

GÜÇ FAKTÖRÜ DÜZELTMELİ DOĞRULTUCULAR

VE SİMÜLASYONLARI

Mehmet Bilge KASAP

Yüksek Lisans Tezi

Elektrik-Elektronik Mühendisliği Anabilim Dalı

Ekim-2006

GÜÇ FAKTÖRÜ DÜZELTMELİ DOĞRULTUCULAR VE SİMÜLASYONLARI

Mehmet Bilge KASAP

Dumlupınar Üniversitesi
Fen Bilimleri Enstitüsü
Lisansüstü Yönetmeliği Uyarınca
Elektrik-Elektronik Anabilim Dalında
YÜKSEK LİSANS TEZİ
Olarak Hazırlanmıştır.

Danışman: Yrd. Doç. Dr. Bekir MUMYAKMAZ

Ekim-2006

KABUL VE ONAY SAYFASI

Mehmet Bilge Kasap'ın YÜKSEK LİSANS tezi olarak hazırladığı GÜÇ FAKTÖRÜ DÜZELTMELİ DOĞRULTUCULAR VE SİMÜLASYONLARI başlıklı bu çalışma, jürimizce lisansüstü yönetmeliğinin ilgili maddeleri uyarınca değerlendirilerek kabul edilmiştir.

26/10/2006
(Sınav tarihi)

Üye : Yrd. Doç. Dr. Bünyamin TAMYÜREK

Üye : Yrd. Doç. Dr. Mehmet Ali EBEOĞLU

Üye : Yrd. Doç. Dr. Bekir MUMYAKMAZ (Danışman)

Fen Bilimleri Enstitüsü Yönetim Kurulu'nun .../.../..... gün ve sayılı kararıyla onaylanmıştır.

Prof. Dr. M. Sabri ÖZYURT
Fen Bilimleri Enstitüsü Müdürü

GÜÇ FAKTÖRÜ DÜZELTMELİ DOĞRULTUCULAR VE SİMÜLASYONLARI

Mehmet Bilge KASAP

Elektrik-Elektronik Mühendisliği Yüksek Lisans Tezi, 2006

Tez Danışmanı: Yrd. Doç. Dr. Bekir MUMYAKMAZ

ÖZET

Bu çalışmada; şebekeden sinüsoidal akım çeken bir fazlı doğrultucular tasarlanmıştır. Tasarlanan doğrultucular bir fazlı yükseltici tip doğrultucu, modifiyeli yükseltici tip doğrultucu, yarı köprü doğrultucu, çift yönlü güç aktarımlı yar köprü doğrultucu ve tam köprü doğrultucudur. Tasarımlar Matlab/Simulink® programında gerçekleştirilmiş ve simüle edilmiştir.

Simülasyonları yapılan doğrultucular iki tip kontrolör içermektedir. Birincisi çıkış gerilimini kontrol eden PI gerilim kontrolörü, ikincisi ise şebekeden çekilen akımı kontrol eden histerezis veya PWM (darbe genişlik modülasyonu) kontrolörüdür. Simülasyonların sonuçları beş tip doğrultucuda da makul performansa sahip olup, şebekeden çekilen akımdaki THD (toplam harmonik bozulma) oranı standartlara uygun çıkmıştır. Doğrultucuların DC çıkış gerilimi regüleli, şebekeden çektikleri akım ise ideal sinüse çok yakındır. Şebekeden çekilen akımın sinüsoidal olması ve gerilim ile aynı fazda olması güç faktörünü de yükseltmiştir.

Doğrultucuların eşit ağır yük ve hafif yükler altındaki performansları incelenmiştir. Verilen referansa oturma süreleri, şebekeden çektikleri akımdaki THD oranları ve DC çıkış gerilimindeki değişimler karşılaştırılmıştır.

Anahtar Kelimeler: Bir fazlı doğrultucular, Güç faktörü düzeltimi, Şebekeden sinüsoidal akım çeken doğrultucular.

POWER FACTOR CORRECTION RECTIFIERS AND THEIR SIMULATIONS

Mehmet Bilge KASAP

Electrical and Electronics Engineering MSc. Thesis, 2006

Supervisor: Assist. Prof. Dr. Bekir MUMYAKMAZ

SUMMARY

In this study; single phase rectifiers, which draw sinusoidal current from the grid, are designed and evaluated. The rectifiers that are studied include rectifiers single phase boost type rectifier, modified boost type rectifier, semi-bridge rectifier, bi-directional semi-bridge rectifier and full bridge rectifier. The rectifiers have been designed and simulated in Matlab/Simulink environment.

Each simulated rectifier unit has two control mechanisms. The first controller is a linear PI controller which regulates output voltage. The second one is hysteresis controller or PWM controller that shapes the input current drawn from the grid. Simulation results show that all the five type rectifiers have satisfactory performance. Total harmonic distortion (THD) levels in the grid current are in the acceptable range defined in the harmonic standards. The current which is drawn from the grid is sinusoidal in shape and in almost same phase with voltage, thus the power factor of the rectifier is close to unity.

All the rectifiers have been simulated with the same heavy and light load conditions, and their performance have been observed and evaluated. Settling time for a given reference value, THD rates in the grid current, and rectifier output voltage waveforms of each designed system have been compared.

Keywords: Power factor correcting, Rectifiers with a sinusoidal current, Single phase rectifiers.

TEŐEKKÜR

Bu alışmada bana yardımcı olan başta danışman hocam Yrd. Do. Dr. Bekir MUMYAKMAZ'a, katkılarından dolayı diğer bۆlüm ۆđretim elemanlarına ve hibir zaman maddi ve manevi desteklerini esirgemeyen sevgili aileme sonsuz teőekkür ederim.

İÇİNDEKİLER

	<u>Sayfa</u>
ÖZET.....	iv
SUMMARY.....	v
ŞEKİLLER DİZİNİ.....	ix
ÇİZELGELER DİZİNİ.....	xiii
SİMGELER DİZİNİ.....	xiv
1. GİRİŞ.....	1
2. KONTROLSÜZ DOĞRULTUCULAR.....	5
2.1 Bir Fazlı Yarım Dalga Kontrolsüz Doğrultucu.....	5
2.2 Bir Fazlı Tam Dalga Kontrolsüz Doğrultucu.....	8
2.3 Üç Fazlı Tam Dalga Kontrolsüz Doğrultucu.....	12
2.4 Güç Faktörü ve Güç Faktörü Düzeltme.....	16
3. GÜÇ FAKTÖRÜ DÜZELTMELİ DOĞRULTUCULAR.....	20
3.1 Bir Fazlı Güç Faktörü Düzeltmeli Yükseltici Tip Doğrultucu.....	22
3.1.1 Referans Değişimlerine Sistemin Verdiği Tepki.....	27
3.1.2 Yük Değişimlerine Sistemin Verdiği Tepki.....	28
3.2 Modifiyeli Yükseltici Tip Doğrultucu.....	29
3.2.1 Referans Değişimlerine Sistemin Verdiği Tepki.....	35
3.2.2 Yük Değişimlerine Sistemin Verdiği Tepki.....	37
3.3 Yarı Köprü Doğrultucu.....	38
3.3.1 Referans Değişimlerine Sistemin Verdiği Tepki.....	43
3.3.2 Yük Değişimlerine Sistemin Verdiği Tepki.....	44
3.4 Çift Yönlü Güç Aktarımlı Yarı Köprü Doğrultucu.....	46
3.4.1 Referans Değişimlerine Sistemin Verdiği Tepki.....	51
3.4.2 Yük Değişimlerine Sistemin Verdiği Tepki.....	53
3.5 Bir Fazlı Tam Köprü Doğrultucu.....	55
3.5.1 Referans Değişimlerine Sistemin Verdiği Tepki.....	59
3.5.2 Yük Değişimlerine Sistemin Verdiği Tepki.....	61

İÇİNDEKİLER(devam)

	<u>Sayfa</u>
4. PERFORMANS ANALİZİ VE DEĞERLENDİRMELER.....	63
5. SONUÇ VE ÖNERİLER.....	72

ŞEKİLLER DİZİNİ

<u>Sekil</u>	<u>Sayfa</u>
2.1 Yarım dalga doğrultucu.....	5
2.2 Çıkış gerilimi, şebeke gerilimi, şebeke akımı.....	6
2.3 Çıkış gerilimi, şebeke gerilimi, şebeke akımı.....	7
2.4 a) Şebeke akımı	
b) Harmonik bileşenler ve THD.....	7
2.5 Bir fazlı tam dalga doğrultucu.....	8
2.6 a) Şebeke ani gerilimi pozitif iken akım b) Şebeke ani gerilimi negatif iken akım	
c) Kesintili <i>id</i> akımı ve dalgalı <i>vd</i> gerilimi.....	9
2.7 Çıkış gerilimi, şebeke gerilimi, şebeke akımı, $C=220\mu\text{F}$ için.....	10
2.8 Çıkış gerilimi, şebeke gerilimi, şebeke akımı, $C=1000\mu\text{F}$ için.....	10
2.9 a) Şebeke akımı	
b) Harmonik bileşenler ve THD.....	11
2.10 Üç fazlı tam dalga doğrultucu.....	12
2.11 AC giriş gerilimleri ve DC çıkış gerilimi.....	13
2.12 Bir faz eşdeğer devre.....	13
2.13 Çıkış gerilimi, şebeke gerilimi, şebeke akımı, $C=220\mu\text{F}$ için.....	14
2.14 Çıkış gerilimi, şebeke gerilimi, şebeke akımı, $C=1000\mu\text{F}$	15
2.15 a) Şebeke akımı	
b) Harmonik bileşenler ve THD.....	15
2.16 Güç üçgeni.....	16
2.17 Saf direncin bağlandığı şebeke gerilimi ve şebekeden çektiği akım... ..	17
2.18 Endüktif yükün bağlandığı şebeke gerilimi ve şebekeden çektiği akım.....	17
2.19 Kontrolsüz doğrultucunun bağlandığı şebeke gerilimi ve şebekeden çektiği akım.....	18
3.1 Kontrollü doğrultucu blok diyagramı.....	21
3.2 Güç faktörü düzeltmeli doğrultucuların temel blok diyagramı.....	21
3.3 Bir fazlı yükseltici tip doğrultucu.....	23
3.4 Bir fazlı yükseltici tip doğrultucu kontrol devresi blok diyagramı.....	23
3.5 Referans verilen 400V değerine ulaşırken DC çıkış gerilimi, şebeke akımı, şebeke gerilimi.....	25
3.6 a) Şebeke akımı	
b) Harmonik bileşenler ve THD.....	25

ŞEKİLLER DİZİNİ (devam)

<u>Sekil</u>	<u>Sayfa</u>
3.7 Şebekeden çekilen akımın yarım periyodu.....	26
3.8 Şebekeden çekilen akım ve şebeke gerilimi.....	26
3.9 DC çıkış gerilimi(0V-400V, 400V-1000V).....	27
3.10 Çıkış gerilimi(1000V-600V,600V-400V).....	28
3.11 a) Yükün 100Ω'dan 250Ω'a değiştirilmesi	
b) Yükün 250Ω'dan 100Ω'a değiştirilmesi	
Yük değişimlerinde DC çıkış gerilimi.....	29
3.12 Modifiyeli yükseltici Tip Doğrultucu.....	30
3.13 Modifiyeli yükseltici tip doğrultucu kontrol devresi blok diyagramı.....	31
3.14 PWM kontrolör.....	32
3.15 Referans verilen 600V değerine ulaşırken çıkış gerilimi, şebeke akımı, şebeke gerilimi.....	33
3.16 a) Şebeke akımı	
b) Harmonik bileşenler ve THD.....	33
3.17 Şebeke gerilimi ve şebeke akımı.....	34
3.18 Şebeke akımının yarım periyodu.....	35
3.19 DC çıkış gerilimi (0V-600V, 600V-800V).....	36
3.20 DC çıkış gerilimi (800V-600V, 600V-400V).....	36
3.21 Yükün 100Ω'dan 250Ω'a değiştirilmesi sırasında DC çıkış gerilimi.....	37
3.22 Yükün 250Ω'dan 100Ω'a değiştirilmesi sırasında DC çıkış gerilimi.....	38
3.23 a) Simetrik yarı köprü doğrultucu	
b) Asimetrik yarı köprü doğrultucu	
Yarı Köprü Doğrultucu.....	39
3.24 Yarı köprü doğrultucu kontrol devresi blok diyagramı.....	40
3.25 a) Şebeke akımı	
b) Harmonik bileşenler ve THD.....	41
3.26 Şebekeden çekilen akımın yaklaştırılmış dalga şekli.....	42
3.27 Şebekeden çekilen akım ve şebeke gerilimi.....	43
3.28 Referans değişimleri (400V-600V, 600V-1000V) ve şebeke akımı.....	43
3.29 Referans değişimleri (1000V - 400V) ve şebeke akımı.....	44
3.30 Yükün 270Ω'dan 1000Ω'a değiştirilmesi sırasında çıkış gerilimi ve şebeke akımı.....	45

ŞEKİLLER DİZİNİ (devam)

<u>Sekil</u>	<u>Sayfa</u>
3.31 Yükün 1000 Ω 'dan 270 Ω 'a değiştirilmesi sırasında çıkış gerilimi ve şebeke akımı.....	45
3.32 Çift yönlü güç aktarımlı yarı köprü doğrultucu.....	46
3.33 Çift yönlü güç aktarımlı yarı köprü doğrultucu kontrol devresi blok diyagramı.....	47
3.34 Referans olarak verilen 1000V değerine ulaşma.....	49
3.35 a) Şebekeden çekilen akım	
b) Harmonik bileşenler ve THD.....	50
3.36 Şebekeden çekilen akımın yarım periyodu.....	50
3.37 Şebekeden çekilen akım ve şebeke gerilimi.....	51
3.38 DC çıkış gerilimi ve şebeke akımı (800V-1000V,1000V-1200V).....	52
3.39 DC çıkış gerilimi ve şebeke akımı (1200V-800V).....	52
3.40 Şebekeden çekilen akım ve şebeke geriliminin dalga şekli.....	53
3.41 Yükün 270 Ω 'dan 500 Ω 'a değiştirilmesi sırasında çıkış gerilimi ve şebeke akımı.....	54
3.42 Yükün 500 Ω 'dan 270 Ω 'a değiştirilmesi sırasında çıkış gerilimi ve şebeke akımı.....	54
3.43 Tam köprü doğrultucu.....	55
3.44 Tam köprü doğrultucu kontrol devresi blok diyagramı.....	56
3.45 Referans gerilim değerine ulaşırken DC çıkış gerilimi, şebeke akımı, şebeke gerilimi.....	57
3.46 a) Şebeke akımı	
b) Harmonik bileşenler ve THD.....	58
3.47 Şebekeden çekilen akımın yarım periyodu.....	58
3.48 Şebekeden çekilen akım ve gerilimin dalga şekli.....	59
3.49 Çıkış gerilimi ve şebeke akımı (0V-600V,600V-1000V).....	60
3.50 DC çıkış gerilimi ve şebeke akımı (1200V-400V).....	60
3.51 Şebeke gerilimi ve akımı.....	61
3.52 Yükün 270 Ω 'dan 1000 Ω 'a değiştirilmesi sırasında çıkış gerilimi ve şebeke akımı.....	61
3.53 Yükün 1000 Ω 'dan 270 Ω 'a değiştirilmesi sırasında çıkış gerilimi ve şebeke akımı.....	62
4.1 a) Bir fazlı yükseltici tip doğrultucu b) Modifiyeli yükseltici tip doğrultucu c) Simetrik yarı köprü doğrultucu d) Asimetrik yarı köprü doğrultucu e) Çift yönlü güç aktarımlı yarı köprü doğrultucu f) Tam köprü doğrultucu.....	64

ŞEKİLLER DİZİNİ (devam)

<u>Sekil</u>	<u>Sayfa</u>
4.2 a) Yük 100Ω b) Yük 500Ω Bir fazlı yükseltici tip doğrultucunun şebekeden çektiği akımdaki harmonikler ve THD.....	65
4.3 a) Yük 100Ω b) Yük 500Ω Modifiyeli yükseltici tip doğrultucunun şebekeden çektiği akımdaki harmonikler ve THD.....	65
4.4 a) Yük 100Ω b) Yük 500Ω Yarı köprü doğrultucunun şebekeden çektiği akımdaki harmonikler ve THD.....	66
4.5 a) Yük 100Ω b) Yük 500Ω Çift yönlü yarı köprü doğrultucunun şebekeden çekilen akımdaki harmonikler ve THD.....	66
4.6 a) Yük 100Ω b) Yük 500Ω Tam köprü doğrultucunun şebekeden çektiği akımdaki harmonikler ve THD.....	66
4.7 Bir fazlı yükseltici tip doğrultucunun çıkış gerilimi ve şebeke akımı.....	68
4.8 Modifiyeli yükseltici tip doğrultucunun çıkış gerilimi ve şebeke akımı.....	69
4.9 Yarı köprü doğrultucunun çıkış gerilimi ve şebeke akımı.....	69
4.10 Çift yönlü güç aktarımlı yarı köprü doğrultucunun çıkış gerilimi ve şebeke akımı.....	70
4.11 Tam köprü doğrultucunun çıkış gerilimi ve şebeke akımı.....	70

ÇİZELGELER DİZİNİ

<u>Çizelge</u>	<u>Sayfa</u>
4.1 Performans tablosu.....	67
4.2 Doğrultucu topolojileri.....	68
4.3 Doğrultucuların verilen referansa oturma süreleri.....	71

SİMGELER DİZİNİ

<u>Simgeler</u>	<u>Açıklama</u>
THD	Total harmonic distortion (toplam harmonik bozulma)
PI	Proportional integral (oransal integral)
PWM	Pulse width modulation (darbe genişlik modülasyonu)
ω	Açısal hız
Ω	Ohm
Z	Empedans
v_s	Kaynak gerilimi
v_d	Yük gerilimi
R_s	Hat direnci
C_d	Filtre kapasitörü
L_s	Hat indüktansı
ϕ	Akım ile gerilim arasındaki açı
V_{rms}	Gerilimin efektif değeri
I_{rms}	Akımın efektif değeri
P	Aktif güç
S	Görünür güç
PF	Güç faktörü
D	Diyot
Ki	İntegral kazancı
Kp	Oransal kazanç
M	Mosfet
v_p	Anahtar üzerindeki gerilim
i_p	Anahtar üzerindeki akım
d	Anahtarların açık veya kapalı olma durumu
UPS	Kesintisiz güç kaynağı
AC	Alternatif akım
DC	Doğru akım
v_m	Alternatif gerilimin maksimum değeri

1. GİRİŞ

Son yıllarda teknolojinin gelişmesi ile enerji ihtiyacı giderek artmaktadır ve bu ihtiyacın büyük çoğunluğunu elektrik enerjisi oluşturmaktadır. Elektrik enerjisi üretim kaynakları sınırlıdır, buna karşılık elektrik enerjisi kullanan cihaz sayıları giderek artmaktadır. Günümüzde ortaya çıkan bu elektrik enerjisi ihtiyacı karşısında var olan enerjiyi verimli kullanmak çok önemli hale gelmiştir. Elektrik enerjisi üretim maliyetlerinin artması kullanıcı tarafına da yansımış ve elektrik enerjisine ödenen miktar artmıştır. Bu sebeple yeni geliştirilen cihazlar yüksek verim sağlayacak şekilde tasarlanmaya başlamıştır.

Teknoloji geliştikçe, elektrik enerjisinin kullanımı rezistif ısıtıcılar, akkor lamba gibi basit yüklerden anahtarlamalı motor sürücüler, AC/DC dönüştürücüler, bilgisayarlar vb. karmaşık yapıli yüklerle geçmiştir. Basit yükler şebekeden reaktif güç çekmez iken bu karmaşık yapıli yükler şebekeden aktif gücün yanında reaktif güç de çekerler. Saf direnç ve buna benzer yapıdaki lineer yüklerin güç faktörü 1 ve 1'e yakın iken, lineer olmayan kapasite ve indüktans bulunan devrelerde güç faktörü düşüktür. Düşük güç faktörü şebekenin aşırı zorlanması, trafoların aşırı ısınması gibi problemleri oluşturmaktadır. İzin verilenden daha fazla kullanılan reaktif enerji, enerji şirketi tarafından faturaya cezalı olarak yansıtılmaktadır. Bu sebeple düşük güç faktörünün yüksek tutulması gerekmektedir. Yüksek güç faktörüne sahip bir cihazın şebekeden şebeke ile aynı faz ve dalga şekline sahip akım çekmesi gerekmektedir([1],[11]). Düşük güç faktörünün iki sebebi vardır. Birincisi devredeki kapasite ve indüktans sebebi ile oluşan düşük güç faktörü, ikincisi ise kontrolsüz doğrultucular gibi harmonikli akım çeken yüklerin oluşturduğu düşük güç faktörüdür. Birincisinde şebekeden çekilen akım sinüs fakat fazı kayıktır. Bu tür düşük güç faktörünü yükseltmek kolaydır. Devreye paralel kapasite veya indüktans bağlanarak faz kayması düzeltilir ve güç faktörü yükseltilmiş olur. Bu işleme kompanzasyon denir. Fakat asıl zor olan harmonikli akım çeken yüklerin oluşturduğu düşük güç faktörünü düzeltmektir[13]. Burada şebekeden çekilen akım şebeke gerilimi ile aynı fazda olabilmektedir ancak dalga şekli ideal sinüsten oldukça uzaktır ve darbelidir. Kontrolsüz doğrultucu içeren güç elektroniği uygulamalarında güç faktörünü yükseltmek için aktif filtre kullanılıyordu. Son yıllarda pahalı ve tasarımı zor olan bu yöntemin yerine kontrollü elemanlar kullanarak doğru kontrol yöntemi ile şebekeden şebekeyle aynı fazda ve dalga şeklinde akım çeken devreler tasarlanmaya başlamıştır. Bu devrelere örnek olarak şebekeden sinüse yakın akım çeken güç faktörü düzeltmeli doğrultucular gösterilebilir.

Anahtarlama güç kaynakları, elektronik balastlar vb. lineer olmayan elemanlar gibi kontrolsüz doğrultucular da önemli bir harmonik kaynağıdır. Bu harmoniklerden aynı şebekeye bağlı diğer kullanıcıların cihazları da olumsuz yönde etkilenmektedir. Harmonikler şebeke geriliminin sinüs şeklinde bozulmalar meydana getirmektedir. Bu da aynı şebekeye bağlı ölçüm cihazları, medikal cihazlar, mikroişlemcili sistemler ve bilgisayarlar gibi hassas cihazların yanlış çalışmasına veya hiç çalışmamasına sebebiyet vermektedir[14]. Harmonikler şebeke enerji kalitesini düşürmektedir. Enerji kalitesi terimi genel olarak, bir güç sistemindeki akım ve gerilimin ideal dalga şeklini bozan her türlü elektriksel etkileşimdir. Bu terim Dugan tarafından (1996); “Uç kullanıcıların cihazlarının çalışmasını bozan veya yanlış çalışmasına sebep olan akım, gerilim ve frekansta meydana gelen herhangi bir sapma enerji kalitesi problemi” şeklinde tanımlanmıştır[8]. Dengeli üç fazlı doğrultucular 3 ve 3’ün katları tek harmonikleri ve çift harmoniklerin tamamını üretmezken, bir fazlı doğrultucular çift harmonikler hariç diğer bütün harmonikleri üretmektedir. Harmonikler güç kayıplarının artmasına, kuvvetli elektromanyetik gürültüye, trafolarla ısınmaya, üç fazlı sistemlerde nötr iletkeninden fazla akım akmasına sebebiyet vermektedirler[16]. Ayrıca kompanzasyon panolarındaki kondansatörler ile rezonansa girerek arızalanmalarına yol açmaktadırlar. Güç faktörü düzeltmeli doğrultucular şebekeden aynı fazda ve dalga şeklinde akım çektikleri için bu harmonik sorununa da çözüm getirmektedir.

Bu çalışmada, güç elektroniği uygulamalarında sık olarak kullanılan, şebekeden sinüoidal akım çeken bir fazlı yükseltici tip doğrultucu, modifiyeli yükseltici tip doğrultucu, yarı köprü doğrultucu, çift yönlü güç aktarımlı yarı köprü doğrultucu ve tam köprü doğrultucu tasarlanmıştır. Anahtarlama yapılmadığı durumda harmonikli akıma ve düşük güç faktörüne sahip olan bu doğrultucular uygulanan kontrol yöntemleriyle şebekeden sinüs akım çeker hale gelmiş ve yüksek güç katsayısına ulaşmıştır. Doğrultucuların güç faktörü 1’e çok yakındır. Doğrultucuların şebekeden çektiği akımdaki THD (toplam harmonik bozulma) oranı EN 61000-3-2, IEEE 519-1992 ve IEC 1000 standartlarına uygun çıkmıştır. Bu standartlara göre güç faktörü düzeltmeli doğrultuculardaki akımdaki THD oranının %5’in altında olması gerekmektedir[5]. Bir fazlı yükseltici tip doğrultucu, modifiyeli yükseltici tip doğrultucu ve yarı köprü doğrultucuda güç aktarımı tek yönlüdür. Güç daima şebekeden yüke doğru akmaktadır. Çift yönlü güç aktarımlı yarı köprü doğrultucu ve tam köprü doğrultucu her iki yöne de güç aktarabilmektedir. Bazı özel UPS, batarya şarj vb. uygulamalarda çift yönlü güç aktarımı gerekmektedir. Çift yönlü güç aktarımlı doğrultucularda verim ve sistemin güvenilirliği daha yüksektir[2]. Tasarımı yapılan doğrultucuların tümü yükseltici özelliktedir. Yükseltici tip doğrultucuların yaygın kullanılmasının nedeni düşürücü tip doğrultucudaki gibi akımdaki THD

oranının doğrultucunun yapısından kaynaklanan sebep ile yüksek olmamasıdır. Düşürücü tip doğrultucularda giriş AC gerilimi çıkış DC geriliminden düşük olduğu anda şebeke akımı sıfıra düşmektedir ve bu düşüş akımdaki THD oranını önemli ölçüde arttırmaktadır([10],[11]). Yükseltici tip doğrultucularda ise indüktanstan geçen akımın kontrolü daha kolaydır. Bu doğrultucularda çıkış DC gerilim seviyesi giriş AC gerilim seviyesinin pik değerinden daha büyüktür. Girilen referans değere göre çıkış DC gerilim seviyesi regülelidir.

Bir elektronik devrenin tasarımında simülasyon programları tasarıma oldukça yardımcı olmaktadır. Bu programlar tasarımın uygulanabilirliği ve karşılaşacağı problemleri önceden görebilmek için büyük önem taşımaktadır. Elektrik-Elektronik devreleri tasarlamada kullanılan pek çok simülasyon programı vardır. Bunlar Matlab/Simulink, Pspice, Orcad, Simnon vb. programlardır. Bu çalışmada simülasyon hızı, standart kütüphaneleri ve kullanım yaygınlığı sebebi ile Matlab/Simulink programı tercih edilmiştir[7].

Şebekeden sinüsoidal akım çeken doğrultucular kontrollü doğrultucular oldukları için geri beslemelidirler. Yük üstünden gerilim örneği ve doğrultucuda bulunan indüktanstan da akım örneği alınmaktadır. Şebekeden sinüs akım çeken doğrultucularda akım kontrolü ve gerilim kontrolü olmak üzere iki tür kontrol yapılmaktadır. Akım kontrolünün gerilim kontrolüne göre daha hızlı yapılması gerekmektedir. Çünkü doğrultucu akımının anlık değişimi DC çıkış geriliminin anlık değişiminden çok daha hızlıdır. Doğrultucuda DC çıkış gerilimini istenilen referansa ayarlayabilmek için çıkıştan gerilim örneği alınmaktadır. Çıkış gerilimi referans gerilimden küçük ise görev periyodu arttırılmakta, büyük ise azaltılmaktadır. Bu çalışmada gerilim kontrolünü PI (proportional integral) hata kontrolörü yapmaktadır.

Akım kontrolü için bir fazlı yükseltici tip doğrultucu, yarı köprü doğrultucu, çift yönlü güç aktarımlı yarı köprü doğrultucu ve tam köprü doğrultucuda histerezis kontrolör kullanılmıştır. Modifiyeli yükseltici tip doğrultucuda ise histerezis kontrolör ile karşılaştırma yapabilmek için PWM (pulse width modulation) kontrolör kullanılmıştır. Histerezis kontrolörde esas olan akımı belirli bir bant genişliğinde tutmaktır. Bu bant genişliğinin değerine göre de anahtarlama frekansı değişmektedir. PWM kontrolörde ise frekans sabittir. PWM ve histerezis kontrolör çıkışındaki tek sinyal kullanılan doğrultucudaki anahtar sayılarına göre gerekirse tersi alınmış ve çoğaltılmış olarak anahtarlama elemanlarına uygulanmıştır.

Matlab/Simulink programında; simülasyonu yapılan doğrultucuların; normal çalışma koşullarında, akımdaki THD oranlarına ve harmonik miktarlarına bakılarak doğrultucu devrelerinin gerekli parametre ayarlamaları yapılmıştır. Kontrol sisteminde şebeke girişinden gerilim örneği alınarak gerilimin dalga şekli olan sinüsü takip edecek şekilde anahtarlama

yapılması sağlanmaktadır. Şebeke gerilimi ile aynı fazda ve aynı dalga şeklini takip edecek şekilde yapılan anahtarlama sonucunda ise istenilen standartlardaki güç faktörü değerine ve akım THD oranına ulaşılmıştır. Kontrolsüz doğrultucularda 0.5 ile 0.65 arasında değişen güç faktörü simülasyonu yapılan doğrultucuların hepsinde de 0.95'ten büyüktür. Akım THD oranı ise %5'in altında çıkmıştır.

Doğrultucuların performanslarını karşılaştırmak için değişik yükler altında inceleme yapılmıştır. Ağır ve hafif yükler için sahip oldukları akımdaki THD oranlarının değişimlerine, bu değişim sırasında DC çıkış geriliminde meydana gelen artmalara ve azalmalara, ağır ve hafif yük geçişlerinde çıkış geriliminin referans olarak verilen gerilime geri dönme zamanlarına bakılmıştır. Her bir doğrultucunun karakteristiğine ve sahip oldukları PI kontrolör parametrelerine göre verdiği dinamik cevabı farklıdır. Bunlara göre verilen bir referans değere oturma zamanları ve başlangıçta çektikleri pik akımları karşılaştırılmıştır.

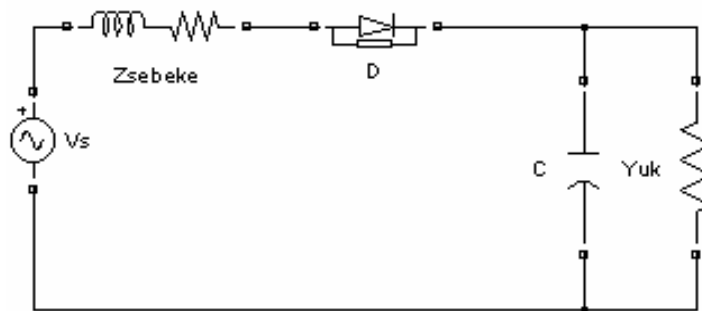
2. KONTROLSÜZ DOĞRULTUCULAR

Kontrolsüz doğrultucular AC şebeke gerilimini DC hat gerilimine dönüştüren diyotlu doğrultuculardır. Günümüzdeki güç elektroniği uygulamalarının çoğunda AC şebeke gerilimini DC gerilime dönüştürmek bir zorunluluk haline gelmiştir. AC/DC dönüşümü yapan güç elektroniği uygulamalarının çoğunda 50Hz'lik demir nüveli trafolar kullanılmaktadır. Gerilim düşürücü olarak kullanılan bu ağır ve pahalı trafolar düşük verimle çalışmaktadır. Modern güç elektroniği uygulamalarında bu düşük verimli trafolar tercih edilmemektedir.

Genellikle küçük güçteki uygulamalar için bir fazlı kontrolsüz doğrultucular kullanılmaktadır. Bir fazlı hat frekanslı olan bu doğrultucular ev aletleri, elektronik balastlar, müzik seti vb. uygulamalarda kullanılmaktadır. Yüksek güç ihtiyacı olan endüstriyel uygulamalar, motor sürücü devreleri uygulamaları ve daha az harmonik istenen uygulamalarda ise üç fazlı kontrolsüz doğrultucular tercih edilmektedir. Bu iki tipteki doğrultucularda güç akış yönü şebekeden yüke doğrudur.

Bir fazlı ve üç fazlı doğrultucular ile sağlanan DC gerilim aküden elde edilen DC gerilim gibi değildir, üzerinde küçük genlikli bir AC sinyal bulunmaktadır. Bu gerilimi ideal DC gerilime yaklaştırmak ve çıkış gerilimini filtrelemek için doğrultucu çıkışına büyük değerde bir kapasitör bağlanmaktadır[11].

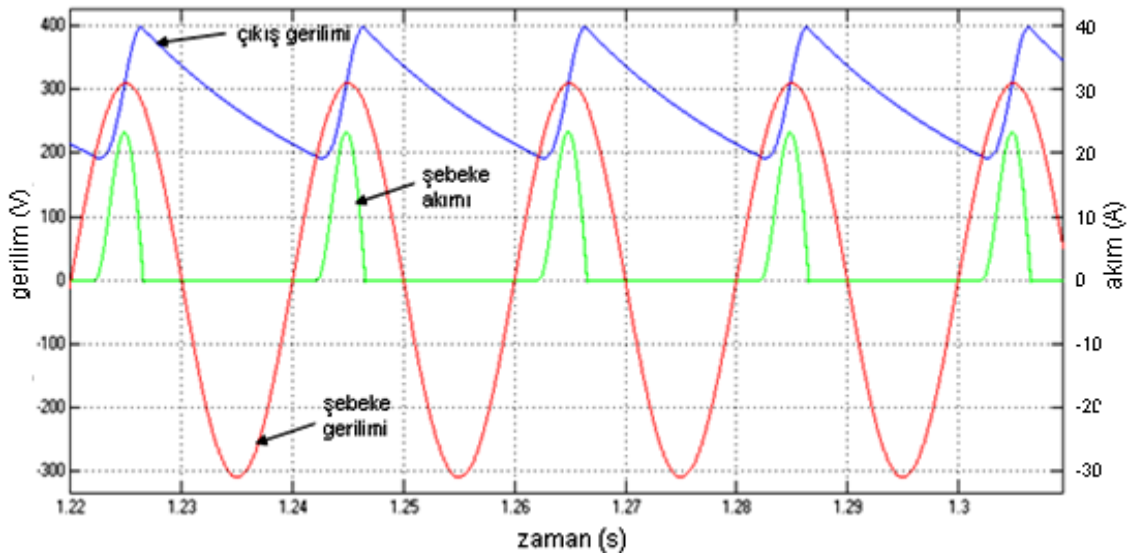
2.1 Bir Fazlı Yarım Dalga Kontrolsüz Doğrultucu



Şekil 2.1 Yarım dalga kontrolsüz doğrultucu

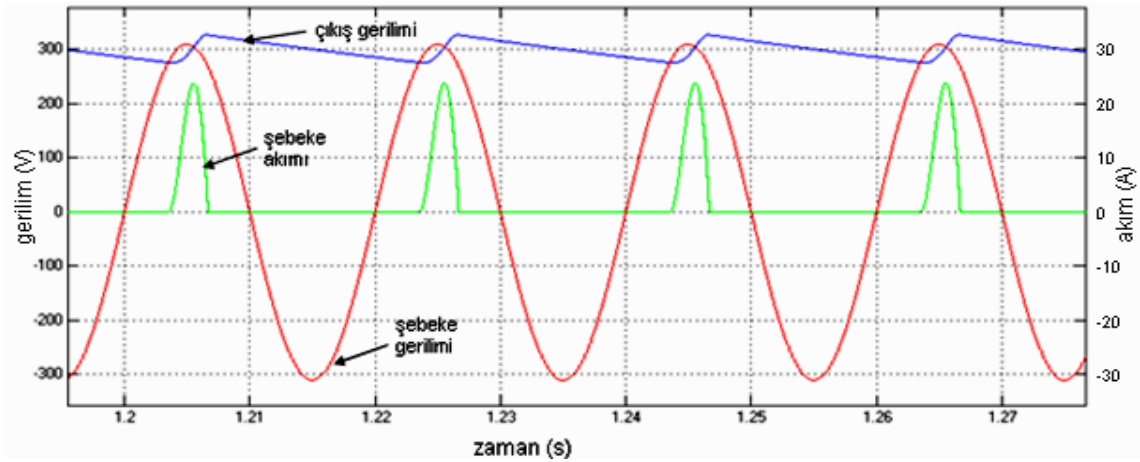
Şekil 2.1'de kontrolsüz doğrultucuların en temel devresi olan bir fazlı yarım dalga doğrultucu verilmiştir. Doğrultucu şebekeyi temsil eden bir AC kaynak ve ona seri bağlı hat empedansı ile beslenmektedir. Bu doğrultucu çalışması itibariyle çıkışta büyük bir gerilim

dalgalanması oluşturmaktadır. Bu dalgalanmayı azaltmak için çıkışa paralel bağlı kapasitenin değerini arttırmak gerekmektedir. Doğrultucudaki diyot girişteki sinüs gerilim dalgasının sadece pozitif kısmını iletmektedir, dalga negatif olduğunda herhangi bir iletim gerçekleşmemektedir. Diyot ON konumdayken kapasite giriş geriliminin maksimum değerine şarj olur. Diyot OFF konuma geçtiğinde ise kapasite sahip olduğu bu enerjiyi yük üstüne boşaltır. Bu sırada çıkış gerilim değeri düşmektedir. Diyot tekrar ON konuma geçtiğinde ise kapasite tekrar şarj olmakta ve bu çevrim böyle devam etmektedir.



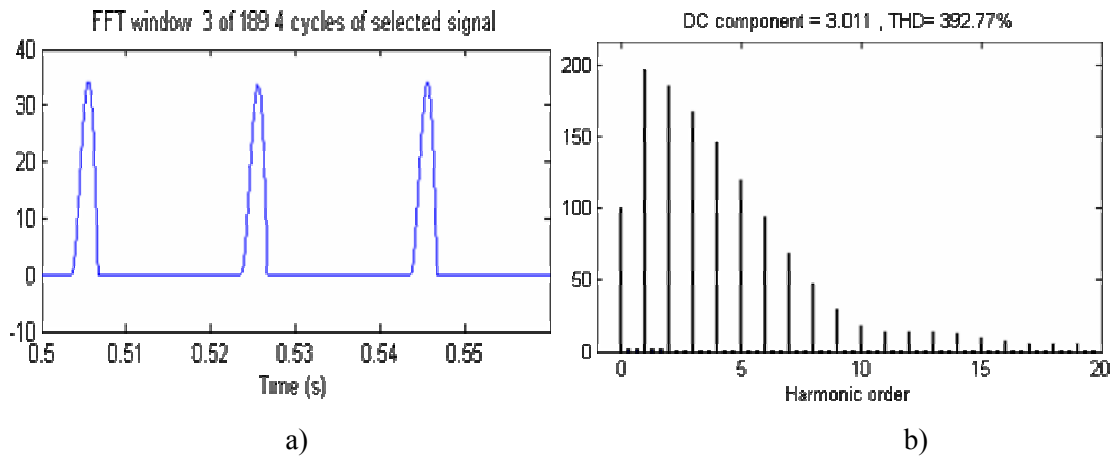
Şekil 2.2 Çıkış gerilimi, şebeke gerilimi, şebeke akımı

220Vrms olarak verilen şebeke geriliminde $220\mu\text{F}$ 'lık kapasitör ile Şekil 2.2'deki dalga şekilleri elde edilmiştir. Şebekeden çekilen akımın daha iyi görülmesi için 10 kat artırıldı. Şekil 2.2'den de görüldüğü gibi çıkıştaki dalgalanma çok yüksektir. Çıkış DC gerilimi 310V ile 180V arasında dalgalanmaktadır. Bu dalgalanmayı azaltmak kapasite değerini makul ölçüde arttırmakla mümkün olmaktadır. Şekil 2.3'te ise kapasitenin $1000\mu\text{F}$ olduğu durumdaki DC çıkış gerilimi, şebeke gerilimi, şebekeden çekilen akım görülmektedir.



Şekil 2.3 Çıkış gerilimi, şebeke gerilimi, şebeke akımı

Şekil 2.3 'te çıkış gerilim dalgalanmasının 328V ile 280V arasında dalgalandığı görülmektedir. Bu dalgalanma Şekil 2.2'ye göre daha azdır. Kapasite değerini daha da yükseltmek simülasyonda mümkün olsa da pratikte zordur. Çünkü yüksek değerli kapasite şebekeden ani değerli yüksek akım çeker ve doğrultucudaki diyot bu akıma dayanamayabilir. Yarım dalga doğrultucunun DC çıkış gerilimi yaklaşık olarak AC giriş geriliminin pik değeri kadardır. Şebeke gerilimi $220V_{rms}$ olan bir sistemde yaklaşık 310V değerindedir. Yarım dalga kontrolsüz doğrultucu kullanıldığı için DC çıkış gerilim seviyesi ayarı ancak çıkışa gerilim bölücü direnç özelliğindeki devreler bağlanarak yapılabilmektedir. Bu uygulama düşük olan verimi daha da düşürmektedir.

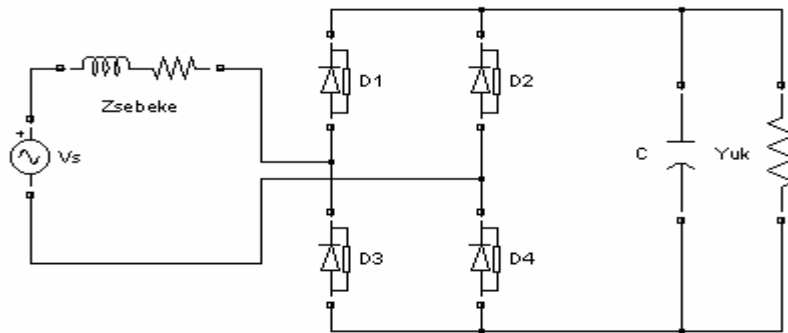


Şekil 2.4 a) Şebeke akımı, b) Harmonik bileşenler ve THD

Yarım dalga doğrultucular şebekeye yüksek miktarda harmonik akımları enjekte ederler. Bu doğrultucunun şebekeden çektiği akımdaki toplam harmonik bozulma oranı (THD) %392.77 gibi çok yüksek bir değerdedir. Aynı şebekeye bağlanan çok sayıdaki bu tip doğrultucuların oluşturduğu harmonikler şebeke enerji kalitesini bozarak diğer uç kullanıcılara zarar verebilir. Şekil 2.4'te çıkıştaki kapasiteden dolayı çekilen darbeli akım ve şebekeden çekilen akımdaki THD oranı görülmektedir. Bu sebeplerden dolayı doğrultucunun güç faktörü de düşüktür. Yüksek güç faktörü ve düşük harmonik miktarı için şebekeden çekilen akımın ideal sinüse çok yakın ve şebeke gerilimi ile aynı fazda olması gerekmektedir.

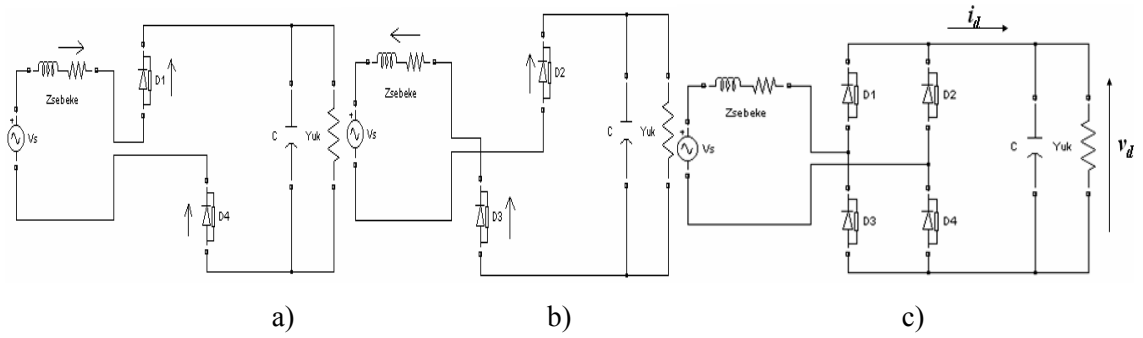
2.2 Bir Fazlı Tam Dalga Kontrolsüz Doğrultucu

Hat frekanslı ve kontrolsüz olan bir fazlı tam dalga doğrultucular küçük güçlü uygulamalar için kullanılmaktadır. Şekil 2.5'te bir fazlı tam dalga köprü doğrultucu görülmektedir. Tam dalga doğrultucu şarj aletleri, güç kaynakları, elektrikli ev aletleri vb. küçük güçlü uygulamalarda kullanılmaktadır[17]. DC çıkış gerilimi yaklaşık olarak AC giriş gerilimin pik değeri kadardır. Bir fazlı tam dalga doğrultucu ayarlı DC gerilim gerektiren uygulamalarda da sık olarak kullanılmaktadır. Bu gerilim ayarlaması çıkışa eklenecek regüle devresi yardımıyla yapılabilmektedir.



Şekil 2.5 Bir fazlı tam dalga kontrolsüz doğrultucu

Şekil 2.5'teki bir fazlı tam dalga doğrultucu şebekeyi temsil eden AC kaynak ve ona seri bağlı hat empedansını temsil eden Z şebeke ile beslenmektedir. Dört adet diyot köprü şeklinde yerleşmiştir. Çıkıştaki gerilim dalgalanmasını azaltmak için yüke paralel bir kapasite bulunmaktadır.



Şekil 2.6 a) Şebeke ani gerilimi pozitif iken akım b) Şebeke ani gerilimi negatif iken akım
c) Kesintili i_d akımını ve dalgalı v_d çıkış gerilimi

Şebeke geriliminin pozitif yarım periyodunda doğrultucu devresinden Şekil 2.6.a'daki gibi bir akım akmaktadır. Şebeke gerilimi negatif yarım periyodunda doğrultucu devresinden Şekil 2.6.b'deki gibi bir akım akmaktadır. Her iki durumda da yükün üstünden aynı yönde akım geçer. Böylelikle giriş AC gerilimi doğrultulmuş olur. Devreden i_d kesintili akımı akarken yük üstünde küçük bir AC bileşen içeren v_d gerilimi oluşur. İletim anında doğrultucuya ait denklemler aşağıda verilmiştir[17].

v_s : kaynak gerilimi

R_s : hat direnci

L_s : hat empedansı

C_d : filtre kapasitesi

$R_{yük}$: doğrultucuya bağlanan yük

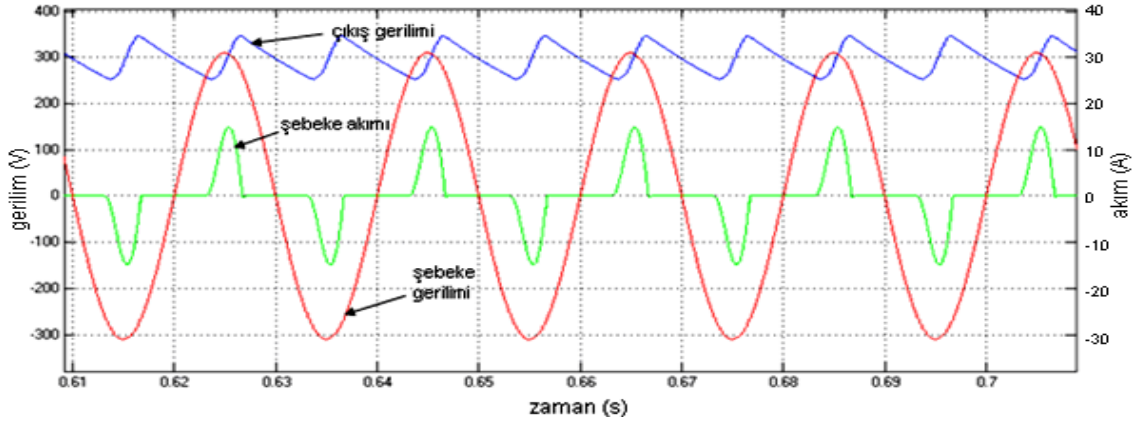
v_d : yük gerilimi

i_d : yük akımı

$$|v_s| = R_s \cdot i_d + L_s \frac{d i_d}{dt} + v_d \quad (2.1)$$

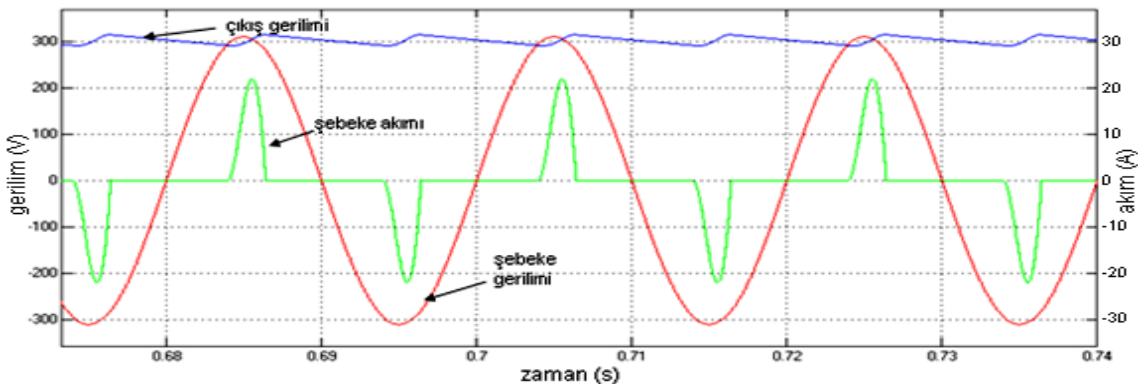
$$i_d = C_d \frac{d v_d}{dt} + \frac{v_d}{R_{yük}} \quad (2.2)$$

Bir fazlı tam dalga doğrultucu Matlab/Simulink'te simule edilmiştir. Simülasyon parametreleri $v_s = 220V_{rms}$, hat empedansı olarak $R_s \approx 0\Omega$ $L_s = 1mH$ ve $R_{yük} = 100\Omega$ olarak seçilmiştir. Kapasite olarak ilk önce $220\mu F$ seçilmiş ve çıkışlar gözlemlenmiştir. Şekil 2.7'de şebeke gerilimi, şebekeden çekilen akım ve DC çıkış gerilimi verilmektedir.



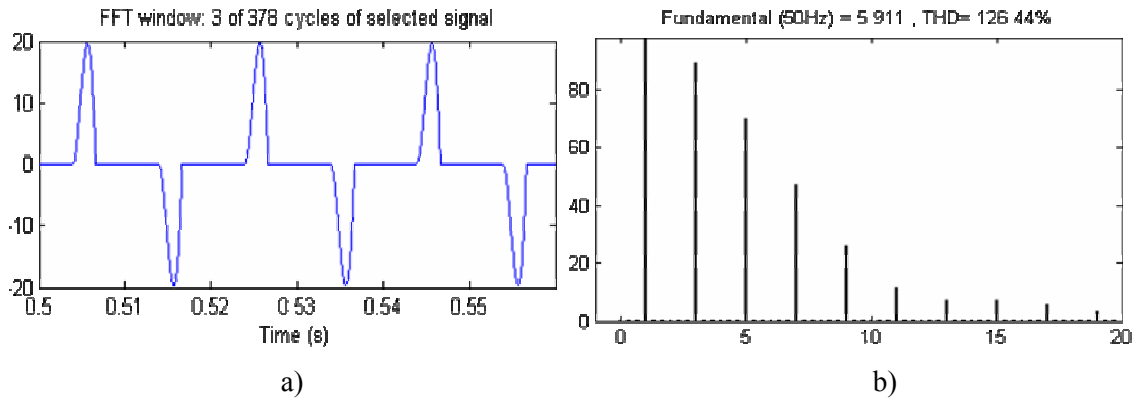
Şekil 2.7 Çıkış gerilimi, şebeke gerilimi, şebeke akımı, $C=220 \mu F$ için

Şekil 2.7'den de görüldüğü gibi $220\mu F$ 'lık kapasite değerinde çıkış DC gerilimi 250V ile 340V arasında dalgalanmaktadır. Bu dalgalanma miktarı aynı kapasite değerindeki yarım dalga doğrultucunun dalgalanma miktarı ile karşılaştırıldığında daha düşük olduğu görülmektedir. Bunun sebebi ise, şebeke geriliminin sadece pozitif olduğu bölgede değil, aynı zamanda negatif olduğu bölgede de şebekeden akım çekilmesidir.



Şekil 2.8 Çıkış gerilimi, şebeke gerilimi, şebeke akımı, $C=1000 \mu F$ için

220 μ F'lık kapasite 1000 μ F'a çıkarıldığı zaman çıkış ideal DC gerilime daha çok yaklaşmaktadır. Şekil 2.8'de 1000 μ F'lık kapasite değerindeki çıkış gerilimi, şebeke gerilimi, şebeke akımı görülmektedir. Buradaki DC çıkış gerilim dalgalanması 310V ile 290V arasındadır. Kapasite değerini daha da arttırmak pratikte uygun değildir.

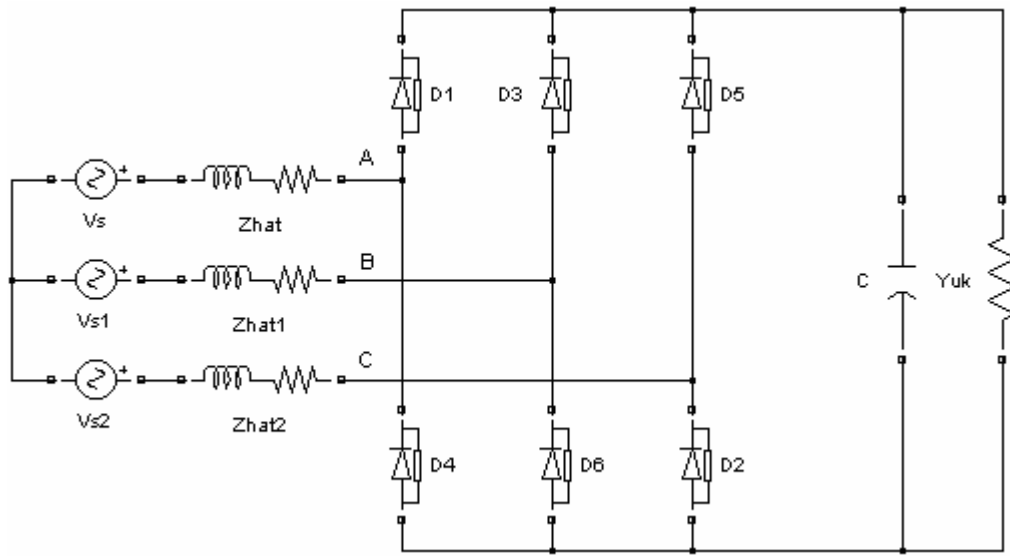


Şekil 2.9 a) Şebeke akımı, b) Harmonik bileşenler ve THD

Elektriksel bir sistemin yüksek güç faktörüne sahip olabilmesi için şebekeden çektiği akımın dalga şekli, fazı ve frekansı şebeke gerilimi ile aynı olması gerekmektedir. Şekil 2.8'de verilen şebeke akımının şebeke gerilimi ile aynı fazda olmadığı görülmektedir. Harmonikler sebebiyle bu devrenin güç faktörü 0.5 ile 0.6 arasındadır. Düşük güç faktörüne sahip bu devrenin verimi de düşüktür. Ayrıca şebekeden çekilen akım ideal sinüsten oldukça uzaktır. Tam dalga doğrultucu yarım dalga doğrultucuya göre daha düşük akım THD'sine (toplam harmonik bozulma) sahip olsa da bu değer yüksektir. Akımdaki THD Şekil 2.9.b'den de görüldüğü gibi %126.44 oranındadır. Modern güç kaynaklarında bu oran %5'in altında tutulmaktadır. Bu yüksek orandaki harmonikler şebekeyi olumsuz yönde etkilemekte ve ona bağlı bilgisayar, mikroişlemcili sistemler ve medikal cihazlar vb. hassas donanımların yanlış çalışmasına ve hatalı ölçüm yapmasına sebebiyet vermektedir[14].

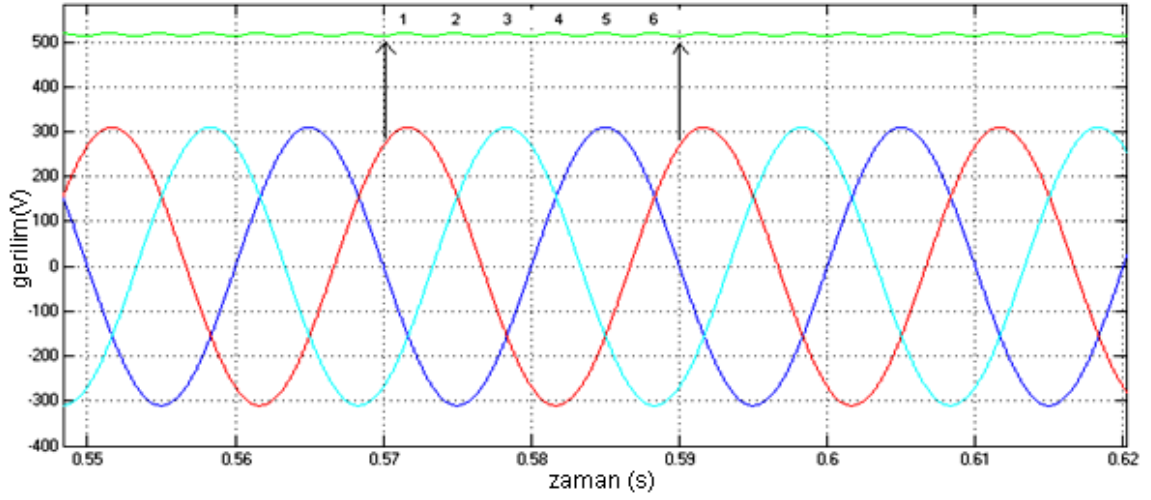
2.3 Üç Fazlı Tam Dalga Kontrolsüz Doğrultucu

Sanayi ve endüstriyel elektronik uygulamalarında yüksek güç ihtiyacı ve üç fazlı endüstriyel cihazların yaygın kullanımı sebebi ile bir fazlı sistemler tercih edilmemektedir. Üç fazlı alternatif gerilimlerin bulunduğu bu ortamlarda üç fazlı tam dalga kontrolsüz doğrultucular sıklıkla kullanılmaktadır[17].



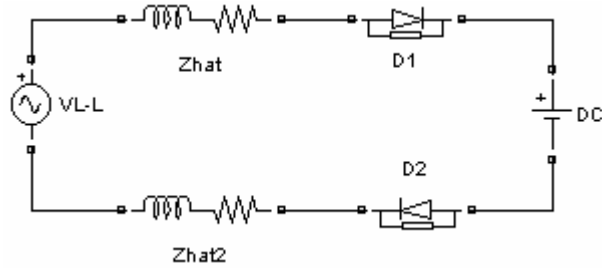
Şekil 2.10 Üç fazlı tam dalga kontrolsüz doğrultucu

Doğrultucu üç fazlı AC dengeli bir kaynak ve ona seri bağlı hat empedansları ile beslenmektedir. Şekil 2.10'daki üç fazlı tam dalga doğrultucunun çıkışına yüke paralel bir kapasite takılmıştır. Bu kapasite gerilimdeki dalgalanmayı azaltmak için kullanılmaktadır. Üç fazlı tam köprü doğrultucunun DC çıkış gerilimi ve AC giriş gerilimleri Şekil 2.11'de verilmiştir. Şekil 2.11'den de görüldüğü gibi DC çıkış gerilimi 6 darbelidir. Bu önemli bir özelliktir. Darbe sayısı ne kadar fazla olursa DC çıkış gerilimindeki dalgalanma o kadar az olmaktadır. Bunun sonucunda da tek fazlı doğrultuculara göre daha küçük değerli kapasite kullanılabilir. Şekil 2.11'deki AC giriş gerilimleri ve DC çıkış gerilimi gösterilmiştir.



Şekil 2.11 AC giriş gerilimleri ve DC çıkış gerilimi

C kapasite değerinin yeteri kadar büyük seçildiği durumda çıkış DC gerilimi sabit olur. Sabit çıkış gerilimi için devre incelenirse eşdeğer devre Şekil 2.12'deki gibi olur.



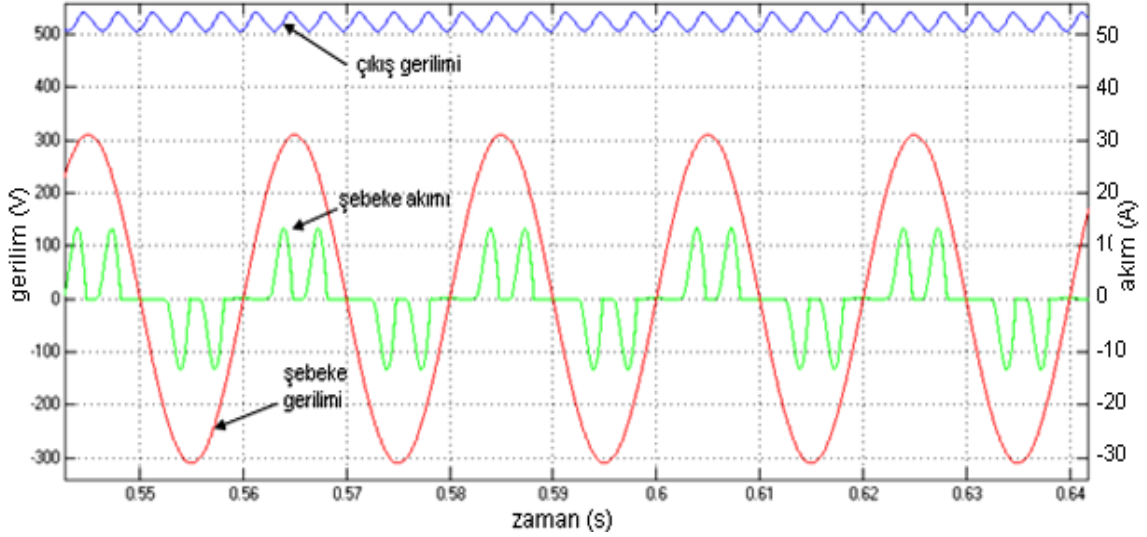
Şekil 2.12 Eşdeğer devre

I_d doğru akımı kısa devre faz akımına göre normalize edilir. Giriş gerilimi fazlar arası alternatif gerilimler cinsinden aşağıdaki gibi ifade edilir[17].

$v_{L-L} = v_{A-B}$ fazlar arası gerilim

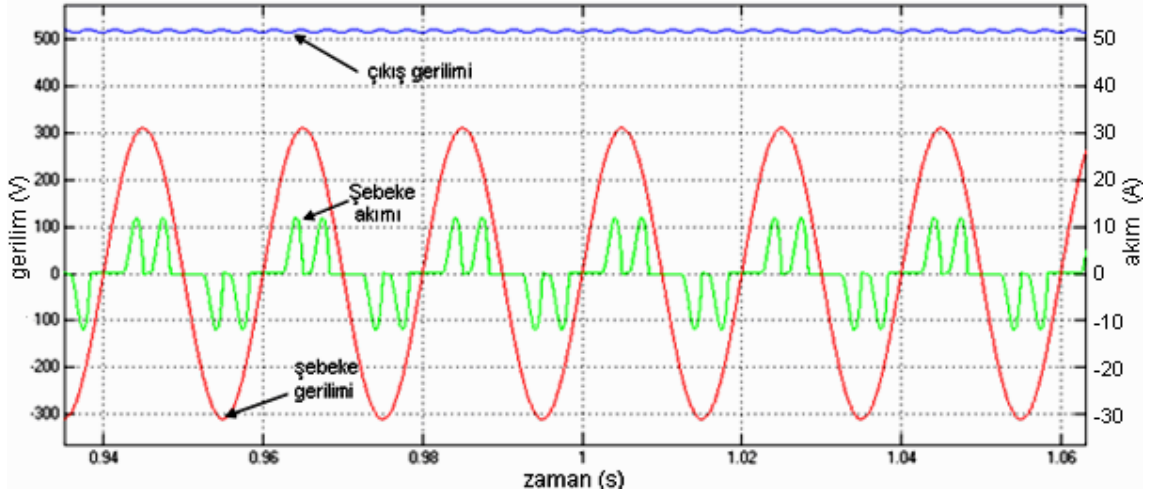
$$i_{\text{kısadevre}} = \frac{v_{L-L} / \sqrt{3}}{\omega L_s} \quad (2.3)$$

Üç fazlı tam dalga doğrultucu Matlab/Simulink'te simüle edilmiştir. Simülasyon parametreleri $v_s = 220\text{Vrms}$, Z hat $R_s \approx 0\Omega$ $L_s = 1\text{mH}$ ve $R_{yük} = 100\Omega$ kullanılmıştır. Düşük kapasite değerinde çıkıştaki dalgalanmayı görebilmek için kapasite olarak ilk önce $220\mu\text{F}$ seçilmiştir. Girilen bu değerlere göre DC çıkış gerilimi, şebeke gerilimi, şebeke akımı Şekil 2.13'te verilmiştir.



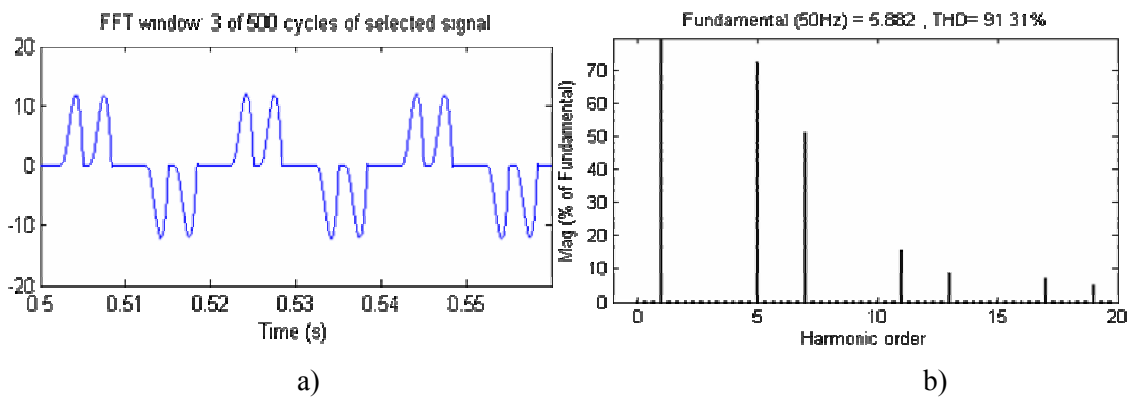
Şekil 2.13 Çıkış gerilimi, şebeke gerilimi,
şebeke akımı, $C=220\mu\text{F}$ için

$220\mu\text{F}$ 'lık kapasite ile DC çıkış gerilimi 510V ile 540V arasında dalgalanmaktadır. Bu dalgalanma miktarı aynı kapasite değerine sahip bir faz yarım dalga doğrultucu ve bir faz tam dalga doğrultucuya göre daha düşüktür Bunun sebebi ise DC çıkış geriliminin 6 darbeli olmasıdır.



Şekil 2.14 Çıkış gerilimi, şebeke gerilimi, şebeke akımı, $C=1000 \mu\text{F}$ için

İkinci bir uygulama olarak $1000\mu\text{F}$ 'lık kapasite kullanılmış ve doğrultucu çıkışları gözlemlenmiştir. Şekil 2.14'te $1000\mu\text{F}$ 'lık kapasite değerindeki çıkış gerilimi, şebeke gerilimi, şebeke akımı görülmektedir. Buradaki DC çıkış gerilim dalgalanması 514V ile 540V arasındadır. Bu dalgalanma miktarına bakılırsa kapasite değerinin tam dalga doğrultucuya göre gayet uygun olduğu görülmektedir. Kapasite değeri daha düzgün bir DC gerilim elde etmek için bir miktar daha artırılabilir. Kapasite değerinin aşırı artırılması doğrultucunun şebekeden ani yüksek akımlar çekmesine neden olmaktadır.



Şekil 2.15 a) Şebeke akımı, b) Harmonik bileşenler ve THD

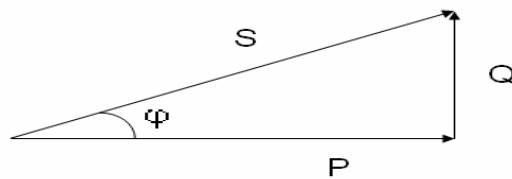
Üç fazlı tam dalga doğrultucunun güç faktörü 0.85 civarındadır. Bu değer bir fazlı yarım dalga ve bir fazlı tam dalga doğrultuculara göre daha yüksektir. Kontrollü güç kaynaklarında bu değer 0.95'in üzerindedir. Yüksek güç faktörü ve düşük harmonik miktarı doğrultucunun şebekeden çektiği akımın dalga şeklinin ideal sinüs ve şebeke gerilimi ile aynı fazda olması gerekmektedir. Şekil 2.15.a'da şebekeden çekilen akımın sinüs olmadığı görülmektedir. Üç fazlı tam dalga doğrultucuda Şekil 2.15.b'de görüldüğü gibi akımdaki THD oranı %91.31 çıkmıştır. Bu oran bir fazlı yarım dalga ve bir fazlı tam dalga doğrultucu ile karşılaştırıldığında daha düşüktür. Bunun sebebi ise DC çıkış geriliminin 6 darbeli olmasıdır. 6 darbeli DC çıkış gerilimi sağlayan bu dengeli sistem tasarımında 3 ve 3'ün katları tek harmonikler ve çift harmoniklerin tamamı oluşmamaktadır[17].

2.4 Güç Faktörü ve Güç Faktörü Düzeltme

Güç faktörü (PF) aktif gücün (P) görünür güce (S) oranıdır. AC şebekeye bağlı elektriksel bir devre şebeke tarafından bakıldığında endüktif, kapasitif veya saf direnç özelliği göstermektedir. Bu özelliğe göre bir devrenin güç faktörü 0 ile 1 arasında değişmektedir.

$$PF = \frac{P}{S} = \cos \varphi \quad (2.4)$$

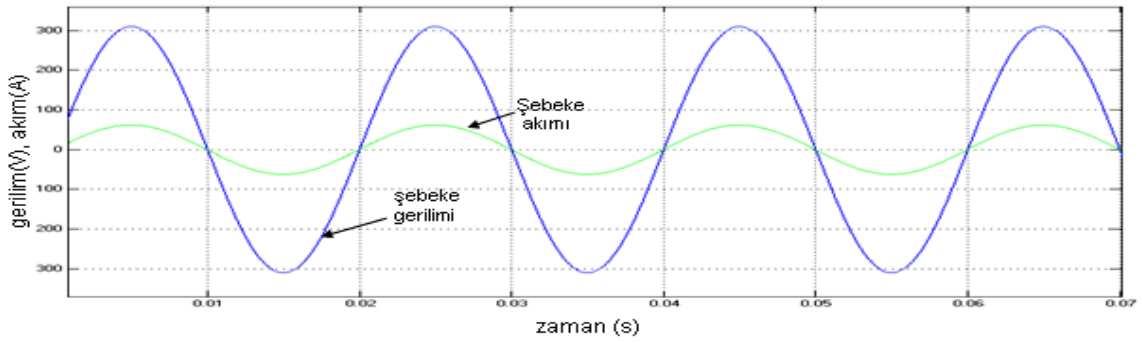
Endüktif bir yük için güç üçgeni Şekil 2.16'da verilmiştir.



Şekil 2.16 Güç üçgeni

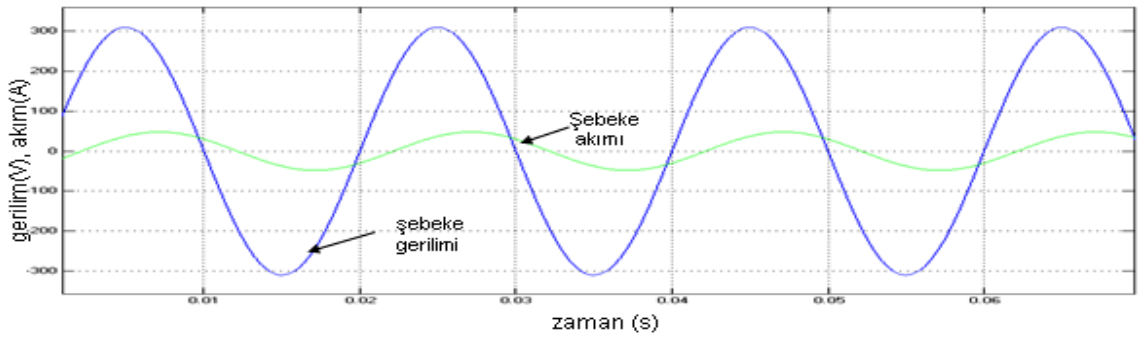
Özellikle sanayide kullanılan enerjinin yüksek güç faktörlü olması istenmektedir. Çünkü düşük güç faktörü şebekeye aşırı yük bindirmektedir. Bu yüzden enerji şirketi normalden fazla çekilen reaktif güç için bir takım cezalar uygulamaktadır. Bu yüzden güç faktörünün yüksek tutulması endüstriyel uygulamalarda kaçınılmaz hale gelmiştir.

Yüksek güç faktörü için; şebekeden çekilen akımın şebeke gerilimi ile aynı dalga şekli, frekans ve faza sahip olması gerekmektedir. Elektronik bir devre lineer özellikte ise saf direnç gibi davranır ve güç faktörü 1 olur. Dirençler şebekeden sadece aktif güç (P) çekerler. Şekil 2.17’de direnç yükünün şebeke gerilimi ve şebekeden çektiği akım verilmiştir. Endüktif veya kapasitif özellikteki yükler ise lineer değildir ve güç faktörü 1’den küçüktür[13].



Şekil 2.17 Saf direncin bağlandığı şebeke gerilimi ve şebekeden çektiği akım

Şekil 2.18’de ise endüktif bir devrenin şebeke gerilimi ve akımı verilmiştir. Şekil P.3’ten de görüldüğü gibi şebeke akımı ve şebeke gerilimi aynı fazda değildir. Dalga şekli sinüs olmasına rağmen fazı kayık olduğu için güç faktörü 1’den küçüktür



Şekil 2.18 Endüktif yükün bağlandığı şebeke gerilimi ve şebekeden çektiği akım

Kontrolsüz AC/DC dönüşümü yapan doğrultucular da düşük güç faktörüne sahiptir ve güç faktörü yaklaşık 0.5 ile 0.7 arasındadır. Bu doğrultucuların şebekeden çektiği akımdaki harmonikler şebeke akımının sinüs olmasını engeller. Sinüs olmayan akımın güç faktörü düşüktür ve aşağıdaki gibi hesaplanır[15].

$$P = V_{rms} \cdot I_{rms1} \cdot \cos \varphi \quad (2.5)$$

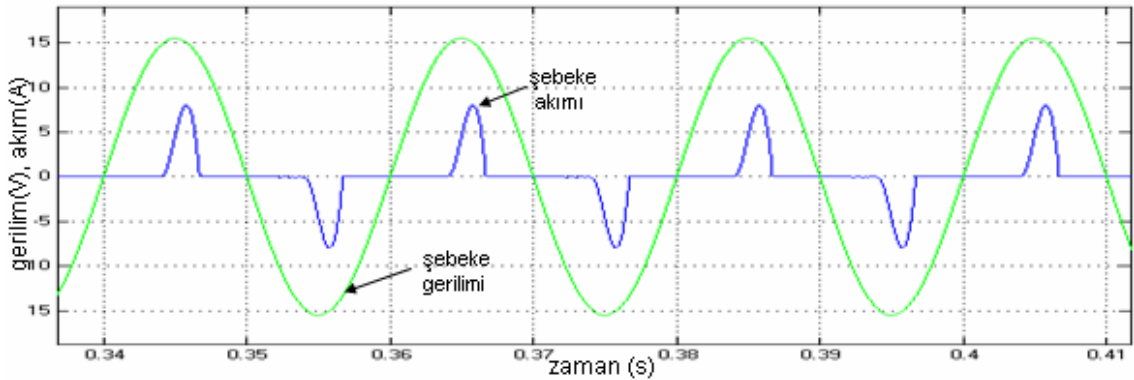
$$PF = \frac{P}{S} = \frac{V_{rms} \cdot I_{rms1}}{V_{rms} \cdot I_{rms}} \cdot \cos \varphi = \frac{I_{rms1}}{I_{rms}} \cdot \cos \varphi \quad (2.6)$$

V_{rms} = giriş AC şebeke geriliminin efektif değeri

I_{rms} = giriş AC şebeke akımı

I_{rms1} = giriş AC gerilimin temel bileşeni

Şekil 2.19'da kontrolsüz bir doğrultucunun şebekeden çektiği akım ve şebeke gerilimi verilmiştir. Görüldüğü gibi şebeke akımı ile şebeke gerilimi aynı fazda olsa da akımın şekli sinüs olmadığı ve harmonik bileşen içerdiği için güç faktörü düşüktür([10],[13]).



Şekil 2.19 Kontrolsüz doğrultucunun bağlandığı şebeke gerilimi ve şebekeden çektiği akım

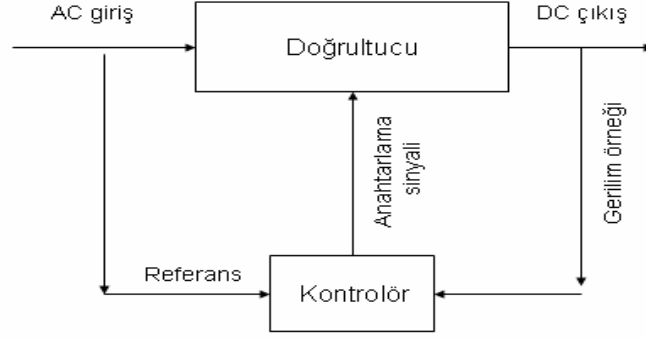
Düşük güç faktörünü düzeltmek için çeşitli yöntemler uygulanmaktadır. Şekil 2.18'deki dalga şekline sahip endüktif bir sistemin girişine aynı değerde bir kapasite bağlanarak faz kayması engellenir. Güç faktörü düzeltilmiş olur. Endüstride kullanılan kompanzasyon panoları bu işi yapmaktadır. Şekil 2.19'da verilen dalga şekline sahip kontrolsüz doğrultucuların güç faktörünü düzeltmek zordur ve şebekeyi de en çok etkileyen sorun budur. Kompanzasyon panolarının düzeltilmediği bu sorun kaynağında düzeltilmeye çalışılır. Böyle darbeli bir akım çeken

doğrultucu devresinin girişine bir aktif filtre takılarak güç faktörü yükseltilir. Bu aktif filtre şebekeden toplam çekilen akımın sinüs olmasını sağlayacak şekilde doğrultucunun çektiği akımın tersini çekmektedir[18]. Bu yöntem pahalı ve uygulaması zor bir yöntemdir. Son yıllardaki çalışmalarda ise güç faktörü düzeltmeli yani şebekeden gerilim ile aynı fazda sinüs akım çeken kontrollü doğrultucular tasarlanmaya başlamıştır. Bu tür doğrultucularda bulunan indüktans üzerinden geçen akımla referans olarak üretilen akımın dalga şekli karşılaştırılarak hem ayarlı DC çıkış hem de şebekeden sinüsoidal akım çekme işlemi gerçekleştirilmiş olur. Bu tür doğrultucuların güç faktörü bire çok yakın 0.95'ten büyüktür.

3. GÜÇ FAKTÖRÜ DÜZELTMELİ DOĞRULTUCULAR

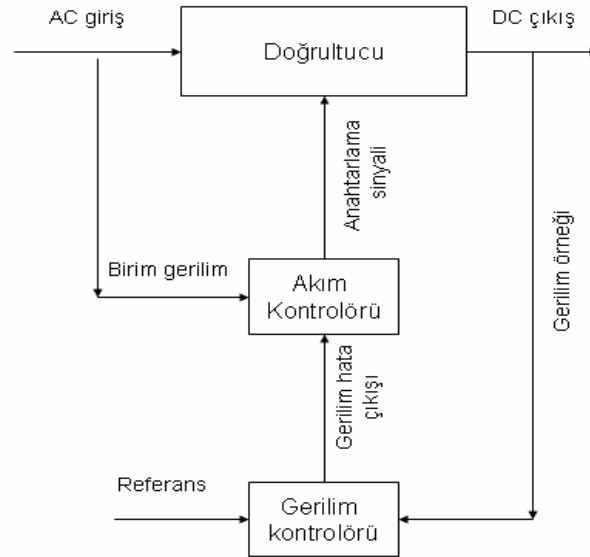
Teknolojinin gelişmesi ile son yıllarda elektronik cihazların kullanım oranı hızla artmıştır. Bu cihazların büyük bir bölümü de doğru akım kullanacak şekilde tasarlanmıştır. Şebeke tarafında alternatif gerilim (AC) olduğu için bu gerilimin doğrultulması gerekmektedir. AC/DC dönüşümü yapan dönüştürücülere doğrultucu denir. Klasik kontrolsüz doğrultucuların çektikleri yüksek değerdeki pik akımları ve şebekeye geri verdikleri harmonik akımları sebebiyle güç faktörü düşmektedir[6]. Kontrolsüz diyot doğrultucuların yüksek değerde harmonik akım içermesi ve düşük güç katsayısına sahip olmaları yüksek güç gerektiren uygulamalarda kullanılamamaktadır. Yüksek güç uygulamalarında harmonikler cihazlarda ısınmaya yol açmakta ve iletim hatlarının gereğinden fazla yüklenmesine sebep olmaktadır. Ayrıca şebekeye geri verilen bu harmonikler diğer uç kullanıcılarını da olumsuz bir şekilde etkilemektedir[14]. Bir doğrultucunun şebekeye olan olumsuz etkisini şebeke tolare edebilir. Buna karşın büyük iş merkezleri, üniversiteler, büyük apartmanlar vb. yerlerde bulunan yüzlerce bilgisayar ve buna benzer cihazlarda bulunan doğrultucular şebekeyi önemli ölçüde etkilemektedir. Ayrıca şebekeden düşük güç faktörlü enerji çekmek; hat kapasitelerinin verimsiz kullanılmasına ve sınırı aşması durumunda enerji faturalarının cezalı ödenmesine yol açmaktadır. Bu sorunun önlenmesi için çeşitli yöntemler uygulanmaktadır. Kompanzasyon panoları, aktif filtre kullanımı gibi yöntemler harmonik problemlerini çözmektedir. Kompanzasyon sırasında kondansatörleri reaktif güç ihtiyacına göre devreye sokup çıkartan kontaktörler sık sık arızalanmaktadır. Aktif filtrenin tasarımı zor ve yüksek maliyetlidir. Son yıllarda yapılan çalışmalarda kontrollü doğrultuculara uygun kontrol teknikleri uygulanarak harmoniksiz ve yüksek güç faktörü ile çalışması sağlanmıştır[2]. Bu tip doğrultuculara güç faktörü düzeltmeli doğrultucular veya şebekeden sinüzoidal akım çeken doğrultucular denilmektedir.

Güç faktörü ideal olarak 1 olmalıdır. Doğrultucularda istenen özellik güç faktörünün 1'e çok yakın olabilmesidir. Yani diğer bir deyişle doğrultucuların şebekeden çektiği akımın dalga şeklinin ideal sinüse çok yakın ve şebeke gerilimi ile aynı fazda olması istenilmektedir. Kontrollü doğrultucular DC çıkış gerilim değerini değişen yüklerde sabit tutacak şekilde ayarlayabilmektedir. Bu ayarlama devrede kullanılan anahtarlama elemanının görev periyodu değiştirilerek yapılmaktadır.



Şekil 3.1 Kontrollü doğrultucu blok diyagramı

Aynı zamanda kontrollü doğrultucu çıkıştaki DC gerilim değerini istenilen seviyeye ayarlayabilmektedir. Bu ayarlama anahtarlama elemanının görev periyodu arttırılarak veya azaltılarak yapılmaktadır. Kontrollü doğrultucular Şekil 3.1'deki gibi kapalı çevrim kontrol yöntemine sahiptir. Çıkış gerilim kontrolü için çıkıştan gerilim örneği alınır, referans olarak girilen çıkış gerilimi ile karşılaştırılarak hata sinyali oluşturulur. Bu hata sinyali kontrolörde işlenerek anahtarlama elemanı için gerekli anahtarlama sinyali oluşturulur[6]. Bu kontrollü doğrultucu doğru şekilde anahtarlalmaz ise şebekeden çekilen akım sinüsten uzaklaşır ve oldukça harmonik bileşen içeren bir akım meydana getirir.



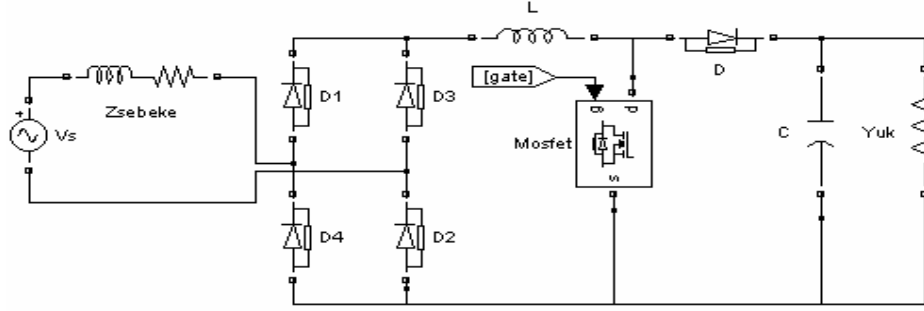
Şekil 3.2 Güç faktörü düzeltmeli doğrultucuların temel blok diyagramı

Güç faktörü düzeltmeli doğrultucuların temel blok diyagramı Şekil 3.2’de verilmiştir. Doğrultucunun çıkış gerilim kontrolü bir gerilim kontrolörü ile yapılmaktadır. Şebekeden sinüs akım çekilmesini sağlayan kontrol ise bir akım kontrolörü ile yapılmaktadır. Akım kontrolörü gerilim kontrolörüne göre daha hızlı tepki vermelidir çünkü akım değişim zamanı gerilim değişim zamanına göre oldukça kısadır.

3.1 Bir Fazlı Güç Faktörü Düzeltmeli Yükseltici Tip Doğrultucu

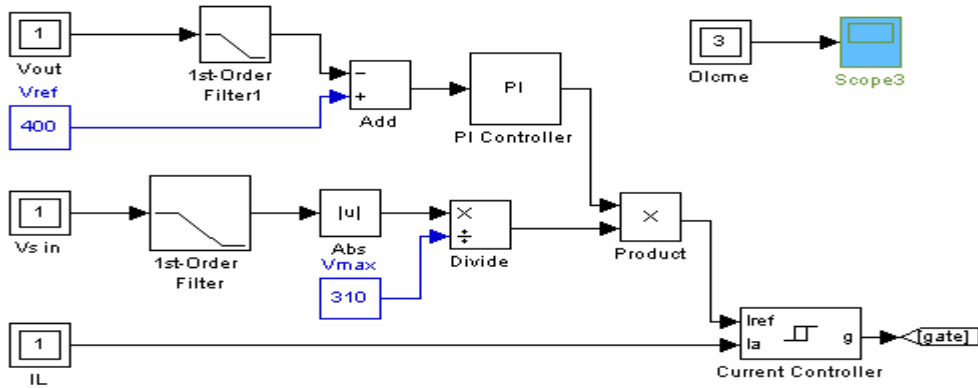
Kontrollü doğrultucular lineer bir sistem olmadıkları için doğru kontrol yöntemiyle kontrol edilmezlerse akımda istenmeyen harmonik bileşenler oluştururlar ve düşük güç faktörüyle verimsiz çalışırlar. Güç faktörü düzeltmeli doğrultucular şebekeden ideal sinüse çok yakın ve şebeke gerilimi ile aynı fazlı akım çekecek şekilde tasarlanmalıdırlar. Böylelikle maksimum güç transferi sağlanır ve doğrultunun boyutları küçültülebilir. Daha küçük bir boyutla aynı güç transferi sağlanabilir. Güç faktörü düzeltmeli doğrultucuların tasarımı her türlü yük değişimini hızlı bir şekilde tolare edebilmelidir.

Güç faktörü düzeltmeli doğrultucuların temel devresi Şekil 3.3’te bir fazlı yükseltici tip doğrultucudur. Doğrultucu tasarımında bir simülasyon programı olan Matlab/Simulink kullanılmıştır. Matlab/Simulink’in tercih edilme sebebi zengin kütüphanelere ve hazır devre elemanlarının ve kontrolörlerin matematiksel modellerine sahip olmasıdır. Güç faktörü düzeltmeli doğrultucular genelde aynı kontrol mantığına sahiptir. Bu doğrultucular temelde sürekli mod indüktans akımlı ve kesikli mod indüktans akımlı olarak ikiye ayrılmaktadır. Yükseltici tip doğrultucularda sürekli mod indüktans akımı, düşürücü tip doğrultucularda kesikli mod indüktans akımı vardır[10]. Sürekli mod çalışmada indüktanstan geçen akım anahtarlama yapılmadığı anda bile sifıra düşmemektedir. Kesikli mod çalışmada ise indüktanstan geçen akım anahtarlama yapılmadığı anlarda sifıra düşmektedir. Kesikli mod indüktans akımlı çalışmada şebekeden çekilen indüktanstan geçen akımdaki bozulma miktarı daha fazla olmaktadır. Bunun sonucunda şebekeden çekilen akımdaki toplam harmonik oranı (THD) artmaktadır. Bu harmonik bozulmanın önüne geçebilmek için yüksek değerli indüktans kullanmak gerekmektedir, bu yüzden sürekli mod indüktans akımlı olan yükseltici tip doğrultucular tercih edilmektedir[10].



Şekil 3.3 Bir fazlı yükseltici tip doğrultucu

Devredeki köprü diyotlar şebekeyi temsil eden 50Hz frekanslı 220Vrms değerli sinüsoidal kaynak ve ona bağlı seri hat empedansı ile beslenmektedir. Anahtar olarak mosfet kullanılmıştır. Anahtar ON konumundayken L indüktansı enerji depolar, OFF konumundayken indüktans ve kapasitedeki enerji yükün üzerine boşalır. Şekil 3.4'teki kontrol devresi yük üstünden gerilim örneği alarak referans değerle karşılaştırır ve PI kontrolör çıkışı bir hata sinyali üretir. Kaynaktan alınan gerilim örneğinin mutlak değeri alınarak kaynak geriliminin pik değerine bölünerek birim sinüs sinyali elde edilir. Bu birim sinyalin alınma sebebi ise giriş gerilimi ile aynı fazda anahtarlama yapabilmektir. Çünkü giriş gerilimi ile akımın aynı fazda olması demek güç faktörünün 1'e yaklaşması demektir. Ayrıca bu birim sinyalin sinüs olması, şebekeden çekilen akımın da sinüs formunda olmasına yardımcı olmaktadır. Birim sinüs sinyali ile PI hata çıkışı çarpılarak referans akım değeri bulunur. Devredeki L indüktanstan geçen akımla referans akım histerezis kontrolöre verilir. Histerezis kontrolör çıkışı mosfete gerekli olan anahtarlama sinyalini göndermektedir.



Şekil 3.4 Bir fazlı yükseltici tip doğrultucu kontrol devresi blok diyagramı

Kaynak gerilimi $v_s(t) = v_m \sin \omega t$

Doğrultulmuş hat gerilimi $v_d(t) = |v_s(t)| = v_m \sin \omega t$

Birim giriş voltaj değeri $u(t) = \frac{v_s(t)}{v_m}$

Boost devreye uygulanan $u(t) = \frac{|v_s(t)|}{v_m}$

Anahtar üzerindeki gerilim $= v_p$

$$\frac{d}{dt} i_L = \frac{(v_d - v_p)}{L_s} - r \frac{i_L}{L_s} \quad (3.1)$$

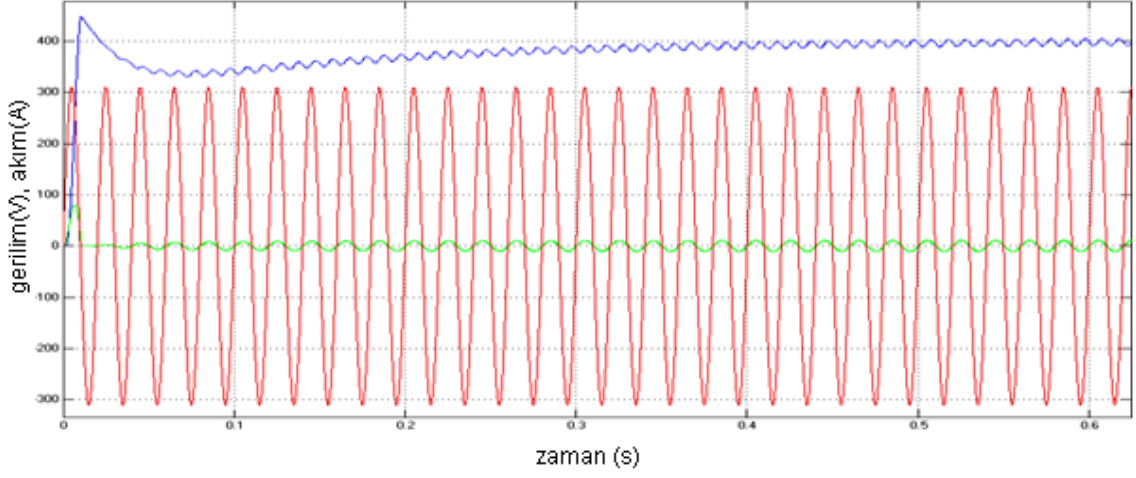
$$\frac{d}{dt} v_{dc} = (i_p - v_{dc}/R)/C_d \quad (3.2)$$

$$v_p = v_{dc}(1-d) \quad (3.3)$$

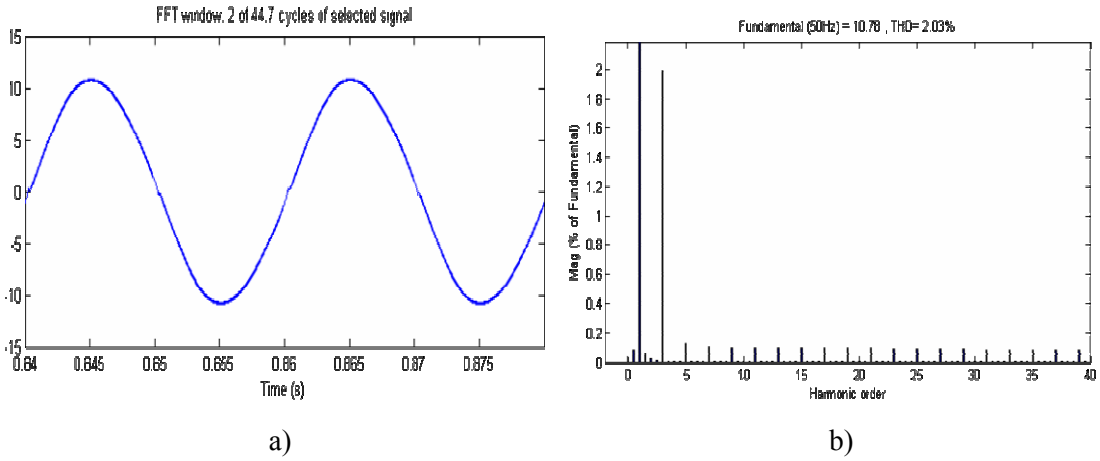
$$i_p = i_L(1-d) \quad (3.4)$$

d=1 "ON" d=0 "OFF"

Bir fazlı yükseltici tip doğrultucunun denklemleri yukarıda verilmiştir[4].Devrede yük olarak omik yük kullanılmıştır. Çıkıştaki gerilim dalgalanmasını azaltmak için yüke paralel kapasite kullanılmıştır[3]. Devredeki elemanların değerleri daha önce bu konuyla ilgili yapılan çalışmalar ve piyasada kullanılan doğrultucular incelenerek makul değerlerde seçilmiştir. Devredeki parametreler; $v_s = 220\text{Vrms}$, Z hat olarak $R \approx 0\Omega$ $L = 1\text{mH}$, DC taraf indüktansı $L = 20\text{mH}$, $C = 1000\mu\text{F}$ ve $\text{Yük} = 100 \Omega$ olarak seçilmiştir. PI kontrolörün parametreleri ise $K_p = 0.07$ $K_i = 0.7$ 'dir. PI kontrolörün parametreleri Matlab/Simulink programının getirdiği kolaylıkla deneme yanılma metodu ile ayarlanmıştır. Devre yükseltici tip doğrultucu olduğu için referans gerilim 310V'tan büyük verilmiştir(Giriş geriliminin pik değeri 310V değerindedir). Bu çalışmada doğrultucuya 400V referans gerilimi verilmiştir. Şekil 3.5'te DC çıkış geriliminin 0V'dan 400 V değerine ulaşması ve şebekeden çekilen akım ve şebeke gerilimi görülmektedir.

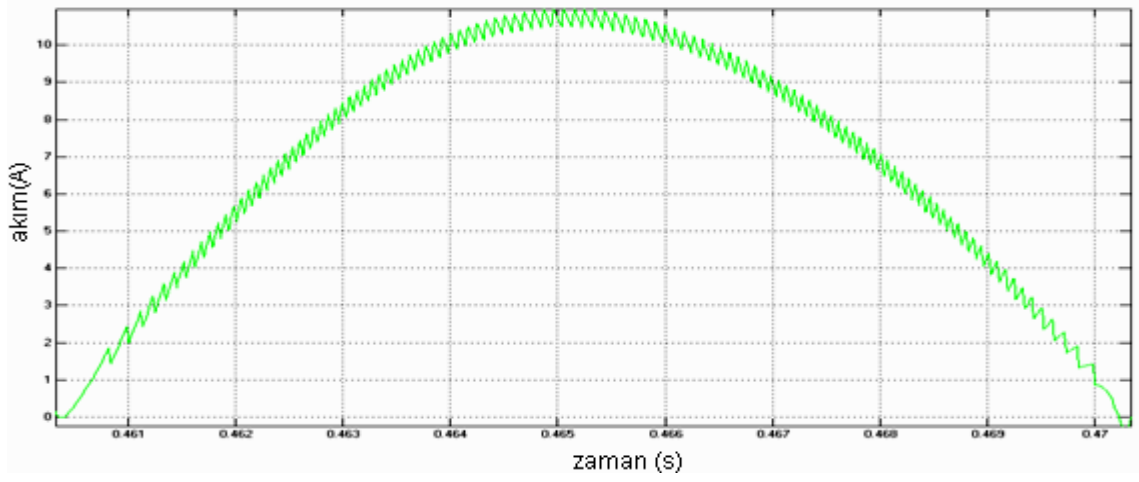


Şekil 3.5 Referans verilen 400V değerine ulaşırken DC çıkış gerilimi, şebeke akımı, şebeke gerilimi



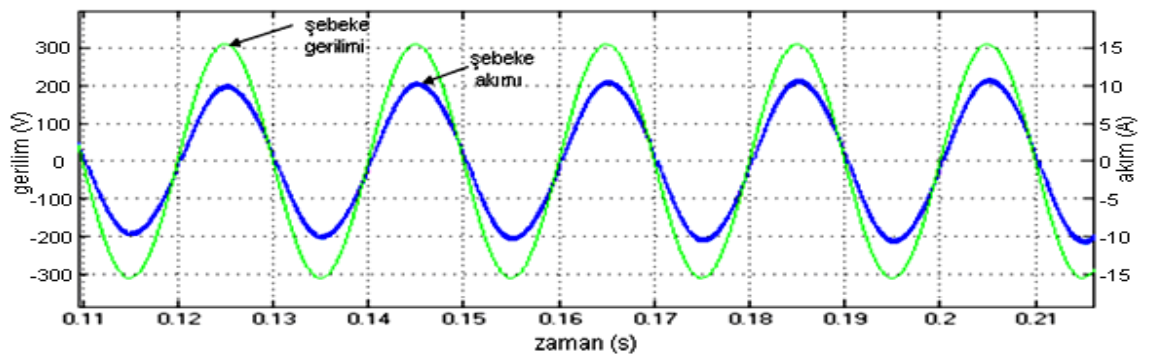
Şekil 3.6 a) Şebekeden çekilen akım, b) Harmonik bileşenler ve THD

Doğrultucuya 400V referans gerilim verilmesi durumunda çıkış geriliminin 0.8s'de 400V değerine oturduğu görülmüştür. Çıkış gerilimi 400V'ta sabit kalmış kalıcı hal hatası oluşmamıştır. Şekil 3.6.a'da şebekeden çekilen akımın şekli ideal sinüse çok yakın olduğu görülmektedir. Şekil 3.6.b'de ise şebekeden çekilen akımın harmonik bileşenleri görülmektedir. Ayrıca şebeke akımındaki toplam harmonik bozulma (THD) %2.03 gibi makul bir değerde ölçülmüştür. Akımdaki THD önemli bir parametredir ve belirli standartları vardır. Bu standartlar EN 61000-3-2, IEEE 519-1992 ve IEC 1000 standartlarıdır.



Şekil 3.7 Şebekeden çekilen akımın yarım periyodu

Şekil 3.7'de şebekeden çekilen akımın yarım periyodu görülmektedir. Şebeke akımı birim sinüsü takip eden inişli çıkışlı bir yol izlemektedir. Bu iniş çıkışların taradığı bant genişliği histerezis kontrolör tarafından ayarlanabilmektedir. Bu genişlik histerezis kontrolör yardımıyla daraltılıp genişletilebilir. İstenildiği takdirde bu değer daha da daraltılırsa ideal sinüs dalga şekline yaklaşabiliriz. Ama simülasyon ortamında bu değer istenildiği kadar azaltılabilsede pratikte uygun değildir. Çünkü sürücü devre hızları belli değerleri aşamayabilir. Yani bu bant daraldıkça onu kontrol eden mikro denetleyicinin saat hızının yükselmesi gerekmektedir. Doğrultucuda bu bant genişliği 0.25A olacak şekilde ayarlanmıştır. Yüksek güçlü uygulamalar için bu değer gayet uygundur[5].

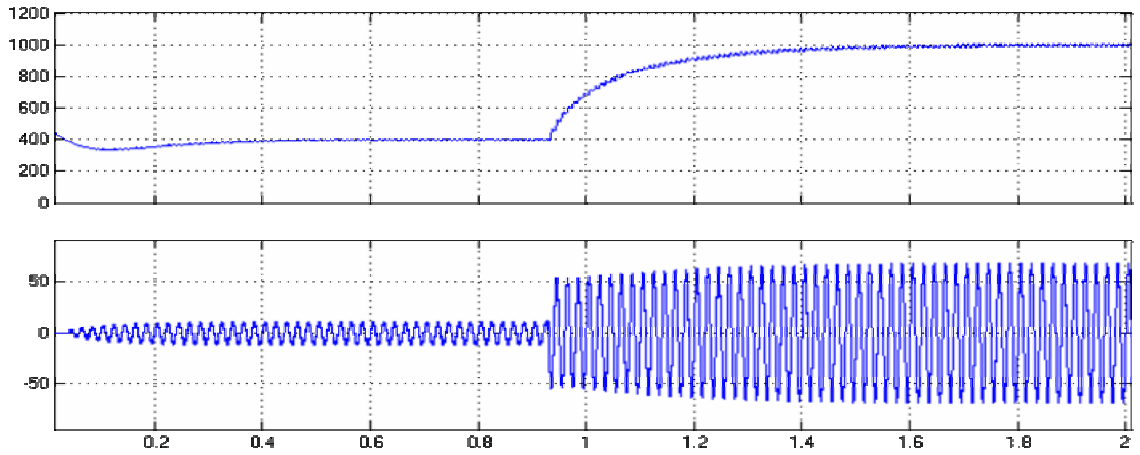


Şekil 3.8 Şebekeden çekilen akım ve şebeke gerilimi

Yüksek güç faktörü şebekeden çekilen akım ile şebeke geriliminin yaklaşık olarak aynı fazda olması ile mümkün olmaktadır. Güç faktörü yüksek olunca doğrultucuda maksimum güç transferi gerçekleşir. Kontrolsüz doğrultucularda 0.65 civarında olan güç faktörü şebekeden sinüsoidal akım çeken doğrultucularda 0.95'ten büyüktür. Şekil 3.8'de şebekeden çekilen akım ve şebeke gerilimi verilmiştir. Şekil 3.8'den de anlaşılacağı gibi gerilim ile akımın faz farkı çok küçüktür. Doğrultucunun güç faktörü 0.96 ile 0.99 arasındadır. Bu değer doğrultucu için gayet makul bir değerdir([3],[12]).

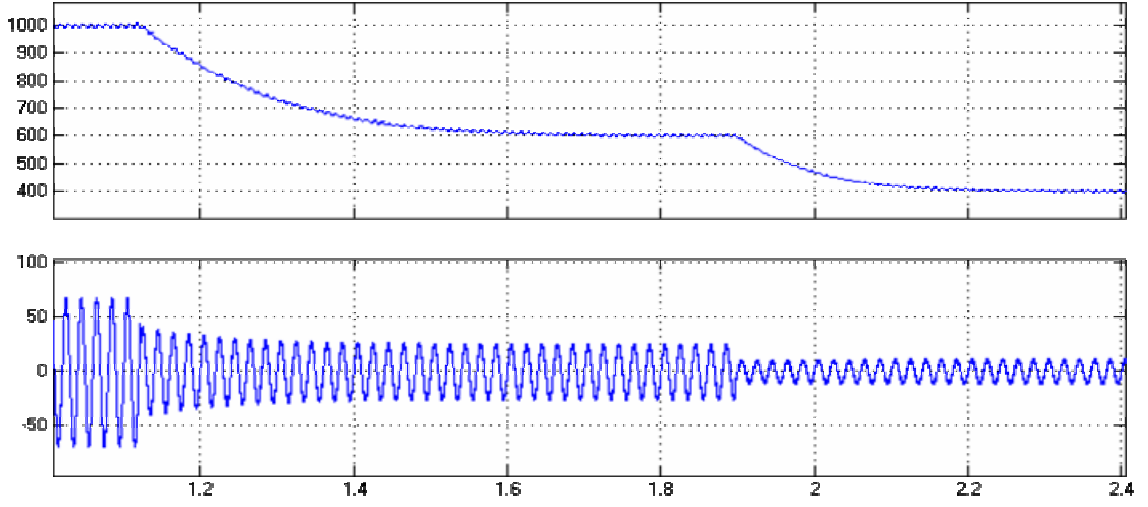
3.1.1 Referans Değişimlerine Sistemin Verdiği Tepki

DC çıkış geriliminin girilen referans gerilim değerine nasıl ulaştığını PI kontrolör belirlemektedir. PI kontrolörün parametrelerini doğru ayarlamak gerekmektedir. Parametreler deneme yanılma metodu ile belirlendikten sonra en iyi değerler girilmiş, Şekil 3.9'daki referans gerilim değişimlerine göre DC çıkış gerilim eğrisi elde edilmiştir. 0V'dan 400V'a çıkış ve devamında 400'den 1000V'a çıkış uygulaması yapılmış, buna göre DC çıkış gerilim eğrisi Şekil 3.9'daki gibi elde edilmiştir.



Şekil 3.9 DC çıkış gerilimi(0V-400V, 400V-1000V)

İkinci bir uygulama olarak 1000V referans gerilim değerinden 600V değerine, 600V referans gerilim değerinden de 400V değerine düşme tepkisi Şekil 3.10'da verilen DC çıkış geriliminde görülmektedir.

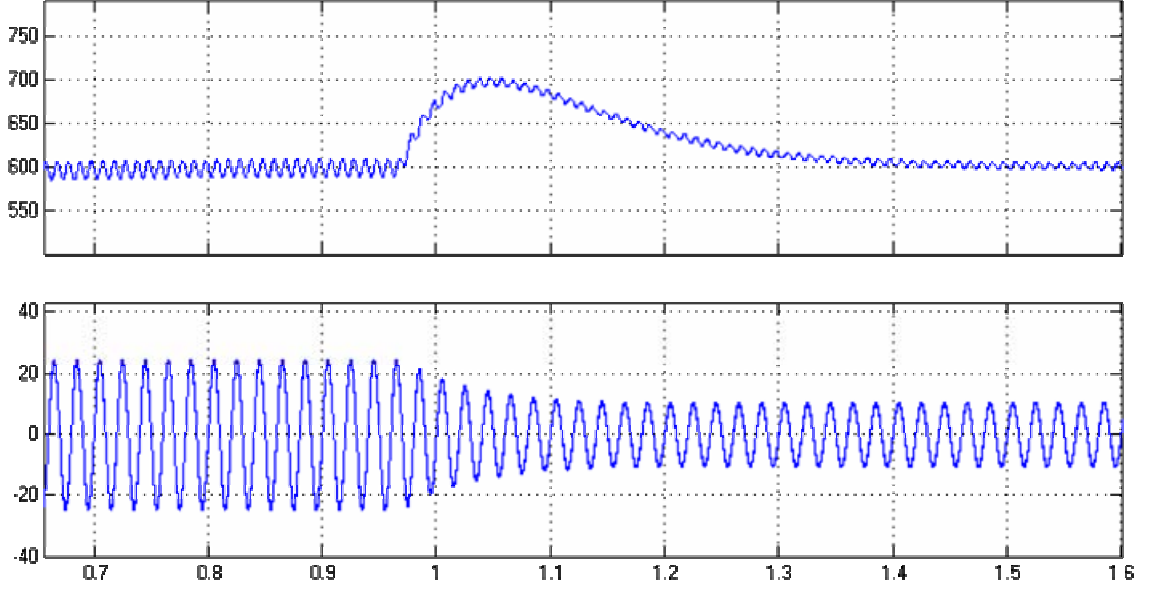


Şekil 3.10 Çıkış gerilimi(1000V-600V,600V-400V)

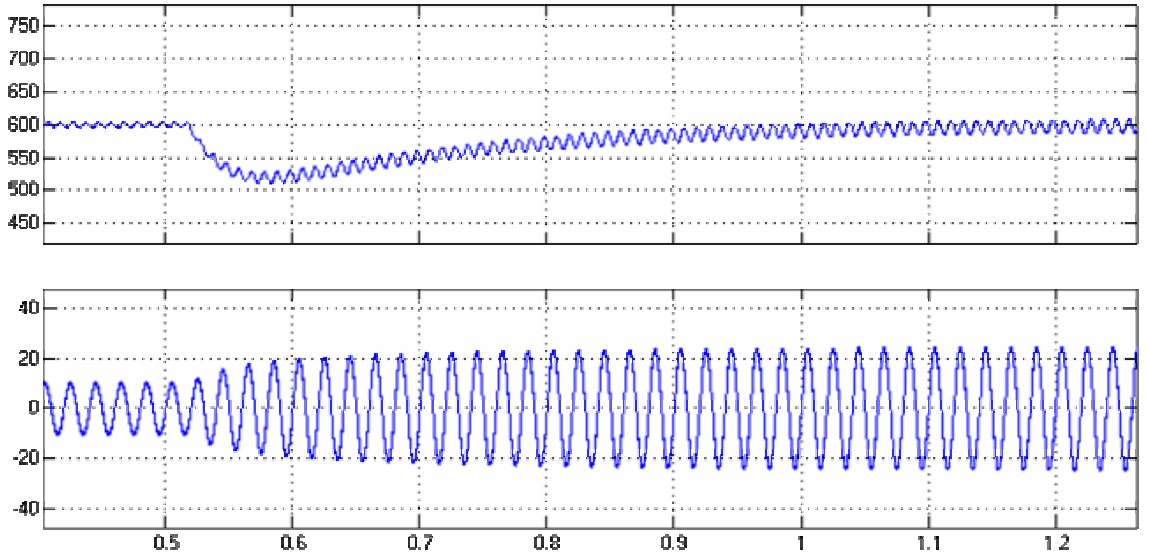
Bir fazlı yükseltici tip doğrultucu devresi tek yönlü enerji transferine izin verdiği için düşme sırasında şebekeye geri enerji verilememektedir. Ayrıca düşme sırasında şebekeden akım çekilmemekte, fazla enerji yük üzerinde tüketilmektedir. Tüketilme süresi düşme tepkisini etkilemektedir. 0V'tan 1000V'a çıkış süresi iniş süresinden daha kısadır.

3.1.2 Yük değişimlerine sistemin verdiği tepki

KontROLSÜZ doğrultucularda DC çıkış gerilim kontrolü yapılamamaktadır. Doğrultucu sabit yükte belirli bir DC çıkış gerilimi verecek şekilde ayarlanır. Fakat yük değişimlerinde DC çıkış gerilimi kalıcı olacak şekilde değişmektedir. Yük direnci azaldıkça çıkış gerilimi düşmekte, arttıkça belirli bir miktar artmaktadır. Mikroişlemcili sistemler, bilgisayarlar, tıbbi ölçüm cihazları gibi hassas uygulamalarda bu gerilim değişimleri istenmeyen sonuçlar doğurabilir. Bu yüzden bu tip uygulamalarda kontrollü doğrultucular seçilir. Kontrollü doğrultuculardan da yük değişse bile çıkış geriliminin ayarlanan değere geri dönmesi istenir. Kontrollü doğrultucular çıkıştan gerilim örneği alır, referans gerilim değeri ile karşılaştırır ve hata sinyaline göre anahtarlama görev periyodunu değiştirir. Böylece DC çıkış gerilim regülasyonu yapılmış olur. 600V referans gerilim altında yükün 100Ω 'dan 500Ω 'a değiştirilmesi durumunda ve 500Ω 'dan 100Ω 'a değiştirilmesi durumunda DC çıkış geriliminin değişimi Şekil 3.11'de görülmektedir.



a) Yükün 100Ω 'dan 250Ω 'a değiştirilmesi

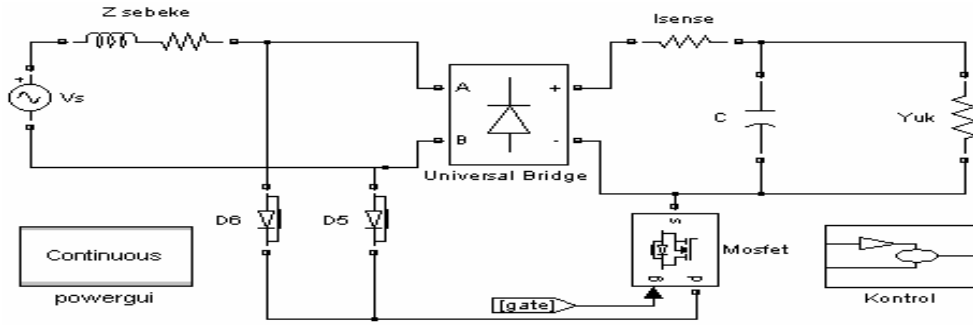


b) Yükün 250Ω 'dan 100Ω 'a değiştirilmesi

Şekil 3.11 Yük değişimlerinde DC çıkış gerilimi

3.2 Modifiyeli Yükseltici Tip Doğrultucu

Bir fazlı yükseltici tip doğrultucunun verimi %95 civarında olmasına rağmen iletim kayıplarını daha da azaltabilmek için değişik tasarımlara gidilmiştir. Bu tasarımlardan biri de Şekil 3.12'deki modifiyeli yükseltici tip doğrultucudur. Güç aktarımı sırasında akımın geçtiği yollardaki yarı iletken elemanlar ne kadar azaltılabilirse iletim kayıplarını da o kadar azaltılabilir[9]. Şekil 3.12'deki bir fazlı yükseltici tip doğrultucudaki mosfetin iletimi durumunda üç adet yarı iletken elemanın üzerinden akım akar. Bunların iki tanesi köprü içinde bir tanesi ise yükseltici taraftaki diyottur. İletim kayıplarını azaltmak için Şekil 3.12'deki tasarım oluşturulmuştur[11]. Bu şekildeki doğrultucu da yükseltici olarak çalışmaktadır. Doğrultucu, girişindeki AC gerilimin pik değerinden daha büyük DC çıkış gerilimi üretmektedir.



Şekil 3.12 Modifiyeli yükseltici tip doğrultucu

Birinci durumda anahtar iletimde iken akım, $V_1 > 0$ olduğunda D6, mosfet, ve D4'ten geçer, $V_1 < 0$ olduğunda D5, mosfet, D3'ten geçer. İkinci durumda anahtar kesimde iken akımın geçtiği yolda sadece iki yarı iletken eleman vardır. $V_1 > 0$ iken D1 ve D4 üzerinden, $V_1 < 0$ iken D2 ve D3 üzerinden akım geçer. Doğrultucu gerilim eşitliği Eşitlik 3.5'te verilmiştir[11].

Kaynak gerilimi $v_s(t) = v_m \sin \omega t$

Doğrultulmuş hat gerilimi $v_d(t) = |v_s(t)| = |v_m \sin \omega t|$

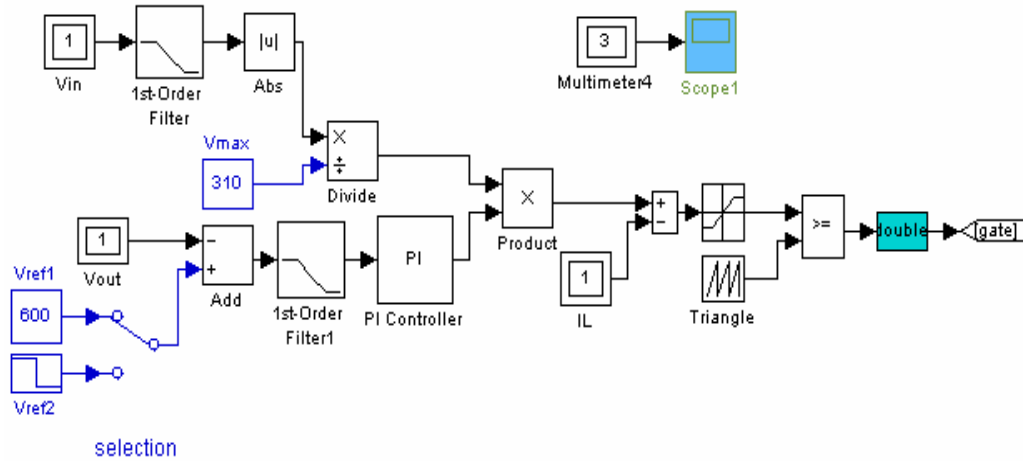
Birim giriş voltaj değeri $u(t) = \frac{v_s(t)}{v_m}$

Boost devreye uygulanan $u(t) = \frac{|v_s(t)|}{v_m}$

$$\frac{v_{yük}}{v_m |\sin \omega t|} = \frac{1}{1-d} \quad (3.5)$$

d=1 "ON" d=0 "OFF"

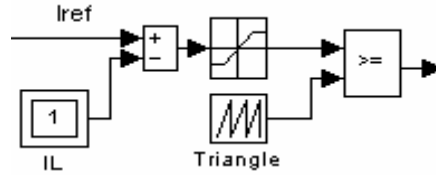
Bu tasarımda anahtarlama periyodu bir fazlı yükseltici tip doğrultucudan daha düşüktür. Bu yüzden anahtarlama kaybı daha düşüktür. Ayrıca anahtar kesimde iken sadece iki yarı iletken üzerinden akım aktığı için iletim kaybı klasik yükseltici tip doğrultucudan daha düşüktür. Şekil 3.12'ye dikkat edilirse yükseltici tip doğrultucunun DC tarafındaki tek diyot modifiyeli yükseltici tip doğrultucuda bulunmamaktadır.



Şekil 3.13 Modifiyeli yükseltici tip doğrultucu kontrol devresi blok diyagramı

Devredeki köprü diyotlar 50Hz frekanslı $220V_{rms}$ gerilimindeki şebekeden beslenmektedir. Anahtar olarak mosfet kullanılmıştır. Şekil 3.13'deki kontrol devresi yük üstünden gerilim örneği alarak referans olarak verilen gerilim değeriyle karşılaştırır ve PI kontrolör bir hata sinyali üretir. Kaynak gerilimi kendi pik değerine bölünerek kaynak frekanslı birim sinüs elde edilir. Bu birim sinüs sinyalin alınma sebebi ise giriş gerilimi ile aynı fazda

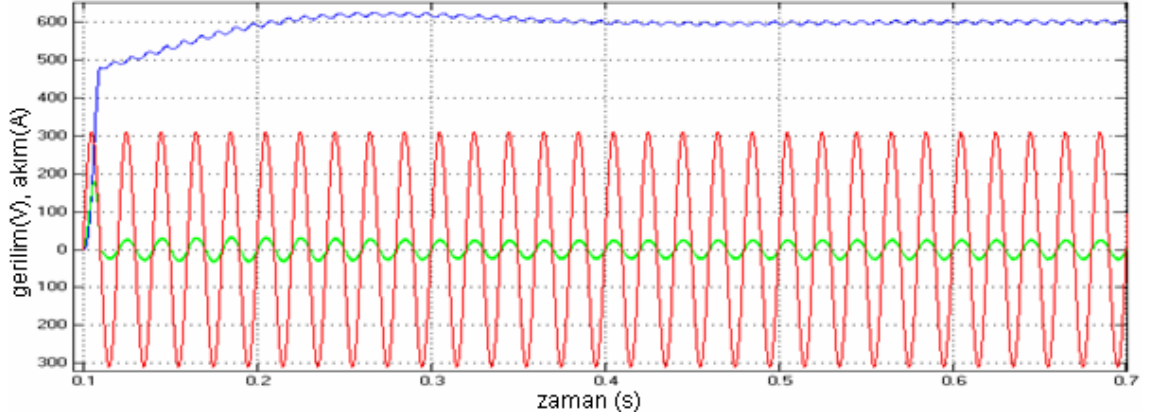
anahtarlama yapabilmektir. Birim sinüs sinyali ile PI kontrolör çıkışı çarpılarak referans akım değeri bulunur. Referans akım ile yükseltici taraftaki I sense direncinden geçen akımın farkı PWM (Pulse Width Modulation) kontrolöre verilir ve anahtarlama sinyali üretilir. Şekil 3.14'teki PWM kontrolörün avantajı ise sabit bir anahtarlama frekansı elde edebilmesidir. Bu sabit frekans, tasarım donanımsal olarak gerçekleştirilmek istenirse, büyük kolaylık sağlar. Gerçekleme aşamasında PWM sinyali mikrodenetleyiciler tarafından sağlandığı için sabit frekansla birlikte kullanımı uygulanabilirliği daha kolaydır. Yükseltici taraftaki i sense direncinin devreye elektriksel açıdan bir etkisi yoktur. Bu direnç o hattan geçen akımın ölçülebilmesi için konulmuştur.



Şekil 3.14 PWM kontrolör

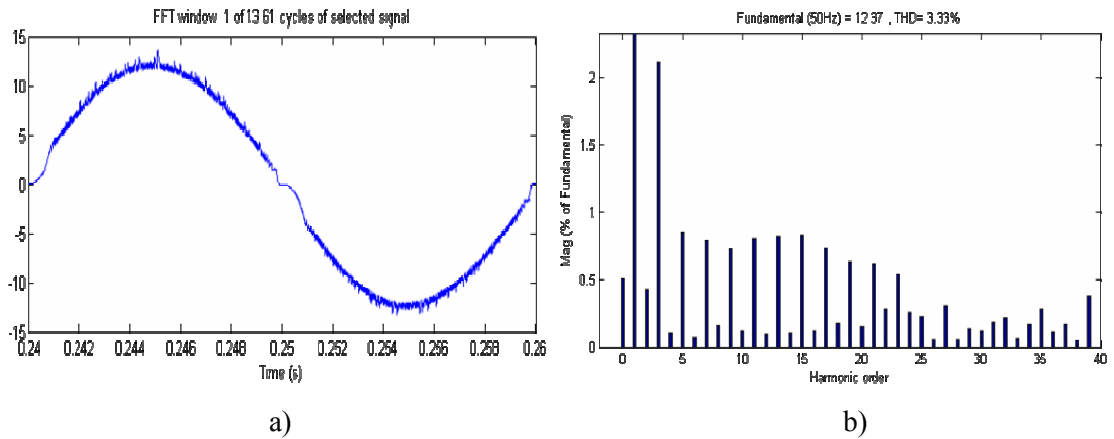
Modifiyeli yükseltici tip doğrultucudaki PWM anahtarlama frekansı bu konuda daha önce yapılan çalışmalar ve oluşan anahtarlama kayıpları göz önüne alınarak 50KHz seçilmiştir. Anahtarlama frekansı arttıkça şebekeden çekilen akımdaki pürüzler ortadan kalkmakta, ideal sinüse oldukça yaklaşılmaktadır. Aynı zamanda akımdaki THD ise giderek azalmaktadır. Frekans arttırmanın en önemli dezavantajı ise anahtarlama kayıplarının artmasıdır. Bu durumlar göz önüne alındığında anahtarlama frekansının 45KHz ile 100KHz arası seçilmesi daha uygundur[12]. Devrede yük olarak omik yük kullanılmıştır. DC çıkış gerilimindeki dalgalanmayı azaltmak için yüke paralel filtre kapasitörü bağlanmıştır.

Doğrultucu parametreleri olarak; $v_s = 220V_{rms}$, $Z_{hat} R \approx 0 \Omega$, $L = 3mH$, $C = 2000\mu F$, $i_{sense} = 1m\Omega$, $Yük = 100 \Omega$ ve PI parametreleri $K_p = 0.07$ $K_i = 3$ kullanılmıştır.



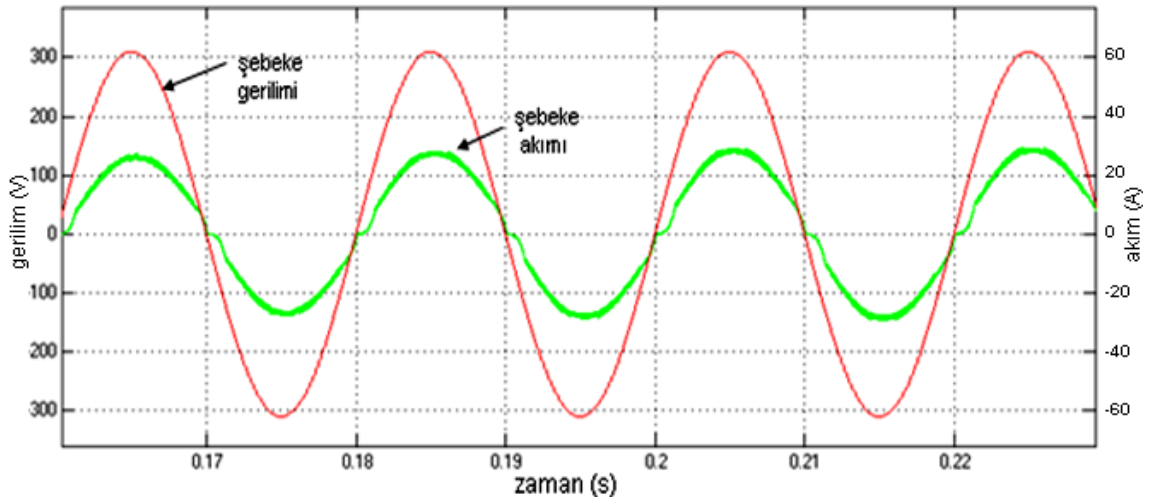
Şekil 3.15 Referans verilen 600V değerine ulaşırken çıkış gerilimi, şebeke akımı, şebeke gerilimi

PI kontrolörün parametreleri devreyi tamamen etkilemektedir. Bu parametreler Matlab/Simulink yardımıyla deneme yanılma metodu ile ayarlanmıştır. Her doğrultucu devresi birbirinden farklı karakterdedir ve PI parametreleri her doğrultucunun kendisine özgüdür. Bir doğrultucuda çalışan parametre diğerinde çalışmayabilir. Bir fazlı yükseltici tip doğrultucu ile karşılaştırıldığında Ki parametresinin aynı olmadığı görülmektedir. Bu çalışmada doğrultucuya referans olarak 600V verilmiştir. Şekil 3.15'te çıkış geriliminin 0V'dan 600V'a ulaşması, şebekeden çekilen akım ve şebeke gerilimi görülmektedir.



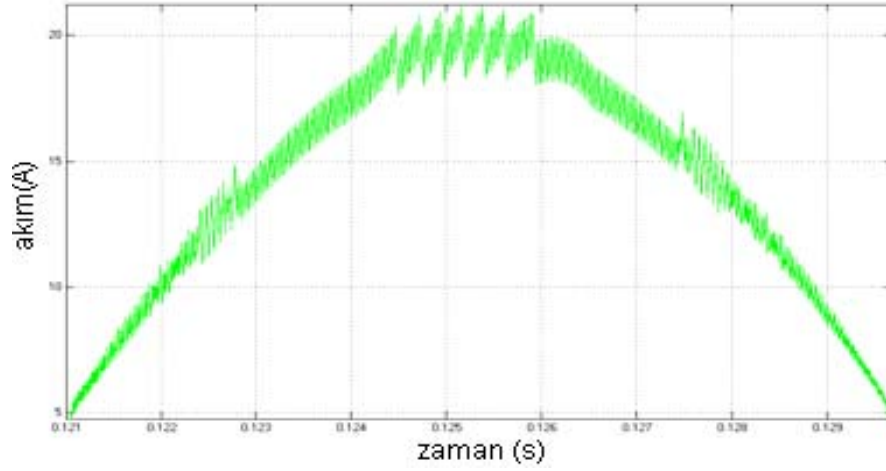
Şekil 3.16 a) Şebeke akımı b) Harmonik bileşenler ve THD

Çalışmada DC çıkış gerilimi 600V'ta sabit kalmış ve kalıcı hal hatası oluşmamıştır. Şekil 3.16.a'da şebekeden çekilen akım görülmektedir. Şebekeden çekilen akımın dalga şekli ideal sinüse çok yakındır. Ama belirli bir miktar harmonik içermektedir. Şekil 3.16.b'de akımın harmonik bileşenleri verilmiştir. Şebekeden çekilen akımdaki toplam harmonik bozulma (THD) %3.33 değerindedir. Bu değer EN 61000-3-2, IEEE 519-1992 ve IEC 1000 standartlarına uygundur ve standartlara göre akımdaki toplam harmonik bozulmanın %5'in altında tutulması gerekmektedir.



Şekil 3.17 Şebeke gerilimi ve şebeke akımı

Güç faktörü düzeltmeli doğrultucular şebeke akımını şebeke gerilimi ile aynı fazda tutmaya çalışırlar. Simülasyon sonucunda Şekil 3.17'de şebekeden çekilen akımın şebeke gerilimi ile yaklaşık aynı fazda olduğu görülmektedir. Doğrultucunun güç faktörü 0.95'ten büyüktür. Bu değer güç faktörü düzeltmeli bir doğrultucu için kabul edilebilir bir değerdir[5]. Örnek olarak kontrolsüz bir doğrultucu ile 500VA'lık bir kaynaktan 300W güç çekilebilirken güç faktörü düzeltmeli doğrultucuda 475W'lık güç çekilebilmektedir. Bu da yüksek güç faktörünün ne kadar önemli olduğunu kanıtlamaktadır.

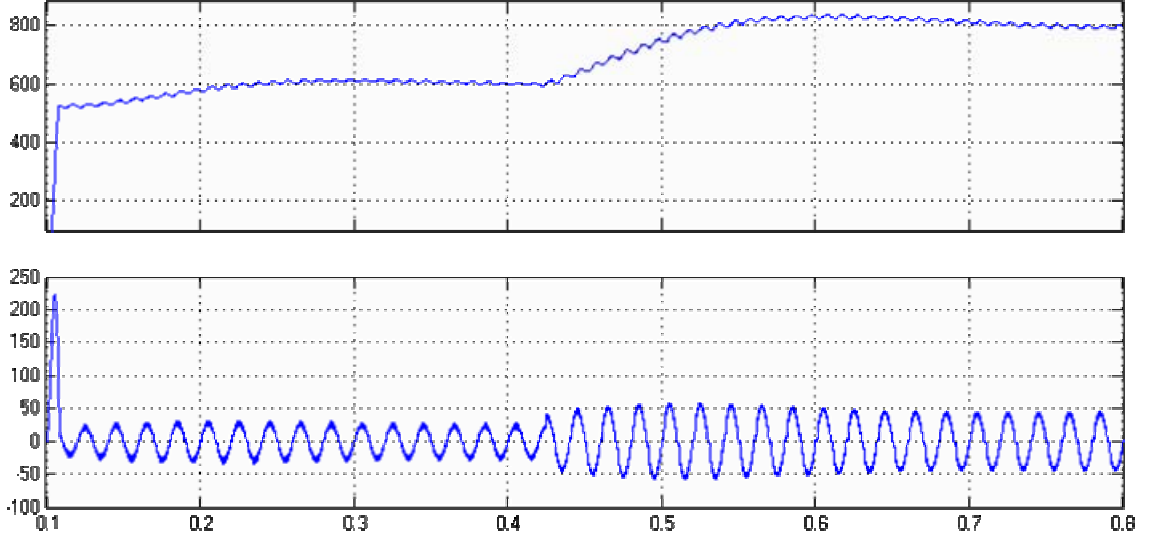


Şekil 3.18 Şebeke akımının yarım periyodu

Şekil 3.18'de şebekeden çekilen akımın yarım periyodu verilmiştir. PWM anahtarlama yapıldığı için akım sinüs eğrisini takip ederken anahtarlama frekansına bağlı olarak aşşağı ve yukarı dar bir bölgeyi taramaktadır. Anahtarlama frekansı arttıkça taranan bölge giderek çizgi halini alır. İniş çıkışların frekansı anahtarlama frekansı 50 KHz'e eşittir.

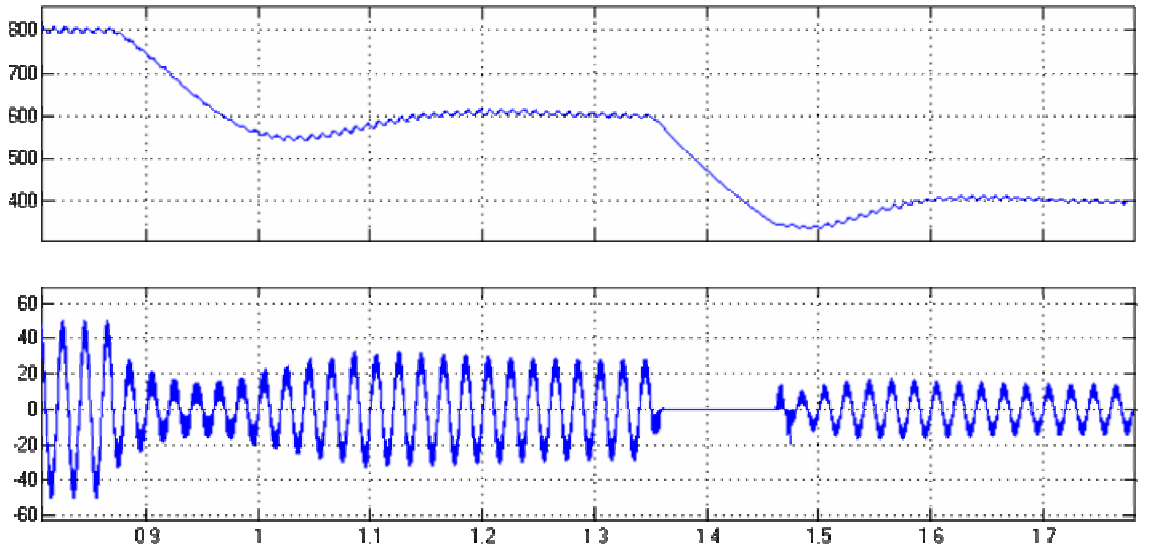
3.2.1 Referans Değişimlerine Sistemin Verdiği Tepki

Modifiyeli yükseltici tip doğrultucunun referans değişimlerine nasıl tepki verdiğini görmek için doğrultucu çalışırken referans olarak verilen gerilimler değiştirilmiştir. 0V'dan 600V'a çıkış ve devamında 600V'dan 800V'a çıkış deneyi yapılmıştır. Şekil 3.19'da DC çıkış geriliminin değiştirilen referanslara nasıl ulaştığı görülmektedir. PI kontrolörün Ki ve Kp parametreleri DC çıkış geriliminin ne kadar sürede referans olarak verilen değere ulaşacağını belirlemektedir. Parametreler yanlış ayarlanırsa referans gerilim civarında aşırı salınımlar oluşabilir veya referanstan uzak bir değerde sabit kalabilir.



Şekil 3.19 DC çıkış gerilimi (0V-600V, 600V-800V)

Bu uygulamanın devamında ise referans gerilimi 800V'tan 600V'a, 600V'tan da 400V'a düşürülmüştür. DC çıkış gerilimi 800V sabit gerilimden referans olarak verilen 600V'a düşerken 550V seviyelerine kadar inmiştir. PI kontrolör gerilim kontrolü yapmaktadır. Gerilim kontrolü her zaman akım kontrolüne göre daha yavaştır. Bu yüzden gerilim 550V'a kadar düşmüştür. Doğrultucu için bu kısa süreli gerilim düşümü herhangi bir sorun yaratmamaktadır.

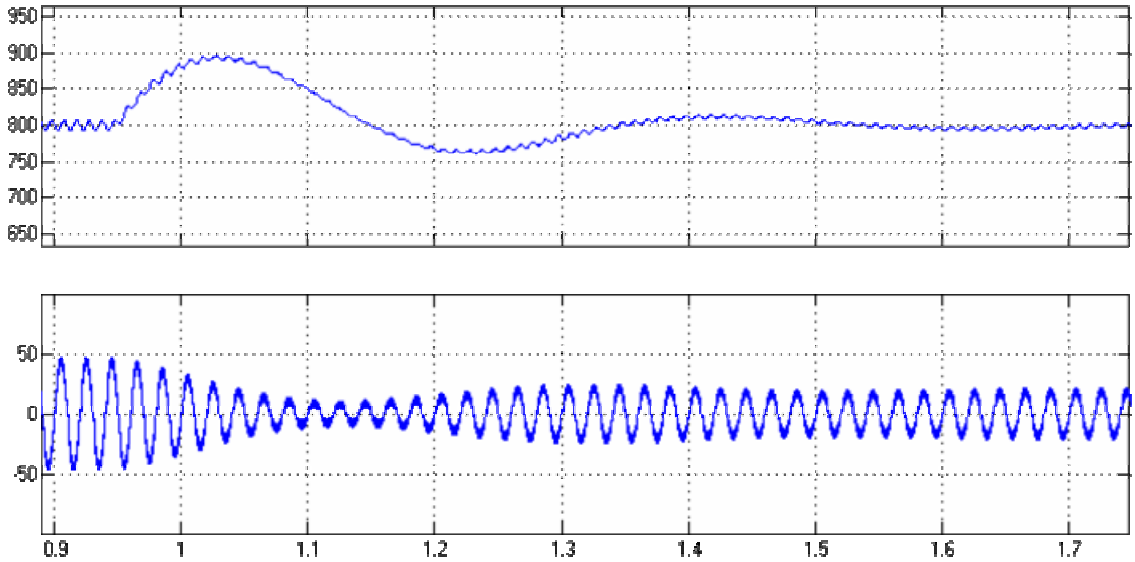


Şekil 3.20 DC çıkış gerilimi (800V-600V, 600V-400V)

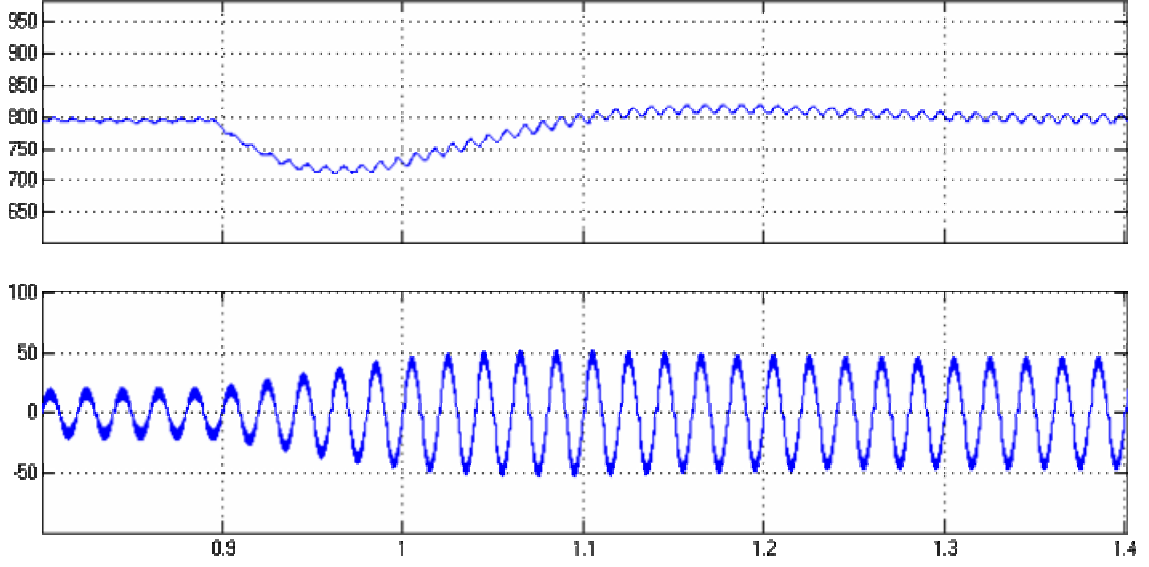
Modifiyeli yükseltici tip doğrultucu da bir fazlı yükseltici tip doğrultucu gibi tek yönlü enerji transferine izin vermektedir. Yük üstündeki gerilim düşerken şebekeye geri enerji verilememektedir. Bu yüzden referans gerilime düşme süresi biraz uzamaktadır. Şekil 3.20'de değişen referanslara karşı DC çıkış geriliminin değişimi verilmektedir.

3.2.2 Yük Değişimlerine Sistemin Verdiği Tepki

Kontrollü doğrultucular DC çıkış gerilimini girilen referans gerilim değerine göre ayarlayabilmektedir. Modifiyeli yükseltici tip doğrultucu yük üzerinden gerilim örneği alarak referans olarak verilen gerilim değeri ile karşılaştırmaktadır. Bu karşılaştırmayı ve kontrolü PI kontrolör yapmaktadır. DC çıkış gerilimi ani yük değişimlerine karşı duyarlıdır. Yük değiştiği anda şebekeden çekilen akım da değişmektedir. Bu sırada çıkış gerilimi de etkilenmektedir. Kontrolsüz doğrultucularda çıkış geriliminde kalıcı olabilen bu değişiklik kontrollü doğrultucularda geçicidir. Örnek çalışma olarak çıkış gerilimi 800V'ta sabit iken yük 100Ω'dan 250Ω'a daha sonra da 250Ω'dan 100Ω'a değiştirilmiştir. DC çıkış gerilim değişimi Şekil 3.21 ve Şekil 3.22'de görülmektedir. Şekil 3.21'de görüldüğü gibi yük üstündeki gerilim çok kısa bir süre artıp tekrar eski haline dönmüştür. Bu gerilim artışı 100V kadar olmuştur. Şekil 3.22'deki yük arttırma çalışmasında ise yaklaşık 80V'luk bir azalma olmuştur.



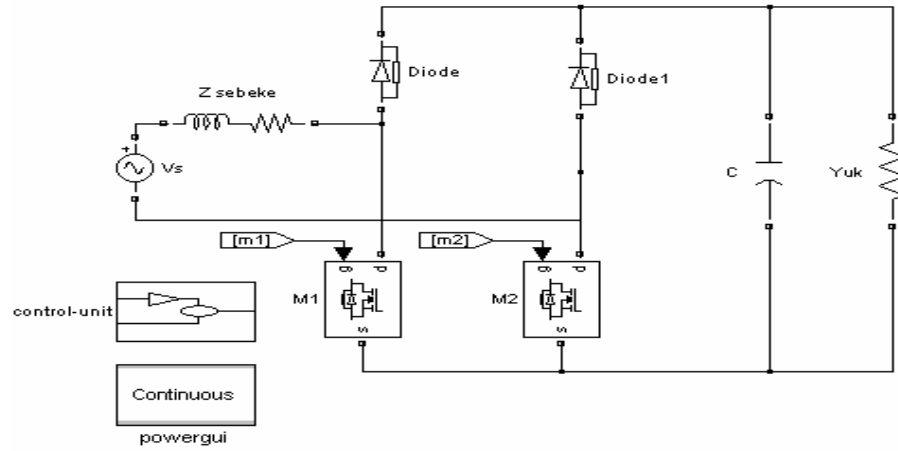
Şekil 3.21 Yükün 100Ω'dan 250Ω'a değiştirilmesi sırasında DC çıkış gerilimi



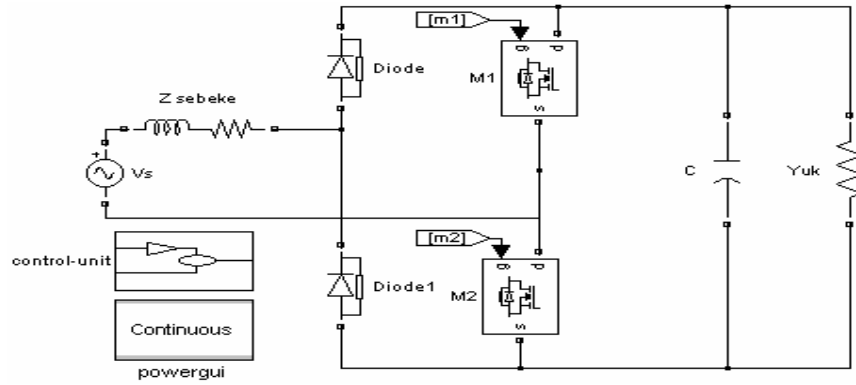
Şekil 3.22 Yükün 250Ω 'dan 100Ω 'a değiştirilmesi sırasında DC çıkış gerilimi

3.3 Yarı Köprü Doğrultucu

Güç faktörü düzeltmeli doğrultucular anahtarlamalı AC/DC dönüştürücüler arasında giderek artan bir yere sahip olmaya başlamışlardır. Bu doğrultucuların asıl amacı regüleli DC çıkış elde etmenin yanında güç faktörünü 1'e yaklaştırmaktır. Bunları yaparken de istenmeyen harmonik bileşenleri oluşturmamaktır. Bu amaçla tasarlanan ilk devre Şekil 3.3'deki klasik bir fazlı yükseltici tip doğrultucu devresidir. Bu devrenin de kayıplarını azaltmak için yeni tasarımlara gidilmiştir. Hazırlanan yeni tasarımlardan biri de Şekil 3.23'deki yarı köprü doğrultuculardır. Şekil 3.23.a'da simetrik Şekil 3.23.b'de asimetrik yarı köprü doğrultucu görülmektedir. Bu iki tip doğrultucunun da kontrolü, parametreleri ve çalışması aynıdır[11].



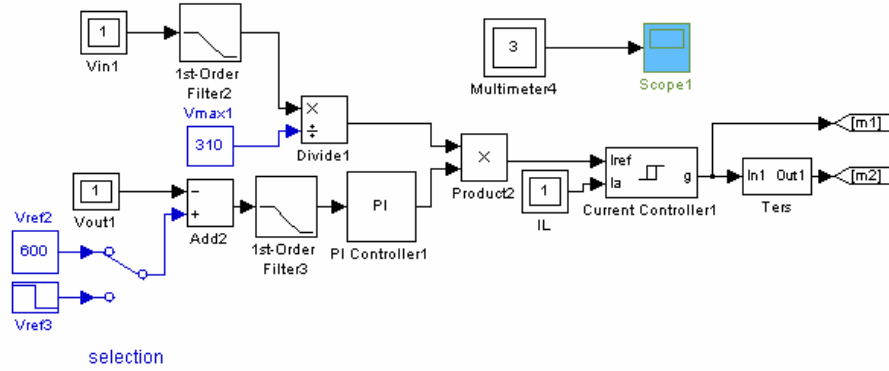
a) Simetrik Yarı Köprü Doğrultucu



b) Asimetrik Yarı Köprü Doğrultucu

Şekil 3.23 Yarı Köprü Doğrultucu

Bu tasarımda bir fazlı yükseltici tip doğrultucuda bulunan DC tarafta bulunan diyot kaldırılmıştır. Bu işlem tasarımın verimliliğini ve güvenilirliğini arttırmıştır. Yarı köprü doğrultucunun akım yolunda biri diyot ve diğeri mosfet olmak üzere iki yarı iletken eleman vardır. Enerji kayıpları azaltıldığı için klasik bir fazlı yükseltici tip doğrultucuya göre performansı daha yüksektir[2].



Şekil 3.24 Yarı köprü doğrultucu kontrol devresi blok diyagramı

Güç faktörü düzeltmeli doğrultucu yükseltici olarak çalışmaktadır. Doğrultucu AC giriş geriliminin pik değerinden daha büyük DC çıkış gerilimi üretmektedir. Şekil 3.24'teki kontrol devresinde girilen referans değerinden yükün üzerindeki gerilim değeri çıkarılarak PI hata kontrolörüne giriş yapılır. Şebekeden alınan birim gerilim örneği PI kontrolör çıkışı ile çarpılarak referans akım değeri bulunur. Referans akım değerinin karşılaştırılacağı akım ise şebekeye seri bağlı olan indüktanstan geçen akımdır. Histerezis kontrolörün çıkışındaki anahtarlama sinyali birinci anahtara, bu sinyalin tersi ise ikinci anahtara uygulanır. Anahtarların biri ON konumdayken diğeri OFF konumda bulunur. Doğrultucu eşitlikleri aşağıda verilmiştir[4].

Kaynak gerilimi $v_s(t) = v_m \sin \omega t$

Birim giriş voltaj değeri $u(t) = \frac{v_s(t)}{v_m}$

Anahtar üzerindeki gerilim $= v_p$

$$\frac{d}{dt} i_L = \frac{(v_s - v_p - r \cdot i_L)}{L_s} \quad (3.6)$$

$$\frac{d}{dt} v_{dc} = (i_p - v_{dc} / R) / C_d \quad (3.7)$$

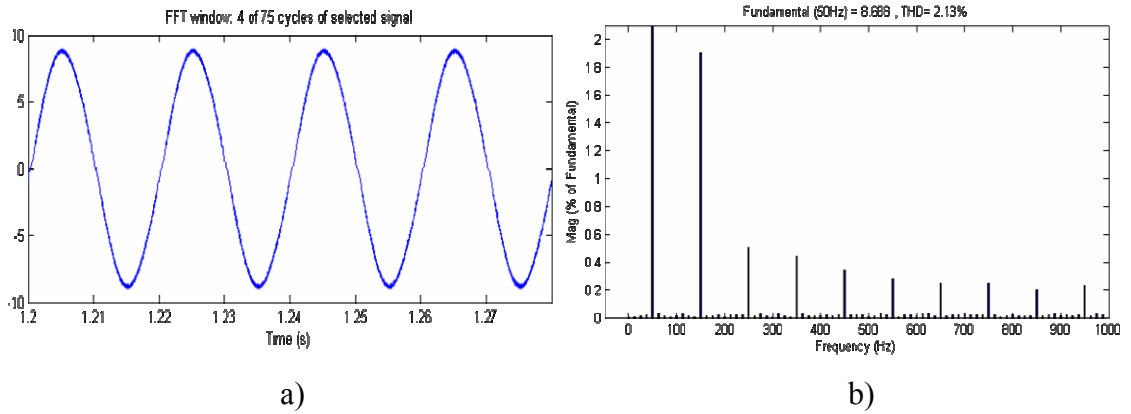
$$v_p = v_{dc} (d_1 - d_2) \quad (3.8)$$

$$i_p = i_L (d_1 - d_2) \quad (3.9)$$

d=1 "ON" d=0 "OFF"

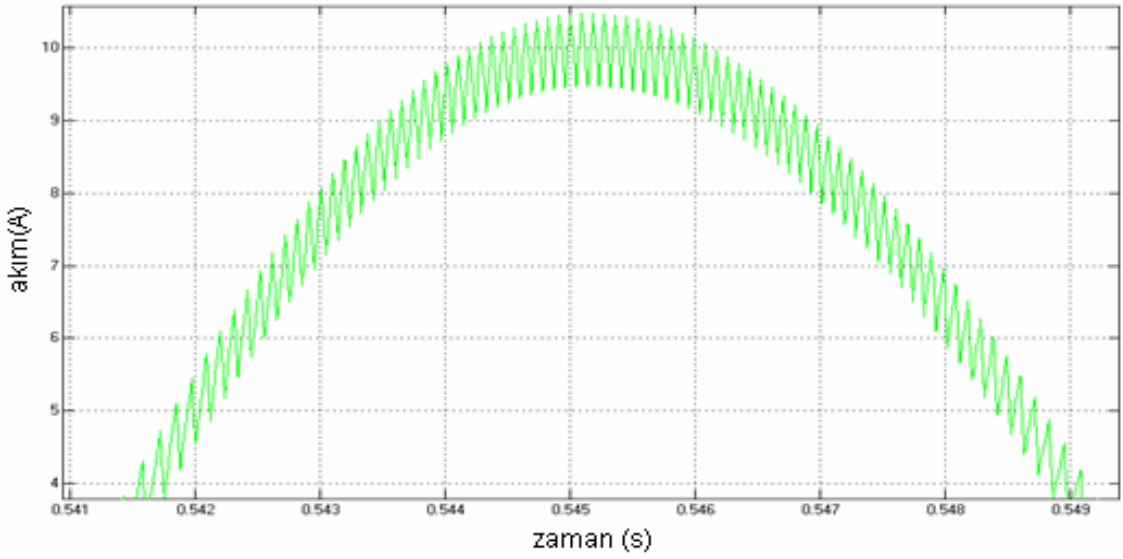
Yarı köprü doğrultucu kapalı döngü kontrol sistemine sahip olduğu için özellikle ani yük değişimlerini tolare edebilmektedir. Değiştirilen referans gerilim değerlerine de dinamik bir cevap vermektedir. Aynı şekilde AC giriş gerilimindeki değişimleri de tolare etmektedir. 220Vrms gerilimde çalışırken gerilim ani olarak 150V'a düşer veya 300V'a çıkarsa çıkış geriliminde kalıcı bir değişiklik olmadan doğrultucu ayarlanan referans gerilimine geri döner. Doğrultucu bu ayarı çıkıştan aldığı gerilim örneği ve PI kontrolör sayesinde yapmaktadır. Gerilim düşerse çıkış gerilimi de buna bağlı olarak düşecektir. Kontrolör çıkış DC gerilim düşüşünü algılar ve anahtarlama periyodunu arttırarak çıkış gerilimini tekrar eski haline getirir. Anahtarlama periyodu arttığı için ise şebekeden çekilen akım da aynı oranda artmaktadır. Bu sebeplerden dolayı doğrultucu geniş bir giriş gerilim değerine sahiptir. 90V_{rms} ile 310V_{rms} gerilim değerleri ve 40KHz ve 70KHz frekans değerleri arasında rahatlıkla çalışabilir[2].

Örnek çalışmadaki doğrultucu parametreleri; $v_s = 220V_{rms}$, $R_{hat} \approx 0\Omega$ $L = 13mH$, $C = 1000\mu F$, $Yük = 270\Omega$ olarak kullanılmıştır. PI parametreleri $K_p = 0.07$ $K_i = 0.7$ 'dir. Yukarıdaki parametreler ile yapılan simülasyon sonuçlarında istenilen değerlere ulaşılmıştır. Şebekeden çekilen harmonik bileşenler standart değerlere uygun çıkmıştır. Akımdaki toplam harmonik bozulma (THD) %2.13 gibi bir değerle klasik yükseltici tip doğrultucunun da altındadır. Şekil 3.25'te şebekeden çekilen akım, harmonik bileşenler ve şebekeden çekilen akımdaki THD görülmektedir.



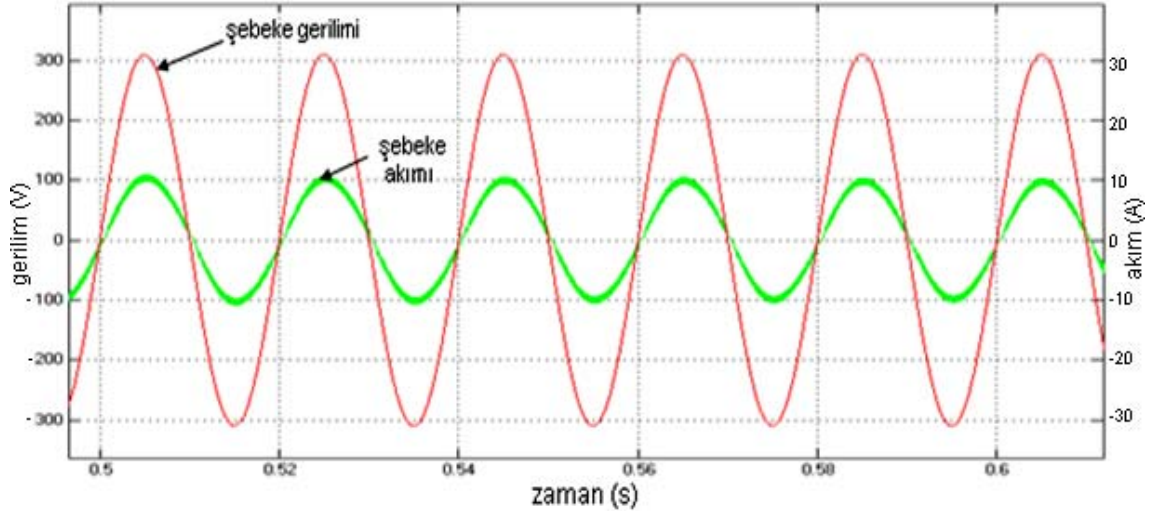
Şekil 3.25 a) Şebeke akımı b) Harmonik bileşenler ve THD

Şekil 3.25.a'da görülen dalga şekline göre şebekeden çekilen akım sinüse oldukça yakındır. Aslında bu akım sinüs dalga şeklini takip ederken aşağı ve yukarı doğru inip çıkmaktadır. Şekil 3.26'da bu hareket rahatlıkla görülmektedir. Histerezis kontrolöre girilen akım değerine göre buradaki taranan alan artar veya azalır. Bu çalışmada histerezis kontrolöre 1A'lık akım değeri girilmiştir. İstenirse bu değer küçültülebilir. Bu değer küçültülürse taranan bant genişliği daralır ve daha pürüzsüz bir sinüs elde edilebilir.



Şekil 3.26 Şebekeden çekilen akımın yaklaşılmış dalga şekli

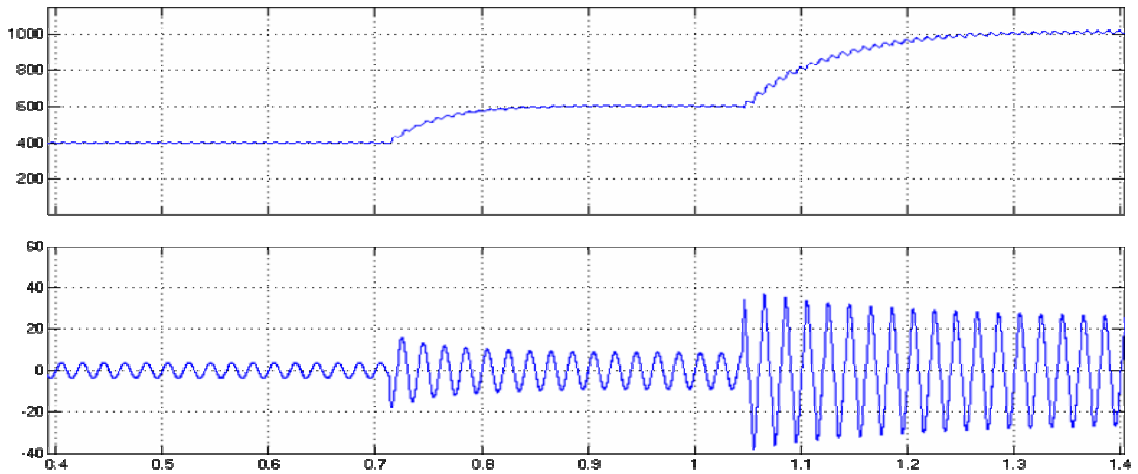
Yarı köprü doğrultucuda harmonikler standartların altında çıkmıştır. Anahtarlamalı güç kaynaklarında harmoniklerin bastırılması çok önemlidir ama bunun yanında güç faktörünün de yüksek tutulması gerekmektedir. Yüksek güç faktörü şebeke akımının gerilimle aynı fazda olması ile mümkün olmaktadır[15]. Şekil 3.27'de şebeke akımı ile geriliminin yaklaşık aynı fazda olduğu görülmektedir. Güç faktörü 0.95'ten büyüktür.



Şekil 3.27 Şebekeden çekilen akım ve şebeke gerilimi

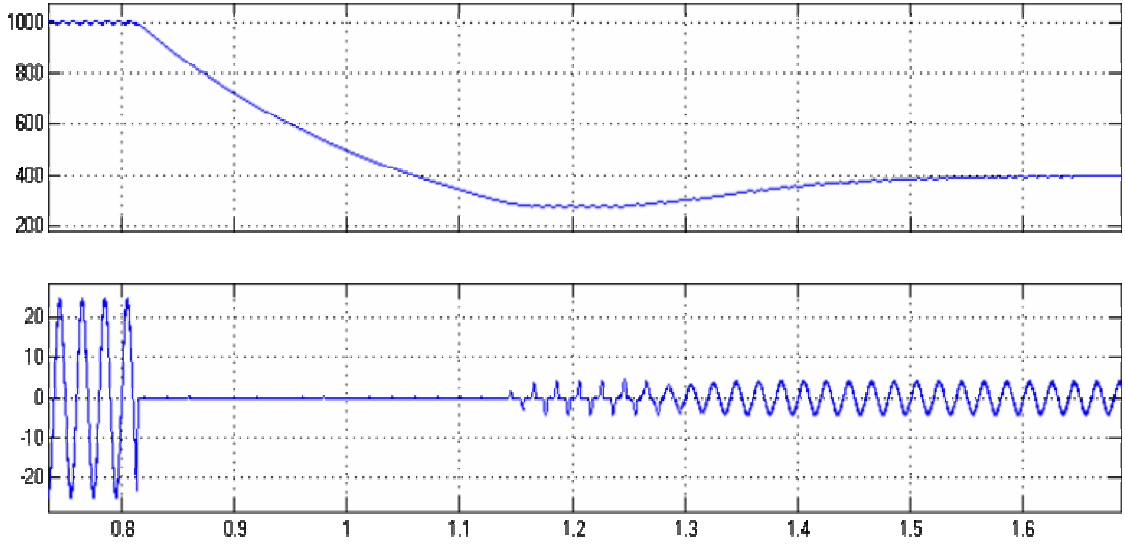
3.3.1 Referans Değişimlerine Sistemin Verdiği Tepki

Yapılan simülasyon sonucu yarı köprü doğrultucunun referans değişimlerine verdiği tepki incelenmiştir. Şekil 3.28'de DC çıkış gerilim tepkisi görülmektedir. Referans önce 400V'tan 600V'a, 600V'tan da 1000V'a çıkarılmıştır. Şekil 3.28'de bu sırada şebekeden çekilen akım da görülmektedir.



Şekil 3.28 Referans değişimleri (400V-600V, 600V-1000V) ve şebeke akımı

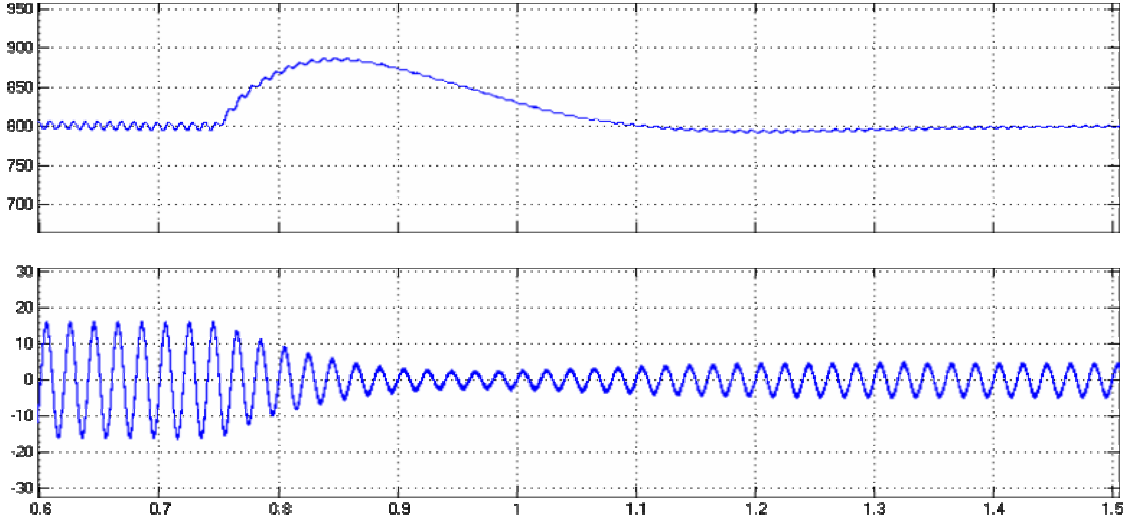
Bir sonraki uygulamada referans 1000V'tan 400V'a düşürülmüştür. Bu sırada Şekil 3.29'da DC çıkış geriliminin değişimi ve şebekeden çekilen akım görülmektedir. Doğrultucu tasarım itibariyle tek yönlü enerji transferine izin vermektedir. Bu doğrultucuda enerji transferi her zaman şebekeden yük tarafına doğrudur. Bu yüzden 1000V'tan 400V'a inerken şebekeden akım çekilmez, şebekeye geri akım da verilemez.



Şekil 3.29 Referans değişimleri (1000V - 400V) ve şebeke akımı

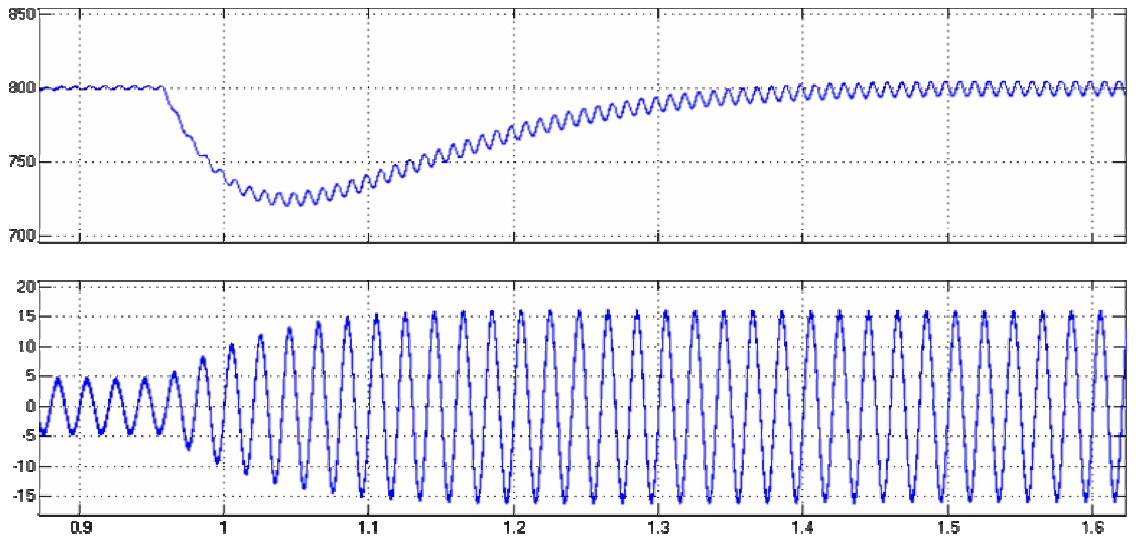
3.3.2 Yük Değişimlerine Sistemin Verdiği Tepki

Doğrultucular sabit değerli yükler için kullanıldıkları gibi değişken değerli yükler için de kullanılmaktadırlar. Kontrolsüz doğrultucular DC çıkış geriliminden örnek almadıkları için çıkış gerilim regülasyonunu yapamazlar. Doğrultucunun beslediği yükün değeri değişirse şebekeden çekilen akım değişir ve buna bağlı olarak çıkış geriliminde de bir sapma meydana gelir. Kontrolsüz doğrultucuların düzeltmediği bu sapma kontrollü doğrultucularda kısa sürede düzeltilir. Yarı köprü doğrultucuda gerilim kontrolünü PI kontrolör yapmaktadır. PI kontrolör yük değişince çıkıştaki gerilim değişikliğini kısa sürede düzeltmektedir. DC çıkış gerilimi 800V'ta sabit iken yük azaltma ve artırma çalışmaları yapılmıştır. Şekil 3.30'da yük 270Ω'dan 1000Ω'a değiştirildiğindeki çıkış gerilimi ve şebekeden çekilen akım görülmektedir.



Şekil 3.30 Yükün 270Ω 'dan 1000Ω 'a değiştirilmesi sırasında çıkış gerilimi ve şebeke akımı

Yük direnç değeri ani olarak yükseltildiği anda güç fazla gelir ve D çıkış geriliminde anlık bir artma meydana gelir. Şekil 3.30'da görülen gerilim artışı PI kontrolör tarafından algılanarak çekilen akım azaltılmıştır. Böylelikle DC çıkış gerilimi eski seviyesi olan 800V'a geri gelmiştir.



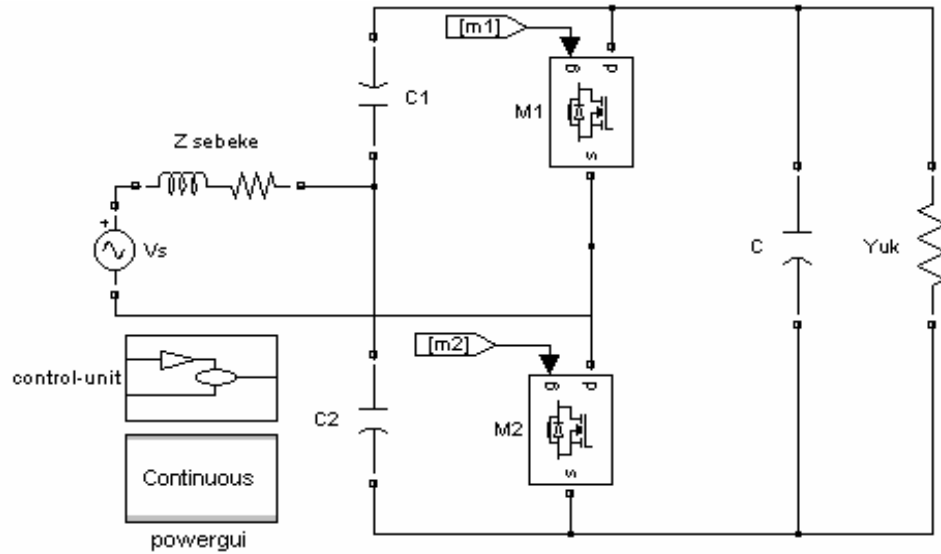
Şekil 3.31 Yükün 1000Ω 'dan 270Ω 'a değiştirilmesi sırasında çıkış gerilimi ve şebeke akımı

Şekil 3.31'de yük değerinin 1000Ω 'dan 270Ω 'a düşürülmesi sırasındaki DC çıkış gerilimi ve şebekeden çekilen akım görülmektedir. Yük ani olarak düşürüldüğünde 800V gerilim çıkışını

sağlayacak güç olmadığından dolayı gerilimde bir düşüş meydana gelir. Çünkü o andaki akım yükü besleyecek yeterlilikte değildir.

3.4 Çift Yönlü Güç Aktarımlı Yarı Köprü Doğrultucu

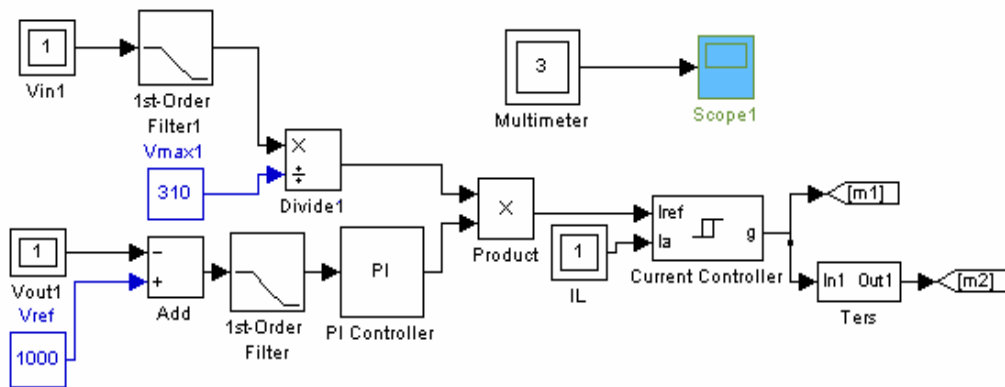
KontROLSÜZ doğrultucuların düşük güç faktörü ve buna bağlı düşük verim, güç faktörü düzeltmeli doğrultucuların geliştirilmesi ile giderilmiştir. %95'in üzerinde bir verime sahip olan güç faktörü düzeltmeli doğrultucular aynı zamanda standartlara uygun akımdaki THD (toplam harmonik bozulma) değerlerine sahiptir[1]. Bir fazlı yükseltici tip doğrultucu, modifiyeli yükseltici tip doğrultucu, simetrik ve asimetrik yarı köprü doğrultucu tek yönlü enerji iletimine izin vermektedirler. Bazı UPS, batarya şarj ünitesi ve küçük güçlü DC motor uygulamalarında çift yönlü enerji iletimi gerekmektedir. Bu sebeple yeni tasarımlara gidilmiş, Şekil 3.32'deki çift yönlü güç aktarımlı yarı köprü doğrultucu geliştirilmiştir.



Şekil 3.32 Çift yönlü güç aktarımlı yarı köprü doğrultucu

Bu tasarımda bir fazlı yükseltici tip doğrultucuda bulunan DC taraftaki diyot kaldırılmıştır. Sistemin verimini ve güvenilirliğini arttıran bu özellik yanında doğrultucunun güç yolunda sadece bir yarı iletken eleman bulunduğu için iletim kayıpları daha da azalmıştır[4]. DC çıkış gerilim dalgalanmasını azaltmak için yüke paralel bir kapasite kullanılmıştır. Simülasyon programı olarak Matlab/Simulink kullanılmıştır. Matlab programının seçilme nedeni ise kullanım kolaylığı ve hazır devre elemanlarının bulunmasıdır[7]. Simülasyonda anahtar olarak

mosfet kullanılmıştır. Şekil 3.32’de görüldüğü gibi mosfet bloğunun içinde kendine ait sönümleyici devresi bulunmaktadır. Doğrultucuda iki tip kontrolör bulunmaktadır. Gerilim kontrolü için PI kontrolör, akım kontrolü için histerezis kontrolör kullanılmıştır.



Şekil 3.33 Çift yönlü güç aktarımlı yarı köprü doğrultucu kontrol devresi blok diyagramı

Çift yönlü güç aktarımlı yarı köprü doğrultucu da yükseltici olarak çalışmaktadır. Doğrultucu AC giriş geriliminin pik değerinden daha büyük DC çıkış gerilim değeri üretmektedir. Şekil 3.32’de görülen C1 ve C2 kapasitörlerinin gerilimleri toplamı DC çıkış gerilimini vermektedir. Bu sebeple DC çıkış gerilimi AC giriş gerilimin pik değerinden daha büyük olmaktadır. Giriş gerilimi olarak devreye 220Vrms verilirse çıkış 620V olmaktadır ($V_{maxgiriş}=310V$).

Kaynak gerilimi $v_s(t) = v_m \sin \omega t$

Birim giriş voltaj değeri $u(t) = \frac{v_s(t)}{v_m}$

Anahtar üzerindeki gerilim $= v_p$

Anahtar üzerindeki akım $= i_p$

$$\frac{d}{dt} i_L = \frac{(v_s + v_{p1} - v_{p2} - r \cdot i_L)}{L_s} \quad (3.10)$$

$$\frac{d}{dt} v_{c1} = -\{i_{p1} + (v_{dc} / R)\} / C_1 \quad (3.11)$$

$$\frac{d}{dt} v_{c2} = -\{i_{p2} + (v_{dc} / R)\} / C_2 \quad (3.12)$$

$$v_{dc} = (v_{c1} + v_{c2}) \quad \text{DC çıkış gerilimi} \quad (3.13)$$

$$i_{p1} = d_1 \cdot i_L \quad (3.14)$$

$$i_{p2} = d_2 \cdot i_L \quad (3.15)$$

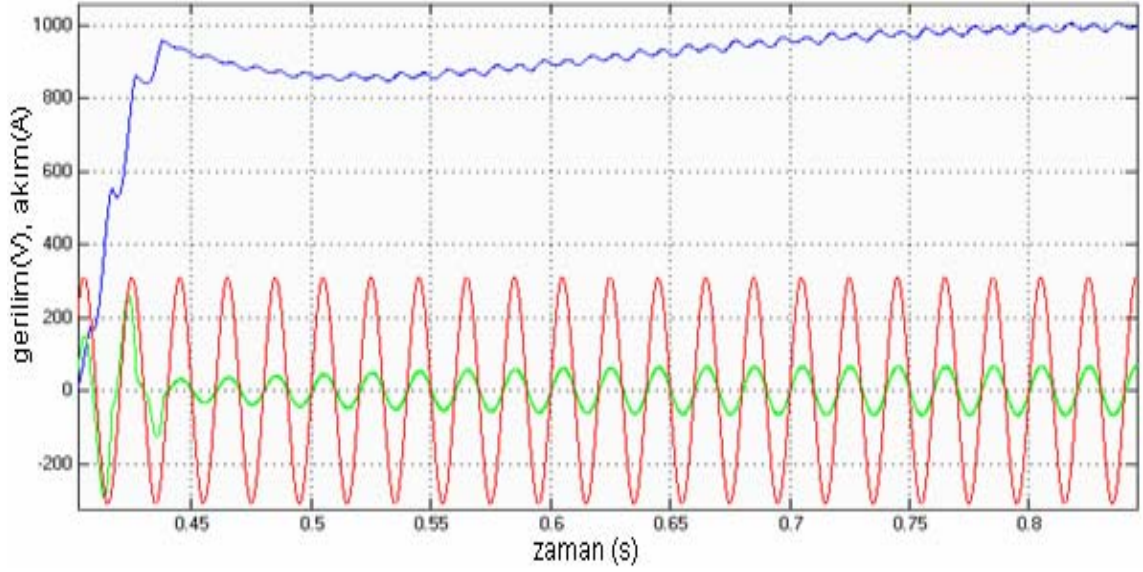
$$v_{p1} = d_1 \cdot v_{c1} \quad (3.16)$$

$$v_{p2} = d_2 \cdot v_{c2} \quad (3.17)$$

d1 ve d2 anahtarların açık ve kapalı olma durumları

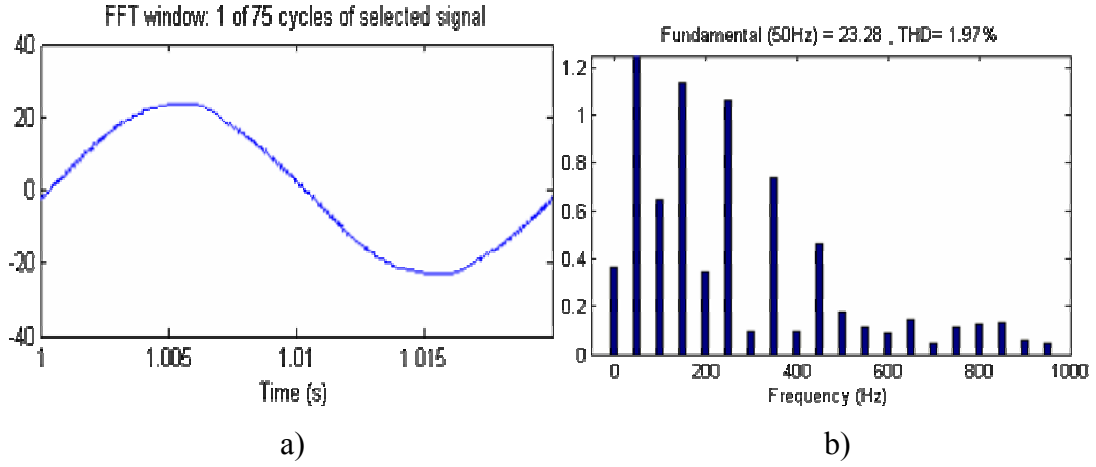
Çift yönlü güç aktarımlı yarı köprü doğrultucunun eşitlikleri yukarıda verilmiştir[4]. Şekil 3.33'deki kontrol devresi çıkıştaki yük üzerinden gerilim örneği alarak girilen referans gerilim değeri ile karşılaştırmaktadır. PI kontrolör çıkışındaki hata sinyali şebekeden alınan birim gerilim örneği ile çarpılarak referans akım değeri bulunur. Referans akımla şebekeden çekilen akım karşılaştırılır. Histerezis kontrolör ise mosfetler için gerekli olan anahtarlama sinyallerini oluşturmaktadır. Anahtarlardan bir tanesi açık iken diğeri kapalı durumdadır.

Çift yönlü güç aktarımlı yarı köprü doğrultucu $90V_{rms}$ ile $310V_{rms}$ gerilim aralığı ve 40KHz ile 70KHz frekans aralığında çalışmaktadır[2]. Eğer AC şebeke gerilimi $220V_{rms}$ yerine $110V_{rms}$ olursa, çıkıştaki yük üstündeki gerilimin sabit tutulması için doğrultucu şebekeden daha yüksek akım çekecektir. $300V_{rms}$ olursa yük üstündeki gerilimin sabit tutulması için doğrultucu şebekeden $220V_{rms}$ 'te çalışmaya göre daha küçük bir akım çekecektir. Çünkü her iki durumda da çıkış gücü eşittir. Doğrultucu bu özelliğini sahip olduğu yük üzerinden gerilim örneği alan PI kontrolör sayesinde kazanmaktadır. Ayrıca ani olarak gelişen şebeke gerilimindeki değişimleri de bu özellik sayesinde tolare edilebilmektedir.



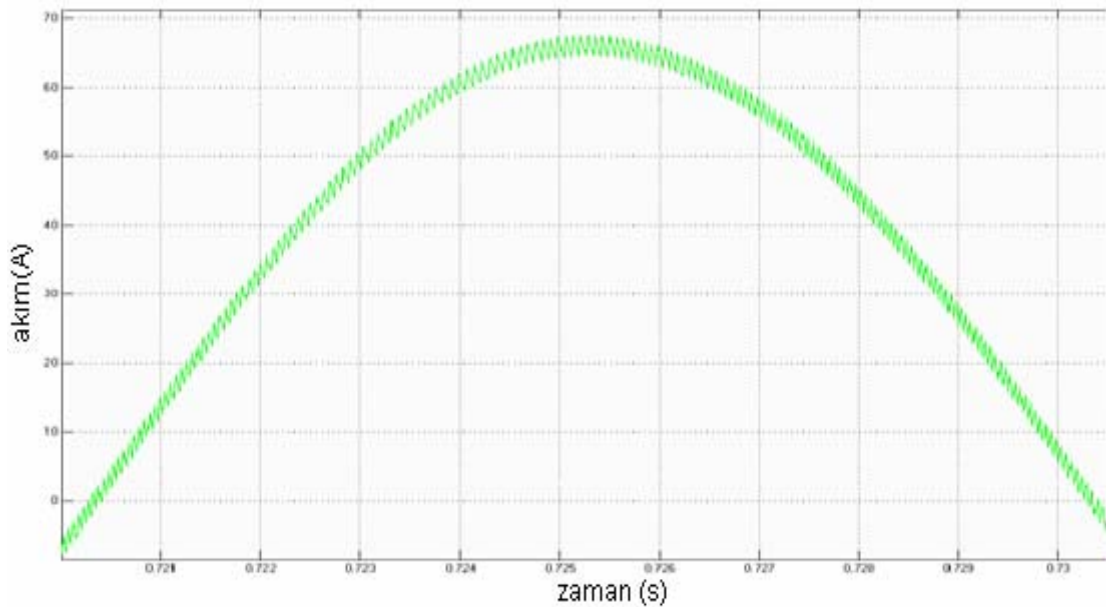
Şekil 3.34 Referans olarak verilen 1000V değerine ulaşma

Örnek çalışmadaki doğrultucu parametreleri olarak; $v_s = 220V_{rms}$, $Z_{şebeke} \approx 0\Omega$ ve $L = 13mH$, $C, C1, C2 = 2000\mu F$, $Yük = 100\Omega$ ve PI parametreleri $K_p = 0.07$ $K_i = 1.4$ seçilmiştir. Çalışmada referans olarak 1000V gerilim değeri verildiği anda Şekil 3.34'te DC çıkış gerilimi, şebekeden çekilen akım, şebeke gerilimi görülmektedir. Yukarıdaki parametreler ile yapılan simülasyon sonuçlarında istenilen değerlere ulaşılmıştır. Şekil 3.35'te şebekeden çekilen akım ve bu akımdaki THD görülmektedir. Şebekeden çekilen akımdaki THD %1.97'lik bir değerle EN 61000-3-2, IEEE 519-1992 ve IEC 1000 standartlarına uygun çıkmıştır[1]. Şekil 3.35.a'dan da görüldüğü gibi şebekeden çekilen akımın dalga şekli ideal sinüse oldukça yakındır.



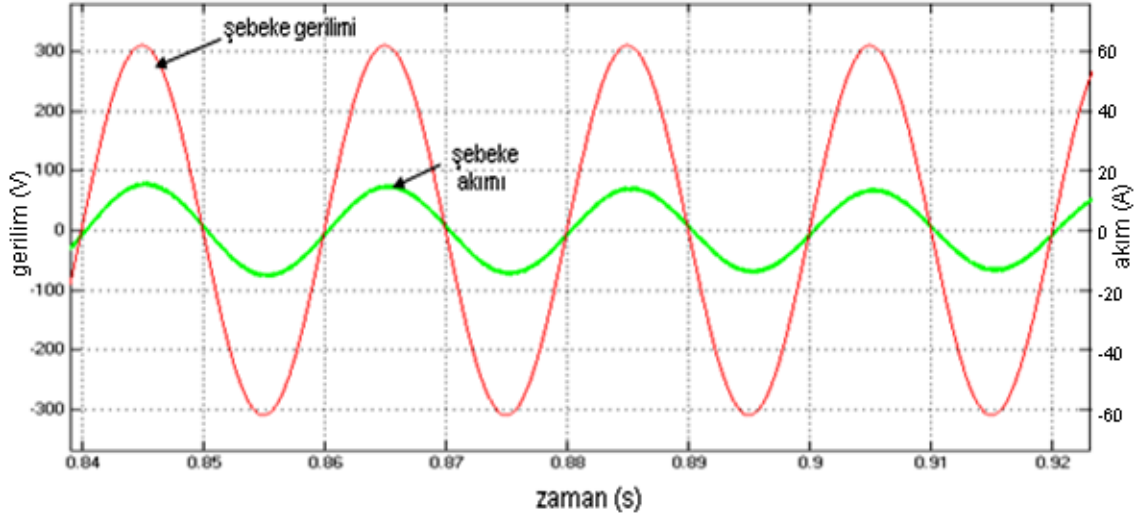
Şekil 3.35 a) Şebekeden çekilen akım b) Harmonik bileşenler ve THD

Şebekeden çekilen akım sinüsü takip ederken kontrol devresindeki histeresis kontrolör bu takip sırasındaki yolu belirlemektedir. Şekil 3.36'da şebekeden çekilen akımın yarım periyodu görülmektedir. Görüldüğü gibi şebekeden çekilen akım sinüsü takip ederken aşağı ve yukarı gidip gelerek dar bir alanı taramaktadır. Bu alanın genişliğini ise histeresis kontrolör belirlemektedir. Bu çalışmada histeresis kontrolöre 0.25A değeri girilmiştir.



Şekil 3.36 Şebekeden çekilen akımın yarım periyodu

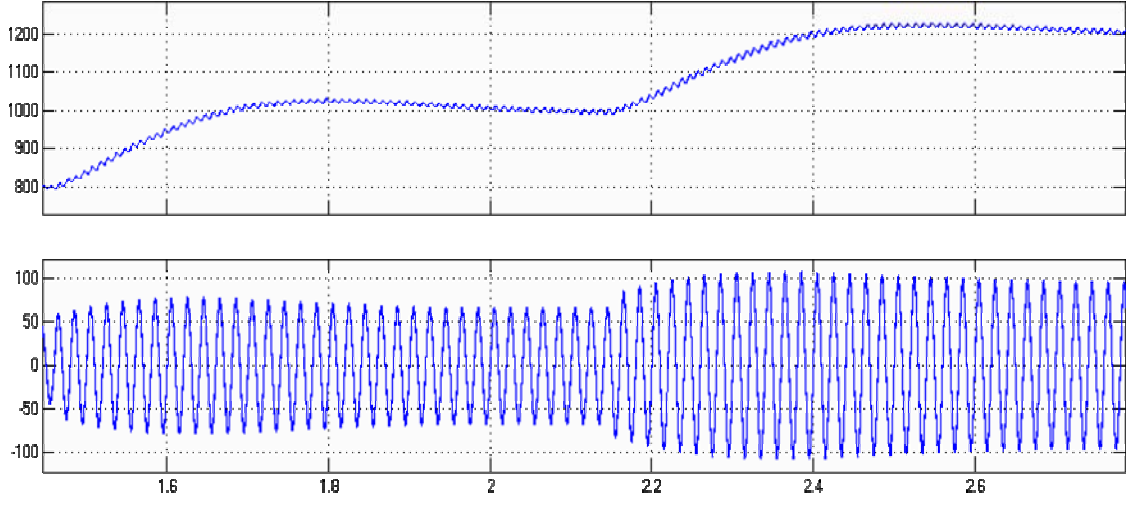
Güç faktörü düzeltmeli bir doğrultucuda şebekeden çekilen akım ile şebeke geriliminin aynı fazda olması gereklidir. Şekil 3.37’de şebekeden çekilen akım ve şebeke geriliminin yaklaşık olarak aynı fazda olduğu görülmektedir. Buna bağlı olarak doğrultucunun güç faktörü 0.95’ten büyüktür.



Şekil 3.37 Şebekeden çekilen akım ve şebeke gerilimi

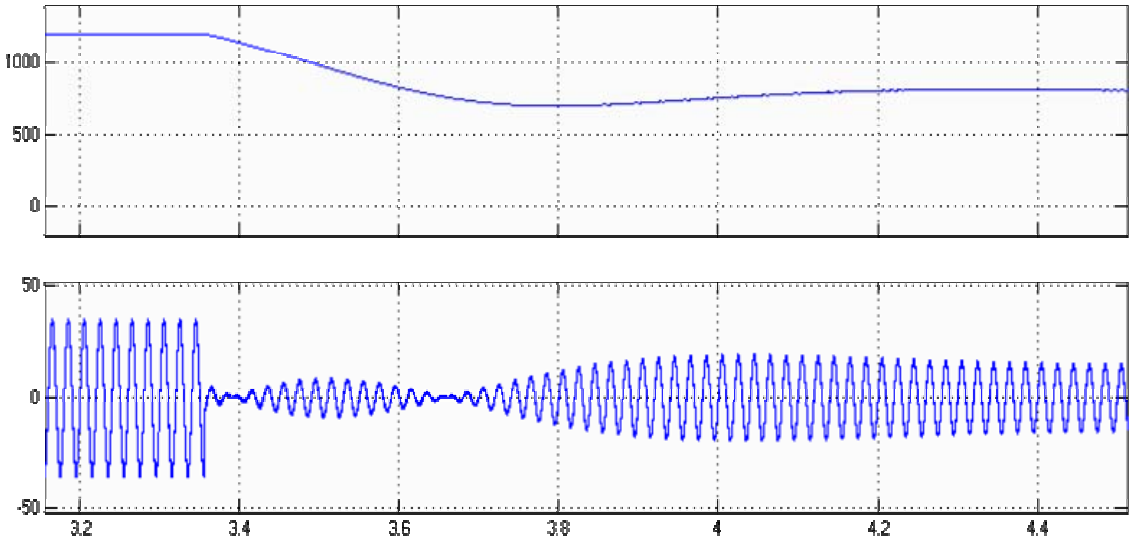
3.4.1 Referans Değişimlerine Sistemin Verdiği Tepki

Çift yönlü güç aktarımlı yarı köprü doğrultucu kontrollü doğrultucu olduğu için yük üstünde istenilen gerilim seviyesi elde edilebilmektedir. PI kontrolü aracılığı ile yapılan bu kontrolde yük üstünden gerilim örneği alınarak girilen referans gerilim değeriyle karşılaştırılmaktadır. Bir referanstan başka bir referansa geçişte yük üstündeki gerilim doğrultucunun dinamikleri gereği aniden girilen değere ulaşamaz. Belli bir sürede olan bu değişim sürecini PI kontrolörün parametreleri belirlemektedir. K_i ve K_p parametreleri Matlab/Simulink'in getirdiği kolaylıkla deneme yanılma metodu ile ayarlanmıştır. Bu değerler doğru bir şekilde ayarlanmaz ise doğru kontrol yapılamamakta ve istenilen çıkış gerilimi ve sinüsoidal akıma ulaşamamaktadır.



Şekil 3.38 DC çıkış gerilimi ve şebeke akımı (800V-1000V,1000V-1200V)

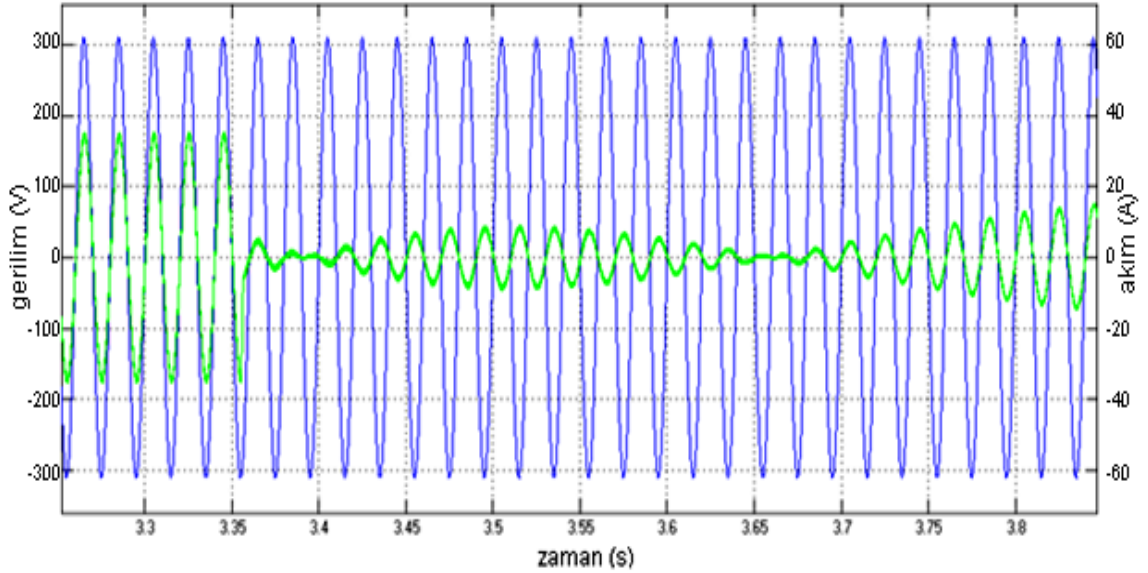
İlk çalışma olarak referans gerilimin 800V'dan 1000V'a çıkarılmış daha sonrada 1000V'dan 1200V'a çıkarılmıştır. Buna göre DC çıkış gerilimi ve şebekeden çekilen akım Şekil 3.38'deki gibi elde edilmiştir.



Şekil 3.39 DC çıkış gerilimi ve şebeke akımı (1200V-800V)

İkinci bir çalışma olarak referans gerilimi 1200V'tan 800V'a düşürülmüş ve Şekil 3.39'daki dalga şekilleri elde edilmiştir. Şekil 3.39'da görüldüğü gibi gerilim düşmesi sırasında şebekeden çekilen akım aniden sıfıra düşmüş ve 3.4 ve 3.65 saniyeleri arasında şebekeye geri akım

verilmiştir. Şebekeye geri akım verilmesi doğrultucunun çift yönlü güç aktarımlı olduğunu doğrulamıştır. Diğer doğrultuculardan farklı olarak bu özellik sayesinde yük üstündeki gerilim düşüşü daha hızlı olmaktadır.



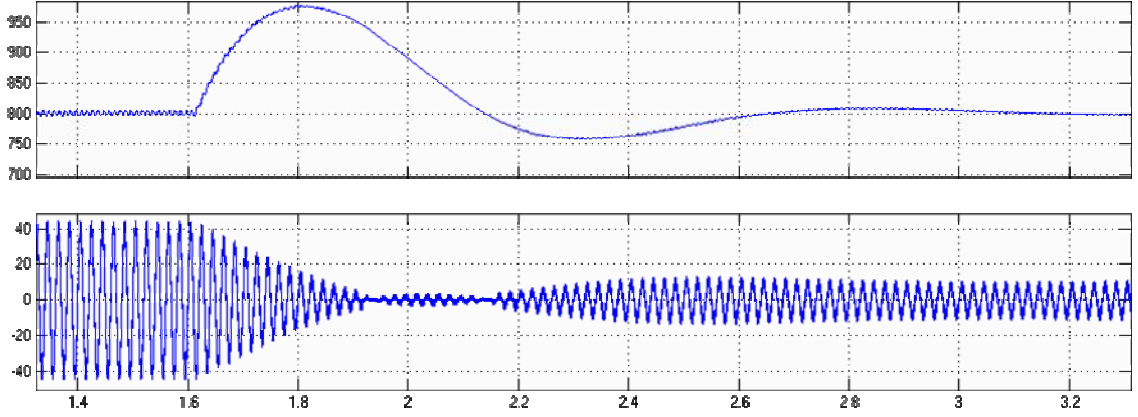
Şekil 3.40 Şebekeden çekilen akım ve şebeke geriliminin dalga şekli

Sabit DC çıkış sırasında güç faktörü yaklaşık olarak 1'e eşittir. Yani şebekeden çekilen akımla gerilim aynı fazdadır. Çıkış gerilimi verilen referansa düşerken Şekil 3.40'dan da görüldüğü gibi akım faz değiştirmiş, 180 derece kaymıştır. Akım ile gerilim arasında 180 derecelik faz farkı güç faktörünün yaklaşık olarak -1'e eşit olduğunu göstermektedir.

3.4.2 Yük Değişimlerine Sistemin Verdiği Tepki

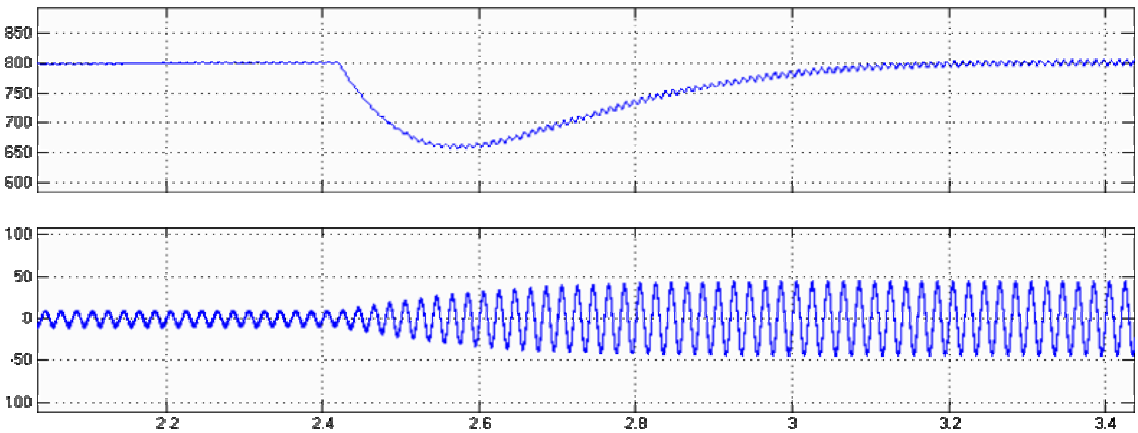
Kontrolsüz doğrultucular çıkıştaki yük değişimlerini algılayamadıkları için yük değişimlerinde oluşan çıkış gerilim değişimine müdahale edemezler. Yük arttırıldığında veya azaltıldığında DC çıkış gerilim seviyesi değişmektedir. Kontrolsüz doğrultucular sabit değerli yükler için kullanılabilir fakat değişken değerli yükler için kullanılamaz. Yük arttığında doğrultucu çıkışındaki gerilim azalır, azaldığında ise doğrultucu çıkışındaki gerilim artar. Çıkış gerilimi değiştikten sonra sabit kalır ve geriye dönüş olmaz. Çift yönlü güç aktarımlı yarı köprü doğrultucuda ise PI kontrolör çıkıştaki yük değiştikten sonra değişen gerilimi algılamakta ve ona göre şebekeden çekilen akımı değiştirerek referans olarak verilen gerilim değerine geri

dönüşü sağlamaktadır. İlk uygulama olarak 800V sabit referans geriliminde çalışırken yük direnç değeri 270Ω 'dan 500Ω 'a çıkarılmıştır. Yük azaldığı için çıkışta ani bir gerilim artışı olmuş 800V seviyesindeki DC çıkış gerilimi 1000V'a yaklaşmıştır. Bu sırada PI gerilim kontrolörü çıkış gerilim değişimini algılayarak şebekeden çekilen akımı azaltmaya başlamıştır.



Şekil 3.41 Yükün 270Ω 'dan 500Ω 'a değiştirilmesi sırasında çıkış gerilimi ve şebeke akımı

Şekil 3.41'de şebekeden çekilen akım ve yük üstündeki gerilim görülmektedir. Bu şekilde aniden artan gerilimin düşüşü sırasında çok kısa süreli de olsa şebekeye geri enerji verildiği görülmektedir. Şebekeye geri enerji verilmesinin olumlu katkısı yük değişimi sebebiyle oluşan gerilim değişiminin daha kısa sürede toparlanmasını sağlamaktır.

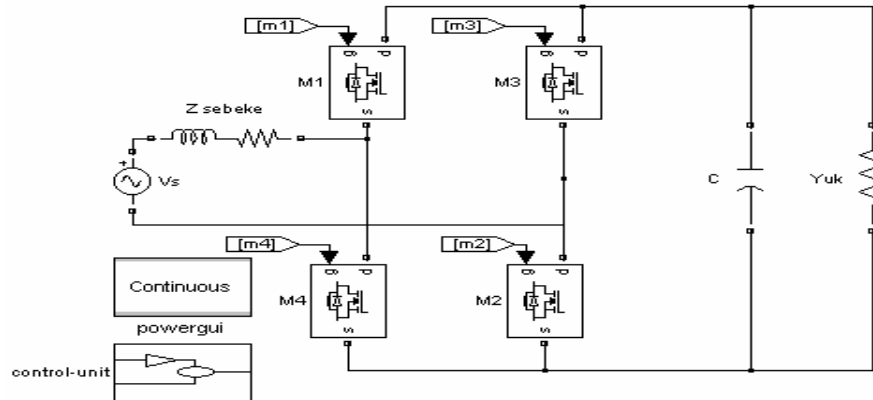


Şekil 3.42 Yükün 500Ω 'dan 270Ω 'a değiştirilmesi sırasında çıkış gerilimi ve şebeke akımı

İkinci bir uygulama olarak 800V sabit referans geriliminde çalışırken yük 500Ω 'dan 270Ω 'a değiştirilmiştir. Şekil 3.42'deki akım dalga şekillerine göre yükün ani olarak artması DC çıkış gerilim seviyesinde bir düşme yaratmıştır. Yük üstündeki gerilim düşüşünü algılayan PI kontrolör şebekeden çekilen akımı arttırarak gerilimin eski seviyesine tekrar ulaşmasını sağlamıştır. PI kontrolördeki K_p ve K_i parametrelerinin ayarı ile gerilimin toparlanma süresi, aşağı veya yukarı ne kadar değişeceği belirlenmektedir. Bu parametreler doğru ayarlanmaz ise gerilim düşümü sifira kadar inebilir veya gerilim yükselmesi referansın iki katından daha yukarı bir seviyeye çıkabilir. Bu istenmeyen durum doğrultucunun kullanıldığı cihazlarda olumsuz sonuçlar doğurabilmektedir.

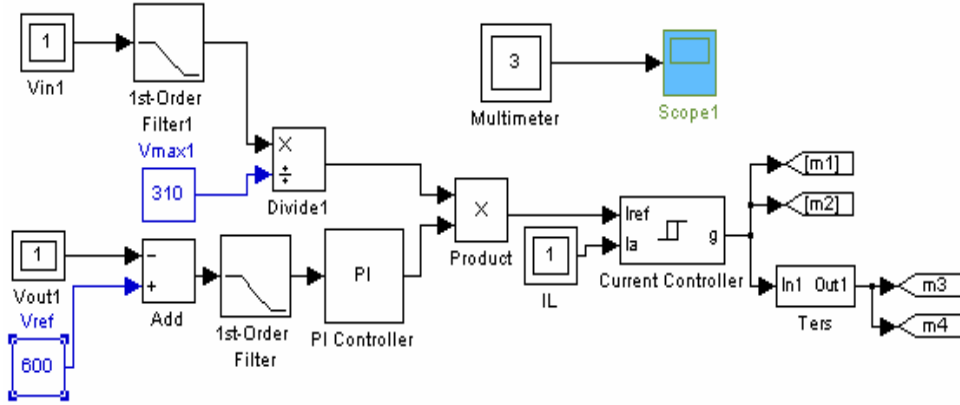
3.5 Bir Fazlı Tam Köprü Doğrultucu

Şebekeden sinüsoidal akım çeken doğrultucuların en gelişmiş olanı bir fazlı tam köprü doğrultucudur. Tam köprü doğrultucuda 4 adet anahtar bulunmaktadır. H köprüsü olarak bilinen şekilde bağlanmışlardır. H köprüsü genelde DC motor uygulamalarında kullanılmaktadır. Bunun sebebi ise çift yönlü enerji aktarımı yapabilmesidir[3]. Gelişmiş UPS uygulamalarında da kullanılmaktadır. Tam köprü doğrultucunun çift yönlü güç aktarımlı yarı köprü doğrultucu ile karşılaştırıldığında ise önemli avantajları vardır. Tam köprü doğrultucu daha az akım bozulmasına ve daha iyi bir dinamik cevaba sahiptir. Çift yönlü güç aktarımlı doğrultucunun dezavantajı ise kapasitelerden dolayı DC çıkış geriliminin minimum değerinin AC giriş geriliminin pik değerinin 2 katı olmasıdır. Bu durumun önüne geçebilmek için Şekil 3.43'teki tam köprü doğrultucu tasarlanmıştır. Bu doğrultucu bazı durumlarda şebekeye geri akım vererek enerji tasarrufu sağlamaktadır.



Şekil 3.43 Tam köprü doğrultucu

Doğrultucuda köprü şeklinde 4 adet mosfet bulunmaktadır. Doğrultucu şebekeyi temsil eden AC kaynak ve ona seri bağlı hat empedansı ile beslenmektedir. Yüke paralel bağlı kapasite ise yük üzerindeki gerilim dalgalanmasını azaltmak için kullanılmaktadır. M1 ve M2 iletimde iken M3 ve M4 kesimdedir. M3 ve M4 iletimde iken M1 ve M2 kesimdedir.



Şekil 3.44 Tam köprü doğrultucu kontrol devresi blok diyagramı

Şekil 3.44'teki kontrol devresi yük üstünden gerilim örneği olarak referans değeriyle karşılaştırır ve PI kontrolör çıkışı bir hata sinyali üretir. Kaynaktan alınan gerilim örneği kaynak geriliminin pik değerine bölünür. Bu işlemin sonunda birim sinüs sinyali ortaya çıkar. Bu birim sinyalin alınma sebebi ise giriş gerilimi ile aynı fazda anahtarlama yapabilmektir. Çünkü giriş gerilimi ile akımının aynı fazda olması güç faktörünün 1'e yaklaştığının bir göstergesidir. Birim sinüs sinyali ile PI hata çıkış sinyali çarpılarak referans akım değeri bulunur. Şebekede çekilen akım ile referans akım karşılaştırılarak histerezis kontrolöre verilir. Histerezis kontrolör mosfetler için gerekli olan anahtarlama sinyallerini üretmektedir. Histerezis kontrolörün çıkış sinyali 1 ve 2 nolu mosfetlere bu sinyalin tersi ise 3 ve 4 nolu mosfetlere gönderilmektedir.

Doğrultucu akım ve gerilim denklemleri aşağıda verilmiştir[4].

Kaynak gerilimi $v_s(t) = v_m \sin \omega t$

Birim giriş voltaj değeri $u(t) = \frac{v_s(t)}{v_m}$

Anahtar üzerindeki gerilim $= v_p$

Anahtar üzerindeki akım $= i_p$

$$\frac{d}{dt}i_L = \frac{(v_s - v_p - r.i_L)}{L_s} \quad (3.18)$$

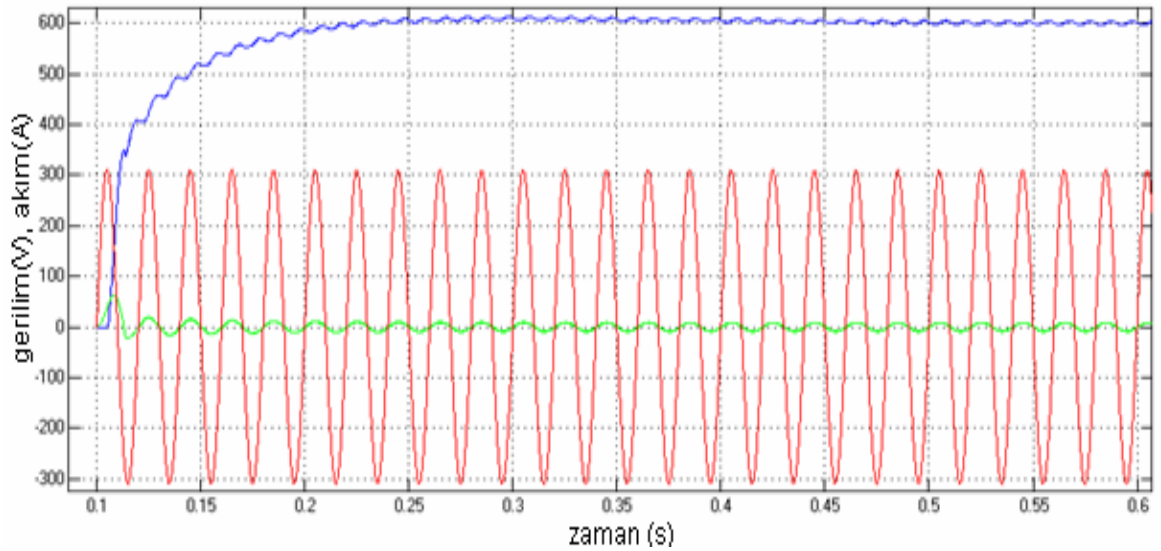
$$\frac{d}{dt}v_{dc} = (i_p - v_{dc}/R)/C_d \quad (3.19)$$

$$v_p = v_{dc}(d_a - d_b) \quad (3.20)$$

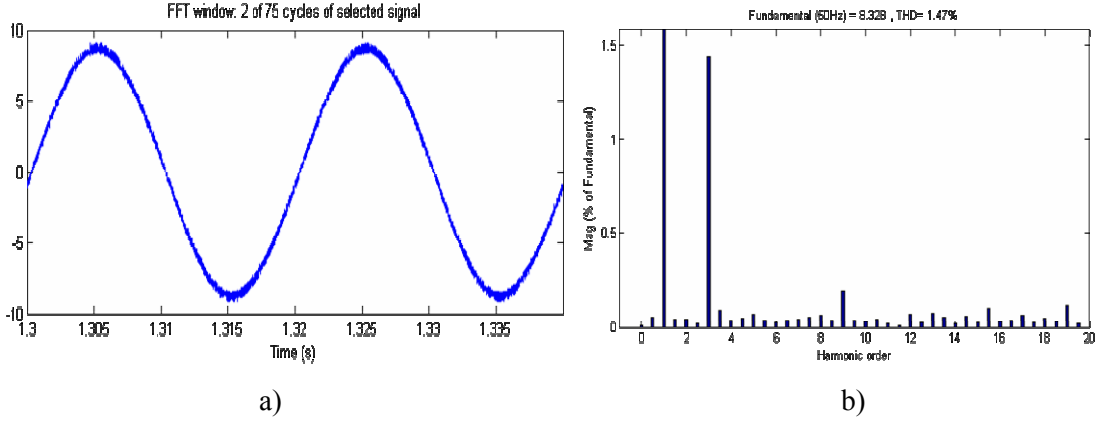
$$i_p = i_L(d_a - d_b) \quad (3.21)$$

Doğrultucu yükü olarak sadece resistif yük kullanılmıştır. Simülasyonda kullanılan elemanların parametreleri daha önceden bu konuda yapılan çalışmalara uygun seçilmiştir[3].

Devredeki parametreler; $v_s = 220V_{rms}$, $Z_{hat} R \approx 0\Omega$ $L = 26mH$, $C = 1000\mu F$, $Yük=270\Omega$ seçilmiştir. PI parametreleri olarak PI kontrolöre $K_p = 0.07$ $K_i = 0.7$ değerleri girilmiştir. PI kontrolörün parametreleri Matlab/Simulink programı sayesinde kolaylıkla ayarlanmıştır. Tam köprü doğrultucu da yükseltici olarak çalışmaktadır. Bu çalışmada şebeke gerilimi $220V_{rms}$ seçilmiş, referans gerilim olarak $600V$ girilmiştir. Şekil 3.45'te bu parametreler ile $600V$ referans gerilime ulaşırken DC çıkış gerilimi, şebekeden çekilen akım ve şebeke gerilimi verilmektedir.

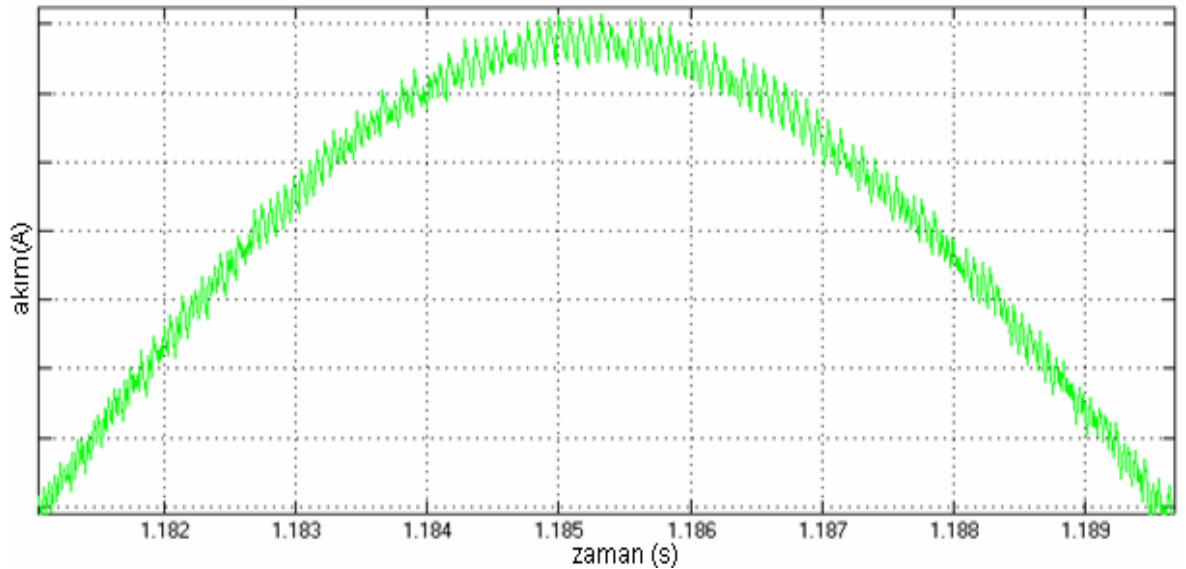


Şekil 3.45 Referans gerilim değerine ulaşırken DC çıkış gerilimi, şebeke akımı, şebeke gerilimi



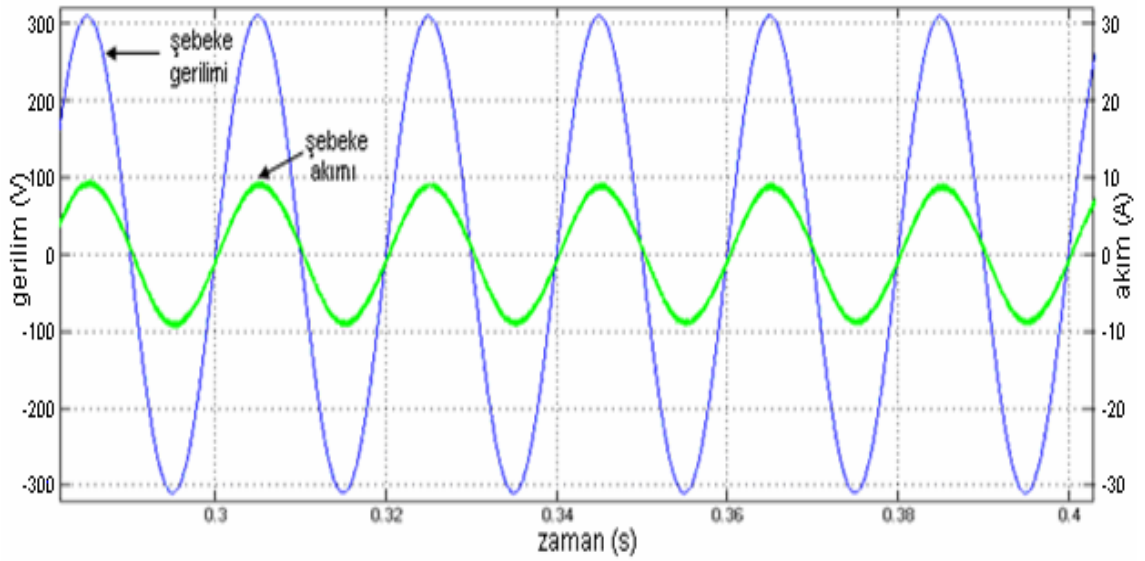
Şekil 3.46 a) Şebeke akımı b) Harmonik bileşenler THD

Doğrultucu 600V olarak verilen referans gerilime 0.6s'de ulaşmıştır ve kalıcı hal hatası oluşmamıştır. $K_p = 0.07$ $K_i = 0.7$ olarak ayarlanan PI parametreleri sayesinde DC çıkış gerilimi istenilen referans değere uygun bir şekilde oturmuştur. Şekil 3.46.a'da şebekeden çekilen akımın ideal sinüse oldukça yakın olduğu gözükmektedir. Dalganın şekli sinüs olsa da üstünde belli bir miktar harmonik bulunmaktadır. Bu harmonikler Şekil 3.46.b'de gözükmektedir. Şebekeden çekilen akımdaki THD ise %1.47'lik bir değerle standartlara uygun çıkmıştır.



Şekil 3.47 Şebekeden çekilen akımın yarım periyodu

Şekil 3.47’de şebekeden çekilen akımın yarım periyodu görülmektedir. Şebeke girişindeki akım ile kontrol devresindeki referans akım karşılaştırılır. Şebekedeki akım referans akımdan büyük ise anahtar açılır (OFF), küçük ise anahtar kapatılır (ON). Anahtarlamaı histerezis kontrolör yapmaktadır. Histerezis kontrolöre belirli bir tolerans akım değeri girilir. Bu tolerans akım değeri şebekeden çekilen akım sinüsü takip ederken oluşturduğu bant genişliğini belirlemektedir. Bu değer ne kadar küçük girilirse ideal sinüse o kadar yaklaşılır fakat anahtarlama frekansı artacağından dolayı anahtarlama kayıpları da o oranda artmaktadır.



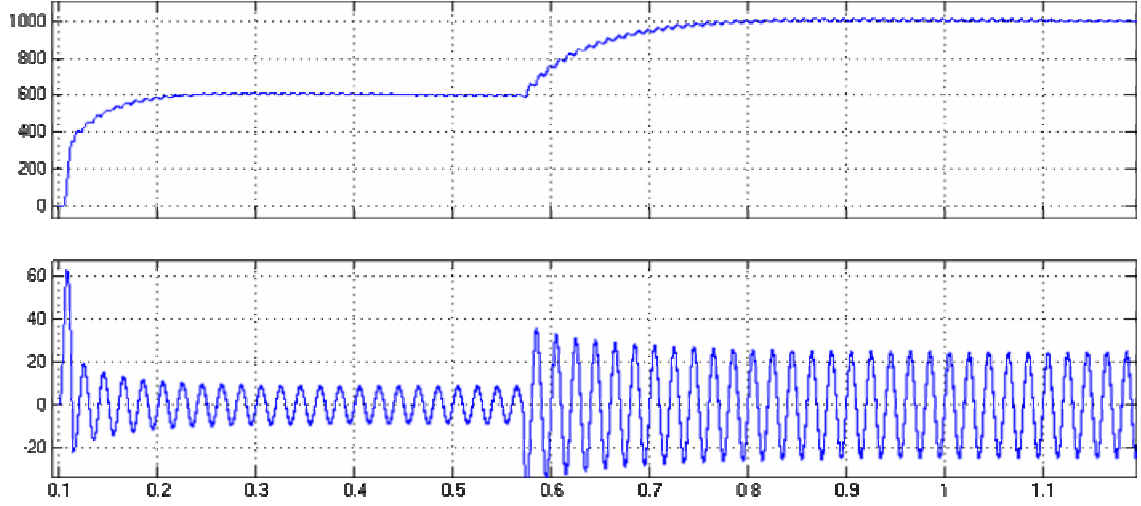
Şekil 3.48 Şebekeden çekilen akım ve gerilimin dalga şekli

Şekil 3.48’de şebekeden çekilen akımın dalga şekli, şebeke geriliminin dalga şekli, görülmektedir. Şekilden de görüldüğü gibi şebeke akımı ile gerilimi aynı fazdadır. 0.95’in üstünde olan güç faktörü ile maksimum güç transferi sağlanmaktadır ve bu değer güç faktörü düzeltilmeli doğrultucular için makul bir değerdir.

3.5.1 Referans Değişimlerine Sistemin Verdiği Tepki

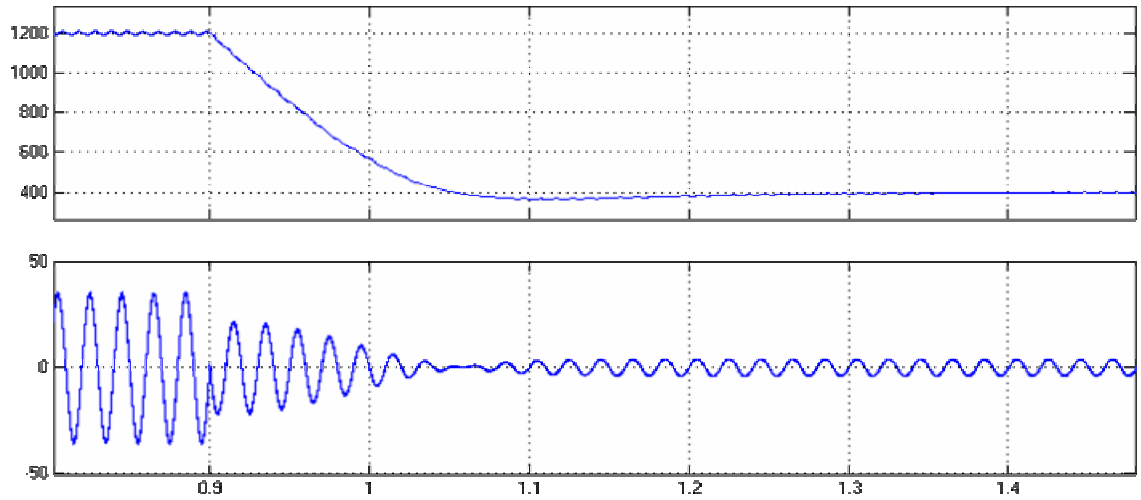
Kontrollü bir doğrultucuda verilen referans değer değiştirildiği zaman çıkış DC geriliminin yeni değere gelmesi belirli bir süre almaktadır. Bu süre devredeki elemanlar kadar PI kontrolün parametrelerine de bağlıdır. Bu çalışmada $K_p = 0.07$ $K_i = 0.7$ değerleri ile en iyi oturuş süresi ve şekli elde edilmiştir. Şekil 3.49’da yükseltilen referans değişimlerine göre DC

çıkış gerilim eğrisi elde edilmiştir. 0V'dan 600V'a ve devamında 600V'dan 1000V'a çıkış uygulaması yapılmıştır.



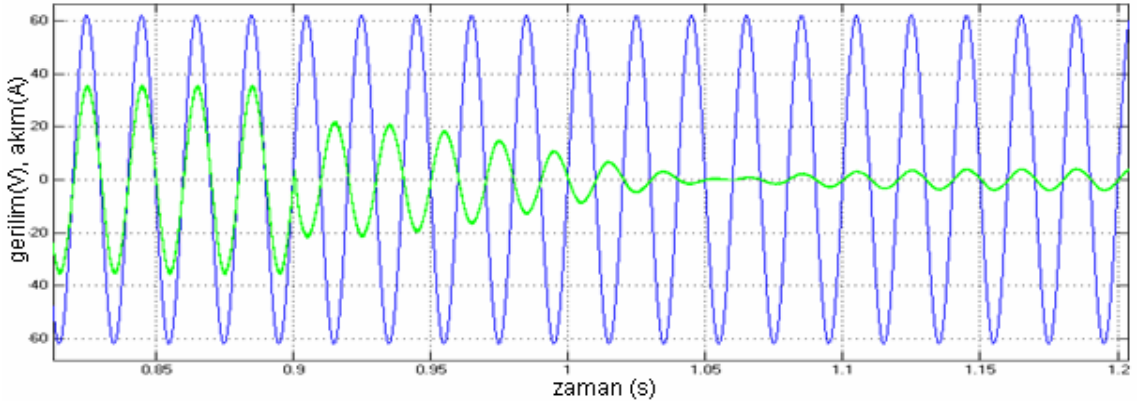
Şekil 3.49 Çıkış gerilimi ve şebeke akımı (0V-600V,600V-1000V)

Doğrultucunun düşürülen referansa karşı tepkisini incelemek için ikinci bir uygulama olarak referans 1200V'dan 400V'a düşürülmüştür. Bu değişime sistemin verdiği tepki Şekil 3.50'de DC gerilim çıkışı ve şebeke akımı olmak üzere görülmektedir.



Şekil 3.50 DC çıkış gerilimi ve şebeke akımı (1200V-400V)

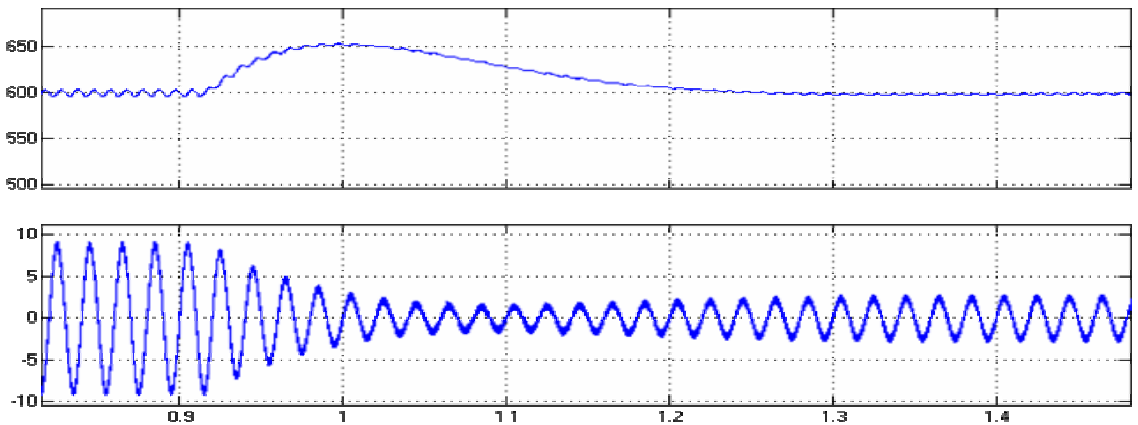
Referans gerilim düşürülürken 0.9 ve 1.06 saniyeleri arasında şebekeye geri akım verilmiştir. Daha önce yaklaşık olarak 1 olan güç faktörü -1'e kaymıştır. Gerilimle aynı fazda olan şebeke akımı düşüş sırasında 180 derece kaymıştır. Bu olay Şekil 3.51'de açıkça görülmektedir. Çift yönlü güç aktarımı bu çalışmada doğrulanmıştır. Bu özellik DC çıkış geriliminin düşüş sırasında istenilen referans değere daha çabuk ulaşmasını sağlamaktadır.



Şekil 3.51 Şebeke gerilimi ve akımı

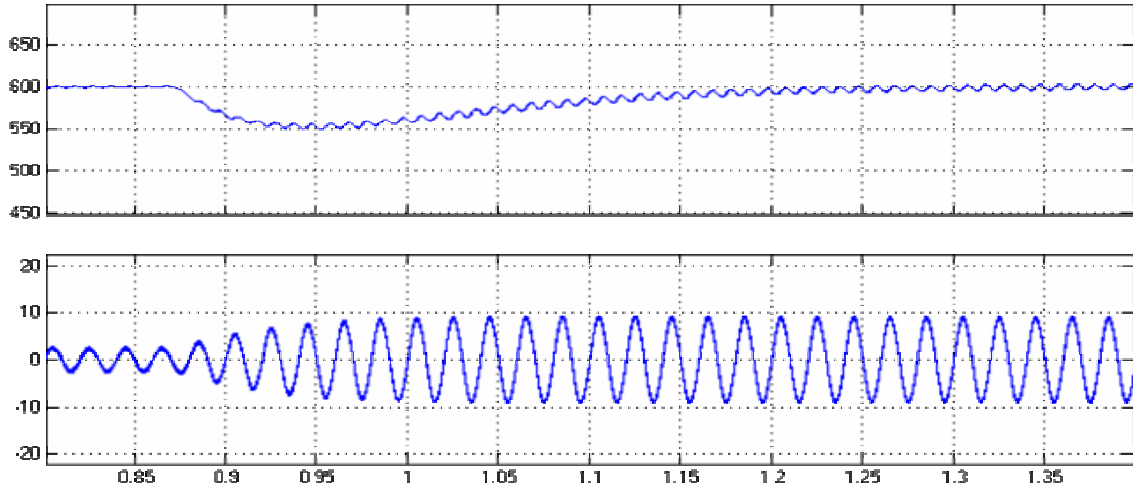
3.5.2 Yük Değişimlerine Sistemin Verdiği Tepki

Tam köprü doğrultucunun yük değişimlerine verdiği tepkiyi görmek için yük azaltma ve çoğaltma uygulamaları yapılmıştır. Şekil 3.52'de yük 270Ω 'dan 1000Ω 'a değiştirilirken çıkış gerilimi ve şebekeden çekilen akım görülmektedir. Bu uygulama sabit 600V DC çıkışta yapılmıştır.



Şekil 3.52 Yükün 270Ω 'dan 1000Ω 'a değiştirilmesi sırasında çıkış gerilimi ve şebeke akımı

Yük üstündeki gerilimi sabit tutmak için $V = I \cdot R$ denklemine göre R (direnç) arttığında I 'nın (akım) azalması gerekmektedir. R aniden değişirse devredeki indüktans ve PI kontrolör gecikmesi sebebiyle I aynı anda değişemez. Bu sebeplerden dolayı akım referans değere gelene kadar gerilimde ani bir artış olur. Bu artış Şekil 3.52'de görülmektedir. Artış miktarı 50V kadardır ve çok kısa sürelidir.



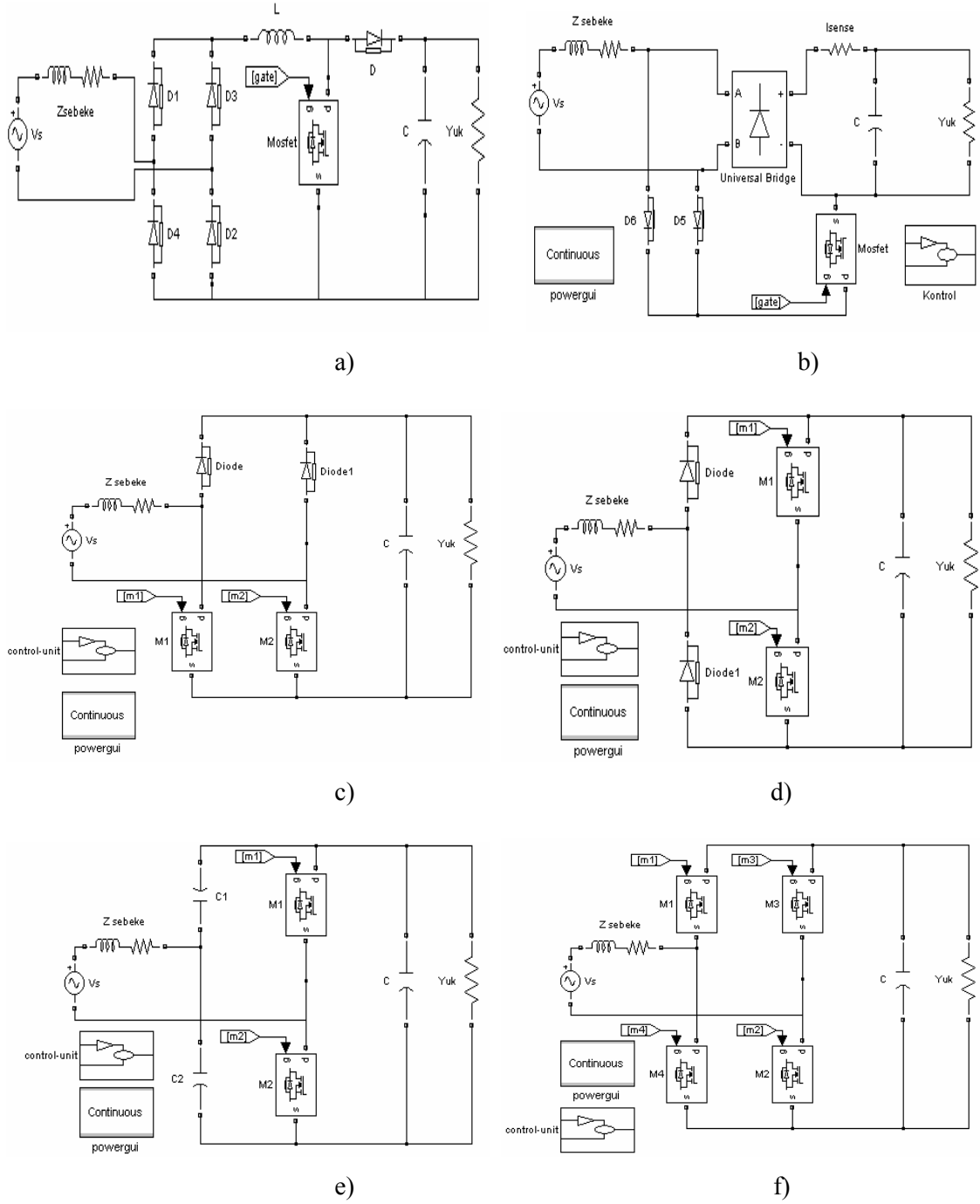
Şekil 3.53 Yükün 1000Ω 'dan 270Ω 'a değiştirilmesi sırasında çıkış gerilimi ve şebeke akımı

İkinci bir uygulama olarak yük 1000Ω 'dan 270Ω 'a değiştirilmiş ve Şekil 3.53'teki DC çıkış gerilimi ve şebeke akımı elde edilmiştir. Sabit V gerilimi için $V = I \cdot R$ denklemine göre R azaldığı için I 'nın artması gerekmektedir. I devredeki indüktans, PI kontrolör gecikmesi sebepleri ile aniden artmaz. Bu sebeple yük üstünde ani bir gerilim düşümü meydana gelmektedir. Yaklaşık olarak 50V azalan DC çıkış geriliminin kısa bir sürede eski konumuna geldiği Şekil 3.53'te görülmektedir.

4. PERFORMANS ANALİZİ VE DEĞERLENDİRMELER

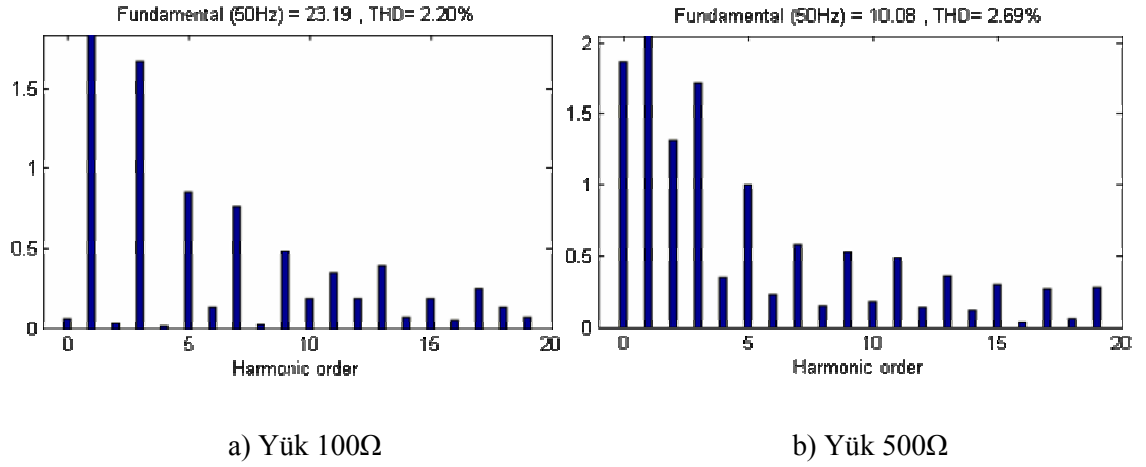
Bu bölümde Matlab/Simulink programında hazırlanan güç faktörü düzeltmeli doğrultucuların performans değerlendirmesi yapılmıştır. Bu doğrultucular bir fazlı yükseltici tip doğrultucu, modifiyeli yükseltici tip doğrultucu, yarı köprü doğrultucu, çift yönlü güç aktarımlı yarı köprü doğrultucu, tam köprü doğrultucudur. Bu doğrultucular güç elektroniği uygulamalarında yüksek verimlilik, yüksek güç faktörü, yüksek enerji kalitesi sayesinde yaygın şekilde kullanılmaktadır. Bu beş doğrultucu tasarımının tümü yükseltici tiptedir. Yükseltici tip doğrultucular AC giriş geriliminin pik değerinden daha büyük bir DC çıkış gerilimi elde etmektedir. Yükseltici tip doğrultucu düşürücü tip doğrultucuya oranla daha çok tercih edilmektedir[10]. Çünkü düşürücü tip doğrultucunun önemli bir dezavantajı vardır. Düşürücü tip doğrultucu AC giriş geriliminin pik değerinden daha küçük bir DC gerilim elde etmektedir. Fakat anlık giriş gerilimi çıkış geriliminden düşük olduğu anda şebeke akımı sifıra düşer ve bu düşüş akımdaki THD (toplam harmonik bozulma) miktarını önemli ölçüde arttırmaktadır. Ayrıca düşürücü tip doğrultucuların girişine konan filtrenin tasarımı zordur ve doğrultucunun çalışmasına sınırlı bir yarar sağlamaktadır[11]. Yükseltici tip doğrultucularda ise indüktanstan geçen akımı uygun akım kontrol yöntemleriyle kontrol etmek daha kolaydır.

Şekil 4.1'de incelenen doğrultucu tipleri görülmektedir. Kontrol kolaylığı ve ekonomik olması sebebiyle en çok tercih edilen doğrultucu Şekil 4.1.a'da görülen bir fazlı yükseltici tip doğrultucudur. Son yapılan çalışmalarda bu doğrultucunun düşük verimli ve az güvenilir olduğu öne sürülmüştür. Şekil 4.1.b'de ise modifiyeli yükseltici tip doğrultucu görülmektedir. Bu doğrultucu bir fazlı yükseltici tip doğrultucuya göre daha verimlidir çünkü akım yolundaki yarı iletken eleman sayısı düşürülmüştür. Şekil 4.1.c ve Şekil 4.1.d'de simetrik ve asimetrik yarı köprü doğrultucu görülmektedir. İki doğrultucunun da çalışma prensibi aynıdır. Bu doğrultucular azaltılmış akımdaki THD ve yüksek verimlilik sunmaktadırlar. Şekil 4.1.e'deki çift yönlü güç aktarımlı yarı köprü doğrultucu ise çift yönlü iletim gereken bazı uygulamalarda ise daha verimli ve daha performanslı çalışmaktadır. Şekil 4.1.f'deki tam köprü doğrultucu ise çift yönlü enerji iletimi sayesinde batarya şarj ve UPS gibi sistemlere uygundur[2]. Yüksek verim ve güvenilirlik sunmaktadır.

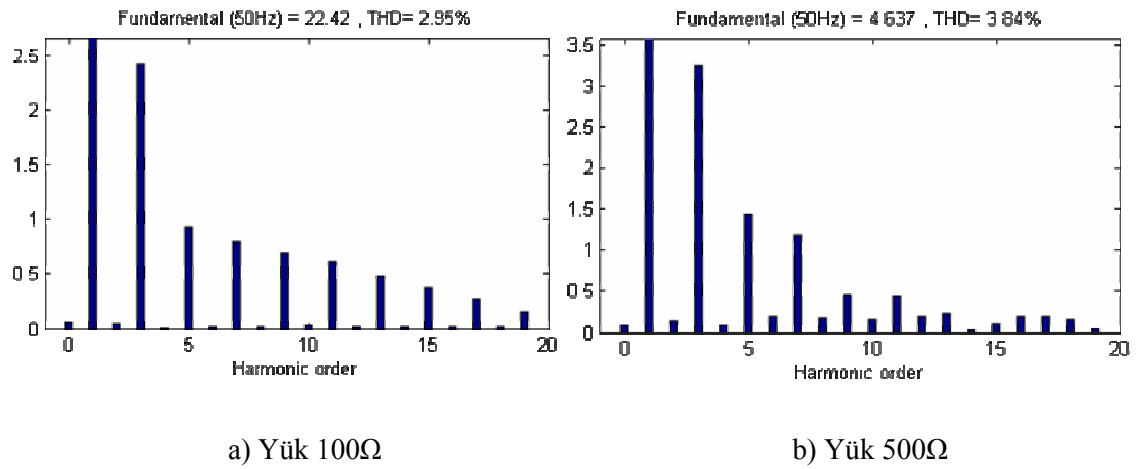


Şekil 4.1 a) Bir fazlı yükseltici tip doğrultucu b) Modifiyeli yükseltici tip doğrultucu
 c) Simetrik yarı köprü doğrultucu d) Asimetrik yarı köprü doğrultucu
 e) Çift yönlü güç aktarımlı yarı köprü doğrultucu f) Tam köprü doğrultucu

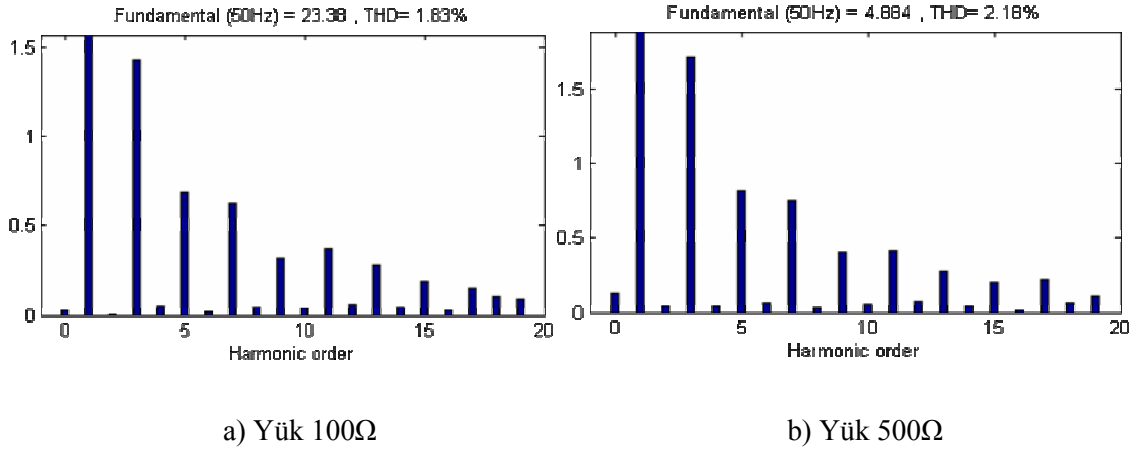
Doğrultucuların performansları ağır ve hafif yük altında incelenmiştir. İncelenen doğrultucu tiplerinin hepsinde standartların altında akım THD'si ve yüksek güç faktörü değerleri elde edilmiştir. Yük olarak 100Ω gibi ağır bir yük ve daha sonra 500Ω gibi hafif bir yük doğrultuculara uygulanmıştır. Ağır ve hafif yükte doğrultucuların şebekeden çektiği akımdaki harmonikler ve THD bir fazlı yükseltici tip doğrultucu için Şekil 4.2'de, modifiyeli yükseltici tip doğrultucu için Şekil 4.3'te, yarı köprü doğrultucu için Şekil 4.4'te, çift yönlü güç aktarımlı yarı köprü doğrultucu için Şekil 4.5'te, tam köprü doğrultucu için Şekil 4.6'da verilmiştir.



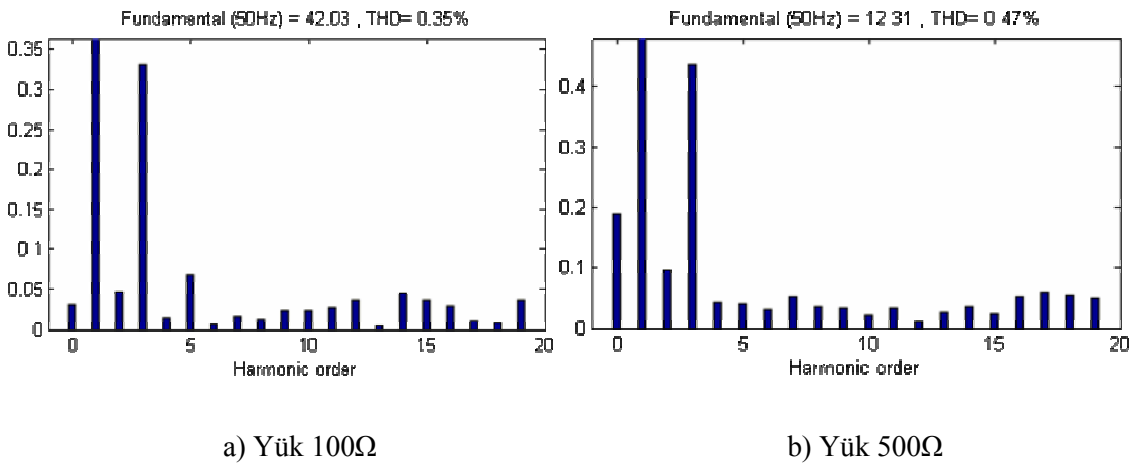
Şekil 4.2 Bir fazlı yükseltici tip doğrultucunun şebekeden çektiği akımdaki harmonikler ve THD



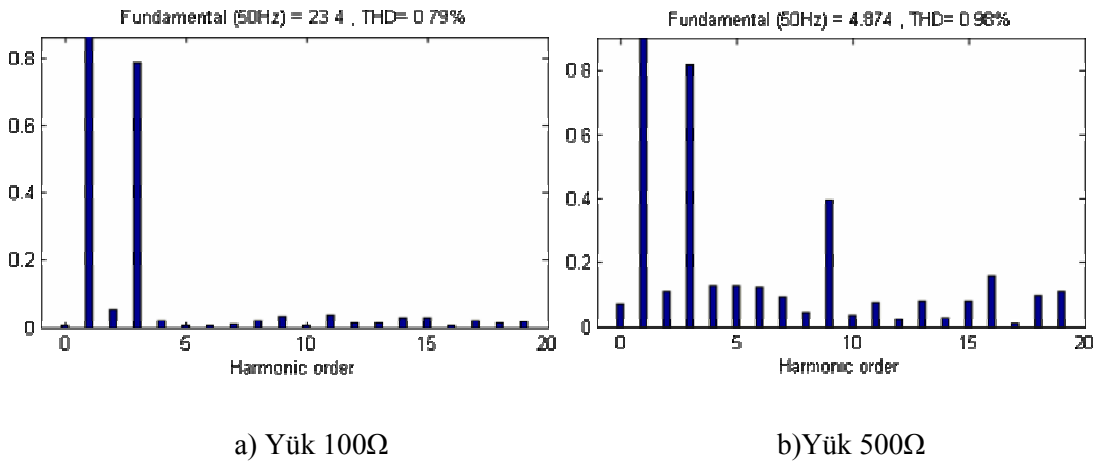
Şekil 4.3 Modifiyeli yükseltici tip doğrultucunun şebekeden çektiği akımdaki harmonikler ve THD



Şekil 4.4 Yarı köprü doğrultucunun şebekeden çektiği akımdaki harmonikler ve THD



Şekil 4.5 Çift yönlü yarı köprü doğrultucunun şebekeden çekilen akımdaki harmonikler ve THD



Şekil 4.6 Tam köprü doğrultucunun şebekeden çektiği akımdaki harmonikler ve THD

Şebeke akımındaki THD, yük değişiminde DC çıkış geriliminde oluşan iniş-çıkış ve yine yük değişiminde DC çıkış geriliminin eski değerine oturma sürelerine bakılmıştır. Elde edilen değerler Tablo 4.1’de verilmiştir.

Doğrultucu	THD(%)		Çıkış Gerilimi(%V)		Oturma Zamanı(ms)	
	100Ω	500Ω	Yükseliş	Düşüş	Yük↑	Yük↓
Bir fazlı yükseltici tip	2.03	2.37	10	9	73	83
Modifiyeli yükseltici tip	3.01	3.30	10	9	50	85
Yarı köprü	1.76	2.20	8	8	54	60
Çift yönlü güç aktarımlı yarı köprü	0.36	0.77	13	11	79	55
Tam köprü	0.79	1.01	5	5	42	34

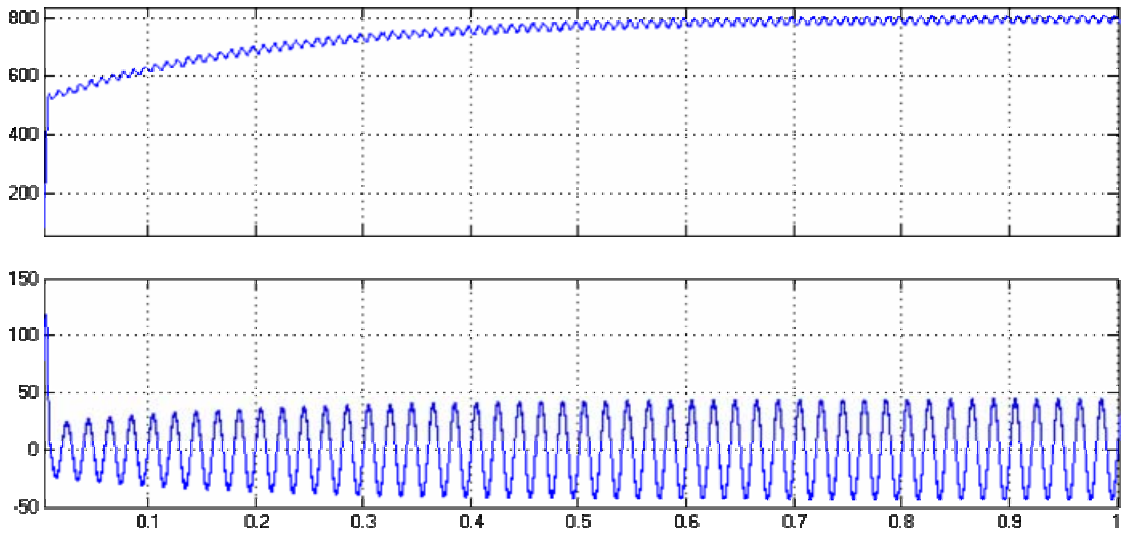
Çizelge 4.1 Performans tablosu

Tablo 4.1’deki en düşük THD miktarına çift yönlü güç aktarımlı yarı köprü doğrultucu ve tam köprü doğrultucu ulaşmıştır. Yük değişiminde en çabuk toparlanmayı tam köprü doğrultucu yapmıştır. Ayrıca yük değişimi de DC çıkış geriliminde oluşan iniş-çıkış değerleri en az olan doğrultucular tam köprü ve yarı köprü doğrultuculardır. Şebekeden çekilen akımdaki THD önemli bir parametredir ve belirli standartları vardır. Bu standartlar EN 61000-3-2, IEEE 519-1992 ve IEC 1000 standartlarıdır([1],[5]). Tablo 4.1’de elde edilen akımdaki THD miktarları standartlara uygun çıkmıştır.

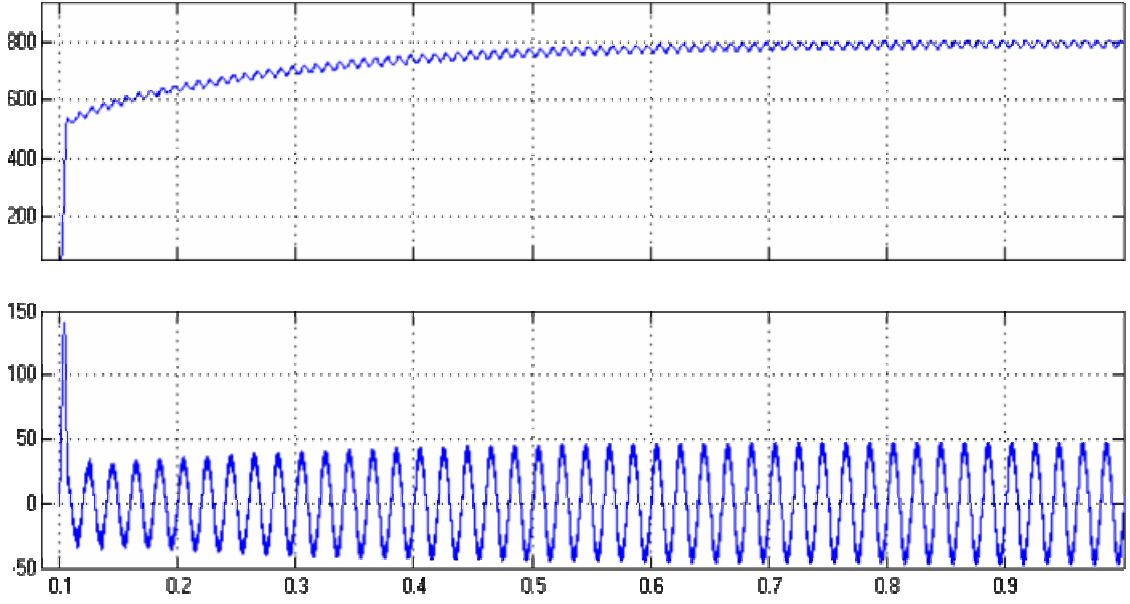
Doğrultucu	Anahtar sayısı	Diyot Sayısı	Güç yolundaki yarı iletken sayısı	Güç akışı
Bir fazlı yükseltici tip	1	6	3	Tek yön
Modifiyeli yükseltici tip	1	7	2	Tek yön
Yarı köprü	2	4	2	Tek yön
Çift yönlü güç aktarımlı yarı köprü	2	2	1	Çift yön
Tam köprü	4	4	2	Çift yön

Çizelge 4.2 Doğrultucu topolojileri

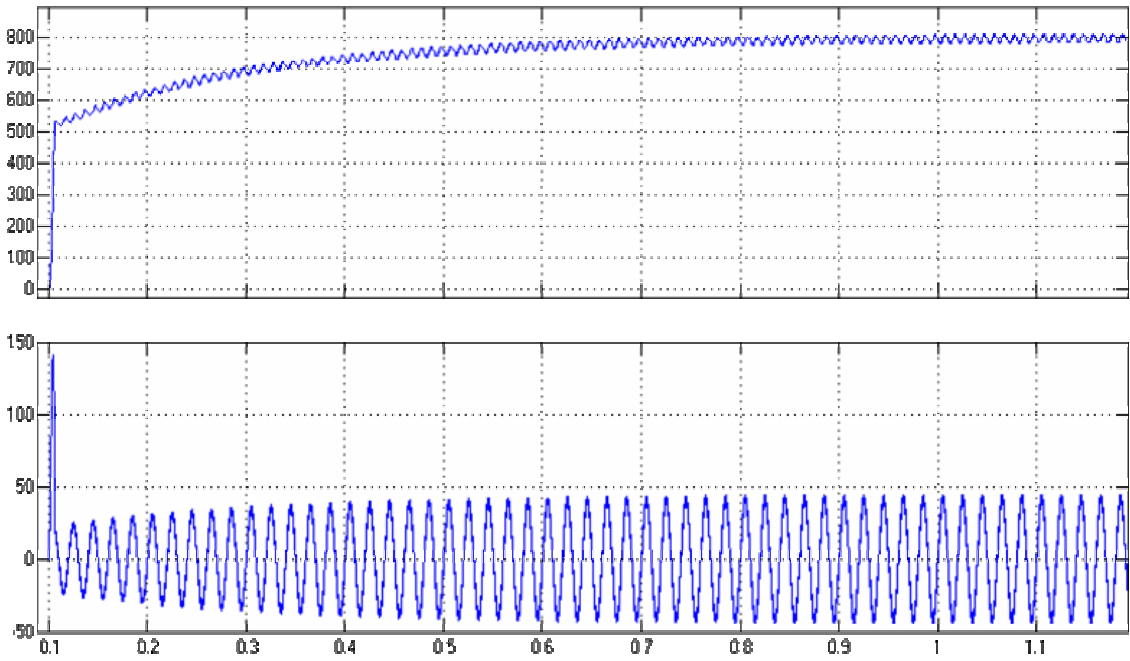
Tablo 4.2’de ise doğrultucuda bulunan yarı iletken anahtar sayıları, diyot sayıları, güç akış yolundaki yarı iletken sayısı ve güç akış yönü verilmiştir. Yarı iletken anahtar sayısı ne kadar az ise maliyet de buna bağlı olarak az olmaktadır. Verimin ve güvenilirliğin yüksek olması için ise güç akış yolundaki yarı iletken eleman sayısının az olması gerekmektedir[4]. Böylece iletim kayıpları azalmış olmaktadır. Bu yönden Tablo 4.2’ye bakılırsa en verimli doğrultucu çift yönlü güç aktarımlı doğrultucu en verimsizi ise bir fazlı yükseltici tip doğrultucu olarak gözükmektedir.



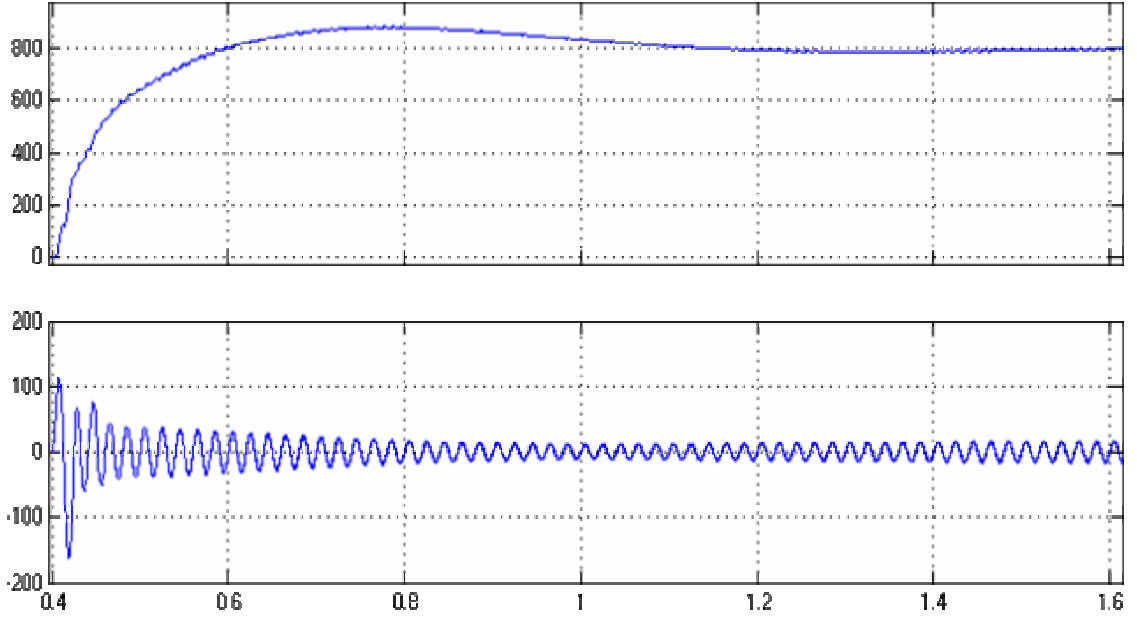
Şekil 4.7 Bir fazlı yükseltici tip doğrultucunun çıkış gerilimi ve şebeke akımı



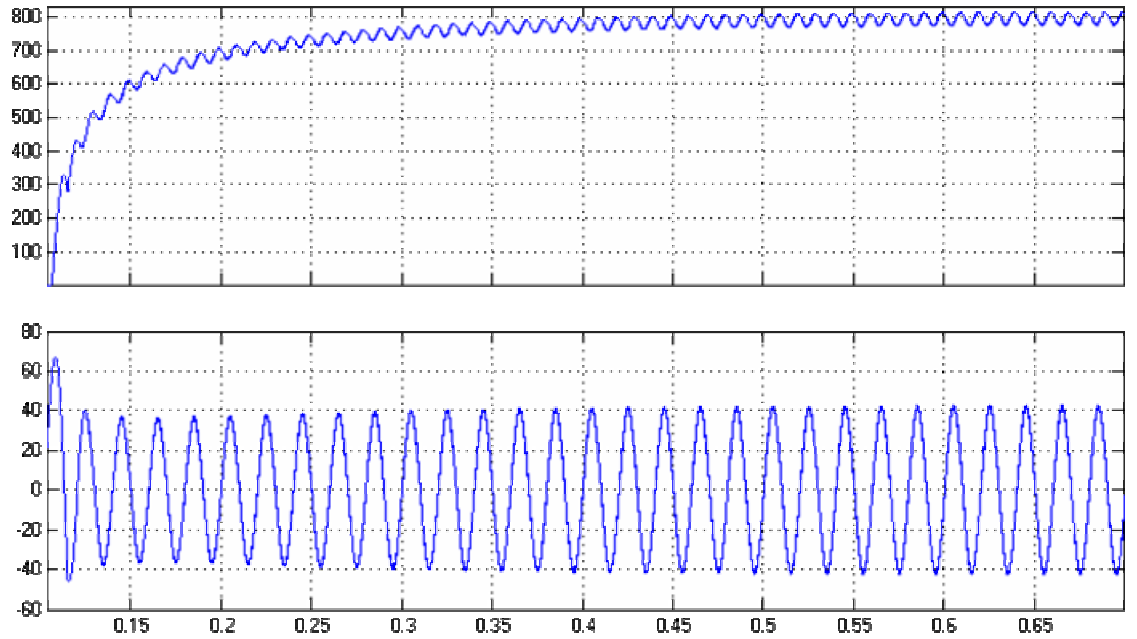
Şekil 4.8 Modifiyeli yükseltici tip doğrultucunun çıkış gerilimi ve şebeke akımı



Şekil 4.9 Yarı köprü doğrultucunun çıkış gerilimi ve şebeke akımı



Şekil 4.10 Çift yönlü güç aktarımlı yarı köprü doğrultucunun çıkış gerilimi ve şebeke akımı



Şekil 4.11 Tam köprü doğrultucunun çıkış gerilimi ve şebeke akımı

Doğrultucuların performansları incelenirken verilen referansa ulaşma süreleri de incelenmiştir. 0V'dan 800V'a ulaşma sırasında Şekil 4.7'de bir fazlı yükseltici tip doğrultucunun, Şekil 4.8'de modifiyeli yükseltici tip doğrultucunun, Şekil 4.9'da yarı köprü doğrultucunun, Şekil 4.10'da

çift yönlü güç aktarımlı yarı köprü doğrultucunun, Şekil 4.11’de tam köprü doğrultucunun şebekeden çektiği akım ve DC çıkış gerilimi verilmiştir. DC çıkış gerilim dalgalanmasını azaltmak için doğrultucuların çıkışına yüksek değerli kapasiteler bağlanmaktadır. Bu kapasiteler ilk anda şebekeden yüksek değerde pik akımı çekerler. Simülasyonda yapılan bu doğrultucu tasarımları gerçekleşmek istenirse bu pik akımları için gerekli koruma işlemleri yapılmalıdır. Bu ani çekilen yüksek akım doğrultucuda bulunan diyot ve mosfet gibi yarı iletken elemanları yakabilmektedir. Tablo 4.3’te bir fazlı yükseltici tip doğrultucu, modifiyeli yükseltici tip doğrultucu, yarı köprü doğrultucu, çift yönlü güç aktarımlı yarı köprü doğrultucu ve tam köprü doğrultucunun 0V’dan 800V’a ulaşma süreleri verilmiştir.

Doğrultucu	0V’dan 800V’a oturma süresi
Bir fazlı yükseltici tip	0.85s
Modifiyeli yükseltici tip	0.95s
Yarı köprü	1.19s
Çift yönlü yarı köprü	1.6s
Tam köprü	0.7s

Çizelge 4.3 Doğrultucuların verilen referansa oturma süreleri

Bir fazlı yükseltici tip doğrultucu tek yönlü güç aktarımı gereken yerlerde en ekonomik çözümü sunmaktadır. Çünkü üzerinde sadece bir anahtar vardır. İletim kayıplarının biraz daha az olması istenen uygulanmalarda modifiyeli yükseltici tip doğrultucu kullanılabilir. Bu uygulamalar bilgisayar güç kaynakları, elektronik balastlar vb. uygulamalardır. Tek yönlü güç aktarımı gereken ve verimin daha da yüksek olması istenen yerlerde yarı köprü doğrultucu kullanılabilir. Çift yönlü güç aktarımı gereken UPS, batarya şarj vb. uygulamalarda çift yönlü güç aktarımlı yarı köprü doğrultucu kullanılmaktadır. Tam köprü doğrultucu da yapısı itibariyle çift yönlü güç aktarımına izin vermektedir. Dinamik cevabı oldukça yüksek olan bu doğrultucular küçük güçlü DC motor uygulamaları, batarya şarj, UPS gibi uygulamalarda rahatlıkla kullanılabilir.

5. SONUÇ VE ÖNERİLER

Günümüzde elektrik enerjisinin tüketim miktarı sanayileşme ve teknolojinin gelişmesi ile oldukça artmıştır. Buna karşılık üretilen enerji sınırlıdır. Bu yüzden yeni enerji kaynakları bulmanın yanında elektrik enerjisini verimli kullanmanın önemi de gittikçe artmıştır.

Teknoloji geliştikçe elektrik enerjisini kullanan cihazlar da gelişmiştir. Resistif ısıtıcılar, akkor lamba vb. lineer yüklerin yanında elektronik balastlı floresan lamba, bilgisayarlar, motor sürücüler gibi lineer olmayan yükler yaygın şekilde kullanılmaya başlanmıştır. Lineer yükler saf direnç özelliği gösterir ve şebekeden reaktif güç çekmezler, lineer olmayan yükler ise şebekeden aktif güç yanında reaktif güç de çekmektedirler. Çekilen bu reaktif gücün hiçbir yararı yoktur ve şebekeyi gereksiz yere yükleyerek enerjinin boşa harcanmasına sebebiyet vermektedir. Bu yüzden enerji şirketleri belli bir limitin üstünde çekilen reaktif güç için cezalı tarife uygulamaktadır[14].

Reaktif güç çeken devrelerin güç faktörü düşüktür[13]. Düşük güç faktörünün iki sebebi vardır. Birincisi devredeki kapasite veya indüktans sebebi ile oluşan düşük güç faktörü, ikincisi ise kontrolsüz doğrultucuların oluşturduğu düşük güç faktörüdür. Birincisinde şebekeden çekilen akım sinüs fakat fazı gerilim ile aynı değildir. Bu tür düşük güç faktörünü yükseltmek kolaydır. Devrenin kapasitif veya indüktif özellik göstermesiyle oluşan bu durum kompanzasyonla düzeltilebilir. Fakat asıl zor olan kontrolsüz doğrultucuların oluşturduğu düşük güç faktörünü düzeltmektir. Burada şebekeden çekilen akım şebeke gerilimi ile aynı fazdadır ama dalga şekli ideal sinüsten oldukça uzaktır. Doğrultucu çıkışına bağlı yüksek değerli kapasite sebebi ile akım darbelidir ve istenmeyen harmonik bileşenleri içermektedir. Kontrolsüz doğrultucu içeren güç elektroniği uygulamalarında görülen bu durumu düzeltmek için aktif filtre kullanılıyordu[18]. Son yıllarda pahalı ve tasarımı zor olan bu yöntemin yerine kontrollü elemanlar kullanarak doğru kontrol yöntemi ile şebekeden sinüsoidal akım çeken (güç faktörü düzeltmeli) doğrultucular tasarlanmaya başlamıştır.

Anahtarlamalı güç kaynakları, elektronik balastlar vb. lineer olmayan elemanlar gibi kontrolsüz doğrultucular da önemli bir harmonik kaynağıdır[11]. Bu harmoniklerden aynı şebekeye bağlı diğer kullanıcıların cihazları da olumsuz yönde etkilenmektedir. Harmonikler şebeke geriliminin sinüs şeklinde bozulmalar meydana getirmektedir. Bu da aynı şebekeye bağlı ölçüm cihazları, medikal cihazlar, mikroişlemcili sistemler ve bilgisayarlar gibi hassas cihazların yanlış çalışmasına veya hiç çalışmamasına sebep olmaktadır. Harmonikler şebeke enerji kalitesini düşürmektedir. Üç fazlı doğrultucular 3 ve 3'ün katları tek harmonikleri ve çift

harmonikleri üretmezken bir fazlı doğrultucular çift harmonikler hariç diğer bütün harmonikleri üretmektedir. Harmonikler güç kayıplarının artmasına, kuvvetli elektromanyetik gürültüye, trafolarla ısınmaya, üç fazlı sistemlerde nötr iletkeninden fazla akım akmasına sebebiyet vermektedirler[16]. Ayrıca kompanzasyon panolarındaki kondansatörler ile rezonansa girerek arızalanmalarına yol açmaktadırlar. Güç faktörü düzeltmeli doğrultucular şebekeden gerilimle aynı fazda ve dalga şeklinde akım çektikleri için bu doğrultucular harmonik sorununa da çözüm getirmektedir.

Bu çalışma güç elektroniğinde sık kullanılan AC/DC dönüşüm yapan güç faktörü düzeltmeli doğrultucular tasarlanmıştır. Tasarım; gerçeğe uygunluğu, hazır standart kütüphaneleri, simülasyon hızı sebebi ile yaygın şekilde kullanılan ve kabul gören Matlab/Simulink programında yapılmıştır.[7].

Çalışmaya bir fazlı yükseltici tip doğrultucunun tasarımı ile başlanmıştır. Daha sonra sırasıyla modifiyeli yükseltici tip doğrultucu, yarı köprü doğrultucu, çift yönlü güç aktarımlı yarı köprü doğrultucu ve tam köprü doğrultucunun tasarımı yapılmıştır. Beş tip doğrultucuda da güç faktörü düzeltme işlemi benzer şekilde yapılmaktadır. Doğrultucular verilen referans değere göre regüleli DC çıkış gerilimi üretmektedir. Bunun için yük üstünden alınan gerilim örneği PI kontrolöre verilmektedir. Simülasyon sonuçlarında elde edilen değerlere göre PI kontrolörün dinamik cevabının bu tür doğrultucu uygulamaları için yeterli olduğu görülmüştür. Doğrultularda akım kontrolü histerezis kontrolör veya PWM kontrolör ile yapılmıştır. Histerezis kontrolör PWM kontrolöre göre daha iyi performans göstermiştir. Ama PWM kontrolörün avantajı ise sabit anahtarlama frekansına sahip olması bunun da kullanıcı tarafından ayarlanabilmesidir.

Doğrultucuların girişinden alınan gerilim örneği aynı gerilimin pik değerine bölünerek birim sinüs sinyali elde edilmektedir. Bu sinyal bazı doğrultucularda mutlak değeri alınarak kullanılmıştır. Birim sinüs sinyali ile PI hata kontrolörü çıkışı çarpılarak referans akım değeri bulunmaktadır. Referans akım doğrultucuda DC tarafta veya AC tarafta bulunan indüktanstan geçen akımla referans akım değeri karşılaştırılır ve akım kontrolörüne verilir. Akım kontrolü de doğrultuculardaki anahtarlama elemanlarına gerekli olan anahtarlama sinyallerini üretmektedir.

Simülasyonlar sonucu bir fazlı yükseltici tip doğrultucu, modifiyeli yükseltici tip doğrultucu, yarı köprü doğrultucu, çift yönlü güç aktarımlı yarı köprü doğrultucu ve tam köprü doğrultucu da yüksek güç faktörü ve düşük akım THD (toplam harmonik bozulma) oranlarına ulaşılmıştır. Bu değerler EN 61000-3-2, IEEE 519-1992 ve IEC 1000 standartlarına uygun

çıkıştır[1]. Doğrultucuların şebekeden çektiği akımın dalga şekli ideal sinüse çok yakın ve şebeke gerilimi ile yaklaşık aynı fazdadır.

Doğrultucuların performansları ağır ve hafif yükler altında incelenmiştir. Ağır ve hafif yükler için şebekeden çekilen THD oranlarına, bu değişim sırasındaki referansa tekrar oturma zamanlarına ve DC çıkış gerilimindeki artma ve azalma miktarlarına bakılmıştır. Her bir doğrultucunun karakteristiği farklıdır ve buna bağlı olarak değişen yüklere karşı gösterdiği tepki de farklıdır. PI parametreleri ayarlanarak doğrultucu karakteristikleri optimize edilmiştir. Beş tip doğrultucuya aynı yük altında aynı referans gerilim değeri verilmiş ve sıfırdan verilen referans gerilim değerine oturması sırasındaki şebekeden çekilen akım, DC çıkış gerilimi ve oturma zamanlarına bakılarak performansları karşılaştırılmıştır.

Bu çalışmada doğrultucularda yük olarak sadece resistif yük kullanılmıştır. İleride yapılacak çalışmalarda indüktif yük tepkisi incelenerek DC motor uygulamalarında kullanılması önerilebilir. Ayrıca bu doğrultucular üç fazlı uygulamalara uyarlanarak daha yüksek güç seviyesi ve daha iyi performans elde edilebilir.

KAYNAKLAR DİZİNİ

- [1] Keyve Smedley, Changuing Qiao “Develop a Single Phase Power Factor Connection Control Chip” University of California 1998
- [2] Bhim Singh, Ambrish Chandra “A review of Single-Phase Improved Power Quality AC/DC Converters” IEEE Transactions on Industrial Electronics, Vol 50, 2003
- [3] Edvardo Mendes, Romeo Ortega “An Experimental Comparison of Several PWM Controllers for a Single Phase AC/DC Converter”
- [4] Ashish Pandey & et all, “Modelling and Simulation of Power Factor Corrected AC/DC Converters” International Journal of Electrical Engineering Education 41/3
- [5] Ashish Pandey & et all, “Comparative Evaluation of Single-Phase Unity Power Factor AC/DC Boost Converter Topologies” Vol 85, 2004
- [6] Simon Wall, Robin Jackson, “Fast Controller Design For Single Phase Power Correction Systems” IEEE Transactions an Industrial Electronics, Vol 44, 1997
- [7] The Mathworks Inc, “Using Simulink Version 7”, 2004
- [8] Dugan, R.C, Mc Granaghan, M.F. and Beaty, H.W.(1996) “Electrical Power Systems Quality, McGraw-Hill
- [9] Oscar Garcia & et all, “Single Phase Power Factor Correction: A Survey” IEEE Transactions an Industrial Electronics, Vol 18, 2003
- [10] Application Note 42047 “Power Factor Correction Basics” www.fairchildsemi.com
- [11] Vlad Grigone “Topological Issues in Single-Phase Power Factor Correction” Institute of Intelligent Power Electronics Publications Publication 6
- [12] Andreas Lindermann, “Rectifiers With Power Factor Correction” IXYS Semiconductor GmbH
- [13] App Note 513 “ Power Factor Correction” Invensys Lambda Inc.
- [14] Levent Pekcan, Berkan Metin “Güç Kaynaklarındaki PFC nedir?” Şubat 2004
- [15] Cyril W.Lander “Power Electronics” Mc Graw – Hill Book Company
- [16] Turgut Odabaşı “Üçüncü Harmoniğin Getirdiği Problem” Botaş BTC Proje Direktörlüğü
- [17] Ned Mohan, Tore M.Undeland Williams P.Robbins “Güç Elektroniği” Literatür Yayınevi
- [18] Juan W. Dixon, Jose M. Contardo, Luis A. Moran “A Fuzzy-Controlled Active Front End Rectifier With Current Harmonic Filtering Characteristics And Minimum Sensing Variables” IEEE Transactions an Industrial Electronics, Vol 14, 1999