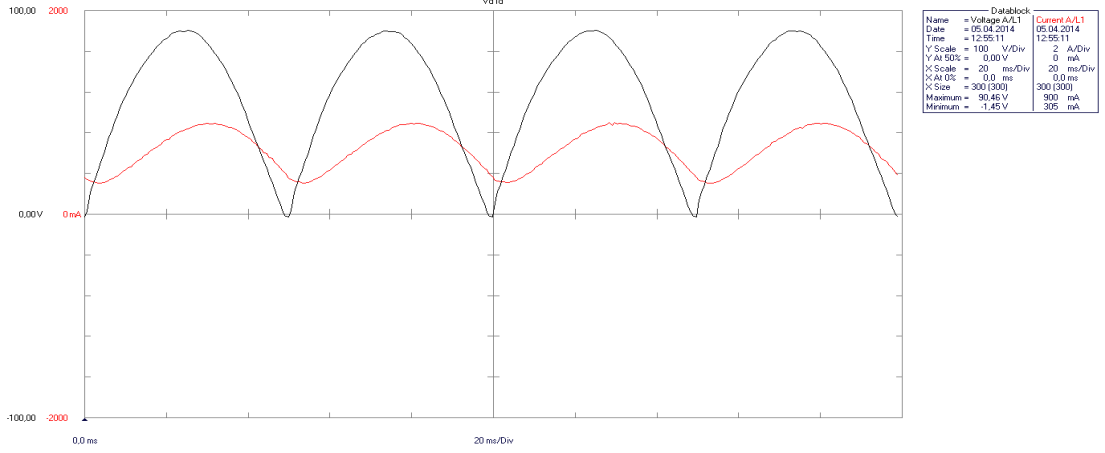


(c)

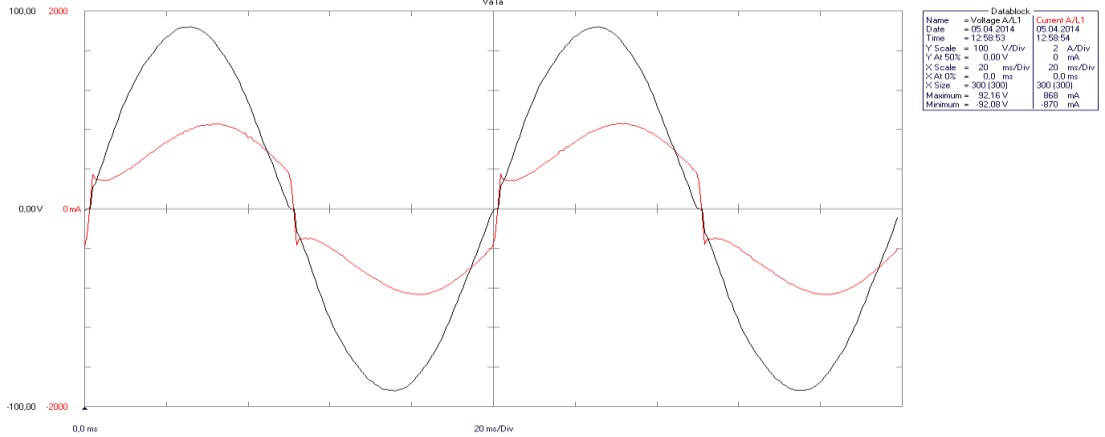
Şekil 5.13. Bir fazlı tam dalga kontrolsüz doğrultucu devresine ait benzetim sonuçları  
a) giriş gerilimi  $v_a(t)$  ve çıkış gerilimi  $v_d(t)$ , b) çıkış gerilimi  $v_d(t)$  ve çıkış akımı  $i_d(t)$ ,  
c) giriş gerilimi  $v_a(t)$  ve giriş akımı  $i_a(t)$



(a)



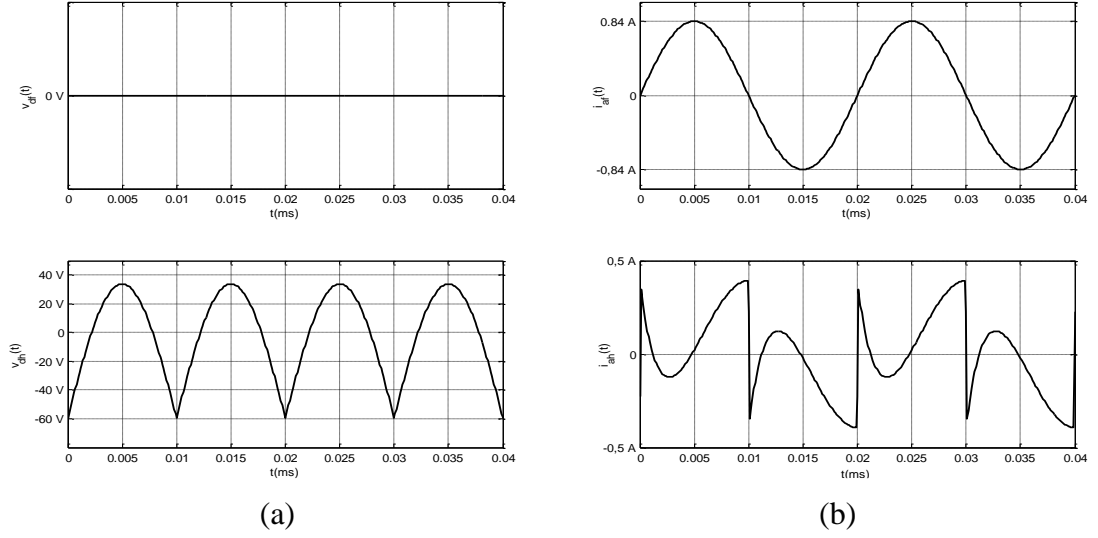
(b)



(c)

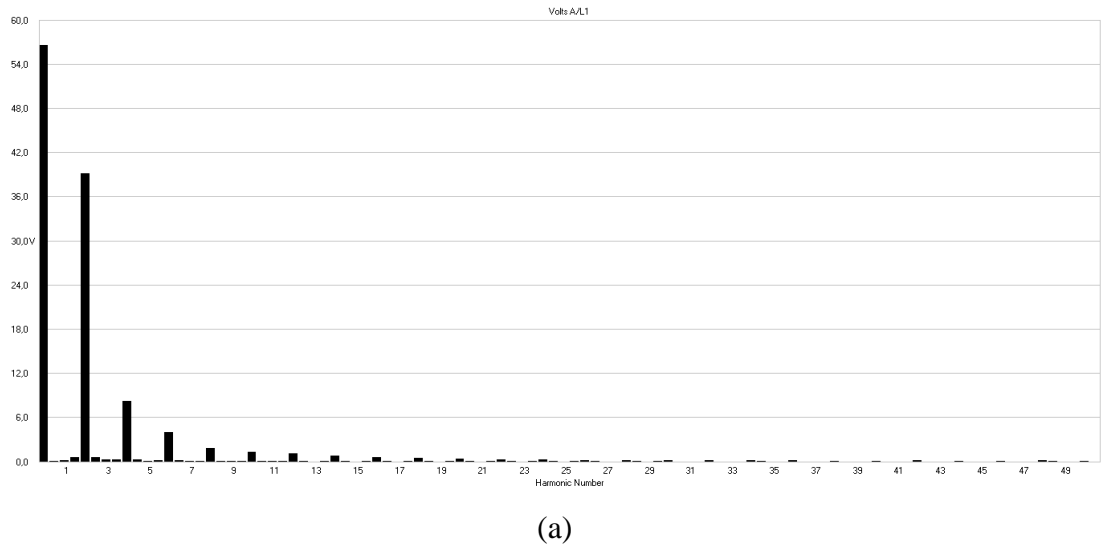
Şekil 5.14. Bir fazlı tam dalga kontrolsüz doğrultucu devresine ait deneysel sonuçlar  
a) giriş gerilimi  $v_a(t)$  ve çıkış gerilimi  $v_d(t)$ , b) çıkış gerilimi  $v_d(t)$  ve çıkış akımı  $i_d(t)$ ,  
c) giriş gerilimi  $v_a(t)$  ve giriş akımı  $i_a(t)$

Giriş akımı  $i_a(t)$  ve çıkış gerilimi  $v_d(t)$ 'e ait, eşdeğer devre modellerinden elde edilen temel bileşen ve harmonik bileşen büyüklükleri Şekil 5.15'de verilmiştir.

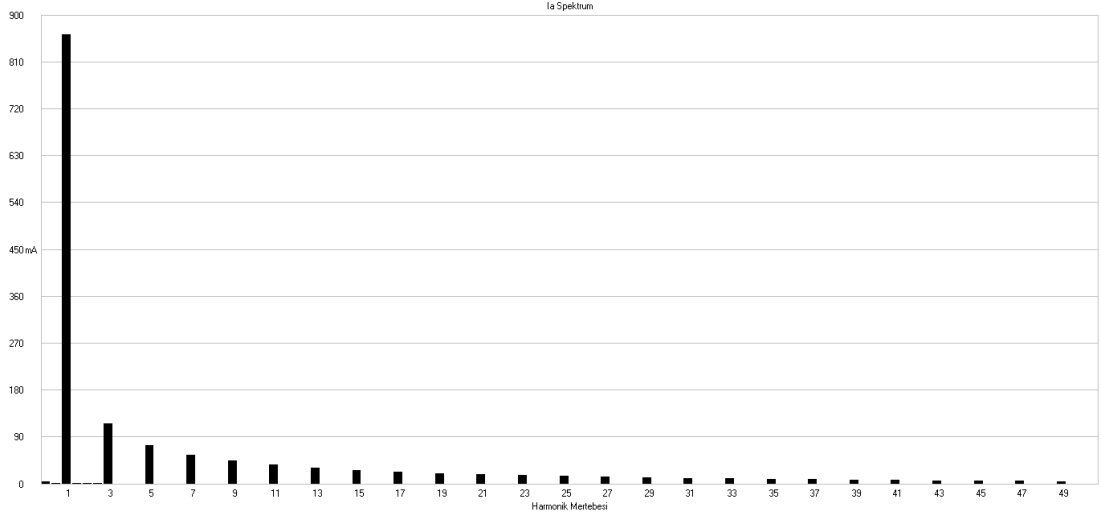


Şekil 5.15. Bir fazlı tam dalga kontrolsüz doğrultucunun eşdeğer devresine ait a) çıkış gerilimi temel bileşeni  $v_{df}(t)$  ve harmonik bileşeni  $v_{dh}(t)$ , b) giriş akımı temel bileşeni  $i_{af}(t)$  ve harmonik bileşeni  $i_{ah}(t)$

Giriş akımı  $i_a(t)$  ve çıkış gerilimi  $v_d(t)$ 'e ait, deneysel olarak ölçülen harmonik spektrumlar Şekil 5.16'da verilmiştir.



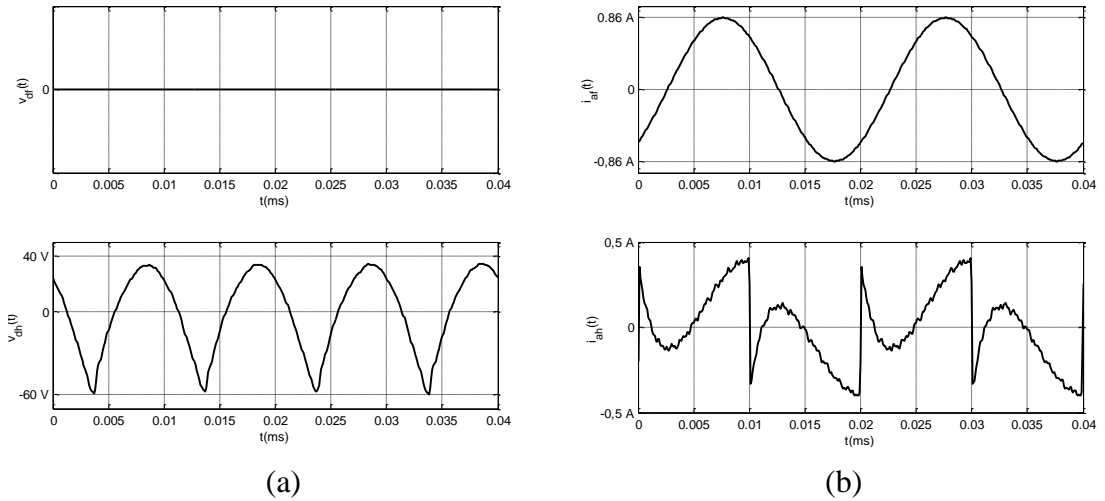
Şekil 5.16. Bir fazlı tam dalga kontrolsüz doğrultucuya ait a)  $v_d(t)$  harmonik spektrumu b)  $i_a(t)$  harmonik spektrumu



(b)

Şekil 5.16. (Devam) Bir fazlı tam dalga kontrolsüz doğrultucuya ait a)  $v_d(t)$  harmonik spektrumu b)  $i_a(t)$  harmonik spektrumu

Bu spektrumlara dayalı olarak elde edilen giriş akımı  $i_a(t)$  ile çıkış gerilimi  $v_d(t)$ 'nin deneysel temel bileşen ve harmonik bileşen büyüklükleri Şekil 5.17'de verilmiştir.



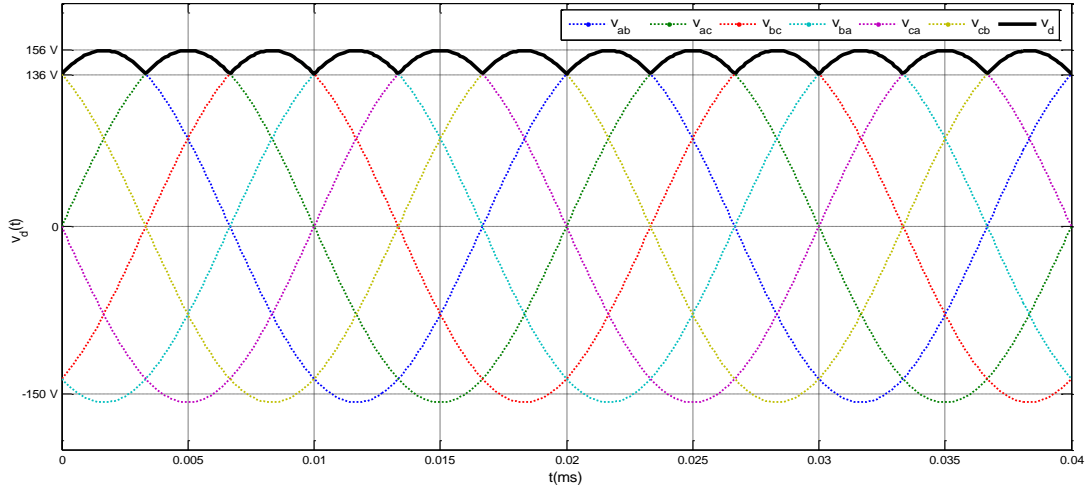
(a)

(b)

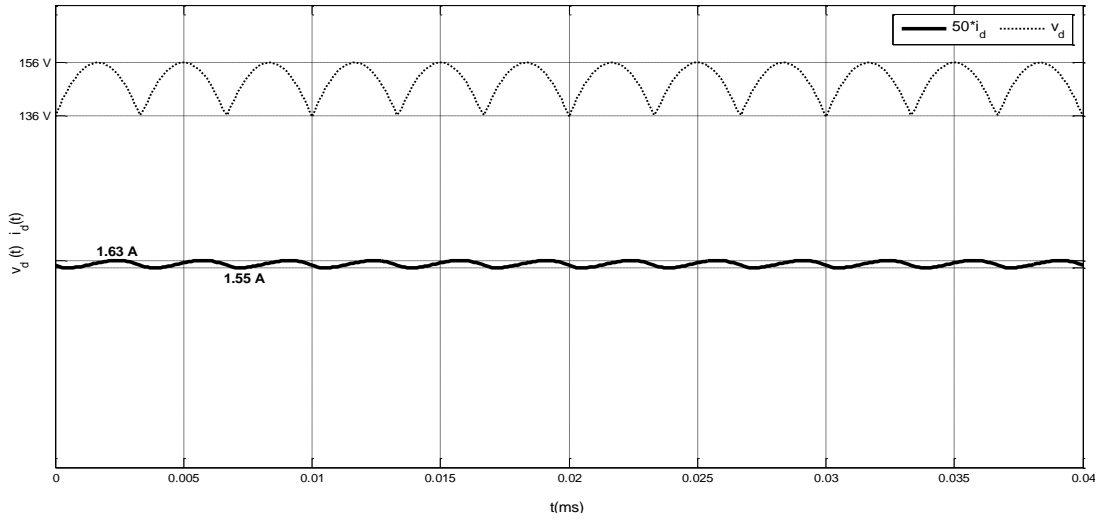
Şekil 5.17. Bir fazlı tam dalga kontrolsüz doğrultucunun deneysel sonuçlarına ait a) çıkış gerilimi temel bileşeni  $v_{df}(t)$  ve harmonik bileşeni  $v_{dh}(t)$ , b) giriş akımı temel bileşeni  $i_{af}(t)$  ve harmonik bileşeni  $i_{ah}(t)$

#### 5.1.4. Üç fazlı tam dalga kontrolsüz doğrultucu devresi

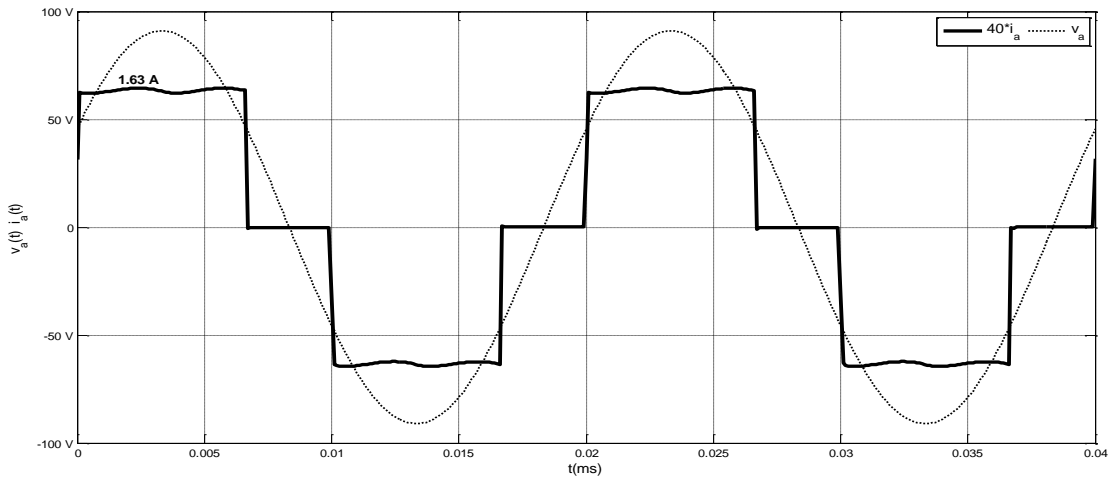
Üç fazlı tam dalga kontrolsüz doğrultucu devresine ait benzetim sonuçları ve deneysel sonuçlar sırasıyla Şekil 5.18 ve Şekil 5.19'da verilmiştir.



(a)

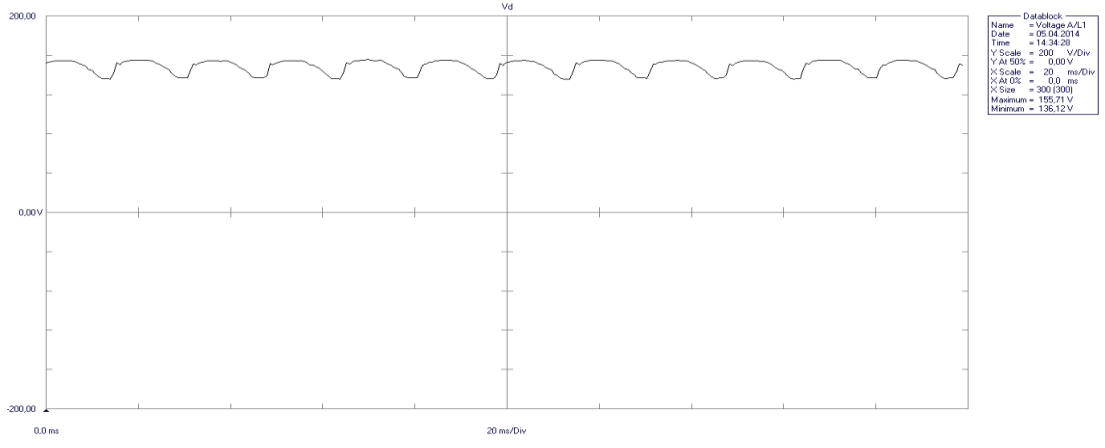


(b)

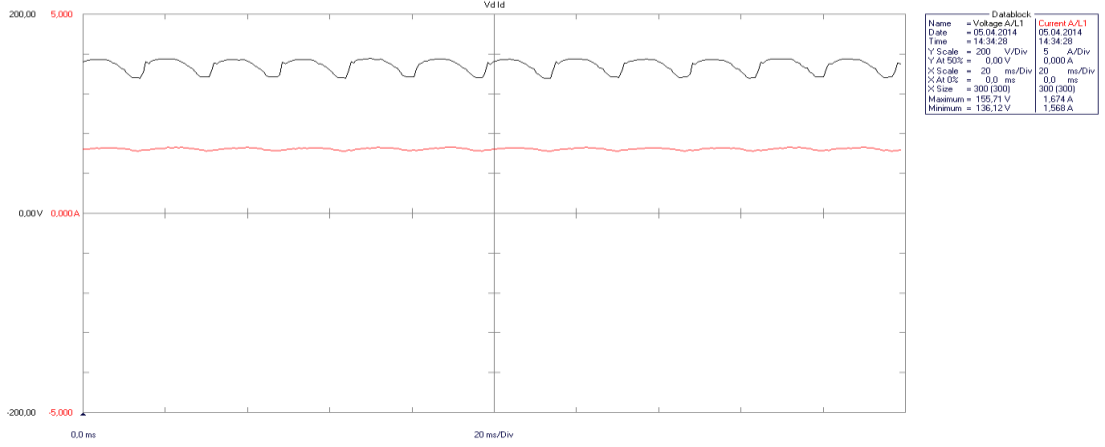


(c)

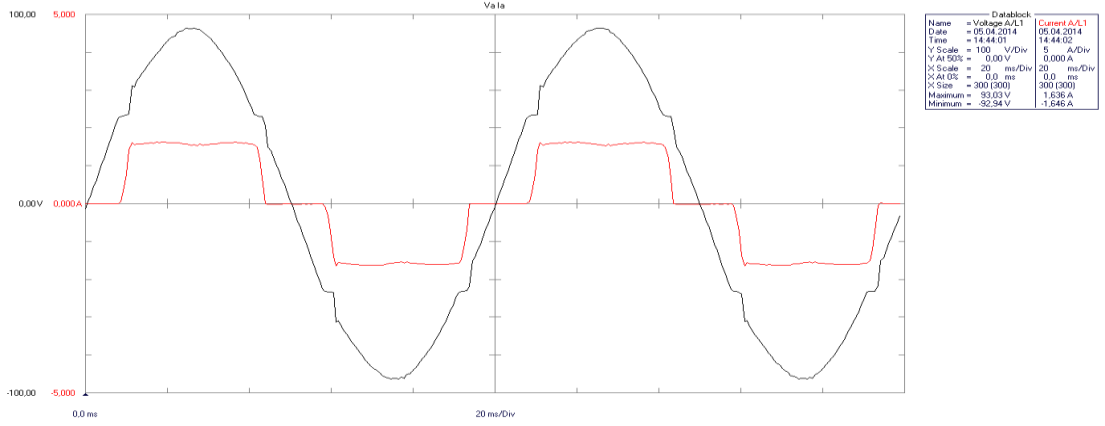
Şekil 5.18. Üç fazlı tam dalga kontrolsüz doğrultucu devresine ait benzetim sonuçları  
a) giriş gerilimleri ve çıkış gerilimi  $v_d(t)$ , b) çıkış gerilimi  $v_d(t)$  ve çıkış akımı  $i_d(t)$ ,  
c) giriş gerilimi  $v_a(t)$  ve giriş akımı  $i_a(t)$



(a)



(b)

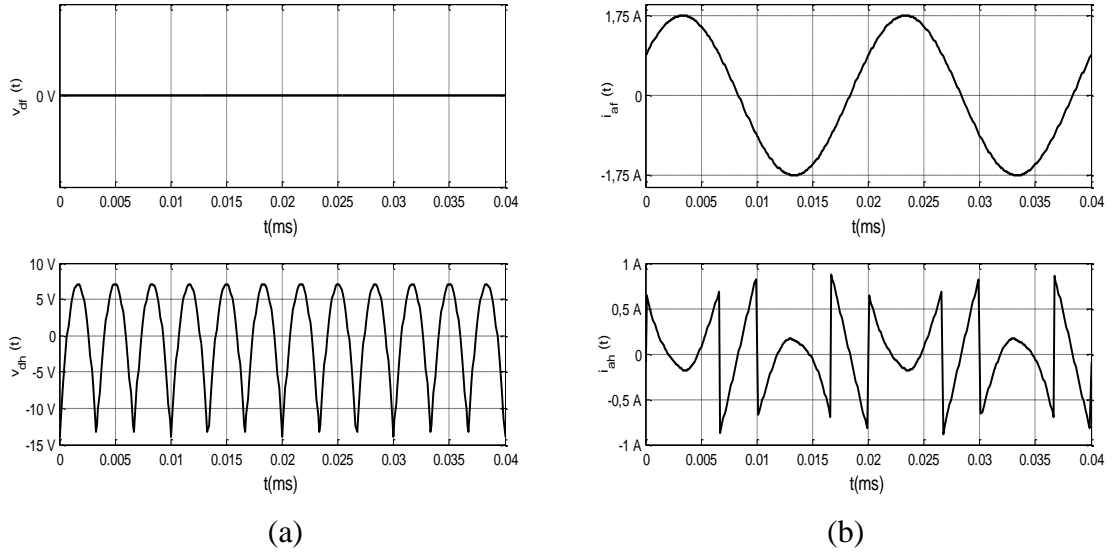


(c)

Şekil 5.19. Üç fazlı tam dalga kontrolsüz doğrultucu devresine ait deneysel sonuçlar a) çıkış gerilimi  $v_d(t)$ , b) çıkış gerilimi  $v_d(t)$  ve çıkış akımı  $i_d(t)$ , c) giriş gerilimi  $v_a(t)$  ve giriş akımı  $i_a(t)$

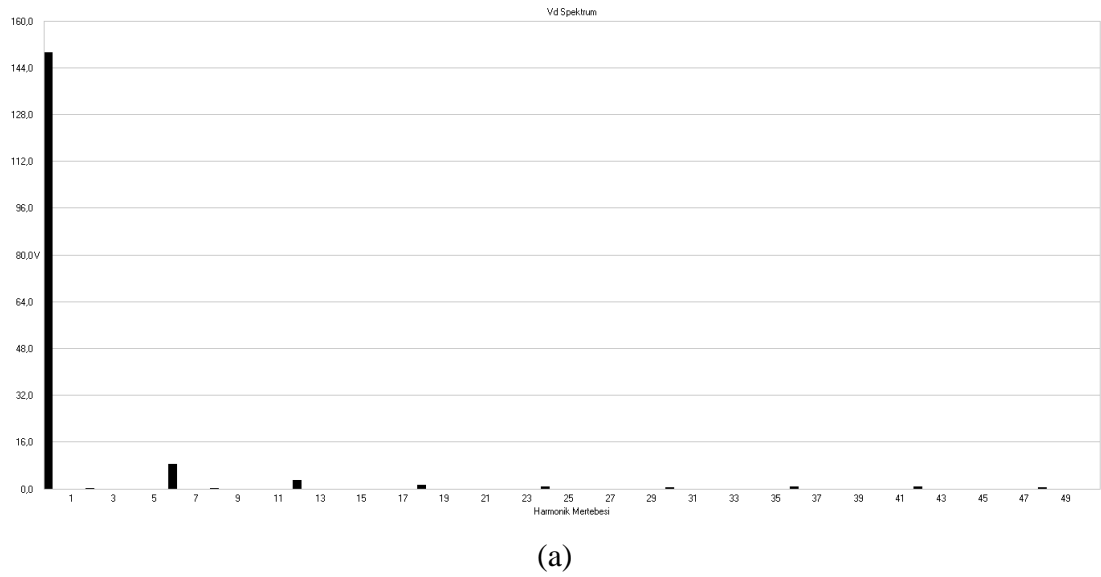
Giriş akımı  $i_a(t)$  ve çıkış gerilimi  $v_d(t)$ 'e ait, eşdeğer devre modellerinden elde edilen temel bileşen ve harmonik bileşen büyüklükleri Şekil 5.20'de verilmiştir.



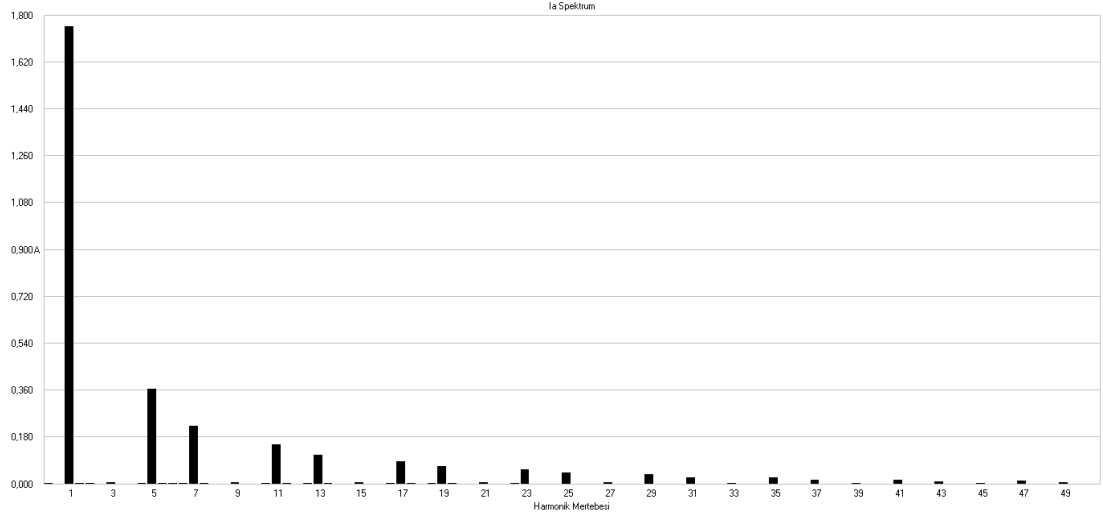


Şekil 5.20. Üç fazlı tam dalga kontrolsüz doğrultucunun eşdeğer devresine ait a) çıkış gerilimi temel bileşeni  $v_{df}(t)$  ve harmonik bileşeni  $v_{dh}(t)$ , b) giriş akımı temel bileşeni  $i_{af}(t)$  ve harmonik bileşeni  $i_{ah}(t)$

Giriş akımı  $i_a(t)$  ve çıkış gerilimi  $v_d(t)$ 'e ait, deneysel olarak ölçülen harmonik spektrumlar Şekil 5.21'de verilmiştir.



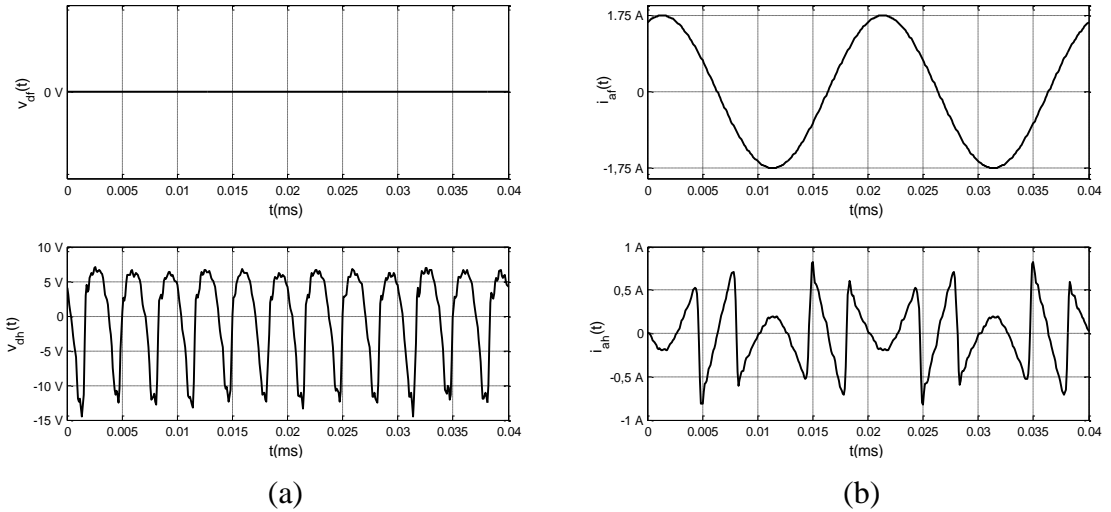
Şekil 5.21. Üç fazlı tam dalga kontrolsüz doğrultucuya ait a)  $v_d(t)$  harmonik spektrumu b)  $i_a(t)$  harmonik spektrumu



(b)

Şekil 5.21. (Devam) Üç fazlı tam dalga kontrolsüz doğrultucuya ait a)  $v_d(t)$  harmonik spektrumu b)  $i_a(t)$  harmonik spektrumu

Bu spektrumlara dayalı olarak elde edilen giriş akımı  $i_a(t)$  ile çıkış gerilimi  $v_d(t)$ 'nin deneysel temel bileşen ve harmonik bileşen büyüklükleri Şekil 5.22'de verilmiştir.



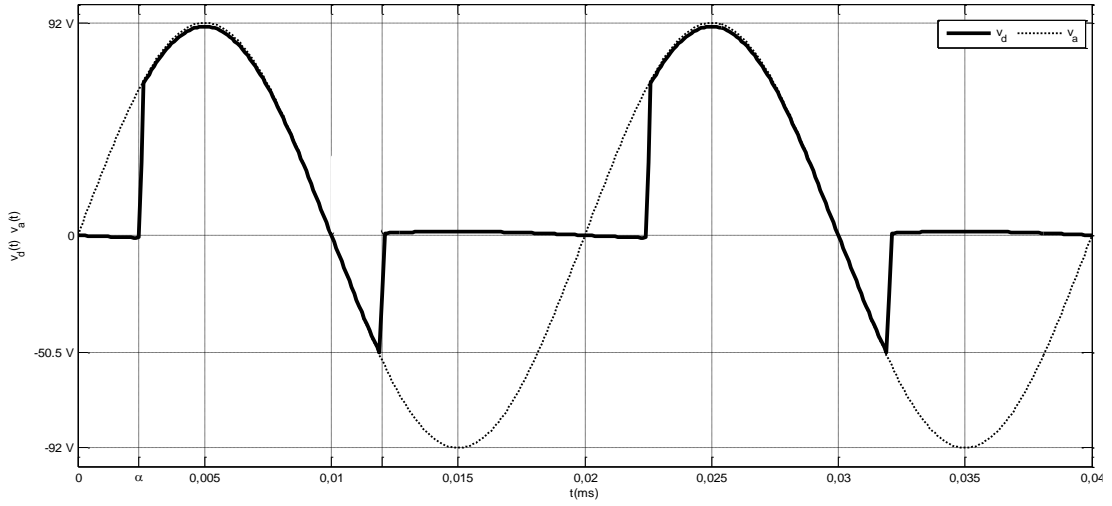
(a)

(b)

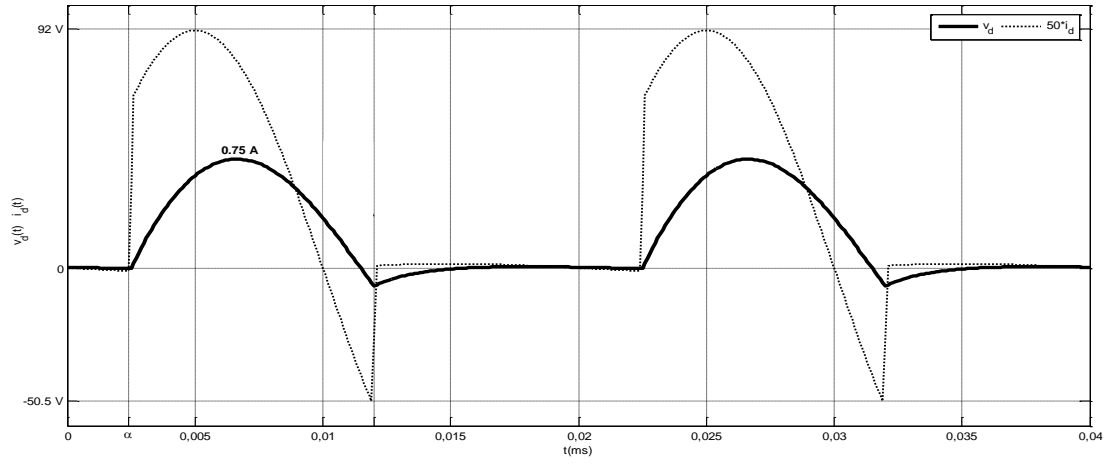
Şekil 5.22. Üç fazlı tam dalga kontrolsüz doğrultucunun deneysel sonuçlarına ait a) çıkış gerilimi temel bileşeni  $v_{df}(t)$  ve harmonik bileşeni  $v_{dh}(t)$ , b) giriş akımı temel bileşeni  $i_{af}(t)$  ve harmonik bileşeni  $i_{ah}(t)$

### 5.1.5. Bir fazlı yarım dalga kontrollü doğrultucu devresi

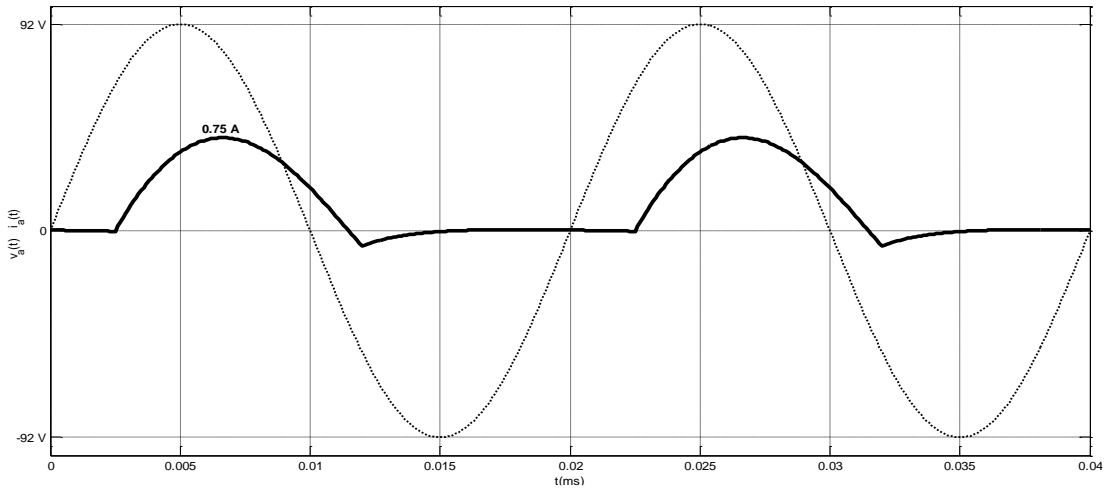
Bir fazlı yarım dalga kontrollü doğrultucu devresine ait benzetim sonuçları ve deneysel sonuçlar sırasıyla Şekil 5.23 ve Şekil 5.24'de verilmiştir.



(a)

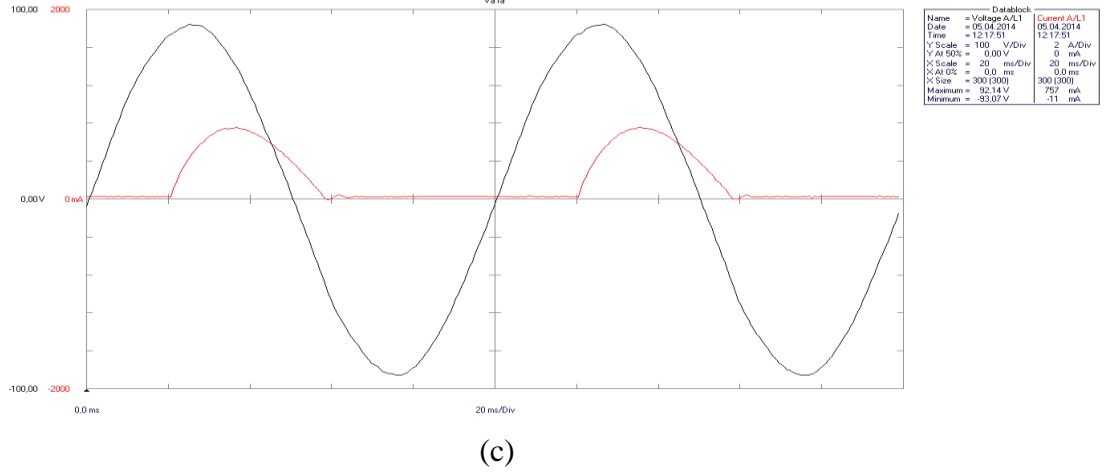
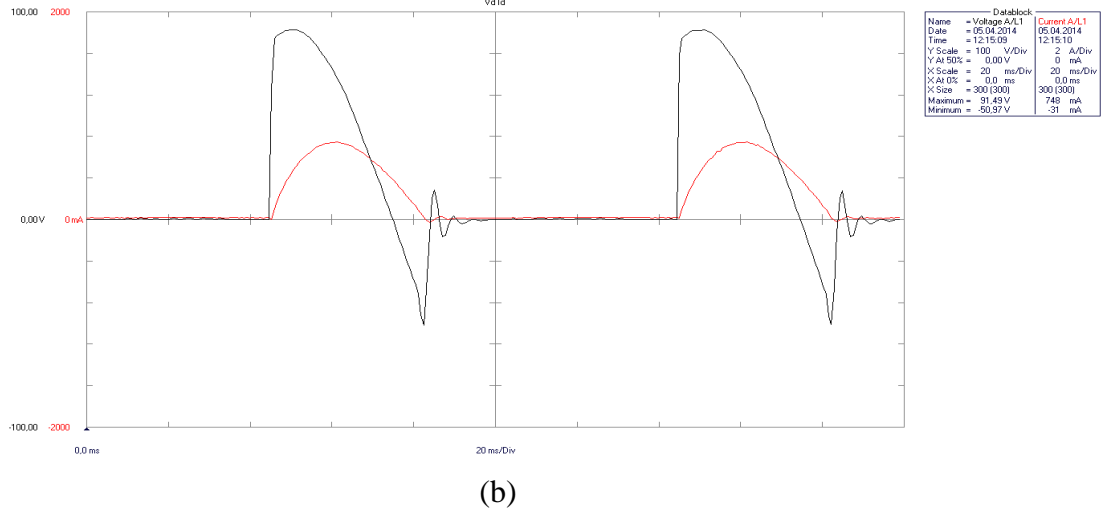
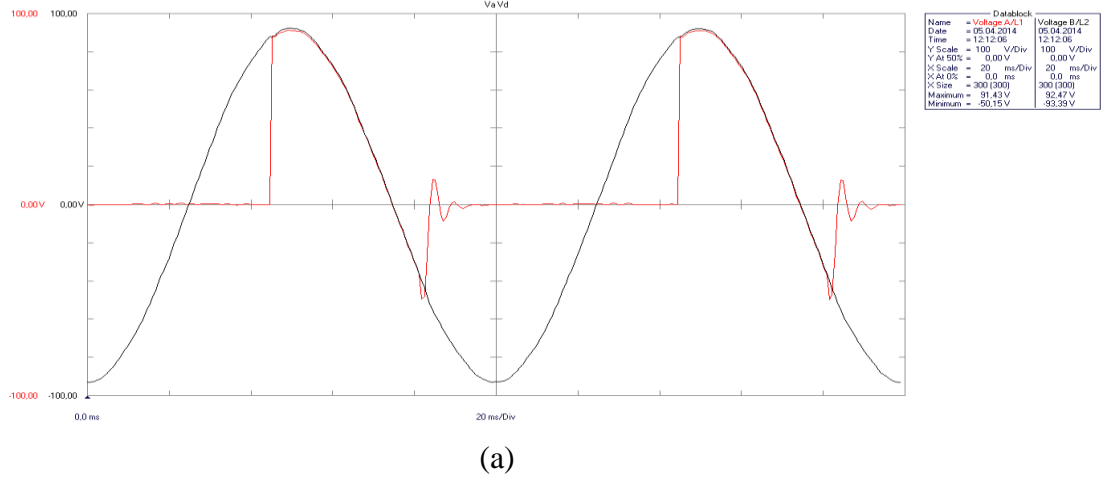


(b)



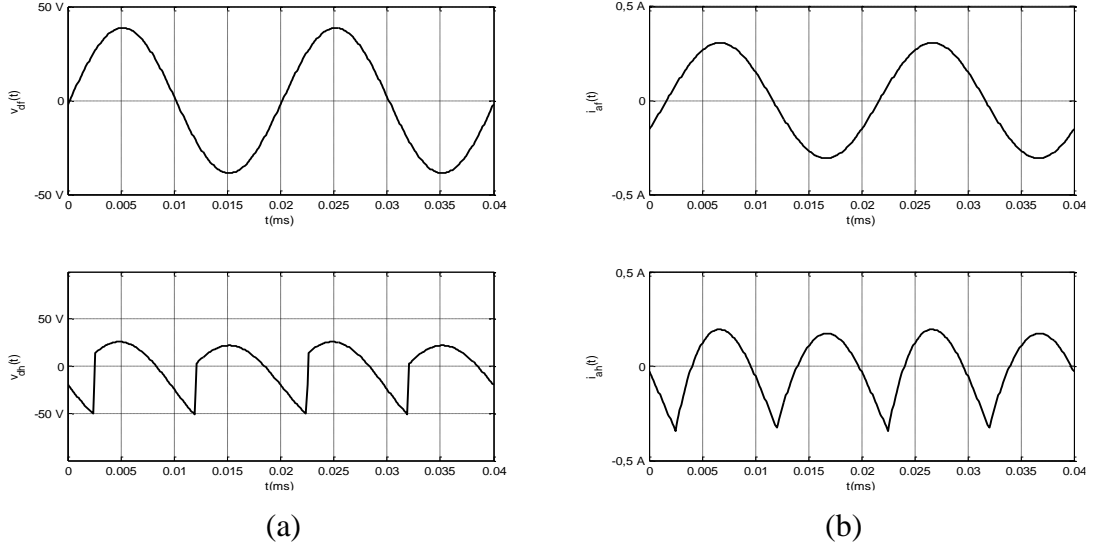
(c)

Şekil 5.23. Bir fazlı yarım dalga kontrollü doğrultucu devresine ait benzetim sonuçları  
a) giriş gerilimi  $v_a(t)$  ve çıkış gerilimi  $v_d(t)$ , b) çıkış gerilimi  $v_d(t)$  ve çıkış akımı  $i_d(t)$ ,  
c) giriş gerilimi  $v_a(t)$  ve giriş akımı  $i_a(t)$



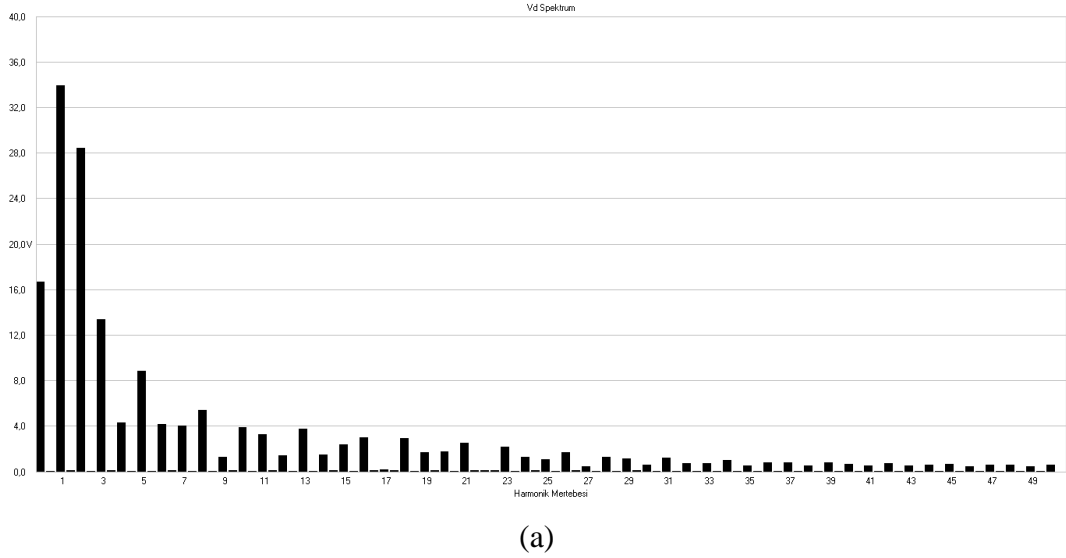
Şekil 5.24. Bir fazlı yarım dalga kontrollü doğrultucu devresine ait deneysel sonuçlar  
a) giriş gerilimi  $v_a(t)$  ve çıkış gerilimi  $v_d(t)$ , b) çıkış gerilimi  $v_d(t)$  ve çıkış akımı  $i_d(t)$ ,  
c) giriş gerilimi  $v_a(t)$  ve giriş akımı  $i_a(t)$

Giriş akımı  $i_a(t)$  ve çıkış gerilimi  $v_d(t)$ 'e ait, eşdeğer devre modellerinden elde edilen temel bileşen ve harmonik bileşen büyüklükleri Şekil 5.25'de verilmiştir.

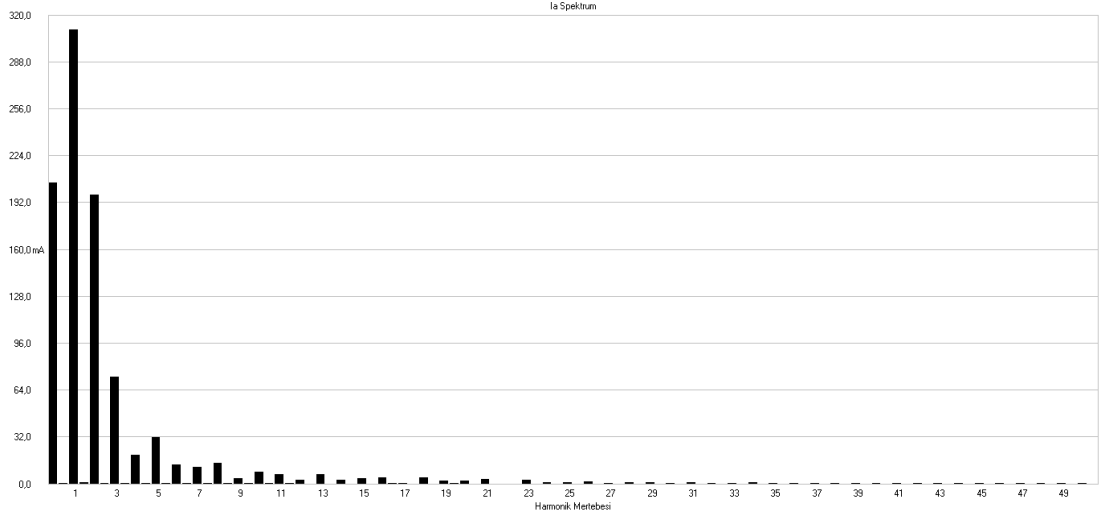


Şekil 5.25. Bir fazlı yarım dalga kontrollü doğrultucunun eşdeğer devresine ait a) çıkış gerilimi temel bileşeni  $v_{d1}(t)$  ve harmonik bileşeni  $v_{dh}(t)$ , b) giriş akımı temel bileşeni  $i_{a1}(t)$  ve harmonik bileşeni  $i_{ah}(t)$

Giriş akımı  $i_a(t)$  ve çıkış gerilimi  $v_d(t)$ 'e ait, deneysel olarak ölçülen harmonik spektrumlar Şekil 5.26'da verilmiştir.



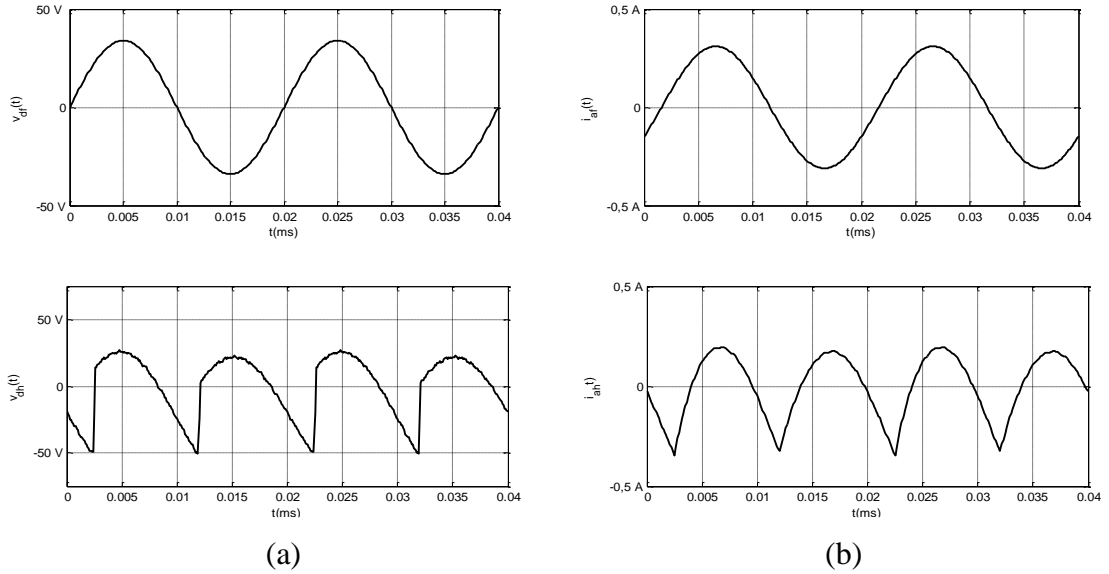
Şekil 5.26. Bir fazlı yarım dalga kontrollü doğrultucuya ait a)  $v_d(t)$  harmonik spektrumu b)  $i_a(t)$  harmonik spektrumu



(b)

Şekil 5.26. (Devam) Bir fazlı yarım dalga kontrollü doğrultucuya ait a)  $v_d(t)$  harmonik spektrumu b)  $i_a(t)$  harmonik spektrumu

Bu spektrumlara dayalı olarak elde edilen giriş akımı  $i_a(t)$  ile çıkış gerilimi  $v_d(t)$ 'nin deneysel temel bileşen ve harmonik bileşen büyüklükleri Şekil 5.27'de verilmiştir.



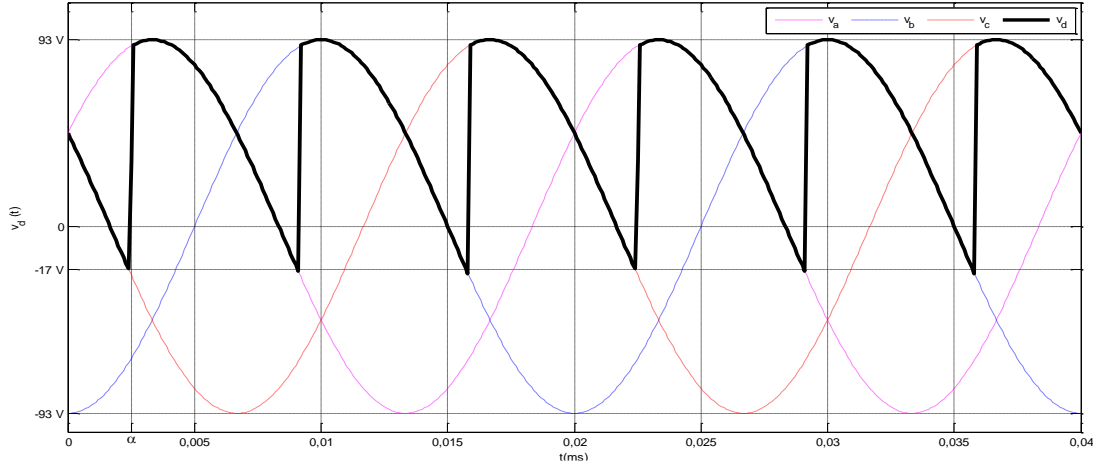
(a)

(b)

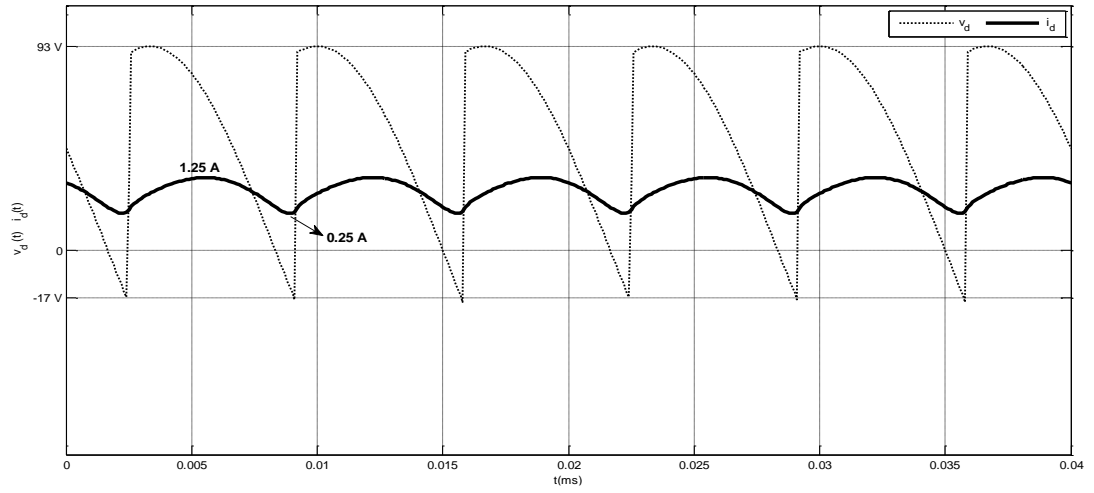
Şekil 5.27. Bir fazlı yarım dalga kontrollü doğrultucunun deneysel sonuçlarına ait a) çıkış gerilimi temel bileşeni  $v_{df}(t)$  ve harmonik bileşeni  $v_{dh}(t)$ , b) giriş akımı temel bileşeni  $i_{af}(t)$  ve harmonik bileşeni  $i_{ah}(t)$

### 5.1.6. Üç fazlı yarım dalga kontrollü doğrultucu devresi

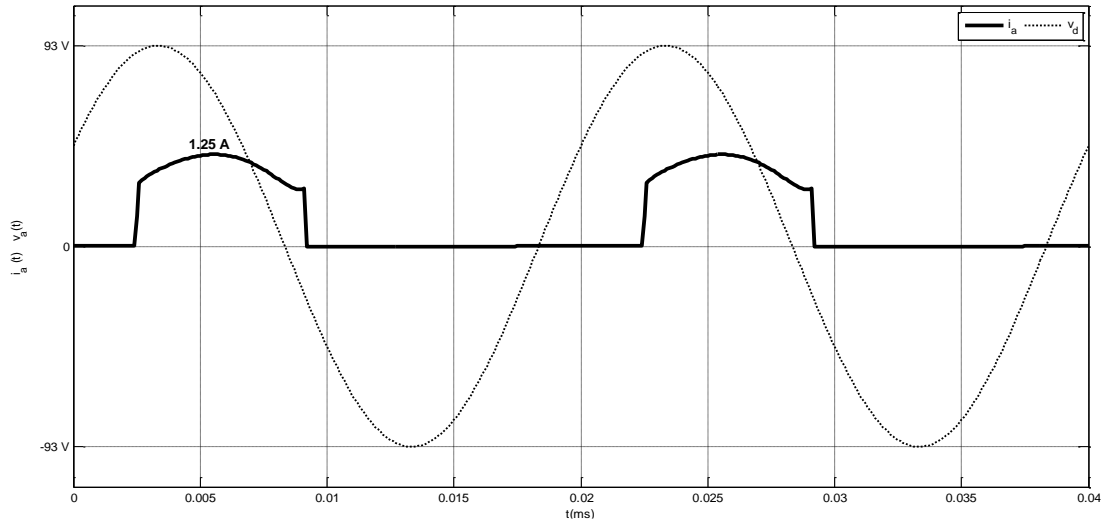
Üç fazlı yarım dalga kontrollü doğrultucu devresine ait benzetim sonuçları ve deneysel sonuçlar sırasıyla Şekil 5.28 ve Şekil 5.29'da verilmiştir.



(a)

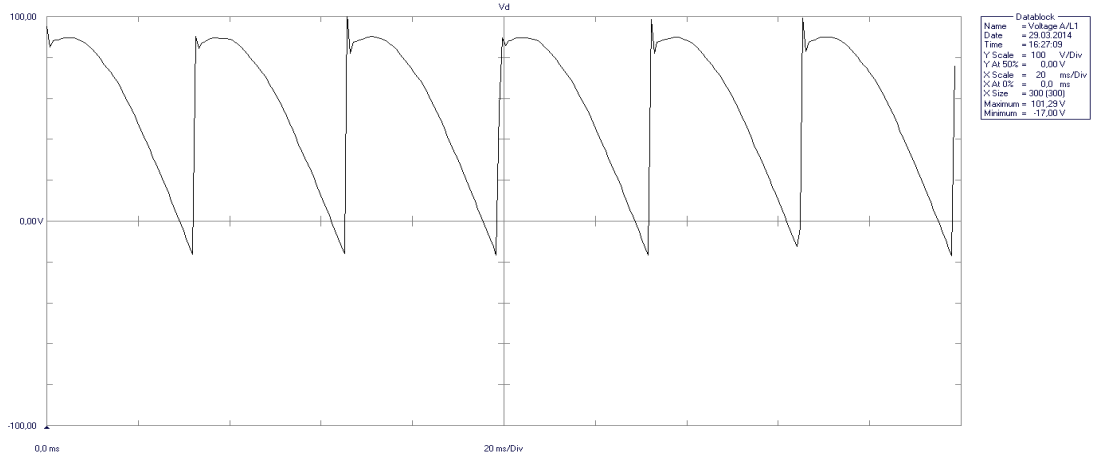


(b)

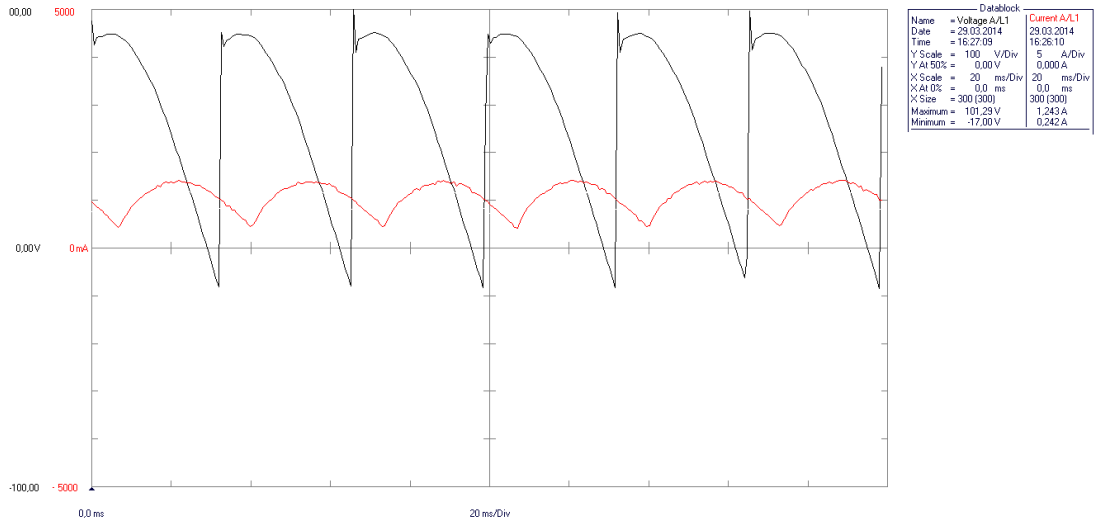


(c)

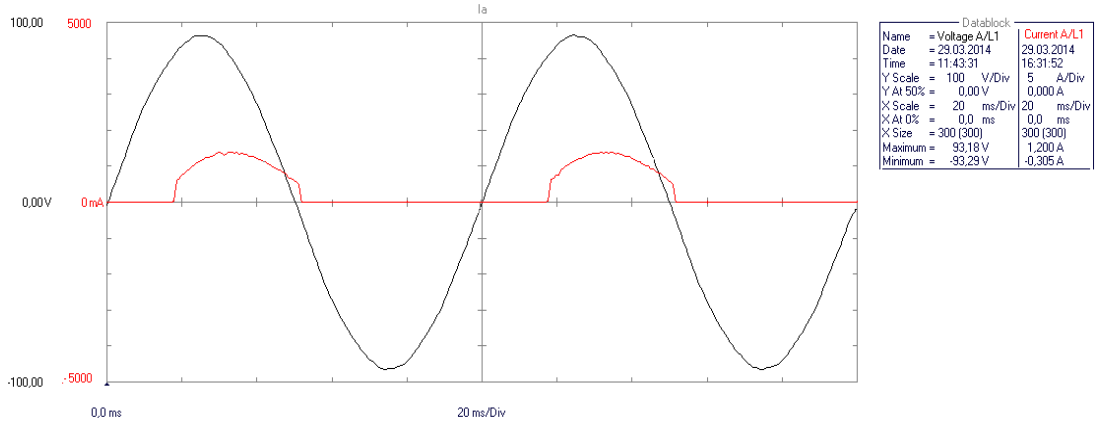
Şekil 5.28. Üç fazlı yarı dalga kontrollü doğrultucu devresine ait benzetim sonuçları  
a) giriş gerilimi  $v_a(t)$  ve çıkış gerilimi  $v_d(t)$ , b) çıkış gerilimi  $v_d(t)$  ve çıkış akımı  $i_d(t)$ ,  
c) giriş gerilimi  $v_a(t)$  ve giriş akımı  $i_a(t)$



(a)



(b)

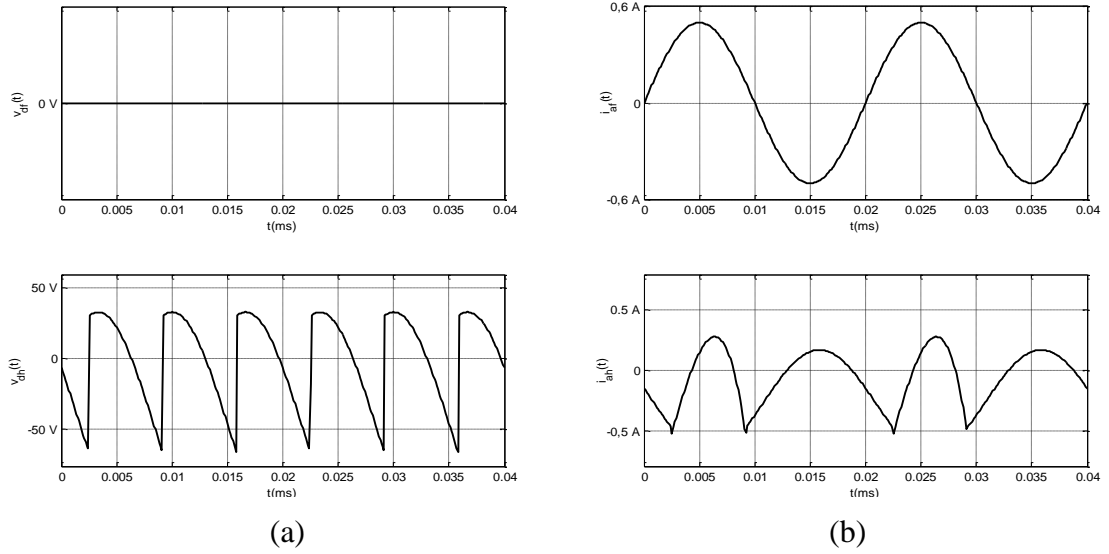


(c)

Şekil 5.29. Üç fazlı yarım dalga kontrollü doğrultucu devresine ait deneysel sonuçlar  
a) giriş gerilimi  $v_a(t)$  ve çıkış gerilimi  $v_d(t)$ , b) çıkış gerilimi  $v_d(t)$  ve çıkış akımı  $i_d(t)$ ,  
c) giriş gerilimi  $v_a(t)$  ve giriş akımı  $i_a(t)$

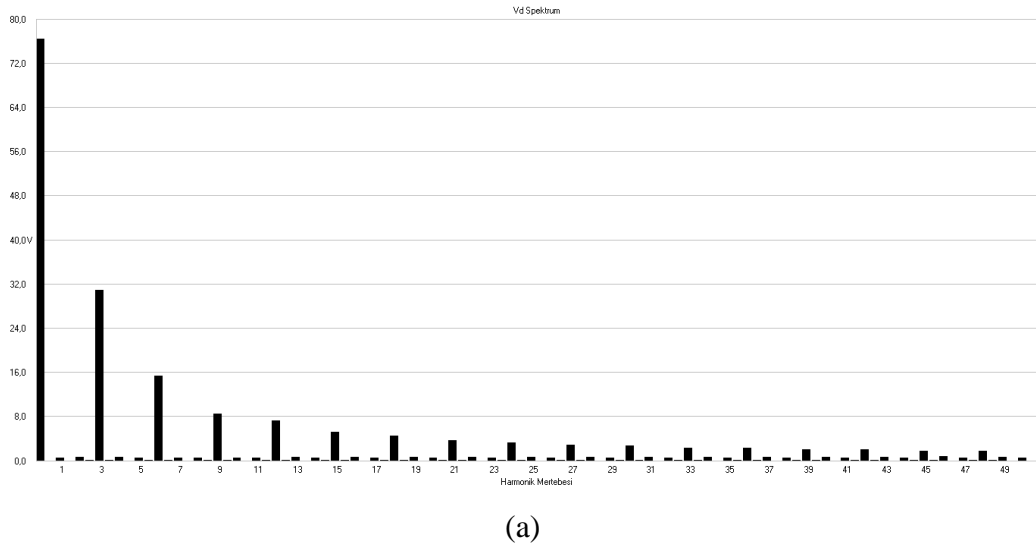


Giriş akımı  $i_a(t)$  ve çıkış gerilimi  $v_d(t)$ 'e ait, eşdeğer devre modellerinden elde edilen temel bileşen ve harmonik bileşen büyüklükleri Şekil 5.30'da verilmiştir.

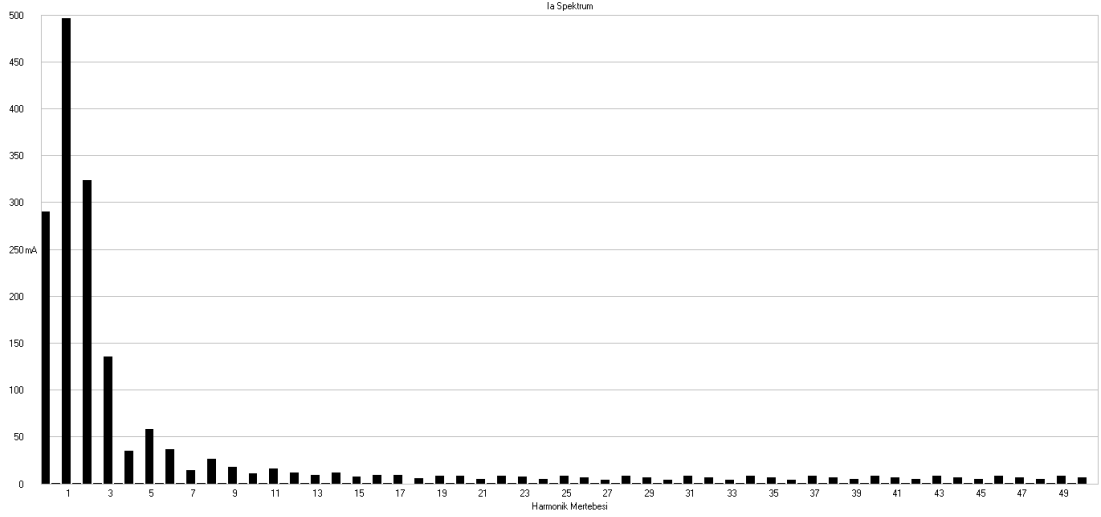


Şekil 5.30. Üç fazlı yarı dalga kontrollü doğrultucunun eşdeğer devresine ait a) çıkış gerilimi temel bileşeni  $v_{df}(t)$  ve harmonik bileşeni  $v_{dh}(t)$ , b) giriş akımı temel bileşeni  $i_{af}(t)$  ve harmonik bileşeni  $i_{ah}(t)$

Giriş akımı  $i_a(t)$  ve çıkış gerilimi  $v_d(t)$ 'e ait, deneysel olarak ölçülen harmonik spektrumlar Şekil 5.31'de verilmiştir.



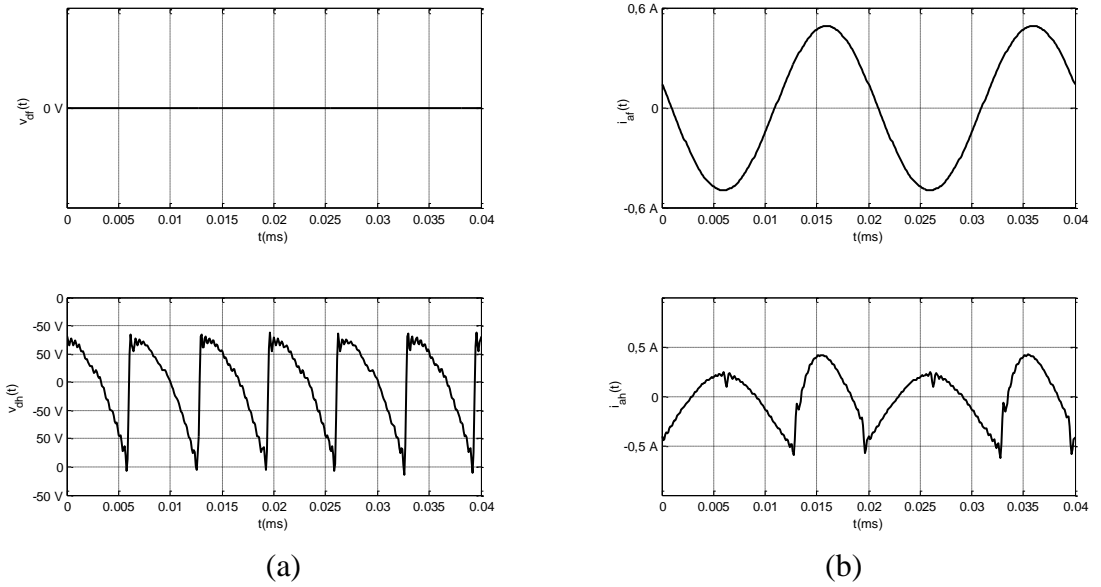
Şekil 5.31. Üç fazlı yarı dalga kontrollü doğrultucuya ait a)  $v_d(t)$  harmonik spektrumu b)  $i_a(t)$  harmonik spektrumu



(b)

Şekil 5.31. (Devam) Üç fazlı yarım dalga kontrollü doğrultucuya ait a)  $v_d(t)$  harmonik spektrumu b)  $i_a(t)$  harmonik spektrumu

Bu spektrumlara dayalı olarak elde edilen giriş akımı  $i_a(t)$  ile çıkış gerilimi  $v_d(t)$ 'nin deneysel temel bileşen ve harmonik bileşen büyüklükleri Şekil 5.32'de verilmiştir.



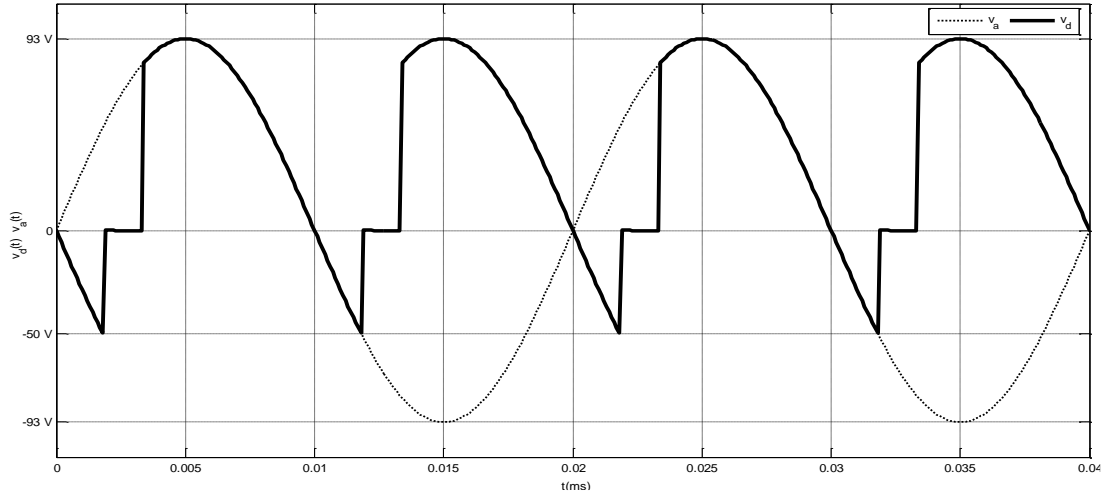
(a)

(b)

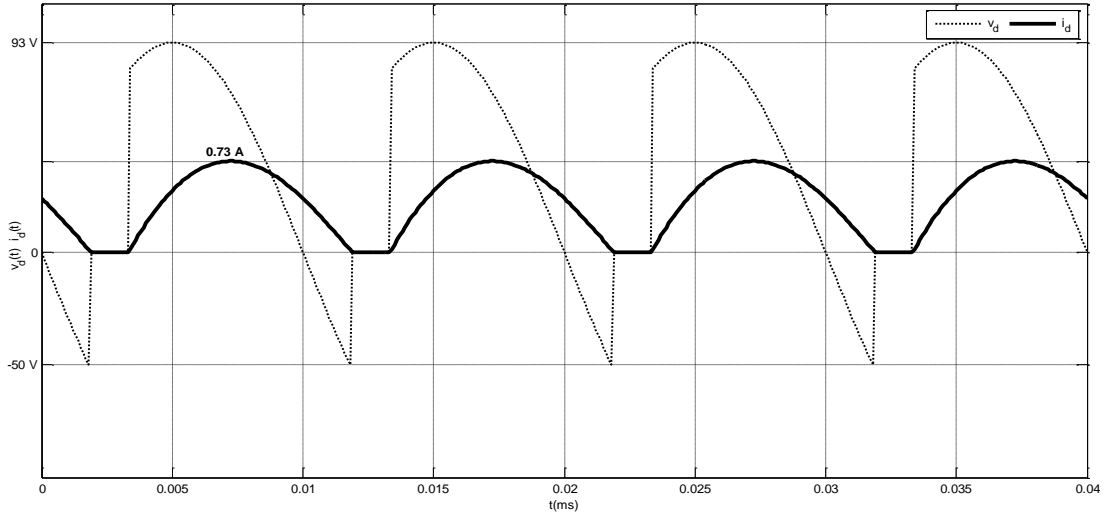
Şekil 5.32. Üç fazlı yarım dalga kontrollü doğrultucunun deneysel sonuçlarına ait a) çıkış gerilimi temel bileşeni  $v_{df}(t)$  ve harmonik bileşeni  $v_{dh}(t)$ , b) giriş akımı temel bileşeni  $i_{af}(t)$  ve harmonik bileşeni  $i_{ah}(t)$

### 5.1.7. Bir fazlı tam dalga kontrollü doğrultucu devresi

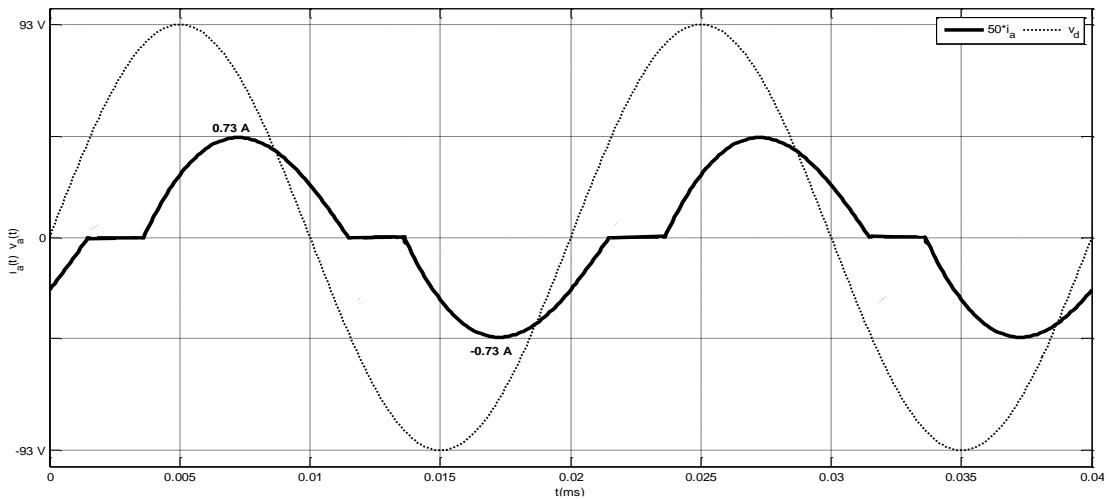
Bir fazlı tam dalga kontrollü doğrultucu devresine ait benzetim sonuçları ve deneysel sonuçlar sırasıyla Şekil 5.33 ve Şekil 5.34'de verilmiştir.



(a)

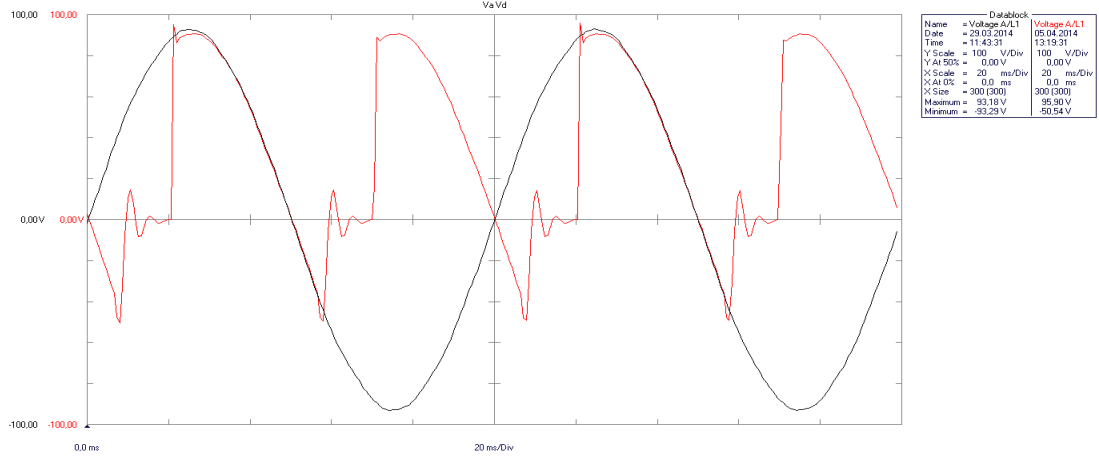


(b)

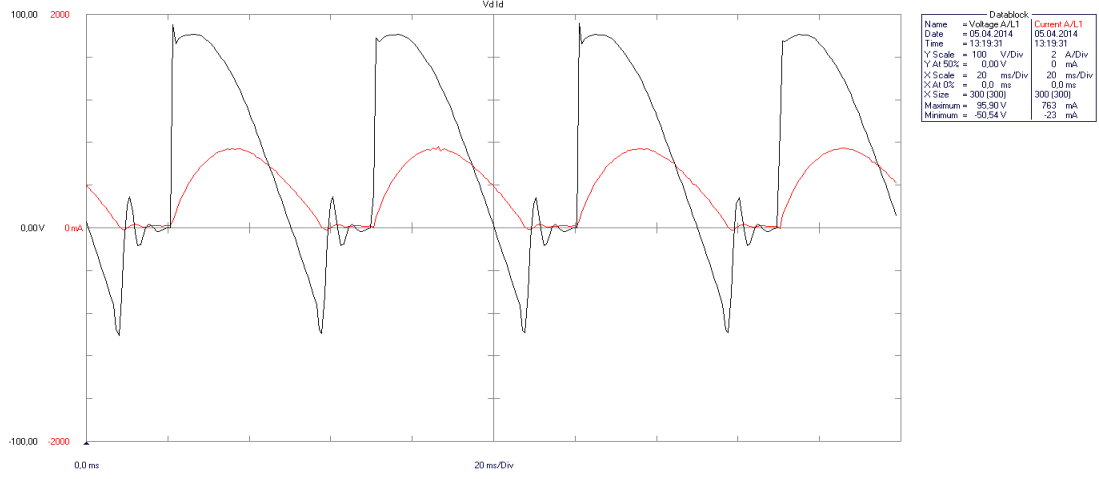


(c)

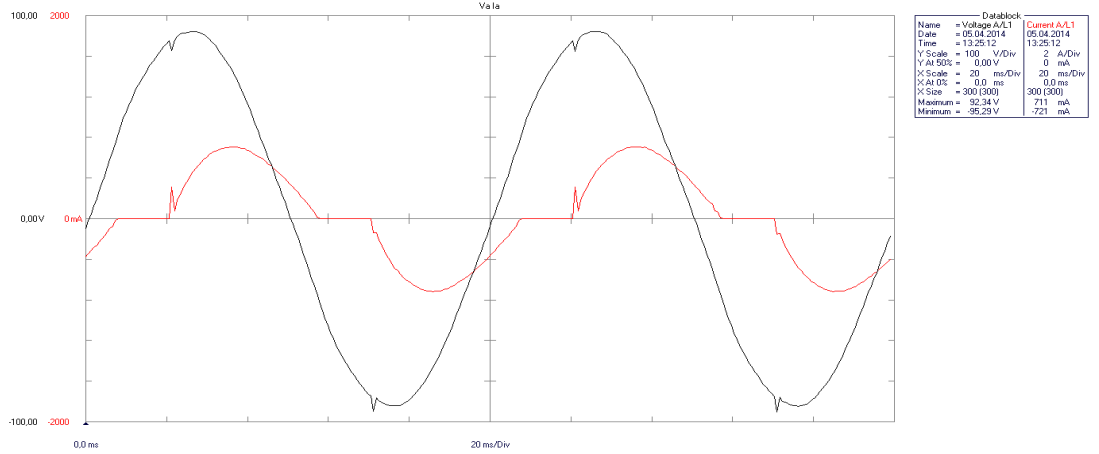
Şekil 5.33. Bir fazlı tam dalga kontrollü doğrultucu devresine ait benzetim sonuçları  
a) giriş gerilimi  $v_a(t)$  ve çıkış gerilimi  $v_d(t)$ , b) çıkış gerilimi  $v_d(t)$  ve çıkış akımı  $i_d(t)$ ,  
c) giriş gerilimi  $v_a(t)$  ve giriş akımı  $i_a(t)$



(a)



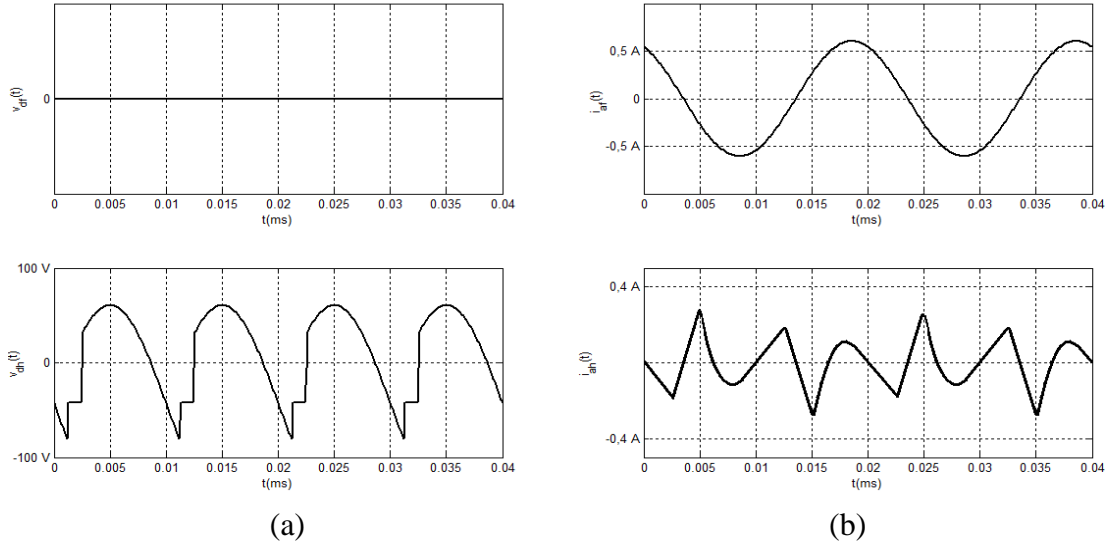
(b)



(c)

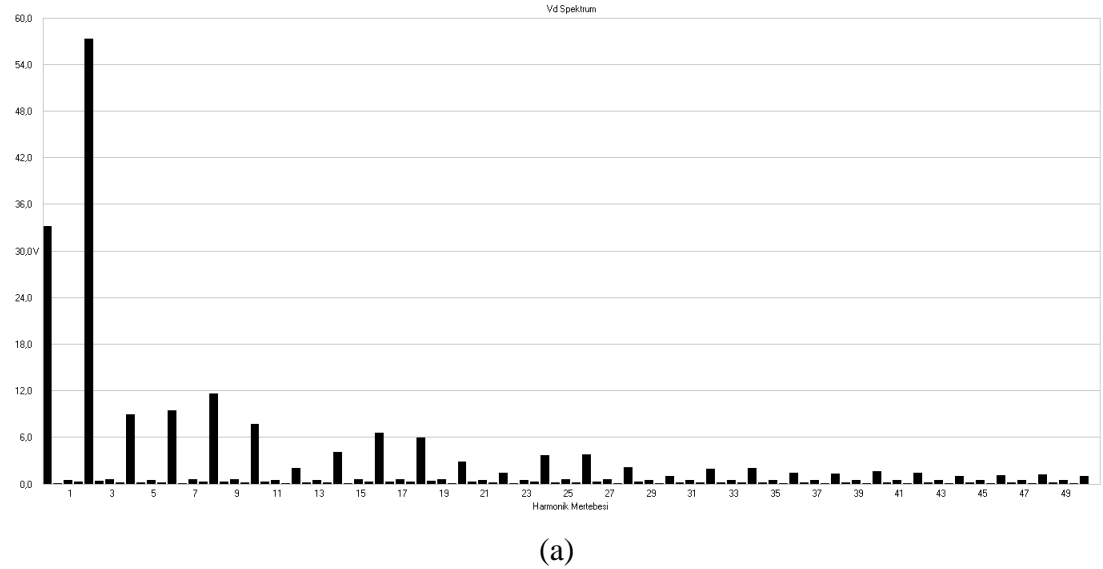
Şekil 5.34. Bir fazlı tam dalga kontrollü doğrultucu devresine ait deneysel sonuçlar  
a) giriş gerilimi  $v_a(t)$  ve çıkış gerilimi  $v_d(t)$ , b) çıkış gerilimi  $v_d(t)$  ve çıkış akımı  $i_d(t)$ ,  
c) giriş gerilimi  $v_a(t)$  ve giriş akımı  $i_a(t)$

Giriş akımı  $i_a(t)$  ve çıkış gerilimi  $v_d(t)$ 'e ait, eşdeğer devre modellerinden elde edilen temel bileşen ve harmonik bileşen büyüklükleri Şekil 5.35'de verilmiştir.

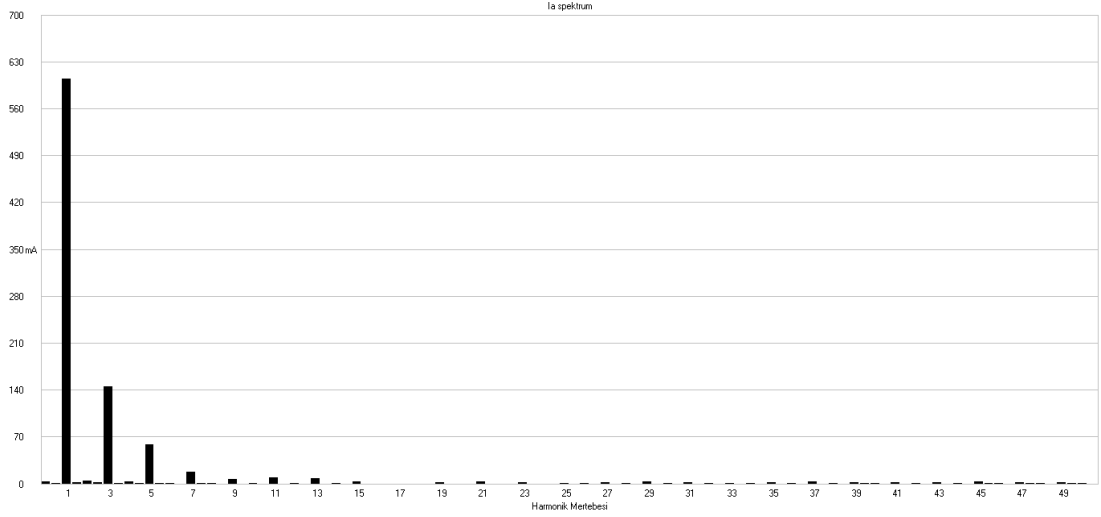


Şekil 5.35. Bir fazlı tam dalga kontrollü doğrultucunun eşdeğer devresine ait a) çıkış gerilimi temel bileşeni  $v_{df}(t)$  ve harmonik bileşeni  $v_{dh}(t)$ , b) giriş akımı temel bileşeni  $i_{af}(t)$  ve harmonik bileşeni  $i_{ah}(t)$

Giriş akımı  $i_a(t)$  ve çıkış gerilimi  $v_d(t)$ 'e ait, deneysel olarak ölçülen harmonik spektrumlar Şekil 5.36'da verilmiştir.



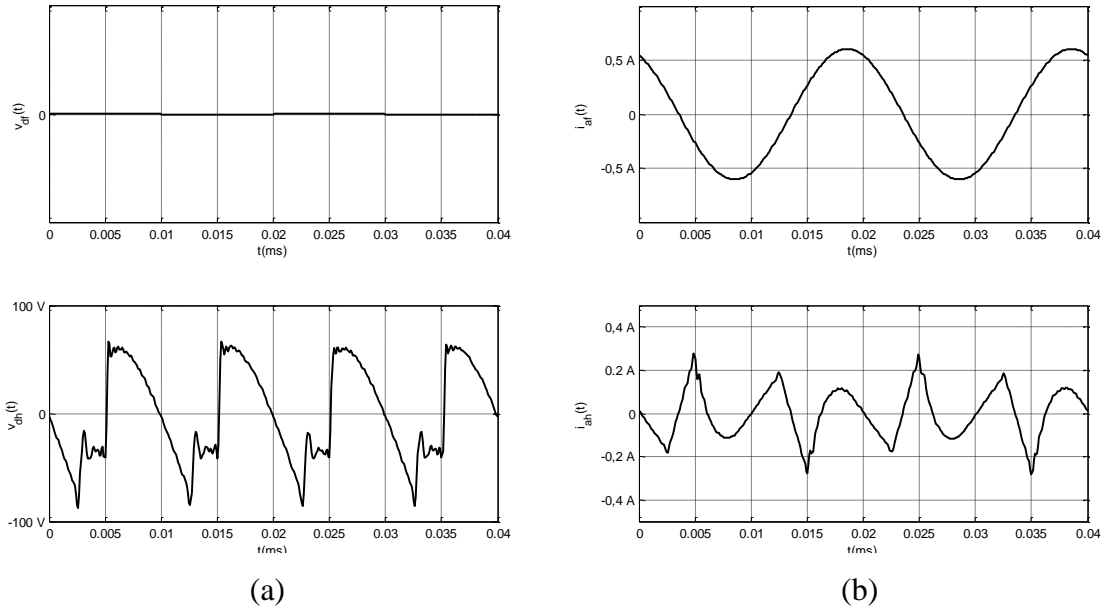
Şekil 5.36. Bir fazlı tam dalga kontrollü doğrultucuya ait a)  $v_d(t)$  harmonik spektrumu b)  $i_a(t)$  harmonik spektrumu



(b)

Şekil 5.36. (Devam) Bir fazlı tam dalga kontrollü doğrultucuya ait a)  $v_d(t)$  harmonik spektrumu b)  $i_a(t)$  harmonik spektrumu

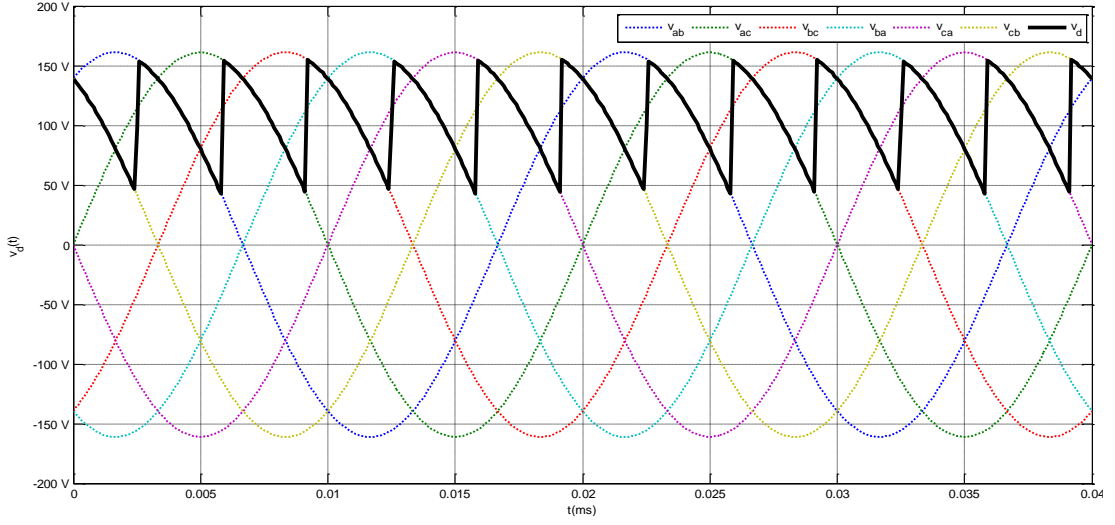
Bu spektrumlara dayalı olarak elde edilen giriş akımı  $i_a(t)$  ile çıkış gerilimi  $v_d(t)$ 'nin deneysel temel bileşen ve harmonik bileşen büyüklükleri Şekil 5.37'de verilmiştir.



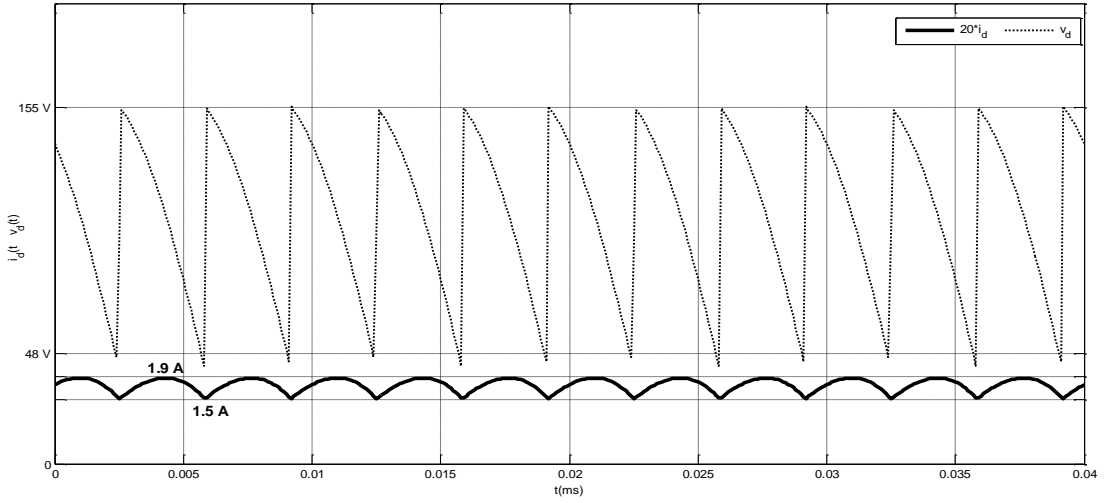
Şekil 5.37. Bir fazlı tam dalga kontrollü doğrultucunun deneysel sonuçlarına ait a) çıkış gerilimi temel bileşeni  $v_{df}(t)$  ve harmonik bileşeni  $v_{dh}(t)$ , b) giriş akımı temel bileşeni  $i_{af}(t)$  ve harmonik bileşeni  $i_{ah}(t)$

### 5.1.8. Üç fazlı tam dalga kontrollü doğrultucu devresi

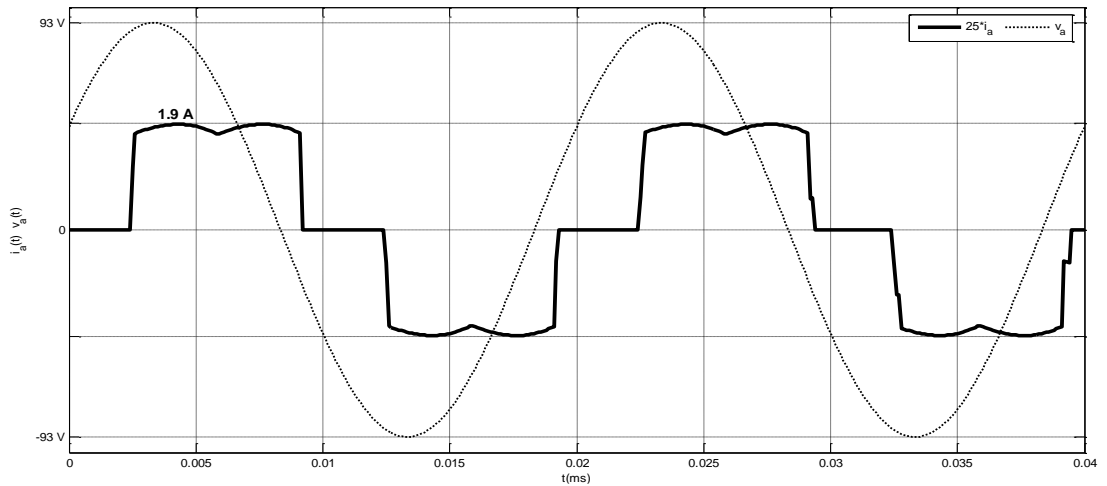
Üç fazlı tam dalga kontrollü doğrultucu devresine ait benzetim sonuçları ve deneysel sonuçlar sırasıyla Şekil 5.38 ve Şekil 5.39'da verilmiştir.



(a)

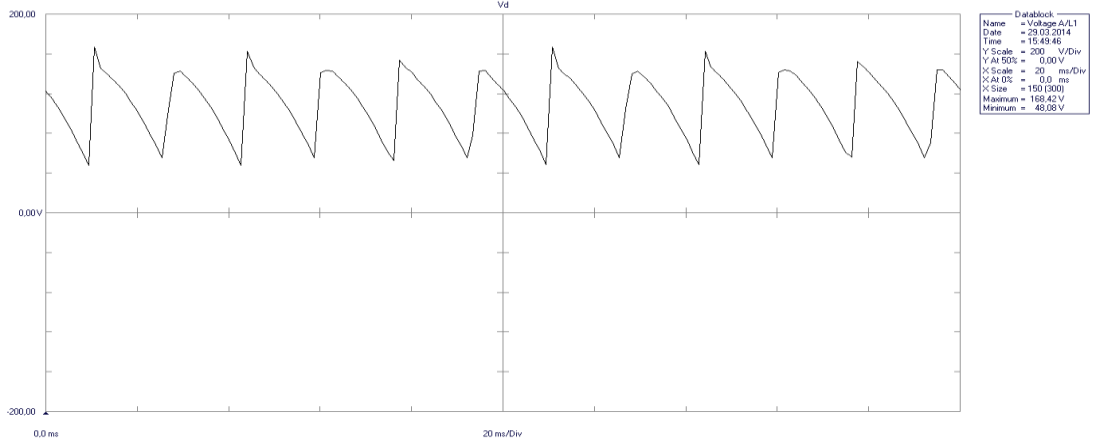


(b)

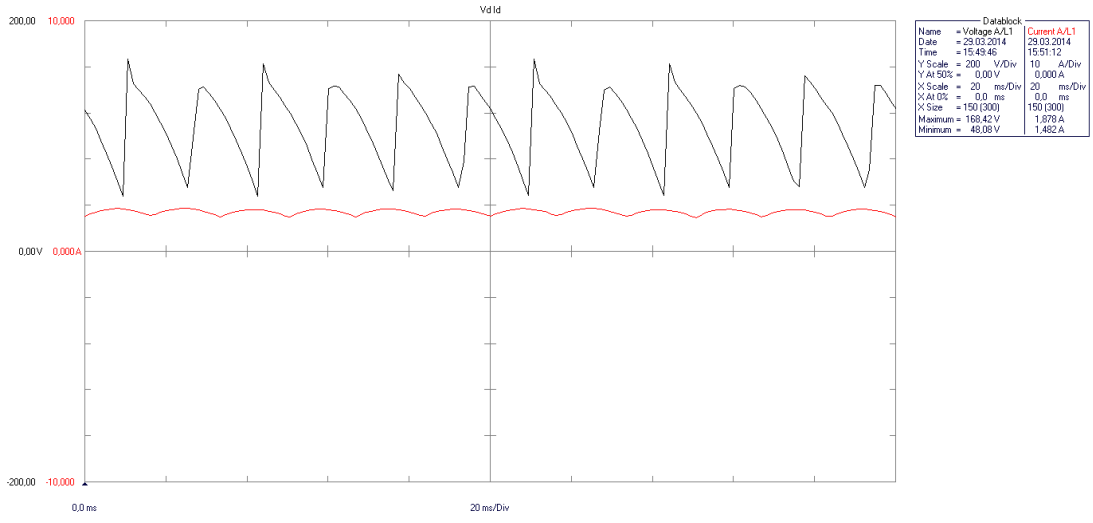


(c)

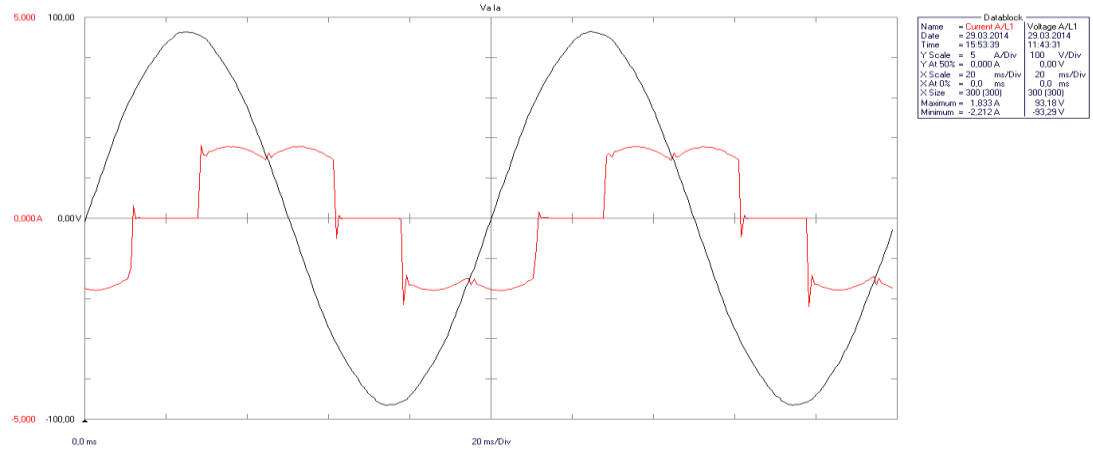
Şekil 5.38. Üç fazlı tam dalga kontrollü doğrultucu devresine ait benzetim sonuçları  
a) giriş gerilimi  $v_a(t)$  ve çıkış gerilimi  $v_d(t)$ , b) çıkış gerilimi  $v_d(t)$  ve çıkış akımı  $i_d(t)$ ,  
c) giriş gerilimi  $v_a(t)$  ve giriş akımı  $i_a(t)$



(a)



(b)

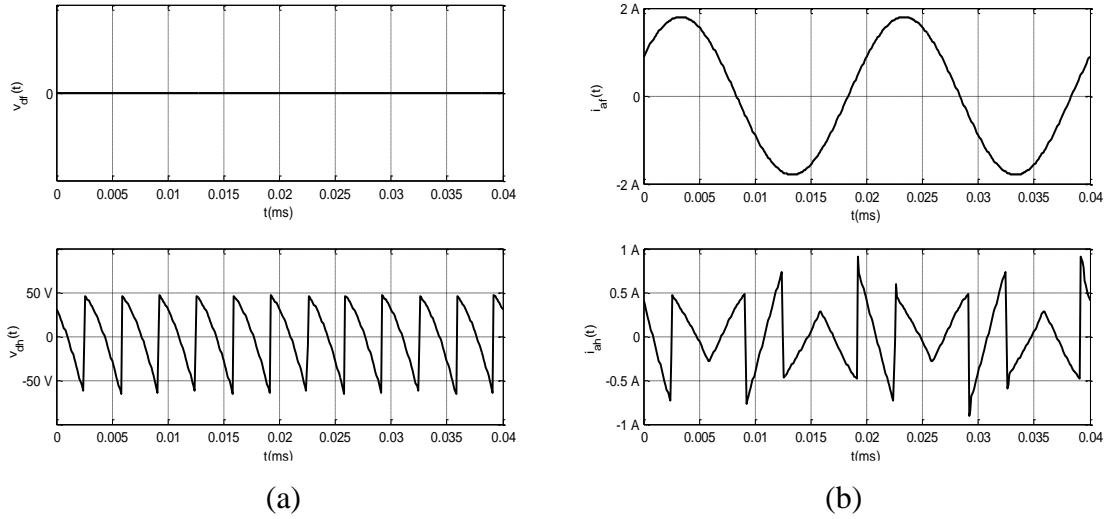


(c)

Şekil 5.39. Üç fazlı tam dalga kontrollü doğrultucu devresine ait deneysel sonuçlar  
a) giriş gerilimi  $v_a(t)$  ve çıkış gerilimi  $v_d(t)$ , b) çıkış gerilimi  $v_d(t)$  ve çıkış akımı  $i_d(t)$ ,  
c) giriş gerilimi  $v_a(t)$  ve giriş akımı  $i_a(t)$

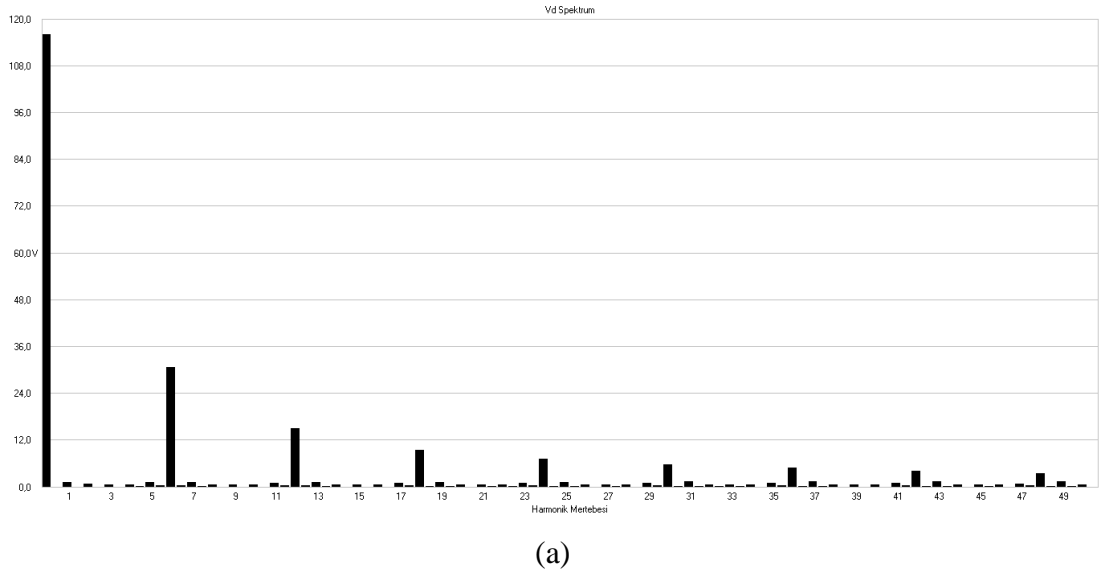


Giriş akımı  $i_a(t)$  ve çıkış gerilimi  $v_d(t)$ 'e ait, eşdeğer devre modellerinden elde edilen temel bileşen ve harmonik bileşen büyüklükleri Şekil 5.40'da verilmiştir.

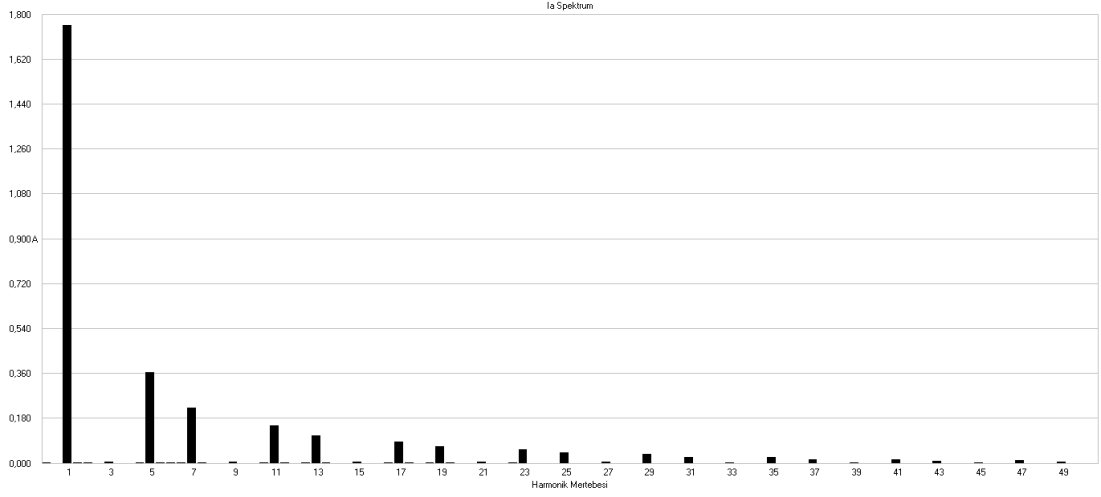


Şekil 5.40. Üç fazlı tam dalga kontrollü doğrultucunun eşdeğer devresine ait a) çıkış gerilimi temel bileşeni  $v_{df}(t)$  ve harmonik bileşeni  $v_{dh}(t)$ , b) giriş akımı temel bileşeni  $i_{af}(t)$  ve harmonik bileşeni  $i_{ah}(t)$

Giriş akımı  $i_a(t)$  ve çıkış gerilimi  $v_d(t)$ 'e ait, deneysel olarak ölçülen harmonik spektrumlar Şekil 5.41'de verilmiştir.



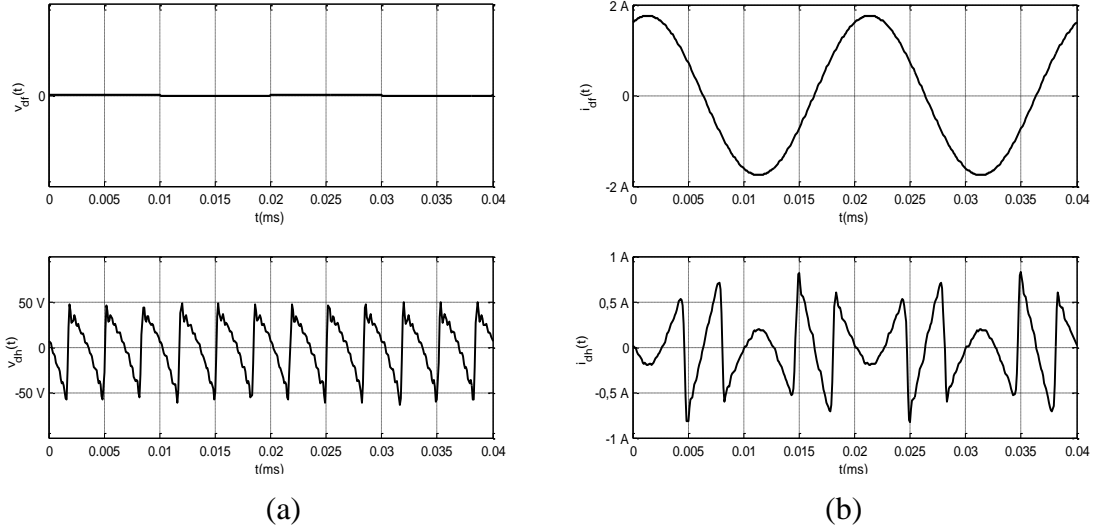
Şekil 5.41. Üç fazlı tam dalga kontrollü doğrultucuya ait a)  $v_d(t)$  harmonik spektrumu b)  $i_a(t)$  harmonik spektrumu



(b)

Şekil 5.41. (Devam) Üç fazlı tam dalga kontrollü doğrultucuya ait a)  $v_d(t)$  harmonik spektrumu b)  $i_a(t)$  harmonik spektrumu

Bu spektrumlara dayalı olarak elde edilen giriş akımı  $i_a(t)$  ile çıkış gerilimi  $v_d(t)$ 'nin deneysel temel bileşen ve harmonik bileşen büyüklükleri Şekil 5.42'de verilmiştir.



(a)

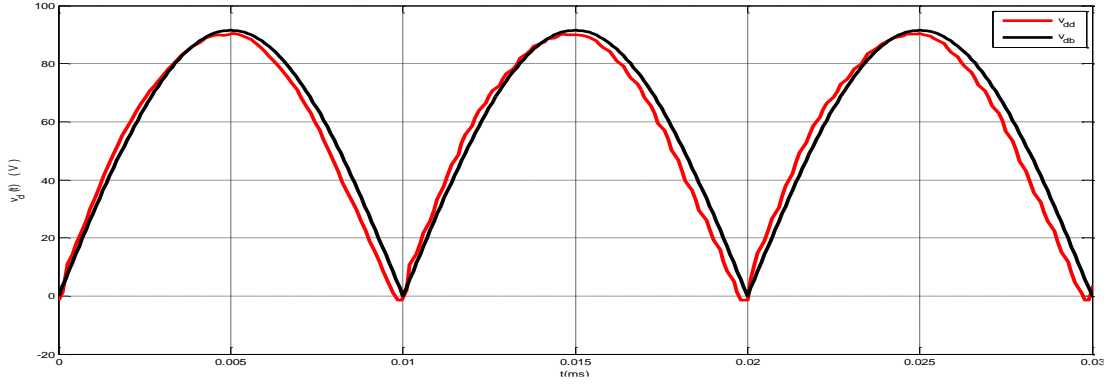
(b)

Şekil 5.42. Üç fazlı tam dalga kontrollü doğrultucunun deneysel sonuçlarına ait a) çıkış gerilimi temel bileşeni  $v_{df}(t)$  ve harmonik bileşeni  $v_{dh}(t)$ , b) giriş akımı temel bileşeni  $i_{af}(t)$  ve harmonik bileşeni  $i_{ah}(t)$

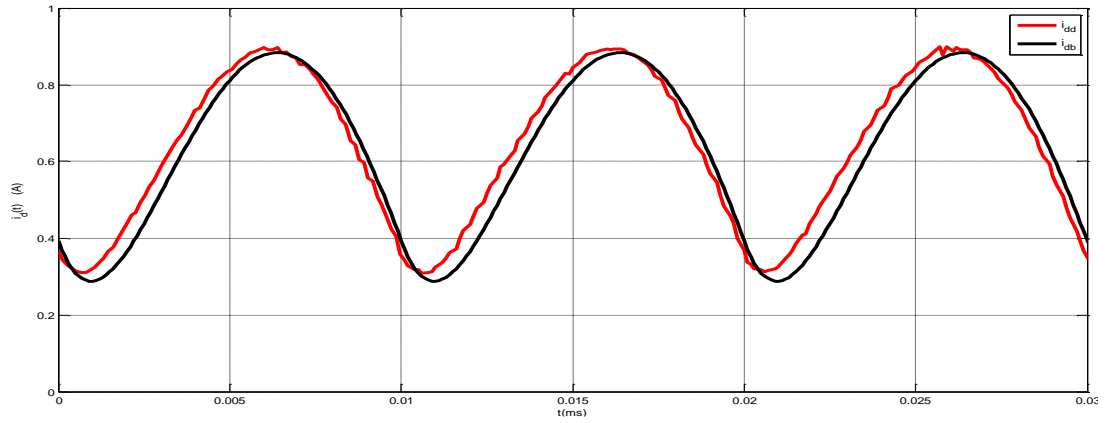
## 5.2. Örnek Bir Doğrultucu Devresi İçin Sonuçların Karşılaştırılması

Bölüm 5.1'de, her bir doğrultucu devresindeki giriş gerilimi  $v_a(t)$ , çıkış gerilimi  $v_d(t)$ , giriş akımı  $i_a(t)$  ve çıkış akımı  $i_d(t)$  büyüklüklerine ilişkin deneysel sonuçlar ve eşdeğer devre sonuçları ayrı ayrı verilmiştir. İleri sürülen eşdeğer devre modelini daha iyi test edebilmek amacıyla, örnek bir doğrultucu devresi için sonuçlar birlikte ele alınacaktır.

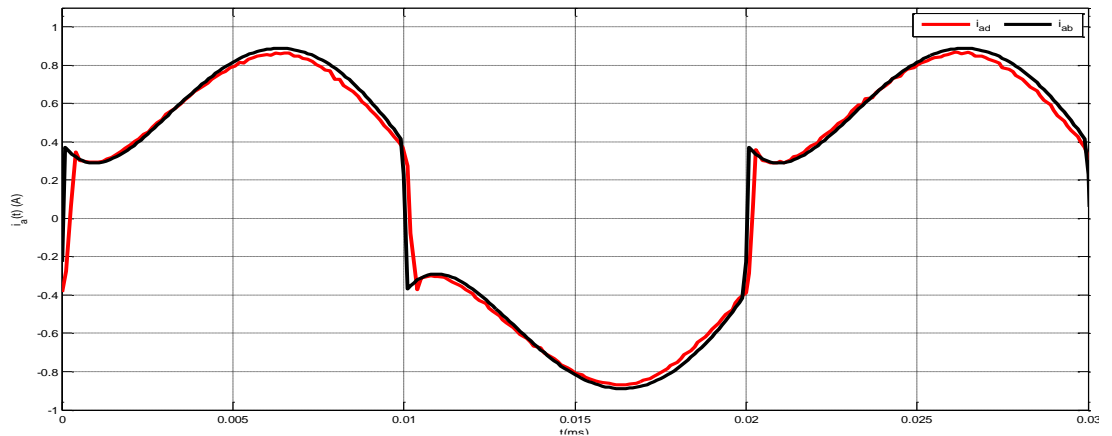
Bu amaçla, Bölüm 4’te modelin geliştirilmesinde referans alınan bir fazlı tam dalga kontrolsüz doğrultucu devresi seçilmiştir. Bu devredeki  $v_d(t)$ ,  $i_a(t)$  ve  $i_d(t)$  büyüklüklerine ilişkin deneysel sonuçlar ve ileri sürülen eşdeğer devre modelinden elde edilen benzetim sonuçları Şekil 5.43’de birlikte verilmiştir.



(a)



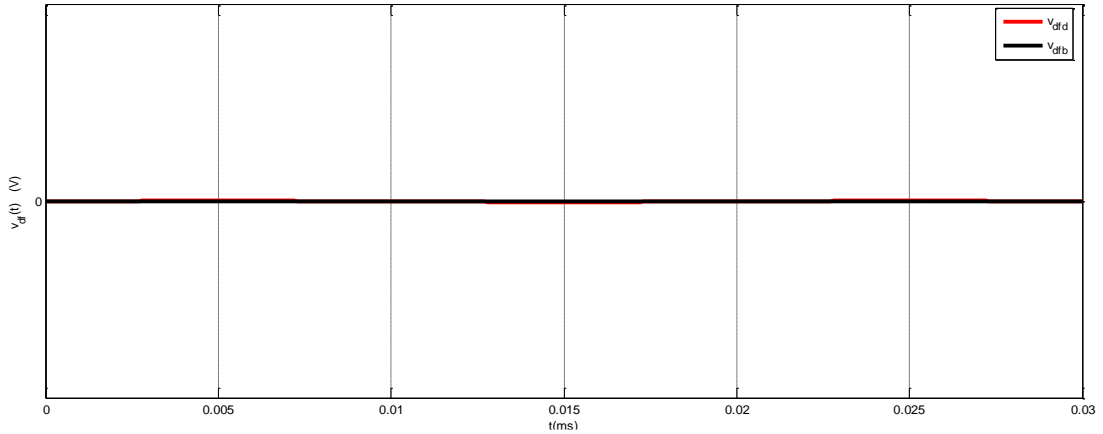
(b)



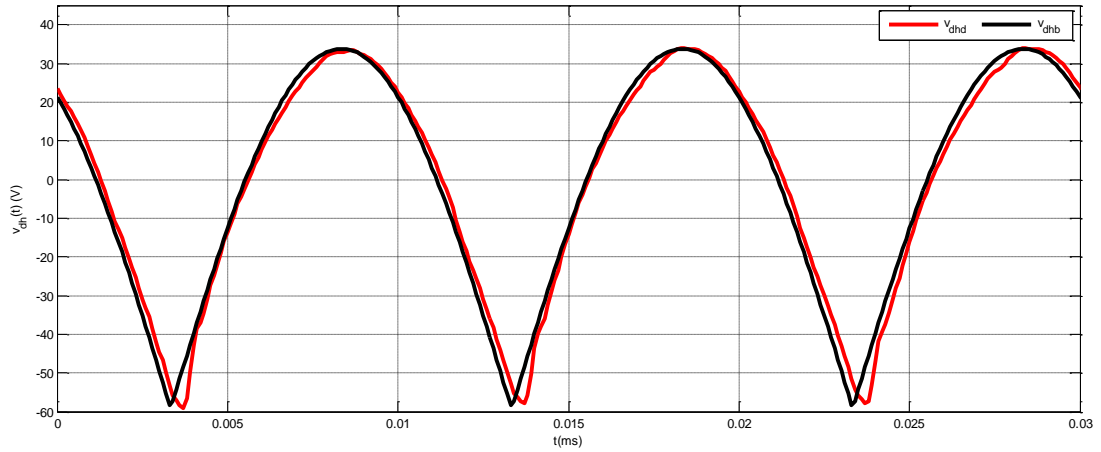
(c)

Şekil 5.43. Bir fazlı tam dalga kontrolsüz doğrultucu devresinin deneysel sonuçları ile benzetim sonuçlarının karşılaştırması a) çıkış gerilimi  $v_d(t)$ , b) çıkış akımı  $i_d(t)$ , c) giriş akımı  $i_a(t)$

Benzer şekilde, temel bileşen ve harmonik bileşenlerin zamana bağlı değişimleri açısından da, eşdeğer devre modeli test edilmiştir. Bu amaçla, aynı devreye ilişkin giriş akımı ( $i_a(t)$ ) ve çıkış geriliminin ( $v_d(t)$ ) temel bileşen ve harmonik bileşenleri mukayese edilmiştir. Bu büyüklüklere ait deneysel sonuçlar ve ileri sürülen eşdeğer devre modelinden elde edilen benzetim sonuçları Şekil 5.44’de birlikte verilmiştir.

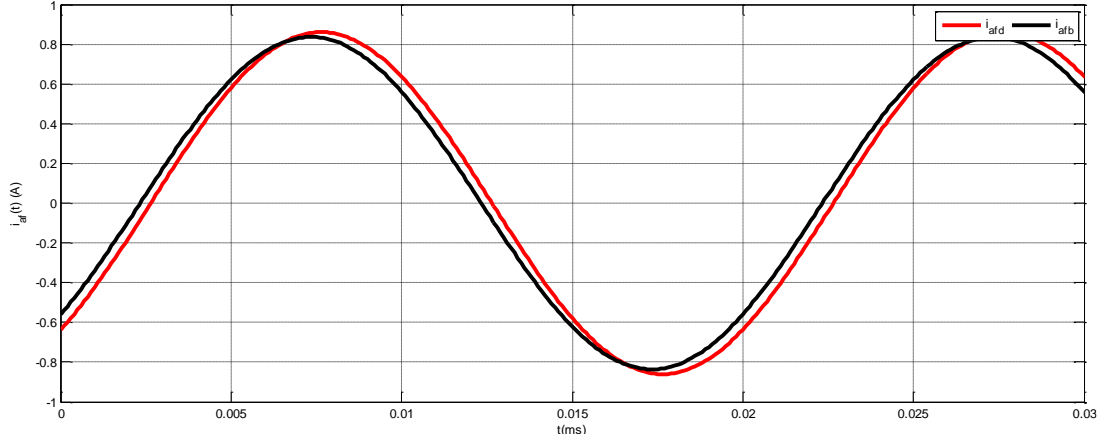


(a)

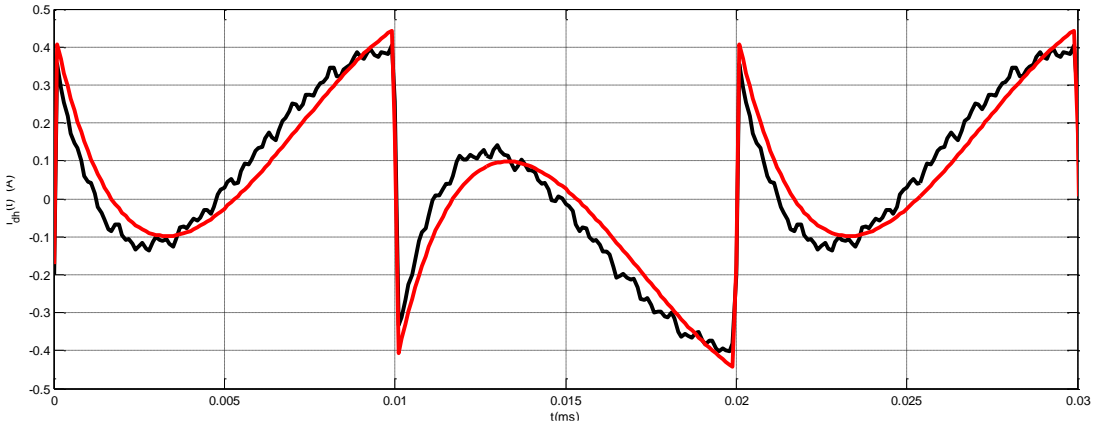


(b)

Şekil 5.44. Bir fazlı tam dalga kontrolsüz doğrultucu devresinin deneysel sonuçları ile benzetim sonuçlarının karşılaştırması a) çıkış geriliminin temel bileşeni  $v_{df}(t)$ , b) çıkış geriliminin harmonik bileşeni  $v_{dh}(t)$ , c) giriş akımının temel bileşeni  $i_{af}(t)$ , d) giriş akımının harmonik bileşeni  $i_{ah}(t)$



(c)



(d)

Şekil 5.44. (Devam) Bir fazlı tam dalga kontrolsüz doğrultucu devresinin deneysel sonuçları ile benzetim sonuçlarının karşılaştırması a) çıkış geriliminin temel bileşeni  $v_{df}(t)$ , b) çıkış geriliminin harmonik bileşeni  $v_{dh}(t)$ , c) giriş akımının temel bileşeni  $i_{af}(t)$ , d) giriş akımının harmonik bileşeni  $i_{ah}(t)$

Şekil 5.43 ve Şekil 5.44'den görüldüğü gibi, benzetim sonuçları ile deneysel sonuçlar birbiriyle oldukça uyumludur. Bazı büyüklüklerdeki küçük farklılıklar, ölçüm esnasında oluşan referans kaymaları ve şebekedeki dengesizliklerden kaynaklanmaktadır.

## 6. SONUÇLAR VE ÖNERİLER

AA/DA dönüştürücülerin doğru bir harmonik analizi son yıllarda daha da önem kazanmıştır. Birçok harmonik model, güç elektroniği düzeneklerinin ürettiği harmoniklerin temsili için önerilmiştir. AA/DA dönüştürücülerinin, harmoniklere bağlı incelemelerinde, geleneksel olarak, DA tarafındaki akım düzgün olarak varsayılmıştır.

Tez çalışmasında, gerçek ve doğru bir harmonik analizi için, dönüştürücü sisteminin hem AA hem de DA tarafındaki akımın düzgün olmayan yapısı göz önüne alınmıştır. AA tarafındaki akım harmoniklerinin ve DA tarafındaki gerilim harmoniklerinin ifadesine dayalı olarak yeni bir harmonik eşdeğer devre modeli ileri sürülmüştür. Ayrıca AA/DA dönüştürücüsü bir anahtarlama devresi olmasına rağmen, ileri sürülen modellerle, söz konusu devre harmonikler açısından doğrusal bir devreye dönüştürülmüştür.

Bölüm 4’de, incelemeler ve modelin geliştirilmesi, bir fazlı tam dalga kontrolsüz doğrultucu devresi üzerinde gerçekleştirilmiştir. Daha sonra elde edilen sonuçlar, tüm doğrultucu devre türlerine uyarlanmıştır. Öncelikle referans alınan doğrultucu devresine ait geleneksel eşdeğer devre incelenmiştir. Daha sonra ise, AA tarafındaki akım harmoniklerinin ve DA tarafındaki gerilim harmoniklerinin ifadesine dayalı olarak yeni harmonik eşdeğer devre modeli ileri sürülmüştür.

Bölüm 5.1’de, tüm doğrultucu devre türleri için giriş gerilimi  $v_a(t)$ , çıkış gerilimi  $v_d(t)$ , giriş akımı  $i_a(t)$  ve çıkış akımı  $i_d(t)$  büyüklüklerine ilişkin hem deneysel sonuçlar hem de eşdeğer devreye ilişkin benzetim sonuçları ayrı ayrı verilmiştir. İleri sürülen eşdeğer devre modelini daha iyi test edebilmek amacıyla, örnek bir doğrultucu devresi için sonuçlar Bölüm 5.2’de birlikte ele alınmıştır.

Bu çalışmada, doğrultucu devrelerinin çıkışına omik ( $R_y$ ), endüktif ( $R_y-L_y$ ) ve akım kaynağı ( $I_d$ ) yüklerinin bağlı olması durumları incelenmiştir. Sonraki çalışmalarda model, başka bir DA/AA ve DA/DA dönüştürücünün girişi olabileceği gibi, doğrudan

bir DA motorunu besleyecek veya bir akümülatör şarjında kullanılacak şekilde geliştirilebilir.

## KAYNAKLAR

Abut N., *Güç elektroniği*, 1, Birsen Yayınevi, İstanbul, 2004.

Adak S., Enerji sistemlerinde harmonik distorsiyonun azaltılması, Doktora Tezi, Yıldız Teknik Üniversitesi, Fen Bilimleri Enstitüsü, İstanbul, 2003, 139775.

Akagi H., Active harmonic filters, *Proceedings of the IEEE*, 2005, **93**, 2128-2141.

Arrillaga J., Watson N. R., *Power System Harmonics*, 2nd ed., John Wiley&Sons Ltd., England, 2003.

Baghzouz Y., An accurate solution to line harmonic distortion produced by ac/dc converters with overlap and dc ripple, *IEEE Trans. Industrial Applications*, 1993, **29**, 536-540.

Bathurst G. N., Smith B. C., Watson N. R., Arrillaga J., Harmonic domain modelling of high-pulse converters, *Electric Power Applications, IEE Proceedings*, 1999, **146**, 335-340.

Bathurst G. N., Smith B. C., Watson N. R., Arrillaga J., A harmonic domain solution for systems with multiple high-power AC/DC converters, *Generation, Transmission and Distribution, IEE Proceedings*, 2001, **148**, 312-318.

Blooming T. M., Carnovale D. J., Application of IEEE STD 519-1992, *Harmonic Limits, Pulp and Paper Industry Technical Conference*, Wisconsin, USA, 18-23 June 2006.

Bodur H., *Güç elektroniği temel analiz ve sayısal uygulamalar*, 2. baskı, Birsen Yayınevi, İstanbul, 2012.

Carpinelli G., Gagliardi F., Russo M., Villacci D., Generalized converter models for iterative harmonic analysis in power systems, *IEE Proc.—Gener. Transm. Distrib.*, 1994, **141**, 445–451.

Chang G. W., Liu Y., Modeling of nonlinear components for harmonic studies, *IEEE Power Engineering Society General Meeting*, Taiwan, 13-17 July 2003.

Chou C. J., Liu C. W., Lee J. Y., Lee K. D., Optimal planning of large passive-harmonic-filters set at high voltage level, *Power Systems, IEEE Transactions on*, 2000, **15**, 433-441.

Çelik C., Dağıtım Sistemlerinde Enerji Kalitesi, Yüksek Lisans Tezi, Gazi Üniversitesi, Fen Bilimleri Enstitüsü, Ankara, 2008, 212937.

Dugan C., Mcgranaghan M. F., Santoso S., Beaty H. W., *Power systems quality*, 3rd ed., The McGraw-Hill Companies, USA, 2012.



De La Rose C. F., *Harmonics and power systems*, 1st ed., CRC Press, Missouri, USA, 2006.

Dommel H. W., Yan A., Wei S., Harmonics from transformer saturation, *IEEE Trans. on Power Delivery*, 1986, **2**, 209-215.

Fuentes J. A., Gabaldon A., Canovas F. J., Molina A., Harmonic model of electronically controlled loads, *IEEE Power Engineering Society Summer Meeting*, Seattle, WA, 16-20 July 2000.

Grotzbach M., Ried C., Investigation of AC/DC converter harmonics by an analytical based time-discrete approach, *IEEE Trans. on Power Delivery*, 1997, **12**, 874-880.

Haplin S. M., Comparison of IEEE and IEC harmonic standards, *Power Engineering Society General Meeting*, Seattle, WA, 12-16 June 2005.

IEEE PES Harmonic Working Group, Characteristics and modeling of harmonic Sources - Power electronic devices, *IEEE Trans. on Power Delivery*, 2001, **4**, 791-800.

Jalali S. G., Lasseter R. H., A study of nonlinear harmonic interaction between a single phase line-commutated converter and a power system, *IEEE Trans. on Power Delivery*, 1994, **9**, 1616-1624.

Karakaş A., Kocatepe C., Baysal M., Çakır H., Harmonikli sistemlerde filtre uygulamasının karşılaştırılması, *Enerji Verimliliği ve Kalitesi Sempozyumu*, Kocaeli, 17-18 Mayıs 2005.

Kasapoğlu A., *Devre Analizi*, 1.baskı, Yıldız Üniversitesi Yayınları, İstanbul, 1989.

Kocatepe C., Uzunoglu M., Yumurtacı R., Karakaş A., Arıkan O., *Elektrik tesislerinde harmonikler*, 1. baskı, Birsen Yayınevi, İstanbul, 2003.

Larsen E. V., Baker D. H., McIver J. C., Low-order harmonic interactions on AC/DC systems, *IEEE Trans.on Power Delivery*, 1989, **4**, 493-501.

Lee G.-M., Lee D.-G., Seok J.-K., Control of series active power filters compensating for source voltage unbalance and current harmonics, *IEEE Transactions on Industrial Electronics*, 2004, **51**, 132-139.

Lian Z. M., Bo W. X., Lang Y. X., A novel smart power management integrated circuit used for fluorescent lamp, *Power Electronics and Motion Control Conf.*, Xi'an, 14-16 August 2004.

Nahvi M., Edminister J. A., *Electric Circuits*, 4th ed., McGraw-Hill Companies, USA, 2002.

Mahmoud A. A., Shoultz R. D., A method for analyzing harmonic distribution in AC power systems, *IEEE Trans.on Power Apparatus and Systems*, 1982, **PAS-101**, 1815-1824.

Medora N. K., Kusko A., Computer-aided design and analysis of power-harmonic filters, *IEEE Trans. on Industry Applications*, 2000, **36**, 604-613.

Mohan N., Undeland T. M., Robbins W. P., *Power Electronics*, 3rd ed., Wiley, USA, 2002.

Nassif A. B., Xu W., Passive Harmonic Filters for Medium-Voltage Industrial Systems: Practical Considerations and Topology Analysis, *Power Symposium*, Las Cruces NM, 30 September - 2 October 2007.

Perkins B. K., Iravani M. R., Novel calculation of HVDC converter harmonics by linearization in the time-domain, *IEEE Trans.on Power Delivery*, 1997, **12**, 867-873.

Pileggi D. J., Chandra N. H., Emanuel A. E., Prediction of Harmonic Voltages in Distribution Systems, *IEEE Trans.on Power Apparatusand Systems*, 1981, **PAS-100**, 1815-1824.

Rajagopal N., Quaiocoe J. E., Harmonic analysis of three-phase AC/DC converters using the harmonic admittance method, *Proceedings of IEEE Canadian Conference on Electrical and Computer Engineering*, Vancouver BC, 14-17 September 1993.

Rice D. E., A detailed analysis of six-pulse converter harmonic currents, *IEEE Trans. on Industrial Applications*, 1994, **30**, 294-304.

Sadek K., Pereira M., Harmonic transfer in HVDC systems under unbalanced conditions, *IEEE Trans.on Power Systems*, 1999, **14**,1934–1939.

Sharma V., Fleming R. J., Niekamp L., An iterative approach for analysis of harmonic penetration in power transmission networks, *IEEE Trans. on Power Delivery*, 1991, **6**, 1698-1706.

Shore N. L., Andersson G., Canelhas A. P., Asplund G., A threepulse model of DC side harmonic flow in HVDC systems, *IEEE Trans. on Power Delivery*, 1989, **4**, 1945-1954.

Smith B. C., Watson N. R., Wood A. R., Arrillaga J., A sequence components model of the AC/DC converter in the harmonic domain, *IEEE Trans. on Power Delivery*, 1997, **12**, 1736-1731.

Smith B. C., Watson N. R., Wood A. R., Arrillaga J., Steady state model of the AC/DC converter in the harmonic domain, *IEE Proc.-Gener. Transm. Distrib.*,1995, **142**, 109-118.

Tanaka T., Akagi H., Proposal for a new equivalent circuit of diode rectifiers with respect to harmonics, *Power Conversion Conference*, Yokohama, 19-21 April 1993.

Tunçalp K., Sucu M., Elektrik Enerji Sistemlerinde Oluşan Harmoniklerin Filtrelenmesinde Pasif Filtre ve Filtreli Kompanzasyonun Kullanımı ve Simülasyon Örnekleri, *Gazi Üniversitesi Politeknik Dergisi*, 2006, **9**, 263-269.

- Wichakool W., Avestruz A. T., Cox R. W., Leeb S. B., Modeling and estimating current harmonics of variable electronic loads, *IEEE Trans. on Power Electronics*, 2009, **24**, 2803-2811.
- Xia D., Heydt G. T., Harmonic power flow studies Part I-Formulation and solution, Part II-Implementation and practical application, *IEEE Trans. Power Apparatus and Systems*, 1982, **PAS-101**, 1257-1270.
- Xu W., Dommel H. W., Hughes M. B., Chang G. W., Tang L., Modeling of adjustable speed drives for power system harmonic analysis, *IEEE Trans. Power Delivery*, 1998, **14**, 595-601.
- Xu W., Dommel H. W., Hughes M. B., Liu Y., Modeling of DC drives for power system harmonic analysis, *IEE Proc.—Gener. Transm. Distrib.*, 1999., **146**, 217-222.
- Xu W., Drakos J. E., Mansour Y., Chang A., A three-phase converter model for harmonic analysis of HVDC systems, *IEEE Trans. on Power Delivery*, **9**, 1724-1731.
- Yang C., Liu K., Wang D., Harmonic Resonance Circuit's Modeling and Simulation, *Power and Energy Engineering Conference, Asia-Pacific*, 27-31 March 2009.
- Yıldız A. B., *Elektrik devreleri (Kısım 1)*, 1. baskı, Kocaeli Üniversitesi Yayınları, Kocaeli, 2003.
- Zhang X. P., Handschin E., Frequency-dependent simple harmonic model of synchronous machines, *IEEE Power Engineering Review*, 2000, **20**, 58-60.

## KİŞİSEL YAYIN VE ESERLER

**Unverdi. E.**, Yıldız A. B., Equivalent circuit model containing AC and DC side harmonics of rectifier circuits, *4th IEEE International Conference on Power Engineering, Energy and Electrical Drives*, Istanbul, Turkiye, 13-17 May 2013.

**Unverdi. E.**, Yıldız A. B., Tek fazlı tam dalga doğrultucularda farklı yük durumlarındaki harmoniklerin incelenmesi, *3e Electrotech*, 2013, **226**, 204-212.

Yıldız A. B., **Unverdi E.**, Simplified harmonic model for full wave diode rectifier circuits, *Automatika – Journal for Control, Measurement, Electronics, Computing and Communications* (Article in press).

Yıldız A. B., **Unverdi E.**, Farklı doğrultucu yapılarının çeşitli yük durumları altındaki harmoniklerinin incelenmesi ve lineer modellerin elde edilmesi, *Kocaeli Üniversitesi BAP Projesi*, 2013/065, 2013.

## **ÖZGEÇMİŞ**

1989 yılında Bornova’da doğdu. İlk ve orta öğrenimini Manisa’da tamamladı. 2005 yılında Manisa Lisesinden mezun olduktan sonra, aynı yıl Kocaeli Üniversitesi Mühendislik Fakültesi Elektrik Mühendisliği bölümünü kazandı. Bir yıl hazırlık eğitimi ile birlikte 2010 yılında mezun oldu. 2010–2012 yılları arasında Beck&Pollitzer San Tic. Ltd. Şti şirketinde Satınalma mühendisi olarak çalıştı.

2011 yılında Kocaeli Üniversitesi Fen Bilimleri Enstitüsü Elektrik Mühendisliği Anabilim Dalında Yüksek Lisans öğrenimine başladı. 2012 yılından beri, Elektrik Mühendisliği Bölümünde Araştırma Görevlisi olarak çalışmaktadır.