

**YILDIZ TEKNİK ÜNİVERSİTESİ
FEN BİLİMLERİ ENSTİTÜSÜ**

**ENERJİ SİSTEMLERİNDE HARMONİK
DİSTORSİYONUNUN AZALTILMASI**

Elek. Yük. Müh. Süleyman ADAK

**F.B.E. Elektrik Mühendisliği Anabilim Dalında
Hazırlanan**

DOKTORA TEZİ

Tez Savunma Tarihi : 20.01.2003

Tez Danışmanı

Jüri Üyeleri

: Prof. Dr. Celal KOCATEPE (Y.T.Ü.)

: Prof. Dr. Hüseyin ÇAKIR (Y.T.Ü.)

: Prof. Dr. Nariman ŞERİFOĞLU (İ.Ü.)

: Doç. Dr. Özcan KALENDERLİ (İ.T.Ü.)

: Doç. Dr. Nurettin UMURKAN (Y.T.Ü.)

İstanbul, 2003

**İTÜ FEN BİLİMLERİ ENSTİTÜSÜ
ELEKTRİK MÜHENDİSLİĞİ ANABİLİM DALI**

İÇİNDEKİLER

	Sayfa
SİMGE LİSTESİ	v
KISALTMA LİSTESİ	vi
ŞEKİL LİSTESİ.....	vii
ÇİZELGE LİSTESİ.....	ix
ÖNSÖZ	x
ÖZET	xi
ABSTRACT	xii
1 GİRİŞ.....	1
1.1 Harmonik Tanımı.....	2
1.2 Harmonik Analizi	2
1.2.1 Analitik Yöntem	2
1.2.2 Grafik Yöntem	4
1.2.3 Hızlı Fourier Dönüşümü(FFT).....	5
1.2.4 Ölçme Yöntemi	5
1.3 Harmonikli Sistemlerde Tanımlamalar.....	5
1.3.1 Devre Büyüklüklerinin Tanımı	5
1.3.2 Harmonikli Büyüklüklerin Tanımı	7
1.3.2.1 Toplam Harmonik Distorsiyonu	7
1.3.2.2 Distorsiyon Faktörü	7
1.3.2.3 Tepe Faktörü	8
1.3.2.4 K- Faktörü.....	8
1.3.2.5 Harmonik Faktörü.....	8
1.3.2.6 Toplam Talep Distorsiyonu	8
2 HARMONİKLİ BİLEŞENLERİN KAYNAKLARI VE ETKİLERİ.....	9
2.1 Nonlinear Elemanlar	9
2.1.1 Transformatörler	10
2.1.2 Statik Dönüştürücüler	14
2.1.3 Generatörler	15
2.1.4 Ark Fırınları	15
2.1.5 Gaz Desarjlı Aydınlatma	17
2.1.6 Statik VAR Kompanzatörleri.....	19
2.1.7 Fotovoltaik Sistemler	19
2.1.8 Bilgisayarlar.....	19
2.1.9 Kesintisiz Güç Kaynakları	20

2.1.10	Doğru Akımla Enerji Nakli.....	20
2.2	Harmonik Kaynağı Olarak Üç Fazlı Kontrolsüz Doğrultucu	20
2.3	Harmonik Kaynağı Olarak Üç Fazlı Kontrollü Doğrultucu	23
2.4	Harmoniklerin Sisteme Etkileri	25
2.4.1	Harmoniklerin Sebep Olduğu Rezonans Olayları.....	26
2.4.2	Harmoniklerin Kondansatörler Üzerindeki Etkileri	27
2.4.3	Harmoniklerin Transformatörler Üzerindeki Etkileri.....	28
2.4.4	Harmoniklerin İletim Hatları Üzerindeki Etkileri.....	28
2.4.5	Döner Makinalar Üzerindeki Etkileri	29
2.4.6	Koruyucu Sistemler Üzerindeki Etkileri	30
2.4.7	Harmoniklerin Güç Faktörüne Etkileri	31
2.5	Harmonik Standartları.....	31
3	HARMONİK GİDERME YÖNTEMLERİ	34
3.1	Tasarım Aşamasında Alınabilecek Önlemler	34
3.1.1	Generatörlerde Alınabilecek Önlemler	34
3.1.2	Dönüştürücülerde Alınabilecek Önlemler	34
3.1.3	Transformatörlerde Alınabilecek Önlemler	34
3.2	Pasif Filtre.....	35
3.2.1	Seri Filtre	35
3.2.2	Şönt Filtreler ve Çeşitleri.....	35
3.3	Aktif Filtre	36
3.4	Harmonikli Akım Enjekte Ederek Harmonikleri Yoketme	37
3.4.1	Tam Dalga Kontrolsüz Doğrultucuda Üçüncü Harmonik Akımını Enjekte Ederek Harmonik Distorsiyonunun Azaltılması	40
3.4.2	Distorsiyon Azaltılmasının Analitik Olarak İncelenmesi.....	42
3.4.3	Enjekte Edilecek Optimal Akım Değeri	45
3.4.4	Akım Enjekte Edildikten Sonra Üç Fazlı Doğrultucu Giriş Akımı Harmonik Distorsiyonu.....	46
3.5	Genlik darbe Modülasyonu (PMW) Yöntemi ile Harmonik Giderme	47
3.5.1	Seçmeli Genlik Darbe Modülasyonu (SPWM)	48
4	ÖNERİLEN HARMONİK GİDERME YÖNTEMİ.....	50
4.1	Üç Fazlı Tam Dalga Kontrollü Doğrultucu	50
4.2	Tam Dalga Kontrollü Doğrultucu Çıkış Geriliminin Ortalama ve Efektif Değeri	52
4.2.1	Tam Dalga Kontrollü Doğrultucunun Çıkış Geriliminin Ortalama Değeri.....	52
4.2.2	Tam Dalga Kontrollü Doğrultucunun Çıkış Geriliminin Efektif Değeri.....	54
4.3	Tam Dalga Kontrollü Doğrultucunun Çıkış Geriliminin Fourier Analizi	55
4.4	Tam Dalga Kontrolü Doğrultucunun Giriş Akımına Ait Harmonik Distorsiyonu	58
4.4.1	Matlab Programı Kullanarak Doğrultucunun simülasyonu	59
4.5	Tam Dalga Kontrollü Doğrultucuda Önerilen Distorsiyonu azaltma Devresi.....	60
4.6	Akım Enjekte Devre Tipleri.....	61
4.7	Optimal Harmonik Akım Enjeksiyonu	63
4.8	Enjekte Edilen Akım Sonucunda Toplam Harmonik Distorsiyonu Değeri.....	69
4.8.1	Analitik Olarak THD ' nin Elde Edilmesi	69
4.8.2	Matlab Programı ile THD Elde Edilmesi	71
4.9	Enjekte Edilen Üçüncü Harmonik Akım Katsayısının Değişimi	76
4.10	Akım Enjekte Edildikten Sonraki Giriş Akımı Harmonik Faktörü	83

4.10.1	Onüçüncü Harmonige Ait Harmonik Faktörü	79
4.10.2	Ondokuzuncu Harmonige Ait Harmonik Faktörü	81
5	SAYISAL UYGULAMALAR	83
5.1	A Tipi Enjekte Devresi Kullanılarak Yapılan Harmonik Giderme Devresi	83
5.1.1	Tetikleme Açısının $\alpha = 45^\circ$ Olması Hali	83
5.1.1.1	Toplam Harmonik Distorsiyonu İçin Analitik Hesap ($\alpha = 45^\circ$)	84
5.1.1.2	Matlab programı ile toplam harmonik distorsiyonu belirlenmesi ($\alpha = 45^\circ$).....	85
5.2	Tetikleme Açısının 60 Derece Olması Hali	87
5.2.1	Toplam Harmonik Distorsiyonu İçin Analitik Hesap($\alpha = 60^\circ$).....	88
5.2.2	Matlab Programı İle Toplam Harmonik Distorsiyonunun Belirlenmesi($\alpha = 60^\circ$).....	89
5.3	B Tipi Enjekte Devresi Kullanılarak Yapılan Harmoni Giderme.....	93
5.3.1	Tetikleme Açısının 30 Derece Olması Hali	93
5.3.1.1	Toplam Harmonik Distorsiyonu Analitik Hesabı ($\alpha = 30^\circ$)	93
5.3.2.2	Matlab programı ile toplam harmonik distorsiyonun belirlenmesi ($\alpha = 30^\circ$).....	94
6	SONUÇLAR VE ÖNERİLER.....	97
	KAYNAKLAR	101
	EKLER	106
Ek 1	Üç Fazlı Tam Dalga Kontrollü Doğrultucunun Çıkış Geriliminin Fourier	107
	Analizi (A_n katsayısının bulunması)	
Ek 2	Üç Fazlı Tam Dalga Kontrollü Doğrultucunun Çıkış geriliminin Fourier	
	Analizi (B_n Katsayısının Bulunması).....	109
Ek 3	Tam Dalga Kontrollü Doğrultucu Akımına Ait Harmonik Distorsiyon Ait (A_n	
	Katsayısının Bulunması).....	112
Ek 4	Tam Dalga Kontrollü Doğrultucu Akımına Ait Harmonik Distorsiyonu(B_n	
	Katsayısının Bulunması).....	113
Ek 5	Üç Fazlı Tam Dalga Kontrollü Doğrultucu Giriş Akımı İfadesi	114
Ek 6	Üç Fazlı Tam Dalga Kontrollü Doğrultucu Giriş Akımı Toplam Harmonik	
	Distorsiyonu.....	115
Ek 7	Üç Fazlı Tam Dalga Kontrollü Doğrultucu Girişine Üçüncü Harmonik Bileşeni	
	Enjekte Edildikten Sonra, Doğrultucu Giriş Akım Efektif Değeri.....	116
Ek 8	Üç Fazlı Tam Dalga Kontrollü Doğrultucu Girişine Enjekte Edilen Üçüncü	
	Harmonik Akım Katsayısı (k)'nın Bulunması .(A_n , Fourier Katsayısının	
	Bulunması.).....	118
Ek 9	Üç Fazlı Tam Dalga Kontrollü Doğrultucu Girişine Enjekte Edilen Üçüncü	
	Harmonik Akım Katsayısı (k)'nın Bulunması.(B_n , Fourier Katsayısının	
	Bulunması.).....	121
Ek 10	Üç Fazlı Tam Dalga Kontrollü Doğrultucunun Girişine Enjekte Edilen Üçüncü	
	Harmonikli Akım Katsayısı (k)'nın Bulunması.....	124
	ÖZGEÇMİŞ	127

SİMGE LİSTESİ

D	Distorsiyon gücü
DF_I	Akım için distorsiyon faktörü
DF_V	Gerilim için distorsiyon faktörü
f_1	Temel harmonik frekansı
f_p	Paralel rezonans frekansı
f_s	Seri rezonans frekansı
I_1	Temel harmonik akımının etkin değeri
I_n	n. harmonik akımının etkin değeri
I_μ	Mıknatıslanma akımı
L	Endüktans
n	Harmonik mertebesi
P	Aktif güç
Q	Reaktif güç
R	Direnç, empedans
R_r'	Statora indirgenmiş rotor etkin direnci
R_s	Stator omik etkin direnci
S	Görünür güç
S_L	Omik yükün gücü
S_t	Transformatör nominal gücü
V_{L-L}	Fazlar arası gerilim
X	Reaktans
X_L	Endüktif reaktans
X_{L1}	Bobinin temel frekanstaki reaktansı
X_C	Kapasitif reaktans
X_{C1}	Kondansatörün temel frekanstaki reaktansı
X_{cn}	Kondansatörün n. harmonik için reaktansı
α	Tetikleme açısı
ω_r	Rezonans anındaki açısal frekans.
Z_t	Transformatör per unit (birim değer) empedans

KISALTMA LİSTESİ

AC	Alternative Current
CF	Crest Factor
CCM	Continuous Current Mode
DC	Direct Current
DF	Distortion Factor
DCM	Discontinuous Current Mode
DC	Direct Current (Doğru Akım)
FFT	Fast Fourier Transform
HVDC	High Voltage Direct Current
HDF	Harmonic Distortion Factor
IEEE	Institute of Electrical and Electronics Engineers
IEE	Institute of Electrical Engineers (İngiltere)
PWM	Pulse Width Modulation
PF	Power Factor
Pu	Per-unit
SHEM	Selective Harmonic Elimination Method
THD	Total Harmonic Distortion
THD _I	Total Harmonic Current Distortion
THD _V	Total Harmonic Voltage Distortion
TCR	Thyristor Controlled Reactors
UPS	Uninterruptible Power Supply

ŞEKİL LİSTESİ

Sayfa

Şekil 1.1 Yarı peryotta harmoniklerin durumu.....	1
Şekil 2.1 Lineer olmayan yükler ile harmonik akım kaynakları	9
Şekil 2.2 PC bilgisayara ait harmonik distorsiyonu.....	20
Şekil 2.3 Üç fazlı tam dalga kontrolsüz doğrultucuya ait giriş akımı dalga şekli	21
Şekil 2.4 Üç fazlı tam dalga kontrolsüz doğrultucu giriş akımı dalga formu.....	23
Şekil 2.5 Transformatörün n. harmonik için eşdeğer devresi.....	28
Şekil 2.6 Asenkron makinanın n. harmonik için eşdeğer devresi.....	29
Şekil 3.1 Seri filtrenin devrenin devreye bağlanması.....	35
Şekil 3.2 Şönt filtrenin devreye bağlanması.....	36
Şekil 3.3 Aktif güç filtresine ait blok şeması.....	37
Şekil 3.4 Üç fazlı yarım dalga doğrultucuda harmonik akım enjeksiyonu.....	38
Şekil 3.5 Çapsal doğrultucuda harmonik enjeksiyon devresi.....	38
Şekil 3.6 Üç fazlı kontrolsüz doğrultucuda harmonik enjeksiyonu.....	39
Şekil 3.7 Altı fazlı yıldız bağlı trafo üzerinden beslenen doğrultucu.....	40
Şekil 3.8 Üç fazlı doğrultucuda üçüncü harmonik akımının enjekte edilmesi	41
Şekil 3.9 Üç fazlı doğrultucuda harmonik akım enjeksiyonuna ait basitleştirilmiş devre	42
Şekil 3.10 Basit inverter elde etmeye ait prensip şeması.....	47
Şekil 3.11 Darbe genlik modülasyonunun prensip şeması	47
Şekil 3.12 Aşırı modülasyonlu PMW (m=1.3).....	48
Şekil 3.13 İki seviyeli PMW dalga formu ile tek dalga formu simetrisi	49
Şekil 4.1 Yüksek endüktif yüklü tam dalga tristör bağlantısı.....	50
Şekil 4.2 Tam dalga köprü doğrultucuda tristörlerin iletimde olduğu aralıklar	51
Şekil 4.3 Fazlar arası gerilimin dalga şekli	52
Şekil 4.4 Tam dalga kontrollü doğrultucu α tetikleme açısı ile tetiklendiğinde çıkış geriliminin dalga formu.....	52
Şekil 4.5 Üç fazlı tam dalga kontrollü doğrultucu çıkış ortalama gerilimi değişimi.....	53
Şekil 4.6 Kontrollü doğrultucuda çıkış efektif geriliminin α açısına bağlı değişimi	54
Şekil 4.7 Üç fazlı tam dalga kontrollü doğrultucunun çıkış dalga formu.....	55
Şekil 4.8 Tam dalga kontrollü doğrultucunun giriş akımı.....	58
Şekil 4.9 Üç fazlı tam dalga kontrollü doğrultucu için uygulama devresi.....	59
Şekil 4.10 Üç fazlı kontrollü doğrultucuya üçüncü harmonik akımını enjekte etme	60
Şekil 4.11 Akım enjekte devresinin basitleştirilmiş şekli.....	61
Şekil 4.12 GPS ve nivelman ortometrik yükseklikleri farkı.....	62
Şekil 4.13 Akım enjekte devreleri için eşdeğer devreler	62
Şekil 4.14 Akım enjekte devrelerine ait basitleştirilmiş eşdeğer devreler.....	63
Şekil 4.15 Girişe enjekte edilen harmonikli akım formu.....	64
Şekil 4.16 Giriş akımı ile enjekte edilen akım katsayısı arasındaki ilişki	66
Şekil 4.17 k katsayısı ile THD arasındaki ilişki	71
Şekil 4.18 Doğrultucu giriş akım değişimi.....	71
Şekil 4.19 A türü enjekte devresi ile harmonikli akım enjekte edildikten sonra doğrultucu giriş harmonik bileşenleri.....	72
Şekil 4.20 A türü akım enjekte devresi ile elde edilen ($\alpha = 0$) için uygulama devresi.....	73
Şekil 4.21 B türü akım enjekte devresi ile gerçekleştirilen uygulama devresi.....	75
Şekil 4.22 B türü akım enjekte devresi ile doğrultucu girişine harmonikli akım enjekte edildikten sonra doğrultucu giriş akım harmonik bileşenleri.....	74
Şekil 4.23 Tetikleme açısına bağlı k katsayısının değişimi.....	77
Şekil 4.24 Yedinci harmonik bileşen için harmonik faktörü ile enjekte edilen akım katsayısı arasındaki ilişki	79
Şekil 4.25 Onüçüncü harmonik bileşeni için harmonik faktörü ile enjekte edilen akım	

katsayısı k arasındaki ilişki	82
Şekil 4.26 Ondokuzuncu harmonik bileşeni için harmonik faktörü ile enjekte edilen akım katsayısı k arasındaki ilişki	83
Şekil 5.1 A tipi akım enjekte devresi ile üç fazlı tam dalga kontrollü doğrultucunun girişine harmonikli akım enjekte etme.....	83
Şekil 5.2 A tipi enjekte devresinde tetikleme açısının $\alpha = 45$ derece olması halinde sayısal uygulama devresi	86
Şekil 5.3 Kontrollü doğrultucu giriş akım harmonik bileşenleri	87
Şekil 5.4 $\alpha = 45$ derece için üç fazlı tam dalga kontrollü doğrultucu giriş akımı	88
Şekil 5.5 A tipi enjekte devresi ile tetikleme açısının ($\alpha = 60$ derece) olması halinde sayısal uygulama devresi	90
Şekil 5.6 $\alpha = 60$ derece tetikleme açısı için kontrollü doğrultucu giriş akım harmonikleri.....	92
Şekil 5.7 $\alpha = 60$ derece tetikleme açısı için doğrultucu giriş akımı	92
Şekil 5.8 B tipi akım enjekte devresi ile üç fazlı tam dalga kontrollü doğrultucu girişine harmonikli akım enjekte etme.....	93
Şekil 5.9 Tetikleme açısının $\alpha = 30$ derece olması halinde uygulama devresi	95
Şekil 5.10 Kontrollü doğrultucu giriş akım harmonik bileşenleri	96

ÇİZELGE LİSTESİ

Sayfa

Çizelge 1.1	Çeşitli simetri durumlarında Fourier katsayıları	4
Çizelge 2.1	Mıknatıslanma akım bileşenlerinin mıknatıslanma akımına oranı	12
Çizelge 2.2	Sıcakta haddelenmiş sacların özellikleri	13
Çizelge 2.3	Kristalleri yönlendirilmiş saclarda harmonik akım oranları	14
Çizelge 2.4	Ark fırınlarına ait harmonik değerleri	16
Çizelge 2.5	Fluoresan lamba harmonik distorsiyon değerleri(Akım için).....	17
Çizelge 2.6	Fluoresan lamba harmonik distorsiyon değerleri(Gerilim için).....	18
Çizelge 2.7	Magnetik balastlı floresan lamba harmonik spektrumu	18
Çizelge 2.8	Tristör kontrollü reaktörde harmonikler ve genlikleri	19
Çizelge 2.9	Altı darbeli kontrolsüz doğrultucu harmonik bileşenleri	23
Çizelge 2.10	Asenkron makinada harmoniklerin dönüşümü	30
Çizelge 2.11	Dağıtım sistemleri için akım bozulma sınırları.....	32
Çizelge 2.12	Limit harmonik akım değerleri	33
Çizelge 4.1	Kontrollü doğrultucu giriş akımı harmonik bileşenleri.....	71
Çizelge 4.2	B türü akım enjekte devresi uygulama sonuçları.....	74
Çizelge 5.1	Doğrultucu giriş harmonikli akımına ait harmonik bileşenler	87
Çizelge 5.2	Doğrultucu giriş harmonikli akım bileşenleri ve açılış değerleri	92
Çizelge 5.3	Doğrultucu giriş harmonikli akım bileşenleri ve açılış değerleri	95

ÖNSÖZ

Harmoniklerin enerji sistemleri üzerinde etkileri ile harmonikleri yok etme metodlarının incelendiği bu tezde, önce teorik çalışmalar yapılmış, daha sonra da MATLAB programı yardımı ile sonuçlar alınmıştır. Alınan sonuçlarla analitik çalışma sonuçları doğrulanmıştır. Bu çalışmalar sırasında bana yardım ve anlayış gösteren aileme teşekkürü bir borç bilirim. Ayrıca yardımlarını ve desteklerini esirgemeyen tez danışmanım sayın hocam Prof. Dr. Celal Kocatepe' ye teşekkürlerimi sunarım.



ÖZET

Elektrik enerji sisteminin ve bu sisteme bağlanan yüklerin arızasız ve güvenli bir şekilde çalışabilmesi için o sistemdeki dalga şeklinin sinüsoidal olması ve frekansının 50 Hz' lik tek frekansa sahip olması istenir. Ancak sisteme bağlanan bazı elemanlar ve bazı olaylar sonucunda akım ve gerilim büyüklükleri sinüsoidal özelliklerini kaybederek sistemde istenmeyen harmonikler oluşmaktadır.

Lineer olmayan yüklerin, elektrik dağıtım sistemlerinde, gerilim ve akım dalga biçiminde bozulma meydana getirdikleri uzun yıllardır bilinmektedir. Ancak günümüzde; eskiden beri var olan lineer olmayan yüklere ilaveten, güç elektroniği elemanlarının hızla yaygınlaşması ise dalga şeklindeki bozulmaya duyarlı elemanların sayısındaki artış, bu konuda yapılacak çalışmaların önemini artırmıştır.

Akım ve gerilim dalgalarında oluşan bu harmonikler elektrik tesislerine ve bu tesislere bağlı tüketicilere zarar vermekte veya tamamen işlemez hale getirmektedir.

Bu çalışmada harmonik distorsiyonunun azaltılması hedeflenmiş olup, üçüncü harmonik enjekte yöntemi kullanılmıştır. Enerji sistemlerinde çokça kullanılan 3 fazlı tam dalga doğrultucunun harmoniklerinin giderilmesi, kullanılan bu yöntem ile sağlanmıştır. Konu ile ilgili sayısal uygulama gerçekleştirilerek çeşitli tetikleme açıları için toplam harmonik distorsiyonu değeri hem analitik hem de MATLAB programı ile elde edilmiştir.

Bu çalışmanın birinci bölümünde, harmoniklerle ilgili tanımlar ve matematiksel bağıntılar verilmiştir. İkinci bölümde harmoniklere sebep olan elemanlar genel olarak incelenmiştir. Harmoniklerin güç sistemine etkileri verilmiş ayrıca bu etkiler maddeler halinde sıralanmıştır. Üçüncü bölümde harmonikleri giderme metotları incelenmiştir. Dördüncü bölümde ise üçüncü harmonik akımını enjekte ederek harmonik distorsiyonunun azaltılması incelenmiştir. Beşinci bölümde ise konu ile ilgili sayısal uygulamalar yapılmıştır.

En son bölümde yapılan çalışmadan çıkarılan sonuçlar ile yapılmasının uygun olduğu önerilere yer verilmiştir.

Anahtar kelimeler: Toplam harmonik distorsiyonu, Üçüncü harmonik akımını enjekte etme, Aktif filtre, Pasif filtre, Harmonikleri azaltma

ABSTRACT

To operate electric energy system and their loads reliably, the waveform of the system magnitudes should be in the form of sinusoidal with 50 Hz. However, owing to elements connected to the power system and some events the voltage and current waveform are deviated from pure sinusoidal form, which cause to undesired harmonics.

It has long been known that nonlinear loads cause to voltage and current waveform distortion in distribution networks. In addition importance of the research on this subject has recently intensified due to both the widespread use of power electronic devices and the increase in the number of sensitive electrical devices to waveform distortion.

Voltage and current waveform distortion due to harmonics can make the electrical system and electrical consumer either damaged or out of order.

The aim of this study is to reduce harmonic distortion by on the third harmonic injection. The elimination of harmonics resulting from widespread use of three phase full wave rectifier in energy system is accomplished by the proposed method. In relation to numerical application, total harmonic distortion values for various firing angles are obtained via both numerical method and MATLAB package program.

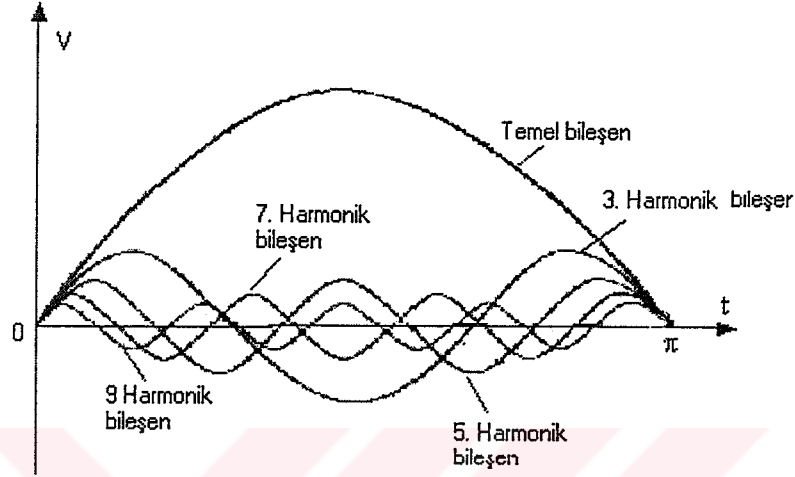
In the first chapter of this study, general mathematical expressions and definitions related to harmonics are given. In the second chapter, components causing to harmonics are examined in general sense. The effects of harmonics on power systems are examined and the effects are given. In the third chapter, harmonics mitigation techniques are investigated. In the fourth chapter, reduction of distortion via third harmonics current injection is examined. In the fifth chapter, numerical applications are presented.

The results obtained from numerical example and future studies are given in the final chapter.

Keywords:Total harmonic distortion, Elimination harmonics, Third harmonic current injection Active filter, Passive filter, Reduction of harmonics

1 GİRİŞ

Bilindiği elektrik enerjisi üç aşamadan geçerek alıcılara ya da yüklerle ulaşmaktadır. Elektrik enerjisinin üretimi, iletimi ve dağıtımı aşamalarında akım ve gerilim büyüklüklerinin sinüsoidal biçimli olması gereklidir. Fakat bu her zaman gerçekleşmeyebilir. Çeşitli nonlineer yükler nedeniyle sistemde çeşitli frekansta sinüsoidal dalgalar görülebilir.



Şekil 1.1 Yarı periyotta harmonik bileşenler

Şekil 1.1’de yarı periyotta harmoniklerin durumu gösterilmektedir. Elektrik enerji sistemlerinde manyetik ve elektrik devre lineersizlikleri, harmoniklerin ortaya çıkmasında en önemli etkenlerdir. Harmoniklerin meydana gelmesi ile de sinüzoidal dalga şeklinden uzaklaşılacak yani dalga şeklinde bir bozulma (distorsiyon) görülecektir. Akım ve gerilimde oluşan bu bozulma elektrik tesisleri ve bu tesislere bağlı güç sistemlerine zarar vermekte ve hatta bazen sistemleri çalışamaz hale getirmektedir.

Manyetik devre lineersizliği, demir çekirdekli bobin, transformatör, generetör gibi elemanların doymaya giderek manyetik bakımdan lineer olmayan bir olayın meydana gelmesidir. Elektrik devre lineersizliği ise, akımı ile gerilimi arasında ilişkisi doğrusal olmayan bir elemanda arka çalışan işletme araçlarında yarı iletken elemanlar kullanılarak sinüsoidal dalganın bazı kısımlarının kırılması sonucunda meydana gelir. Bu lineersizlikler şebekenin akım ve gerilim dalga şeklinin sinüzoidallikten uzaklaşmasına sebep olmaktadır. Bu tür elemanlara örnek olarak şunlar verilebilir. DC çevirici, DC evirici, motor kontrol devreleri, statik VAR generetörleri, anahtarlamalı güç kaynakları gibi güç elektroniği elemanlı devre, flüoresan,

cıva arkı, cıva buharı, neon, ksenon ve yüksek basınçlı sodyum lambalar gibi gaz deşarjlı aydınlatma elemanları, akü ve fotovoltaiik sistemleri ve elektrikli ulaşım sistemleri gibi sistemler sayılabilir.

1.1 Harmonik tanımı

Harmonikler genel olarak devredeki elemanın özelliğine ve kaynağın durumuna göre ortaya çıkarlar. Eğer devrede nonlinear elemanlar veya nonsinüzoidal kaynaklar bulunacak olursa veya bunların her ikisinin de olması durumunda meydana gelirler. Bu şekilde çeşitli elemanlar veya olaylar sonucunda enerji sistemindeki sinüzoidal dalga biçimi bozulur. Bu bozuk dalgalar “nonsinüzoidal dalga” olarak adlandırılır. Nonsinüzoidal dalga biçimleri, periyodik olmakla birlikte sinüzoidal dalga ile frekans ve genliği farklı diğer sinüzoidal dalgaların toplamından oluşmaktadır. Temel dalga dışındaki sinüzoidal dalgalara “harmonik bileşen” adı verilir. Güç sistemindeki sinüzoidal dalganın simetrisinden dolayı 3., 5., 7., 11, gibi tek harmonik bileşenleri bulunur. Çift harmonikli bileşenler bulunmaz. Şekil 1.1’de bir yarı periyottaki temel bileşen ve harmonik bileşenler gösterilmiştir.

1.2 Harmoniklerin analizi

Harmoniklerin analizinde, periyodik dalganın bir doğru bileşeni ile bir temel frekanslı saf sinüs dalgası ve frekansları farklı saf sinüs dalgalarının toplamından oluştuğu gösterilir. Böylece nonsinüzoidal dalgaların “harmonik spektrumu” elde edilmeye çalışılır.

1.2.1 Analitik yöntem

Periyodik bir nonsinüzoidal dalganın değişik genlik ve faz açılarına sahip sinüzoidal dalgaların toplamı olarak yazılabileceği veya çeşitli genlik ve faz açılarına sahip sinüzoidal dalgaların toplamı ile nonsinüzoidal dalganın meydana geldiği J. Fourier tarafından kanıtlanmıştır. Böyle bir fonksiyon,

$$F(t) = A_0 + A_1 \sin(2\pi f_1 t + \phi_1) + A_2 \sin(2\pi f_2 t + \phi_2) + \dots + A_n \sin(2\pi f_n t + \phi_n) \quad (1.1)$$

şeklinde ifade edilir. Burada A_0 ,ortalama değeri, 1 indisi ile gösterilen terim ise “Temel bileşen” olarak adlandırılır. 2., 3., 4., ..., n indisleri gösterilen bileşenlere ise “harmonik bileşen ” adı verilmektedir. $A_2, A_3, \dots, A_n$ harmoniklerin genliklerini, f_1 temel bileşen

frekansını, $f_2, \dots, f_n$ harmonik bileşenlerin frekansını ifade etmektedir. Harmoniklerin açısal frekansları ve ϕ_1 temel bileşen faz acısını $\phi_2, \dots, \phi_n$ harmonik bileşenlerin faz acılarını göstermektedir. Temel bileşen ile n. harmonik frekansı arasında ,

$$f_n = n \cdot f_1 \quad (1.2)$$

bağıntısı vardır. Denklem (1.1) gibi ifade edilen seriye “Fourier serisi”, bu seri elemanlarına da “Fourier bileşenleri” adı verilir. Herhangi bir periyodik dalganın fourier serisine açılabilmesi için Dirichlet koşulları olarak bilinen koşulların sağlanması gerekir. Bu koşullar,

- Fonksiyonun sonlu sayıda sayı da süreksizlik noktasının bulunması
- Fonksiyonun ortalama değerinin bulunması
- Fonksiyonun sonlu sayıda negatif ve pozitif tepe değerlerinin bulunmasıdır.

Bir nonsinüsoidal dalga denklem (1.1) deki sinüsoidal bileşenlerle ifade edildiği gibi ,

$$F(t) = A_0 + A_1 \sin \omega t + \dots + A_n \sin \omega_n t + B_1 \cos \omega t + \dots + B_n \cos \omega_n t \text{ şeklinde ifade edilir.}$$

Bu ifadedeki katsayılar şu şekilde bulunur.

$$\left. \begin{aligned} A_0 &= \frac{1}{2\pi} \int_0^{2\pi} f(\omega t) d\omega t \\ A_n &= \frac{1}{\pi} \int_0^{2\pi} f(\omega t) \sin(n\omega t) d\omega t \\ B_n &= \frac{1}{\pi} \int_0^{2\pi} f(\omega t) \cos(n\omega t) d\omega t \end{aligned} \right\} \quad (1.3)$$

Nonsinüsoidal dalganın özelliğine göre bu katsayılardan bazıları bulunacak bazıları ise sıfır olacaktır. Çizelge (1.1) de bu durum özetlenmiş bulunmaktadır.

Çizelge 1.1 Çeşitli simetri durumlarında Fourier katsayıları

Fonksiyonun özelliği	Matematiksel ifadesi	Fourier katsayıları
Çift fonksiyon	$f(-t) = f(t)$	$B_n = \frac{1}{\pi} \int_0^{2\pi} f(t) \cos(n\omega t) d\omega t$ $A_n = 0$
Tek fonksiyon	$f(-t) = -f(t)$	$B_n = 0$ $A_n = \frac{1}{\pi} \int_0^{2\pi} f(t) \sin(n\omega t) d\omega t$
Yarım dalga Simetrisi	$f(t) = -f(t+T/2)$	$A_n = B_n = 0 \quad (n'nin \text{ çift değerlerinde.})$ $B_n = \frac{1}{\pi} \int_0^{2\pi} f(t) \cos n\omega t d(\omega t) \quad (n'nin \text{ çift değ.})$ $B_n = \frac{1}{\pi} \int_0^{2\pi} f(t) \sin n\omega t d(\omega t) \quad (n'nin \text{ tek değ..})$

1.2.2 Grafik yöntem

Fonksiyonun matematiksel olarak ifade edilmediği durumlarda kullanılır. Nonsinüsoidal dalgalar için osiloskoptan alınan veya deney yoluyla elde edilen dalga formu bir periyot için s eşit parçaya bölünür. Formüller yardımı ile fourier katsayıları hesaplanır.

$$A_0 = \frac{2}{s} \sum_{k=1}^{\infty} f_k \quad (1.4)$$

$$A_n = \frac{2}{s} \sum_{k=1}^{\infty} f_k \text{Sink} \frac{2\pi.t}{s} \quad (1.5)$$

$$B_n = \frac{2}{s} \sum_{k=1}^{\infty} f_k \text{Cosk} \frac{2\pi.t}{s} \quad (1.6)$$

Bu eşitliklerdeki, f_k değeri fonsiyonun her k değerine karşılık elde edilen değeridir. s ne kadar büyük olursa hesaptaki doğruluk o oranda artacaktır.

1.2.3 Hızlı fourier dönüşümü(FFT)

Bilgisayar desteği ile yapılan Fourier analizidir. Pratikte hızlı Fourier transformu çözümü için pratikte matematiğe dayalı algoritmalar kullanılır. Bu algoritmalarda sıra önemlidir. Yapılan işlemlere “Kelebek” adı verilir. Özel entegre devrelere bu işlemler uygulanır. z transformundan, Nyquist frekansından ve pencere (window) fonksiyonlarından yararlanılarak örnekleme ve dönüşümler yapılır. Son yıllarda hızlı fourier dönüşümüne konularında paket programlar geliştirilmiştir.

1.2.4 Ölçme yöntemi

Bu konuda üretilmiş olan ölçme aletleri ile bir akım ya da gerilime ait harmonik bileşenler direkt olarak tespit edilir. “Harmonik Analizatörü “ olarak adlandırılan bu cihazlar ölçme kapasitelerine bağlı olarak yüksek dereceli(örneğin 40 harmonikli) harmonik bileşenleri belirleyebilmektedir.

1.3 Harmonikli sistemlerde tanımlamalar

Güç sistemlerinde harmonik etkinliklerinin her geçen gün artması, bu etkilerin minimuma indirilmesi ve sınıflandırılmasında kolaylık sağlamak için genel tanım büyüklüklerinin verilmesini zorunlu kılmıştır.

1.3.1 Devre büyüklüklerinin tanımı

Harmonik bileşenleri içeren akım ve gerilimin ani değerleri,

$$i(t) = I_0 + \sum_{n=1}^{\infty} I_{mn} \cdot \text{Sin}(n\omega t + \gamma_n) \quad (1.7)$$

$$v(t) = V_0 + \sum_{n=1}^{\infty} V_{mn} \sin(n\omega t + \delta_n) \quad (1.8)$$

şeklinde ifade edilir. Akım ve gerilimin n. harmonik için etkin değerleri sırayla,

$$I_n = \frac{I_{mn}}{\sqrt{2}} \quad (1.9)$$

$$V_n = \frac{V_{mn}}{\sqrt{2}} \quad (1.10)$$

ile belirlenir. Akım ve gerilimin etkin değerleri sırayla,

$$I = \sqrt{\sum_{n=0}^{\infty} I_n^2} = \sqrt{I_0^2 + I_1^2 + I_2^2 + \dots + I_n^2} \quad (1.11)$$

$$V = \sqrt{\sum_{n=0}^{\infty} V_n^2} = \sqrt{V_0^2 + V_1^2 + V_2^2 + \dots + V_n^2} \quad (1.12)$$

ifadelerinden tespit edilir (Shepherd ve Zand, 1979). Bu eşitliklerde I_0 ve V_0 akım ve gerilimin doğru bileşeni, n değeri harmonik mertebesini, I_{mn} ve V_{mn} , n. harmonik akım ve gerilimin tepe değerini göstermektedir. γ_n 'n. harmonik akımının faz açısı, δ_n ' ise n. harmonik gerilimin faz açısını ifade etmektedir.

Böyle büyüklüklerin bulunduğu devrede aktif güç ifadesi,

$$P = V_0 \cdot I_0 + \sum_{n=1}^N V_n \cdot I_n \cos(\delta_n - \gamma_n) \quad (1.13)$$

ile reaktif güç ise,

$$Q = \sum_{n=1}^N V_n I_n \sin(\delta_n - \gamma_n) \quad (1.14)$$

denklemleri ile tanımlanır. Görünür güç ,

$$S = V \cdot I = \sqrt{\sum_{n=0}^N V_n^2} \cdot \sqrt{\sum_{n=0}^N I_n^2} \quad (1.15)$$

Eşitliği ile ifade edilir. Harmonikli güç sistemlerinde tanımlanan diğer büyüklük distorsiyon

gücüdür. $S^2 = P^2 + Q^2 + D^2$ ifadesinden distorsiyon gücü ,

$$D = \sqrt{S^2 - P^2 - Q^2} \quad (1.16)$$

olarak belirtilir (Shepherd ve Zand, 1979). Farklı frekanslı akım ve gerilim bileşenlerin çarpımından oluşan bu gücün fiziksel anlamı ve reaktif güç ile ilişkisi halen tartışılmaktadır.

1.3.2 Harmonikli büyüklüklerin tanımı

Bu büyüklükler enerji kalitesi ile ilgili büyüklüklerdir. Değerleri ne kadar küçük olursa ,enerji tesislerindeki akım ve gerilimin değeri sinüs eğrisine daha yakın olur. Saf sinüs eğrisi durumunda harmonik bulunmayacağından ,harmoniklerin değeri matematiksel olarak sıfır olacağından bu büyüklüklerin değeri de sıfır olur.

1.3.2.1 Toplam harmonik distorsiyonu

Harmonik bileşenlerin temel bileşene göre seviyesini belirlemede dikkate alınan en önemli ölçüttür. Sinüsoidalden uzaklaşmayı, distorsiyonu diğer bir deyişle bozulmanın derecesini belirtir. Hem gerilim, hem de akım için verilebilir

$$THD_v = \frac{1}{U_1} \left(\sum_{n=2}^{\infty} U_n^2 \right)^{1/2} \quad (1.17)$$

şeklinde ifade edilir. Akım toplam harmonik distorsiyonu (akım bozulma faktörü) THD_I ,

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

şeklindedir.

1.3.2.2 Distorsiyon faktörü

Akım ve gerilim için distorsiyon faktörü,

$$DF_I = \frac{1}{I} \left(\sum_{n=2}^{\infty} I_n^2 \right)^{1/2} \quad (1.19)$$

Gerilim değeri için,

$$DF_v = \frac{1}{U} \left(\sum_{n=2}^{\infty} U_n^2 \right)^{1/2} \quad (1.20)$$

olarak ifade edilir.

1.3.2.3 Tepe faktörü (Crest Factor,CF)

Sinüzoidal olmayan dalgalar için tepe faktörü ,

$$CF = \frac{\text{Dalga'nın tepe değeri}}{\text{Dalga'nın efektif değeri}} \quad (1.21)$$

ifadesi ile belirtilir (Dugan vd., 1996).

1.3.2.4 K – Faktörü

Kuru tip transformatörlerin K faktörü,nonlineer yüklenen ve genellikle 500 KVA'nın altındaki transformatörlerde yüklenme kapasitesinin bir ölçütüdür (Kerszenbaum vd., 1991 ; Linden, 1996). Bu faktör imalatçılar tarafından ifade edilen bir büyüklük olup ,

$$K_{\text{Faktörü}} = \sum_{n=1}^{\infty} I_n^2 (pu)n^2 \quad (1.22)$$

olarak ifade edilir (Linden, 1996). Burada I_n birm değer (p.u)t olarak transformatörün akım bileşenidir.

1.3.2.5 Harmonik faktörü

Her bir harmonik bileşenin seviyesini belirlemede kullanılır. Örneğin gerilim için,

$$HF_n = \frac{V_n}{V_1} \quad (1.23)$$

$V_n = n'$ ci harmonik gerilimine ait efektif değeri, V_1 gerilimin temel bileşeninin efektif değerini göstermektedir.

1.3.2.6 Toplam talep distorsiyonu

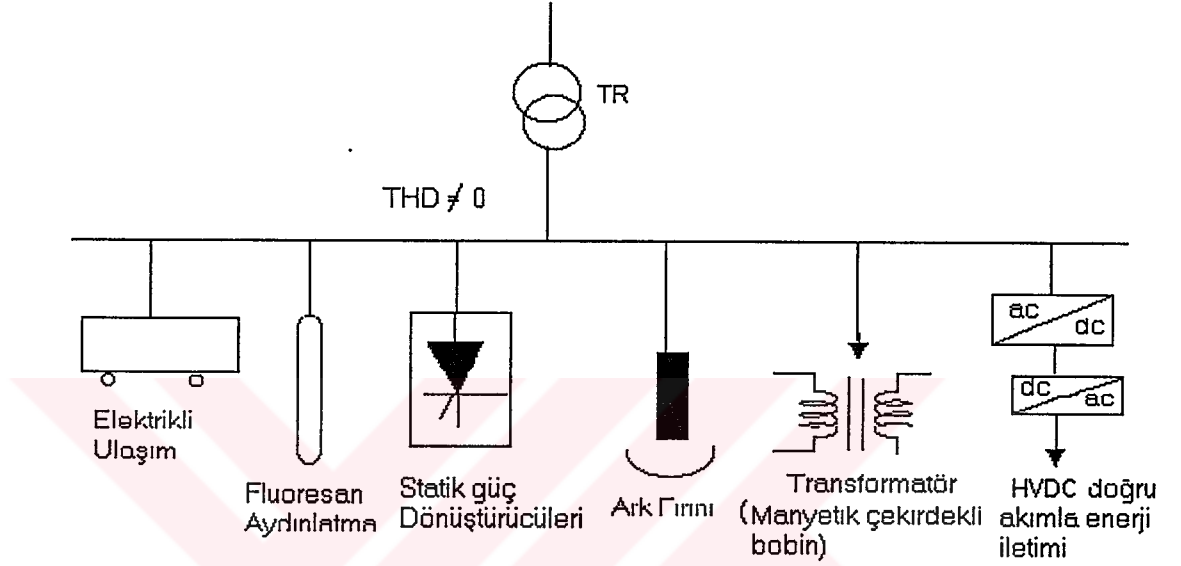
Çekilen yük akımına ait distorsiyonu belirlemede kullanılır. Toplam talep distorsiyonu (TTD)

$$TDD = \frac{(\sum_{n=2}^{\infty} I_n^2)^{1/2}}{I_L} \quad (1.24)$$

ile belirtilir. Burada I_n harmonik akımını , I_L ise 12 ay boyunca talep edilen maksimum akımların matematiksel ortalamasını göstermektedir.

2 HARMONİKLERİN KAYNAKLARI VE ETKİLERİ

Tüketiciler elektrik enerjisinin, kalitesinden önemli derecede etkilenirler. Güç kalitesi olarak belirtilen enerjinin belli şartları taşıma gerekliliği, artık vazgeçilmez bir olgudur. Güç kalitesini olumsuz etkileyenlerden biri de harmoniklerdir. Harmoniklere nonlineer yükler neden olurlar. Şekil 2.1’de lineer olmayan yüklerden bazıları görülmektedir.



Şekil 2.1 Nonlineer olmayan yükler ile harmonik akım kaynakları

2.1 Nonlineer elemanlar

Harmoniklerin oluşmasının başlıca sebebi, elektrik devrelerinde kullanılan lineer olmayan devre elemanlarıdır. Bu devre elemanlarının, gerilimi ile akımı arasındaki bağıntının lineer olmayışından harmonikler oluşmaktadır. Magnetik devrelerin aşırı doyması, elektrik arkları ve güç elektroniğindeki sinüzoidal gerilimin anahtarlanması ve kısılması lineer olmayan olaylardır. Harmoniklerin oluşmasına neden olan kaynakların başlıcaları şunlardır:

- Transformatörler
- Statik dönüştürücüler (Konvertörler)
- Generatörler
- Ark fırınları
- Gaz deşarjlı aydınlatma armatürleri

- Statik VAR kompanzatörleri
- Fotovoltanik sistemler
- Bilgisayarlar
- Kesintisiz güç kaynakları
- Doğru akım ile enerji iletimi
- Elektrikli ulaşım sistemleri

2.1.1 Transformatörler

Güç sistemlerindeki en önemli eleman olan transformatörler, demir çekirdeği bulunan bobinden oluştuğu için harmoniklere yol açmaktadır (Dommel v.d, 1986). Demir çekirdeğinin mıknatıslama karakteristiği lineer olmadığından, transformatör doyuma gitmekte ve harmonikler üretmektedir.

Transformatörler sinüzoidal gerilimle çalışma altında lineer mıknatıslama karakteristiği bölgesinde sinüzoidal çıkış büyüklüğü verecek şekilde tasarlanırlar. Transformatörlerin nominal değerlerinin dışında çalışması nüvede daha çok doymaya ve harmonik akımları seviyesinde hızla artmaya sebep olabilir (Szabados ve Lee, 1981). Mıknatıslama akımı harmonikleri günün erken saatlerinde en yüksek seviyeye ulaşır. Çünkü sistem yükü az olup, gerilim yükselerek aşırı uyarma meydana gelir, aşırı uyarmayla oluşan akım harmoniklerinde 3., 5. ve 7. harmonikler etkili olur (Arrillaga v.d. , 1985). Akım şiddeti bakımından en önemli harmonik 3. harmoniktir. 3 ve 3'ün katı harmonikler arasında 360 derecenin tam katları kadar faz farkı olduğundan hepsi aynı fazdadır.

Harmonik akımları transformatörün primer reaktansı, hattın reaktansı ve generatörün kaçak reaktansı üzerinden geçerek harmonik gerilim düşümü meydana getirir; generatörde sinüs şeklinde emk üretildiği halde çıkış uçlarındaki gerilim şekli bozulabilir. Bununla beraber mıknatıslama akımlarının şebekeye geçip geçmemesi transformatörün bağlantı grubu, primerin yıldız bağlı olması halinde yıldız noktasının şebekenin nötrüne bağlı olup olmaması ve transformatördeki manyetik devrenin geometrik yapısına bağlı olarak değişmektedir.

Transformatörlerin harmonik üretme özelliği, demir çekirdeğin mıknatıslanma karakteristiğinin lineer olmayışından ileri gelir (Bayram, 1984). Transformatörler doyuma gitmekte ve harmonikler üretmektedirler. Transformatörlerin nominal değerlerin dışında çalışması nüvede daha çok doymaya sebep olur. Doyma harmonik akımların seviyesinde

hızlı artmaya sebep olur.

Transformatörlerde genelde iki türlü harmonik oluşur. Bu harmonikler akım harmonikleri ve gerilim harmonikleri olarak sınıflandırılır. Akım devresinde akan yüksek harmoniklerden dolayı ilave joule ($R \cdot I^2$) kayıpları oluşur. Çekirdek demir kayıpları artar. Haberleşme devreleri üzerinde magnetik etkiler yapar. Gerilim harmonilerinin etkileri. Dielektrik zorlanmasını artırır. Haberleşme devrelerine elektrostatik etki yapar. Transformatörün endüktansı ile transformatöre bağlı tüketicilerin kapasitesi arasında rezonans oluşmasına sebep olur. Bu etkiler istenmeyen etkilerdir

Akım şiddeti bakımından en önemli harmonik 3. harmoniktir. 3 ve 3 ün katı harmoniklerin en önemli özellikleri, bunlar arasındaki faz farkının 360 derecenin tam sayılı katlarına eşit olması, yani bunların hepsinin aynı fazda olmalarıdır.

Üç fazlı transformatörlerde mıknatıslanma akımı transformatörün bağlama şekline ve magnetik devresinin yapısına bağlı olarak değişir. Üç ve üçün katı harmonikler çeşitli bağlantı grupları ile yok edilebilirler. 5, ve 7, harmoniklerin etkileri soğukta haddelenmiş ve kristalleri yönlendirilmiş saclar kullanılarak azaltılabilir.

Transformatörlerde mıknatıslanma akımının 3 ve 3 'ün katı harmoniklerin şebekede bulunmasını önlemek için primer yıldız bağlı transformatörlerin yıldız noktası ,şebekenin nötr hattına bağlanmaz veya sargıların biri üçgen bağlanır veya büyük güçlü transformatörlerde olduğu gibi üçgen bağlı tersiyer sargı kullanılır.

Transformatörlerde kristalleri magnetik yönlendirilmiş saclar kullanarak harmoniklerin etkileri azaltılabilir. 1600 Gauss' ta kristalleri magnetik yönlendirilmiş saclardan oluşan trafo çekirdeklerinde muhtelif harmoniklerin etkin değeri ile toplam mıknatıslanma akımının etkin değeri arasındaki oranlar. Çizelge 2.1' de verilmiştir (Boduroğlu , 1988).

Çizelge 2.1 Mıknatıslanma akımlarının oranı

Harmonik bileşenler n	1	3	5	7	9
$I_{\mu n} / I_{\mu}$	0.86	0.40	0.23	0.12	0.07

Mıknatıslanma akımlarının harmoniklerinin tepe değerleri, temel mıknatıslanma akımının tepe değerinden oldukça küçüktür. Transformatörlerin mıknatıslanma akımları nominal akımlarının %0.5 ile %1 'i kadardır. Buna rağmen seri bağlı generetör, hat ve transformatör reaktansları frekansla orantılı arttıklarından, özellikle düşük yüklerde yüksek harmonik akımlarının bunlar üzerinde sebep oldukları reaktif gerilim düşümleri büyük değerler alır. Mıknatıslanma akımlarının şebekeye geçişleri aşağıdaki faktörlere bağlıdır (Boduroğlu , 1988).

- Transformatör sargılarının bağlanış tarzı (bağlama grubu)
- Primlerdeki yıldız bağlı sargılarda, yıldız noktasının şebekenin nötr hattına bağlanıp bağlanmamasına,
- Transformatörlerde mıknatıslanmanın serbest veya zorunlu olmasına.

Buna rağmen şebekeden 5. ve 7. harmonikler geçmeye devam eder. Bu tür harmonikler rezonansa sebep olabilir. Bunu önlemek için transformatörlerde konstrüktif tedbirlere başvurulabilir. Şebekedeki mıknatıslanma akımını düşürmek için en uygun tedbir magnetik endüksiyonu düşük tutmaktır. Transformatörlerde soğuk haddelenmiş ve kristalleri yönlendirilmiş sac kullanmakla bu sonuca ulaşılmaktadır. Bu tür sacları kullanmakla harmonikler değerlerinin 1/5 ne kadar düşmektedirler. Böylece harmoniklerin tehlikesi büyük çapta önlenmiş olur.

Çizelge 2.2 Sıcakta haddelenmiş yüksek alaşımlı saçlardan imal edilmiş bir transformatörde mıknatıslanma akımının harmoniklerinin temel harmoniğe oranları gösterilmiştir (Boduroğlu , 1988).

Çizelge 2.2 Sıcakta haddelenmiş saçların özellikleri

Çekirdek endüksiyonu (Gaus)	I_3 / I_1	I_5 / I_1	I_7 / I_1	I_9 / I_1
10000	-0.162	0.05	0.011	0.009
12000	-0.287	0.095	-0.013	0.01
14000	-0.528	0.267	-0.013	0.062
16000	-0.658	0.331	-0.121	0.031
18000	-0.658	0.275	-0.053	-0.018

Çizelge 2.3 'te magnetik endüksiyonu ortalama 16000 gauss olan soğukta haddelenmiş ve

kristalleri yönlendirilmiş bir transformatörde mıknatıslanma akımının harmoniklerinin temel harmoniğe oranı gösterilmiştir (Boduroğlu, 1988) .

Çizelge 2.3 Kristalleri yönlendirilmiş saçlar

I_3 / I_1	I_5 / I_1	I_7 / I_1	I_9 / I_1
0.08	0.44	0.27	0.14

2.1.2 Statik dönüştürücüler

Güç elektroniği düzenekli donanımlar önemli birer harmonik kaynağıdır. Genel anlamda doğrultucular, eviriciler, frekans çeviricileri kıyıcılar birer harmonik kaynağıdır. Bu cihazlar elektronik anahtarlama prensibiyle çalıştıklarından harmonik üretmektedirler.

Harmonik kaynaklarından biri de bir fazlı ve üç fazlı hat komutasyonlu konverterlerdir. DC iletim sistemleri,akü ve fotovoltaiik sistemler hat komutasyonlu konverterler üzerinden beslenir (Kocatepe, 1998). Büyük güçlü konverterin kullanım alanlarından biride elektrikli ulaşımdır. Üç fazlı konverterin bir fazlı konvertere üstünlüğü, üç ve üçün katı harmonikleri üretmemesidir (Dugan vd.,1996).

İdeal bir dönüştürücünün ürettiği harmonik bileşenleri,

$$n=k p \pm 1$$

(2.1)

İle belirlenir. Burada P: darbe sayısı, k:1 den sonsuza herhangi bir sayı, n: harmonik mertebesini göstermektedir (Sundberg, 1976). Böylece, üç darbeli doğrultucu üç ve üçün katları hariç tüm harmonikleri üretir. 6 darbeli bir doğrultucu, 5., 7., 13., 17., 19., 23., 25., v.s.harmonikleri üretir. 12 darbeli doğrultucu ise 11., 13., 23., 25., 35., 37., v.s.harmonikleri üretir. Genellikle, endüstriyel tesislerde 6 darbeli doğrultucular kullanılmaktadırlar. Temel bileşen akımı (I_1) ile harmonik bileşen akımı (I_n) arasında,

$$\frac{I_n}{I_1} = \frac{I}{n} \quad (2.2)$$

eşitliği vardır (Rashid, 1988).

2.1.3 Generetörler

Dönen makineler makine ve endüvi oluk sayısına bağlı olarak harmonik üretirler (Arrillaga vd., 1985). En tabii harmonik üreticileri generetörlerdir. Alan şekline ve manyetik devrenin doymaya ulaşmasına yada magnetik direncin değişimine bağlı olarak harmonik üretirler.

Bu nedenlerden dolayı generetör sargılarının yıldız bağlanması ve yıldız noktasının yalıtılması tercih edilir. Generatör dört iletkenli bir şebekeye bağlı ise, bu koşulda nötr hattı, zigzag bağlı bir bobinle oluşturulan suni yıldız noktasına bağlanır. Stator sargı adımlarının uygun seçildikten sonra kırılganlık yolu ile alan eğrisindeki 3. harmonik ile 5. ve 7. harmonikler gerilim eğrisinde tamamen ortadan kaldırılabilirler. Burada dikkate değer en düşük harmonik 2. harmoniktir (Arrillaga vd., 1985).

2.1.4 Ark fırınları

Ark fırınları, kaynak makineleri gibi normal işlemlerini ark ile sürdüren tesisler önemli harmonik kaynakları arasında sayılabilirler. Harmoniğin üretilme nedeni, ark direncinin lineer olmaması yani ateşleyici elektrotlarının akım gerilim karakteristiğinin lineer olmayışındır (Arrillaga vd., 1985).

Tipik bir ark fırınında 2., 3., ...9 mertebeli akım harmonikleri bulunur. En büyük harmonik bileşeni temel bileşenin %30'u kadardır (Sundberg, 1976). Çizelge 2.4'de bir ark fırınına ait harmonik değerleri verilmiştir (Sundberg, 1976).

Çizelge 2.4 Ark fırınına ait harmonik değerleri

n	(%)GENLİK	
	Ortalama	En büyük
2	4.....9	30
3	6.....10	20
4	2.....6	15
5	2.....10	12
6	2.....3	10
7	3.....6	8
9	2.....5	7

2.1.5 Gaz deşarjlı aydınlatma

Fluoresant,cıva ve yüksek basınçlı sodyum lambalar, xenon v.b. gibi gaz deşarjlı aydınlatma elemanları, şebekeden harmonikli akımların çekilmesine neden olurlar. Çizelge 2.5 ve 2.6' da flouresan lambaya ait harmonik değerleri verilmiştir (Talbent ve Hale, 1996).

Çizelge 2.5 Flouresan lamba harmonik distorsiyon değerleri(Akım için)

Harmonik bileşenler (n)	Magnetik Balast (THD _i)		Elektronik Balast (THD _i)	
	Faz	Nötr	Faz	Nötr
1	12.8	171.2	16.3	44.0
3	10.6	169.8	3.6	11.9
5	6.7	16.6	11.7	31.6
7	1.6	3.3	5.2	3.7
9	0.8	12.7	3.9	20.1
11	0.2	2.3	3.5	2.0
13	0.3	2.5	3.4	4.1
15	0.1	3.4	2.1	10.1
17	0.1	0.0	2.1	3.2
19	0.0	0.7	2.2	3.1
21	0.0	0.5	2.0	9.1
23	0.0	0.0	1.7	1.5
25	0.0	0.4	1.9	3.7
27	0.0	0.0	1.7	8.2
29	0.0	0.0	1.5	3.0
31	0.0	0.0	1.5	3.5
33	0.0	0.0	1.4	6.4

Çizelge 2.6 Flouresan lamba harmonik distorsiyon değerleri(Gerilim için)

Harmonik bileşenler (n)	Magnetik Balast (THD _v)		Elektronik Balast (THD _v)	
	Faz	Nötr	Faz	Nötr
1	12.8	171.2	16.3	44.0
3	10.6	169.8	3.6	11.9
5	6.7	16.6	11.7	31.6
7	1.6	3.3	5.2	3.7
9	0.8	12.7	3.9	20.1
11	0.2	2.3	3.5	2.0

Kompakt fluoresant lambalarda kullanılan elektronik balastlar da önemli harmonik kaynaklarıdır. Çizelge 2.7’de magnetik balastlı bir fluoresant lamba harmonik akımlarının temel bileşene oranı verilmiştir (Dugan vd,1996).

Çizelge 2.7 Magnetik balastlı fluoresant lamba harmonik spektrumu

Harmonikler (n)	1	3	5	7	9	11	13	15	17	19	21
(%) $\frac{I_n}{I_1}$	100	19.9	7.4	3.2	2.4	1.8	0.8	0.4	0.1	0.2	0.1

2.1.6 Statik VAR Kompanzatörleri

Statik VAR kompanzatörleri genel itibari ile sinüzoidal dalganın belirli açılarla kesilmesi

ine neden olur. Böylece dalga şekli sinüsoidalden uzaklaşır. Çalışma prensibi, L ve C elemanları üzerinden kesilen bu dalgalar ile reaktif gücün ayarlanma prensibine dayanır.

Çizelge 2.8’de 25. mertebeye kadar olan harmoniklerin en büyük genlikleri verilmiştir. Tam iletimde temel bileşen genliğinin yüzdesi olarak verilen değerler, faz ve hat akımlarının her ikisi için de aynıdır (Funabiki ve Himeı , 1985)

Çizelge 2.8 Tristör kontrollü reaktörde harmonikler ve genlikleri

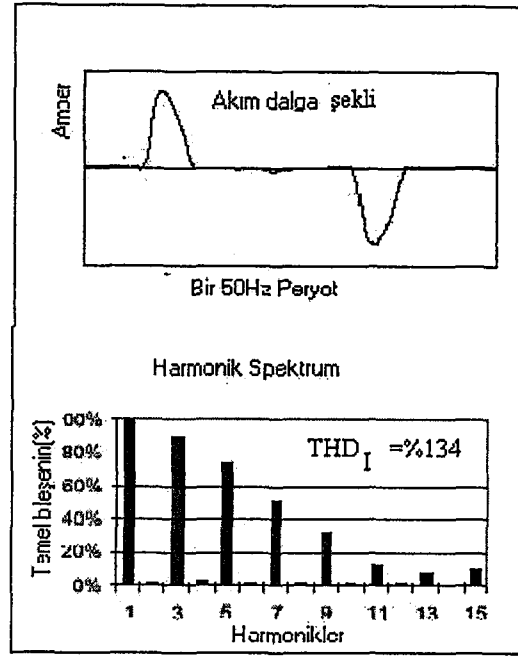
Harmonik Mertebesi	3	5	7	9	11	13	15	17	19	21	25
Harmonik genliği	13.8	5.05	5.29	1.57	1.05	0.75	0.57	0.44	0.35	0.29	0.24

2.1.7 Fotovoltaik sistemler

Bu sistemler elektrik enerjisini fotovoltaik yoldan elde eden sistemler olup, ürettikleri doğru akımı alternatif akıma dönüştürmek için konverterleri kullanırlar. Doayısıyle harmoniklere yol acarlar (Kocatepe, 1999).

2.1.8 Bilgisayarlar

Bilgisayar sistemleri, hem harmonik üreticisidir. Hem de harmonik bileşenlerden son derece etkilenirler.Şekil 2.9’da bir bilgisayarın akım dalga şekli ve harmonik spektrumu verilmiştir (Chair, 1996)



Şekil 2.2 PC bilgisayarlar için harmonik distorsiyonu

2.1.9 Kesintisiz Güç Kaynakları

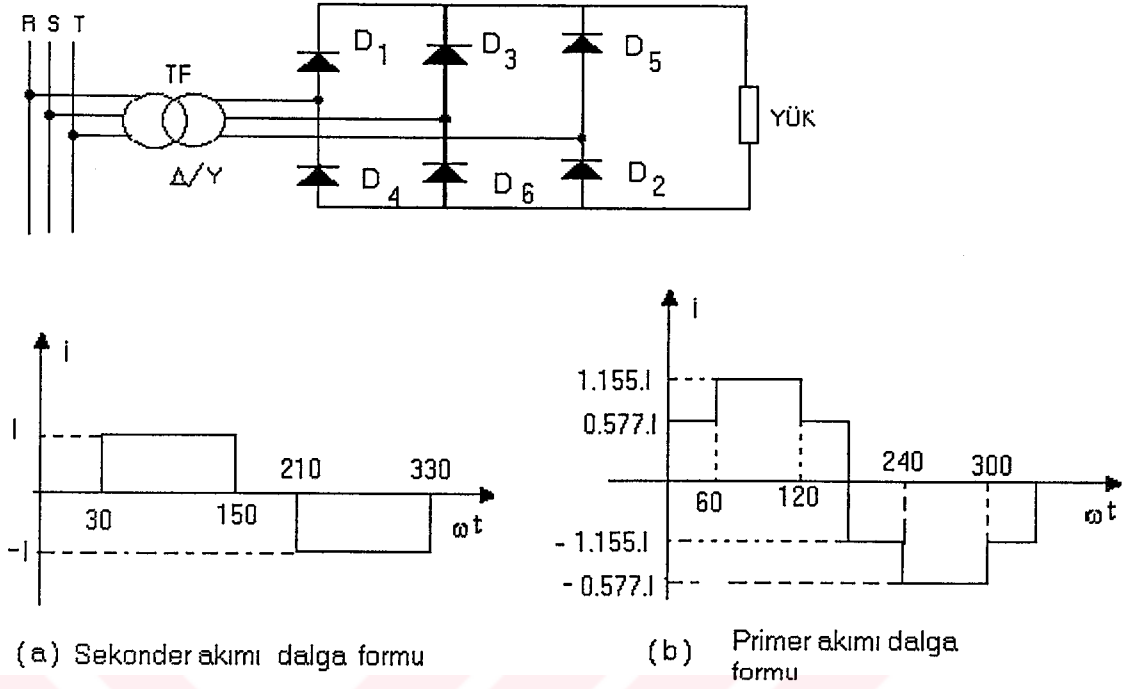
Kesintisiz güç kaynakları alternatif gerilimi doğru gerilime çevirerek enerjiyi depolanması ve sonra evirici yardımı ile alternatif akıma çevirerek elektrik kesintisi anında tüketiciye iletmeye esasa göre çalışır. Gerek doğrultucu gerekse çıkışta evirici tarafında harmonikler oluştururlar.

2.1.10 Doğru akımla enerji iletimi

Bünyesindeki dönüştürücü elemanlar nedeni ile şebekede birer harmonik kaynağı gibi davranırlar.

2.2 Harmonik kaynağı olarak üç fazlı kontrolsüz doğrultucu.

Doğrultucular alternatif gerilimi doğru gerilime çeviren cihazlardır. Eğer kullanılan elemanlar kontrol edilmeyen elemanlar ise böyle devreler kontrolsüz doğrultucu devrelerdir.



Şekil 2.3 Üç fazlı tam dalga kontrolsüz doğrultucuya ait giriş akımı dalga şekilleri

Üç fazlı tam dalga kontrolsüz doğrultucunun giriş akımına ait dalga formları Şekil 2.3 'da verilmiştir. Bu doğrultucuya ait giriş akımlarının fourier serisini elde ederek harmoniklerini görelim.

$$I = I_{dc} + \sum_{n=1}^{\infty} A_n \cos n\omega t + B_n \sin n\omega t \quad (2.3)$$

şeklinde ifade edilecektir. Şekil 2.6 a' daki dalga formu $f(t) = -f(-t)$ koşulunu sağladığından tek fonksiyondur. Ve aynı zamanda dalga şekli yarı dalga simetrisine sahiptir. Bu koşullardan dolayı doğrultucu akımı için fourier serisini aşağıdaki gibi yazarız ($A_n = 0, I_{dc} = 0$)

Diğer Fourier katsayısı,

$$B_n = \frac{4.1}{\pi} \int_{30}^{90} I \sin n\omega t d(\omega t) = \frac{4I}{n\pi} \cos\left(\frac{n\pi}{6}\right) \quad (2.4)$$

olarak elde edilir. Buradan doğrultucunun sekonder akımının ifadesi

$$I = 1.103 \left[\sin(\omega t) - \frac{1}{5} \sin(5\omega t) - \frac{1}{7} \sin(7\omega t) + \frac{1}{11} \sin(11\omega t) + \frac{1}{13} \sin(13\omega t) - \frac{1}{17} \sin(17\omega t) \right] \quad (2.5)$$

şeklinde bulunur. Doğrultucunun primer akımı Şekil 2.3 b' deki dalga formu $f(t) = -f(-t)$ koşulunu sağladığından tek fonksiyondur. Ve aynı zamanda dalga formu yarı dalga simetrisine sahiptir. Bu koşullardan dolayı doğrultucu akımı için fourier serisini aşağıdaki gibi yazarız.

Doğrultucunun primer akımına ait Fourier açılımı, dalganın tek fonksiyon olması ve yarı – dalga simetrisi nedeniyle. Buradan $A_n = 0$, $I_{dc} = 0$ yazılabilir. Buradan,

$$B_n = \frac{4.I}{\pi} \left[\int_0^{30} 0.577.I \sin(n\omega t) d(\omega t) + \int_{60}^{90} 1.155.I \sin(n\omega t) d(\omega t) \right] \quad (2.6)$$

şeklinde yazılabilir. Çözümünden,

$$B_n = \frac{4.I}{n\pi} 0.577 \left[1 + \cos\left(\frac{n\pi}{3}\right) \right] \quad (2.7)$$

bulunur. Doğrultucunun primer akımı,

$$I = 1.103 \left[\sin(\omega t) + \frac{1}{5} \sin(5\omega t) + \frac{1}{7} \sin(7\omega t) + \frac{1}{11} \sin(11\omega t) + \frac{1}{13} \sin(13\omega t) + \frac{1}{17} \sin(17\omega t) \right] \quad (2.8)$$

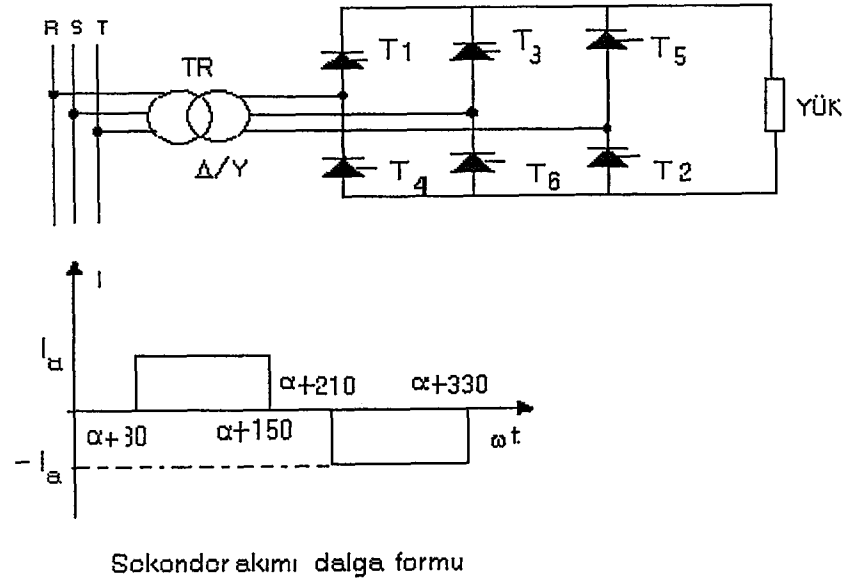
şeklinde elde edilir. Çizelge 2.9' da altı darbeleri kontrolsüz bir doğrultucuya ait harmonik bileşenleri ile genlikleri verilmiştir.

Çizelge 2.9 Altı darbeli kontrolsüz doğrultucu harmonik bileşenleri

Harmonik mertebesi	Harmonik bileşenlerin genlikleri
5	0.2
7	0.145
11	0.091
13	0.077
17	0.059
19	0.053
23	0.043
25	0.040

2.3 Harmonik kaynağı olarak üç fazlı kontrollü doğrultucu.

Doğrultucu devrelerinde kontrolü sağlayan eleman olarak tristör kullanılır. Böylece çıkıştaki büyüklükleri istediğimiz değere ayarlayabiliriz.



Şekil 2.4 Üç fazlı tam dalga kontrollü doğrultucu giriş akım dalga şekli

Şekil 2.4'te kontrollü doğrultucu devresi ve giriş akımı dalga şekli görülmektedir. Kontrollü doğrultucu devresinin harmonikleri için Fourier serisini yazalım

$$I = I_{dc} + \sum_{n=1}^{\infty} (A_n \cos(n\omega t) + B_n \sin(n\omega t)) \quad (2.9)$$

$$I_{dc} = \frac{1}{2\pi} \int_0^{2\pi} i_1(t) d\omega t = 0 \quad (2.10)$$

Fourier serisinin A_n bileşeni,

$$A_n = \frac{1}{\pi} \int_0^{\pi} i_1(t) \cos(n\omega t) d\omega t \quad (2.11)$$

değeri hesaplandığında,

$$A_n = \frac{1}{\pi} \left[\int_{\pi/6+\alpha}^{5\pi/6+\alpha} I_a \cos(n\omega t) d\omega t - \int_{7\pi/6+\alpha}^{11\pi/6+\alpha} I_a \cos(n\omega t) d\omega t \right] \quad (2.12)$$

$$A_n = \frac{I_a}{\pi n} \left\{ [\sin \omega t]_{\pi/6+\alpha}^{5\pi/6+\alpha} - [\sin \omega t]_{7\pi/6+\alpha}^{11\pi/6+\alpha} \right\} \quad (2.13)$$

$$A_n = \frac{4I_a}{\pi \cdot n} \sin \frac{n\pi}{3} \sin n\alpha \quad (n = 1, 3, 5, \dots) \quad (2.14)$$

şeklinde bulunur. Fourier serisinin B_n bileşeni,

$$B_n = \frac{1}{\pi} \int_0^{2\pi} i_1(t) \sin(n\omega t) d\omega t \quad (2.15)$$

$$B_n = \frac{1}{\pi} \left[\int_{\pi/6+\alpha}^{5\pi/6+\alpha} I_a \sin(n\omega t) d\omega t - \int_{7\pi/6+\alpha}^{11\pi/6+\alpha} I_a \sin(n\omega t) d\omega t \right] \quad (2.16)$$

$$B_n = \frac{I_a}{n\pi} \left\{ [-\cos n\omega t]_{\pi/6+\alpha}^{5\pi/6+\alpha} - [-\cos n\omega t]_{7\pi/6+\alpha}^{11\pi/6+\alpha} \right\} \quad (2.17)$$

$$B_n = \frac{4I_a}{n\pi} \sin \frac{n\pi}{3} \cos n\alpha \quad (n = 1, 3, 5, \dots) \quad (2.18)$$

şeklinde bulunur. Giriş akımının efektif değeri,

$$I_n = \frac{\sqrt{A_n^2 + B_n^2}}{\sqrt{2}} = \frac{2\sqrt{2}I_a}{n\pi} \sin \frac{n\pi}{3} \quad (2.19)$$

olarak elde edilir. Giriş akımının genel ifadesi ise

$$i_1(t) = \frac{4I_a}{n\pi} \sin \frac{n\pi}{3} \sin(n\omega t - n\alpha) \quad (2.20)$$

şeklinde verilir.

2.4 Harmoniklerin sisteme etkileri

Harmonikler güç sistemlerindeki tüm elemanları etkilerler. Dolayısı ile güç sistemleri bundan olumsuz yönde etkilenir. Harmonikler gerilim ve akımın dalga şeklini bozmaları sonucu enerji sistemlerinde meydana getirdikleri etkileri genel olarak şöyle sıralanabilir.

1. Enerji sistemindeki elemanlarda kayıpların artması,
2. Transformatörlerin aşırı ısınması,
3. Dönen makinalarda moment salınımlarının ve aşırı ısınmaların oluşumu,
4. Gerilim düşümünün artması,
5. Generatör ve şebeke gerilimi dalga şeklinin bozulması,
6. Kompanzasyon tesislerinin aşırı reaktif yüklenmesi,
7. Endüksiyon tipi sayaçlarda yanlış ölçmeler,
8. Şebekede rezonans olayları, rezonansın neden olduğu aşırı gerilim ve akımlar,

9. Kontrol devrelerinde çalışma bozuklukları,
10. Korumada hatalı çalışma ,
11. Dielektrik malzemesinin delinmesi,
12. Mikroişlemcilerin hatalı çalışması,
13. Sesli ve görüntülü iletişim araçlarında parazit ve anormal çalışma,
14. Güç faktörünün değişimi,

2.4.1 Harmoniklerin sebep olduğu rezonans olayları

Güç sistemlerinde endüktif reaktans, frekans ile doğru orantılı olarak artarken, kapasitif reaktans frekans ile ters orantılı olarak azalmaktadır. Endüktif reaktansın kapasitif reaktansa eşit olduğu frekansa rezonans frekansı denmektedir. Sistem rezonansı, harmonik frekanslardan birine yakın bir değerde oluşursa, aşırı seviyede harmonik akım ve gerilimleri ortaya çıkacaktır. Harmonik seviyelerini etkileyen en önemli etkenlerden birisi rezonans durumudur. Seri rezonans harmonik akımının dolaşmasına düşük bir empedans gösterirken, paralel rezonans yüksek empedans göstermektedir..

Bilindiği gibi elektrik devrelerinde, seri rezonans ve paralel rezonans olmak üzere iki çeşit rezonans oluşabilir. Güç sistemindeki güç katsayısının düzeltilmesinde yada filtrelerde kullanılan kondansatörlerden dolayı, paralel rezonans meydana gelebilmektedir. Paralel rezonans olayı kondansatör uçlarındaki gerilimin aşırı yükselmesine sebep olmakta ve kondansatöre zarar verebilmektedir. Bu durum endüstriyel yüklerde ve sistemlerde yaygın olarak görülen bir olaydır. Rezonans frekansı şebeke empedansının tamamen endüktif olduğu kabul edilerek

$$f_p = f_1 \sqrt{\frac{S_k}{S_c}} \quad (2.21)$$

şeklinde yazılabilir. Burada, f_p ; paralel rezonans frekansı; f_1 ; temel frekans; S_k ; kaynağın kısa devre gücüdür.

İkinci rezonans türü olan seri rezonans koşulu;

$$f_s = f_1 \sqrt{\frac{S_t}{S_c \cdot Z_t} - \frac{S_L^2}{S_c^2}} \quad (2.22)$$

şeklindedir. Burada, f_1 ; temel frekans; f_s ; seri rezonans frekansını; S_t ; transformatör gücünü; S_c ; kondansatör gücü; S_L ; omik yükü; Z_t ; transformatörün per-unit empedansını göstermektedir. Rezonans halinde kondansatör uçlarındaki gerilim devre geriliminin X_c/R katına çıkar. Bu nedenle, rezonans durumunda sistemde arıza asarlar meydana getirebilir. Rezonansın oluşacağı harmonik bileşeni,

$$n = \frac{1}{2\pi \cdot f_1 \sqrt{LC}} = \sqrt{\frac{X_{Cl}}{X_{Ll}}} \quad (2.23)$$

ile belirlenir.

2.4.2 Harmoniklerin kondansatörler üzerindeki etkileri

Kapasitif reaktans değeri harmonik bileşenleri ile azalma gösterir. n . harmonik için kapasitif reaktans,

$$X_{cn} = \frac{X_{cl}}{n} \quad (2.24)$$

olarak belirlenir. Kondansatöre, harmonik bileşenleri olan bir gerilim uygulandığında, hem akım hem reaktif güç değeri artış gösterecektir. Örneğin 3., 5., 7., harmoniklerin bulunması halinde kondansatörden geçen akımın efektif değeri,

$$I_c = \sqrt{I_{C1}^2 + I_{C3}^2 + I_{C5}^2 + I_{C7}^2} \quad (2.25)$$

olarak hesaplanır. Kondansatör gücü ,

$$Q_n = n \cdot \omega_1 \cdot C \cdot V_n^2 \quad (2.26)$$

olacaktır. Burada ω_1 temel harmoniğin açısal frekansıdır. Kondansatör gücü,

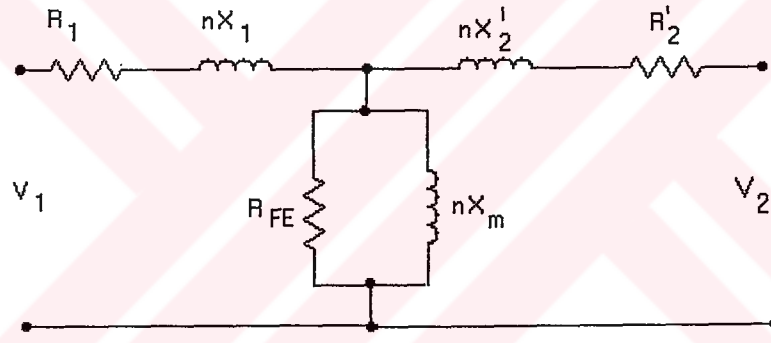
$$Q_c = \sum_{n=1}^{\infty} Q_n = \omega_1 \cdot C \cdot \sum_{n=1}^{\infty} n \cdot V_n^2 \quad (2.27)$$

bağıntısı ile hesaplanır.

Genellikle tüm harmonik problemleri öncelikle paralel bağlı kondansatör gruplarında ortaya çıkar. Rezonans olayları sonucu oluşan aşırı gerilim ve akımlar, kondansatörlerde ısınmayı ve gerilim zorlanmalarını arttırarak ömürlerini kısaltırlar (Freund, 1988).

2.4.3 Harmoniklerin transformatörler üzerindeki etkileri

Akım harmonikleri bakır kayıplarında artışa, gerilim harmonikleri ise demir kayıplarında artışa neden olurlar. Her iki durumda, magnetik çekirdekteki magnetik alanın yön değiştirmesi, yüksek frekanslarda daha hızlı olduğundan, çekirdekteki histerezis kayıpları artar. Ayrıca zamanla değişen magnetik akı, iletkenleri kestikçe değişen magnetik alan çelik dilimlerde girdap akımlarını oluşturur. Bu akımlar da ek kayıplara neden olurlar. Kısaca frekans arttıkça transformatör kayıplarda artar. Bu yüzden transformatörün ısınmasında yüksek frekanslı harmonik bileşenler düşük frekanslı harmonik bileşenlerden daha önemlidir.



Şekil 3.4 Transformatörün eşdeğer devresi (n. harmonik için)

R_1 primer sargı direncini, X_1 primer sargı kaçak reaktansını, R'_2 primere indirgenmiş sekonder omik direnci, X'_2 primere indirgenmiş sekonder kaçak reaktansını, R_{FE} demir kaybını sembolize eden direnci, X_m mıknatıslanma reaktansını göstermektedir.

Transformatörlerin yük altındaki gerilimleri için, IEEE bir sınır değeri belirlemiştir. Bu standarda göre, THD_I sınırı %5 'tir. THD_V sınırı ise yüksüz durumda %10, anma yükünde %5 tir (Freud, 1988).

2.4.4 Harmoniklerin iletim hatları üzerine etkisi

Enerji iletim hatlarında harmonik bileşenler hattın empedans değerinin artmasına neden olurlar. Her bir harmonik bileşen için

$$Z_n = R_n + jX_n \quad (2.28)$$

olup meydana gelen gerilim düşümü ,

$$V_n = I_n \cdot (R_n + jX_n) \quad (2.29)$$

olacaktır. Ayrıca, kablolu iletim durumunda harmonik bileşenler gerilimdeki artış nedeniyle dielektrik zorlanmayı artırır.

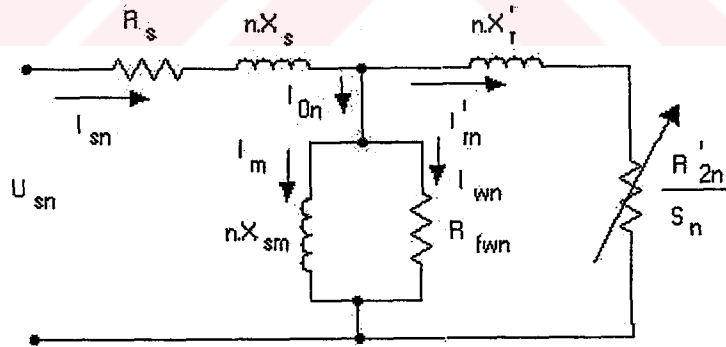
Akım harmonikleri iletim hatlarında ek I^2R kayıpları oluşturur. Bu kayıplar,

$$\sum_{n=2}^{\infty} (I_n^2 \cdot R_n) = \sum_n I_n^2 R_n \quad (2.30)$$

ile belirlenir.

2.4.5 Döner makinalar üzerindeki etkileri

Harmonikler dönün makinalarda harmonik momentler nedeni ile titreşimlere ve gürültülere yol acar. Toplam momente 5. ve 11. harmonikler frenleme etkisi yaparken; 1, 7, ve 13, harmonikler birbirlerini desteklemektedir. Şekil 2.6 'da n. harmonik için asenkron makinanın eşdeğer devresi verilmiştir.



Şekil 2.6 Asenkron makinanın n. harmonik için eşdeğer devresi

Asenkron makinanın nominal yükünde harmonikli eşdeğeri için kayma değeri,

$$s_n = \frac{(nn_s \pm n_r)}{n \cdot n_s} = \frac{(n \mp 1) \pm s_1}{n} \quad (2.31)$$

R_s , Stator omik direnci X_s , Stator kaçak reaktansı X_r' , Statora indirgenmiş rotor kaçak reaktansı R_r' , Statora indirgenmiş rotor omik direncini s_n , Nominal yükteki kayma değerini göstermektedir. Çizelge 2.10' da altı darbeli bir dönüştürücüyle bağlantılı durumda harmonik karakteristikleri ve stator harmoniği ile harmonik dönüş yönü verilmiştir.

Çizelge 2.10 Harmoniklerin dönüş yönü

Harmonik Mertebesi	Simetrlili Bileşen	Stator Harmoniği	Harmonik Dönüş yönü
1	+	1	İleri
5	-	5	Geri
7	+	7	İleri
11	-	11	Geri
13	+	13	İleri
17	-	17	Geri
19	+	19	İleri
23	-	23	Geri
25	+	25	İleri

Harmonik akım ve gerilimleri stator sargılarında ilave kayıplara sebep olarak ısınmada artış meydana getirirler. Makinanın veriminin düşmesine neden olurlar.

2.4.6 Koruyucu sistemler üzerindeki etkileri

Koruma elemanları temel bileşen akım ve gerilim için imal edilirler. Elektromagnetik röle uygulamalarında (aşırı akım koruması gibi) yüksek harmoniklerin çok fazla etkinliğinin olmadığı söylenebilir (Arrillage, 1976). Ancak özellikle mesafe korumalarında, harmonik akımlarının (özellikle 3. harmonik bileşeni) büyük ölçme ve değerlendirme hatalarına yol açabilmektedir. Dijital mesafe koruma sistemlerinde, akım ve gerilim dalgalarının mutlaka

filtre edilmesi gerekmektedir (McClaren and Redfern, 1975). Çünkü mesafe koruma röleleri (bunlar hat empedansını ölçerek çalışırlar) ana frekansa karşılık gelen empedans değerinin ölçülmesi ilkesine göre çalışırlar.

2.4.7 Harmoniklerin güç faktörüne etkisi

Harmonik bileşenler içeren bir devrede güç faktörü,

$$PF = \frac{V_1 \cdot I_1 \cdot \cos\psi_1}{V_1 \cdot I_{ef}} = \frac{I_1}{I_{ef}} \cdot \cos\psi_1 = \mu \cdot \cos\psi_1 \quad (2.32)$$

ile tanımlanır (Arrillaga, vd. 1985). V_1 ve I_1 temel bileşene ait gerilim ve akım değerini göstermektedir. Temel bileşen ya da sinüsoidal durumdaki güç faktörü ($\cos\psi_1$), bir çarpanla (I_1 / I_{ef}) çarpıldığında güç faktörünü verecektir. I_1 / I_{ef} in değeri birden küçük olacağı için güç faktörü değeri de $\cos\psi_1$ 'den daha düşük olacaktır.

2.5 Harmonik standartları

Enerji sistemlerinde nonlineer eleman sayısının her geçen gün artması sonucu distorsiyon değerlerinin neden olmaktadır. Harmonik bileşenlerin olumsuz etkilerinden dolayı sınırlandırma çalışmaları önem arz etmektedir. Harmoniklerin sınırlandırılması için THD kriterine göre çeşitli standartlar mevcuttur. Müsaade edilen maksimum gerilim ve akım bozulması IEEE (standart 519-1992)'de belirtilmiştir. Bu konuda ulusal ve uluslar arası standartlar geliştirilmiştir. Bu standartlarda hem akım hem gerilim hem de harmonik bileşenlerin derecesine bağlı olarak sınır değerler verilmektedir.

Çizelge 2.11 Dağıtım sistemleri için akım bozulma sınırları (IEEE519-1992)

$V_n < 69 \text{ kV}$						
I_{KD} / I_L	$h < 11$	$11 \leq h < 17$	$17 \leq h < 23$	$23 \leq h < 35$	$h \geq 35$	%TDD
< 20	4.0	2.0	1.5	0.6	0.3	5.0
20 – 50	7.0	3.5	2.5	1.0	0.5	8.0
50-100	10.0	4.5	4.0	1.5	0.7	12.0
100- 1000	12.0	5.5	5.0	2.0	1.0	15.0
> 1000	15.0	7.0	6.0	2.5	1.4	20.0
$69 < V_n \leq 161 \text{ kV}$						
< 20	2.0	1.0	0.75	0.3	0.15	2.5
20- 50	3.5	1.75	1.25	0.5	0.25	4.0
50- 100	5.0	2.25	2.0	0.75	0.35	6.0
100-1000	6.0	2.75	2.5	1.0	0.5	7.5
> 1000	7.5	3.5	3.0	1.25	0.7	10.0
$V_n > 161 \text{ kV}$						
< 50	2.0	1.0	0.75	0.3	0.15	2.5
≥ 50	3.0	1.5	1.15	0.5	0.22	4.0

Bu tabloda, I_{KD} kısa devre akımını, I_L temel bileşen akımını, h harmonik derecesini göstermektedir. IEC- 555 göre harmonik akım limitleri Çizelge 2.12' te verilmiştir.

Çizelge 2.12 Limit harmonik akım değerleri(IEC-555)

Tek Harmonikler		Çift Harmonikler	
Harmonik bileşeni (n)	Maksimum Akım(%A)	Harmonikler bileşeni (n)	Maksimum Akım(%A)
3	2.30	2	1.08
5	1.14	4	0.43
7	0.77	6	0.30
9	0.40	$8 \leq n \leq 40$	$0.23A_n.(8/n)$
11	0.33		
13	0.21		
$15 \leq n \leq 39$	$0.15.(15/n)$		

3 HARMONİKLİ BÜYÜKLÜKLERİN GİDERİLMESİ

Harmoniklerin olumsuzlukları öncelikle tasarımda daha sonra da devreye bağlanan elemanlarla giderilmeye çalışılır. Nonlineer elemanların bulunduğu devreye bağlanan ve istenen harmonik bileşenlerin giderilmesini sağlayan bu devrelere “harmonik filtresi” adı verilir. Filtreler aktif ve pasif filtreler olarak iki gruba ayrılır. Pasif filtrelerin amacı ayarlandığı frekans ya da frekanslarda rezonans meydana getirerek, harmonik bileşen akımlarını toprağa ileterek harmonik bileşenlerin giderilmesini sağlar. Aktif filtreler ise sistemde dolaşan harmonikleri sağlayan aktif elemanlardır.

3.1 Tasarım aşamasında alınabilecek önlemler

Daha başlangıçta harmonik bileşenleri gidermek amacıyla, bazı önlemler alınabilir. Bu önlemler devre elemanlarının imali veya bunların bağlanması esnasında alınır.

3.1.1 Generetörlerde alınabilecek önlemler

Senkron generatörlerde hava aralığındaki manyetik alanın şekli endüklenen elektromotor kuvvetini belirler. Eğer manyetik alan sinüzoidal ise endüklenen elektromotor kuvveti de sinüzoidal olacaktır. Yuvarlak rotorlu senkron makinalarda sinüzoidal olmayan alan eğrisinin sinüs eğrisine yaklaştırmak için kutup oluklarının 2 / 3 ‘ü sarılır ya da sarım adımları birbirlerinden farklı olan sarım tipi kullanılır.

3.1.2 Dönüştürücülerde alınabilecek önlemler

Doğrultucularda darbe sayısı p ise, harmonik mertebesi $n=k.p\pm 1$ formülü ile bulunur. Bu formülde $k=1, 2, 3....$ gibi tam sayılardır. Darbe sayısının artırılması ile küçük dereceli harmoniklerin giderilmesi mümkündür. Dönüştürücülerde $n=5, 7, 11, 13$ olduğu için, harmonik akımları $I_5 = I_1 / 5$ ve $I_7 = I_1 / 7$, gibi değerler almaktadır. Bundan dolayı darbe sayısı ne kadar büyük olursa, harmonik mertebeleri de o kadar küçük olur .

3.1.3 Transformatörlerde alınabilecek önlemler

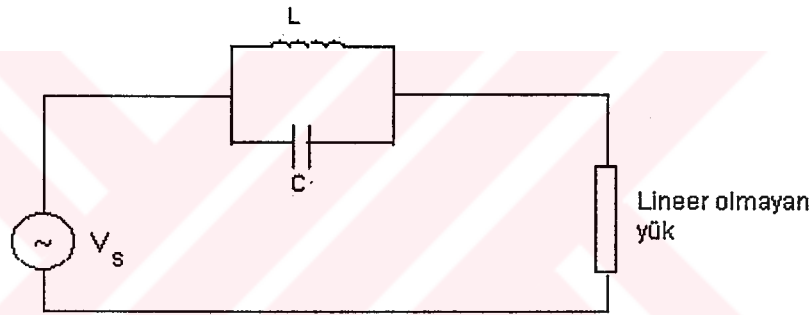
Büyük transformatörlerde magnetik endüksiyon değerinin büyük tutulması ile, demir çekirdekten en büyük yarar sağlanır. Ancak büyük endüksiyon değerinde, doyma nedeni ile mıknatıslanma akımında harmonikli bileşenler artar. Mıknatıslanma akımının harmonik bileşenlerini azaltmak için alınabilecek en iyi tedbir, manyetik endüksiyonu düşük tutmaktır.

3.2 Pasif filtreler

Pasif filtreler, adından da anlaşılacağı üzere endüktans, kapasite ve omik direnç gibi pasif elemanlardan meydana gelir. Kaynak ile alıcı arasına konularak temel frekans dışındaki harmonik bileşenleri yok eder. Pasif filtrede amaç, gidermek istenen harmonik bileşene ait frekans değerinde L ve C elemanlarının rezonansa gelmesini sağlamaktır. Pasif filtreler devreye seri ve paralel olarak bağlanırlar.

3.2.1 Seri Filtreler

Seri filtreler harmonik kaynağı ile şebeke arasına seri olarak bağlanır. Seri filtreler harmonik akışına yüksek bir empedans gösterir. Bu yüzden seri filtrenin ayarlı frekanslarda yüksek empedansa sahiptir. Seri filtre belirli bir frekansa ayarlandığı için sadece o ayarlı frekans bileşenine yüksek empedans gösterir.



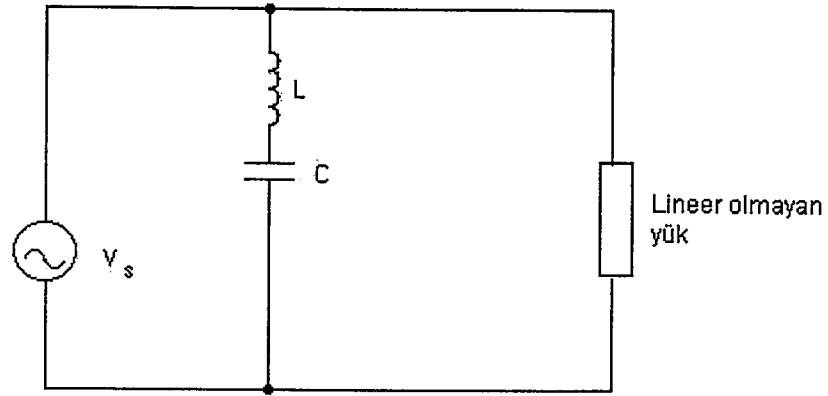
Şekil 3.1 Seri filtrenin devreye bağlanması

Seri filtreler tek fazlı sistemde 3. harmoniğin baskın olduğu uygulamada yaygındır. Seri filtreler genellikle temel frekansta düşük empedans gösterir. Seri filtrelerin en büyük dezavantajı yük akımını taşımalarının gerekliliği ile hat gerilimi için yalıtılmalarıdır. Bununla birlikte seri filtrelerin rezonans problemi yoktur.

3.2.2 Şönt filtreler

Şönt filtreler harmonik kaynağına paralel bağlanırlar. Giderilmek istenen harmonik frekansında düşük bir empedans elde edilerek istenmeyen harmonik akımlarını toprağa aktarılır. Şönt filtreler harmonik akımlarına çok düşük bir empedans göstermek için tasarlanır. Ayrıca şönt filtreler güç faktörünü düzeltmede de kullanılabilirler. Şönt filtreler

seri filtre gibi sadece ayarlı oldukları frekansda etkilidirler.

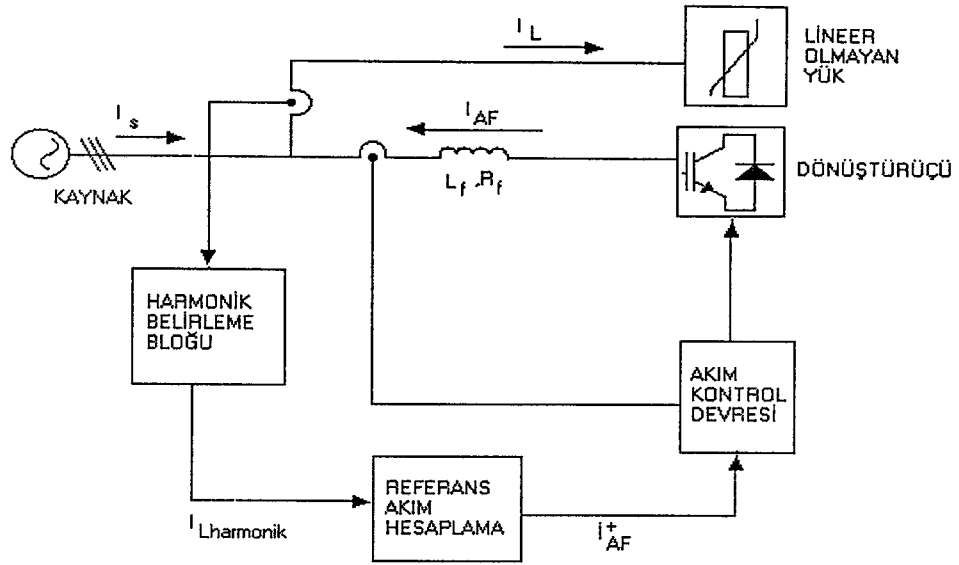


Şekil 3.2 Şönt filtrenin devreye bağlanması

3.3 Aktif filtreler

Aktif güç filtresinin çalışması, sisteme yükün ürettiği harmoniklerle aynı genlikte fakat ters fazda bir akım enjekte edilmesi prensibine dayanır. Güç elektroniği elemanları kullanılarak gerçekleştirilir. Temel olarak aktif güç filtresi, şebekeye bir dijital kontrolörle bağlı standart bir dönüştürücüden oluşur. Akım veya gerilimdeki harmonik distorsiyonunu tanımlamak için ilave bir kontrol bloğu mevcuttur. Aktif filtreler pasif filtreler nazaran kaynak empedansına daha az bağlıdır. Yük değişimlerinde sadece kontrolör yeniden programlanmalıdır.

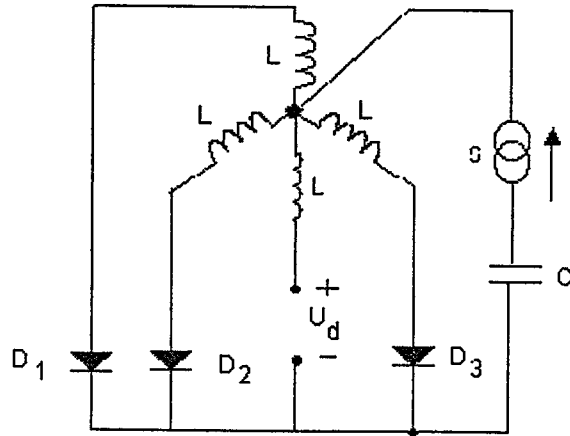
Aktif güç filtresi, dönüştürücü, akım kontrol devresi ve harmonik belirleme bloğu olmak üzere üç kısımdan oluşur. Şekil 3.3 'te aktif güç devresinin prensip şeması gösterilmiştir (Gonzales, 1987).



Şekil 3.3 Aktif güç filtresine ait blok şeması

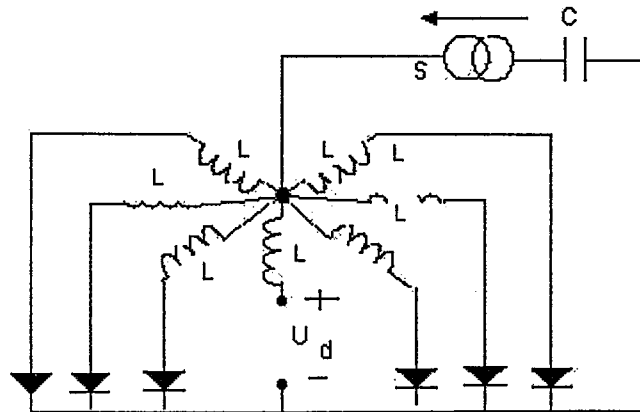
3.4 Harmonikli akım enjekte yöntemi ile harmoniklerin giderilmesi

Üçüncü harmonik bileşen akımları enjekte edilerek harmonik distorsiyonu azaltılabilir (Arrillaga, Bradley ve Bodger, 1985). Genelde bu yöntem konverter girişine harmonikli akım enjekte edilerek gerçekleştirilir. Üç ve üçün katı harmonikli akımlar sisteme enjekte edilerek harmonik distorsiyon düşürülür. Üçüncü harmonik bileşen akımı sisteme enjekte edildiğinde sistemdeki 7. harmonik bileşeni büyük oranda giderilir. Dokuzuncu harmonik akımı enjekte edildiğinde ise yüksek harmoniklerin elimine imkanı vardır (Murray, 1975). Aşağıda çeşitli şekillerde harmonik enjeksiyon yöntemleri verilmiştir.



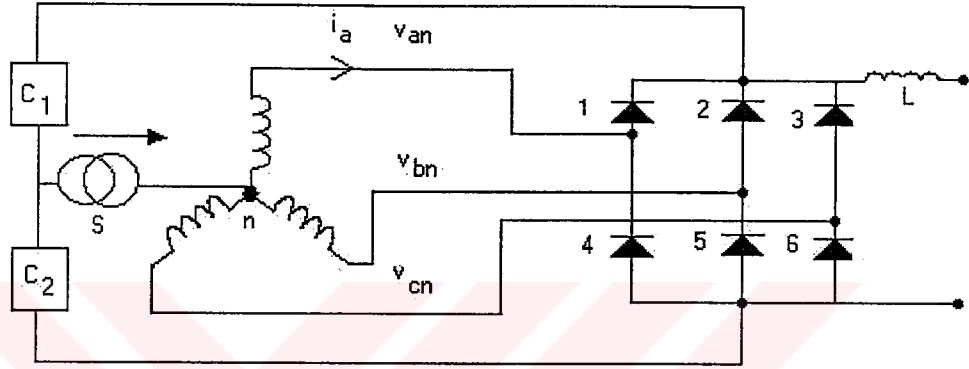
Şekil 3.4 Üç fazlı yarım dalga doğrultucuda harmonik akım enjeksiyonu

Şekil 3.4' te gösterildiği gibi konverter çıkıştan alınan harmonikli akım, giriş nötr noktasına enjekte edilerek distorsiyonu azaltma yoluna gidilmiştir (Baird ve Arrilaga 1980). Burada, C harmonikli akım enjekte devresine ait kondansatörü, S, üzerinden harmonikli akımın enjekte edildiği transformatörü göstermektedir. Bu devrede çıkıştan alınan harmonikli akım kondansatör ve transformatör üzerinden, yarım dalga kontrolsüz doğrultucunun nötr noktasına enjekte edilir. Bu yolla kontrolsüz yarım dalga doğrultucunun giriş akımı harmonik distorsiyonu azaltılır.



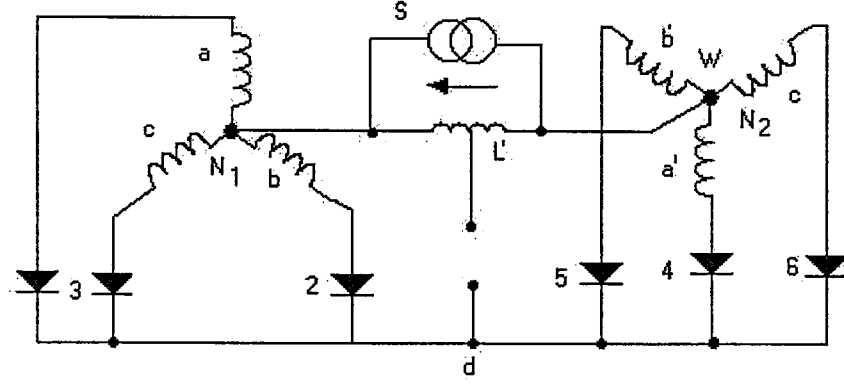
Şekil 3.5 Çapsal (Diametrical) doğrultucuda harmonik enjeksiyon devresi

Şekil 3.5' te üç fazlı tam dalga kontrolsüz doğrultucuda harmonik enjeksiyon yöntemi ile doğrultucu giriş akımı harmonik distorsiyonunun düşürülmesine ait bağlantı şeması verilmiştir. Bu doğrultucu tipinde harmonikli akım C kondansatörü ve S transformatörü üzerinden kontrolsüz doğrultucunun nötrüne girişine enjekte edilir. Enjekte devresinin kontrolsüz doğrultucu ile entegre bir biçimde çalışması gerekir. Bu devrelerde kullanılan L endüktansı düzeltme reaktörü olarak adlandırılır.



Şekil 3.6 Üç fazlı kontrolsüz doğrultucuda harmonik enjeksiyonu

Şekil 3.6'da üç fazlı tam dalga kontrolsüz bir doğrultucuda harmonik akımını enjekte ederek distorsiyonun azaltılmasına ait şema verilmiştir (Baird ve Arrilaga 1980). Bu devrede iki adet akım enjekte devresi vardır. Çıkıştan alınan harmonikli akım enjekte devreleri yardımı ile kontrolsüz doğrultucu nötr noktasına enjekte edilir. Bu yolla kontrolsüz doğrultucu giriş akımı harmonik distorsiyonu azaltılır.

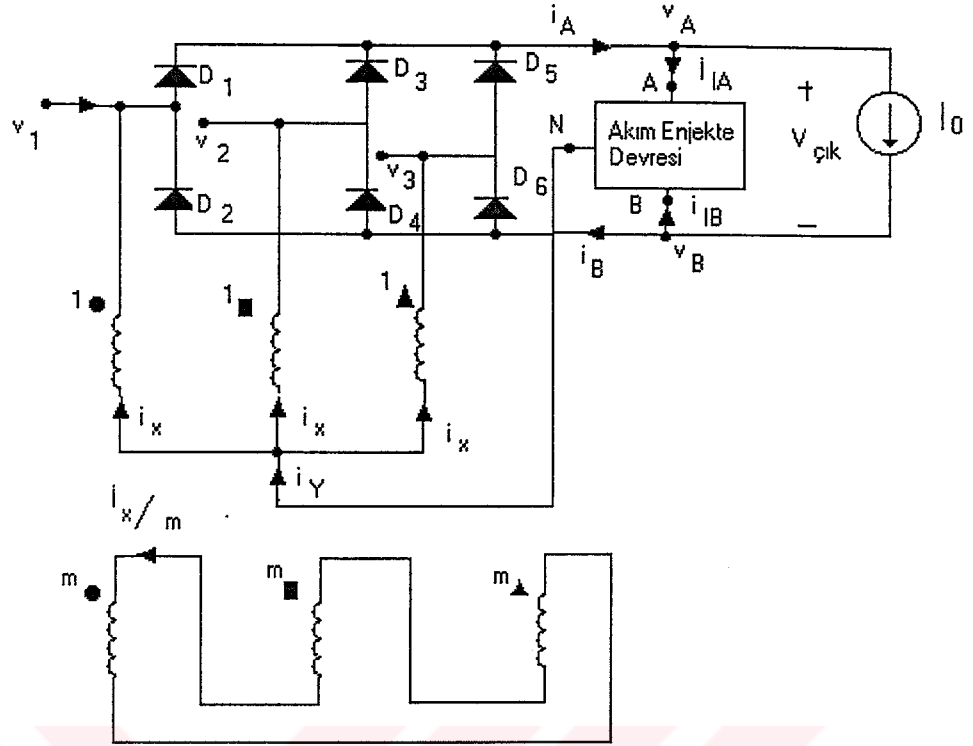


Şekil 3.7 Altı fazlı yıldız bağlı trafo üzerinden beslenen doğrultucu

Sekonderi çift yıldız bağlı altı fazlı kontrolsüz bir doğrultucuda nötr noktalarına harmonik akımı enjekte ederek distorsiyonun azaltılmasına ait prensip şeması verilmiştir. Harmonikli akım endüktansa paralel bağlanmış bir transformatör üzerinden enjekte edilmektedir. Bu devrede transformatör yerine manyetik bir devrede bağlanabilir (Baid ve Arrillaga, 1980).

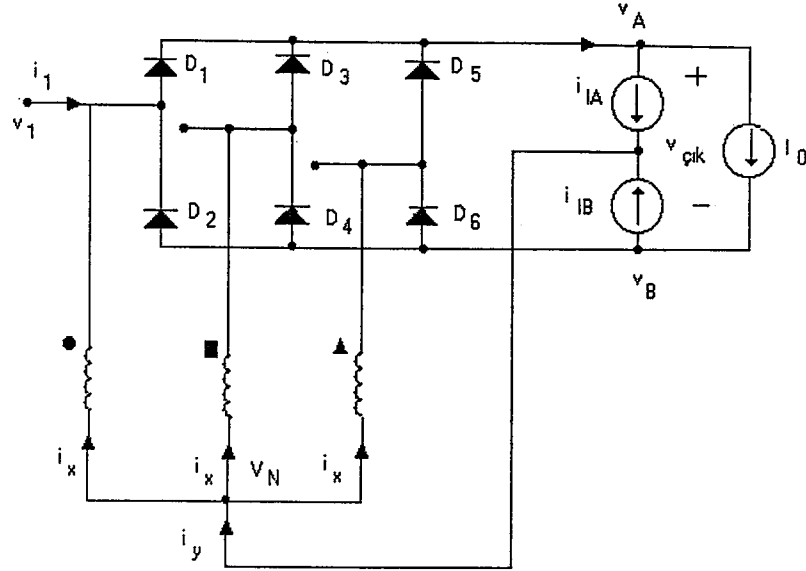
3.4.1 Tam dalga kontrolsüz doğrultucuda üçüncü harmonik bileşen akımını enjekte ederek harmonik distorsiyonunun azaltılması (Pejovic ve Janda, 1999)

Üçüncü harmonik akımının, üç fazlı doğrultucunun girişine enjekte edilmesi ile akıma ait harmonik distorsiyon değerinde azalmalar olur. Bu yöntemi büyük güçlü doğrultucuların güç faktörünü iyileştirmede ,anahtarlama sistemlerinde ve çıkış geriliminin kontrolünde de kullanma imkanı vardır. Şekil 3.8 'de üç fazlı kontrolsüz doğrultucuda üçüncü harmonik akımını enjekte etmeye ait devrenin prensip şeması verilmiştir.



Şekil 3.8 Üç fazlı doğrultucuda üçüncü harmonik akımının enjekte ait devre.

Şekil 3.8’ de üç fazlı tam dalga doğrultucu ile harmonikli akım enjekte eden sisteme ait bağlantı şeması verilmiştir. Bu devreler yardımı ile giriş akımının toplam harmonik distorsiyonunu (THD) iyileştirme imkanı vardır. Harmonikli akım enjekte sistemi, akım enjekte şebekesi ile aygıtlarını kapsamaktadır. Üç fazlı tam dalga doğrultucu çıkışına bağlı olan harmonikli akım şebekesinden alınan i_y akımının doğrultucu girişine enjekte edilmesi ile giriş akımı harmonik distorsiyonu azaltılır. Harmonik akım enjekte şebekelerinden alınan i_y akımı eşit değerde doğrultucu girişine enjekte edilen üç adet i_x akımının toplamından oluşmaktadır. Akım enjekte işlemi, üç fazlı yüksüz sekonderi üçgen bağlı bir transformatör üzerinden uygulanır. Sekonderi ise zigzag bağlı bir ototransformatör veya magnetik bir devre olabilir. Devreyi basitleştirecek olursak Şekil 3.9’da bağlantı şemasını elde ederiz.



Şekil 3.9 Üç fazlı doğrultucuya harmonikli akım enjekte etmeye ait basitleştirilmiş devre

Harmonikli akım enjekte etmekle toplam harmonik distorsiyonda bir iyileşme sağlanır. Bu devre ile toplam harmonik distorsiyonu değeri % 5.125 düşürülebilmektedir. Harmonikli akımı daha iyi dağıtarak bu değer daha da düşürülebilir. Analizde yüksek harmonikli akımların etkisi dikkate alınmayabilir. Harmonikli akım enjekte şebekesi üçlü harmoniklerden oluşmaktadır.

3.4.2 Distorsiyon azalmasının analitik olarak incelenmesi (Pejović ve Janda, 1999)

Giriş akımının distorsiyonun azaltılmasında akım enjekte devresi 2 adet bağımsız akım kaynağından oluşur. Akım kaynaklarının akımları $i_A > 0$ ve $i_B > 0$ değerleri için köprü doğrultucu iletim modundadır. Üç fazlı doğrultucunun simetrik dengeli üç fazlı bir gerilim sistemine bağlı olduğunu kabul edelim. Bu durumda gerilim ifadeleri,

$$\left. \begin{aligned} v_1 &= V_m \sin(\omega_0 t) \\ v_2 &= V_m \sin(\omega_0 t - 120) \\ v_3 &= V_m \sin(\omega_0 t - 240) \end{aligned} \right\} \quad (3.1)$$

şeklinde yazılır. D1, D3, D5 diyot grubu yüksek gerilime bağlı, D2, D4, D6 diyot grubu da alçak gerilime bağlı diyot gruplarıdır. Doğrultucu giriş akımı fonksiyonu aşağıdaki şekilde ifade edilebilir.

$$i = \begin{cases} -i_x(\omega_0 t) & 0 < \omega_0 t < 30^\circ \\ -i_x(\omega_0 t) & 150^\circ < \omega_0 t < 210^\circ \\ -i_x(\omega_0 t) & 330^\circ < \omega_0 t < 360^\circ \\ i_A(\omega_0 t) - i_x(\omega_0 t) & 30^\circ < \omega_0 t < 150^\circ \\ -i_B(\omega_0 t) - i_x(\omega_0 t) & 210^\circ < \omega_0 t < 330^\circ \end{cases} \quad (3.2)$$

Doğrultucu girişine enjekte edilen faz akımı,

$$i_x = \frac{1}{3} i_Y \quad (3.3)$$

dir. Nötr noktasındaki gerilimin değeri,

$$v_N = \frac{1}{3} (v_1 + v_2 + v_3) = 0 \quad (3.4)$$

Buna karşılık köprü doğrultucu iletimde olduğu zaman, üç fazlı kontrollösüz doğrultucu çıkış gerilim ifadeleri (v_A ve v_B) fourier serisine açılımı,

$$v_A = V_{dc} + \sum_{n=1}^{\infty} (A_n \sin n\omega t + B_n \cos n\omega t) \quad (3.5)$$

şeklinde olacaktır. (1.3) eşitliğine uygun olarak, Fourier katsayılarını hesaplarsak,

$$v_A = V_m \frac{3\sqrt{3}}{\pi} \left(\frac{1}{2} + \sum_{n=1}^{+\infty} \frac{(-1)^{n+1}}{9n^2 - 1} \cos \left(3n \left(\omega_0 t - \frac{\pi}{2} \right) \right) \right) \quad (3.6)$$

$$v_A = V_{A,0} + \sum_{n=1}^{+\infty} V_{A,n} \cos \left(3n \left(\omega_0 t - \frac{\pi}{2} \right) \right) \quad (3.7)$$

$$v_A = V_{A,0} + \sum_{n=1}^{+\infty} v_{A,n}(\omega_0 t) \quad (3.8)$$

ve

$$v_B = V_m \frac{3\sqrt{3}}{\pi} \left(-\frac{1}{2} + \sum_{n=1}^{+\infty} \frac{1}{9n^2 - 1} \cos \left(3n \left(\omega_0 t - \frac{\pi}{2} \right) \right) \right) \quad (3.9)$$

$$v_B = V_{B,0} + \sum_{n=1}^{+\infty} V_{B,n} \cos \left(3n \left(\omega_0 t - \frac{\pi}{2} \right) \right) \quad (3.10)$$

$$v_B = V_{B,0} + \sum_{n=1}^{+\infty} v_{B,n}(\omega_0 t) \quad (3.11)$$

Harmonik bileşenlerinin (n), tek değerleri için genlik ifadesi ,

$$V_{A,n} = V_{B,n} = \frac{3\sqrt{3}}{\pi} \cdot \frac{1}{9n^2 - 1} \cdot V_m \quad (3.12)$$

şeklinde bulunur.

3.4.3 Enjekte edilecek optimal akım değeri

Aşağıda yapılacak analiz işleminde, i_{IA} ve i_{IB} akım değerleri akım kaynağı tarafından üretilen akımlardır. Bu akım değerleri eşit değerlerde olup, akımı frekansları temel bileşen frekansının 3 katına sahiptirler. Enjekte edilen akımlar, enjekte devreleri tarafından üretilmekte olup, üç fazlı doğrultucunun girişine üç fazlı transformatör üzerinden verilirler.

$$i_{IA} = i_{IB} = -kI_0 \sin(3\omega_0 t - \varphi) \quad (3.13)$$

φ acısı v_A ve v_B gerilimleri tarafından enjekte edilen akımın faz açısıdır. Şekil 3.12' ye göre ,doğrultucu çıkış akımları i_A ve i_B 'nin değerleri ,

$$i_A = I_0 + i_{IA} \quad (3.14)$$

ve

$$i_B = I_0 - i_{IB} \quad (3.15)$$

dir. Doğrultucunun her fazına enjekte edilen akım,

$$i_x = \frac{1}{3}(i_A - i_B) \quad (3.16)$$

olacaktır. Böylelikle Enjekte edilen akım çıkış akımları cinsinden ifade edilmiş olur .

3.4.4 Akım Enjekte edildikten sonra, üç fazlı doğrultucu giriş akımı harmonik distorsiyonu

Doğrultucu giriş akımı toplam harmonik distorsiyonunu hesaplamak için iki temel büyüklüğe ihtiyaç vardır. Birincisi, harmonikli akım doğrultucu girişine enjekte edildikten sonraki doğrultucu giriş akımı efektif değeri ile temel bileşen akımın efektif değeridir. Doğrultucu giriş akımını aşağıdaki şekilde ifade edebiliriz :

$$I = \frac{i}{I_0} = \begin{cases} \frac{2}{3}k \sin(3\omega_0 t - \varphi) & 0^\circ < \omega_0 t < 30^\circ \\ " & 150^\circ < \omega_0 t < 210^\circ \\ " & 330^\circ < \omega_0 t < 360^\circ \\ 1 - \frac{1}{3}k \sin(3\omega_0 t - \varphi) & 30^\circ < \omega_0 t < 150^\circ \\ -1 - \frac{1}{3}k \sin(3\omega_0 t - \varphi) & 210^\circ < \omega_0 t < 330^\circ \end{cases} \quad (3.17)$$

Bu tanım aralığına ait giriş akımının efektif değeri,

$$I = \frac{1}{3} \sqrt{k^2 + 6} \quad (3.18)$$

Temel dalgaya ait, giriş akımının efektif değeri,

$$I_1 = \frac{1}{4\pi} \sqrt{\frac{3}{2} (k^2 (9 - 8(\cos\varphi)^2) + 16k\cos\varphi + 64)} \quad (3.19)$$

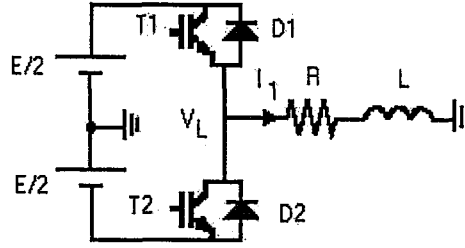
olarak bulunur. Giriş akımına ait toplam harmonik distorsiyonu (THD_I) değeri aşağıdaki gibi ifade edilir,

$$THD(k, \varphi) = \frac{\sqrt{I_{RMS}^2 - I_{1RMS}^2}}{I_{1RMS}} \quad (3.20)$$

k 'nın optimal değeri, toplam harmonik distorsiyonu (THD_I) değerini minimum yapar.

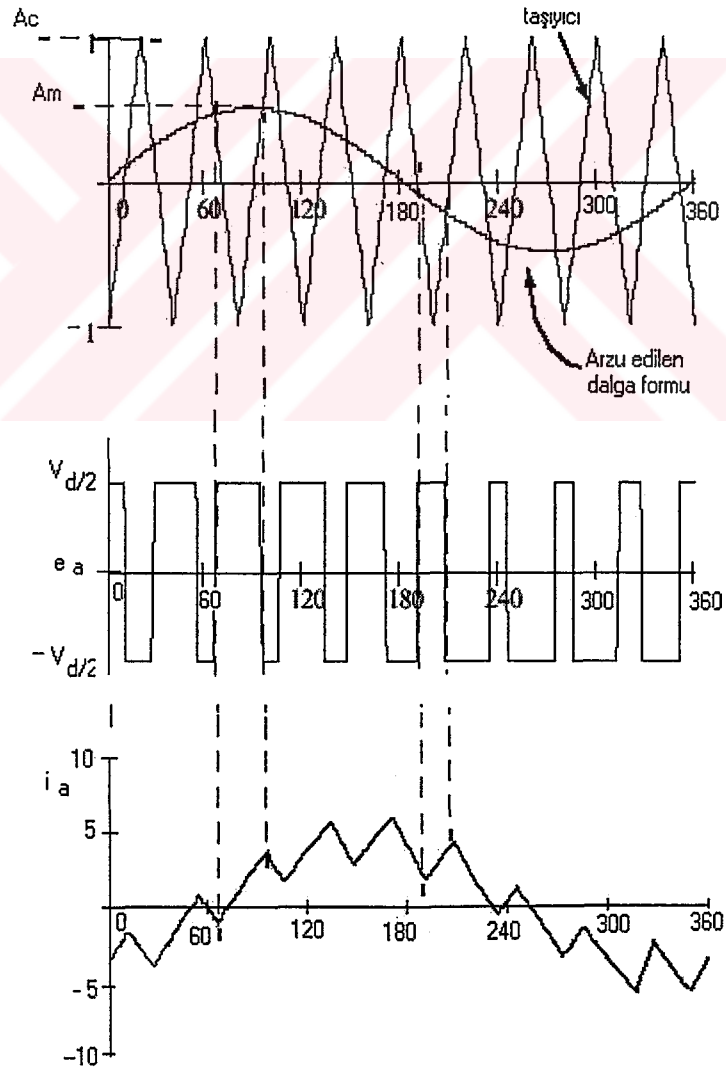
3.5 Genlik darbe modülasyonu (PMW) yöntemi ile harmonik giderme

İnverter (DA/AA) dönüştürücülerinin çalışma prensibinde sistemde anahtarlamalara gerek vardır. Basit yaklaşımla doğru akımı alternatif akıma dönüştürmede her periyotta anahtarlamalara gerek vardır. Uygun anahtarlamarla kare dalga elde edilir.sürekli yapılan anahtarlamarlar sonucunda, elde edilen dalgada birçok harmonikler bulunur (Bimbhra, 1997).



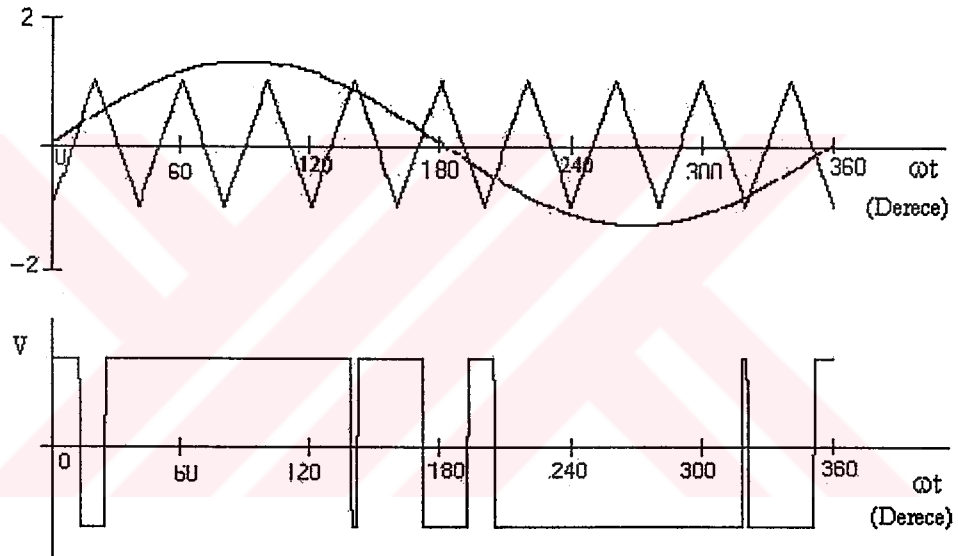
Şekil 3.10 Basit invertere ait prensip şeması

E doğru gerilim kaynağı, T_1, T_2 gerilim ile kontrol edilen alan etkili transistörlerdir. R ve L yükü sembolize etmektedirler. İnverterde ana amaç, çıkış geriliminin değişiminin sinüs dalgası uymasındır. Uygun tetikleme açıları ile kıyılmış kare dalga, tam kare dalgaya göre daha az harmonik içerir.



Şekil 3.11 Darbe genlik modülasyonunun prensip şeması

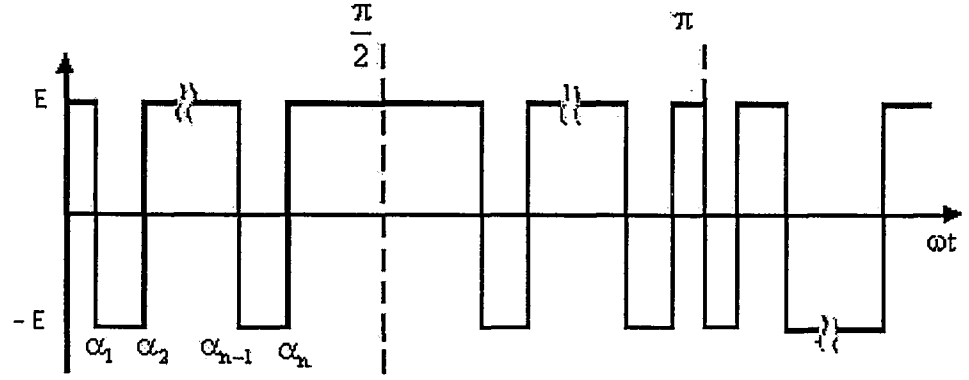
Modüle edilecek bir sinüsoidal dalganın genliği A_m ve taşıyıcı üçgen dalganın genliği A_c olsun. Bunların oranı $m = A_m / A_c$ oranına modülasyon endeksi adı verilir. Giriş akımının genliği bununla kontrol edilir. Modülasyon endeksini büyük tutarsak, aşırı modülasyonlu bir durum ortaya çıkar. Çıkış eğrisinin dalga formu sinüs eğrisi dalga formuna yaklaşır. Bu ise çıkış gerilimindeki harmonik bileşenlerin filtrelenmesini sağlar. Şekil 3.12’ de gösterildiği gibi.



Şekil 3.12 Aşırı modülasyonlu PWM ($m=1.3$)

3.5.1 Sellektif genlik darbe modülasyonu (SPWM)

Sellektif genlik darbe modülasyonu prensibinde son zamanlarda önemli gelişmeler olmuştur. Eskiden istenilen harmonikleri elimine etmede fazladan anahtarlamalar kullanılırdı. Bu anahtarlamalar, anahtarlama kayıpları olarak önümüze çıkardı. Sellektif harmonik eliminasyonu metodu ile az sayıda anahtarlamalarla istenilen harmonikler elimine edilir. Bu metot mikroişlemcilerin yoğun olarak kullanıldığı bir yöntemdir. İki seviyeli darbe genlik modülasyonu ile dalga boyu düzeyinde yarım dalga simetrisi oluşturulur. Çeyrek periyotta n ' adet dalga kıyılması gerçekleştirilir.



Şekil 3.13 İki seviyeli PWM dalga formu ile tek dalga formu simetrisi

Harmonik bileşenlerin maksimum genlikleri temel dalga da dahil olmak aşağıda ki gibi ifade edilir :

$$\left. \begin{aligned}
 h_1 &= \left(4 \cdot \frac{E}{\pi} \right) (1 - 2 \cos \alpha_1 + 2 \cos \alpha_2 - 2 \cos \alpha_3 \dots \cos \alpha_n) \\
 h_3 &= \left(4 \cdot \frac{E}{3\pi} \right) (1 - 2 \cos 3\alpha_1 + 2 \cos 3\alpha_2 - 2 \cos 3\alpha_3 \dots \cos 3\alpha_n) \\
 &\vdots \\
 h_k &= \left(4 \cdot \frac{E}{k\pi} \right) (1 - 2 \cos k\alpha_1 + 2 \cos k\alpha_2 - 2 \cos k\alpha_3 \dots 2 \cos k\alpha_n)
 \end{aligned} \right\} \quad (3.21)$$

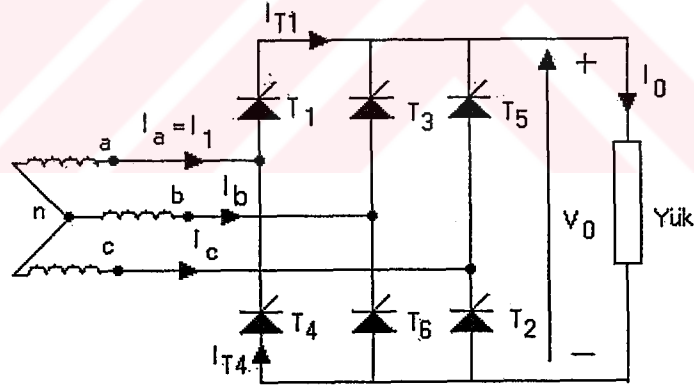
Burada h_i değeri i.nci harmonik akımlarının genliğidir. α_j ise j.nci giriş anahtarlama acısıdır. Çift harmonik karakteristikleri değerleri yarım dalga simetrisinden dolayı gösterilmemiştir çünkü bunların değeri sıfırdır. Bir çok tercih imkanı vardır. Örneğin n seçilen değerindeki harmonikler elimine edilebilir. h genliği sıfır olacak şekilde α değerleri hesaplanır. Günümüzde matlab yazılım paketi yardımı ile büyük boyutlu matrisleri sıfır hata payı ile kısa bir sürede çözme imkanı olduğundan, bu yolla harmonikleri elimine etme daha da kolaylaşmıştır.

4 ÖNERİLEN HARMONİK GİDERME YÖNTEMİ

Üç fazlı tam dalga kontrollü doğrultucunun giriş akımına ait toplam harmonik distorsiyonunun düşürülmesi hedeflenmektedir. Bunun için doğrultucu girişine üçüncü harmonik akım bileşeni enjekte ederek distorsiyonun azaltılması sağlanmıştır.

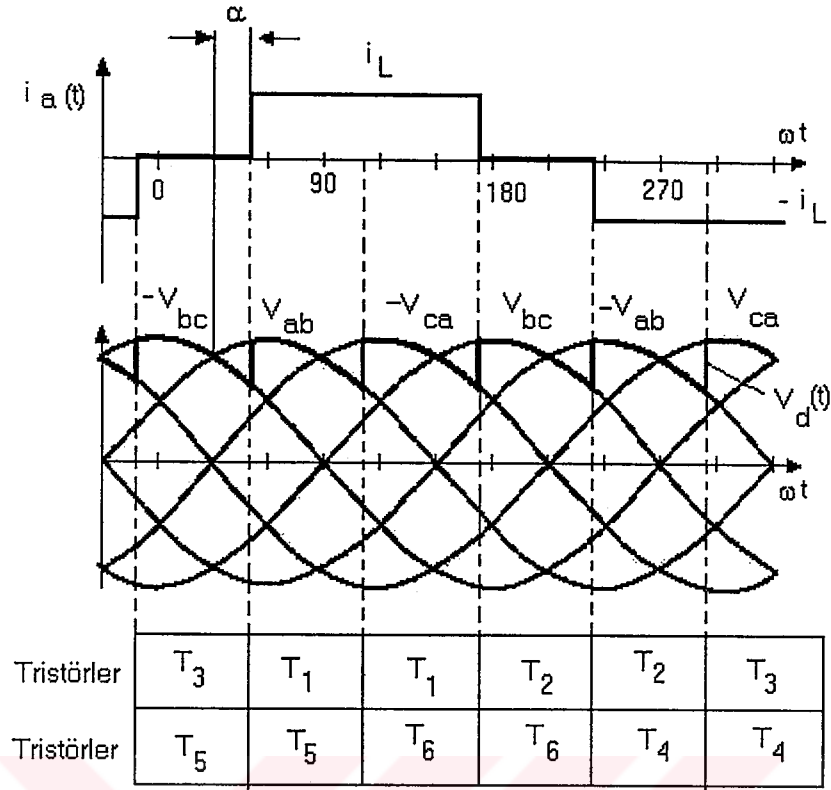
4.1 Üç fazlı tam dalga kontrollü doğrultucu

Lineer olmayan yüklere örnek olarak anahtarlama güç elektroniği devreleri gösterilebilir. Bu tip devreler örnek olarak, olarak anahtarlama güç elektroniği devreleri gösterilebilir. Bunlar doğrultucular, eviriciler, frekans çeviriçiler ve alternatif akım kıyıcıları örnek olarak gösterilebilir. Simülasyon çalışmasında tristör, gto ve güç transistörlerini ideal bir anahtar olarak alabiliriz. Bu bölümde harmonik distorsiyon oranını düşürerek elektrik akımının kalitesinin iyileştirilmesi anlatılacaktır. Bu tür devreler güç sistemlerinde çok ça kullanıldığından ve harmonik distorsiyona neden olduklarından, bu devrelerdeki harmonik distorsiyonun azaltılması hedeflenmiştir. Öncelikle üç fazlı tam dalga kontrollü doğrultucu devresine ait tüm büyüklükleri belirleyelim.



Şekil 4.1 Yüksek endüktif yüklü tam dalga tristör bağlantısı.

Şekil 4.1’de tam dalga kontrollü doğrultu devresi verilmiştir. Tam dalga kontrollü doğrultucuda çıkış gerilim dalgalanma oranı üç fazlı yarım dalga kontrollü doğrultucuya nazaran daha azdır. T_1 ve T_6 tristörleri $(\pi/6 + \alpha \leq \omega t < (\pi/2 + \alpha))$ aralığında iletimdedir. Bu aralıkta yük uçlarında v_{ab} gerilimi olacaktır. T_1 ve T_2 tristörleri ise $(\pi/2 + \alpha) \leq \omega t < (5\pi/6 + \alpha)$ aralığında iletimde olup, yük uçlarında v_{ac} fazlar arası gerilimi bulunacaktır. Şekil 4.2’ de bir periyot için tristörlerin iletimde olduğu süreler gösterilmiştir.



Şekil 4.2 Tam dalga köprü doğrultucuda tristörlerin iletimde olduğu aralıklar

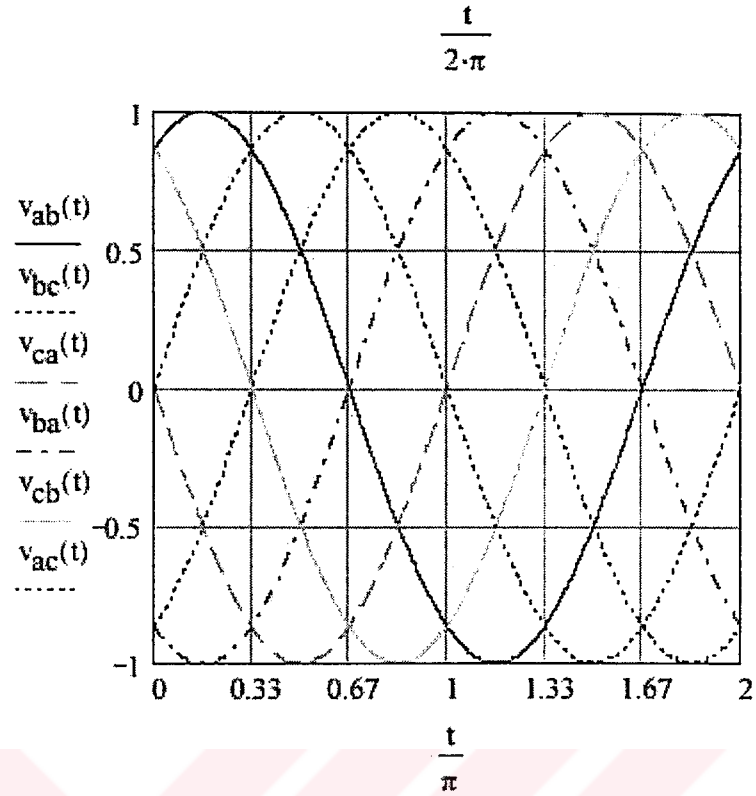
Faz nötr gerilimleri aşağıdaki gibi ifade edilir, gerilimi aşağıdaki gibi ifade edilir.

$$\left. \begin{aligned} v_{an} &= V_m \sin \omega t \\ v_{bn} &= V_m \sin \left(\omega t - \frac{2\pi}{3} \right) \\ v_{cn} &= V_m \sin \left(\omega t + \frac{2\pi}{3} \right) \end{aligned} \right\} \quad (4.1)$$

Fazlar arası gerilimler için,

$$\left. \begin{aligned} v_{ab} &= v_{an} - v_{bn} = \sqrt{3} V_m \sin \left(\omega t + \frac{\pi}{6} \right) \\ v_{bc} &= v_{bn} - v_{cn} = \sqrt{3} V_m \sin \left(\omega t - \frac{\pi}{2} \right) \\ v_{ca} &= v_{cn} - v_{an} = \sqrt{3} V_m \sin \left(\omega t + \frac{\pi}{2} \right) \end{aligned} \right\} \quad (4.2)$$

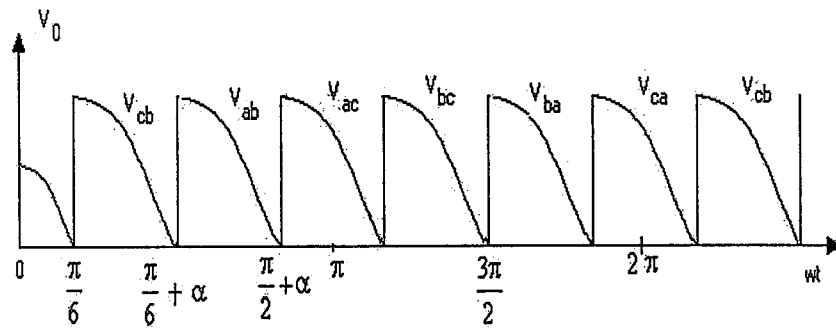
yazılabilir.



Şekil 4.3 Fazlar arası gerilimin dalga şekli

4.2 Tam dalga kontrollü doğrultucuda çıkış geriliminin ortalama ve efektif değeri

Tam dalga kontrollü doğrultucu α tetikleme açısı ile tetiklendiğinde, Şekil 4.4’de görülen çıkış gerilimi elde edilir. Bu dalga şekli sinüsoidal dalganın kırılması sonucu nonsinüzoidal bir hal almaktadır. Dolayısıyla harmonik bileşenlerine sahip olacaktır.



Şekil 4.4 Tam dalga kontrollü doğrultucu α tetikleme açısı ile tetiklendiğinde çıkış geriliminin dalga formu

4.2.1 Tam dalga kontrollü doğrultucunun çıkış geriliminin ortalama değeri

Bir peryot için gerilimin ortalama değeri,

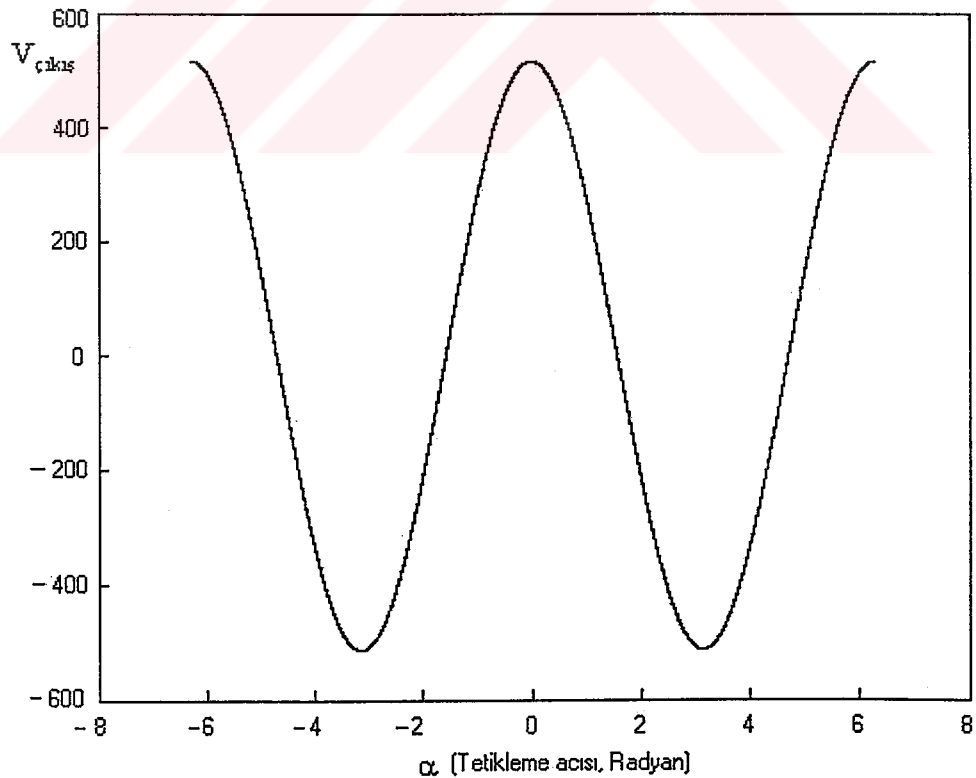
$$V_{dc} = \frac{3}{\pi} \int_{\pi/6+\alpha}^{\pi/2+\alpha} v_{ab} d(\omega t) \quad (4.3)$$

$$V_{dc} = \frac{3}{\pi} \int_{\pi/6+\alpha}^{\pi/2+\alpha} \sqrt{3} V_m \sin(\omega t + \frac{\pi}{6}) d(\omega t) = \frac{3\sqrt{3}V_m}{\pi} \left[-\cos\left(\omega t + \frac{\pi}{6}\right) \right]_{\pi/6+\alpha}^{\pi/2+\alpha} \quad (4.4)$$

fadeleri kullanılarak,

$$V_{dc} = \frac{3\sqrt{3}V_m}{\pi} \cos \alpha \quad (4.5)$$

şeklinde bulunur. Burada, V_m , faz nötr geriliminin tepe değerini, α tetikleme açısını göstermektedir. Denklemden de anlaşılacağı üzere tam dalga kontrollü doğrultuçuda ortalama değer α açısına bağlı olarak değişmektedir. Şekil 4.5 ,te α tetikleme açısına bağlı olarak bu çıkış geriliminin değişimi verilmiştir ($V_m = \sqrt{2}.220$ (V) , $-2\pi \leq \alpha \leq 2\pi$).



Şekil 4.5 Üç fazlı tam dalga kontrollü doğrultucu çıkış ortalama geriliminin α tetikleme açısına bağlı değişimi

4.2.2 Tam dalga kontrollü doğrultucunun çıkış geriliminin efektif değeri

Periyodik bir fonksiyonun bir peryod üzerinden efektif değeri,

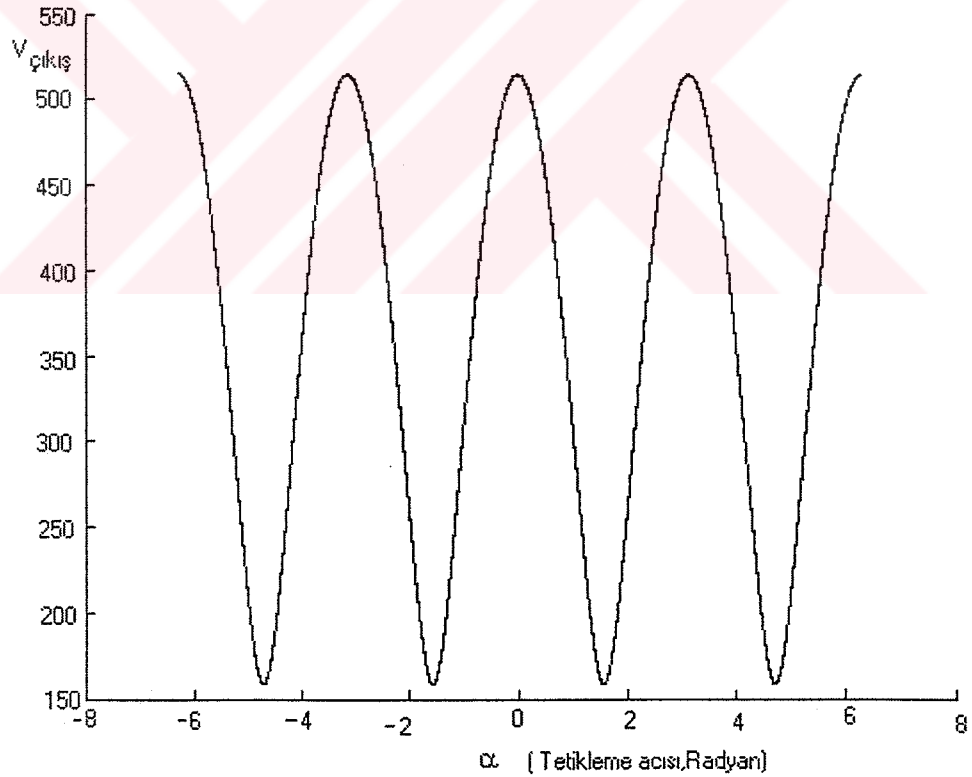
$$X_{\text{eff}} = \sqrt{\frac{1}{2\pi} \int_0^T X^2(t) dt} \quad (4.6)$$

$$V_{\text{eff}} = \left[\frac{3}{\pi} \int_{\pi/6+\alpha}^{\pi/2+\alpha} 3V_m^2 \cdot \sin^2(\omega t + \frac{\pi}{6}) d(\omega t) \right]^{1/2} \quad (4.7)$$

ile hesaplanırsa çıkış geriliminin efektif değeri,

$$V_{\text{eff}} = \sqrt{6}V_m \left(\frac{1}{4} + \frac{3\sqrt{3}}{8\pi} \cos 2\alpha \right)^{1/2} \quad (4.8)$$

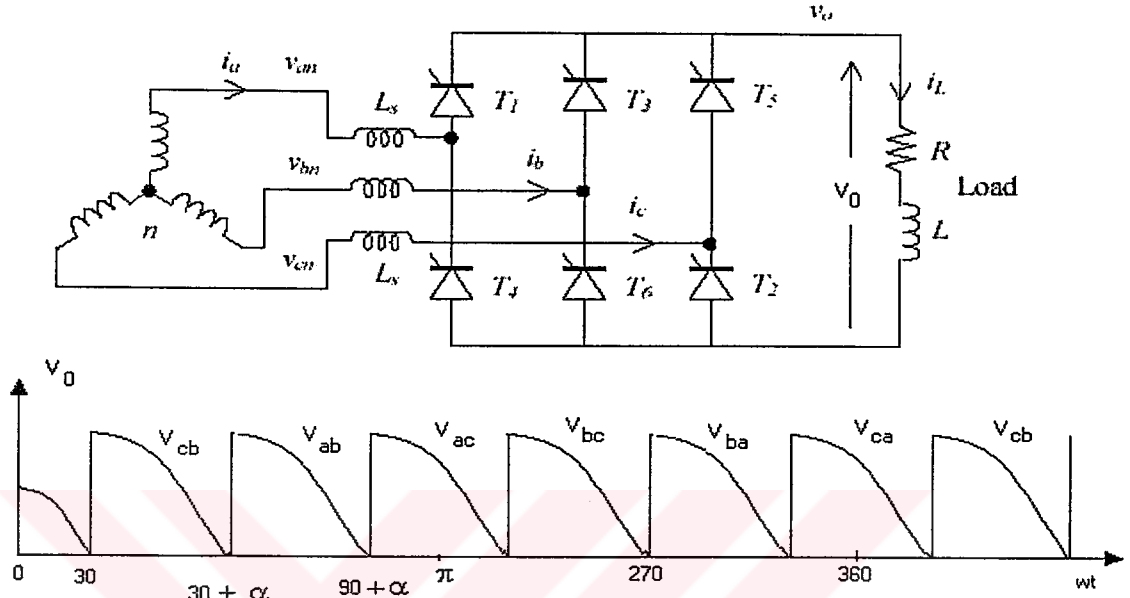
olarak bulunur. $V_m = \sqrt{2} \cdot 220$, için $(-2\pi \leq \alpha \leq 2\pi)$ aralığında α 'ya göre çıkış geriliminin efektif değerinin değişimi Şekil 4.6'da verilmiştir.



Şekil 4.6 Kontrollü doğrultucuda çıkış efektif geriliminin α acısına bağlı değişimi.

4.3 Tam dalga kontrollü doğrultucunun çıkış geriliminin Fourier analizi

Çıkış geriliminin dalga şekline ait Şekil 4.4 deki değişim daha önce de belirtildiği üzere harmonik bileşenlere sahip olacaktır. Tam dalga kontrollü bir doğrultucunun $\alpha = 30$ derece tetikleme açısı ile tetiklendiğinde doğrultucunun çıkış dalga formu aşağıda verildiği gibidir.



Şekil 4.7 Üç fazlı tam dalga kontrollü bir doğrultucunun çıkış dalga formu

Çıkış geriliminin a fazı için fourier katsayıları ile ifadesi,

$$V_{an} = V_{dc} + \sum (A_n \sin n\omega t + B_n \cos n\omega t) \quad (4.9)$$

şeklinde yazılır. Bu ifadeye çıkış geriliminin ortalama değeri,

$$V_{dc} = \frac{3\sqrt{3} \cdot V_m}{\pi} \cos \alpha \quad (4.10)$$

şeklinde daha önce belirlenmiş idi. Fourier katsayıları,

$$A_n = \frac{3}{\pi} \int_{\alpha+30}^{\alpha+90} V_{ab} \sin n\omega t d(\omega t) \quad (4.11)$$

eşitliğinden fazlar arası gerilim değeri,

$$V_{ab} = \sqrt{3} V_m \sin(\omega t + 30^\circ) \quad (4.12)$$

$$A_n = \frac{3\sqrt{3}V_m}{\pi} \int_{\alpha+30}^{\alpha+90} \sin(\omega t + 30^\circ) \sin(n\omega t) d\omega t \quad (4.13)$$

ifadesini aşağıdaki formda yazabiliriz.

$$A_n = \frac{3\sqrt{3}V_m}{\pi} \int_{\alpha+60}^{\alpha+120} \sin \omega t \cdot \sin n\omega t d(\omega t) \quad (4.14)$$

Ek-1 ' de verilen trigonometrik özdeşlikler kullanılarak işlemlere devam edildiğinde Fourier katsayısını,

$$A_n = \frac{3\sqrt{3}V_m}{\pi} \left[\frac{2\pi + 3\sqrt{3} \cos(2\alpha)}{12} + \frac{\sqrt{3} \cos(n60) [\cos n\alpha \cos \alpha + n \sin n\alpha \sin \alpha] - \sin(n60) [\sin n\alpha \sin \alpha + n \cos n\alpha \cos \alpha]}{n^2 - 1} \right] \quad (4.15)$$

biçiminde elde ederiz (Ek.1). Diğer Fourier katsayısı ,

$$B_n = \frac{3}{\pi} \int_{\alpha+30}^{\alpha+90} V_{ab} \cos n\omega t d(\omega t) \quad (4.16)$$

V_{ab} geriliminin değerini yazdığımızda bu eşitlik,

$$B_n = \frac{3\sqrt{3}V_m}{\pi} \int_{\alpha+30}^{\alpha+90} \sin(\omega t + 30) \cos n\omega t d(\omega t) \quad (4.17)$$

halini alır. Buradan,

$$B_n = \frac{3\sqrt{3}V_m}{\pi} \int_{\alpha+60}^{\alpha+120} \sin \omega t \cdot \cos n\omega t d(\omega t) \quad (4.18)$$

elde edilir. Diğer Fourier katsayısının hesaplanmasındaki gibi sonuç olarak

$$B_n = \frac{3\sqrt{3}V_m}{\pi} \left[\left(-\frac{\sqrt{3}}{4} \sin 2\alpha \right) + \frac{\sqrt{3} \cos n60 [(\cos n\alpha \sin \alpha - n \sin n\alpha \cos \alpha) + \cos n\alpha \sin n90 * [\sin n\alpha \cos \alpha - n \cos n\alpha \sin \alpha]]}{n^2 - 1} \right] \quad (4.19)$$

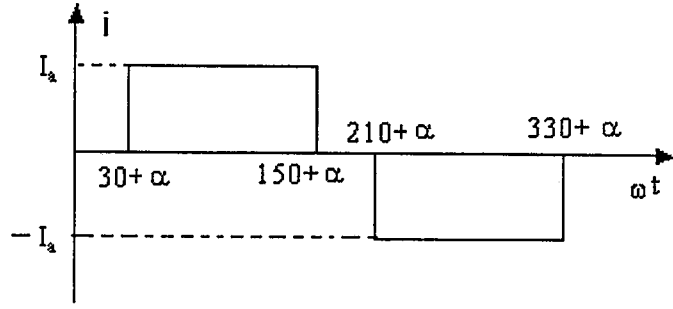
olarak elde edilir (Ek 2). Çıkış gerilimi,

$$V_{an} = \frac{3\sqrt{3}V_m}{\pi} \cos \alpha + \sum_{n=1}^{\infty} \left\{ \left[\frac{2\pi + 3\sqrt{3} \cos(2\alpha)}{12} + \frac{\sqrt{3} \cos(n60) [\cos n\alpha \cos \alpha + n \sin n\alpha \sin \alpha] - \sin(n60) [\sin n\alpha \sin \alpha + n \cos n\alpha \cos \alpha]}{n^2 - 1} \right] \sin n\omega t + \left[\left(-\frac{\sqrt{3}}{4} \sin 2\alpha \right) + \frac{\sqrt{3} \cos n60 [(\cos n\alpha \sin \alpha - n \sin n\alpha \cos \alpha) + (\cos n\alpha \sin n90) * [\sin n\alpha \cos \alpha - n \cos n\alpha \sin \alpha]]}{n^2 - 1} \right] \cos n\omega t \right\} \quad (4.20)$$

şeklinde ifade edilebilir. Bu ifade ile çıkış geriliminin harmonik bileşenlerini tespit etmek mümkün olur. Örneğin (4.20) denkleminde $n=5$ ile gerilimdeki 5. harmonik bileşeni, $n=7$ ile 7. harmonik bileşeni belirlenir. Bu sistemlerde üç ve üçün katı harmonikler üçgen bağlantı ile giderildiğinden bulunmazlar.

4.4 Tam dalga kontrollü doğrultucunun giriş akımına ait harmonik distorsiyonu.

Tam dalga kontrollü doğrultucu devresinin giriş akımı Şekil 4.8' deki gibidir. Dönüştürücülerin (konverterlerin) harmonik analizi yapıldığında üç ve üçün katı harmoniklerin bulunmadığı görülecektir. Fourier analizine göre giriş akımı ifadesi şöyle yazılır.



Şekil 4.8 Tam dalga kontrollü doğrultucu giriş akımı

Giriş akımının Fourier analizi yapılacak olursa,

$$I_{dc} = \frac{1}{2\pi} \int_0^{2\pi} i_1(t) d(\omega t) = 0 \quad (4.21)$$

elde edilir. Fourier katsayıları ise,

$$A_n = \frac{1}{\pi} \int i_1(t) \cos n\omega t d(\omega t) \quad (4.22)$$

$$A_n = \frac{4I_a}{\pi n} \sin \frac{n\pi}{3} \sin n\alpha \quad (n = 1, 3, 5, \dots) \quad (4.23)$$

olarak elde edilir(Ek 3). Diğer Fourier katsayısını ise,

$$B_n = \frac{4I_a}{n\pi} \sin \frac{n\pi}{3} \cos n\alpha \quad (n = 1, 3, 5, \dots) \quad (4.24)$$

olarak elde edilir (Ek 4). Fourier katsayılarını kullanarak giriş akımın. Harmonik bileşeni için,

$$i_1(t) = \frac{4I_a}{n\pi} \sin \frac{n\pi}{3} \sin(n\omega t - n\alpha) \quad (4.25)$$

biçiminde ifade edilir (Ek 5). Efektif olarak,

$$I_n = \frac{2\sqrt{2}I_a}{n\pi} \sin \frac{n\pi}{3} \quad (4.26)$$

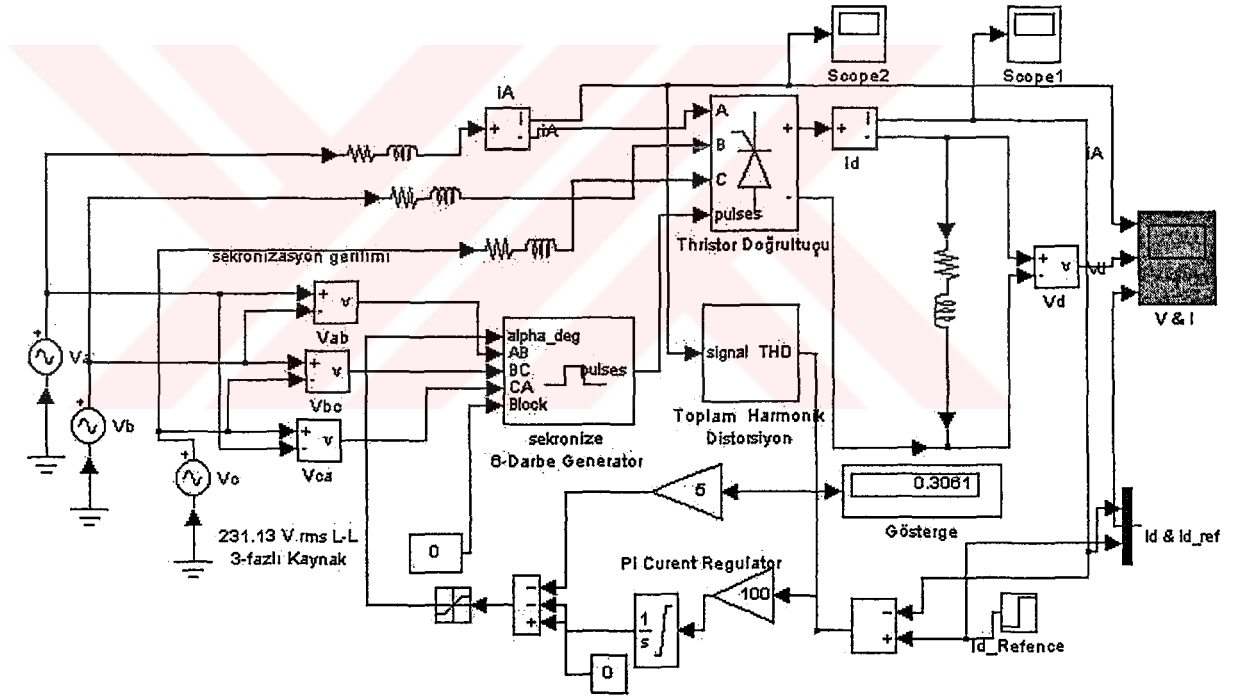
şeklinde yazılır. Giriş akımının toplam harmonik distorsiyonu ise bu ifadelerin kullanılmasıyla,

$$THD_I = 0.3107 = \%31.07$$

olarak hesaplanır (Ek 6).

4.4.1 MATLAB programında kontrollü doğrultucunun simülasyonu.

Üç fazlı tam dalga kontrolü doğrultucu devresi simülasyonu Şekil 4.9’ da verildiği gibidir.

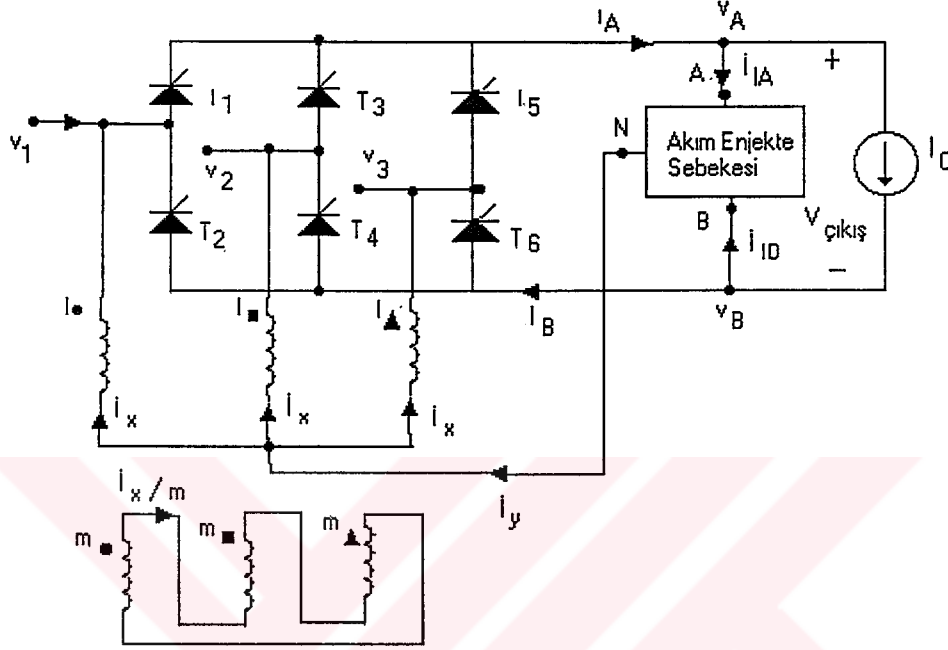


Şekil 4.9 Üç fazlı tam dalga kontrollü doğrultucu için uygulama devresi.

Tam dalga kontrollü doğrultucu devresinin analizi ve harmonik distorsiyonun azaltılması için önerilen çalışmayı simule etmek bakımından mühendislikte çok kullanışlı olan MATLAB programı tercih edilmiştir. MATLAB programına ait toolboxlarda güç sistem analizine ait bloklar bulunmaktadır. Şekil 4.9 ‘da MATLAB programının power system block setindeki tam dalga kontrollü doğrultucu için uygulama devresi temel olarak alınmıştır.

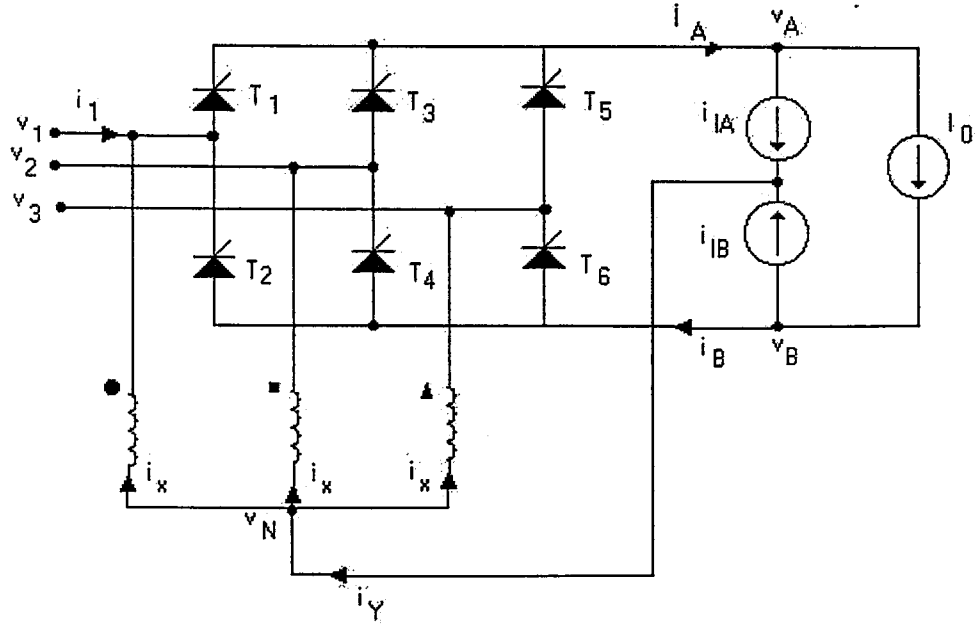
4.5 Tam dalga kontrollü doğrultucuda önerilen distorsiyon azaltma devresi

Bu çalışmada, tam dalga kontrollü doğrultucunun harmonik distorsiyonunun harmonik akımı enjekte ederek azaltılması hedeflenmiştir. Harmonik akımı enjekte ederek giriş akımı distorsiyonunu azaltmada en etkin bileşen üçüncü harmonik bileşenidir. Pratikte bu harmoniğin genliğinin optimal seçilmesi ve girişe enjekte edilmesi sağlanır (Ametani, 1976).



Şekil 4.10 Üç fazlı kontrollü doğrultucuya üçüncü harmonik akımının enjekte edilmesi

Şekil 4.10' da tam dalga kontrollü doğrultucu devresine harmonikli akım enjekte edilmesine ait devre görülmektedir. Şekilde v_A ve v_B doğrultucu çıkış uç gerilimleridir. Bu gerilimlerde doğrultucu girişine i_Y akımı enjekte edilir. i_Y akımı aynı genlik değerine sahip üç adet i_x akımından oluşur. Akım enjekte işlemi primeri yıldız sekonderi üçgen bağlı üç fazlı bir transformatör üzerinden gerçekleştirilir. Transformatörün sekonder ucu yüksüzdür. Tam dalga kontrollü doğrultucu ile akım enjekte devresi Şekil 4.11'deki gibi basitleştirilmiştir (Pejovic, P. ve Janda., 1999). Şekil 4.11'de görüldüğü gibi akım enjekte devresi bağımsız akım kaynaklarına dönüştürülmekte, transformatör ise birer faza ait endüktans olarak modellenmektedir.

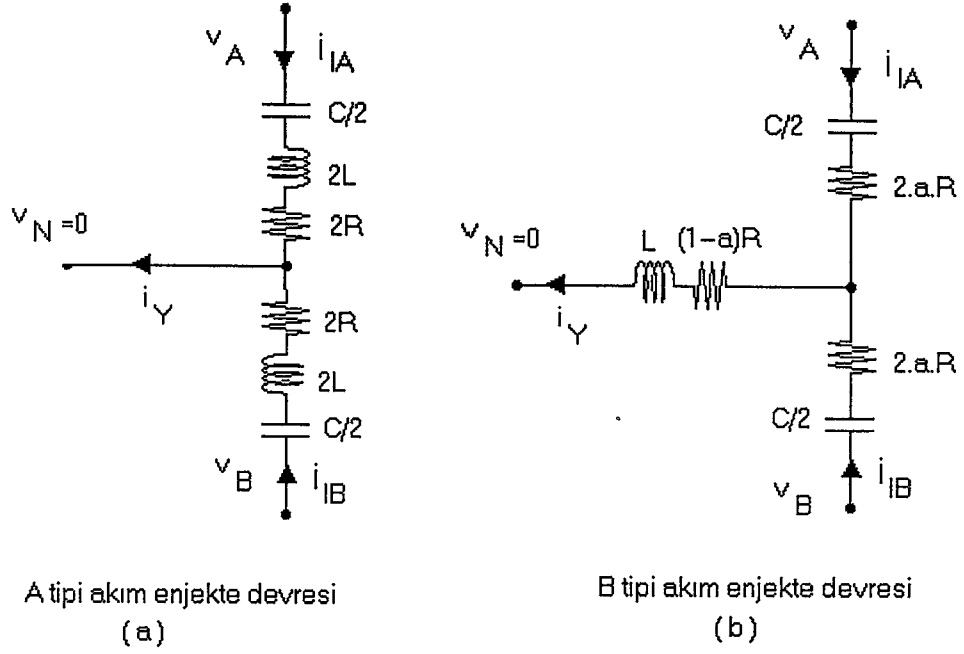


Şekil 4.11 Akım enjekte devresinin basitleştirilmiş şekli

Bu yöntem üç fazlı tam dalga kontrollü doğrultucuya uygulandığında giriş akımına ait harmonik distorsiyonunda gözle görülür bir iyileşme görülebilmektedir. Bu çalışmada orijinal olarak tam dalga kontrollü doğrultucuya harmonik enjekte devreleri ile 3. harmonik akımının enjekte edilmesi sağlanmış ve yine orijinal olarak MATLAB programı kullanılarak analiz gerçekleştirilmiştir. Analiz sonuçlarında harmonik distorsiyonunda azalma sağlanmıştır.

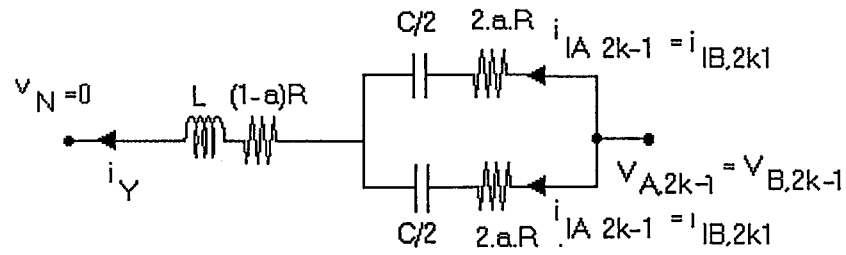
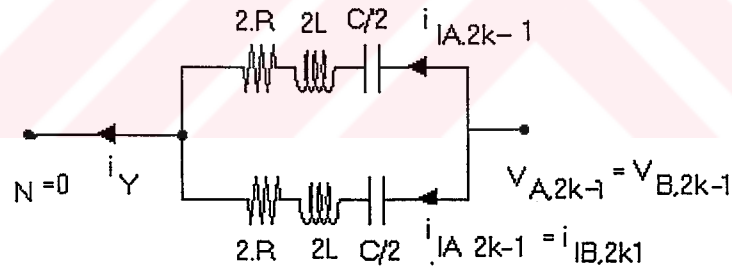
4.6 Akım enjekte devre tipleri

Harmonik distorsiyonu azaltmada çeşitli akım enjekte devreleri ile çeşitli harmonik bileşenleri kullanılmaktadır. Özellikle üçüncü harmonik bileşeninin uygulandığı devreler daha etkin sonuçlar vermektedir (Ametani., 1976). Ancak literatürde, daha yüksek dereceli harmonik bileşenlerin giderilmesinde 9. harmonik bileşeninin enjekte edilmesi de kullanılmaktadır. Bu çalışmada, tam dalga kontrollü doğrultucunun harmonik distorsiyonunu azaltmada, üçüncü harmonik akımı enjekte edilmiştir. Akım enjekte devreleri ise literatürde çeşitli devreler ile yapılabilmektedir. Pezoviç ve Janda'nın (Pejovic, P ve Janda, Z, 1999) geliştirilmiş olduğu devreler pasif elemanlar tarafından gerçekleştirildiği için daha kullanışlı ve uygulanabilir olması nedeniyle tercih edilmiştir. Geliştirilen bu devreler A ve B tipi olarak sınıflandırılmaktadır. Şekil 4.12 (a)' da A tipi akım enjekte devresi, Şekil 4.12 (b)' de B tipi akım enjekte devresi görülmektedir. Akım enjekte devrelerinden, i_{IA} , i_{IB} ve i_Y akımlarını üretilir. Doğrultucu çıkış gerilimleri v_A ve v_B dir.



Şekil 4.12 Akım enjekte devreleri.

V_A gerilimi V_B gerilimleri üçüncü harmonik bileşeninde eşit olduğundan, akım enjekte devreleri Şekil 4.13 'teki gibi gösterilir..

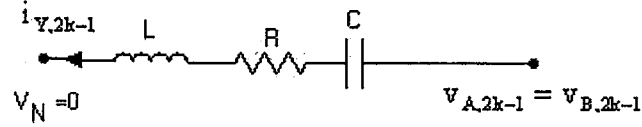


Şekil 4.13 Akım enjekte devreleri için eşdeğer devreler

$k=1,2,3,\dots$ tam sayı değerleri için V_A ve V_B gerilimlerine ilişkin i_{IA} ve i_{IB} akımları eşit olur. Bu eşitlikten hareketle aşağıdaki sonuca varılır.

$$i_{IA,2k-1} = i_{IB,2k-1} = \frac{1}{2} i_{Y,2k-1} \quad (4.27)$$

Akım enjekte devrelerinin Şekil (4.13) 'teki akım enjekte devreleri şekil (4.14)'teki gibi basitleştirilir.



Şekil 4.14 Akım enjekte devrelerine ait basitleştirilmiş eşdeğer devre.

Şekil 4.14'teki devreye ait rezonans frekansı ,

$$\omega_r = \frac{1}{\sqrt{LC}} = 3.\omega_0 \quad (4.28)$$

Bu ifade de ω_r , rezonans frekansı, ω_0 şebeke frekansını göstermektedir.

Enjekte edilen akımın genliğinin kontrolü, akım enjekte devresindeki dirençlerle sağlanır.

Akım enjekte devresinin R direnci ,

$$R = \frac{V_{AI}}{2.k.I_0} \quad (4.29)$$

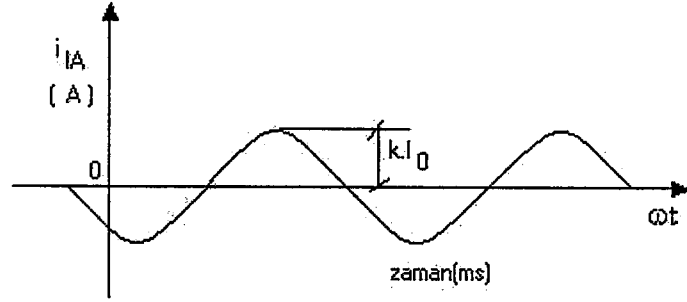
Burada , V_{AI} doğrultucunun çıkış geriliminin Fourier analizinde bulunan temel bileşene ait gerilim değeridir. k enjekte edilen akıma ait katsayı, I_0 doğrultucu giriş akımına eşit bağımsız akım kaynağıdır.

4.7 Optimal harmonik akımının enjeksiyonu

Daha önce belirtildiği üzere harmonik distorsiyonun azaltmak için üçüncü harmonik akımı enjekte edilir. Girişe enjekte edilecek üçüncü harmonik akımı genel ifadesi,

$$i_{IA} = i_{IB} = -kI_0 \sin(3\omega t - \rho\alpha - \varphi) \quad (4.30)$$

Bu ifadede k ,değişken katsayı, I_0 konvertör çıkış akımı , α , tetikleme acısını, φ ,yer değiştirme açısını, ρ tetikleme açısının katsayısını belirtmektedir.



Şekil 4.15 Girişe enjekte edilen harmonikli akım formu

Enjekte edilen akımlar, temel bileşen frekansının üç katı frekansa eşittir. Enjekte edilen akımın genliği , akımın toplam harmonik distorsiyonu (THD_I) minimum yapacak şekilde seçilir. Üçüncü harmonik akımını enjekte ettiğimizde dolayı tetikleme acısının da üçün katı olması gerekir.Bundan dolayı $\rho = 3$ almamız gerekir. Bu durumda enjekte edilecek harmonikli akım,

$$i_{IA} = i_{IB} = -kI_0 \sin(3\omega t - 3\alpha - \varphi) \quad (4.31)$$

İle ifade edilir. Konvertör çıkış akımları ,

$$\left. \begin{aligned} i_A &= I_0 + i_{IA} \\ i_B &= I_0 - i_{IB} \end{aligned} \right\} \quad (4.32)$$

dır. Kontrollü doğrultucu girişine enjekte edilen akım,

$$i_x = \frac{1}{3}i_Y = \frac{1}{3}(I_A - I_B) \quad (4.33)$$

olarak bulunur. Tam dalga kontrollü doğrultucunun giriş (komütasyon aralığının ihmali ile) akımı üçüncü harmonik akımı enjekte edildikten sonra şu şekilde tanımlanır :

$$i = \begin{cases} 0 & 0^\circ \leq \theta < \alpha \\ I_A - i_x & \alpha + 30^\circ \leq \theta < \alpha + 150^\circ \\ 0 & \alpha + 150^\circ \leq \theta < \pi \end{cases} \quad (4.34)$$

I_A ve i_x akım değerlerini rını yazarsak (4.35) denklemindeki ifade elde edilir.

$$I(t) = \frac{i_1}{I_0} = \begin{cases} 0 & 0^\circ \leq \theta < \alpha \\ 1 - \frac{1}{3}k \sin(3\omega t - \rho\alpha - \varphi) & \alpha + 30^\circ \leq \theta < \alpha + 150^\circ \\ 0 & \alpha + 150^\circ \leq \theta < \pi \end{cases} \quad (4.35)$$

Doğrultucu girişine ait toplam akım ifadesi bulunur. Üçüncü harmonik akımı enjekte edildikten sonra giriş akımının efektif değeri :

Devreye üçüncü harmonik akımını enjekte edeceğimizden tetikleme açısının da üçün katı şeklinde olması gerekecektir. Kontrollü doğrultucu giriş akımının efektif değeri,

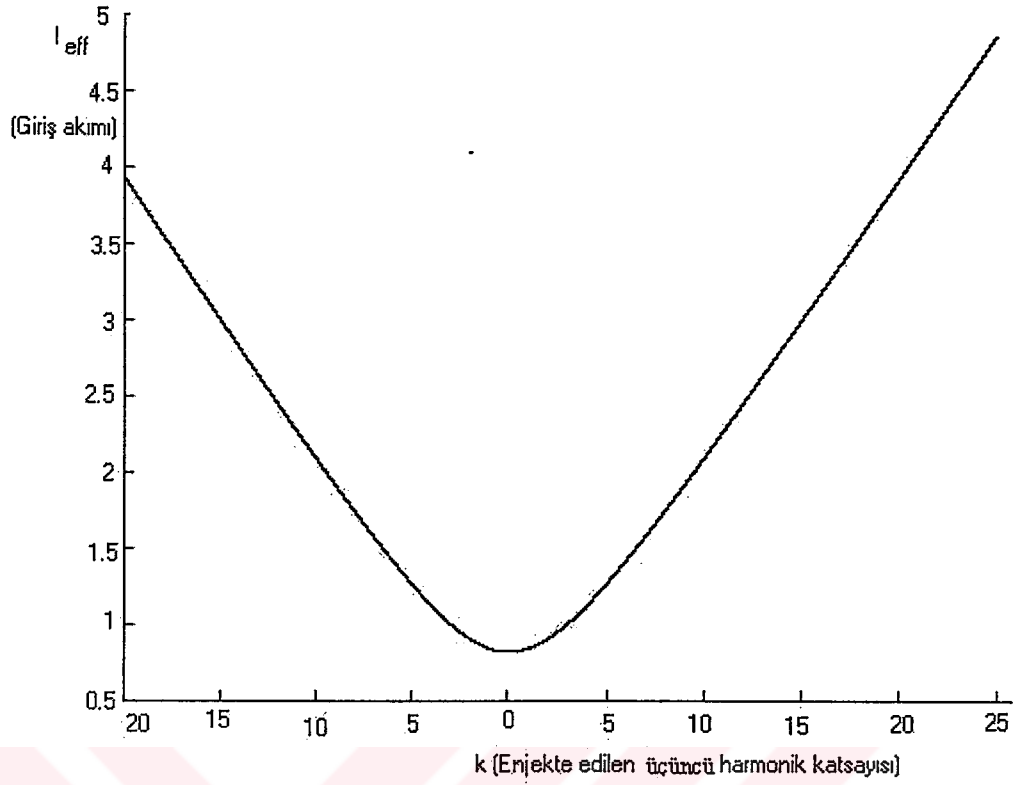
$$I_{\text{eff}}^2 = \frac{2}{2\pi} \left[\int_{\alpha+30}^{\alpha+150} \left(\left(1 - \frac{k}{3} \sin(3\omega t - 3\alpha - \varphi) \right)^2 d(\omega t) \right) \right] \quad (4.36)$$

$$I_{\text{eff}}^2 = \frac{1}{\pi} \left[\int_{\alpha+30}^{\alpha+150} d(\omega t) - \frac{2k}{3} \int_{\alpha+30}^{\alpha+150} \sin(3\omega t - 3\alpha - \varphi) d(\omega t) + \frac{k^2}{9} \int_{\alpha+30}^{\alpha+150} \sin^2(3\omega t - 3\alpha - \varphi) d(\omega t) \right] \quad (4.37)$$

eşitliğinin çözümü ile,

$$I_{\text{eff}} = \sqrt{\frac{18 + k^2}{27}} \quad (4.38)$$

elde edilir (Ek 7). Eşitlikten görüldüğü gibi üçüncü harmonik akımını enjekte edilmesinden sona giriş akımının efektif değeri ile enjekte edilen akımın katsayısına bağlı olarak değişecektir. İkisi arasındaki ilişki Şekil 4.16 'da verilmiştir.



Şekil 4.16 Giriş akımı ile enjekte edilen akımın katsayısı arasındaki ilişki

Enjekte edilecek üçüncü harmonikli akımın genliğine ait katsayıyı (k) bulalım :

Enjekte edilecek akımın eşitliği şöyle tanımlanır,

$$I(t) = \frac{i_1}{I_0} = \begin{cases} 0 & 0^\circ \leq \theta < \alpha \\ 1 - \frac{1}{3}k \sin(3\omega t - 3\alpha - \varphi) & \alpha + 30^\circ \leq \theta < \alpha + 150^\circ \\ 0 & \alpha + 150^\circ \leq \theta < \pi \end{cases} \quad (4.39)$$

Bu tanım aralığındaki giriş akımını Fourier serisine açarsak,

$$I(t) = I_{dc} + \sum_{n=1,2,\dots}^{\infty} (A_n \sin n\omega t + B_n \cos n\omega t) \quad (4.40)$$

ile ifade edebiliriz. Buradaki terimler,

$$I_{dc} = \frac{1}{2\pi} \int_0^{2\pi} I(t) d(\omega t) = 0 \quad (4.41)$$

olur. Fourier katsayıları ise,

$$A_n = \frac{1}{\pi} \int_0^{2\pi} I(t) \sin n\omega t d(\omega t) \quad (4.42)$$

eşitliğinden,

$$A_n = \frac{2}{\pi} \int \left[\left(1 - \frac{1}{3} k \sin(3\omega t - 3\alpha - \varphi) \right) \right] \sin n\omega t d(\omega t) \quad (4.43)$$

yazılır. Ek-8 ve Ek-9'daki işlemler ve özdeşliklerden sonra ,

$$A_n = \left(\frac{1}{n} \cos n\alpha + \frac{k \sin n\alpha \sin \varphi - \frac{kn}{3} \cos n\alpha \cos \varphi}{n^2 - 9} \right) \frac{4}{\pi} \sin n60 \quad (4.44)$$

elde edilir (Ek 8). Diğer fourier katsayısı ise,

$$B_n = \frac{2}{\pi} \int_{\alpha+30}^{\alpha+150} \left(1 - \frac{k}{3} \sin(3\omega t - 3\alpha - \varphi) \right) \cos n\omega t d(\omega t) \quad (4.45)$$

eşitliğinden,

$$B_n = \left[\frac{-1}{n} \sin n\alpha + \frac{k \cos n\alpha \sin \varphi + \frac{kn}{3} \sin n\alpha \sin \varphi}{n^2 - 9} \right] \frac{4}{\pi} \sin n60 \quad (4.46)$$

olarak bulunur (Ek 9).

A_n ve B_n katsayılarını kullanarak akımın genel ifadesi,

$$I = \sum_{n=1}^{\infty} \left\{ \left[\frac{1}{n} \cos n\alpha + \frac{\frac{kn}{3} \cos n\alpha \cos \varphi}{n^2 - 9} \right] \sin n\omega t + \left[\frac{-1}{n} \sin n\alpha + \frac{k \cos n\alpha \sin \varphi + \frac{kn}{3} \sin n\alpha \sin \varphi}{n^2 - 9} \right] \cos n\omega t \right\} \frac{4}{\pi} \sin n60 \quad (4.47)$$

Giriş akımının n . harmonik bileşen için efektif değeri,

$$I_n = \sqrt{\frac{(A_n^2 + B_n^2)}{2}} \quad (4.48)$$

$$I_n = \frac{2\sqrt{2}}{\pi} \sin n60 \sqrt{\left[\frac{(k \sin n\alpha \sin \varphi - \frac{kn}{3} \cos n\alpha \cos \varphi)}{\frac{1}{n} \cos n\alpha + \frac{kn}{n^2 - 9}} \right]^2 + \left[\frac{(k \cos n\alpha \sin n\varphi + \frac{kn}{3} \sin n\alpha \sin \varphi)}{\frac{-1}{n} \sin n\alpha + \frac{kn}{n^2 - 9}} \right]^2} \quad (4.49)$$

elde edilir.

$$I_1^2 = 10^{-5} (105.6.k^2 + 5066.4.k + 60791.6)$$

olarak elde edilir (Ek 10). Üçüncü harmonik akımını enjekte ettikten sonra denklem (4-39)'göre giriş akımının efektif değeri,

$$I_{\text{eff}} = \sqrt{\frac{k^2 + 18}{27}} = \sqrt{10^{-5} (3703.7.k^2 + 66666)}$$

olarak bulunur. Giriş akımının toplam harmonik distorsiyonu,

$$\text{THD}_1 = \sqrt{\frac{I_{\text{eff}}^2}{I_1^2} - 1} \quad (4.50)$$

$$= \sqrt{\frac{3703.7.k^2 + 66666}{105.6.k^2 + 5066.4.k + 60791.6} - 1} \quad (4.51)$$

Toplam harmonik distorsiyonunu minimum yapan değer birinci türevi sıfır yapan değerdir.

$$\frac{\partial(\text{THD}_1)}{\partial k} = 0 \quad (4.52)$$

Gerekli sadeleştirmeler yapıldıktan sonra,

$$18764425.68k^2 + 436227838.6k - 337756622.4 = 0 \quad (4.53)$$

denkleminin kökleri olarak,

$$k_1=0.75007$$

$$k_2=-23.998$$

elde edilir.

4.8 Enjekte edilen akım sonucu toplam harmonik distorsiyonu değeri

Toplam harmonik distorsiyonunun değerinin hesaplanması analitik olarak ya da simülasyon yoluyla belirlenebilir. Bu çalışmada her iki yol ile de hesaplamalar gerçekleştirilmiştir.

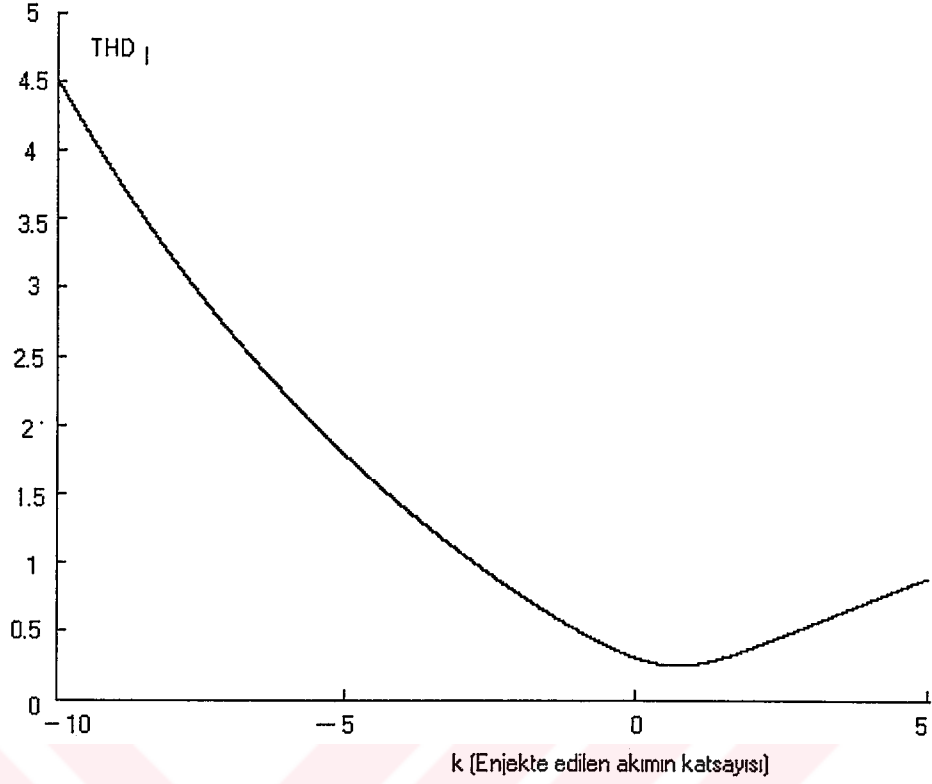
4.8.1 Analitik olarak THD'nin elde edilmesi.

Yukarıda 4.7 ayırında k değerini elde etmiş olduk. Enjekte edilen 3.harmonik bileşenine ait k katsayısı 0.75007 aldığımızda ,doğrultucu giriş akımının toplam harmonik distorsiyonunun değerinin minimum olduğunu görürüz.. Bu değer (4.51) denkleminde,

$$THD_I = \sqrt{\frac{3703.7.(0.75007)^2 + 66666}{105.6.(0.75007)^2 + 5066.4.(0.75007) + 60791.6}} - 1$$

$$THD_I = \%25.2$$

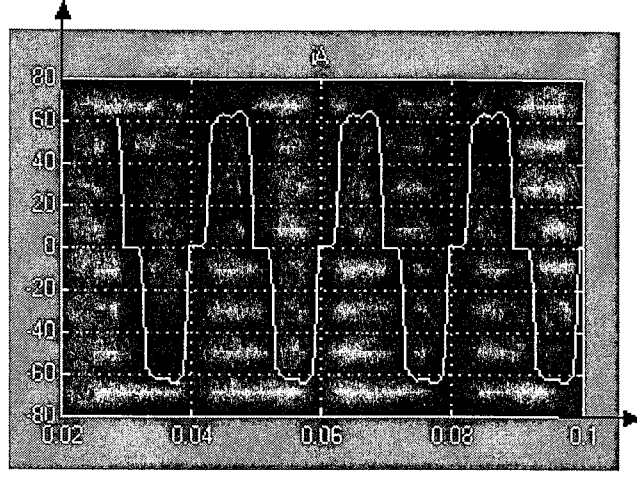
olarak tespit edilir.



Şekil 4.17 k katsayısı ile THD arasındaki ilişki

4.8.2 MATLAB programı ile THD'nin elde edilmesi

Üçüncü harmonikli bileşen akımın doğrultucu girişine enjekte edilmesinden sonra, doğrultucunun giriş akımının harmonikli dalga şekli Şekil 4.19'da harmonik bileşenlere ait değerler Çizelge 4.1'de verilmiştir ($k=0.75, \alpha=0, \varphi=0$ değerlerinde). Buna ait uygulama devresi Şekil 4.20'dedir.

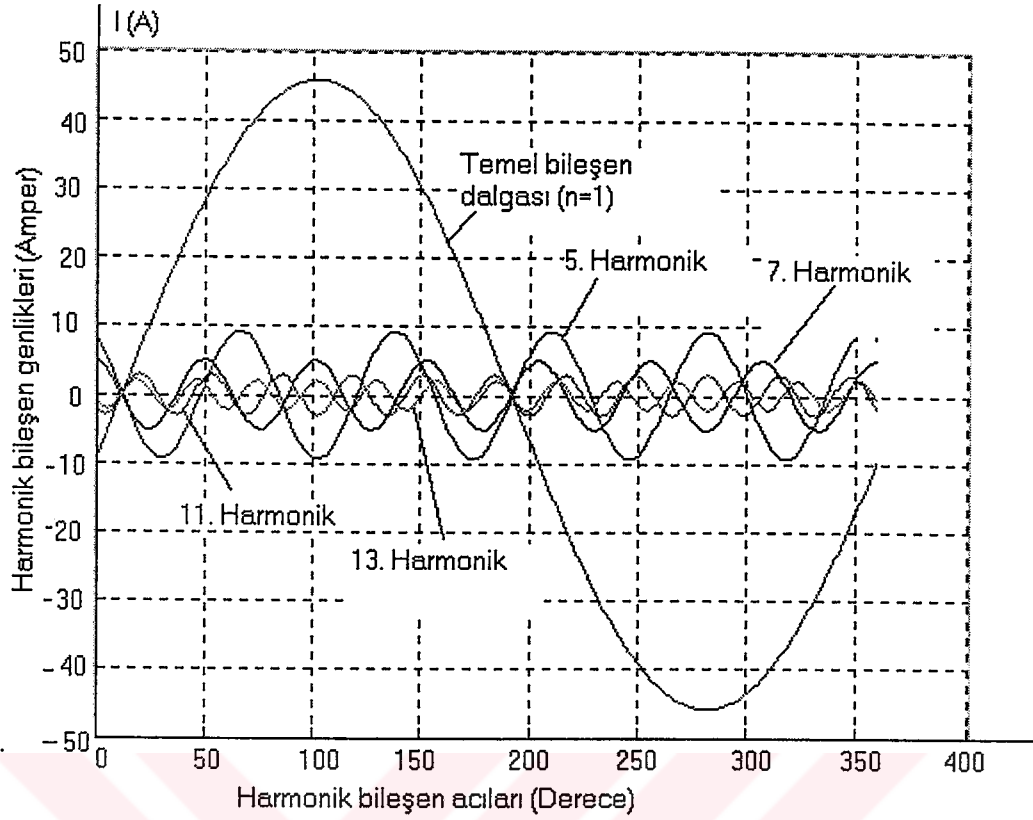


Şekil 4.18 Doğrultucu giriş akım değişimi

Çizelge 4.1 Giriş akımına ait harmonik bileşenlerin genlik ve faz açıları verilmiştir.

Çizelge 4.1 Doğrultucu giriş akımı harmonik bileşenleri

Harmonik bileşen Sırası (n)	Harmonik bileşen Genliği	Harmonik bileşen Faz açısı(Derece)
1	45.83	-11.89
5	9.298	118.7
7	5.04	99.85
11	2.935	-133.5
13	2.085	-155.4
17	1.125	-33.95
19	0.8421	-61.72
23	0.04141	-130.7



Şekil 4.19 A türü akım enjekte devresi ile harmonikli akım enjekte edildikten sonra doğrultucu giriş akım harmonik bileşenleri.

Çizelge 4.1'deki doğrultucu girişine ait akımın toplam harmonik distorsiyonunu hesaplırsak,

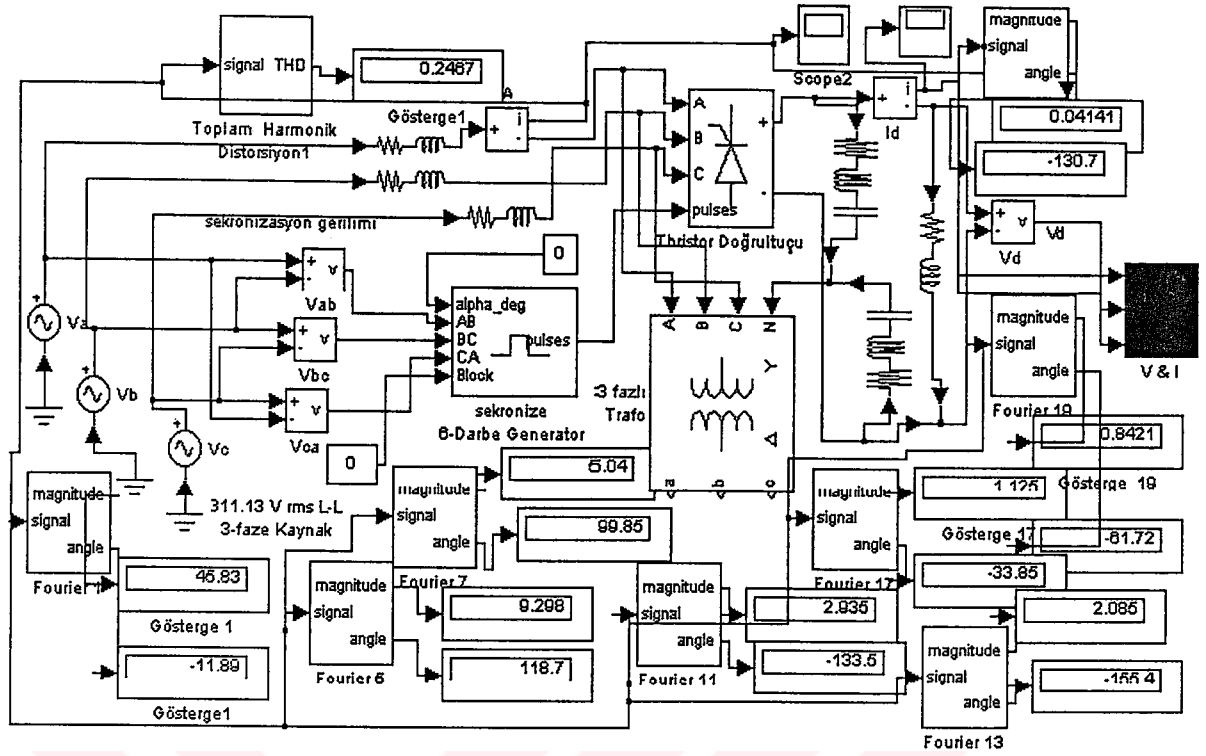
$$THD_I = \sqrt{\frac{I_5^2 + I_7^2 + I_{13}^2 + I_{17}^2 + I_{19}^2 + I_{23}^2}{I_1^2}} \quad (4.54)$$

formülünü kullandığımızda,

$$THD_I = \sqrt{\frac{9.298^2 + 5.04^2 + 2.935^2 + 2.085^2 + 1.125^2 + 0.8421^2 + 0.04141^2}{45.83^2}}$$

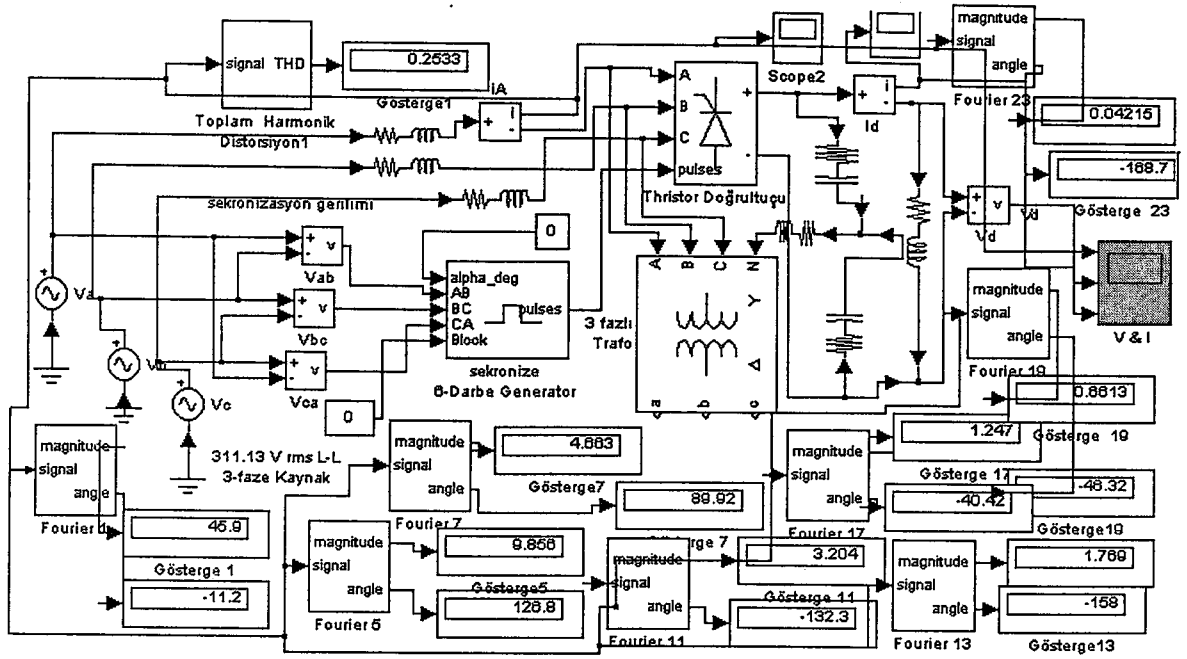
$$THD_I = 0.2457 = \%24.57$$

olarak bulunur. Buna ait uygulama devresini(MATLAB, power system blockset'teki üç faz tam dalga kontrollü doğrultucu devresi referans alınarak), A türü akım enjekte devresi ile gerçekleştirebilirsek , orijinal olarak şu devreyi elde ederiz :



Şekil 4.20 A türü akım enjekte devresi ile elde edilen ($\alpha = 0$) için uygulama devresi

Uygulama devresini (MATLAB power system blockset'teki üç fazlı tam dalga kontrollü doğrultucu devresi referans alınarak) B türü enjekte devresi ile gerçekleştirirsek orijinal olarak şu devreyi elde ederiz.



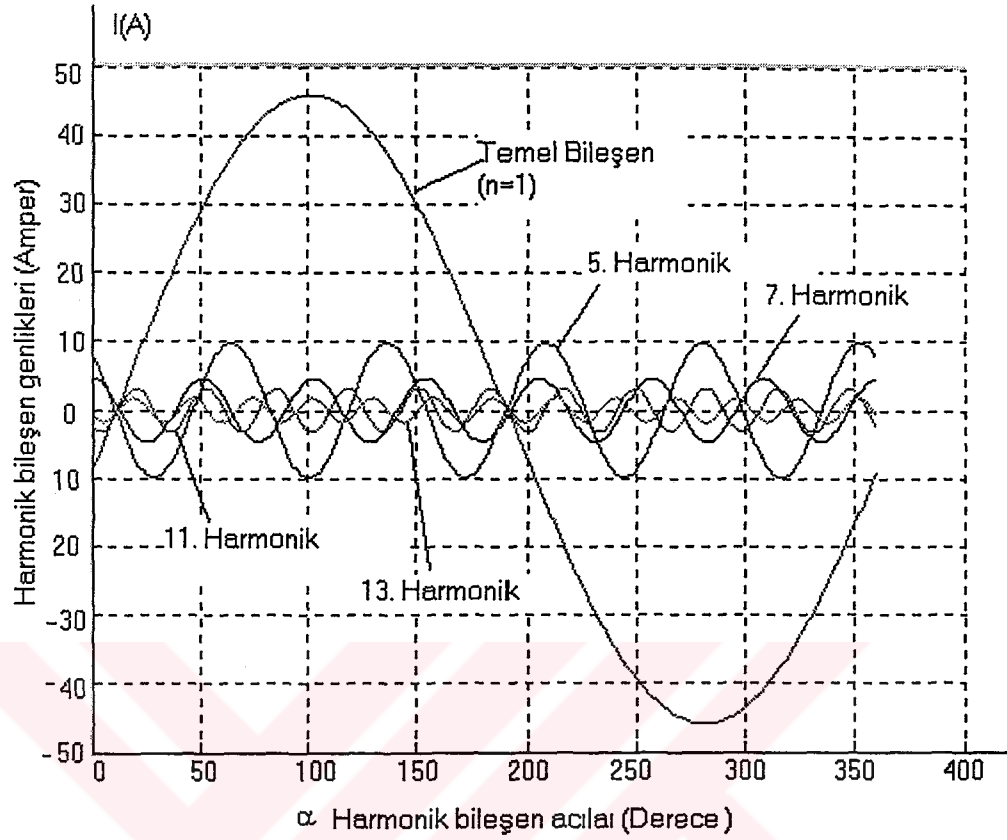
Şekil 4.22 B türü akım enjekte devresi ile gerçekleştirilen uygulama devresi

B türü akım enjekte şebekesi ile elde edilen uygulama sonuçları Çizelge 4.2’de verilmiştir. Bu çizelgede de görüldüğü gibi uygulama devresinin, A türü akım enjekte şebekesi ile elde edilen uygulama devresinden farkı bu uygulama devresinde temel bileşenin genlik değerinde gözle görülür bir artmanın oluşmasıdır. Tüm harmoniklerin dalga şekli çizelge 4.2 ‘de görülmektedir.

Çizelge 4.2 B türü akım enjekte devresi uygulama sonuçları

Harmonik bileşenler (n)	Harmonik bileşenlere ait akımların genliği(A)	Harmonik bileşenlere ait akımların faz açıları (Derece)
1	45.9	-11.2
5	9.856	126.8
7	4.663	89.92
11	3.204	-132.3
13	1.796	-158
17	1.247	-40.42
19	0.66	-46
23	0.8423	175.1

Çizelge 4.2 ait harmonik bileşenlerin grafiği Şekil 4.13'te verilmiştir.



Şekil 4.21 B türü akım enjekte devresi ile doğrultucu girişine harmonikli akım enjekte ettikten sonra doğrultucu giriş akım harmonik bileşenleri

Çizelge 4.2'deki değerler için doğrultucu giriş akımı toplam harmonik distorsiyonunu hesaplırsak,

$$THD_I = \frac{\sqrt{I_5^2 + I_7^2 + I_{11}^2 + I_{13}^2 + I_{17}^2 + I_{19}^2 + I_{23}^2}}{I_1} \quad (4.55)$$

$$THD_I = \frac{\sqrt{19.75^2 + 11.19^2 + 12.63^2 + 10.22^2 + 2.097^2 + 0.503^2 + 0.8423^2}}{126.4}$$

toplam harmonik distorsiyonu,

$$THD_I = 0.2260 = \%22.60$$

olarak elde edilir.

4.9 Enjekte edilen üçüncü harmonik akım katsayısının (k) değişimi

Daha önce verildiği üzere, üçüncü harmonik akımı enjekte edildikten sonra giriş akımının n. harmonik bileşeni ,

$$I_n = \frac{2\sqrt{2}}{\pi} \sin n60 \sqrt{\left[\frac{k \sin n\alpha \sin \varphi}{\frac{1}{n} \cos n\alpha + \frac{-\frac{kn}{3} \cos n\alpha \cos \varphi}{n^2 - 9}} \right]^2 + \left[\frac{k \cos n\alpha \sin \varphi + \frac{kn}{3} \sin n\alpha \sin \varphi}{\frac{-1}{n} \sin n\alpha + \frac{3}{n^2 - 9}} \right]^2}$$

ile ifade edilir. $\varphi = 0$ koşulu altında giriş akımı,

$$I_n = \frac{2\sqrt{2}}{\pi} \sin n60 \sqrt{\left[\frac{1}{n} \cos n\alpha - \frac{kn \cos n\alpha}{3n^2 - 27} \right]^2 + \left[\frac{-1}{n} \sin n\alpha \right]^2} \quad (4.56)$$

olur. Temel bileşen için ($n=1$) giriş akımı,

$$I_1 = \sqrt{10^{-5} (60793 + 5067k \cos^2 \alpha + 106k^2 \cos^2 \alpha)} \quad (4.57)$$

şeklinde bulunur. Giriş akımının harmonik bileşen akımının enjekte edilmeden önceki efektif değeri,

$$I_{\text{eff}} = \sqrt{10^{-5} (3704k^2 + 66666)}$$

idi. Akım için toplam harmonik distorsiyonu ifadesi,

$$\text{THD}_1 = \sqrt{\frac{I_{\text{eff}}^2}{I_1^2} - 1} \quad (4.58)$$

tanımı kullanılarak,

$$= \sqrt{\frac{3704k^2 + 66666}{60793 + 5067k \cos^2 \alpha + 106k^2 \cos^2 \alpha} - 1} \quad (4.59)$$

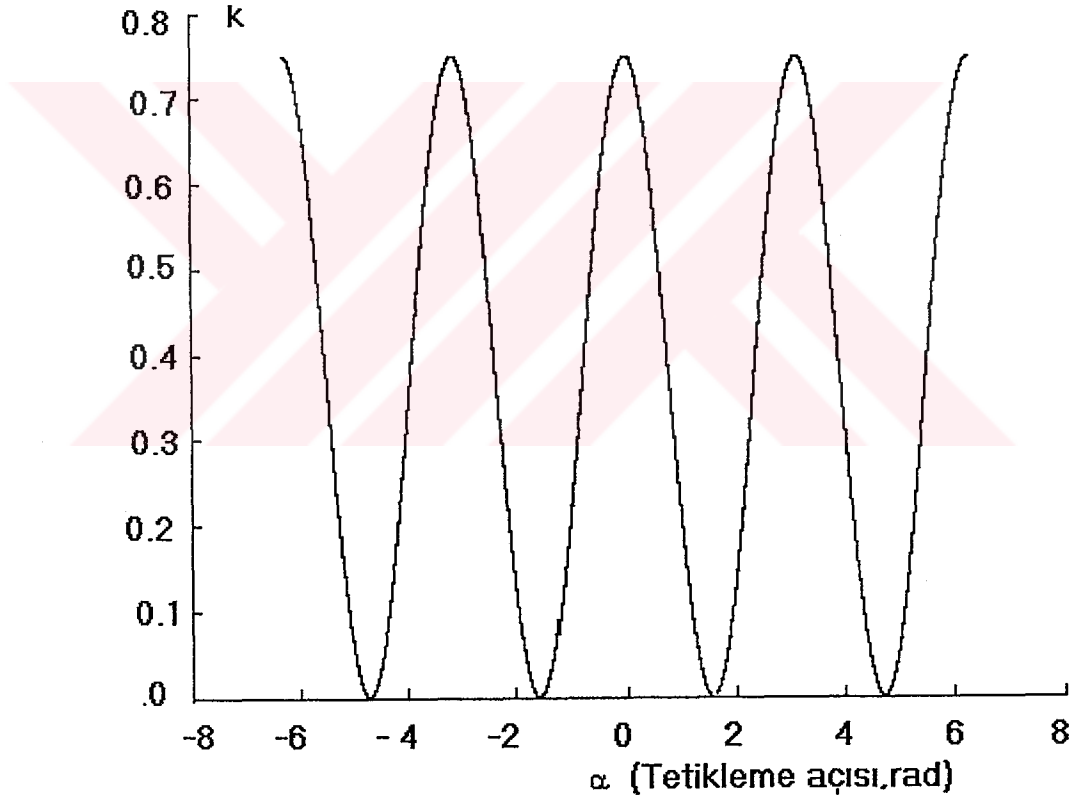
şeklinde bulunur. Bu ifadenin k 'ya göre birinci türevini alıp sıfıra eşitlenmesi ile,

$$18768168.\cos^2\alpha.k^2 + k(450354544-14133192\cos^2\alpha)-337796622\cos^2\alpha = 0 \quad (4.60)$$

ikinci dereceden denklem elde edilir. Bu denklemin köklerinden negatif olanı çözüm olmayacaktır. Pozitif olan ise çözümü verecektir. Gerçek kök,

$$k_1 = \frac{(-450354544 + 14133192 \cos^2 \alpha) + \sqrt{(450354544 - 14133192 \cos^2 \alpha)^2 + 2.5359295 \cdot 10^{16} \cos^4 \alpha}}{37536336 \cos^2 \alpha} \quad (4.61)$$

olarak elde edilir. Bu eşitliğin α ' ya bağlı değişimi Şekil 4.23'de görülmektedir.



Şekil 4.23 Tetikleme açısına bağlı k katsayısının değişimi

4.10 Akım enjekte edildikten sonraki giriş akımı harmonik faktörü

Bu çalışmada, gerçekleştirilen üçüncü harmonik bileşeni enjekte edilmesi ile giriş akımının harmonik bileşenlerindeki azalmasının değişim miktarı şöyle tespit edilmiştir. Üç fazlı

kontrollü doğrultucunun girişine harmonikli akım enjekte edilmeden önceki giriş akımı ifadesi,

$I_n = \frac{2\sqrt{2}}{n\pi} I_a \sin n60$ ifadesi ile verilmişti. Bu ifade $n=1$ değeri için $I_1 = 0.7797 \cdot I_a$ şeklinde yazılır. Doğrultucu girişine harmonikli akımı enjekte ettikten sonra giriş akımı ifadesini,

$$I_n = \frac{2\sqrt{2}}{\pi} \sin n60 \cdot I_0 \sqrt{\left[\frac{1}{n} \cos n\alpha + \frac{-\frac{kn}{3} \cos n\alpha \cos \varphi}{n^2 - 9} \right]^2 + \left[\frac{-1}{n} \sin n\alpha + \frac{\frac{kn}{3} \sin n\alpha \sin \varphi}{n^2 - 9} \right]^2}$$

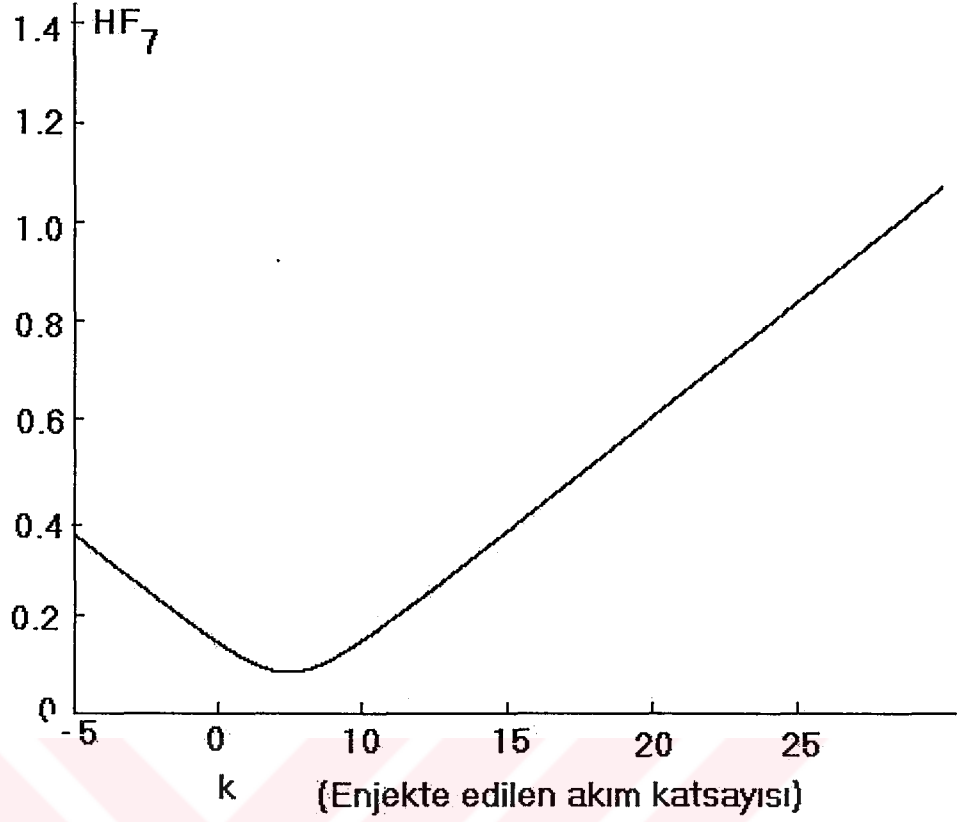
olarak yazılabilir.

Konvertörlerde üç ve üçün katı harmonik değerleri sıfırdır. Bu ifade 7. harmonik için ($\alpha = 5$, $\varphi = 0$, $I_a = I_0$) aşağıdaki şekliyle yazılabilir:

$$I_7 = 0.7797 \cdot I_0 \sqrt{\left(\frac{1}{7} \cos 35 - \frac{7 \cdot k \cos 35}{120} \right)^2 + \left(\frac{-1}{7} \sin 35 \right)^2} \quad (4.62)$$

$$HF_7 = \frac{I_7}{I_1} = \sqrt{0.002283k^2 - 0.01118k + 0.0207} \quad (4.63)$$

şeklinde bulunur. Bu ifadeye ait değişim Şekil 4.24'de verilmiştir.



Şekil 4.24 Yedinci harmonik bileşeni için, harmonik faktörü ile enjekte edilen akım katsayısı arasındaki ilişki

4.10.1 Onüçüncü harmoniğe ait harmonik faktörü

Üç fazlı kontrollü doğrultucunun girişine harmonikli akım enjekte edilmeden önceki giriş akımı ifadesi,

$$I_n = \frac{2\sqrt{2}}{n\pi} I_a \sin n60 \text{ ifadesi ile verilmişti. Bu ifade } n=1 \text{ değeri için } I_1 = 0.7797 \cdot I_a \text{ şeklinde yazılır. Doğrultucu girişine harmonikli akımı enjekte ettikten sonra giriş akımı ifadesini,}$$

$$I_n = \frac{2\sqrt{2}}{\pi} \sin n60 \cdot I_0 \sqrt{\left[\frac{1}{n} \cos n\alpha + \frac{(k \sin n\alpha \sin \varphi - \frac{kn}{3} \cos n\alpha \cos \varphi)}{n^2 - 9} \right]^2 + \left[\frac{-1}{n} \sin n\alpha + \frac{(k \cos n\alpha \sin \varphi + \frac{kn}{3} \sin n\alpha \sin \varphi)}{n^2 - 9} \right]^2}$$

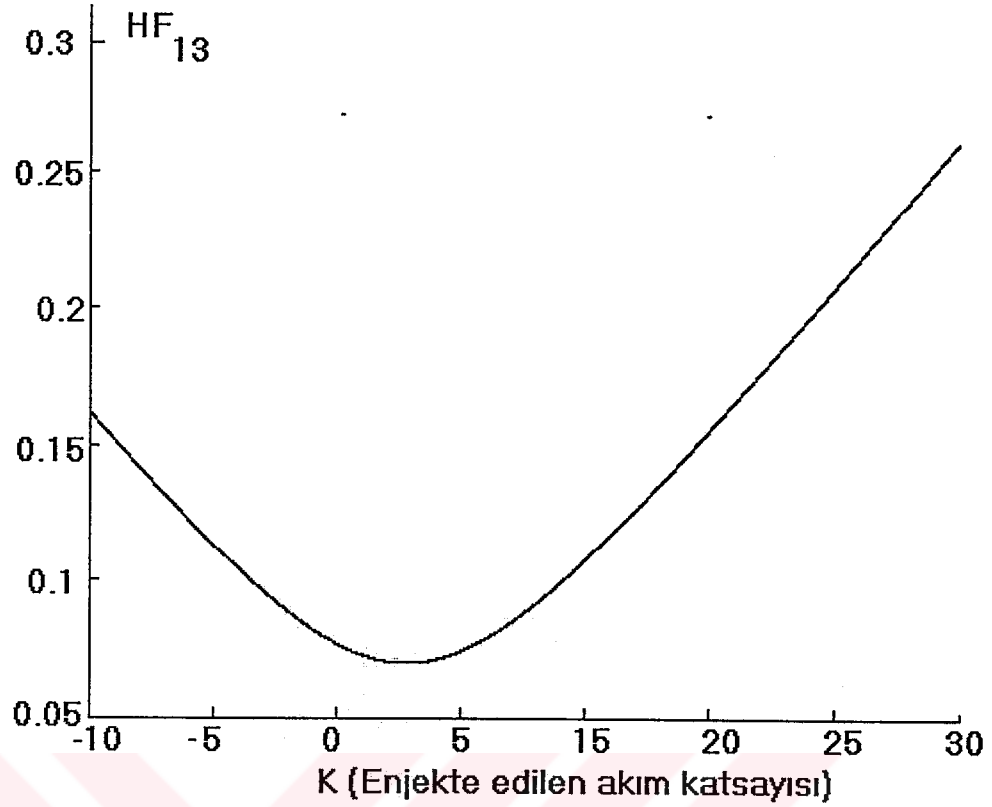
Olarak yazabiliriz.

Konvertörlerde 3. ve üçün katı harmonik değerleri sıfırdır. Bu ifade 13. harmonik için ($\alpha = 5^\circ$, $\varphi = 0$, $I_a = I_0$) aşağıdaki şekliyle yazılabilir.

$$I_{13} = 0.7797 \cdot I_0 \sqrt{\left(\frac{1}{13} \cos 65 - \frac{65 \cdot k \cos 65}{120} \right)^2 + \left(\frac{-1}{13} \sin 65 \right)^2} \quad (4.64)$$

$$HF_{13} = \frac{I_{13}}{I_1} = \sqrt{0.00013k^2 - 0.00074k + 0.00592} \quad (4.65)$$

şeklinde bulunur. Bu ifadeye ait değişim Şekil 4.25'de verilmiştir.



Şekil 4.25 Onüçüncü harmonik bileşeni için, harmonik faktörü ile enjekte edilen akım katsayısı (k) arasındaki ilişki

4.10.2 Ondokuzuncu harmoniğe ait harmonik faktörü

Üç fazlı kontrollü doğrultucunun girişine harmonikli akım enjekte edilmeden önceki giriş akımı ifadesi,

$I_n = \frac{2\sqrt{2}}{n\pi} I_a \sin n60$ ifadesi ile verilmişti. Bu ifade $n=1$ değeri için $I_1 = 0.7797 I_a$ şeklinde

yazılır. Doğrultucu girişine harmonikli akımı enjekte ettikten sonra giriş akımı ifadesini

$$I_n = \frac{2\sqrt{2}}{\pi} \sin n60 I_0 \sqrt{\left[\frac{1}{n} \cos n\alpha + \frac{-\frac{kn}{3} \cos n\alpha \cos \varphi}{n^2 - 9} \right]^2 + \left[\frac{-1}{n} \sin n\alpha + \frac{\frac{kn}{3} \sin n\alpha \sin \varphi}{n^2 - 9} \right]^2}$$

Şeklinde dir. Konvertörlerde 3. ve üçün katı harmonik değerleri sıfırdır. Bu ifade 19.

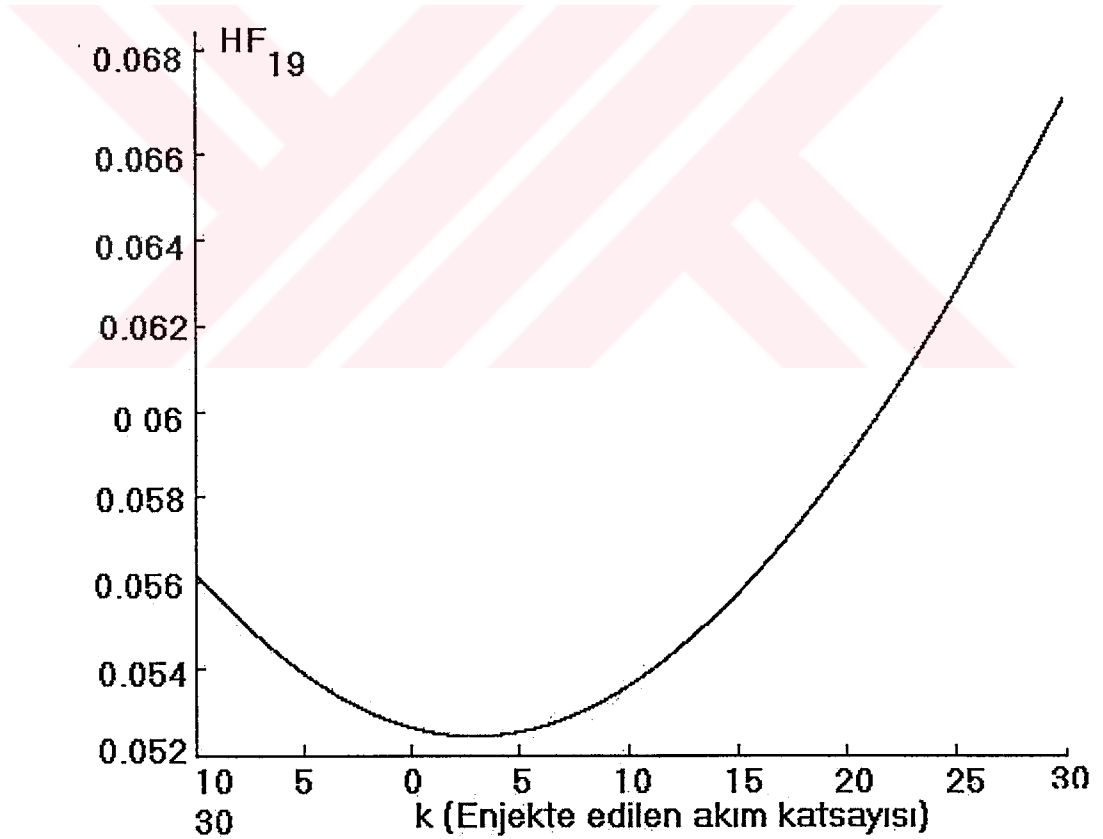
harmonik için ($\alpha = 5$, $\varphi = 0$, $I_a = I_0$) aşağıdaki şekliyle yazılabilir .

$$I_{19} = 0.7797 \cdot I_0 \sqrt{\left(\frac{1}{19} \cos 95 + \frac{13 \cdot k \cos 95}{120}\right)^2 + \left(\frac{-1}{19} \sin 95\right)^2} \quad (4.66)$$

Harmonik faktörü,

$$HF_{19} = \frac{I_{19}}{I_1} = \sqrt{2.45907278 \cdot 10^{-6} k^2 - 1.438659743 \cdot 10^{-5} k + 2.770083103 \cdot 10^{-3}} \quad (4.67)$$

şeklinde bulunur. Bu ifadeye ait değişim Şekil 4.26'de verilmiştir.



Şekil 4.26 Ondokuzuncu harmonik bileşeni için, harmonik faktörü ile enjekte edilen akım katsayısı arasındaki ilişki

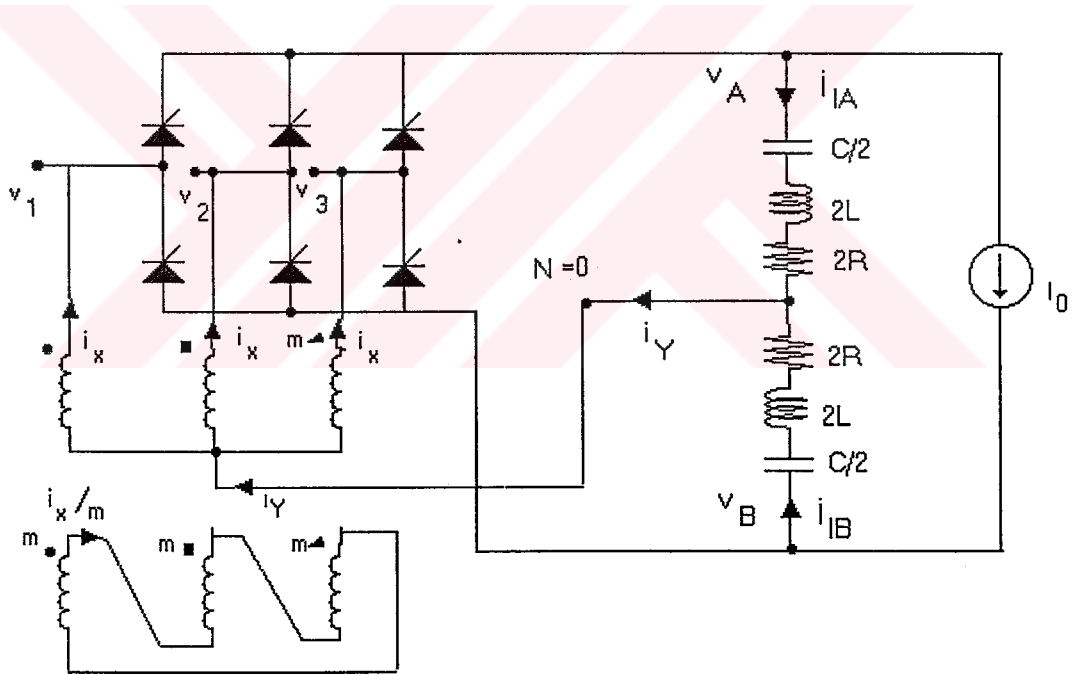
Harmonik bileşenlerin genliği belirli k değerleri için minimumdan geçer.

5 SAYISAL UYGULAMA

Üç fazlı tam dalga kontrollü bir doğrultucunun giriş akımı yaklaşık olarak dikdörtgen şeklindedir. Üçüncü harmonik enjeksiyonu ile elde edilen toplam dalga şekli sinüsoidal dalgaya yaklaştırılmaktadır. Elde edilen dalga şeklinin harmonik distorsiyonu ise azalmaktadır. Bu bölümdeki uygulamalarda üç fazlı tam dalga kontrollü doğrultucunun girişine üçüncü harmonik bileşen akımı çeşitli tetikleme açılarında enjekte edilerek elde edilen dalganın harmonik distorsiyonuna ait analiz yapılmıştır. Üçüncü harmonik bileşenli akım A tipi ve B tipi akım enjekte devreleri ile doğrultucu çıkışından alınan harmonikli akım birlikte doğrultucu girişine enjekte edilmiştir.

5.1 A tipi enjekte devresi kullanılarak yapılan harmonik giderme

Üç fazlı tam dalga kontrollü doğrultucunun girişine A tipi akım enjekte devresi ile harmonikli akım enjekte ederek, harmonik distorsiyonunu azaltmaya ait devre Şekil 5.1’de verilmiştir.



Şekil 5.1 A tipi akım enjekte devresi ile üç fazlı tam dalga kontrollü doğrultucunun girişine harmonikli akım enjekte etme devresi

5.1.1 Tetikleme açısının $\alpha=45$ derece olması hali

Tetikleme açısının 45 derece iken, toplam harmonik distorsiyonun belirlenmesinde hem analitik hesap hem de MATLAB programı kullanılmıştır.

5.1.1.1 Toplam harmonik distorsiyonu için analitik hesap ($\alpha = 45$ derece)

Üç fazlı tam dalga kontrollü doğrultucuya enjekte edilen harmonikli akım katsayısı (4.61) denkleminde,

$$k = \frac{(-450354544 + 14133192 \cos^2 \alpha) + \sqrt{(450354544 - 14133192 \cos^2 \alpha)^2 + 2.5359295 \cdot 10^{16} \cos^4 \alpha}}{37536336 \cos^2 \alpha} \quad (5.1)$$

şeklinde tetikleme acısına bağlı ifade edilir. $\alpha = 45$ derece için akım katsayısı,

$$k = \frac{(-450354544 + 14133192 \cos^2 45) + \sqrt{(450354544 - 14133192 \cos^2 45)^2 + 2.5359295 \cdot 10^{16} \cos^4 45}}{37536336 \cos^2 45} \quad (5.2)$$

$$k = 0.3779$$

olarak elde edilir. $\alpha = 45$ derece, $k = 0.3779$ ve $\varphi = 0$ değerleri için denklem (4.49)' dan, kontrollü doğrultucu giriş akımına ait temel bileşen ($n=1$) akım değeri ,

$$I_1 = 0.7797 \cdot \sqrt{\left(\cos 45 + \frac{0.3779 \cos 45}{24} \right)^2 + (-\sin 45)^2} \quad (5.3)$$

$$I_1 = 0.7859$$

bulunur. Üç fazlı kontrollü doğrultucu giriş efektif akım değeri denklem (4.39)' dan,

$$I_{\text{eff}}^2 = 0.81973$$

olur. Toplam harmonik distorsiyonu (4.58) denkleminde,

$$\text{THD}_I = \sqrt{\frac{0.81973^2}{0.78586^2} - 1}$$

$$\text{THD}_I = 0.2967 = \%29.67$$

olarak hesaplanır.

5.1.1.2 MATLAB programı ile toplam harmonik distorsiyonunun belirlenmesi ($\alpha = 45$ derece)

kontrollü doğrultucuda çıkış geriliminin temel bileşen katsayıları, için daha önce elde edilen (4.15) denklemi ile ($\alpha = 45$ derece, $V_m = 311.13$ V)

$$A_1 = 462.45$$

elde edilir. Diğer katsayı için, (4.19) denklemi kullanılarak ($\alpha = 45$ derece, $V_m = 311.13$ V)

$$B_1 = -222.83$$

bulunur. Bu katsayıların kullanılması ile doğrultucu çıkış geriliminin temel bileşen değeri (4.20) denklemi ile,

$$V_{A1} = 349.65 \text{ V}$$

olarak bulunur. Akım enjekte devre elemanlarının değeri rezonans şartlarından belirlenir.

Üçüncü harmonik bileşen için rezonans frekansı,

$$\omega_r = \frac{1}{\sqrt{LC}} \quad (5.4)$$

denkleminden,

$$LC = \frac{1}{\omega_r^2} = \frac{1}{(2\pi \cdot 3.50)^2} = 1.1258 \cdot 10^{-6} (\text{s}^{-2}) \quad (5.5)$$

bulunur. Devrede endüktans için,

$$2 \cdot L = 11.6 \text{ mH}$$

seçildiğinde, kapasite değeri için

$$C/2 = 97.05 \text{ } \mu\text{F}$$

Elde edilir. Enjekte edilen harmonikli akım ifadesi ise

$$i_{IA} = -k \cdot I_0 \sin(3\omega t - 3\alpha - \varphi) \quad (5.6)$$

enjekte edilen harmonikli akım yolu üzerindeki direnç değeri rezonans durumunda,

$$R = \frac{V_{AI}}{i_Y} \quad (5.7)$$

değerine sahiptir. Buradan,

$$i_Y = 2.i_{IA} \quad (5.8)$$

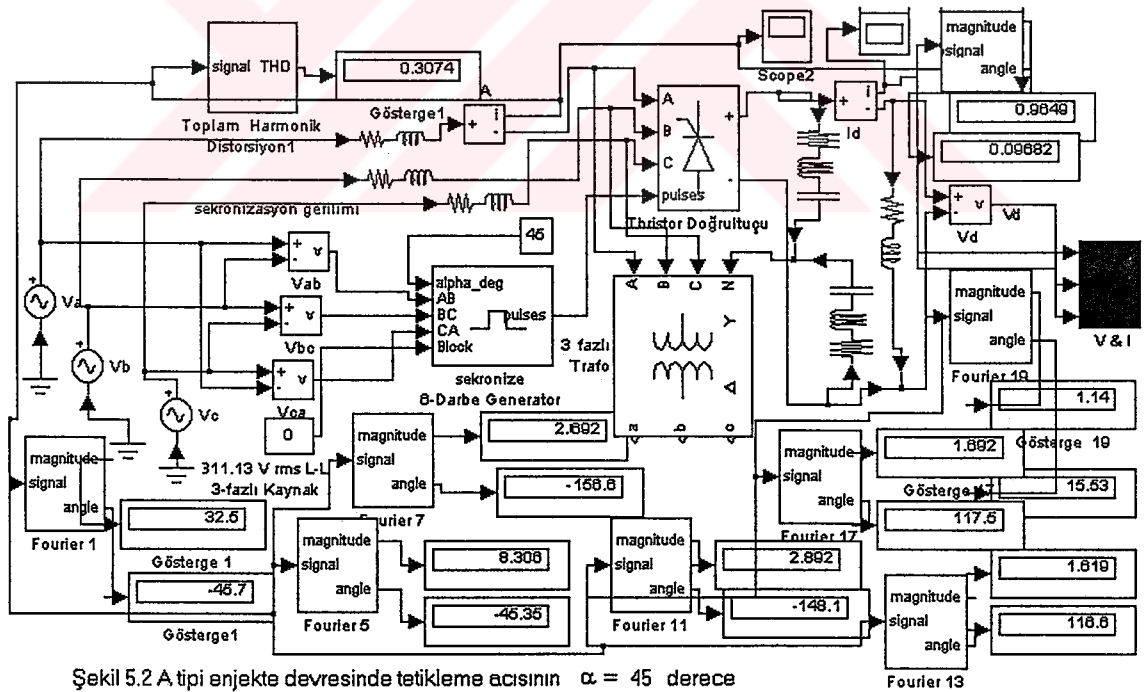
eşitliği (5.7) denkleminde yerine konarak,

$$R = \frac{V_{AI}}{2.k.I_0} \quad (5.9)$$

olarak bulunur.

$$R = \frac{349.65}{2 * 0.3779 * 48.5} = 9.5386 (\Omega)$$

değeri belirlenmiş olur. Belirlenen bu parametreler ile A tipi enjekte devresine ait uygulama devresi Şekil 5.2 'de verilmiştir.



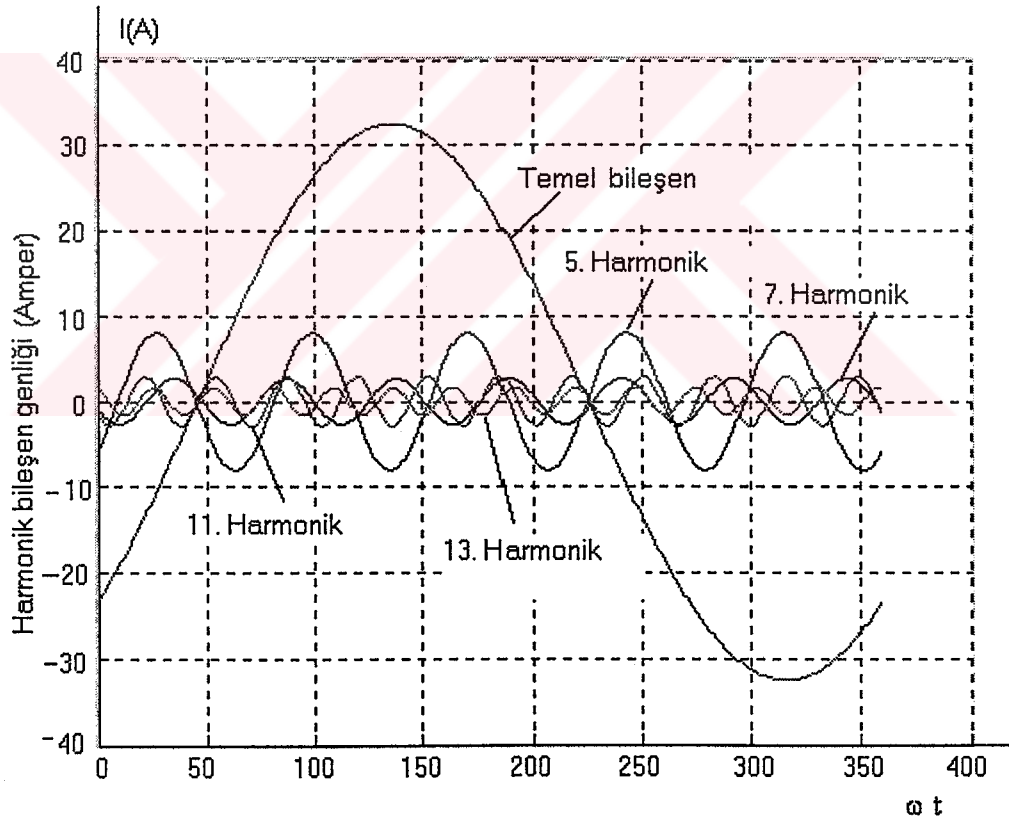
Şekil 5.2 A tipi enjekte devresinde tetikleme açısının $\alpha = 45$ derece olması halinde, sayısal uygulama devresi.

MATLAB programının kullanılması ile elde edilen doğrultucu giriş akımına ait harmonik bileşenleri ve bu bileşenlerin açılar Çizelge 5.1'de verilmiştir.

Çizelge 5.1 Doğrultucu giriş harmonikli akıma ait harmonik bileşenler.

Harmonik bileşen derecesi (n)	Harmonik bileşen akım genlikleri (Amper)	Harmonik bileşen akımlarına ait açılar.(Derece)
1	32.5	-45.7
5	8.306	-45.35
7	2.692	-156.6
11	2.892	-148.1
13	1.619	116.6
17	1.692	117.5
19	1.14	15.53
23	0.9649	0.09682

Çizelge 5.1 ait harmonik bileşenler Şekil 5.3 'te verilmiştir.



Şekil 5.3 Kontrollü doğrultucu giriş akım harmonik bileşenleri

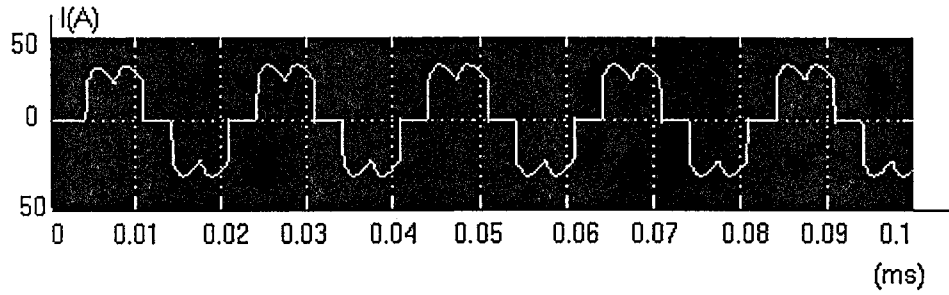
Doğrultucu giriş akımı toplam harmonik distorsiyonu (4.54) denkleminde,

$$THD_1 = \frac{\sqrt{8.306^2 + 2.692^2 + 2.892^2 + 1.619^2 + 1.692^2 + 1.14^2 + 0.9449^2}}{32.5}$$

$$THD_1 = 0.2956 = \% 29.56$$

olarak hesaplanır. Çizelge 5.1’ deki değerlere ait harmoniklerin grafiğini çizersek Şekil 5.3’deki harmonik bileşenlerini buluruz. MATLAB programı ile yapılan analizde elde edilen sonuç ile analitik olarak elde edilen sonuç arasında % 0.11’ lik fark olmuştur. Bu fark analitik hesapta komutasyonun ihmal edilmesinden kaynaklanmaktadır.

$\alpha = 45$ derece için kontrollü doğrultucunun giriş akımına ait değişim Şekil 5.4’ de verilmiştir.



Şekil 5.4 $\alpha = 45$ derece için, üç fazlı tam dalga kontrollü doğrultucu giriş akımı

5.2 Tetikleme açısının 60 derece olması hali

Tetikleme açısı 60 derece iken, toplam harmonik distorsiyonun belirlenmesinde hem analitik hesap hem de MATLAB programı kullanılmıştır.

5.2.1 Toplam harmonik distorsiyonu için analitik hesap ($\alpha = 60$ derece)

Üç fazlı tam dalga kontrollü doğrultucuya enjekte edilen harmonikli akım katsayısının α tetikleme açısına bağlı değişim (4.61) denkleminde,

$$k = \frac{(-450354544 + 14133192 \cos^2 60^\circ) + \sqrt{(450354544 - 14133192 \cos^2 60^\circ)^2 + 2.5359295 \cdot 10^{16} \cos^4 60^\circ}}{37536336 \cos^2 60^\circ} \quad (5.10)$$

$$k = 0.1886$$

olarak elde edilir. $\alpha = 60$ derece, $k = 0.1886$ ve $\phi = 0$ değerleri için denklem (4.49) ‘dan kontrollü doğrultucu giriş akım temel bileşen ($n=1$) akım değeri ,

$$I_1 = 0.7797 \cdot \sqrt{\left(\cos 60 + \frac{0.1886 \cos 60}{24} \right)^2 + (-\sin 60)^2} \quad (5.12)$$

değeri hesaplandığında,

$$I_1^2 = 0.610253$$

olarak bulunur. Üç fazlı kontrollü doğrultucu giriş efektif akım değeri denklem (4.39)'dan,

$$I_{\text{eff}}^2 = 0.66798$$

olur. Toplam harmonik distorsiyonu (4.50) denkleminde,

$$\text{THD}_I = 0.3075 = \% 30.75$$

olarak hesaplanır.

5.2.2 MATLAB programı ile toplam harmonik distorsiyonunun belirlenmesi ($\alpha = 60^\circ$)

Kontrollü doğrultucu çıkış geriliminin temel bileşen değeri Fourier katsayıları elde edilen (4.15) denklemi ile ($\alpha = 60^\circ$, $V_m = 311.13 \text{ V}$)

$$A_1 = 158.03$$

bulunur. B_1 katsayısının değeri (4.19) denkleminde,

$$B_1 = -192.98$$

olur. Bu katsayıların kullanılması ile doğrultucu çıkış gerilimine ait temel bileşen değeri (4.20) denkleminde,

$$V_{A1} = 249.43 \text{ V}$$

olarak bulunur. Akım enjektör devresinin elemanlarının değeri rezonans şartlarında belirlenir.

Üçüncü harmonikli bileşenin rezonans durumunda (5.4) denkleminde,

$$LC = \frac{1}{\omega_r^2} = \frac{1}{(2\pi \cdot 3.50)^2} = 1.1258 \cdot 10^{-6} (\text{s}^{-2}) \quad (5.13)$$

bulunur. Devre endüktansı için

$$2.L=11.6 \text{ mH}$$

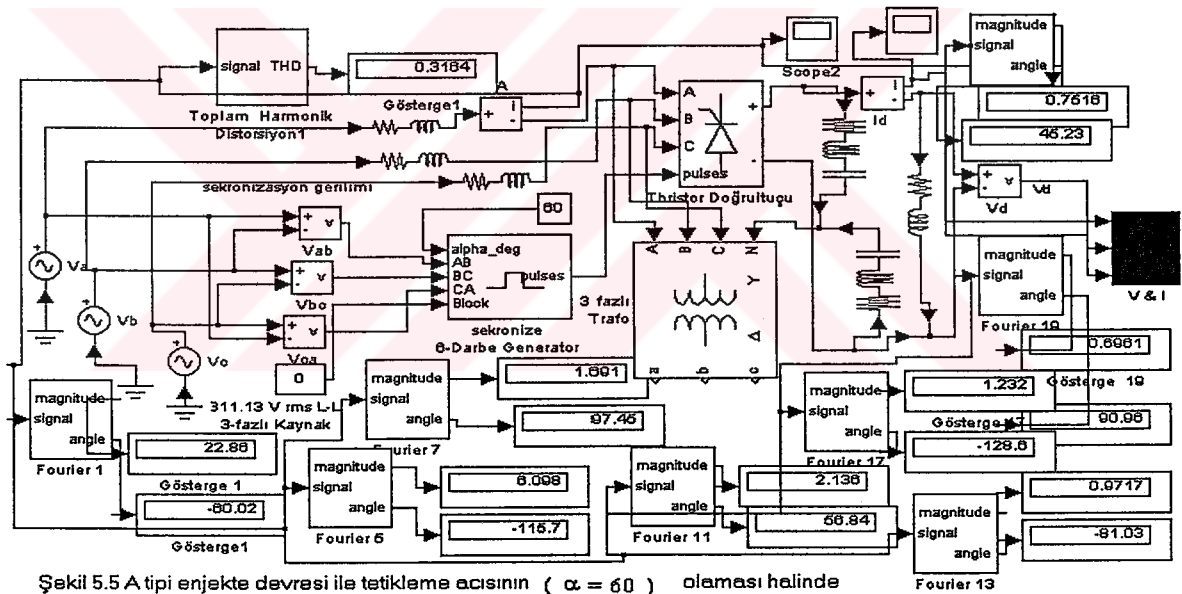
seçildiğinde, kapasite değeri için,

$$C/2 = 97.05 \text{ } \mu\text{F}$$

elde edilir. Enjekte edilen harmonikli akım yolu üzerinde bulunan R direnci (5.9) denkleminde,

$$R = \frac{349.65}{2.01886.36} = 18.3685 \text{ } (\Omega)$$

olarak bulunur. Bu parametreler ile A tipi enjekte devresine ait uygulama devresi Şekil 5.5'te verilmiştir.



Şekil 5.5 A tipi enjekte devresi ile tetikleme acısının ($\alpha = 60^\circ$) olması halinde sayısal uygulama devresi

MATLAB programının kullanılması ile elde edilen doğrultucu giriş akımına ait harmonik bileşenleri ve bu bileşenlerin açılar Çizelge 5.2'de verilmiştir..

Çizelge 5.2 Doğrultucu giriş harmonikli akım bileşenleri ve açı değerleri.

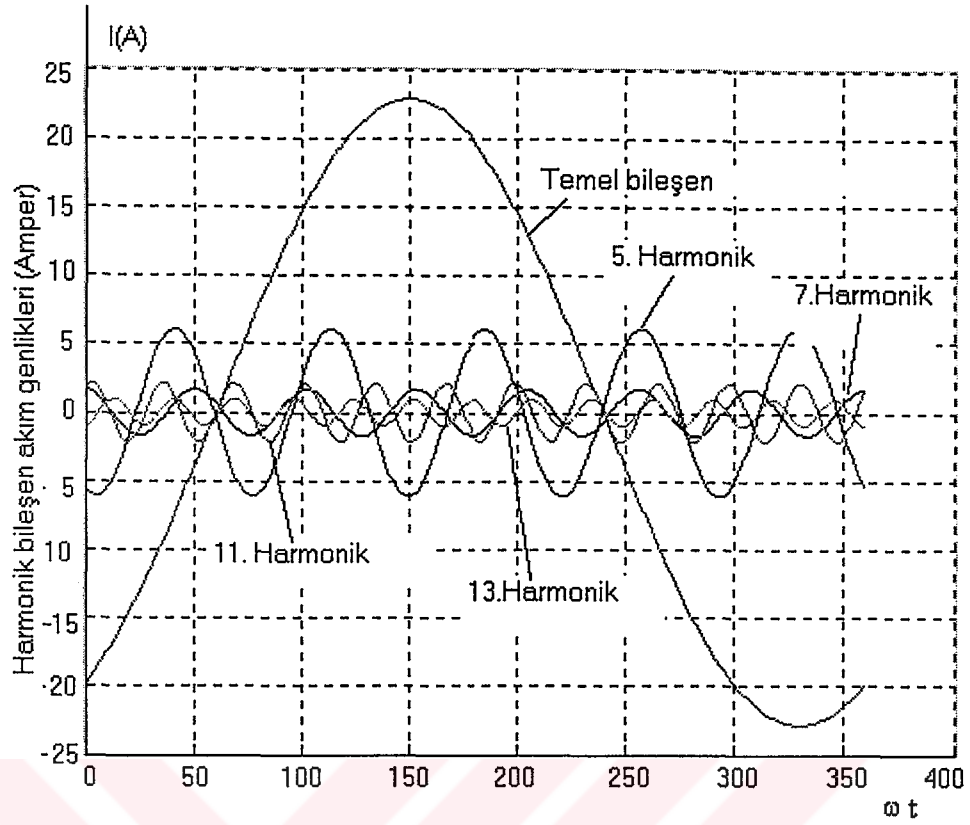
Harmonik bileşen Derecesi (n)	Harmonik bileşen akım genliği (Amper)	Harmonik bileşen akımına ait açı (Derece)
1	22.86	-60.02
5	6.098	-115.7
7	1.691	97.45
11	2.136	56.84
13	0.9717	-81.03
17	1.232	-128.6
19	0.6961	90.96
23	0.7516	45.23

Çizelge 5.2' ye göre kontrollü doğrultucu giriş akımı toplam harmonik distorsiyonu (4.54) denkleminde,

$$THD_1 = \frac{\sqrt{6.098^2 + 1.691^2 + 2.136^2 + 0.9717^2 + 1.232^2 + 0.6961^2 + 0.7516^2}}{22.86}$$

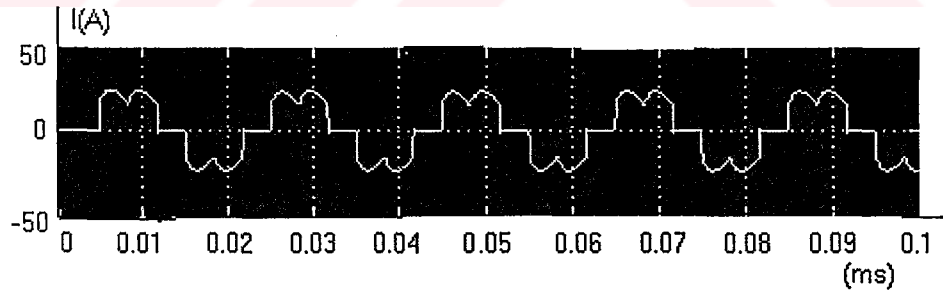
$$THD_1 = 0,3034 = \% 30.34$$

olarak hesaplanır. Çizelge 5.4 değerlere ait harmoniklerin grafiğini çizersek Şekil 5.6' da verilmiştir. MATLAB programı ile yapılan analizde elde edilen sonuç ile analitik olarak elde edilen sonuç arasında % 0.41' lik bir fark olmuştur. Bu fark analitik hesapta komutasyonun ihmal edilmesinden kaynaklanmaktadır.



Şekil 5.6 $\alpha = 60$ derece tetikleme açısı için, kontrollü doğrultucu giriş akım harmonikleri

$\alpha = 60$ derece tetikleme açısı için üç fazlı tam dalga kontrollü doğrultucu giriş akımı değişimi Şekil 5.7' de verilmiştir.



Şekil 5.7 $\alpha = 60$ dereç
e tetikleme acısı için doğrultucu giriş akımı

5.3 B tipi enjekte devresi kullanılarak yapılan harmonik giderme

Üç fazlı tam dalga kontrollü doğrultucunun girişine B tipi akım enjekte devresi ile harmonikli akım enjekte ederek harmonik distorsiyonunu azaltmaya ait devre Şekil 5.8' de verilmiştir.

değeri hesaplandığında,

$$I_1^2 = 0.629687$$

olarak bulunur. Üç fazlı kontrollü doğrultucu giriş akımı efektif değeri (4.39)' denkleminde

$$I_{\text{eff}}^2 = 0.68487$$

olur. Toplam harmonik distorsiyonunu (4.58) denkleminde,

$$\text{THD}_I = 0.2784 = \% 27.84$$

olarak hesaplanır.

5.3.1.2 MATLAB programı ile toplam harmonik distorsiyonunun belirlenmesi ($\alpha=30^\circ$)

Kontrollü doğrultucu çıkış geriliminin temel bileşen Fourier katsayıları elde edilen (4.15) denklemi ile ($\alpha = 30^\circ$, $V_m = 311.3 \text{ V}$)

$$A_1 = 380.86$$

bulunur. (4.19) denkleminde b_1 katsayısı,

$$B_1 = -192.98$$

olur. Temel bileşen gerilim değeri (4.20) denkleminde,

$$V_{A1} = 426.96 \text{ V}$$

bulunur. Akım enjekte devresinin elemanlarının değeri ise rezonans şartlarından belirlenir.

Üçüncü harmonik bileşenin rezonans frekansından hareketle LC değeri (5.4) denkleminde,

$$LC = \frac{1}{\omega_r^2} = \frac{1}{(2\pi \cdot 3.50)^2} = 1.1258 \cdot 10^{-6} (\text{s}^{-2}) \quad (5.15)$$

bulunur. Devre endüktansı için

$$2.L = 11.6 \text{ mH}$$

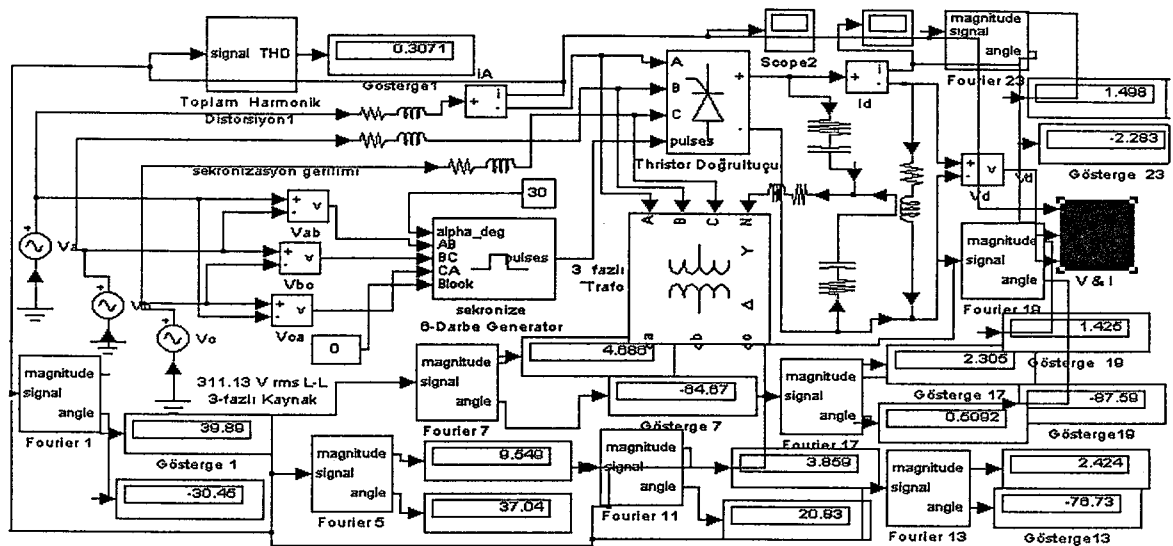
seçildiğinde, kapasite değeri için

$$C/2 = 97.05 \text{ }\mu\text{F}$$

elde edilir. (5.9) denkleminde R değeri,

$$R = \frac{426.96}{2 \cdot 0.5659 \cdot 58.4} = 6.126 (\Omega)$$

olarak belirlenir. Şekil 5.9'deki 2.aR ile (1-a).R değerleri $a=0.48$ alınarak bulunur. Bu parametreler ile B tipi enjekte devresine ait uygulama devresi Şekil 5.9' da verilmiştir.



Şekil 5. 9 Tetikleme açısı ($\alpha = 30$ derece) olması halinde sayısal uygulama devresi

MATLAB programının kullanılması ile elde edilen doğrultucu giriş akımına ait harmonik bileşenleri ve bu bileşenlerin açıları Çizelge 5.3'te verilmiştir.

Çizelge 5.3 Doğrultucu giriş harmonikli akım bileşenleri ve açı değerleri.

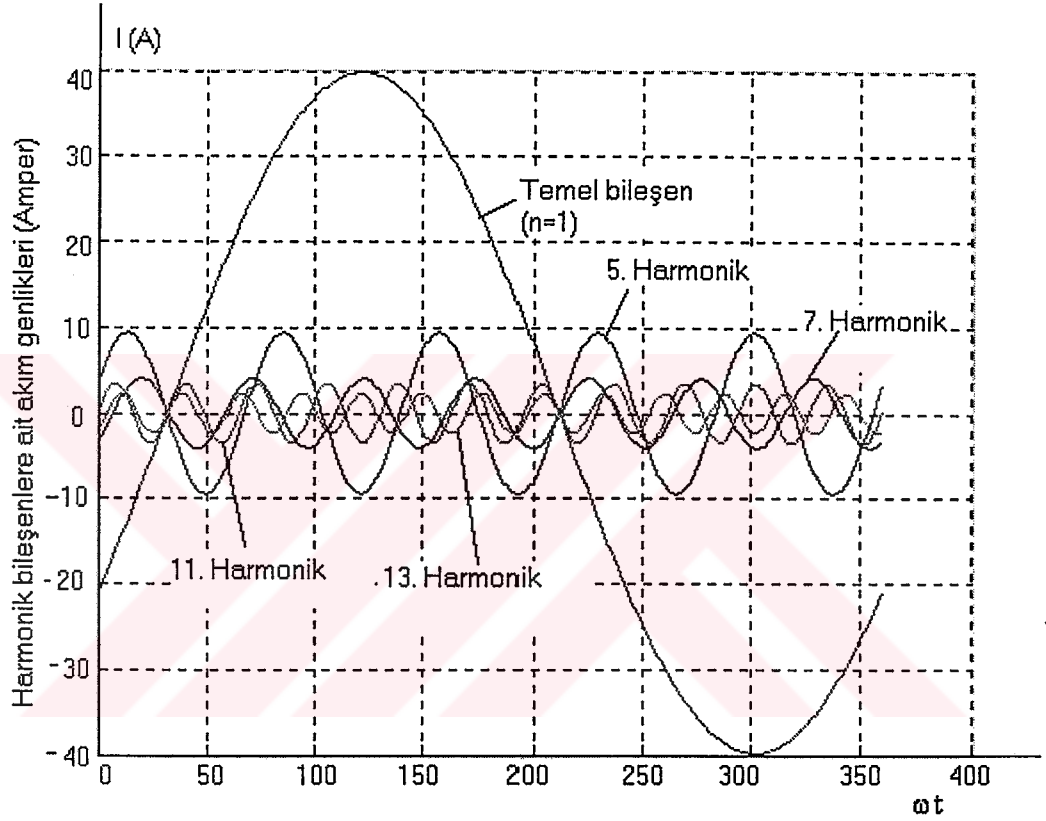
Harmonik bileşen Derecesi (n)	Harmonik bileşen akım genlikleri (Amper)	Harmonik bileşen akımlarına ait açılar (Derece).
1	39.89	-30.45
5	9.549	37.04
7	4.686	-64.67
11	3.859	20.83
13	2.424	-76.73
17	2.305	0.5092
19	1.425	-87.59
23	1.498	-2.283

Çizelge 5.3'e göre kontrollü doğrultucu giriş akımı toplam harmonik distorsiyonu (5.14) denkleminde,

$$\text{THD}_I = \frac{\sqrt{9.549^2 + 4.686^2 + 3.859^2 + 2.424^2 + 2.305^2 + 1.425^2 + 1.498^2}}{39.89}$$

$$THD_1 = 0.30 = \% 30$$

olarak hesaplanır. Çizelge 5.3' e değerlerine ait harmoniklerin grafiği Şekil 5.10'da verilmiştir. MATLAB programı ile yapılan analizde elde edilen sonuç ile analitik olarak elde edilen sonuç arasında % 2.16 'lık bir fark olmuştur. Bu fark analitik hesapta komutasyonun ihmal edilmesinden kaynaklanmaktadır.



Şekil 5.10 Kontrollü doğrultucu giriş akım harmonik bileşenleri

Görüldüğü gibi akım enjekte devresiyle yapılan harmonik enjektesi sonucu sistemin toplam harmonik distorsiyonu değeri düşürülmüş bulunmaktadır.

6. SONUÇLAR VE ÖNERİLER

Elektrik enerjisine olan talep miktarının sürekli artması, daha güvenilir ve daha kaliteli bir enerji kavramını ve bunu gerçekleştirmek için bazı kriterlerin gerekliliğini ortaya çıkarmıştır. Bu kriterlerin en önemlilerinden biri de sistemde dolaşan harmonik bileşenlerdir. Enerji tesislerindeki harmonikler konusunda bize bir ölçüt veren toplam harmonik distorsiyonun azaltılması bu çalışmada incelenmiştir. Tezde üç fazlı tam dalga kontrollü bir doğrultucunun girişine harmonikli akım enjekte ederek giriş akımı harmonik distorsiyonunun düşürülmesi sağlanmıştır. Çalışmanın genel sonucu olarak, şunlar söylenebilir.

Nonlinear yükler düşük güçlü olsalar bile enerji sistemlerinde sinüsoidal akım ve gerilim dalga şeklini bozarlar. Güç sistemlerine bağlanan çok sayıda nonlinear yük göz önüne alınırsa bunların sonucunda ek kayıp ve THD değerlerinin yüksek değerlere varması kaçınılmazdır. Nonlinear yüklerin etkinliğinin azaltılması, harmonik distorsiyonunun giderilmesi enerjinin kalitesi açısından çok önemlidir.

Nonlinear elemanlar, üretim, iletim ve dağıtım sistemlerinde ciddi bir harmonik kirliliğe neden olmakta ve tüketiciye verilen enerjinin kalitesini düşürmektedirler.

Enerji tesisinin güvenilir ve kararlı bir biçimde çalışmasını sağlamak için, tasarım ve işletme aşamasında nonlinear elemanların veya nonsinüsoidal kaynakların meydana getirdiği harmonik büyüklüklerinin hesaplanarak veya ölçülerek ortaya konması gerekir.

Nonlinear yüklerin sebep olduğu harmonik güç sistemini rezonansa getirmemesine dikkat edilmelidir. Rezonans şartları her harmonik bileşenler için ayrı, ayrı hesaplanmalıdır. Bir güç sistemine harmonik kaynaklardan enjekte edilen harmoniklerin olması durumunda, bunlar şebekeyi herhangi bir bileşeni yada bileşenler için rezonanslar oluşturacak şekilde etkiler. Yüksek dereceli harmonikler, tüm sistemi etkileyebilir. Bu etkiler güç sistemi ve diğer ekipmanların da performansını azaltır.

Elektrik güç sistemlerinde harmonik distorsiyon sıklıkla orijinal kaynaklardan büyük uzaklıkta bulunan mesafelerde tüm sistemi etkilemektedir. Harmonikler güç sistemlerindeki kirliliktir. Statik dönüştürücülerin kullanılmalarının artması ile bu kirlilik oranı gün be gün artmaktadır. Güç elektroniği elemanları ve çeşitli nonlinear elemanların her geçen gün artış göstermesi, enerji sisteminde dolaşan nonsinüsoidal büyüklüklerin artmasına neden olmaktadır. Bunun bir sonucu, akım ya da gerilim için harmonik distorsiyonu da

artmaktadır. Böylece çeşitli harmonik problemlerinin analizi için, harmonik seviyesinin hesaplanması ve daha büyük problemler oluşmadan harmoniklerin giderilmesi gerekir.

Üç fazlı tam dalga kontrollü doğrultucu giriş akımı harmonik distorsiyonunun azaltılmasına yönelik bu çalışma ile yapılan yenilikler, elde edilen sonuçlar ve öneriler şu şekilde sıralanabilir:

- Harmonik enjekte yöntemi ile harmonik giderme, üç fazlı tam dalga kontrollü doğrultucular için orijinal olarak gerçekleştirilmiştir. Yapılan sayısal uygulamadan elde edilen sonuçlarla distorsiyon değerindeki azalmalar ortaya konulmuştur.
- Yine bu çalışmada orijinal olarak üç fazlı tam dalga kontrollü doğrultucunun harmoniklerinin giderilmesine ait uygulamada mühendislik için çok kullanışlı olan MATLAB paket programı kullanılmıştır. MATLAB ile örnek modellemeler gerçekleştirilmiş ve çeşitli tetikleme açıları için doğrultucu giriş akımı harmonik distorsiyonu belirlenmiştir. Yine bu çalışmada MATLAB programı yardımı ile harmonik bileşenler ile bu bileşenlerin faz açıları belirlenmiştir. Çizelge [(5.1),(5.2),(5.3)]
- Harmonik distorsiyonun azaltılmasında daha önce kontrolsüz doğrultucu için uygulanan (Pajovic, P., Janda, Z., 1999) tarafından gerçekleştirilen A ve B tipi devreler bu çalışmada orijinal olarak üç fazlı tam dalga kontrollü doğrultucu için kullanılmıştır. Üç fazlı tam dalga kontrollü doğrultucu devresinin harmonik bileşenleri analitik yoldan belirlenmiştir.
- Çalışmamızda endüstride sıklıkla kullanılan DC makine kontrolü, kaynak marinasında, akü şarj cihazlarında kullanılan üç fazlı tam dalga kontrollü doğrultucu devresi alınmıştır. Üçüncü harmonikli akım doğrultucu girişine enjekte edildikten sonra kontrollü doğrultucu giriş akımı harmonik bileşenleri MATLAB programı yardımı ile ölçülmüş ve harmonik bileşenlere ait dalga şekilleri Şekil [(5.3),(5.6),(5.10)] 'da verilmiştir.
- Üç fazlı tam dalga kontrollü doğrultucunun harmonikli akım enjekte etmeden önceki distorsiyonu ile harmonikli akım enjekte edildikten sonraki giriş akımına ait distorsiyon değerleri hesaplanıp ölçülmüştür. Kontrollü doğrultucu giriş akımı harmonik distorsiyonunda düşmeler gözlenmiştir (Sayfa 58 ile 70 ve 74), (Sayfa (58 ile 74)
- Kontrollü doğrultucunun çeşitli tetikleme açıları sonucu giriş akımı harmonik distorsiyonu ölçülmüş ve buna ait osiloskop çıkışları $\alpha = 45$ derece ve $\alpha = 60$ derece tetikleme açıları için verilmiştir Şekil [(5.4),(5.7)].

- Üç fazlı tam dalga kontrollü doğrultucu girişine üçüncü harmonik akımı enjekte edildikten sonraki giriş akım ifadesi elde edilmiştir. Bu ifade nonlinear bir özellik taşımaktadır. Bu ifade analizlerde kullanılmaya hazır bir hale getirilmiştir (4.49) denklemi.
- Çeşitli tetikleme açıları için A ve B tipi enjekte devrelerinin kullanılması ile var olan harmonik distorsiyonun değeri hem analitik hem de MATLAB programı yardımı ile belirlenmiştir. Her iki değerde birbirine çok yakın olarak elde edilmiştir.
- Enerji tesisi esnasında harmoniklerden korunma için çeşitli tedbirler tüketiciler için ek bir maliyet olarak gözüktür. Bu açıdan harmonik kaynağı gibi davranan devre elemanlarının tasarım aşamasında bunların ürettiği harmonikleri elimine edecek şekilde bu elemanlara ek sistemlerin bağlanmasında faydalar vardır. Eğer konverter imal ediliyorsa bu elemanlara harmonikli akım enjekte eden ek devreler bağlanarak distorsiyonu azaltma yoluna gidilmelidir. Düşük harmonikleri gidermede 3, harmonik akımını enjekte etme, yüksek harmonikleri gidermede 9, harmoniği enjekte etme yöntemi daha uygundur. Harmonik enjeksiyon yöntemi ile toplam harmonik distorsiyonunu azaltma ekonomik bir yöntemdir. Yöntemin prensibi nonsinüsoidal dalga formunun üçüncü harmonik bileşeni ilave edilerek (diğer harmonik bileşenler de kullanılabilir) mümkün olabilen sinüsoidal dalga formuna yaklaştırmadır. Dalga formu sinüse yaklaştığı oranda distorsiyonu azalacak ve harmoniklerin getirdiği zararlardan korunmuş olunacaktır.
- Harmoniklerin enerji sistemindeki teknik ve ekonomik olumsuzluklarının giderilmesi bakımından bazı önlemlerin alınması gerekir. Ülkemizdeki sanayi kuruluşlarının harmonikler ve meydana getirdiği olumsuzlukları hakkında yeterli bilgileri yoktur. Bu nedenle harmonikler konusunda tüketicilerin bilgilendirilmeleri gerekmektedir. Nonlinear yüklerin enerji sisteminde harmonik akımları dolaştırmaları sonucu ek kayıp enerji söz konusu olmaktadır. Bunun sınırlandırılması için toplam harmonik distorsiyonuna bir ölçüt olabilir. Tüketicilerin bu sınır değeri aşmaları halinde ek bir ücret ödemeleri sağlanmalıdır. Son yıllarda nonlinear yüklerdeki artış dikkate alındığında, harmoniklerin yakın gelecekte enerji sistemimizi büyük oranda etkileyecekleri gözükmektedir. Sınır harmonik bozulma değerlerinin verileceği harmonik standartları ülkemiz için detaylı bir biçimde belirlenmeli ve uygulamasına mutlaka geçilmelidir. Tanımları verilen THD, TDD, HD_v , HD_i gibi sınır değerler tespit edilmelidir. Bu faktörlere ilişkin maksimum değerler standartlaştırılmalıdır.

- Büyük güçlü nonlinear elemanlar olan demir elik tesisleri, ark ocakları gibi tesislerde yılda birkaç kez harmonik ölçümü yapılmalıdır. Bu tür tesislerin yıllık harmonik yük eğrileri çıkarılmalı ve bu tesislerde harmoniklerin düşük seviyede tutulmaları sağlanmalıdır.
- Sanayi tesislerinde tesisin yapısına uygun bir harmonik giderme yöntemi mutlaka kullanılmalıdır. Harmoniklerin zararları konusunda tüketiciler bilinçlendirilerek, THD oranını iyileştirme oranında tüketicilere verilen enerjinin maliyeti düşürülebilir. Bunu tersi olarak enerji şebekesini kirletme oranında tüketicilere ek bir maliyet getirilebilir. Böylelikle daha kaliteli daha güvenli ve daha ekonomik bir enerjinin elde edilmesi mümkün olabilecektir.



KAYNAKLAR

- Arrillaga, J., Bradley, D.A. ve Bodger, P.S., (1985), Power System Harmonics, John Wiley&Sons ,Norwich, New York
- Arrillaga, J., Smith, B.C., Watson, N.R. ve Wood, A.R., (1997), Power System Harmonic Analysis, John Wiley & Sons, New Delhi
- Arrillaga, J., Yonghe, L., Crimp, C.S. ve Villablanca, M., (1993), "Harmonic Elimination by DC Ripple Reinjection in Generator- Convertor Units Operating at Variable Speeds" , IEE Proceedings –C, Vol. 140, No. 1, pp. 57-64
- Arrillaga, J. VE Efthymiadis, A.E.,(1968), 'Simulation of convertor performance under unbalanced conditions'. Proc. IEE, 115, no.12, pp.1809-17.
- Ametani, A.,(1976), "Harmonic Reduction in Thyristor Converters By Harmonic Current Injection", IEEE Trans. on Power Apparatus and Sytems, Vol.PAS-95, no. 2.pp. 441-449
- Ametani, A., (1972) "Generalized method of harmonic reduction in a.c.–d.c.convertors by harmonic current injection," Proc. Inst. Elect. Eng., vol 119, pp. 857–864.
- Andria, G., Salvatora,L., Savino, M. ve Trotta, A.,(1993),"Measurements of Power and Current Components in Unbalanced and Distorted Three – Phase Systems", ETEP Vol 3, No. 1 PP. 75-83
- Adak, S.,(2002), "Elektrik Tesislerindeki Kirlilik, Harmonikler", Kaynak Elektrik sayı 162 sayfa 116-121
- Bathurst, N., Smith,B.C ., Watson,N.R ve Arrillaga,J., (1999)."Harmonic Domain Modelling of High-Pulse Converters".IEE Proceedings Online no.19990294. pp. 335-349
- Boduroğlu, T., (1988), Elektrik Makinaları Dersleri, Beta Basım Yayım Dağıtım A.Ş, İstanbul.
- Bose, B.K., (1986), Power Electronics and AC Drivers , Prentice- Hall, Englewood Cliffs, New Jersey
- Biran, A., ve Breiner, M., (1999), Matlab 5 for Engineers, Addison Wesley Longman Limited. Great Britain
- Breuer, D.G., Chow, H.J., Addis, G., Lassater, H.R. ve Vithayathil, J.J., (1982), "HVDC –AC Harmonic Interaction", IEEE Trans. On Power and Systems, Vol. Pas-101, No. 3 pp. 698-709
- Brien, K., Teichmann, R. ve Bernet., (2001). "Active Rectifier for Medium Drive Systems".0-IEEE 7803-6618-8/10.00 C
- Bimbhra, P.S., (1997), Power Electronics, Khanna Publishers 2-B Nath, Market Sarak DELHI
- Bohmann, L.J. ve Lasseter, R.H., (1991), "Stability and Harmonics in Tthyristor Controlled Reactors" , IEEE Trans. Power Delivery, 2(5) : pp. 1175-1181.
- Bird, B.M., Marsh, J.F. ve McLellan, P.R., (1969), "Harmonic Reduction in Multiplex Convertors by Triple-frequency Current Injection", Proc. IEE, 116:1730-1734
- Baird, F.J. ve Arrilaga J., (1980), " Harmonic Reduction in dc – Ripple Reinjection" , IEE Proc.. Vol. 127, Pt. C, No. 5 pp. 294-304

CIGRE Working Group 36-05., (1981), "Harmonics, Characteristic Parameters, Methods of Study, Estimates of Existing Values in the Network", *Electra*, 77: pp. 35-54.

Czarnecki, L., (1996), "Comments on Active Power Flow and Energy Accounts in Electrical System with Nonsinusoidal Waveform and Asymmetry", *IEEE Trans. On Power Delivery*, Vol. 11, No.3. pp. 1244-1250

Caramia, P., Carpinelli, G., Rossi, F., ve Verde, P., (1994), "Probabilistic Iterative Harmonic Analysis of Power System", *IEE Proc- Gener. Transm.Distrib.*, Vol.141, No. 4. pp. 279-285

Chu, H.K. ve Pollock, C., (1997), "PWM- Controlled Series Compensation with Low Harmonic Distortion", *IEE Proc.- Gener. Transm. Distrib.*, Vol.144 No .6 pp. 555-563

Doggan, E. ve Morrison E.R., (1993), "Prediction of Harmonic Voltage Distortion When a Nonlinear Loads is Connected to an Already Distorted Supply", *IEE Proceedings-C*, Vol 140 No.3, pp. 161-166

Dommel, H.V., Yan, A. ve Wei, S., (1986), "Harmonics from Transformer Saturation", *IEEE Trans. on Power Systems*, Vol. PWRD-1, No.2: 209-215

Datta K.S.,(1985), *Power Electronics and Controls*, Reston Publishing Company, Inc.Virginia

Dwyer et. al, R., (1995) "Evaluation of Harmonic Impacts from Compact fluorescent Lights on Distribution Systems", *IEEE Trans. Power Systems*, vol. 10, pp. 1772-1779.

Dixon, J.W., Venegas, G. ve Moran, L.A.,(1998), "A series active filter based on a sinusoidal current-controlled voltage-source inverter," *IEEE Trans. Ind. Electron.*, vol. 44, no. 5, pp. 612-620s

Ellis, R.G., (1996) "Harmonic Analysis of Industrial Power Systems," *IEEE Trans.Industry Applications*, vol. 32. pp. 417-421

Erickson, W.R.,(1997), *Fundamentals of Power Electronics*, Kluwer Academic Publishers Boston / Dordrecht / London

Filipski, S.P., (1991), "Polyphase Apperent Power and Power Factor Under Distorted Waveform Condition", *IEEE Trans. On Power Delivery*, Vol.6 No. 3. pp. 1161-1165

Funabiki, S. ve Himei, T., (1985), "Desing Procedure of Firing Angles Harmonic Reduction in a Thyristor Controlled Reactor by Asymmetrical Firing Control" *IEE Proceedings*, Vol. 132 Pt. C, No . 5. pp. 257-261

Filipski, P.S. ve Labaj, P.W., (1992), "Evaluation of Reactive Power Meters in the Presence of High Harmonic Distortion", *IEEE Trans. on Power Delivery*, 7(4): pp. 1793-1799.

Glinkowski, M.T. ve Estergalyos. J., (1996), "Transient Modeling of Electromechanical Relays Part II : Plunger Type 50 Relays", *IEEE Trans. on Power Delivery*, 11(2): pp. 771-782.

Gonzalez, D.A. ve Mc Call, J.C., (1987), "Design of Filters to Reduce Harmonic Distribution in Industrial Power Systems", *IEEE Transactions on Power Industry Applications*, Vol. IA-23, No 3: pp. 504-511.

Gretsch, R. ve Dai, X., (1994), " Optimal Compensator Currents for the Reduction of the Harmobnic Distortion in Networks" Part1: Analitic Solution, *ETEP Vol.1 No.4* pp. 301-307

- Grady, W.M ve Heydt, G.T., (1985), "Prediction of Power System Harmonics due to Gaseous Discharge Lighting", IEEE Trans. on Power Apparatus and Systems, Vol. PAS-104: pp 554-561
- Herrick, P.R., (1980), "Mathematical Models for High Intensity Discharge Lamps", IEEE, Trans. on Industry Applications, Vol. IA-16: pp. 648-654
- Hammond, P.W., (1988), "A harmonic Filter Installation to Reduce Voltage Distortion from Static Power Converters", IEEE Transactions on Industry Applications, Vol. 24, No 1 pp.1291-1298
- Huang, Q. ve Lee, F.C.,(1996),"Harmonic Reduction in A Single-Switch, Three-Phase Boost Rectifier with High Order Harmonic Injected PWM," IEEE Power Electronics Specialists Conf. (PESC) Record, pp. 26 - 27
- Horton, W.F. ve Goldberg, S., (1985), "The Effect of Harmonics on the Operating Points of Electromechanical Relays", IEEE Trans. on Power Apparatus and Systems, PAS-104(5): pp. 1178-1188.
- IEEE Working Group on Power System Harmonics., (1983), "Power Systems Harmonics: An Overview", IEEE Trans. on Power Apparatus and Systems, PAS 102 (8): pp. 2445 –2460.
- Ivensky, G. ve Yaakov, B.S.,(2000), " A Novel Three- Phase Rectifier with Reduced THD", www.ee.bgu.ac.il, Ben – Gurion University of the Negev- Israel
- Jose, F., Seixas, M. ve Barbi, I., " A New 18- Pulse AC-DC Converter with Regulated DC Output and Hing Power Factor for Three – Phase Application", Federal University of Santa Catarina- Department of Electrical Engineering. Power Electronics Institute.
- Trans. On Power Electronics, Vol. 13, No. Jank, Y. ve Jovanovic, M.M.,(1998), "A Novel Robust Harmonic Injection Method for Single- Switch Three – Phase Discontinuous-Conduction – Mode Boost Rectifiers"
- Kassakian, G.J., Schlecht, F.M. ve Verghese, C.G., (1991), Principles of Power Electronics, Addison – Wesley Publishing Company. New York
- Kim, S., Enjeti, P., Packebush, P. ve Pitel, I., (1994) "A new approach to improve power factor and reduce harmonics in a three-phase diode rectifier type utility interface," IEEE Trans. Ind. Applicat., vol. 30, pp.1557–1564.
- Kocatepe, C., (1995), "Sinüsoidal Olmayan Yükleri İçeren Enerji sistemlerinde Harmonik Yük Akışı Analizi ve Simulasyonu", Doktora Tezi, Yıldız Teknik Üniversitesi, İstanbul.
- Kassick, ve., Perin, J.A. ve Sumner, M., (1998), " Passive Filtering of Harmonics in an Industrial Plant", Power Electronics Institute, Brazil.
- Khaled E. A, ve Adel L.M.,(1990) "Microprocesor Based Harmonic Elimination in Chopper Type AC Voltage Regulators", IEEE Trans. on Power Electronics, Vol 5, No. 2 pp. 191-200,
- Liang, J.T., Connell, M.R. ve Hoft, G.R., (1997), " Inverter Harmonic Reduction Using Walsh Function Harmonic Elimination Method" IEEE Trans. On Power Electronics, Vol.12 No.6 pp.1119-1125
- Lipo, A.T., " An Improved Weighted Total Harmonic Distortion Index for Induction Motor Drives", University of Wisconsin, 1415 Engineering Drive, Madiso WI, wisc.edu. USA

- Land, R., Manjrekar, D.M., Steimer, P. ve Lipo A.T., "Control Strategies for a Hybrid Seven-Level Inverter", Norges Teknisk- Naturvitenskapelige Universitet, Norway.
- Lee, S.C. ve Lin, C., (2000), "Enhanced FFT -Based Parametric Algorithm for Simultaneous Multiple Harmonics Analysis", IEE Proceedings, Vol. 132, Pt. B, No.2. pp. 209-214
- Lawrance, B.W. ve Mielczarski, W., (1992), "Harmonic current reduction in a three-phase diode bridge rectifier," IEEE Trans. Ind. Electron., vol. 39, pp. 571-576.
- Lander, C.W., (1981), Power Electronics, McGraw-Hill Book Company Limited, Michigan.
- Ludbrook, A., (1986), "Harmonic Filters for Notch Reduction", IEEE Transactions on Power Systems, pp. 1043-1047
- Mohamadein, A. L., Addoweesh, K. E., (1989) "Evaluation of The Performance of The Copper Type AC Voltage Controllers", Intern. Journ. Of Electronics, Vol. 67, pp.669-683,
- Marinos, A.Z., Pereira, R.L.J. ve Carneiro, S., (1994), "Fast Harmonic Power Flow Calculation Using Parallel Processing", IEE Proc. - Gener. Trasm. Distrib., Vol. 141 No.1
- Muttik, K.P. ve Ramsed, V.S., (2000), "Hybrid Filter Control System with Adaptive Filters for Elective Elimination of Harmonics and Interharmonics", IEE Proc. Power Appl., Vol. 147, No.3 pp. 311-317
- Mohan, N., Undeland, M.T. ve Robbins, P.W., (1989), Power Electronics: Converters, Applications and Design. , John Wiley, New York
- Mikolajuk, K. ve Staroszczyk, Z., (1994), "Measurement Aspects of the Voltage Distortion Compensation", ETEP Vol4 No .5 pp. 85-90
- Martin, H.L., Chow, K.W. ve Chi, K.T., (1998), "A Novel Method for Elimination of Line-Current Harmonics in Single - Stage PFC Switching Regulators" , IEEE Trans. on Power Electronics. VOL..13, No1 pp. 1398-1404
- Mitchell, B. ve Boys, J., (1999), "Current - Forced Neutral Injection in a three -phase Rectifier / Converter", IEE Proceeding online
- Mc Granahan, M.F., (1984), "Distribution Feeder Harmonic Study Methodology", IEEE Trans. Power App. Syst., vol. PAS-103, No 12: pp.3663-3671
- Michael Z. Lowenstein., (1993), "Improving power factor in the presence of harmonics using low-voltage tuned filters," IEEE transactions on Industry Applications, Vol. 29, No. 3. pp.1339-1345
- Makram, E.B., Wrigght, C.L. ve Girgis, A.A., (1992), "A Harmonic Analysis of the Induction Watthour Meter's Registration Error", IEEE Trans. on Power Delivery, 7(3): pp.1080-1088.
- Makram, E.B., Subramaniam, E.V., Girgis, A.A. ve Catoe, R., (1993), "Harmonic Filter Design Using Actual Recorded Data", IEEE Transactions on Industry Applications, Vol. 29, No 6: pp. 1176-1183.
- Naik, R., Rastogi, M., Mohan, N., Nilssen, R., ve Henze, C., (1993) "A magnetic device for current injection in a three-phase, sinusoidal-current utility interface," in IEEE/IAS Annu. Meeting, pp. 926-930
- Nilson, W.j., (1985), Electric Circuits, Addison-Wesley Publishing Company ,Canada

- Nagrath, J.I. ve Kothari, P.D., (1980), *Modern Power System Analysis*. McGraw-Hill Publishing Company Limited, New Delhi.
- Ortmeyer, T.H., Chakravarthi, K.R. ve Mahmoud, A.A., (1985), "The Effect of Power System Harmonics on Power System Equipment and Loads", *IEEE Trans. on Power Apparatus and Systems*, 9(104): pp. 2555-2563.
- Patel, H.K. ve Dubey, G.K., (1983). "Harmonic Reduction in the Static VAR Compensator by Sequence Control of Transformer Taps". *IEE Proceedings*, Vol.130, Pt. C, No 6. pp.427-433
- Prasad A.R., Ziogas P.D ve Manias, S., (1989), "An Active Power Factor Correction Technique For Three-Phase Diode Rectifiers", *IEEE, Rec* pp. 58-66
- Peng, F.Z., Akagi, H. ve Nabae, A., (1990) "A New Approach to Harmonic Compensation in Power Systems - A Combined System of Shunt Passive and Series Active Filters, " *IEEE Trans. on Industry Applications*, vol. 26, No. 6.
- Pejović, P., (2002a), "A Novel Low- Harmonic Three- Phase Rectifier", *IEEE Trans. On Circuit and System- Fundamental Theory and Applications*. Vol 49, No.7 pp. 241-247
- Pejović, P., (2000b), "Three- Phase High Power Factor Rectifier Based on the Third Harmonic Current Injection with Passive Resistance Emulation" *IEEE 0-708-5692-6/* pp.1342-1348
- Pejovic, P. ve Janda, Z., (1990a) "An Analysis of Three – Phase Low- Harmonic Rectifier Applying the Third – Harmonic Current Injection", *IEEE Trans. on Power Electronics*, Vol.14, No.3, pp. 397-405
- Pejovic, P. ve Janda Z., (1999b), "Low- Harmonic Three –Phase Rectifier Applying Current Injection", *IEE Proc. Elect. Power Appl.*, Vol. 146, No. 5 pp.241-247
- Peng, F.Z., Akagi, H. ve Nabae, A., (1990), "A New Approach to Harmonic Compensation in Power Systems A Combined System of Shunt Passive and Series Active Filters, " *IEEE Trans. on Industry Applications*, vol. 26, No. 6. pp.1477-1483
- Rashid, M.H., (1993), *Power Electronics*, Prentice Hall, New Jersey.
- Rice, D. E., (1986), "Adjustable Speed Drive and Power Rectifier Harmonics-Their Effect on Power Systems Components," *IEEE Transactions on Industry Applications*, Vol. IA-22, No.1, pp. 1521-1527
- Rashid, H.M., (2000), *SPICE For Power Electronics and Electric Power*. New Jersey.
- Rashid, H.M., (1983), "Design of LC Input Filter for Multiphase DC Choppers", *IEE Proc.*, Vol. 130 Pt. B, No. 1 pp.299-305
- Szabados, B. ve Lee, J., (1981), "Harmonic Impedance Measurements on Transformers", *IEEE Trans. Power Apparatus and Systems*, Vol. PAS-100: pp.5020-5026
- Shipp, D.D., (1979), "Harmonics Analysis and Suppression for Electrical Systems Supplying Static Power Converters and Other Nonlinear Loads", *IEEE Trans on industrial Application*, Vol. IA-15, No 5: pp.453-458.
- Sundberg, Y., (1980), "The Arc Furnace as a Load on the Network", *ASEA Journal*, Vol.49: pp.75-87
- Sakui, M. ve Fujita, H., (1992), "Calculation of Harmonic Currents in a three- Phase

Converter with Unbalanced Power Supply Conditions. IEE Proceedings –B, Vol. 139, No. 5
pp. 478-485

Sun, J., Frohleke, N. ve Grotstollen, H., (1996), "Harmonic Reduction Techniques for Single-Switch Three-Phase Boost Rectifiers," IEEE IAS Annual Meeting Record, pp. 1 225 - 1 232.

Trzynadlowski, M. A., (1998), Introduction to Modern Power Electronics, A Wiley-Interscience Public. Singapore

Topalis, F.V., (1993) "Efficiency of Energy Saving Lamps and Harmonic Distortion in Distribution Systems," IEEE Trans. Power Delivery, vol. 8, pp. 2038-2042

Tang, Y. ve Mahmoud, A.A., (1989), "Evaluation and Reduction of Harmonic Distortion in Power System", Electric Power System Research. Pp. 17, 41-48.

Tobola, A. ve Mikolajuk, K., (1998), "A New Method for Reduction of Current and Voltage Harmonic Distortion in Power System", ETEP Vol. 6 No. 1 pp. 122-129

Wagner, V.E. ve IEEE Task. Force., (1993), "Effects of Harmonics on Equipment", IEEE Trans. on Power Delivery, 2(8): pp. 672-680.

Xia, D. ve Heydt, G.T., (1982), "Harmonics Power Flow Studies Part II – Implementation And Practical Application, PAS 101 (6) : pp. 1266-121270.

Yacamini, R., ve Oliveira, J.C., (1980), "Harmonics in Multiple Converter Systems: A Generalised Approach". IEEE Proceedings, Vol. 127, Pt. B, No. 2. pp. 96-106

EKLER

- Ek 1 Üç fazlı tam dalga kontrollü doğrultucunun çıkış geriliminin fourier analizi (A_n katsayısının bulunması)
- Ek 2 Üç fazlı tam dalga kontrollü doğrultucunun çıkış geriliminin fourier analizi (B_n katsayısının bulunması).
- Ek 3 Tam dalga kontrollü doğrultucu akımına ait harmonik distorsiyonu (A_n katsayısının bulunması)
- Ek 4 Tam dalga kontrollü doğrultucu akımına ait harmonik distorsiyonu (B_n katsayısının bulunması)
- Ek 5 Üç fazlı tam dalga kontrollü doğrultucu giriş akımı ifadesi
- Ek 6 Üç fazlı tam dalga kontrollü doğrultucu giriş akımı toplam harmonik distorsiyonu
- Ek 7 Üç fazlı tam dalga kontrollü doğrultucu girişine üçüncü harmonik bileşeni enjekte edildikten sonra, doğrultucu giriş akım efektif değeri.
- Ek 8 Üç fazlı tam dalga kontrollü doğrultucu girişine enjekte edilen üçüncü harmonik akım katsayısı (k)'nın bulunması (A_n , Fourier katsayısının bulunması).
- Ek 9 Üç fazlı tam dalga kontrollü doğrultucu girişine enjekte edilen üçüncü harmonik akım katsayısı (k)'nın bulunması (B_n , fourier katsayısının bulunması).
- Ek 10 Üç fazlı tam dalga kontrollü doğrultucunun girişine enjekte edilen üçüncü harmonikli akım katsayısı (k)'nın bulunması.

Ek 1 Üç fazlı tam dalga kontrollü doğrultucunun çıkış geriliminin fourier analizi (A_n katsayısının bulunması)

Üç fazlı tam dalga kontrollü doğrultucunun Fourier katsayısı A_n ,

$$A_n = \frac{3}{\pi} \int_{\alpha+30}^{\alpha+90} V_{ab} \sin n\omega t d(\omega t) \quad (E.1.1)$$

Formülü ile hesaplanır. Fazlar arası gerilimin değeri dikkate alındığında,

$$V_{ab} = \sqrt{3}V_m \sin(\omega t + 30^\circ) \quad (E.1.2)$$

gerilim değeri dikkate alındığında,

$$A_n = \frac{3\sqrt{3}V_m}{\pi} \int_{\alpha+30}^{\alpha+90} \sin(\omega t + 30^\circ) \sin n\omega t d(\omega t) \quad (E.1.3)$$

ifadesini aşağıdaki formda yazabiliriz.

$$A_n = \frac{3\sqrt{3}V_m}{\pi} \int_{\alpha+60}^{\alpha+120} \sin \omega t \cdot \sin n\omega t d(\omega t) \quad (E.1.4)$$

$$\sin x \cdot \sin y = -\frac{1}{2} \cos(x + y) + \frac{1}{2} \cos(x - y) \quad (E.1.5)$$

özdeşliğini kullandığımızda,

$$A_n = \frac{3V_m}{\pi} \left[-\frac{1}{2} \int_{\alpha+60}^{\alpha+120} \cos(n+1)\omega t d(\omega t) + \frac{1}{2} \int_{\alpha+60}^{\alpha+120} \cos(n-1)\omega t d(\omega t) \right] \quad (E.1.6)$$

$$A_n = \frac{3\sqrt{3}V_m}{-2\pi} \left[\frac{1}{n+1} \sin(n+1)\omega t - \frac{1}{n-1} \sin(n-1)\omega t \right]_{\alpha+60}^{\alpha+120} \quad (E.1.7)$$

$$A_n = \frac{3\sqrt{3}V_m}{-2\pi} \left[\frac{1}{n+1} \sin(n+1)(\alpha + 120^\circ) - \frac{1}{n-1} \sin(n-1)(\alpha + 120^\circ) - \frac{1}{n+1} \sin(n+1)(\alpha + 60^\circ) + \frac{1}{n-1} \sin(n-1)(\alpha + 60^\circ) \right] \quad (E.1.8)$$

$$A_n = \frac{3\sqrt{3}V_m}{-2\pi} \left\{ \frac{1}{n+1} [\sin(n\alpha + n120^\circ + \alpha + 120^\circ) - \sin(n\alpha + n60^\circ + \alpha + 60^\circ)] \right. \\ \left. + \frac{1}{n-1} [\sin(n\alpha + n60^\circ - \alpha - 60^\circ) - \sin(n\alpha + n120^\circ - \alpha - 120^\circ)] \right\} \quad (E.1.9)$$

$$\sin A - \sin B = 2 \cos\left(\frac{A+B}{2}\right) \sin\left(\frac{A-B}{2}\right) \quad (E.1.10)$$

özdeşliğini kullanarak, A_n aşağıdaki gibi bulunur.

$$A_n = \frac{3\sqrt{3}V_m}{\pi} \left[\frac{\sin(n\alpha + n90^\circ + \alpha) \sin(n30^\circ + 30^\circ)}{n+1} + \frac{\sin(n\alpha + n90^\circ - \alpha) \sin(n30^\circ - 30^\circ)}{n-1} \right] \quad (E.1.11)$$

$n=1$ için belirsizlik olduğundan bu değer içinde hesaplama yapmak gerekir.

$$A_1 = \frac{3\sqrt{3}V_m}{\pi} \int_{\alpha+60}^{\alpha+120} \sin \omega t \sin \omega t d(\omega t) \quad (E.1.12)$$

$$\sin^2(\omega t) = \frac{1 - \cos(2\omega t)}{2} \quad (E.1.13)$$

trigonometrik özdeşliğini kullandığımızda,

$$A_1 = \frac{3\sqrt{3}V_m}{\pi 2} \left[\int_{\alpha+60}^{\alpha+120} d(\omega t) - \int_{\alpha+60}^{\alpha+120} \cos(2\omega t) d(\omega t) \right] \quad (E.1.14)$$

$$A_1 = \left(\frac{3\sqrt{3}V_m}{\pi} \right) \left[\frac{2\pi + 3\sqrt{3} \cos 2\alpha}{12} \right] \quad (E.1.15)$$

$$A_n = \frac{3\sqrt{3}V_m}{\pi} \left[\frac{2\pi + 3\sqrt{3} \cos(2\alpha)}{12} + \frac{\sqrt{3} \cos(n60) [\cos n\alpha \cos \alpha + n \sin n\alpha \sin \alpha] - \sin(n60) [\sin n\alpha \sin \alpha + n \cos n\alpha \cos \alpha]}{n^2 - 1} \right] \quad (E.1.16)$$

şeklinde bulunur.

Ek 2 Üç fazlı tam dalga kontrollü doğrultucunun çıkış geriliminin fourier analizi (B_nkatsayısının bulunması)

Fourier serisine ait B_n katsayısı şöyle bulunur,

$$B_n = \frac{3}{\pi} \int_{\alpha+30}^{\alpha+90} V_{ab} \cos n\omega t d(\omega t) \quad (E.2.1)$$

V_{ab} geriliminin değerini yazdığımızda,

$$B_n = \frac{3\sqrt{3}V_m}{\pi} \int_{\alpha+30}^{\alpha+90} \sin(\omega t + 30) \cos n\omega t d(\omega t) \quad (E.2.2)$$

trigonometrik özdeşlikler kullanıldığında,

$$B_n = \frac{3\sqrt{3}V_m}{\pi} \int_{\alpha+60}^{\alpha+120} \sin \omega t \cdot \cos n\omega t d(\omega t) \quad (E.2.3)$$

$$\sin x \cdot \cos y = \frac{1}{2} \sin(x + y) + \frac{1}{2} \sin(x - y) \quad (E.2.4)$$

özdeşliği kullanıldığında,

$$B_n = \frac{3\sqrt{3}V_m}{2\pi} \left[\int_{\alpha+60}^{\alpha+120} (\sin(n+1)\omega t) d(\omega t) + \int_{\alpha+60}^{\alpha+120} \sin(1-n)\omega t d(\omega t) \right] \quad (E.2.5)$$

$$B_n = \frac{3\sqrt{3}V_m}{2\pi} \left\{ \frac{1}{n+1} [\cos(n+1)\omega t]_{\alpha+60}^{\alpha+120} + \frac{1}{1-n} [\cos(1-n)\omega t]_{\alpha+60}^{\alpha+120} \right\} \quad (E.2.6)$$

$$B_n = \frac{3\sqrt{3}V_m}{2\pi} \left\{ \left[\frac{1}{n+1} [\cos(n\alpha + n60^\circ + \alpha + 60^\circ) - \cos(n\alpha + n120^\circ + \alpha + 120^\circ)] \right] - \left[\frac{1}{n-1} [\cos(\alpha + 60^\circ - n\alpha - n60^\circ) - \cos(\alpha + 120^\circ - n\alpha - n120^\circ)] \right] \right\} \quad (E.2.7)$$

$$\cos A - \cos B = -2 \sin\left(\frac{A+B}{2}\right) \sin\left(\frac{A-B}{2}\right) \quad (\text{E.2.8})$$

trigonometrik özdeşliği kullanılarak,

$$B_n = \frac{3\sqrt{3}V_m}{\pi} \left[\frac{\cos(n\alpha + n90 + \alpha) \sin(n30 + 30)}{n+1} + \frac{\cos(n\alpha + n90 - \alpha) \sin(n30 - 30)}{n-1} \right] \quad (\text{E.2.9})$$

$$B_n = \frac{3\sqrt{3}V_m}{\pi} \left[\frac{\sqrt{3} \cos n60 (\cos n\alpha \cdot \sin \alpha - n \cdot \sin n\alpha \cdot \cos \alpha) + \cos n\alpha \sin n90 (\sin n\alpha \cos \alpha - n \cos n\alpha \cdot \sin \alpha)}{n^2 - 1} \right] \quad (\text{E.2.10})$$

B=1 için belirsizlik olduğundan bu değer yeniden hesaplanmalıdır,

$$B_1 = \frac{3\sqrt{3}V_m}{\pi} \int_{\alpha+60}^{\alpha+120} \sin(\omega t) \cos(\omega t) d(\omega t) \quad (\text{E.2.11})$$

$$\sin(\omega t) \cos(\omega t) = \frac{\sin(2\omega t)}{2} \quad (\text{E.2.3})$$

trigonometrik özdeşliği kullanıldığında,

$$B_1 = \frac{3\sqrt{3}V_m}{4\pi} [\cos(2\omega t)]_{\alpha+120}^{\alpha+60} \quad (\text{E.2.14})$$

$$B_1 = \frac{3\sqrt{3}V_m}{\pi} \left(-\frac{\sqrt{3}}{4} \sin 2\alpha \right) \quad (\text{E.2.15})$$

$$B_n = \frac{3\sqrt{3}V_m}{\pi} \left[\frac{-\sqrt{3}}{4} \sin 2\alpha + \frac{\sqrt{3} \cos n60 [(\cos n\alpha \sin \alpha - n \sin n\alpha \cos \alpha) + (\cos n\alpha \sin n90)] + [\sin n\alpha \cdot \cos \alpha - n \cdot \cos n\alpha \cdot \sin \alpha]}{n^2 - 1} \right] \quad (E.2.17)$$

olarak elde edilir.

Ek 3 Tam dalga kontrollü doğrultucu akımına ait harmonik distorsiyonu (A_n , katsayısının bulunması)

Fourier serisine ait A_n katsayısı,

$$A_n = \frac{1}{\pi} \int i_1(t) \cos n\omega t d(\omega t) \quad (E.3.1)$$

$$A_n = \frac{1}{\pi} \left[\int_{\pi/6+\alpha}^{5\pi/6+\alpha} I_a \cos n\omega t d(\omega t) - \int_{7\pi/6+\alpha}^{11\pi/6+\alpha} I_a \cos n\omega t d(\omega t) \right] \quad (E.3.2)$$

$$A_n = \frac{I_a}{\pi n} \left\{ [\sin \omega t]_{\pi/6+\alpha}^{5\pi/6+\alpha} - [\sin \omega t]_{7\pi/6+\alpha}^{11\pi/6+\alpha} \right\} \quad (E.3.3)$$

$$A_n = \frac{4I_a}{\pi n} \sin \frac{n\pi}{3} \sin n\alpha \quad (n = 1, 3, 5..) \quad (E.3.4)$$

olarak elde edilir.

Ek 4 Tam dalga kontrollü doğrultucu akımına ait harmonik distorsiyonu (B_n , katsayısının bulunması)

Fourier serisinde B_n katsayısı,

$$B_n = \frac{1}{\pi} \int_0^T i_1(t) \sin n\omega t d(\omega t) \quad (E.4.1)$$

formülü kullanıldığında,

$$B_n = \frac{1}{\pi} \left[\int_{\pi/6+\alpha}^{5\pi/6+\alpha} I_a \sin n\omega t d(\omega t) - \int_{7\pi/6+\alpha}^{5\pi/6+\alpha} I_a \sin n\omega t d(\omega t) \right] \quad (E.4.2)$$

$$B_n = \frac{I_a}{n\pi} \left\{ [-\cos n\omega t]_{\pi/6+\alpha}^{5\pi/6+\alpha} - [-\cos n\omega t]_{7\pi/6+\alpha}^{5\pi/6+\alpha} \right\} \quad (E.4.3)$$

$$B_n = \frac{4.I_a}{n\pi} \sin \frac{n\pi}{3} \cos n\alpha \quad (n = 1,3,5,7,..) \quad (E.4.4)$$

olarak elde edilir.

Ek 5 Üç fazlı tam dalga kontrollü doğrultucu giriş akımı ifadesi

Giriş akımı ifadesi,

$$i_1(t) = \sum \sqrt{2}I_n \sin(n\omega t + \phi_n) \quad (\text{E.5.1})$$

Burada,

$$\phi_n = \tan^{-1}\left(\frac{A_n}{B_n}\right) = -n\alpha \quad (\text{E.5.2})$$

Giriş akımının efektif değeri,

$$I_n = \frac{\sqrt{A_n^2 + B_n^2}}{\sqrt{2}} = \frac{2\sqrt{2}I_a}{n\pi} \sin \frac{n\pi}{3} \quad (\text{E.5.3})$$

$$i_1(t) = \frac{4I_a}{n\pi} \sin \frac{n\pi}{3} \sin(n\omega t - n\alpha) \quad (\text{E.5.4})$$

biçiminde ifade edilir. Efektif olarak,

$$I_n = \frac{2\sqrt{2}I_a}{n\pi} \sin \frac{n\pi}{3} \quad (\text{E.5.5})$$

şeklinde yazılır.

Ek 6 Üç fazlı tam dalga kontrollü doğrultucu giriş akımı toplam harmonik distorsiyonu

Üç fazlı tam dalga kontrollü doğrultucu giriş akımı,

$$I_n = \frac{2\sqrt{2}I_a}{n\pi} \sin \frac{n\pi}{3} \quad (\text{E.6.1})$$

ifadesini birinci harmonik için yazarsak (n=1),

$$I_1 = \frac{2\sqrt{2}I_a}{\pi} \sin 60^\circ \quad (\text{E.6.2})$$

$$I_1^2 = 0.6079 I_a^2 \quad (\text{E.6.3})$$

Üç fazlı tam dalga kontrollü doğrultucu giriş akımı efektif değeri,

$$I_{\text{eff}} = \sqrt{\frac{1}{T} \int_0^T i^2(\omega t) d(\omega t)} \quad (\text{E.6.4})$$

$$I_{\text{eff}}^2 = \frac{2.1}{2\pi} \int_{\alpha+30}^{\alpha+150} I_a^2 d(\omega t) \quad (\text{E.6.5})$$

$$= \frac{I_a^2}{\pi} (150 + \alpha - 30 - \alpha) \quad (\text{E.6.6})$$

$$I_{\text{eff}}^2 = \frac{2}{3} I_a^2 = 0.66666 I_a^2 \quad (\text{E.6.7})$$

şeklinde bulunur. Toplam harmonik distorsiyonu ,

$$\text{THD}_I = \sqrt{\frac{I_{\text{eff}}^2}{I_1^2} - 1} \quad (\text{E.6.8})$$

formülünden bulunur. Toplam harmonik distorsiyon değeri,

$$= \sqrt{\frac{0.66666 I_a^2}{0.6079 I_a^2} - 1} \quad (\text{E.6.9})$$

şeklinde bulunur.

Ek 7 Üç fazlı tam dalga kontrollü doğrultucu girişine üçüncü harmonik bileşeni enjekte edildikten sonra, doğrultucu giriş akım efektif değeri.

Üç fazlı tam dalga kontrollü doğrultucu girişine üçüncü harmonik akımı enjekte edildikten sonra, doğrultucu giriş akımının efektif değeri,

$$I_{\text{eff}}^2 = \frac{2}{2\pi} \left(\int_{\alpha+30}^{\alpha+150} \left(\left(1 - \frac{k}{3} \sin(3\omega t - 3\alpha - \varphi) \right)^2 \right) d(\omega t) \right) \quad (\text{E.7.1})$$

formülü ile bulunur.

$$I_{\text{eff}}^2 = \frac{2}{\pi} \left(\int_{\alpha+30}^{\alpha+150} d(\omega t) - \frac{2k}{3} \int_{\alpha+30}^{\alpha+150} \sin(3\omega t - 3\alpha - \varphi) d(\omega t) + \frac{k^2}{9} \int_{\alpha+30}^{\alpha+150} \sin^2(3\omega t - 3\alpha - \varphi) d(\omega t) \right) \quad (\text{E.7.2})$$

Bu entegrali üç adet entegral toplamı şeklinde yazarsak,

$$I_1 = \int_{\alpha+30}^{\alpha+150} d(\omega t) = \frac{2\pi}{3} \quad (\text{E.7.3})$$

bulunur.

$$I_2 = -\frac{2k}{3} \int_{\alpha+30}^{\alpha+150} \sin(3\omega t - 3\alpha - \varphi) d(\omega t) \quad (\text{E.7.4})$$

$$= -\frac{2k}{3} \left[\frac{1}{3} \cos(3\omega t - 3\alpha - \varphi) \right]_{\alpha+150}^{\alpha+30} \quad (\text{E.7.5})$$

$$= -\frac{2k}{9} [\cos(3\alpha + 90 - 3\alpha - \varphi) - \cos(3\alpha + 90 - 3\alpha - \varphi)] \quad (\text{E.7.6})$$

$$I_2 = 0$$

bulunur.

$$I_3 = \int_{\alpha+30}^{\alpha+150} \frac{1}{9} k^2 \sin^2(3\omega t - 3\alpha - \varphi) d(\omega t) \quad (\text{E.7.7})$$

$$\sin^2 \omega t = \frac{1 - \cos 2\omega t}{2} \quad (\text{E.7.8})$$

özdeşliği kullanılarak,

$$I_3 = \frac{k^2}{18} \left[\int_{\alpha+30}^{\alpha+150} d(\omega t) - \int_{\alpha+30}^{\alpha+150} \cos(6\omega t - 6\alpha - 2\varphi) d(\omega t) \right] \quad (\text{E.7.9})$$

$$I_3 = \frac{k^2}{18} \left\{ [\omega t]_{\alpha+30}^{\alpha+150} - \frac{1}{6} [\sin(6\omega t - 6\alpha - 2\varphi)]_{\alpha+30}^{\alpha+150} \right\} \quad (\text{E.7.10})$$

$$I_3 = \frac{k^2}{18} \left[\frac{2\pi}{3} - \frac{1}{6} \sin(6\alpha + 180 - 6\alpha - 2\varphi) + \frac{1}{6} \sin(6\alpha + 180 - 6\alpha - 2\varphi) \right] \quad (\text{E.7.11})$$

$$I_3 = \frac{k^2 \pi}{27} \quad (\text{E.7.12})$$

bulunur. Toplam entegral ifadesi,

$$I_{\text{eff}}^2 = \frac{1}{\pi} (I_1 + I_2 + I_3) \quad (\text{E.7.13})$$

değerleri yerine konursa,

$$I_{\text{eff}}^2 = \frac{1}{\pi} \left(\frac{2\pi}{3} + 0 + \frac{k^2 \pi}{27} \right)$$

$$I_{\text{eff}} = \sqrt{\frac{18 + k^2}{27}} \quad (\text{E.7.14})$$

şeklinde bulunur.

Ek 8 Üç fazlı tam dalga kontrollü doğrultucu girişine enjekte edilen üçüncü harmonik akım katsayısı (k)'nın bulunması (A_n,fourier katsayısının bulunması).

Fourier serisine ait A_n katsayısı,

$$A_n = \frac{1}{\pi} \int_0^{2\pi} I(t) \sin n\omega t d(\omega t) \quad (E.8.1)$$

$$A_n = \frac{2}{\pi} \int_{\alpha+30}^{\alpha+150} \left(1 - \frac{1}{3}k \sin(3\omega t - 3\alpha - \varphi)\right) \sin n\omega t d(\omega t) \quad (E.8.2)$$

$$A_n = \frac{2}{\pi} \left(\int_{\alpha+30}^{\alpha+150} \sin n\omega t d(\omega t) - \frac{1}{3}k \int_{\alpha+30}^{\alpha+150} \sin(3\omega t - 3\alpha - \varphi) \sin n\omega t d(\omega t) \right) \quad (E.8.3)$$

Bu integrali, iki integral toplamı şeklinde ifade edersek,

$$I_1 = \int_{\alpha+30}^{\alpha+150} \sin n\omega t d(\omega t) \quad (E.8.4)$$

$$I_2 = \frac{-k}{3} \int_{\alpha+30}^{\alpha+150} \sin(3\omega t - 3\alpha - \varphi) \sin n\omega t d(\omega t) \quad (E.8.5)$$

$$A_n = \frac{2}{\pi} (I_1 + I_2) \quad (E.8.6)$$

I₁ integralini şöyle buluruz,

$$I_1 = \int_{\alpha+30}^{\alpha+150} \sin n\omega t d(\omega t) \quad (E.8.7)$$

$$I_1 = \left[-\frac{1}{n} \cos n\omega t \right]_{\alpha+30}^{\alpha+150} \quad (E.8.8)$$

$$I_1 = \frac{1}{n} [\cos(n\alpha + n30) - \cos(n\alpha + n150)] \quad (E.8.9)$$

$$\cos A - \cos B = -2 \sin\left(\frac{A+B}{2}\right) \sin\left(\frac{A-B}{2}\right) \quad (\text{E.8.10})$$

Trigonometrik özdeşliği kullanıldığında ,

$$I_1 = \frac{2}{n} \sin(n\alpha + n90) \sin(n60) \quad (\text{E.8.11})$$

$$\sin x \cdot \sin y = \frac{1}{2} \cos(x-y) - \frac{1}{2} \cos(x+y) \quad (\text{E.8.12})$$

trigonometrik özdeşliği kullanılarak,

$$I_1 = \frac{2}{n} \cos n\alpha \sin n60 \quad (\text{E.8.13})$$

sonucu elde edilir.

$$I_2 = \frac{-k}{3} \int_{\alpha+30}^{\alpha+150} \sin(3\omega t - 3\alpha - \varphi) \sin n\omega t d(\omega t) \quad (\text{E.8.14})$$

Entegralini çözmek için parçalı entegral formülünü kullanırsak,

$$I = \int \sin(3\omega t - 3\alpha - \varphi) \sin n\omega t d(\omega t) \quad (\text{E.8.15})$$

Bu integrale parçalı entegral formülünü uygularsak,

$$\int u \cdot dv = u \cdot v - \int v \cdot du \quad (\text{E.8.16})$$

$$\sin n\omega t = u \quad (\text{E.8.17})$$

$$n \cos n\omega t d(\omega t) = du \quad (\text{E.8.18})$$

$$\int \sin(3\omega t - 3\alpha - \varphi) d\omega t = \int dv \quad (\text{E.8.19})$$

$$-\frac{1}{3} \cos(3\omega t - 3\alpha - \varphi) = v \quad (\text{E.8.20})$$

$$= -\frac{1}{3} \sin n\omega t \cos(3\omega t - 3\alpha - \varphi) + \frac{n}{3} \int \cos n\omega t \cos(3\omega t - 3\alpha - \varphi) d(\omega t) \quad (\text{E.8.21})$$

$$I = \int \cos n\omega t \cos(3\omega t - 3\alpha - \varphi) d(\omega t) \quad (\text{E.8.22})$$

Entegraline, tekrardan parçalı entegral formülünü uygularsak,

$$\cos n\omega t = u \quad (\text{E.8.23})$$

$$-n \sin n\omega t d(\omega t) = du \quad (\text{E.8.24})$$

$$\int \cos(3\omega t - 3\alpha - \varphi) d(\omega t) = \int dv \quad (\text{E.8.25})$$

$$\frac{1}{3} \sin(3\omega t - 3\alpha - \varphi) = v \quad (\text{E.8.26})$$

$$\int u.dv = uv - \int vdu \quad (\text{E.8.27})$$

Formülünü tekrardan kullanırsak,

$$= \frac{1}{3} \cos n\omega t \sin(3\omega t - 3\alpha - \varphi) + \frac{n}{3} \int \sin n\omega t . \sin(3\omega t - 3\alpha - \varphi) d(\omega t) \quad (\text{E.8.28})$$

$$I = \frac{3}{n^2 - 9} \sin n\omega t . \cos(3\omega t - 3\alpha - \varphi) - \frac{n}{n^2 - 9} \cos n\omega t . \sin(3\omega t - 3\alpha - \varphi) \quad (\text{E.8.29})$$

(8.14) denkleminde yerine koyarsak,

$$I_2 = \left[\frac{k}{9 - n^2} \cos n\omega t . \cos(3\omega t - 3\alpha - \varphi) + \frac{kn}{27 - 3n^2} \sin n\omega t . \sin(3\omega t - 3\alpha - \varphi) \right]_{\alpha+30}^{\alpha+150} \quad (\text{E.8.30})$$

$$I_2 = \frac{2.k.\sin n\alpha.\cos n30.\sin \varphi - \frac{2.kn}{3} \cos n\alpha.\cos n30.\cos \varphi}{n^2 - 9} \quad (\text{E.8.31})$$

elde ederiz.

$$A_n = \frac{2}{\pi} (I_1 + I_2) \quad (\text{E.8.32})$$

$$A_n = \left(\frac{1}{n} \cos n\alpha + \frac{k.\sin n\alpha \sin \varphi - \frac{kn}{3} \cos n\alpha \cos \varphi}{n^2 - 9} \right) \frac{4}{\pi} \sin n60 \quad (\text{E.8.33})$$

ifadesi elde edilir.

Ek 9 Üç fazlı tam dalga kontrollü doğrultucu girişine enjekte edilen üçüncü harmonik akım katsayısı (k)'nın bulunması (B_n ,fourier katsayısının bulunması).

Fourier katsayısı B_n şöyle hesaplanır,

$$B_n = \frac{2}{\pi} \int_{\alpha+30}^{\alpha+150} \left(1 - \frac{k}{3} \sin(3\omega t - 3\alpha - \varphi)\right) \cos n\omega t d(\omega t) \quad (E.9.1)$$

Entegralini iki integral toplamı şeklin de ifade edersek,

$$I_1 = \int_{\alpha+30}^{\alpha+150} \cos n\omega t d(\omega t) \quad (E.9.2)$$

$$I_2 = \frac{-k}{3} \int_{\alpha+30}^{\alpha+150} \sin(3\omega t - 3\alpha - \varphi) \cos n\omega t d(\omega t) \quad (E.9.3)$$

$$B_n = \frac{2}{\pi} (I_1 + I_2) \quad (E.9.4)$$

I_1 entegralini şöyle buluruz,

$$I_1 = \int_{\alpha+30}^{\alpha+150} \cos n\omega t d(\omega t) \quad (E.9.5)$$

$$I_1 = \left[\frac{1}{n} \sin n\omega t \right]_{\alpha+30}^{\alpha+150} \quad (E.9.6)$$

$$I_1 = \frac{1}{n} [\sin(n\alpha + n150) - \sin(n\alpha + n30)] \quad (E.9.7)$$

$$\sin A - \sin B = 2 \cos\left(\frac{A+B}{2}\right) \sin\left(\frac{A-B}{2}\right) \quad (E.9.8)$$

trigonometrik özdeşliği kullanıldığında,

$$I_1 = \frac{2}{n} \cos(n\alpha + n90) \sin(n60) \quad (E.9.9)$$

$$I_1 = \frac{-2}{n} \sin n\alpha \cdot \sin n90 \cdot \sin n60 \quad (E.9.10)$$

$$\sin x \cdot \sin y = \frac{1}{2} \cos(x - y) - \frac{1}{2} \cos(x + y) \quad (\text{E.9.11})$$

özdeşliğini kullanırsak,

$$I_1 = \frac{-2}{n} \sin n\alpha \cdot \sin n60 \quad (\text{E.9.12})$$

şeklinde bulunur.

$$I_2 = -\frac{k}{3} \int_{\alpha+30}^{\alpha+150} \sin(3\omega t - 3\alpha - \varphi) \cos n\omega t d(\omega t) \quad (\text{E.9.13})$$

$$I = \int \sin(3\omega t - 3\alpha - \varphi) \cos n\omega t d(\omega t) \quad (\text{E.9.14})$$

$$\int u \cdot dv = uv - \int v du \quad (\text{E.9.15})$$

parçalı integral formülünü uygularsak,

$$\cos n\omega t = u \quad (\text{E.9.16})$$

$$-n \sin n\omega t \cdot d(\omega t) = du \quad (\text{E.9.17})$$

$$\int \sin(3\omega t - 3\alpha - \varphi) d(\omega t) = \int dv \quad (\text{E.9.18})$$

$$= -\frac{1}{3} \cos n\omega t \cos(3\omega t - 3\alpha - \varphi) - \frac{n}{3} \int \sin n\omega t \cdot \cos(3\omega t - 3\alpha - \varphi) d(\omega t) \quad (\text{E.9.19})$$

Tekrardan parçalı integral formülünü uygularsak,

$$\sin n\omega t = u \quad (\text{E.9.20})$$

$$n \cos n\omega t d(\omega t) = du \quad (\text{E.9.21})$$

$$\int \cos(3\omega t - 3\alpha - \varphi) d(\omega t) = dv \quad (\text{E.9.22})$$

$$\frac{1}{3} \sin(3\omega t - 3\alpha - \varphi) = v \quad (\text{E.9.23})$$

$$I = -\frac{1}{3} \cos n\omega t \cos(3\omega t - 3\alpha - \varphi) - \frac{n}{9} \sin n\omega t \sin(3\omega t - 3\alpha - \varphi) + \frac{n^2}{9} I \quad (\text{E.9.24})$$

$$I = -\frac{3}{9-n^2} \cos n\omega t \cdot \cos(3\omega t - 3\alpha - \varphi) - \frac{n}{9-n^2} \sin n\omega t \cdot \sin(3\omega t - 3\alpha - \varphi) \quad (\text{E.9.25})$$

sınır değerleri kullanırsak,

$$I_2 = \left[\frac{k}{9-n^2} \cos n\omega t \cos(3\omega t - 3\alpha - \varphi) + \frac{kn}{27-3n^2} \sin n\omega t \sin(3\omega t - 3\alpha - \varphi) \right]_{\alpha+30}^{\alpha+150} \quad (\text{E.9.26})$$

$$I_2 = \left\{ \begin{aligned} & \frac{k}{9-n^2} \cos(n\alpha + n150) \cos(3\alpha + 90 - 3\alpha - \varphi) + \frac{kn}{27-3n^2} \sin(n\alpha + n150) \\ & * \sin(3\alpha + 90 - 3\alpha - \varphi) - \frac{k}{9-n^2} \cos(n\alpha + n30) \cos(3\alpha + 90 - 3\alpha - \varphi) \\ & - \frac{kn}{27-3n^2} \sin(n\alpha + n30) \sin(3\alpha + 90 - 3\alpha - \varphi) \end{aligned} \right\} \quad (\text{E.9.27})$$

$$I_2 = \frac{2k \cdot \cos n\alpha \cdot \cos n30 \cdot \sin \varphi + \frac{2 \cdot k \cdot n}{3} \sin n\alpha \cos n30 \sin \varphi}{n^2 - 9} \quad (\text{E.9.28})$$

$$B_n = \frac{2}{\pi} (I_1 + I_2) \quad (\text{E.9.29})$$

$$B_n = \left[\frac{-1}{n} \sin n\alpha + \frac{k \cdot \cos n\alpha \cdot \sin \varphi + \frac{kn}{3} \sin n\alpha \cdot \sin \varphi}{n^2 - 9} \right] \frac{4}{\pi} \sin n60 \quad (\text{E.9.30})$$

olarak bulunur.

Ek 10 Üç fazlı tam dalga kontrollü doğrultucu girişine enjekte edilen üçüncü harmonik akım katsayısı (k)'nın bulunması

A_n ve B_n katsayılarını kullanarak akımın genel ifadesi,

$$I = \sum_{n=1}^{\infty} \left\{ \left[\begin{array}{c} (k \sin n\alpha \cdot \sin \varphi - \\ \frac{1}{n} \cos n\alpha + \frac{\frac{kn}{3} \cos n\alpha \cdot \cos \varphi}{n^2 - 9}) \sin n\omega t + \\ \left[\begin{array}{c} (k \cos n\alpha \sin \varphi \\ -\frac{1}{n} \sin n\alpha + \frac{\frac{kn}{3} \sin n\alpha \sin \varphi}{n^2 - 9}) \cos n\omega t \end{array} \right] \end{array} \right] \right\} \frac{4}{\pi} \sin n60 \quad (E.10.1)$$

Giriş akımının n'ci harmonik için efektif değeri,

$$I_n = \sqrt{\frac{(A_n^2 + B_n^2)}{2}} \quad (E.10.2)$$

$$I_n = \sqrt{\frac{8}{\pi^2} \sin^2 n60 \left\{ \left[\begin{array}{c} (k \cdot \sin n\alpha \sin \varphi - \\ \frac{1}{n} \cos n\alpha + \frac{\frac{kn}{3} \cos n\alpha \cos \varphi}{n^2 - 9}) \end{array} \right]^2 + \left[\begin{array}{c} -\frac{1}{n} \sin n\alpha + \\ (k \cos n\alpha \sin \varphi + \\ \frac{\frac{kn}{3} \sin n\alpha \cdot \sin \varphi}{n^2 - 9}) \end{array} \right]^2 \right\}} \quad (E.10.3)$$

$$I_n = \frac{2\sqrt{2}}{\pi} \sin n60 \sqrt{\left[\frac{(k \sin n\alpha \sin \varphi - \frac{kn}{3} \cos n\alpha \cos \varphi)}{\frac{1}{n} \cos n\alpha + \frac{kn}{n^2 - 9}} \right]^2 + \left[\frac{(k \cos n\alpha \sin n\varphi + \frac{kn}{3} \sin n\alpha \sin \varphi)}{\frac{-1}{n} \sin n\alpha + \frac{kn}{n^2 - 9}} \right]^2} \quad (E.10.4)$$

$\alpha = 0, \varphi = 0$ değerleri için,

$$I_n = \frac{2\sqrt{2}}{n\pi} \sin n60^\circ \left(1 - \frac{kn^2}{3n^2 - 27} \right) \quad (E.10.5)$$

elde edilir.

$n=1$ değeri için,

$$I_1 = \frac{2\sqrt{2}}{\pi} \sin 60^\circ \cdot \left(1 - \frac{k}{-24} \right) \quad (E.10.6)$$

$$I_1 = 0.77969 + 0.03249.k \quad (E.10.7)$$

Temel harmonik akımının karesini alırsak,

$$I_1^2 = 10^{-5} (105.6.k^2 + 5066.4.k + 60791.6) \quad (E.10.8)$$

Üçüncü harmonik akımını enjekte ettikten sonar giriş akımının efektif değeri,

$$I_{\text{eff}} = \sqrt{\frac{k^2 + 18}{27}} = \sqrt{10^{-5} (3703.7.k^2 + 66666)} \quad (E.10.9)$$

Giriş akımının toplam harmonik distorsiyonu,

$$\text{THD}_I = \sqrt{\frac{I_{\text{eff}}^2}{I_1^2} - 1} \quad (E.10.10)$$

$$\text{THD}_I = \sqrt{\frac{3703.7.k^2 + 66666}{105.6.k^2 + 5066.4.k + 60791.6} - 1} \quad (E.10.11)$$

Toplam harmonik distorsiyonunu minimum yapan değer birinci türevi sıfır yapan değerdir.

$$\frac{d\text{THD}}{dk} = 0 \quad (E.10.12)$$

Gerekli sadeleştirmeler yapıldıktan sonra,

$$18764425.68k^2 + 436227838.6k - 337756622.4 = 0 \quad (\text{E.10.13})$$

$$k_1 = 0.75007$$

$$k_2 = -23.998$$

şeklinde bulunur. Giriş akımı toplam harmonik distorsiyonunu minimum kılan değer pozitif değerdir.



ÖZGEÇMİŞ

Doğum tarihi 27.05.1960

Doğum yeri Mardin

Lise 1975-1978 Mardin Lisesi

Lisans 1981-1985 İstanbul Teknik Üniversitesi, Elektrik-Elektronik Fakültesi, Elektrik Mühendisliği Bölümü

Yüksek Lisans 1986-1988 Yıldız Üniversitesi, Fen Bilimleri Enstitüsü, Elektrik Müh. Anabilim Dalı

Doktora 1991-1997 Yıldız Teknik Üniversitesi, Fen Bilimleri Enstitüsü, Elektrik Müh. Anabilim Dalı, (Elektrik Tesisleri Programı)

Çalıştığı kurumlar

1986-1988 Keban İşletme Grup Müdürlüğü
 1990-1992 Bayındırlık ve İskan Müdürlüğü(Mardin).
 1992-Devam ediyor Meslek Yüksekokulu (Mardin)