

**T.C.
YILDIZ TEKNİK ÜNİVERSİTESİ
FEN BİLİMLERİ ENSTİTÜSÜ**

**DÜŞÜK HARMONİKLİ VE YÜKSEK GÜÇ FAKTÖRLÜ YÜKSEK GÜÇLÜ
DOĞRULTUCUNUN GERÇEKLEŞTİRİLMESİ**

ÖZGÜN GİRĞİN

**YÜKSEK LİSANS TEZİ
ELEKTRİK MÜHENDİSLİĞİ ANABİLİM DALI
ELEKTRİK MAKİNALARI VE GÜÇ ELEKTRONİĞİ PROGRAMI**

**DANIŞMAN
DOÇ. DR. AHMET FARUK BAKAN**

İSTANBUL, 2013

T.C.
YILDIZ TEKNİK ÜNİVERSİTESİ
FEN BİLİMLERİ ENSTİTÜSÜ

DÜŞÜK HARMONİKLİ VE YÜKSEK GÜÇ FAKTÖRLÜ YÜKSEK GÜÇLÜ
DOĞRULTUCUNUN GERÇEKLEŞTİRİLMESİ

Özgün GİRGIN tarafından hazırlanan tez çalışması 03.06.2013 tarihinde aşağıdaki jüri tarafından Yıldız Teknik Üniversitesi Fen Bilimleri Enstitüsü Elektrik Mühendisliği Anabilim Dalı'nda **YÜKSEK LİSANS TEZİ** olarak kabul edilmiştir.

Tez Danışmanı

Doç. Dr. Ahmet Faruk BAKAN
Yıldız Teknik Üniversitesi

Jüri Üyeleri

Doç. Dr. Ahmet Faruk BAKAN
Yıldız Teknik Üniversitesi

Doç. Dr. Erkan MEŞE
Yıldız Teknik Üniversitesi

Yrd. Doç. Dr. Tuncay UZUN
Yıldız Teknik Üniversitesi

Bu alışma, Bilim, Sanayi ve Teknoloji Bakanlığı tarafından SanTez Projesi kapsamında 00791.STZ.2011-1 numaralı projesi ile desteklenmiştir.

ÖNSÖZ

Endüstriyel uygulamalarda yaygın olarak kullanılan altı darbeli doğrultucular, özellikle yüksek güçlerde, şebekede bozucu etkiler oluşturmaktadır. Doğrultucular, IEEE-519 ve IEC-61000-3-2 gibi uluslararası standartlarda şebekeden çekilen akımın toplam harmonik distorsiyonu için tanımlanan limitleri sağlamamaktadır. Bu tezin konusu olan düşük harmonik ve yüksek güç faktörü, en çok kullanılan enerji türü olan elektrik enerjisinin kullanımındaki kalite ve verimliliği ifade eder.

Bu çalışma kapsamında, harmonik ve güç faktörü kavramları incelenmiş, AC/DC dönüştürücülerde harmonik ve güç faktörü üzerine incelemeler ve simülasyonlar yapılmıştır. Simülasyon çalışmaları ile standartları sağlayan yüksek güçlü özgül bir doğrultucu devresi geliştirilmiş ve uygulama devresi gerçekleştirilmiştir. Simülasyon ve uygulama çalışmaları ile yapılmış olan teorik analiz desteklenmiştir.

Yıllarını Güç Elektroniği'ne adanmış ve gerek dersleri gerekse müthiş sinerjisiyle; çalışma alanı olarak Güç Elektroniği'ni seçmemde büyük bir payı olan değerli hocam Sayın Prof. Dr. Hacı BODUR'a, tez çalışmalarım sırasında büyük bir sabır ve özveriyle bana her konuda yardımcı olup, yol gösteren danışmanım Sayın Doç.Dr. A. Faruk BAKAN'a, daima beni destekleyen ve bilgilerini cömertçe paylaşan, yardımlarını esirgemeyen Elektrik Yüksek Mühendisi Sayın Halit ZENGİNCE'ye ve ESİSPOWER firmasına teşekkürü bir borç bilirim.

Ve tabii ki; bugüne kadar maddi ve manevi olarak beni sürekli destekleyen sevgili aileme, hayatımdaki çok farklı, çok özel insanlara ve dostluklarıyla hayatıma renk katan tüm dostlarıma teşekkürlerimi sunarım.

Haziran, 2013

Özgün GİRGIN

İÇİNDEKİLER

SAYFA

SİMGE LİSTESİ	vii
KISALTMA LİSTESİ	viii
ŞEKİL LİSTESİ.....	ix
ÇİZELGE LİSTESİ	xiv
ÖZET	xv
ABSTRACT	xvii
BÖLÜM 1.....	1
GİRİŞ.....	1
1.1 Literatür Özeti	1
1.2 Tezin Amacı	2
1.3 Hipotez	2
BÖLÜM 2.....	3
HARMONİK KAVRAMI	3
2.1 Harmonikler	3
2.1.1 Toplam Harmonik Distorsiyonu (THD).....	4
2.1.2 Toplam Talep Distorsiyonu (TTD)	4
2.1.3 Şekil (Form) Faktörü	4
2.1.4 Tepe (Crest) Faktörü	5
2.1.5 Transformatör K -- Faktörü.....	5
2.2 Güç Faktörü.....	5
BÖLÜM 3.....	8
HARMONİKLERİN ETKİLERİ VE HARMONİK STANDARTLARI	8

3.1	Giriş	8
3.2	Harmonikleri Sınıflandırma Çalışmaları	9
3.3	Harmoniklerin Olumsuz Etkileri	10
3.4	Harmonik Standartları	12
BÖLÜM 4.....		13
ENDÜSTRİYEL DOĞRULTUCULAR		13
4.1	Giriş	13
4.2	6 – Darbeli Doğrultucular.....	14
4.2.1	$L_s=0$ ve $I_d(t)=I_d$ Olan Devrenin İncelenmesi	14
4.2.2	Hat Endüktansı L_s 'in Etkisi.....	20
4.3	12-Darbeli doğrultucular.....	22
4.3.1	$L_s=0$ ve $I_d(t)=I_d$ Olan Devrenin İncelenmesi	23
4.3.2	Hat Endüktası L_s 'in Etkisi.....	25
BÖLÜM 5.....		26
SİMÜLASYON ÇALIŞMALARI		26
5.1	Simülasyon Çalışmaları	26
5.2	Şebeke Dengesizliği Durumunun Doğrultucu Harmoniklerine Etkisi.....	105
BÖLÜM 6.....		113
UYGULAMA DEVRESİ.....		113
6.1	Düşük Harmonikli Ve Yüksek Güç Faktörlü Yüksek Güçlü Doğrultucu Devresinin Uygulaması	113
BÖLÜM 7.....		144
SONUÇ VE ÖNERİLER		144
KAYNAKLAR.....		147
EK-A.....		149
ÖZGEÇMİŞ.....		154

SİMGE LİSTESİ

GF	Güç Faktörü
f	Frekans
T	Periyot
ω	Açısal Hız
h	Harmonik derecesi
Kf	Şekil Faktörü
K	Transformatör K faktörü
P	Gerçek Güç
Q	Reaktif Güç
S	Görünür Güç
φ	Faz açısı
$V_{1,ef}$	Temel Bileşen Efektif Gerilimi
$V_{n,ef}$	n. Harmonik Bileşen Efektif Gerilimi
$I_{1,ef}$	Temel Bileşen Efektif Akımı
$I_{n,ef}$	n. Harmonik Bileşen Efektif Akımı
L_S	Hat Endüktansı
I_d	Ortalama Doğrultucu Çıkış Akımı
V_{LL}	Fazlararası Gerilim Efektif Değeri
α	Tetikleme açısı
V_{do}	$\alpha = 0$ iken Doğrultucu Çıkış Gerilimi
$V_{d\alpha}$	$\alpha \neq 0$ iken Doğrultucu Çıkış Gerilimi

KISALTMA LİSTESİ

THD	Toplam Harmonik Bozulma Değeri
THDi	Toplam Akım Harmonik Bozulma Değeri
TTD	Toplam Talep Distorsiyonu
IEEE	Institute of Electrical and Electronics Engineers
IEC	Uluslararası Elektroteknik Komisyonu (International Electrotechnic Commission)
DC	Doğru Akım
AC	Alternatif Akım
SCR	Tristör
IGBT	İzole Kapılı Bipolar Transistör
W	Gerçek Güç
VA	Zahiri Güç
VAR	Reaktif Güç
L_s	Hat Endüktansı
$i_d(t)$	Anlık Çıkış akımı
V_{LL}	Fazlararası gerilimin etkin değeri

ŞEKİL LİSTESİ

	Sayfa
Şekil 2. 1	Güç Faktörü 6
Şekil 3. 1	Doğrultucu blok diyagramı 8
Şekil 3. 2	Doğrultucu giriş gerilim ve akım dalga şekli..... 9
Şekil 3. 3	Temel bileşen ve harmonikler..... 11
Şekil 3. 4	Üçüncü harmoniğin temel bileşen üzerine etkisi..... 11
Şekil 4. 1	Endüstriyel Doğrultucu Blok Şeması 13
Şekil 4. 2	6-darbeli bir doğrultucu devresi 14
Şekil 4. 3	Altı darbeli doğrultucuya ilişkin (a) giriş faz gerilimleri, (b) çıkış gerilim Dalga şekilleri [1] 15
Şekil 4. 4	Şekil4.2'deki devre için a fazına ait gerilim ve akım dalga şekilleri [1] 16
Şekil 4. 5	α tetikleme açısı için sırasıyla a fazına ait gerilim ve akım dalga şekilleri [1] 16
Şekil 4. 6	Şekil 4.5'deki durum için çıkış gerilimi dalga şekli [1] 16
Şekil 4. 7	$V_{d\alpha} = \frac{A_\alpha}{\pi/3}$ olarak doğru gerilimin α 'nın fonksiyonu olarak değişimi [1].... 18
Şekil 4. 8	6-darbeli doğrultucuya ait hat akımı [1] 18
Şekil 4. 9	Altı darbeli doğrultucuya ait hat akımı harmonik bileşenlerin etkin değerleri[1] 19
Şekil 4. 10	Hat endüktansı L_s var olduğu durumda komütasyon [1]..... 20
Şekil 4. 11	Komütasyon anında giriş gerilim ve akımı dalga biçimleri($L_s \neq 0$) [1]..... 21
Şekil 4. 12	12-darbeli doğrultucu sistemi [1] 23
Şekil 4. 13	12-darbeli doğrultucuya ait dalga şekilleri [1] 24
Şekil 5. 1	Üç fazlı Tamdalga Kontrolsüz Doğrultucu 28
Şekil 5. 2	Üç fazlı Tamdalga Kontrolsüz Doğrultucu 28
Şekil 5. 3	Üç fazlı Tamdalga Kontrolsüz Doğrultucu 29
Şekil 5. 4	Hat Endüktanslı Üç fazlı Tamdalga Kontrolsüz Doğrultucu..... 29
Şekil 5. 5	Hat Endüktanslı Üç fazlı Tamdalga Kontrolsüz Doğrultucunun 30
Şekil 5. 6	Çıkış Filtreli ve Hat Endüktanslı Üç fazlı Tamdalga Kontrolsüz Doğrultucu. 30
Şekil 5. 7	Çıkış Filtreli ve Hat Endüktanslı Üç fazlı Tamdalga Kontrolsüz Doğrultucunun Çıkış Gerilim Ve akım Dalga Şekilleri 31
Şekil 5. 8	Üç fazlı Tamdalga Kontrollü Doğrultucu 32
Şekil 5. 9	Üç fazlı Tamdalga Kontrollü Doğrultucunun 32
Şekil 5. 10	12 darbeli doğrultucularda kullanılabilir trafo bağlantı şekilleri 34

Şekil 5. 11	Altı Darbeli Doğrultucu Çıkış Gerilimi Dalga Şekli	35
Şekil 5. 12	On iki Darbeli Doğrultucu Çıkış Gerilimi Dalga Şekli	35
Şekil 5. 13	12-Darbeli kontrolsüz Paralel Tip Doğrultucu.....	36
Şekil 5. 14	12-Darbeli kontrolsüz Paralel Tip Doğrultucu.....	36
Şekil 5. 15	Darbeli kontrolsüz Paralel Tip Doğrultucu	37
Şekil 5. 16	Hat endüktanslı 12-Darbeli kontrolsüz Paralel Tip Doğrultucu	38
Şekil 5. 17	Hat endüktanslı 12-Darbeli kontrolsüz Paralel Tip Doğrultucunun	38
Şekil 5. 18	Darbeli kontrolsüz Seri Tip Doğrultucu	39
Şekil 5. 19	12-Darbeli kontrolsüz Seri Tip Doğrultucunun	40
Şekil 5. 20	Hat endüktanslı 12-Darbeli kontrolsüz Seri Tip Doğrultucu	41
Şekil 5. 21	12-Darbeli kontrolsüz Seri Tip Doğrultucunun	41
Şekil 5. 22	Paralel Tip 12-Darbeli Kontrollü Doğrultucu.....	42
Şekil 5. 23	Paralel Tip 12-Darbeli Kontrollü Doğrultucunun	43
Şekil 5. 24	Hat endüktanslı Paralel Tip 12-Darbeli Kontrollü Doğrultucu	44
Şekil 5. 25	Hat endüktanslı Paralel Tip 12-Darbeli Kontrollü Doğrultucunun	44
Şekil 5. 26	Seri Tip 12-Darbeli Kontrollü Doğrultucunun $\alpha = 30^\circ$ için Giriş Akım ve Gerilim Dalga Şekilleri	46
Şekil 5. 27	Seri Tip 12-Darbeli Kontrollü Doğrultucunun $\alpha = 30^\circ$ için Giriş Gerilim ve Akım Dalga Şekilleri.....	46
Şekil 5. 28	Hat endüktanslı Seri Tip 12-Darbeli Kontrollü Doğrultucu	47
Şekil 5. 29	Hat endüktanslı Seri Tip 12-Darbeli Kontrollü Doğrultucunun $\alpha = 30^\circ$ için Giriş Akım ve Gerilim Dalga Şekilleri.....	48
Şekil 5. 30	Giriş Filtreli ve Hat endüktanslı Paralel Tip 12-Darbeli Kontrollü Doğrultucu	50
Şekil 5. 31	Giriş Filtreli ve Hat endüktanslı Paralel Tip 12-Darbeli Kontrollü Doğrultucunun $\alpha = 20^\circ$ için Giriş Gerilim ve Akım Dalga Şekilleri	50
Şekil 5. 32	Doğrultucu sisteminin devre şeması.....	53
Şekil 5. 33	Filtre grubu.....	55
Şekil 5. 34	Şebeke gerilimi 380 V, $I_{ref} = 400A$ ve $V_{akü}=110V$ olması durumunda Şebekeden çekilen akım, reaktif güç ve Kademe değişimleri.....	65
Şekil 5. 35	$I_{ref}=400A$, $V_o=110V$ ve $V_s = 380*1.1 V$ için değişimler	66
Şekil 5. 36	$I_{ref}=400A$, $V_o=122V$ ve $V_s = 380*1.1 V$ için değişimler	67
Şekil 5. 37	$I_{ref}=300A$, $V_o=110V$ ve $V_s = 380*1.1 V$ için değişimler	68
Şekil 5. 38	$I_{ref}=300A$, $V_o=122V$ ve $V_s = 380*1.1 V$ için değişimler	69
Şekil 5. 39	$I_{ref}=200A$, $V_o=110V$ ve $V_s = 380*1.1 V$ için değişimler	70
Şekil 5. 40	$I_{ref}=200A$, $V_o=122V$, ve $V_s=418$ için değişimler	71
Şekil 5. 41	$I_{ref}=100A$, $V_o=110V$ ve $V_s = 380*1.1 V$ için değişimler	72
Şekil 5. 42	$I_{ref}=100A$, $V_o=122V$ ve $V_s = 380*1.1 V$ için değişimler	73
Şekil 5. 43	$I_{ref}=50A$, $V_o=110V$ ve $V_s = 380*1.1 V$ için değişimler	74
Şekil 5. 44	$I_{ref}=50A$, $V_o=122V$ ve $V_s = 380*1.1 V$ için değişimler	75
Şekil 5. 45	$I_{ref}=10A$, $V_o=110V$ ve $V_s = 380*1.1 V$ için değişimler	76
Şekil 5. 46	$I_{ref}=400A$, $V_o=110V$ ve $V_s = 380 V$ için değişimler	77
Şekil 5. 47	$I_{ref}=400A$, $V_o=122V$ ve $V_s = 380 V$ için değişimler	78
Şekil 5. 48	$I_{ref}=300A$, $V_o=110V$ ve $V_s = 380 V$ için değişimler	79
Şekil 5. 49	$I_{ref}=300A$, $V_o=122V$ ve $V_s = 380 V$ için değişimler	80
Şekil 5. 50	$I_{ref}=200A$, $V_o=110V$ ve $V_s = 380 V$ için değişimler	81

Şekil 5. 51	$I_{ref}=200A$, $V_o=122V$ ve $V_s = 380 V$ için değişimler	82
Şekil 5. 52	$I_{ref}=100A$, $V_o=110V$ ve $V_s = 380 V$ için değişimler	83
Şekil 5. 53	$I_{ref}=100A$, $V_o=122V$ ve $V_s = 380 V$ için değişimler	84
Şekil 5. 54	$I_{ref}=50A$, $V_o=110V$ ve $V_s = 380 V$ için değişimler	85
Şekil 5. 56	$I_{ref}=50A$, $V_o=122V$ ve $V_s = 380 V$ için değişimler	86
Şekil 5. 57	$I_{ref}=10A$, $V_o=110V$ ve $V_s = 380 V$ için değişimler	87
Şekil 5. 58	$I_{ref}=400A$, $V_o=110V$ ve $V_s = 380*0.9 V$ için değişimler	88
Şekil 5. 59	$I_{ref}=400A$, $V_o=122V$ ve $V_s = 380*0.9 V$ için değişimler	89
Şekil 5. 60	$I_{ref}=300A$, $V_o=110V$ ve $V_s = 380*0.9 V$ için değişimler	90
Şekil 5. 61	$I_{ref}=300A$, $V_o=122V$ ve $V_s = 380*0.9 V$ için değişimler	91
Şekil 5. 62	$I_{ref}=200A$, $V_o=110V$ ve $V_s = 380*0.9 V$ için değişimler	92
Şekil 5. 63	$I_{ref}=200A$, $V_o=122V$ ve $V_s = 380*0.9 V$ için değişimler	93
Şekil 5. 64	$I_{ref}=100A$, $V_o=110V$ ve $V_s = 380*0.9 V$ için değişimler	94
Şekil 5. 65	$I_{ref}=100A$, $V_o=122V$ ve $V_s = 380*0.9 V$ için değişimler	95
Şekil 5. 66	$I_{ref}=50A$, $V_o=110V$ ve $V_s = 380*0.9 V$ için değişimler	96
Şekil 5. 67	$I_{ref}=50A$, $V_o=122V$ ve $V_s = 380*0.9 V$ için değişimler	97
Şekil 5. 68	$I_{ref}=10A$, $V_o=110V$ ve $V_s = 380*0.9 V$ için değişimler	98
Şekil 5. 69	$V_s=380 + \%10 V$, $V_{akü}=110V$ için çıkış akımına bağlı değişimler	99
Şekil 5. 70	$V_s=380 + \%10 V$, $V_{akü}=122V$ için çıkış akımına bağlı değişimler	100
Şekil 5. 71	$V_s=380V$, $V_{akü}=110V$ için çıkış akımına bağlı değişimler.....	101
Şekil 5. 72	$V_s=380V$, $V_{akü}=122V$ için çıkış akımına bağlı değişimler.....	102
Şekil 5. 73	$V_s=380 - \%10 V$, $V_{akü}=110V$ için çıkış akımına bağlı değişimler.....	103
Şekil 5. 74	$V_s=380 - \%10 V$, $V_{akü}=122V$ için çıkış akımına bağlı değişimler.....	104
Şekil 5. 75	Şebeke Dengesizliği Durumunda 6-Darbeleri Doğrultucu THD Değerleri...	107
Şekil 5. 76	Kontrol Açısı 20° iken 6-Darbeleri Doğrultucu Giriş Akım Harmonikleri.....	107
Şekil 5. 77	Kontrol Açısı 30° iken 6-Darbeleri Doğrultucu Giriş Akım Harmonikleri.....	108
Şekil 5. 78	Kontrol Açısı 40° iken 6-Darbeleri Doğrultucu Giriş Akım Harmonikleri.....	108
Şekil 5. 79	Şebeke Dengesizliği Durumunda 12-Darbeleri Doğrultucu THD Değerleri.	109
Şekil 5. 80	Kontrol Açısı 20° iken 12-Darbeleri Doğrultucu Giriş Akım Harmonikleri...	110
Şekil 5. 81	Kontrol Açısı 30° iken 12-Darbeleri Doğrultucu Giriş Akım Harmonikleri...	111
Şekil 5. 82	Kontrol Açısı 40° iken 12-Darbeleri Doğrultucu Giriş Akım Harmonikleri...	111
Şekil 6. 1	12-Darbeleri Doğrultucu Uygulama Devresi.....	113
Şekil 6. 2	Tristör Tetikleme Kartı.....	114
Şekil 6. 3	Besleme Kartı	115
Şekil 6. 4	Anakart ve Üzerine Entegre Bilgi Ekranı.....	115
Şekil 6. 5	Doğrultucu Giriş-Çıkış Bağlantı Noktaları	116
Şekil 6. 6	Üçgen-Üçgen Bağlı Transformatör	117
Şekil 6. 7	Üçgen-Yıldız Bağlı Transformatör.....	117
Şekil 6. 8	Besleme Hattına Seri Bağlı Endüktanslar	118
Şekil 6. 9	Besleme Hattına Paralel Bağlı Filtre Gruplarından Biri	118
Şekil 6. 10	Tristör Modülü Grubu Bara ve Soğutma Sistemi	119
Şekil 6. 11	D-D bağlı transformatörlü doğrultucunun $\%25$ yüklenmesi durumunda (a) Giriş Gerilim im ve Akım Dalga Şekilleri, (b) Giriş Akımı Harmonik Distorsiyonu ve Giriş Güç Faktörü	120

Şekil 6. 12	D-D bağlı transformatörlü doğrultucunun %50 yüklenmesi durumunda (a) Giriş Gerilim ve Akım Dalga Şekilleri, (b) Giriş Akımı Harmonik Distorsiyonu ve Giriş Güç Faktörü	121
Şekil 6. 13	D-D bağlı transformatörlü doğrultucunun %75 yüklenmesi durumunda (a) Giriş Gerilim ve Akım Dalga Şekilleri, (b) Giriş Akımı Harmonik Distorsiyonu ve Giriş Güç Faktörü	122
Şekil 6. 14	D-D bağlı transformatörlü doğrultucunun %100 yüklenmesi durumunda (a) Giriş Gerilim ve Akım Dalga Şekilleri, (b) Giriş Akımı Harmonik Distorsiyonu ve Giriş Güç Faktörü	123
Şekil 6. 15	D-Y bağlı transformatörlü doğrultucunun %25 yüklenmesi durumunda (a) Giriş Gerilim ve Akım Dalga Şekilleri, (b) Giriş Akımı Harmonik Distorsiyonu ve Giriş Güç Faktörü	124
Şekil 6. 16	D-Y bağlı transformatörlü doğrultucunun %50 yüklenmesi durumunda (a) Giriş Gerilim ve Akım Dalga Şekilleri, (b) Giriş Akımı Harmonik Distorsiyonu ve Giriş Güç Faktörü	125
Şekil 6. 17	D-Y bağlı transformatörlü doğrultucunun %75 yüklenmesi durumunda (a) Giriş Gerilim ve Akım Dalga Şekilleri, (b) Giriş Akımı Harmonik Distorsiyonu ve Giriş Güç Faktörü	126
Şekil 6. 18	D-Y bağlı transformatörlü doğrultucunun %100 yüklenmesi durumunda (a) Giriş Gerilim ve Akım Dalga Şekilleri, (b) Giriş Akımı Harmonik Distorsiyonu ve Giriş Güç Faktörü	127
Şekil 6. 19	Filtresiz 12-Darbeleri Sistemin %12.5 yüklenmesi durumunda (a) Giriş Gerilim, Akım Dalga Şekilleri ve Gerilim Değerleri, (b) Giriş (R,S,T)Akımı Toplam Harmonik Distorsiyon Değerleri, (c) Giriş Güç Faktörü ve Akım Değerleri	128
Şekil 6. 20	Filtreli 12-Darbeleri Sistemin %12.5 yüklenmesi durumunda (a) Giriş Gerilim, Akım Dalga Şekilleri ve Gerilim Değerleri, (b) Giriş (R,S,T)Akımı Toplam Harmonik Distorsiyon storsiyon Değerleri, (c) Giriş Güç Faktörü ve Akım Değerleri	129
Şekil 6. 21	Filtresiz 12-Darbeleri Sistemin %25 yüklenmesi durumunda (a) Giriş Gerilim, Akım Dalga Şekilleri ve Gerilim Değerleri, (b) Giriş (R,S,T)Akımı Toplam Harmonik Distorsiyon Değerleri, (c) Giriş Güç Faktörü ve Akım Değerleri	130
Şekil 6. 22	Filtreli 12-Darbeleri Sistemin %25 yüklenmesi durumunda (a) Giriş Gerilim, Akım Dalga Şekilleri ve Gerilim Değerleri, (b) Giriş (R,S,T)Akımı Toplam Harmonik Distorsiyon Değerleri, (c) Giriş Güç Faktörü ve Akım Değerleri	131
Şekil 6. 23	Filtresiz 12-Darbeleri Sistemin %37.5 yüklenmesi durumunda (a) Giriş Gerilim, Akım Dalga Şekilleri ve Gerilim Değerleri, (b) Giriş (R,S,T)Akımı Toplam Harmonik Distorsiyon Değerleri, (c) Giriş Güç Faktörü ve Akım Değerleri	132
Şekil 6. 24	Filtreli 12-Darbeleri Sistemin %37.5 yüklenmesi durumunda (a) Giriş Gerilim, Akım Dalga Şekilleri ve Gerilim Değerleri, (b) Giriş (R,S,T)Akımı Toplam Harmonik Distorsiyon Değerleri, (c) Giriş Güç Faktörü ve Akım Değerleri	133
Şekil 6. 25	Filtresiz 12-Darbeleri Sistemin %50 yüklenmesi durumunda (a) Giriş Gerilim, Akım Dalga Şekilleri ve Gerilim Değerleri, (b) Giriş (R,S,T)Akımı Toplam Harmonik Distorsiyon Değerleri, (c) Giriş Güç Faktörü ve Akım Değerleri	134

Şekil 6. 26	Filtreli 12-Darbeleri Sistemin %50 yüklenmesi durumunda (a) Giriş Gerilim, Akım Dalga Şekilleri ve Gerilim Değerleri, (b) Giriş (R,S,T)Akımı Toplam Harmonik Distorsiyon Değerleri, (c) Giriş Güç Faktörü ve Akım Değerleri	135
Şekil 6. 27	Filtresiz 12-Darbeleri Sistemin %62.5 yüklenmesi durumunda (a) Giriş Gerilim, Akım Dalga Şekilleri ve Gerilim Değerleri, (b) Giriş (R,S,T)Akımı Toplam Harmonik Distorsiyon Değerleri, (c) Giriş Güç Faktörü ve Akım Değerleri	136
Şekil 6. 28	Filtreli 12-Darbeleri Sistemin %62.5 yüklenmesi durumunda (a) Giriş Gerilim, Akım Dalga Şekilleri ve Gerilim Değerleri, (b) Giriş (R,S,T)Akımı Toplam Harmonik Distorsiyon Değerleri, (c) Giriş Güç Faktörü ve Akım Değerleri	137
Şekil 6. 29	Filtresiz 12-Darbeleri Sistemin %75 yüklenmesi durumunda (a) Giriş Gerilim, Akım Dalga Şekilleri ve Gerilim Değerleri, (b) Giriş (R,S,T)Akımı Toplam Harmonik Distorsiyon Değerleri, (c) Giriş Güç Faktörü ve Akım Değerleri	138
Şekil 6. 30	Filtreli 12-Darbeleri Sistemin %75 yüklenmesi durumunda (a) Giriş Gerilim, Akım Dalga Şekilleri ve Gerilim Değerleri, (b) Giriş (R,S,T)Akımı Toplam Harmonik Distorsiyon Değerleri, (c) Giriş Güç Faktörü ve Akım Değerleri	139
Şekil 6. 31	Filtresiz 12-Darbeleri Sistemin %87.5 yüklenmesi durumunda (a) Giriş Gerilim, Akım Dalga Şekilleri ve Gerilim Değerleri, (b) Giriş (R,S,T)Akımı Toplam Harmonik Distorsiyon Değerleri, (c) Giriş Güç Faktörü ve Akım Değerleri	140
Şekil 6. 32	Filtreli 12-Darbeleri Sistemin %87.5 yüklenmesi durumunda (a) Giriş Gerilim, Akım Dalga Şekilleri ve Gerilim Değerleri, (b) Giriş (R,S,T)Akımı Toplam Harmonik Distorsiyon Değerleri, (c) Giriş Güç Faktörü ve Akım Değerleri	141
Şekil 6. 33	Filtresiz 12-Darbeleri Sistemin %100 yüklenmesi durumunda (a) Giriş Gerilim, Akım Dalga Şekilleri ve Gerilim Değerleri, (b) Giriş (R,S,T)Akımı Toplam Harmonik Distorsiyon Değerleri, (c) Giriş Güç Faktörü ve Akım Değerleri	142
Şekil 6. 34	Filtreli 12-Darbeleri Sistemin %100 yüklenmesi durumunda (a) Giriş Gerilim, Akım Dalga Şekilleri ve Gerilim Değerleri, (b) Giriş (R,S,T)Akımı Toplam Harmonik Distorsiyon Değerleri, (c) Giriş Güç Faktörü ve Akım Değerleri	143
Şekil 7. 1	Yapılan Çalışmalar Sonucu Muhtelif Yüklerde Elde Edilen %THD Değerleri	145
Şekil 7. 2	Yapılan Çalışmalar Sonucu Muhtelif Yüklerde Elde Edilen Giriş Güç Faktörü Değerleri	145

ÇİZELGE LİSTESİ

	Sayfa	
Çizelge 3. 1	IEEE 519 harmonik limitleri	12
Çizelge 3. 2	Elektrik Üreticileri ve Dağıtıcıları için % Cinsinden (V_h/V_1) Harmonik Sınır Değerleri	12
Çizelge 4. 1	Çıkış Akım Regülasyon Bloğu Yazılımı	56
Çizelge 4. 2	Tristörlü Doğrultucu Kontrol Yazılımı	58
Çizelge 4. 3	Filtre Kontrol Yazılımı	61
Çizelge 5. 1	Dengeli Üç Fazlı Ve Dengesizlik Faktörlü Gerilimler	106
Çizelge EK.A-1	Fourier Analizinde Simetrisinin Kullanımı	151

**DÜŞÜK HARMONİKLİ VE YÜKSEK GÜÇ FAKTÖRLÜ YÜKSEK GÜÇLÜ
DOĞRULTUCUNUN GERÇEKLEŞTİRİLMESİ**

Özgün GİRGIN

Elektrik Mühendisliği Anabilim Dalı

Yüksek Lisans Tezi

Tez Danışmanı: Doç. Dr. A. Faruk BAKAN

Güç elektroniği dönüştürücüleri arasında en çok kullanılan dönüştürücü türü olan doğrultucular, DC gerilim regülatörü, akümülatör şarjı, motor kontrolü, elektrolizle kaplama, kimyasal prosesler, dc ark fırınları vb gibi endüstriyel uygulamalarda yaygın olarak kullanılmaktadır. Doğal komütasyonlu dönüştürücüler grubuna giren doğrultucularda genellikle güç elemanı olarak tristörler kullanılmaktadır. Güç elemanları arasında gerilim ve akım dayanımı açısından en yüksek değerlere sahip olan tristörler, doğal komütasyonlu dönüştürücülerde ve özellikle yüksek güçlerde ekonomik ve dayanıklı olması nedeniyle diğer güç elemanları yerine tercih edilmektedir. Tristörlü doğrultucularda THDi değerinin azaltılması IEEE-519 ve IEC-61000-3-2 gibi uluslararası standartlara uygunluk ve enerji kalitesi açısından son derece önemlidir. Ancak doğrultucularda şebekeden çekilen akımların THDi değerleri oldukça yüksek olup, faz kontrol açısının artmasıyla da şebekeden çekilen reaktif güç artar.

Bu çalışmada, uluslararası standartlara uygunluk sağlayan doğrultucu sistemi üzerine araştırmalar yapılmıştır. Literatürdeki çalışmalar, teorik olarak incelenmiş,

simülasyonları gerçekleştirilmiştir. Doğrultucuların farklı çalışma koşullarındaki karakteristikleri incelenmiştir.

Bu tezin uygulama kısmında, düşük harmonikli ve yüksek güç faktörlü, 110V / 400A değerlerinde, THDi ve güç faktörü açısından şebekeye olumsuz etkileri çok düşük olan tristörlü bir doğrultucu sistemi geliştirilmiştir. Geliştirilen doğrultucu özellikle akü şarj redresörü amacıyla kullanılarak, yazılım değişikliği ile kaplama redresörü, dc gerilim kaynağı vb. gibi uygulamalara da adapte edilebilecektir. Geliştirilen doğrultucunun THDi değeri %5'ten küçük ve güç faktörünün 0.95'ten büyüktür. Böylece uluslararası standartlara uygun ve enerji kalitesi yüksek bir tristörlü doğrultucu geliştirilmiştir.

Anahtar Kelimeler: Güç Elektroniği, Doğrultucular, Akü Şarj Redresörleri, Enerji Kalitesi

**APPLICATION OF HIGH POWER RECTIFIERS WITH LOW HARMONICS AND
HIGH POWER FACTOR**

Özgün GİRGIN

Department of Electrical Engineering

MSc. Thesis

Advisor: Assoc. Prof. Dr. A. Faruk BAKAN

Rectifiers, the most commonly used converter type among power electronics converters, are widely used for DC power supplies, battery chargers, motor control, electro-chemical process, dc arc furnaces, and many other applications. In the rectifier, which is known as line commutated converter, thyristors are preferred as semiconductor power switches. Thyristor has the highest current and voltage capacity between power semiconductor switches. In rectifiers, thyristors are preferred to the other semiconductor switches especially at high power levels due to their high reliability and relatively low costs. In rectifiers, reactive power increases with delay angle. Besides, total harmonic distortion of the input current (THDi) is very high. Decreasing THDi value is very important to comply with IEEE-519 standards and IEC-61000-3-2, and for energy quality issues.

In this study, to conform to international standards, these standards were examined and were carried out on the rectifier system. Studies in the literature, rectifiers was analyzed theoretically and simulated. Rectifiers have examined the characteristics of the different working conditions.

The application part of this thesis, a low harmonic and high power factor 110V/400A rectifier which has low THDi and good power factor was developed. The developed rectifier will be used for battery charging purposes, but also it could be adopted to the applications such as electroplating rectifiers, dc power source etc. by software modification. In the developed rectifier, THDi value will be lower than 5%, and power factor value will be higher than 0.95. At the end of the thesis, it is aimed to make contribution to literature and to the national technology on high power rectifiers.

Keywords: Power Electronics, Rectifiers, Battery Chargers, Energy Quality

1.1 Literatür Özeti

Endüstriyel uygulamalarda yaygın olarak kullanılan diyotlu ve tristörlü doğrultucuların şebekeden çektiği akımlar IEEE-519 harmonik standartlarını sağlamamaktadır. IEEE-519 standardında güç elektroniği dönüştürücüleri ve lineer olmayan yüklerin şebekeye enjekte edebilecekleri harmonik akım limitleri belirtilmiştir. Doğrultucuların toplam harmonik distorsiyon (THDi) değerini düşürmek için literatürde birçok yöntem geliştirilmiştir. Doğrultucularda genellikle pasif filtre kullanılarak THDi değeri düşürülmektedir. Doğrultucuların THDi değeri ve çıkış gerilimindeki dalgalanma miktarı darbe sayısının artması ile azalmaktadır. Literatürde doğrultucularda darbe sayısını arttırmak üzere birçok yöntem bulunmaktadır[1,2].

AC/DC dönüştürücüler yüksek güçlerde genellikle 50 Hz'lik transformatör ve tristörler ile gerçekleştirilmektedir. Klasik doğrultucu sistemleri basit, ucuz ve dayanıklı yapıları nedeniyle tercih edilmektedir. Düşük güçlerde, klasik doğrultucular yerine IGBT güç elemanları ve yüksek frekans transformatörü içeren AC/DC dönüştürücüler kullanılmaktadır. Güç yoğunluğu, verim ve enerji kalitesi açısından çok iyi özelliklere sahip olan bu dönüştürücüler, klasik dönüştürücülere göre oldukça karmaşık bir yapıya sahiptir. Modern doğrultucu sistemlerinde arıza oluşma riski tristörlü doğrultuculara göre daha yüksektir. Ayrıca modern doğrultucu sistemlerinde belirli bir güce kadar çıkılabilmektedir. Bunun ilk nedeni IGBT güç elemanlarındaki sınırlamalardır. İkinci önemli nedeni ise ferit transformatörlerden oluşan yüksek frekans güç transformatörünün yüksek güçlerde gerçekleştirilmesindeki sınırlamalardır. Bu

nedenlerden dolayı endüstrideki doğrultucu ihtiyacı genellikle modern doğrultucu sistemleri yerine klasik doğrultucu sistemleri ile karşılanmaktadır[1-4].

1.2 Tezin Amacı

Klasik doğrultucu sistemlerinde şebekeden çekilen harmonik güç ve kontrol açısına bağlı olarak artan reaktif güç, şebekede ciddi problemlere yol açmaktadır. Endüstriyel uygulamalarda yaygın olarak kullanılan 6 darbeli doğrultucular şebekeyi önemli ölçüde bozmaktadır. Harmonik standartlarındaki limitler nedeniyle enerji kalitesi yüksek doğrultuculara duyulan ihtiyaç her geçen gün artmaktadır. Bu tezin amacı, düşük harmonikli ve yüksek güç faktörlü bir doğrultucu sistemi geliştirmektir. Geliştirilecek doğrultucunun THDi değerinin %5'ten küçük ve güç faktörünün 0.95'ten büyük olması hedeflenmektedir.

1.3 Hipotez

Kullanılan enerjinin verim ve kalitesinin yükseltilmesi amacıyla geliştirilen devrede sağlanması gereken ve istenen özellikler etraflı bir şekilde aşağıdaki gibi sıralanabilir.

- Şebekeden çekilen akım, mümkün olduğunca gerilimle aynı fazda ve sinüzoidal olmalıdır.
- Güce bağlı olarak verilen uluslararası standartlar sağlanmalıdır.

HARMONİK KAVRAMI

2.1 Harmonikler

Elektriksel yükler çektikleri akımların dalga şekillerine göre lineer ve lineer olmayan yükler olarak adlandırılır. Lineer yükler, üzerindeki gerilimle içinden geçen akım arasında lineer bir ilişki olan yüklerdir. Lineer olmayan yüklerde ise belirgin bir matematiksel ifade yoktur. Lineer olmayan yükler, şebekeden harmonik içerikli akımlar çekerler. İdeal olarak, kullanıcıların elektrik şebekesinden elde ettikleri besleme gerilimi, temel bileşen frekanslı tam bir sinüs dalgası şeklindedir. Ancak gerçekte, lineer olmayan yüklerin çektiği bu harmonik akımlar, şebeke geriliminde bozulmalara yol açar. (IEEE, 1992). Güç elektroniği devrelerinin şebekeden çektikleri akım, çoğu kez bozuk bir dalga şeklindedir. Sürekli hal çalışmada bu dalgalar T periyot süresince ve $f=1/T$ frekansında tekrar ederler. Bu tekrarlama frekansına temel frekans adı verilir. Baskın olan temel frekansa ek olarak, temel frekansın katları frekanslardaki istenmeyen harmonik bileşenleri de içerir. Bu bileşenler Fourier analizi (Ek-A) ile hesaplanır.

Gelecekte enerji sistemlerinde harmonik problemlerin daha da artacağı göz önüne alınarak, nonlineer yükler içeren tesisler harmonik problemleri bakımından kuruluş ve tasarım aşamasında, önceden tanımlanmış ve standartlaştırılmış harmonik büyüklüklere göre incelenecektir. Bu bölümde harmoniklerle ilgili standartlarda ölçül olarak ele alınan çeşitli tanımlamalar ve kavramlar verilmiştir.

2.1.1 Toplam Harmonik Distorsiyonu (THD)

Harmonik büyüklüklerin sınırlanmasını amaçlayan standartlarda çok yaygın olarak kullanılan toplam harmonik distorsiyonu, dalga şeklinin içerdiği toplam akımın efektif değerinin temel akım bileşeninin efektif değerine oranı şeklinde tanımlanır. THD gerilim ve akım için sırasıyla,

$$THD_V = \sqrt{\frac{\sum_{n=2}^{\infty} V_{n,ef}^2}{V_{1,ef}^2}} \quad \text{ve} \quad THD_I = \sqrt{\frac{\sum_{n=2}^{\infty} I_{n,ef}^2}{I_{1,ef}^2}} \quad (1.1)$$

Akımdaki bozulma miktarını belirten THD, bir oran olarak ifade edilse de, yüzdesel olarak da gösterilebilir. Bu durumda,

$$\%THD = \sqrt{\frac{\sum_{n=2}^{\infty} I_{n,ef}^2}{I_{1,ef}^2}} \times 100 \quad (1.2)$$

2.1.2 Toplam Talep Distorsiyonu (TTD)

Toplam talep distorsiyonu bir yüke ait değer olup toplam harmonik akım distorsiyonu olarak aşağıdaki gibi tanımlanır.

$$TTD = \sqrt{\frac{\sum_{n=2}^{\infty} I_{n,ef}^2}{I_L^2}} \quad (1.3)$$

Burada I_L yük tarafından beslenme sisteminin ortak bağlantı noktasından edilen maksimum akımların ortalaması olarak hesaplanır. TTD kavramı, IEEE Standard 519 uygulamasında özellikle belirtilmiştir.

2.1.3 Şekil (Form) Faktörü

Nonsinüsoidal bir dalga için şekil faktörü,

$$K_f = \frac{\text{EfektifDeğer}}{\text{OrtalamaDeğer}} \quad (1.4)$$

olarak tanımlanır. Bozulmuş sinüsoidal bir dalganın bozulma ölçütünü verecek olan bu faktör sinüsoidal bir dalga için 1.11 değerine eşittir.

2.1.4 Tepe (Crest) Faktörü

Harmonik bileşenlerin en basit bi biçimde ortaya konmasını sağlayan bu faktör, nonsinüsoidal akım veya gerilim tepe değeri ile temel bileşenin efektif değeri arasında tanımlanır.

$$TepeFaktörü = \frac{TepeDeğer}{TemelBileşeninEfektifDeğeri} \quad (1.5)$$

Sinüsoidal bir dalga için bu değer, $\sqrt{2}$ dir.

2.1.5 Transformator K -- Faktörü

Transformatörlerin lineer olmayan yükleri beslemesi sonucu transformator üzerinden akan yük akımı, harmonik bileşenleri içerir. Transformator K-faktörü, harmonik akımlar mevcut olduğu zaman standart transformatörlerin yüklenme kapasitesindeki azalma miktarlarını hesaplamak için kullanılan bir kavramdır.

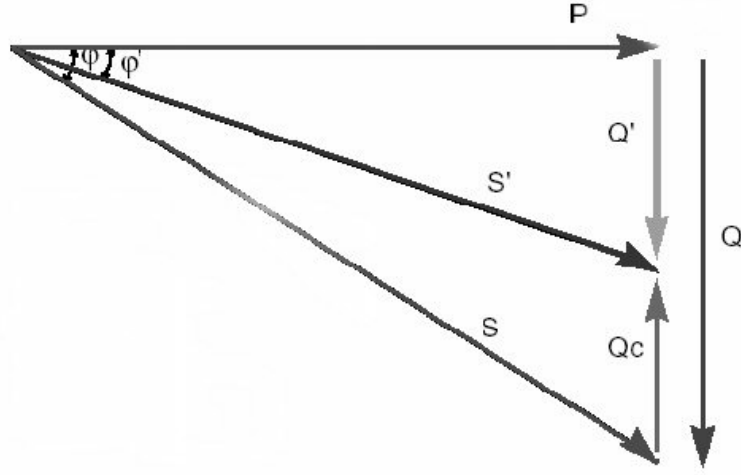
Nonlineer yükleri besleyen bir transformator için K-faktörü

$$K = \sum_{n=1} \left(n \cdot \frac{I_n}{I_1} \right)^2 \quad (1.6)$$

olarak tanımlanır. Burada, I_1 efektif akımı I_n , n. Harmonik bileşen akımını belirtmektedir.

2.2 Güç Faktörü

Güç faktörü bir alternatif akım kaynağından çekilen gücün, yüke ne kadar kaliteli ve verimli aktarıldığını gösteren bir tanımdır. Şebeke akımının bozulma oranını ve akım ile gerilim arasındaki faz farkını temsil eder. "Gerçek" iş yapan gücün, zahiri güce oranlanması ile bulunur. Aktif güç W, görünen güç VA ve reaktif güç (VAr) bir dik üçgenin kenarları olarak gösterilir.



Şekil 2. 1 Güç Faktörü

Görünen güç, hat üzerindeki görünen toplam güçtür. Efektif olarak şebeke akımı ve geriliminin çarpımı olan görünen güç, aşağıdaki gibi yazılabilir.

$$S = V_{ef} \cdot I_{ef} \quad (1.7)$$

Reaktif ve aktif güçlerin vektörel toplamı görünen gücü (S) verir.

Aktif güç, görünen gücün gerilim ile aynı fazda olan bileşenidir. Gerçek güç olarak da ifade edilen aktif güç, yüke aktarılan enerjinin faydalı, istenen, işe dönüşen kısmıdır. Aktif güç, harmonik içermeyen sistemlerde, akım ve gerilimin efektif değerleri ile bunlar arasındaki faz farkının kosinüsünün çarpımıdır.

$$P = V_{ef} \cdot I_{ef} \cdot \cos \varphi \quad (1.8)$$

Reaktif güç ise, görünen gücün, gerilim ile faz farkı olan bileşeni olup, harmonik içermeyen sistemlerde,

$$Q = V_{ef} \cdot I_{ef} \cdot \sin \varphi \quad (1.9)$$

şeklinde ifade edilir.

Aktif güç W' 'nin, görünen güç VA' 'e bölümü bu iki güç arasındaki φ açısının kosinüsü ($\cos \varphi$)nin de dahil olduğu sonuç "güç faktörü" diye isimlendirilen oranı verir. VA' miktarı azaldıkça, φ açısı küçülür ve VA' 'nin büyüklüğü W' 'a yaklaşır. Güç faktörü boyutsuzdur.

Harmonik içermeyen bir sistemde, kaynaktan çekilen aktif gücün, görünen güce oranı güç faktörü olarak tanımlanır ve aşağıdaki gibi yazılabilir.

$$\text{Güç Faktörü (GF, PF)} = \frac{\text{Aktif Güç (P)}}{\text{Görünen Güç (S)}} = \frac{V_{ef} \cdot I_{ef} \cdot \cos \varphi}{V_{ef} \cdot I_{ef}} = \cos \varphi \quad (1.10)$$

(1.10)'e göre, akım ile gerilimin faz farkının sıfır olması, birim güç faktörü ile çalışma durumudur. Yani faz farkı sıfır olduğunda güç faktörü "1" olmaktadır. Harmonik içeren sistemlere ise, aktif ve reaktif güçler, temel akımın aktif ve reaktif bileşenleri ile hesaplanır. Bu durumda, güç faktörünün genel bağıntısı,

$$GF = \frac{P}{S} = \frac{V_{ef} \cdot I_{1ef} \cdot \cos \varphi_1}{V_{ef} \cdot I_{ef}} = \frac{I_{1ef}}{I_{ef}} \cos \varphi_1 = k_{bozulma} \cdot k_{faz_farkı} \quad (1.11)$$

olarak tanımlanır. (1.11)'te, $k_{faz_farkı} = \cos \varphi_1$ olup, şebeke gerilimi ile akımın temel

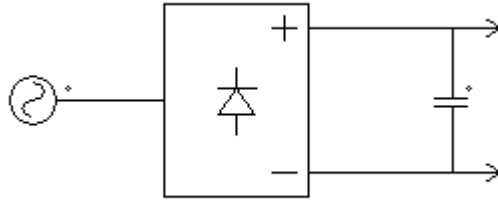
bileşeni arasındaki faz farkını temsil eder. $k_{bozulma} = \frac{I_{1ef}}{I_{ef}}$ olarak ifade edilir ve

harmoniklerin oluşturduğu bozulmayı temsil eder. (1.11) bağıntısından, güç faktörünün hem faz farkı hem de bozulma faktörüne bağlı olduğu görülür.

Bir tesiste manyetik özellikleri olan motorlar, transformatörler ve kaynak makinelerinin kullanımı arttıkça VAr ve dolayısıyla \varnothing açısı büyür, bunun sonucu olarak da $\cos \varnothing$ küçülür.

HARMONİKLERİN ETKİLERİ VE HARMONİK STANDARTLARI**3.1 Giriş**

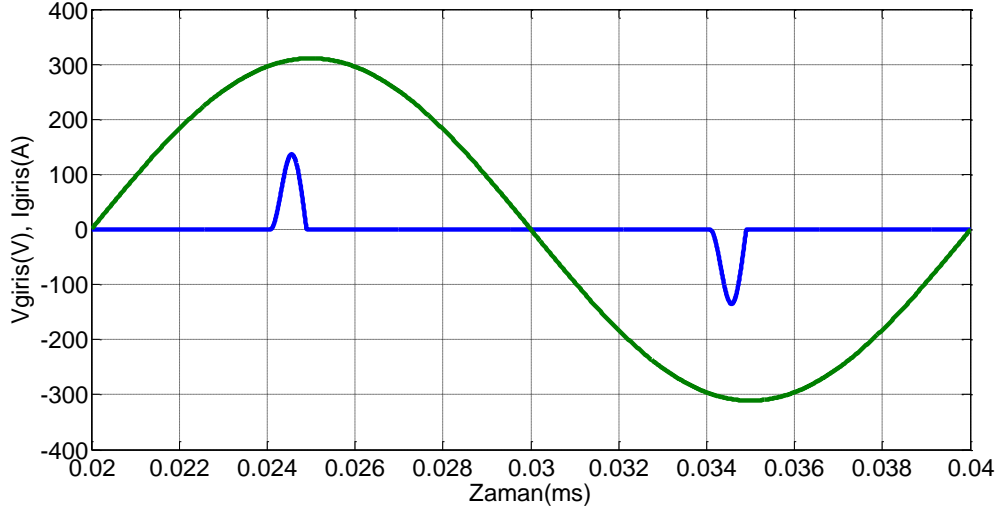
Anahtarlama güç kaynakları, kesintisiz güç kaynakları, alternatif akım ve doğru akım motor sürücüleri gibi birçok güç elektroniği uygulamasında, doğrultucular şebeke gerilim kaynağı ile yük arasındaki arayüzü oluşturmaktadır. Bir doğrultucunun çıkış gerilimi olabildiğince salınımsız olmalıdır. Bu nedenle, doğrultucu çıkışına filtre olarak büyük bir kondansatör bağlanmalıdır. Şekil 3. 1’de Doğrultucu blok diyagramı görülmektedir.



Şekil 3. 1 Doğrultucu blok diyagramı

Bu kondansatör giriş şebeke geriliminin tepe değerine yakın bir değere kadar doldurulur. Doğrultucudan akan akım, alternatif giriş geriliminin tepe değerine yakın bir değerde en büyük değerindedir. Akım sürekli akmaz ve hat frekansının her bir yarı periyodunda sonlu sürelerde sıfır değerindedir. Bu nedenle bu doğrultucular,

şebekeden oldukça harmonikli akım çekerler. Şekil 3. 2'de şebeke gerilimi ve doğrultucunun şebekeden çektiği akım şekli görülmektedir.



Şekil 3. 2 Doğrultucu giriş gerilim ve akım dalga şekli

Enerji sistemindeki harmonik bileşenler sonucu meydana gelen harmonik kirliliği, özellikle güç elektroniği elemanlarının yaygın kullanımı ile giderek artış göstermektedir. Bu distorsiyonun sonucu oluşan olumsuzlukların giderilmesi bakımından harmonik sınırlamanın yapılması gereği ortaya çıkmaktadır. Bu nedenle elektrik enerjisindeki harmonik kirliliği bazı ülkelerce sınırlandırılmış ve güç kalitesinin artması hedeflenmiştir. Harmonik bileşenlerin sınırlandırılması, sistemde harmoniklerin oluşturdukları ek kayıpların azaltılması, sistemdeki elemanların tam kapasite ile kullanılması ve meydana getirdikleri zorlanma ve arızaların giderilmesi bakımından son derece gereklidir.

3.2 Harmonikleri Sınıflandırma Çalışmaları

Elektrik enerji sistemlerinde bulunan harmoniklerin miktarını sınırlamak amacıyla iki ayrı yöntem mevcuttur. Bunlardan birincisi, Uluslararası Elektroteknik Komisyonu (International Electrotechnic Commission, IEC) tarafından da tercih edilen herhangi bir nonlineer yükün bağlandığı noktada uygulanan yöntemdir. İkinci yöntem ise (IEEE

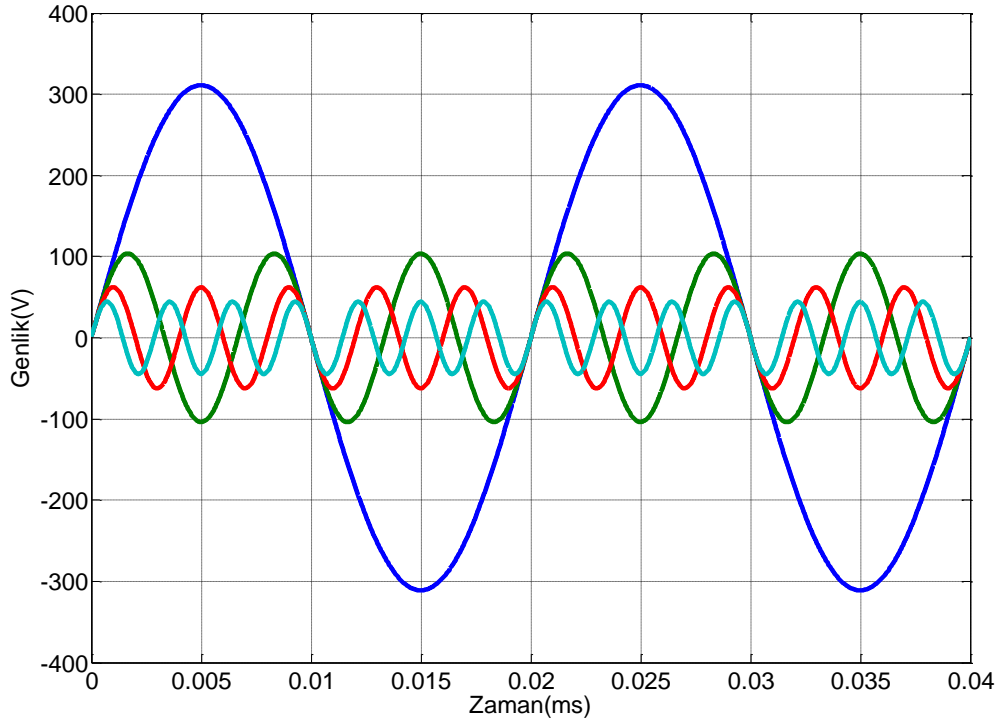
tarafından benimsenen) birden fazla nonlineer yükün beslendiği bir veya daha fazla merkezi noktada uygulanan bir yöntemdir.

IEC tarafından ön görülen sınırlamanın temelinde, tek tek her bir yükten kaynaklanan harmoniklerin sınırlandırılması söz konusudur. Böylece harmoniklerin toplamsal etkisinin de sınırlandırılacağı kabulü vardır. Bu mantık düşünsel bazda etkin olmakla birlikte uygulamada harmonik sınırlama için yapılan kabuller nedeniyle gerçekte oldukça farklı olmaktadır. IEEE tarafından ön görülen değerler, hem akım hem de gerilim harmoniklerine sınırlar getirmeleri bakımından daha etkin ve sınırlayıcı olarak görünmektedir.

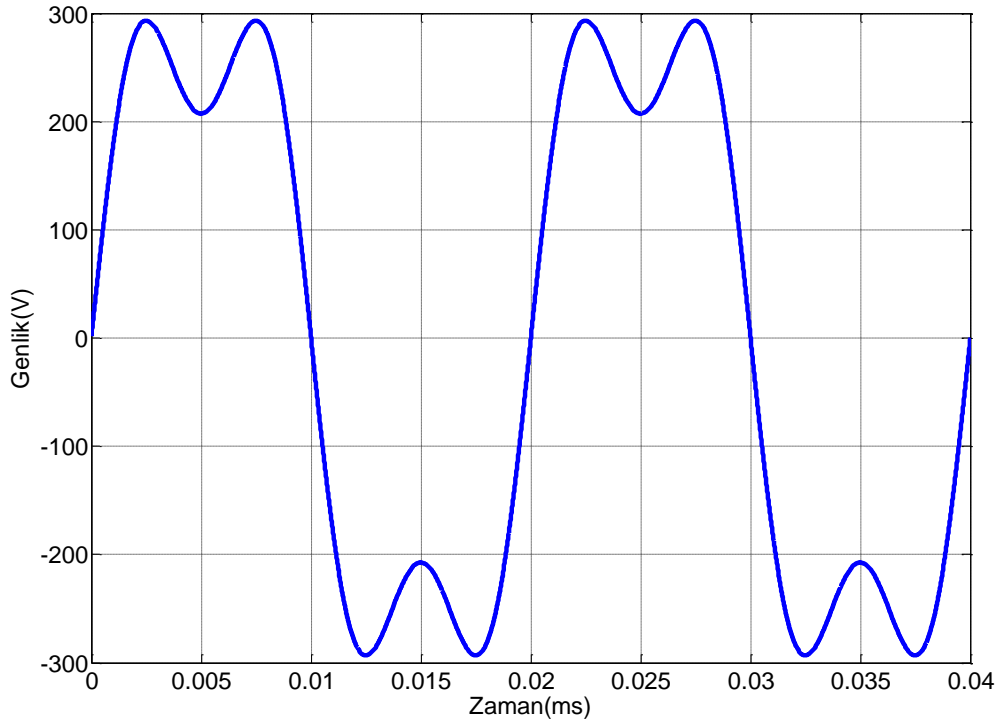
3.3 Harmoniklerin Olumsuz Etkileri

- Kompanzasyon kondansatörlerinin aşırı yüklenerek çok kısa sürede bozulması,
- Nötr akımının artması,
- Transformatörlerin ısınması, kayıpların artması, şebekede ilave kayıplar,
- Devre kesicilerde ve diğer kontrol sistemlerinde istenmeyen anahtarlanmalar,
- Kompanzasyon kademe sigortalarının açılması,
- İletişim sistemlerinde parazitlerin oluşması,
- Elektronik cihazlarda kart arızalarının meydana gelmesi,
- Kontrol sistemlerinde beklenmeyen duruşlar ve arıza kodlarının oluşması,

Şekil 3. 3'de akımın temel bileşeni ve bazı harmonikleri, Şekil 3. 4'de ise üçüncü harmoniğin akım üzerindeki bozucu etkisi görülmektedir.



Şekil 3. 3 Temel bileşen ve harmonikler



Şekil 3. 4 Üçüncü harmoniğin temel bileşen üzerine etkisi

3.4 Harmonik Standartları

Şebekeden çekilen akım harmoniklerinin sınırlandırılması için, ulusal ve uluslararası birçok standart ortaya konmuştur. Ortaya konulan bu standartlar, farklı güç seviyelerinde ve uygulama alanlarında izin verilebilecek harmonik içeriği sınırlamaktadır. IEEE-519 ve IEC 61000, enerji kalitesi ile ilgili uluslararası standartlardır. Bu standartlardan IEC 61000 3-2, Türkiye’de TS-EN-61000-3-2 adı ile uygulanmaktadır.

IEEE-519 standardında güç elektroniği dönüştürücüleri ve lineer olmayan yüklerin şebekeye verebilecekleri harmonik akım limitleri yüzdesel olarak Çizelge 3. 1’de gösterilmiştir. Çizelge 3. 1 ’de öngörülen akım sınırlarının aşılması halinde, şebekenin tüketiciye vereceği gerilimin kalite sınırları Çizelge 3. 2’de gösterilmektedir.

Çizelge 3. 1 IEEE 519 harmonik limitleri

I_{sc}/I_1	$h < 11$	$11 < h < 17$	$17 < h < 23$	$23 < h < 35$	$35 < h$	THDi (%)
<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

I_{sc} = Ortak bağlantı(kuplaj) noktasındaki maksimum kısa devre akımı

I_1 = Ortak bağlantı noktasındaki maksimum talep edilen yük akımı(temel bileşen)

Çizelge 3. 2 Elektrik Üreticileri ve Dağıtıcıları için % Cinsinden (V_h/V_1) Harmonik Sınır Değerleri

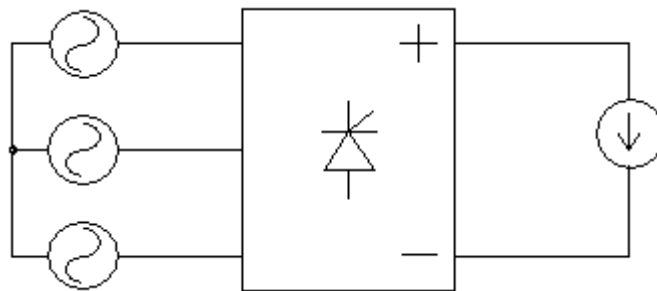
Gerilim Değerleri	2.3-69kV	69-138Kv	>138kV
Her Bir Harmonik İçin	3.0	1.5	1.0
Toplam Harmonik Bozulma	5.0	2.5	1.5

ENDÜSTRİYEL DOĞRULTUCULAR

4.1 Giriş

Akümülatör doldurma devreleri, doğru akım motor sürme devreleri gibi endüstride sıkça kullanılan uygulamalarda doğru akım geriliminin kontrol edilebilir olması gereklidir. Geçmişten günümüze dek kontrollü doğru akım gerilimine ihtiyaç duyulduğunda tristörlü doğrultucular kullanılmaktadır. Günümüzde anma gerilim ve akımı yüksek ve daha iyi kontrol edilebilir yarı iletken güç anahtarlarının giderek artması nedeniyle tristörlü doğrultucular üç fazlı, yüksek güçlü uygulamalarla sınırlanmıştır.

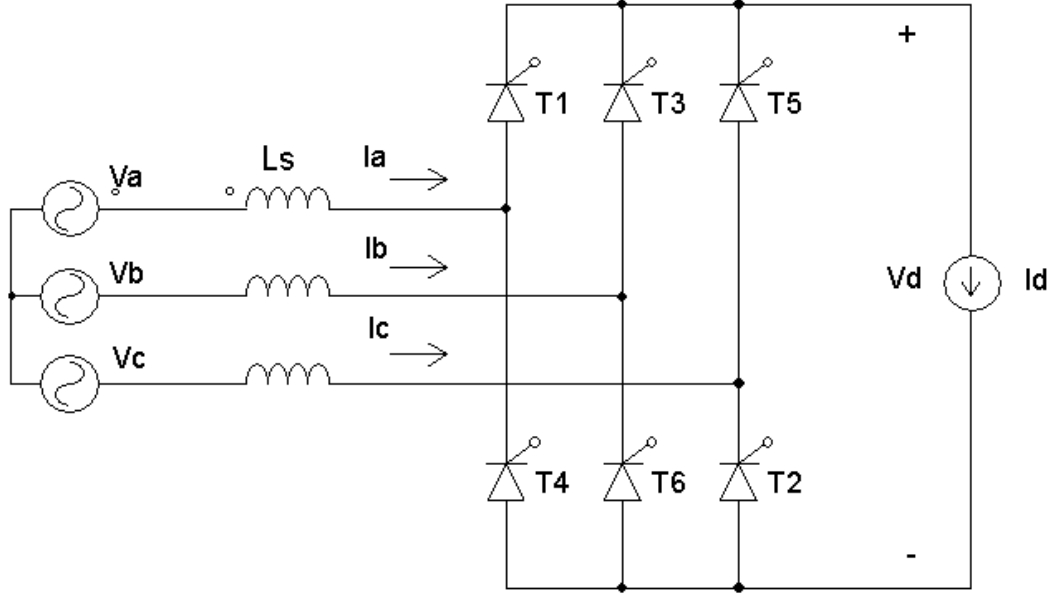
Doğrultucuların şebekeden çektikleri akımın harmonik içeriği bir önceki bölümde incelenmişti. İncelenen sistemde süreksiz akım modu üzerinden bilgi aktarılmıştı. Ancak endüstriyel uygulamalarda doğru akım tarafındaki i_d akımı sürekli akmaktadır.



Şekil 4. 1 Endüstriyel Doğrultucu Blok Şeması

4.2 6 – Darbeli Doğrultucular

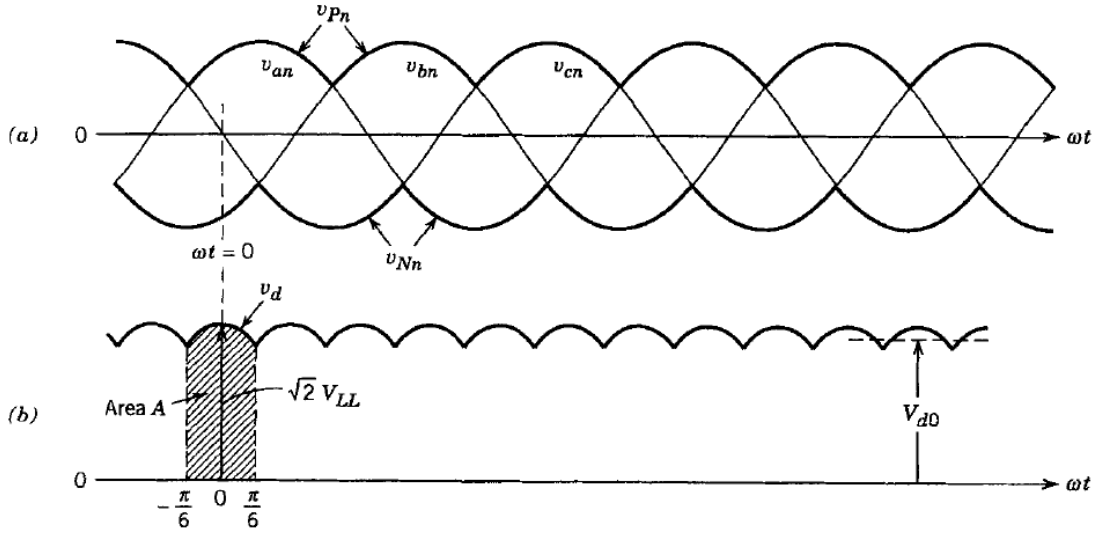
3 fazlı kontrollü doğrultucular literatürde gerek devredeki tristör sayısı gerekse bir periyotta çıkış gerilimindeki dalga sayısı altı adet olduğundan 6-darbeli doğrultucular olarak yer almaktadır. Şekil 4. 2' de 6-darbeli bir doğrultucu devresi görülmektedir. Burada L_s hat endüktansını, i_d çıkış akımını, i_a , i_b , i_c sırasıyla giriş faz akımlarını göstermektedir.



Şekil 4. 2 6-darbeli bir doğrultucu devresi

4.2.1 $L_s=0$ ve $I_d(t)=I_d$ Olan Devrenin İncelenmesi

Şekil 4. 2'deki doğrultucu devresini idealleştirmek adına hat endüktansı değerinin $L_s=0$ olduğunu ve çıkış akımının sabit I_d akımı olduğunu varsayalım. Çıkış akımının sabit I_d akımı olma durumunu akım kaynağıyla modelleyebiliriz. Ayrıca doğru akım tarafında yeteri kadar büyük değerli endüktans değeri içinde sabit I_d akımı söz konusu olacaktır. İlgili doğrultucunun kapı akımları sürekli uygulanması durumlarında tristörler diyot gibi davranacak ve kontrolsüz doğrultucu sistemi söz konusu olacaktır. Bu durumda 6-darbeli kontrolsüz bir doğrultucu için çıkış gerilim dalga şekli Şekil 4. 3' teki gibidir.



Şekil 4. 3 Altı daerbeli doğrultucuya ilişkin (a) giriş faz gerilimleri, (b) çıkış gerilim dalga şekilleri [1]

Şekil 4. 3a'da giriş faz gerilimleri ve b'de çıkış gerilimi dalga şekilleri görülmektedir. Çıkış doğru gerilimin ortalama değerini elde etmek için altı parçadan birini hesaba katarak 60°'lik bir ortalama değer almak yeterlidir.

$$V_d = V_{ab} = \sqrt{2}V_{LL} \cdot \cos \omega t \quad -\frac{1}{6}\pi \leq \omega t \leq \frac{1}{6}\pi \quad (4.1)$$

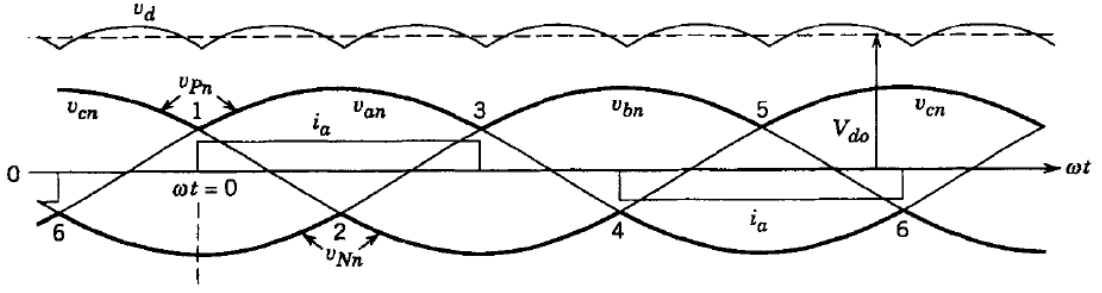
Burada V_{LL} fazlararası gerilimin etkin değeridir. V_{ab} 'nin entegre edilmesiyle A alanı elde edilir.

$$A = \int_{-\pi/6}^{\pi/6} \sqrt{2}V_{LL} \cdot \cos \omega t d(\omega t) = \sqrt{2}V_{LL} \quad (4.2)$$

A'nın $\pi/3$ aralığına bölünmesiyle çıkış geriliminin ortalama değeri denklem (4.3) elde edilir.

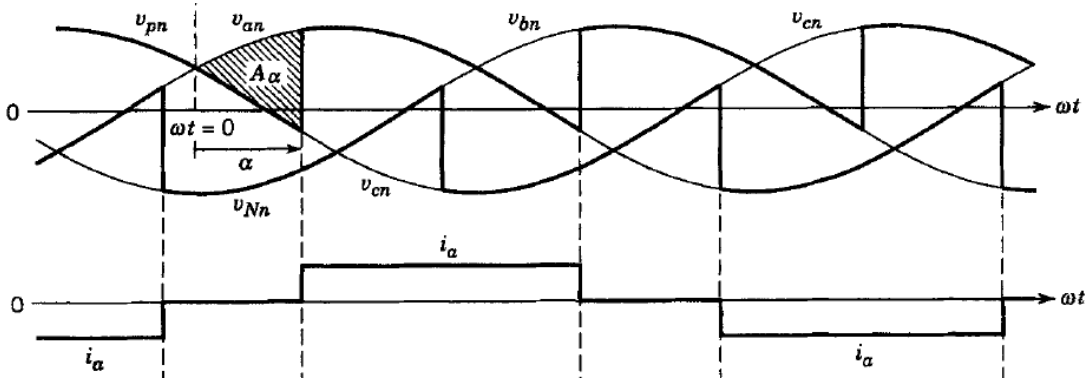
$$V_{do} = \frac{1}{\pi/3} \int_{-\pi/6}^{\pi/6} \sqrt{2}V_{LL} \cdot \cos \omega t d(\omega t) = \frac{3}{\pi} \sqrt{2}V_{LL} = 1.35V_{LL} \quad (4.3)$$

Bu koşullar altında ($\alpha=0$ ve $L_s=0$) a fazındaki gerilim ve akım Şekil 4. 4'deki gibi verilebilir. Bura çeşitli tristörlere ait doğal iletim anları 1,2,3... ile gösterilmiştir.

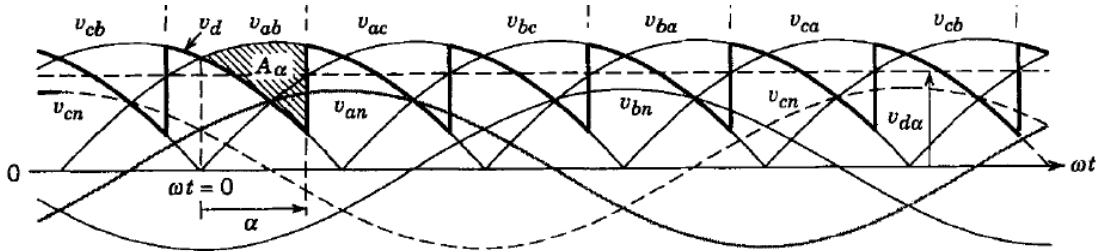


Şekil 4. 4 Şekil4.2'deki devre için a fazına ait gerilim ve akım dalga şekilleri [1]

Şekil 4. 5'te $L_s=0$ durumunda herhangi bir α tetikleme açısında doğrultucu a fazına ait akım, gerilim ve çıkış gerilimi dalga şekli verilmiştir. Komütasyon anlarına dikkat edilecek olunursa, tristörlerin $\omega t = \alpha$ olana kadar iletimde olduğu ve tam o anda komütasyonun gerçekleştiği görülür. $L_s=0$ olmasından ötürü komütasyon olayı aniden gerçekleşmektedir.



Şekil 4. 5 α tetikleme açısı için sırasıyla a fazına ait gerilim ve akım dalga şekilleri [1]



Şekil 4. 6 Şekil 4.5'deki durum için çıkış gerilimi dalga şekli [1]

Doğrultucu çıkış geriliminin ortalama değeri Şekil 4. 6'daki dalga şeklinden elde edilebilir. A_α alanı, ortalama d.a gerilim V_{do} 'a göre α tetikleme açısı ile bir azalmaya neden olur. A_α alanı 60° 'de bir tekrarlandığından çıkış gerilim ifadesi denklem (4.4)'deki gibi olacaktır.

$$V_{d\alpha} = V_{do} - \frac{A_\alpha}{\pi / 3} \quad (4.4)$$

Şekil 4.6'daki A_α alanı denklem (4.5) şeklinde elde edilir.

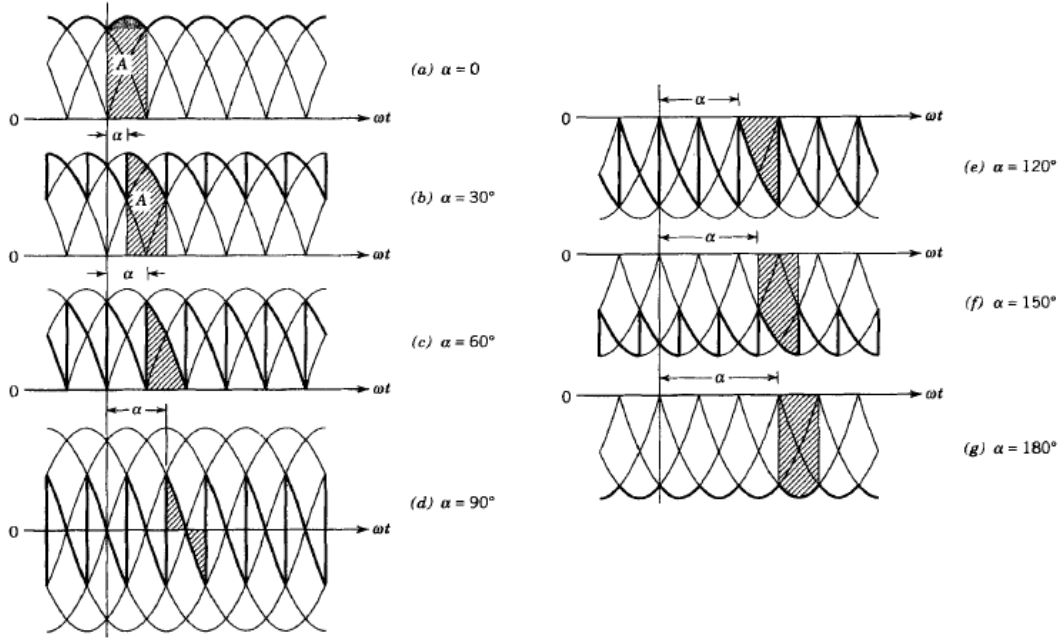
$$A_\alpha = \int_0^\alpha \sqrt{2}V_{LL} \cdot \cos \omega t d(\omega t) = \sqrt{2}V_{LL} \cdot (1 - \cos \alpha) \quad (4.5)$$

A_α 'yı ve V_{do} 'ı denklem (4.4)'de yerine koyarsak kontrollü doğrultucu çıkış gerilim ifadesi denklem (4.6)'daki gibi olur.

$$V_{d\alpha} = \frac{3\sqrt{2}}{\pi} V_{LL} \cdot \cos \alpha = V_{do} \cdot \cos \alpha \quad (4.6)$$

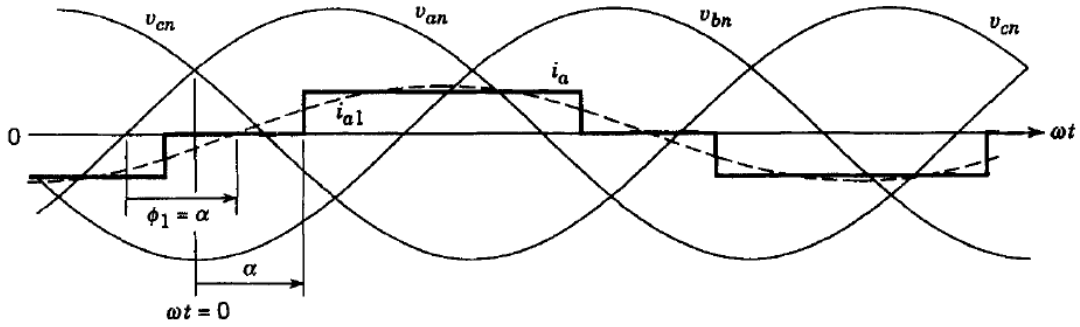
Denklem (4.6)'dan görüldüğü üzere $L_s=0$ ve $I_d(t)=I_d$ olması durumunda çıkış gerilimi, akım değerinden bağımsızdır.

Şekil 4. 7'de muhtelif α tetikleme açılarında 6-darbeleri doğrultucuya ait çıkış gerilimleri görülmektedir. Herbir durum için çıkış geriliminin ortalama değeri denklem (4.6)'daki gibi hesaplanabilir. Bir periyot içerisinde 6-darbeleri doğrultucuya ait çıkış geriliminin frekansı, hat frekansının 6 katı olduğu Şekil 4. 7'de görülmektedir.



Şekil 4. $V_{d\alpha} = \frac{A\alpha}{\pi/3}$ olarak doğru gerilimin α 'nın fonksiyonu olarak değişimi [1]

Doğrultucu çıkış akımı $I_d(t)=I_d$ durumu için sırasıyla i_a , i_b , i_c giriş hat akımları, I_d genlikli dikdörtgen biçiminde dalga şekline sahiptir. α tetikleme açısının sıfırdan farklı bir değeri kadar faz kaydırılmış değişimi Şekil 4. 7' de verilmiştir.



Şekil 4. 8 6-darbeli doğrultucuya ait hat akımı [1]

V_{an} gerilimi referans alınarak gösterilen bu değişim Fourier bileşenleri cinsinden denklem (4.7)'deki gibi ifade edilir.

$$\begin{aligned}
 i_a(\omega t) = & \sqrt{2}I_{S1} \cdot \sin(\omega t - \alpha) - \sqrt{2}I_{S5} \cdot \sin[5(\omega t - \alpha)] - \sqrt{2}I_{S7} \cdot \sin[7(\omega t - \alpha)] \\
 & + \sqrt{2}I_{S11} \cdot \sin[11(\omega t - \alpha)] + \sqrt{2}I_{S13} \cdot \sin[13(\omega t - \alpha)] \\
 & - \sqrt{2}I_{S17} \cdot \sin[17(\omega t - \alpha)] - \sqrt{2}I_{S19} \cdot \sin[19(\omega t - \alpha)] \dots
 \end{aligned} \tag{4.7}$$

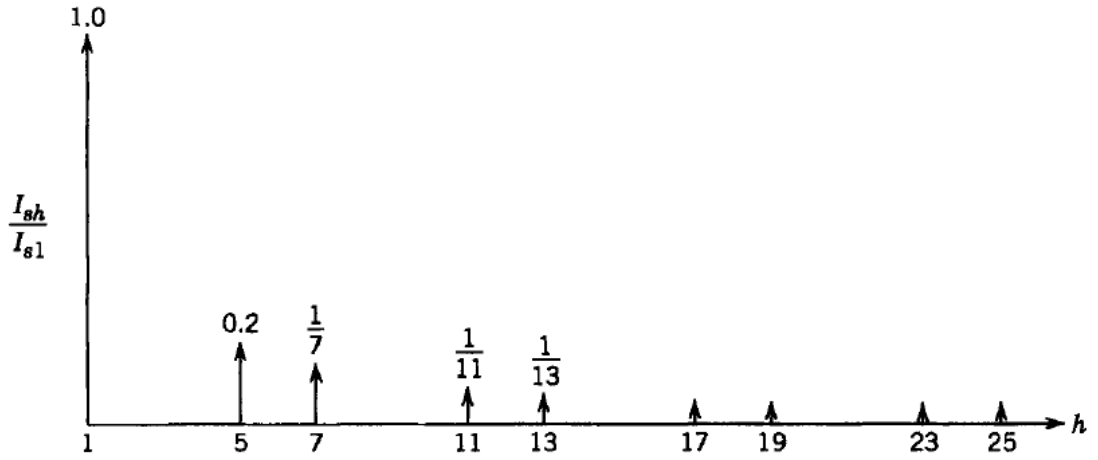
Denklem (4.7) için katı harmonikler hariç sadece tek harmoniklerden oluşmaktadır. Buradan, 6-darbeli doğrultucu sistemi için denklem(4.8) elde edilir.

$$h = 6.n \mp 1 \quad (n = 1, 2, 3 \dots)$$

(4.8)

Ayrıca Şekil 4. 8'de görüldüğü üzere harmonik bileşenlerin etkin değerleri, harmonik mertebeleri ile ters orantılıdır.

$$I_{sh} = \frac{I_{s1}}{h} \quad (4.9)$$



Şekil 4. 9 Altı darbeli doğrultucuya ait hat akımı harmonik bileşenlerin etkin değerleri[1]

Böylece $L_s=0$ ve $I_d(t)=I_d$ olması durumunda denklem(4.10)'daki eşitlikler elde edilir.

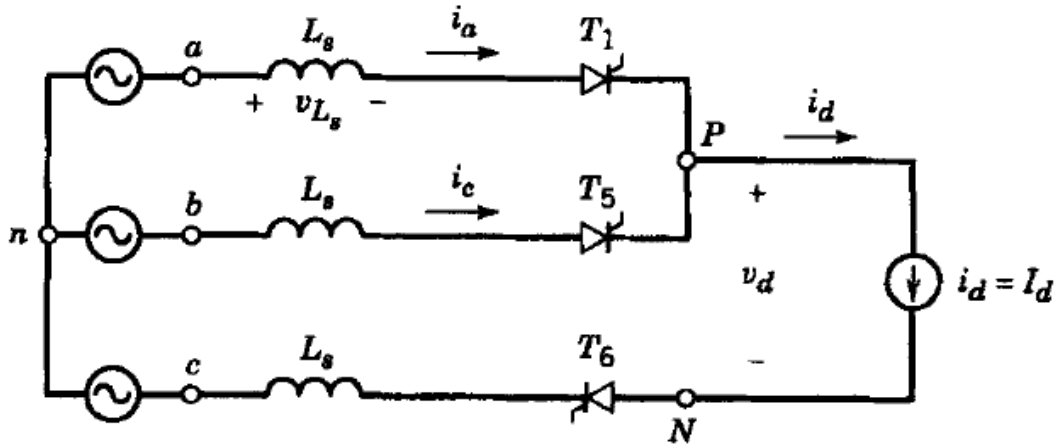
$$I_s = \sqrt{\frac{2}{3}} \cdot I_d = 0.816 I_d$$

$$\frac{I_{s1}}{I_s} = \frac{3}{\pi} = 0.955 \quad , \quad THD = \%31.08 \quad (4.10)$$

$$G.F = \frac{3}{\pi} \cdot \cos \alpha$$

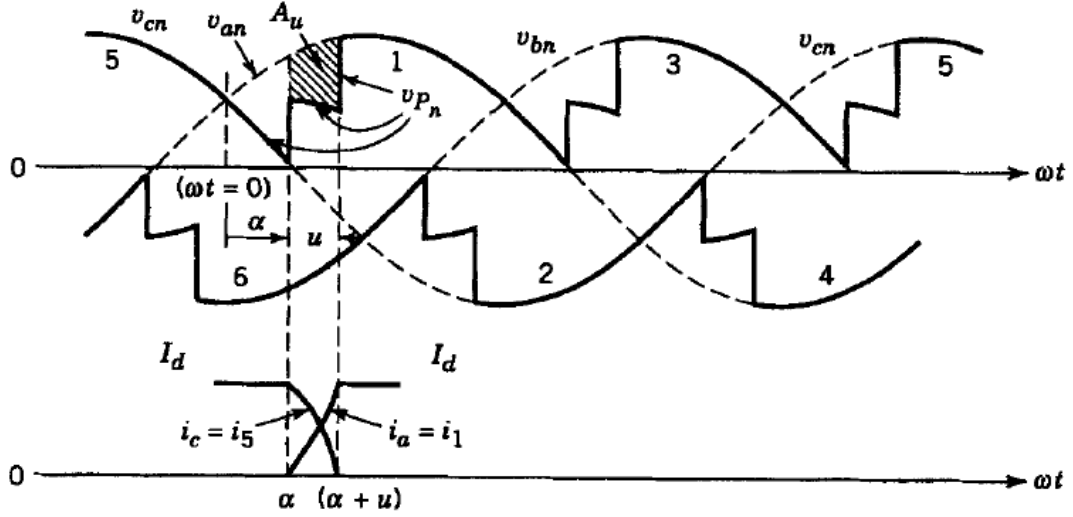
4.2.2 Hat Endüktansı L_s 'in Etkisi

Endüstriyel uygulamalarda kullanılan 6-darbeli doğrultucu sistemlerinin alternatif akım tarafında bulunan L_s endüktansının ihmal edilmesi mümkün değildir. L_s endüktansının etkisiyle belirli bir α tetikleme açısı için akım komütasyonu sonlu bir u komütasyon aralığı kadar sürmektedir. Tristörlerden 5 ve 6 no.'lu olanların iletimde olduğu ve $\omega t = \alpha$ anında akımın 5 no.'lu tristörden 1 no.'lu tristöre aktarıldığı göz önüne alınarak şekil 4.9'da sadece akım iletiminde rol oynayan tristörlere ait eğriler verilmiştir. 1 no.'lu tristörün doğal iletim anı $\omega t = 0$ başlangıç olarak seçilmiştir.



Şekil 4. 10 Hat endüktansı L_s var olduğu durumda komütasyon [1]

Akım komütasyon aralığı u süresince 1 ve 5 no.lu tristörler aynı anda iletimde olup, V_{an} ve V_{cn} faz gerilimleri her bir fazdaki L_s üzerinden kısa devre edilmektedir. i_d akımı 0'dan I_d 'ye yükselirken, i_c de I_d 'den sıfıra düşerek 5 no.lu tristörden 1 no.lu tristöre akım aktarımı tamamlanmaktadır. 5 ve 1 no.lu tristörlerden akan i_5 ve i_1 akımları şekil 4.10'da verilmiştir. i_a dalga biçiminin tümü ise Şekil 4. 11'de verilmiştir.



Şekil 4. 11 Komütasyon anında giriş gerilim ve akımı dalga biçimleri($L_S \neq 0$) [1]

Şekil 4. 9'da komütasyon aralığı $\alpha < \omega t < \alpha + u$ boyunca

$$V_{Pn} = V_{an} - V_{L_S} \quad , \quad V_{L_S} = L_S \cdot \frac{di_a}{dt} \quad (4.11)$$

Şekil 4. 10'da komütasyon aralığı nedeniyle A_u alanındaki azalma,

$$A_u = \int_{\alpha}^{\alpha+u} V_{L_S} d(\omega t) \quad (4.12)$$

Denklem (4.11), (4.12)'de yerine koyulursa,

$$A_u = \omega L_S \int_0^{I_d} di_a = \omega L_S I_d \quad (4.13)$$

Böylece ortalama d.a çıkış gerilimi (4.6)'da verilen $V_{d\alpha}$ 'dan $\frac{A_u}{\pi/3}$ kadar azalır:

$$V_{d\alpha} = \frac{3\sqrt{2}}{\pi} V_{LL} \cdot \cos \alpha - \frac{3\omega L_S}{\pi} I_d \quad (4.14)$$

Akımın komütasyonu sırasında a ve c fazları birbirlerine kısa devre edilmişlerdir. Bu nedenle, komütasyon sırasında,

$$V_{Pn} = V_{an} - L_S \cdot \frac{di_a}{dt} \quad \text{ve} \quad V_{Pn} = V_{cn} - L_S \cdot \frac{di_c}{dt} \quad (4.15)$$

Denklem (4.15)'den denklem (4.16) elde edilir.

$$V_{Pn} = \frac{V_{an} + V_{cn}}{2} - \frac{L_S}{2} \left(\frac{di_a}{dt} + \frac{di_c}{dt} \right) \quad (4.16)$$

$I_d = i_a + i_c$ 'nin komütasyon aralığı boyunca sabit olduğu varsayılarak,

$$\frac{di_a}{dt} = - \frac{di_c}{dt} \quad (4.17)$$

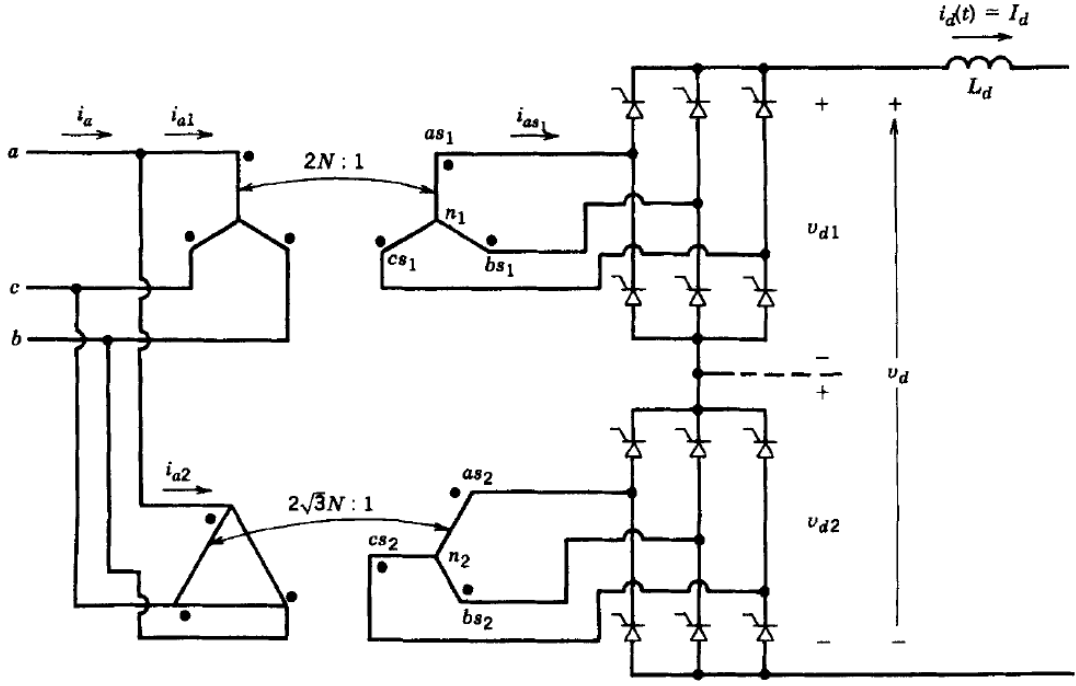
Denklem (4.17), (4.16)'da yerine konursa denklem(4.18) elde edilir.

$$V_{Pn} = \frac{V_{an} + V_{cn}}{2}$$

Komütasyon aralığı boyunca V_{Pn} dalga şekli Şekil 4. 11'de görülmektedir.

4.3 12-Darbeli doğrultucular

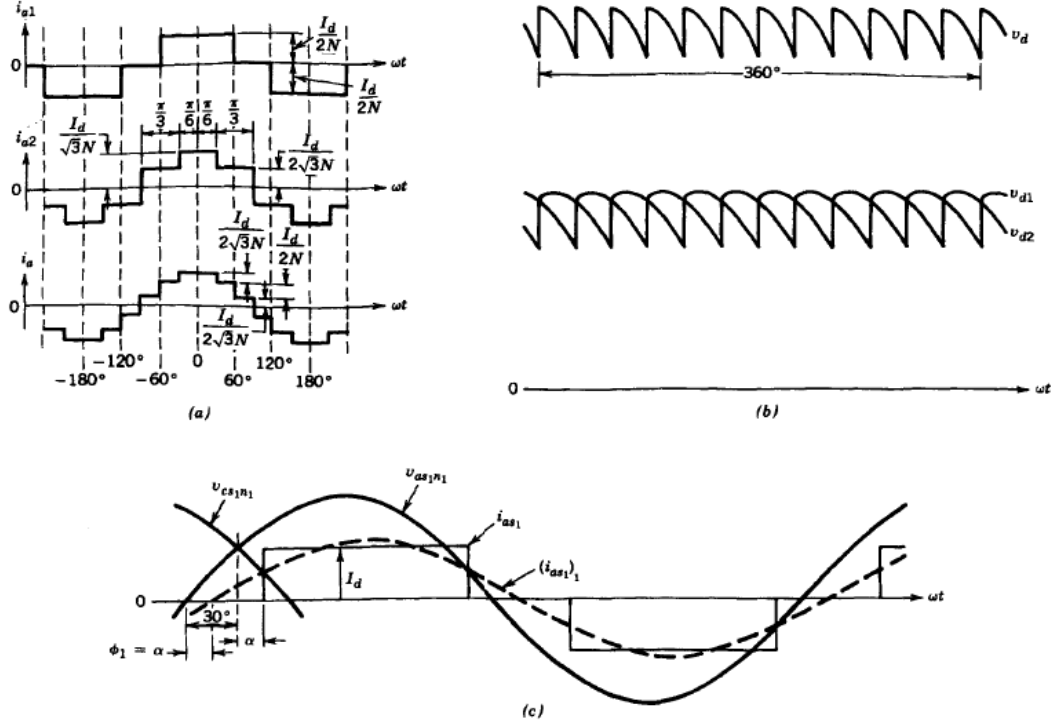
Yüksek güçlü doğru gerilim gerektiren uygulamalarda, doğrultucuların alternatif gerilim tarafında ürettikleri harmoniklerin ve doğru gerilim tarafında ürettikleri gerilim dalgalılığının azaltılması önem kazanmıştır. Girişlerin Y-Y ve D-Y bağlı transformatörler bulunan iki 6-darbeli doğrultucu ile oluşturulan 12-darbeli doğrultucu, bunu büyük ölçüde başarır. 12-darbeli bir doğrultucu sisteminde 6-darbeli iki doğrultucunun alternatif gerilim tarafı paralel bağlanır. Doğrultucuların doğru gerilim tarafı seri ya da paralel bağlanabilir. Yüksek doğru gerilim uygulamalarda, doğru gerilim tarafının seri bağlanması, yüksek yüksek doğru gerilim gereksiniminin karşılanabilmesi açısından önemlidir. Güç elemanları üzerinden akan akım yük akımına eşit olması seri bağlantılı sistemi sınırlandıran bir etmendir. Bu sebepten yüksek akım gerektiren uygulamalarda paralel bağlantılı sistem daha avantajlıdır. Paralel bağlantı durumunda ise doğru gerilim tarafında kullanılmak üzere fazlararası reaktöre ihtiyaç duyulmaktadır. Bu reaktör, anlık doğrultucu çıkış gerilimlerindeki farklılığı engellemektedir. Seri bağlantıda fazlararası reaktöre ihtiyaç yoktur. Şekil 4. 12'de doğru gerilim tarafı seri bağlı 12-darbeli bir doğrultucu sistemi görülmektedir.



Şekil 4. 12 12-darbeleri doğrultucu sistemi [1]

4.3.1 $L_s=0$ ve $I_d(t)=I_d$ Olan Devrenin İncelenmesi

12 darbeleri bir doğrultucu sistemindeki Y-Y ve D-Y trafoların sekonder gerilimleri arasında 30° faz farkı mevcuttur. Düzeltici reaktans L_d çok büyük olduğu ya da çıkışta akım kaynağı yüklü durum varsayılarak gerilim ve akım dalga şekilleri çizilebilir. Alternatif gerilim tarafındaki L_s endüktans değeri ihmal edilirse, giriş akımları dikdörtgen biçimini alır. Buy varsayımlar altında $L_s=0$ ve $I_d(t)=I_d$ olup, şekil 4.15'teki dalga şekilleri elde edilir. Her iki 6 darbeleri doğrultucu aynı α gecikme açısıyla çalışmaktadır. 12- darbeleri doğrultucunun bir fazına ait toplam giriş akımı $i_a=i_{a1}+i_{a2}$ olup, 6-darbeleri doğrultucu için çizilen i_{a1} ve i_{a2} akım dalga şekillerinden daha az harmonik içermektedir.



Şekil 4. 13 12-darbeli doğrultucuya ait dalga şekilleri [1]

i_{a1} ve i_{a2} giriş akımları için Fourier bileşenleri denklem (4.18) ve (4.19) gibi bulunur.

$$i_{a1} = \frac{2\sqrt{3}}{2N\pi} I_d \left(\cos \omega t - \frac{1}{5} \cos 5\omega t + \frac{1}{7} \cos 7\omega t - \frac{1}{11} \cos 11\omega t + \frac{1}{13} \cos 13\omega t \dots \right) \quad (4.18)$$

$$i_{a2} = \frac{2\sqrt{3}}{2N\pi} I_d \left(\cos \omega t + \frac{1}{5} \cos 5\omega t - \frac{1}{7} \cos 7\omega t - \frac{1}{11} \cos 11\omega t + \frac{1}{13} \cos 13\omega t \dots \right) \quad (4.19)$$

Burada trafo çevirme oranı N Şekil 4. 13'de gösterildiği gibidir. 12-darbeli doğrultucunun giriş akımı (4.18) ve (4.19) 'un toplamı olarak bulunur.

$$i_{a2} = \frac{2\sqrt{3}}{N\pi} I_d \left(\cos \omega t - \frac{1}{11} \cos 11\omega t + \frac{1}{13} \cos 13\omega t \dots \right) \quad (4.20)$$

12 darbeli bir doğrultucunun şebekeden çektiği akımın içindeki harmoniklerin mertebeleri

$$h = 12k \pm 1 \quad (4.21)$$

Burada $k = 1, 2, 3, \dots$ bir tam sayı olup, en küçük harmonikler 11. ve 13. Harmoniklerdir. Fakat 6-darbeli doğrultucularda harmonik mertebeleri $6k \pm 1$ bağıntısı uyarınca hesaplanır ve en küçük harmonikler 5. ve 7. mertebededir.

12-darbeli doğrultucunun çıkış gerilimi, iki 6-darbeli doğrultucu çıkış geriliminin toplamı şeklindedir. Çıkış gerilimleri arasında 30° fark mevcuttur. Bunun sonucunda 12-darbeli bir doğrultucunun V_d çıkış doğru gerilim harmonikleri (4.22) gibidir.

$$h = 12k \quad (4.22)$$

4.3.2 Hat Endüktansı L_s 'in Etkisi

Gerçekte 12-darbeli bir doğrultucu sisteminde kullanılan trafoların kaçak akılarından ötürü oldukça büyük L_s aktarım endüktansları vardır. Bu endüktans, 6-darbeli doğrultucuların ideal konumda çalışmaları halinde aa giriş akımı harmoniklerini ve da çıkış gerilimi harmoniklerini etkilemez. Ancak harmoniklerin genliği büyük ölçüde L_s , tetikleme açısı α ve doğru akım I_d değerlerine bağlıdır.

SİMÜLASYON ÇALIŞMALARI

5.1 Simülasyon Çalışmaları

Bu tez kapsamında öncelikle 6 darbeli doğrultucular üzerine bilgi sahibi olunup eksik yanları araştırılmış ve bu eksiklikler üzerine nasıl iyileştirilmeler yapılabilir sorusuna cevap aranmıştır. Bu düşünce ile yapılan literatür taramasında çok darbeli doğrultucular üzerine inceleme yapılmıştır. Çok darbeli doğrultucuların çeşitleri ve bunun yanı sıra birbirlerine nazaran üstünlükleri ve eksiklikleri üzerine araştırma yapılmıştır. Çok darbeli doğrultucular ile elde edilen giriş akımı toplam harmonik distorsiyonu(THDi) değerleri incelenmiştir. Literatürde karşılaşılan çok darbeli doğrultucular simülasyonlarla pekiştirilmiştir. Var olan çalışmalarda elde edilen değerler simülasyonlarla elde edilmiştir. Yapılan simülasyonlarda literatürde elde edilen sonuçları iyileştirme adına ne yapılabilir sorusuna cevap aranmıştır. Literatürdeki giriş akım THD değerini iyileştirme yönünde, darbe sayısını arttırma yöntemi üzerine çalışmalara sıklıkla rastlanılmıştır[12-23]. Literatürde darbe sayısını 48 darbeye kadar arttırıldığına rastlanılmıştır. IEEE-519 standartlarını sağlamak için en az 24 darbeli doğrultucuların kullanılması gerektiği bilgisine literatürde yer almaktadır. Simülasyon sonuçlarıyla literatürdeki değerler arasında tutarlı bir ilişki yakalanmıştır. Ancak bu tezin gayesi olarak darbe sayısını arttırmaksızın IEE-519 standartlarına uyulması benimsenmiştir. Bunun üzerine simülasyonlar üzerinde çalışmalara devam edilmiştir. Tezdeki amaç giriş akım THDi değerini %5'in altında olması, giriş güç faktörünün 0.95-0.99 arasında olması ve çıkış gerilimindeki dalgalılığın %3'ten küçük olması olmuştur. Bu kapsamda doğrultucu girişinde pasif filtre kullanılması üzerine fikir oluşturulmuştur.

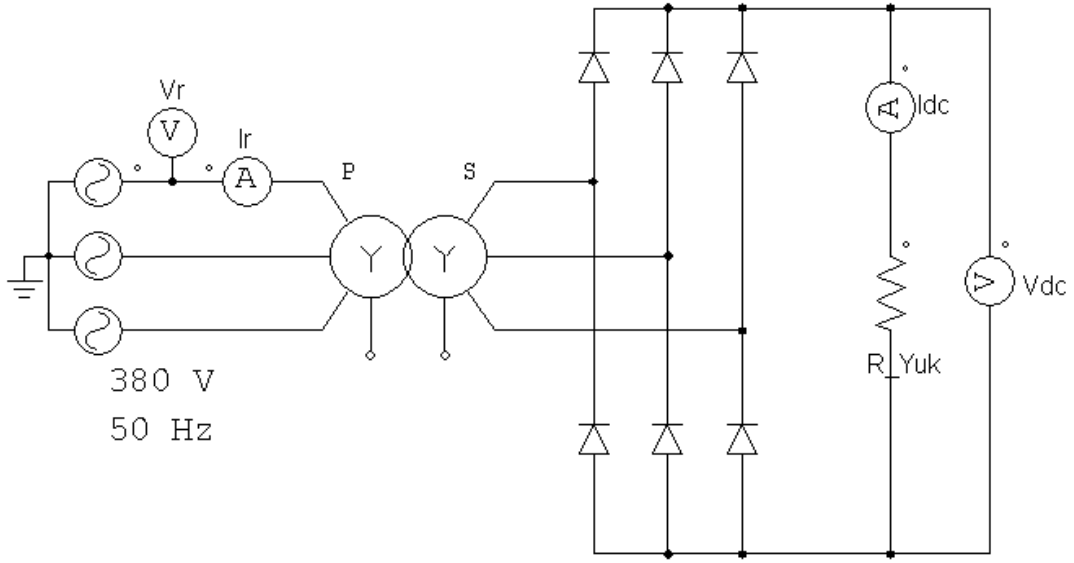
Doğrultucu karakteristikleri incelenerek pasif filtre tasarımı üzerine çalışmalar yapılmıştır. Tez kapsamında yapılması planan pasif filtrenin doğrultucudaki güç elemanlarını tetikleme açısıyla olan ilişkisi üzerine çalışmalara başlanmıştır. İlk hedef olarak kontrolsüz doğrultucular üzerinde pasif filtre tasarımı ile iyileştirme üzerine gidilmiştir. Alınan sonuçların ardından kontrol açısına bağlı olarak sistem çalışmasını stabil tutacak pasif filtre tasarımı üzerine çalışmalarda bulunulmuştur. Kontrol açısına uygun filtre grupları tasarlanmıştır ve tasarım sonucu güç faktörü 0.95 değerinin üzerinde olmuştur. Aynı zamanda tasarım sonucunda giriş akım THDi değeri %5'in altında tutulmuştur. Literatürde 36 darbeli doğrultucu ile elde edilen giriş akımı THDi değeri 12 darbeli doğrultucuyla elde edilmiştir. Üstelik kontrol açısına bağlı olarak düşen güç faktörünü 0.95'in üzerinde hedeflenen değerde elde edecek tasarıma ulaşılmıştır. Literatürde 6-darbeli doğrultucuların seri ve paralel gruplar halinde bağlanması sonucu elde edilen doğrultucu yapılarıyla karşılaştırıldığında tez kapsamında tasarlanan sistemin giriş akım THDi değeri ve güç faktörü değeri dikkat çekici derecede iyi durumdadır. Aşağıda yapılan simülasyon, analiz ve yorumlar bulunmaktadır. Analizlerin sonunda hangi sorulara cevap aranmak üzere hangi yönde çalışmanın ilerlediği açıklanmıştır. İlk olarak klasik 6-darbeli doğrultucu üzerine inceleme yapılmıştır.

6-Darbeli Kontrolsüz Doğrultucu Simülasyonu:

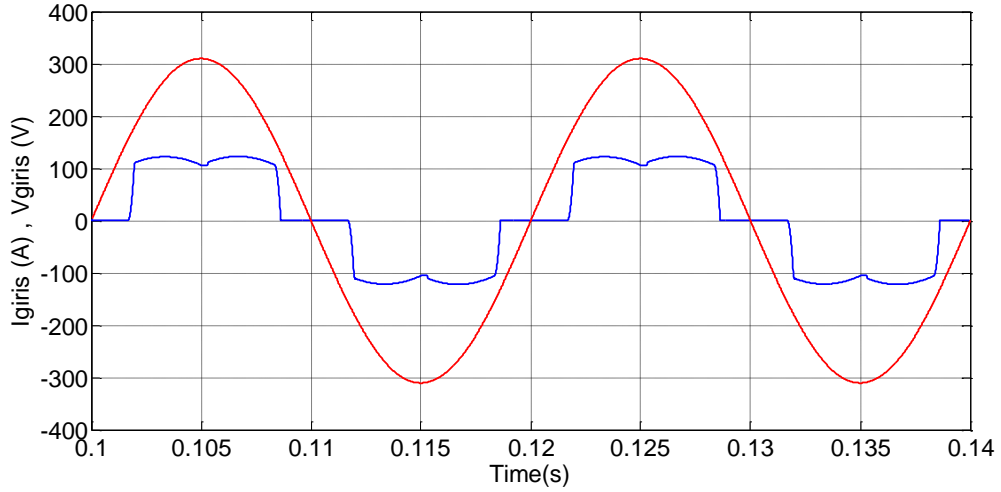
Bu simülasyonda;

Çıkış Gerilimi: 110Vdc

Çıkış Akımı: 400A şartlarını sağlayacak temel bir doğrultucu devresi üzerinde çalışmalar yapılmıştır. Hat endüktansı $L_s=0$, Çıkış endüktansı $L_d=0$, Transformator çevirme oranı 4.5:1 olarak alınmıştır.



Şekil 5. 1 Üç fazlı Tamdalga Kontrolsüz Doğrultucu



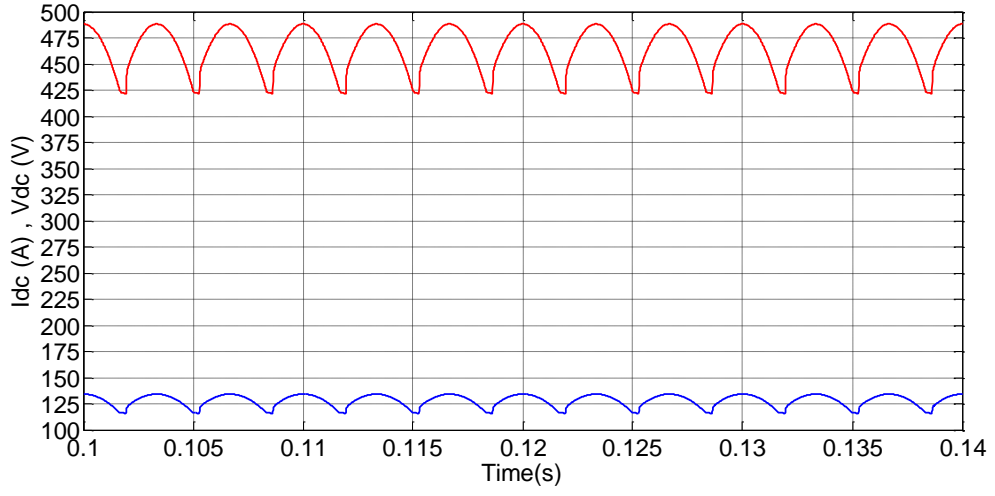
Şekil 5. 2 Üç fazlı Tamdalga Kontrolsüz Doğrultucu

Giriş Akım ve Gerilim Dalga Şekilleri

Giriş Akımı THDi Değeri: %29.37

Giriş Güç Faktörü: 0.95

Kontrolsüz doğrultucularda güç elemanı tetikleme açısı 0 olduğundan güç faktörünün değeri yüksek çıkmaktadır.



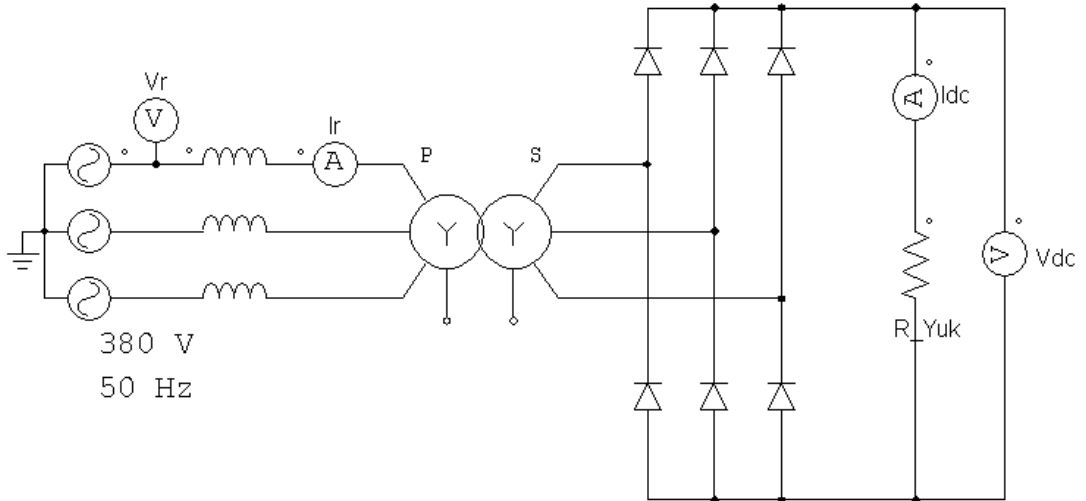
Şekil 5. 3 Üç fazlı Tamdalga Kontrolsüz Doğrultucu

Çıkış Gerilim ve Akım Dalga Şekilleri

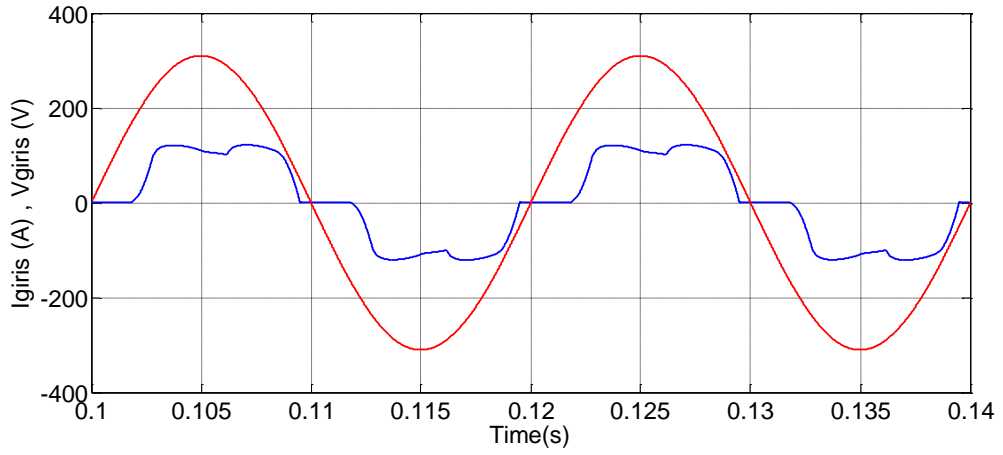
Çıkış Gerilim Ripple: %14.5

Çıkış Akım Ripple: %15

Doğrultucu hattına konan 0.5mH değerinde endüktanslar ile giriş akım THDi değeri iyileştirmesi yapmak mümkün görünmüştür. Alınan sonuçlar;



Şekil 5. 4 Hat Endüktanslı Üç fazlı Tamdalga Kontrolsüz Doğrultucu

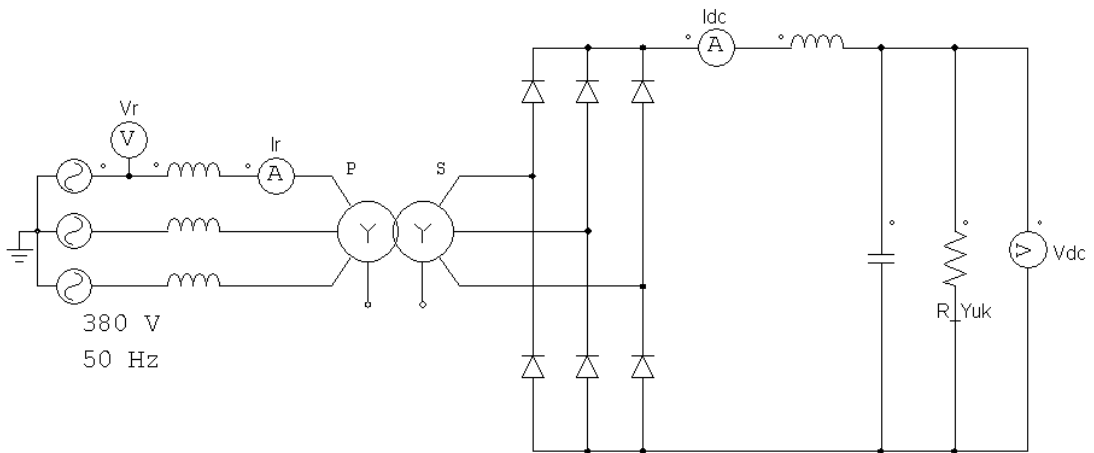


Şekil 5. 5 Hat Endüktanslı Üç fazlı Tamdalga Kontrolsüz Doğrultucunun Giriş Gerilim Ve akım Dalga Şekilleri

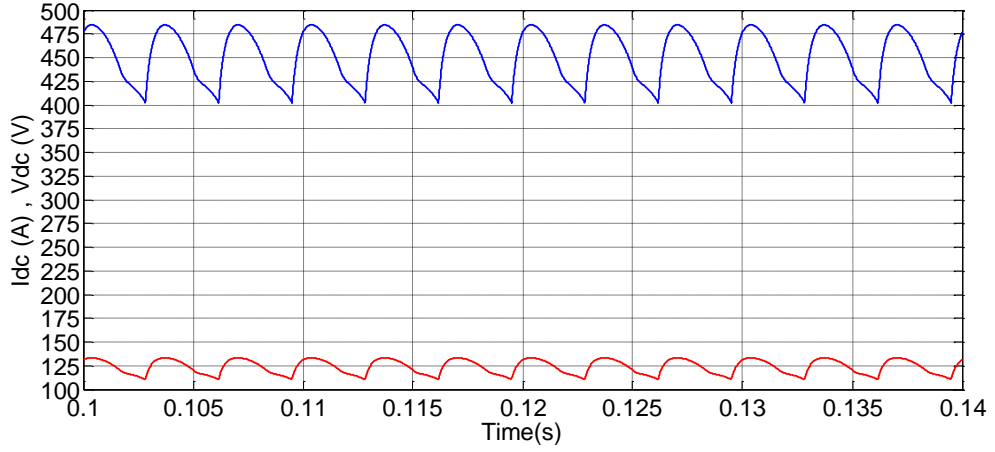
Giriş Akım THDi: %25.3

Giriş Güç Faktörü: 0.95

Bu şartlar altında çıkış akım ve gerilim dalgalılığını azaltmak için doğrultucu çıkışına konan bir kondansatör ve bir bobin sayesinde çıkış gerilim ve akım dalgalılığı azaltılmıştır. Alınan sonuçlar;



Şekil 5. 6 Çıkış Filtreli ve Hat Endüktanslı Üç fazlı Tamdalga Kontrolsüz Doğrultucu



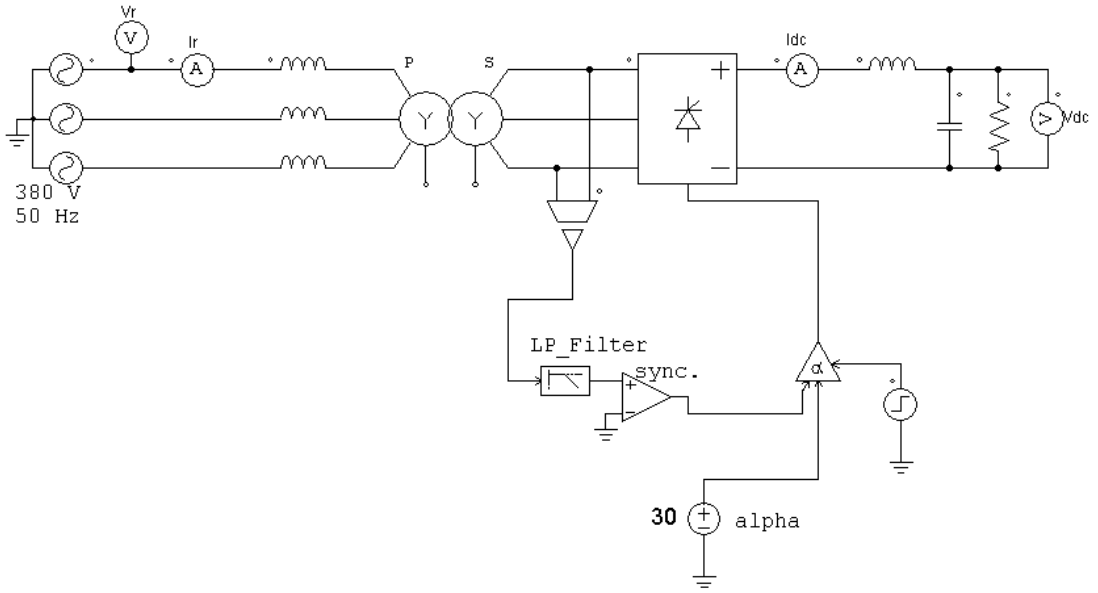
Şekil 5. 7 Çıkış Filtreli ve Hat Endüktanslı Üç fazlı Tamdalga Kontrolsüz Doğrultucunun Çıkış Gerilim Ve akım Dalga Şekilleri

Çıkış Gerilim Ripple: %3

Çıkış Akım Ripple: %8.75

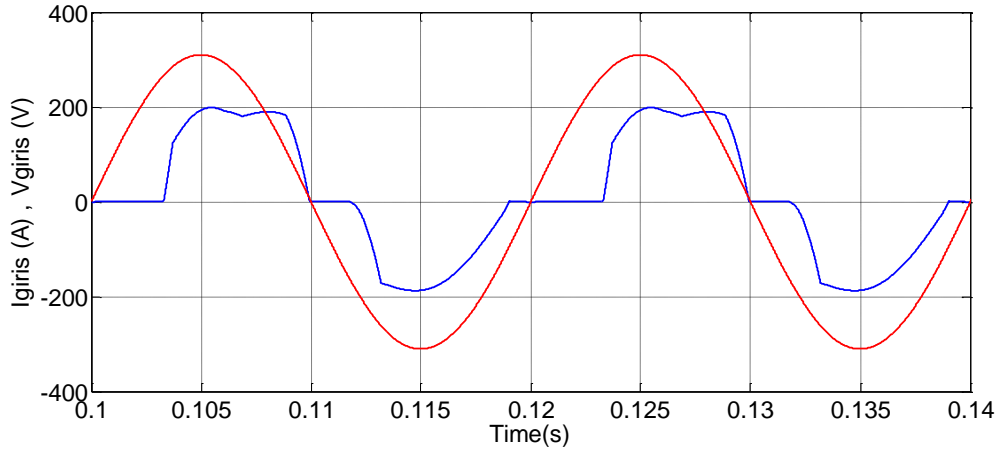
Bu çalışmalardan sonra 6-darbeli kontrollü doğrultucu üzerine simülasyonlar yapılmıştır. Bu simülasyonlardaki amaç; güç elemanlarına uygulanan tetikleme açısına bağlı olarak giriş akımı THDi değerinde ve güç faktöründe değişimleri incelemektir.

6-Darbeli Kontrollü Doğrultucu Simülasyonu:



Şekil 5. 8 Üç fazlı Tamdalga Kontrollü Doğrultucu

$\alpha = 30^\circ$ için Giriş Akım ve Gerilim Dalga Şekilleri



Şekil 5. 9 Üç fazlı Tamdalga Kontrollü Doğrultucunun

Giriş Gerilim ve Akım Dalga Şekilleri

Giriş Akım THDi: %26

Giriş Güç Faktörü: 0.93

$\alpha = 45^\circ$ için

Giriş Akım THDi: %31

Giriş Güç Faktörü: 0.91

$\alpha = 60^\circ$ için

Giriş Akım THDi: %40

Giriş Güç Faktörü: 0.87

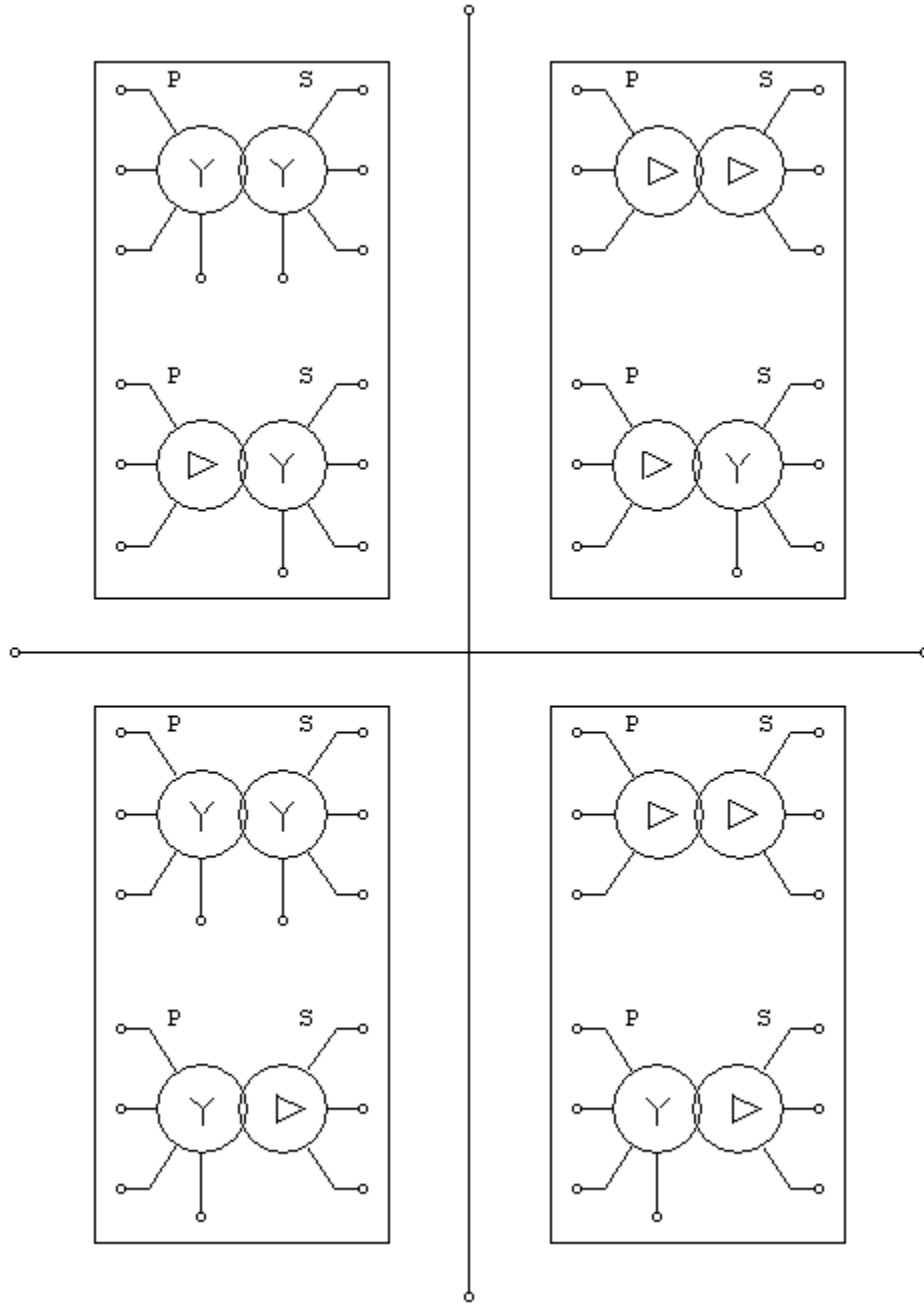
$\alpha = 75^\circ$ için

Giriş Akım THDi: %60

Giriş Güç Faktörü: 0.59

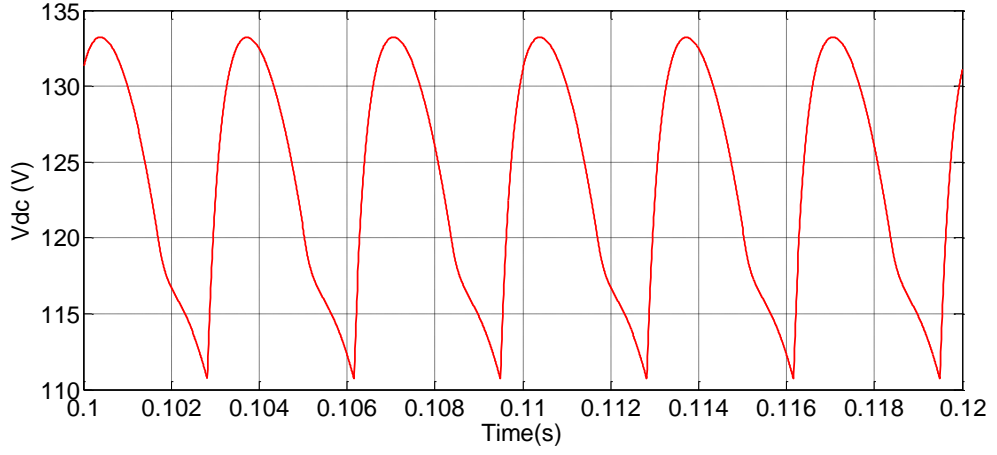
Yukarıda özetlemeye çalışıldığı üzere 6-darbeli kontrollü ve kontrolsüz doğrultucular incelenmiş, analiz edilmiştir. Analiz sonucunda giriş THDi değeri, güç faktörü ve çıkış dalgalılığını azaltmak üzere çalışılmıştır. Burada beklendiği gibi IEEE-519 standardını sağlayan bir yapıya erişilememiştir. Bir sonraki adım olarak çok darbeli doğrultucular incelenmiştir.

12-Darbeli doğrultucularla ilgili literatürde iki temel yapıya rastlanılmıştır. Bunlar seri ve paralel bağlantı yapılmış yapılardır. Buradaki seri ve paralellikten kasıt, iki adet 6-darbeli doğrultucunun çıkışlarının bağlantı biçimidir. 12-Darbeli doğrultucular içerisinde iki adet 6-darbeli doğrultucu barındırmaktadır. Bu iki doğrultucu girişindeki gerilimler arasında faz farkı olması gerekmektedir. Bu problemi çözmek için iki adet transformatör kullanılmaktadır. Primer sargıları şebekeye bağlı olan bu iki transformatörün bağlantı şekilleri aşağıdaki kombinasyonlarda olabilmektedir.

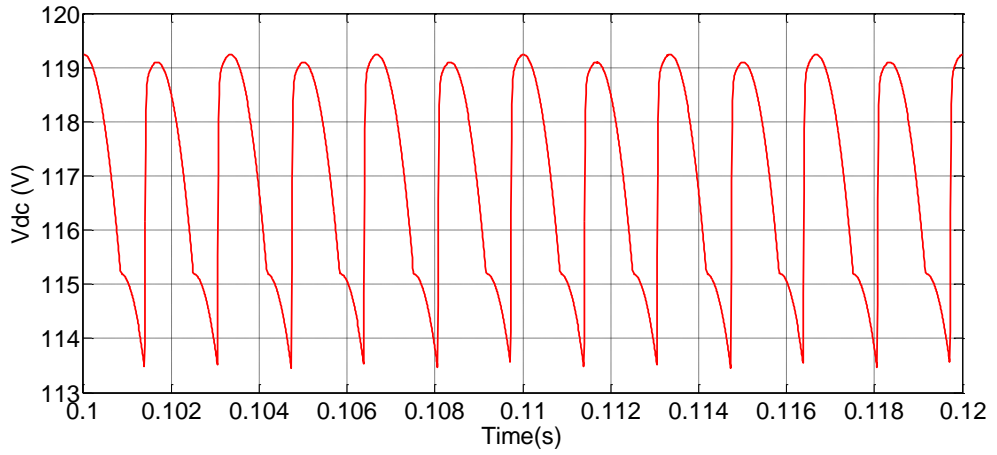


Şekil 5. 10 12 darbeli doğrultucularda kullanılabilecek trafo bağlantı şekilleri

Bu bağlantı şekilleriyle elde edilen transformatör çıkışındaki gerilimler arasında 30° farkı oluşmaktadır. Bu faz farkından ötürü çıkış gerilimindeki dalgalılıkta azalma görülmektedir. 6-darbeli doğrultucuların çıkış geriliminde bir periyot süresince 6 adet tepe görülür. 12-darbeli doğrultucu çıkış geriliminde ise bir periyotta 12 adet tepe görülmektedir.



Şekil 5. 11 Altı Darbeli Doğrultucu Çıkış Gerilimi Dalga Şekli



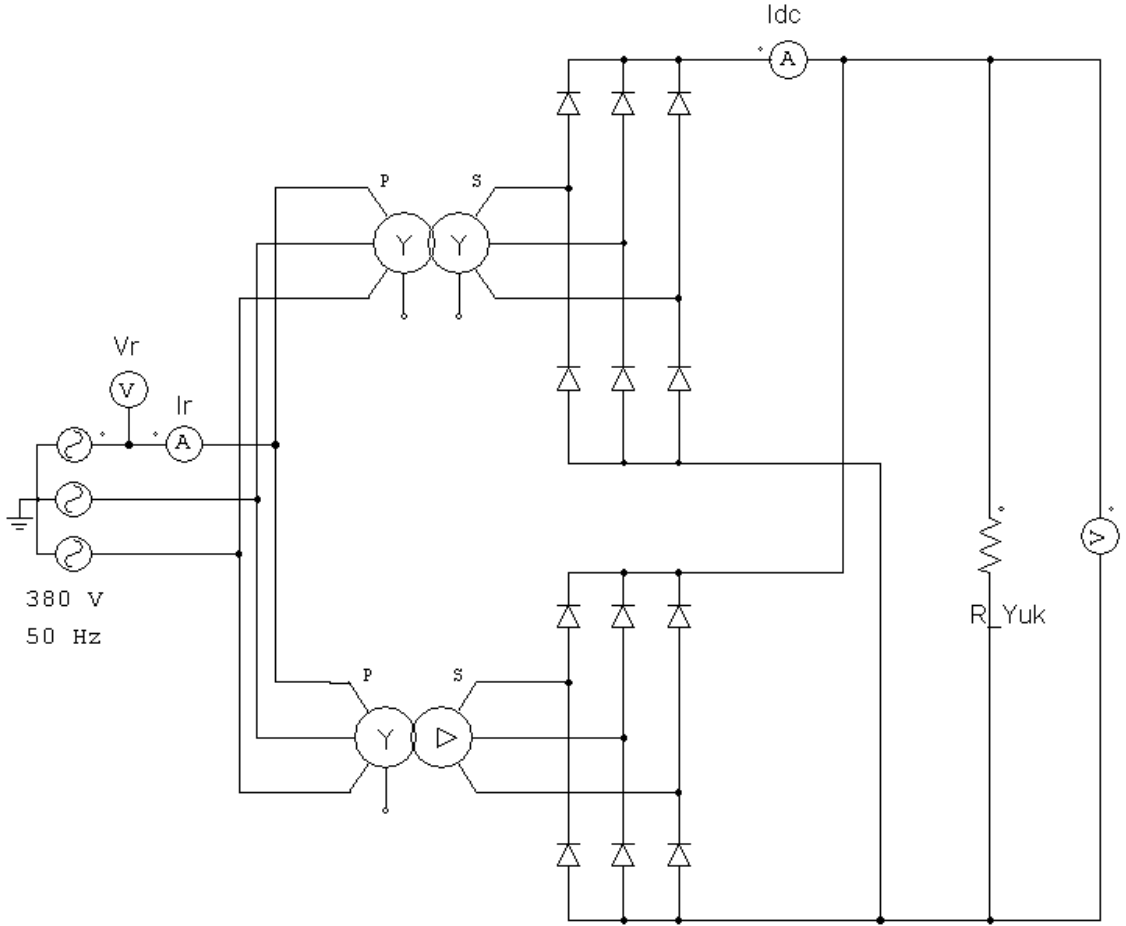
Şekil 5. 12 On iki Darbeli Doğrultucu Çıkış Gerilimi Dalga Şekli

12-Darbeli kontrolsüz Paralel Tip Doğrultucu Simülasyonu

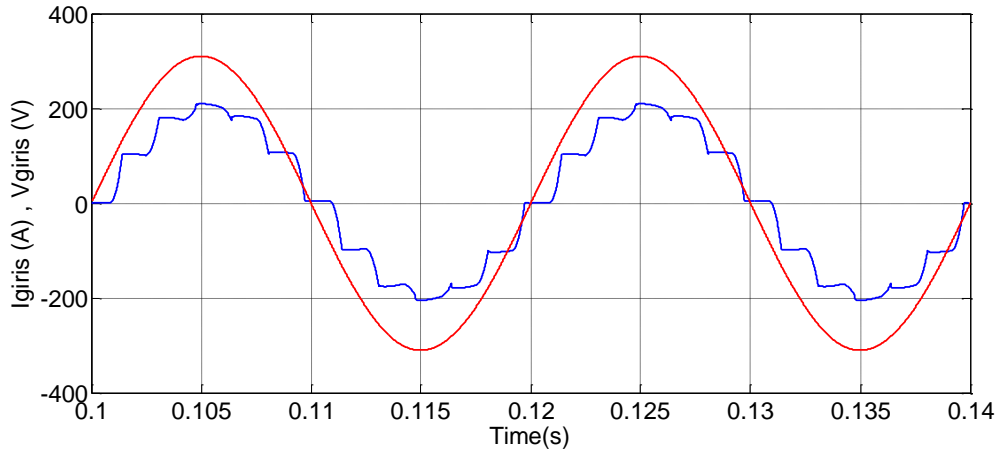
Bu simülasyonda;

Çıkış Gerilimi: 110Vdc

Çıkış Akımı: 800A şartlarını sağlayacak temel bir doğrultucu devresi üzerinde çalışmalar yapılmıştır. Hat endüktansı $L_s=0$, Çıkış endüktansı $L_d=0$, Transformatörlerin çevirme oranı 4.5:1 ve 4.5:1.73 olarak alınmıştır.



Şekil 5. 13 12-Darbeleri kontrolsüz Paralel Tip Doğrultucu



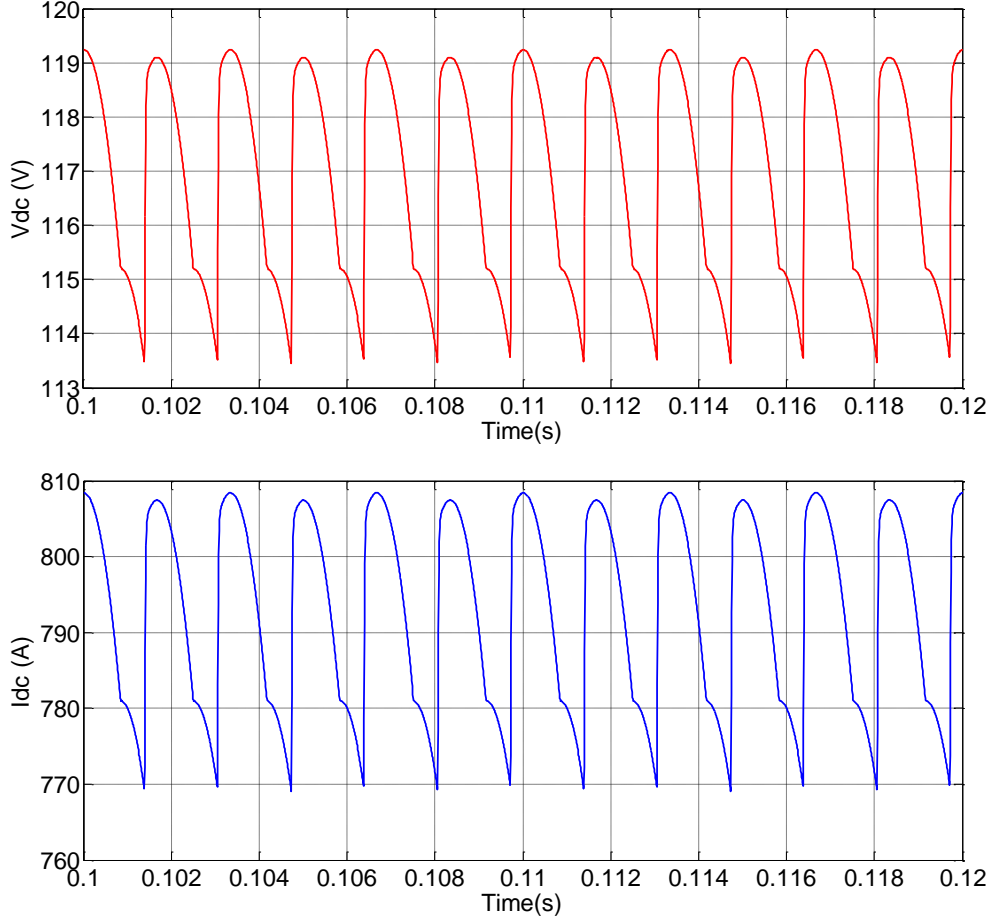
Şekil 5. 14 12-Darbeleri kontrolsüz Paralel Tip Doğrultucu

Giriş Gerilim ve Akım Dalga Şekilleri

Giriş Akım THDi: %12

Giriş Güç Faktörü: 0.98

Kontrolsüz doğrultucularda g¼c elemanı tetikleme açısı 0 olduğundan g¼c fakt¼r¼n¼n değeri y¼ksek çıkmaktadır.



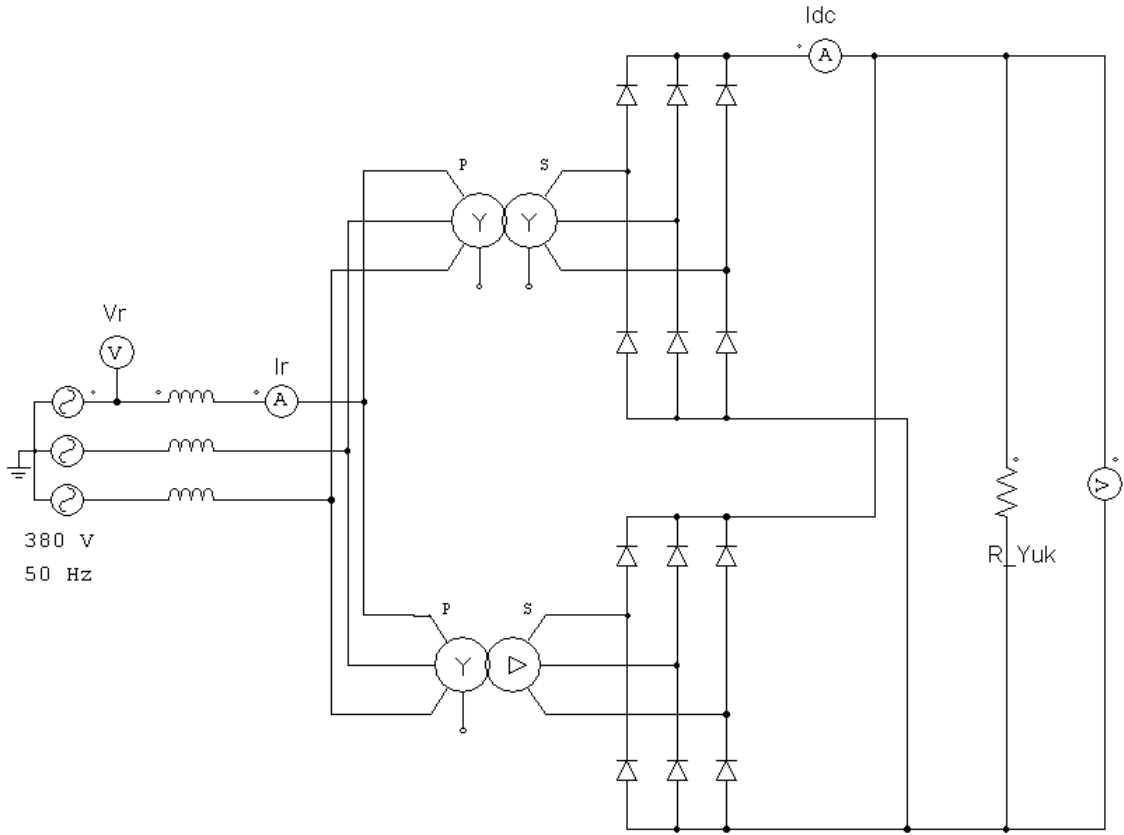
Şekil 5. 15 Darbeli kontrols¼z Paralel Tıp Doğrultucu

Çıkış Gerilim ve Akım Dalga Şekilleri

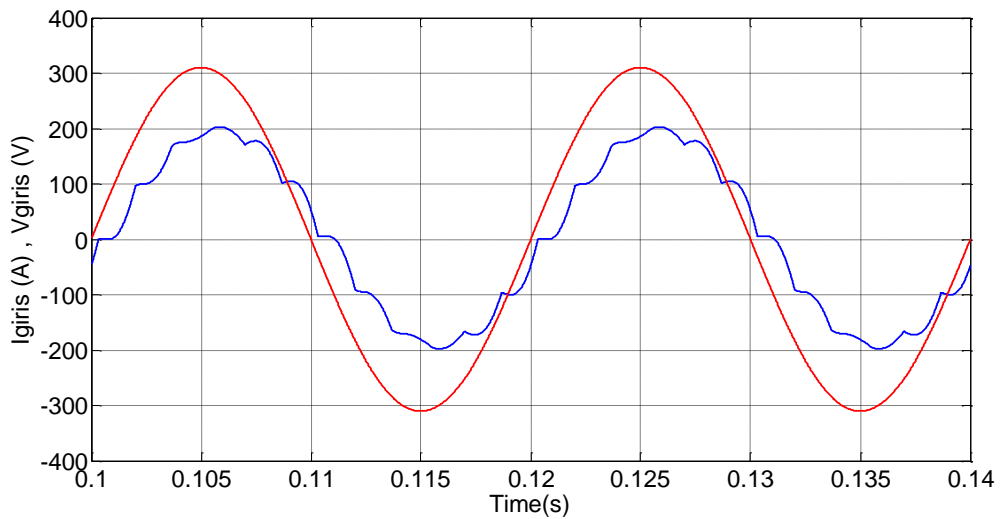
Çıkış Gerilim Ripple: %5.2

Çıkış Akım Ripple: %4.875

Doğrultucu Hattına konan 0.5mH değerinde endüktanslar ile Giriş Akım THDi değeri iyileştirmesi yapmak mümkün görünmüştür. Alınan sonuçlar;



Şekil 5. 16 Hat endüktanslı 12-Darbeleri kontrolsüz Paralel Tip Doğrultucu



Şekil 5. 17 Hat endüktanslı 12-Darbeleri kontrolsüz Paralel Tip Doğrultucunun

Giriş Gerilim Ve Akım Dalga Şekilleri

Giriş Akım THDi: %7.5

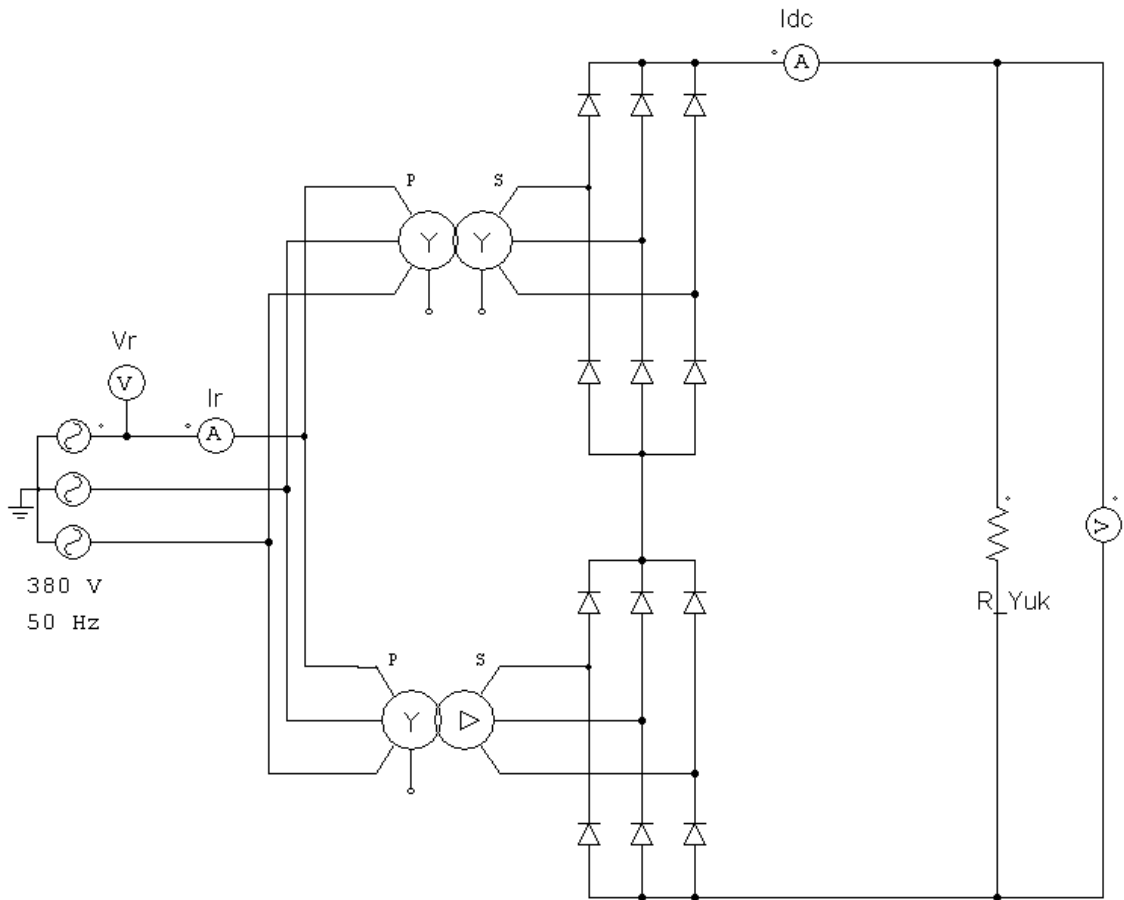
Giriş Güç Faktörü: 0.96

12-Darbeli kontrolsüz Seri Tip Doğrultucu Simülasyonu

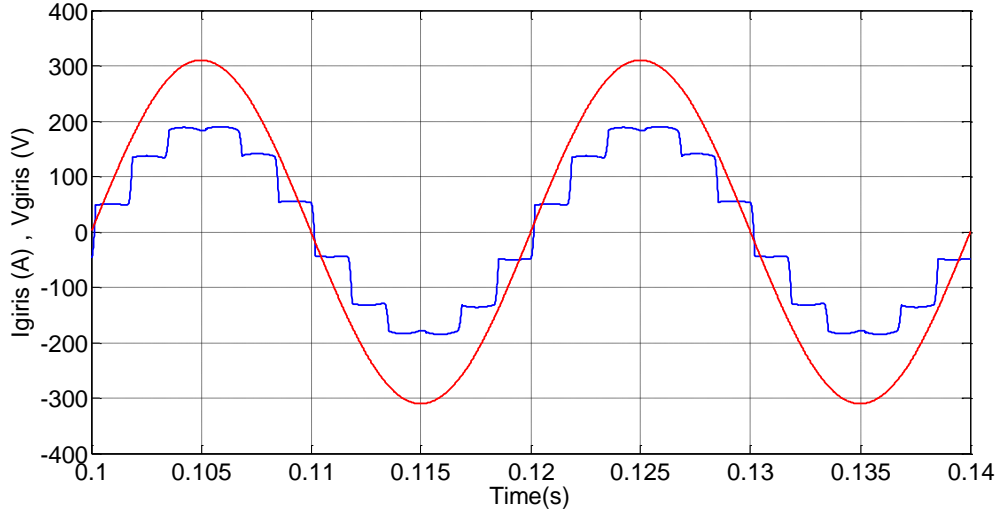
Bu simülasyonda;

Çıkış Gerilimi: 110Vdc

Çıkış Akımı: 800A şartlarını sağlayacak temel bir doğrultucu devresi üzerinde çalışmalar yapılmıştır. Hat endüktansı $L_s=0$, Çıkış endüktansı $L_d=0$, Transformatörlerin çevirme oranı 9:1 ve 9:1.73 olarak alınmıştır.



Şekil 5. 18 Darbeli kontrolsüz Seri Tip Doğrultucu



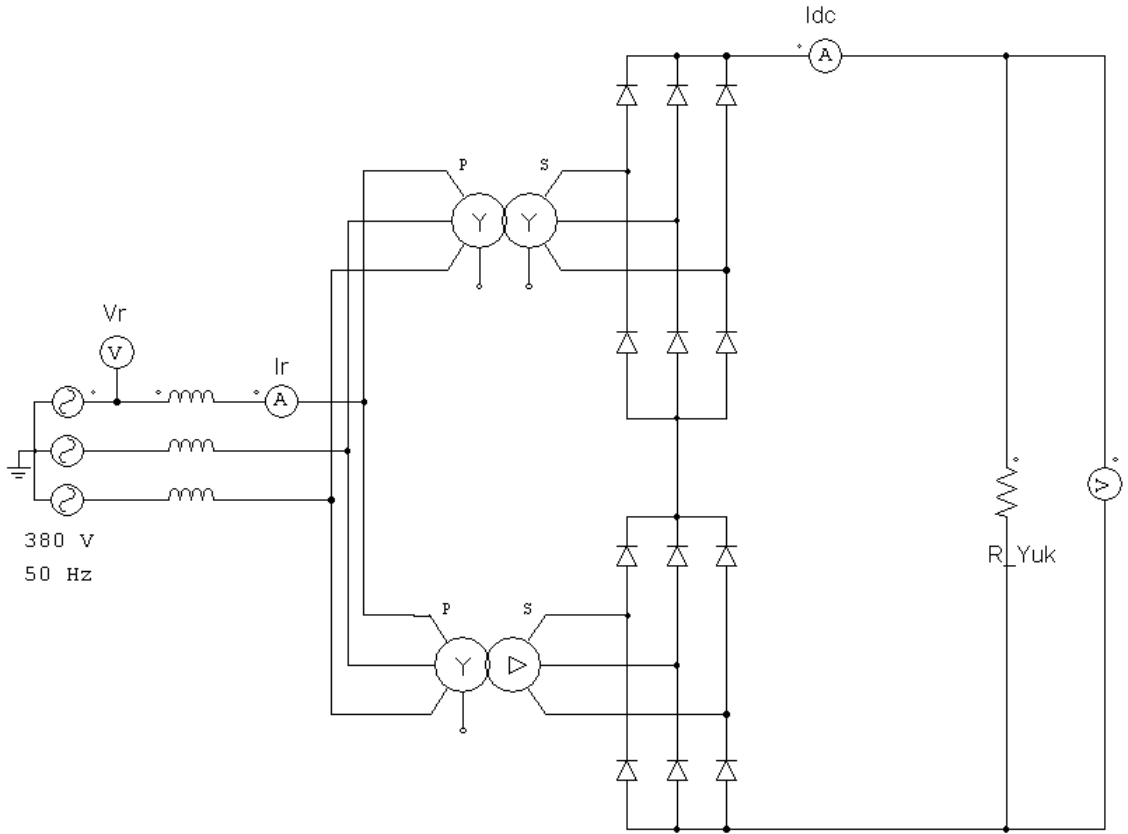
Şekil 5. 19 12-Darbeli kontrolsüz Seri Tip Doğrultucunun

Giriş Gerilim Ve Akım Dalga Şekilleri

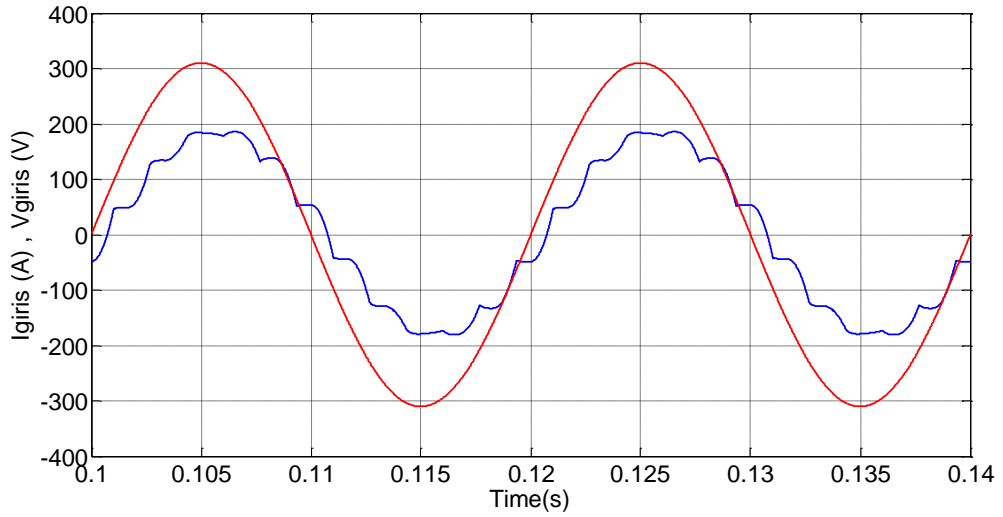
Giriş Akım THDi: %14

Giriş Güç Faktörü: 0.99

Doğrultucu Hattına konan 0.5mH değerinde endüktanslar ile Giriş Akım THDi değeri iyileştirmesi yapmak mümkün görünmüştür. Alınan sonuçlar;



Şekil 5. 20 Hat endüktanslı 12-Darbeleri kontrolsüz Seri Tip Doğrultucu



Şekil 5. 21 12-Darbeleri kontrolsüz Seri Tip Doğrultucunun

Giriş Gerilim Ve Akım Dalga Şekilleri

Giriş Akım THDi: %8.4

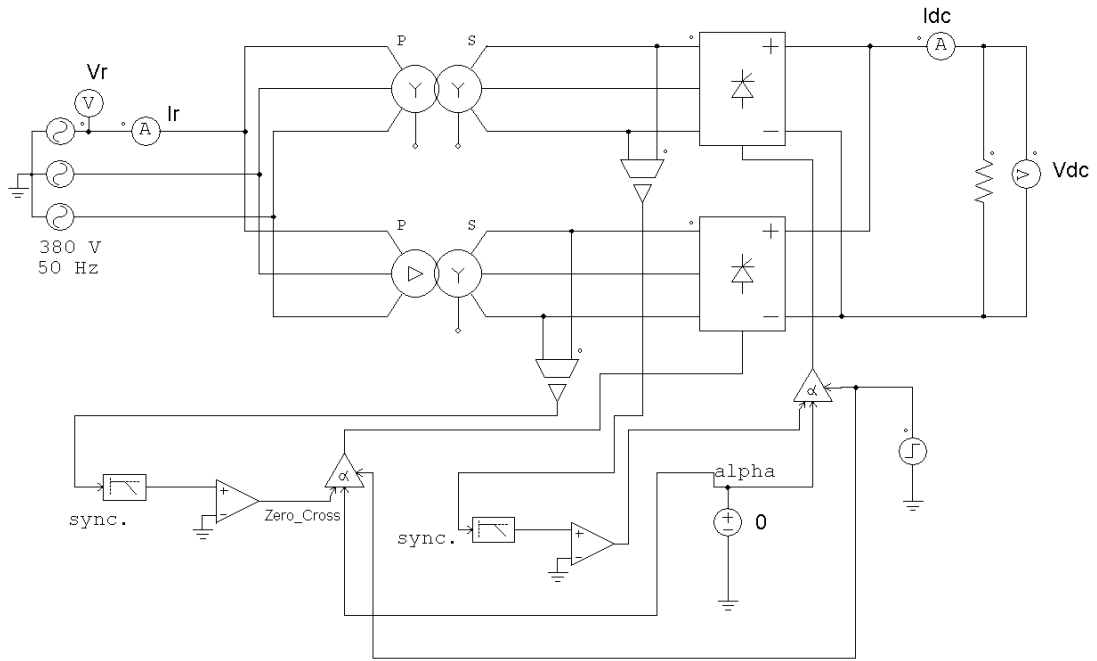
Giriş Güç Faktörü: 0.96

Bu çalışmalardan sonra 12-darbeleri kontrollü doğrultucu üzerine simülasyonlar yapılmıştır. Bu simülasyonlardaki amaç güç elemanlarına uygulanan tetikleme açısına bağlı olarak giriş akımı THDi değerinde ve güç faktöründe değişimleri incelemektir.

Çıkış Gerilimi: 110Vdc

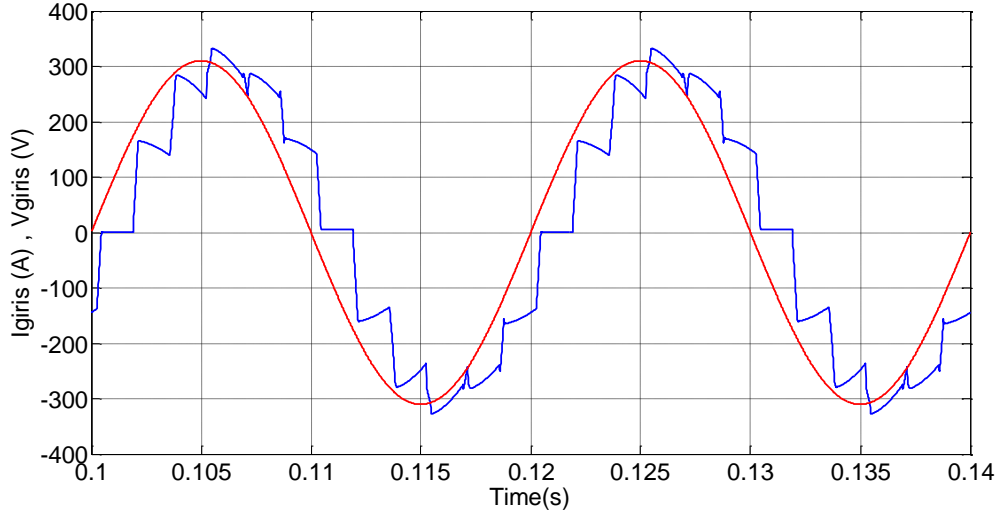
Çıkış Akımı: 800A şartlarını sağlayacak temel bir doğrultucu devresi üzerinde çalışmalar yapılmıştır. Hat endüktansı $L_s=0$, Çıkış endüktansı $L_d=0$, Transformatörlerin çevirme oranı 4.1:1 ve 4.1:1.73 olarak alınmıştır.

Paralel Tip 12-Darbeleri Kontrollü Doğrultucu Simülasyonu:



Şekil 5. 22 Paralel Tip 12-Darbeleri Kontrollü Doğrultucu

$\alpha = 30^\circ$ için Giriş Akım ve Gerilim Dalga Şekilleri



Şekil 5. 23 Paralel Tip 12-Darbeleri Kontrollü Doğrultucunun

Giriş Gerilim Ve Akım Dalga Şekli

Giriş Akım THDi: %14.8

Giriş Güç Faktörü: 0.92

$\alpha = 45^\circ$ için

Giriş Akım THDi: %17.5

Giriş Güç Faktörü: 0.80

$\alpha = 60^\circ$ için

Giriş Akım THDi: %22.2

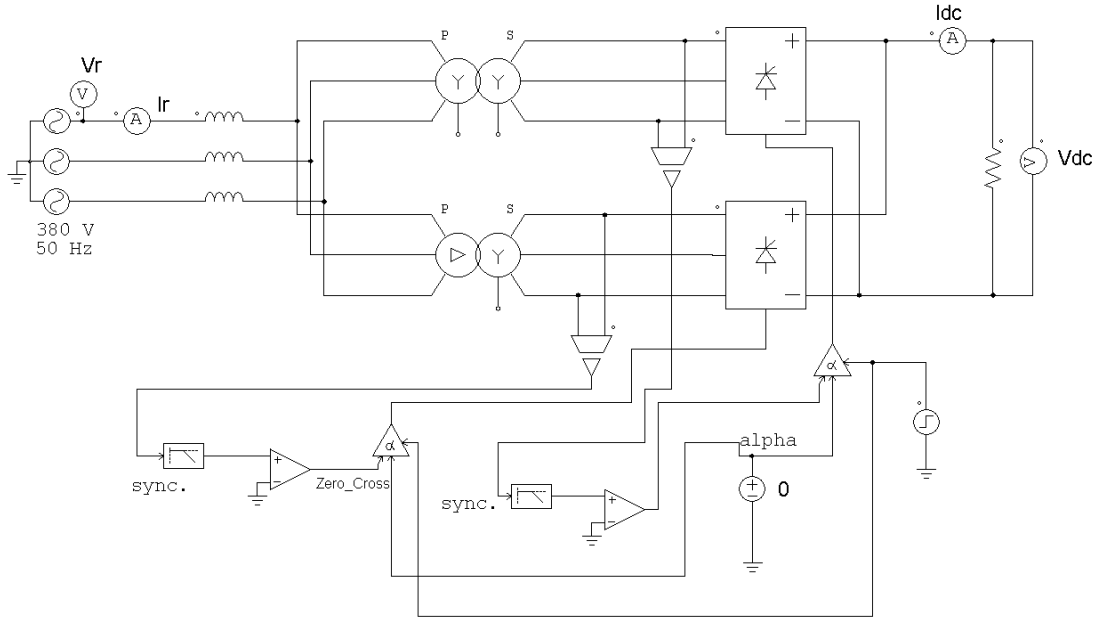
Giriş Güç Faktörü: 0.64

$\alpha = 75^\circ$ için

Giriş Akım THDi: %33

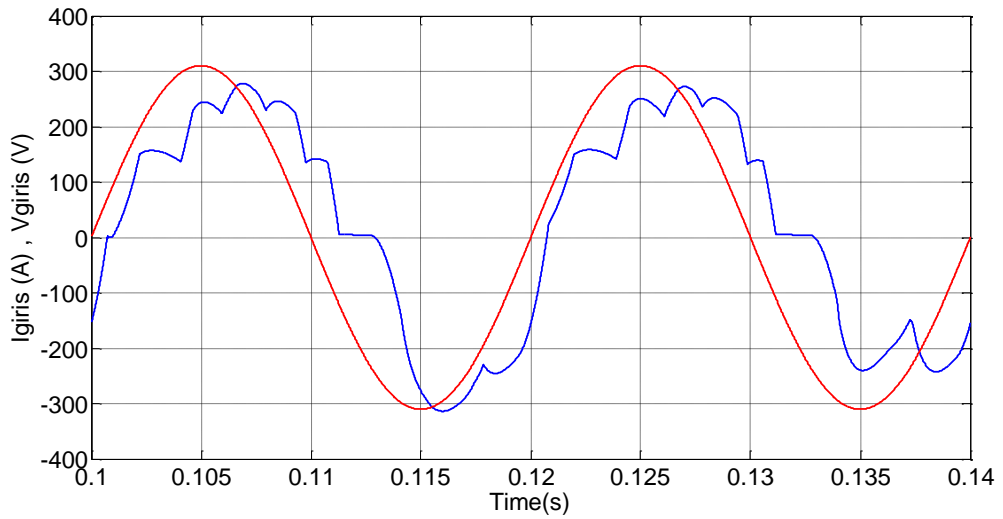
Giriş Güç Faktörü: 0.43

Doğrultucu Hattına konan 0.5mH değerinde endüktanslar ile Giriş Akım THDi değeri iyileştirmesi yapmak mümkün görünmüştür. Alınan sonuçlar;



Şekil 5. 24 Hat endüktanslı Paralel Tip 12-Darbeleri Kontrollü Doğrultucu

$\alpha = 30^\circ$ için Giriş Akım ve Gerilim Dalga Şekilleri



Şekil 5. 25 Hat endüktanslı Paralel Tip 12-Darbeleri Kontrollü Doğrultucunun

$\alpha = 30^\circ$ için Giriş Gerilim ve Akım Dalga Şekilleri

Giriş Akım THDi: %21

Giriş Güç Faktörü: 0.79

$\alpha = 45^\circ$ için

Giriş Akım THDi: %27

Giriş Güç Faktörü: 0.75

$\alpha = 60^\circ$ için

Giriş Akım THDi: %22

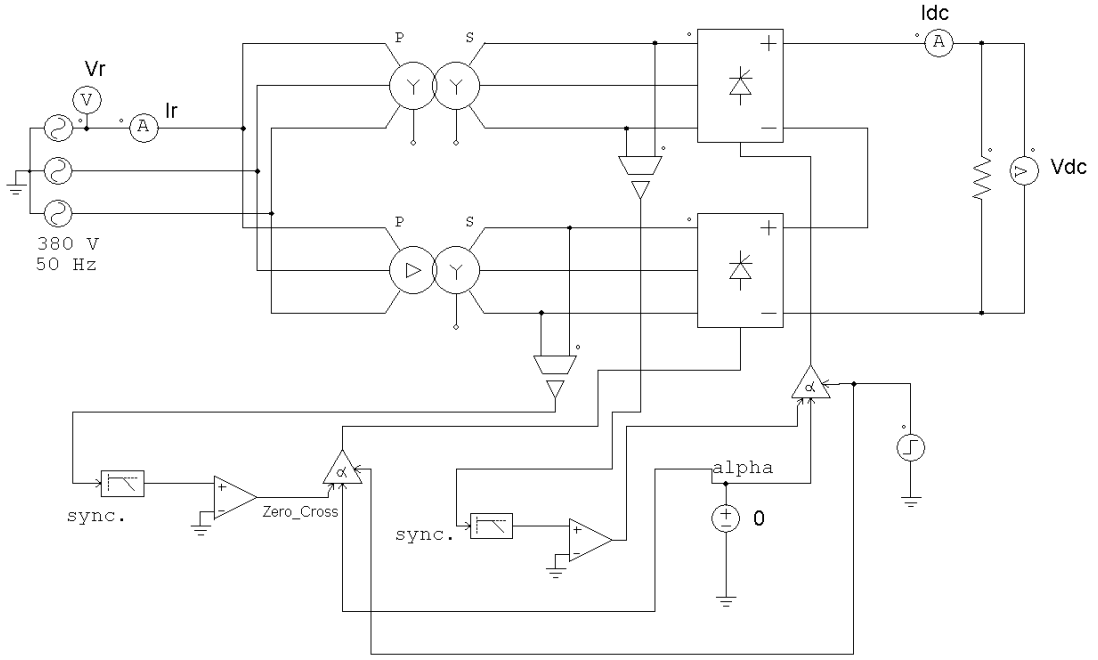
Giriş Güç Faktörü: 0.65

$\alpha = 75^\circ$ için

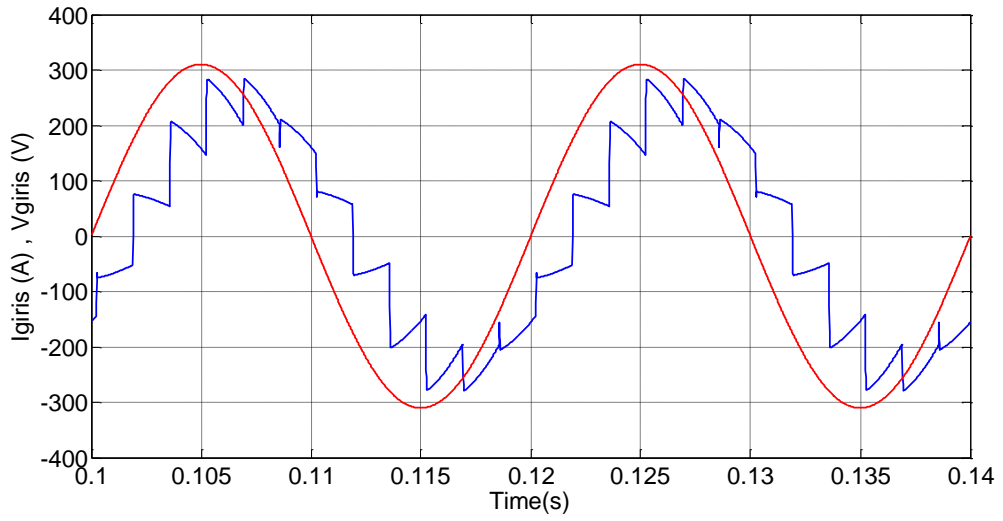
Giriş Akım THDi: %20

Giriş Güç Faktörü: 0.43

Paralel tip 12 darbeleri kontrollü doğrultucu ile ilgili yapılan simülasyonlar seri tip 12 darbeleri kontrollü doğrultucu içinde yapılması ön görülmüştür.



Şekil 5. 26 Seri Tip 12-Darbeleri Kontrollü Doğrultucunun $\alpha = 30^\circ$ için Giriş Akım ve Gerilim Dalga Şekilleri



Şekil 5. 27 Seri Tip 12-Darbeleri Kontrollü Doğrultucunun $\alpha = 30^\circ$ için Giriş Gerilim ve Akım Dalga Şekilleri

Giriş Akım THDi: %18

Giriş Güç Faktörü: 0.81

$\alpha = 45^\circ$ için

Giriş Akım THDi: %23

Giriş Güç Faktörü: 0.65

$\alpha = 60^\circ$ için

Giriş Akım THDi: %34

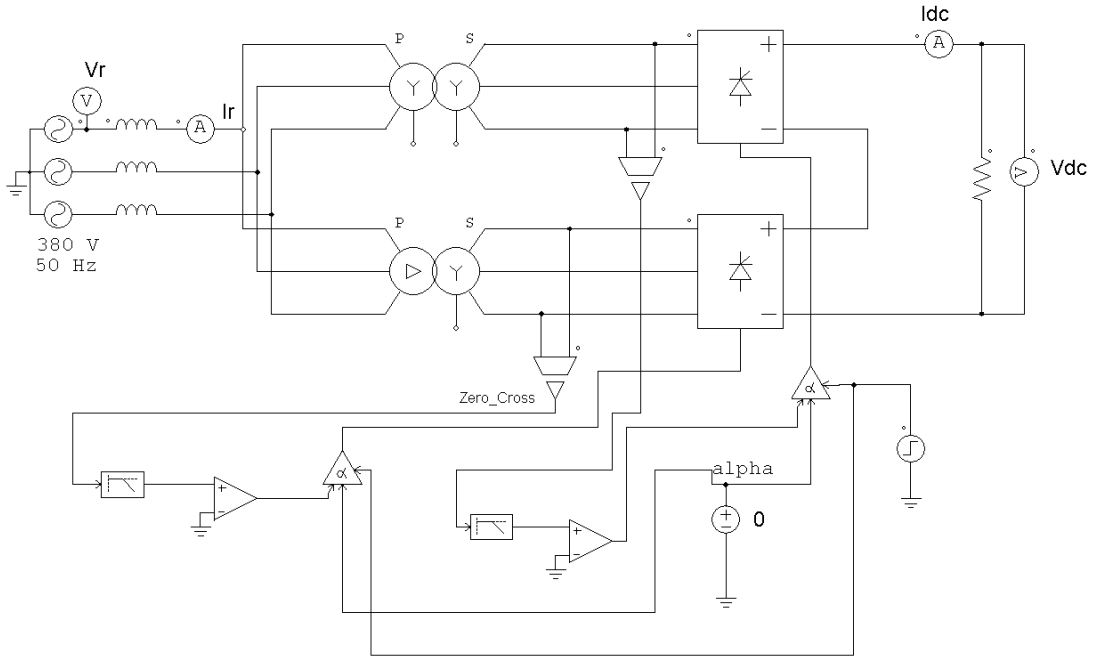
Giriş Güç Faktörü: 0.44

$\alpha = 75^\circ$ için

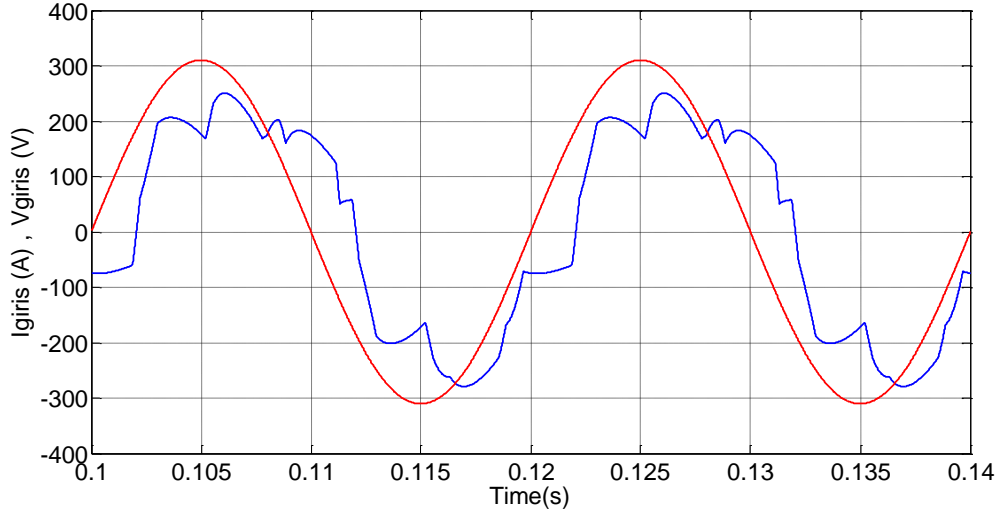
Giriş Akım THDi: %71

Giriş Güç Faktörü: 0.22

Doğrultucu Hattına konan 0.5mH değerinde endüktanslar ile Giriş Akım THDi değeri iyileştirmesi yapmak mümkün görünmüştür. Alınan sonuçlar;



Şekil 5. 28 Hat endüktanslı Seri Tip 12-Darbeleri Kontrollü Doğrultucu



Şekil 5. 29 Hat endüktanslı Seri Tip 12-Darbeleri Kontrollü Doğrultucunun $\alpha = 30^\circ$ için Giriş Akım ve Gerilim Dalga Şekilleri

Giriş Akım THDi: %25

Giriş Güç Faktörü: 0.72

$\alpha = 45^\circ$ için

Giriş Akım THDi: %31

Giriş Güç Faktörü: 0.60

$\alpha = 60^\circ$ için

Giriş Akım THDi: %22

Giriş Güç Faktörü: 0.37

$\alpha = 75^\circ$ için

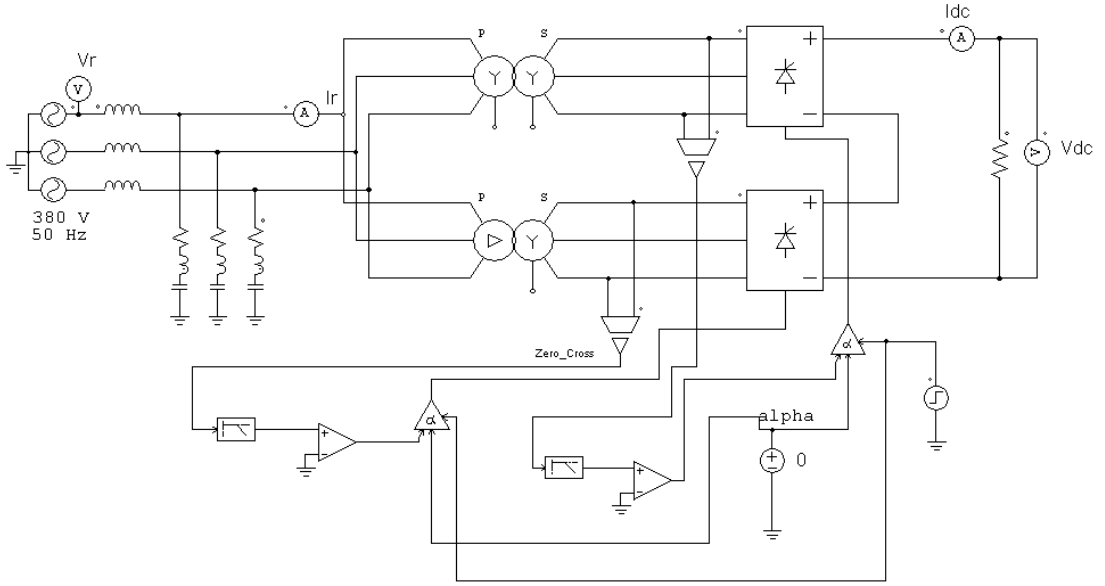
Giriş Akım THDi: %56

Giriş Güç Faktörü: 0.44

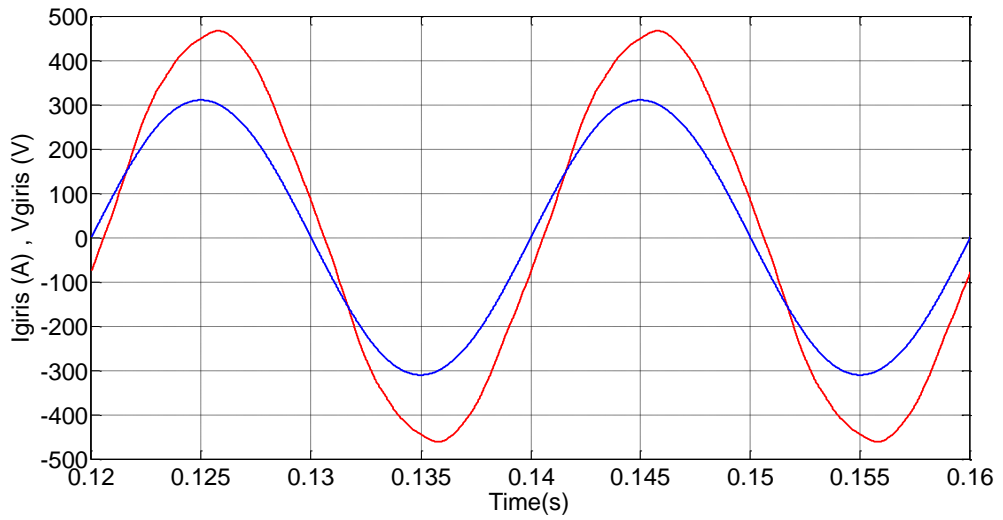
12 darbeli seri tip doğrultucular, paralel tip 12 darbeli doğrultucularla Şebekeden çektikleri akımdaki toplam harmonik distorsiyonu ve g faktörü açısından kıyaslandığında paralel tip doğrultucuların Şebekeden çektikleri akımın THD oranın daha düşük olduğu gözlemlenmiştir. Tetikleme açısına bağlı olarak g faktöründeki değişim kıyaslandığında ise yine paralel tip doğrultucuların bir adım nde olduğu görülmektedir.

Tezin amacında belirttiğiği üzere giriş gerilimi $\pm 10\%$ deđiŐtiđinde çıkış gerilimi 122V, giriş akım THDi değerisi $< 5\%$ ve g faktörü > 0.95 olan devrenin alıŐma Şartlarını incelediğimizde α kontrol açısının hangi aralıkta kontrol edileceği sorusunun cevabı olarak yapılan çalışmalarda α açısının 20° ile 44° değerleri arasında olacağı belirlenmiştir. Şebeke geriliminin $+10\%$ artması durumunda α açısı maksimum değerinde olur. Şebeke gerilimi -10% düŐmesi durumunda ise α minimum değerinde olmaktadır. α açısının minimum değerini simülasyonlarda sıfır derece alınabilirdi ancak uygulamada emniyet için 20° lik bir aının bırakılması gerektiği üzerine bilgilere literatürde rastlanılmıştır. Bu sebepten minimum α açısı olarak 20° alınmıştır ve bu Őartlarda hedeflenen g faktörü değerine ulaŐmak üzere filtre tasarımı yapılmıştır.

Bu noktadan itibaren paralel tip 12 darbeli doğrultucular üzerine standartları sağlamak adına çözümler aranmıştır. Doğrultucu giriŐine pasif filtre grupları tasarlanıp, tetikleme açısı her ne olursa olsun g faktörünün 0.95 in üzerinde olması garanti edilecektir. Ayrıca Şebekeden çekilen akımdaki THDi değerini her koŐulda 5% 'ten küçük olması üzerine çalışmalar yapılacaktır. AŞağıda sırasıyla ilgili çalışmalar ve sonuçları yer almaktadır.



Şekil 5. 30 Giriş Filtreli ve Hat endüktanslı Paralel Tip 12-Darbeli Kontrollü Doğrultucu



Şekil 5. 31 Giriş Filtreli ve Hat endüktanslı Paralel Tip 12-Darbeli Kontrollü Doğrultucunun $\alpha = 20^\circ$ için Giriş Gerilim ve Akım Dalga Şekilleri

$\alpha = 20^\circ$ için

Giriş Akım THDi: %3

Giriş Güç Faktörü: 0.99

$\alpha = 30^\circ$ için doğrultucu girişinde şebekeden faz başına,

Görünür Güç=41423 VA

Aktif Güç=34956 W

Reaktif güç= 22224 VAr olarak hesaplanır. Bu reaktif gücü kompanze edecek filtre tasarlandığında,

Giriş Akım THDi: %2.7

Giriş Güç Faktörü: 0.99

$\alpha = 40^\circ$ için doğrultucu girişinde şebekeden faz başına,

Görünür Güç=43266 VA

Aktif Güç=35772 W

Reaktif güç= 24337 VAr olarak hesaplanır. Bu reaktif gücü kompanze edecek filtre tasarlandığında,

Giriş Akım THDi: %3.56

Giriş Güç Faktörü: 0.997

$\alpha = 44^\circ$ için doğrultucu girişinde şebekeden faz başına,

Görünür Güç=44560 VA

Aktif Güç=35936 W

Reaktif güç= 26347 VAr olarak hesaplanır. Bu reaktif gücü kompanze edecek filtre tasarlandığında,

Giriş Akım THDi: %3.88

Giriş Güç Faktörü: 0.994

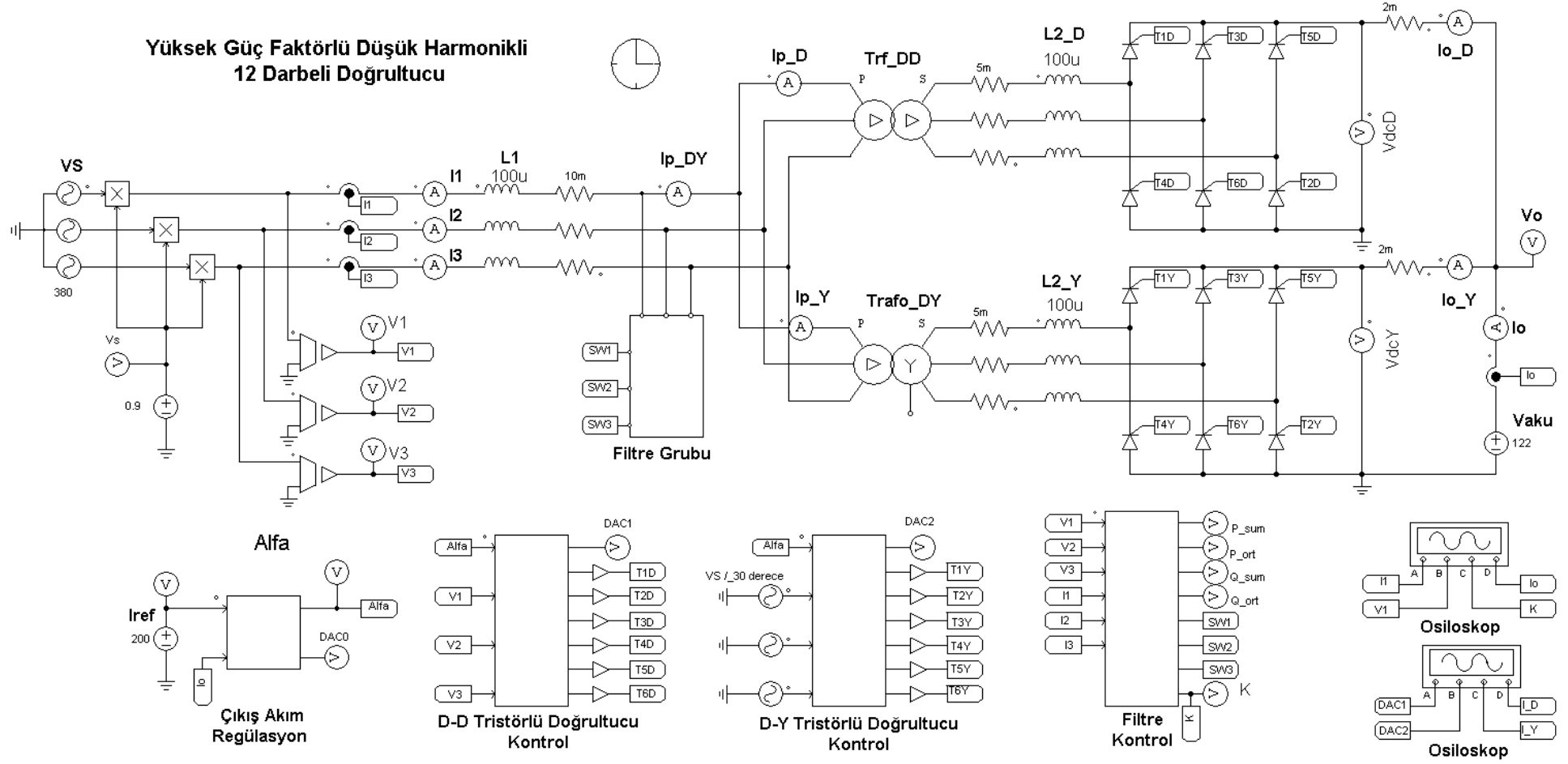
şebeke geriliminde $\pm\%10$ değişim olduğunda doğrultucu devremizde kontrol açımız 20° ile 44° arasında değiştirilerek çıkış gerilimi 122V değerinde regüle ediliyor. Bu durumlara ilişkin filtre tasarımında kontrol açısına bağlı olarak çekilen reaktif güç hesaplanmıştır. Hesaplanan bu değerini kompanze edecek kondansatör değerini

hesaplanarak bulunmuştur. Daha sonrasında filtre köşe frekansı 600Hz olacak şekilde endüktans değeri hesaplanmıştır. Burada köşe frekansının 600Hz seçilmesinin sebebi, çok darbeli doğrultucuların $n \pm 1$ nolu harmonik akımlar ürettiği gözlemlenmiştir. Burada n tamsayı ve m doğrultucudaki darbe sayısıdır. Örneğin 6 darbeli bir doğrultucuda 5, 7, 11, 13, 17, 19... nolu harmonikler bulunmaktadır. 6 darbeli bir doğrultucuda 5. harmoniği filtre etmek için 250 Hz'e ayarlanmış L ve C elemanları kullanılır. Her bir harmonik için ayrı ayrı filtre kullanılabilir. Filtre elemanlarının sayısını azaltmak için köşe frekansı merkez seçilebilir. Örneğin 11 ve 13 nolu harmoniklerin bastırılması için filtrenin merkez frekansı 12. harmoniğe denk getirilerek, 11. ve 13. harmonik için tek bir filtre kullanılır. Filtrenin toplam C değerine göre şebekeden çekilen toplam kapasitif güç değişir. 12. Harmonik 600Hz'e denk geldiğinden filtre köşe frekansı 600Hz olarak seçilmiştir. Simülasyonda 12 darbeli doğrultucu kullanılarak 5. Ve 7. Harmonikler elemine edilmiştir. 11. Ve 13. Harmonikler içinde pasif filtre tasarlanmıştır. Filtre tasarımını geniş bir kontrol aralığı içinde yapmak mümkündür. Bu tezde çıkış gerilimi 122V olacağı ve giriş geriliminde $\pm\%10$ dalgalanma olacağından kontrol açısı 20 ile 44 arasında seçilmiştir. Bu aralık için tek bir pasif filtre ile IEEE-519 şartları sağlanmıştır. Giriş güç faktörü 0.95 değerinin üzerinde tutulmuştur ve giriş akım THDi değeri %5'i geçmesine müsaade verilmemiştir.

Yukarıda da belirtildiği gibi çok darbeli kontrollü ve kontrolsüz doğrultucular incelenmiş, analiz edilmiştir. Analiz sonucunda giriş THDi değeri, güç faktörü ve çıkış dalgalılığını azaltmak üzere çalışılmıştır. Pasif filtre tasarımıyla beklenen değerlere erişilmiştir. Simülasyonları gerçekleştirilen 110V/400A doğrultucu sisteminin şeması Şekil 5. 33'de gösterilmiştir.

12 darbeli doğrultucuda $\Delta-\Delta$ ve $\Delta-Y$ transformatörler (Trafo_DD, Trafo_DY) kullanılmıştır. 6 darbeli tristörlü doğrultucular paralel bağlanmıştır. Her iki doğrultucu çıkış akımını paylaşmaktadır.

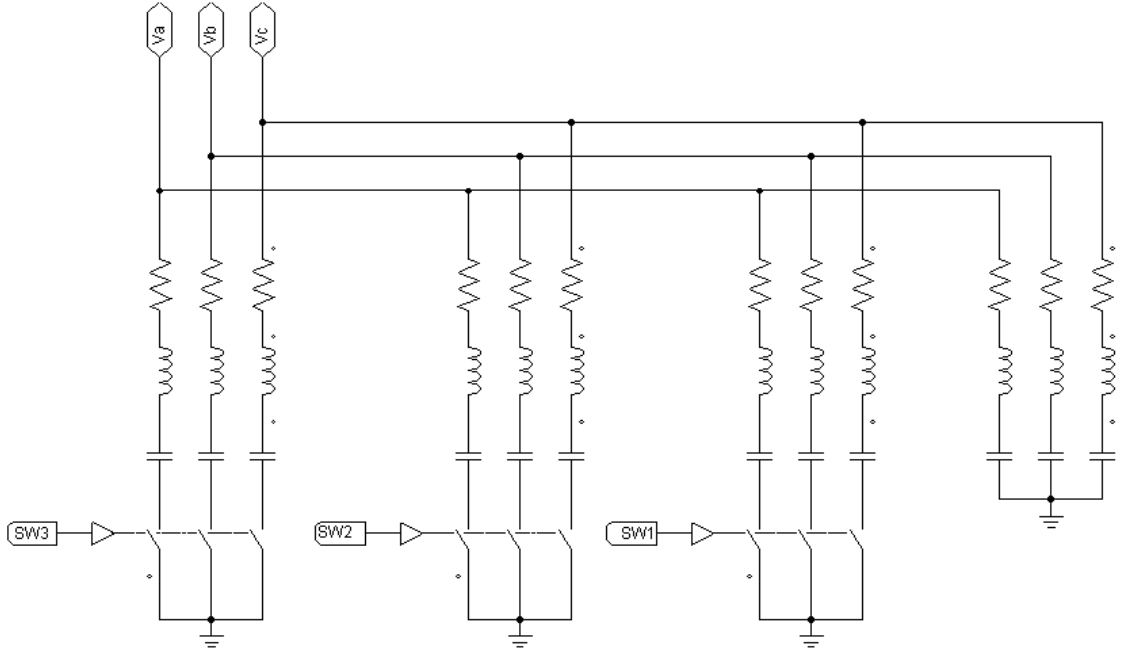
Şekil 5. 32 Doğrultucu sisteminin devre şeması



Doğrultucu çıkışındaki akü gerilimi 110V ile 122V arasında değişmektedir. Değişken akü gerilimi altında, çıkış akımı 0-400A arasında ayarlanmaktadır. Δ - Δ ve Δ -Y transformatörlerin çıkışları ile 6 darbeli doğrultucular arasında L2 filtre elemanları (L2_D, L2_Y) kullanılmıştır. Doğrultucuların tetikleme sinyallerinin üretilmesi için *D-D Tristörlü Doğrultucu Kontrol* ve *D-Y Tristörlü Doğrultucu Kontrol* blokları kullanılmıştır. Kapalı çevrim çıkış akımı kontrolü için *Çıkış Akım Regülasyon* bloğu kullanılmıştır.

Doğrultucuda THD ve PF şartlarını sağlayan filtre elemanları simülasyonlar ile tespit edilmiştir. Filtre elemanları L1, L2 ve Filtre Grubundan oluşmaktadır. L1 ve L2 seri filtre elemanlarıdır. Reaktif kompanzasyon ihtiyacına göre Filtre Grubu devreye alınmaktadır. 3 farklı koldan oluşan Filtre Grubu elemanları ile $2^3=8$ kademe elde edilmektedir. L1 ve L2 filtrelerinin yüksek değerli seçilmesi filtrenin etkinliğini artırmaktadır. Fakat maliyetin artmasına ve gerilim düşümüne yol açmaktadır. Çıkış akımının artması ile transformatör giriş gerilimi azalmaktadır. Filtre elemanlarının değerleri transformatörlerin dönüştürme oranlarını etkilemektedir. L1 ve L2 elemanları üzerindeki gerilim düşümünün nominal çalışmada şebeke geriliminin %10'undan küçük olması hedeflenmiştir. Filtre elemanlarının seçimi konusunda çok sayıda simülasyon ve analiz yapılmıştır. 12 darbeli doğrultucuda kullanılan transformatörlerin dönüştürme oranları şebeke geriliminin minimum değerinde ve çıkış akımının maksimum değerinde yeterli gerilimi sağlayacak şekilde belirlenmiştir. Şebeke ile transformatörler arasında L1 filtre endüktansı bulunmaktadır. Δ - Δ transformatörün dönüştürme oranı 3.25, Δ -Y transformatörün dönüştürme oranı 5.63 seçilmiştir. Δ - Δ transformatörün primerine (fazlararası) 380V uygulandığında sekonderde (fazlararası) 117V elde edilmektedir. L1 ile transformatörlerin primeri arasında kullanılan Filtre Grubu Şekil 2'de gösterilmiştir. 3 adet koldan oluşan Filtre Grubu 12 darbeli tristörlü doğrultucunun şebekeden çektiği 11. ve 13. harmonikleri zayıflatmak ve reaktif gücü azaltmak amacıyla kullanılmıştır. Her bir kol 11. harmoniğe ayarlanmıştır. Kolların devreye alınması simülasyonda anahtarlar ile yapılmıştır. Uygulamada her bir kol için 3 adet triyak veya 6 adet tristör kullanılacaktır. Filtre elemanları reaktif güç kompanzasyonu ihtiyacına göre

seçilmektedir. *Fitre Kontrol* bloğu şebekeden çekilen reaktif gücü hesaplamakta ve anahtarları sürmektedir.



Şekil 5. 34 Filtre grubu

Çıkış Akım Regülasyon, *D-D Tristörlü Doğrultucu Kontrol*, *D-Y Tristörlü Doğrultucu Kontrol* ve *Fitre Kontrol* blokları yazılımla gerçekleştirilmiştir.

Çıkış Akım Regülasyon bloğu yazılımı Çizelge 4. 1'de verilmiştir. Bu bloğun Iref ve Io olmak üzere iki girişi mevcuttur. Blok çıkışında Alfa açısı elde edilmektedir. Yazılımdaki değişkenleri izlemek için ayrıca bir DAC çıkışı da mevcuttur. Çıkış akımının ortalaması 3.3ms'de bir hesaplanmaktadır. Ortalama akım, Iref referans akımı ile karşılaştırılarak hata elde edilmektedir. PI algoritması 3.3ms'de bir çalıştırılır. Hata bir PI dönüştürücüden geçirilerek Alfa kontrol açısı üretilir. Alfa kontrol açısı, Doğrultucu Kontrol bloklarına giriş olarak uygulanır. Yazılımda *delt* değişkeni simülasyon adımını (20us) göstermektedir.

Çizelge 4. 1 Çıkış Akım Regülasyon Bloğu Yazılımı

```
KP =5e-3;
KI =3e-3;

Iref = in[0];

lo_sum = lo_sum + in[1];
n=n+1;

tc = tc + delt;
if(tc>3.3e-3)
{
lo_ort = lo_sum / n;
lo_sum = 0; n=0; tc=0;
e= Iref - lo_ort;

e_sum = e_sum + KI * e;
if(e_sum>180) e_sum=180;
if(e_sum<0) e_sum=0;

y= KP * e + e_sum;

Alfa = 180 - y;
if(Alfa<0) Alfa=0;
```

Çizelge 4. 2 Çıkış Akım Regülasyon Bloğu Yazılımı(devam)

```
if(Alfa>180) Alfa=180;  
  
}  
  
out[0]=(int(Alfa*1000))/1000;  
  
out[1]=lo_ort;
```

D-D Tristörlü Doğrultucu Kontrol bloğunun girişi üç faz şebeke gerilimleri ve Alfa faz kontrol açısıdır. D-D trafoya bağlı 6 tristörün tetikleme sinyallerinin üretilmesi için V1, V2 ve V3 şebeke gerilimleri kullanılmıştır. Fazlararası gerilimlerin sıfır noktaları Alfa=0 durumuna karşılık gelmektedir. Tristörlerin tetikleme sinyalleri sıfır noktalarından itibaren Alfa açısı kadar geciktirilir. *D-Y Tristörlü Doğrultucu Kontrol* bloğu benzer şekilde çalışmaktadır. Sadece senkronize olmak için kullanılan gerilimler şebeke geriliminden 30 derece faz farklıdır. *Tristörlü Doğrultucu Kontrol* yazılımı Çizelge 4. 3’de verilmiştir.

Çizelge 4. 3Tristörlü Doğrultucu Kontrol Yazılımı

```
Alfa = in[0];

V12_old = V12;
V23_old = V23;
V31_old = V31;

V1 = in[1];
V2 = in[2];
V3 = in[3];

if(V1>V2) V12=1; else V12=0;
if(V2>V3) V23=1; else V23=0;
if(V3>V1) V31=1; else V31=0;

if( (V12_old != V12) | (V23_old !=V23) | (V31_old != V31) )
{
if(V12==1 & V23==0 & V31==0) { Durum=1; Alfa1 = Alfa; }
if(V12==1 & V23==1 & V31==0) { Durum=2; Alfa2 = Alfa; }
if(V12==0 & V23==1 & V31==0) { Durum=3; Alfa3 = Alfa; }
if(V12==0 & V23==1 & V31==1) { Durum=4; Alfa4 = Alfa; }
if(V12==0 & V23==0 & V31==1) { Durum=5; Alfa5 = Alfa; }
```

Çizelge 4. 4Tristörlü Doğrultucu Kontrol Yazılımı(devam)

```
if(V12==1 & V23==0 & V31==1) { Durum=6; Alfa6 = Alfa; }  
}  
  
D_Alfa = delt*180/10e-3;  
  
Alfa1 = Alfa1- D_Alfa;  
if(Alfa1<0) { T1=1; if(Alfa1<Alfa-160) T1=0; }  
  
Alfa2 = Alfa2- D_Alfa;  
if(Alfa2<0) { T2=1; if(Alfa2<Alfa-160) T2=0; }  
  
Alfa3 = Alfa3- D_Alfa;  
if(Alfa3<0) { T3=1; if(Alfa3<Alfa-160) T3=0; }  
  
Alfa4 = Alfa4- D_Alfa;  
if(Alfa4<0) { T4=1; if(Alfa4<Alfa-160) T4=0; }  
  
Alfa5 = Alfa5- D_Alfa;  
if(Alfa5<0) { T5=1; if(Alfa5<Alfa-160) T5=0; }  
  
Alfa6 = Alfa6- D_Alfa;  
if(Alfa6<0) { T6=1; if(Alfa6<Alfa-160) T6=0; }  
  
out[1]=T1;
```

Çizelge 4. 5Tristörlü Doğrultucu Kontrol Yazılımı(devam)

```
out[2]=T2;  
out[3]=T3;  
out[4]=T4;  
out[5]=T5;  
out[6]=T6;  
  
// ***** DAC  
out[0]=Durum;
```

Çizelge 4. 6'te filtre kontrol yazılımı verilmiştir. Bu yazılım şebekeden çekilen reaktif gücü hesaplamakta ve ihtiyaca göre kademe seçimini yapmaktadır.

Çizelge 4. 6 Filtre Kontrol Yazılımı

```
V1=in[0];
V2=in[1];
V3=in[2];

I1=in[3];
I2=in[4];
I3=in[5];

tc= tc + delt;

if(tc>=100e-6) // 100us'de bir güç hesabı yapılıyor
{
tc=0;
P_sum = P_sum + V1*I1 + V2*I2 + V3*I3;

i1[k] = I1;
i2[k] = I2;
i3[k] = I3;

j = k+50;// 90 derece faz farklı olan dizi terimleri alınıyor
if(j>199) j=j-200;
Q_sum =Q_sum + V1*i1[j] + V2*i2[j] + V3*i3[j];
```

Çizelge 4. 7 Filtre Kontrol Yazılımı(devam)

```
k++;  
  
if( k ==200 ) // bir peryot geçti...  
{  
P_ort = P_sum/k; Q_ort =Q_sum/k;  
P_sum=0; Q_sum=0;  
k=0;  
  
Peryot++;  
  
if(Peryot==3)// . peryotta hesaplama yapılıyor  
{  
Peryot=0;  
  
if(t<700e-3) // Kademe sabit kalsın  
{  
if(Q_ort>1000) Kademe++;  
if(Q_ort<-1000) Kademe--;  
}  
  
if(Kademe>7) Kademe=7;  
if(Kademe<0) Kademe=0;  
}  
}  
}
```


Çizelge 4. 8 Filtre Kontrol Yazılımı(devam)

```
if(t<100e-3) Kademe=0; // Kademe seçimi belirli bir
süreden sonra başlasın

SW1=0; SW2=0; SW3=0;

if( (Kademe & 1) == 1 ) SW1=1;

if( (Kademe & 2) == 2 ) SW2=1;

if( (Kademe & 4) == 4 ) SW3=1;

out[0]=P_sum;

out[1]=P_ort;

out[2]=Q_sum;

out[3]=Q_ort;

out[4]=SW1;

out[5]=SW2;

out[6]=SW3;

out[7]=Kademe;
```

Giriş gerilimi 380V + %10, akü gerilimi 110V ve çıkış akımı 400A iken doğrultucu şebekeden en yüksek aktif ve reaktif gücü çekilmektedir. Tetikleme açısı en yüksek değerindedir. Filtre Grubu'nda kullanılması gereken toplam kapasite, doğrultucunun şebekeden çektiği en yüksek reaktif güce göre belirlenir. İhtiyaç duyulan kapasite değeri reaktif güç kompanzasyonu dikkate alınarak hesaplanır.

Nominal durumda sistemin çalışması Şekil 5. 35'te gösterilmiştir. Başlangıçta çok yüksek reaktif güç çekilmektedir. Kademenin artırılması ile reaktif güç azalmakta ve sifıra yaklaşmaktadır. Kademe 7 olduğunda akım ve gerilimin hemen hemen aynı faza geldiği ve akımın sinüsoide yaklaştığı görülmektedir. Sistemde reaktif güç kompanzasyonu 700 ms içinde tamamlanmaktadır.

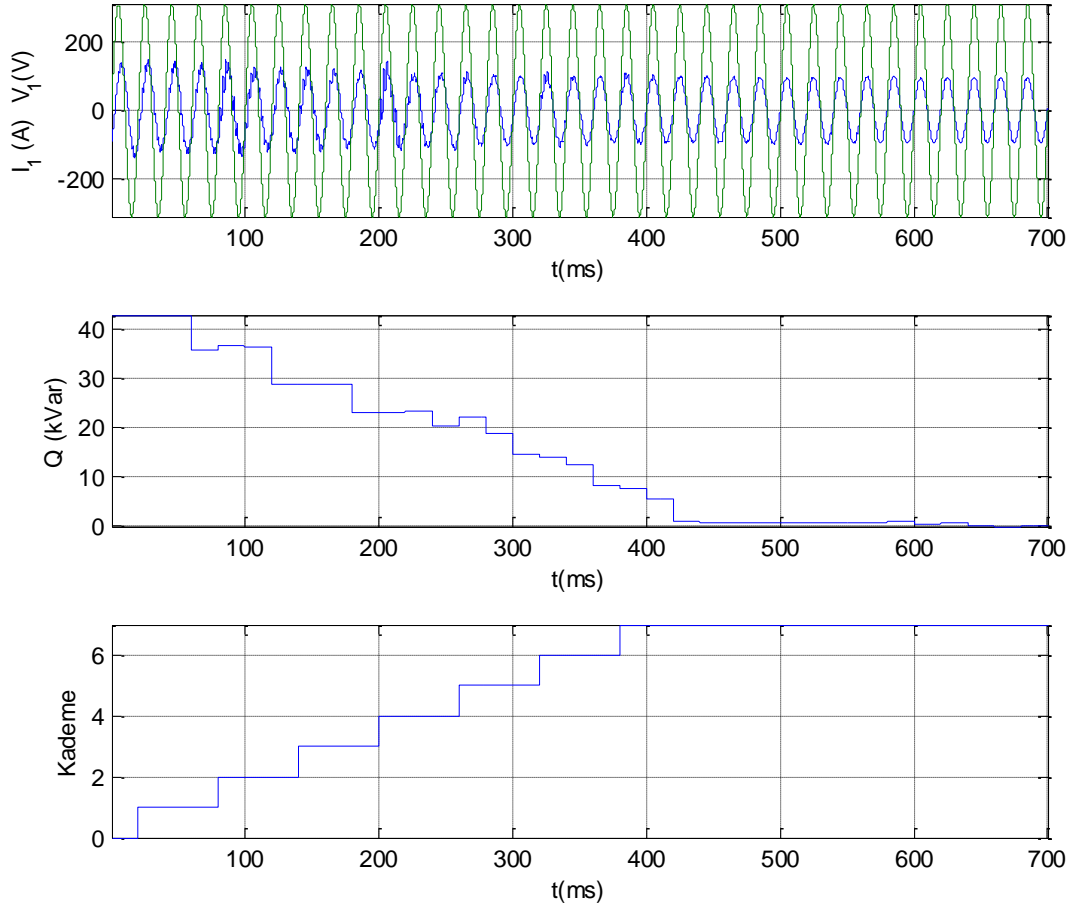
Filtre kullanılan 12 darbeli paralel doğrultucu sisteminin muhtelif çalışma şartları altındaki davranışları incelenerek simülasyon sonuçları Şekil 5. 36'de verilmiştir. Simülasyonlar aşağıdaki durumlar için gerçekleştirilmiştir. Sistemin detaylı şeması Şekil 5. 34 ve Şekil 5. 35'da gösterilmiştir.

Şebeke gerilimi : $380+ \%10$, 380, $380- \%10$ V

Çıkış akımı 10, 50, 100, 200, 300, 400A

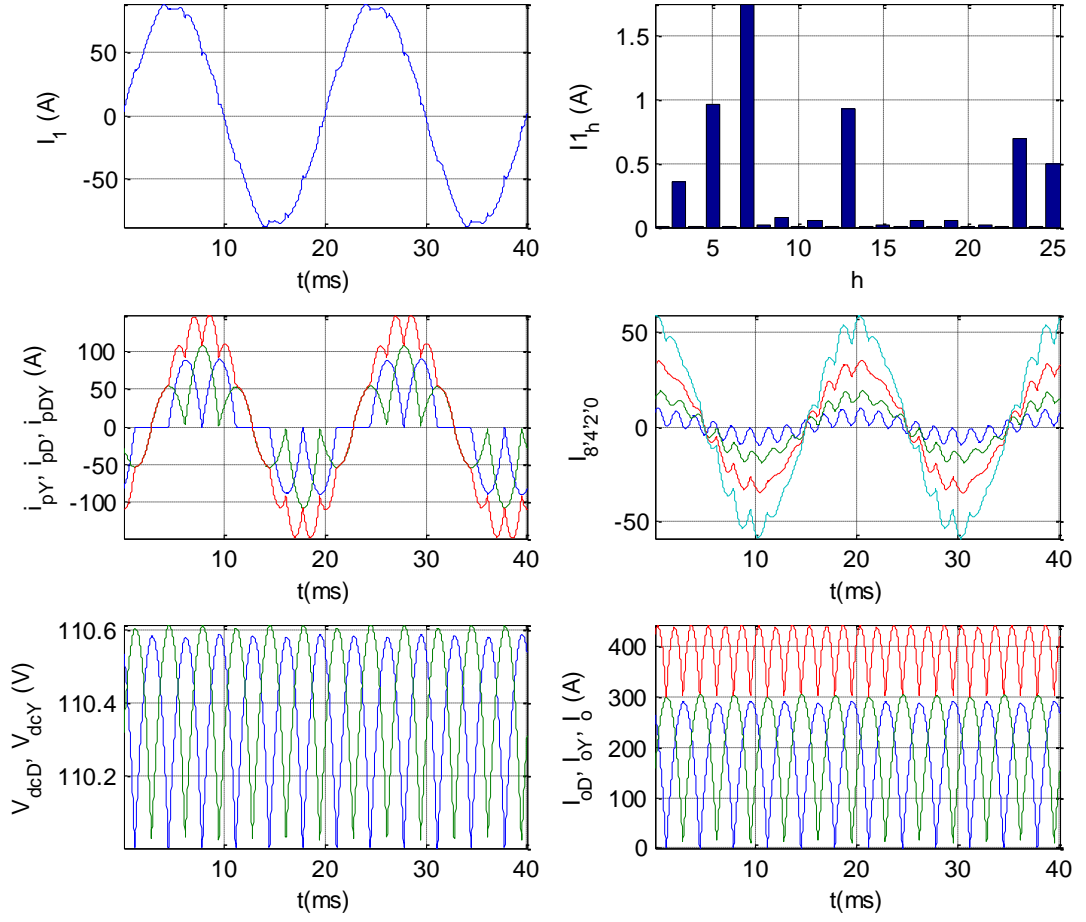
Akü gerilimi : 110 ve 122V

Simülasyonlar ile I_1 , I_{1h} , I_{pD} , I_{pY} , I_{pDY} , I_{h8} , I_{h4} , I_{h2} , I_{h0} , V_{dcD} , V_{dcY} , I_{oD} , I_{oY} , I_o değişimleri elde edilmiştir. I_1 , V_1 şebeke geriliminden çekilen akım değişimini göstermektedir. I_{1h} , I_1 akımının 2-25 nolu harmonik genliklerini göstermektedir. Altı darbeli doğrultucu transformatörlerinin primer akımları I_{pD} ve I_{pY} olarak gösterilmiştir. I_{pDY} , I_{pD} ve I_{pY} akımlarının toplamıdır. I_8 , I_4 , I_2 ve I_0 akımları sırasıyla kullanılan filtre kollarının akımlarıdır. Filtre kollarından geçen akım değişimleri filtre endüktanslarının tasarımı ve tristör seçimi açısından önemlidir. V_{dcD} ve V_{dcY} altı darbeli doğrultucuların çıkış gerilimleridir. I_{oD} ve I_{oY} altı darbeli doğrultucuların çıkış akımlarıdır. Doğrultucu sisteminin toplam çıkış akımı I_o 'dur. Simülasyon sonuçları kullanılarak hesaplanan PF, THD, I_1 , IEF, P, Q, Alfa ve K değerleri ilgili değişimin altında verilmiştir.



Şekil 5. 35 Şebeke gerilimi 380 V, $I_{ref} = 400A$ ve $V_{akü}=110V$ olması durumunda şebekeden çekilen akım, reaktif güç ve Kademe değerleri

Şekil 5. 36'deki değişimlerde doğrultucu sisteminin davranışı görülmektedir. Bu değişimler kararlı rejimde verilmiştir. Harmonikler açısından en iyi çalışma şartları Alfa açısının en küçük olduğu durumlarda oluşmaktadır. I_{1h} harmonik genlikleri I_{1EF} değerine göre oldukça küçüktür. 12. harmonik, filtre tarafından süzülme olup genliği çok küçüktür. Harmonikler içinde 13, 23 ve 25. harmoniklerin genlikleri ön plana çıkmaktadır. Çıkış akımında yüksek bir dalgalanma mevcuttur. 6 darbeli doğrultucuların I_o çıkış akımını dengeli bir şekilde paylaştığı görülmektedir.



Şekil 5. 36 Iref=400A, Vo=110V ve Vs = 380*1.1 V için değişimler

PF=0.9945

THD=4.04

IEF=61.84A

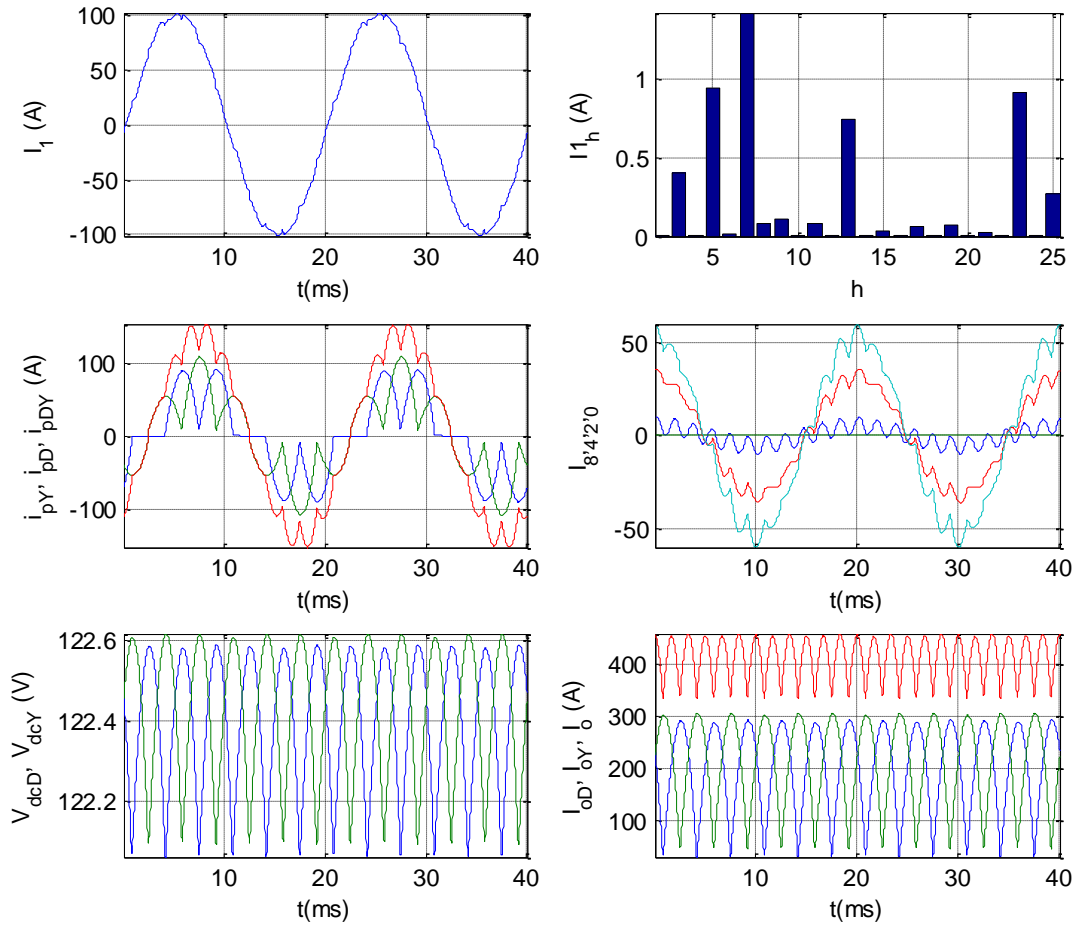
I1=61.79A

Alfa=50.12

P=44.6 kW

Q=1.0 kVar

K=7 değerleri elde edilmiştir.



Şekil 5. 37 $I_{ref}=400A$, $V_o=122V$ ve $V_s = 380*1.1 V$ için değişimler

PF=0.9919

THD=3.19

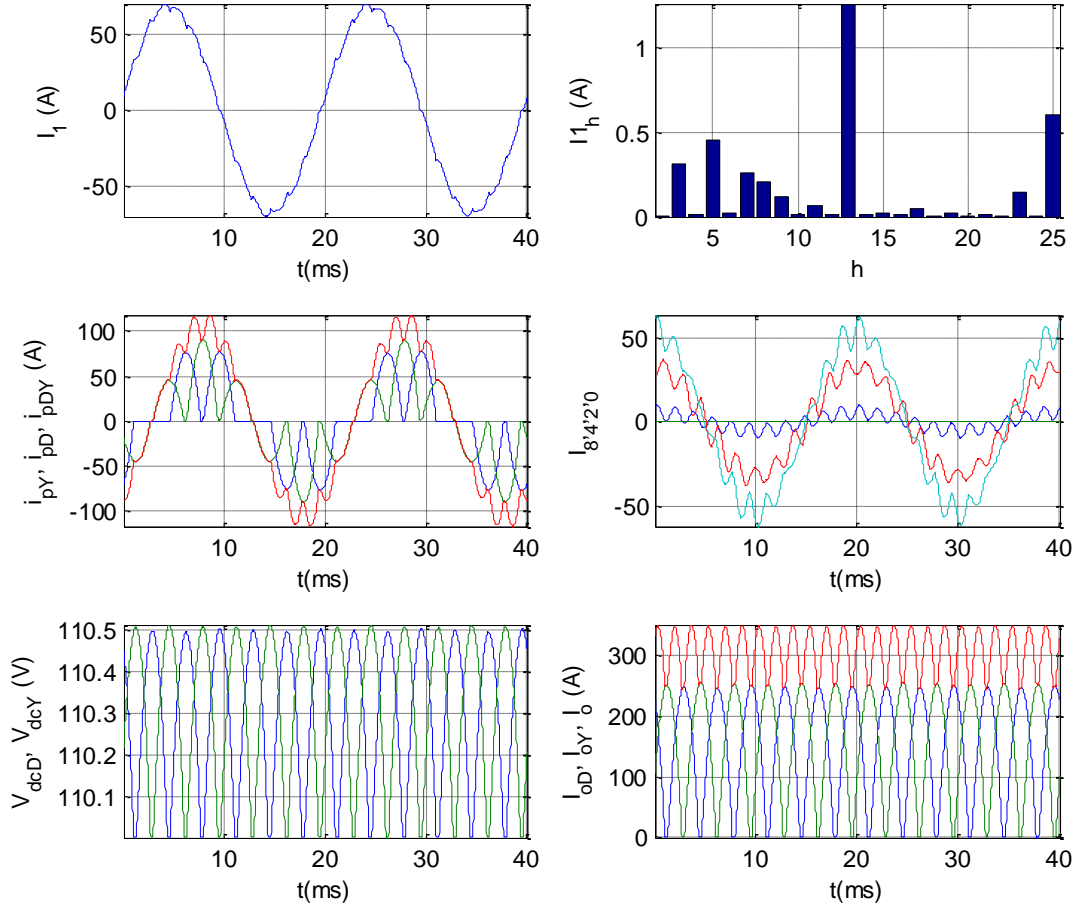
IEF=71.93A

I1=71.89A

Alfa=44.21

P=51.8 kW, Q=5.2 kVar

K=6 değerleri elde edilmiştir.



Şekil 5. 38 $I_{ref}=300A$, $V_o=110V$ ve $V_s = 380*1.1 V$ için değişimler

PF=0.9881

THD=3.47

IEF=48.01A

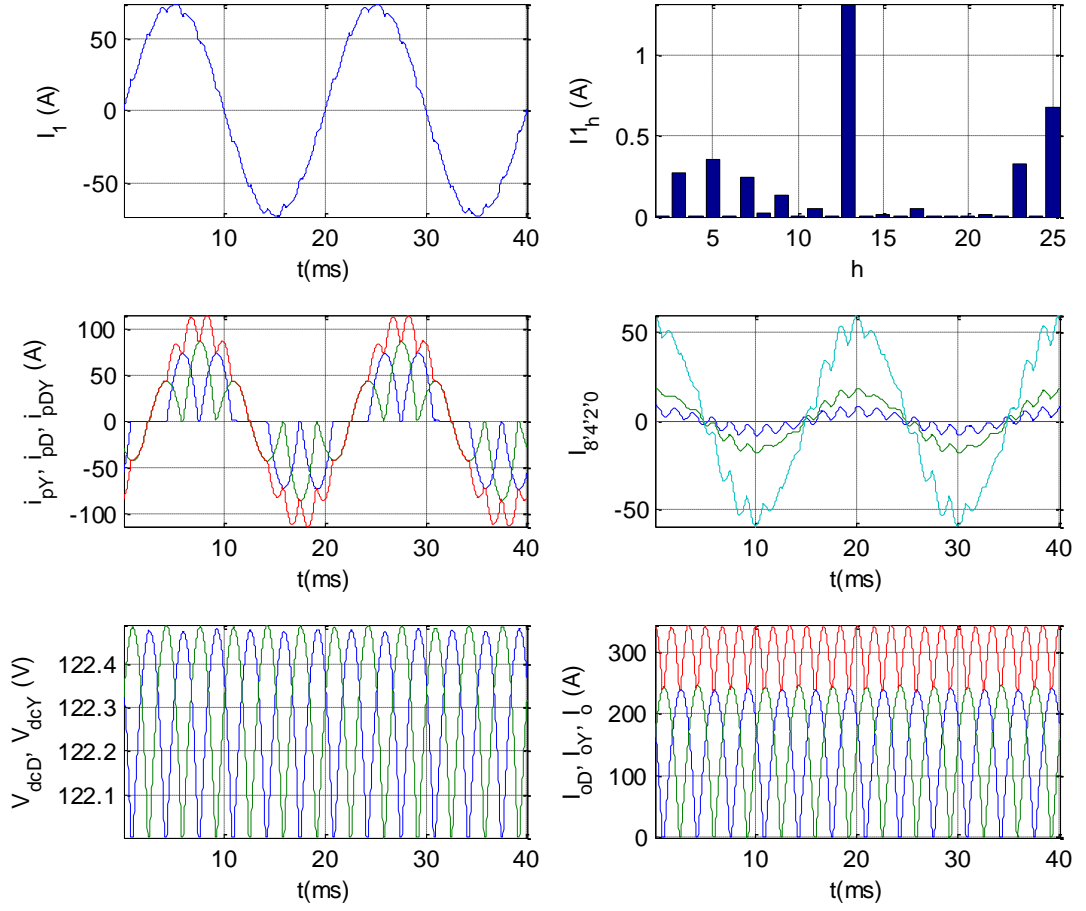
I1=47.98A

Alfa=53.25

P=34.4 kW

Q=4.5 kVar

K=6 değerleri elde edilmiştir.



Şekil 5. 39 Iref=300A, Vo=122V ve Vs = 380*1.1 V için değişimler

PF=0.9966

THD=3.30

IEF=51.67A

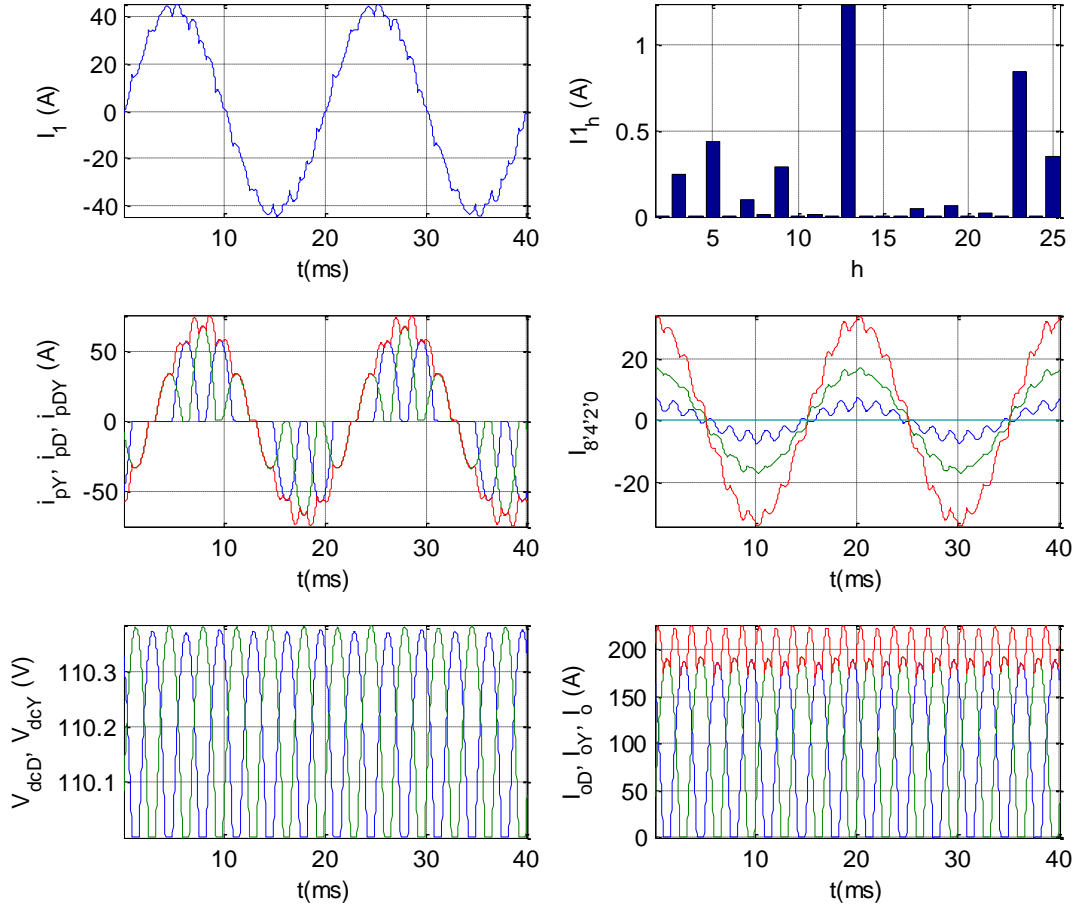
I1=51.64A

Alfa=46.84

P=37.4 kW

Q=0.3 kVar

K=5 değerleri elde edilmiştir.



Şekil 5. 40 Iref=200A, Vo=110V ve Vs = 380*1.1 V için değişimler

PF=0.9954

THD=5.75

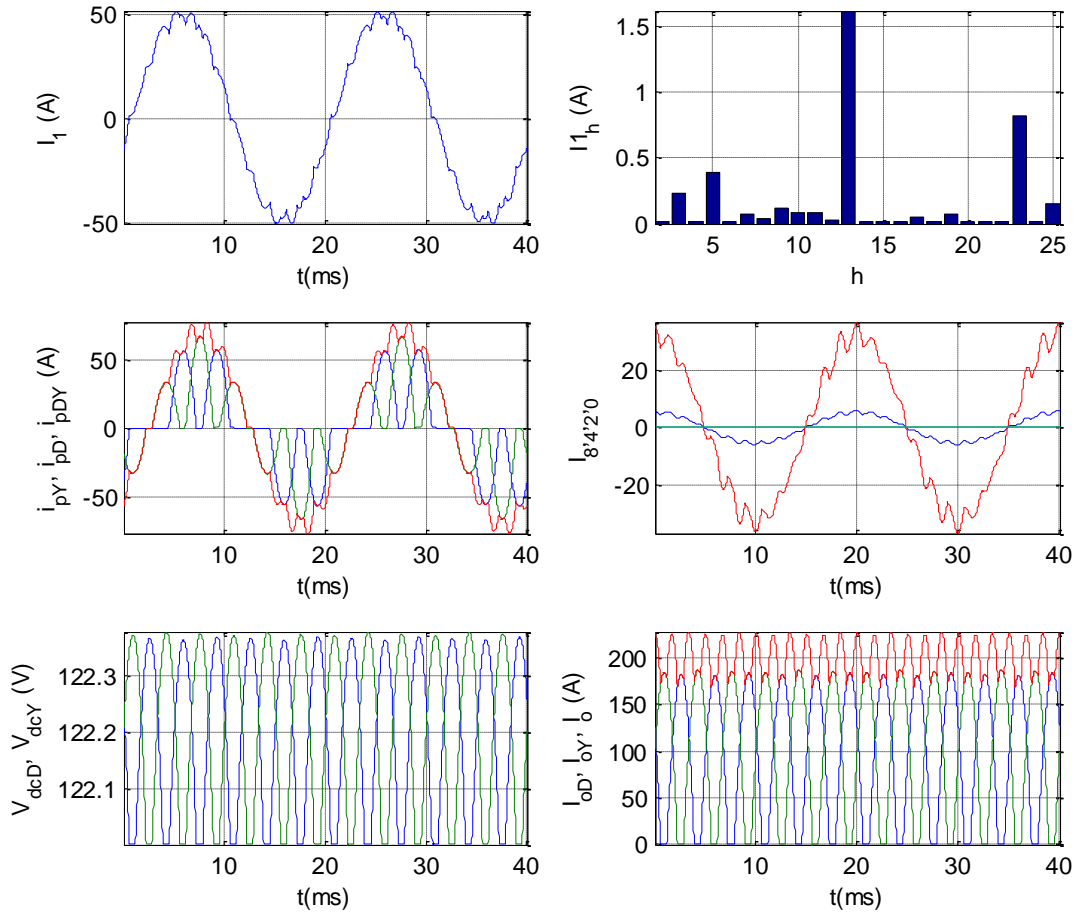
IEF=30.79A

I1=30.74A

Alfa=57.30

P=22.2 kW, Q=0.4 kVar

K=3 değerleri elde edilmiştir.



Şekil 5. 41 $I_{ref}=200A$, $V_o=122V$, ve $V_s=418$ için değişimler

PF=0.9648

THD=5.91

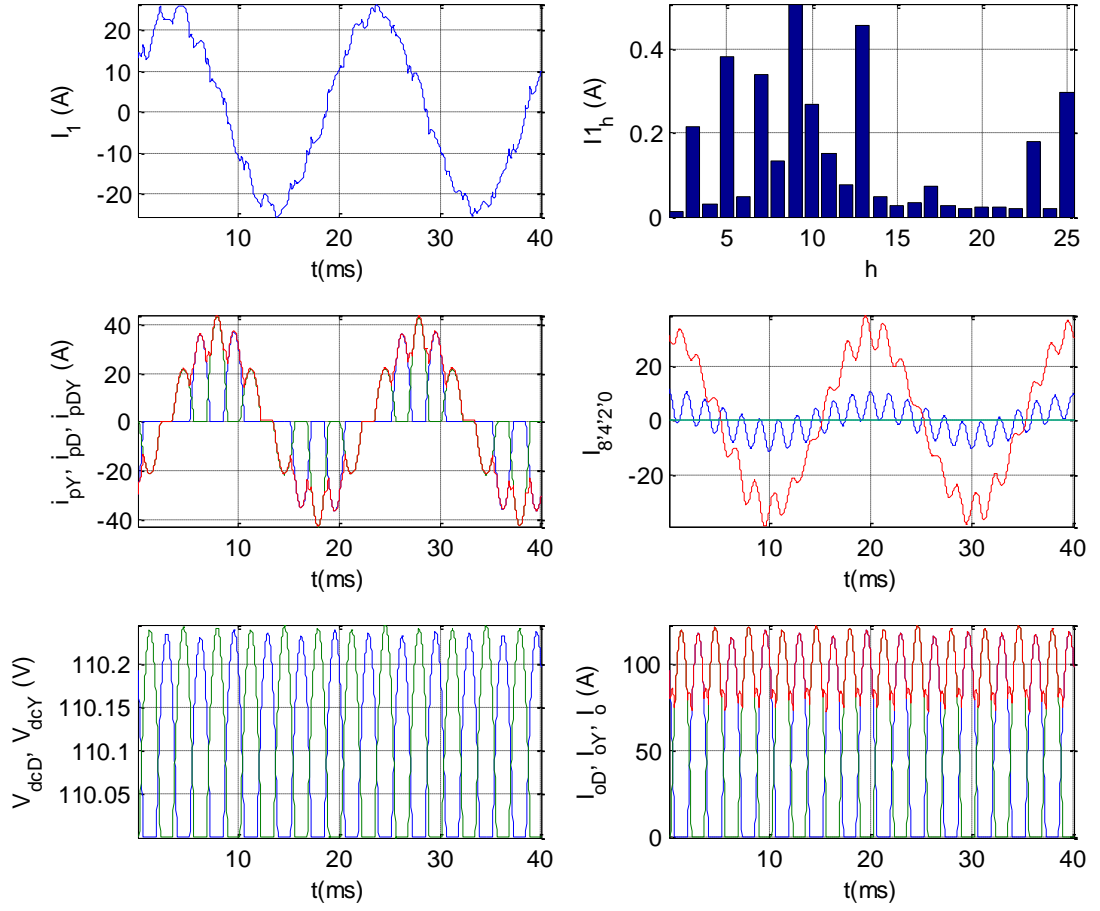
IEF=35.39A

$I_1=35.33A$

Alfa=51.40

$P=24.7$ kW, $Q=6.6$ kVar

$K=2$ değerleri elde edilmiştir.



Şekil 5. 42 $I_{ref}=100A$, $V_o=110V$ ve $V_s = 380*1.1 V$ için değişimler

PF=0.9036

THD=9.27

IEF=16.87A

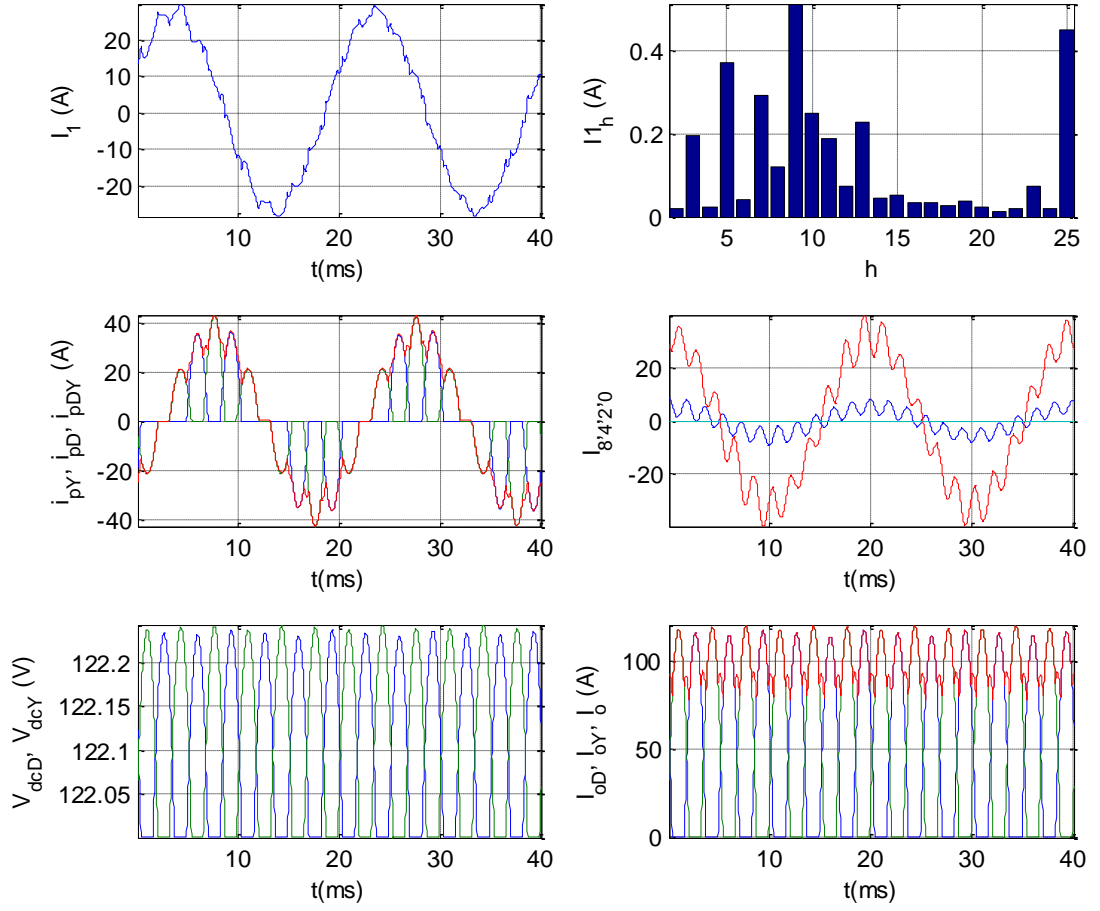
I1=16.79A

Alfa=63.02

P=11.1 kW

Q=5.1 kVar

K=2 değerleri elde edilmiştir.



Şekil 5. 43 $I_{ref}=100A$, $V_o=122V$ ve $V_s = 380*1.1 V$ için değişimler

PF=0.9015

THD=7.82

IEF=19.10A

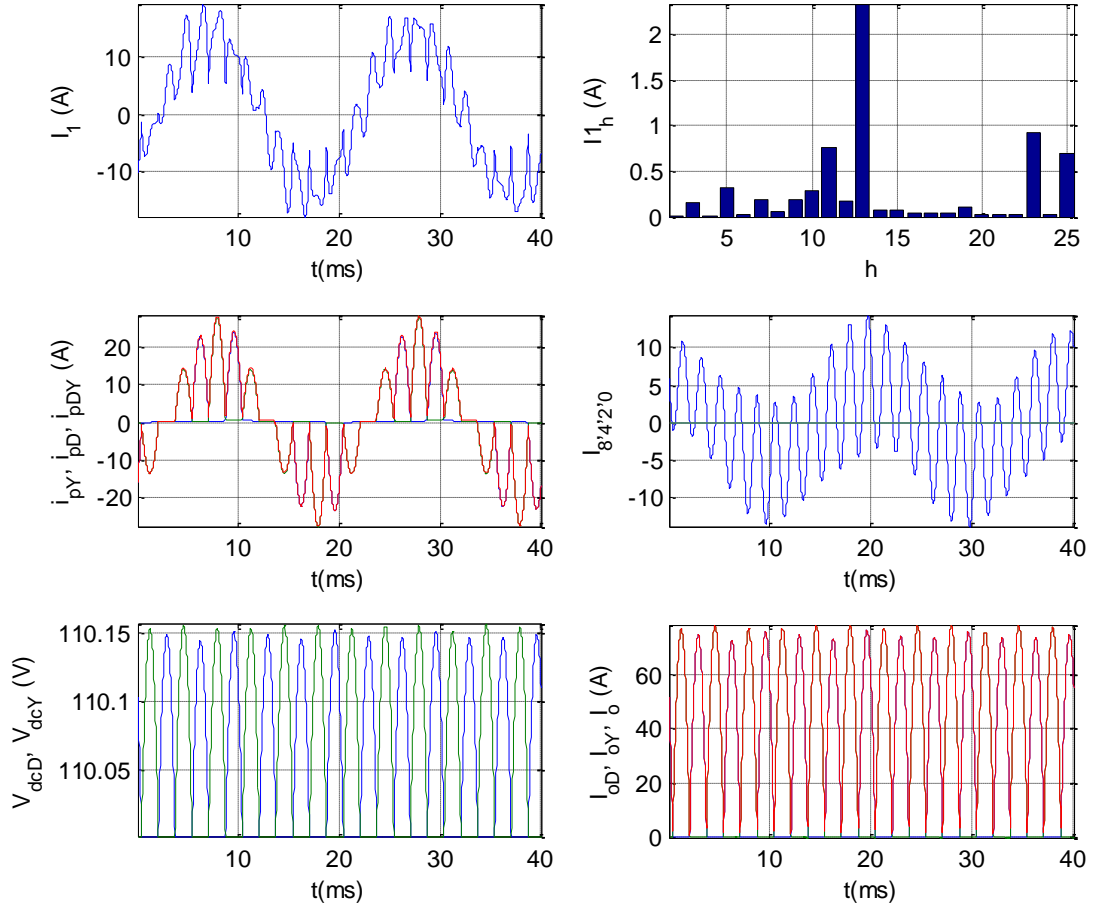
I1=19.05A

Alfa=57.58

P=12.5 kW

Q=5.8 kVar

K=2 değerleri elde edilmiştir.



Şekil 5. 44 Iref=50A, Vo=110V ve Vs = 380*1.1 V için değişimler

PF=0.7322

THD=30.92

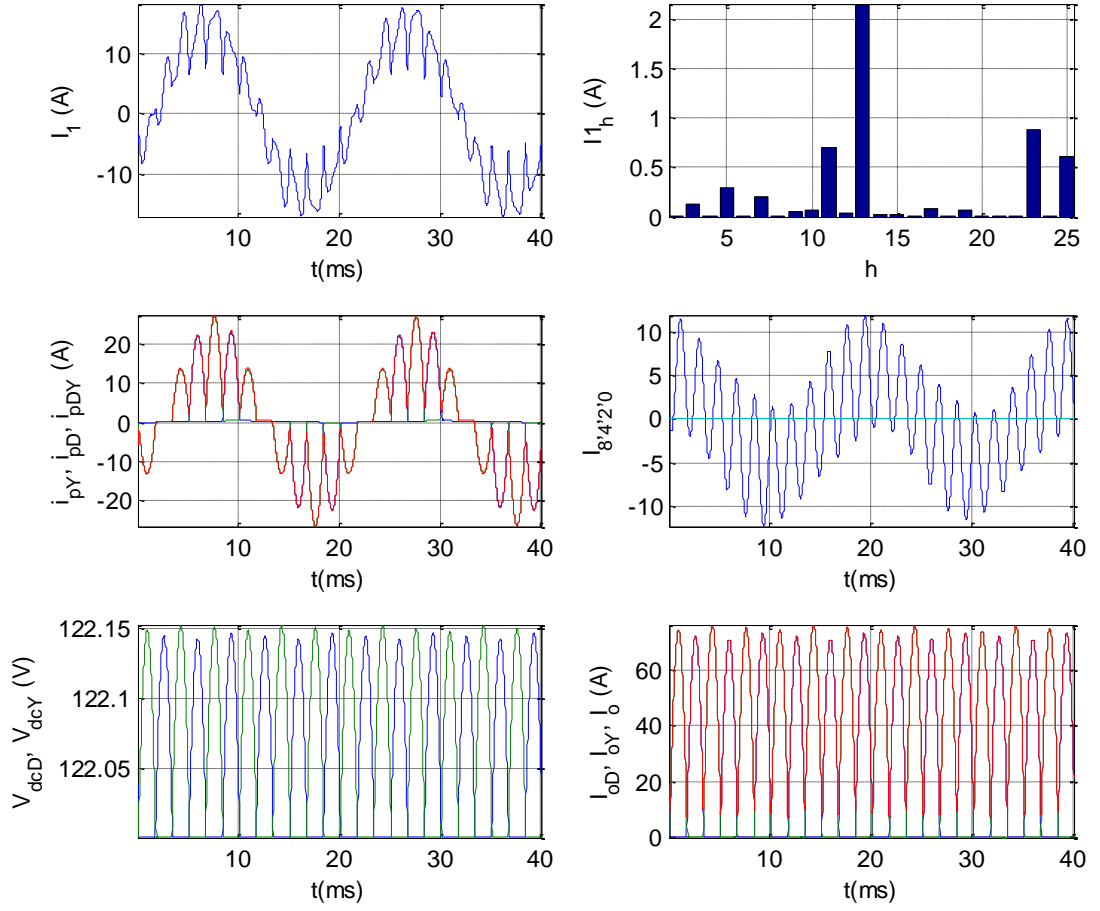
IEF=10.50A

I1=10.04A

Alfa=67.30

P=5.6 kW, Q=4.6 kVar

K=0 değerleri elde edilmiştir.



Şekil 5. 45 Iref=50A, Vo=122V ve Vs = 380*1.1 V için değişimler

PF=0.8042

THD=26.01

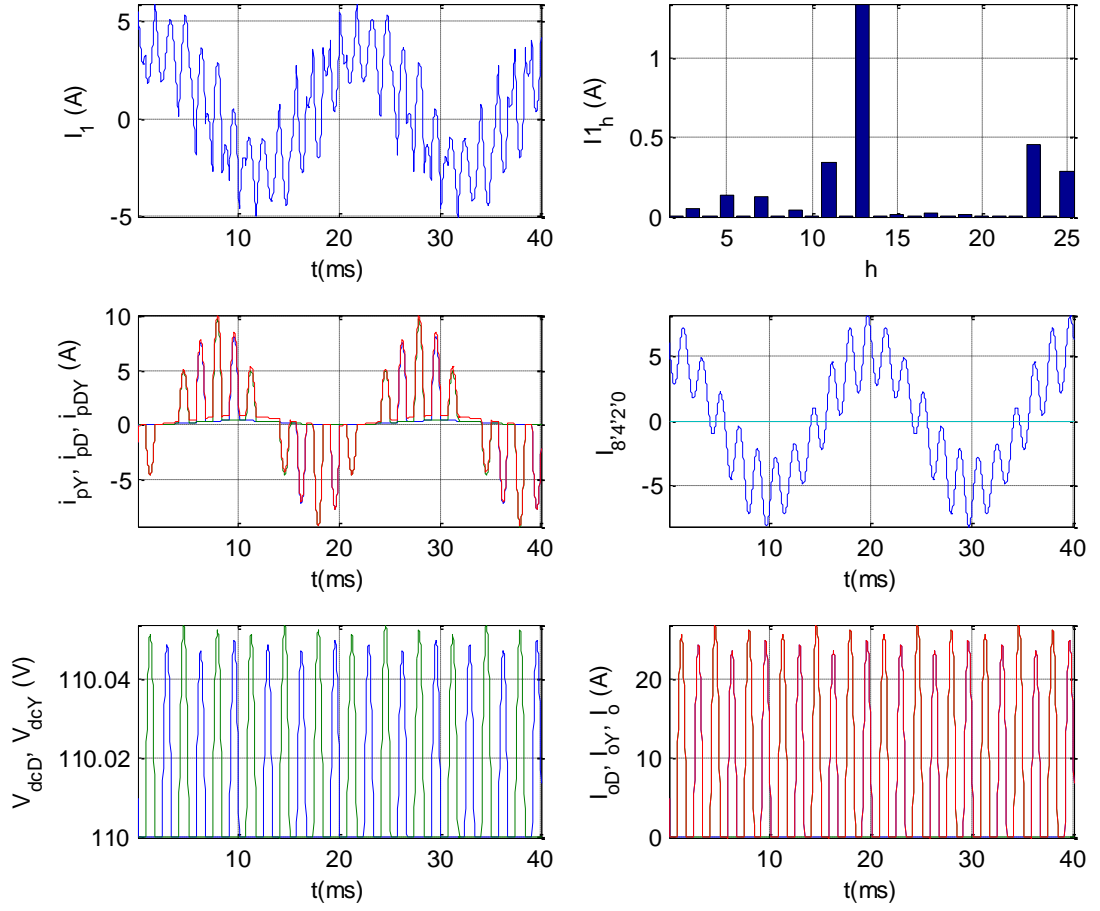
IEF=10.57A

I1=10.23A

Alfa=61.92

P=6.2 kW, Q=4.1 kVar

K=0 değerleri elde edilmiştir.



Şekil 5. 46 Iref=10A, Vo=110V ve Vs = 380*1.1 V için değişimler

PF=0.5594

THD=73.58

IEF=2.69A

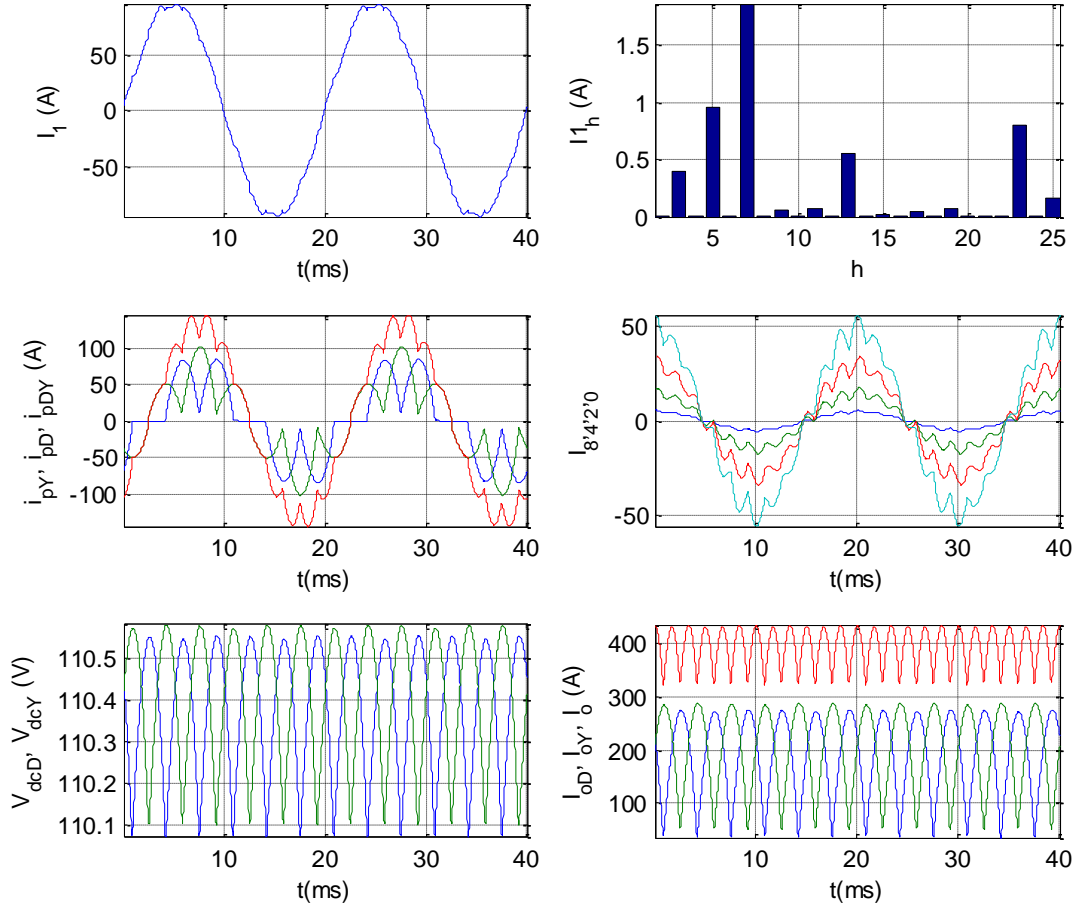
I1=2.16A

Alfa=73.80

P=1.1 kW

Q=1.1 kVar

K=0 değerleri elde edilmiştir.



Şekil 5. 47 Iref=400A, Vo=110V ve Vs = 380 V için değişimler

PF=0.9966

THD=3.63

IEF=67.60A

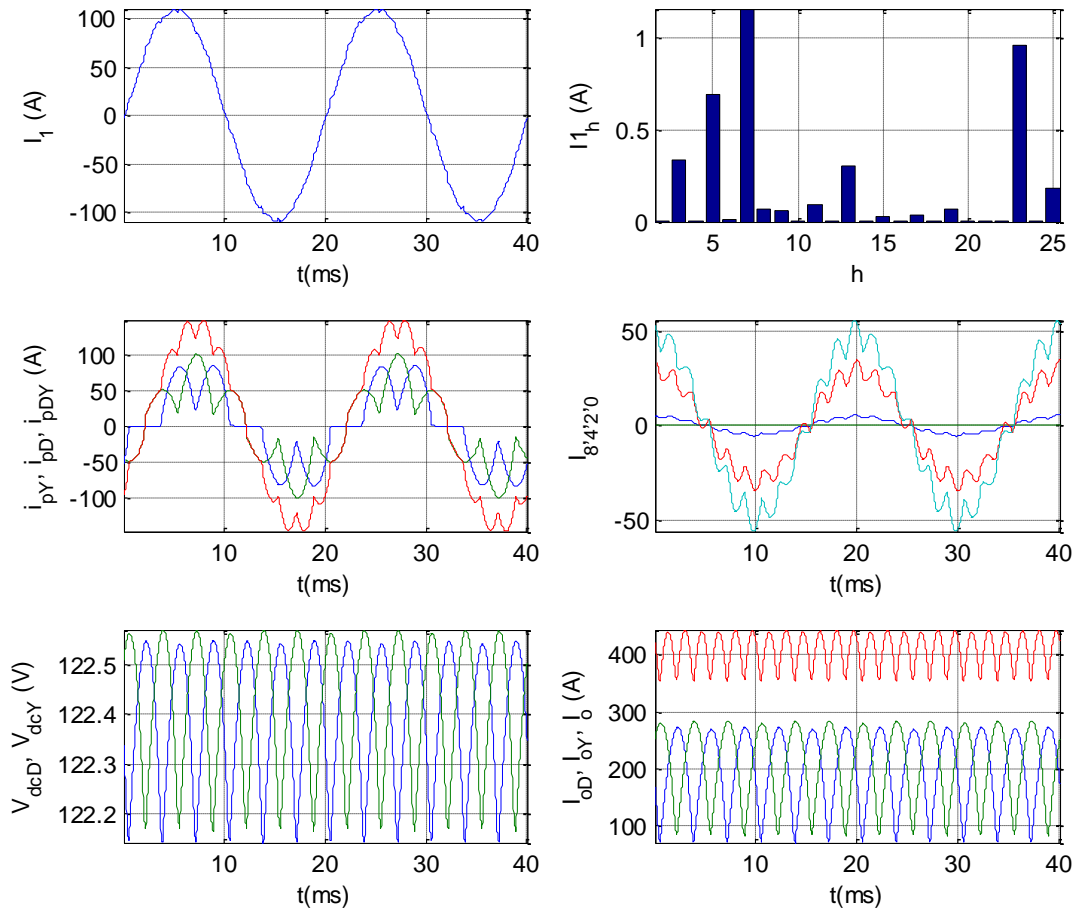
I1=67.56A

Alfa=44.29

P=44.5 kW

Q=0.3 kVar

K=7 değerleri elde edilmiştir.



Şekil 5. 48 $I_{ref}=400A$, $V_o=122V$ ve $V_s = 380 V$ için değişimler

PF=0.9957

THD=2.46

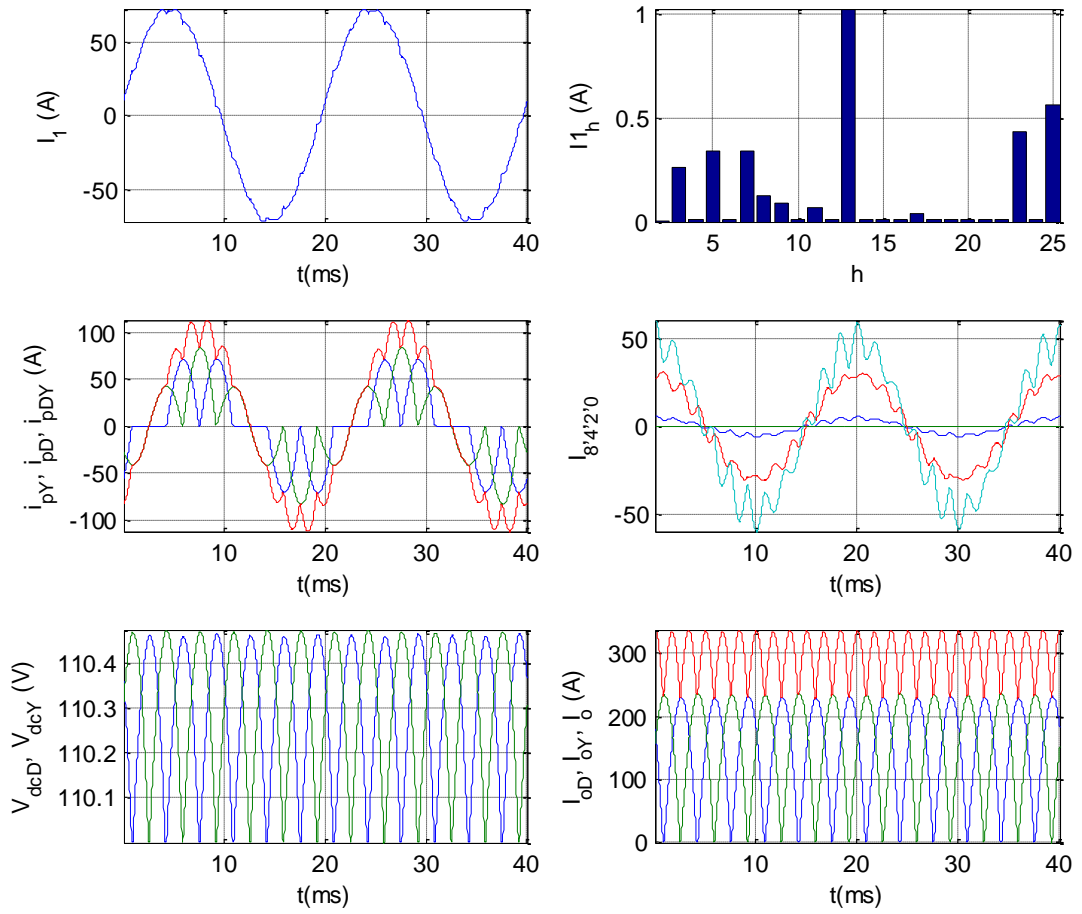
IEF=77.65A

I1=77.63A

Alfa=36.95

P=51.0 kW, Q=2.6 kVar

K=6 değerleri elde edilmiştir.



Şekil 5. 49 Iref=300A, Vo=110V ve Vs = 380 V için değişimler

PF=0.9891

THD=2.96

IEF=51.07A

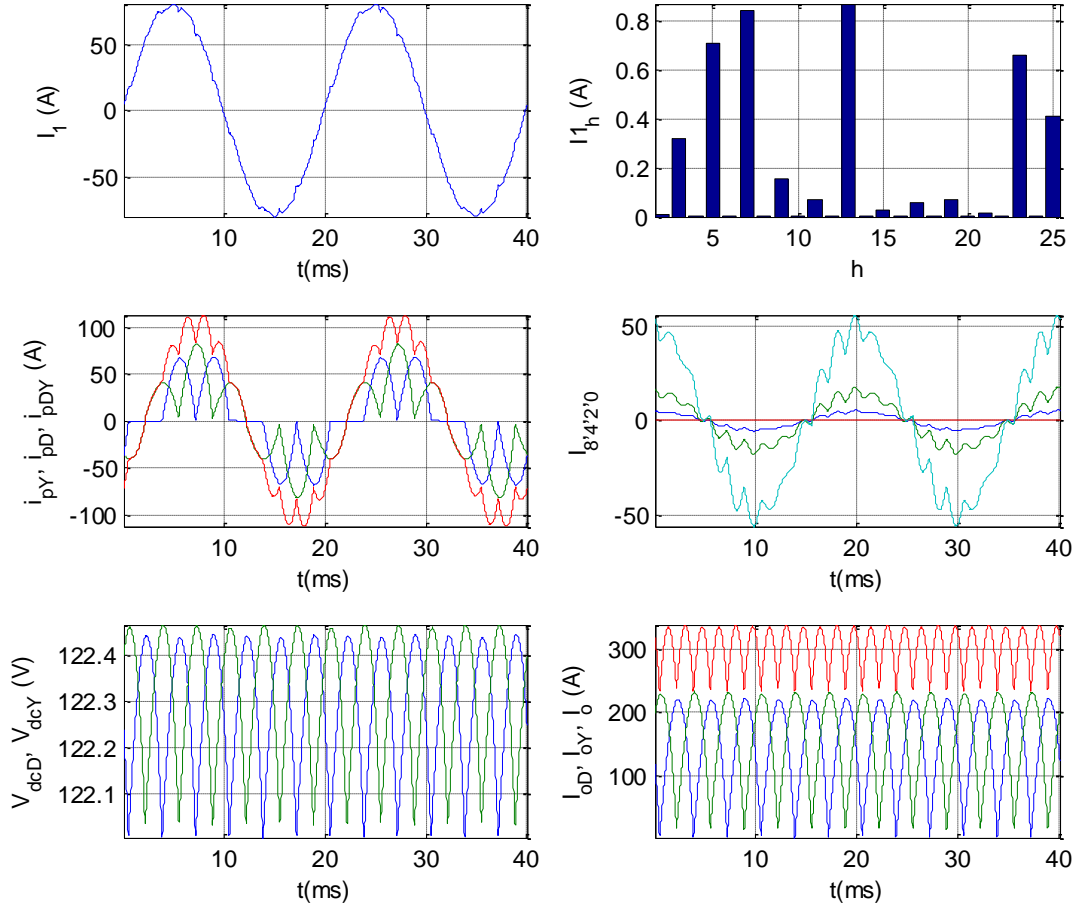
I1=51.05A

Alfa=46.47

P=33.3 kW

Q=4.2 kVar

K=6 değerleri elde edilmiştir.



Şekil 5. 50 Iref=300A, Vo=122V ve Vs = 380 V için değişimler

PF=0.9965

THD=3.10

IEF=56.85A

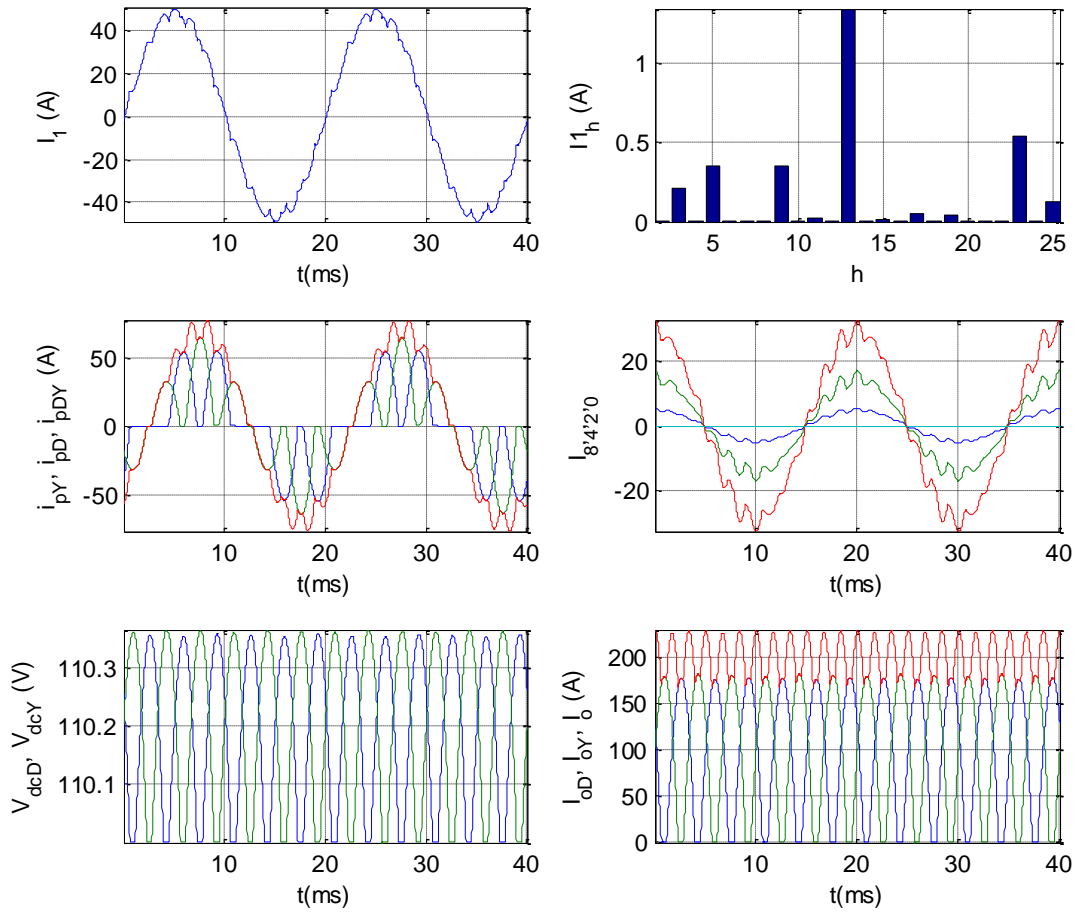
I1=56.82A

Alfa=38.67

P=37.4 kW

Q=0.9 kVar

K=5 değerleri elde edilmiştir.



Şekil 5. 51 $I_{ref}=200A$, $V_o=110V$ ve $V_s = 380 V$ için değişimler

PF=0.9952

THD=4.93

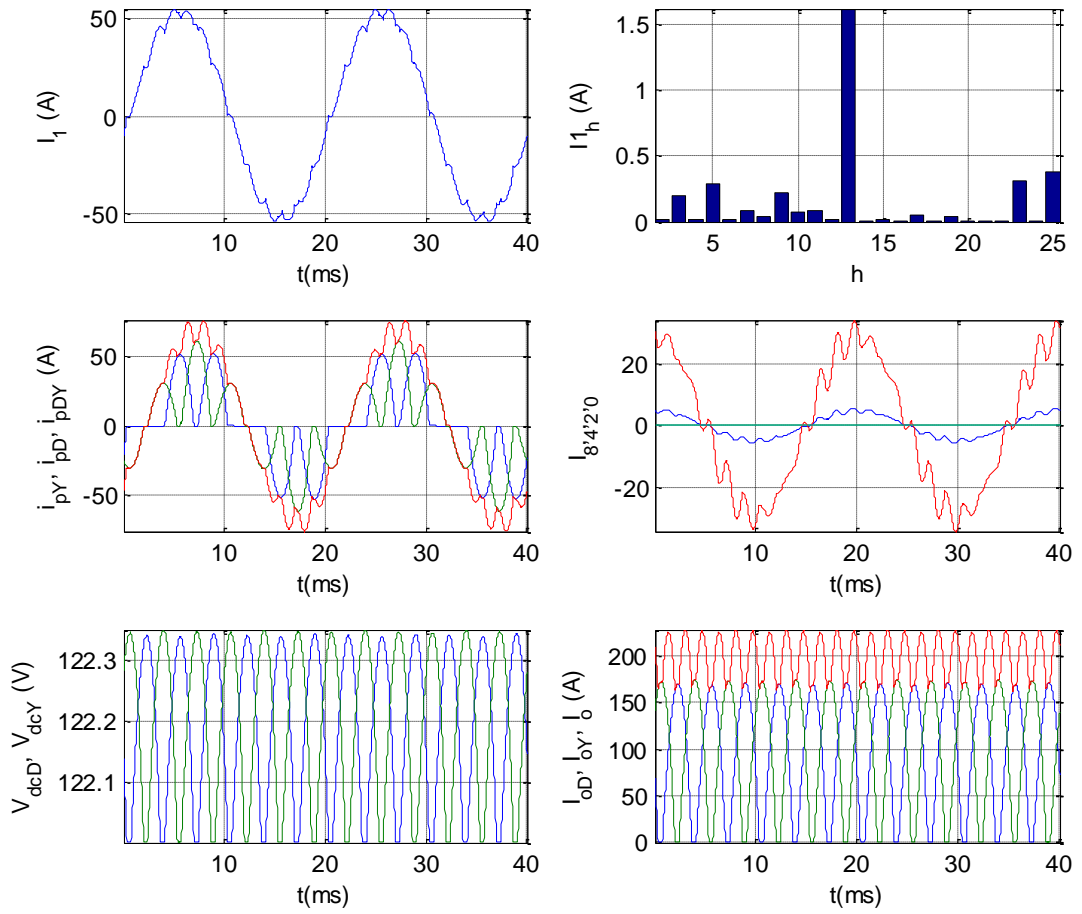
IEF=34.07A

$I_1=34.03A$

Alfa=50.96

$P=22.4 kW$, $Q=0.9 kVar$

$K=3$ değerleri elde edilmiştir.



Şekil 5. 52 Iref=200A, Vo=122V ve Vs = 380 V için değişimler

PF=0.9768

THD=5.03

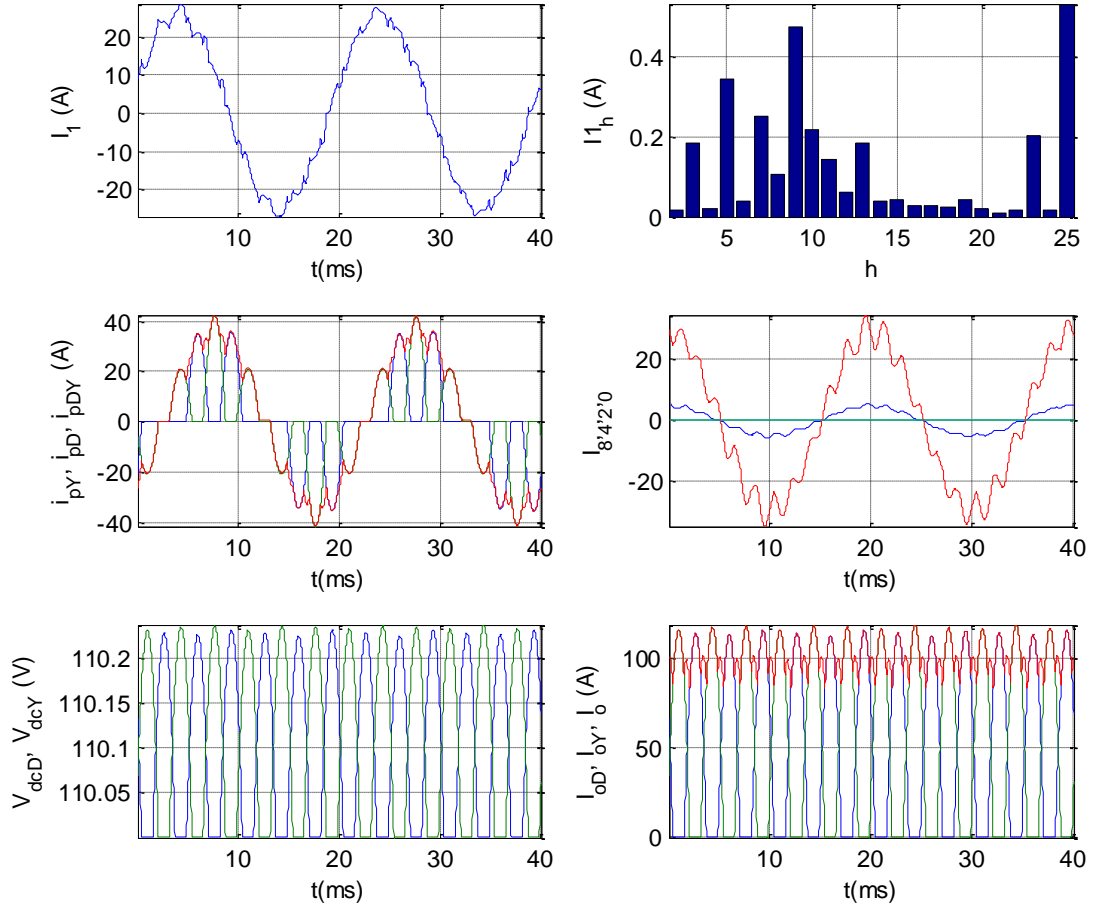
IEF=37.91A

I1=37.87A

Alfa=43.21

P=24.4 kW, Q=4.9 kVar

K=2 değerleri elde edilmiştir.



Şekil 5. 53 Iref=100A, Vo=110V ve Vs = 380 V için değişimler

PF=0.9512

THD=7.56

IEF=18.20A

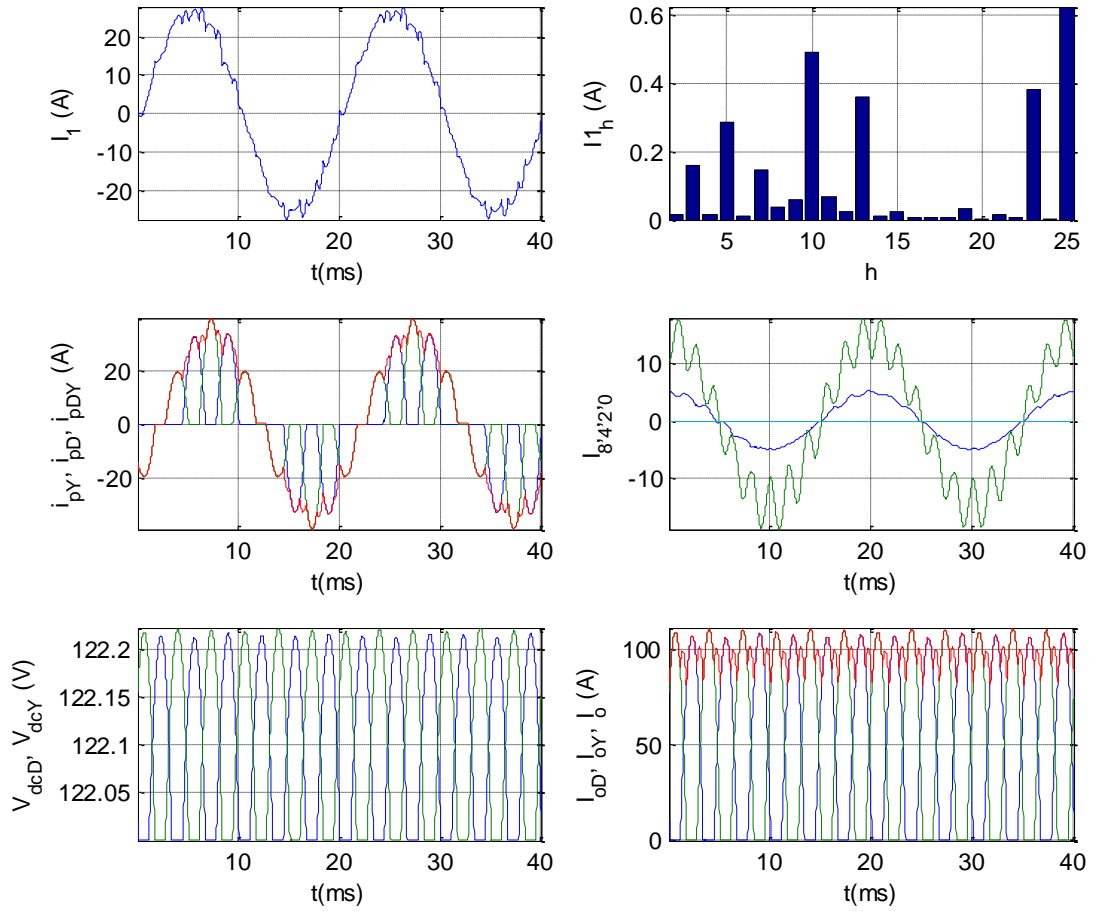
I1=18.14A

Alfa=57.24

P=11.4 kW

Q=3.5 kVar

K=2 değerleri elde edilmiştir.



Şekil 5. 54 $I_{ref}=100A$, $V_o=122V$ ve $V_s = 380 V$ için değişimler

PF=0.9858

THD=6.36

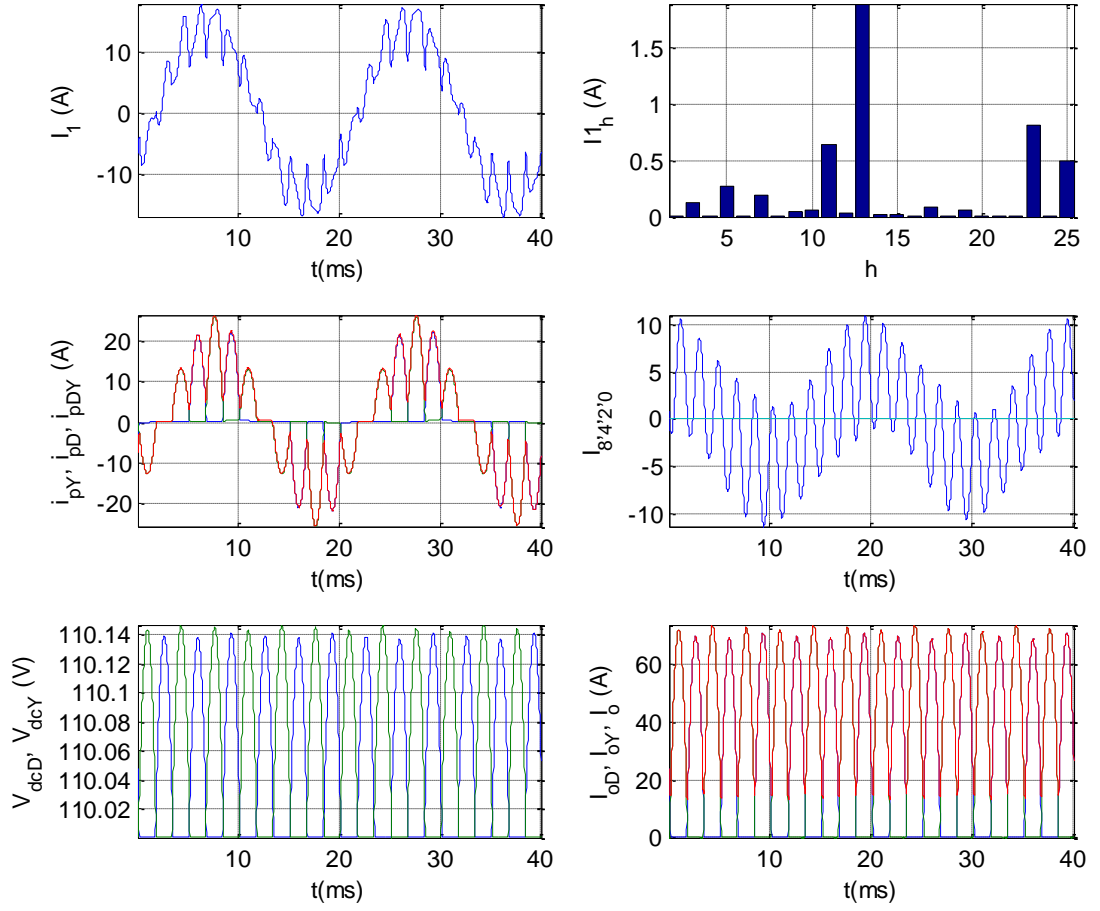
IEF=18.75A

I1=18.71A

Alfa=50.19

P=12.2 kW, Q=1.7 kVar

K=1 değerleri elde edilmiştir.



Şekil 5. 55 Iref=50A, Vo=110V ve Vs = 380 V için değişimler

PF=0.7929

THD=22.84

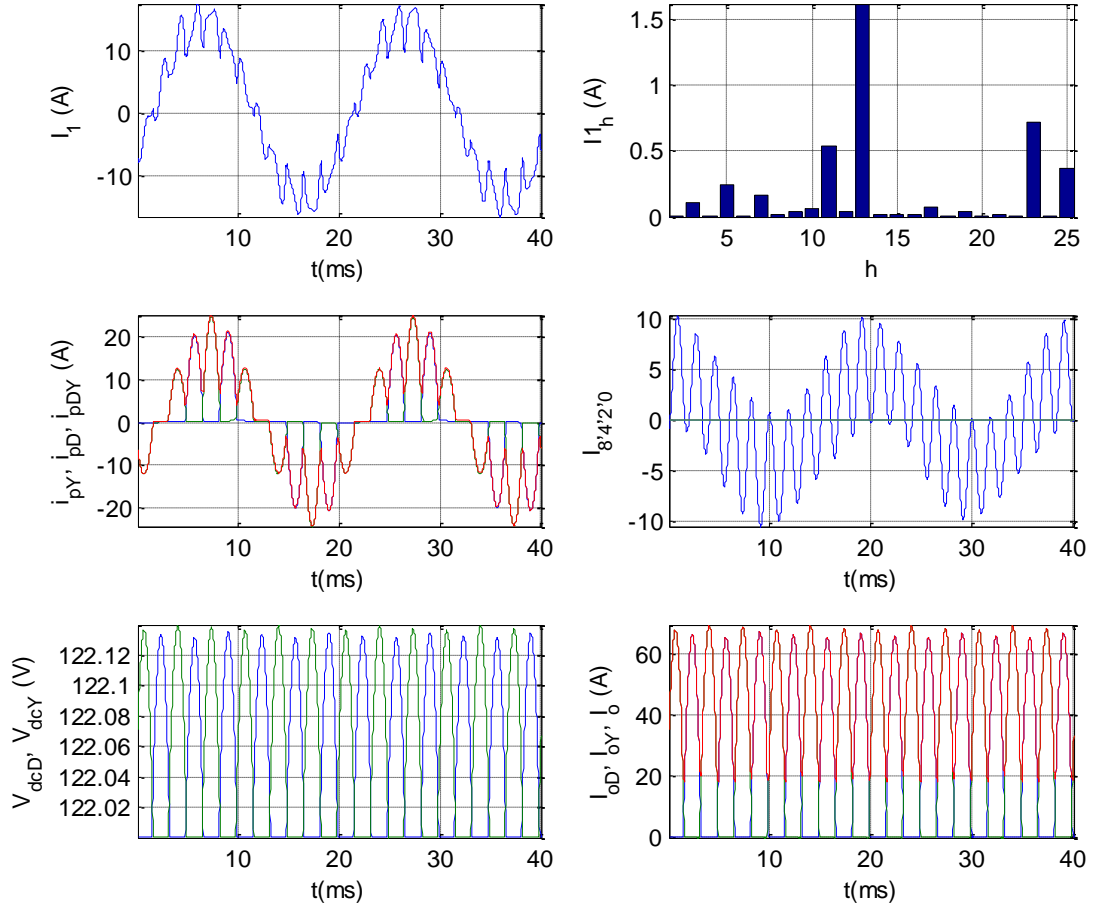
IEF=10.55A

I1=10.28A

Alfa=61.87

P=5.5 kW, Q=3.9 kVar

K=0 değerleri elde edilmiştir.



Şekil 5. 56 $I_{ref}=50A$, $V_o=122V$ ve $V_s = 380 V$ için değerler

PF=0.8644

THD=19.54

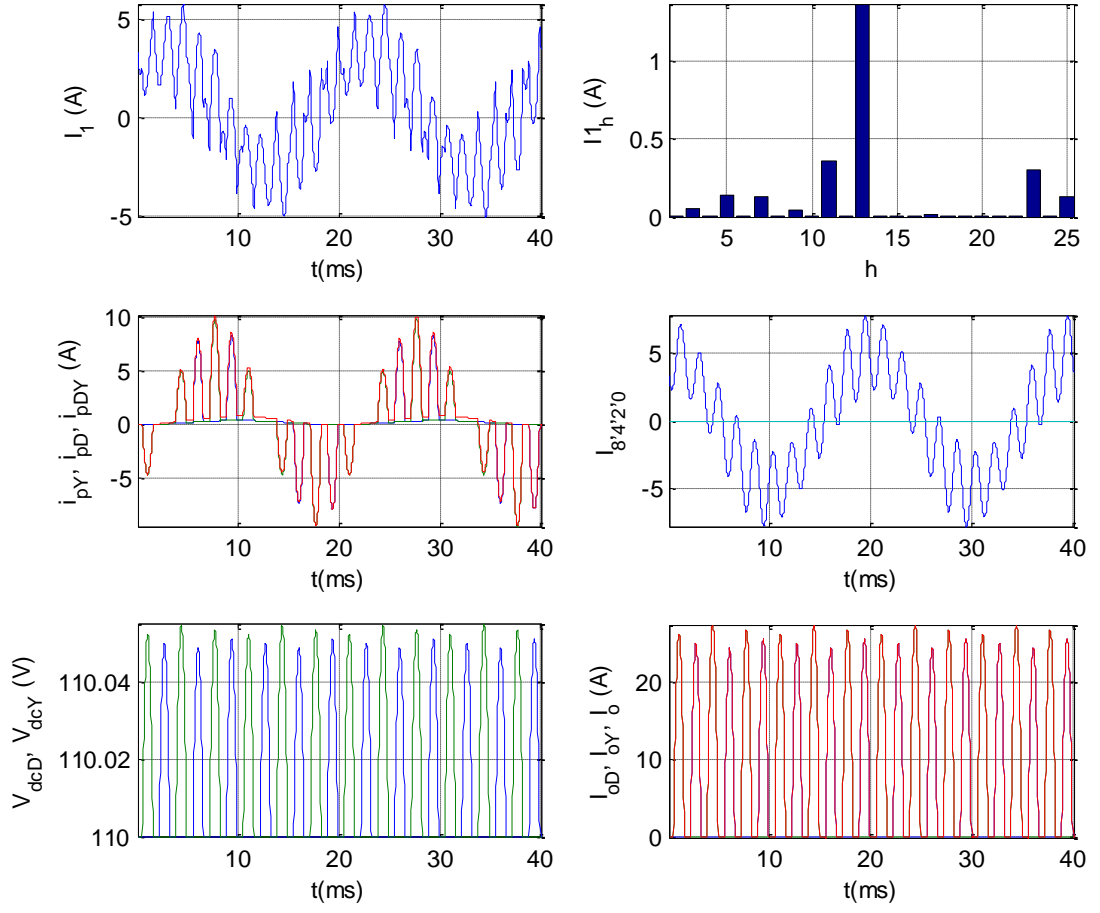
IEF=10.49A

$I_1=10.29A$

Alfa=55.09

$P=6.0 kW$, $Q=3.2 kVar$

$K=0$ değerleri elde edilmiştir.



Şekil 5. 57 Iref=10A, Vo=110V ve Vs = 380 V için değişimler

PF=0.6897

THD=71.50

IEF=2.68A

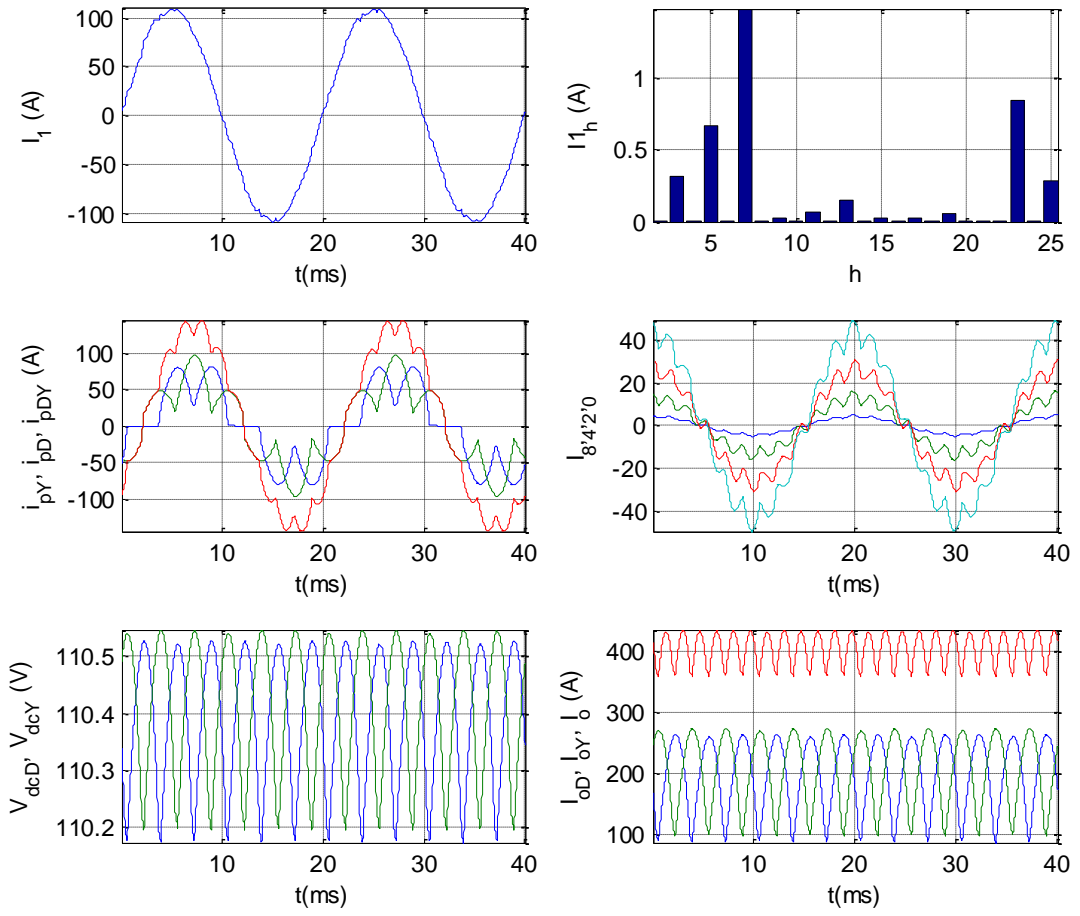
I1=2.18A

Alfa=68.76

P=1.2 kW

Q=0.8 kVar

K=0 değerleri elde edilmiştir.



Şekil 5. 58 Iref=400A, Vo=110V ve Vs = 380*0.9 V için değişimler

PF=0.996889

THD=2.62

IEF=76.93A

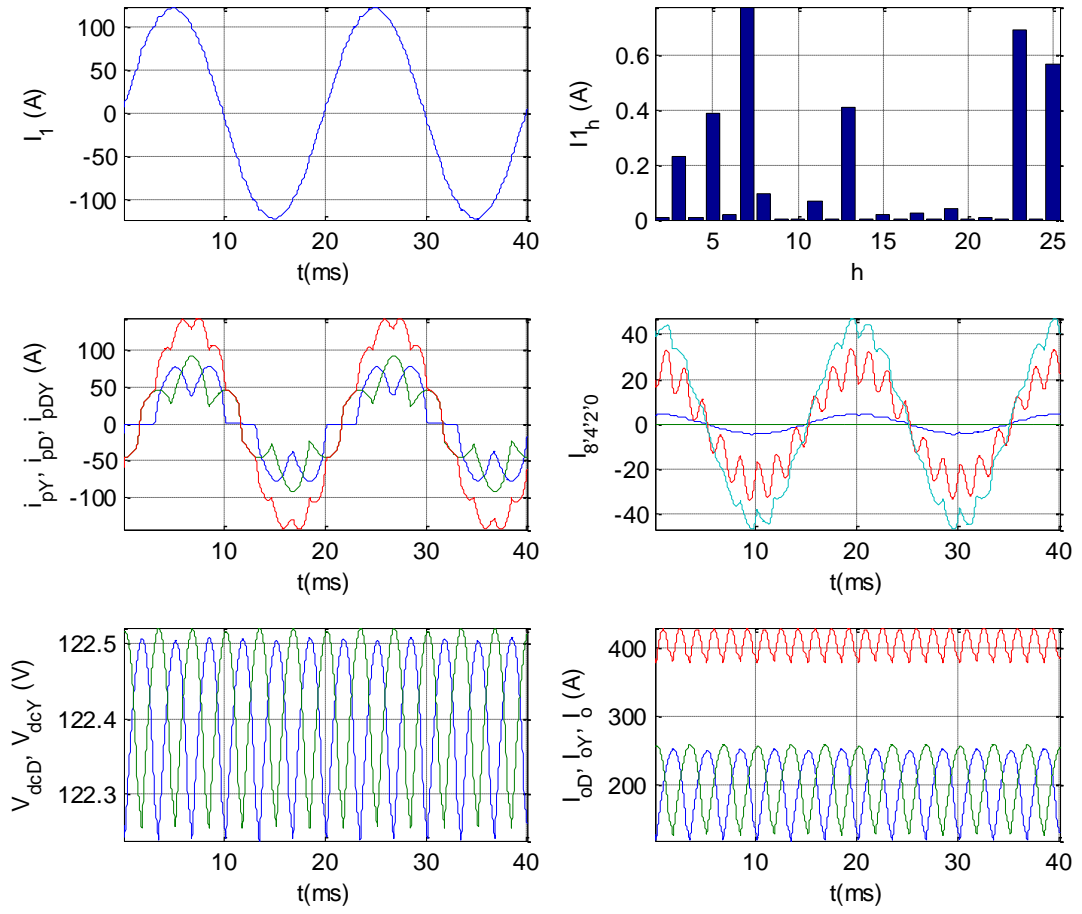
I1=76.90A

Alfa=36.35

P=45.6 kW

Q=0.5 kVar

K=7 değerleri elde edilmiştir.



Şekil 5. 59 Iref=400A, Vo=122V ve Vs = 380*0.9 V için değişimler

PF=0.996333

THD=1.69

IEF=86.29A

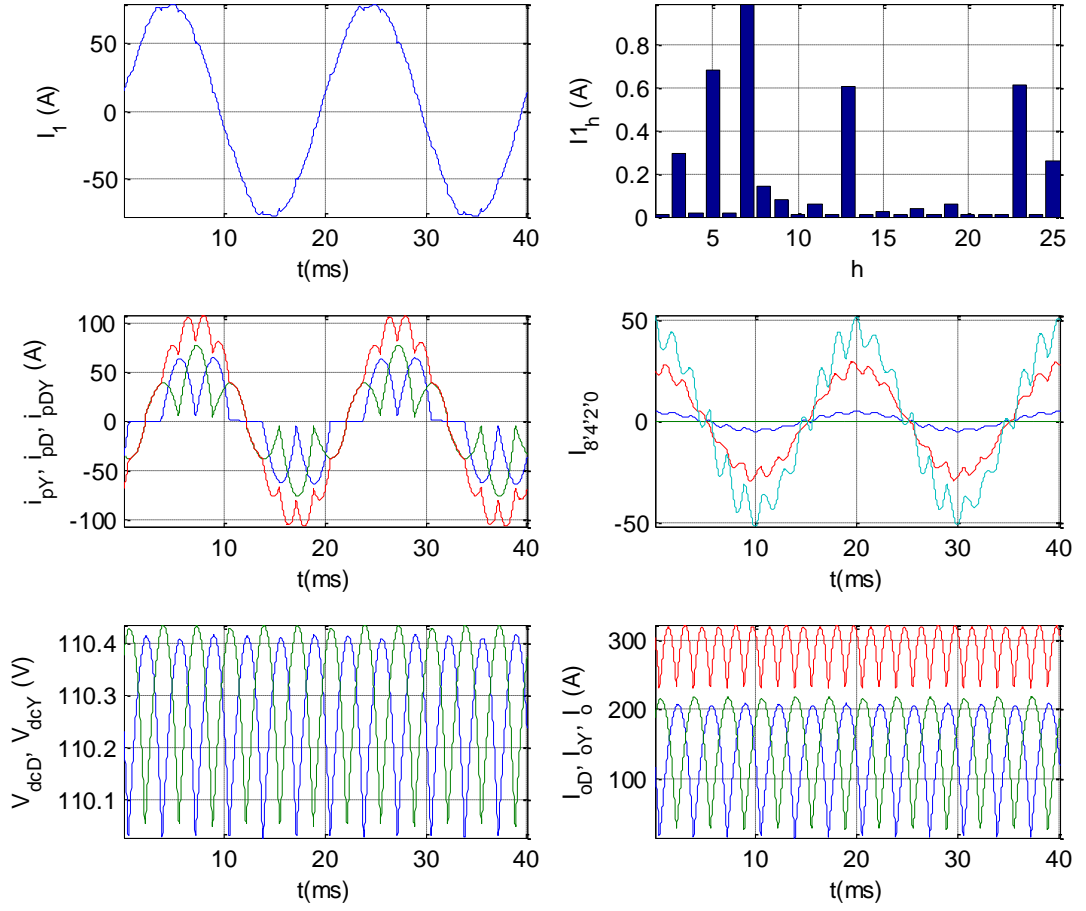
I1=86.27A

Alfa=25.55

P=51.1 kW

Q=2.0 kVar

K=6 değerleri elde edilmiştir.



Şekil 5. 60 Iref=300A, Vo=110V ve Vs = 380*0.9 V için değişimler

PF=0.986444

THD=3.06

IEF=55.39A

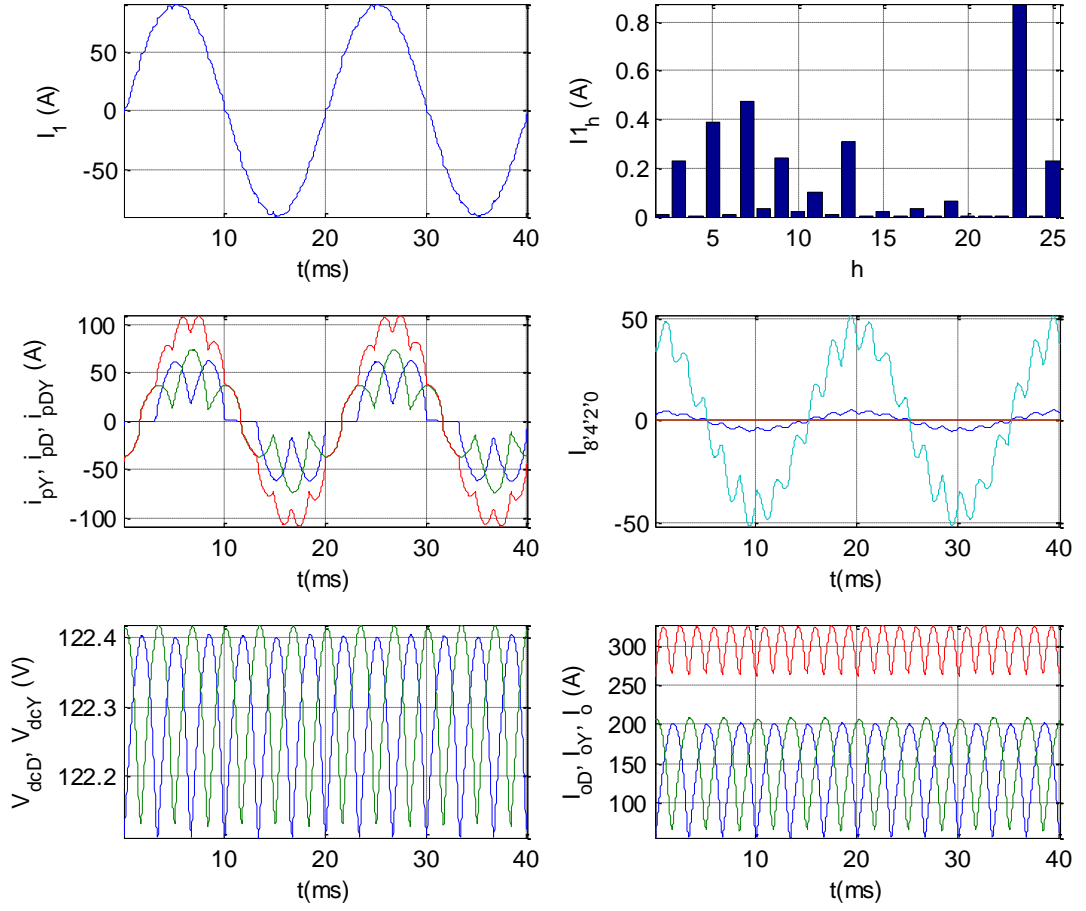
I1=55.37A

Alfa=38.18

P=32.5 kW

Q=4.7 kVar

K=6 değerleri elde edilmiştir.



Şekil 5. 61 Iref=300A, Vo=122V ve Vs = 380*0.9 V için değişimler

PF=0.995667

THD=2.20

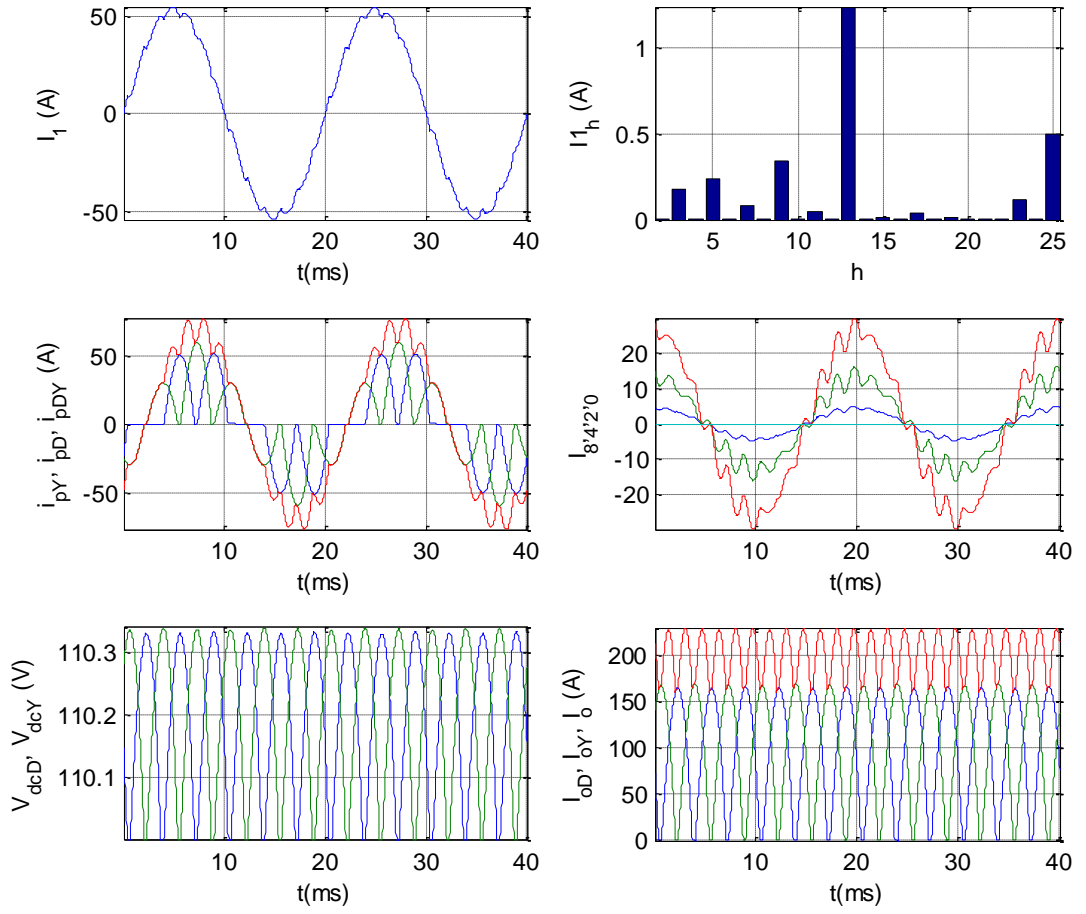
IEF=63.46A

I1=63.44A

Alfa=28.03

P=37.5 kW, Q=2.0 kVar

K=4 değerleri elde edilmiştir.



Şekil 5. 62 Iref=200A, Vo=110V ve Vs = 380*0.9 V için değişimler

PF=0.996222

THD=3.93

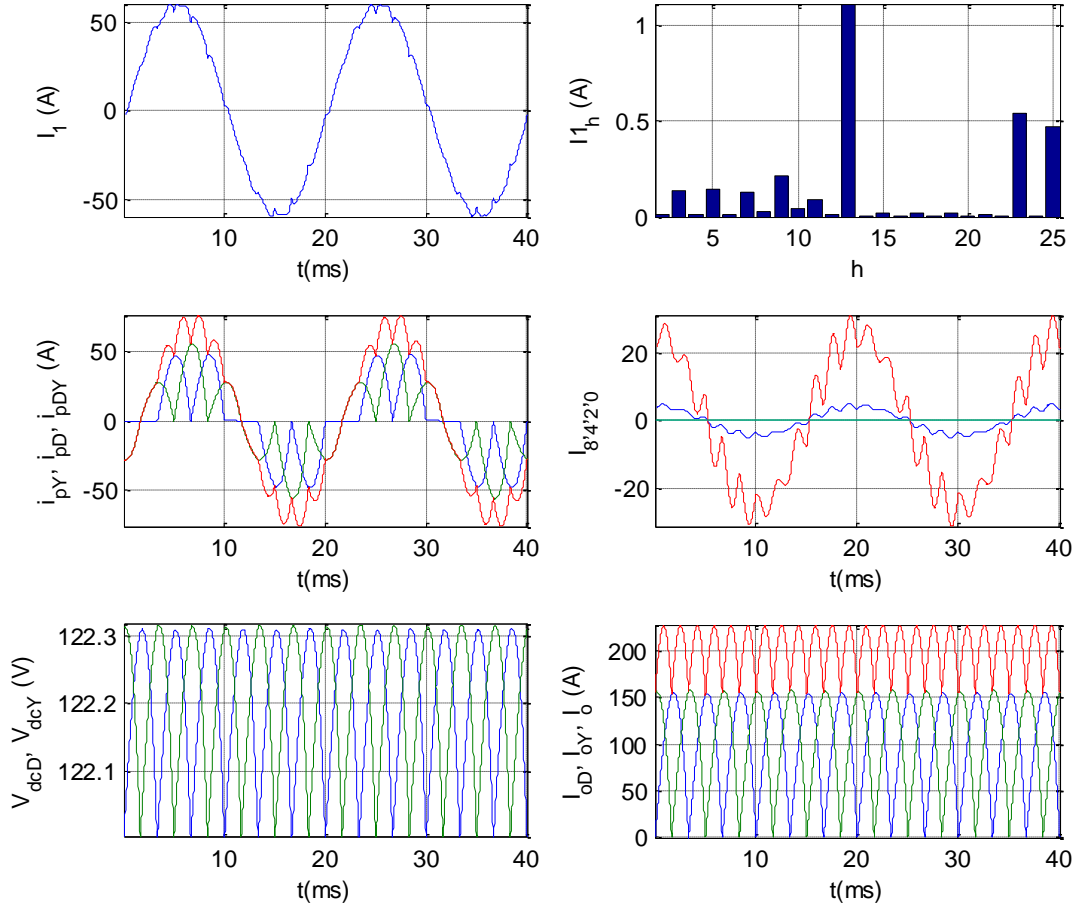
IEF=37.84A

I1=37.81A

Alfa=41.92

P=22.4 kW, Q=0.4 kVar

K=3 değerleri elde edilmiştir.



Şekil 5. 63 $I_{ref}=200A$, $V_o=122V$ ve $V_s = 380*0.9 V$ için değişimler

PF=0.991333

THD=3.51

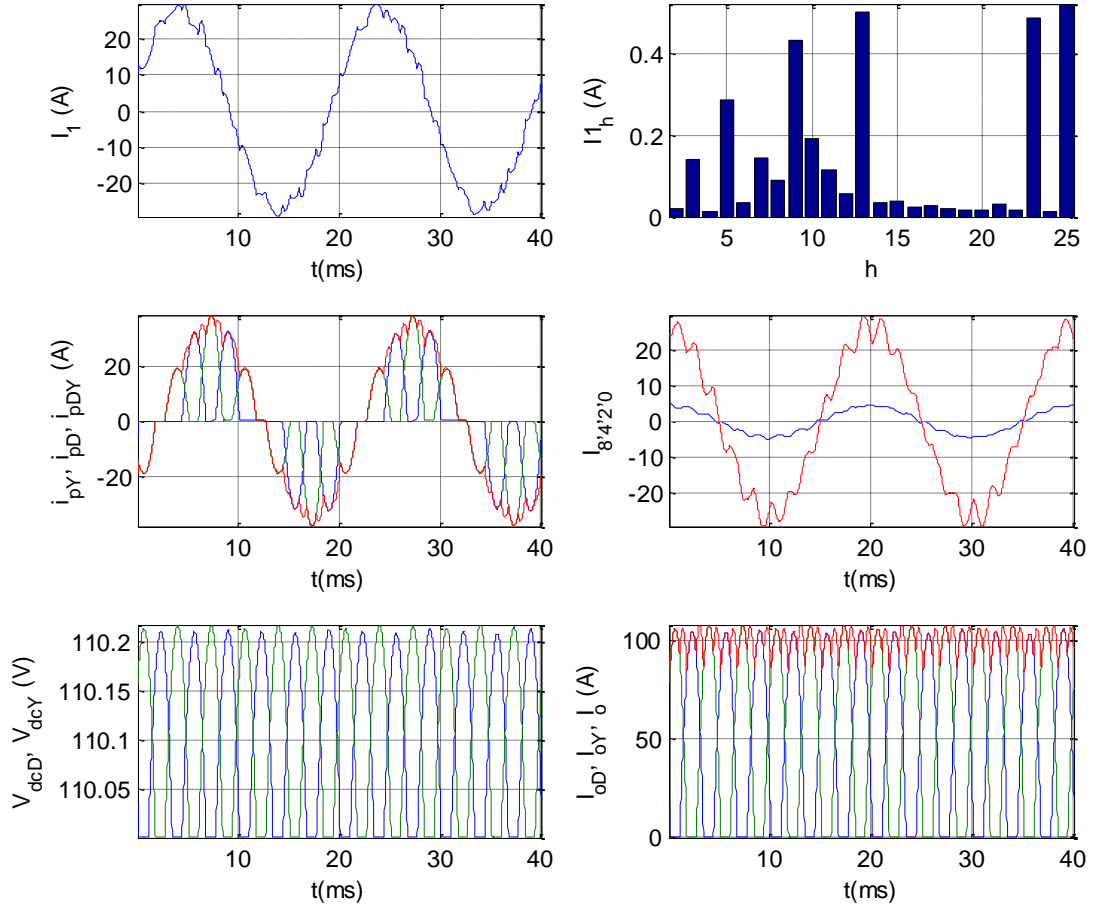
IEF=42.37A

I1=42.35A

Alfa=30.57

P=25.0 kW, Q=2.6 kVar

K=2 değerleri elde edilmiştir.



Şekil 5. 64 $I_{ref}=100A$, $V_o=110V$ ve $V_s = 380*0.9 V$ için değişimler

PF=0.958778

THD=6.94

IEF=19.70A

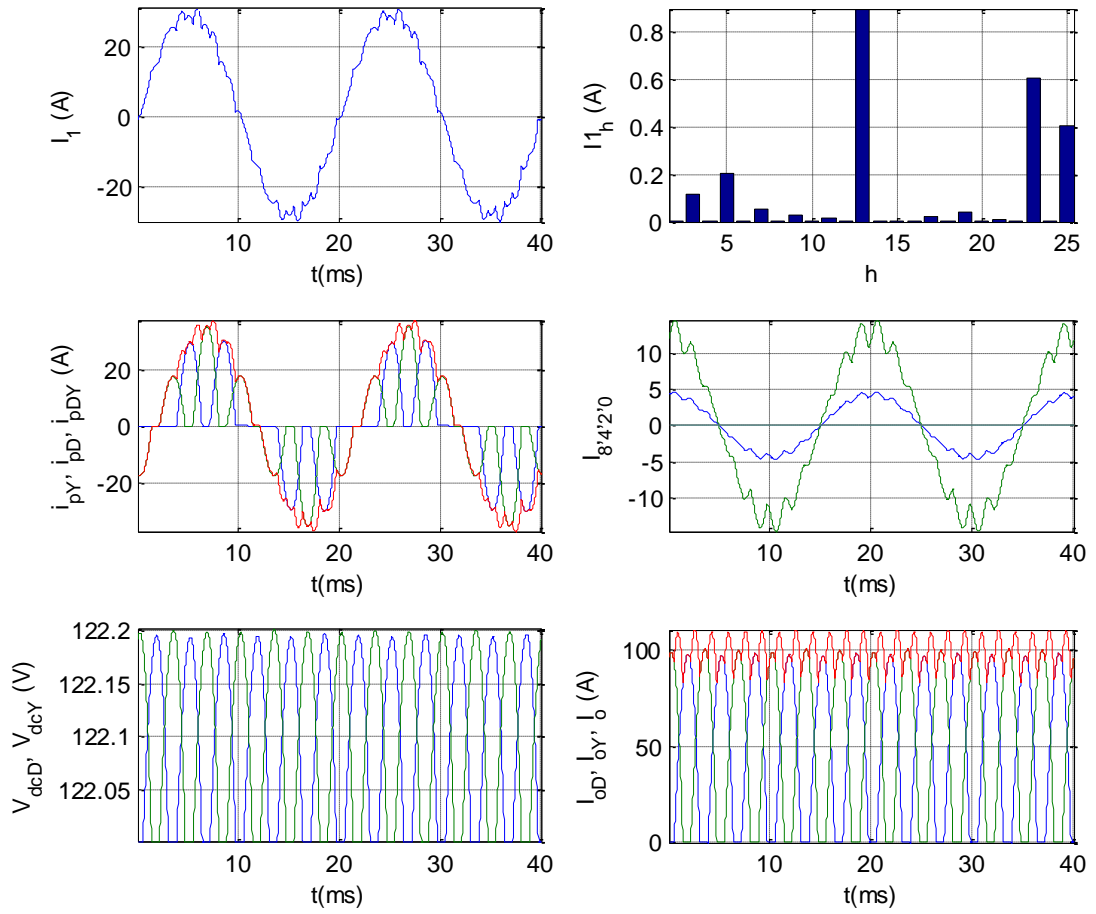
I1=19.65A

Alfa=49.14

P=11.2 kW

Q=3.1 kVar

K=2 değerleri elde edilmiştir.



Şekil 5. 65 Iref=100A, Vo=122V ve Vs = 380*0.9 V için değişimler

PF=0.993889

THD=6.17

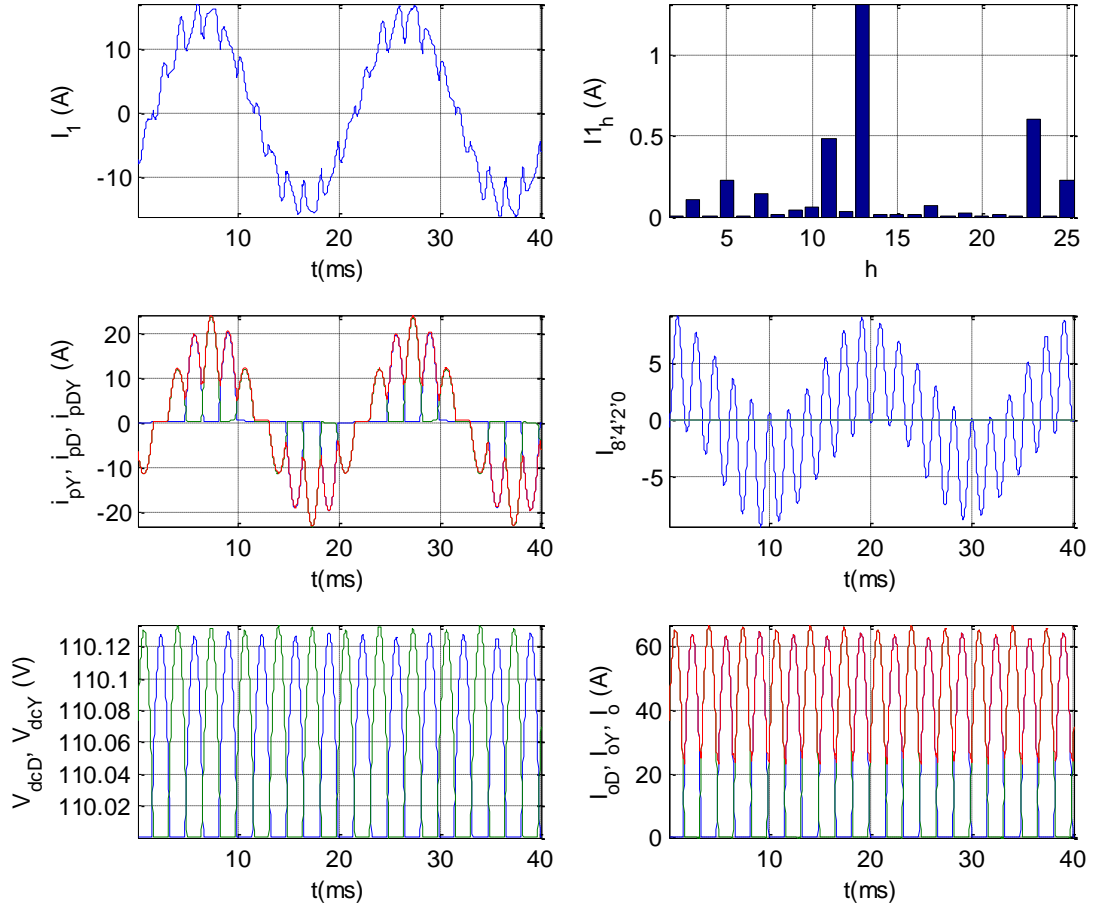
IEF=20.63A

I1=20.59A

Alfa=39.27

P=12.2 kW, Q=0.6 kVar

K=1 değerleri elde edilmiştir.



Şekil 5. 66 $I_{ref}=50A$, $V_o=110V$ ve $V_s = 380*0.9 V$ için değişimler

PF=0.859556

THD=16.04

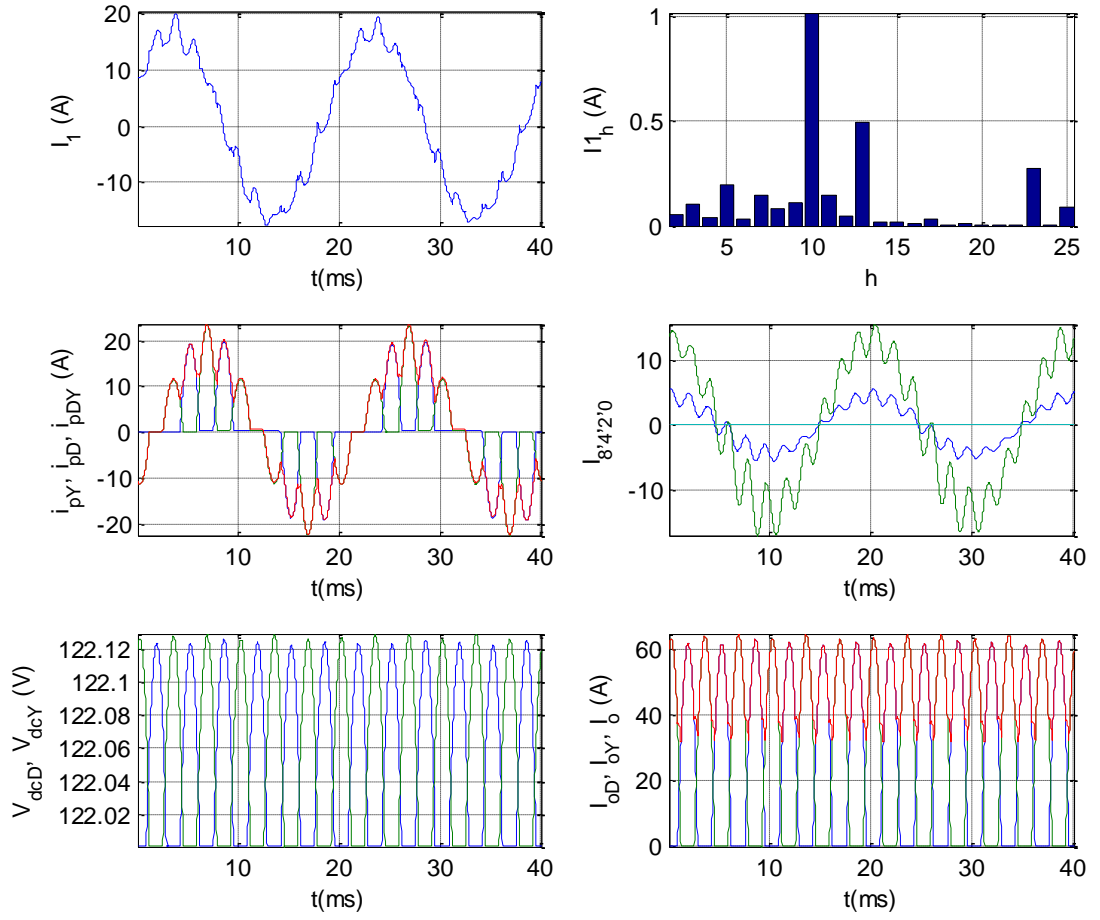
IEF=10.47A

I1=10.33A

Alfa=54.38

P=5.3 kW, Q=3.0 kVar

K=0 değerleri elde edilmiştir.



Şekil 5. 67 $I_{ref}=50A$, $V_o=122V$ ve $V_s = 380*0.9 V$ için değişimler

PF=0.882889

THD=11.60

IEF=11.75A

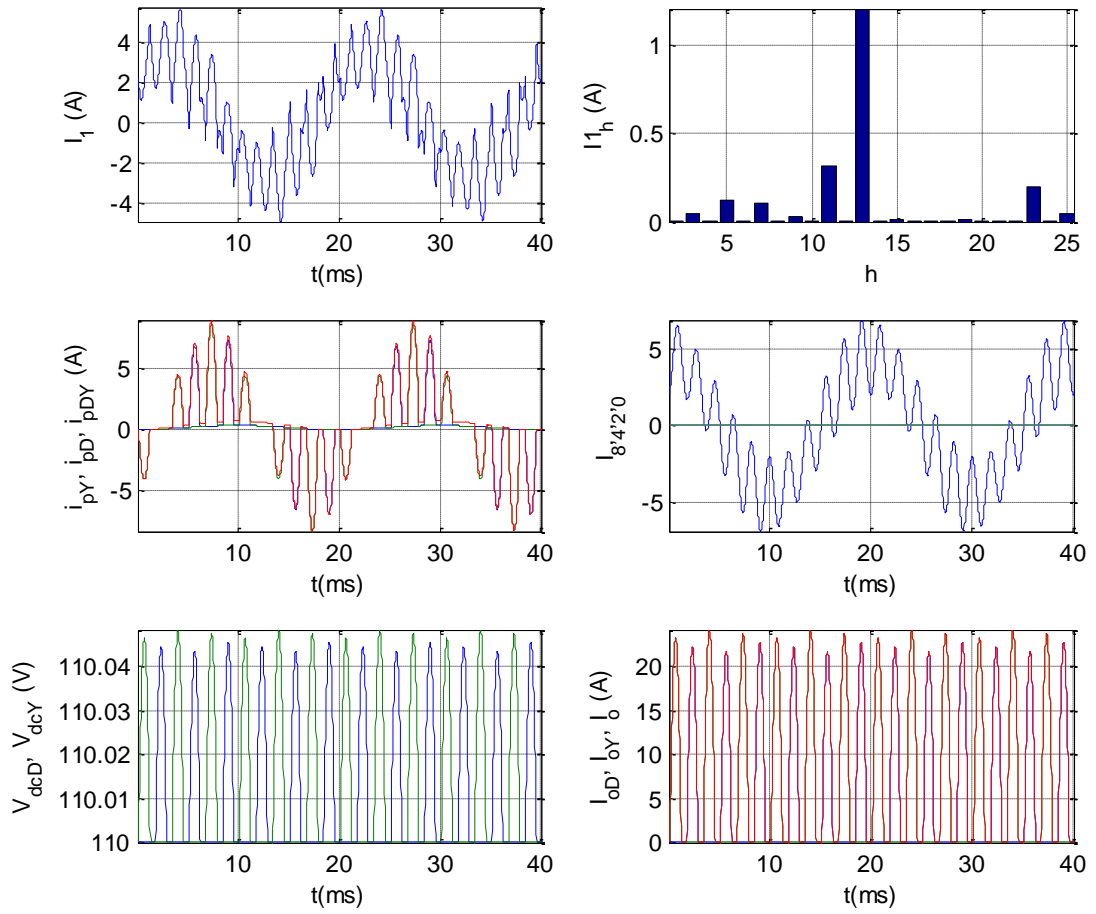
I1=11.67A

Alfa=45.44

P=6.2 kW

Q=3.1 kVar

K=1 değerleri elde edilmiştir.



Şekil 5. 68 Iref=10A, Vo=110V ve Vs = 380*0.9 V için değişimler

PF=0.727222

THD=60.59

IEF=2.61A

I1=2.23A

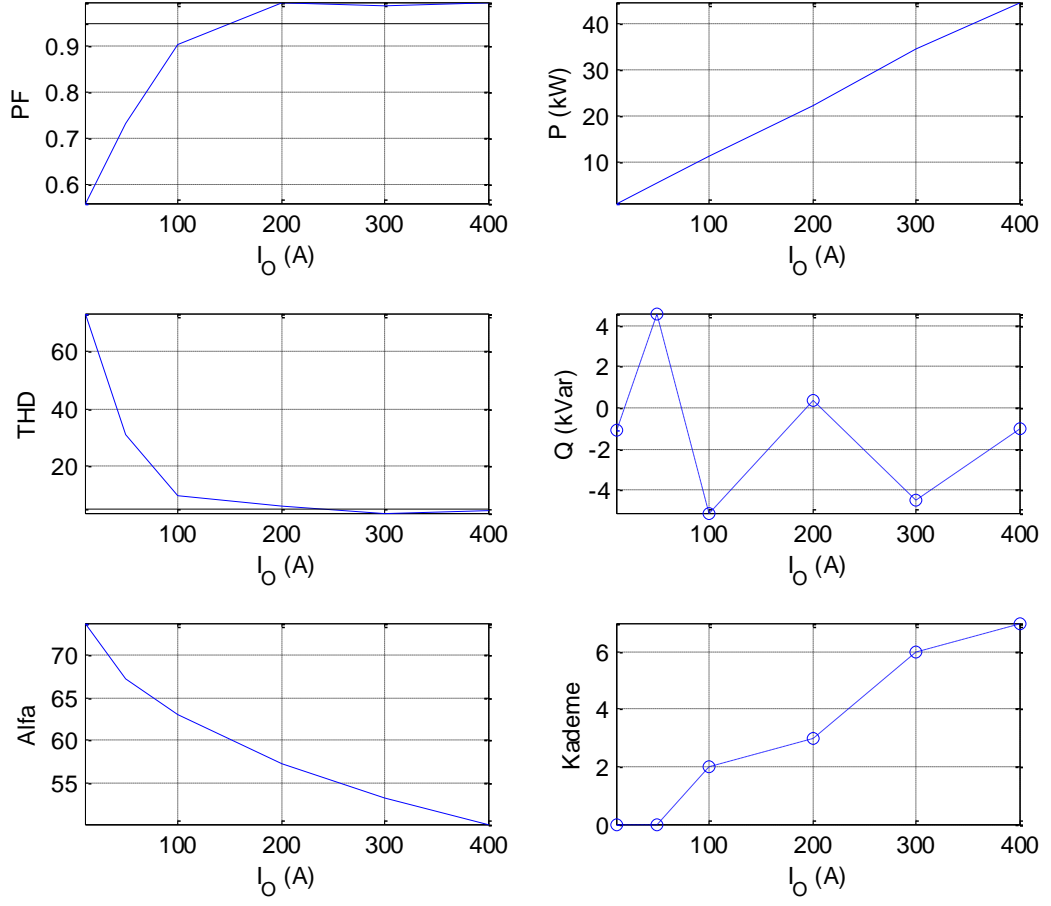
Alfa=61.95

P=1.1 kW

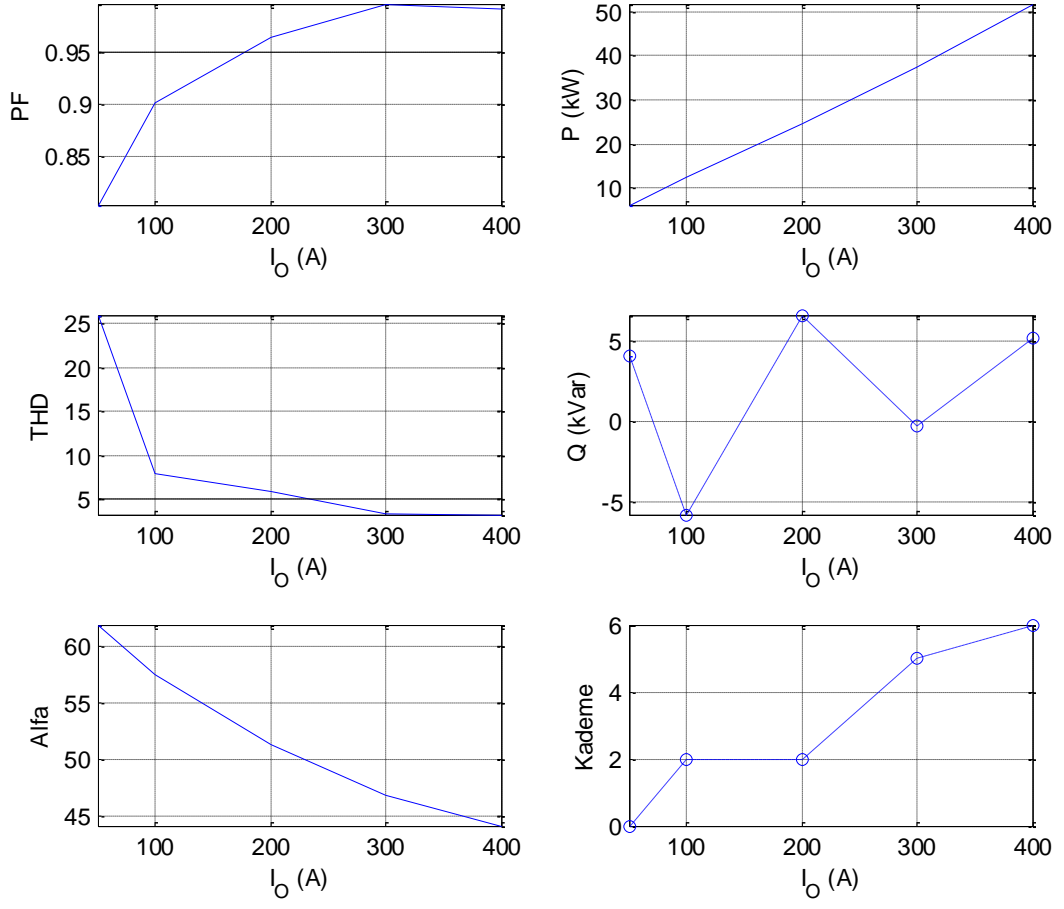
Q=0.7 kVar

K=0 değerleri elde edilmiştir.

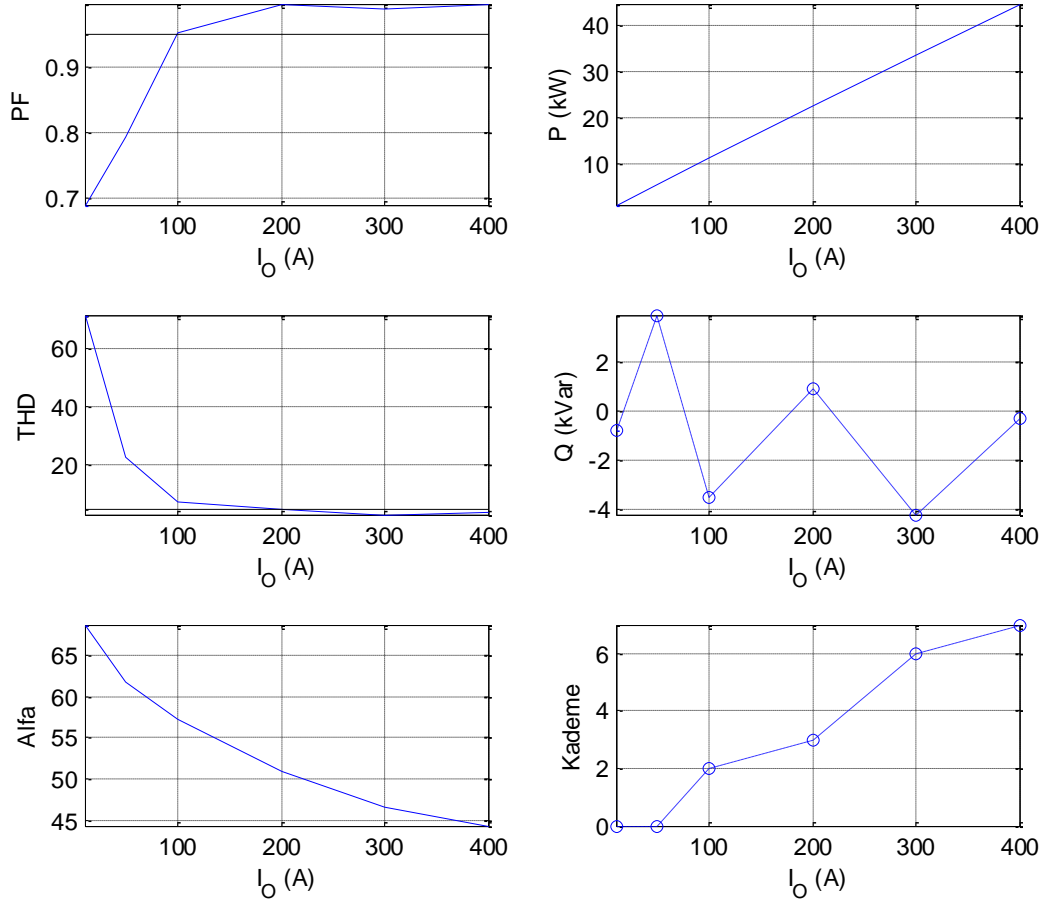
Elde edilen veriler gruplandırılarak, karakteristik eğriler çizdirilmiştir. Sonuçlar Şekil 37-Şekil 42’de verilmiştir.



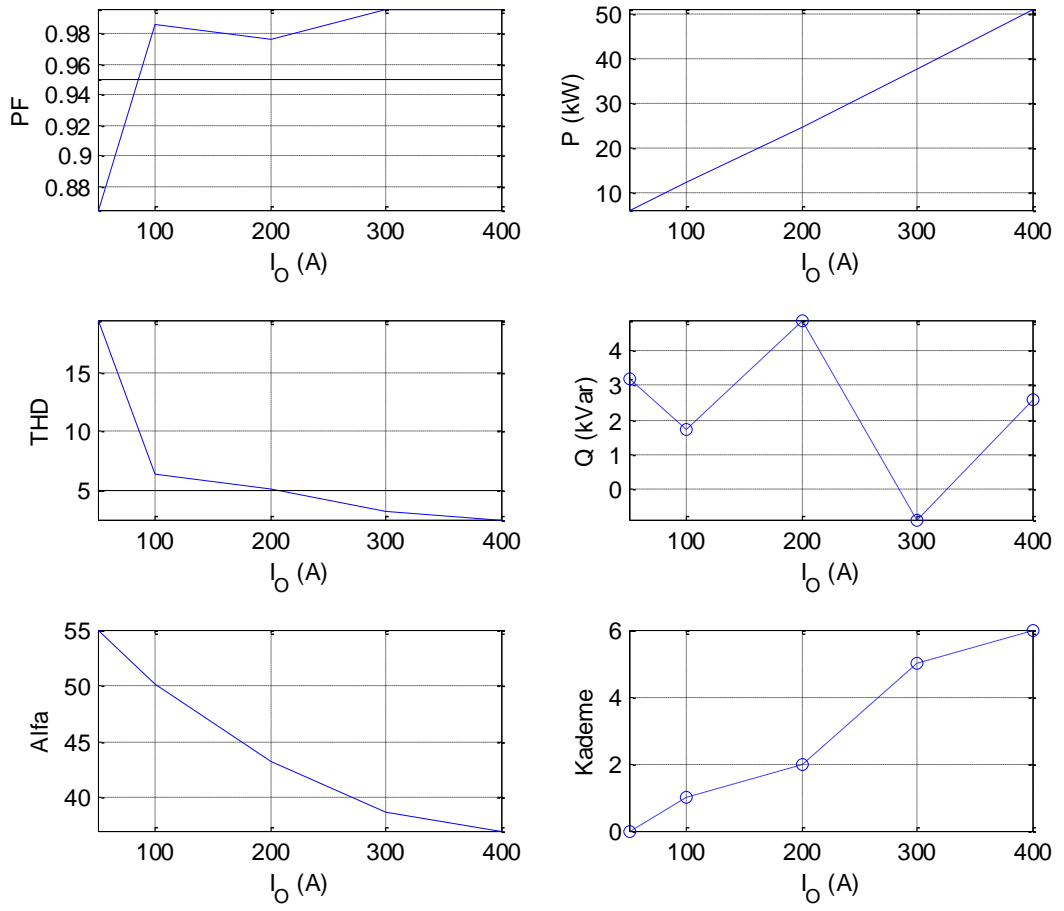
Şekil 5. 69 Vs=380 + %10 V, Vakü=110V için çıkış akımına bağlı değişimler



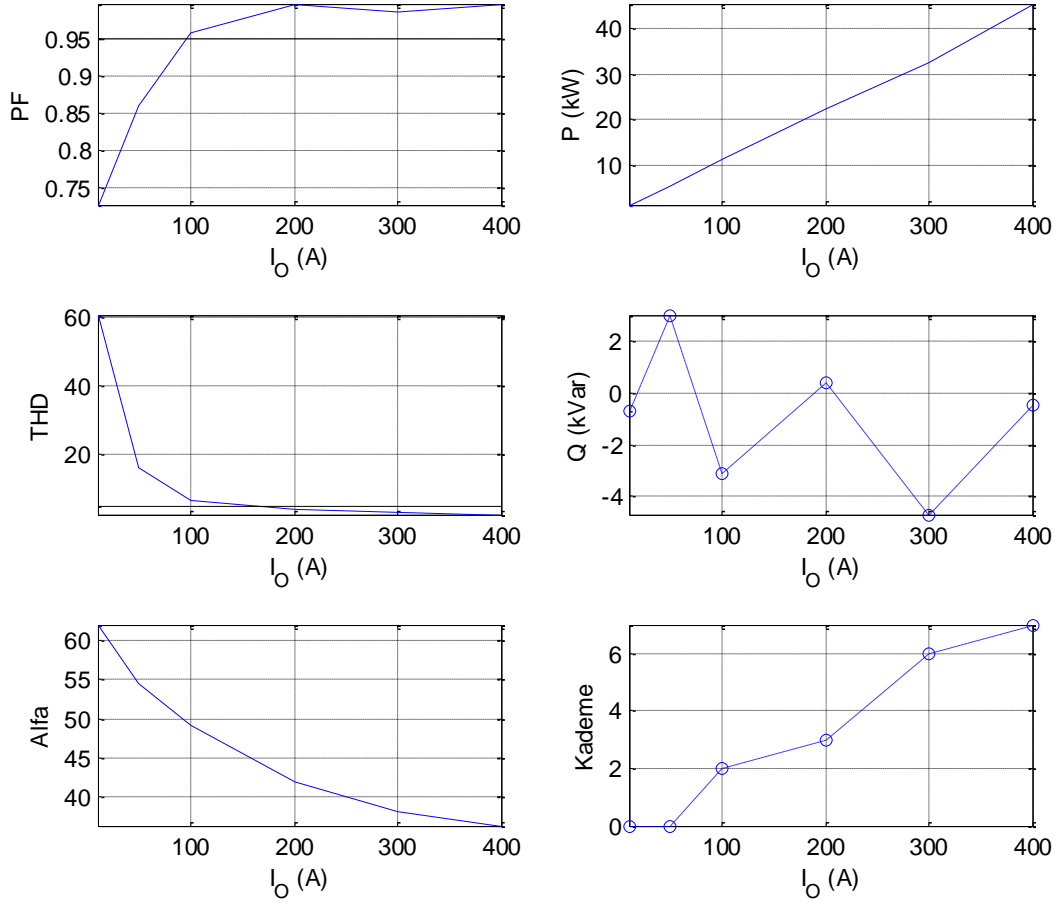
Şekil 5. 70 Vs=380 + %10 V, Vakü=122V için çıkış akımına bağlı değişimler



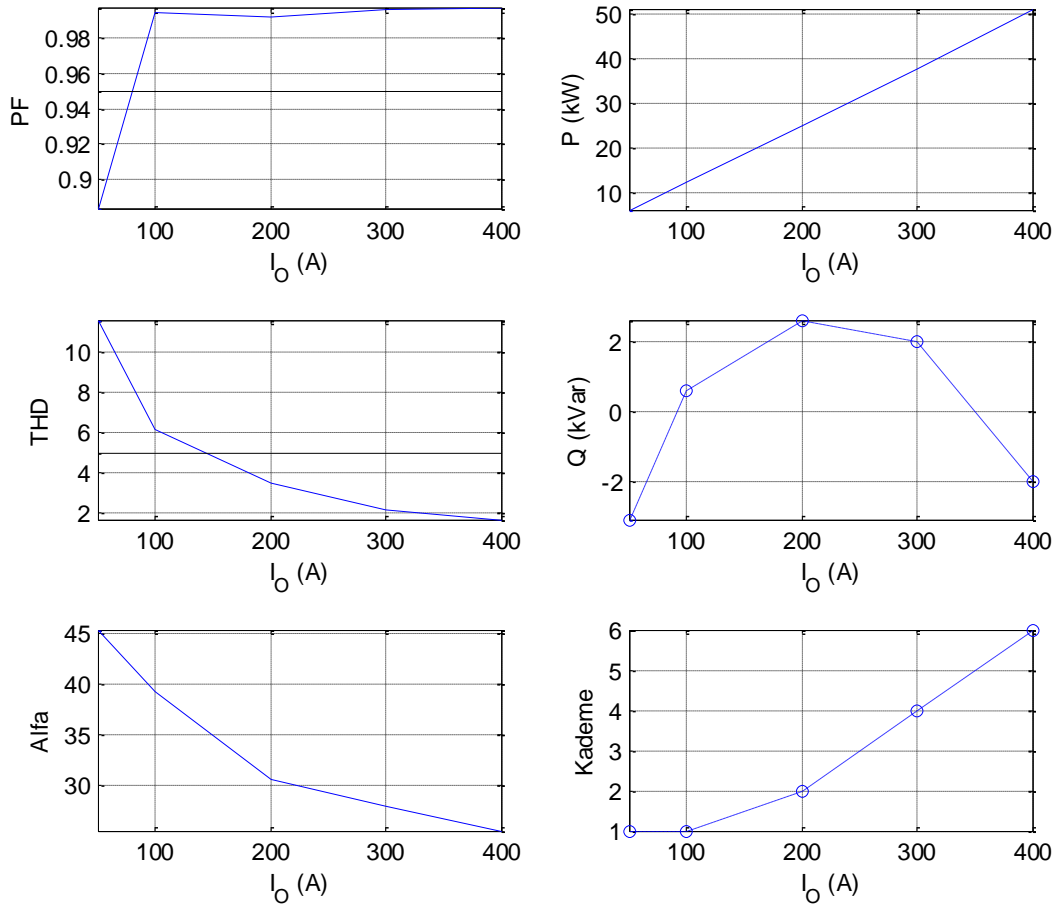
Şekil 5. 71 $V_s=380V$, $V_{akü}=110V$ için çıkış akımına bağlı değişimler



Şekil 5. 72 Vs=380V, Vakü=122V için çıkış akımına bağlı değişimler



Şekil 5. 73 $V_s=380$ - %10 V, Vakü=110V için çıkış akımına bağlı değişimler



Şekil 5. 74 Vs=380 - %10 V, Vakü=122V için çıkış akımına bağlı değişimler

Değişimlerde nominal çalışma şartlarında PF ve THD hedefinin sağlandığı görülmektedir. Çıkış akımı azaldığında Alfa açısı artmakta, PF ve THD değerleri kötüleşmektedir. Transformatör dönüştürme oranı harmonikleri etkilemektedir. Bu oran ne kadar büyük olursa Alfa açısı o kadar küçük olmaktadır. Alfa açısının en düşük olduğu durum harmonikler açısından en iyi durumdur. Sistemde Alfa açısına bağlı olarak Kademe değişikliği ile reaktif güç kompanzasyonu yapılmaktadır. Aynı zamanda 12. harmonik süzülmemektedir.

5.2 Şebeke Dengesizliği Durumunun Doğrultucu Harmoniklerine Etkisi

Endüstriyel uygulamaların birçoğunda kaynak gerilimi olarak şebeke gerilimi direkt kullanılmaktadır. Pratikte üç fazlı şebeke geriliminde dengesizlikler mevcuttur. Faz gerilimlerinin birbirine kıyasla farklı olması, şebekeden beslenen cihazları etkilemektedir. Dengesiz şebeke koşullarında çalışan üç fazlı doğrultucularda, doğrultucu akım harmoniklerinin arttığı bilinmektedir[24]. Doğrultuculardaki şebeke dengesizliği durumu harmoniklerin artmasına, üç ve üçün katı karaktersitik olmayan ve dengeli durumda görünmeyen harmonikler üretir.[25,26]. Gerilim dengesizliği durumunda giriş akımının toplam harmonik distorsiyonunun %3-7 civarında arttığı belirtilmiştir[27,28].

Eğer kaynak faz gerilimlerine V_{an} , V_{bn} ve V_{cn} denirse, bunlara karşılık gelen sıfır sequence, pozitif sequence ve negatif sequence gerilimleri ifade edilirse;

$$V_0 = \frac{V_{an} + V_{bn} + V_{cn}}{3} \quad (5.1)$$

$$V_1 = \frac{V_{an} + a.V_{bn} + a^2.V_{cn}}{3} \quad (5.2)$$

$$V_2 = \frac{V_{an} + a^2.V_{bn} + a.V_{cn}}{3} \quad (5.3)$$

Dengesizlik faktörü u ;

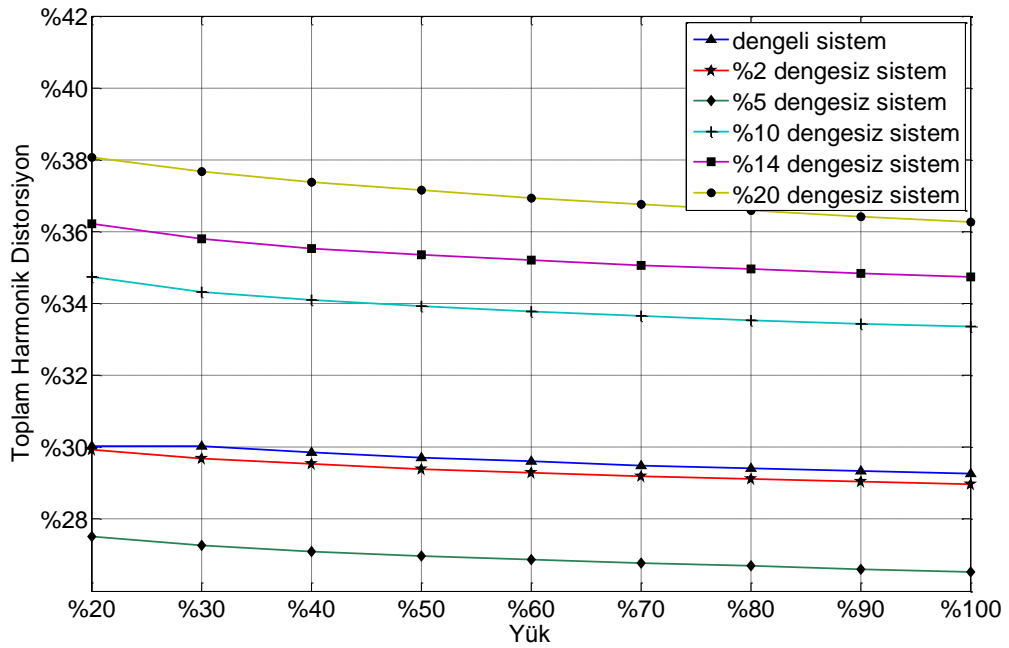
$$u = \frac{|V_2|}{|V_1|} \quad (5.4)$$

Buradaki a operatörü $a = 1 \angle 120^\circ$ şeklindedir. CENELEC EN 50160, IEEE 1159 standartlarına göre şebeke faz gerilimlerinde $\pm\%10$ 'luk değişim kabul edilebilir değerlerdedir. Üç fazlı sistemde yüzdesel olarak dengesizlik durumlarına karşılık gelen gerilimler Çizelge5. 1'de gösterilmiştir.

Çizelge5. 1 Dengeli Üç Fazlı Ve Dengesizlik Faktörlü Gerilimler

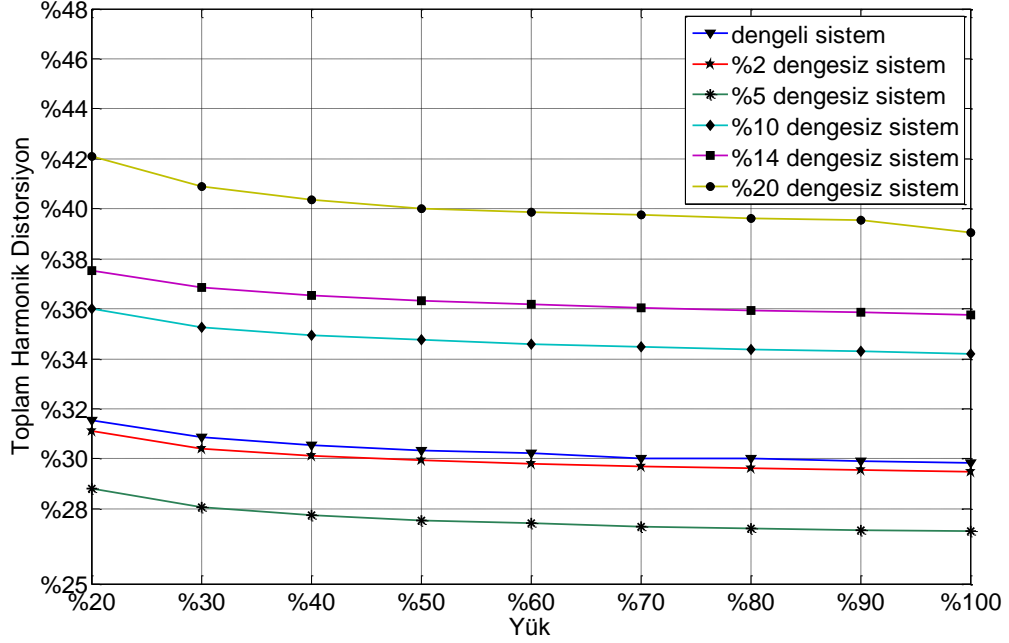
u(%)	V_{an}	V_{bn}	V_{cn}
Dengeli	$1\angle 0^\circ$	$1\angle 120^\circ$	$1\angle 240^\circ$
2	$1\angle 0^\circ$	$0.95\angle 120^\circ$	$1.01\angle 240^\circ$
5	$1\angle 0^\circ$	$0.861\angle 120^\circ$	$0.863\angle 240^\circ$
10	$1\angle 0^\circ$	$1.4\angle 120^\circ$	$1.1\angle 240^\circ$
14	$1\angle 0^\circ$	$1.55\angle 120^\circ$	$1.13\angle 240^\circ$
20	$1\angle 0^\circ$	$1.9\angle 120^\circ$	$1.1\angle 240^\circ$

Şekil 5. 75'te 6-darbeleri kontrolsüz doğrultucularda şebeke dengesizliği durumunda giriş akım harmoniklerindeki değişimler verilmiştir. Burada şebeke dengesizliğinin toplam harmonik distorsiyonu arttırdığı görülmektedir.



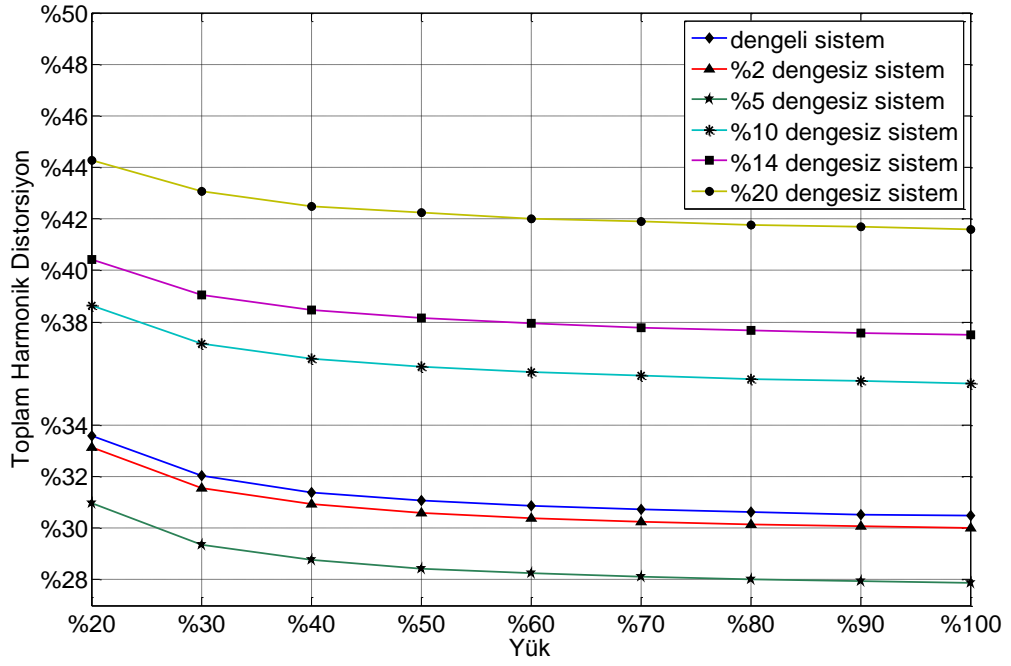
Şekil 5. 75 Şebeke Dengesizliği Durumunda 6-Darbeli Doğrultucu THD Değerleri

Şekil 5. 75'te %2 ve %5'lik şebeke dengesizliği ile dengeli sistem karşılaştırıldığında tüm yüklerde THD değerinin birbirine yakın olmaktadır. %10, %14 ve %20'lik şebeke dengesizliğinde ise dengesizlik arttıkça harmonik içeriğin arttığı görülmektedir.

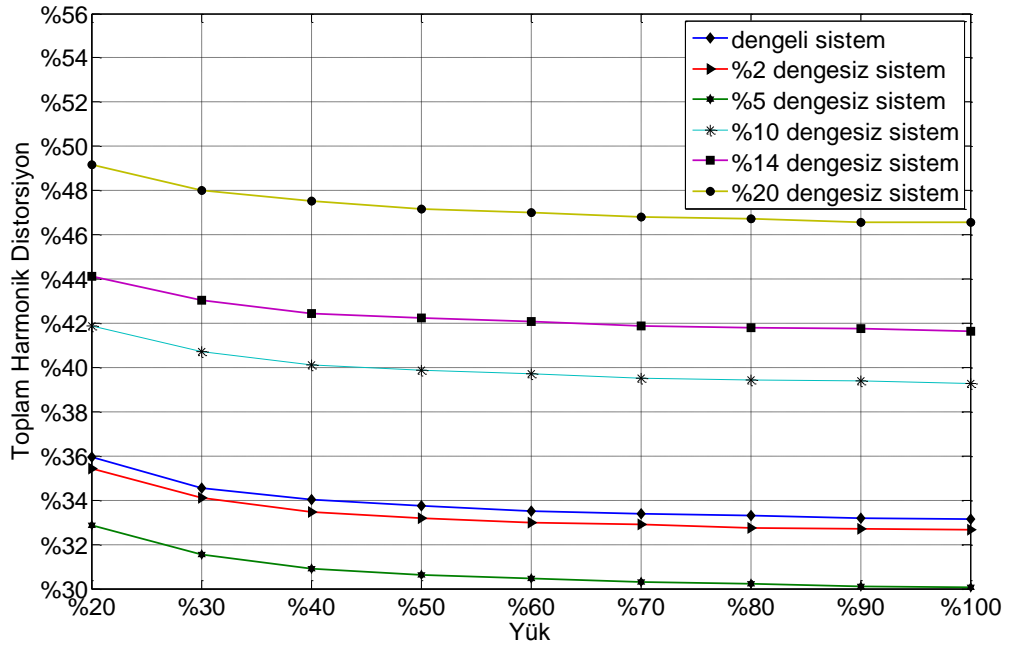


Şekil 5. 76 Kontrol Açısı 20° iken 6-Darbeli Doğrultucu Giriş Akım Harmonikleri

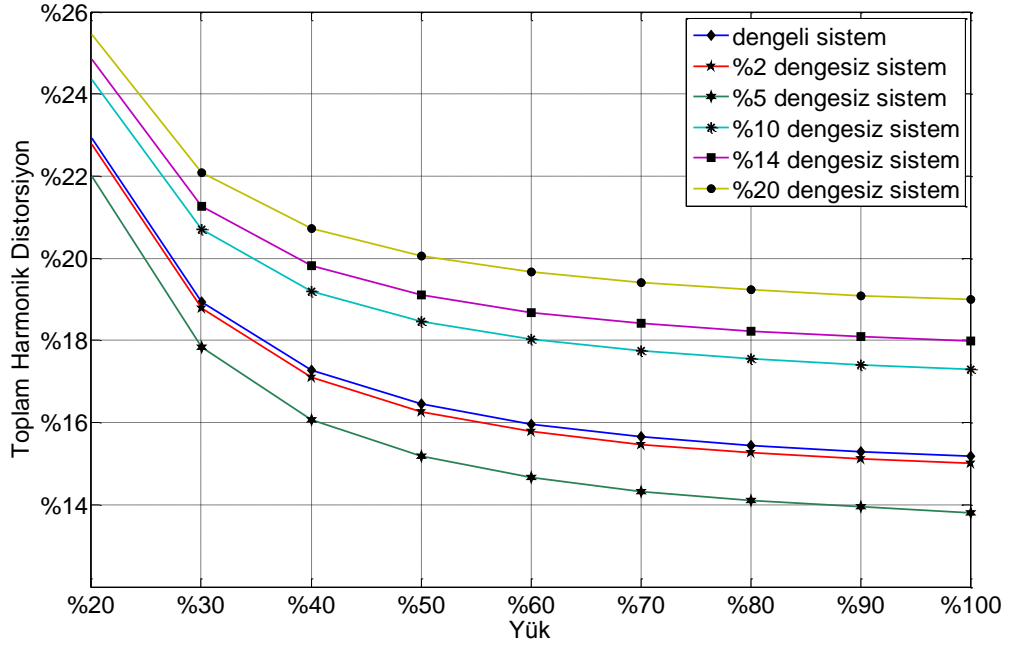
Şekil 5. 76'da kontrol açısı 20° iken 6-darbeli doğrultucuya ait THD değerleri görülmektedir. Buradan kontrol açısı arttıkça doğrultucuların THD değerinin arttığı açıkça görülmektedir. Şekil 5. 76 ile Şekil 5. 75 karşılaştırıldığında şebeke geriliminin her bir durumu için kontrol açısının THD üzerinde olumsuz etkide bulunduğu görülebilmektedir. Şekil 5. 77'de kontrol açısı 30° iken 6-darbeli doğrultucuya ait THD değerleri bulunmaktadır. Burada yine kontrol açısına bağlı olarak harmoniklerde kötüleşme gözlemlenebilmektedir. Şekil 5. 78'de ise 40°'lik kontrol açısında altı darbeli doğrultucunun muhtelif yüklerdeki toplam harmonik bozunma değerleri bulunmaktadır.



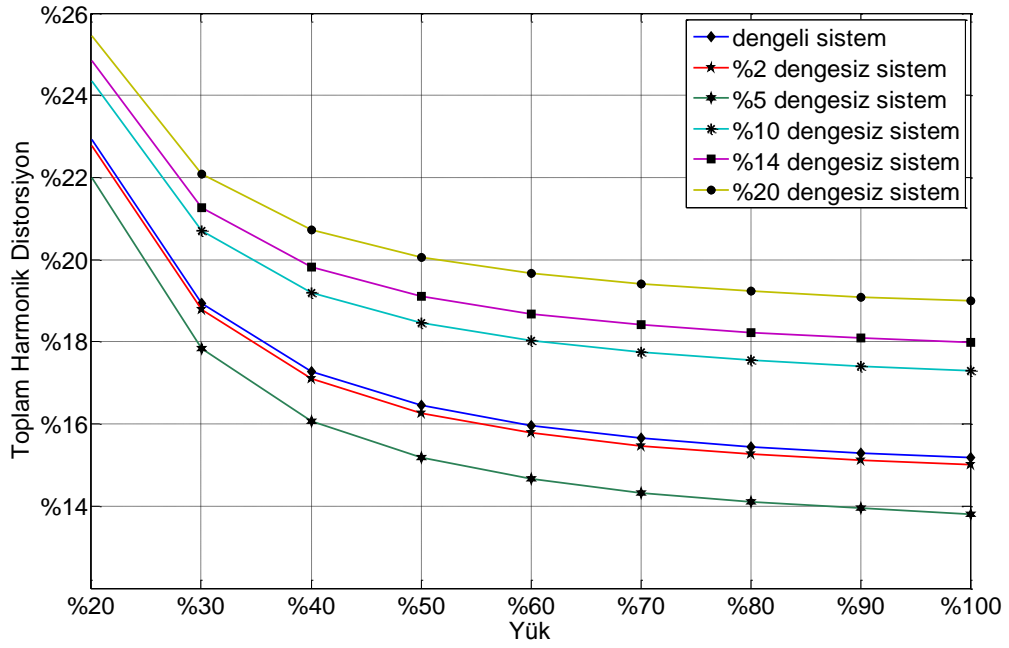
Şekil 5. 77 Kontrol Açısı 30° iken 6-Darbeli Doğrultucu Giriş Akım Harmonikleri



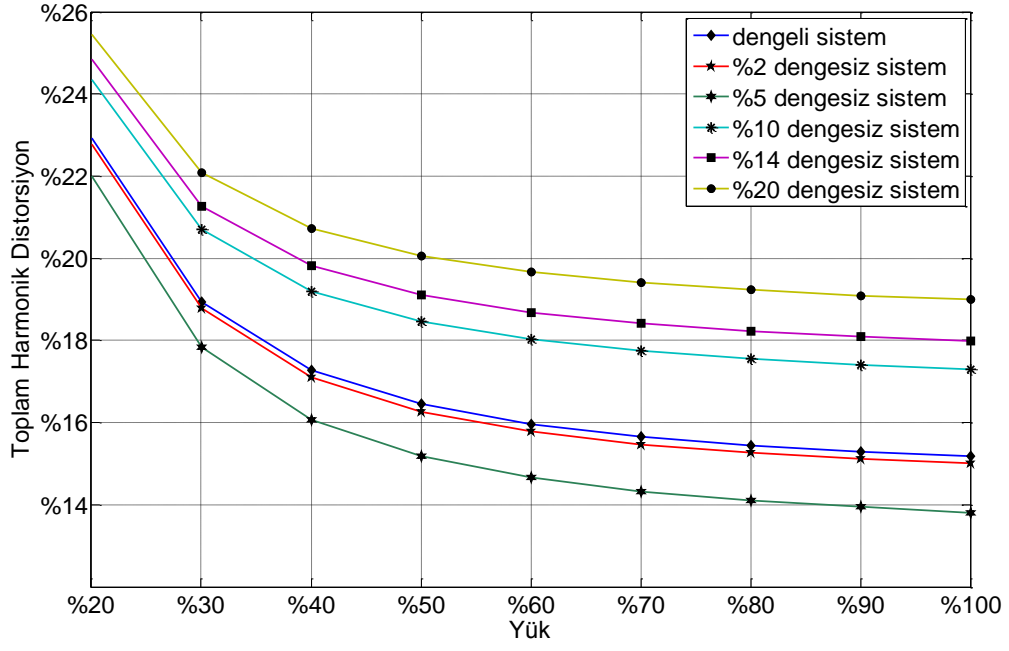
Şekil 5. 78 Kontrol Açısı 40° iken 6-Darbeli Doğrultucu Giriş Akım Harmonikleri



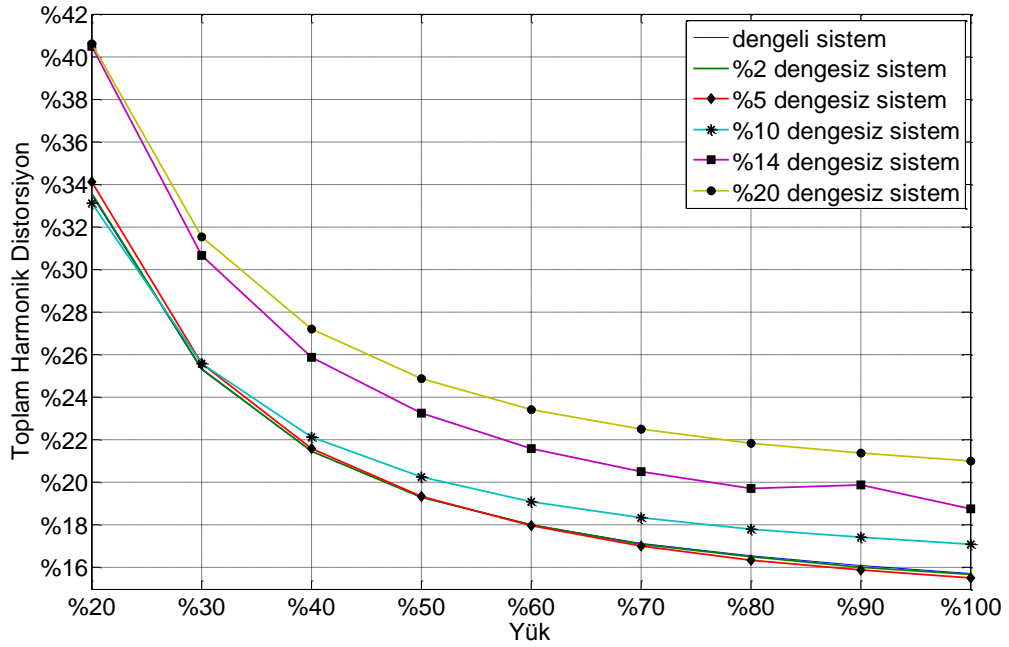
Şekil 5. 79 Şebeke Dengesizliği Durumunda 12-Darbeli Doğrultucu THD Değerleri



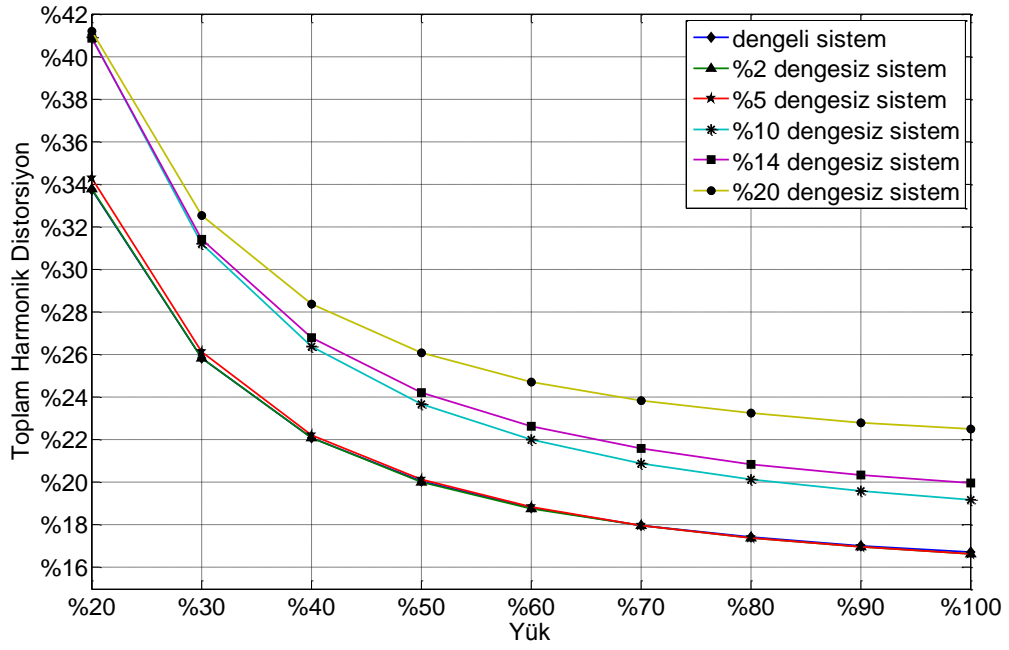
Şekil 5. 79'da 12-darbeli kontrolsüz bir doğrultucunun şebeke dengesizliği durumunda muhtelif yüklerde çekmiş olduğu akımlardaki THD değerleri görülmektedir. Şekil 5. 75 ile



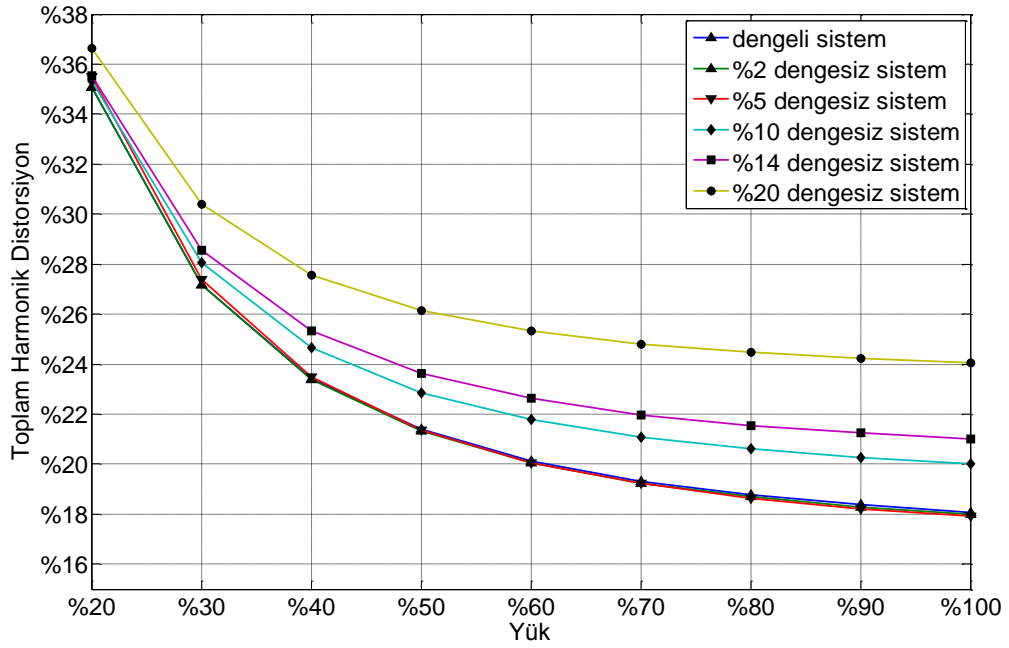
Şekil 5. 79 karşılaştırıldığında, aynı şebeke gerilimi koşullarında 12-darbeli doğrultucuların çektiği akımlardaki harmonik içeriğin 6-darbeli doğrultuculara nazaran daha az olduğu görülmektedir.



Şekil 5. 80 Kontrol Açısı 20° iken 12-Darbeli Doğrultucu Giriş Akım Harmonikleri



Şekil 5. 81 Kontrol Açısı 30° iken 12-Darbeli Doğrultucu Giriş Akım Harmonikleri



Şekil 5. 82 Kontrol Açısı 40° iken 12-Darbeli Doğrultucu Giriş Akım Harmonikleri

Kontrol açısının artmasının 6-darbeli doğrultuculardakine benzer biçimde 12-darbeli doğrultucuların çektiği harmoniklerin artmasında neden olduğu görülebilmektedir. %2 ve %5'lik şebeke dengesizliklerinde 12-darbeli doğrultucuların ürettikleri harmoniklerin

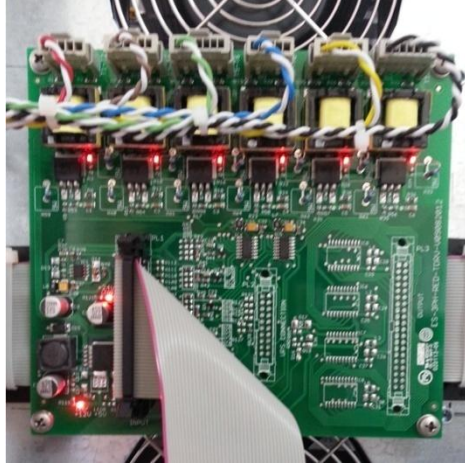
hemen hemen aynı değerlere sahip oldukları göze çarpmaktadır. Ayrıca, aynı şartlar altında 12-darbeli doğrultucuların sahip olduğu THD değerleri 6-darbeli doğrultuculardan yaklaşık olarak %18 daha az olduğu görölmektedir. Bu farkın pratikteki anlamı, harmonikleri iyileştirmek adına gereksinim duyulan filtre değerlerinin daha düşük değerlerde olacağıdır. Son olarak, her iki doğrultucuda da yük değişimlerine karşılık harmonik bozunmalardaki değişim gayet düzgün değiştii gözlemlenmiştir. Bu durum girişte kullanılacak filtre boyutunun geniş bir yük aralığında ihtiyacı karşılayabileceğini göstermektedir.

6.1 Düşük Harmonikli Ve Yüksek Güç Faktörlü Yüksek Güçlü Doğrultucu Devresinin Uygulaması



Şekil 6. 1 12-Darbeli Doğrultucu Uygulama Devresi

Tez kapsamında gerçekleştirilen sistem Şekil 6. 1’de görünmektedir. Burada iki adet 6-darbeli doğrultucu paralel bağlanarak 12-darbeli doğrultucu sistemi elde edilmiştir. Doğrultucuların her birinde tristör tetikleme kartı, besleme devresi kartı ve anakart bulunmaktadır. Her iki doğrultucu üzerinde bilgi ekranı mevcuttur. Bu ekran üzerinden giriş üç faz gerilimleri, çıkış gerilimi, çıkış akımı bilgileri mevcuttur. Şekil 6. 2’de tristör tetikleme kartı görülmektedir. İlgili kart 3 adet tristör modülünü tetikleyebilme yeteneğine sahiptir. Her modül içerisinde 2 adet tristör olduğundan bu kart toplamda 6 adet tristör tetikleyebilme yeteneğine sahiptir. Tasarımı yapılan kartların muhtelif noktalarında dış dünyaya bilgi vermesi amacıyla ledler kullanılmıştır. Bilgi içerikli bu yapılara hayat ledi ismi verilmektedir.



Şekil 6. 2 Tristör Tetikleme Kartı

Şekil 6. 3’te sistemde kullanılan kartları beslemek amacıyla tasarlanmış olan besleme kartı görülmektedir. Besleme kartı, üç faz gerilimiyle çalışmaktadır ve bu kart üzerinden üç faz gerilimlerinin sıfır geçiş bilgileri algılanmaktadır. Besleme kartı opsiyonel olarak bir anahtar vasıtasıyla dc gerilimle de çalışabilmektedir. Buradaki amaç, akü şarj redresörlerinin çalışması esnasında şebeke gerilimi var olmadığı durum için kullanıcının akü gerilim bilgisini cihazın bilgi ekranından görebilmesidir. Besleme kartı tasarımında, geri dönüşlü anahtarlama güç kaynağı topolojisinden faydalanılmıştır.



Şekil 6. 3 Besleme Kartı

Şekil 6. 4'de anakart ve anakarta entegre olan bilgi ekranı görünmektedir. Anakart üzerindeki mikrodenetleyici şebeke gerilimlerinin durumunu kontrol ederek ilgili tristörler için tetikleme sinyali üretmektedir ve bununla beraber dış dünyaya sistem durumuyla ilgili bilgileri vermektedir. Anakart sayesinde çıkış gerilimi ve akımı kontrol edilebilmektedir. Doğrultucu sistemiyle ilgili tüm elektronik korumalar buradaki mikrodenetleyici vasıtasıyla sağlanmaktadır. Anakart üzerinde 4 adet buton bulunmaktadır. Bu butonlar sayesinde çıkış gerilim ve akım değerleri değiştirilebilmektedir. Ayrıca elektronik olarak doğrultucu sisteminin açma-kapama işlemleri yapılabilmektedir.



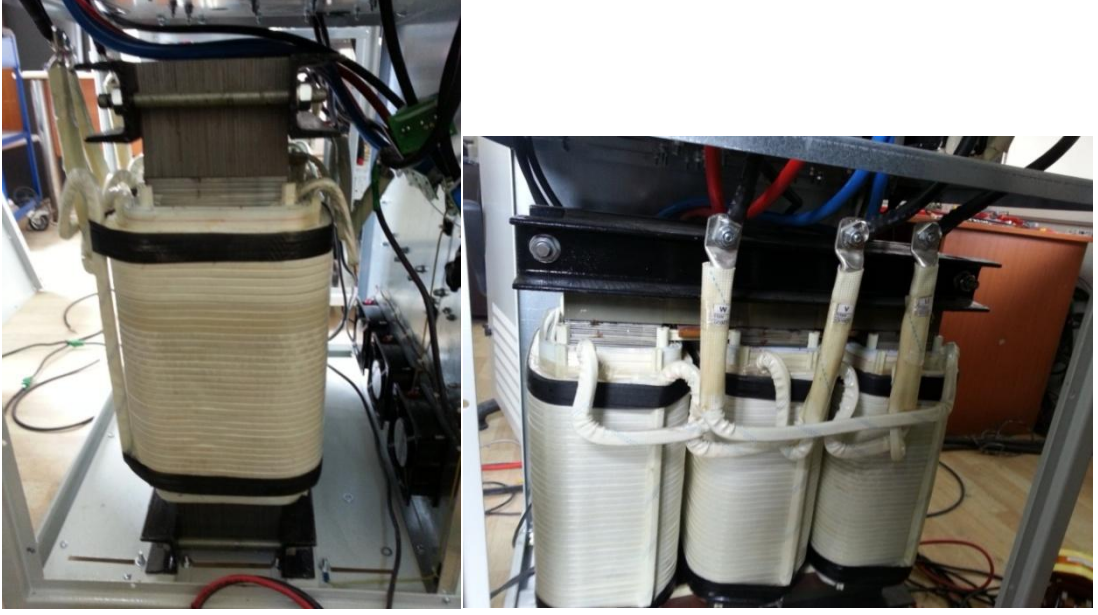
Şekil 6. 4 Anakart ve Üzerine Entegre Bilgi Ekranı

Şekil 6. 5'te doğrultucu giriş-çıkış bağlantı noktaları görünmektedir. Doğrultucu sisteminin girişinde termik manyetik şalter kullanılmıştır. Bu şalter sayesinde sisteme enerji aktarımı yapılabilmekte, aşırı ve ani akımlara karşı koruma sağlanmaktadır. Doğrultucu çıkışlarında ise NH tipi bıçaklı sigortalar kullanılmıştır. Doğru gerilim ve akımda yüksek güvenilirlik sağlaya bu sigortalar yükü aşırı akımlara karşı korumaktadır.

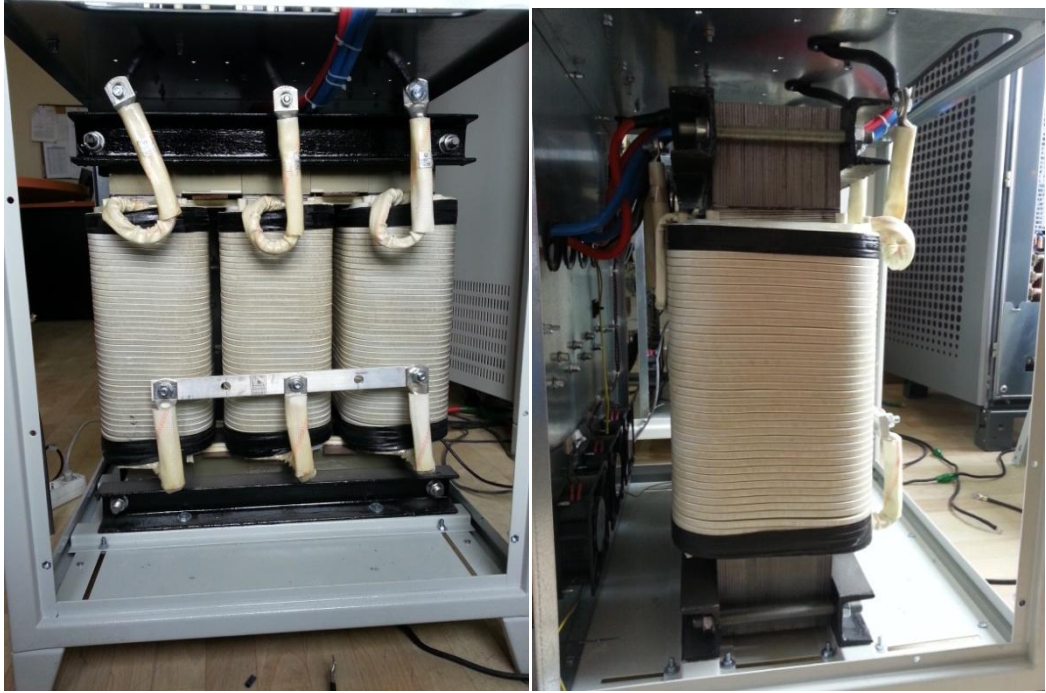


Şekil 6. 5 Doğrultucu Giriş-Çıkış Bağlantı Noktaları

12-darbeli doğrultucu sistemini elde etmek amacıyla iki adet 6-darbeli doğrultucu sistemi paralel bağlanmıştır. 6-darbeli doğrultucu sistemlerinin giriş gerilimleri arasında faz farkı oluşturmak amacıyla Üçgen-Üçgen(D-D) ve Üçgen-Yıldız(D-Y) bağlı birer adet transformatör kullanılmıştır. Şekil 6. 6'da D-D bağlı, Şekil 6. 7'de D-Y bağlı transformatör görülmektedir. Kullanılan transformatörlerin faz farkı oluşturma dışında, izolasyon ve gerilim uyumu görevi söz konusudur.



Şekil 6. 6 Üçgen-Üçgen Bağlı Transformatör



Şekil 6. 7 Üçgen-Yıldız Bağlı Transformatör

Şekil 6. 8 ve Şekil 6. 9'da gerek giriş akımlarının harmonik distorsiyonunu iyileştirmek gerekse güç faktörünü iyileştirmek amacıyla kullanılan endüktans ve kondansatörler görülmektedir. Şekil 6. 8'de tez kapsamında simülasyonlarla elde edilen şebeke besleme hattına seri bağlı endüktanslar görülmektedir. Ayrıca tez kapsamında 4 adet L-C grubundan oluşan filtreler mevcuttur. Şekil 6. 9'da ise, hem hedeflenen harmonikleri

azaltacak hemde güç faktörünü iyileştirecek olan filtre gruplarından bir tanesi görülmektedir.

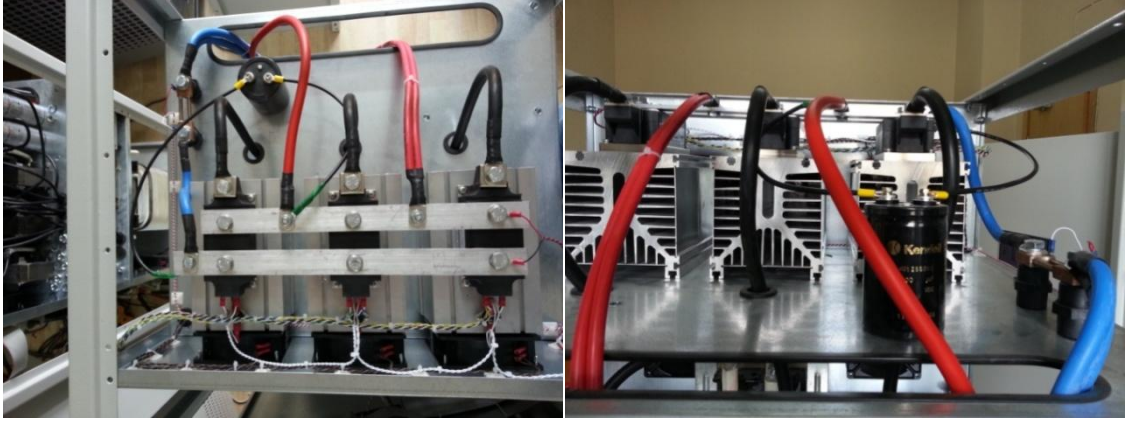


Şekil 6. 8 Besleme Hattına Seri Bağlı Endüktanslar



Şekil 6. 9 Besleme Hattına Paralel Bağlı Filtre Gruplarından Biri

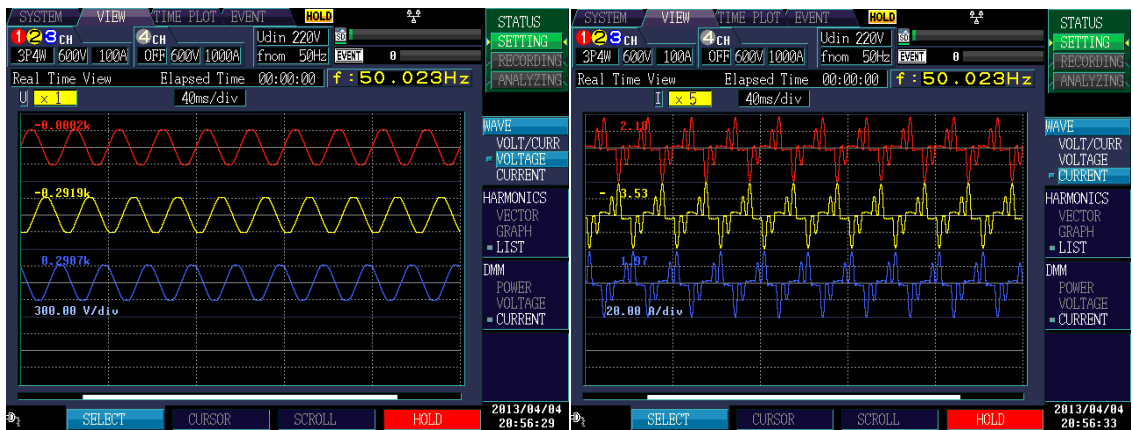
Herbir doğrultucuda üç adet tristör modülü kullanılmıştır. Yapılan hesaplamalar sonucunda muhtelif alüminyum soğutucu ve fan sistemi tasarlanmıştır. Her bir tristör modülü için bir adet alüminyum soğutucu ve bir adet fan uygun görülmüştür. Şekil 6. 10 'da 3 adet tristör mdülü ve soğutma sitemi görülmektedir. Ayrıca ilgili şekilde, çıkış akım bilgisini hesaplama kullanılan şönt direnç ve çıkış gerilimini filtre eden çıkış dc kondansatörü görülmektedir.



Şekil 6. 10 Tristör Modülü Grubu Bara ve Soğutma Sistemi

Geliştirilen prototipin testleri yapılmıştır. AC/DC dönüştürücü farklı çalışma şartlarında çıkış gerilim regülasyonu, çıkış akım kontrolü ve giriş harmonikleri açısından incelenmiştir. İlk olarak iki adet 6-darbeleri doğrultucu birbirine paralel bağlanmadan ve %25, %50, %75, %100 yüklenme koşulu altında çalıştırılmıştır. Sistemden alınan sonuçların simülasyon sonuçları ile uyumlu olduğu görülmüştür.

D-D bağlı transformatörlü doğrultucu sisteminin %25 yük ile yüklenmesi durumu için alınan sonuçlar Şekil 6. 11’de verilmiştir. Bu çalışma koşulunda giriş akımı harmonik distorsiyonu % 100.68 ve giriş güç faktörü 0.63 olarak okunmuştur.



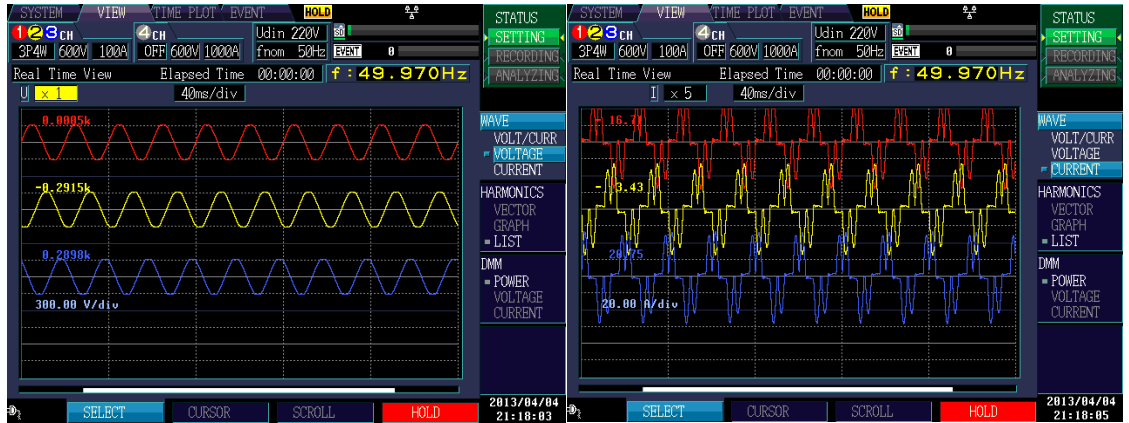
(a)



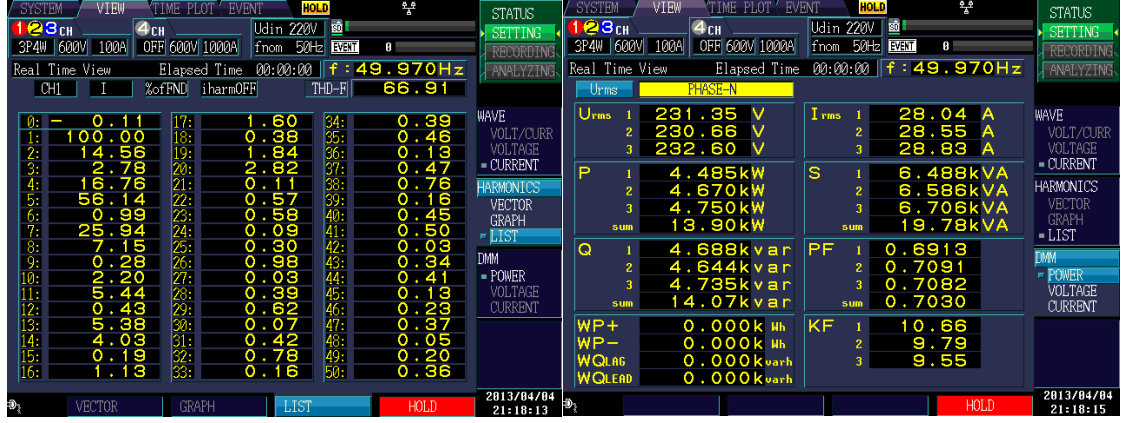
(b)

Şekil 6. 11 D-D bağlı transformatörlü doğrultucunun %25 yüklenmesi durumunda (a) Giriş Gerilim ve Akım Dalga Şekilleri, (b) Giriş Akımı Harmonik Distorsiyonu ve Giriş Güç Faktörü

D-D bağlı transformatörlü doğrultucu sisteminin %50 yük ile yüklenmesi durumu için alınan sonuçlar Şekil 6. 12’de verilmiştir. Bu çalışma koşulunda giriş akımı harmonik distorsiyonu %66.91 ve giriş güç faktörü 0.7 olarak okunmuştur.



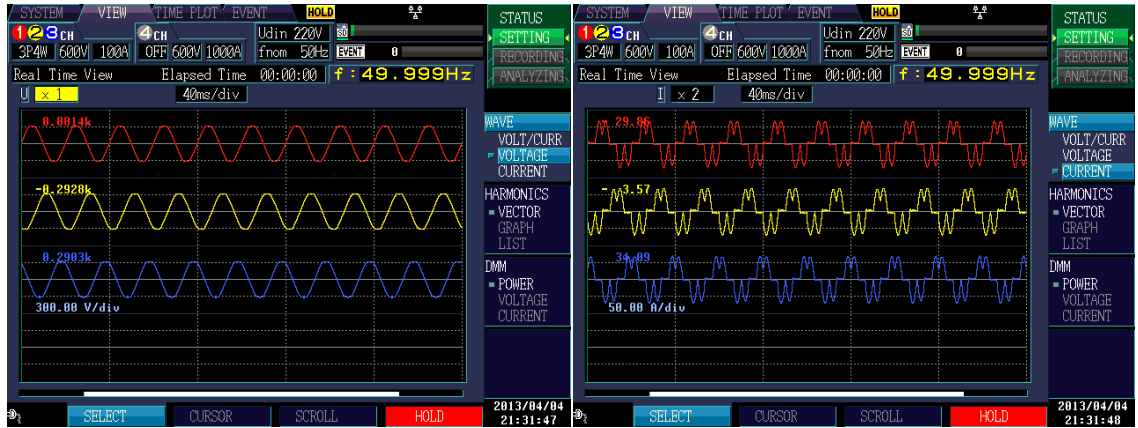
(a)



(b)

Şekil 6. 12 D-D bağlı transformatörlü doğrultucunun %50 yüklenmesi durumunda (a) Giriş Gerilim ve Akım Dalga Şekilleri, (b) Giriş Akımı Harmonik Distorsiyonu ve Giriş Güç Faktörü

D-D bağlı transformatörlü doğrultucu sisteminin %75 yük ile yüklenmesi durumu için alınan sonuçlar Şekil 6. 13’de verilmiştir. Bu çalışma koşulunda giriş akımı harmonik distorsiyonu %51.34 ve giriş güç faktörü 0.75 olarak okunmuştur.



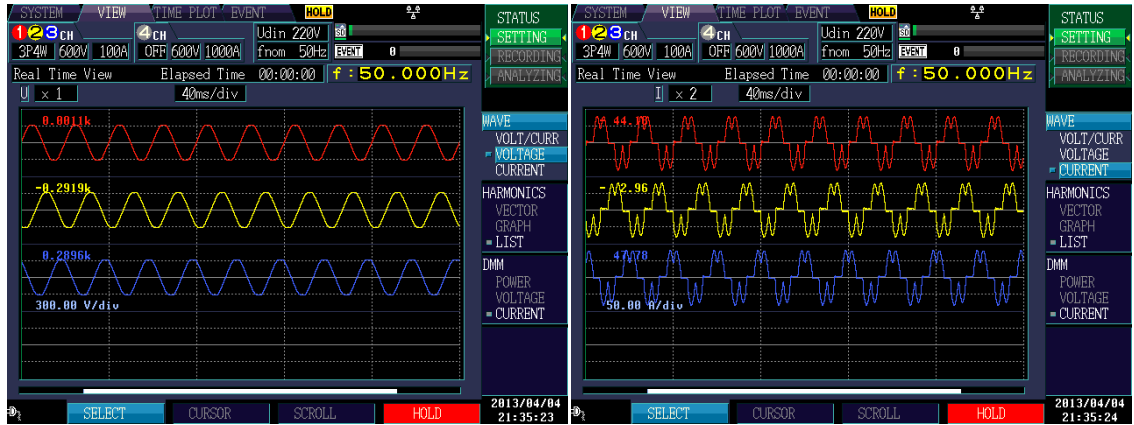
(a)



(b)

Şekil 6. 13 D-D bağlı transformatörlü doğrultucunun %75 yüklenmesi durumunda (a) Giriş Gerilim ve Akım Dalga Şekilleri, (b) Giriş Akımı Harmonik Distorsiyonu ve Giriş Güç Faktörü

D-D bağlı transformatörlü doğrultucu sisteminin %100 yük ile yüklenmesi durumu için alınan sonuçlar Şekil 6. 14'de verilmiştir. Bu çalışma koşulunda giriş akımı harmonik distorsiyonu %41.75 ve giriş güç faktörü 0.76 olarak okunmuştur.



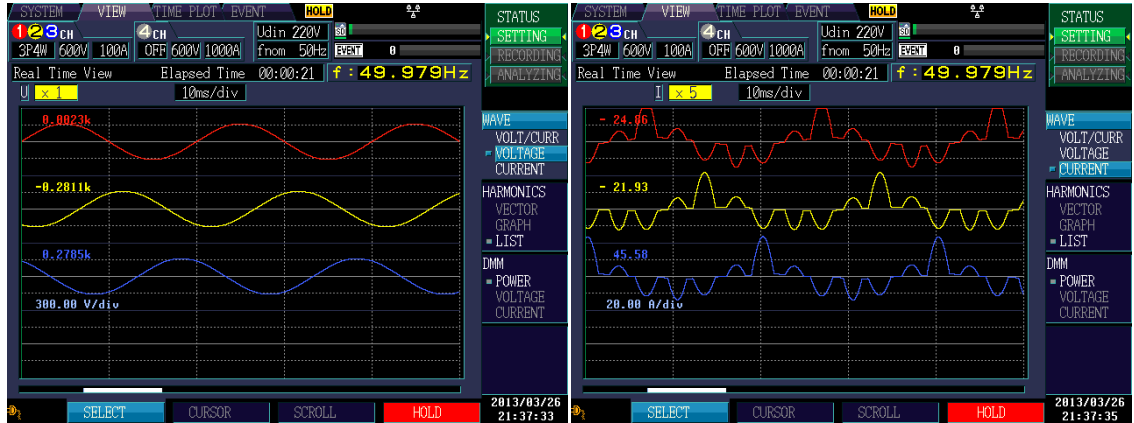
(a)



(b)

Şekil 6. 14 D-D bağlı transformatörlü doğrultucunun %100 yüklenmesi durumunda (a) Giriş Gerilim ve Akım Dalga Şekilleri, (b) Giriş Akımı Harmonik Distorsiyonu ve Giriş Güç Faktörü

D-Y bağlı transformatörlü doğrultucu sisteminin %25 yük ile yüklenmesi durumu için alınan sonuçlar Şekil 6. 15'te verilmiştir. Bu çalışma koşulunda giriş akımı harmonik distorsiyonu %74.4 ve giriş güç faktörü 0.63 olarak okunmuştur.



(a)



(b)

Şekil 6. 16 D-Y bağlı transformatörlü doğrultucunun %50 yüklenmesi durumunda (a) Giriş Gerilim ve Akım Dalga Şekilleri, (b) Giriş Akımı Harmonik Distorsiyonu ve Giriş Güç Faktörü

D-Y bağlı transformatörlü doğrultucu sisteminin %75 yük ile yüklenmesi durumu için alınan sonuçlar Şekil 6. 17'de verilmiştir. Bu çalışma koşulunda giriş akımı harmonik distorsiyonu %42.23 ve giriş güç faktörü 0.76 olarak okunmuştur.



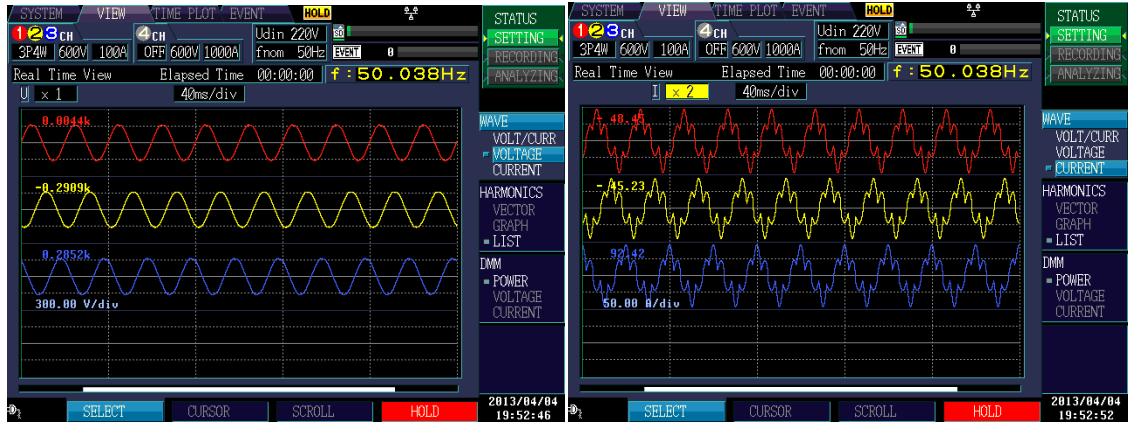
(a)



(b)

Şekil 6. 17 D-Y bağlı transformatörlü doğrultucunun %75 yüklenmesi durumunda (a) Giriş Gerilim ve Akım Dalga Şekilleri, (b) Giriş Akımı Harmonik Distorsiyonu ve Giriş Güç Faktörü

D-Y bağlı transformatörlü doğrultucu sisteminin %100 yük ile yüklenmesi durumu için alınan sonuçlar Şekil 6. 18'de verilmiştir. Bu çalışma koşulunda giriş akımı harmonik distorsiyonu %36.19 ve giriş güç faktörü 0.78 olarak okunmuştur.



(a)

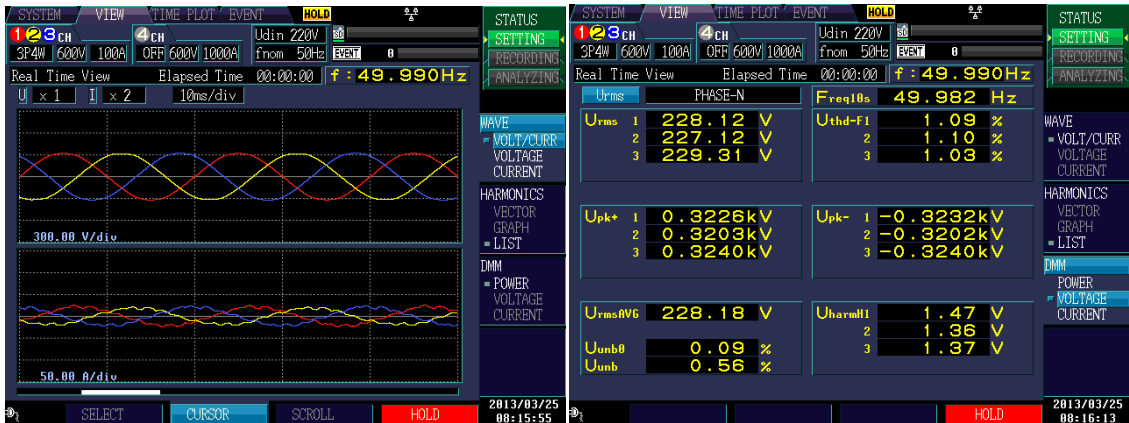


(b)

Şekil 6. 18 D-Y bağlı transformatörlü doğrultucunun %100 yüklenmesi durumunda (a) Giriş Gerilim ve Akım Dalga Şekilleri, (b) Giriş Akımı Harmonik Distorsiyonu ve Giriş Güç Faktörü

6-darbeleri doğrultucular ayrı ayrı test edildikten sonra paralel bağlanarak 12-darbeleri doğrultucu sistemi elde edilmiş ve farklı yüklenme koşulları altında çalıştırılmıştır. Ayrıca, sistem girişinde filtre grubunun bulunması ve bulunmaması durumları için ayrı ayrı sonuçlar alınmıştır.

12 darbeleri doğrultucu sisteminin girişinde filtre bulunmaması ve sistemin %12.5 yük ile yüklenmesi durumu için alınan sonuçlar Şekil 6. 19'da verilmiştir.



(a)



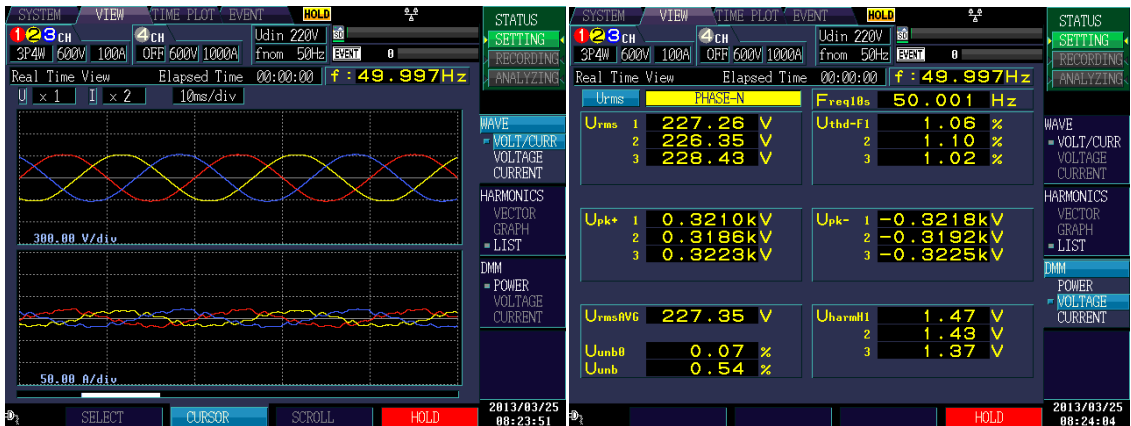
(b)



(c)

Şekil 6. 19 Filtresiz 12-Darbeli Sistemin %12.5 yüklenmesi durumunda (a) Giriş Gerilim, Akım Dalga Şekilleri ve Gerilim Değerleri, (b) Giriş (R,S,T)Akımı Toplam Harmonik Distorsiyon Değerleri, (c) Giriş Güç Faktörü ve Akım Değerleri

12 darbeli doğrultucu sisteminin girişinde filtre grubunun bulunması ve sistemin %12.5 yük ile yüklenmesi durumu için alınan sonuçlar Şekil 6. 20'de verilmiştir.



(a)



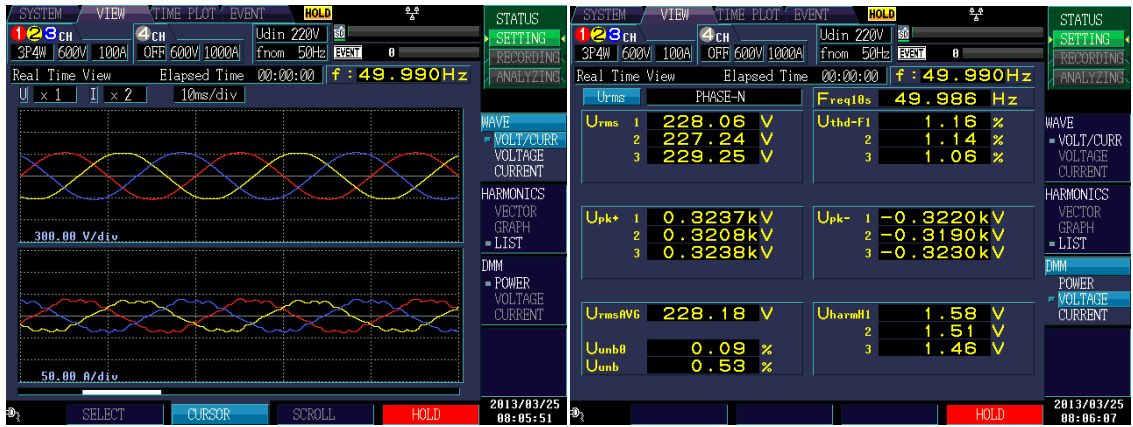
(b)



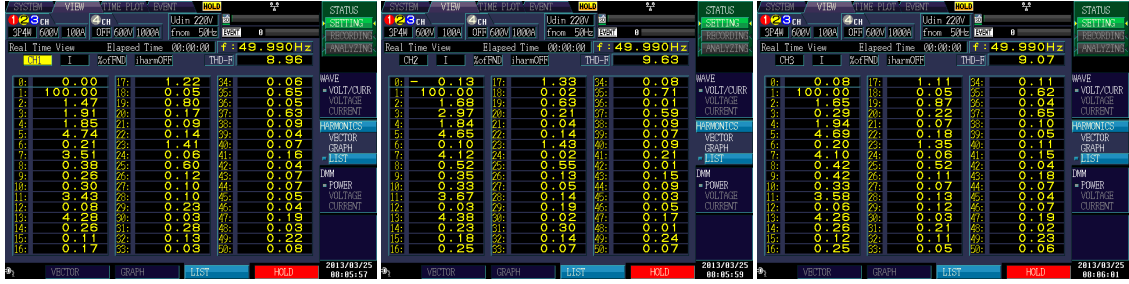
(c)

Şekil 6. 20 Filtreli 12-Darbeli Sistemin %12.5 yüklenmesi durumunda (a) Giriş Gerilim, Akım Dalga Şekilleri ve Gerilim Değerleri, (b) Giriş (R,S,T)Akımı Toplam Harmonik Distorsiyon Değerleri, (c) Giriş Güç Faktörü ve Akım Değerleri

12 darbeli doğrultucu sisteminin girişinde filtre bulunmaması ve sistemin %25 yük ile yüklenmesi durumu için alınan sonuçlar Şekil 6. 21'de verilmiştir.



(a)



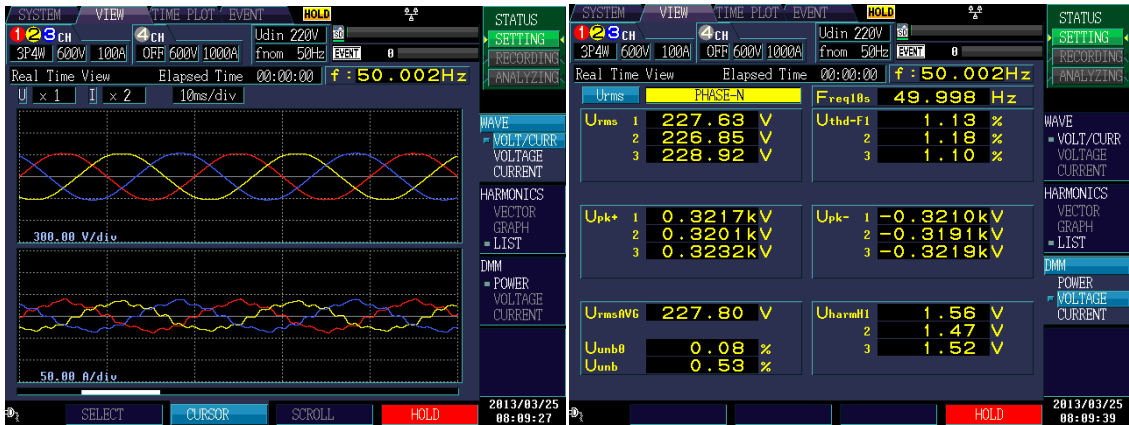
(b)



(c)

Şekil 6. 21 Filtresiz 12-Darbeleri Sisteminin %25 yüklenmesi durumunda (a) Giriş Gerilim, Akım Dalga Şekilleri ve Gerilim Değerleri, (b) Giriş (R,S,T)Akımı Toplam Harmonik Distorsiyon Değerleri, (c) Giriş Güç Faktörü ve Akım Değerleri

12 darbeleri doğrultucu sisteminin girişinde grubunun bulunması ve sistemin %25 yük ile yüklenmesi durumu için alınan sonuçlar Şekil 6. 22'de verilmiştir.



(a)



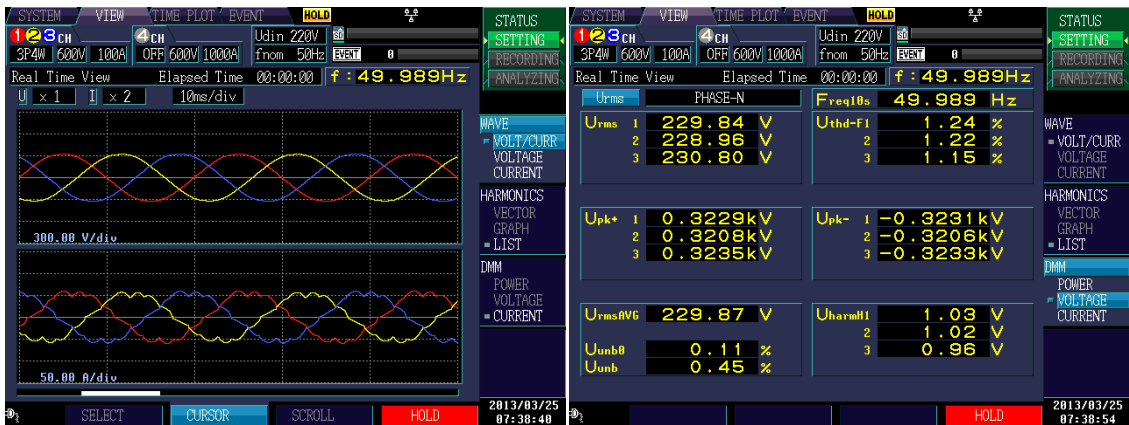
(b)



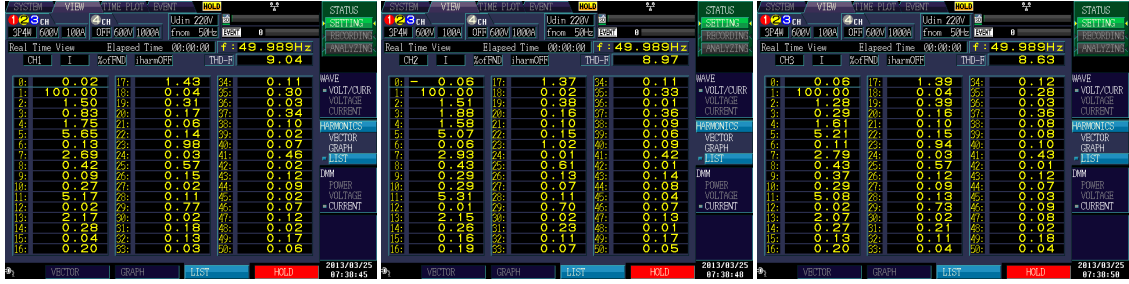
(c)

Şekil 6. 22 Filtreli 12-Darbeli Sistemin %25 yüklenmesi durumunda (a) Giriş Gerilim, Akım Dalga Şekilleri ve Gerilim Değerleri, (b) Giriş (R,S,T)Akımı Toplam Harmonik Distorsiyon Değerleri, (c) Giriş Güç Faktörü ve Akım Değerleri

12 darbeli doğrultucu sisteminin girişinde filtre bulunmaması ve sistemin %37.5 yük ile yüklenmesi durumu için alınan sonuçlar Şekil 6. 23'de verilmiştir.



(a)



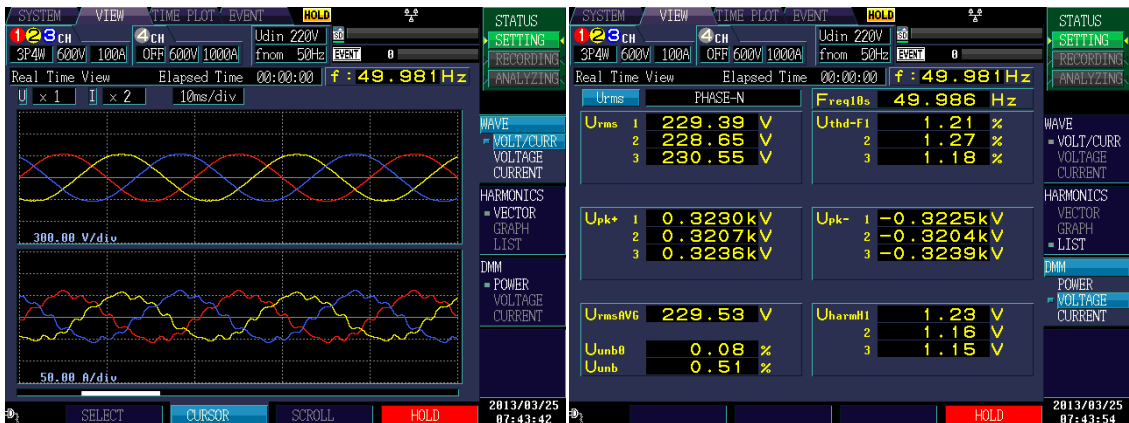
(b)



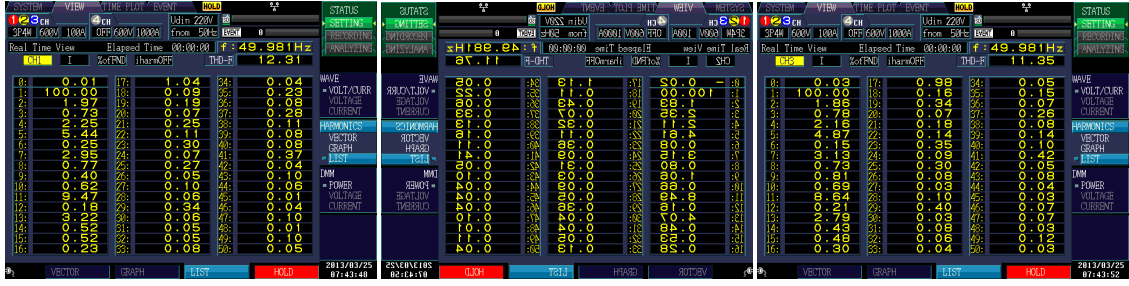
(c)

Şekil 6. 23 Filtresiz 12-Darbeli Sistemin %37.5 yüklenmesi durumunda (a) Giriş Gerilim, Akım Dalga Şekilleri ve Gerilim Değerleri, (b) Giriş (R,S,T)Akımı Toplam Harmonik Distorsiyon Değerleri, (c) Giriş Güç Faktörü ve Akım Değerleri

12 darbeli doğrultucu sisteminin girişinde filtre grubunun bulunması ve sistemin %37.5 yük ile yüklenmesi durumu için alınan sonuçlar Şekil 6. 24'de verilmiştir.



(a)



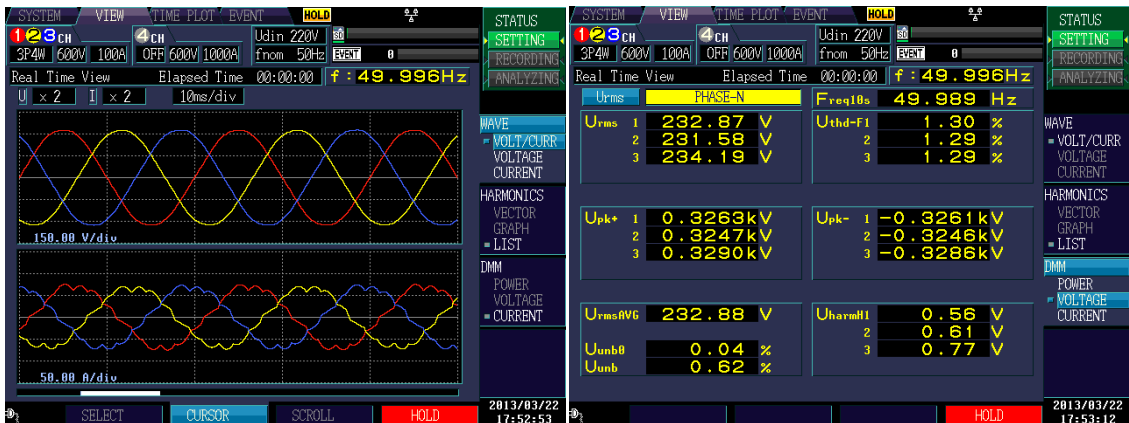
(b)



(c)

Şekil 6. 24 Filtreli 12-Darbeli Sistemin %37.5 yüklenmesi durumunda (a) Giriş Gerilim, Akım Dalga Şekilleri ve Gerilim Değerleri, (b) Giriş (R,S,T)Akımı Toplam Harmonik Distorsiyon Değerleri, (c) Giriş Güç Faktörü ve Akım Değerleri

12 darbeli doğrultucu sisteminin girişinde filtre bulunmaması ve sistemin %50 yük ile yüklenmesi durumu için alınan sonuçlar Şekil 6. 25'de verilmiştir.



(a)



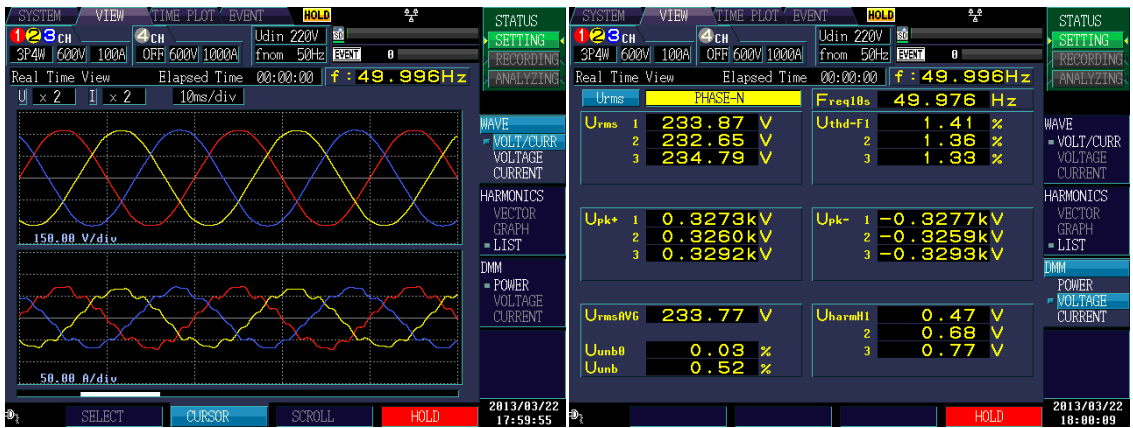
(b)



(c)

Şekil 6. 25 Filtresiz 12-Darbeli Sistemin %50 yüklenmesi durumunda (a) Giriş Gerilim, Akım Dalga Şekilleri ve Gerilim Değerleri, (b) Giriş (R,S,T)Akımı Toplam Harmonik Distorsiyon Değerleri, (c) Giriş Güç Faktörü ve Akım Değerleri

12 darbeli doğrultucu sisteminin girişinde filtre grubunun bulunması ve sistemin %50 yük ile yüklenmesi durumu için alınan sonuçlar Şekil 6. 26'da verilmiştir.



(a)



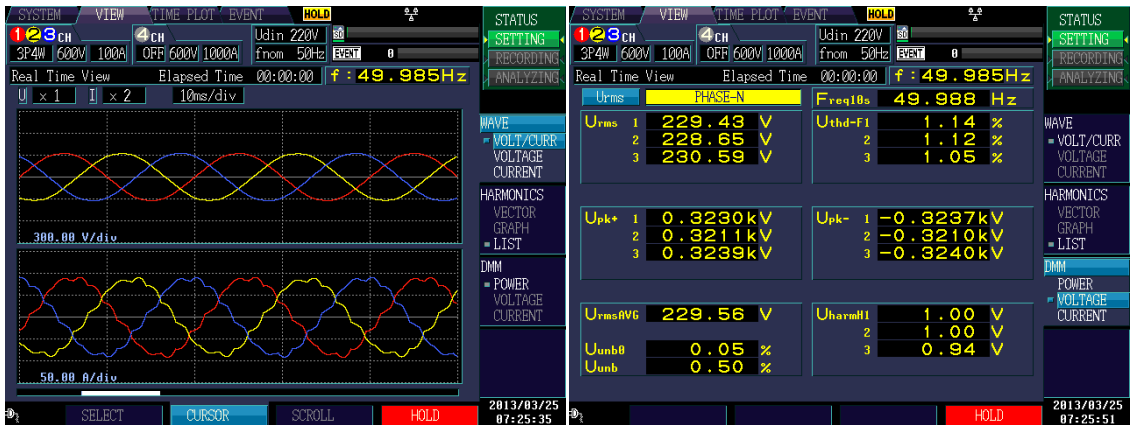
(b)



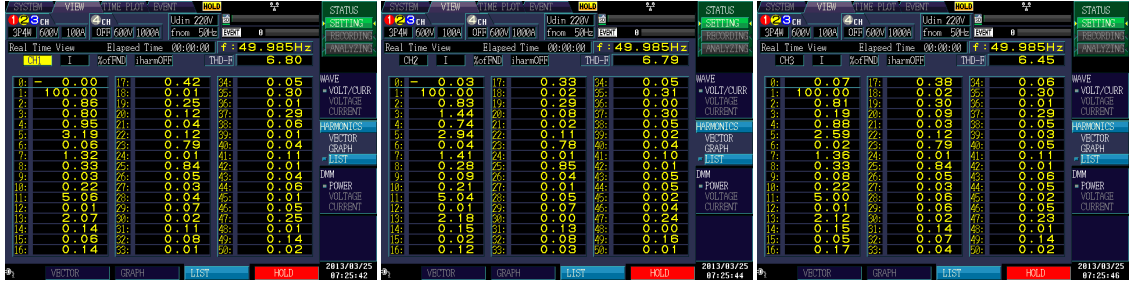
(c)

Şekil 6. 26 Filtreli 12-Darbeli Sistemin %50 yüklenmesi durumunda (a) Giriş Gerilim, Akım Dalga Şekilleri ve Gerilim Değerleri, (b) Giriş (R,S,T)Akımı Toplam Harmonik Distorsiyon Değerleri, (c) Giriş Güç Faktörü ve Akım Değerleri

12 darbeli doğrultucu sisteminin girişinde filtre bulunmaması ve sistemin %62.5 yük ile yüklenmesi durumu için alınan sonuçlar Şekil 6. 27’de verilmiştir.



(a)



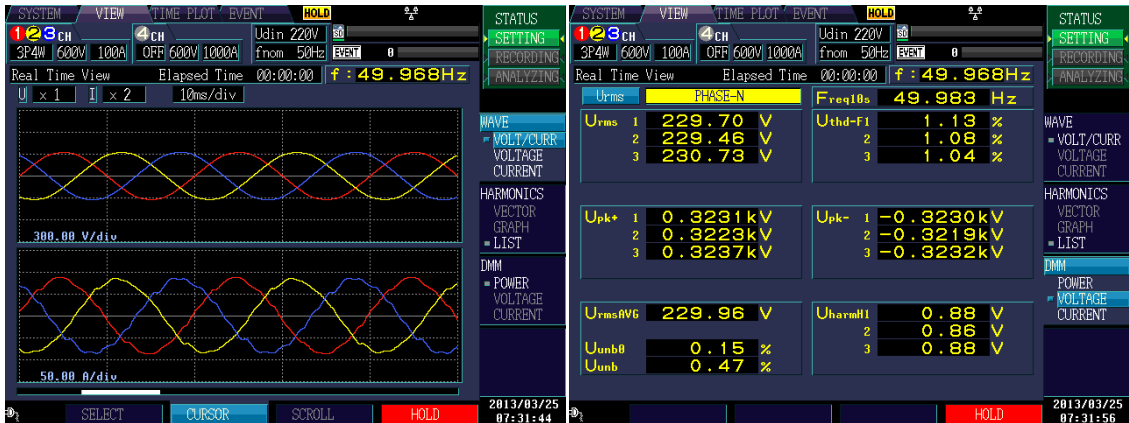
(b)



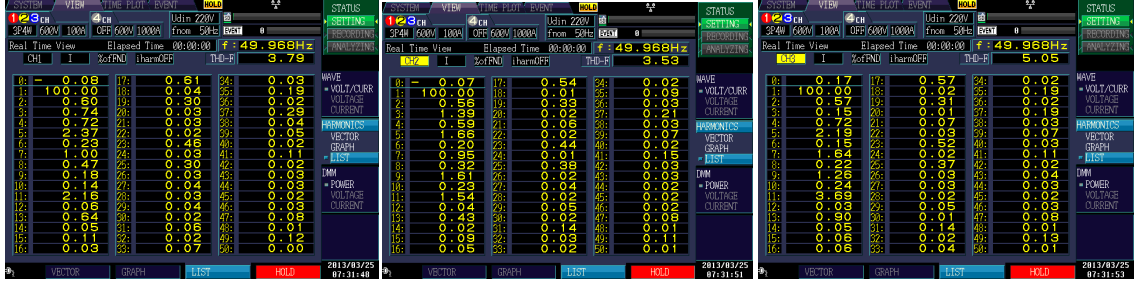
(c)

Şekil 6. 27 Filtresiz 12-Darbeli Sistemin %62.5 yüklenmesi durumunda (a) Giriş Gerilim, Akım Dalga Şekilleri ve Gerilim Değerleri, (b) Giriş (R,S,T)Akımı Toplam Harmonik Distorsiyon Değerleri, (c) Giriş Güç Faktörü ve Akım Değerleri

12 darbeli doğrultucu sisteminin girişinde filtre grubunun bulunması ve sistemin %62.5 yük ile yüklenmesi durumu için alınan sonuçlar Şekil 6. 28'de verilmiştir.



(a)



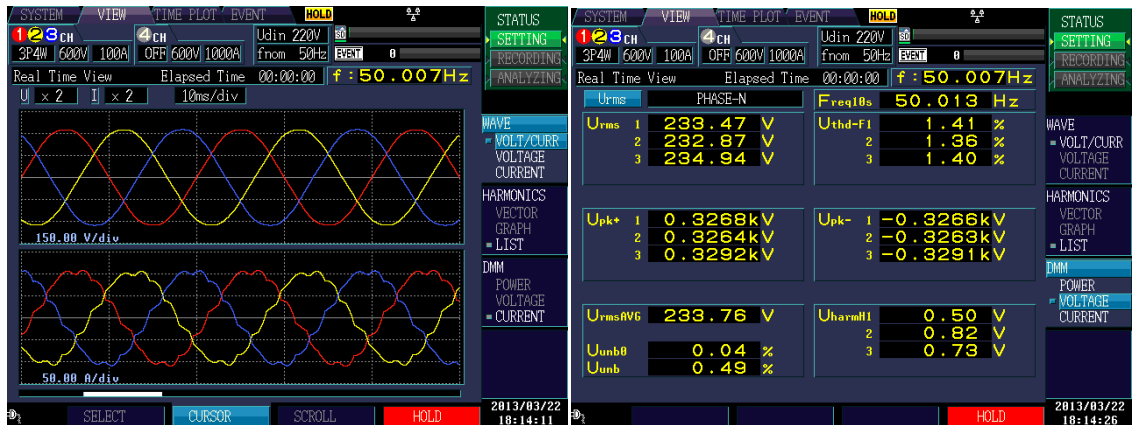
(b)



(c)

Şekil 6. 28 Filtreli 12-Darbeli Sistemin %62.5 yüklenmesi durumunda (a) Giriş Gerilim, Akım Dalga Şekilleri ve Gerilim Değerleri, (b) Giriş (R,S,T)Akımı Toplam Harmonik Distorsiyon Değerleri, (c) Giriş Güç Faktörü ve Akım Değerleri

12 darbeli doğrultucu sisteminin girişinde filtre bulunmaması ve sistemin %75 yük ile yüklenmesi durumu için alınan sonuçlar Şekil 6. 29'da verilmiştir.

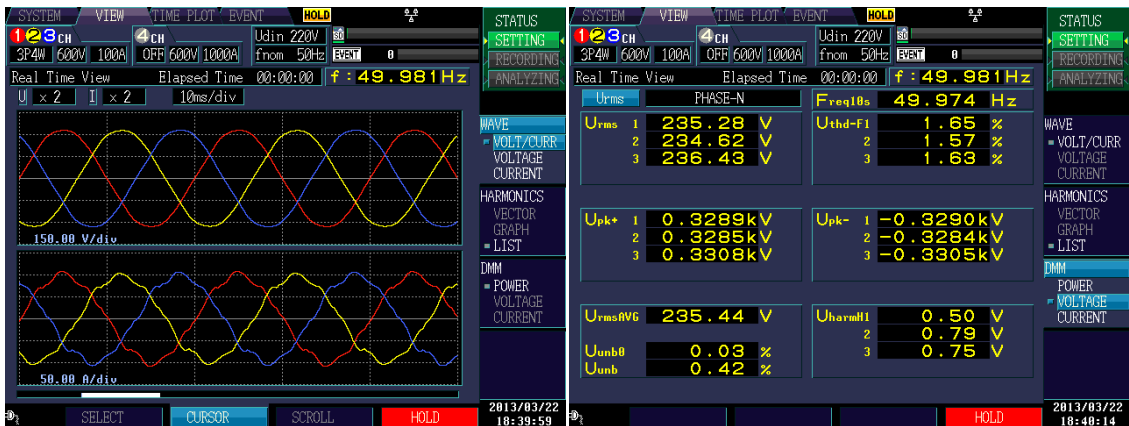


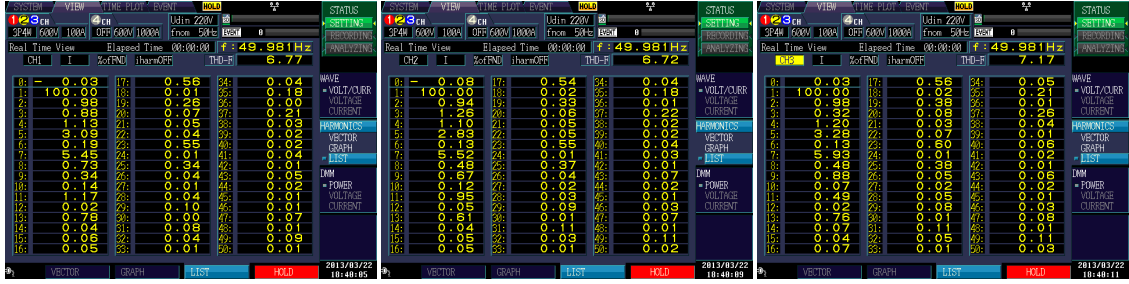
(a)



Şekil 6. 29 Filtresiz 12-Darbeli Sistemin %75 yüklenmesi durumunda (a) Giriş Gerilim, Akım Dalga Şekilleri ve Gerilim Değerleri, (b) Giriş (R,S,T)Akımı Toplam Harmonik Distorsiyon Değerleri, (c) Giriş Güç Faktörü ve Akım Değerleri

12 darbeli doğrultucu sisteminin girişinde filtre grubunun bulunması ve sistemin %75 yük ile yüklenmesi durumu için alınan sonuçlar Şekil 6. 30'de verilmiştir.





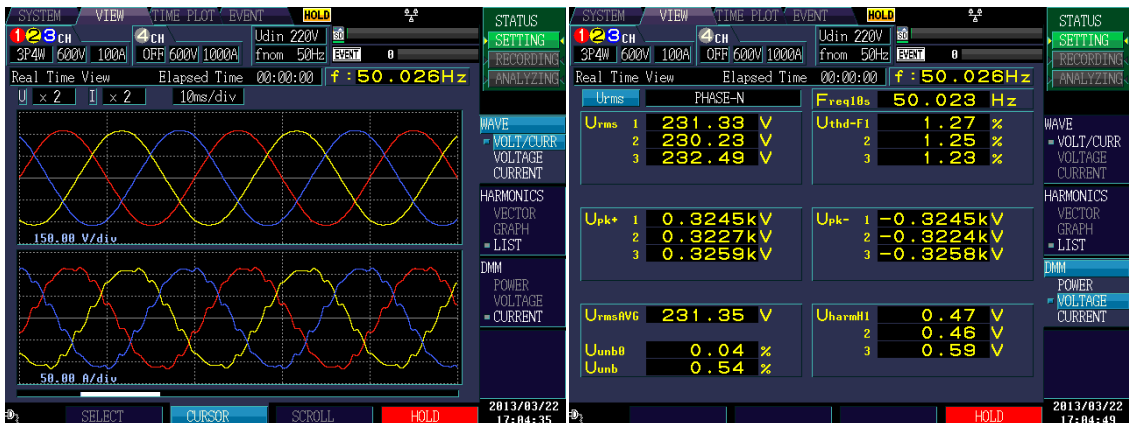
(b)



(c)

Şekil 6. 30 Filtreli 12-Darbeli Sistemin %75 yüklenmesi durumunda (a) Giriş Gerilim, Akım Dalga Şekilleri ve Gerilim Değerleri, (b) Giriş (R,S,T)Akımı Toplam Harmonik Distorsiyon Değerleri, (c) Giriş Güç Faktörü ve Akım Değerleri

12 darbeli doğrultucu sisteminin girişinde filtre bulunmaması ve sistemin %87.5 yük ile yüklenmesi durumu için alınan sonuçlar Şekil 6. 31'de verilmiştir.



(a)



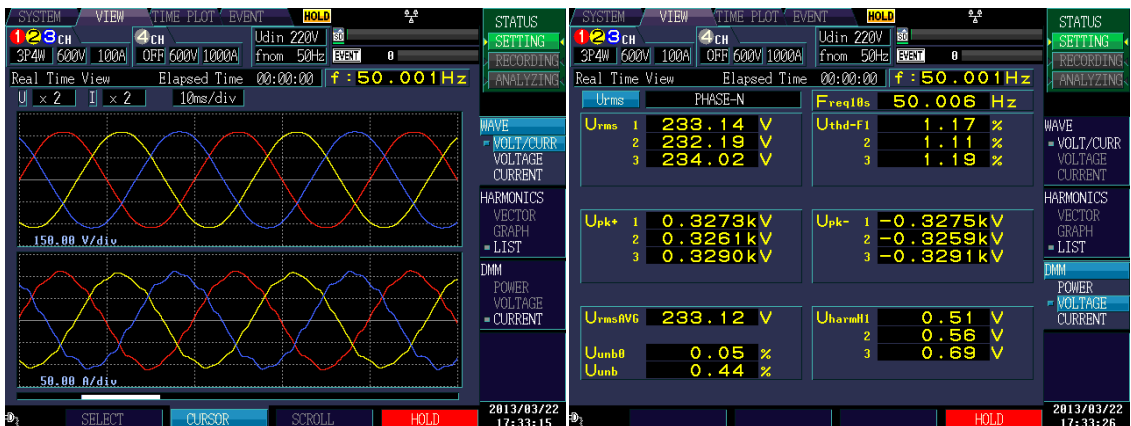
(b)



(c)

Şekil 6. 31 Filtresiz 12-Darbeli Sistemin %87.5 yüklenmesi durumunda (a) Giriş Gerilim, Akım Dalga Şekilleri ve Gerilim Değerleri, (b) Giriş (R,S,T)Akımı Toplam Harmonik Distorsiyon Değerleri, (c) Giriş Güç Faktörü ve Akım Değerleri

12 darbeli doğrultucu sisteminin girişinde filtre grubunun bulunması ve sistemin %87.5 yük ile yüklenmesi durumu için alınan sonuçlar Şekil 6. 32'de verilmiştir.



(a)



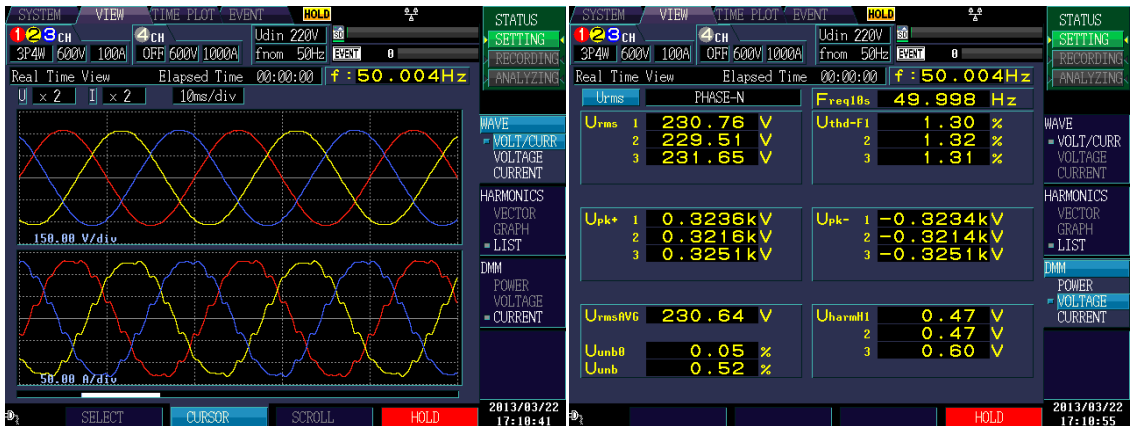
(b)



(c)

Şekil 6. 32 Filtreli 12-Darbeli Sistemin %87.5 yüklenmesi durumunda (a) Giriş Gerilim, Akım Dalga Şekilleri ve Gerilim Değerleri, (b) Giriş (R,S,T)Akımı Toplam Harmonik Distorsiyon Değerleri, (c) Giriş Güç Faktörü ve Akım Değerleri

12 darbeli doğrultucu sisteminin girişinde filtre bulunmaması ve sistemin %100 yük ile yüklenmesi durumu için alınan sonuçlar Şekil 6. 33'de verilmiştir.



(a)



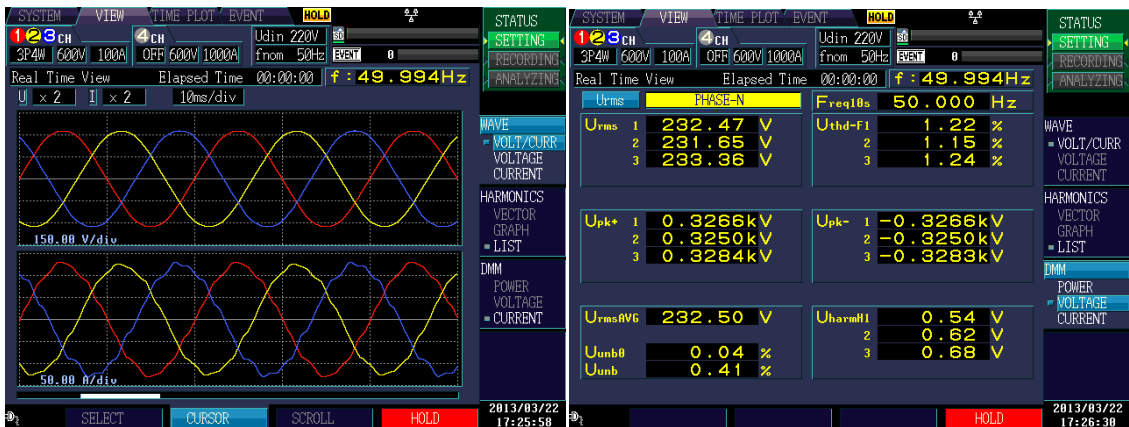
(b)



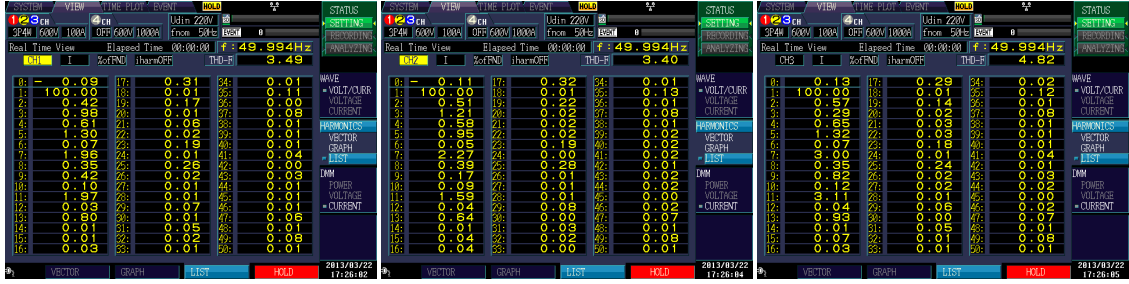
(c)

Şekil 6. 33 Filtresiz 12-Darbeli Sistemin %100 yüklenmesi durumunda (a) Giriş Gerilim, Akım Dalga Şekilleri ve Gerilim Değerleri, (b) Giriş (R,S,T)Akımı Toplam Harmonik Distorsiyon Değerleri, (c) Giriş Güç Faktörü ve Akım Değerleri

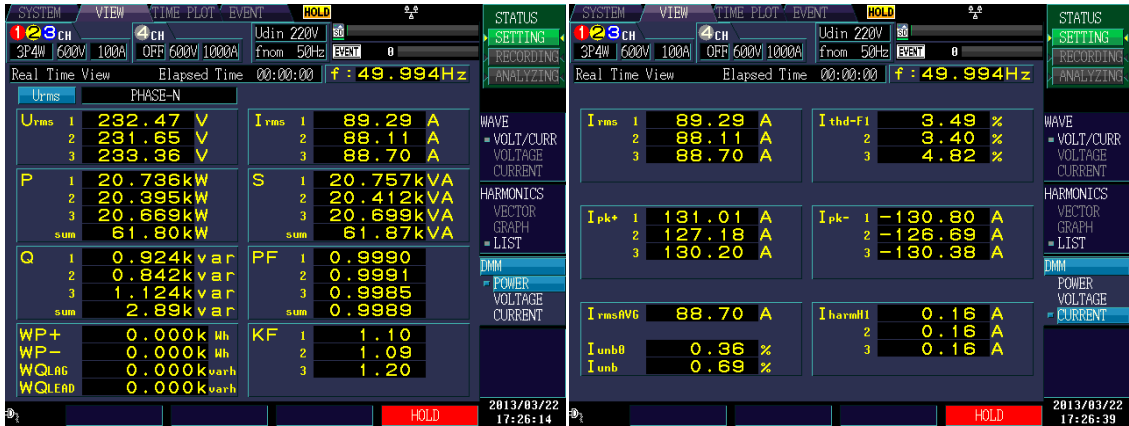
12 darbeli doğrultucu sisteminin girişinde filtre grubunun bulunması ve sistemin %100 yük ile yüklenmesi durumu için alınan sonuçlar Şekil 6. 34'de verilmiştir.



(a)



(b)



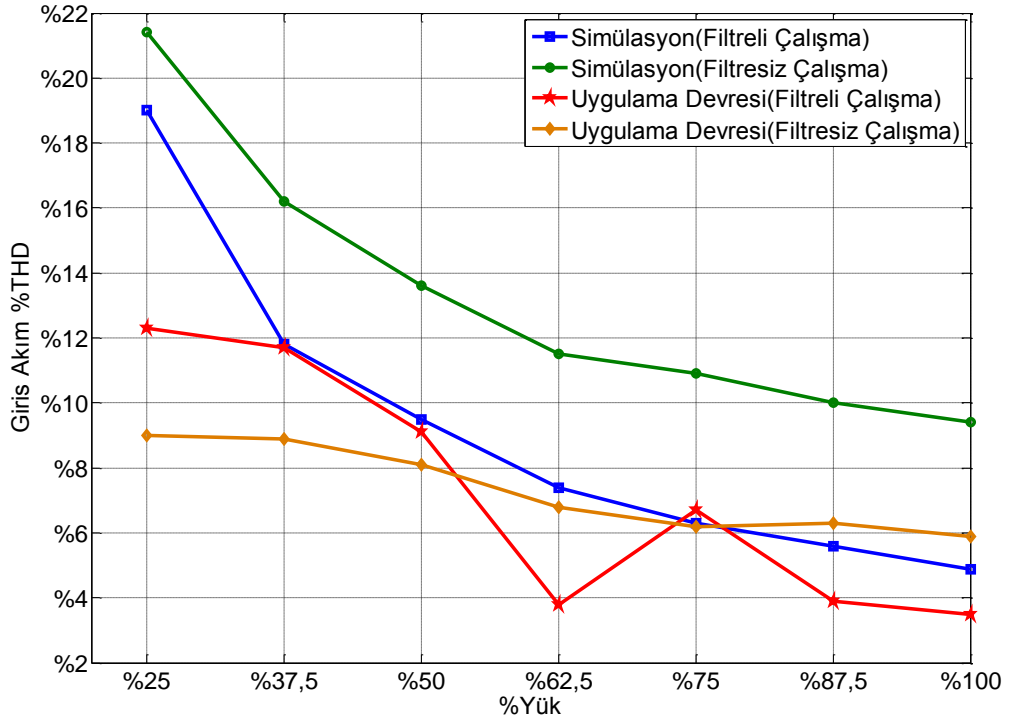
(c)

Şekil 6. 34 Filtreli 12-Darbeli Sistemin %100 yüklenmesi durumunda (a) Giriş Gerilim, Akım Dalga Şekilleri ve Gerilim Değerleri, (b) Giriş (R,S,T)Akımı Toplam Harmonik Distorsiyon Değerleri, (c) Giriş Güç Faktörü ve Akım Değerleri

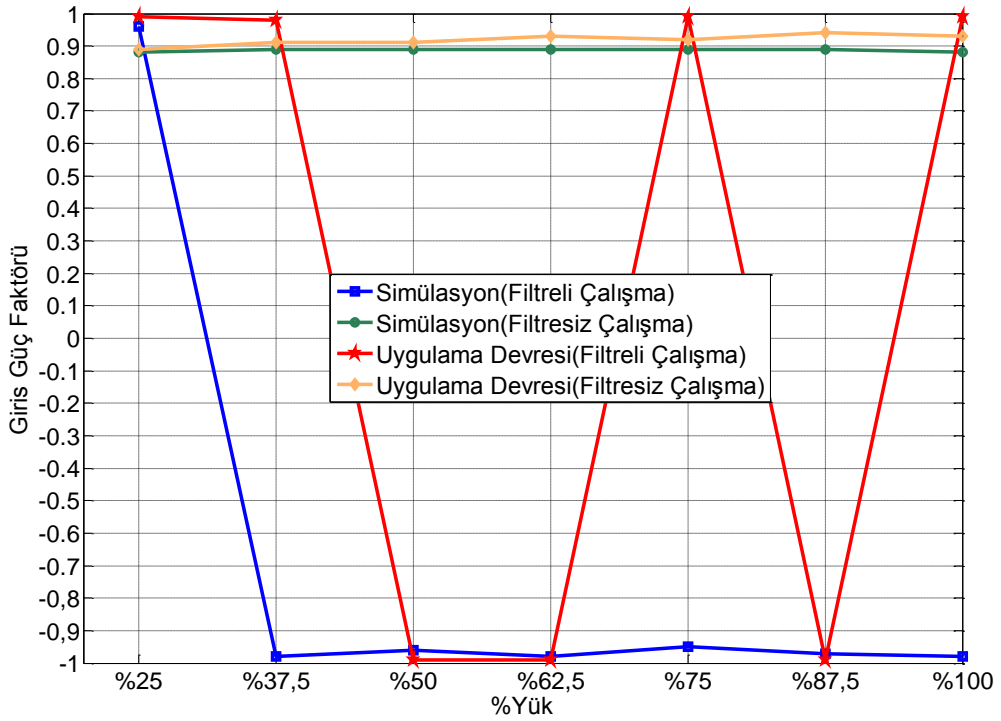
SONUÇ VE ÖNERİLER

Son yıllarda kullanımı giderek artan güç elektroniği sistemleri lineer olmayan yükler grubundadır ve şebekeden harmonik akımlar çeker. Endüstride yüklerin büyük çoğunluğu DC gerilimle çalıştığından, doğrultucular endüstride yaygın olarak kullanılmaktadır.

Literatürde doğrultucuların şebekeden çektiği harmonikleri en aza indirmek adına yapılmış birçok çalışma mevcuttur. Bu çalışmalar arasında doğrultucu darbe sayısının arttırılması, doğrultucu girişinde filtre kullanımı, doğrultucu çıkışında fazlar arası reaktör kullanarak faz kaydırılması gibi birçok yöntem mevcuttur. Endüstriyel ürünlerde maliyet, sağlamlık, standartlara uygunluk ve kontrol kolaylığı önem arz etmektedir. Bu tez kapsamında endüstriyel uygulamalara en uygun tasarım olarak uygulama devresinde anlatılan yapı seçilmiştir. Bu yapı sayesinde faz sayısı çok fazla arttırılmadan standartları sağlayacak doğrultucu sistemi elde edilmiştir. Darbe sayısını arttırma yöntemiyle standartların sağlandığı en az darbe sayılı doğrultucu yapısı 48-darbeli doğrultucu iken 12-darbeli doğrultucu ile ilgili standartlar karşılanmıştır. Tasarlanan doğrultucu sistemi endüstriyel uygulamalarda ihtiyaç duyulan tüm özellikleri barındırmaktadır.



Şekil 7. 1 Yapılan Çalışmalar Sonucu Muhtelif Yüklerde Elde Edilen %THD Değerleri



Şekil 7. 2 Yapılan Çalışmalar Sonucu Muhtelif Yüklerde Elde Edilen Giriş Güç Faktörü Değerleri

Tasarlanan dönüştürücü sisteminin teorik analizi ile simülasyon ve uygulama çalışmaları yapılmıştır. Simülasyon çalışmaları ortamındaki ideal durumlar ve uygulamadaki anlık alınan görüntüler göz önünde bulundurularak Şekil 7. 1 ve Şekil 7. 2'deki sonuçlar elde edilmiştir. Sonuç olarak, yapılmış olan simülasyon çalışmaları teorik analizi, uygulama çalışması da simülasyon sonuçlarını doğrulamaktadır.

KAYNAKLAR

-
- [1] Mohan N., Undeland T. and Robbins W. Power Electronics Converters, Applications, and Design, Third edition 2002
 - [2] Mohan N., Undeland T. and Robbins W. Çeviri: Tuncay N., Gökaşan M. ve Boğosyan S., (2003) Literatür Yayınları, Güç Elektroniği, 1. Basım Eylül
 - [3] Bodur,H., (2010), Güç Elektroniği, Birsen Yayınevi.
 - [4] Gülgün, R., (1999), Güç Elektroniği, Yıldız Teknik Üniversitesi,Istanbul.
 - [5] D. E. Rice, (1994) "A detailed analysis of six-pulse converter harmonic currents," IEEE Trans. Ind. Appl. 30 (2) : 294–304
 - [6] IEEE Recommended Practices and Requirements for Harmonic Control in Electrical Power Systems, IEEE Standard 519, 1992.
 - [7] Kim S., Enjeti P.N., Packbush P. and Pitel I.J., (1994): 'A new approach to improve power factor and reduce harmonics in a three phase diode rectifier type utility interface', IEEE Trans.Ind. Appl., , 30 (6) : 1557–1564.
 - [8] Raju N.R., Venkata S.S., Kagalwala R.A. and Sastry V.V.(1995): 'An active power quality conditioner for reactive power, harmonics compensation'. Proc. IEEE PESC'95, 209–214.
 - [9] Chi-Jui, W., Jung-Chen, C., Shih-Song, Y., Ching-Jung, L., Jin-Shyr, Y. and Tzong-Yih, G.,(1998) "Investigation and Mitigation of Harmonic Amplification Problems Caused by Single-Tuned Filters", Power Delivery, IEEE Transactions on, 13 (3) : 800–806.
 - [10] Choi S., Enjeti P.N., Lee H.H. and Pitel I.J.,(1996): 'A new active interphase reactor for 12-pulse rectifiers provides clean power utility interface', IEEE Trans. Power Electron., 32 : 1304–1311
 - [11] P. S.Maniscalco, V. Scaini and W. E. Veerkamp, (2001)"Specifying DC chopper systems for electrochemical applications," IEEE Trans. Ind. Appl., 37(3) : 941–948
 - [12] M. Mazaheri, V. Scaini, and W. E. Veerkamp,(2002) "Cause, effects and mitigation of ripple from rectifiers," in Proc. IEEE PCIC, 85–91.

- [13] V. Scaini and T. Ma,(2002) "High current DC choppers in the metals industry,"IEEE Trans. Ind. Appl., 8 (2) : 26–33
- [14] Alexa, D., Sirbu, A., Dobrea and D. M.,(2004) "An Analysis of Three-Phase Rectifiers with Near-Sinusoidal Input Currents", Industrial Electronics, IEEE Transactions on, 51 (4) : 884–891
- [15] S. Fukuda and M. Ohta,(2002) "An auxiliary-supply-assisted twelve-pulse diode rectifier with reduced input current harmonics," in Proc. IEEE Inst. Aeronaut.Sci. Annu. Meet., 1 : 452.
- [16] J. R. Rodriguez, J. Pontt, C. Silva, E. P. Wiechmann, P. W. Hammond, F. W. Santucci, R. Alvarez, R. Musalem, S. Kouro, and P. Lezana, "Large current rectifiers: State of the art and future trends," IEEE Trans. Ind.Electron., 52 (3) : 738–746
- [17] Lasantha Bernard Perera, (2006)" Multi Level Reinjection AC/DC Converters for HVDC", thesis presented for the degree of Doctor of Philosophy in Electrical and Computer Engineering at the University of Canterbury, Christchurch, New Zealand. February.
- [18] Peterson M. and Singh B.N.(2006) 'Modeling and analysis of multipulse uncontrolled/controlled ac –dc converters'. Proc. IEEE ISIE'06, 1400–1407
- [19] Gomes de Freitas, L.C. Simoes, M.G. Canesin. and C.A. de Freitas, L.C. , "Performance Evaluation of a Novel Hybrid Multipulse Rectifier for Utility Interface of Power Electronic Converters" Industrial Electronics, IEEE Transactions on, 54 (6) : 3030 - 3041
- [20] Eltamaly, A.M.,(2008) "A Modified Harmonics Reduction Technique for a Three-Phase Controlled Converter", Industrial Electronics, IEEE Transactions on, 55 (3) : 1190 - 1197
- [21] Fukuda, S. Ohta, M. and Iwaji, Y.,(2008) "An Auxiliary-Supply-Assisted Harmonic Reduction Scheme for 12-Pulse Diode Rectifiers", Power Electronics, IEEE Transactions on, 23 (3) : 1270 - 1277
- [22] Harmonics, Fukuda, S. Hiei, I.,(2008) "Auxiliary Supply-Assisted 12-Pulse Phase-Controlled Rectifiers With Reduced Input Current", Industry Applications, IEEE Transactions on, 44 (1) : 205 - 212
- [23] Shiyang Yang Fangang and Meng Wei Yang ,(2010) "Optimum Design of Interphase Reactor With Double-Tap Changer Applied to Multipulse Diode Rectifier", Industrial Electronics, IEEE Transactions on, 57 (9) : 3022 - 3029

Periyodik Dalgaların Fourier Analizi

Genek olarak ω açısal frekansı ile tekrarlanan ve sinüsoidal olmayan $f(t)$ dalgalar aşağıdaki gibi ifade edilir.

$$f(t) = F_0 + \sum_{h=1}^{\infty} f_h(t) = \frac{1}{2}a_0 + \sum_{h=1}^{\infty} \{a_h \cos(h\omega t) + b_h \sin(h\omega t)\} \quad (6-1)$$

Burada $F_0 = 1/2a_0$ ortalama değerdir. Denklemdaki a_h ve b_h katsayıları;

$$a_h = \int_0^{2\pi} f(t) \cos(h\omega t) d(\omega t) \rightarrow h = 0, \dots, \infty \quad (6-2)$$

$$b_h = \int_0^{2\pi} f(t) \sin(h\omega t) d(\omega t) \rightarrow h = 1, \dots, \infty \quad (6-3)$$

uyarınca hesaplanır. Açısal frekansın $\omega = 2\pi/T$ olduğu göz önüne alınarak ortalama değer;

$$F_0 = \frac{1}{2}a_0 = \frac{1}{2\pi} \int_0^{2\pi} f(t) d(\omega t) = \frac{1}{T} \int_0^T f(t) dt \text{ olarak bulunmuş olur.} \quad (6-4)$$

Denklemin 6-1 de her frekans bileşeninin $[f_h(t) = a_h \cos(h\omega t) + b_h \sin(h\omega t)]$ olduğu göz önüne alınarak etkin değer olarak fazör biçiminde ifade edilebilir.

$$F_h = F_h e^{j\phi_h} \quad (6-5)$$

etkin değer fazörün genliğidir;

$$F_h = \frac{\sqrt{a_h^2 + b_h^2}}{\sqrt{2}} \quad (6-6)$$

faz açısı;

$$\tan(\varphi_h) = \frac{(-b_h)}{a_h} \quad (6-7)$$

bağlantısı ile bulunur.

Daha sonra ispatlanacağı biçimde periyodik bir $f(t)$ fonksiyonunun etkin değeri, Fourier bileşenlerinin etkin değeri cinsinden;

$$F = \left(F_0^2 + \sum_{h=1}^{\infty} F_h^2 \right)^{\frac{1}{2}} \quad (6-8)$$

olarak hesaplanır. Burada işaret edilmesi gereken nokta birçok güç elektroniği dalgasının ortalama değeri sıfırdır. ($F_0=0$) Buna ek olarak dalga simetrikliği nedeniyle 6-2 ve 6-3 bağlantılarındaki a_h ve b_h katsayılarının hesabında kısaltmalar yapılabilir. Çizelge EK-A1'de hangi koşullarda hangi kısaltmaların yapıldığı ve bunlara ilişkin a_h ve b_h katsayıları özetlenmektedir.

Çizelge EK.A-1 Fourier Analizinde Simetrinin Kullanımı

Simetri Türü	Gerekli Koşul	a_h ve b_h katsayıları
Çift	$f(-t) = f(t)$	$b_h = 0$ $a_h = \frac{2}{\pi} \int_0^{\pi} f(t) \cos(h\omega t) d(\omega t)$
Tek	$f(-t) = -f(t)$	$a_h = 0$ $b_h = \frac{2}{\pi} \int_0^{\pi} f(t) \sin(h\omega t) d(\omega t)$
Yarı-Dalga	$f(t) = -f\left(t + \frac{1}{2}T\right)$	$a_h = b_h = 0$ çift h'lar için; $a_h = \frac{2}{\pi} \int_0^{\pi} f(t) \cos(h\omega t) d(\omega t) \rightarrow h = 1, 3, 5, \dots, \infty$ $b_h = \frac{2}{\pi} \int_0^{\pi} f(t) \sin(h\omega t) d(\omega t) \rightarrow h = 1, 3, 5, \dots, \infty$
Çift Çeyrek Dalga	Çift ve yarı dalga	$b_h = 0$ tüm h'ler için $a_h = \begin{cases} \frac{4}{\pi} \int_0^{\pi/2} f(t) \cos(h\omega t) d(\omega t) \rightarrow h = 1, 3, 5, \dots, \infty \\ 0 \rightarrow h = 0, 2, 4, 6, \dots, \infty \end{cases}$
Tek Çeyrek Dalga	Tek ve yarı dalga	$a_h = 0$ tüm h'ler için; $b_h = \begin{cases} \frac{4}{\pi} \int_0^{\pi/2} f(t) \sin(h\omega t) d(\omega t) \rightarrow h = 1, 3, 5, \dots, \infty \\ 0 \rightarrow h = 0, 2, 4, 6, \dots, \infty \end{cases}$

Hat Akımında Bozulma

Şekil 3-5 bir güç elektroniği devresi tarafından elektrik şebekesinden çekilen hat akımının dalga şeklini göstermektedir. Bu dalga biçimi sinüsten çok uzak bozuk bir dalga olup, kendisini besleyen elektrik şebekesinin geriliminde de bozulmaya yol açar. Eğer besleme kaynağı güçlü ise (iç empedansı küçük ise) bu bozulma da çok küçük olur.

Hesaplarda önemli kısaltmalar getirdiği için buradaki inceleme şebeke geriliminin $f=f_1$ ($w=w_1$) frekansında saf sinüs olduğu varsayılacaktır.

$$v_s = \sqrt{2}V_s \sin \omega_1 t \quad (6-9)$$

Doğru bileşenin olmadığı kabul edilerek, giriş akımının temel bileşenden ve harmoniklerden oluştuğu göz önüne alınarak;

$$i_s(t) = i_{s1}(t) + \sum_{h \neq 1} i_{sh}(t) \quad (6-10)$$

ifadesi elde edilir. Burada i_{s1} akımın temel bileşenini $i_{sh}(t)$ ise f harmonik frekansındaki bileşenleri göstermektedir. Denklem 6-10'daki bileşenler ani değer cinsinden ifade edilerek,

$$i_s(t) = \sqrt{2}I_{s1} \sin(\omega_1 t - \varphi_1) + \sum \sqrt{2}I_{sh} \sin(\omega_h t - \varphi_h) \quad (6-11)$$

Bağıntısı bulunur. Burada φ sinüsoidal gerilim ile akımın temel bileşeni arasındaki faz açısıdır. Endüktif devrelerde bu açı pozitifdir. Hat akım dalgasına bağıntı 6-5'deki etkin değer denklemi uygulanarak ve $T_1 = 1/f_1$ olduğu göz önüne alınarak i_s hat akımının etkin değeri;

$$I_S = \left(\frac{1}{T_1} \int_0^{T_1} i_s^2(t) dt \right)^{\frac{1}{2}} \quad (6-12)$$

Olarak bulunur. Denklem 6-11 den I_{s1} çekilip 6-12 de yerine konulursa ve her farklı frekanstaki terimlerin çapraz çarpımı sıfır olduğu göz önüne alınıp;

$$I_S = \left(i_{s1}^2 + \sum_{h \neq 1} I_{sh}^2 \right)^{\frac{1}{2}} \quad (6-13)$$

Gerilim veya akım dalga şeklindeki bozulmalar toplam harmonik bozulma (THD) bağıntısıyla % cinsinden ifade edilmiştir. Bağıntı 6-10'daki akımın bozulma bileşimi $i_{boz}(t)$,

$$i_{dis}(t) = i_s(t) - i_{s1}(t) = \sum_{h \neq 1} i_{sh}(t) \quad (6-14)$$

olup, bozulma bileşeninin etkin değeri,

$$I_{dis}(t) = \left[I_S^2 - I_{S1}^2 \right]^{\frac{1}{2}} = \left(\sum_{h \neq 1} I_{sh}^2 \right)^{\frac{1}{2}} \quad (6-15)$$

Akımdaki toplam harmonik bozulma, THD

$$\%THD = 100 \cdot \frac{I_{dis}}{I_{S1}} = 100 \cdot \frac{\sqrt{I_S^2 - I_{S1}^2}}{I_{S1}} = \sqrt{\sum_{h \neq 1} \left(\frac{I_{sh}}{I_{S1}} \right)^2} \quad (6-16)$$

Olarak % cinsinden bulunur. Burada i indisi THD nin akım için bulunduğunu gösterir.

Denklemler 6-15 ve 6-16'da akım yerine gerilim büyüklükleri kullanılarak, THD_v bağıntısı bulunur.

Bir çok uygulamada hat akımının tepe değeri I_{TEPE}, hat akımının etkin değeri I_S ye oranı önem taşır bu orana Tepe Faktörü denir.

ÖZGEÇMİŞ

KİŞİSEL BİLGİLER

Adı Soyadı : Özgün GİRĞİN
Doğum Tarihi ve Yeri : 29.07.1987 Beykoz/Istanbul
Yabancı Dili : İngilizce
E-posta : ogirgin@yildiz.edu.tr

ÖĞRENİM DURUMU

Derece	Alan	Okul/Üniversite	Mezuniyet Yılı
Yüksek Lisans	Elektrik Mühendisliği	Yıldız Teknik Üniversitesi	2013
Lisans	Elektrik Mühendisliği	Yıldız Teknik Üniversitesi	2010
Lise	Sayısal	Paşabahçe Ahmet Ferit İnal Lisesi	2004

İŞ TECRÜBESİ

Yıl	Firma/Kurum	Görevi
2012 – Devam Ediyor	Yıldız Teknik Üniversitesi	Araştırma Görevlisi
2010 - 2012	Esis Enerji ve Elektronik San. Tic. A.Ş	Ar-Ge Mühendisi

YAYINLARI

Bildiri

1. Sarıtaş, E., Aksoy, İ., Girgin, Ö., Geleneksel Güç Katsayısı Düzeltme Devreleri ile Köprüsüz Güç Katsayısı Düzeltme Devrelerinin Karşılaştırılması, İlk Bildiriler Konferansı, Vol. 1, Issue 1, pp. 40-45, (2012)
2. Bakan, A.F., Girgin, Ö., Zengince, H., Çok Darbeli Doğrultucularda Çok Seviyeli Akım Enjeksiyonu İle Harmonik Eliminasyonu, IV. Enerji Verimliliği ve Kalitesi Sempozyumu(EVK 2011), Vol. 1, Issue 1, pp. 69-73, (2011)

Projeler

1. Bilim, Sanayi ve Teknoloji Bakanlığı 00791.STZ.2011-1 SanTez Projesi