

**T.C.
AKDENİZ ÜNİVERSİTESİ**



**DEĞİŞKEN YÜK UYUMLU BOOST DÖNÜŞTÜRÜCÜ TEMELLİ YENİ BİR
AKTİF GÜÇ FAKTÖRÜ DÜZENLEYİCİ KONTROL DEVRESİ TASARIMI**

Özgür ÇOBAN

**FEN BİLİMLERİ ENSTİTÜSÜ
ELEKTRİK-ELEKTRONİK MÜHENDİSLİĞİ
ANABİLİM DALI
YÜKSEK LİSANS TEZİ**

HAZİRAN 2022

ANTALYA

**T.C.
AKDENİZ ÜNİVERSİTESİ**



**DEĞİŞKEN YÜK UYUMLU BOOST DÖNÜŞTÜRÜCÜ TEMELLİ YENİ BİR
AKTİF GÜÇ FAKTÖRÜ DÜZENLEYİCİ KONTROL DEVRESİ TASARIMI**

Özgür ÇOBAN

**FEN BİLİMLERİ ENSTİTÜSÜ
ELEKTRİK-ELEKTRONİK MÜHENDİSLİĞİ
ANABİLİM DALI
YÜKSEK LİSANS TEZİ**

HAZİRAN 2022

ANTALYA

T.C.
AKDENİZ ÜNİVERSİTESİ
FEN BİLİMLERİ ENSTİTÜSÜ

**DEĞİŞKEN YÜK UYUMLU BOOST DÖNÜŞTÜRÜCÜ TEMELLİ YENİ BİR AKTİF
GÜÇ FAKTÖRÜ DÜZENLEYİCİ KONTROL DEVRESİ TASARIMI**

Özgür ÇOBAN
ELEKTRİK-ELEKTRONİK MÜHENDİSLİĞİ
ANABİLİM DALI
YÜKSEK LİSANS TEZİ

Bu tez 21/06/2022 tarihinde jüri tarafından Oybirliği ile kabul edilmiştir.

Doç. Dr. Hamza Feza CARLAK (Danışman)

Prof. Dr. Şükrü ÖZEN

Dr. Öğr. Üyesi Atilla DÖNÜK

ÖZET

DEĞİŞKEN YÜK UYUMLU BOOST DÖNÜŞTÜRÜCÜ TEMELLİ YENİ BİR AKTİF GÜÇ FAKTÖRÜ DÜZENLEYİCİ KONTROL DEVRESİ TASARIMI

Özgür ÇOBAN

Yüksek Lisans, Elektrik-Elektronik Mühendisliği Anabilim Dalı

Danışman: Doç. Dr. Hamza Feza CARLAK

Haziran 2022; 41 sayfa

Tez çalışmasında değişken çıkış yüküne sahip yükseltici tip dönüştürücü tabanlı güç faktörü düzeltim devreleri arasından, değişken çıkış yüküne sahip güç faktörü düzeltim devrelerinin, nominal çıkış gücünden daha düşük güçlerde meydana gelen güç faktörü düşümleri üzerine odaklanılmıştır. Değişken çıkış yüklerinde meydana gelen güç faktörü düşümü problemini çözmek için Değişken Yük Uyumlu Ortalama Akım Kontrolü ile Aktif Güç Faktörü Düzeltimi algoritması 400 V çıkış gerilimi ve 50-400 Watt çıkış yükü aralığı için geliştirilmiştir. Algoritma geliştirilirken, güç faktörü düzenleme devrelerinin iki temel problemi üzerinde durulmuştur. Bu problemlerden birincisi güç faktörü düzenleme devrelerinin sabit bir çıkış gücüne göre tasarlanmasıdır. Güç faktörü düzenleme devresinin sabit bir yük için tasarımı yapılırken güç faktörü düzenleme devresinin kontrol parametreleri sabit olan transfer fonksiyonuna göre belirlenir. Birçok güç faktörü düzenleme devresinde ise çıkış gücü zamanla değişmektedir. Bu durum transfer fonksiyonunun değişmesine, dolayısı ile kontrolcünün kötü performans sergilemesine neden olmaktadır. Belirtilen problemlerden ikincisi yükseltici bobin üzerindeki akımının düşük güçlerde sürekli akım modu ile kesintili akım modu arasında sürekli geçiş yapmasıdır. Bu durum karmaşık akım modu olarak ifade edilir ve güç faktörü düşümüne neden olur. Belirtilen problemler bir adet yapay zekâ eğri uydurma temelli oransal akım okuyucu ile çözülmüştür. Geliştirilen oransal akım okuyucu giriş akımını çıkış gücü / nominal güç oranında yükselterek transfer fonksiyonunu sabit tutmakta ve güç faktörü düşümünü önlemektedir. Yükseltici bobin ve devre elemanları seçimleri ile de devrenin çalışma modları arasındaki geçiş önlenmiş ve devrenin sürekli iletim modunda çalışması sağlanmıştır. Geliştirilen güç faktörü düzenleme algoritması ve literatürde var olan güç faktörü düzenleme algoritmaları Psim simülasyon ortamında gerçekleştirilerek karşılaştırması yapılmıştır. Elde edilen sonuçlar geliştirilen güç faktörü düzeltim algoritmasının sürekli akım modunda meydana gelen düşük güçlerde, güç faktörü düşümü problemini çözmede başarılı olduğunu göstermektedir.

ANAHTAR KELİMELER: Değişken Çıkış Yüğü, Eğri Uydurma, Güç Faktörü Düzeltimi, Sürekli Akım Modu, Yükseltici Dönüştürücü

JÜRİ: Doç. Dr. Hamza Feza CARLAK

Prof. Dr. Şükrü ÖZEN

Dr. Öğr. Üyesi Atilla DÖNÜK

ABSTRACT

DESIGN OF THE NEW VARIABLE LOAD COMPATIBLE BOOST CONVERTER BASED POWER FACTOR CORRECTION CONTROL CIRCUIT

Özgür ÇOBAN

Master, Department of Electrical-Electronics Engineering

Supervisor: Assoc. Prof. Dr. Hamza Feza CARLAK

June 2022; 41 pages

In the thesis study, it has been focused on the power factor reductions of the power factor correction circuits with variable output load, which are among the amplifier type converter-based power factor correction circuits with variable output load. In order to solve the power factor reduction problem that occurs at variable output loads, Variable Load Compatible Active Power Factor Correction with Average Current Control algorithm has been developed for 400 V output voltage and 50-400 Watt output load range. While developing algorithm, focused on two main problems of power factor correction circuits. The first of these problems is the design of power factor correction circuits produces for a constant output power. While designing the power factor correction circuit for a constant load, the control parameters of the power factor correction circuit are determined according to the constant transfer function. In many power factor correction circuits, on the other hand, the output power changes over time. This situation causes the transfer function to change, thus causing the controller to perform poorly. The second problem mentioned is that the current on the booster inductor constantly switches between the continuous current mode and the discontinuous current mode at low powers. This situation is referred to as the complex current mode and give rise to power factor reduction. Stated problems have been solved with an artificial intelligence curve fitting based proportional current reader. The developed proportional current reader keeps the transfer function constant by increasing the input current in the ratio of output power / rated power and prevents power factor reduction. The switching between the operating modes of the circuit has been prevented and operation of the circuit in continuous current mode has been provided with the selection of booster inductor and circuit elements. Improved power factor correction algorithm and power factor correction algorithms which exist in literature have been implemented in the Psim simulation environment and compared. The results show that the developed power factor correction algorithm is successful in solving the power factor reduction problem at low power in continuous current mode.

KEYWORDS: Boost Converter, Continuous Current Mode, Curve Fitting, Power Factor Correction, Variable Output Load

COMMITTEE: Assoc. Prof. Dr. Hamza Feza CARLAK

Prof. Dr. Şükrü ÖZEN

Asst. Prof. Dr. Atilla DÖNÜK

ÖNSÖZ

Bu tez çalışması Akdeniz Üniversitesi Fen Bilimleri Enstitüsü Elektrik – Elektronik Mühendisliği Anabilim Dalı’nda Yüksek Lisans tezi olarak yapılmıştır. Bu çalışma; yüksek lisans eğitimimde ve tezimde maddi manevi tüm desteği gösteren ve akademik olarak yol göstericim olan ilk tez danışmanım rahmetli Dr. Öğr. Üyesi Yavuz USER’e ithafen yazılmıştır.

Bu tez çalışmasında yer alan ve önerileri ile katkıda bulunan değerli tez danışmanı hocam Doç. Dr. Hamza Feza CARLAK’ a şükran ve saygılarımı sunarım.

Eğitim-Öğretim hayatım boyunca bana her zaman destek olan, her zaman arkamda olduklarını hissettiren değerli aileme ve varlıkları ile bana güç veren sevgili arkadaşlarıma teşekkürlerimi sunarım.



İÇİNDEKİLER

ÖZET.....	i
ABSTRACT.....	ii
ÖNSÖZ	iii
AKADEMİK BEYAN	v
SİMGELER VE KISALTMALAR.....	vi
ŞEKİLLER DİZİNİ.....	viii
ÇİZELGELER DİZİNİ	x
1. GİRİŞ	1
2. KAYNAK TARAMASI	3
3. MATERYAL VE METOT	6
3.1. Güç Faktörü Düşümü	6
3.2. Güç Faktörü Düzeltimi	8
3.2.1. Pasif filtre temelli güç faktörü düzenleme devresi	8
3.2.2. Aktif filtre temelli güç faktörü düzenleme devresi.....	9
3.2.3. DC-DC dönüştürücü temelli güç faktörü düzenleme devreleri	10
3.3. Arttırıcı Tip DC-DC Dönüştürücü Temelli Güç Faktörü Düzeltimi.....	11
3.3.1. Değişken frekanslı tepe akım kontrol yöntemi	12
3.3.2. Sabit frekanslı tepe akım kontrol yöntemi.....	13
3.3.3. Ortalama akım mod kontrol yöntemi:.....	14
3.4. Ortalama Akım Mod PFC Devrelerinin Tasarımı ve Eksiklikleri	15
3.4.1. Ortalama akım mod kontrol yöntemi eksiklikleri.....	18
3.4.2. Değişken yük uyumlu ortalama akım mod kontrol yöntemi	20
4. BULGULAR VE TARTIŞMA	24
4.1. 400 Watt Çıkış Gücü İçin Güç Faktörü Düzeltim Performansları	26
4.2. 200 Watt Çıkış Gücü İçin Güç Faktörü Düzeltim Performansları	28
4.3. 100 Watt Çıkış Gücü İçin Güç Faktörü Düzeltimi Performansları	30
4.4. 75 Watt Çıkış Gücü İçin Güç Faktörü Düzeltimi Performansları	32
4.5. 50 Watt Çıkış Gücü İçin Güç Faktörü Düzeltimi Performansları	35
5. SONUÇLAR	38
6. KAYNAKLAR	40
ÖZGEÇMİŞ	

AKADEMİK BEYAN

Yüksek Lisans tezi olarak sunduğum “Değişken Yük Uyumlu Boost Dönüştürücü Temelli Yeni Bir Aktif Güç Faktörü Düzenleyici Kontrol Devresi Tasarımı” adlı bu çalışmanın, akademik kurallar ve etik değerlere uygun olarak yazıldığını belirtir, bu tez çalışmasında bana ait olmayan tüm bilgilerin kaynağını gösterdiğimi beyan ederim.

21/06/2022

Özgür ÇOBAN



SİMGELER VE KISALTMALAR

Simgeler

E : Hata değeri

f_c : Kesim frekansı

f_{sw} : Anahtarlama frekansı

$I_{L,\%r}$: Akımda istenilen dalgalanma miktarı

K_d : Bozulma katsayısı

K_s : Kayma katsayısı

L : Yükseltici endüktans değeri

P : Aktif güç

P_f : Güç faktörü

P_{out} : Çıkış gücü değeri

P_{outmin} : Çıkış gücünün minimum değeri

P_{outmax} : Çıkış gücünün maksimum değeri

S : Görünür güç

S_l : Güç faktörü düzeltildikten sonraki görünür güç

$V_{in,rms}$: Giriş geriliminin etkin değeri

V_{out} : Çıkış gerilimi değeridir.

Q : Reaktif güç

Q_c : Azaltılan reaktif güç

Q_l : Güç faktörü düzeltildikten sonraki reaktif güç

$\Delta i_{L(on)}$: Anahtarın açık olduğu süreçteki bobin akımının toplam değeri ve

$\Delta i_{L(off)}$: Anahtarın kapalı olduğu süreçteki toplam bobin akımı

ΔV_{out} : Çıkış gerilimindeki bir anahtarlama süresindeki toplam değer

Kısaltmalar

EMI : Elektromanyetik Girişim

PFC : Güç Faktörü Düzeltimi

THD : Toplam Harmonik Bozulma



ŞEKİLLER DİZİNİ

Şekil 3. 1.a) Tam dalga doğrultucu b) Tam dalga doğrultucu giriş-çıkış ilişkisi	6
Şekil 3. 2. Pasif filtre temelli güç faktörü düzenleme devresi	8
Şekil 3. 3. Aktif filtre temelli güç faktörü düzenleme devresi akış diyagramı	9
Şekil 3. 4. Aktif filtre temelli güç faktörü düzenleme devresi.....	10
Şekil 3. 5. Arttırıcı tip DC-DC dönüştürücü temelli güç faktörü düzenleme devresi.....	11
Şekil 3. 6. Değişken frekans tepe akım kontrol yöntemi devresi	12
Şekil 3. 7. Sabit frekans tepe akım kontrol yöntemi devresi	13
Şekil 3. 8. Ortalama akım kontrolü ile güç faktörü düzenleme devresi.....	14
Şekil 3. 9. Bastırma hücreli ortalama akım mod güç faktörü düzenleme devresi	15
Şekil 3. 10. a) Sürekli akım modu; b) Kesintili akım modu.....	16
Şekil 3. 11. Ortalama akım mod güç faktörü düzenleme devresi kontrol döngüleri	19
Şekil 3. 12. Akım kontrol döngüsü	19
Şekil 3. 13. Değişken yük uyumlu ortalama akım kontrolü ile güç faktörü düzeltimi ...	21
Şekil 3. 14.a) Giriş akımı çarpan değeri genel dağılımı; b) Non-lineer eğri uydurma...	23
Şekil 4. 1. Ortalama akım mod DC-DC dönüştürücülü güç faktörü düzenleme devresi	25
Şekil 4. 2. Ortalama akım mod DC-DC dönüştürücü temelli PFC kontrol yapısı.....	25
Şekil 4. 3. Değişken yük uyumlu ortalama akım mod DC-DC dönüştürücü temelli PFC kontrol yapısı.....	26
Şekil 4. 4. 400 W çıkış yükü için ortalama akım mod çıkış gerilimi.....	26
Şekil 4. 5. 400 W çıkış yükü için değişken yük uyumlu çıkış gerilimi	27
Şekil 4. 6. 400 W çıkış yükü için ortalama akım mod giriş akımı ve giriş gerilimi	27
Şekil 4. 7. 400 W çıkış yükü için değişken yük uyumlu giriş akımı ve giriş gerilimi....	28
Şekil 4. 8. 200 W çıkış yükü için ortalama akım mod çıkış gerilimi.....	28
Şekil 4. 9. 200 W çıkış yükü için değişken yük uyumlu çıkış gerilimi	29
Şekil 4. 10. 200 W çıkış yükü için ortalama akım mod giriş akımı ve giriş gerilimi	29

Şekil 4. 11.	200 W çıkış yükü için değişken yük uyumlu giriş akımı ve giriş gerilimi..	29
Şekil 4. 12.	100 W çıkış yükü için ortalama akım mod çıkış gerilimi.....	30
Şekil 4. 13.	100 W çıkış yükü için değişken yük uyumlu çıkış gerilimi	31
Şekil 4. 14.	100 W çıkış yükü için ortalama akım mod giriş akımı ve giriş gerilimi	31
Şekil 4. 15.	100 W çıkış yükü için değişken yük uyumlu giriş akımı ve giriş gerilimi..	31
Şekil 4. 16.	75 W çıkış yükü için ortalama akım mod çıkış gerilimi.....	32
Şekil 4. 17.	75 W çıkış yükü için değişken yük uyumlu çıkış gerilimi	33
Şekil 4. 18.	75 W çıkış yükü için ortalama akım mod giriş akımı ve giriş gerilimi	33
Şekil 4. 19.	75 W çıkış yükü için değişken yük uyumlu giriş akımı ve giriş gerilimi....	34
Şekil 4. 20.	50 W çıkış yükü için ortalama akım mod çıkış gerilimi.....	35
Şekil 4. 21.	50 W çıkış yükü için değişken yük uyumlu çıkış gerilimi	35
Şekil 4. 22.	50 W çıkış yükü için ortalama akım mod giriş akımı ve giriş gerilimi	36
Şekil 4. 23.	50 W çıkış yükü için değişken yük uyumlu giriş akımı ve giriş gerilimi....	36

ÇİZELGELER DİZİNİ

Çizelge 3. 1. Çıkış yükü ve yük akımı için giriş akımı çarpan değeri22

Çizelge 4. 1. Çıkış yükü güç faktörü ilişkisi37



1. GİRİŞ

Günümüzde hayatımızın en önemli gereksinimlerinden biri olan elektriğe olan ihtiyaç gün geçtikçe artmaktadır. Yapılan araştırmalarda dünyanın 2021 yılı elektrik tüketimi 23.5 trilyon kilovatsaat olarak tespit edilmiştir (EPDK 2021). Elektriğe olan ihtiyacın artması ve üretim santrallerinin yetersizliği, ülkeleri elektriği daha verimli kullanacak araçlar üretmeye zorlamaktadır.

Santrallerde üretilen elektrik, sinüzoidal alternatif akım formundadır. Belirli genlik ve frekansta üretilen AC gerilim ve akım lineer ve lineer olmayan reaktif yüklere uygulandığında, gerilim ve akım arasında faz kayması oluşmaktadır. Akım ve gerilim birbirini takip edemediği için de akım şeklinde bozulmalar meydana gelmektedir. Bu bozulma iletim hattında harmoniklerin oluştuğunu gösterir ve güç faktörünü düşürür. Diğer bir ifadeyle güç faktörü düşük cihazlar şebekeden çektikleri sinüzoidal akım sebebiyle elektrik hattında harmonik oluşumuna sebep olurlar. Düşük güç faktörü aynı aktif güç için daha fazla enerji tüketilmesine, trafo kapasitelerini gereksiz yere arttırmasına ve iletim hatlarından gereksiz daha fazla akım akmasına neden olur. Bir başka deyişle düşük güç faktörü elektriğin verimsiz kullanılmasının en önemli nedenlerinden birisidir.

Düşük güç faktörü ve harmonikler elektriğin verimsiz kullanılmasının dışında; jeneratör ve şebeke geriliminde dalga şekillerinin bozulması, senkron ve asenkron motorlarda salınım sebebi ile aşırı ısınması, UPS'lerin veriminin düşmesi, aydınlatma elemanları ve monitörlerde titreşimler, rezonans sebebi ile şebekede aşırı akım ve gerilim oluşması, sesli ve görüntülü görüşmelerde parazitler, temel frekans ile tasarlanmış kompanzasyon sistemlerinde kondansatörlerin harmonik frekanslarda düşük kapasitif reaktans göstermesi ile aşırı yüklenme, hatlarda hesaplanandan daha fazla akım geçmesi, iletim hatlarında ısınma, hattın koruma yalıtkanında delinmeler ve mikro-işlemcilerin hatalı çalışması gibi çeşitli sıkıntılara yol açabilir. Tasarlanan bir güç faktörü düzeltim devresi ile belirtilen bu sorunların önüne geçilebilir ve elektriğin daha verimli kullanılması sağlanabilir.

Günümüzde var olan Dc-Dc dönüştürücü temelli güç faktörü düzeltim devrelerine bakıldığında; çıkış gerilimi istenilen sabit bir çıkış gerilimini referans alarak ayarlanmakta; giriş akımı giriş geriliminin şeklini referans alan bir PI kontrolör yardımı ile kontrol edilmekte ve güç faktörü düzeltimi sağlanmaktadır.

Artırıcı dönüştürücü temelli güç faktörü düzenleme devrelerinin tasarımı incelendiğinde, belirli bir akım modunda -genellikle sürekli akım modunda- sabit bir yük için tasarlandıkları görülmektedir. Artırıcı dönüştürücü temelli güç faktörü düzenleme devreleri sabit bir çıkış gücü için yapılan tasarımları belirtilen nominal güç için bir güç faktörü düzeltimi sağlasa da çıkış gücünün düştüğü değerlerde artırıcı dönüştürücü temelli güç faktörü düzenleme devresinin transfer fonksiyonu değişmekte, bu durumda nominal güçteki transfer fonksiyonu için tasarlanan PI kontrolörün kötü performans sergilemesine dolayısıyla iyi bir güç faktörü düzeltimi sağlayamamasına neden olmaktadır.

Sürekli akım modunda sabit bir yük için tasarlanan artırıcı dönüştürücü temelli güç faktörü düzenleme devrelerinde çıkış gücünün düşmesi durumunda karşılaşılabilecek diğer bir problem ise çıkış yükünün çok düşmesi durumunda, maksimum anahtar doluluk oranına rağmen yükseltici bobin üzerinden akan giriş akımının sürekli değil kesintili olmasıdır. Kesintili akım modu olarak ifade edilen bu durumda sürekli akım modu için tasarlanan kontrolcüler iyi bir kontrol yapamamakta ve güç faktörü düşümlerine neden olmaktadır.

Belirtilen bu problemler ile artırıcı dönüştürücü temelli güç faktörü düzenleme devreleri ile elektrikli araç şarj aletleri ve batarya şarj aletlerinde sıklıkla karşılaşılmaktadır. Çünkü şarj aletlerinde çıkış gücü başlangıçta sabit olmakta olup bataryanın doluluk oranı arttıkça çıkış gücü azalmaktadır. Çıkış gücünde meydana gelen bu düşüş, sistemin transfer fonksiyonunun değişmesine ve kontrol edilememesi nedeni ile güç faktöründe düşmelere neden olmaktadır.

Çalışmanın amacı, eğri uydurma temelli bir oransal akım okuyucuya sahip güç faktörü düzenleme algoritması geliştirmektir. Geliştirilen oransal akım okuyucu yardımı ile nominal güçten düşük güçlerde giriş akımının değerinin düşmesine bağlı olarak değişen devrenin transfer fonksiyonunu akım okuyucu kazancını değiştirerek nominal güçteki değerine getirmek dolayısı ile sistemin Laplace ortamındaki sıfır kutuplarını nominal güçteki değerde sabit tutarak nominal güç için geliştirilen PI kontrolörün her değerde etkin kontrol gerçekleştirmesini sağlamaktır. Giriş akımının kazancını değiştirerek sistemin transfer fonksiyonunu düşük güçlerde sabit tutan ve PI kontrolcünün her zaman maksimum performans göstermesini sağlayan bu kontrol yapısı ile değişen yüklerde de giriş akımında meydana gelen şekilsel bozuklukların ve faz farkının önüne geçilmiş ve güç faktörü düzeltimi sağlanmıştır. Belirtilen algoritmanın çalışma güç aralığını artırabilmek için devre tasarımı yapılırken belirlenen güç aralığında optimum eleman seçimleri yapılmıştır. Böylece düşük güçlerde devrenin sürekli akım modunda kalması sağlanmış ve oransal akım okuyucu yardımı ile düşük güçlerdeki güç faktörü düşümlerinin önüne geçilmiştir. Geliştirilen güç faktörü düzenleme algoritması Psim platformunda gerçekleştirilerek mevcutta var olan güç faktörü düzenleme algoritması ile güç faktörü, performans ve harmonik bozulmalar yönünden kıyaslaması yapılmıştır. Psim ortamında simülasyonu gerçekleştirilen güç faktörü düzenleme devresi modellenerek devrenin değişken yüklerde güç faktörü düzeltimi sağladığı kanıtlanmıştır.

2. KAYNAK TARAMASI

Stanley (1977) tarafından yapılan araştırmalarda hat akımı ve gerilimi arasındaki açı farkından ve akımdaki şekil bozukluklarından kaynaklı olarak güç faktörünün düştüğü ve düşük güç faktörünün enerji kullanımını verimsizleştirdiği ve maliyetleri artırdığı tespit edilmiştir.

Saied (1988) gerçekleştirdiği model ile enerji iletim hatlarının güç faktörü düzenlemesi olmadan ve güç faktörü düzenlemesi yaparak maliyetleri karşılaştırmış; güç faktörü düzenlemenin enerji tüketim maliyetini azalttığını kanıtlamıştır.

Shepherd ve Zakikhani (1973) yaptıkları çalışmada akım ve gerilim arasındaki açı farkının kullanılan endüktif yüklerden kaynaklandığını tespit etmişler ve kapasite kullanarak akım ve gerilim arasındaki açının azaltarak güç faktörü düşümlerinin önüne geçilebileceğini kanıtlamışlardır.

Kapasitelerin hantal yapıları ve akımda meydana gelen şekil bozulmalarından kaynaklı güç faktörü düşümlerini önleyememesi; akımda meydana gelen harmonikleri oluşturulan zıt işaretli harmoniklerle yok etme fikrine dayanan aktif filtre yönteminin ortaya çıkmasını sağlamıştır (Gyugyi ve Strycula 1976).

Balogh (1993) yaptığı çalışmada AC gerilimi DC gerilime dönüştüren doğrultucu devrelerinde meydana gelen yüksek güç faktörü düşümleri üzerine odaklanmıştır. Meydana gelen yüksek güç faktörü düşümlerini devreye eklenen bir DC-DC dönüştürücü temelli aktif filtre tasarlayarak önlemeyi amaçlamıştır. Harmonik tabanlı filtredeki karmaşık kontrol yapısı ve yüksek maliyetlere oranla daha basit bir güç faktörü düzenleme devresi geliştirmiştir.

Texas Instruments (1999) ekibi yükseltici tip güç faktörü düzenleme devresinin sürekli akım modu, kritik akım modu ve kesintili akım modu için ayrı ayrı devre elemanlarını hesaplamışlardır.

Karakaş (2018) tarafından yapılan çalışmada yükseltici tip bir güç faktörü düzenleme devresinin bobin ve nüve seçimlerini ayrıntılı bir şekilde yapılmış ve güç kayıplarını optimize etmek için en uygun bobin seçimini yapan bir akış diyagramı geliştirmiştir.

Kanaan (2012) yükseltici tip dönüştürücülerde yükseltici bobin ve çıkış kapasitesi arasındaki ilişkiyi bir eğri ile ifade ederek eleman seçimlerini kolaylaştırmayı amaçlamıştır.

Valascho ve Rahman (2016) tarafından geliştirilen yükseltici tip dönüştürücü tabanlı güç faktörü düzenleme devresinde dijital kontrolcü kullanılmış ve 300W güce sahip bir yük için sürekli akım modunda çalışan güç faktörü düzenleme devresinin dijital kontrol parametreleri ayrıntılı olarak hesaplamış; bu devrede kullanılabilecek ortalama anahtarlama frekansından bahsetmişlerdir. Ayrıca yapılan çalışmada yükseltici tip güç faktörü düzenleme devresinin transfer fonksiyonunun hangi parametreler bağlı olduğu ayrıntılı olarak açıklanmıştır.

Güç faktörü düzenleme devreleri tasarlanırken dikkat edilmesi gereken diğer bir nokta ise verimlilik konusudur. Yüksek anahtarlama frekansına sahip devrelerden herhangi bir bastırma hücresi kullanılmadan yapılan anahtarlama yöntemi olan sert anahtarlama (HS) anahtarlama kayıpları ve EMI gürültüleri nedeniyle verim, maksimum %80 seviyelerindedir. Bu sorunu çözmek adına geliştirilmiş birçok aktif ve pasif bastırma hücresi bulunmaktadır. (Bodur 2013; Praneeth ve Williamson 2019; Göynüşen 2011).

DC-DC dönüştürücü temelli aktif filtrelerin en önemli kayıpları olarak görülen yüklem mosfetinden kaynaklı kayıpları azaltmak adına bastırma devreleri ve yumuşak anahtarlama yöntemleri kullanılabilir (Göynüşen 2011).

Alam ve Eberle (2017) yumuşak anahtarlama teknikleri üzerinde durmuş hem yeni bir yumuşak anahtarlama ile hem de sert anahtarlama ile güç faktörü düzenleyici devresinin giriş voltajını 100 ve 240 volt değerlerine göre verim ve güç faktörü olarak kıyaslamış ve sonuçları EN61000-3-2 standardına göre değerlendirmiştir.

Çetin (2011) geliştirmiş olduğu yeni bir yumuşak anahtarlama yöntemi ile yumuşak anahtarlamanın, yüklem mosfetinin kayıplarını azalttığını kanıtlamıştır.

Praneeth ve Williamson (2019) tasarladıkları yumuşak anahtarlama devresi ile değişken çıkış yüklerinde de yüksek verimlilik sağlamışlardır.

Rossetto ve Spiazzi (1994) yapmış oldukları çalışmada arttırıcı tip güç faktörü düzenleme devrelerinde sabit bir çıkış gücü için analog kontrolcü tasarımını ayrıntılı olarak gerçekleştirmişlerdir.

Belirli bir yük için sürekli akım mod kontrolü ile tasarlanmış bir yükseltici tip güç faktörü düzenleme devresi daha düşük yüklerde kullanılırsa devrede karmaşık akım modunda çalışma ve sıfır geçiş bozulmalarında artma gözlemlenir. Bobin akımının sürekli olma ile süresiz olma arası devamlı geçiş yaptığı karmaşık akım modunda sürekli mod için belirlenen kontrol katsayıları süresiz modda istenilen kontrolü sağlayamamakta bu durum güç faktörünün düşmesine neden olmaktadır (Chen, 2006).

Gussemé (2005) tarafından yapılan çalışmada yükseltici tip bir güç faktörü düzenleme devresinin karmaşık akım modunda çalışmasını önlemek için güç faktörü düzenleme devresinin yüklere göre çalışma modlarını belirlemiş ve sürekli akım modu ve kesintili akım modu için ayrı kontrol katsayıları hesaplamıştır.

Ivaldi ve Park (2017) tarafından yapılan çalışmada çıkış gücünü tahmin edebilmek için çıkış akımının maksimum değeri okunmuş bu değerden yararlanılarak çıkış gücü tahmin edilmiş ve belirlenen çıkış gücüne göre sistemin sürekli akım modunda mı kesintili akım modunda mı çalışması gerektiği kararlaştırılmıştır. Belirlenen çalışma metoduna göre düşük güçlerde kesintili akım modunda nominal ve yüksek güçlerde sürekli akım modunda sistem çalıştırılarak sonuçlar alınmış. Elde edilen sonuçlar çalışma modunun güce göre değiştirilmesinin sadece sürekli akım modu kullanmaya oranla daha yüksek güç faktörü sağladığını kanıtlamıştır.

Güç faktörü düşümleri akım ve gerilim arasındaki açı farkının yanı sıra akımda meydana gelen ve şekil bozukluklarından da kaynaklanmaktadır. Toplam harmonik bozulma (THD) olarak ifade edilen akım şekil bozukluklarını önleyerek güç faktörü düzeltimi sağlanabilir (Jeyaraj ve Kumar, 2021).

Sarker and Nazir (2021) geliştirmiş oldukları güç faktörü düzenleme algoritması ile sabit bir yük için yükseltici tip dönüştürücülerde giriş akımında meydana gelen harmonik bozulmaları azaltarak güç faktörü düzeltimini sağlamışlardır.



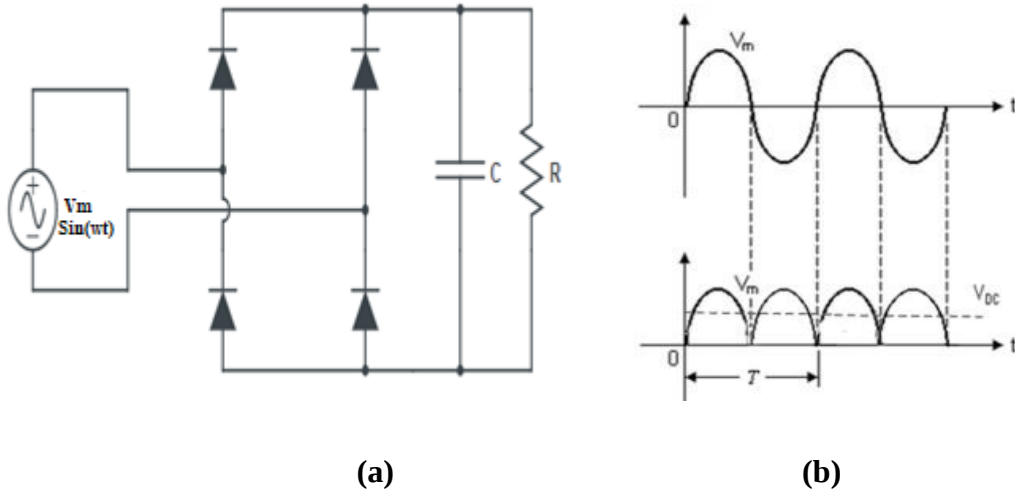
3. MATERYAL VE METOT

3.1. Güç Faktörü Düşümü

Güç faktörü değerinin bir olabilmesi için istenilen ana etken akım ve gerilim değerlerinin sinüs formunda olup yükün tam rezistif olmasıdır. Eğer hat akımının uygulandığı yük tam rezistif olursa hat akımı format olarak hat gerilimi ile aynı şekle sahip olacaktır ve aralarında bir faz farkı oluşmamaktadır. Fakat günümüzde kullanılan yüklerin büyük bir çoğunluğu endüktif ve kapasitif yüklere sahiptir. Bu durum akım ile gerilim arasında açı farkının oluşmasına dolayısı ile güç faktörünün düşmesine neden olmaktadır.

$$Pf = \frac{P}{S} \quad (3.1)$$

Anahtarlama elemanlarının bulunmadığı devrelerde güç faktörü denklem 3.1'deki gibi hesaplanır ve sadece yükün tam rezistif olup olmamasına bağlıdır. Denklem 3.1'de verilen Pf güç faktörünü, P aktif gücü, S görünür gücü ifade etmektedir. Fakat anahtarlama elemanlarının bulunduğu bir devrede akım şeklinde değişimler meydana gelmektedir. Örneğin şekil 3.1.a'daki gibi bir tam dalga doğrultucuda giriş sinyali sinüs formundandır ve çıkış sinyali diyotlarda gördüğü işlem nedeniyle Şekil 3.1.b'de gösterildiği gibi tam dalga doğrultmuş bir yapıdadır ve sinüs formundan uzaktır.



Şekil 3. 1.a) Tam dalga doğrultucu b) Tam dalga doğrultucu giriş-çıkış ilişkisi

Şekil 3.1.b'de gösterilen tam dalga doğrultulmuş sinyali denklem 3.2'de verilen Fourier serilerinden yararlanarak birçok sinüs sinyalinin birleşimi olarak ifade edebiliriz.

$$f(x) = A_0 + \sum_{n=1}^{\infty} A_n \cos nt + B_n \sin nt \quad (3.2)$$

$$A_0 = \frac{1}{T} \int_0^T f(t) \cos(nt) dt \quad (3.3)$$

$$A_n = \frac{2}{T} \int_0^T f(t) \cos(nt) dt \quad (3.4)$$

$$B_n = \frac{2}{T} \int_0^T f(t) \sin(nt) dt \quad (3.5)$$

Şekil 3.1.b’de gösterilen tam dalga doğrultulmuş sinyal fourier serileri ile ifade edilirse bu durumda tam dalga doğrultulmuş sinyal bir ana sinüs sinyali ve diğer sinüs sinyalleri olan üç, beş ve yedinci harmonikler olarak ifade edilir. Bu sinyallerden ana sinüs sinyali yani birinci harmonik asıl işi yapan sinyal olup aktif gücü oluşturan sinyaldir. Diğer harmonikler ise sistemde ısınmalara neden olan ve iş yapmayan sinyallerdir. Bu durumda yük tam rezistif olsa dahi anahtarlama elemanlarının bulunduğu devrelerde harmoniklerden dolayı güç faktörü bire eşit değildir. Bu nedenle anahtarlama elemanlarının bulunduğu devrelerde güç faktörü denklem 3.6’da verildiği gibi ifade edilmelidir.

$$Pf = K_d K_s \quad (3.6)$$

Denklem 3.6’ da verilen K_s kayma katsayısıdır ve sistemde var olan endüktif ve kapasitif yüklerden kaynaklı olarak ortaya çıkan güç faktörü düşümünü ifade eder ve akım ile gerilim arasındaki açının kosinüs değerinden hesaplanır. K_d bozulma katsayısıdır ve sistemde var olan anahtarlama elemanlarından kaynaklı harmoniklerin oluşturduğu güç düşümünü ifade eder ve denklem 3.7’deki gibi hesaplanır.

$$K_d = \frac{1}{\sqrt{1 + \left(\frac{THD}{100}\right)^2}} \quad (3.7)$$

Denklem 3.7’de verilen THD toplam harmonik distorsiyon olup sinüs formunda olmayan bir sinyalin harmonik bileşenleri toplamının ana harmoniğe oranıdır. Diğer bir deyişle sinüs formunda olmayan bir sinyalin enerjisinin ne kadarının iş yapımında ne kadarının zahir işler için kullanıldığını belirten bir katsayıdır ve denklem 3.8’de verildiği gibi ifade edilir.

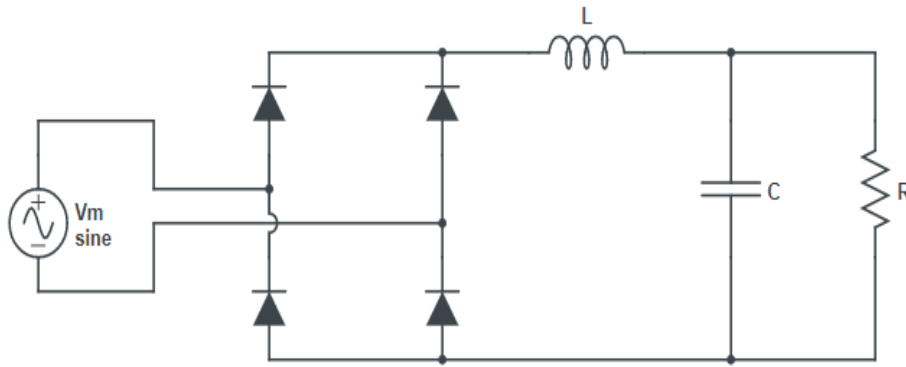
$$THD = \frac{\sum_{n=2}^{\infty} (I_{n,rms}^2)}{I_{1,rms}} \quad (3.8)$$

Denklem 3.8’de $I_{1,rms}$ iş yapan birinci harmonik sinyalin etkin değerini, $I_{n,rms}$ ana harmonik dışındaki tüm harmoniklerin etkin değerini ifade etmektedir.

3.2. Güç Faktörü Düzeltimi

Şekil 3.1.a'daki tam dalga doğrultucu göz önüne alındığında böyle bir tam dalga doğrultucuda çıkış gerilimini düzeltmede kullanılan kondansatörden kaynaklı olarak faz akımı ve gerilimi arasında açı farkı oluşur ve bu durum güç faktörü düşümüne sebep olur. Ayrıca tam dalga doğrultucunun giriş sinyali diyotlarda gördüğü işlem nedeniyle sinüs formundan uzaklaşır bu durumda THD dolayı da güç faktörü düşümleri meydana gelir. Meydana gelen güç faktörü düşümlerini önlemenin birçok yolu bulunmakla birlikte pasif filtre temelli güç faktörü düzeltimi, aktif filtre temelli güç faktörü düzeltimi ve DC-DC dönüştürücü temelli güç faktörü düzeltimi yöntemleri en sık kullanılan yöntemlerdir.

3.2.1. Pasif filtre temelli güç faktörü düzenleme devresi



Şekil 3. 2. Pasif filtre temelli güç faktörü düzenleme devresi

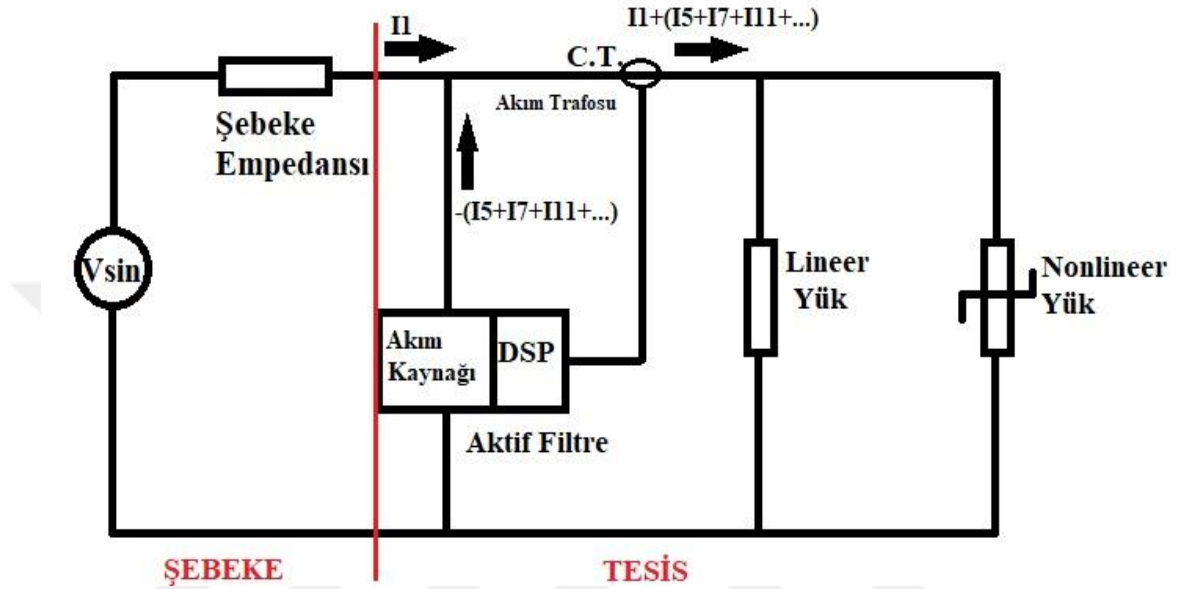
Pasif filtre temelli güç faktörü düzenleme devrelerinde temel amaç tam dalga doğrultulmuş sinyalde toplam harmonik distorsiyondan kaynaklanan güç faktörü düşümlerinin önüne geçmektir. Pasif filtreleme yönteminde diyottan kaynaklanan harmonikleri bastırmak için çıkışta bulunan kondansatöre seri veya paralel bir bobin ve/veya direnç bağlanır. Böylece seri veya paralel bir RLC veya LC filtresi elde edilerek harmoniklerin bastırılması amaçlanmaktadır. Şekil 3.2'de gösterildiği gibi tam dalga doğrultucuya harmonikleri bastırmak için diyotlar ile kondansatör arasına seri bir bobin bağlanarak LC filtre elde edilebilir. Pasif LC filtre temelli güç faktörü düzenleme devresi şekil 3.2'de gösterildiği gibi olup, giriş sinyalinin tam dalga doğrultulmuş 100 Hz frekansa sahip bir sinyal olduğu göz önünde bulundurularak denklem 3.9'dan bastırma frekansı hesaplanır.

$$f_c = \frac{1}{2\pi\sqrt{LC}} \quad (3.9)$$

Denklem 3.9'da f_c kesim frekansıdır ve en düşük değeri ana harmonik sinyalinin iki katı olarak seçilmelidir. C devrede kullanılan ve çıkış sinyalini düzeltmeye yarayan kondansatör değerini, L filtrenin frekansını belirleme kullanılan bobin değeridir.

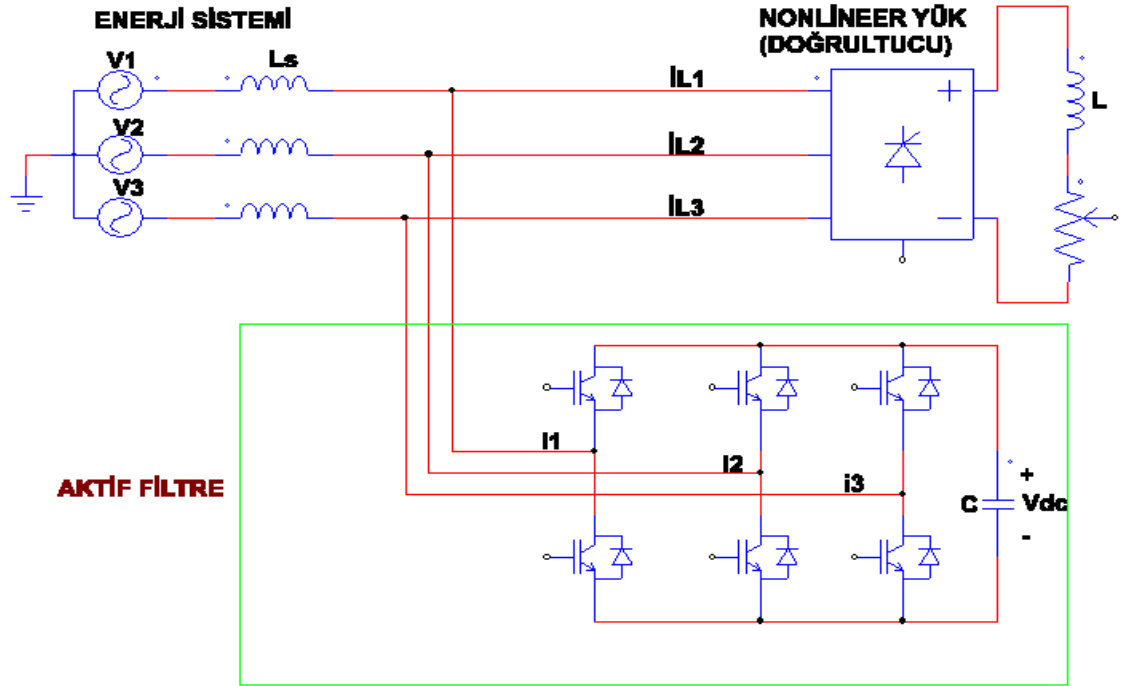
Pasif filtre ile güç faktörü düzeltimi, kontrol gerektirmemesi ve düşük maliyetli olmakla birlikte, harmonikleri bastırma konusunda çoğu zaman istenilen seviyelere ulaşamamaktadır. Bu durum aktif filtre ile güç faktörü düzenlemesinin ortaya çıkmasına neden olmuştur (Gyugyi ve Strycula 1976).

3.2.2. Aktif filtre temelli güç faktörü düzenleme devresi



Şekil 3. 3. Aktif filtre temelli güç faktörü düzenleme devresi akış diyagramı

Aktif filtre temelli güç faktörü düzenleme devrelerinde ana amaç oluşan harmonikleri yok ederek bozulmadan kaynaklı güç faktörü düşümlerinin önüne geçmektir. Bu amaçla aktif filtre temelli güç faktörü düzenleme devrelerinde şebeke akımının incelemesi yapılmakta ve şekil 3.3'te gösterildiği gibi şebekeye harmoniklerinin tam tersi yönünde sinyaller uygulanarak harmoniklerinin azaltılması sağlanmaktadır. Böylece şebeke ana hat akımı şekli olan sinüs formundan uzaklaşmamakta ve bozulmalardan kaynaklı güç faktörü düşümlerinin önüne geçilmektedir.



Şekil 3. 4. Aktif filtre temelli güç faktörü düzenleme devresi

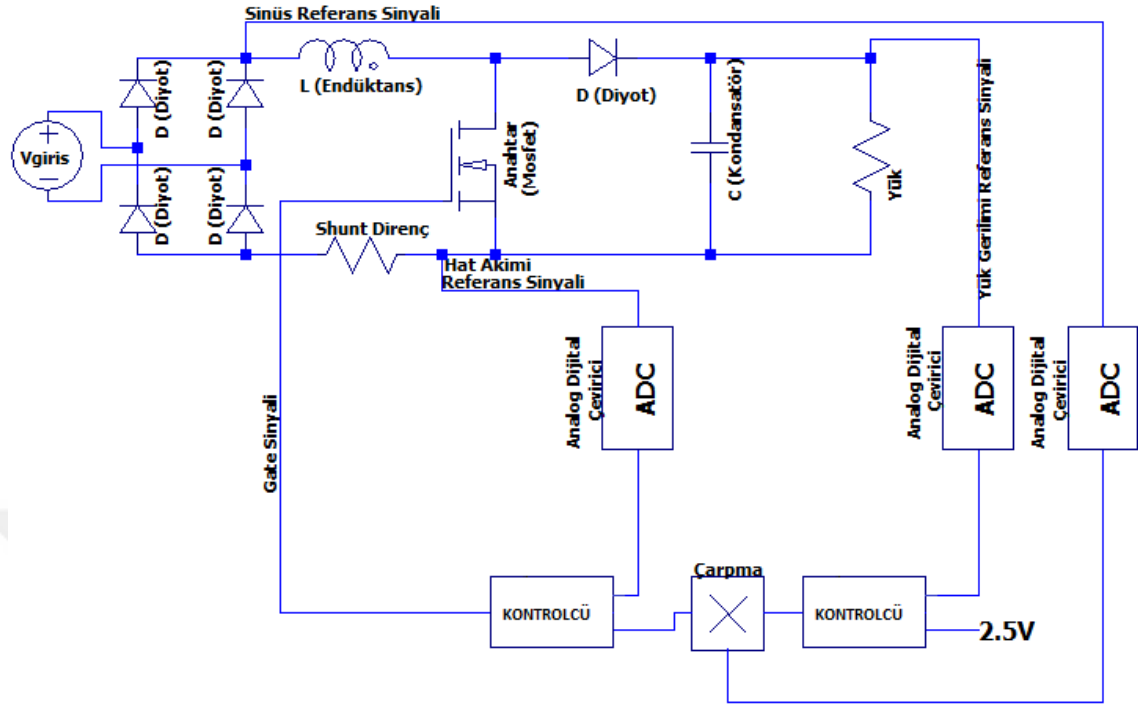
Aktif filtre temelli güç faktörü düzenleme devresinde akımın harmonikleri kontrol mekanizması tarafından hesaplanmakta ve elde edilen harmoniklerin frekansına uygun olarak kontrolcü tarafından anahtarlama elemanları yardımıyla harmoniklerle aynı frekansa sahip fakat zıt yönlü işaretler üretilmektedir. Üretilen bu zıt işaretli harmonikler şebekeye uygulanarak hat akımında meydana gelen harmoniklerin azaltılması amaçlanmaktadır. Genel çalışma yapısı göz önüne alındığında karmaşık bir kontrol mekanizmasına ihtiyaç duyan aktif filtre temelli güç faktörü düzenleme devreleri yüksek harmonik bastırma performansına karşın yüksek maliyetleri karmaşık kontrol mekanizmaları nedeni ile tercih edilmemektedirler.

3.2.3. DC-DC dönüştürücü temelli güç faktörü düzenleme devreleri

DC-DC dönüştürücü temelli güç faktörü düzenleme devreleri çıkış geriliminin istenilen düzeye getirmenin yanında giriş gerilim şeklini referans alarak giriş akımını düzenlemektedir. Belirtilen düzenleme ile giriş akımı form olarak giriş gerilimi ile aynı şekle sahip olmaktadır. Böylece giriş akımı ve gerilimi arasındaki faz farkı ve şekil değişikliklerinin önüne geçilmektedir ve bozulmadan ve/veya faz farkından kaynaklı güç faktörü düşümlerinin önüne geçilmektedir.

DC-DC dönüştürücü temelli güç faktörü düzenleme devreleri çıkış geriliminde yapmış oldukları düzenlemeye göre arttırıcı, azaltıcı ve arttırıcı azaltıcı tip olmak üzere üç tipten oluşmaktadır. Bu çalışmada çıkış geriliminin arttırıldığı dönüştürücü modeli olan arttırıcı tip DC-DC dönüştürücü temelli güç faktörü düzenleme devreleri üzerine odaklanılmıştır.

3.3. Arttırıcı Tip DC-DC Dönüştürücü Temelli Güç Faktörü Düzeltimi

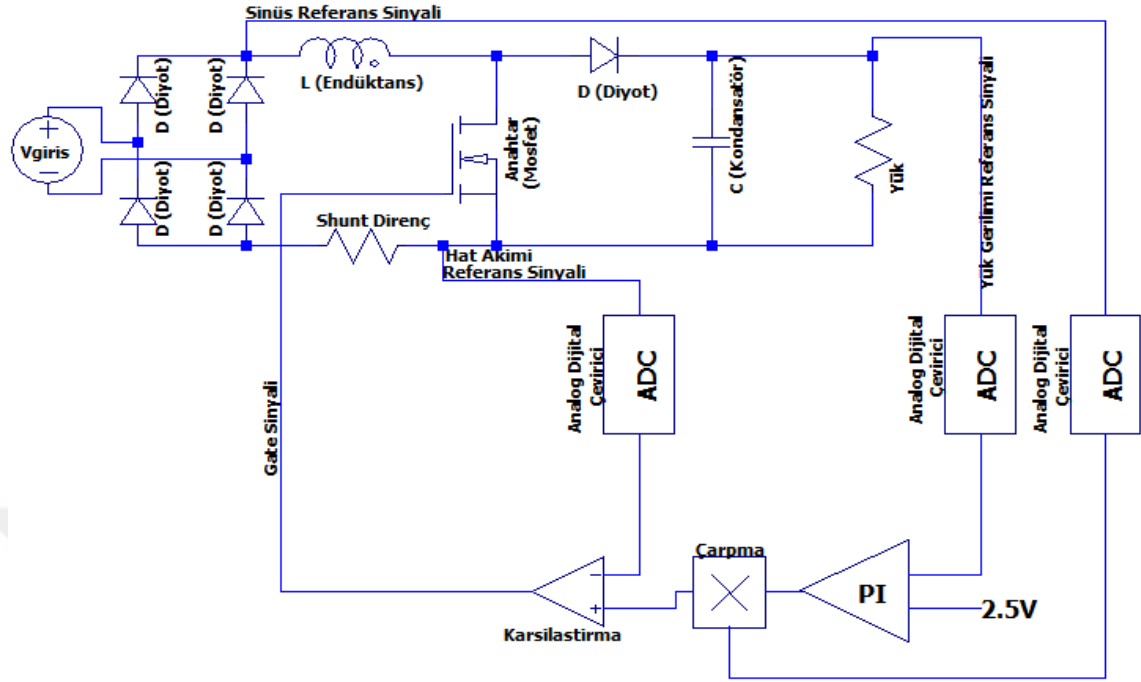


Şekil 3. 5. Arttırıcı tip DC-DC dönüştürücü temelli güç faktörü düzenleme devresi

Arttırıcı tip DC-DC dönüştürücü temelli güç faktörü düzenleme devrelerinde bir ADC yardımı ile çıkış gerilimi okunmakta ve çıkış geriliminin istenilen değere yükseltilmesi bir kontrolcü yardımıyla yapılmaktadır. Çıkış gerilimini yükselten kontrolcünün çıkışındaki kontrol sinyali devre girişteki sinüs referans sinyali ile çarpılarak giriş akımı şekli için bir referans sinyal üretilmektedir. Güç faktörü düzeltimi için kullanılan ikinci kontrolcüye referans sinyali ve giriş akımı sinyali girmekte ve bu kontrolcü tarafında giriş akımı şekil olarak giriş gerilimi ile aynı formda ve faz farksız olarak üretilmektedir. Böylece şekil 3.5'te gösterildiği üzere arttırıcı tip DC-DC dönüştürücü temelli güç faktörü düzenleme devrelerinde kaskat bağlanmış iki adet kontrolcülerden ilki ile çıkış gerilimi istenilen değere yükseltilmekte ve ikinci kontrolcü ile güç faktörü düzeltimi sağlanmaktadır.

Arttırıcı tip DC-DC dönüştürücü temelli güç faktörü düzenleme devrelerinde kullanılan kontrol yapısına bağlı olarak birçok kontrol yöntemi bulunmaktadır bu yöntemlerden değişken frekanslı tepe akım kontrol yöntemi, sabit frekanslı tepe akım kontrol yöntemi ve ortalama akım mod kontrol yöntemi en çok kullanılan yöntemlerdir.

3.3.1. Değişken frekanslı tepe akım kontrol yöntemi



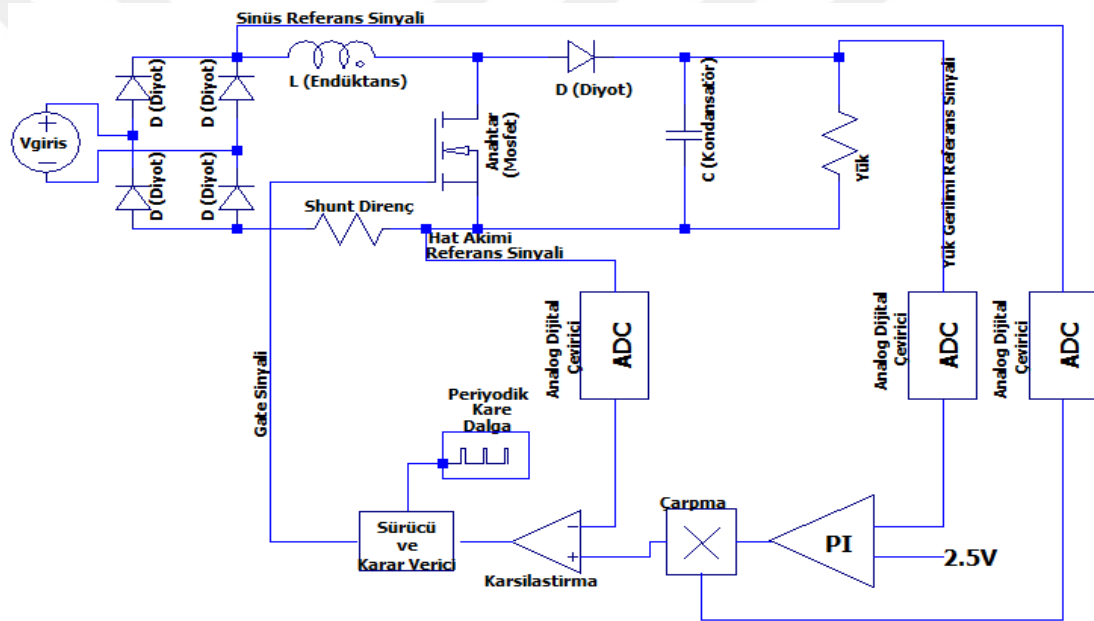
Şekil 3. 6. Değişken frekans tepe akım kontrol yöntemi devresi

Değişken frekans tepe akım kontrol yönteminde çıkış gerilimi kontrol mekanizmasına zarar vermemesi amacıyla çıkış geriliminin genliği kadar küçültülerek alınır ve bu değer istenilen çıkış geriliminden çıkarılarak bir hata sinyali elde edilir. Elde edilen hata sinyali bir PI kontrolcü yardımı ile kontrol edilerek çıkış gerilimi istenilen değere getirilmesi sağlanır. Çıkış gerilimini kontrol eden kontrolcünün ürettiği kontrol sinyali, giriş geriliminin belirli bir oranda küçültülmesi ile elde edilen sinüs referans sinyali ile çarpılarak giriş akımı için bir referans sinyal elde edilir. Giriş akımının tepe değerini okuyan bir akım okuyucu ile giriş akımı okunur. Elde edilen referans sinyali ile akım sinyali bir karşılaştırıcıya sokulur eğer giriş akımı referans akım sinyalinden küçük ise anahtar kapatılır böylece giriş akımının artması sağlanır. Eğer giriş akımı referans akım sinyalinden küçük değil ise anahtar açık tutulur böylece hat akımı şekil olarak hat gerilimine benzetilir ve güç faktörü artırılmış olur.

Kontrol yapısından da anlaşılacağı üzere değişken frekanslı pik akım kontrolü yönteminde yükleyici anahtar giriş akımı değerinin referans sinyali değerinden küçük olduğu anlarda kapanmakta ve bobin akımı değerinin referans sinyali değerinden büyük olduğu anlarda anahtar açılmaktadır. Bu durum yükleyici anahtarın sabit bir frekansa sahip olmamasına dolayısıyla anahtarlama kayıplarının artmasına neden olmaktadır. Ayrıca giriş akımının tepe değerlerinin okunması kontrol sisteminin gürültülerden fazla etkilenmesine neden olmaktadır.

3.3.2. Sabit frekanslı tepe akım kontrol yöntemi

Değişken frekans tepe akım kontrolü yöntemindeki sabit olmayan anahtarlama frekansı sorununu çözmek için Şekil 3.7’de genel yapısı verilen sabit frekanslı tepe akım kontrolü ile güç faktörü düzeltim devresi geliştirilmiştir. Sabit frekans tepe akım kontrolü yönteminde karşılaştırıcısının çıkışına, bir karar verici blok ve anahtarlama frekansı ile aynı frekansa sahip periyodik kare dalga üreten bir blok koyulmuştur. Anahtarın kararsız şekilde açılıp kapanması periyodik kare dalga üretici ile önlenir. Bu işlem anahtar açıldıktan sonra doluluk oranı maksimum %80 oranında açık tutularak elde edilir ve bu sayede değişken anahtarlama frekansı problemini çözer. Şekil 3.7’de verilen sabit frekans tepe akım kontrolü yöntemi ile şekil 3.6’da verilen değişken frekans tepe akım kontrolü yöntemi kıyaslanırsa aralarındaki tek farkın sabit frekans tepe akım kontrolü yönteminde kontrol sinyalinin periyodik kare dalga ile karşılaştırılmasıdır. Diğer bir ifade ile sabit frekans pik akım kontrol yöntemi, değişken frekans pik akım kontrolü yönteminin sabit anahtarlama frekansına sahip halidir.



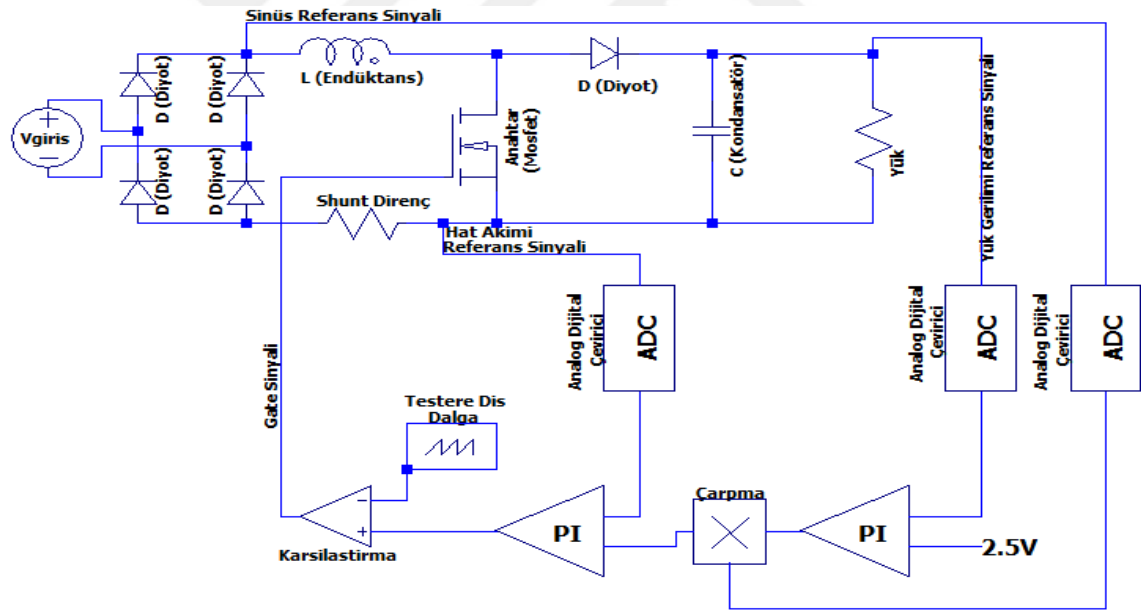
Şekil 3. 7. Sabit frekans tepe akım kontrol yöntemi devresi

Sabit frekans tepe akım kontrolü yönteminde akım şeklini düzenlemek adına bir adet karşılaştırıcı ve sabit frekanslı sürücü kullanılması akımda meydana gelen ani değişimlere olan tepkileri azaltmaktadır. Dolayısıyla belirtilen bu sistem akımda meydana gelen ani şekil değişimlerine tepki verememekte bu durum akım şeklinde bozulmalara ve güç faktörünün düşmesine neden olmaktadır. Ayrıca bütün tepe akım kontrol yöntemlerinde var olan giriş akımının tepe değerinin okunmasından kaynaklı gürültülerden etkilenme sorunu sabit frekans tepe akım kontrol yönteminde de mevcuttur.

3.3.3. Ortalama akım mod kontrol yöntemi:

Sabit frekans tepe akım kontrolü ile güç faktörü düzenlemede karşılaştırıcı ve frekansı sabitlemek için kullanılan karar verici bloktan dolayı tepkilerde meydana gelen gecikmeyi ve kontrol yapısında var olan gürültülerden etkilenme sorunlarını önlemek amacıyla şekil 3.8’de genel diyagramı verilen çift PI kontrolörün kullanıldığı ortalama akım kontrolü ile güç faktörü düzenleme devresi geliştirilmiştir.

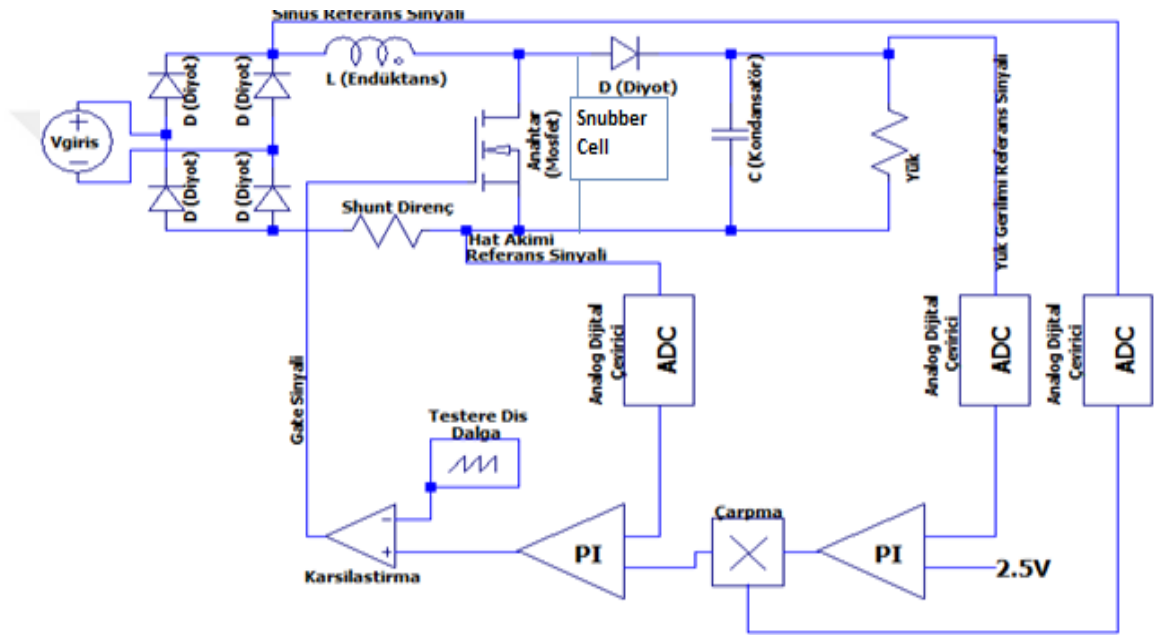
Ortalama akım kontrolü ile güç faktörü düzenleme devresinde çıkış gerilimi istenilen çıkış gerilimi değerinin genliği kadar küçültülerek alınır ve istenilen çıkış gerilimi ile karşılaştırılarak bir hata sinyali elde edilir. Elde edilen hata sinyali çıkış gerilimini kontrol eden kontrolcüye sokularak çıkış gerilimi kontrolü sağlanır. Çıkış gerilimini kontrol eden PI kontrolörün ürettiği kontrol sinyali giriş geriliminden elde edilen sinüs referans sinyali ile çarpılarak giriş akımı için sinüs formuna sahip bir referans sinyali üretilir. Bu yöntemde gürültülerden daha az etkilenmek adına giriş akımının ortalama değeri okunur. Üretilen referans sinyalinden giriş akımının ortalama değeri çıkarılarak bir hata değeri elde edilir. Bu hata değeri güç faktörünü düzenlemede kullanılan ikinci PI kontrolörde işlem görür ve bu kontrolcünün üretmiş olduğu sinyal bir testere dişli dalga ile karşılaştırılarak PWM sinyali üretilir, bu PWM sinyali anahtara uygulanır. Böylece kaskat bağlı iki adet PI kontrolörden ilki ile giriş gerilimi istenilen seviyeye kadar yükseltilirken ikinci PI kontrolör ile güç faktörü düzeltimi gerçekleşir.



Şekil 3. 8. Ortalama akım kontrolü ile güç faktörü düzenleme devresi

Ortalama akım mod kontrol yönteminde giriş akımının ortalama değerinin alınması kontrol sisteminin gürültülerden daha az etkilenmesini sağlamaktadır. Akım kontrolün de bir PI kontrolcü ve PWM sinyali ile yapılması sistemin tepki hızını ve dolayısıyla güç faktörünü arttırmaktadır.

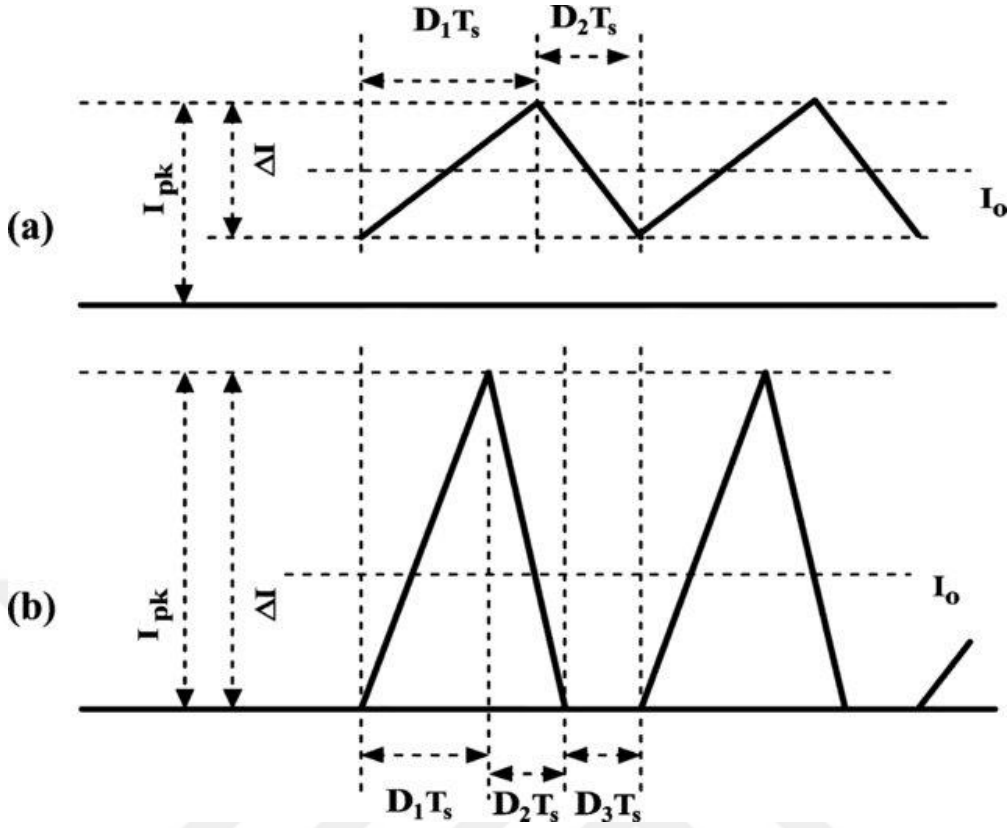
Güncel yöntemler arasında en yüksek güç faktörü düzeltimi sağlayan yöntem olan ortalama akım mod güç faktörü düzenleme devrelerinde karşılaşılan en büyük problemlerden biri verim sorunudur. Yükseltici anahtarın açılma ve kapanması sırasında anahtar yükseltici endüktanstan kaynaklanan akım gecikmesi anahtar akımı ve geriliminin aynı anda var olmasına dolayısıyla anahtar üzerinde bir güç kaybının ve elektromanyetik girişim gürültülerinin (EMI) oluşmasına neden olmaktadır. Bu nedenle ortalama akım kontrolü ile güç faktörü düzenleme devrelerinde verim yüzde seksen seviyelerindedir. Bu durumu önlemek için literatürde snubber cell olarak geçen bastırma hücreleri geliştirilmiştir. Şekil 3.9’da genel yapısı verilen bastırma hücreli ortalama akım mod güç faktörü düzenleme devresinde bastırma hücresi ile anahtarın akım ve geriliminin aynı anda var olması önlenerek verim düşümleri ve EMI gürültülerinin önüne geçilmektedir.



Şekil 3.9. Bastırma hücreli ortalama akım mod güç faktörü düzenleme devresi

3.4. Ortalama Akım Mod PFC Devrelerinin Tasarımı ve Eksiklikleri

DC-DC dönüştürücü temelli güç faktörü düzenleme devrelerinin tasarımı yapılırken yükseltici bobin üzerinden akan akımın sürekli veya kesintili olması önem teşkil etmektedir. Yükseltici bobin üzerindeki akımın şekil 3.10.b’de gösterildiği üzere bir anahtarlama periyodunda sıfır değerini görmesi durumu kesintili akım modu olarak ifade edilirken, şekil 3.10.a’da gösterildiği üzere yükseltici bobin akımının bir anahtarlama periyodunda sıfır değerini hiç görmediği yapıya sürekli akım modu ismi verilmektedir.



Şekil 3. 10. a) Sürekli akım modu; b) Kesintili akım modu

Sabit bir çıkış yükü için sürekli akım modu ve süreksiz akım modu karşılaştırıldığında süreksiz akım modunda giriş akımının tepe değeri sürekli akım modunun giriş akımı tepe değerinden daha yüksektir. Bu durum eleman seçimi yapılırken daha kalın kesitli iletkenler kullanılması gerektirmekte ayrıca yükseltici anahtar üzerindeki kayıplar artmakta dolayısı ile verim düşümlerine neden olmaktadır. Verimin önem arz ettiği çalışmalarda sürekli akım modunun kullanılması önem teşkil etmektedir.

Şekil 3.9’da genel yapısı verilen ortalama akım mod güç faktörü düzenleme devresinin sürekli akım modunda çalışacak şekilde tasarımı yapılırsa sürekli akım modundan Şekil 3.10.a’da görüleceği üzere $D_1 T_s$ süresindeki ve $(1-D_1) T_s$ süresindeki bobin akımı değerleri toplamının sıfır olması gerekmektedir. Bu durum denklem 3.10 ile ifade edilir.

$$\Delta i_{L(on)} + \Delta i_{L(off)} = 0 \quad (3.10)$$

Denklem 3.10’da $\Delta i_{L(off)}$ anahtarın açık olduğu süreçteki bobin akımının toplam değeri ve $\Delta i_{L(on)}$ anahtarın kapalı olduğu süreçteki toplam bobin akımı değeridir. Belirtilen denklem, denklem 3.11’deki gibi ifade edilir.

$$\frac{V_{in} \times D_1}{f \times L} + \frac{(V_{in} - V_{out}) \times (1 - D_1)}{f \times L} = 0 \quad (3.11)$$

Denklem 3.11’de V_{in} giriş gerilimi, D_1 anahtarın kapalılık süresi L yükseltici endüktans değeri ve f frekans değeridir. Belirtilen denklemde D_1 yalnız bırakılırsa denklem 3.12 elde edilir.

$$D_1 = \frac{V_{out} - V_{in}}{V_{out}} \quad (3.12)$$

Ayrıca belirtilen devre için giriş gerilimi denklem 3.13’teki gibi ifade edilebilir. Denklem 3.13’teki L yükseltici endüktans değeri f_{sw} anahtarlama frekansı Δi giriş akımı toplam değeridir. Denklem 3.13’te D_1 yerine denklem 3.12’deki değeri yazılırsa ve endüktans değeri yalnız bırakılırsa denklem 3.14 elde edilir.

$$V_{in} = L \frac{di}{dt} = L \frac{\Delta i}{D_1 \times \frac{1}{f_{sw}}} \quad (3.13)$$

$$L = \frac{V_{in,rms}^2 \times Pf}{P_{out} \times f_{sw} \times I_{L,\%r}} \times \left(1 - \frac{V_{in,rms} \times \sqrt{2}}{V_{out}} \right) \quad (3.14)$$

Denklem 3.14’te L yükseltici endüktans değeri, $V_{in,rms}$ giriş geriliminin etkin değeri, Pf güç faktörü değeri, P_{out} çıkış gücü değeri, f_{sw} anahtarlama frekansı, $I_{L,\%r}$ akımda istenilen dalgalanma miktarı ve V_{out} çıkış gerilimi değeridir.

$$C = \frac{P_{out}}{2\pi \times f_{sw} \times \Delta V_{out} \times V_{out}} \quad (3.15)$$

Çıkış kondansatörü değeri denklem 3.15’te belirtildiği gibi hesaplanır. Burada ΔV_{out} çıkış gerilimdeki bir anahtarlama süresindeki toplam değeridir.

3.4.1. Ortalama akım mod kontrol yöntemi eksiklikleri

Sürekli akım modunda, ortalama akım mod DC-DC dönüştürücü temelli güç faktörü düzenleme devrelerinin tasarımı yapılırken sabit bir yük için tasarımları yapılmaktadır. Fakat DC-DC dönüştürücü temelli güç faktörü düzenleme devresinin sık kullanıldığı uygulamalar olan şarj aletlerinde ise bataryanın şarj olması nedeni ile çıkış gücü zamanla azalmaktadır. Çıkış gücünde meydana gelen güç azalımı, sürekli akım modu için tasarımı yapılan devrenin kesintili akım moduna geçmesine neden olmaktadır. Sürekli akım modu için tasarımı yapılan devre kesintili akım modunda istenilen performansı gösterememekte ve güç faktörü düşümlerine neden olmaktadır.

Sürekli akım modundan kesintili akım moduna geçme sorunu belirtilen yük aralığı dikkate alınarak eleman seçimleri ile önlenmektedir. Yükseltici endüktans denklem 3.16 ile hesaplanmaktadır.

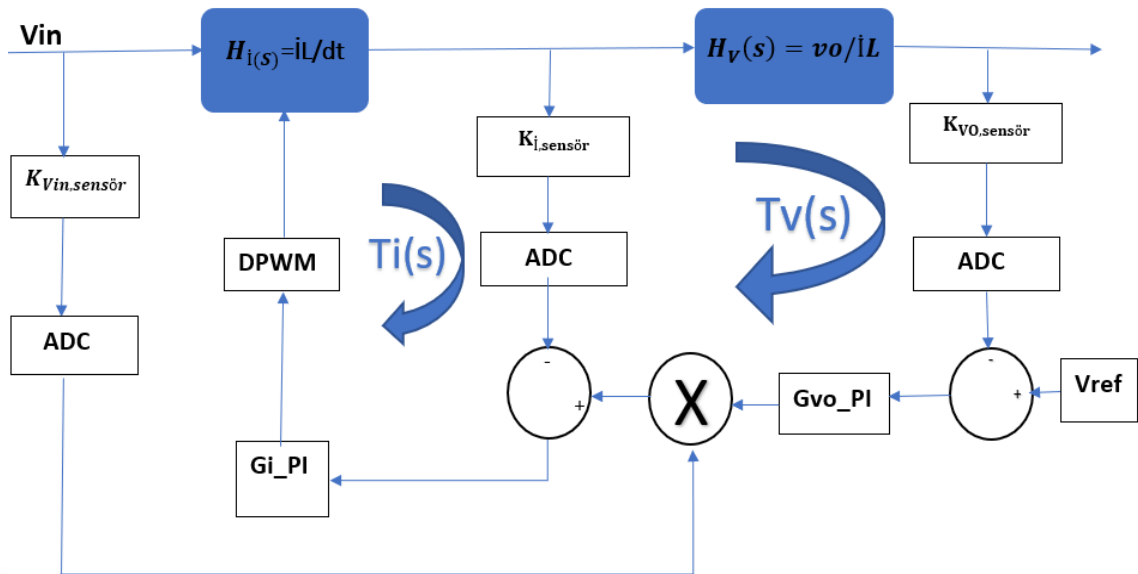
$$L = \frac{V_{in,rms}^2 \times Pf}{P_{outmin} \times f_{sw} \times I_{L,\%r}} \times \left(1 - \frac{V_{in,rms} \times \sqrt{2}}{V_{out}}\right) \quad (3.16)$$

Denklem 3.16'da P_{outmin} çıkış gücünün minimum değeridir. Denklem 3.16 ile denklem 3.14 mukayese edildiğinde aralarındaki tek fark değişken yükte yükseltici endüktansın minimum çıkış gücüne göre hesaplanmasıdır.

$$C = \frac{P_{outmax}}{2\pi \times f_{sw} \times \Delta V_{out} \times V_{out}} \quad (3.17)$$

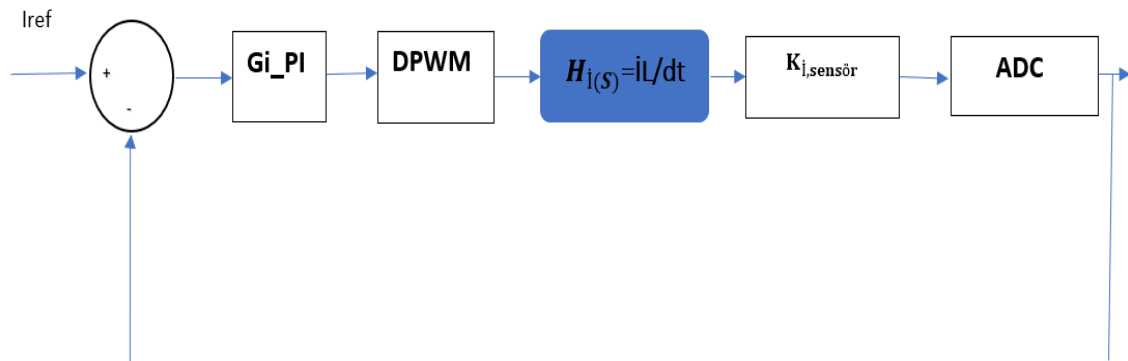
Değişken yüke sahip DC-DC dönüştürücü temelli güç faktörü düzenleme devrelerinde çıkış kapasitansı denklem 3.17'deki gibi hesaplanmakta olup bu denklemde belirtilen P_{outmax} değişken çıkış yükünün maksimum değeridir.

Denklem 3.16 ve 3.17'de verilen eleman seçimleri ile DC-DC dönüştürücü temelli güç faktörü düzenleme devrelerinde çıkış gücünün düşmesi ile meydana gelen akım modları arasındaki geçiş önlenmekte ve devrenin bütün güçlerde sürekli akım modunda çalışması sağlanmaktadır.



Şekil 3. 11. Ortalama akım mod güç faktörü düzenleme devresi kontrol döngüleri

Şekil 3.9’da verilen ortalama akım mod güç faktörü düzenleme devresinin kontrol diyagramı şekil 3.11’deki gibi elde edilir. Burada K_{vin} , sensör giriş gerilimi sensörü kazancı, $H_i(s)$ arttırıcı dönüştürücüye ait transfer fonksiyonu, K_i , sensör bobin akımı sensörünün kazancı, ADC analog dijital dönüştürücü kazancı, G_{i_PI} PI kontrolcü kazancı, DPWM pwm sinyali kazancı, $H_v(s)$ transfer fonksiyonu değeri ve G_{vo_PI} ikinci PI kontrolcü kazancıdır.



Şekil 3. 12. Akım kontrol döngüsü

Şekil 3.11’den güç faktörü düzeltimi için kullanılan döngü olan akım kontrol diyagramı çekilir ve birim geri beslemeli hali ile yeniden düzenlenir ise şekil 3.12’deki döngü elde edilir.

Güç faktörü düzeltimi için kullanılan bu kontrol döngüsüne ait olan transfer fonksiyonu denklem 3.18 ile elde edilmektedir.

$$T_i(s) = \frac{K_{i, \text{sensör}} \times \text{ADC} \times \text{DPWM} \times H_i(s) \times G_{i_PI}}{1 + K_{i, \text{sensör}} \times \text{ADC} \times \text{DPWM} \times H_i(s) \times G_{i_PI}} \quad (3.18)$$

Bu döngüye ait kontrolsüz transfer fonksiyonu denklik 3.19’da verildiği üzere ana döngüden ve dolayısı ile ana transfer fonksiyonundan G_{i_PI} ve DPWM değerlerinin çıkarılması ile elde edilir.

$$T_{i_k}(s) = \frac{K_{i, \text{sensör}} \times \text{ADC} \times H_i(s)}{1 + K_{i, \text{sensör}} \times \text{ADC} \times H_i(s)} \quad (3.19)$$

$$H_i(s) = \frac{\dot{L}}{dt} \quad (3.20)$$

$$\text{ADC} = \frac{2^N}{V_{ref}} \quad (3.21)$$

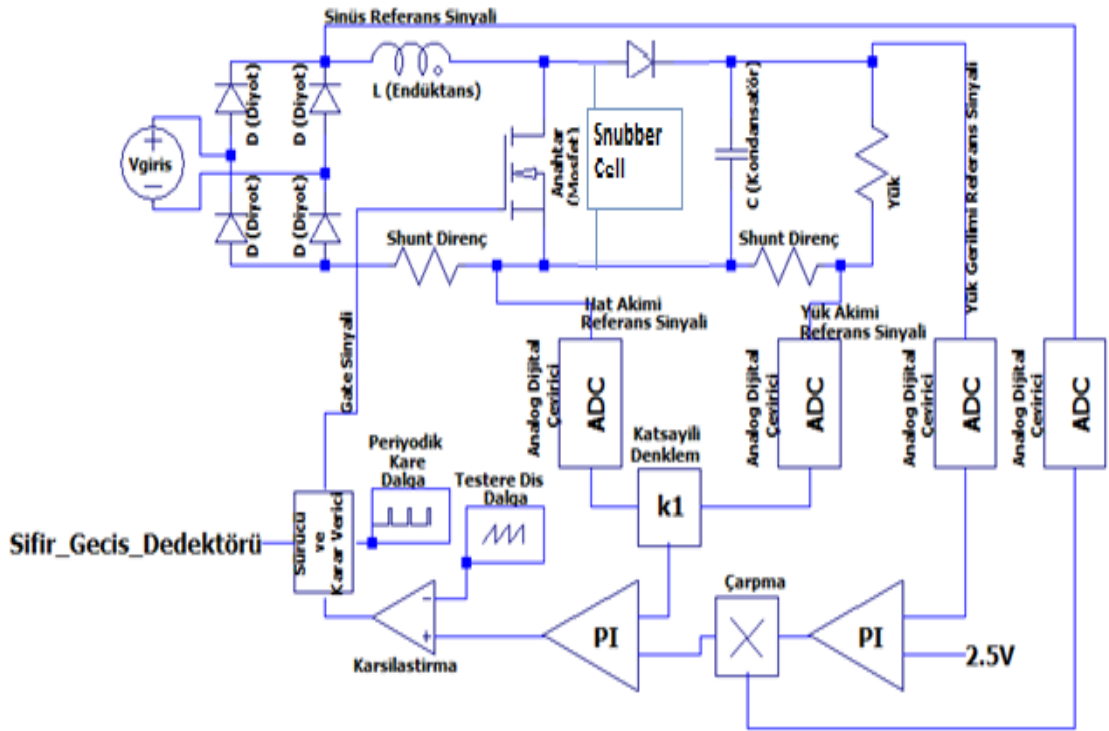
Denklem 3.19’da verilen güç faktörü düzenleme devresinin kontrolsüz transfer fonksiyonunda $H_i(s)$ arttırıcı dönüştürücünün transfer fonksiyonudur ve bobin akımına doğrudan bağlı bir ifadedir. ADC analog dijital dönüştürücü kazancıdır ve denklem 3.21 ile hesaplanmakta olup sabit bir katsayıdır. $K_{i, \text{sensör}}$ ise bobin akımı sensörünün kazancıdır.

Arttırıcı tip DC-DC dönüştürücü temelli güç faktörü düzenleme devrelerinde güç faktörü düzeltimi için kullanılan PI kontrol parametrelerinin hesaplamaları nominal güç için denklem 3.19’da verilen transfer fonksiyonuna göre yapılmaktadır. Çıkış gücünün nominal gücün altına düştüğü değerlerde giriş akımı değeri oransal olarak azalmaktadır. Giriş akımında meydana gelen değişimden dolayı denklem 3.20’den $H_i(s)$ ve denklem 3.19’dan kontrolsüz transfer fonksiyonu değeri değişmektedir. Nominal güçteki kontrolsüz transfer fonksiyonu için tasarlanan PI parametreleri düşük yüklerde kontrolsüz transfer fonksiyonunun değerinin değişmesinden dolayı iyi bir kontrol sergileyememekte ve bu durum güç faktörünün düşmesine neden olmaktadır.

3.4.2. Değişken yük uyumlu ortalama akım mod kontrol yöntemi

Güç faktörü düzeltimi için kullanılan PI parametrelerinin hesaplanması ve kontrolsüz transfer fonksiyonunun hesaplanması göz önünde bulundurulur ise çıkış gücü düşümünden kaynaklı güç faktörü düşümü problemini çözmenin iki yolu mevcuttur. Bu yollardan birincisi giriş akımını kontrol eden PI kontrolcü değerinin çıkış gücü değerine göre değiştirilmesidir. Fakat bu durumda her çıkış gücü için PI kontrol parametreleri yeniden hesaplanmalıdır. Bu durum kontrol yapısı bakımından çok karmaşık bir modelin oluşmasına neden olacağı için gerçekleştirilmesi mümkün değildir.

Belirtilen problemi çözmenin ikinci yolu ise çıkış gücünün düştüğü değerlerde kontrolsüz transfer fonksiyonunu sabit tutmaktır. Çıkış gücü değeri düştüğünde giriş akımı değeri düşmekte denklem 3.20 ve 3.19'dan kontrolsüz transfer fonksiyonu değeri düşmektedir. ADC ve DPWM kazançlarının sabit değerler olduğu göz önüne alınırsa kontrolsüz transfer fonksiyonunu nominal güç değerine getirmenin tek yolu giriş akımı sensörünün kazancını değiştirmektir. Bu işlemi analog olarak gerçekleştirmek karmaşık bir devre düzeneğini oluşturacağı için dijital bir oransal akım okuyucu gerçekleştirilmiştir ve giriş akımı çıkış gücüne bağlı olarak belirli bir katsayı ile çarpılarak alınmıştır. Değişken yük uyumlu kontrol yöntemi olarak isimlendirilen bu yöntem ile nominal gücün altındaki tüm güçlerde kontrolsüz transfer fonksiyonu sabit bir değerde tutularak PI kontrolörün optimum kontrol gerçekleştirmesi sağlanmıştır.



Şekil 3. 13. Değişken yük uyumlu ortalama akım kontrolü ile güç faktörü düzeltimi

Şekil 3.13'te genel yapısı verilen değişken yük uyumlu kontrol yönteminde yük akımı okunmuş ve okunan değere göre bir çarpan değeri k1 bloğu içinde non-lineer interpolasyon yöntemi ile üretilecektir. Bu değer giriş akımındaki değer değişikliklerinde kontrolsüz transfer fonksiyonunu sabit tutmak için okunan giriş akımı ile çarpılmıştır. Giriş akımının çıkış gücüne göre orantılı olarak yükseltildiği bu yöntemde kontrolsüz transfer fonksiyonu tüm yüklerde sabit tutulmuş ve PI kontrol parametrelerinin optimum kontrol gerçekleştirmesi sağlanmıştır. Bu sayede çıkış gücü düşümlerinden kaynaklı güç faktörü düşümlerinin önüne geçilmiştir.

Şekil 3.13'te kontrol diyagramı verilen değişken yük uyumlu ortalama akım mod kontrol yöntemini ile şekil 3.9'da kontrol diyagramı verilen ortalama akım mod kontrol yöntemi arasındaki en temel fark giriş akımının bir oransal akım okuyucu ile okunmasıdır. Belirtilen oransal akım okuyucunun 220Vrms giriş gerilimi, 400 Vdc çıkış gerilimi ve 50-400 Watt yük aralığı için tasarımı yapılmıştır. Bu tasarım yapılırken non-lineer eğrinin düzgün bir karakteristiğe sahip olması için çıkış gücü sırasıyla 35 W, 50 W, 75 W, 100 W, 200 W ve 400 W olarak ayarlanmış ve her bir güç değeri için yük akımı, giriş akımı çarpan değeri ikilileri Çizelge 1'de verilmektedir.

Çizelge 3. 1. Çıkış yükü ve yük akımı için giriş akımı çarpan değeri

Yük (W)	Yük Akımı (A)	Giriş akımı çarpan değeri
400	1	3,4
200	0,5	6,6
100	0,25	13,6
75	0,1875	20
50	0,125	29,3
35	0,0875	45

Çizelge 3.1'de verilen yük akımı için giriş akımı çarpan değerinin iki boyutlu düzlemdeki genel dağılımı 3.14.a'da gösterilmektedir. Genel dağılımı verilen yük akımı için giriş akımı çarpan değerine eğri uydurmak için;

$$Y = aX^b + c \quad (3.22)$$

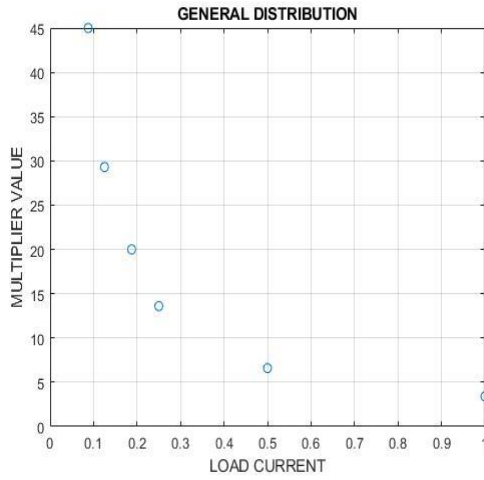
Üstel fonksiyonu eğri olarak seçilmiştir. Belirtilen denklemde Y giriş akımı çarpan değerini, X yük akımını temsil etmektedir. Denklemde verilen a, b ve c sabit değerlerini belirlemek amacı ile Gauss-Newton iterasyonu temelli doğrusal olmayan en küçük kareler yöntemi kullanılmıştır. Gauss-Newton yöntemi ile eğri uydurma gerçekleştirilirken öncelikle denklem 3.22'deki formata uygun rastgele bir eğri üretilir ve üretilen eğrinin Şekil 3.14'a da verilen noktalara olan uzaklığı belirlenir. Her bir uzaklık değeri E_i olmak üzere;

$$\sum_{i=1}^{\infty} (E_i)^2 = 0 \quad (3.23)$$

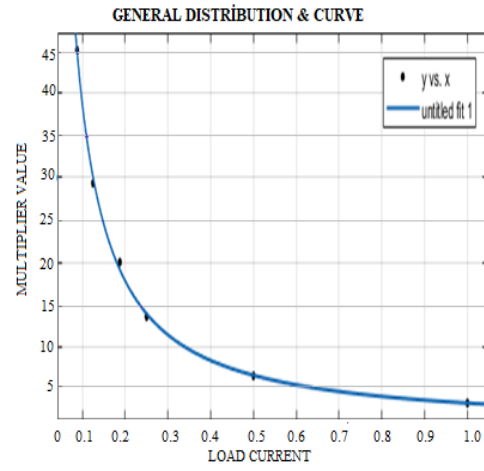
Eğrinin veri notlarına olan uzaklıklarını toplamı sıfıra yaklaştırarak eğri uydurma gerçekleştirilir. Matlab Curve Fitting Toolbox ile gerçekleştirilen Gauss-Newton yöntemi ile eğri uydurma sonucunda denklem 3.24 elde edilmiştir.

$$Y = 2.7X^{-1.147} + 0.6948 \quad (3.24)$$

Denklem 3.24'te Y giriş akımı çarpan değeri ve X yük akımı değeri olup bu eğriye ait grafiğin veri noktaları ile olan ilişkisi Şekil 3.14.b'de gösterildiği gibidir. Doğrusal olmayan en küçük kareler yöntemi ile elde edilen üstel eğrimiz %97 oranında giriş akımı çarpan değeri-yük akımı ilişkisini temsil edebilmektedir.



(a)



(b)

Şekil 3. 14.a) Giriş akımı çarpan değeri genel dağılımı; b) Non-lineer eğri uydurma

4. BULGULAR VE TARTIŞMA

Tez kapsamında değişken yük uyumlu ortalama akım mod DC-DC dönüştürücü temelli güç faktörü düzenleme devresi geliştirilmiş olup, ortalama akım mod DC-DC dönüştürücü temelli güç faktörü düzenleme devresi ve değişken yük uyumlu ortalama akım mod DC-DC dönüştürücü temelli güç faktörü düzenleme devresi, Psim ortamında karşılaştırılarak, düşük güçlerde meydana gelen güç faktörü düşümlerinin geliştirilen güç faktörü düzenleme devresi ile önlendiği gösterilmiştir.

Literatürde var olan ortalama akım mod DC-DC dönüştürücü temelli güç faktörü düzenleme devresinin 50-400 Watt yük aralığı için tasarımında yükseltici endüktans değeri hesaplanırken denklem 3.16'dan yararlanılmıştır. Burada $V_{in,rms}$ 220V, Pf 0.8, $P_{out-min}$ 50 W, f_{sw} 50 kHz, $I_{L,\%r}$ 0.15 ve V_{out} 400 V seçilmiş ve yükseltici endüktans değeri denklem 4.1'de görüleceği üzere yaklaşık 20 mH olarak belirlenmiştir.

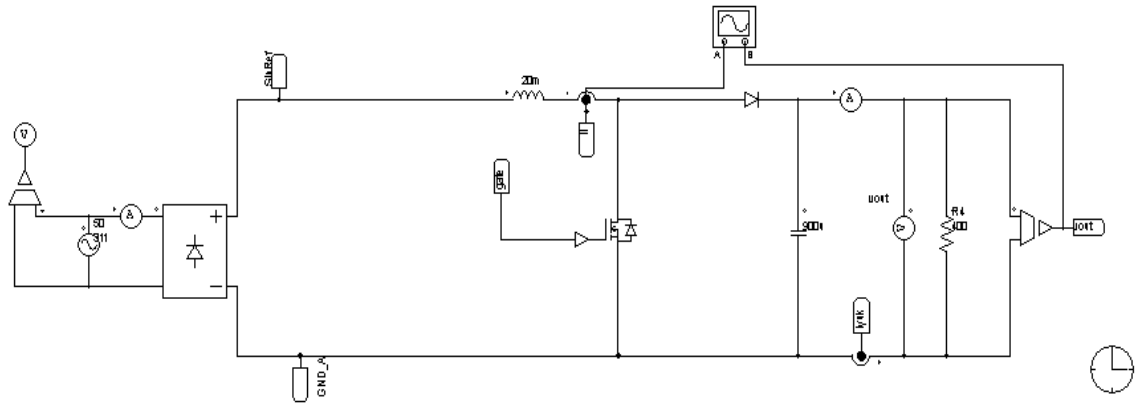
$$L = \frac{220^2 \times 0.8}{50 \times 50000 \times 0.15} \times \left(1 - \frac{220 \times \sqrt{2}}{400}\right) = 20 \text{ mH} \quad (4.1)$$

Değişken çıkış yüküne sahip DC-DC dönüştürücü temelli güç faktörü düzenleme devrelerinde yükseltici endüktans seçiminin minimum çıkış gücüne göre yapılması maksimum çıkış gücünde yükseltici endüktansın doyuma giderek kısa devre olmasına neden olmaktadır. Bu sorun yükseltici endüktansın nüve seçimi ile giderilmelidir. Başka bir deyişle yükseltici endüktansın değeri yani sarım sayısı minimum çıkış gücüne göre seçilirken, nüve karakteristiği maksimum çıkış gücüne göre belirlenmelidir.

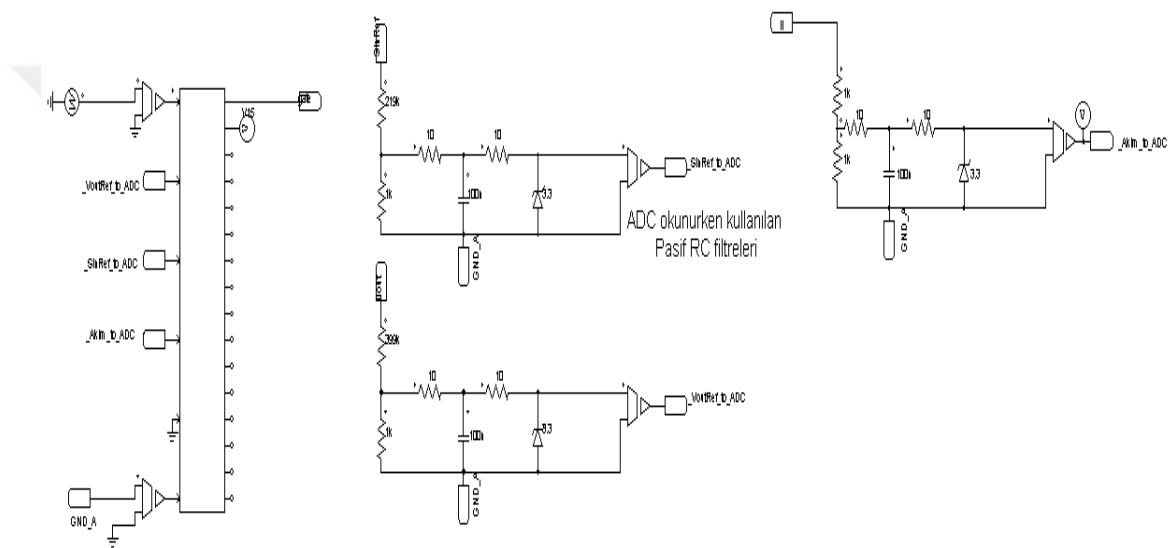
Ortalama akım mod DC-DC dönüştürücü temelli güç faktörü düzenleme devresinin 50-400 Watt yük aralığı için çıkış kapasitansı tasarlanırken, maksimum çıkış gücü olan 400 W için tasarımı denklem 3.17'den yararlanılarak gerçekleştirilmiştir. Burada $P_{out-max} = 400W$, $f_{sw} = 50 \text{ kHz}$, $\Delta V_{out} = \%0,4$ ve $V_{out} = 400V$ seçilmiş ve çıkış kapasitansı denklem 4.2'de gösterildiği üzere 900 μF olarak hesaplanmıştır.

$$C = \frac{400}{2\pi \times 50000 \times 0.004 \times 400} = 900\mu F \quad (4.2)$$

Şekil 4.1'de parametre hesaplamaları yapılan ortalama akım mod DC-DC dönüştürücü temelli güç faktörü düzenleme devresi ve Şekil 4.2'de bu devreye ait kontrolcü ve analog-dijital dönüştürücülerin Psim simülasyon ortamı ifadeleri gösterilmektedir.



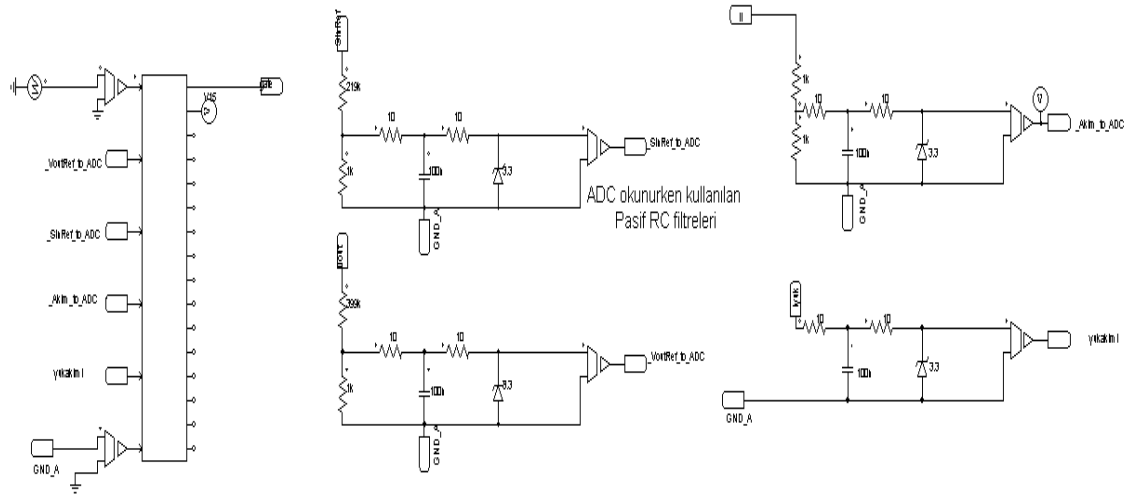
Şekil 4. 1. Ortalama akım mod DC-DC dönüştürücülü güç faktörü düzenleme devresi



Şekil 4. 2. Ortalama akım mod DC-DC dönüştürücü temelli PFC kontrol yapısı

Psim ortamında simülasyonu gerçekleştirilen ortalama akım mod DC-DC dönüştürücü temelli güç faktörü düzenleme devresinde bölüm 3.4'te açıklandığı üzere giriş akımı, sinüs gerilimi ve çıkış gerilimi 150 kHz frekansa sahip alçak geçiren filtre ile algılanmaktadır. Müteakip süreçte şekil 4.2'deki C# kartı ile çıkış gerilimi ve güç faktörü kontrolü yapılmaktadır. Ortalama akım mod DC-DC dönüştürücü temelli güç faktörü düzenleme devresi ile tez kapsamında geliştirilen değişken yük uyumlu ortalama akım mod kontrol yöntemi arasındaki farkın, giriş akımının yük akımına bağlı olan bir katsayı ile çarpılması olduğu göz önüne alınırsa, değişken yük uyumlu ortalama akım mod kontrol yönteminin ana devresi şekil 4.1 ile aynı olup kontrol devresi şekil 4.3'teki gibidir.

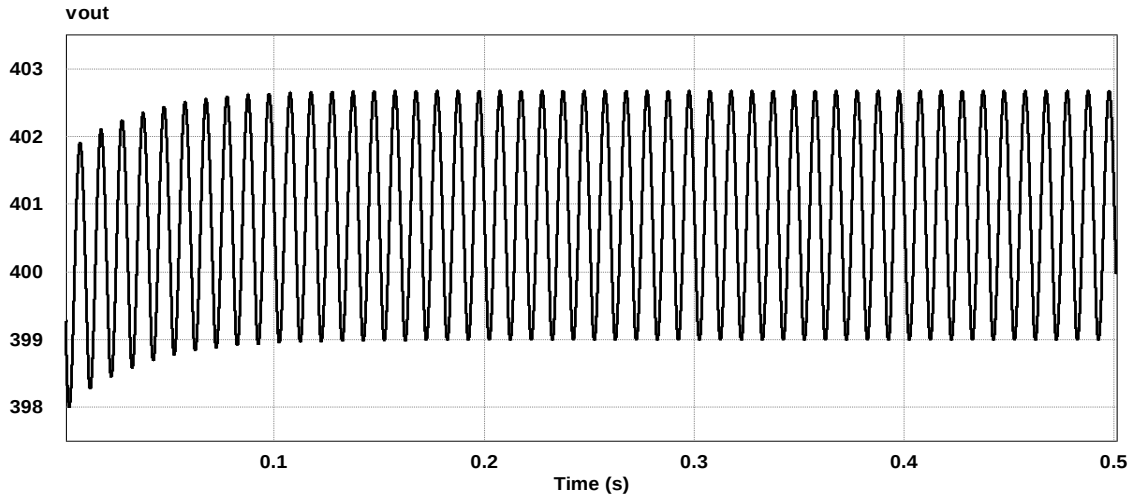
Değişken yük uyumlu ortalama akım mod kontrol yönteminde giriş akımı, sinüs gerilimi ve çıkış geriliminin yanı sıra yük akımı da 150 kHz'lik alçak geçiren filtreden geçirilerek alınmaktadır. Yük akımına bağlı olarak giriş akımı bir katsayı ile çarpılarak okunmakta ve kontrolleri yapılmaktadır.



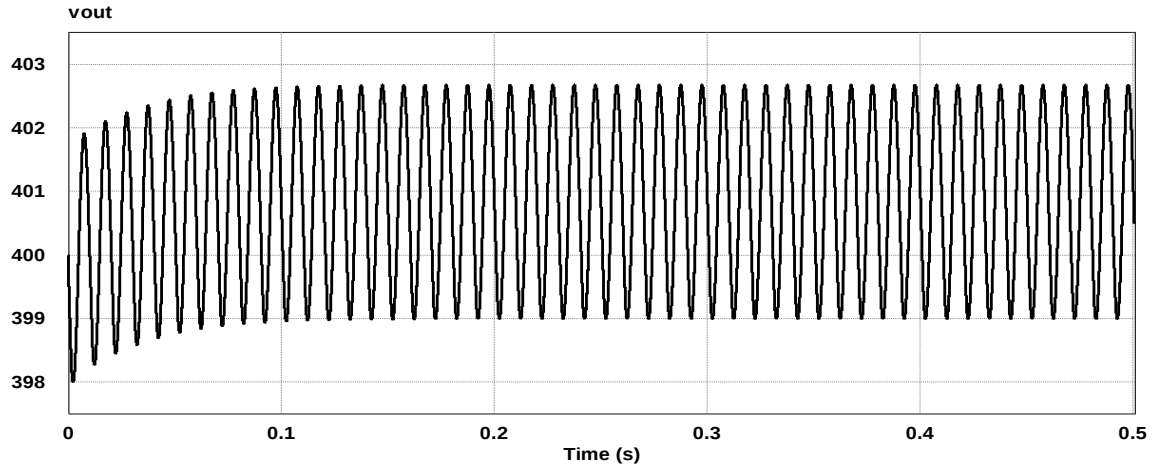
Şekil 4. 3. Değişken yük uyumlu ortalama akım mod DC-DC dönüştürücü temelli PFC kontrol yapısı

4.1. 400 Watt Çıkış Gücü İçin Güç Faktörü Düzeltim Performansları

Nominal çıkış gücü olan 400 W çıkış gücünde ortalama akım mod DC-DC dönüştürücü temelli güç faktörü düzenleme devresinin çıkış gerilimi değeri 4.4'te verilmektedir. Değişken yük uyumlu ortalama akım mod DC-DC dönüştürücü temelli güç faktörü düzenleme devresinin çıkış gerilimi değeri 4.5'te sunulmaktadır.

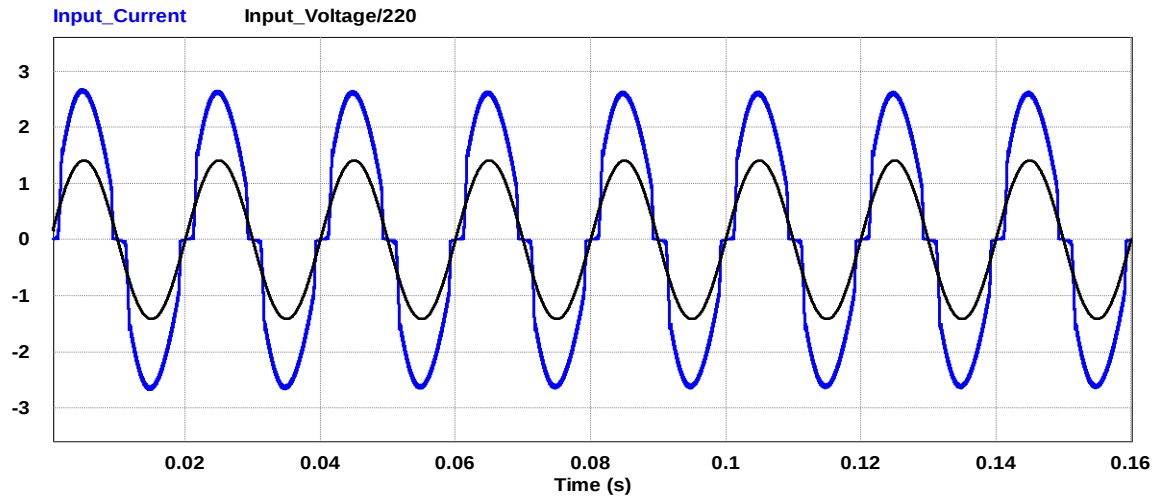


Şekil 4. 4. 400 W çıkış yükü için ortalama akım mod çıkış gerilimi

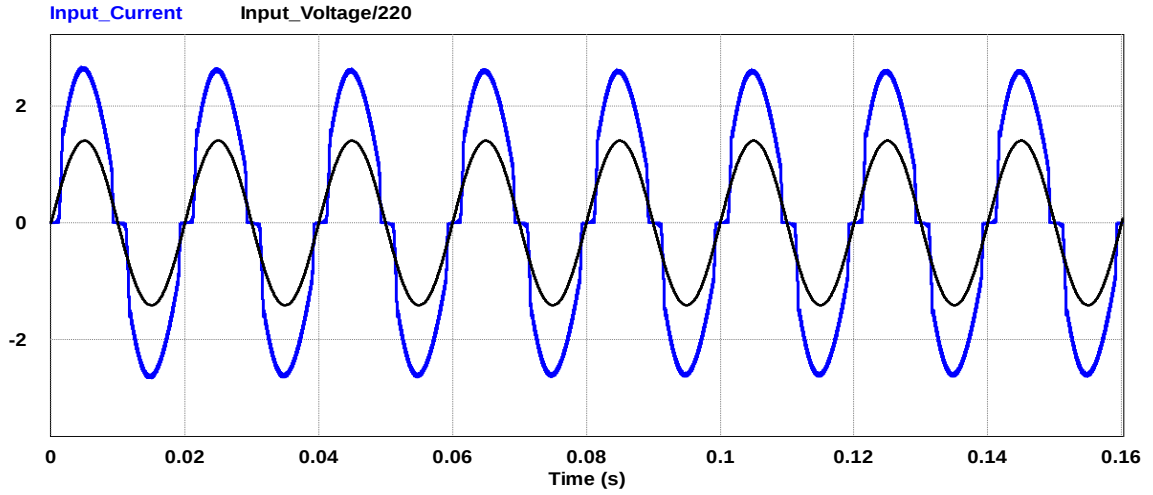


Şekil 4. 5. 400 W çıkış yükü için değişken yük uyumlu çıkış gerilimi

Nominal çıkış gücü olan 400 W çıkış gücünde değişken yük uyumlu ortalama akım mod DC-DC dönüştürücü temelli güç faktörü düzenleme devresinde akım, şekil 3.14.b'deki grafikten, yaklaşık olarak 1 ile çarpılmaktadır. Bu durum nominal güçte ortalama akım mod DC-DC dönüştürücünün giriş akımını ayrıntılı olarak okuduğu bu nedenle akım çarpanına ihtiyaç duymamasından kaynaklanmaktadır. Diğer bir ifade ile nominal güçte ortalama akım mod DC-DC dönüştürücü temelli güç faktörü düzenleme devresi ile değişken yük uyumlu DC-DC dönüştürücü temelli güç faktörü düzenleme devresi aynı kontrol yapısını sergilemektedirler. Bu nedenle çıkış gerilimi değerleri her iki yöntemde de 0.09 saniyede istenilen voltaj olan 400 volt değerine ulaşmış ve her iki yönteminden nominal güç için güç faktörü değerleri yaklaşık olarak 0.99 değerindedir. Giriş akımı-giriş voltajı grafikleri şekil 4.6 ve 4.7'de verilmiştir. Akım gerilim ilişkilerinin ayrıntılı anlaşılabilmesi adına giriş gerilimi 1/220 oranında küçültülmüştür.



Şekil 4. 6. 400 W çıkış yükü için ortalama akım mod giriş akımı ve giriş gerilimi

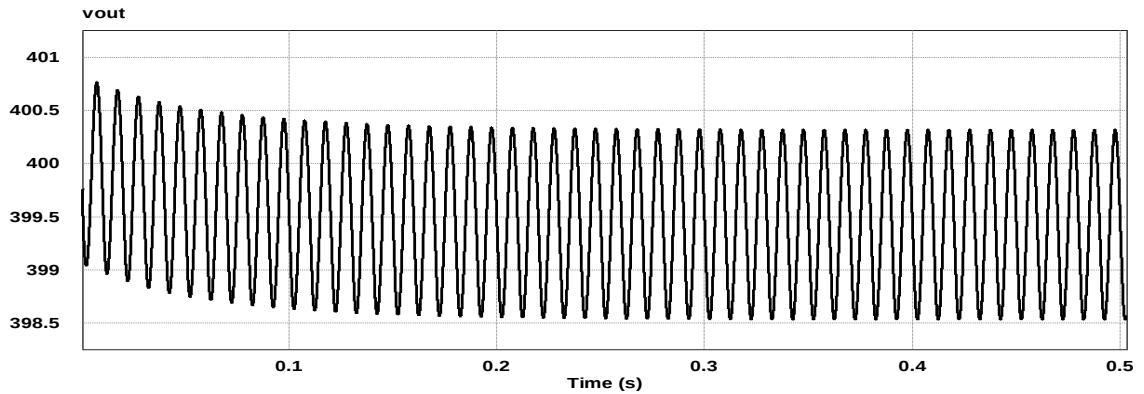


Şekil 4. 7. 400 W çıkış yükü için değişken yük uyumlu giriş akımı ve giriş gerilimi

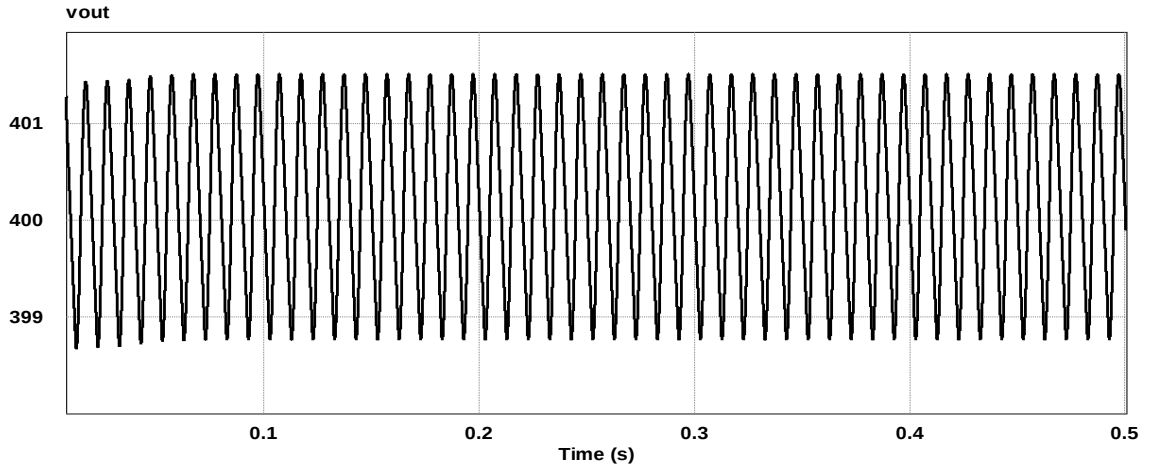
400 Watt nominal çıkış gücü için ortalama akım mod DC-DC dönüştürücü temelli güç faktörü düzenleme devresinin giriş akımının toplam harmonik bozulma (THD) değeri %1.36 olarak elde edilmiştir. Aynı yük için değişken yük uyumlu DC-DC dönüştürücü temelli güç faktörü düzenleme devresinin giriş akımı THD değeri %1.31 olarak hesaplanmıştır. Elde edilen sonuçlar birbirine çok yakın olup, mevcut durum üçüncü bölümde açıklanan nominal yükte ortalama akım mod kontrol yönteminin iyi bir performans gösterdiğini kanıtlamaktadır.

4.2. 200 Watt Çıkış Gücü İçin Güç Faktörü Düzeltim Performansları

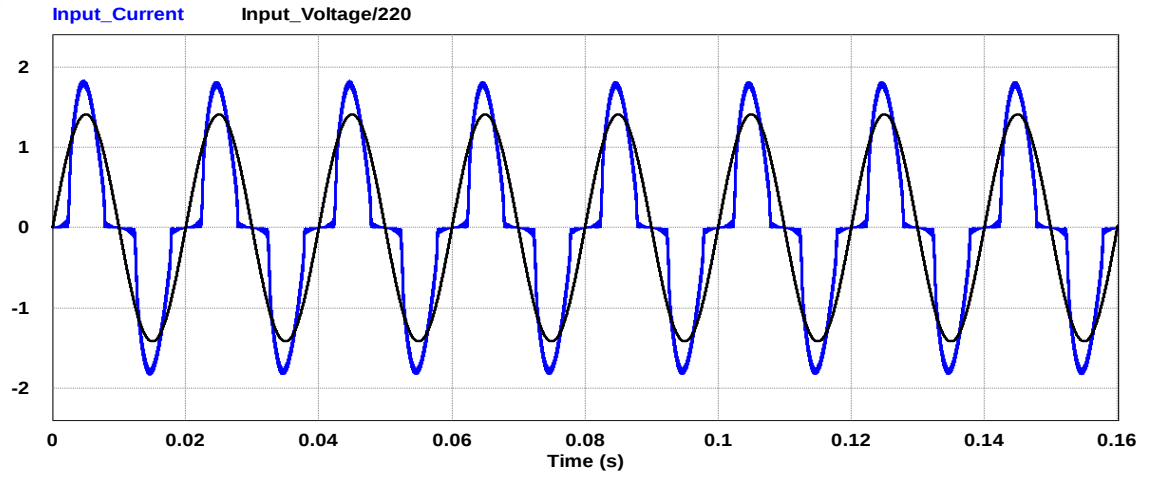
200 W çıkış gücünde ortalama akım mod DC-DC dönüştürücü temelli güç faktörü düzenleme devresinin çıkış gerilimi değeri şekil 4.8’de ve giriş akımı giriş gerilimi ilişkisi şekil 4.10’da gösterilmektedir. Değişken yük uyumlu ortalama akım mod DC-DC dönüştürücü temelli güç faktörü düzenleme devresinin çıkış gerilim değeri şekil 4.9’da ve giriş akımı giriş gerilimi ilişkisi şekil 4.11’de verilmiştir.



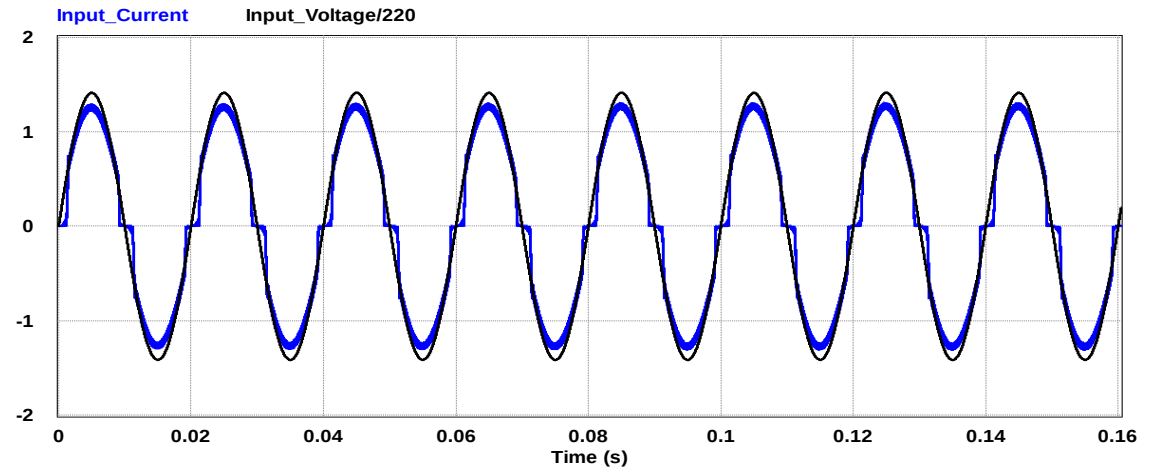
Şekil 4. 8. 200 W çıkış yükü için ortalama akım mod çıkış gerilimi



Şekil 4. 9. 200 W çıkış yükü için değişken yük uyumlu çıkış gerilimi



Şekil 4. 10. 200 W çıkış yükü için ortalama akım mod giriş akımı ve gerilimi

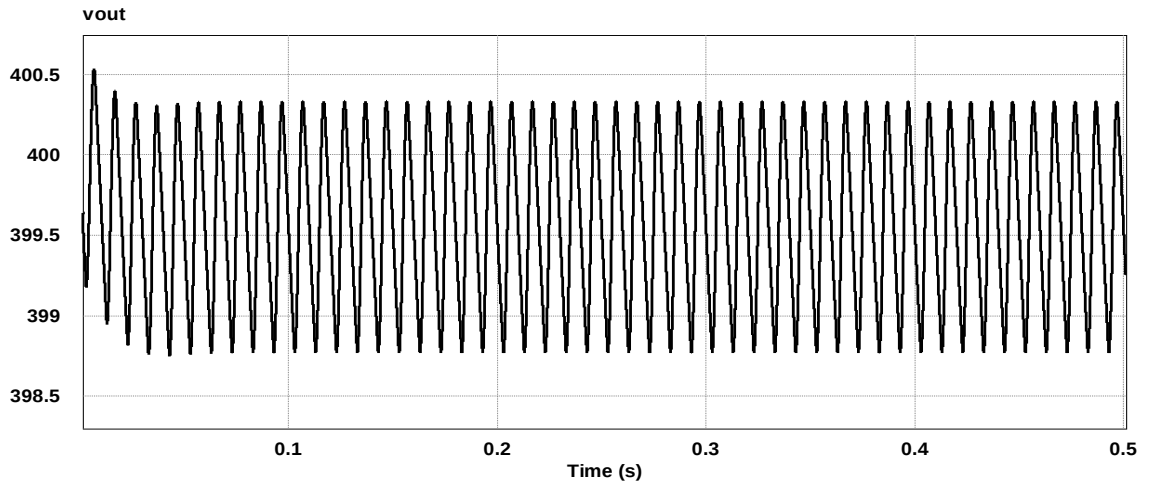


Şekil 4. 11. 200 W çıkış yükü için değişken yük uyumlu giriş akımı ve gerilimi

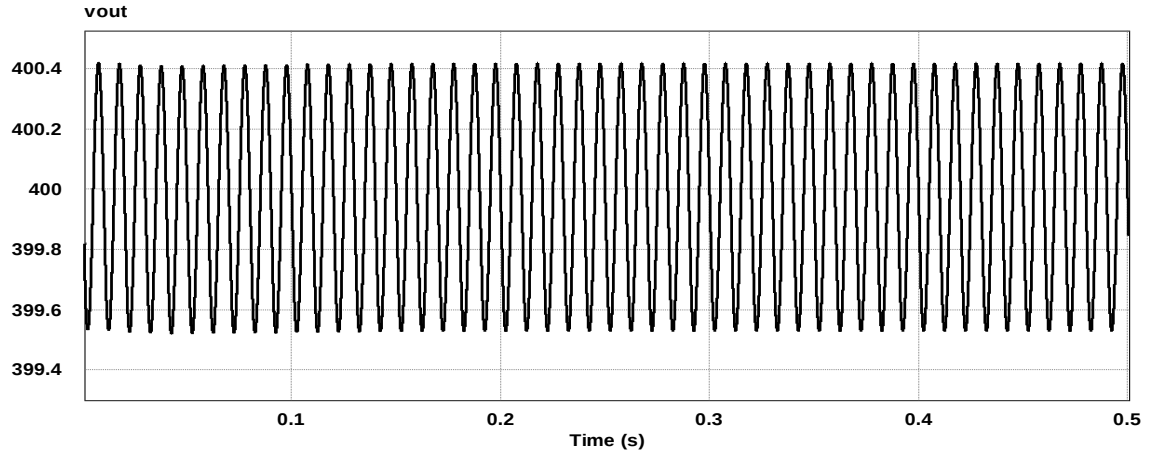
Ortalama akım mod kontrol yönteminde çıkış gerilimi 0.5 V sapma ile 399.5 V değerine 0.9 saniyede ulaşmıştır. Değişken yük uyumlu kontrol yönteminde ise çıkış gerilimi tam istenilen değer olan 400 V değerini 0.9 saniyede ulaşmıştır. Ortalama akım mod kontrol yönteminde güç faktörü değeri % 90.7 ve THD değeri % 4 iken değişken yük uyumlu kontrol yönteminde güç faktörü % 99.1 ve THD değeri % 1.25 olarak ölçülmüştür. Bu durum nominal gücün yarı değeri olan 200 Watt değerinde ortalama akım mod kontrol yönteminin güç faktörü düzeltiminin düşmeye başladığını göstermektedir.

4.3. 100 Watt Çıkış Gücü İçin Güç Faktörü Düzeltimi Performansları

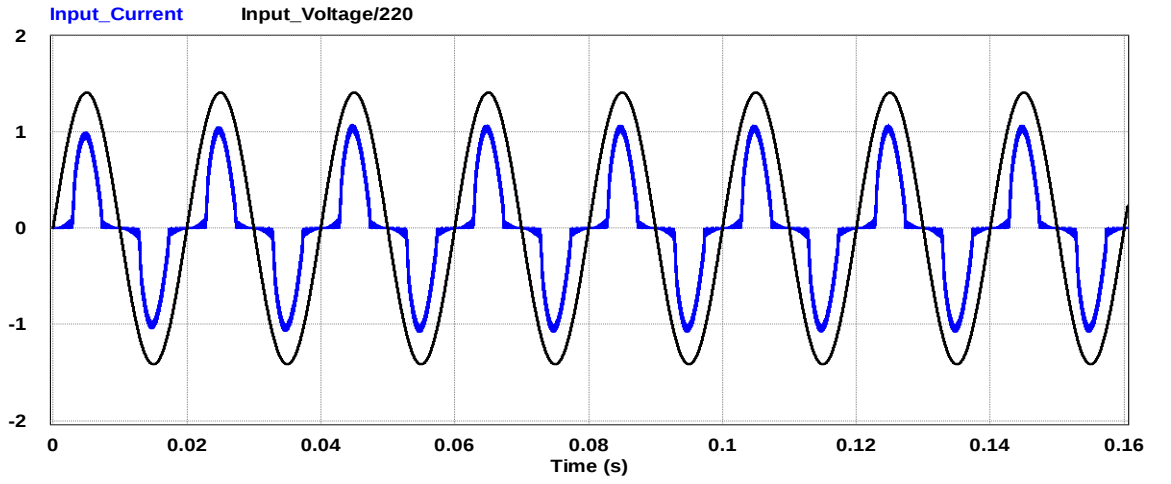
100 W çıkış gücünde ortalama akım mod DC-DC dönüştürücü temelli güç faktörü düzenleme devresinin çıkış gerilimi değeri şekil 4.12’de ve giriş akımı giriş gerilimi ilişkisi şekil 4.14’te gösterilmektedir. Değişken yük uyumlu ortalama akım mod DC-DC dönüştürücü temelli güç faktörü düzenleme devresinin çıkış gerilimi değeri şekil 4.13’te ve giriş akımı giriş gerilimi ilişkisi şekil 4.15’te verilmiştir.



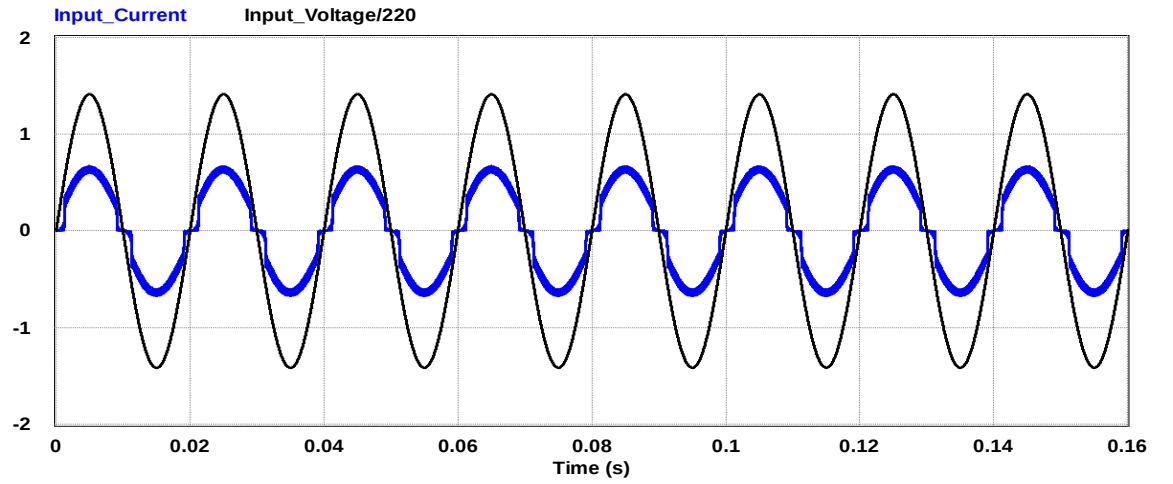
Şekil 4. 12. 100 W çıkış yükü için ortalama akım mod çıkış gerilimi



Şekil 4. 13. 100 W çıkış yükü için değişken yük uyumlu çıkış gerilimi



Şekil 4. 14. 100 W çıkış yükü için ortalama akım mod giriş akımı ve giriş gerilimi

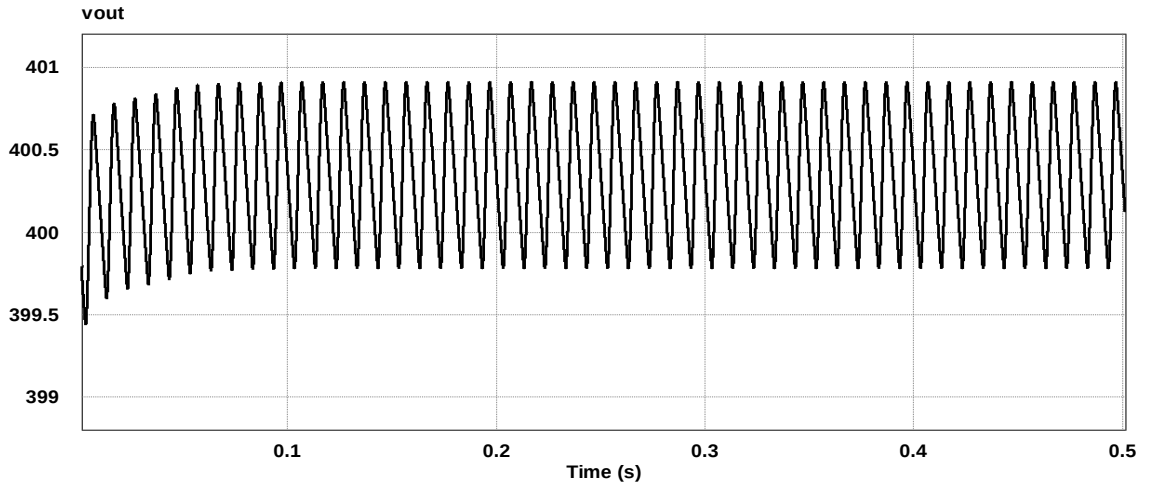


Şekil 4. 15. 100 W çıkış yükü için değişken yük uyumlu giriş akımı ve giriş gerilimi

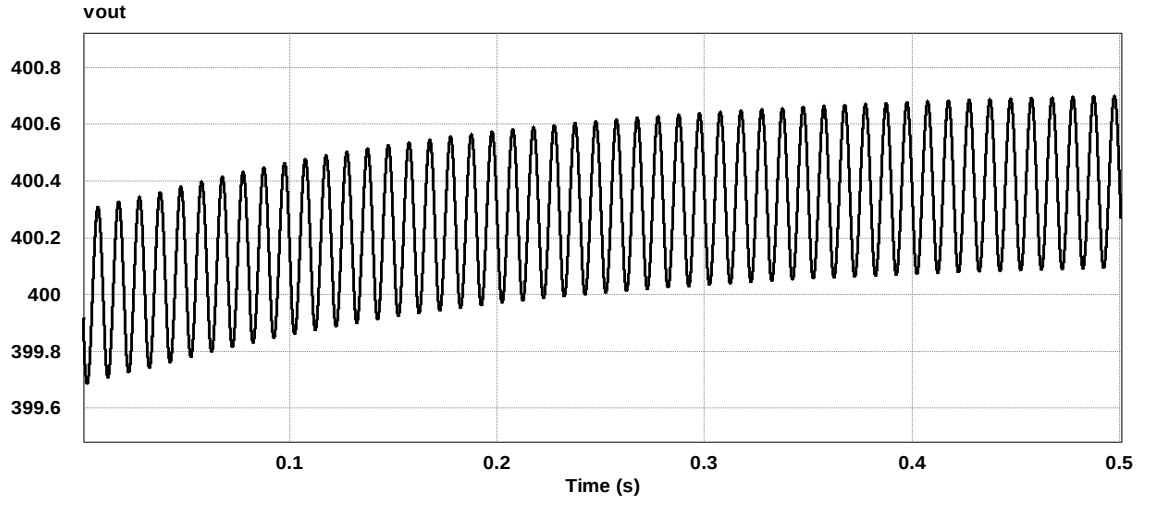
100 Watt çıkış gücünde ortalama akım mod kontrol yöntemi çıkış gerilim değeri, istenilen gerilimden 0.5 V sapma ile 399.5 V değerine otururken değişken yük uyumlu kontrol yönteminin çıkış gerilimi istenilen çıkış gerilim değerine oturmuştur. Ayrıca ortalama akım mod kontrol yönteminde giriş akımı şekil olarak giriş geriliminde gözle görülebilir derecede uzaklaşmıştır ve %85 güç faktörü değerine ve % 6.1 THD değerine sahiptir. Diğer taraftan değişken yük uyumlu kontrol yönteminde transfer fonksiyonunun sabit tutulması sayesinde giriş akımı şekil olarak giriş gerilimi ile aynı forma sahiptir ve %98 güç faktörü değerine ve % 1.92 THD değerine sahiptir. Bu durum değişken yük uyumlu kontrol yönteminin düşük güçlerde giriş akımı belirli bir katsayı ile çarparak okumasının giriş akımının kontrolünü kolaylaştırarak güç faktörünü yükselttiğini ve THD engellediğini kanıtlamaktadır.

4.4. 75 Watt Çıkış Gücü İçin Güç Faktörü Düzeltimi Performansları

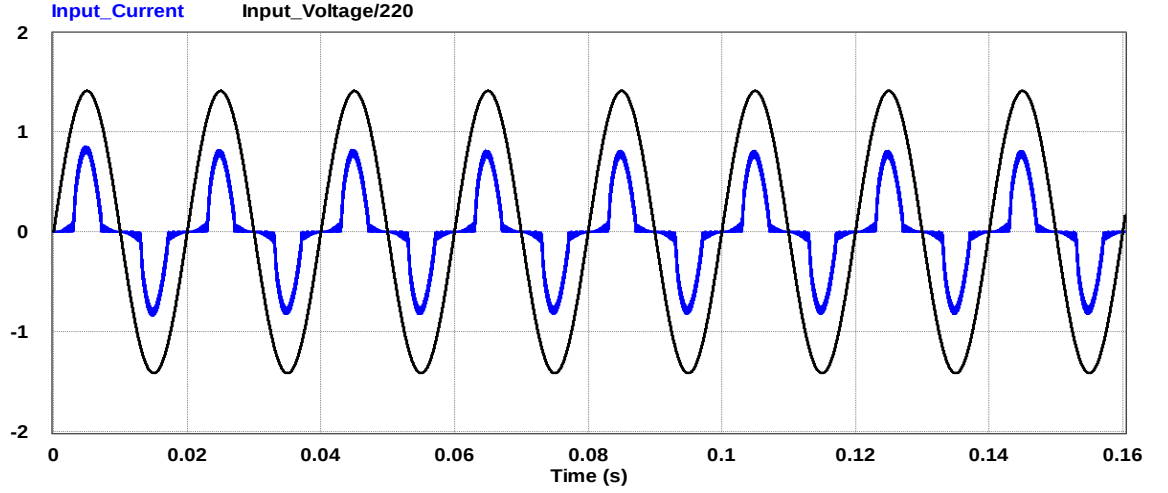
75 W çıkış gücünde ortalama akım mod DC-DC dönüştürücü temelli güç faktörü düzenleme devresinin çıkış gerilimi değeri şekil 4.16'da ve giriş akımı giriş gerilimi ilişkisi şekil 4.18'de gösterilmektedir. Değişken yük uyumlu ortalama akım mod DC-DC dönüştürücü temelli güç faktörü düzenleme devresinin çıkış gerilimi değeri şekil 4.17'de ve giriş akımı giriş gerilimi ilişkisi şekil 4.19'da verilmiştir.



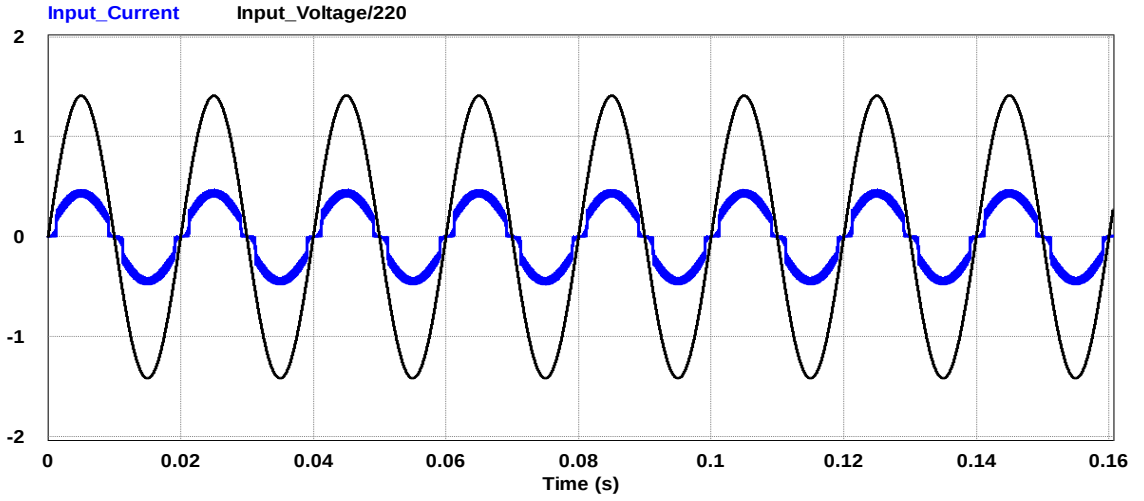
Şekil 4. 16. 75 W çıkış yükü için ortalama akım mod çıkış gerilimi



Şekil 4. 17. 75 W çıkış yükü için değişken yük uyumlu çıkış gerilimi



Şekil 4. 18. 75 W çıkış yükü için ortalama akım mod giriş akımı ve giriş gerilimi

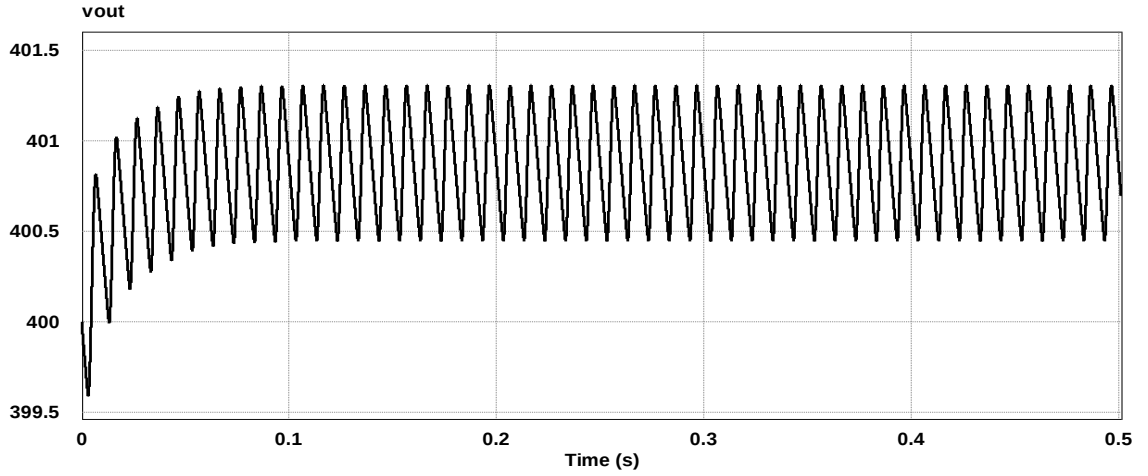


Şekil 4. 19. 75 W çıkış yükü için değişken yük uyumlu giriş akımı ve giriş gerilimi

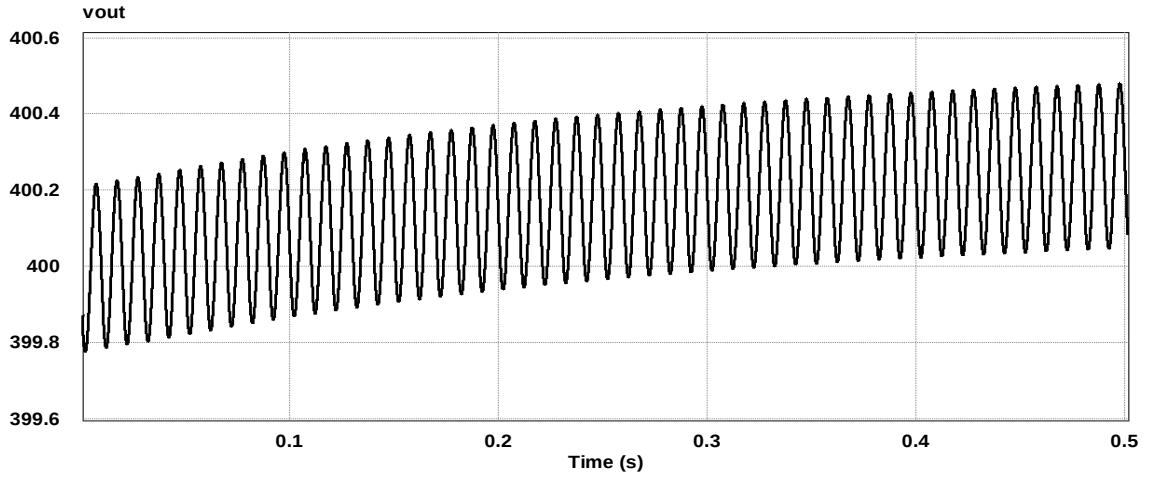
75 W çıkış gücü için ortalama akım mod kontrol yönteminde çıkış gerilimi 400.5 V değerine sahiptir ve giriş akımı giriş gerilimden şekil olarak tamamen farklı olup güç faktörü değeri % 82.5 ve THD değeri %6.88'dir. Değişken yük uyumlu kontrol yöntemi ise çıkış gerilimine 400.4 V değerine ulaşmıştır ve çok düşük güçlerde dahi giriş akımı şekil olarak giriş gerilimine çok benzer olup güç faktörü değeri % 99.2 ve THD değeri %1.38'dir.

4.5. 50 Watt Çıkış Gücü İçin Güç Faktörü Düzeltimi Performansları

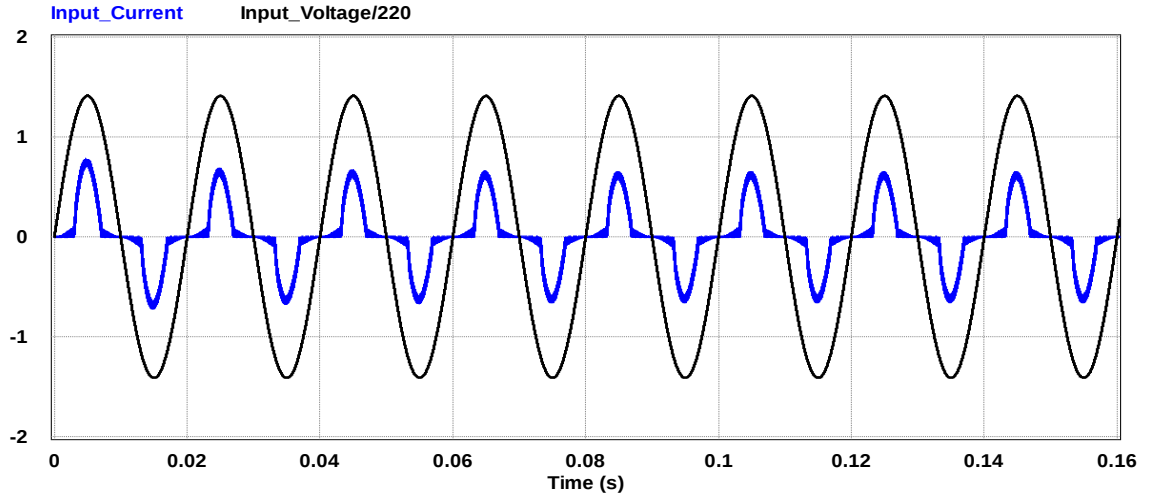
50 W çıkış gücünde ortalama akım mod DC-DC dönüştürücü temelli güç faktörü düzenleme devresinin çıkış gerilimi değeri şekil 4.20’de ve giriş akımı giriş gerilimi ilişkisi şekil 4.22’de gösterilmektedir. Değişken yük uyumlu ortalama akım mod DC-DC dönüştürücü temelli güç faktörü düzenleme devresinin çıkış gerilimi değeri şekil 4.21’de ve giriş akımı giriş gerilimi ilişkisi şekil 4.23’te verilmiştir.



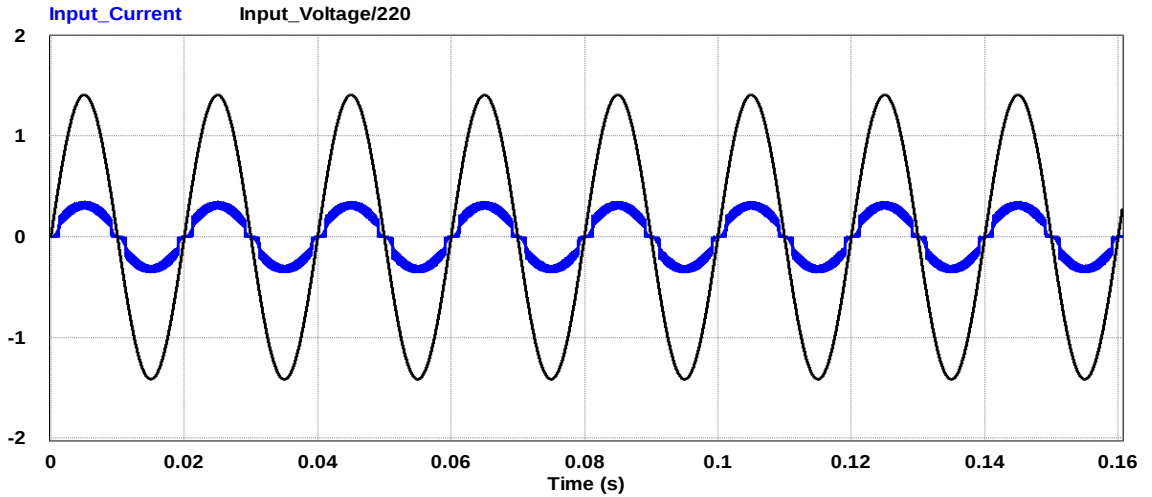
Şekil 4. 20. 50 W çıkış yükü için ortalama akım mod çıkış gerilimi



Şekil 4. 21. 50 W çıkış yükü için değişken yük uyumlu çıkış gerilimi



Şekil 4. 22. 50 W çıkış yükü için ortalama akım mod giriş akımı ve giriş gerilimi



Şekil 4. 23. 50 W çıkış yükü için değişken yük uyumlu giriş akımı ve giriş gerilimi

Nominal çıkış geriliminin sekizde biri olan 50 W çıkış gücünde ortalama akım mod kontrol yönteminde çıkış gerilimi 401 V değerinde olup giriş gerilimi form olarak sinüs yapısından tamamen uzaklaşmıştır ve güç faktörü %79, THD % 7.5'dir. Diğer taraftan geliştirilen değişken yük uyumlu ortalama akım mod kontrol yönteminde ise giriş akımı şekil ve faz olarak giriş gerilimi ile aynı yapıdadır ve güç faktörü değeri % 99, THD % 1.5'tir.

Çizelge 4. 1. Çıkış yükü güç faktörü ilişkisi

YÜK(W)	ORTALAMA AKIM MOD KONTROL		DEĞİŞKEN YÜK UYUMLU KONTROL	
	%PF	%THD	%PF	%THD
400	99	1.36	99	1.31
200	90.7	4	99.1	1.92
100	85	6.1	98	1.38
75	82.5	6.88	99.2	1.38
50	79	7.5	99	1.5

Çizelge 4.1’de ortalama akım mod kontrol yöntemi ve değişken yük uyumlu kontrol yönteminin 50-400 Watt yük aralığı için güç faktörü değerleri verilmiştir. Çizelge bu tez kapsamında savunulan nominal güçten daha düşük güçlerde ortalama akım mod kontrol yönteminin güç faktörünü istenilen seviyelerde tutamadığını ve bu sorunun geliştirilen değişken yük uyumlu kontrol yöntemi ile giderilerek güç faktörünün tüm güçlerde yüksek değerlerde tutulduğunu ve düşük harmonik bozulmalar sağladığını kanıtlamaktadır. Diğer bir ifade ile geliştirilen değişken yük uyumlu kontrol yöntemi belirlenen güç aralığındaki tüm güçlerde yüksek güç faktörü sağlamaktadır ve bu kontrol yapısı değişen yüklerin olduğu şarj aletlerinde kullanmaya uygundu.

5. SONUÇLAR

Bu tez çalışmasında sanayide sıklıkla kullanılan DC-DC dönüştürücü temelli ortalama akım mod kontrol yöntemi ele alınmış ve literatürde mevcut olan sistemlere ait sorunlar tespit edilmiştir:

- Ortalama akım mod kontrol yönteminin nominal çıkış gücüne göre tasarlanması; çıkış gücünün zamanla azaldığı sistemlerde eşik güç değerinden daha düşük güçlere ulaşıldığında sistemin ortalama akım modundan kesintili akım moduna geçmesine veya iki akım modu arasında sürekli salınım yaparak karmaşık akım moduna geçmesine neden olmaktadır. Sürekli akım modu için tasarlanan PI kontrol parametreleri süreksiz akım modunda veya karmaşık akım modunda istenilen performansı sergileyememekte ve güç faktörü düşümlerine neden olmaktadır.
- Ortalama akım mod kontrol yönteminde değişken çıkış yükünde; çıkış gücünün nominal değerinden eşik değerine kadar olan aralıkta değişmesi enerjinin korunumu kanunu gereğince giriş akımının değişmesine neden olmaktadır. Ortalama akım mod kontrol yapısında sisteme ait transfer fonksiyonun giriş akımına bağlı olması giriş akımının değişmesi durumunda transfer fonksiyonun değişmesine neden olmaktadır. Bu durumda nominal giriş akımdaki transfer fonksiyonu için tasarlanan PI kontrol parametreleri istenilen kontrolü sağlayamamakta ve güç faktörü düşümlerine neden olmaktadır.

Ortalama akım mod kontrol yöntemine ait belirtilen problemlerden birincisi yine literatürde var olan belirli bir güç aralığı için eleman seçimi ile çözülmüştür. Yük aralığı için yapılan eleman seçimleri ile sistemin nominal güçten daha düşük güçlerde de sürekli akım modunda kalması sağlanmıştır. Diğer bir ifade ile sistemin eşik çıkış gücü değeri düşürülerek belirlenen güç aralığının nominal çıkış gücü ile eşik çıkış gücü aralığında kalması dolayısıyla her güç değerinde sürekli akım modunda çalışması sağlanmıştır ve akım modu değişiminden kaynaklı güç faktörü düşümlerinin önüne geçilmiştir.

Belirtilen ikinci problemin temel kaynağının giriş akımının değişimden dolayı sisteme ait transfer fonksiyonun değişmesi ve PI kontrolörün istenilen performansı sağlayamadığı olduğu göz önünde bulundurulursa bu sorun transfer fonksiyonu sabit tutularak çözülebilir. Transfer fonksiyonunu sabit tutmak için bir oransal akım okuyucu geliştirilmiş ve giriş akımı belirli bir oran ile çarpılarak okunmuştur. Bu sayede giriş akımının düşmesinden kaynaklı transfer fonksiyonunda meydana gelen doğru oranlı düşme, akım sensörü kazancının artması ile doğru oranlı olarak artmakta ve sistemin transfer fonksiyonu sabit tutulmaktadır. Transfer fonksiyonun oransal akım okuyucu ile sabit tutulduğu bu yöntem değişken yük uyumlu ortalama akım mod kontrol yöntemi olarak isimlendirilmiştir.

Geliştirilen değişken yük uyumlu ortalama akım mod kontrol yönteminin Psim ortamında simülasyonları yapılmış ve elde edilen sonuçlar nominal güç eşik gücü aralığında meydana gelen güç faktörü düşümlerinin oransal akım okuyucu yardımı ile önlendiğini kanıtlamaktadır.

Değişken yük uyumlu ortalama akım mod kontrol yönteminin zamanla azalan çıkış gücüne sahip sistemler için maksimum güç faktörü sağladığı göz önünde bulundurulursa günümüzde hızla gelişmekte olan ve gelecekte sarf edilen enerjinin büyük bir kısmını oluşturacak olan elektrikli araç şarj istasyonlarına entegre edilmesi mümkündür. Elektrikli araç şarj istasyonlarında aracın ilk şarja bağlanma anında sistemden nominal güç çekilmekte ve zamanla batarya dolarak çekilen güç azalmaktadır, çıkış gücünde meydana gelen bu değişimden kaynaklı güç faktörü düşümleri değişken yük uyumlu ortalama akım mod kontrol yöntemi ile önlenabilir ve maksimum güç faktörü sağlanabilir.

Elektrikli araç şarj istasyonlarında ve diğer reel uygulamalarda kullanılabileceğini kanıtlamak amacıyla tez kapsamında geliştirilen değişken yük uyumlu ortalama akım mod güç faktörü düzenleme devresi gerçekleştirilmiştir. Devre üzerinde osiloskop ile ölçüm yapılmış fakat bölüm 3.4.3'te açıklanan, sert anahtarlardan kaynaklı, EMI gürültüleri nedeni ile giriş akım, giriş gerilimi ve güç faktörü ölçümü sağlıklı olarak gerçekleştirilememiştir.

Tez kapsamında geliştirilen güç faktörü düzenleme devresinin çalışma yapısını etkilemeyecek şekilde EMI gürültülerini önlemek ve verimi arttırmak amacı ile güç faktörü düzenleme devresine uygun bir bastırma hücresinin tasarımı bu tez çalışmasının geliştirilmeye açık en önemli noktasıdır. Geliştirilen güç faktörü düzenleme devresine uygun bir bastırma hücresinin tasarlanması halinde, geliştirilen devrenin maksimum güç faktörü sağlayacak şekilde bütün reel uygulamalarda kullanılabilmesi mümkün olacaktır. Reel uygulamalar bakımından dikkat edilmesi gereken bir diğer husus ise çıkış yük aralığının belirlenmesidir. Çıkış gücü aralığı belirlenirken, belirlenen aralığın çok geniş tutulması kullanılacak yükseltici bobin başta olmak üzere elemanların daha yüksek hacimli olmasına neden olurken, belirlenen yük aralığının çok kısıtlı seçilmesi ise geliştirilen yöntemin asıl etkinlik alanında çalışamamasına neden olacaktır.

6. KAYNAKLAR

- Alam, M. Eberle, W. Deepak, S. G. and Botting, C. 2017. *A soft-switching bridgeless ac-dc power factor correction converter*. *IEEE Transaction on Power Electronics*, 32 (10).
- Balogh, J. Redl, R. 1993. *Power factor correction with interleaved boost converters in continuous inductor current mode*, *IEEE Transaction on Power Electronics*.
- Bodur, H. 2013. An improved lossless passive snubber cell for PFC boost converter. 3rd International Conference on Electric Power and Energy Conversion Systems, ss. 1-15, 2- 4 Ekim, EPECS 2013, İstanbul, Türkiye.
- Chen, M. Mathew, A. And Sun, A. 2006. Mixed signal control of single-phase pfc based on a nonlinear current control method. Power Electronics Specialists Conference, ss. 1-10, 18-22 Haziran, 37th IEEE, Jeju, Korea.
- Dorf, R.C. 2000. Introduction to Electric Circuits, John Wiley & Sons Yayınları, Ders Kitabı, New York, 880 s.
- Göynüşen, A. 2011. Sıfır gerilim geçişli faz kaydırmalı tam köprü türü bir pwm dc-dc dönüştürücünün incelenmesi ve gerçekleştirmesi. Yüksek lisans tezi, Yıldız Teknik Üniversitesi, İstanbul, 138 s.
- Gussemé, K.D. Sype, D.M. and Melkebeek, J.A. 2005. *Digitally controlled boost power-factor-correction converters operating in both continuous and discontinuous conduction mode*. *IEEE Transactions on industrial electronics*, 52(1): 88-98.
- Gyugyi, L. 1976 and Strycula E.C. Active AC power filters, IEEE IAS Annual Meeting, El Kitapçığı, New York, 529 s.
- Hwang, T.S. and Park, S.Y. 2012. *Seamless Boost Converter Control Under the Critical Boundary Condition for a Fuel Cell Power Conditioning System*. *IEEE Transactions on Power Electronics*, 27 (1): 3616- 3626.
- Ivaldi, J and Park, S.Y. 2017. Flexible PFC Control Featuring Adaptive Gain, Mode Estimation, and Dual Feedforward Compensation. IEEE Energy Conversion Congress and Exposition (ECCE), 1-5 Oct., Cincinnati, USA.
- Jeyaraj, M. and Kumar S. 2021. *Power factor correction and THD minimization in boost converter with PID controller*. *Materials Today Proceeding*, 5 April.
- Karataş, E. 2018. Yükseltici tip güç katsayısı düzeltme bobininin kayıp optimizasyonu. International Conference on Science and Technology, 5-9 September, Prizren, KOSOVO.
- Kanaan, H.Y. and Haddad, K.A. 2012. A Comparative Study of Single-Phase Power Factor Correction: Modeling, Steady-State Analysis, Tracking Ability and Desing Criteria. International Symposium on Power Electronics, Electrical Drives, Automation and Motion, 20-22 June, Sorrento, Italy.
- Kim, J. Choi, H. and Won, C.Y. 2018. *New Modulated Carrier Controlled PFC*. *IEEE Transactions on power electronics*, 33 (6): 1-24.

- Mohan, N., Undeland, T. and Robbins, W. 2002. Power Electronics: Converters, Applications, and Design. Wiley: 861, Ders Kitabı, 820 s.
- Praneeth A.V.J.S and Williamson S. 2019 A Soft Switched Boost Cascaded-by-Buck Power Factor Correction Converter for On-board Battery Charger Application. IEEE Applied Power Electronics Conference and Exposition (APEC).
- Peng, F.Z. 1998. *Application issues of active power filters*. IEEE Industry Applications Magazine, 4(5): 21-30.
- Rashid, M.H., 2011. Power Electronics Handbook Third Edition. Butterworth-Heinemann yayımları, Ders Kitabı, İngiltere, 455 s.
- Rossetto, L. Spiazzi, G. and Tenti, 1994. Control techniques for power factor correction converters. University of Padova.
- Saied, M. 1988. *Optimal power factor correction*. IEEE Transactions on Power Electronics, 3(3):844 – 851
- Sarker, L. and Nazir M. 2021. *Harmonics reduction and power factor correction for electric vehicle charging system*. Innovations in Power and Advanced Computing Technologies (i-PACT), 1-25 s.
- Shepherd, W. and Zakikhani, P. 2002. *Power factor correction in nonsinusoidal systems by the use of capacitance*. Journal of Physics D Applied Physics, 6(16): 1850.
- Texas, I. 1996. Understanding Boost Power Stages in Switchmode Power Supplies Applications Raports. Uygulama Raporu, No: 64, USA.
- Valascho, R. and Rahman, S. 2016. Infineon Application Note. In: Digital PFC CCM boost converter 300 W design example using XMC1400 microcontroller. USA, pp. 0-25.
- Zhang, H. Tang, L. Sun, S. and Yang, K. 2017. A Desing of Single Phase Converter with Active Power Factor Correction Modelü. 20th International Conference on Electrical Machines and Systems, 11-14 Aug, Sydney, Australia.

ÖZGEÇMİŞ

ÖZGÜR ÇOBAN

ÖĞRENİM BİLGİLERİ

Yüksek Lisans	Akdeniz Üniversitesi
2019-2022	Fen Bilimleri Enstitüsü, Elektrik-Elektronik Mühendisliği Bölümü Antalya
Lisans	Pamukkale Üniversitesi
2014-2018	Mühendislik Fakültesi, Elektrik-Elektronik Mühendisliği Bölümü, Denizli