

**T.C.
ISPARTA UYGULAMALI BİLİMLER ÜNİVERSİTESİ
LİSANSÜSTÜ EĞİTİM ENSTİTÜSÜ**

**YÜKSEK LİSANS TEZİ
ELEKTRİK ELEKTRONİK MÜHENDİSLİĞİ ANABİLİM DALI**

**ELEKTRİKLİ ARAÇLARDA KULLANILAN YERLEŞİK ŞARJ
CİHAZI TASARIMLARININ BENZETİM ORTAMINDA
GERÇEKLEŞTİRİLMESİ**

Mehmet Tahir ÖZSOY

**Danışman
Doç. Dr. Remzi İNAN**

ISPARTA- 2025



© 2025 [Mehmet Tahir ÖZSOY]

ETİK BEYANI

Isparta Uygulamalı Bilimler Üniversitesi Lisansüstü Eğitim Enstitüsü tez yazım kurallarına uygun olarak ve bilimsel ahlak ve geleneklere Alan yönlendirmeli kontrole düşecek bir yol ve yardıma başvurmaksızın hazırladığım bu tez çalışmasında;

Tez içinde sunduğum verileri, bilgileri ve dokümanları akademik ve etik kurallar çerçevesinde elde ettiğimi, tüm bilgi, belge, değerlendirme ve sonuçları bilimsel etik ve ahlak kurallarına uygun olarak sunduğumu, tez çalışmasında yararlandığım eserlerin tümüne uygun atıfta bulunarak kaynak gösterdiğimi, kullanılan verilerde ve ortaya çıkan sonuçlarda herhangi bir değişiklik yapmadığımı, bu tezde sunduğum çalışmanın özgün olduğunu, tezime ilgili yaptığım bu beyana Alan yönlendirmeli kontrole bir durumun saptanması durumunda, ortaya çıkacak tüm ahlaki ve hukuki sonuçlara katlanacağımı bildirir, aksi bir durumda aleyhime doğabilecek tüm hak kayıplarımı kabullendiğimi beyan ederim.

19 / 06 /2025

Mehmet Tahir ÖZSOY

.....

İÇİNDEKİLER

	Sayfa
İÇİNDEKİLER	i
ÖZET	ii
ABSTRACT	iii
TEŞEKKÜR	iv
ŞEKİLLER DİZİNİ	v
ÇİZELGELER DİZİNİ	vii
SİMGELER VE KISALTMALAR DİZİNİ	viii
1. GİRİŞ	1
2. KAYNAK ÖZETLERİ	4
3. MATERYAL VE YÖNTEM	11
3.1. Yöntem	11
3.2. Güç Faktörü	12
3.3. Harmonik Bozulma	14
3.4. Güç Kalitesi	16
3.5. Güç Yoğunluğu	17
3.6. Batarya Şarj Cihazı Topolojileri	18
3.7. Batarya Şarj Standartları	20
3.8. Batarya Şarj Yöntemleri	22
3.9. AA/DA Dönüştürücüler	24
3.9.1. Klasik YGFD	25
3.9.2. Girişimli YGFD	27
3.9.3. Temel köprüsüz YGFD	30
3.9.4. Totem kutuplu köprüsüz YGFD	33
3.9.5. Tam dalga kontrollü YGFD	36
4. BULGULAR VE TARTIŞMA	38
4.1. Klasik YGFD Benzetim Çalışması	39
4.2. Girişimli YGFD Benzetim Çalışması	41
4.3. Temel Köprüsüz YGFD Benzetim Çalışması	44
4.4. Tam Dalga Kontrollü YGFD Benzetim Çalışması	47
4.5. Girişimli Totem Kutuplu YGFD Benzetim Çalışması	50
5. SONUÇ	55
KAYNAKLAR	57
ÖZGEÇMİŞ	60

ÖZET

Yüksek Lisans Tezi

ELEKTRİKLİ ARAÇLARDA KULLANILAN YERLEŞİK ŞARJ CİHAZI TASARIMLARININ BENZETİM ORTAMINDA GERÇEKLEŞTİRİLMESİ

Mehmet Tahir ÖZSOY

Isparta Uygulamalı Bilimler Üniversitesi
Lisansüstü Eğitim Enstitüsü
Elektrik Elektronik Mühendisliği Anabilim Dalı

Danışman: Doç. Dr. Remzi İNAN

Elektrikli araçların yaygınlaşması ile birlikte şebeke üzerindeki olumsuz etkileri de artmaktadır. Düşük güç faktörü ve yüksek harmonik akımları şebeke güç kalitesi bozmakta ve verimliliği düşürmektedir. Verimliliği artırmak ve güç kalitesini iyileştirmek için tasarlanan şarj cihazlarında güç faktörü düzeltme yöntemleri kullanılmaktadır. Güç faktörü düzeltmeli şarj cihazları incelendiği zaman tek aşamalı ve iki aşamalı olmak üzere iki farklı tasarım görülmektedir. Tek aşamalı şarj cihazlarında enerji doğrudan istenilen gerilim seviyesine dönüştürülmektedir. Bu yöntemde uygulama kolaylığı ve düşük maliyet gibi avantajlar olmasına karşın sadece düşük güçlerde verimli olarak çalışmaktadır. 1 kW üzerindeki güçlerde ise genellikle iki aşamalı topolojiler tercih edilmektedir. İki aşamalı yükseltici tip dönüştürücülerde şebekeden çekilen enerji öncelikle AA/DA dönüştürücülerle istenilen gerilim seviyesinin üzerine çıkarılır. Bu aşamada güç faktörü düzeltme yöntemleri ile şebeke güç kalitesi korunmuş olur. İkinci aşamada is DA/DA dönüştürücüler ile istenilen batarya gerilim seviyesine indirilir. Bu çalışmada iki aşamalı yükseltici tip AA/DA dönüştürücüler incelenmiştir. Sıklıkla kullanılan klasik, girişimli, temel köprüsüz, tam dalga kontrollü ve girişimli totem kutuplu dönüştürücülerin bilgisayar ortamında benzetimleri yapılmıştır. Benzetim sonuçları verimlilik ve toplam harmonik bozulma değerleri açısından birbirleri ile karşılaştırılmıştır.

Anahtar Kelimeler: Elektrikli araçlar, Yerleşik şarj cihazı, AA/DA Dönüştürücüler, Güç faktörü düzeltme

2025, 60 sayfa

ABSTRACT

Master's Thesis

IMPLEMENTATION OF ONBOARD CHARGER DESIGNS USED IN ELECTRIC VEHICLES IN A SIMULATED ENVIRONMENT

Mehmet Tahir ÖZSOY

**Isparta University of Applied Sciences
The Institute of Graduate Education
Department of Electrical Electronics Engineering**

Supervisor: Assoc. Prof. Dr. Remzi İNAN

As electric vehicles become widespread, their negative effects on the grid are also increasing. Low power factor and high harmonic currents deteriorate grid power quality and reduce efficiency. Power factor correction methods are used in chargers designed to increase efficiency and improve power quality. When power factor corrected chargers are examined, two different designs are seen, single-stage and two-stage. In single-stage chargers, energy is directly converted to the desired voltage level. Although this method has advantages such as ease of application and low cost, it only works efficiently at low powers. For powers over 1 kW, two-stage topologies are generally preferred. In two-stage booster type converters, the energy drawn from the grid is first increased to the desired voltage level with AC/DC converters. At this stage, grid power quality is protected with power factor correction methods. In the second stage, it is reduced to the desired battery voltage level with DC/DC converters. In this study, two-stage booster type AC/DC converters are examined. Computer simulations of commonly used classical, interleaved, base bridgeless, full wave controlled and interleaved totem pole converters were performed. Simulation results were compared with each other in terms of efficiency and total harmonic distortion values.

Key Words: Electric vehicles, Onboard charger, AC/DC Converters, Power factor correction

2025, 60 sayfa

TEŞEKKÜR

Tezimin y¼r¼t¼lmesinde desteğini ve emeğini hiğbir zaman esirgemeyen tez danıŐmanım sayın Doç. Dr. Remzi İNAN'a teŐekk¼rlerimi sunarım.

Tezimin her aşamasında beni yalnız bırakmayan aileme sonsuz sevgi ve saygılarımı sunarım.

Mehmet Tahir ÖZSOY
ISPARTA, 2025



ŞEKİLLER DİZİNİ

	Sayfa
Şekil 3.1. Harmonik içermeyen durumlar için güç üçgeni.....	12
Şekil 3.2. Harmonik içeren durumlar için güç üçgeni	13
Şekil 3.3. Harmonik içeren dalga şekli	14
Şekil 3.4. Tek katmanlı şarj cihazı topolojisi.....	19
Şekil 3.5. İki katmanlı şarj cihazı topolojisi.....	19
Şekil 3.6. Klasik YGFD devre şeması	25
Şekil 3.7. Klasik YGFD – Pozitif alternans, anahtar kesimde çalışma.....	26
Şekil 3.8. Klasik YGFD – Pozitif alternans, anahtar iletimde çalışma	27
Şekil 3.9. Klasik YGFD – Negatif alternans, anahtar kesimde çalışma	27
Şekil 3.10. Klasik YGFD –Negatif alternans, anahtar iletimde çalışma.....	27
Şekil 3.11. Girişimli YGFD devre şeması	28
Şekil 3.12. Girişimli YGFD – Pozitif alternans, M1 ve M2 iletimde	29
Şekil 3.13. Girişimli YGFD – Pozitif alternans, M1 kesimde ve M2 iletimde... ..	29
Şekil 3.14. Girişimli YGFD – Pozitif alternans, M1 iletimde ve M2 kesimde... ..	29
Şekil 3.15. Girişimli YGFD – Pozitif alternans, M1 ve M2 kesimde.....	29
Şekil 3.16. Temel Köprüsüz YGFD devre şeması	30
Şekil 3.17. Temel köprüsüz YGFD – M1 iletimde ve M2 kesimde	31
Şekil 3.18. Temel köprüsüz YGFD – M1 ve M2 kesimde.....	32
Şekil 3.19. Temel köprüsüz YGFD – M1 kesimde ve M2 iletimde	32
Şekil 3.20. Temel köprüsüz YGFD – M1 ve M2 kesimde.....	33
Şekil 3.21. Totem kutuplu köprüsüz YGFD devre şeması	33
Şekil 3.22. Totem kutuplu köprüsüz YGFD – M1 kesimde, M2 iletimde.....	34
Şekil 3.23. Totem kutuplu köprüsüz YGFD – M1 ve M2 kesimde.....	35
Şekil 3.24. Totem kutuplu köprüsüz YGFD – M1 iletimde, M2 kesimde.....	35
Şekil 3.25. Totem kutuplu köprüsüz YGFD – M1 ve M2 kesimde	36
Şekil 3.26. Tam dalga kontrollü YGFD devre şeması	37
Şekil 4.1. Klasik YGFD benzetim devresi.....	39
Şekil 4.2. Klasik YGFD kontrol algoritması.....	39
Şekil 4.3. Klasik YGFD tam yükte giriş gerilimi ve giriş akımı	40
Şekil 4.4. Klasik YGFD tam yükte çıkış gerilimi ve çıkış akımı.....	41
Şekil 4.5. Klasik YGFD 6 farklı yük durumu çıkış gerilimi ve çıkış akımı	41
Şekil 4.6. Girişimli YGFD benzetim devresi.....	42
Şekil 4.7. Girişimli YGFD kontrol algoritması.....	42
Şekil 4.8. Girişimli YGFD tam yükte giriş gerilimi ve giriş akımı	43
Şekil 4.9. Girişimli YGFD tam yükte çıkış gerilimi ve çıkış akımı.....	44
Şekil 4.10. Girişimli YGFD 6 farklı yük durumu çıkış gerilimi ve çıkış akımı .	44
Şekil 4.11. Temel köprüsüz YGFD benzetim devresi.....	45
Şekil 4.12. Temel köprüsüz YGFD kontrol algoritması	45
Şekil 4.13. Temel köprüsüz YGFD tam yükte giriş gerilimi ve giriş akımı	46
Şekil 4.14. Temel köprüsüz YGFD tam yükte çıkış gerilimi ve çıkış akımı	47
Şekil 4.15. Temel köprüsüz YGFD 6 farklı yük durumu çıkış gerilimi ve çıkış akımı	47
Şekil 4.16. Tam dalga kontrollü YGFD benzetim devresi.....	48
Şekil 4.17. Tam dalga kontrollü YGFD kontrol algoritması	48
Şekil 4.18. Tam dalga kontrollü YGFD tam yükte giriş gerilimi ve giriş akımı	49
Şekil 4.19. Tam dalga kontrollü YGFD tam yükte çıkış gerilimi ve çıkış akımı.....	50

Şekil 4.20. Tam dalga kontrollü YGFD 6 farklı yük durumu çıkış gerilimi ve çıkış akımı	50
Şekil 4.21. Girişimli totem kutuplu YGFD benzetim devresi.....	51
Şekil 4.22. Girişimli totem kutuplu YGFD kontrol algoritması	51
Şekil 4.23. Girişimli totem kutuplu YGFD tam yükte giriş gerilimi ve giriş akımı	53
Şekil 4.24. Girişimli totem kutuplu YGFD tam yükte çıkış gerilimi ve çıkış akımı	53
Şekil 4.25. Girişimli totem kutuplu YGFD 6 farklı yük durumu çıkış gerilimi ve çıkış akımı	53



ÇİZELGELER DİZİNİ

	Sayfa
Çizelge 3.1. Cihazlar için izin verilen harmonik sınırları	16
Çizelge 3.2. Elektrikli araçlara ait çeşitli şarj standartları	21
Çizelge 3.3. GFD Denklemlerde kullanılan simgeler ve karşılıkları	25
Çizelge 4.1. Benzetim devrelerinde kullanılan elemanlarının değerleri	38
Çizelge 4.2. Klasik YGFD farklı PI katsayılarında ölçümler	40
Çizelge 4.3. Klasik YGFD farklı yük durumları ölçümler	41
Çizelge 4.4. Girişimli YGFD farklı PI katsayılarında ölçümler	43
Çizelge 4.5. Girişimli YGFD farklı yük durumları ölçümler.....	44
Çizelge 4.6. Temel Köprüsüz YGFD farklı PI katsayılarında ölçümler	46
Çizelge 4.7. Temel Köprüsüz YGFD farklı yük durumları ölçümler	47
Çizelge 4.8. Tam dalga kontrollü YGFD farklı PI katsayılarında ölçümler	49
Çizelge 4.9. Tam dalga kontrollü YGFD farklı yük durumları ölçümler	50
Çizelge 4.10. Girişimli totem kutuplu YGFD farklı PI katsayılarında ölçümler	52
Çizelge 4.11. Girişimli totem kutuplu YGFD farklı yük durumları ölçümler	54
Çizelge 5.1. Benzetim sonuçlarının karşılaştırılması.....	55

SİMGELER VE KISALTMALAR DİZİNİ

AA	Alternatif akım
CCS	Kombine şarj sistemi
DA	Doğru akım
EMI	Elektromanyetik interferans
FFT	Hızlı fourier dönüşümü
GaN	Galyum nitrit
GFD	Güç faktörü düzeltme
IEC	Uluslararası elektroteknik komisyonu
SAE	Amerika otomotiv mühendisleri birliği
SiC	Silisyum karbür
THD	Toplam harmonik bozulma
YGFD	Yükseltici güç faktörü düzeltme



1. GİRİŞ

Elektrikli araçların otomotiv endüstrisindeki yeri ve önemi son zamanlarda oldukça artmıştır. Dünya genelinde trafikteki elektrikli araç sayısı 2010 yılında 17 bin iken bu sayı 2019 yılında 7.2 milyona yükselmiştir (Akyüz, 2021). 2035 yılında gelindiğinde ise küresel araç filosunun %30'nun elektrikli araçlardan oluşması bekleniyor (Ejaz vd., 2025).

Sanılanın aksine elektrikli araçların tarihi içten yanmalı motorlu araçlardan daha eskidir. İlk elektrikli araç modeli Profesör Stratingh tarafından 1835 yılında Hollanda'da geliştirmiştir. Ardından 1838 yılında Robert Davidson 6.4 km/s hıza ulaşabilen elektrikli lokomotifi üretmiştir. Kurşun-asit bataryaları 1859 yılından sonra geliştirilmiş ve elektrikli araçlarda kullanılmaya başlanmıştır. 1882'de Siemens, Elektromote adındaki dünyanın ilk elektrikli trolleybüsünü Berlin'de üretmiştir. Bu araç iki adet 2.2 kW'lık motora sahip olup 550 V DC ile beslenmekte ve ortalama 12 km/s hızındaydı.

1886'da Karl Benz içten yanmalı motor ile çalışan ilk otomobil olan Motorwagen'i üretip satışa sunmuştur. Araçta üç adet tekerlek bulunmakta olup motoru arkada ve yolcuların altındaydı. İçten yanmalı motora sahip olan araç 0.55 kW'lık enerji ile maksimum 16 km/s hıza çıkabilmekteydi.

1895 yılında Morris ve Salomon iki koltuklu Electrobats isimli elektrikli aracı geliştirmişlerdir. İngiltere'de 1897 yılında "Londra Elektrikli Taksi Şirketi" tarafından 15 tane elektrikli taksi kullanıma alınmıştır. 1901'de "New York Taxi" firması da elektrikli araçları taksi olarak kullanmaya başlamıştır.

1900 yılında French Electroautomobile ve 1903 yılında Krieger elektrikli-benzinli araçları üretilerek ilk kez hibrid konfigürasyon modeli denenmiştir. Ferdinand Porsche bu dönemlerde ilk deneysel hibrid elektrikli aracın tasarımını yaparak Mixt Wagen adını vermiştir. İçten yanmalı motora sahip aracın her bir tekerleğine elektrik motorları

doğrudan tahrikli hub motor olarak yerleştirilerek araçta kurşun-asit bataryalar kullanılmıştır. Araç 60 km/s hızına çıkabilmekteydi.

Tüm bu gelişmelere rağmen 1920 – 1960 yılları arasında elektrikli araçlara ilgi azalırken içten yanmalı motorlu araçlara ilgi artmaya başlamıştır. Bunun en önemli sebebi ise gelişen karayolları ile birlikte daha uzun menzil gidebilecek olan araçlara ihtiyacın artmasıdır (Kerem, 2014).

Günümüzde ise içten yanmalı motorlu araçlara kıyasla elektrikli araçların birçok avantajları bulunmaktadır. Bu avantajlardan bazıları yakıt tasarrufu, yüksek performans, bakım kolaylığı ve gürültü kirliliğini azaltmasıdır. Ayrıca elektrikli araçlarda bulunan rejeneratif frenleme yöntemi ile elektrik motoru jeneratör gibi kullanılır. Bu sayede frenleme sırasında aküler şarj edilir. Tek bataryalı elektrikli aracın verimi yaklaşık %46 iken geleneksel içten yanmalı motorlarda verim %18-%25 arasında kalmaktadır (Ünlü vd., 2003).

Elektrik araçların en önemli dezavantajları ise kısa menzilli olmaları, şarj süresinin uzunluğu ve yetersiz şarj istasyonu ağıdır. Yerli modellerin piyasa sürülmesi ile birlikte şarj istasyonu ağına ciddi bir artış yaşanmıştır. Yaygınlaşan şarj istasyonu ağı ve yüksek güçlü şarj üniteleri ile birlikte elektrikli araçların kullanımında pratiklik kazanılmıştır.

Günümüz teknolojisinde yaşanan gelişmeler ile birlikte katı pillerin güç yoğunlukları ve depolama kapasiteleri her geçen gün artmaktadır. Bu artışa paralel olarak elektrikli araçların tek bir şarj ile gidebilecekleri maksimum menzili de artış göstermektedir. Artan güç kapasitesi ile birlikte, batarya setlerini daha kısa sürede şarj edebilecek şarj cihazlarına ihtiyaç duyulmuştur. Bu ihtiyacı karşılamak için yüksek güçte şarj cihazları geliştirilmektedir.

Elektrikli araçlar için tasarlanan şarj cihazları harici ve yerleşik olmak üzere iki kısımda incelenmektedir. Harici şarj cihazları da kendi içerisinde ev tipi ve istasyon

tipi olarak ikiye ayrılır. Yüksek maliyetler nedeniyle şehir içi kullanımlarda ev tipi ya da araç içerisinde yerleşik şarj cihazları tercih edilmektedir. Şehirler arası yolculuklarda ise istasyon tipi şarj cihazları kullanılmaktadır.

Elektrikli araç kullanımının yaygınlaşması ile birlikte şebekeye olan etkileri de tartışılmaya başlanmıştır. Güç elektroniği cihazları içerisinde bulunan yarı iletken malzemeler sebebiyle şebekenin sinüzoidal yapısını bozmaktadır. Şebeke güç kalitesini korumak ve verimli olarak şarj işlemi gerçekleştirmek için güç faktörü düzeltmeli dönüştürücü topolojileri kullanılmaktadır. İki aşamalı olarak çalışan güç faktörü düzeltmeli dönüştürücülerde, ilk aşamada doğrultma işlemi yapılır. İkinci aşamada ise endüktans üzerinde anahtarlama yapılarak güç faktörü düzenlenir. Bu şekilde hem verimli bir dönüşüm sağlanır hem de şebeke güç kalitesi korunmuş olur.

Bu tez çalışması kapsamında elektrikli araçlarda yerleşik şarj birimi tasarımında kullanılması için önerilen yükseltici güç elektroniği topolojileri incelenmiştir. Yapılan kaynak araştırmalarında yerleşik şarj cihazlarında en çok tercih edilen topolojilerin klasik, girişimli, temel köprüsüz ve tam dalga kontrollü yükseltici olduğu görülmüştür. Ayrıca son yıllarda totem kutuplu yükseltici uygulamaları sıkça araştırmalara konu olmuştur. Bu nedenle 5 farklı topoloji MATLAB/SIMULINK ortamında benzetimleri yapılmak üzere seçilmiştir. Oluşturulan benzetim devreleri üzerinden verim, güç faktörü ve toplam harmonik bozulma ölçümleri yapılmıştır. Elde edilen değerler birbirleri ile karşılaştırılmış ve tablolar halinde sunulmuştur.

2. KAYNAK ÖZETLERİ

“Elektrikli araç hızlı şarj uygulamaları için kısmi güç dönüştürücü topolojilerine ve kontrol yöntemlerine kapsamlı bir bakış” (Ejaz vd., 2025). Bu çalışmada verimliliği artırmak ve sistem boyutlarını küçültmek amacıyla geliştirilen kısmi güç dönüştürücü topolojileri ve kontrol yöntemleri kapsamlı bir şekilde incelenmektedir. Dönüştürücü topolojileri genel olarak tam güç dönüştürücü ve kısmi güç dönüştürücü olarak iki farklı kategoriye ayrılır. Yapılan çalışmada güncel şarj altyapılarını farklı kısmi güç dönüştürücü topolojileri ile tasarlayarak şebeke üzerinde oluşan yükün azaltılabileceği ancak kontrol karmaşası ve arıza toleransı gibi bazı teknik sorunların aşılması gerektiği belirtilmiştir.

“Elektrikli araçlar için şarj teknolojileri, türleri ve şarj istasyonu modelleri hakkında kapsamlı bir inceleme” (Saraswathi ve Ramachandran, 2024). Bu çalışmada elektrikli araçlarda kullanılan şarj altyapısı detaylı bir biçimde incelenmiştir. Bu kapsamda şarj teknolojileri, batarya şarj cihazı tipleri, şarj konnektörleri, batarya şarj standartları, şarj istasyonları gibi konular ele alınmıştır. Gelecekte akıllı şarj teknolojilerinin kullanımı ile şebeke üzerindeki yükün azaltılmasının gerektiği belirtilmiştir. Ayrıca yenilenebilir enerji kaynakları ile sürdürülebilir şarj altyapısının sağlanması gerektiğine vurgu yapılmıştır.

“Elektrikli araçlarda yerleşik şarj cihazı sistemlerinin simülasyon ortamında analizi” (Karsavuran, 2024). Bu çalışmada elektrikli araçlarda sıkça kullanılan iki aşamalı yerleşik şarj cihazı tasarımlarından 3 farklı tasarım seçilmiş ve MATLAB/SIMULINK ortamında benzetimleri yapılmıştır. İlk seçilen topolojide köprüsüz kutuplu AA/DA dönüştürücü ve iki yönlü DA/DA dönüştürücü, ikinci olarak köprüsüz kutuplu AA/DA dönüştürücü ve çift aktif köprülü DA/DA dönüştürücü, son olarak da girişimli AA/DA dönüştürücü ve izoleli tam dalga köprü DA/DA dönüştürücü kombinasyonlarının benzetimleri yapılmıştır. Oluşturulan tasarımlara yük olarak lityum-iyon pil paketleri eklenmiştir. Yapılan 3 farklı benzetim çalışması verimlilik, güç faktörü, güvenilirlik ve sistem kontrol karmaşıklığı açısından değerlendirilmiştir.

“Elektrikli araçlardaki yerleşik şarj cihazları için kapsamlı bir performans ve verimlilik incelemesi” (Haque vd., 2024). Bu çalışmada elektrikli araçlarda kullanılan yerleşik şarj cihazları mimari, performans, verimlilik ve yenilikler açısından kapsamlı bir şekilde incelenmektedir. Tek yönlü ve çift yönlü olarak ikiye ayrılan şarj cihazı topolojileri kendi içlerinde verimlilik, güç faktörü, güç yoğunluğu alanlarında birbirleri ile karşılaştırılmıştır. Yerleşik şarj cihazı tasarımında çift yönlü enerji akışının önemine vurgu yapılmış ve bu sayede elektrikli araçların hareketli birer enerji kaynağına dönüşeceği belirtilmiştir.

“Şarj edilebilir elektrikli araçlar için tek aşamalı yerleşik şarj yöntemlerinin kapsamlı bir incelemesi” (Ganesh vd., 2024). Bu çalışmada elektrikli araçlarda yerleşik şarj cihazı tasarımında kullanılan güç elektroniği topolojileri incelenmektedir. DA/DA dönüştürücüler maliyet, gerilim kazancı, güvenilirlik, kontrol karmaşası ve anahtarlama elamanı sayısı gibi konularda birbirleri ile karşılaştırılmıştır. Mevcut iki aşamalı şarj yöntemlerinin verimsiz ve karmaşık olduğu belirtilmiştir. İki aşamalı şarj yöntemleri yerine daha az bileşene sahip, şebeke güç kalitesini koruyan ve şarj sürecini optimize eden tek aşamalı yöntemlerin kullanılması önerilmiştir.

“Elektrikli araçlar için şarj topolojileri ve güç elektroniği dönüştürücü çözümleri üzerine kapsamlı bir inceleme” (Ali vd., 2024). Bu çalışmada elektrikli araçlarda kullanılan şarj topolojileri ve güç elektroniği dönüştürücüleri kapsamlı bir şekilde incelenmiştir. Genel olarak güç elektroniği dönüştürücüleri AA/DA, DA/AA, AA/AA ve DA/DA olmak üzere 4 farklı gruba ayrılmıştır. Herbir grubun güçlü ve zayıf yönleri belirtilmiştir. Ayrıca güncel literatür bilgileri taranarak son on yıldaki araştırma eğilimleri analiz edilmiştir. Geleceğe yönelik olarak yapay zekâ tabanlı enerji yönetimi, akıllı kontrol algoritmaları ve çok girişli/çıkışlı dönüştürücüler gibi konuların ilgi odağı olacağı belirtilir.

“İzole ve izole olmayan dönüştürücü yapıları ve hızlı şarj teknolojisi hakkında kapsamlı bir inceleme” (Annamalai vd., 2023). Bu çalışmada elektrikli araçlar ve şarj alt yapısı konusu detaylıca incelenmiştir. Elektrikli araçlarda kullanılan AA/DA ve DA/DA dönüştürücüler sınıflandırılmıştır. İncelenen dönüştürücüler güç faktörü, harmonik bozulma, anahtarlama kaybı ve kontrol karmaşası gibi konularda birbirleri

ile kıyaslanmıştır. Ayrıca modüler dönüştürücü sistemleri ve akıllı şebekelere entegrasyonları hakkında bilgiler sunulmuştur.

“Elektrikli araç hızlı şarj uygulamaları için güç dönüştürücü topolojileri ve kontrol yöntemlerinin kapsamlı bir incelemesi” (Safayatullah vd., 2022). Bu çalışmada elektrikli araçlar için hızlı ve ultra hızlı şarj altyapısının geliştirilmesinde temel rol oynayan güç elektroniği topolojileri ve kontrol teknikleri kapsamlı bir şekilde incelenmiştir. AA/DA ve DA/DA dönüştürücü tasarımları kendi aralarında karşılaştırılmış ve tablolar halinde özetlenmiştir. Sonuç bölümünde hızlı şarj altyapısı için yüksek verim, düşük kayıp, kompakt tasarım, uygun maliyet, çift yönlü güç akışı ve gelişmiş kontrol yöntemlerinin önemli olduğuna belirtilmiştir.

“Elektrikli araçların hızlı şarjı için üç fazlı AA/DA güç faktörü düzeltmeli dönüştürücülerinin incelenmesi” (Mollahasanoglu vd., 2021). Bu çalışmada elektrikli araçlarda kullanılan AA/DA topolojileri incelenmiştir. Özellikle çift yönlü güç akışını destekleyen çok seviyeli topolojiler performans, verimlilik ve güç kalitesi gibi konularda birbirleri ile kıyaslanmıştır. Optimum şarj performansı için uygun topoloji seçimi konusunda genel kriterler belirlenmiştir. Sonuç bölümünde gelişmiş kontrol teknikleri ve yumuşak anahtarlama yöntemlerinin verimliliği artırdığı belirtilmiştir.

“Elektrikli araç uygulamaları için batarya şarj topolojisi, altyapısı ve standartları” (Kumar vd., 2021). Bu çalışmada elektrikli araçlarda kullanılan şarj topolojileri ve şarj standartları ile ilgili kapsamlı bir araştırma yapılmıştır. AA/DA ve DA/DA dönüştürücü tasarımları, modülasyon, kontrol teknikleri, kablolu ve kablosuz şarj yöntemleri incelenmiştir. Sonuç bölümünde kullanıcıların ihtiyacına uygun şarj yöntemi seçimini kolaylaştıran bir akış diyagramı sunulmuştur.

“Elektrikli araçlar için yüksek güç yoğunluklu ve yüksek verimli izole edilmiş yerleşik batarya şarj cihazı tasarımı ve uygulaması” (Dantondji, 2021). Bu çalışmada elektrikli araçlar için 1,2 kW gücünde iki aşamalı yerleşik şarj cihazı tasarlanmıştır. AA/DA dönüştürücü kısmında klasik yükseltici GFD topolojisi, DA/DA dönüştürücü kısmında faz kaydırmalı tam köprü topolojisi kullanılmıştır. Yüksek güç yoğunluğu, yüksek verim ve bant genişliği elde edebilmek için 150 kHz’de çalıştırılan GaN tabanlı

MOSFET'ler tercih edilmiştir. Geliştirilen prototipin genel olarak sistem verimi %94.3 ve güç yoğunluğu 0.52 W/cm³ olarak ölçülmüştür.

“Elektrikli araç şarj cihazlarında kullanılan tek fazlı aktif doğrultucuların şebekeye olan etkilerinin karşılaştırılması” (Özdentürk, 2021). Bu çalışmada elektrikli araçlarda kullanılan yerleşik şarj cihazı topolojileri ile ilgili araştırma yapılmıştır. Yapılan araştırmalar sonucunda iki aşamalı şarj cihazı tasarımlarında sıklıkla kullanılan klasik, girişimli ve köprüsüz AA/DA dönüştürücülerin MATLAB/SIMULINK programı üzerinden benzetimleri yapılmıştır. Sonuç bölümünde elde edilen veriler tablo halinde verilmiştir. Benzetimleri yapılan topolojiler verimlilik, güç faktörü ve toplam harmonik bozulma gibi faktörler açısından birbirleri ile kıyaslanmıştır.

“Yerleşik akü şarjı için güç dönüştürücülerine kısa bir bakış” (Rodriguez vd., 2021). Bu makalede elektrikli araçlarda kullanılacak olan 2 aşamalı yerleşik şarj cihazı tasarımları incelenmiştir. İncelenen topolojiler kullanılan bileşen sayısı, verimlilik, harmonik bozulma, güç faktörü, galvanik izolasyon ve güç seviyesi açısından birbirleri ile kıyaslanmıştır. 13 farklı topoloji için yapılan bu kıyaslamalar sonuç bölümünde tablo olarak sunulmuştur. 3.3kW gücündeki klasik yükseltici GFD devresinde verim %93, güç faktörü 0.99 ve akımın toplam harmonik bozulması %5'den küçük olarak verilmiştir. 3.3kW gücündeki girişimli yükseltici GFD devresinde verim %93 güç faktörü 0.995 olarak verilmiştir.

“Elektrikli araçlarda yerleşik şarj cihazları için yüksek verimli DA/DA dönüştürücülerin incelenmesi” (Yılmaz, 2020). Bu çalışmada, ilk olarak elektrikli araçlara uygun DA/DA dönüştürücüler incelenmiş ve elektrikli araç şarj sistemleri ile ilgili genel bir özet yapılmıştır. Yapılan incelemeler sonucunda iki farklı topolojide 3.1 kW gücünde şarj cihazı önerilmiştir. Önerilen ilk topolojide kolay uygulama, düşük kayıp ve yüksek verim gibi standartlar göz önüne alınmıştır. Bu nedenle DA/DA dönüştürücü olarak yarım dalga LLC Rezonans dönüştürücü kullanılmıştır. Kontrol yöntemi olarak da geleneksel PI yöntemler yerine yapay sinir ağı yöntemi tercih edilmiştir. Tüm sistemin verimliliği maksimum %96.8 olarak ölçülmüştür. Önerilen ikinci topolojide ise tek bir şarj işlemi ile maksimum menzil hedeflenmiştir. Bu nedenle DA/DA dönüştürücü olarak çok giriş-çıkışlı LLC Rezonans dönüştürücü tercih edilmiştir. Ayrıca tasarım PV panel ile desteklenmiş ve düşük güçlü bataryaların

bu panel ile beslenmesi sağlanmıştır. Kontrol yöntemi olarak maksimum güç noktası takibi yönteminden yararlanılmıştır.

“Elektrikli araçlardaki yerleşik batarya şarj sistemleri için yüksek verimli AA/DA güç faktörü düzeltilmiş dönüştürücü tasarımı ve analizi” (Tüksoy, 2020). Bu çalışmada ilk olarak elektrikli araçlarda yaygın olarak kullanılan AA/DA dönüştürücü topolojileri incelenmiş ve analizleri yapılmıştır. Yapılan incelemeler sonucunda elektrikli araçlarda yerleşik şarj cihazı olarak kullanılabilen 3.3kW gücünde iki farklı topoloji önerilmiştir. İlk tasarımda girişimli dönüştürücü topolojisi kullanılmış ve dinamik gerilim kontrol yöntemi ile anahtarlama yapılmıştır. İkinci tasarımda ise klasik dönüştürücü topolojisine yeni bir yumuşak anahtarlama devresi eklenmiştir. Önerilen her iki tasarımda muadil topolojiler ile 3 farklı senaryoda karşılaştırılmış ve MATLAB/SIMULINK ortamında analizleri yapılmıştır. Yapılan benzetimler üzerinden Avrupa verimlilik standartlarına göre 6 farklı yük durumu üzerinden verimlilik hesabı yapılmıştır.

“3.3kW Yerleşik şarj cihazı topolojilerinin literatür incelemesi” (Thosar vd., 2019). Bu makalede ilk olarak elektrik araçlar hakkında genel bir bilgi verilmiş sonra da yaygın olarak kullanılan iki aşamalı şarj topolojileri incelenmiştir. Dördüncü bölümde klasik, girişimli, köprüsüz ve modifiye edilmiş köprüsüz AA/DA dönüştürücü topolojileri açıklanmıştır. İncelenen bu topolojiler tasarımda kullanılan bileşen sayısı, endüktans akımının dalgalanması ve verimlilik açısından birbirleri ile kıyaslanmıştır. Tüm bu kriterler değerlendirilmiş ve yüksek güçlü yapılar için en uygun AA/DA dönüştürücü topolojisinin modifiye edilmiş köprüsüz dönüştürücü yapısı olduğu belirtilmiştir.

“Tek bir transformatöre sahip elektrikli araç yerleşik şarj cihazı için hibrit PWM DA/DA dönüştürücü” (Choi vd., 2018). Bu çalışmada tam dalga ve PWM rezonans DA/DA dönüştürücüler tek bir transformatör ile aynı tasarım altında birleştirilmiştir. Tasarlanan prototip hem tam dalga dönüştürücünün çıkış özelliklerini taşımakta hem de PWM rezonans dönüştürücü gibi anahtarlama yapabilmektedir. Böylece 2 farklı DA/DA dönüştürücünün avantajları tek bir tasarım altında birleşmiştir. Geliştirilen 6.6 kW çıkış gücüne sahip prototipin tam yük altından %97.5 verimliliğe ulaştığı belirtilmiştir.

“Çok yüksek frekanslı, yüksek güç yoğunluklu WGB tabanlı 6.6 kW çift yönlü yerleşik akü şarj cihazı için CRM AA/DA dönüştürücü tasarımı” (Liu vd., 2016). Bu çalışmada elektrikli araçlar için geniş bant aralıklı cihazların kullanıldığı ve çift yönlü olarak çalışabilen yerleşik akü şarj cihazının tasarımı tartışılmaktadır. Önerilen sistem, yeni değişken DA hat gerilim sistemi mimarisi, yüksek frekanslı yumuşak anahtarlama işlemi ve entegre manyetikler sayesinde yüksek verimlilik ve güç yoğunluğuna ulaşmaktadır. Geliştirilen prototipte 1.2 kV SiC MOSFET’ler sıfır gerilimde anahtarlama metodu ile kullanılmış ve 300 kHz’in üzerindeki anahtarlama frekansında %98.5 verimlilik ölçüldüğü belirtilmiştir. Sistem, son teknoloji ürünlerle karşılaştırıldığında verimlilik ve güç yoğunluğu açısından önemli gelişmeler göstermektedir.

“Çift yönlü akıllı şarj prototipinin tasarımı ve testi” (Morris, 2015). Bu çalışmada şebeke ve araç batarya grubu arasında çift yönlü enerji iletimi gerçekleştirebilen bir prototip geliştirilmiştir. Kontrollü şarj işlemi sayesinde elektrik şebekesinin aşırı yüklenme sorunlarına destek olmak amaçlanmıştır. Üretilen prototipin testlerinde şebekeden araç batarya grubuna doğru enerji transferinde %89.65 ve araç batarya grubundan şebekeye doğru enerji transferinde %88.38 verime ulaşılmıştır.

“Silisyum karbür güç elemanları kullanarak yüksek güç yoğunluklu, yüksek verimli, izole yerleşik akü şarj cihazı tasarımı” (Whitaker vd., 2014). Bu makalede SiC tabanlı anahtarlama elemanları kullanarak yüksek verimli ve yüksek güç yoğunluklu yerleşik şarj cihazı tasarımı yapılmıştır. Üretilen 6.1 kW gücünde prototip tam yükte %95 verime ve 3.8 kW/kg güç yoğunluğuna ulaşmıştır. Ayrıca üretilen prototip ile 2010 model Toyota Prius’da kullanılan yerleşik şarj cihazı kıyaslanmıştır. Yapılan bu kıyaslamaya göre üretilen prototip 10 kat daha verimli çıkmıştır.

“Elektrikli araçlar için ikincil taraf faz kaydırmalı sıfır gerilim ve sıfır akım tam aralık yumuşak anahtarlama PWM DA/DA dönüştürücü” (Akamatsu vd., 2012). Bu makalede elektrikli araç akü şarj sistemleri için uygun olan ikincil taraf faz kaydırmalı yumuşak anahtarlama PWM DA/DA dönüştürücü prototipi sunulmaktadır. Önerilen dönüştürücü yüksek frekanslı transformatörün parazitik endüktansını kullanarak geniş bir yük aralığında komütasyonlar elde eder. Tasarlanan prototip ile geniş bir yük

aralığında yumuşak anahtarlama yapılabildiğini ve faz kaydırma açısında nispeten küçük bir değişim ile kontrol sağlanabildiği gösterilmiştir.

“Elektrikli aralarda kullanılan lityum-iyon akülerin tek fazdan hızlı ve verimli şarjı için güç faktörü düzeltmeli yükselticilerin karşılaştırılması” (Akın, 2012). Bu çalışmada elektrikli araçlarda kullanılan lityum-iyon akülerin hızlı ve verimli şarjını sağlamak amacıyla güç faktörü düzeltmeli AA/DA dönüştürücülerin performansları incelenmiştir. Geleneksel, girişimli ve köprüsüz dönüştürücü topolojileri için temel büyüklük değerleri hesaplanmış ve bulunan değerler üzerinden benzetim yapılmıştır. Sonuç bölümünde benzetim çıktıları değerlendirilmiş ve 3 kW çıkış gücünde en iyi sonuçların girişimli dönüştürücüde alındığı belirtilmiştir.



3. MATERYAL VE YÖNTEM

3.1. Yöntem

Yapılan araştırmalar sonucunda yerleşik şarj cihazı tasarımlarında yaygın olarak kullanılan topolojiler belirlenmiştir. Bu topolojilerden klasik, girişimli, temel köprüsüz, tam dalga kontrollü ve totem kutuplu YGFD bilgisayar ortamında benzetimleri yapılmak üzere seçilmiştir. Topolojilerin seçiminin ardından elektrikli araçların yapısı, batarya tipleri, batarya seti gerilimleri ve ülkelere göre değişen şarj standartları incelenmiştir. Buna göre;

- Elektrikli araçlarda kullanılan şarj standartları incelendiğinde AA 1. Seviye şarj akımın 16 amper ile sınırlandırıldığı görölmektedir. Bu nedenle maksimum şarj gücü 3.3 kW olarak belirlenmiştir.
- Seçilen şarj gücüne göre kullanılabilcek uygun AA/DA güç faktörü düzeltmeli dönüştürücü topolojileri belirlenmiştir.
- Belirlenen güç faktörü düzeltmeli AA/DA dönüştürücüler hakkında detaylı araştırmalar yapılmış, devrelerin pozitif ve negatif alternanslardaki çalışma döngüleri incelenmiştir.
- Seçilen topolojilerde kullanılacak olan elemanların değerleri uygun formüller ile hesaplanmıştır. Hesaplanan değerler benzetim ortamı üzerinde test edilerek istenilen çıktıların alınıp alınmadığı kontrol edilmiştir.
- Yarı iletken malzemelerin yapıları ve anahtarlama kayıpları göz önüne alınarak anahtarlama frekansı 50 kHz olarak belirlenmiştir.
- Belirlenen topolojilerde 3.3kW'lık şarj gücüne uygun olarak ortalama akım kontrollü yöntemi tercih edilmiştir.
- Belirlenen tasarım kriterleri ve hesaplanan değerler üzerinden seçilen topolojilerin MATLAB/SIMULINK (V.R2020a) programı üzerinde benzetimleri yapılmıştır.
- Benzetim sonuçları üzerinde ölçüm araçları kullanılarak giriş ve çıkış noktalarından akım, gerilim ve güç değerleri ölçölmüştür.
- MATLAB/SIMULINK programındaki FFT analiz yöntemi ile 50Hz frekans temel alınarak toplam harmonik bozulma hesaplanmıştır.

- Yapılan ölçümler tablolar halinde birbirleri ile kıyaslanmış ve farklı topolojilerin çeşitli alanlarda avantaj ve dezavantajları belirlenmiştir.

Şarj işlemi sırasında yerleşik şarj cihazı kısa bir süre tam yükte çalışmaktadır. Bu nedenle devre topolojisinin toplam verimliliği hesaplanırken farklı yük durumlarının göz önünde bulundurulması gerekmektedir. Gerçeğe yakın sonuçlar almak için tüm devre topolojileri Denklem (3.1)'de verilen EN50530 Avrupa verimlilik standartlarına uygun şekilde 6 farklı yük durumunda test edilmiştir (Tüksoy, 2020).

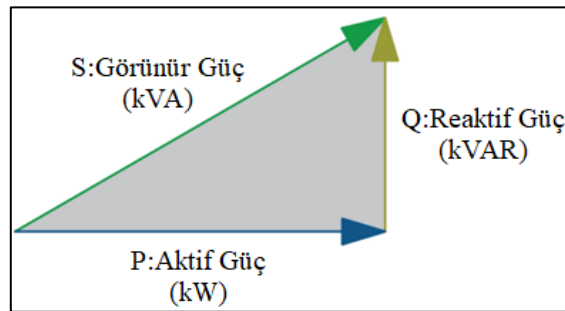
$$\% \Sigma \eta = 0.03\eta_{\%5} + 0.06\eta_{\%10} + 0.13\eta_{\%20} + 0.1\eta_{\%30} + 0.48\eta_{\%50} + 0.2\eta_{\%100} \quad (3.1)$$

Denklem (3.1)'de $\% \Sigma \eta$ devrenin toplam verimini, $\eta_{\%5}$ devrenin %5 yük durumundaki verimini, $\eta_{\%10}$ devrenin %10 yük durumundaki verimini, $\eta_{\%20}$ devrenin %20 yük durumundaki verimini, $\eta_{\%30}$ devrenin %30 yük durumundaki verimini, $\eta_{\%50}$ devrenin %50 yük durumundaki verimini ve $\eta_{\%100}$ devrenin tam yük durumundaki verimini belirtmektedir.

IEC 61000-3-2 standardında cihazlar için izin verilen maksimum harmonik güçleri belirlenmiştir. Benzetimleri yapılan topolojilerin şebekeye olan bozucu etkilerini gözlemlemek için MATLAB/SIMULINK programında FFT analizi yöntemi kullanılmıştır.

3.2. Güç Faktörü

Alternatif akımda çalışan bir şebekede aktif gücün görünür güce oranı güç faktörü olarak tanımlanmaktadır. Harmonik içermeyen yani şebeke akımı ve gerilimi sinüzoidal olan bir sistemde güç üçgeni Şekil 3.1'de verilmiştir (Özdentürk, 2021).

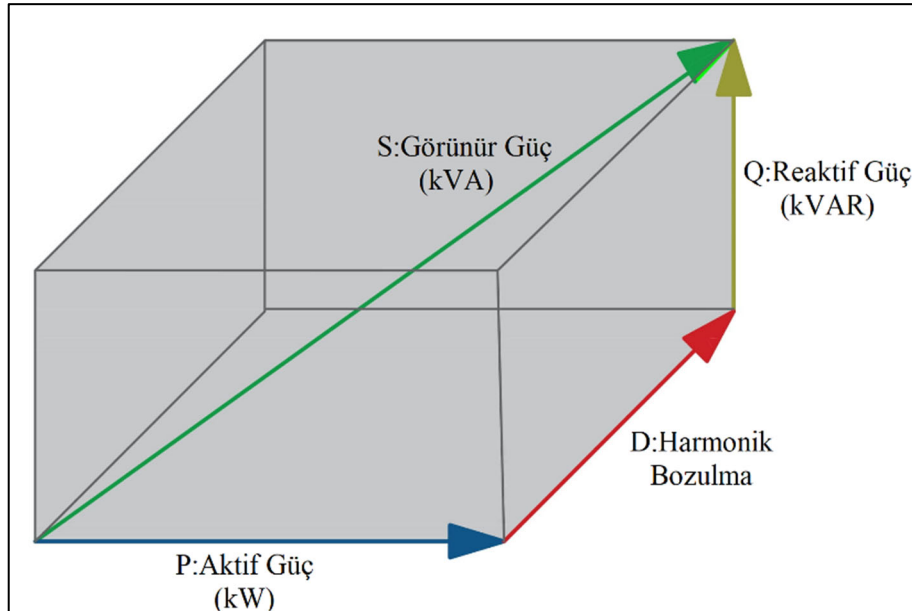


Şekil 3.1. Harmonik içermeyen durumlar için güç üçgeni

Reaktif güç, bir kondansatörün elektrik alanında ya da bir endüktansın manyetik alanında önce depolanıp sonra geri verilen enerjiyi göstermektedir. Kaynak ve yük arasında sürekli gidip gelen bir güç değeridir. Aktif güç ise bir sistemde işi yapan ısı, ışık ve enerjiye dönüşen asıl güçtür. Güç faktörü ifadesi aktif ve reaktif gücün toplamından oluşan görünür güç içerisindeki aktif gücün oranını verir. Bir sistemde gerekli olan aktif güç sağlanırken şebekeden çekilen reaktif gücün minimum olması istenir. Bu sıfır ile bir arasında değişen güç faktörünün birine yakın olması anlamına gelir. Faz farkı açısı arttıkça güç faktörü değeri küçülür ve şebekeden çekilen reaktif güç artar. Reaktif gücün artması aşağıdaki durumlara sebep olur;

- 1- Hat akımını yükseltir. Bu nedenle hat kapasite azalır.
- 2- Devre elemanlarının güç kapasiteleri gereksiz yere dolar.
- 3- Jeneratör, motor ve transformatörler doyuma girebilir.
- 4- Doyuma girme sebebiyle harmonikler oluşur.

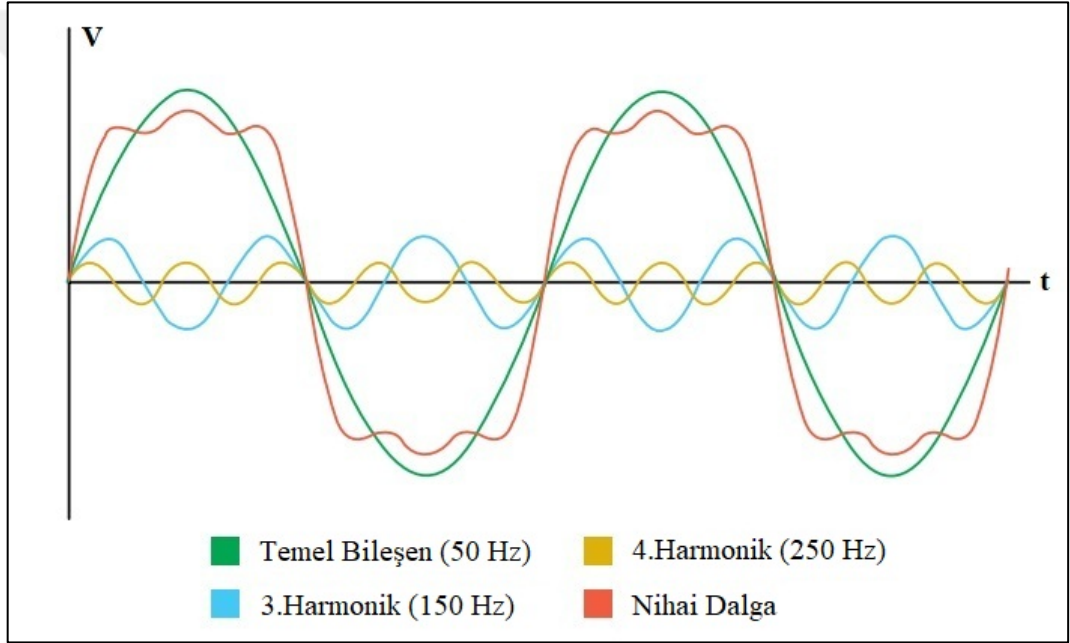
Harmonikli bir sistemde ise güç üçgenine yeni bir bileşen daha eklenir. Harmonik bozulma ihmal edilmeden yapılan güç faktörü hesabı gerçek güç faktörü olarak isimlendirilir. Şekil 3.2’de harmonik bozulma dahil edilerek güç üçgeni tekrar çizilmiştir.



Şekil 3.2. Harmonik içeren durumlar için güç üçgeni

3.3. Harmonik Bozulma

Güç sisteminden beslenen doğrusal olmayan yükler harmonik bozulmaya sebep olur ve temel frekansta sinüzoidal formda olması istenen gerilim ya da akımın şeklini sinüzoidal olmayan bir yapıya dönüştürür. Fourier teoremi herhangi bir periyodik dalga şeklini, temel frekanstaki ve temel frekansın katlarındaki bileşenlerin toplamı olarak tanımlamaktadır. Temel frekansın katları olmak üzere yüksek frekanslı dalga şekilleri harmonik bozulmayı oluşturur. Şekil 3.3'te temel frekans, harmonikler ve harmonikler eklendiği zaman ortaya çıkan toplam dalga şekli gösterilmiştir.



Şekil 3.3. Harmonik içeren dalga şekli

Şekil 3.3'te görüldüğü gibi n. dereceden bir harmonik temel frekansın n katı bir frekansa sahiptir. Harmoniğin derecesi arttıkça genliği düşmektedir. Harmonik bileşenlerin temel dalgaya olan etkisi ise kırmızı dalga şekli ile gösterilmiştir. Artan harmonik bileşenle birlikte sinüzoidal dalga bozulmakta ve kare dalgaya dönüşmektedir. Harmonik oluşuma sebep olan bazı durumlar aşağıda verilmiştir;

- 1- Yarı iletken elemanların kullanıldığı ve güç elektroniği devrelerini barındıran anahtarlamalı güç kaynakları, çeşitli sistemlerin kontrol devreleri, elektrikli araç bataryalarının şarjı, ark fırınları, tristör kontrollü elektrikli ısıtıcılar, doğrultucular, frekans dönüştürücüleri gibi uygulamalar

- 2- Transformatör, jeneratör, motor gibi elektrik makinaları ve makinaların uyarılması için kullanılan diyotlu dönüştürücüler
- 3- Doğru akım ile enerji iletim sistemleri, kesintisiz güç kaynakları, elektronik balastlar, statik kompensatörler
- 4- Bilgisayar ve elektronik sistemler

Fourier analizi zaman alanındaki sinyali, frekans bileşenlerine ayırmak için uygulanan bir yöntemdir. Harmonikler, fourier analizi ile temel frekans ve katları cinsinden ifade edilebilirler. Denklem (3.2)'de fourier açılımı verilmiştir. Burada A_0 $f(t)$ 'nin ortalama değerini ya da DA bileşenini temsil ederken diğer kısımlar ise AA bileşeni oluşturur. ω_0 $f(t)$ 'nin temel frekansı olmak üzere $2\omega_0$, $3\omega_0$, $4\omega_0$, ..., $n\omega_0$ $f(t)$ fonksiyonun harmonik frekanslarıdır. $n=1,2,3...$ olmak üzere $n=1$ için temel dalga, $n=2,3,4...$ için ise harmonikler belirlenir. Şekil 3.3'de görüldüğü gibi fourier analizi sayesinde bozuk bir dalga şeklini oluşturan farklı frekans ve genlikteki sinüzoidal dalgalar birbirinden ayrılabilir.

$$f(t) = A_0 + \sum_{n=1}^{\infty} A_n \cos(n\omega_0 t) + B_n \sin(n\omega_0 t) \quad (3.2)$$

Enerji kalitesi hakkında yorum yapılması ve bozulmaların giderilmesi için akım ve gerilim harmoniklerinin belirlenmesi gerekmektedir. Bu amaçla toplam harmonik bozulma değeri hesaplanmalıdır. Bu hesaplama sonucunun yüzde olarak ifade edilmesiyle sistemdeki harmonik bileşenler ve bozulma hakkında bilgi sahibi olunur. Temel frekansta salınan temel dalga haricindeki diğer frekanslardaki sinyallerin etkin değerlerinin toplamı harmonik içeriği gösterir. İdeal bir sistemde sadece temel dalga vardır. Bu dalga haricinde sistemden herhangi bir harmonik çekilmez. Denklem (3.3)'de verilen V_1 , temel dalga geriliminin etkin değeri ve Denklem (3.4)'de verilen I_1 , temel akım dalgasının etkin değeridir. Denklemlerin pay kısımları ise bozulmayı oluşturan harmoniklerin etkin değerlerinin toplamıdır (Özdentürk, 2021).

Gerilim için toplam harmonik bozulma (TDH_V);

$$\text{TDH}_V = \frac{\sqrt{v_2^2 + v_3^2 + \dots + v_n^2}}{v_1} \quad (3.3)$$

Akım için toplam harmonik bozulma (**TDH₁**);

$$\text{TDH}_1 = \frac{\sqrt{I_2^2 + I_3^2 + \dots + I_n^2}}{I_1} \quad (3.4)$$

3.4. Güç Kalitesi

Elektrik enerjisi verim ve kalite açısından üretimden tüketimine kadar her aşamasında belirli standartlara tabi tutulmuştur. Oluşturulmuş olan bu standartlar güç ve türe göre cihazları sınıflandırır. Yapılan bu sınıflandırmalar sonucunda ise cihazların sağlaması gereken asgari şartlar ve sınır değerleri belirlenir. Faz başına 16 A'ye kadar olan donanımların harmonik akımları açısından sınıflandırılmasında IEC 61000-3-2 standartları uygulanır. Bu sınırlamalara uymayan sistemler uyacak şekilde düzeltilmelidir. Çizelge 3.1'de IEC 61000-3-2 standartlarına göre D sınıfı cihazlar için izin verilen harmonik limitleri verilmiştir. (Yılmaz, 2020)

Çizelge 3.1. Cihazlar için izin verilen harmonik sınırları

Harmonik Numarası	İzin verilen maksimum harmonik akımı (mA/W)	İzin verilen maksimum harmonik akımı (A)
3	3.4	2.3
5	1.9	1.14
7	1.0	0.77
9	0.5	0.4
11	0.35	0.33
13	0.3	0.21
15<n<39	3.85/n	0.15x15/n

Güç sistemlerinde çeşitli yöntemler ile güç kalitesi iyileştirilebilmektedir. Dağıtım merkezlerinde yapılan kompanzasyon uygulamaları ile güç faktörü bire yakın değerlerde tutulmaktadır. Ayrıca yüksek güç talebinin olduğu endüstriyel merkezlerde giriş ve çıkış filtreleri kullanılarak harmonik akımları süzülüp şebeke gerilimi ideal sinüs sinyaline yaklaştırılabilir. Ancak güç sistemlerinde oluşan harmoniklerin ve düşük güç faktörünün yine sistem içerisinde şebekeye yansımadan çözüme kavuşturulması istenilir. Şimdiye kadar yapılan çalışmalar incelendiği zaman güç faktörünün düzeltilmesi için pasif ve aktif olmak üzere iki çeşit yöntem kullanıldığı görülmektedir.

Pasif filtreler bir sistemde belirli frekans aralığına sahip elektriksel sinyallerin iletilmesini veya durdurulmasını sağlayan R-L-C elemanlarından oluşan devrelerdir. Pasif filtre elemanlarının çalışabilmesi için harici bir güç kaynağına ihtiyaç yoktur. Alçak geçiren, yüksek geçiren, bant geçiren, bant durduran gibi çeşitleri vardır. Bir sistemde üretilen harmonik sinyaller temel frekanstan daha yüksek frekanslarda salınır. Alçak geçiren bir filtre uygulanarak yüksek frekanslı harmonikler engellenir ve güç faktörü yükseltilir.

Pasif güç faktörü düzeltme devreleri basitlik, güvenilirlik, gürültüye ve dalgalanmalara karşı duyarsızlık ve herhangi bir yüksek frekanslı EMI'nin üretilmemesi gibi olumlu özelliklere sahiptir. Bunların yanında, bu filtrelerin hacimli boyutları, zayıf dinamik tepkileri, yüksek maliyetleri, gerilim regülasyonunun olmaması ve hat frekansına duyarlılıkları, kullanımlarını 200 W'ın altındaki uygulamalarla sınırlamaktadır.

Güç faktörünü düzeltmenin bir diğer yolu ise aktif yöntemlerdir. Farklı frekans değerlerine ayarlanabilme, değişen harmoniklere cevap verebilme, rezonans etkisi oluşturmama gibi özellikleri bu yöntemleri pasif yöntemlerin önüne geçirmektedir. Bu yöntem güç elektroniği devrelerinin sebep olduğu temel problemleri yine güç elektroniği devreleri sayesinde çözüme kavuşturur. Alçak ve yüksek frekanslar için çeşitli şekillerde uygulanır. Karmaşık yapıları nedeniyle genellikle yüksek güçlü uygulamalarda tercih edilmektedir (Özdentürk, 2021).

3.5. Güç Yoğunluğu

Güç yoğunluğu, belirli bir alanda ne kadar gücün verebileceğinin bir ölçüsüdür. Birim hacim başına üretilen güç; birim metre küp başına watt (W / m^3) veya inç küp başına watt (W / in^3) olarak ölçülebilir. Birimleri, güç seviyesi ve boyuta göre ölçeklemek mümkündür. Örneğin, litre başına kilovat, elektrikli araçlarda yerleşik şarj cihazları için yaygın bir referans değeridir. Çünkü bu güç dönüştürücüler kilowatt güç seviyelerinde (1.9 kW ile 120 kW arasında) sağlamaktadır. Güç yoğunluğu, uygulamaya göre değişir fakat amaç aynıdır: Tasarımın boyutunu azaltarak daha fazla

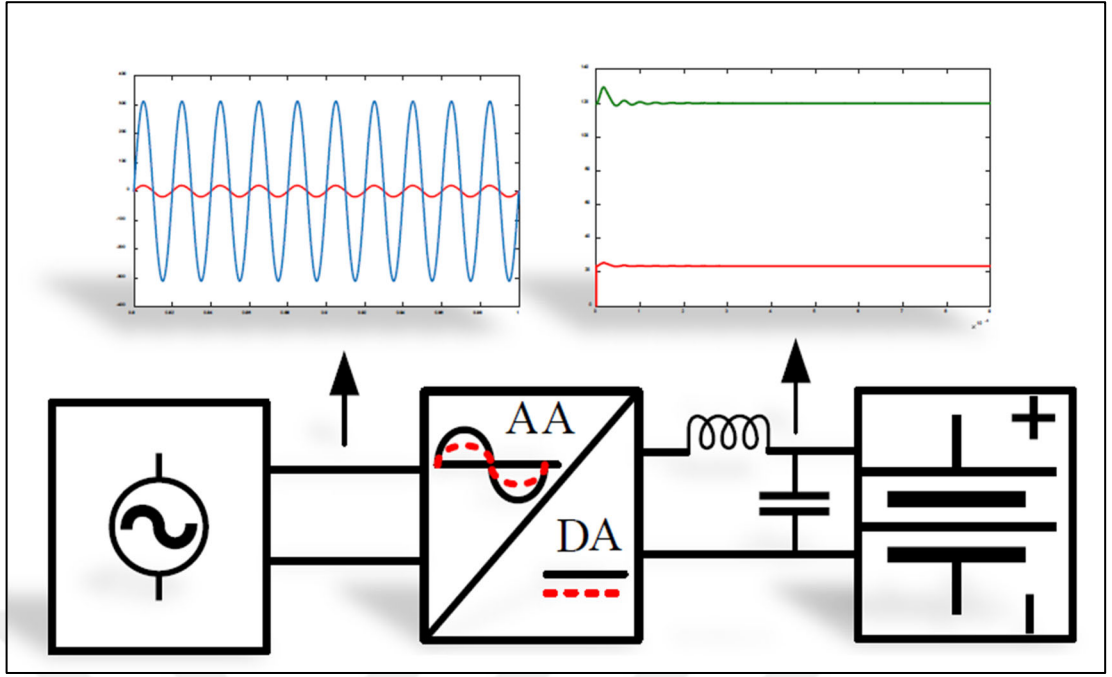
güç elde etmek ve maliyelerini düşürerek sistemin işlevselliğini artırmaktır. Bu nedenle, çoğu tasarımcı, güç yoğunluğu artırmak için pasif elemanların (endüktans, kapasitör, transistör, soğutucu ve transformatör vb.) boyutunu azaltmaya odaklanır. Böylece hem filtre hem de anahtarlama kontrol eden devreleri önemli ölçüde daha küçük ve bütünleşmiş hale gelir. Bu iyileştirmeler, daha az fiziksel malzeme ve düşük profil komponentlerin kullanılması ve daha fazla çözüm entegrasyonunu mümkün kılmaktadır (Dantondji, 2021).

3.6. Batarya Şarj Cihazı Topolojileri

Günümüzde elektrikli araçlar için önemli seçim kriterlerinden biride tek bir şarj ile gidilebilecek maksimum menzildir. Pil teknolojisinde yaşanan gelişmeler ile birlikte bataryaların güç yoğunluğunda ciddi artışlar gerçekleşmiş ve elektrikli araçların menzilleri önemli ölçüde artırılmıştır. Kapasitesi ve güç yoğunluğu artan bataryalar için yüksek güçlü şarj cihazlarının tasarlanması bir zorunluk haline gelmiştir.

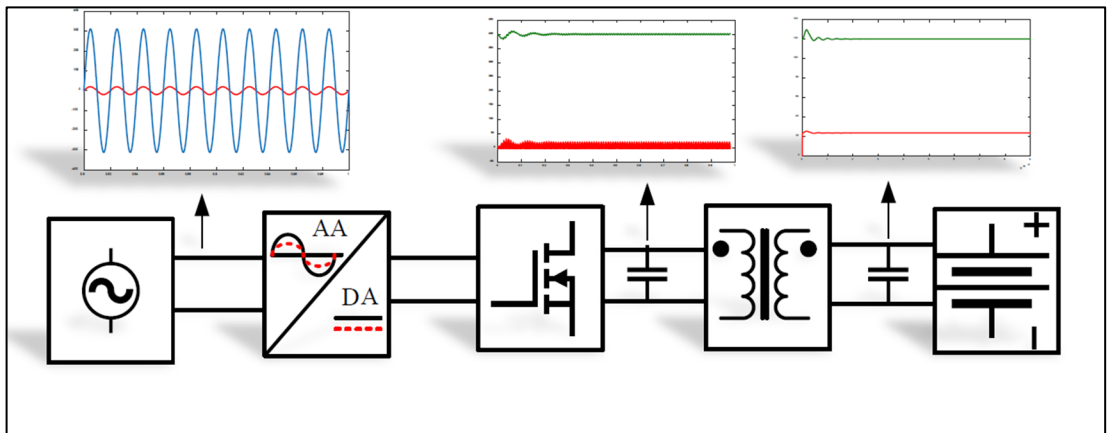
Elektrikli araç bataryaları için 2 farklı şarj cihazı tasarlanabilmektedir. Bunlar, harici ve yerleşik olarak ikiye ayrılır. Harici şarj cihazları kısa sürede dolun imkanı sağlar. Ancak istasyon sayısının yetersizliği ve yüksek maliyetler nedeniyle şehir içi kullanımlarda genellikle araç içine yerleşik şarj cihazları ile evde dolun işlemi gerçekleştirilmektedir. Bu tezin kapsamında araç içine yerleşik batarya şarj cihazları incelenecektir.

Yerleşik şarj cihazları detaylı bir şekilde incelendiğinde tek katmanlı ve iki katmanlı olmak üzere 2 farklı tasarım görülmektedir. Tek katmanlı tasarım düşük güç kademelerinde yüksek verimli olarak çalışır. Devre elemanı sayısı az olduğu için iki katmanlı yapıya göre nispeten daha az maliyetli ve daha güvenilirdir. Fakat elemanların üzerinde oluşan yüksek gerilim stresi, yüksek güçlere çıkıldığında azalan verimlilik ve güç yoğunluğu nedeniyle genellikle 1 kW altındaki güçlerde tercih edilir. Tek katmanlı şarj cihazı yapısı Şekil 3.4'de verilmiştir (Yılmaz, 2020).



Şekil 3.4. Tek katmanlı şarj cihazı topolojisi (Yılmaz, 2020)

İyi tasarlanmış iki katmanlı şarj cihazlarının yüksek güç yoğunluğu, yüksek güç dönüşüm verimliliği, geniş yük aralığında performanslı çalışma, düşük toplam harmonik bozulma gibi istenilen özellikleri vardır. Tek katmanlı yapılara göre nispeten daha karmaşık ve daha maliyetlidir. Genellikle 1 kW üzeri güçlerde tercih edilir. Bu yapıda ilk olarak şebekeden çekilen enerji, güç faktörü düzeltme özellikli AA/DA dönüştürücüler ile yükseltilir. İkinci adımda yüksek verimli DA/DA dönüştürücüler ile batarya grubuna uygun bir gerilime dönüşüm yapılır. İki katmanlı şarj cihazı topolojisi Şekil 3.5’de verilmiştir.



Şekil 3.5. İki katmanlı şarj cihazı topolojisi (Yılmaz, 2020)

Elektrikli araçlar için tasarlanan iki katmanlı yerleşik şarj cihazlarının sağlanması gereken bazı gereksinimler vardır. İlk katman olan AA/DA dönüştürücü tasarımında en önemli beklenti güç faktörünün olabildiğince yüksek tutulması ve şebeke güç kalitesinin korunmasıdır. Bu nedenle güç faktörü kontrollü devreler tercih edilir. Verimlilik ise önemli ölçüde ikinci katman olan DA/DA dönüştürücü tasarımına bağlıdır. Yerleşik şarj cihazı tasarımında genel olarak istenilen özellikler aşağıdaki gibi sıralanmıştır. Ancak tüm bu özellikleri bir arada sağlamak mümkün olmadığı için tasarımın önceliklerine göre bazı kriterlerden ödün vermek gerekebilir (Dantondji, 2021).

- 1- Geniş yük aralığı aralığında yüksek verim
- 2- Geniş çıkış gerilim aralığında yüksek verim
- 3- Geniş yük aralığında yumuşak anahtarlama uygulaması
- 4- Yüksek güç faktörü
- 5- Yüksek güç yoğunluğu
- 6- Düşük harmonik bozulma
- 7- Uygulama kolaylığı

3.7. Batarya Şarj Standartları

Şarj edilebilir elektrikli araçlar için iki farklı şarj sistemi bulunmaktadır. Bunlar alternatif akım ve doğru akım şarj olarak iki başlık altında incelenebilir. AA şarj sistemlerinde herhangi bir harici şarj cihazına ihtiyaç duyulmadan aracın kendi içinde yerleşik olarak bulunan şarj cihazından yararlanır. Bu sistemin en önemli avantajı herhangi bir şarj ünitesine ya da şarj istasyonuna ihtiyaç duyulmamasıdır. Ayrıca doğru akımda şarja göre nispeten daha ucuzdur. En önemli dezavantajı da şarj süresinin oldukça uzun olmasıdır. Bu nedenle şehirler arası yolculuklar için tercih edilmemektedir. DA şarj sistemleri de kendi içerisinde ev tipi ve istasyon tipi olarak ikiye ayrılır. Her iki yöntemde alternatif akıma göre daha hızlı şarja imkan tanımaktadır.

Batarya şarj işleminin güvenli bir şekilde gerçekleştirilebilmesi ve kaliteli şarj yapılabilmesi için farklı standartlar tanımlanmıştır. Bu standartlardan en yaygın olarak kullanılanı Amerika Otomotiv Mühendisleri Birliğinin yayınladığı SAE J1772

standardıdır. AA Seviye 1 ve AA Seviye 2 şarj yöntemlerinde gerekli olan enerji araç içinde bulunan yerleşik şarj cihazından elde edilir. AA Seviye 3 ise ev tipi şarj cihazları için tasarlanmıştır. Diğer DA şarj tiplerinde ise AA/DA dönüşümleri şarj istasyonunda yapılmakta ve aküler hızlı şarj ile şarj olmaktadır. Şarj işleminin ortalama süresi batarya tipi, enerji kapasitesi ve şarj cihazına göre değişmekte olup ortalama 20 dakika ile 20 saat arasında değişmektedir.

Avrupa ve Çin’de ise çoğunlukla Uluslararası Elektroteknik Birliği (IEC) tarafından geliştirilen IEC 61851 standardı kullanılmaktadır. Bu standarda göre AA şarj işlemi çekilen akıma göre 3 moda ayrılmıştır. DA şarj ise hızlı şarj olarak tasarlanmış ve şarj istasyonları için geliştirilmiştir.

Elektrikli araçlarda şarj süresini kısaltmak için Japonya’da ise CHADEMO standardı geliştirilmiştir. Sadece DA şarj için tasarlanan bu standart 62.5 kW’a kadar güç aktarıma izin vermektedir. Çizelge 3.2’de şarj standartlarına ait özellikler verilmiştir (Yılmaz, 2020).

Çizelge 3.2. Elektrikli araçlara ait çeşitli şarj standartları

SAE J1772 Standardı				
Şarj Tipi	Şebeke Girişi	Gerilim (V)	Akım (A)	Şarj Tipi
AA Seviye 1	1 faz	120	12-16	Yavaş
AA Seviye 2	1 faz	240	<80	Yavaş
AA Seviye 3	1,3 faz	240	>80	Yavaş
DA Seviye 1	-	200-450	80	Yavaş
DA Seviye 2	-	200-450	200	Normal
DA Seviye 3	-	200-600	400	Hızlı
IEC 61851 Standardı				
Şarj Tipi	Şarj Modu	Faz Sayısı	Gerilim (V)	Akım (A)
AA	1 Mod	1	≤ 250	≤ 16
		3	≤ 480	≤ 16
AA	2 Mod	1	≤ 250	≤ 32
		3	≤ 480	≤ 32
AA	3 Mod	1	≤ 250	≤ 250
		3	≤ 480	≤ 250
DA	4 Mod	-	≤ 1000	≤ 400
CHADEMO Standardı				
Şarj Tipi	Gerilim (Vdc)	Akım (A)	Güç(kW)	
CHADEMO	500	125	62.5	

Elektrikli araçlarda modellere göre değişen şarj konnektörleri ve kontrol teknikleri şarj istasyonlarında karmaşa oluşturmaktadır. Bu nedenle elektrikli araç üreticilerinin ortak girişimleri ile Kombine Şarj Sistemi (CCS) geliştirilmiştir. CCS ile hem alternatif akımda hem de doğru akımda şarj işlemi tek bir konnektör ile yapılabilmektedir. Ayrıca bu standart ile birlikte tüm şarj senaryoları için tek bir kontrol mantığı ve standart bir arayüz geliştirilmiştir.

3.8. Batarya Şarj Yöntemleri

Günümüz elektrikli araç bataryalarında genellikle lityum-iyon piller kullanılmaktadır. Bunun en önemli nedeni ise kurşun-asit ve nikel-metal gibi elementlerden yapılan batarya gruplarına göre daha hafif ve daha yüksek güç çıkışı verebiliyor olmalarıdır. Bataryalar ile ilgilenirken bazı önemli kavramların bilinmesi gerekir. Bunlar;

- 1- Şarj Durumu (SOC): Bataryada kalan enerji miktarı belirtir. (Genellikle yüzde olarak kullanılır.)
- 2- Şarj Derinliği (DOD): Bataryaya zarar vermeden kullanılacak maksimum enerji miktarını belirtir. (Genellikle yüzde olarak kullanılır.)
- 3- Çevrim Ömrü: Bataryanın kullanılamayacak hale gelmeden önce kaç kez şarj-deşarj edilebileceğini belirtir.
- 4- Depolama Kapasitesi: Tamamen şarj edildiği zaman mevcut toplam enerji miktarını belirtir.
- 5- Sağlık Durumu (SOH): Mevcut pil ile hiç kullanılmamış bir pilin şarj/deşarj akımları kıyaslanır. Bataryanın ne durumda olduğu ile ilgili bilgi verir.

Bataryaları şarj ederken sabit akım ve sabit gerilim olmak üzere iki farklı yöntem kullanılmaktadır. Sabit akım ile şarj yönteminde ilk olarak referans bir akım ve gerilim değeri belirlenir. (Batarya ömrünün uzatmak için şarj akımı kapasitenin üçte biri gibi seçilir.) Belirlenen referans akımı ile şarja başlanır. Şarj süresi boyunca akım sabit tutulur. Batarya grubu belirlenen referans gerilim değerine ulaştığı zaman ise şarj işlemi sonlandırılır. Sabit gerilim ile şarj yönteminde ise batarya grubu için istenilen referans gerilim değeri belirlenir. Gerilim seviyesi şarj süresince sabit kalır.

Sabit akım ile şarj yönteminde akımın sabit tutulması istenilir. Ancak batarya gerilimi arttıkça şarj akımı azalmaktadır. Şarj akımını sabit tutmak için batarya gerilimi arttıkça kaynak gerilimi artırılır. Bu yöntem ile sabit gerilimde şarja göre daha hızlı şarj işlemi gerçekleşmiş olur. Ancak kaynak gerilimini belirli bir seviyeden sonra artırmak bataryaya zarar vereceği için bu yöntem ile şarj işlemi bitirmek mümkün değildir. Bu nedenle batarya gerilimi belirlenen referans gerilimine ulaştıktan sonra sabit gerilim ile şarj işlemine devam edilir. Batarya gerilimi arttıkça şarj akımı düşmeye devam eder. Şarj akımı istenilen seviyeye düştüğü zaman da şarj işlemi sonlandırılır. Her iki yöntemde kullanılması ile bataryalar hem hızlı hem de güvenli bir şekilde şarj edilmiş olur.

Aşırı şarj ve deşarj gibi durumlar batarya ömrünü kısaltmaktadır. Bu nedenle şarj cihazları batarya gruplarını bilinçli olarak kapasitenin %80'ne kadar şarj ederler ve kapasitenin %20'sine kadar deşarj edilmesine izin verirler. Bu şekilde bataryaların kullanım ömürleri uzamaktadır.

Günümüz elektrikli araçları 250 – 450 V arasında bir batarya seti gerilimine sahiptir. Bu batarya setleri genellikle 1000'den fazla lityum-iyon hücrenin bağlanması ile elde edilir. Araçların hızlanması ve rejeneratif frenlemesi sırasında hücreler arası gerilim dengesizlikleri oluşabilmektedir. Batarya güvenli bir şekilde kullanılması ve uzun ömürlü olmaları için bu gerilim dengesizliklerinin giderilmesi önem arz etmektedir.

Elektrikli araç bataryalarında şarj – deşarj döngüsünü kontrol etmek ve hücreler arası dengeleme yapmak için batarya yönetim sistemleri (BYS) kullanılır. Kullanılan batarya yönetim sistemleri hücrelerin gerilimlerini ve sıcaklıklarını sürekli izleyen sensörlere sahiptir. Yapılan ölçümler sonucunda aktif olarak dengeleme yapılır. Aynı zamanda oluşabilecek arızalarda sürekli izlenmektedir. Kullanılan bu yöntemler ile elektrikli araçlar ile seyahat etmek daha güvenli hale gelmektedir (Morris, 2015).

3.9. AA/DA Dönüştürücüler

Anahtarlama güç kaynağı uygulamalarındaki değişen standartlar ve enerjinin verimli kullanımının gerekliliği ile birlikte son yıllarda güç faktör düzeltme (GFD) konusu oldukça önem kazanmıştır. GFD, temel olarak reaktif gücün ve harmonik akımların sifira yaklaştırılması demektir. GFD tabanlı dönüştürücüler bir yandan AA/DA güç dönüşümünü yüksek frekanslarda sağlarken diğer yandan güç faktörünü bire yaklaştırır.

AA/DA dönüşümü yapmanın en kolay yolu bir diyot ve ardından bir kapasitör yerleştirmektir. Fakat bu yöntem şebekede harmonik bozulmalara ve doğrusal olmayan yüklerde güç faktör azalmasına neden olduğu için sağlıklı bir çözüm değildir. Bu nedenle, kolaylığına ve düşük maliyetli olmasına rağmen güç faktörü düzeltmelerinde tercih edilmemektedir. Dolayısıyla, AA/DA dönüştürücü devrelerde diyot, endüktans ve kapasitör gibi pasif elemanlara ek olarak aktif elemanlar kullanılarak hem dönüşüm hem de güç faktör düzeltme görevleri yerine getirilebilir.

AA/DA dönüştürücü topolojileri düşürücü, yükseltici, çevirici, cuk, sepic ve zeta olarak sıralanabilir. Çevirici, cuk, sepic ve zeta yapılarında, anahtarlama eleman uçlarındaki gerilimin yüksek olmasından dolayı elektrikli araç uygulamalarında tercih edilmemektedir. Düşürücü yapılar giriş akımının yüksek olması ile birlikte şebeke akımının bozulmasına ve parazitlerin oluşmasına neden olur ve dolayısıyla güç faktörü olumsuz yönde etkilenir. Yükseltici yapılar, anahtarlama elemanlarından geçen akımın düşük olması nedeniyle elektrikli araç şarj cihazlarında yaygın olarak kullanılmaktadır (Dantondji, 2021).

Güç faktörü düzeltmeli dönüştürücü yapılarında genel olarak endüktans değeri Denklem (3.5)'de, bağıl iletim süresi Denklem (3.6)'da ve kondansatör değerleri Denklem (3.7)'de verilen formüller yardımı ile belirlenmektedir (Çavdar, 2017).

$$L = \frac{V_{in(peak)} D_{peak}}{f_{sw} \Delta i_L} \quad (3.3)$$

$$D_{peak} = \frac{V_{out} - V_{in(peak)}}{V_o} \quad (3.3)$$

$$C = \frac{P_{out}/V_{out}}{2\pi f_r \Delta V_{out}} \quad (3.3)$$

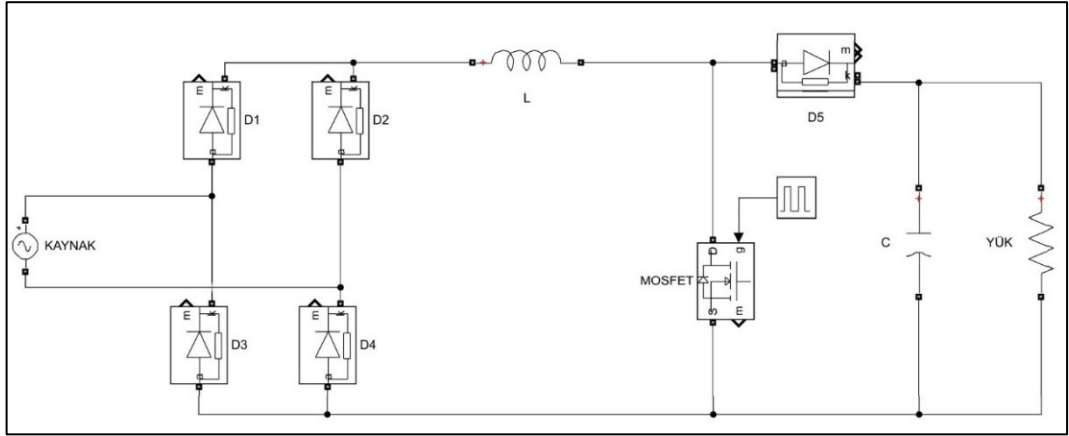
Çizelge 3.3. GFD Denklemlerde kullanılan simgeler ve karşılıkları

Simge	Açıklma	Birim
L	Endüktans	H
V _{in(peak)}	En düşük tolerans değerindeki giriş geriliminin maksimum değeri	V
V _{out}	Çıkış gerilimi	V
P _{out}	Çıkış gücü	W
f _r	Şebeke frekansı	Hz
D _{peak}	Bağlı iletim süresi	-
f _{sw}	Anahtarlama frekansı	Hz
Δi _L	Bobin akımının dalgalanması	A
ΔV _{out}	Çıkış geriliminin dalgalanması	V

3.9.1. Klasik YGFD

Şekil 3.6'da görüldüğü gibi klasik yükseltici GFD devre yapısında köprü doğrultucu, endüktans, anahtarlama elemanı ve bir adet hızlı diyot kullanılır. İlk olarak alternatif akım köprü diyot yapısı ile doğrultulur. Ardından yarıiletken elemanlar ile endüktansa yüksek frekansta enerji aktarımı yapılır. Bu yöntem ile şebeke ve endüktans gerilimi birleşerek gerilim yükseltilmiş olur. Klasik YGFD topolojisinin genel özellikleri aşağıdaki gibi sıralanmıştır.

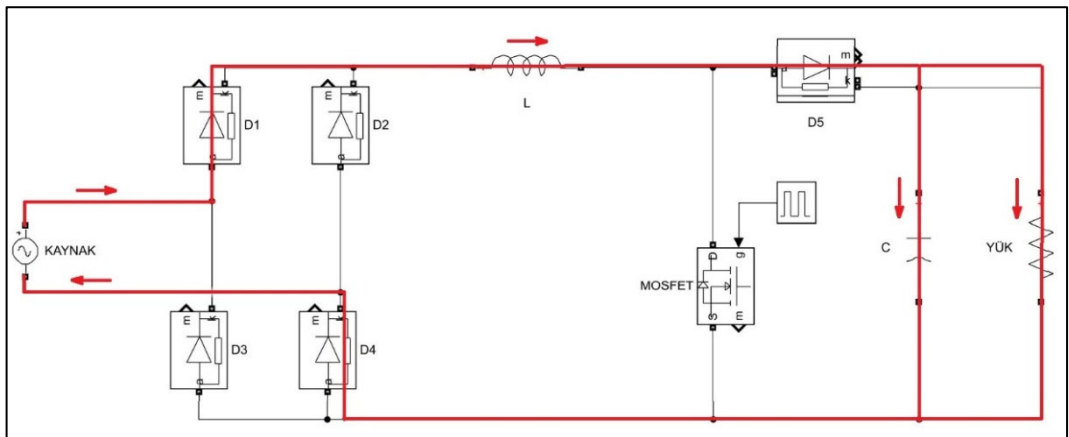
- 1- Girişteki köprü diyot yapısı nedeniyle 1 kW'a kadar olan güçlerde tercih edilmektedir. Artan güç seviyesi diyotların ters toparlanma sürecindeki enerji kaybını artırmaktadır. Dolayısıyla devrenin verimi düşmektedir.
- 2- Anahtarlama elemanlarının gerilim stresi yüksektir.
- 3- Tek bir anahtar olduğu için devrenin kontrolü kolaydır.



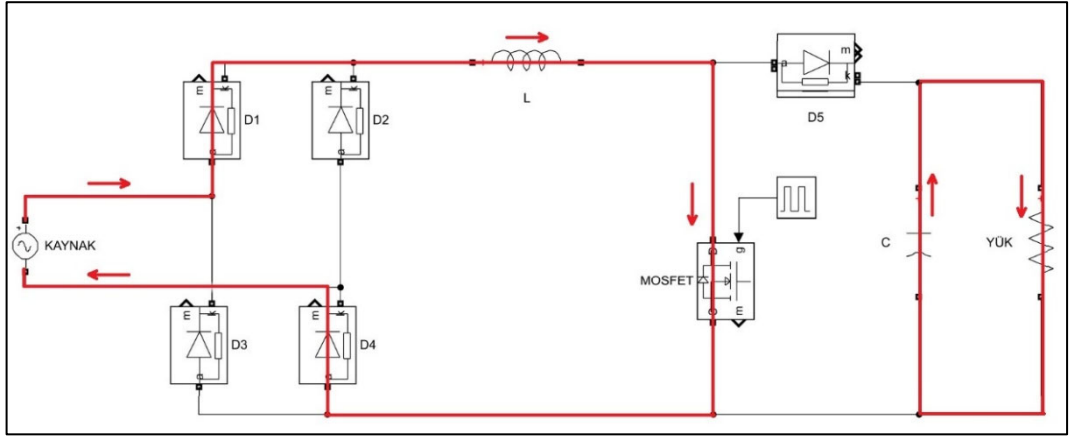
Şekil 3.6. Klasik YGFD devre şeması

Klasik YGFD topolojisinde çıkış gerilimi ayarı anahtarlama elemanının kontrolü ile sağlanır. Anahtar iletim duruma geçtiğinde endüktans şarj olur. Bu sırada kondansatör yükü beslemektedir. Anahtar kesime girdiği zaman ise endüktans üzerinden gelen akım hem yükü hem de kondansatörü besler. Endüktans ve kaynak gerilimleri toplanarak çıkış gerilimi katlanmış olur. Anahtar ne kadar uzun süre iletimde kalırsa endüktans üzerinde o kadar çok enerji depolanmış olur. Dolayısıyla çıkış gerilimini artırmak için anahtarın iletimde kalma süresi artırmak ve çıkış gerilimini azaltmak için anahtarın iletimde kalma süresini azaltmak gerekir.

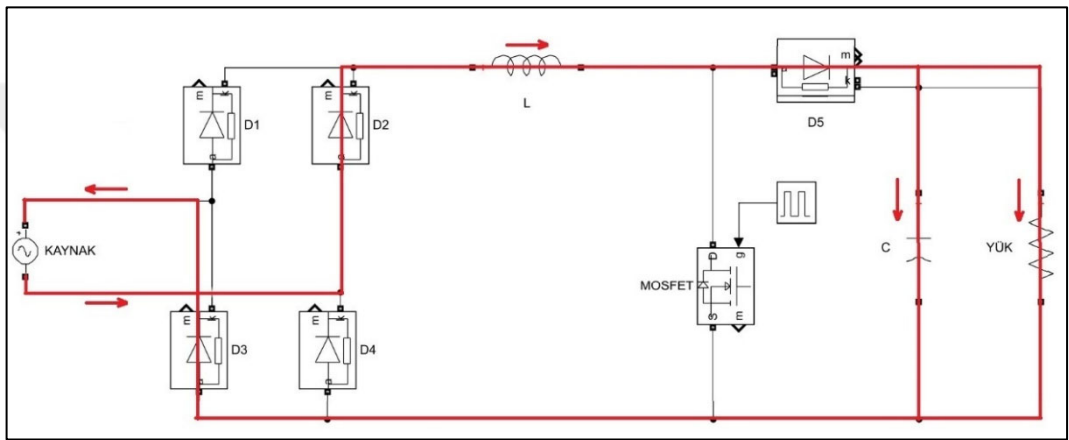
Klasik YGFD devre topolojisi için Şekil 3.7’de anahtar kesimdeyken pozitif alternans döngüsü, Şekil 3.8’de anahtar iletimdeyken pozitif alternans döngüsü, Şekil 3.9’da anahtar iletimdeyken negatif alternans döngüsü ve Şekil 3.10’da anahtar kesimdeyken negatif alternans döngüsü verilmiştir (Özdentürk, 2021).



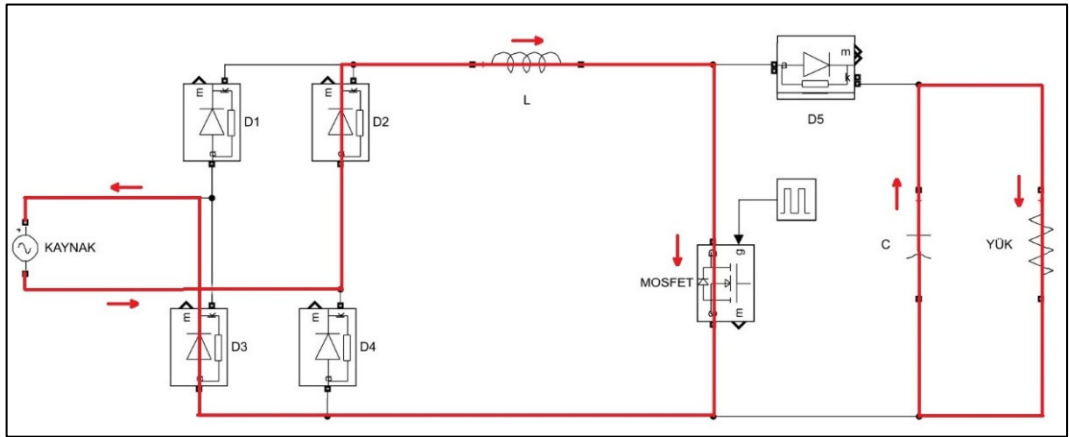
Şekil 3.7. Klasik YGFD – Pozitif alternans, anahtar kesimde çalışma



Şekil 3.8. Klasik YGFD – Pozitif alternans, anahtar iletimde çalışma



Şekil 3.9. Klasik YGFD – Negatif alternans, anahtar kesimde çalışma

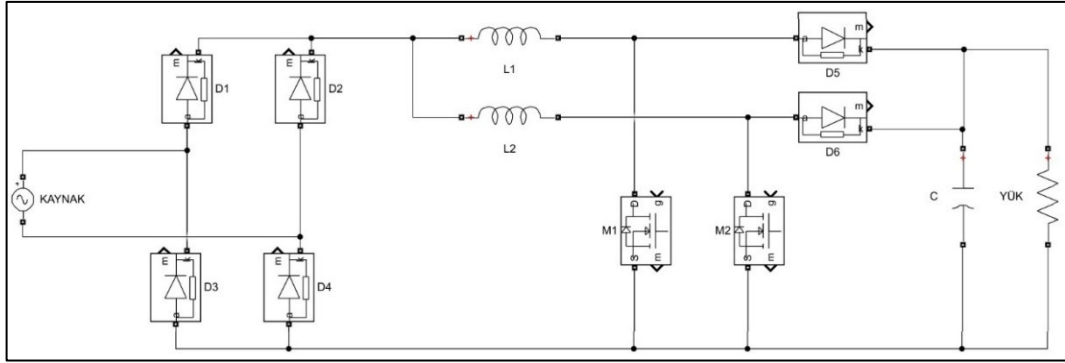


Şekil 3.10. Klasik YGFD – Negatif alternans, anahtar iletimde çalışma

3.9.2. Girişimli YGFD

Şekil 3.11’de görüldüğü gibi girişimli YGFD devre yapısı, klasik yükseltici GFD yapısına oldukça benzerdir. Köprü diyotlardan sonra fazladan bir endüktans ve

anahtarlama elemanı eklenmiştir. Bu şekilde çift katlı bir yükseltici yapısı oluşturulmuş olur.

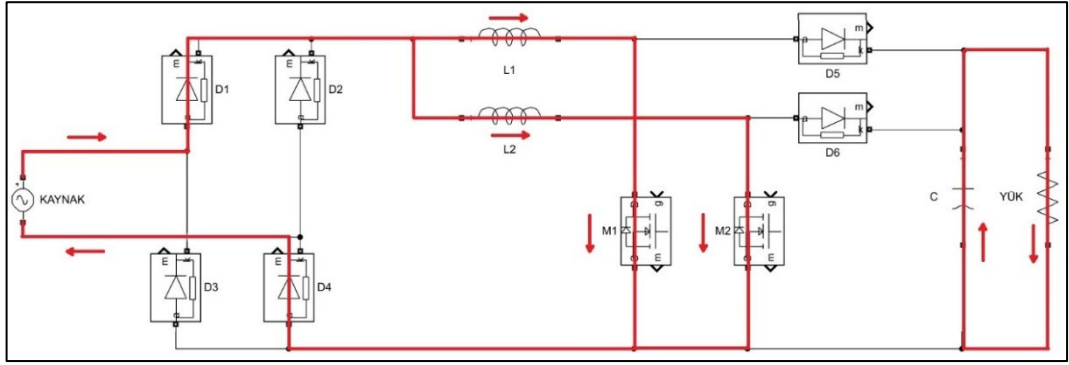


Şekil 3.11 Girişimli YGFD devre şeması

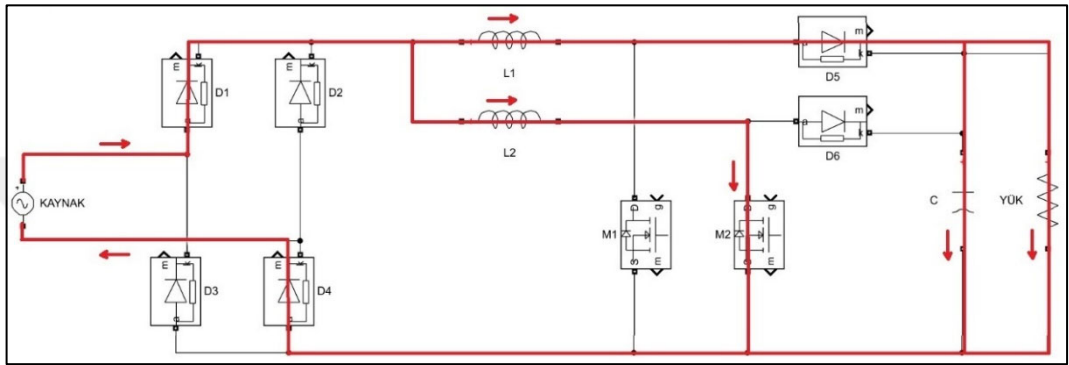
Devrede bulunan iki anahtarlama elemanı uygun kontrol teknikleri kullanılarak birbirleriyle senkronize bir şekilde çalıştırılır. Bu şekilde güç faktörü yükseltilir ve giriş akımındaki harmonik bozulmalar elimine edilir. Girişimli YGFD topolojisinin genel özellikleri aşağıdaki gibi sıralanmıştır (Özdentürk, 2021).

- 1- İki fazlı girişimli devre yapısında efektif dalgalanma frekansı iki kat artar ve mevcut dalgalanma büyüklüğünü azalır. Gerilim dalgalanmasının azalması ile birlikte kapasitör üzerindeki stres azalmış olur.
- 2- Giriş akım dalgalanması klasik YGFD devrelerine göre düşüktür. Böylece girişimli dönüştürücülerde, klasik dönüştürücülere göre daha düşük THD değeri gözlenir.
- 3- Köprü diyot yapısı nedeniyle anahtarlama kayıpları klasik YGFD yapısı ile benzerdir.
- 4- Devre topolojisinin çok katlı yapısı nedeniyle endüktans üzerinde depo edilmesi gereken enerji miktarı azalır. Faz sayısına bağlı olarak gerçekleşen bu azalış nedeniyle endüktans hacimleri de küçülmektedir.

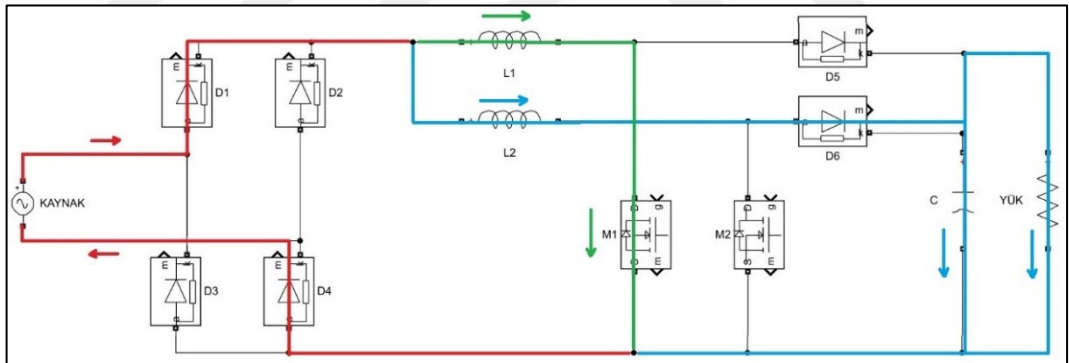
Girişimli YGFD dönüştürücünün pozitif alternans da çalışma döngüsü aşağıda verilmiştir. Şekil 3.12’de her iki anahtarda iletimde, Şekil 3.13’de sadece M2 anahtarı iletimde, Şekil 3.14’de sadece M1 anahtarı iletimde ve Şekil 3.15’de her iki anahtarda kesimde olacak şekilde çalışma döngüleri verilmiştir. Negatif alternansta ise köprü doğrultucunun aktif diyotları ve kaynak akım yönü değişecek şekilde aynı çalışma durumları geçerlidir.



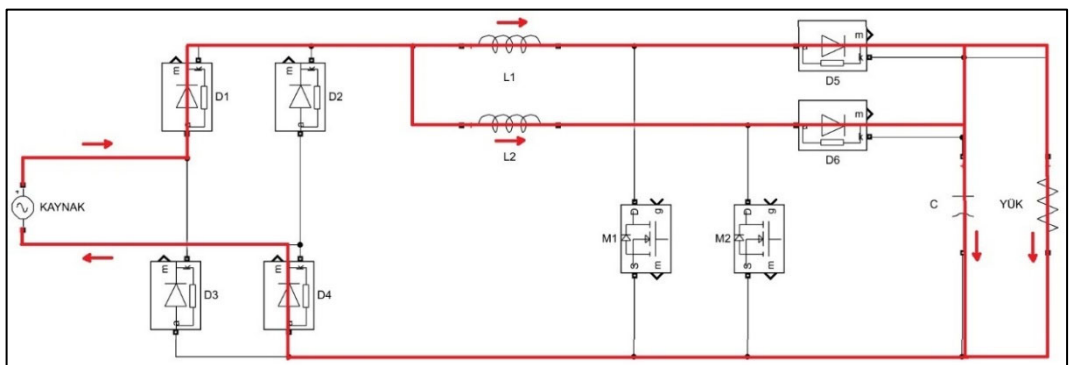
Şekil 3.12. Girişimli YGFD – Pozitif alternans, M1 ve M2 iletimde



Şekil 3.13. Girişimli YGFD – Pozitif alternans, M1 kesimde ve M2 iletimde



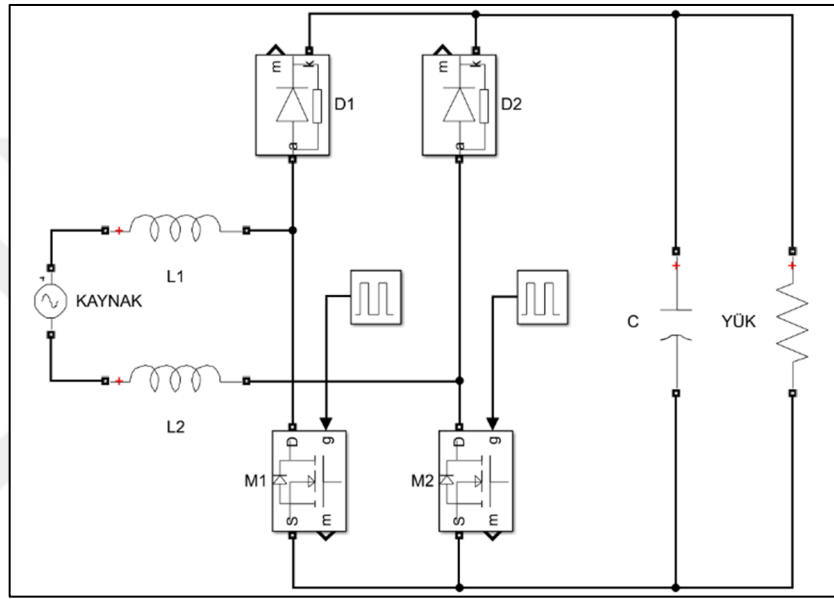
Şekil 3.14. Girişimli YGFD – Pozitif alternans, M1 iletimde ve M2 kesimde



Şekil 3.15. Girişimli YGFD – Pozitif alternans, M1 ve M2 kesimde

3.9.3. Temel köprüsüz YGFD

Yüksek güçlü uygulamalarda sıklıkla kullanılan güç faktörü düzeltmeli dönüştürücü türlerinden biri de köprüsüz yükseltici yapılarıdır. Klasik ve girişimli yapılarından farkı olarak giriş gerilimini doğrultan köprü doğrultucu yapısı yoktur. Yüksek verim ve güç yoğunluğu istenilen uygulamalarda sıklıkla tercih edilmektedir. Şekil 3.16'da temel köprüsüz YGFD yapısı gösterilmiştir.



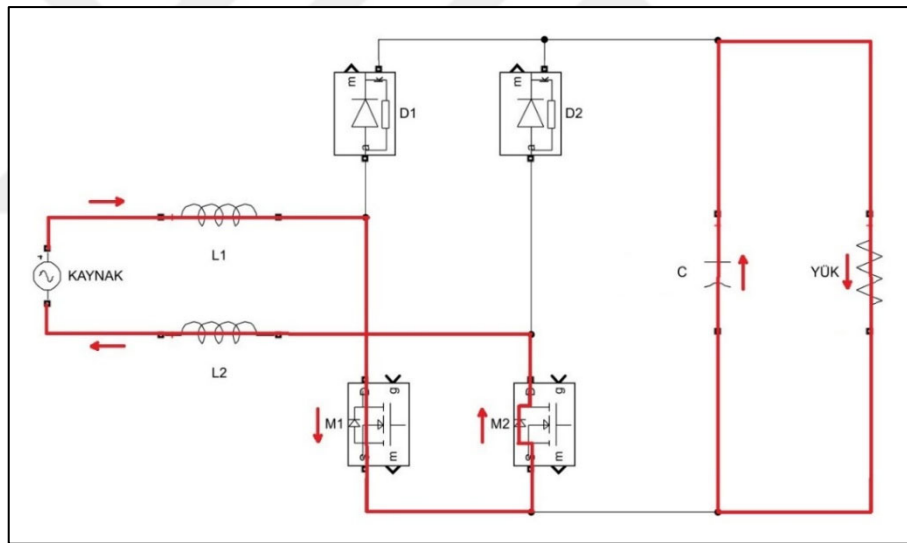
Şekil 3.16. Temel köprüsüz YGFD devre şeması

Köprü diyot barındıran GFD topolojilerinde giriş geriliminin her bir alternansında iki diyot iletimdedir. İletimde olan her iki diyotun da üzerinde, geçen akımın karesi ile doğru orantılı olarak iletim kayıpları oluşur. Köprüsüz yapılarda ise her bir yarım periyotta bir anahtarlama elemanı ve bir doğrultucu diyot bulunur. Anahtarlama elemanlarının uçlarına ters gerilim oluşmasını engellemek için ters toparlanma süresi daha kısa olan diyotlar paralel olarak bağlanır. Bu şekilde hem doğrultucu diyotlara göre daha az iletim kaybı oluşur hem de devre kontrollü hale gelir.

Temel köprüsüz YGFD yapısında anahtarlama elemanları senkronize biçimde kontrol edilerek yüksek verimde güç dönüşüm işlemi yapılır. Diğer yapılardan farklı olarak iki anahtarlama elemanı bulunduğu için kontrol kabiliyeti daha yüksektir. Temel köprüsüz YGFD topolojisinin genel özellikleri aşağıdaki gibi sıralanmıştır.

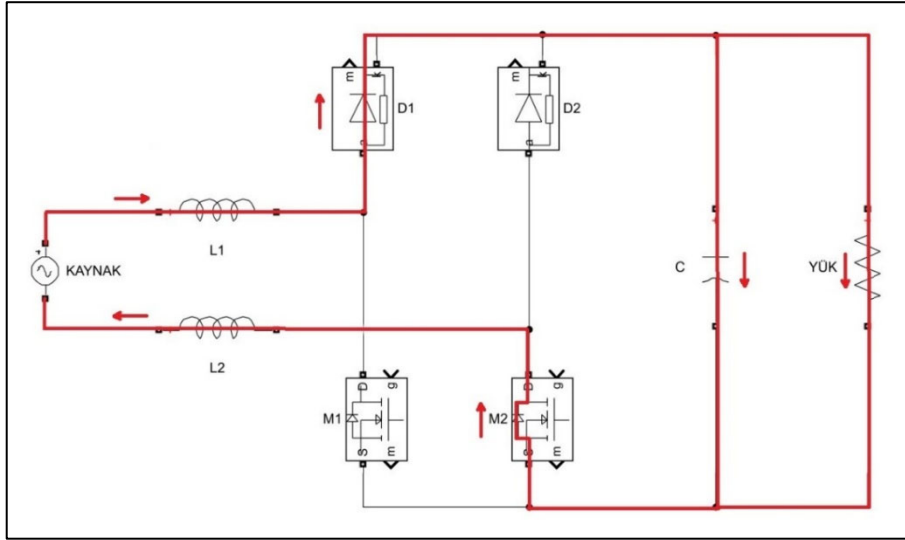
- 1- Düşük anahtarlama kayıpları nedeniyle yüksek güçlerde tercih edilmektedir.
- 2- Düşük yük koşullarında iletim performansı yüksektir.
- 3- Diğer yükseltici dönüştürücülere göre daha fazla EMI'ye sebep olurlar.
- 4- Köprüsüz topolojilerde akımın ve gerilimin ölçülmesi zordur. Akım yolu anahtarlama elemanın durumuna göre her bir çevrimde değişir. Bu nedenle ölçüm yapılması için harici devre elemanları kullanılmaktadır (Özdentürk, 2021).

Temel köprüsüz yükseltici dönüştürücünün pozitif alternans da çalışma döngüsü aşağıda verilmiştir. Şekil 3.17'de M1 anahtarı iletime girer ve devre M2 anahtarının dahili diyotu üzerinden tamamlanır. Bu sırada L1 endüktansı şebeke akımı ile şarj olur. Yükün şebeke ile bağlantısı kesildiği için çıkış kapasitörü tarafından beslenir.



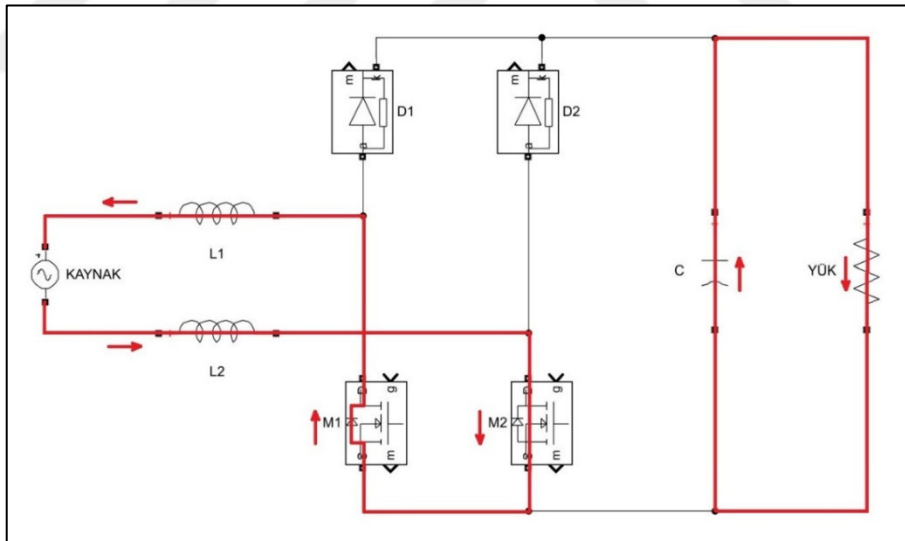
Şekil 3.17. Temel köprüsüz YGFD – M1 iletimde ve M2 kesimde

Şekil 3.18'de M1 anahtarı kesime girer ve devre M2 anahtarının dahili diyotu üzerinden tamamlanır. Yük hem şebeke hem de endüktans üzerinden gelen akım ile beslenmektedir. Çıkış kapasitörü şarj ve giriş endüktansı deşarj durumundadır.



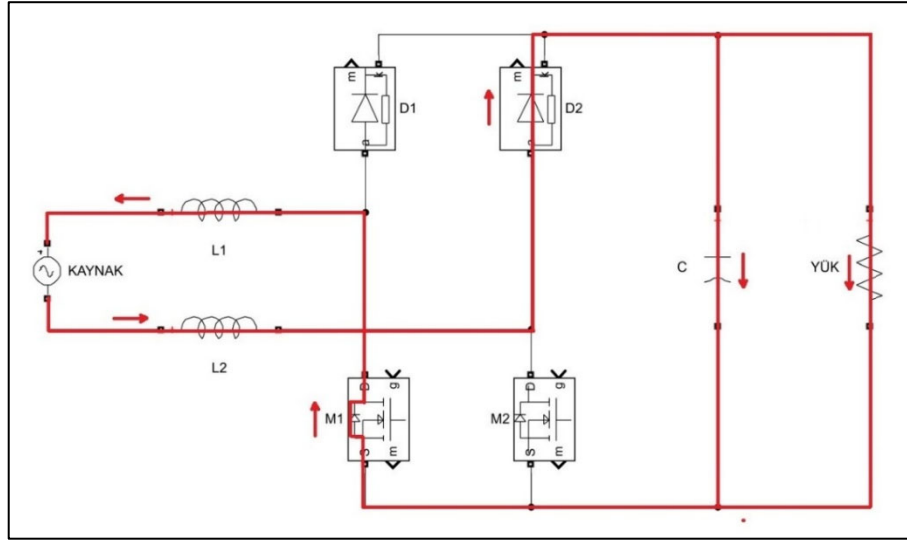
Şekil 3.18. Temel köprüsüz YGFD – M1 ve M2 kesimde

Temel köprüsüz YGFD dönüştürücünün negatif alternansta çalışma döngüsü aşağıda verilmiştir. Şekil 3.19’da M2 anahtarı ilettime girer ve devre M1 anahtarının dahili diyotu üzerinden tamamlanır. Bu sırada giriş endüktansları şebeke akımı ile şarj olur. Yükün şebeke ile bağlantısı kesildiği için çıkış kapasitörü tarafından beslenir.



Şekil 3.19. Temel köprüsüz YGFD – M1 kesimde ve M2 iletimde

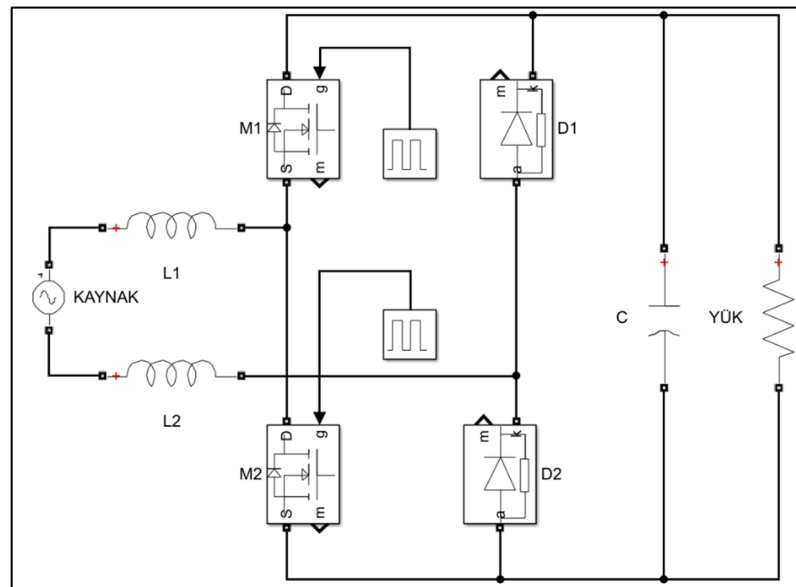
Şekil 3.20’de M2 anahtarı kesime girer ve devre M1 anahtarının dahili diyotu üzerinden tamamlanır. Yük hem şebeke hem de endüktans üzerinden gelen akım ile beslenmektedir. Çıkış kapasitörü şarj ve giriş endüktansları deşarj durumundadır.



Şekil 3.20 Temel köprüsüz YGFD – M1 ve M2 kesimde

3.9.4. Totem kutuplu köprüsüz YGFD

Köprüsüz topolojilerde üzerinde bulunan anahtarların konumları değiştirilerek çok farklı yapıda doğrultucu devre tasarımları elde edilebilir. Bunlardan biri de totem kutuplu köprüsüz yükseltici topolojisidir. Yapı itibariyle temel köprüsüz yükselten topolojiye çok benzemekle birlikte aralarındaki en önemli fark yarı iletken anahtarların konumudur. Bu yapıda yarı iletken anahtarlar ve diyotlar kendi aralarında seri olarak bağlanmıştır (Çavdar, 2017). Şekil 3.21’de Totem kutuplu köprüsüz YGFD yapısı gösterilmiştir.

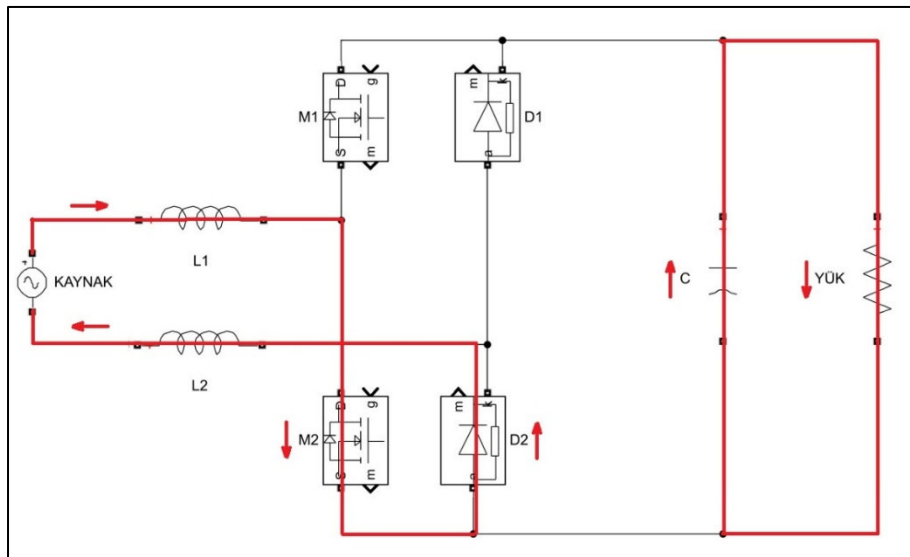


Şekil 3.21. Totem kutuplu köprüsüz YGFD devre şeması

Totem kutuplu köprüsüz YGFD topolojisinin genel özellikleri aşağıdaki gibi sıralanmıştır.

- 1- Anahtarlama kayıpları düşüktür.
- 2- Düşük yük koşullarında iletim performansı yüksektir.
- 3- Temel köprüsüz yükseltici dönüştürücüye göre daha düşük EMI gürültüsüne sahiptir.
- 4- Dahili diyotların ters toparlanma süreleri nedeniyle 1 kW ve üstü güç gereksinimleri için uygun değildir.
- 5- Akımın ve gerilimin ölçülmesi zordur. Akım yolu anahtarlama elemanın durumuna göre her bir çevrimde değişir.

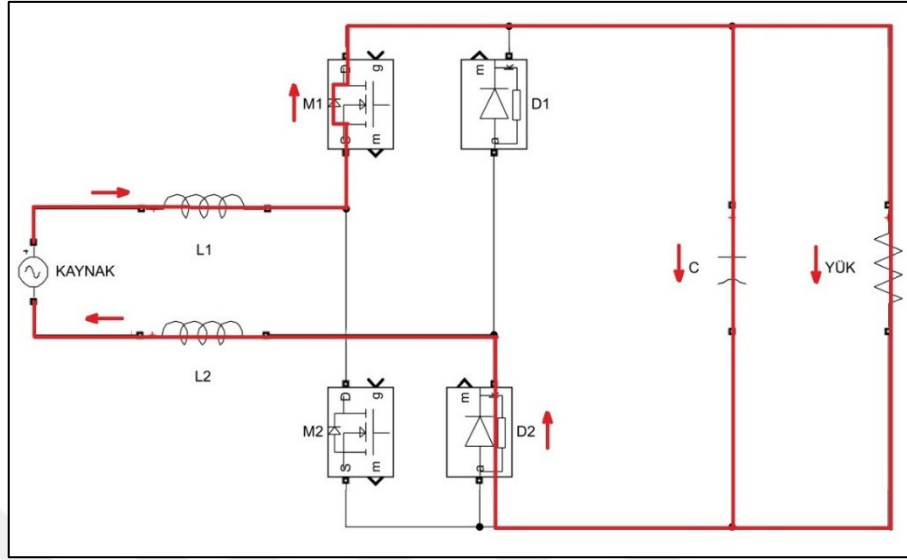
Totem kutuplu köprüsüz YGFD topolojisinde yarı iletken anahtarlar ve diyotlar kendi aralarında birbirlerine seri olarak bağlanmıştır. Yani bir kolda anahtarlar bulunurken diğer kolda diyot elemanları bulunmaktadır. Bu dağılım nedeniyle devrenin çalışma karakteristiği bir hayli değişmektedir. Şekil 3.22’de M2 anahtarı iletime girer ve devre D2 diyotu üzerinden tamamlanır. Bu sırada giriş endüktansları şebeke akımı ile şarj olurken çıkış kapasitörü yükü besleği için deşarj olmaktadır.



Şekil 3.22. Totem kutuplu köprüsüz YGFD – M2 iletimde ve M1 kesimde

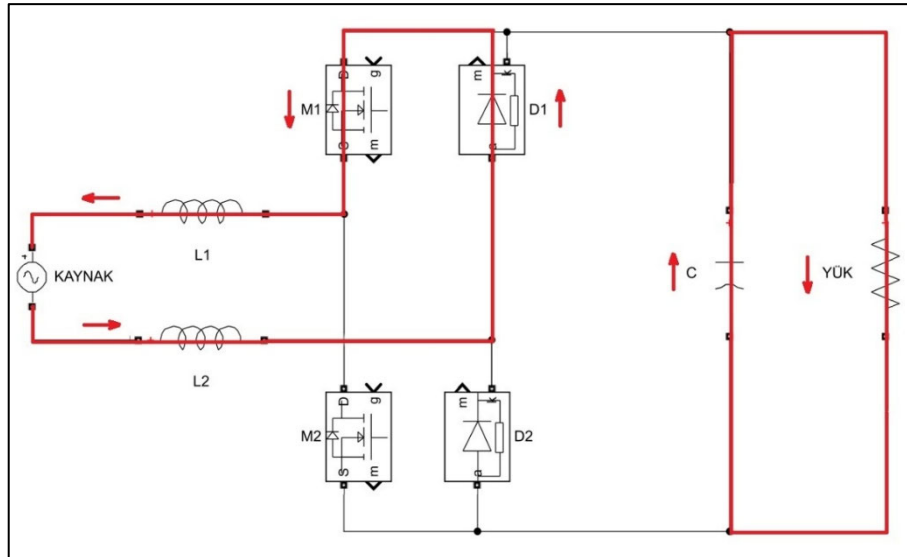
Şekil 3.23’de M1 ve M2 anahtarı kesime girer. Kaynak ve yük arasındaki bağlantı sağlanır. Devre sırasıyla giriş endüktansı, M1 anahtarının dahili diyotu, yük ve D2 diyotu üzerinden tamamlanır. Bu sırada giriş endüktansları deşarj olurken çıkış kondansatör şarj olmaktadır. Şebeke geriliminin üzerine endüktans üzerindeki

gerilimde eklendiği için giriş gerilimi katlanmış olur. Endüktansların şarj süresi ile doğru orantılı olarak gerilim artmaktadır.



Şekil 3.23. Totem kutuplu köprüsüz YGFD – M1 ve M2 kesimde

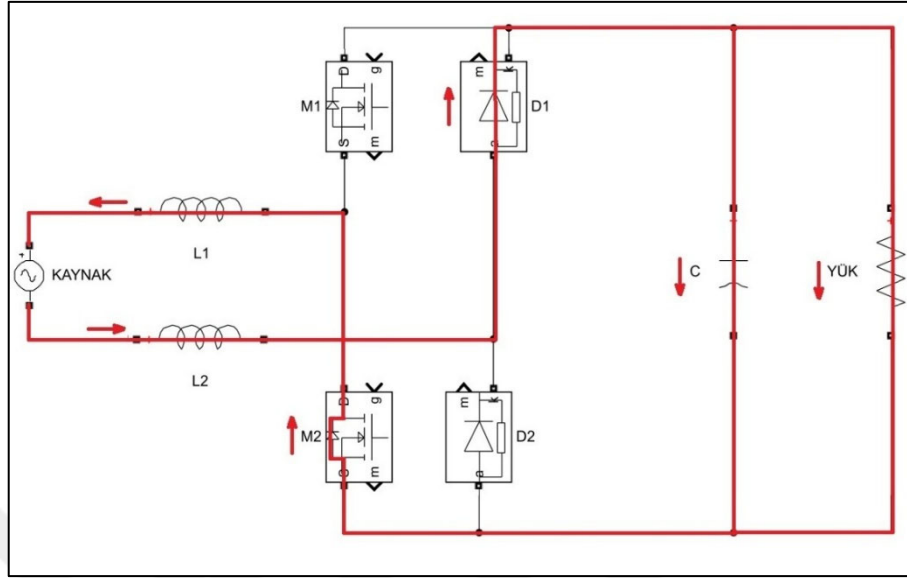
Totem kutuplu köprüsüz YGFD negatif alternanstaki çalışma döngüsü, pozitif alternansa benzer biçimde aşağıda verilmiştir. Şekil 3.24’de M1 anahtarı iletme girer ve devre D1 diyotu üzerinden tamamlanır. Bu sırada giriş endüktansları şebeke akımı ile şarj olurken çıkış kapasitörü yükü besleği için deşarj olmaktadır.



Şekil 3.24. Totem kutuplu köprüsüz YGFD – M1 iletimde, M2 kesimde

Şekil 3.25’de M1 ve M2 anahtarı kesime girer. Kaynak ve yük arasındaki bağlantı sağlanır. Devre sırasıyla giriş endüktansları, M2 anahtarının dahili diyotu, yük ve D1

diyotu üzerinden tamamlanır. Bu sırada giriş endüktansları deşarj olurken çıkış kondansatör şarj olmaktadır.

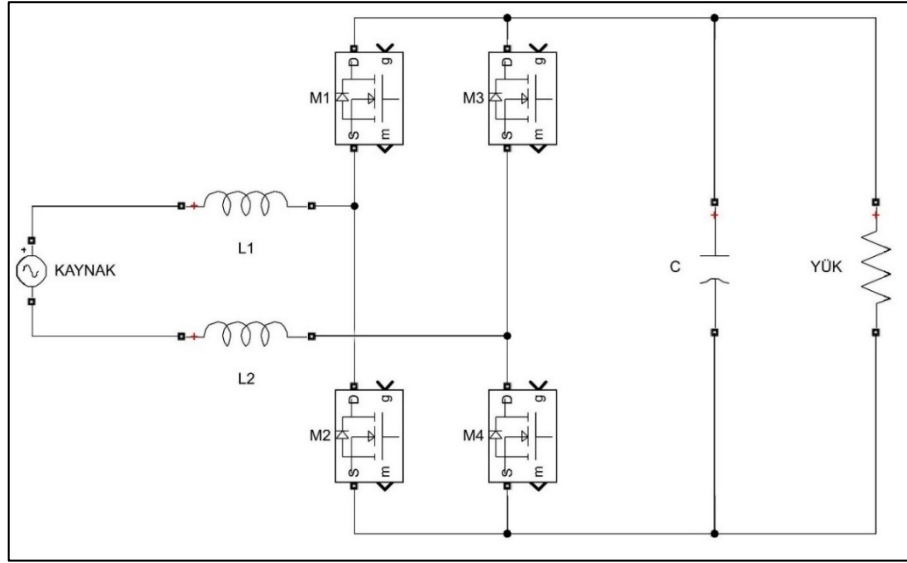


Şekil 3.25. Totem kutuplu köprüsüz YGFD – M1 ve M2 kesimde

Totem kutuplu köprüsüz YGFD topolojisinde anahtarlama elemanları konumları nedeniyle aynı anda ilettime giremezler. Şayet böyle bir durum gerçekleşirse devre çok ciddi hasar görecektir. Bu nedenle kontrol aşamasında bu durumun dikkate alınması gerekir (Çavdar, 2017).

3.9.5. Tam dalga kontrollü YGFD

Yüksek güçlü uygulamalarda verimi artırmak için kullanılabilecek güç faktörü düzeltmeli dönüştürücü türlerinden biri de tam dalga kontrollü YGFD yapısıdır. Şekil 3.26'da gösterilen devre yapısı incelendiği zaman temel köprüsüz dönüştürücü yapıdan tek farkı tüm anahtarlama elemanlarının kontrollü olmasıdır. Anahtarlama elemanları senkronize biçimde kontrol edilerek yüksek verimde güç dönüşüm işlemi yapılır.



Şekil 3.26. Tam dalga kontrollü YGFD devre şeması

Tam dalga kontrollü YGFD topolojisinin genel özellikleri aşağıdaki gibi sıralanmıştır.

- 1- Tüm anahtarlama elemanları kontrollü olduğu için iletim kayıpları önemli ölçüde azalır.
- 2- Tam kontrollü yapısı nedeniyle devre tepki süresi kısadır.
- 3- Diğer GFD dönüştürücülere göre daha fazla EMI'ye neden olur.
- 4- Karmaşık kontrol yöntemleri gerektirir.

4. BULGULAR VE TARTIŞMA

Bu bölümünde bir önceki bölümlerde incelemeleri yapılan klasik, girişimli, temel köprüsüz, tam dalga kontrollü ve girişimli-totem kutuplu YGFD dönüştürücü topolojilerinin MATLAB/SIMULINK programında yapılmış benzetim devreleri verilmiştir.

Tüm devre yapıları Avrupa verimlilik standartlarına uygun olarak 6 farklı yük durumunda test edilmiştir. Benzetim sonuçlarına ait tam yük koşullarında giriş akımı ve giriş gerilimi, tam yük koşullarında çıkış akımı ve çıkış gerilimi ve 6 farklı yük durumu için çıkış akımı ve çıkış gerilimi grafikleri paylaşılmıştır. Kullanılan devre elemanları ideal olarak kabul edilmiş ve hesaplanan değerler Çizelge 4.1’de verilmiştir.

Çizelge 4.1. Benzetim devrelerinde kullanılan elemanlarının değerleri

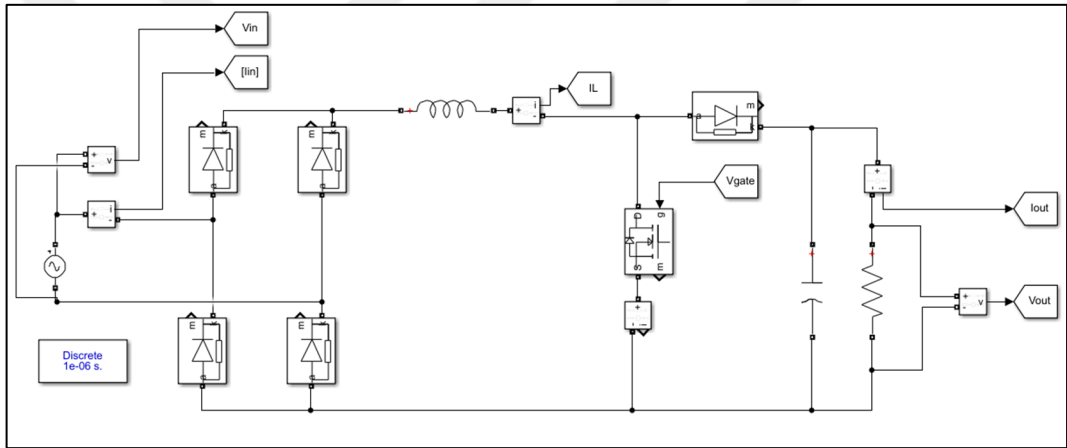
Parametre	Değer	Birim
Maksimum çıkış gücü	3.3	kW
Giriş gerilimi (rms)	220	V _{aa}
Çıkış gerilimi	400	V _{da}
Tam yükte çıkış geriliminin dalgalanması	28	V
Hat frekansı	50	Hz
Anahtarlama frekansı	50	kHz
Endüktans (L1=L2)	700	uH
%Endüktans dalgalanması	10	%
Çıkış kondansatörü (C)	1000	uF
Çıkış yükü (RL)	48.48	Ohm

Dönüştürücünün kontrolü, ortalama akım kontrol metodu ile yapılmıştır. Bu yöntemde iki farklı geri besleme kontrol çevrimi vardır. Yük üzerindeki çıkış gerilimi bir gerilim sensörü ile ölçülür, 400 V değerindeki referans gerilim ile karşılaştırılır ve elde edilen hata işaretine PI kontrolör uygulanır. Ölçülen şebeke giriş geriliminin mutlak değeri alınarak PI kontrol çıkışı ile çarpılır. Oluşan sinyal örneklenmiş giriş gerilime bölündüğü zaman giriş gerilimini takip eden referans akım elde edilir. İkinci kontrol çevrimi ise endüktör akımı üzerindeki hataları gidermek amacıyla uygulanır. Birinci çevrimden elde edilen referans akım ile endüktör üzerinden akım sensörü aracılığıyla ölçülen akım değeri arasındaki hata bulunur daha sonra tekrar PI kontrol uygulanır (Özdentürk, 2021).

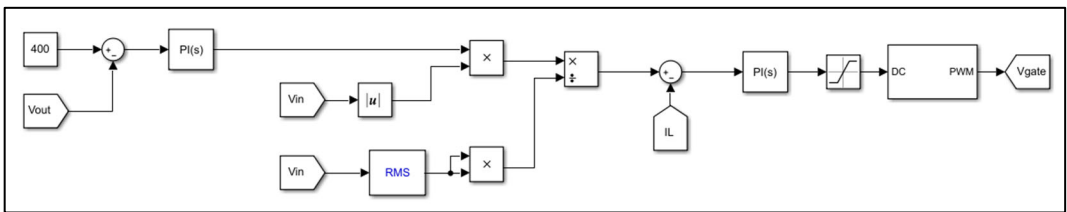
4.1. Klasik YGFD Benzetim Çalışması

Elektrikli araçlarda kullanılan yerleşik batarya şarj cihazları için güç faktörü düzeltilmeli, ortalama akım yöntemi ile kontrol edilen ve sürekli iletim modunda çalıştırılan klasik YGFD dönüştürücünün MATLAB/SIMULINK ortamında oluşturulan benzetim devresi Şekil 4.1'de ve kontrol algoritması da Şekil 4.2'de verilmiştir.

V_{in} giriş gerilimi, I_{in} giriş akımı, V_{out} çıkış gerilimi, I_{out} çıkış akımı, I_L endüktans üzerinden geçen doğrultulmuş giriş akımı, V_{gate} anahtarın tetikleme sinyalidir. Dönüştürücü çıkışına omik bir RL yükü bağlanmıştır.



Şekil 4.1. Klasik YGFD benzetim devresi



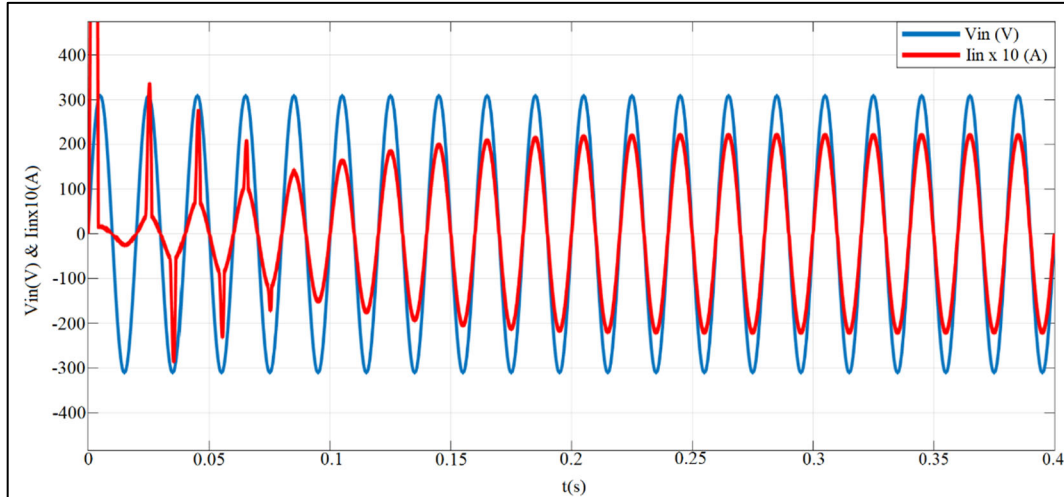
Şekil 4.2. Klasik YGFD kontrol algoritması

Klasik YGFD benzetim devresinde kullanılan PI katsayıları deneme yöntemi ile belirlenmiştir. Yapılan denemelerde en iyi sonuçlar gerilim PI kontrolü için $K_p=0.25$, $K_i=250$ ve akım PI kontrolü için $K_p=250$, $K_i=0.25$ değerlerinde alınmıştır. Çizelge 4.2'de farklı katsayılarda tam yük koşullarında ölçülen verim, THD, devrenin toparlanma süresi ve maksimum gerilim değerleri verilmiştir.

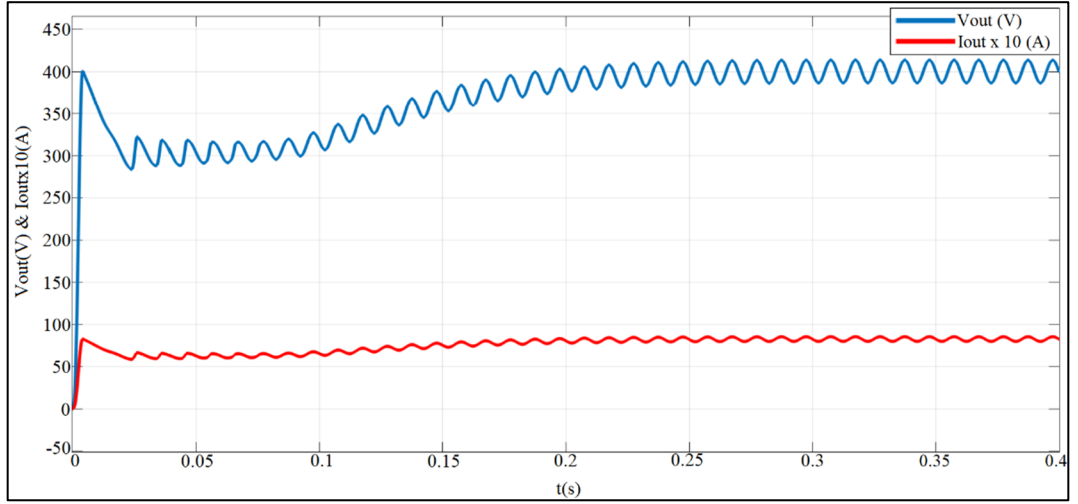
Çizelge 4.2. Klasik YGFD farklı PI katsayılarında ölçümler

Gerilim kontrolü		Akım kontrolü		Verim (%)	THD (%)	Toparlanma Süresi (s)	Maks. Vout (V)
Ki	Kp	Ki	Kp				
0.125	125	125	0.125	96.86	1.95	0.5	414
0.25	125	125	0.25	96.85	1.95	0.5	414
0.5	125	125	0.5	96.84	1.96	0.5	414
0.125	250	250	0.125	96.88	1.94	0.25	414
0.25	250	250	0.25	96.88	1.94	0.25	414
0.5	250	250	0.5	96.88	1.94	0.25	414
0.125	500	500	0.125	96.88	1.98	0.2	421
0.25	500	500	0.25	96.87	1.98	0.2	420
0.5	500	500	0.5	96.88	1.99	0.2	419

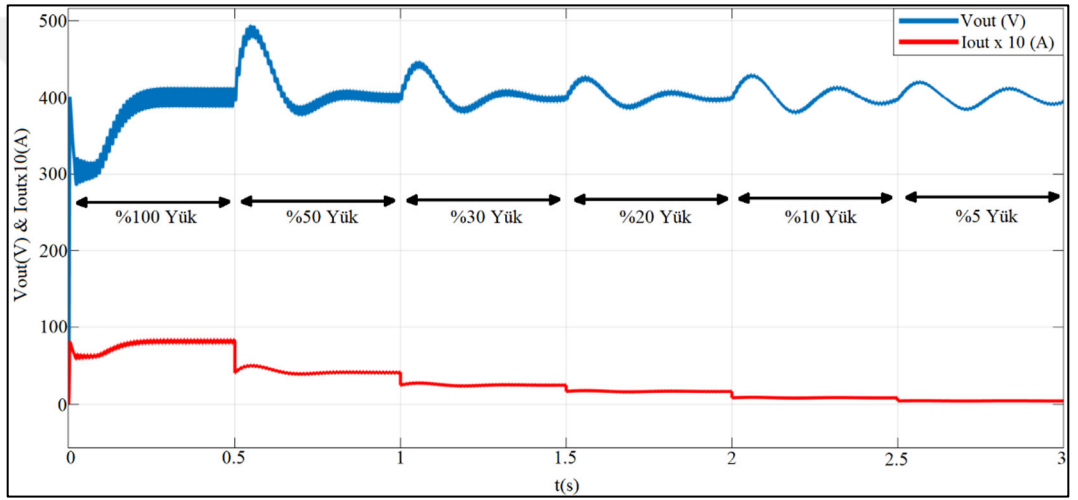
1 saniye süresince klasik YGFD benzetim devresi 6 farklı yük durumunda çalıştırılmıştır. 0.8-1 s zaman aralıklarında akım, gerilim, güç faktörü ve THD ölçümleri yapılmıştır. Güç faktörü tüm yük durumlarında 0.999 olarak ölçülmüştür. Devrenin toplam verimi %93.24 olarak hesaplanmıştır. Şekil 4.3'de tam yükte giriş gerilimi ve giriş akımı, Şekil 4.4'de tam yükte çıkış gerilimi ve çıkış akımı, Şekil 4.5'de 6 farklı yük durumu için çıkış gerilimi ve çıkış akımı grafikleri gösterilmiştir. Çizelge 4.3'de farklı yük durumlarında yapılan ölçümler verilmiştir.



Şekil 4.3. Klasik YGFD tam yükte giriş gerilimi ve giriş akımı



Şekil 4.4. Klasik YGFD tam yükte çıkış gerilimi ve çıkış akımı



Şekil 4.5. Klasik YGFD 6 farklı yük durumu çıkış gerilimi ve çıkış akımı

Çizelge 4.3. Klasik YGFD farklı yük durumları ölçümler

Çıkış gücü (kW)	THD (%)	Güç faktörü	Verim (%)
3.3	1.94	0.999	96.88
1.65	3.64	0.999	95.17
0.99	5.52	0.999	92.9
0.66	7.61	0.999	90.34
0.33	12.58	0.999	83.73
0.165	20.21	0.999	70.93

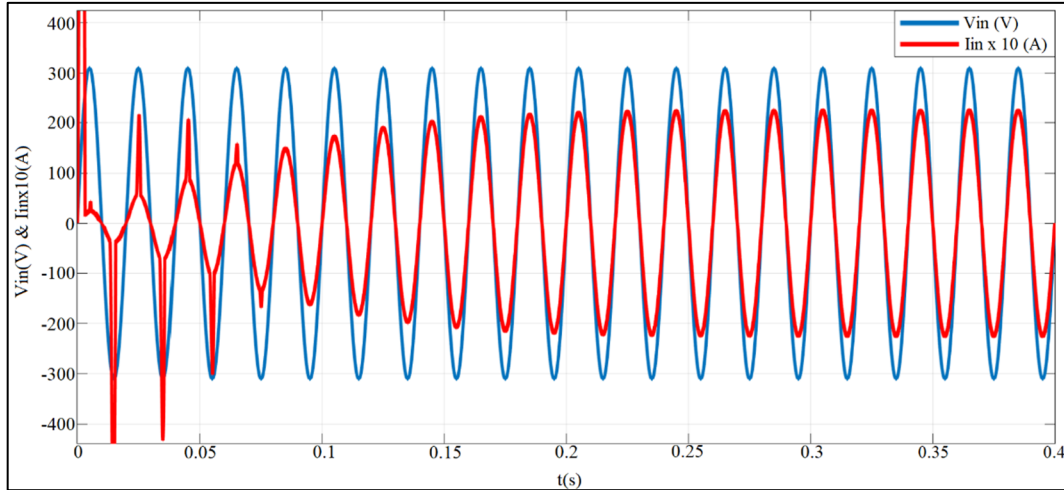
4.2. Girişimli YGFD Benzetim Çalışması

Elektrikli araçlarda kullanılan yerleşik batarya şarj cihazları için güç faktörü düzeltilmeli, ortalama akım yöntemi ile kontrol edilen ve sürekli iletim modunda çalıştırılan girişimli YGFD dönüştürücünün MATLAB/SIMULINK ortamında

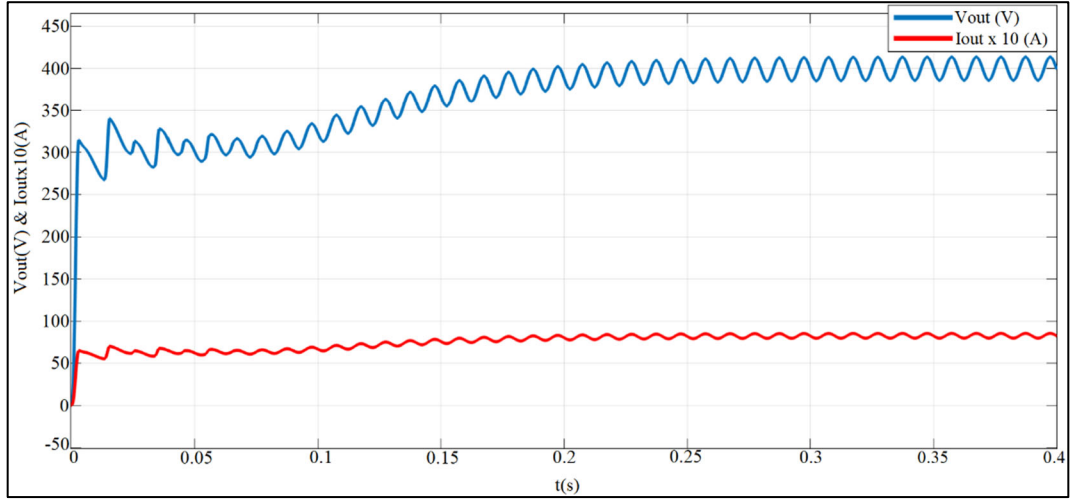
Çizelge 4.4. Girişimli YGFD farklı PI katsayılarında ölçümler

Gerilim kontrolü		Akım kontrolü		Verim (%)	THD (%)	Toparlanma Süresi (s)	Maks. Vout (V)
Ki	Kp	Ki	Kp				
0.125	125	125	0.125	94.82	1.74	0.3	414
0.25	125	125	0.25	94.81	1.74	0.3	414
0.5	125	125	0.5	94.80	1.73	0.3	414
0.125	250	250	0.125	94.84	1.83	0.2	420
0.25	250	250	0.25	94.82	1.81	0.2	420
0.5	250	250	0.5	94.81	1.81	0.2	420
0.125	500	500	0.125	94.81	1.85	0.2	431
0.25	500	500	0.25	94.82	1.84	0.2	430
0.5	500	500	0.5	94.82	1.86	0.2	429

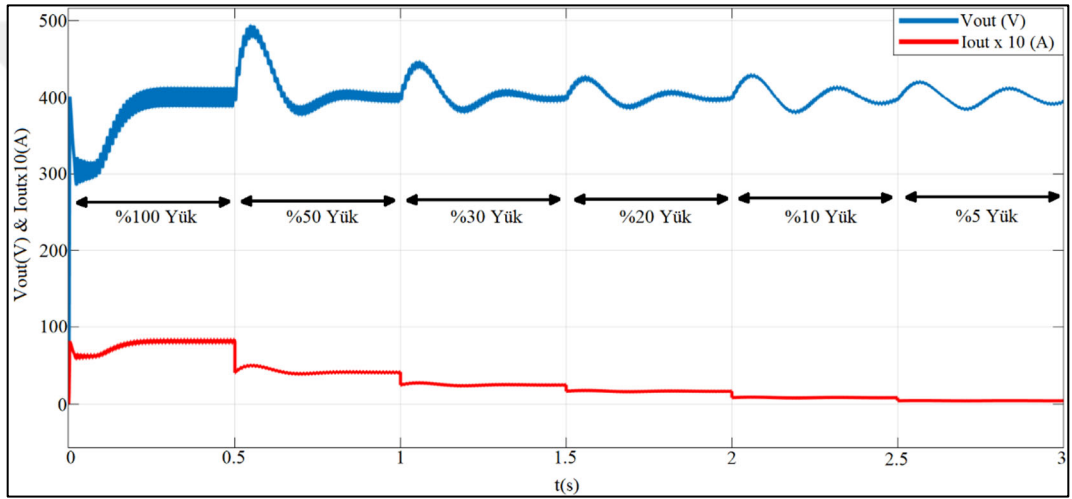
1 saniye süresince girişimli YGFD benzetim devresi 6 farklı yük durumunda çalıştırılmıştır. 0.8-1 s zaman aralıklarında akım, gerilim, güç faktörü ve THD ölçümleri yapılmıştır. Güç faktörü tüm yük durumlarında 0.999 olarak ölçülmüştür. Devrenin toplam verimi %87.91 olarak hesaplanmıştır. Şekil 4.8’de tam yükte giriş gerilimi ve giriş akımı, Şekil 4.9’da tam yükte çıkış gerilimi ve çıkış akımı, Şekil 4.10’da 6 farklı yük durumu için çıkış gerilimi ve çıkış akımı grafikleri gösterilmiştir. Çizelge 4.5’de farklı yük durumlarında yapılan ölçümler verilmiştir.



Şekil 4.8. Girişimli YGFD tam yükte giriş gerilimi ve giriş akımı



Şekil 4.9. Girişimli YGFD tam yükte çıkış gerilimi ve çıkış akımı



Şekil 4.10. Girişimli YGFD 6 farklı yük durumu çıkış gerilimi ve çıkış akımı

Çizelge 4.5. Girişimli YGFD farklı yük durumları ölçümler

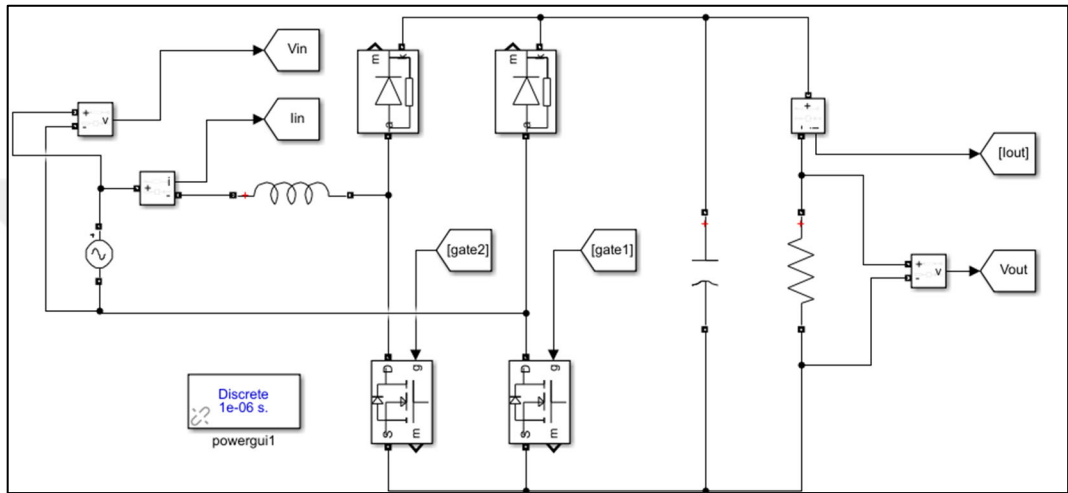
Çıkış gücü (kW)	THD (%)	Güç faktörü	Verim (%)
3.3	1.73	0.999	94.80
1.65	3.10	0.999	91.18
0.99	4.35	0.999	86.73
0.66	5.56	0.999	81.86
0.33	9.14	0.999	72.52
0.165	18.89	0.999	50.55

4.3. Temel Köprüsüz YGFD Benzetim Çalışması

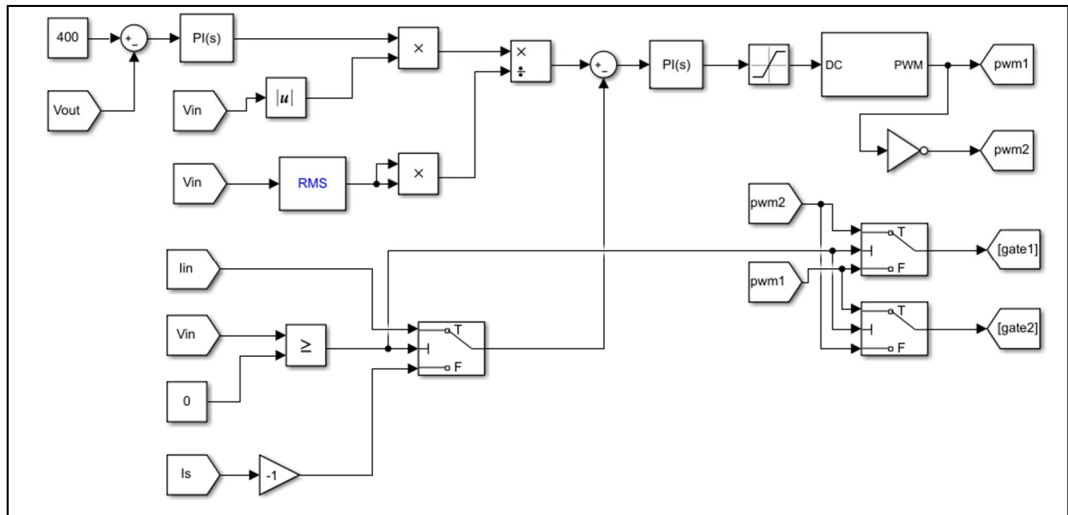
Elektrikli araçlarda kullanılan yerleşik batarya şarj cihazları için güç faktörü düzeltilmeli, ortalama akım yöntemi ile kontrol edilen ve sürekli iletim modunda çalıştırılan temel köprüsüz YGFD dönüştürücünün MATLAB/SIMULINK ortamında

oluşturulan benzetim devresi Şekil 4.11’de ve kontrol algoritması Şekil 4.12’de verilmiştir.

Vin giriş gerilimi, Iin giriş akımı, Vout çıkış gerilimi, Iout çıkış akımı, gate1 ve gate2 anahtarların tetiklenme sinylidir. Dönüştürücü çıkışına omik bir RL yükü bağlanmıştır.



Şekil 4.11. Temel köprüsüz YGFD benzetim devresi



Şekil 4.12. Temel Köprüsüz YGFD kontrol algoritması

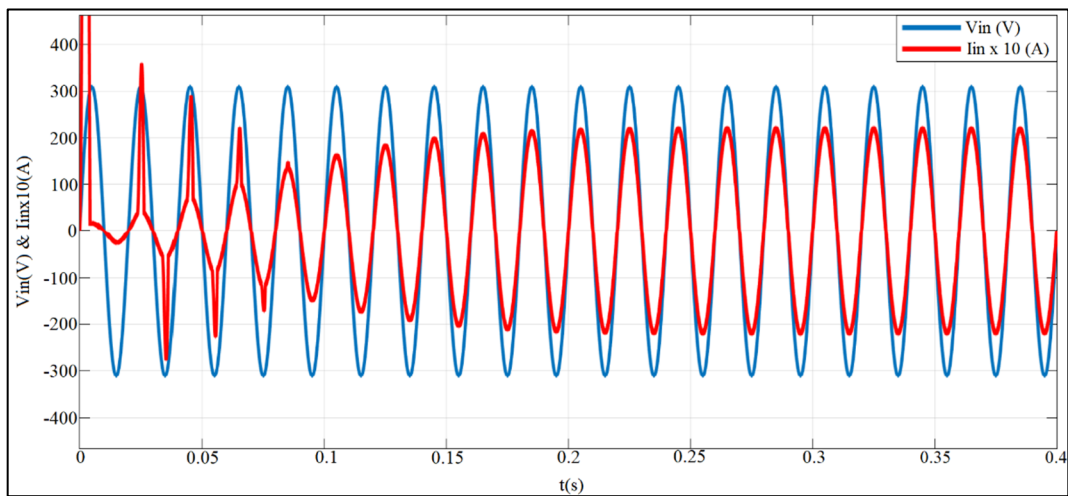
Temel köprüsüz YGFD benzetim devresinde kullanılan PI katsayıları deneme yöntemi ile belirlenmiştir. Yapılan denemelerde en iyi sonuçlar gerilim PI kontrolü için $K_p=0.125$, $K_i=250$ ve akım PI kontrolü için $K_p=250$, $K_i=0.125$ değerlerinde

alınmıştır. Çizelge 4.6’da farklı katsayılarda tam yük koşullarında ölçülen verim, THD, devrenin toparlanma süresi ve maksimum gerilim değerleri verilmiştir.

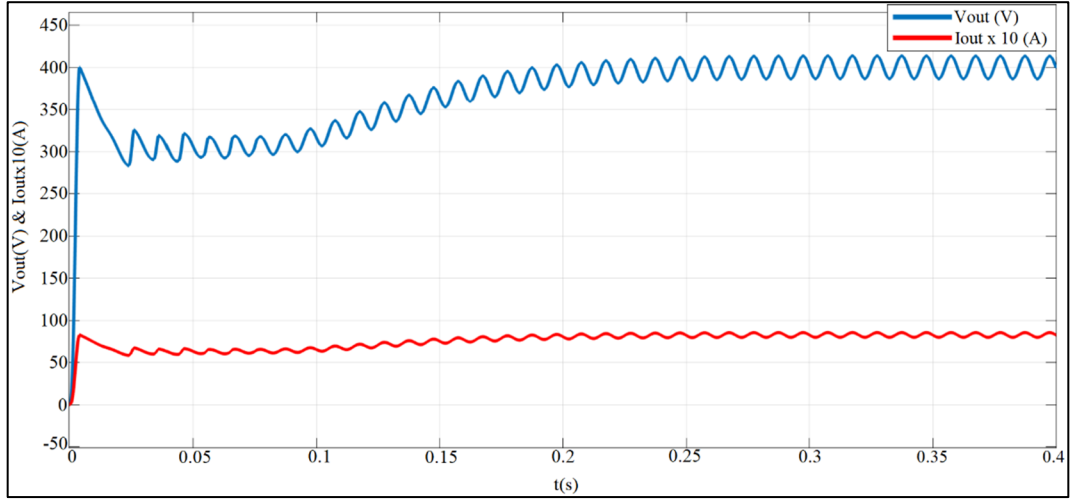
Çizelge 4.6. Temel köprüsüz YGFD farklı PI katsayılarında ölçümler

Gerilim kontrolü		Akım kontrolü		Verim (%)	THD (%)	Toparlanma Süresi (s)	Maks. Vout (V)
Ki	Kp	Ki	Kp				
0.125	125	125	0.125	97.47	1.94	0.5	414
0.25	125	125	0.25	97.47	1.95	0.5	414
0.5	125	125	0.5	97.47	1.95	0.5	414
0.125	250	250	0.125	97.48	1.97	0.3	414
0.25	250	250	0.25	97.48	1.98	0.3	414
0.5	250	250	0.5	97.48	1.98	0.3	414
0.125	500	500	0.125	97.47	1.99	0.2	422
0.25	500	500	0.25	97.47	1.99	0.2	421
0.5	500	500	0.5	97.46	2.01	0.2	420

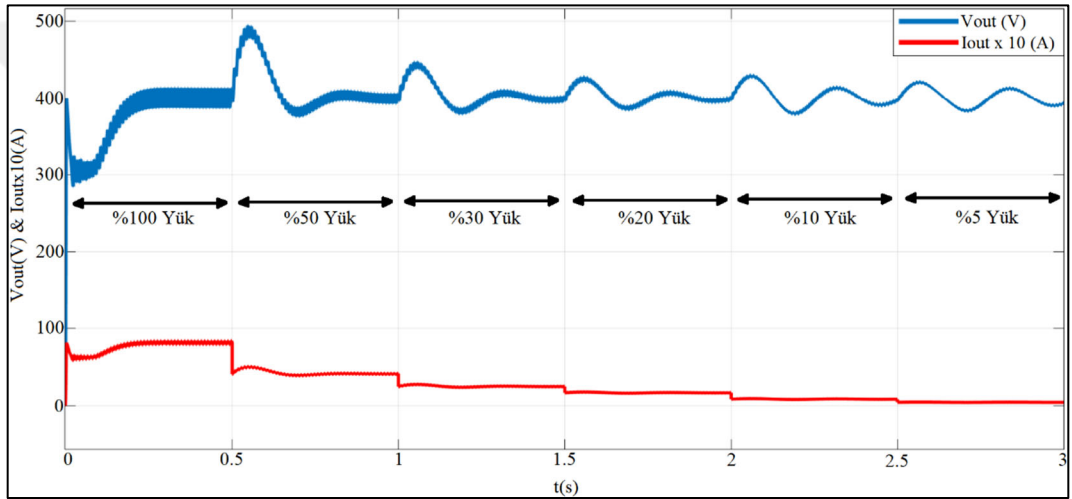
1 saniye süresince temel köprüsüz YGFD benzetim devresi 6 farklı yük durumunda çalıştırılmıştır. 0.8-1 s zaman aralıklarında akım, gerilim, güç faktörü ve THD ölçümleri yapılmıştır. Güç faktörü tüm yük durumlarında 0.999 olarak ölçülmüştür. Devrenin toplam verimi %93.88 olarak hesaplanmıştır. Şekil 4.13’de tam yükte giriş gerilimi ve giriş akımı, Şekil 4.14’de tam yükte çıkış gerilimi ve çıkış akımı, Şekil 4.15’de 6 farklı yük durumu için çıkış gerilimi ve çıkış akımı grafikleri gösterilmiştir. Çizelge 4.7’de farklı yük durumlarında yapılan ölçümler verilmiştir.



Şekil 4.13. Temel köprüsüz YGFD tam yükte giriş gerilimi ve giriş akımı



Şekil 4.14. Temel köprüsüz YGFD tam yükte çıkış gerilimi ve çıkış akımı



Şekil 4.15. Temel köprüsüz YGFD 6 farklı yük durumu çıkış gerilimi ve çıkış akımı

Çizelge 4.7 Temel köprüsüz YGFD farklı yük durumları ölçümler

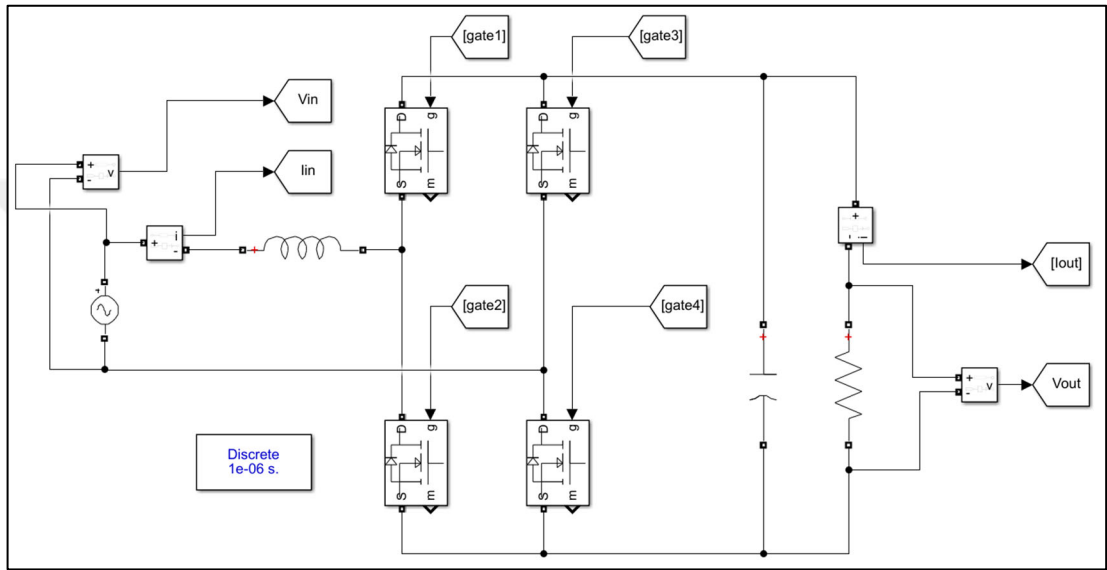
Çıkış gücü (kW)	THD (%)	Güç faktörü	Verim (%)
3.3	1.97	0.999	97.48
1.65	3.65	0.999	95.80
0.99	5.57	0.999	93.51
0.66	7.65	0.999	91.01
0.33	12.86	0.999	84.74
0.165	20.38	0.999	71.25

4.4. Tam Dalga Kontrollü YGFD Benzetim Çalışması

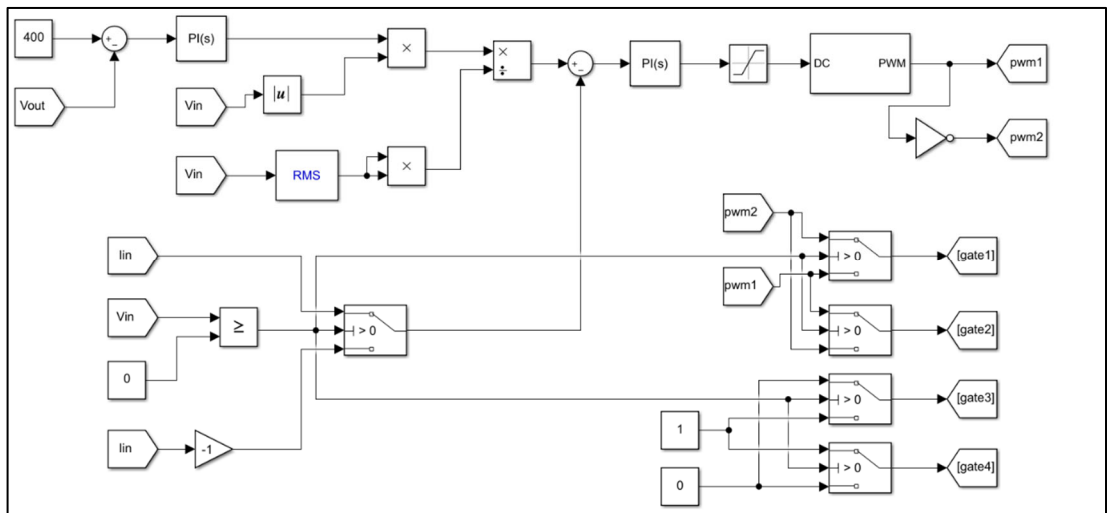
Elektrikli araçlarda kullanılan yerleşik batarya şarj cihazları için güç faktörü düzeltmeli, ortalama akım yöntemi ile kontrol edilen ve sürekli iletim modunda çalıştırılan tam dalga kontrollü YGFD dönüştürücünün MATLAB/SIMULINK

ortamında oluşturulan benzetim devresi Şekil 4.16'da ve kontrol algoritması Şekil 4.17'de verilmiştir.

V_{in} giriş gerilimi, I_{in} giriş akımı, V_{out} çıkış gerilimi, I_{out} çıkış akımı, gate1, gate2, gate3 ve gate4 anahtarların tetiklenme sinyalidir. Dönüştürücü çıkışına omik bir RL yükü bağlanmıştır.



Şekil 4.16. Tam dalga kontrollü YGFD benzetim devresi



Şekil 4.17. Tam dalga kontrollü YGFD kontrol algoritması

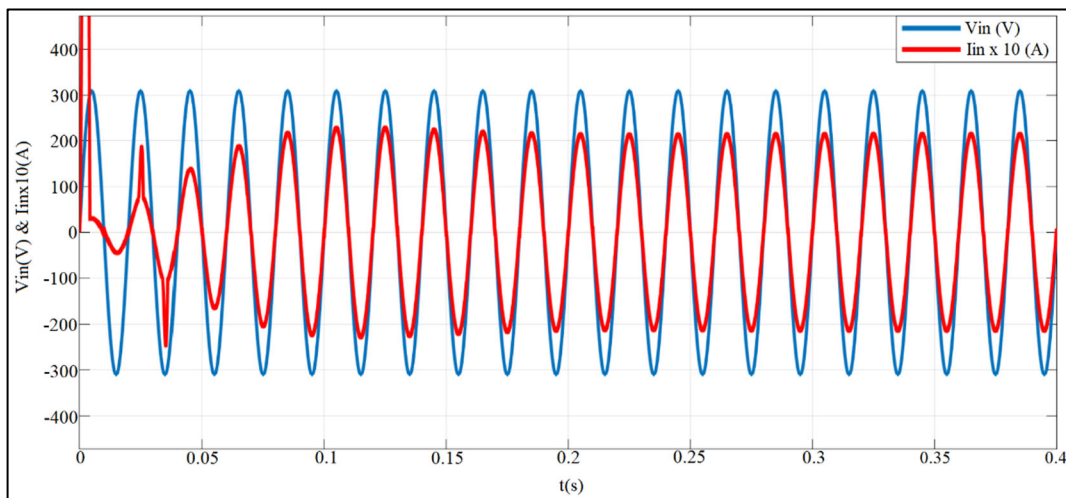
Tam dalga kontrollü YGFD benzetim devresinde kullanılan PI katsayıları deneme yöntemi ile belirlenmiştir. Yapılan denemelerde en iyi sonuçlar gerilim PI kontrolü için $K_p=0.5$, $K_i=500$ ve akım PI kontrolü için $K_p=500$, $K_i=0.5$ değerlerinde alınmıştır.

Çizelge 4.8’de farklı katsayılarda tam yük koşullarında ölçülen verim, THD, devrenin toparlanma süresi ve maksimum gerilim değerleri verilmiştir.

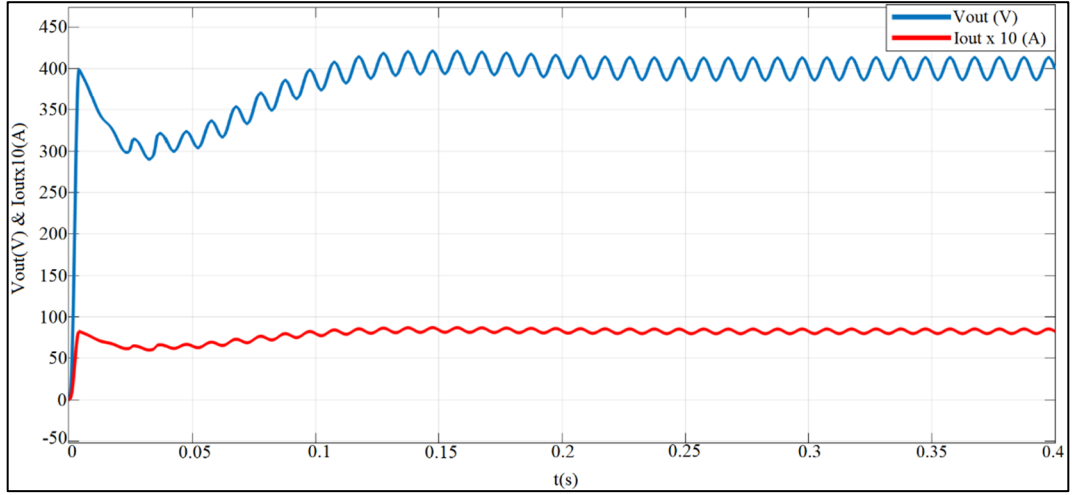
Çizelge 4.8. Tam dalga kontrollü YGFD farklı PI katsayılarında ölçümler

Gerilim kontrolü		Akım kontrolü		Verim (%)	THD (%)	Toparlanma Süresi (s)	Maks. Vout (V)
Ki	Kp	Ki	Kp				
0.125	125	125	0.125	99.41	2.13	0.5	414
0.25	125	125	0.25	99.40	2.18	0.5	414
0.5	125	125	0.5	99.39	2.17	0.5	414
0.125	250	250	0.125	99.40	2.13	0.3	414
0.25	250	250	0.25	99.40	2.25	0.3	414
0.5	250	250	0.5	99.41	2.22	0.3	414
0.125	500	500	0.125	99.41	2.16	0.2	423
0.25	500	500	0.25	99.41	2.16	0.2	422
0.5	500	500	0.5	99.42	2.16	0.2	421

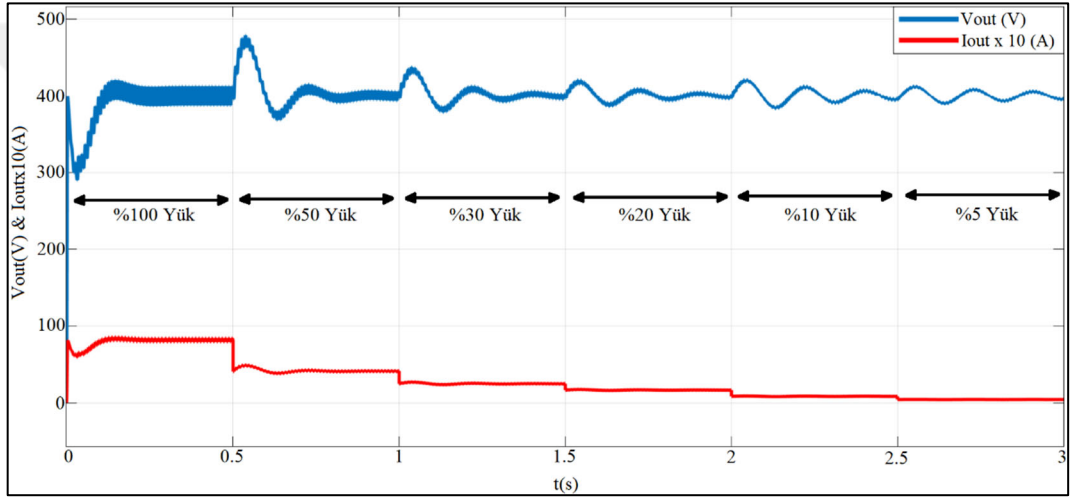
1 saniye süresince tam dalga kontrollü YGFD benzetim devresi 6 farklı yük durumunda çalıştırılmıştır. 0.8-1 s zaman aralıklarında akım, gerilim, güç faktörü ve THD ölçümleri yapılmıştır. Güç faktörü tüm yük durumlarında 0.999 olarak ölçülmüştür. Devrenin toplam verimi %99.13 olarak hesaplanmıştır. Şekil 4.18’de tam yükte giriş gerilimi ve giriş akımı, Şekil 4.19’da tam yükte çıkış gerilimi ve çıkış akımı, Şekil 4.20’de 6 farklı yük durumu için çıkış gerilimi ve çıkış akımı grafikleri gösterilmiştir. Çizelge 4.9’da farklı yük durumlarında yapılan ölçümler verilmiştir.



Şekil 4.18. Tam köprü kontrollü YGFD tam yükte giriş gerilimi ve giriş akımı



Şekil 4.19. Tam köprü kontrollü YGFD tam yükte çıkış gerilimi ve çıkış akımı



Şekil 4.20. Tam köprü kontrollü YGFD 6 farklı yük durumu giriş gerilimi ve giriş akımı

Çizelge 4.9. Tam köprü kontrollü YGFD farklı yük durumları ölçümler

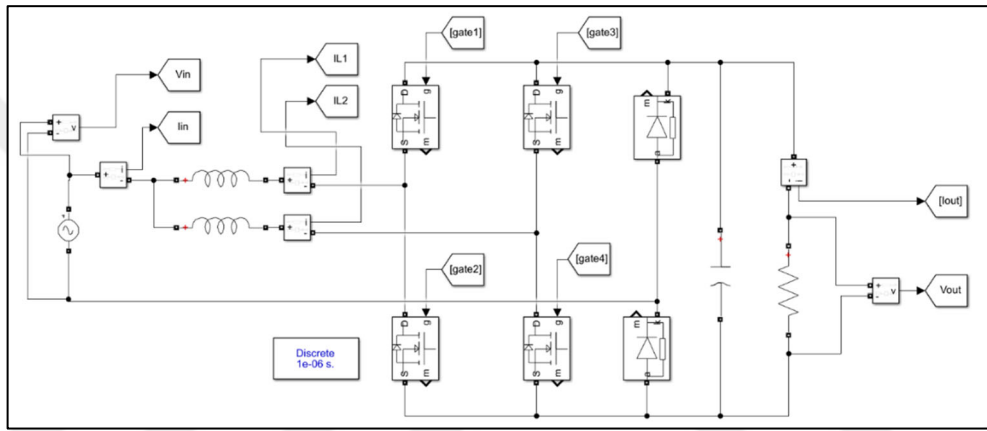
Çıkış gücü (kW)	THD (%)	Güç faktörü	Verim (%)
3.3	2.16	0.999	99.42
1.65	4.24	0.999	99.39
0.99	7.10	0.999	99.20
0.66	10.55	0.999	98.77
0.33	21.00	0.999	98.23
0.165	44.15	0.999	96.23

4.5. Girişimli Totem Kutuplu YGFD Benzetim Çalışması

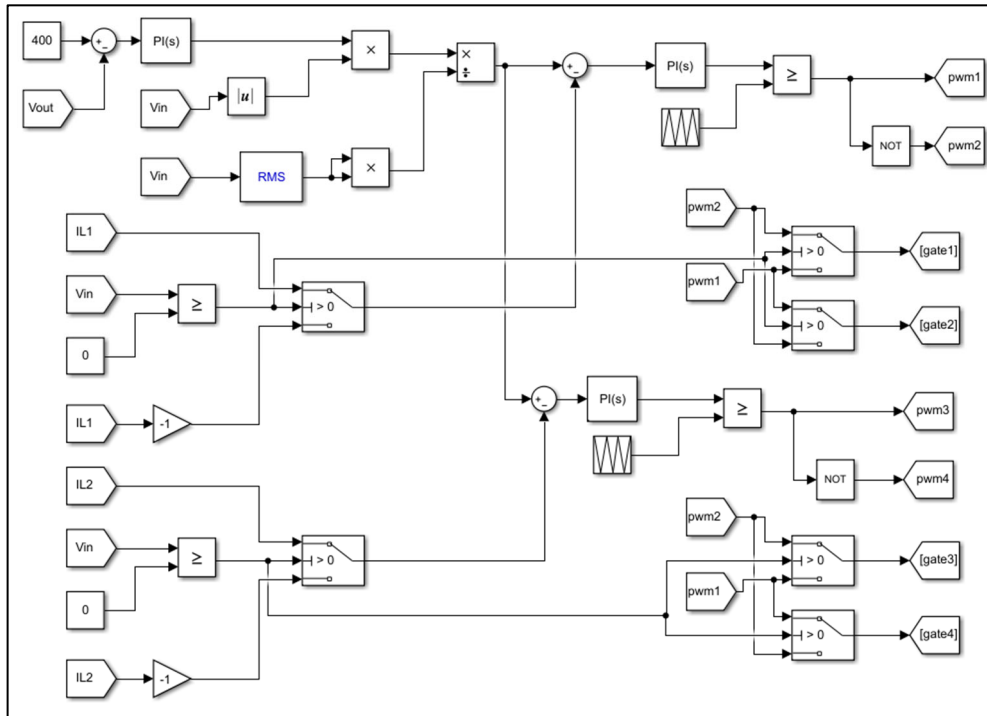
Yapılan benzetim çalışmalarında totem kutuplu devre topolojisinin 2 adet kontrollü anahtarlama yapısı ile verimli bir çalışma sağladığı görülmüştür. Ancak devre yapısında bulunan dahili diyotların ters toparlanma süreleri nedeniyle 1 kW üzeri

güçlerde kullanıma uygun değildir. Bu nedenle girişimli ve totem kutuplu YGFD devre topolojileri birleştirilerek yüksek güçlerde çalışmaya uygun bir yapı elde edilmiştir. Devre topolojisinin MATLAB/SIMULINK ortamında oluşturulan benzetim devresi Şekil 4.21’de ve kontrol algoritması Şekil 4.22’de verilmiştir.

Vin giriş gerilimi, Iin giriş akımı, Vout çıkış gerilimi, Iout çıkış akımı, gate1, gate2, gate3 ve gate4 anahtarların tetiklenme sinyalidir. Dönüştürücü çıkışına omik bir RL yükü bağlanmıştır.



Şekil 4.21. Girişimli totem kutuplu YGFD benzetim devresi



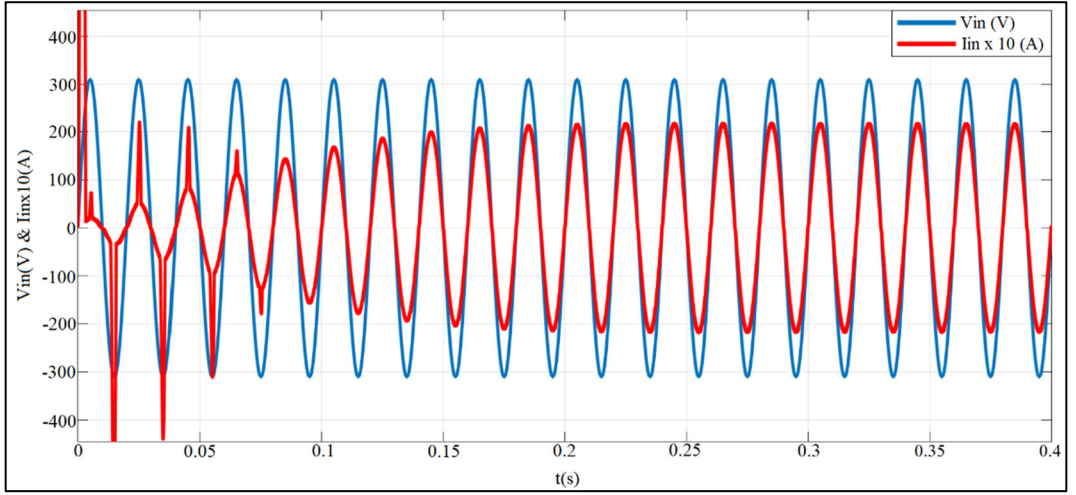
Şekil 4.22. Girişimli totem kutuplu YGFD kontrol algoritması

Girişimli totem kutuplu YGFD benzetim devresinde kullanılan PI katsayıları deneme yöntemi ile belirlenmiştir. Yapılan denemelerde en iyi sonuçlar gerilim PI kontrolü için $K_p=0.125$, $K_i=125$ ve akım PI kontrolü için $K_p=125$, $K_i=0.125$ değerlerinde alınmıştır. Çizelge 4.10’da farklı katsayılarda tam yük koşullarında ölçülen verim, THD, devrenin toparlanma süresi ve maksimum gerilim değerleri verilmiştir.

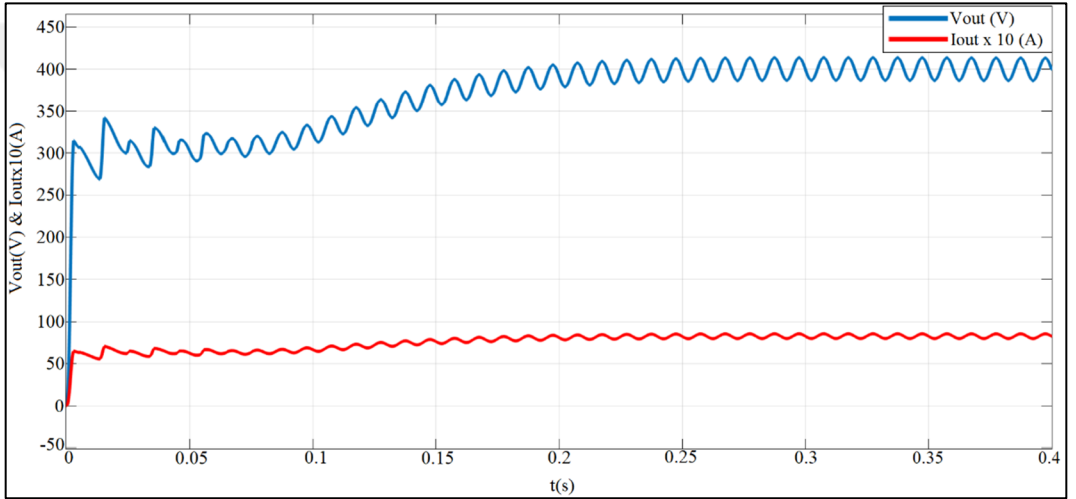
Çizelge 4.10. Girişimli totem kutuplu YGFD farklı PI katsayılarında ölçümler

Gerilim kontrolü		Akım kontrolü		Verim (%)	THD (%)	Toparlanma Süresi (s)	Maks. Vout (V)
K_i	K_p	K_i	K_p				
0.125	125	125	0.125	98.83	2.18	0.3	414
0.25	125	125	0.25	98.83	2.18	0.3	414
0.5	125	125	0.5	98.83	2.18	0.3	414
0.125	250	250	0.125	98.82	2.21	0.2	422
0.25	250	250	0.25	98.83	2.20	0.2	421
0.5	250	250	0.5	98.83	2.20	0.2	420
0.125	500	500	0.125	98.83	2.27	0.2	431
0.25	500	500	0.25	98.84	2.27	0.2	431
0.5	500	500	0.5	98.83	2.27	0.2	430

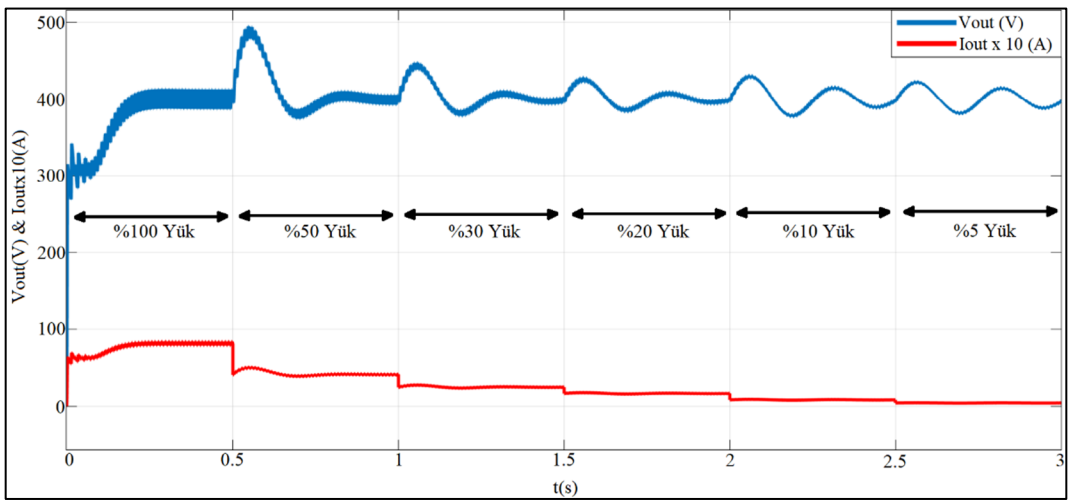
1 saniye süresince girişimli totem kutuplu YGFD benzetim devresi 6 farklı yük durumunda çalıştırılmıştır. 0.8-1 s zaman aralıklarında akım, gerilim, güç faktörü ve THD ölçümleri yapılmıştır. Güç faktörü tüm yük durumlarında 0.999 olarak ölçülmüştür. Devrenin toplam verimi %97.80 olarak hesaplanmıştır. Şekil 4.23’de tam yükte giriş gerilimi ve giriş akımı, Şekil 4.24’de tam yükte çıkış gerilimi ve çıkış akımı, Şekil 4.25’de 6 farklı yük durumu için çıkış gerilimi ve çıkış akımı grafikleri gösterilmiştir. Çizelge 4.6’da farklı yük durumlarında yapılan ölçümler verilmiştir.



Şekil 4.23. Girişimli totem kutuplu YGFD tam yükte giriş gerilimi ve giriş akımı



Şekil 4.24. Girişimli totem kutuplu YGFD tam yükte çıkış gerilimi ve çıkış akımı



Şekil 4.25. Girişimli totem kutuplu YGFD 6 farklı yük durumu çıkış gerilimi ve çıkış akımı

Çizelge 4.11. Girişimli totem kutuplu YGFD farklı yük durumları ölçümler

Çıkış gücü (kW)	THD (%)	Güç faktörü	Verim (%)
3.3	2.18	0.999	98.83
1.65	4.19	0.999	98.31
0.99	6.77	0.999	97.60
0.66	9.81	0.999	97.42
0.33	18.43	0.999	96.51
0.165	33.84	0.999	87.65



5.SONUÇ

Bu tez çalışması kapsamında elektrikli araçlarda yerleşik şarj cihazı tasarımlarında kullanılabilecek beş farklı güç elektroniği topolojisinin MATLAB/SIMULINK programı ile benzetimleri yapılmıştır. Eşit şartlar altında karşılaştırma yapabilmek için tüm devre tasarımlarında aynı ölçüm yöntemleri kullanılmıştır. Elde edilen ölçüm ve hesaplama sonuçları Çizelge 5.1’de verilmiştir.

Çizelge 5.1. Benzetim sonuçlarının karşılaştırılması

Güç Elektroniği Topolojisi	EN50530 Std. Göre % Verim	%100 Yükte THD	%50 Yükte THD	%30 Yükte THD	%20 Yükte THD	%10 Yükte THD	%5 Yükte THD
Klasik YGFD	93.24	1.94	3.64	5.52	7.61	12.58	20.21
Girişimli YGFD	87.91	1.73	3.10	4.35	5.56	9.14	18.89
Temel Köprüsüz YGFD	93.88	1.97	3.65	5.57	7.65	12.86	20.38
Tam Dalga Kontrollü YGFD	99.13	2.16	4.24	7.10	10.55	21.00	44.15
Girişimli Totem Kutuplu YGFD	97.80	2.18	4.19	6.77	9.81	18.43	33.84

Benzetim sonuçları güç faktörü, verim ve toplam harmonik bozulma olarak üç farklı alanda incelenmiştir. Tasarlanan benzetim devrelerinde tüm çalışma durumlarında bire yakın güç faktörü ölçülmüştür. Bu nedenle karşılaştırma kriteri olarak diğer faktörler dikkate alınmıştır.

Güç faktörü düzeltmeli dönüştürücü yapılarında temel hedef şebeke kalitesini korumaktır. Bu nedenle en önemli karşılaştırma ölçüsü şebekeden çekilen akımın toplam harmonik bozulmasıdır. MATLAB / SIMULINK programındaki FFT analiz yöntemi kullanılarak 6 farklı yük durumunda THD ölçümü yapılmıştır.

6 farklı yük durumunda yapılan ölçümler bir bütün olarak incelendiğinde en düşük THD değeri girişimli YGFD devresinde ve en yüksek THD değeri tam dalga kontrollü YGFD devresinde ölçülmüştür.

Son olarak benzetim devrelerinde giriş ve çıkış güçleri ölçülerek EN50530 Avrupa standartlarına göre devrenin toplam verimi hesaplanmıştır. Yapılan ölçümlere göre en yüksek verim %99.10 ile tam dalga kontrollü YGFD devresinde ve en düşük verim %87.98 ile girişimli YGFD devresinde bulunmuştur. Girişimli YGFD hariç tüm devre topolojilerinin genel verimleri %90 üzerindedir.



KAYNAKLAR

- Akamatsu, K., Mishima, T., & Nakaoka, M. (2012). A Secondary-Side Phase-Shifted Zero Voltage and Zero Current Full-Range Soft-Switching PWM DC–DC Converter for EV Battery Chargers. *2012 International Conference on Renewable Energy Research and Applications (ICRERA)*. November 11-14.
- Akın, B. (2012). Elektrikli arabalarda kullanılan Li-ion akülerin tek fazdan hızlı ve verimli şarjı için güç faktörü düzeltmeli yükselticilerin karşılaştırması. *EMO Bilimsel Dergi*, 2(4), 87–93.
- Akyüz, E. (2021). Kentsel Ulaşım: Elektrikli Araçların Artıları ve Eksileri (Türkiye). *Hagia Sophia 3rd International Conference on Multidisciplinary Scientific Studies*. Eylül 15-16.
- Ali, A., Mousa, H. H. H., Shaaban, M. F., Azzouz, M. A., & Awad, A. S. A. (2024). A comprehensive review on charging topologies and power electronic converter solutions for electric vehicles. *Journal of Modern Power Systems and Clean Energy*, 12(3), 675–686. <https://doi.org/10.35833/MPCE.2023.000107>
- Annamalai, M. C., & Amutha Prabha, N. (2023). A comprehensive review on isolated and non-isolated converter configuration and fast charging technology: For battery and plug-in hybrid electric vehicle. *Heliyon*, 9(8), e18808. <https://doi.org/10.1016/j.heliyon.2023.e18808>
- Choi, J.-Y., Choi, S.-W., & Lee, J.-Y. (2020). Hybrid PWM DC/DC converter for EV on-board charger with single transformer. *IEEE Transactions on Power Electronics*, 35(5), 4567–4575. <https://doi.org/10.1109/TPEL.2019.2954321>
- IEC 62196-3 (2014). Plugs Socket-Outlets, Vehicle Connectors And Vehicle Inlets. Part 3: Dimensional Compatibility And Interchangeability Requirements For DC And AC/DC Pin And Contact-Tube Vehicle Coupler.
- Çavdar, M. (2017). *Tek Fazlı Güç Faktörü Düzeltmeli (PFC) Köprüsüz AC-DC Dönüştürücülerin İncelenmesi ve Karşılaştırılması*. (Yüksek Lisans Tezi, Yıldız Teknik Üniversitesi Fen Bilimleri Enstitüsü)
- Dantondji, E. A. (2021). *Elektrikli Araçlar için Yüksek Güç Yoğunluklu ve Yüksek Verimli İzole Edilmiş Yerleşik Batarya Şarj Cihazı Tasarımı ve Uygulaması*. (Yüksek Lisans Tezi, Pamukkale Üniversitesi Fen Bilimleri Enstitüsü)

- Dar, A. R., Haque, A., Khan, M. A., Kurukuru, V. S. B., & Mehruz, S. (2024). On-board chargers for electric vehicles: A comprehensive performance and efficiency review. *Energies*, *17*(18), 4534. <https://doi.org/10.3390/en17184534>
- Dinç, H. C. (2023). Diyot çalışma karakteristiği. Medium. <https://medium.com/@hamitcandinc/diyot-calisma-karakteristigi-3ebd35bbca43> (Son erişim tarihi:11 Temmuz 2025)
- Ejaz, B., Zamora, R., Reusser, C., & Lin, X. (2025). A comprehensive review of partial power converter topologies and control methods for fast electric vehicle charging applications. *Electronics*, *14*(1), Article 1928. <https://doi.org/10.3390/electronics14101928>
- EN 50530 (2010). European Committee For Electrotechnical Standardization.
- Ganesh, M. S., Kumar, S. S., & Babu, B. S. (2024). A comprehensive review of single-stage on-board EV charging methodology for PEV system. *YMER*, *23*(11), 1379–1393.
- Karsavuran, İ. E. (2024). *Elektrikli Araçlarda Yerleşik Şarj Cihazı Sistemlerinin Simülasyon Ortamında Analizi*. (Yüksek Lisans Tezi, Bilecik Şeyh Edebali Üniversitesi Lisansüstü Eğitim Enstitüsü)
- Kerem, A. (2014). Elektrikli araç teknolojisinin gelişimi ve gelecek beklentileri. *Mehmet Akif Ersoy Üniversitesi Fen Bilimleri Enstitüsü Dergisi*, *5*(1), 1-13.
- Kumar, S., Usman, A., & Rajpurohit, B. S. (2021). Battery charging topology, infrastructure, and standards for electric vehicle applications: A comprehensive review. *IET Energy Systems Integration*, *3*(4), 381–396. <https://doi.org/10.1049/esi2.12038>
- Liu, Z., Li, B., Lee, F. C., & Li, Q. (2016). Design of CRM AC/DC Converter For Very High-Frequency High-Density WBG-Based 6.6kW Bidirectional On-board Battery Charger. *IEEE Energy Conversion Congress And Exposition*. September 18-22.
- Mollahasanoğlu, M., & Okumuş, H. İ. (2021). A review of three phase AC-DC power factor correction converters for electric vehicle fast charging. *European Journal of Science and Technology*, *(32)*, 663–669. <https://doi.org/10.31590/ejosat.1041081>

- Morris, J. (2015). *Design and Testing of a Bidirectional Smart Charger Prototype*. (Master's Thesis, University of Waterloo Department of Electrical and Computer Engineering)
- Özdentürk, A. (2021). *Elektrikli Araç Şarj Cihazlarında Kullanılan Tek Fazlı Aktif Doğrultucuların Şebekeye Etkilerinin Karşılaştırılması*. (Yüksek Lisans Tezi, Konya Teknik Üniversitesi Lisansüstü Eğitim Fakültesi)
- Rodriguez, C. J., Martinez, S. J., Martinez, P. R., Lopez, A. R., & A., J. M. (2021). Brief Review of Power Converters for On-board Vehicle Battery Charging. *IEEE International Autumn Meeting on Power*. November 10-12.
- Safayatullah, M., Elrais, M. T., Ghosh, S., Rezaie, R., & Batarseh, I. (2022). A comprehensive review of power converter topologies and control methods for electric vehicle fast charging applications. *IEEE Access*, 10, 40753–40790. <https://doi.org/10.1109/ACCESS.2022.3166935>
- Saraswathi, V. N., & Ramachandran, V. P. (2024). A comprehensive review on charger technologies, types, and charging station models for electric vehicles. *Heliyon*, 10, e38945. <https://doi.org/10.1016/j.heliyon.2024.e38945>
- Thosar, A., Inamdar, S., & Mante, S. (2019). Literature Review of 3.3 kW On-board Charger Topologies. *Third International Conference on Electronics Communication and Aerospace Technology (ICECA 2019)*. June 12-14
- Ünlü, N., Karahan, Ş., Tür, O., Uçarol, H., Özsu, E., Yazar, A., Turhan, L., Akgün, F., & Tırıs, M. (2003). Elektrikli araç sistemleri. *Elektrikli Araçlar*. (pp. 43)
- Tüksoy, Ö. (2020). *Elektrikli Araçlardaki Yerleşik Batarya Şarj Sistemleri İçin Yüksek Verimli AC-DC Güç Faktörü Düzeltmiş Dönüştürücü Tasarımı ve Analizi*. (Doktora Tezi, Çukurova Üniversitesi Fen Bilimleri Enstitüsü)
- Whitaker, B., Barkley, A., Cole, Z., Passmore, B., Daniel, M., McNutt, T., & Shiozaki, K. (2014). A high-density, high-efficiency, isolated on-board vehicle battery charger utilizing silicon carbide power devices. *IEEE Transactions on Power Electronics*, 29(5), 2606–2617. <https://doi.org/10.1109/TPEL.2013.2279950>
- Yılmaz, Ü. (2020). *Elektrikli Araçlarda Dahili Batarya Şarj Sistemi İçin Yüksek Verimli DA-DA Dönüştürücülerin İncelenmesi*. (Doktora Tezi, Çukurova Üniversitesi Fen Bilimleri Enstitüsü)