

T.C.
YILDIZ TEKNİK ÜNİVERSİTESİ
FEN BİLİMLERİ ENSTİTÜSÜ

LAZER İLE KABLOSUZ GÜÇ AKTARIMI İÇİN
TEK AŞAMALI GÜÇ FAKTÖRÜ DÜZELTME
ÖZELLİĞİNE SAHİP YÜKSEK VERİMLİ LLC
SÜRÜCÜ TASARIMI

Ahmet Yiğit SARI

YÜKSEK LİSANS TEZİ
Elektrik Mühendisliği
Elektrik Tesisleri Programı

Danışman
Doç. Dr. Ali Rıfat BOYNUEĞRİ

Ağustos, 2024

T.C.
YILDIZ TEKNİK ÜNİVERSİTESİ
FEN BİLİMLERİ ENSTİTÜSÜ

**LAZER İLE KABLOSUZ GÜÇ AKTARIMI İÇİN TEK
AŞAMALI GÜÇ FAKTÖRÜ DÜZELTME ÖZELLİĞİNE
SAHİP YÜKSEK VERİMLİ LLC SÜRÜCÜ TASARIMI**

Ahmet Yiğit SARI tarafından hazırlanan tez çalışması 12.08.2024 tarihinde aşağıdaki jüri tarafından Yıldız Teknik Üniversitesi Fen Bilimleri Enstitüsü Elektrik Mühendisliği Elektrik Tesisleri Programı **YÜKSEK LİSANS TEZİ** olarak kabul edilmiştir.

Doç. Dr. Ali Rıfat BOYNUEĞRİ
Yıldız Teknik Üniversitesi
Danışman

Jüri Üyeleri

Doç. Dr. Ali Rıfat BOYNUEĞRİ, Danışman
Yıldız Teknik Üniversitesi

Prof. Dr. Ozan ERDİNÇ, Üye
Yıldız Teknik Üniversitesi

Doç. Dr. Yusuf YAŞA, Üye
İstanbul Teknik Üniversitesi

Danışmanım Doç. Dr. Ali Rifat BOYNUEĞRİ sorumluluğunda tarafımca hazırlanan LAZER İLE KABLOSUZ GÜÇ AKTARIMI İÇİN TEK AŞAMALI GÜÇ FAKTÖRÜ DÜZELTME ÖZELLİĞİNE SAHİP YÜKSEK VERİMLİ LLC SÜRÜCÜ TASARIMI başlıklı çalışmada veri toplama ve veri kullanımında gerekli yasal izinleri aldığımı, diğer kaynaklardan aldığım bilgileri ana metin ve referanslarda eksiksiz gösterdiğimi, araştırma verilerine ve sonuçlarına ilişkin çarpıtma ve/veya sahtecilik yapmadığımı, çalışmam süresince bilimsel araştırma ve etik ilkelerine uygun davrandığımı beyan ederim. Beyanımın aksinin ispatı halinde her türlü yasal sonucu kabul ederim.

Ahmet Yiğit SARI

İmza

Kıymetli aileme...



TEŞEKKÜR

Bu tez çalışmasında, yüksek verimli ve şebeke bağlantılı lazer diyot sürücü tasarımı gerçekleştirilmiştir.

Yüksek lisans eğitim sürecimde hayati tecrübelerini benden esirgemeyen, kıymetli fikir ve görüşlerini bana aktararak fikir veren, hem akademik sürecimde hem de hayat yolculuğumda desteğini sonuna kadar hissettiğim, birlikte çalışmaktan onur duyduğum danışman hocam Doç. Dr. Ali Rıfat BOYNUEĞRİ hocama, tez sürecimde benden akademik birikimini esirgemeyen ve hayatın her alanında yol göstermekten çekinmeyen Doç. Dr. Yavuz ATEŞ ve Arş. Gör. Hayri YİĞİT hocalarıma ve hiçbir zaman manevi ve maddi desteklerini benden esirgemeyen kıymetli aileme teşekkürü bir borç bilirim.

Ahmet Yiğit SARI

İÇİNDEKİLER

SİMGE LİSTESİ	vii
KISALTMA LİSTESİ	ix
ŞEKİL LİSTESİ	x
TABLO LİSTESİ	xi
ÖZET	xii
ABSTRACT	xiv
1 GİRİŞ	1
1.1 Literatür Özeti	2
1.2 Tezin Amacı	7
1.3 Orijinal Katkıları	8
2 GÜÇ FAKTÖRÜ DÜZELTME DEVRELERİ	10
2.1 Güç Faktörü Tanımı	10
2.2 PFC Devreleri	12
2.2.1 Yükseltici PFC Devresi	13
2.2.2 Temel Köprüsüz PFC Devresi	14
2.2.3 Totem Kutuplu Yükseltici PFC Devresi	15
3 KABLOSUZ GÜÇ AKTARIMI	19
3.1 Endüktif KGA	20
3.2 Kapasitif KGA	21
3.3 Mikrodalga KGA	22
3.4 Lazer KGA	24
4 LD SÜRÜCÜLERİ	26
4.1 Lineer Akım Regülatörleri	28
4.2 Aktif Dalgalanma Filtreli LD Sürücü	29
4.3 Seri Bağlantılı Transistör Anahtarlama LD Sürücü	29

4.4	Çift Yönlü Dönüştürücü ile Paralel DC-DC Dönüştürücülü LD Dürücü	30
4.5	Tek Aşamalı Filtreli LD Sürücü	31
5	PFC LLC LD SÜRÜCÜ TASARIMI	33
5.1	Sistem Tasarımı	33
5.1.1	Hesaplamalar	34
5.1.2	Kontrolör Tasarımı	37
5.1.3	Simülasyon Sonuçları	37
5.1.4	DeneySEL Çalışma	41
6	SONUÇ	43
	KAYNAKÇA	44
	TEZDEN ÜRETİLMİŞ YAYINLAR	51

SİMGE LİSTESİ

P	Aktif Güç
A	Amper
f_s	Anahtarlama Frekansı
I_o	Çıkış Akımı
L_o	Çıkış Endüktansı
V_o	Çıkış Gerilimi
P_o	Çıkış Gücü
C_o	Çıkış Kondansatörü
GaAs	Galyum Arsenür
GaN	Galyum Nitür
I_{in}	Giriş Akımı
L_{in}	Giriş Endüktansı
V_{in}	Giriş Gerilimi
P_{in}	Giriş Gücü
C_{in}	Giriş Kondansatörü
S	Görünür Güç
H	Henry
Hz	Hertz
L_r	Kaçak Endüktans
Q	Kalite Faktörü
f_p	Kritik rezonans Frekansı
I_{op}	LD Çalışma Akımı
V_{op}	LD Çalışma Gerilimi

R_{on}	LD Direnci
V_{th}	LD Eşik Gerilimi
M	LLC Rezonans Devresi Gerilim Kazancı
L_m	Magnetizasyon Endüktansı
Q	Reaktif Güç
I_{out_ref}	Referans Çıkış Akımı
$I_{ac_ref_0}$	Referans Giriş Akımı
$I_{ac_ref_gen.}$	Referans Giriş Akımı Sinyalinin Genliği
f_r	Rezonans Frekansı
C_r	Rezonans Kondansatörü
Si	Silisyum
SiC	Silisyum Karbür
n	Transformatör Dönüştürme Oranı

KISALTMA LİSTESİ

AC	Alternatif Akım
CCM	Sürekli İletim Modu
CRM	Kritik İletim Modu
DC	Doğru Akım
DCM	Süreksiz İletim Modu
EMC	Elektromanyetik Uyumluluk
EMF	Elektromotor Kuvvet
EMI	Elektromanyetik Girişim
FV	Fotovoltaik
İHA	İnsansız Hava Aracı
KGA	Kablosuz Güç Aktarımı
LD	Lazer Diyot
LGA	Lazer ile Güç Aktarımı
LPT	Laser Power Transmission
MGA	Mikrodalga ile Güç Aktarımı
MOSFET	Metal Oksit Yarı İletken Alan Etkili Transistör
PF	Güç Faktörü
PFC	Güç Faktörü Düzeltme
PLL	Faz Kilitleme Döngüsü
PWM	Darbe Genişlik Modülasyonu
THD	Total Harmonik Distorsiyonu
WPT	Wireless Power Transmission
ZCS	Sıfır Akımda Anahtarlama
ZVS	Sıfır Gerilimde Anahtarlama

ŞEKİL LİSTESİ

Şekil 2.1	Yükseltici PFC devresi	13
Şekil 2.2	Temel köprüsüz PFC devresi	14
Şekil 2.3	Totem kutuplu köprüsüz yükseltici PFC devresi diyotlu	16
Şekil 2.4	Totem kutuplu köprüsüz yükseltici PFC MOSFET’li	17
Şekil 2.5	Totem kutuplu köprüsüz yükseltici PFC MOSFET’li pozitif alternans [55]	17
Şekil 2.6	Totem kutuplu köprüsüz yükseltici PFC MOSFET’li negatif alternans [55]	18
Şekil 2.7	Totem kutuplu köprüsüz PFC kontrolör	18
Şekil 3.1	KGA teknikleri	19
Şekil 3.2	Endüktif KGA devre şeması	20
Şekil 3.3	Kapasitif KGA blok diyagramı [72]	22
Şekil 3.4	Mikrodalga KGA blok diyagramı	23
Şekil 3.5	Lazer KGA genel şeması	25
Şekil 4.1	LD akım-ışınım gücü eğrisi [77]	27
Şekil 4.2	Lineer akım regülatörlü LD sürücü	29
Şekil 4.3	Aktif dalgalanma filtreli LD sürücü	29
Şekil 4.4	Seri bağlantılı transistör anahtarlama LD sürücü	30
Şekil 4.5	Çift yönlü dönüştürücü ile paralel DC-DC dönüştürücülü LD sürücü	30
Şekil 4.6	Tek Aşamalı ileri yönlü dönüştürücü tabanlı filtreli LD sürücü	31
Şekil 5.1	Önerilen PFC LLC LD sürücüsü	34
Şekil 5.2	Önerilen PFC LLC LD sürücüsü kontrolörü	38
Şekil 5.3	Frekansın zamana bağlı değişimi	39
Şekil 5.4	LD akım ve gerilimi	39
Şekil 5.5	Giriş Akımı ve THD Değeri	40
Şekil 5.6	LD sürücü deney seti	41
Şekil 5.7	10 ohm değerinde ölçülen deneysel sonuçlar	42
Şekil 5.8	5 ohm değerinde ölçülen deneysel sonuçlar	42

TABLO LİSTESİ

Tablo 1.1	Literatürdeki LD devreleri ve PFC devrelerinin Tez'deki ile karşılaştırılması	8
Tablo 4.1	LD Sürücü Türleri	28
Tablo 5.1	LD parametreleri ve değerleri	36
Tablo 5.2	PI-1 ve PI-2 parametreleri	37
Tablo 5.3	Devre Parametreleri	38

LAZER İLE KABLOSUZ GÜÇ AKTARIMI İÇİN TEK AŞAMALI GÜÇ FAKTÖRÜ DÜZELTME ÖZELLİĞİNE SAHİP YÜKSEK VERİMLİ LLC SÜRÜCÜ TASARIMI

Ahmet Yiğit SARI

Elektrik Mühendisliği

Yüksek Lisans Tezi

Danışman: Doç. Dr. Ali Rıfat BOYNUEĞRİ

Son yıllarda literatürde geniş yer bulan Kablosuz Güç Aktarımı (KGA) teknolojisi iki nokta arasında fiziksel veya elektriksel bağlantı olmaksızın enerji aktarımını sağlamaktadır. Hem endüstriyel uygulamalarda hem de tüketici elektroniği alanında büyük ilgi gören KGA teknolojisi konvansiyonel kablolu güç aktarımı sistemlerine kıyasla güvenilirlik, dayanıklılık, estetik, tasarım özgünlüğü ve kullanım kolaylığı gibi birçok avantaj sunmaktadır. Bu sebeple mobil cihazlardan elektrikli araçlara kadar geniş bir uygulama yelpazesinde kullanılmaktadır. Farklı KGA teknikleri bulunmasına rağmen, lazerle güç aktarımı (LGA), uzun mesafelerde ve yüksek güç gerektiren uygulamalarda önde gelen teknolojilerden biridir. Bu yöntemde elektrik enerjisi bir dönüştürücü devresi vasıtasıyla lazere aktarılır, lazer elektriksel enerjiyi ışına dönüştürür ve bu ışın fotovoltaiik (FV) hücreler tarafından tekrardan elektrik enerjisine dönüştürülür. LGA teknolojisi, zorlu koşullarda faaliyet gösteren askeri insansız hava, kara ve deniz araçlarına, uzay araştırma araçlarına ve diğer mobil sistemlere güç sağlama konusunda önemli teorik ve uygulama tabanlı araştırmalara konu olmaktadır. LGA sistemlerinde bütüncül sistem verimi göz önüne alındığında özellikle uzak mesafelerde lazer diyotlar (LD) ön plana çıkmaktadır. LD sürücüsünün verimliliği bütüncül LGA sistem verimi bakımından önemli hale gelmiştir. Bu tez çalışmasında güç faktörü düzeltmeli (PFC) tek aşamalı LLC devresi %96,5 gibi yüksek bir verimle ve %2,10 gibi düşük giriş akımı toplam harmonik bozulmasıyla (THD) gerçekleştirilmiştir.

Anahtar Kelimeler: Kablosuz güç aktarımı, lazer ile güç aktarımı, lazer diyot sürücü, güç faktörü düzeltme devresi, LLC rezonans dönüştürücüsü



ABSTRACT

DESIGN OF A HIGH-EFFICIENCY LLC DRIVER WITH SINGLE-STAGE POWER FACTOR CORRECTION FOR LASER POWER TRANSFER

Ahmet Yiğit SARI

Department of Electrical Engineering
Master of Science Thesis

Supervisor: Assoc. Prof. Ali Rıfat BOYNUEĞRİ

In recent years, the Wireless Power Transfer (WPT) technology, which has been extensively covered in the literature, enables energy transfer between two points without any physical or electrical connection. This technology, which has garnered significant interest in both industrial applications and consumer electronics, offers numerous advantages such as reliability, durability, aesthetics, design originality, and ease of use compared to conventional wired power transfer systems. Consequently, WPT technology is being used in a wide range of applications, from mobile devices to electric vehicles. Although various WPT techniques exist, laser power transmission (LPT) stands out as a leading technology for long-distance and high-power applications. In this method, electrical energy is converted to laser energy via a converter circuit, the laser converts the electrical energy into a beam, and this beam is then converted back into electrical energy by photovoltaic (PV) cells. LPT technology is subject to significant theoretical, simulation, and application-based research for powering military unmanned aerial, ground, and naval vehicles operating under challenging conditions, as well as space exploration vehicles and other mobile systems. Considering the overall system efficiency in LPT systems, laser diodes (LD) become particularly important for long distances. The efficiency of the LD driver has become crucial for the overall efficiency of the LPT system. In this thesis, a single-stage LLC circuit with power factor correction (PFC) has been implemented with a high efficiency of 96.5% and a low input current total harmonic distortion (THD) of 2.10%.

Keywords: Wireless power transmission, laser power transmission, laser diode driver, power factor correction circuit, LLC resonant circuit



1 GİRİŞ

Son yıllarda literatürde oldukça yer bulmaya başlayan Kablosuz Güç Aktarımı (KGA) teknolojisi, iki nokta arasında herhangi bir fiziksel veya elektriksel bağlantı olmadan enerji aktarımına olanak sağlamaktadır. Bu teknoloji hem endüstriyel uygulamalarda hem de tüketici elektroniği alanında büyük ilgi görmektedir. KGA, geleneksel kablolu güç aktarımına kıyasla güvenilirlik ve dayanıklılık, estetik, tasarım özgünlüğü ve kullanım kolaylığı gibi birçok avantaja sahiptir. Bu nedenle, KGA teknolojisi mobil cihazlardan elektrikli araçlara kadar geniş bir uygulama yelpazesinde kullanılmaya başlanmıştır [1]. Bu teknoloji, esas olarak kısa mesafeli uygulamalarda yaygın olarak kullanılmaktadır.

19. yüzyılın sonlarından günümüze kadar gerçekleştirilen araştırmalar, KGA teknolojilerinin endüktif, kapasitif, mikrodalga ve lazer ile KGA olmak üzere dört ana kategoriye ayrılabilirliğini göstermektedir. Bu KGA yöntemlerinden endüktif ve kapasitif KGA kısa mesafeli KGA yöntemleriyken mikrodalga ile güç aktarımı (MGA) ve lazer ile güç aktarımı (LGA) uzun mesafeli KGA yöntemleridir [2].

Günümüzde hem Kapasitif Güç Transferi hem de endüktif Güç Transferi teknolojileri, yakın mesafelerde yüksek verimlilikle kilowatt mertebesinde güç aktarımı sağlayabilmektedir [3]. Uygulama kolaylığı ve düşük maliyeti nedeniyle endüktif ve kapasitif KGA teknolojileri tüketici elektroniği, elektrikli araçlar, robotik uygulamalar ve biyomedikal cihazlar gibi günlük hayatta geniş bir kullanım alanına sahiptir [4]. Bununla birlikte, endüktif ve kapasitif KGA teknolojilerinin menzili arttıkça elektrik ve manyetik alanın mesafe ile ters orantılı olarak etkinliğini sürdürebilmesinden kaynaklı olarak verimde azalma meydana gelmektedir. Bu nedenle, güç aktarım mesafesi büyük ölçüde sınırlı kalmaktadır [5]. Bu sebeple araştırmacılar, uzun mesafeli KGA olanaklarını da incelemektedirler. Bu çalışmalar, gelecekte KGA'nın daha geniş bir uygulama yelpazesinde kullanılabilmesi için önemli adımlar atmaktadır [6].

MGA ve LGA teknolojileri, birkaç kilometre mesafeye kadar birkaç kilowattlık

gücü kısa mesafe KGA yöntemlerine kıyasla daha verimli bir şekilde aktarabilme kapasitesine sahiptir. Bu özellikleri, onları kısa mesafe kablosuz güç aktarım teknolojilerine kıyasla daha kullanışlı kılmaktadır. MGA yönteminde, yüksek frekanslı dalgalar atmosferden rahatlıkla geçerek uzun mesafede güç aktarımına olanak sağlar. Ancak bu yöntem sistem verimliliğinin düşük olması, mikrodalgaların alıcı antene odaklanmasında yaşanan zorluklar ve yönlendirme için gerekli olan yardımcı ekipmanların yüksek maliyeti olması gibi önemli dezavantajlara sahiptir. [7], [8].

Bir diğer uzak mesafe güç aktarım yöntemi olan LGA elektrik enerjisinin ışık enerjisine dönüşmesi ve tekrar elektrik enerjisine dönüşmesi prensibine dayanmaktadır. Lazer sistemleri ışık enerjisinin yüksek yoğunluk ile nispeten az kayıpla uzun mesafeler boyunca aktarabilmektedir. Bu sebeple 90'lı yıllarda gelişen lazer sistemleri ile kesme gibi birçok işlem mümkün olmuş ve 2000'li yılların başlarında lazer sistemlerinin güç aktarımı için kullanılmasına yönelik çalışmalar başlamıştır LGA hem uzun mesafede hem de yüksek güçlerde daha avantajlıdır [9].

1.1 Literatür Özeti

LGA teknolojisinin başlangıç noktası olarak kabul edilen ilk çalışma, EADS Uzay Ulaştırma tesisinde gerçekleştirilmiştir [10]. Bu çalışmada, uzay uygulamalarında kullanılmak üzere tasarlanmış hareketli bir araca lazerle güç aktarımı yapılması hedeflenmiştir. 532 nm dalga boyunda ve 5 W çıkış gücüne sahip bir NdYAG lazer kullanılarak, 30-200 metre mesafeden araç üzerine yerleştirilmiş fotovoltaiik (FV) hücreye kablosuz enerji aktarımı başarılı bir şekilde gerçekleştirilmiştir.

2003 yılında NASA tarafından gerçekleştirilen çalışmada lazer ile hava aracına ilk başarılı KGA gerçekleştirilmiştir. Bu deneyde, hava aracına Si FV hücre dizisi monte edilmiş ve 940 nm dalga boyunda, %50 verimliliğe sahip, ayarlanabilir 1,5 kW çıkış gücünde bir LD kullanılmıştır. 15,2 metre mesafedeki hava aracını 500 W gücündeki lazer ışını manuel olarak takip etmiştir. Lazer ışınının FV dizi üzerindeki gücü 40 W olarak ölçülmüş ve FV diziden elde edilen elektriksel güç 7 W olmuştur. FV dizinin yüzey alanının lazer ışınının yüzey alanından daha küçük olması sebebiyle KGA verimi önemli ölçüde düşmüştür [11].

2006 yılında gerçekleştirilen çalışmada LGA teknolojisini küçük uçaklarda uygulaması gerçekleştirildi [12]. Bu çalışmada lazer diyot çıkışından elde edilen 300 W'lık güç kullanılmış ve GaAs PV dizisi tarafından %25 verimlilikle yaklaşık 40 W'lık güç elde edilmiştir. 50 metre yükseklikte uçan uçağın, LGA teknolojisi

sayesinde ile 1 saatten fazla süren uzun uçuş otomatik izleme sistemi ile LGA'nın fizibilitesini doğrulamıştır.

LGA alanında yapılan bir başka çalışmada alıcı için yarım küre şeklinde bir tasarım geliştirmiştir [13]. Bu tasarımda iç yüzeye Si FV hücreler yerleştirilmiş ve ışını düzgün bir şekilde FV hücrelere dağıtmak için çeşitli optik malzemeler kullanılmıştır. Ortabasi ve Friedman bu çalışmada 1064 nm dalga boyunda ve 160 W çıkış gücünde NdYAG lazer kullanmış ve 22 hücreden oluşan FV dizisinin verimi yaklaşık %14 olarak kaydetmiştir. Alıcı kısmının etkili bir tasarıma sahip olmasına rağmen, FV hücrelerden elde edilen verimin düşük olmasının nedenleri arasında küre içindeki ışık akısı yoğunluğunun düşük olması, lazer dalga boyu ile FV malzemesinin uyumsuzluğu ve FV hücre sayısının yetersizliği bulunmaktadır. Bu çalışma, lazer ışınının dalga boyu ile FV hücrelerin uyumunun önemini vurgulamaktadır.

Kawashima ve Takeda [14] tarafından yürütülen çalışma, küçük hava aracına LGA teknolojisini sağlayarak hareket etmesini mümkün kılmıştır. Çalışmada 808 nm dalga boyunda ve 300 W çıkış gücüne sahip bir LD kullanılmıştır. Alıcı kısmında GaAs güneş hücrelerini kullanarak bir FV dizisi oluşturulmuştur ve bu dizinin çıkışından elde edilen güç yaklaşık 40 W'tır. Ancak sistemin uçtan uca verimi %4 seviyelerinin altında kalmıştır. Hava aracı, 50 m yükseklikte ve 10 m yarıçapında bir daire çizerek 1 saatten fazla havada kalmayı başarmıştır. Elde edilen sonuçlar, savunma sanayisinde LGA teknolojisinin önemli bir kullanım potansiyeline sahip olduğunu göstermektedir.

Si güneş hücrelerine en uygun lazer dalga boyunun belirlenmesine yönelik yapılan araştırmada [15], farklı dalga boyları ve güç seviyeleri kullanılarak deneyler gerçekleştirilmiştir. Bu çalışmada, Si güneş hücrelerine 808 nm, 940 nm ve 976 nm olmak üzere üç farklı dalga boyunda ve çeşitli güç seviyelerinde lazer ışını uygulanmıştır. Araştırmanın sonuçlarına göre 976 nm dalga boyunda en yüksek verim elde edilmiştir. Yaklaşık 26 W güce sahip ışın, %28 PV hücre verimi ile Si hücresine iletilmiş ve çıkıştan 7.24 W elektriksel güç elde edilmiştir. Bu çalışmada uçtan uca verim %10'un altında ölçülmüştür.

Smith ve Brandhorst [16] tarafından yapılan çalışmada, 810 nm lazer diyot ile 100 m mesafede enerji aktarımı sağlanmıştır. GaAs PV hücreler kullanılarak gerçekleştirilen deneyde, 2500 W gücündeki lazer diyot ışınının PV dizisine aktarılmasından 240 W elektriksel güç elde edilmiştir. Bu çalışmada çalışmada da uçtan uca verim %10 seviyesinin altında kalmıştır.

Göz ve cilt sağlığını korumak amacıyla 1550 nm dalga boyunda bir lazerin

kullanıldığı bir çalışmada, bu dalga boyuna uygun bir güneş hücresi geliştirilmiştir. Mukherjee vd [17] tarafından gerçekleştirilen bu çalışmada, 30 metre mesafeden güç transferi yapılmış ve 1000 W/m^2 ışıyım altında güneş hücresinden %45 verim elde edilmiştir. Ancak, düşük lazer verimi ve düşük güç nedeniyle bu dalga boyunun kablosuz güç aktarımı için uygun olmadığı sonucuna varılmıştır.

100 metre mesafede güç transferi sağlamak için çok hücreli bir GaAs güneş hücresi geliştirilmiştir. Tao vd [18] gerçekleştirilen bu çalışmada, 793 nm dalga boyunda ve 25 W çıkış gücünde bir lazer diyot kullanılmıştır. Lazer ışınının gücü, %96'lık bir iletim verimi ile güneş hücresinin girişinde 24 W olarak ölçülmüştür. Sistemin çıkışında 9,7 W değerinde elektriksel güç elde edilmiş olup toplam sistem verimi %11,6 olarak hesaplanmıştır.

Lazer ile kablosuz güç aktarımı verici, iletim ve alıcı olmak üzere 3 ana kısımdan oluşur. Verici kısmı, lazer ışını üretmek ve yönlendirmek için gerekli olan sürücü devresi, güç kaynağı, lazer ve optik elemanlardan oluşur. Lazer için uygun akım ve gerilimi sağlayan sürücü devresi ve güç kaynağı, lazer ışınının doğru şekilde üretilmesini sağlar. Optik elemanlar ise lazerden elde edilen ışını kolime ederek iletilmesini sağlar. Işınının dalga boyu ve hava koşulları gibi faktörler iletim sürecinin verimini etkiler [19].

Alıcı kısmında, lazer ışını uygulamaya bağlı olarak çeşitli yöntemlerle FV hücreler üzerine yönlendirilir. Lazer ışını, konkav mercek kullanılarak geniş bir alana yayılabilir, konveks mercek ile odaklanabilir veya doğrudan FV hücre üzerine hizalanabilir. FV hücrelerin çıkışından maksimum elektriksel verimi elde etmek için maksimum güç noktası takibi (MPPT) yapan bir devre kullanılır. Elde edilen elektrik enerjisi daha sonra yüke aktarılır ve böylece lazer ile kablosuz güç aktarımı tamamlanmış olur. Bu süreç, lazerin doğru akım ve gerilim ile beslenmesinden başlayarak, ışının atmosferde iletilmesi ve FV hücreler üzerinde toplanmasına kadar birçok adımı içerir.

Tüm bu bileşenlerin yanı sıra, sistemin en önemli parçalarından biri lazerin kendisidir. LGA teknolojisinde çeşitli lazer türleri kullanılabilir ve her birinin kendine özgü avantajları ve dezavantajları vardır. 2000'li yılların başlarından itibaren, Nd:YAG ve disk lazerler yaygın olarak kullanılmaya başlanmıştır [20], [21], [22].

1060 nm dalga boyunda ve 8 kW gücünde yüksek güçlü bir disk lazer kullanarak 1 km'ye kadar yaklaşık %1.25'lik bütüncül sistem verimiyle güç iletimi sağlanabilmiştir [21]. Bu çalışmada yaklaşık 80 metre mesafedeki bir mini gezici aracına güç aktarımını sağlayan 5 W'lık bir Nd:YAG lazer kullanılmıştır [22]. Bu

tür lazerler, yüksek güçleri uzun menzilli LGA uygulamaları için uygundur. Ancak, elektrik enerjisini optik enerjiye dönüştürmedeki düşük verimlilikleri, bu lazerlerin kullanımını sınırlayan bir dezavantajdır.

Son yıllarda LD'ler oldukça verimli ve kompakt yapıda olmaları nedeniyle LGA uygulamalarında kullanım alanı bulmuştur. Verimlilikleri %30 ile %50 arasında değişen LD'ler, bütüncül sistemin verimini arttırmanın yanı sıra özellikle maliyet açısından oldukça avantajlıdır [23].

LD kullanımı sırasında dikkat edilmesi gereken önemli noktalardan biri lazer tahrik akımına karşın ışın yoğunluğunu gösteren L/I eğrisidir. Bu eğri, LD'nin çalışma noktasını ve eşik akımını belirlemek için kullanılır. LD'nin sıcaklığındaki artış eşik değerinin yükselmesine ve verimliliğinin düşmesine yol açar [24].

Birden fazla LD'nin birleştirilmesiyle her LD'nin çıkışı ortak bir ışın haline getirilerek yüksek güçlü tek bir lazer ışınına dönüştürülebilir. Birden fazla LD'nin çıkışlarını birleştirmek, yüksek ışın kalitesi ve güç yoğunluğu elde edilmesini sağlar. Bu yöntem, farklı sistemlerin ihtiyaçlarına uygun olarak çıkış gücünün ayarlanabilmesine de olanak sağlar [25].

LD için tasarlanan sürücü devresi, lazerin performansını ve genel sistem verimliliğini belirleyen oldukça kritik bir bileşendir. LD'ler akımla sürülen cihazlar oldukları için sürücü olarak akım kaynağı kullanılır. LD sürücüsünün ana amacı, en iyi ışın performansını sağlamak için LD'nin ihtiyacı olan akım seviyesini düşük dalgalanma ile sağlamaktır [26].

Başlangıçta LD'lere gerekli sürme akımını ve düşük akım dalgalanmasını sağlamak amacıyla doğrusal akım regülatörleri kullanılıyordu [27]. Ancak lineer akım kaynakları düşük verimlilik ve düşük güç yoğunluğu gibi sebeplerden dolayı dezavantajlı olduğundan dolayı anahtarlama güç kaynakları tercih edilmeye başlandı. LD sürücü olarak tercih edilen ilk anahtarlama güç kaynağı çıkış kısmında yüksek geçiren filtre bulunduran düşürücü dönüştürücü olmuştur [28]. Ancak yüksek ağırlığı ve yüksek hacmi, düşük dinamik cevap hızı gibi dezavantajları vardır.

Başka bir çalışmada, LD'ye darbe akımı sağlamak amacıyla yüksek hızlı anahtarlama transistör dizisi ile seri olarak bir düşürücü dönüştürücü önerilmektedir. Düşürücü dönüştürücü bir DC akımı üretirken, transistör dizisi DC akımını ya LD'ye ya da şönt direncine aktarır. LD aktifse DC akım LD'ye yönlendirilir. Aksi durumda akım şönt direncine gider ve LD'nin giriş akımı sıfır olur. Bu yöntemle birlikte dinamik cevap hızı yükselmiş olsa da şönt

direncine aktarılan güçten kaynaklı olarak verimi düşüktür [29]. Düşürücü ve düşürücü yükseltici dönüştürücüler LD'nin sürülmesinde düşük dalgalanmalı bir akım sağlamak için kullanılan önemli topolojilerdir. Bu ihtiyacı karşılamak için düşürücü ve düşürücü-yükseltici dönüştürücülerin birlikte kullanıldığı bir anahtarlama mod akım regülatörü önerilmiştir.

Düşürücü dönüştürücü düşük dalgalanmalı sabit bir akım üretmek için en yaygın kullanılan topolojidir. Ancak, yalnızca düşürücü dönüştürücü kullanıldığında akım değişimlerine dinamik yanıt verme yeteneği sınırlıdır. Bu nedenle, yalnızca sabit akım modunda çalıştırılan lazer diyotları için düşürücü dönüştürücü uygundur.

Düşürücü-yükseltici dönüştürücü, düşürücü dönüştürücünün sağladığı doğru akıma AC bir bileşen ekler. Düşürücü dönüştürücüden gelen güç, düşürücü-yükseltici dönüştürücü tarafından bir kapasitörde depolanır. LD aktifken depolanan güç lazer diyotuna aktarılır. Bu sayede, lazer diyotunun ihtiyaç duyduğu hızlı akım geçişleri sağlanabilir ve sabit akım modunun yanı sıra dinamik cevap verme hızı yükselir. Düşürücü ve düşürücü-yükseltici dönüştürücülerden oluşan bu sistemin kontrolü için gerilim ve akım döngüsü olmak üzere iki kontrol döngüsü birlikte kullanılır. Gerilim kontrol döngüsü kapasitörün gerilimini izler ve bu gerilimin LD çalışma geriliminden daha yüksek olmasını sağlar. Akım kontrol döngüsü düşürücü-yükseltici dönüştürücü tarafından sağlanan akımı düzenler. PWM kontrol yöntemi ise düşürücü-yükseltici dönüştürücünün anahtarlarını uygun doluluk oranında sürerek gerekli akım dalgalanmalarını sağlar. 20 W çıkış gücünü %86'lık bir verimle sağlamışlardır [30].

Başka bir çalışmada iki transistörlü ileri yönlü dönüştürücü topolojisi LD sürücü olarak tasarlanmıştır. Bu topoloji birden fazla dönüştürücü topolojisinin kullanımı ile oluşturulan LD sürücülere kıyasla daha basit yapıdır. Tek aşamalı bu tasarım, devredeki potansiyel arıza noktalarını ve enerji kayıplarını azaltarak verimliliği arttırmayı amaçlamıştır. Sürücü devresinin çıkış kısmında LD'deki akım dalgalanmalarını azaltmak için LCL filtre kullanılmıştır. Akım dalgalanmaları LD'nin çıkışında istenmeyen salınımlara neden olur ve bu durum hem çalışma performansını hem de ömrünü olumsuz etkiler. Bu sürücü tepe akım kontrolü yöntemi ile çalıştırılır. Tepe akım kontrolü, yük koşullarındaki değişimlere hızlı yanıt vererek LD'nin optimum performansını korur [31].

Literatürden hareketle DC-DC LD sürme devrelerinin yaygın olarak kullanıldığı görülmektedir. Ancak şebekeye bağlı LD sürücüler hakkında yeterli çalışma yapılmamıştır. Şebekeye bağlı LD sürücüsü, doğrudan şebekeden beslenir ve bu durumda güç faktörü önemli bir kavram olarak karşımıza çıkar [32].

Günümüzde hızla artan teknolojik gelişmeler, enerji talebini de oldukça arttırmıştır. Artan enerji talebinin yanı sıra, anlık yük talepleri de sıkça karşılaşılan bir durum haline gelmiş ve bu durum şebekeden çekilen akımda bozulmalara neden olmuştur. Bu bozulmalar, güç faktörünü düşürmekte ve şebekeden çekilen akımda toplam harmonik distorsiyonu (THD) arttıran bozulmalar olarak kayda geçmiştir. Şebekeden çekilen akımın THD değerinin düşük olması, şebekeden çekilen akımın saf sinüs eğrisine oldukça yakın olması ve dolayısıyla güç faktörünün 1'e yakın olması anlamına gelir.

Güç faktörünün düşük olduğu durumlarda şebekeden düzgün akım çekilemez ve bu durum enerji kayıplarının artmasına yol açar. Güç faktörünün düşük olması, reaktif güç talebini artırarak şebekede istenmeyen akım harmoniklerine ve güç aktarımında ek kayıplara neden olur. Bu durum, özellikle endüstriyel ve ticari tesislerde enerji maliyetlerini artırabilir ve enerji verimliliğini düşürebilir. Bunun yanı sıra, kullanılacak olan hassas elektronik cihazlar da zarar görebilir. Özellikle bilgisayar gibi hassas elektronik bileşenler şebekeden çekilen akımdaki harmonik bozulmalardan olumsuz etkilenirler [33]. Harmonik bozulmalar cihazların performansını düşürmekle kalmaz aynı zamanda ömürlerini kısaltabilir ve ani arızalara yol açabilir. Bu nedenle, şebekeye bağlı lazer diyot sürücü devrelerinde güç faktörünü düzeltmek için güç faktörü düzeltme (PFC) devrelerinin kullanılması hem enerji verimliliğini artırmak hem de cihazların güvenilirliğini sağlamak açısından büyük önem taşımaktadır.

Bu koşullarda, şebekeye bağlı LD sürücülerinde güç faktörü düzeltme (PFC) devreleri kullanmak kaçınılmaz hale gelir. PFC devreleri şebekeden çekilen akımın THD'sini minimuma indirerek güç faktörünü 1'e yaklaştırır, böylece hem şebekeyi hem de cihazı korurlar. Şebekeye bağlı LD sürücülerinin verimliliğini ve performansını artırmak için PFC devreleri aktif ve pasif yöntemlerle uygulanabilir. Aktif PFC devreleri, elektronik devre elemanları kullanarak güç faktörünü düzeltirken, pasif PFC devreleri ise reaktörler ve kapasitörler kullanarak bu düzeltmeyi sağlar.

1.2 Tezin Amacı

Bu tezin amacı yukarıda belirtilen literatürdeki eksikleri tamamlamak amacıyla yüksek verimli güç faktörü düzeltmeli LD sürücüyü gerçekleştirmek için LLC rezonans dönüştürücüsü dizayn edilmesi ve üretilmesidir. Bu amaçlara ulaşmak için şu çalışmalar hedeflenmiştir.

- LD sürücüler için yüksek performanslı bir doğrultucu devresi tasarlamak.

- Güç dönüşüm sürecinde yüksek verimlilik sağlayacak bir inverter devresi geliştirmek.
- Güç transferini sağlayacak düşük kayıplı bir yüksek frekans trafo tasarımı yapmak.
- İstenmeyen frekans bileşenlerini etkin bir şekilde filtreleyebilecek verimli bir çıkış filtresi tasarımı yapmak.
- Ekstra anahtar kullanmadan tek aşamalı PFC devresinin tasarlamak.
- Çıkış akımını sabit tutmak ve giriş akımı harmoniğini azaltma amacıyla uygun kontrol algoritmalarını içeren bir kontrolör tasarlamak.

1.3 Orijinal Katkılar

Bu çalışmada, lazer diyotlarını etkin bir şekilde sürmek için gereken akım ve gerilimi sağlamak üzere şebeke bağlantılı, güç faktörü düzeltmeli, düşük THD'li, tek aşamalı ve yüksek güçlerde sıfır gerilimde anahtarlama (ZVS) yüksek verimli bir LLC rezonans dönüştürücüsü kullanılmıştır. Tablo 1.1'de gözüktüğü üzere PFC sağlayan LD sürücü devresi olmasının yanı sıra verimliliği ve dinamik yanıt hızı oldukça yüksektir.

Tablo 1.1 Literatürdeki LD devreleri ve PFC devrelerinin Tez'deki ile karşılaştırılması

Referans	Lazer Sürme	PFC	Verimlilik (%)	Akım Dalgalanması (%)	Dinamik Yanıt	Karmaşıklık	Güç Seviyesi
[34]	+	-	85-90	0,1-0,5	Orta	Orta	Yüksek
[29]	+	-	70-85	0,5-2	Yüksek	Orta	Orta
[23]	+	-	85-90	1-3	Orta	Yüksek	Yüksek
[28]	+	-	85-90	0,1-0,5	Orta	Orta	Yüksek
[32]	-	+	92-96,5	10-15	Yüksek	Orta	Orta
[35]	-	+	95-97	5-10	Yüksek	Yüksek	Orta
[36]	-	+	97-98,5	2-5	Yüksek	Yüksek	Yüksek
Tez	+	+	94-97	2-10	Yüksek	Yüksek	Yüksek

Bu yaklaşım LD'lerin yüksek verimli ve düşük dalgalanmalı bir biçimde sürülmesini sağlarken aynı zamanda giriş akımının da düşük harmonikli olmasını sağlamaktadır. LLC dönüştürücüsü, LD'nin gereksinim duyduğu akım ve gerilimi sağlamak için yüksek performans sunmaktadır ve LD'nin verimini etkileyen en önemli etkenlerden biri olan akım dalgalanmasını minimize etmiştir.

Bu çalışma, AC-DC LD sürücü devreleri üzerine sınırlı sayıda yapılmış çalışmanın aksine, LLC topolojisinin sağladığı avantajları kullanmaktadır. Bu tezin literatüre orijinal katkıları şu şekilde sıralanabilir:

- Yüksek verimli LD sürücüsü tasarlamak
- Şebeke bağlantılı ve çok düşük akım harmonik bozulmalı LD sürücüsü tasarlamak.
- Şebekeyi enerji kalitesi problemlerine karşı korumak.
- Lazerin akım dalgalanmasını minimum seviyede tutmak.

Bu çalışma literatüre LD sürücü verimliliğini arttırmada ve şebekeye bağlantılı kullanılabilir hale getirmek adına önemli bir katkı sağlayacağı için LGA teknolojisinin kullanımını yaygın hale getirmek adına çok önemli bir fırsat sunacaktır.

2 GÜÇ FAKTÖRÜ DÜZELTME DEVRELERİ

Son yirmi yılda teknolojinin hızla ilerlemesi elektrikli cihazların kullanımına da büyük ölçüde yansımıştır. Dizüstü bilgisayarlar ve akıllı telefonlar gibi kişisel bilgi işlem cihazlarının yaygınlaşmasıyla birlikte elektronik, günlük yaşamın ayrılmaz bir parçası haline gelmiştir [37]. Bu durum, enerji kaynaklarının hızla tükenmesine yol açarak hem siyasi hem de ekonomik düzeyde önemli sonuçlar doğurmuştur. Dolayısıyla mevcut enerji kaynaklarını daha verimli kullanmak günümüzün en kritik konularından biri haline gelmiştir. Elektrikli cihazların şebekeden çektikleri güç ile harcadıkları güç arasında bir fark bulunur ve bu fark, cihazların güç faktörüne ve verimlilik düzeyine bağlıdır [38]. Enerji verimliliği sağlamak sadece ekonomik değil, aynı zamanda çevresel bir zorunluluk haline gelmiştir. Yenilenebilir enerji kaynaklarının daha fazla benimsenmesi ve enerji tüketiminin optimize edilmesi, sürdürülebilir bir geleceğin inşası için kritik öneme sahiptir. Ayrıca, enerji yönetim sistemlerinin geliştirilmesi ve akıllı şebekelerin yaygınlaştırılması, elektrikli cihazların şebeke üzerindeki olumsuz etkilerini minimize etmek için etkin stratejiler olarak ortaya çıkmaktadır. Özellikle yüksek güçlü endüstriyel makineler ve elektronik ekipmanlar, düşük güç faktörü ve yüksek harmonik seviyeleri nedeniyle elektrik şebekelerinde ciddi sorunlara yol açabilirler. Bu tür olumsuz etkileri önlemek amacıyla, bu cihazların belirli minimum güç faktörü ve maksimum harmonik seviyesi standartlarını karşılaması zorunludur [39].

2.1 Güç Faktörü Tanımı

Güç faktörü bir cihazın çıkışa iletebildiği aktif gücün giriş güç kaynağından çekilen toplam güce oranı olarak tanımlanabilir. Bu oran bir alternatif akım (AC) devresindeki gerilim ve akım dalgalarının arasındaki faz açısıyla belirlenir. Güç faktörü, şebekeden çekilen gücün ne kadarının aktif güç olduğunu gösteren bir bileşendir. Endüstriyel uygulamalar açısından yüksek güç faktörleri enerji tüketimini azaltır ve elektriksel sistemlerin daha verimli çalışmasına olanak sağlar.

Elektrik kullanımında üç tip AC güç vardır. Birincisi aktif güçtür. Aktif güç bir yüke aktarılan net enerjiyi temsil eder. Eğer yük tamamen rezistif karakterli ise, hattaki tüm güç aktif güçtür ve gerilim ile akım aynı fazda salınır [33].

İkincisi, eğer yük tamamen endüktif veya kapasitif ise güç tamamen reaktif güçtür. Reaktif güç pasif komponentlerdeki manyetik ve elektrik alanları oluşturmak ve sürdürmek için kullanılır. Elektrik ve manyetik alanlar ise akımın gerilime göre faz farkının oluşmasını sağlar. Akım tamamen kapasitif yükler için 90° önde, tamamen endüktif yükler için ise 90° geride olur .

Pratik uygulamalarda ise yükler ne tamamen aktif ne de tamamen reaktiftir. Üçüncü güç türü olan AC güç türü görünür güç olarak adlandırılır . Aktif gücün görünür güce oranı ise Güç Faktörü olarak tanımlanır [39]. Güç faktörünün hesaplanması için kullanılan formüller aşağıdaki gibidir:

$$S = \frac{P}{\cos(\phi)} \quad (2.1)$$

$$S = \sqrt{P^2 + Q^2} \quad (2.2)$$

Burada, S görünen gücü, P aktif gücü ve Q reaktif gücü sembolize eder. Yükün talebi aktif güç olduğundan dolayı, aktif gücün görünür güce neredeyse eşit olduğu sistemler yüksek verimli olarak ifade edilir ve elektrik sistemlerin en önemli hedeflerinden biri de sistemi yüksek verimli olarak tasarlamaktır.

$$PF = \sqrt{\frac{1}{1 + (THD)^2} \cdot \cos(\phi_V - \phi_I)} \quad (2.3)$$

THD şebekeden çekilen akımın dalga formundaki bozulmanın ölçüsüdür. Güç faktörü, THD'nin artmasıyla düşer. THD'nin sıfıra eşit olması, şebekeden harmonikli akım çekilmediğini gösterir.

ϕ_V gerilimin faz açısını ϕ_I ise akımın faz açısını gösterir. Gerilim ile akım arasında faz farkı yoksa ve şebekeden çekilen akımda harmonik bozulma yoksa güç faktörü 1 olur. Bu durum, yükün tamamen rezistif olması ile mümkün olur. Deneysel çalışmalarda tamamen mümkün olmasa da, 1'e yakın olması için optimum çözümlere odaklanılmalıdır.

2.2 PFC Devreleri

Güç faktörü düzeltme devresinin amacı, yükün karakteri ne olursa olsun yükün şebeke tarafında mümkün olduğunca rezistif bir yük olarak algılanmasını sağlamaktır [40]. Bu durum özellikle endüstriyel uygulamalarda ve yüksek güçlü elektrikli cihazlarda kritik bir rol oynar. Elektrikli cihazların güç kaynağından çektiği akım, eğer düzgün bir şekilde düzeltilmezse, şebekede çeşitli sorunlara yol açabilir. PFC devreleri, bu sorunları minimize ederek enerji verimliliğini artırır ve şebeke üzerindeki olumsuz etkileri azaltır.

PFC devrelerinin yapısı yükün güç miktarı, giriş ve çıkış gerilimleri, anahtarlama frekansı gibi faktörlere bağlı olarak çeşitlilik göstermektedir. PFC devreleri için geliştirilen metodolojiler kullanılan bu faktörlere göre farklılık göstermektedir. PFC devreleri temel olarak aktif ve pasif olarak ikiye ayrılmaktadır. Pasif PFC devreleri, aktif PFC devrelerine göre daha hantal ve daha düşük verimlilik gösterdiği için özellikle yüksek güç uygulamalarında aktif PFC devreleri daha sık tercih edilmektedir [41]. Aktif PFC devreleri, bir AC-DC doğrultucu devresine eklenen endüktans, elektronik anahtar ve diyotlardan oluşur [42]. Bu elektronik bileşenler devrenin çalışma prensibine bağlı olarak doğrultucu devresine farklı şekillerde bağlanarak çeşitli PFC metodolojileri oluşturulur.

Aktif PFC devrelerinin çalıştırılması, genellikle AC-DC dönüştürücülerin yüksek frekansta çalıştırılması prensibi üzerine kuruludur. Bu prensip, PFC'li AC-DC dönüştürücülerin geniş bir kullanım alanına sahip olmasına olanak tanır.

PFC devreleri, modern elektrikli cihazların ve sistemlerin enerji verimliliğini artırmak ve şebeke üzerindeki olumsuz etkilerini azaltmak için vazgeçilmez bileşenlerdir. Gelişen teknoloji ile birlikte, PFC devrelerinin tasarımı ve uygulama alanları da sürekli olarak genişlemekte ve iyileştirilmektedir.

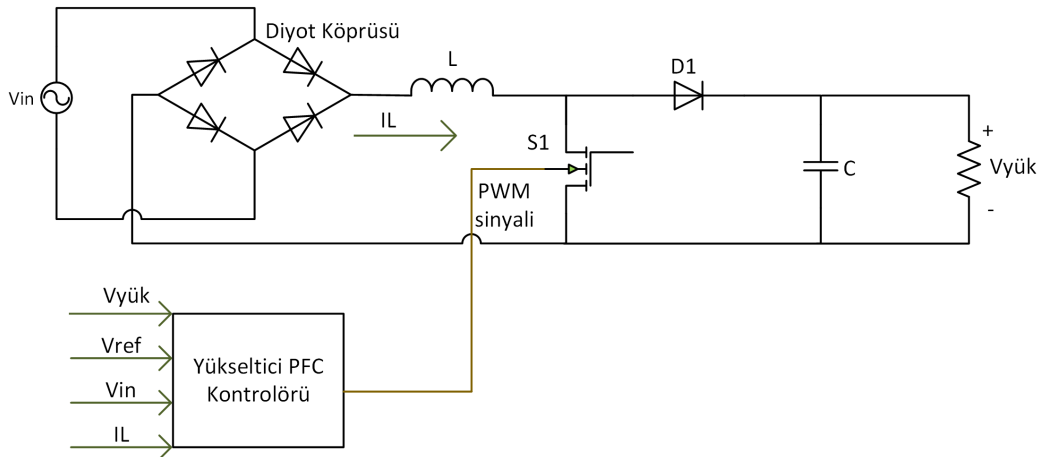
Son yıllarda PFC devreleri üzerine yapılan araştırmalar sonucunda, yavaş ve hantal pasif filtreler ile daha karmaşık ve maliyetli aktif filtrelerin yerine, yüksek frekanslı aktif PFC devrelerinin kullanımı artmıştır. Yüksek frekanslı aktif PFC devreleri kontrolsüz köprü doğrultucu yapısının çıkış kısmında yüksek kapasiteli kondansatörler yerine DC-DC dönüştürücü eklenerek tasarlanmaktadır. Bu sayede şebekeden çekilen akım ve gerilim arasındaki faz farkı minimize edilerek, yüksek güç faktörü (PF) elde edilir. Literatürde yer alan temel DC-DC dönüştürücüler, düşürücü, yükseltici ve yükseltici-düşürücü gibi çeşitli topolojilerden oluşur ve bu topolojiler, doğal PFC özellikleri ile uyumlu oldukları için yaygın olarak tercih edilmektedir [43].

2.2.1 Yükseltici PFC Devresi

Yükseltici PFC devresi yapısal olarak diğer güç elektroniği devrelerine göre daha kolay tasarlanabilir ve malzeme sayısının az olması nedeniyle maliyeti düşüktür. Ancak bu devrenin kontrol sistemi, çalıştırılacağı moda göre değişir. Yükseltici PFC devresi DCM ve CCM olmak üzere iki modda çalıştırılırlar. Günümüzde DCM PFC devreleri neredeyse hiç kullanılmamaktadır. Bunun sebebi DCM modunda endüktans üzerinden geçen maksimum akımın yüksek olması nedeniyle yüksek güçlü devrelerde daha büyük güç kayıplarının meydana gelmesi ve yüksek akım dayanımı gerektiren yarı iletken elemanların kullanımının gereksinimidir.

CCM modunda anahtarlama frekansının endüktansın ve kapasitör değerlerinin yüksek olması endüktans ve kapasitelerdeki akımın tam olarak boşalmadan çıkışa aktarılmasını sağlar. Bu durumda akım değeri sıfıra hiç ulaşmaz ve böylece güç faktöründen büyük oranda ödün verilmez. Burada akımın ortalama değeri giriş gerilimini takip etmelidir. Eğer doluluk oranı uygun şekilde kontrol edilirse hattan gelen akım sinüs dalga formunda oldukça yakın olacaktır.

DCM modunda ise daha düşük anahtarlama kayıpları elde edilir ve daha az maliyetli elemanlar kullanılır. Ancak, güç faktörü değeri CCM moduna göre daha düşüktür. Bu modda, devrede kullanılan anahtarlama elemanı akım tamamen deşarj edilene kadar kesim durumunda bekletilir. Bu sayede sıfır akımda anahtarlama (ZCS) yani anahtarlama elemanı üzerinde sıfır akımda anahtarlama yapılabilir ve böylece yüksek maliyetli yarı iletken elemanların kullanımına gerek kalmaz [44].



Şekil 2.1 Yükseltici PFC devresi

Şekil 2.1’de görüldüğü üzere yükselticiYükseltici PFC devresinin ana bileşenlerinden biri endüktanstır. Anahtarlama elemanının kesim ve iletimi sayesinde, endüktansın enerji depolama ve aktarma özelliği şebekeden sinüzoidal akım çekimini mümkün kılar. Çıkış kapasitörleri ise yükün belirli bir gerilim

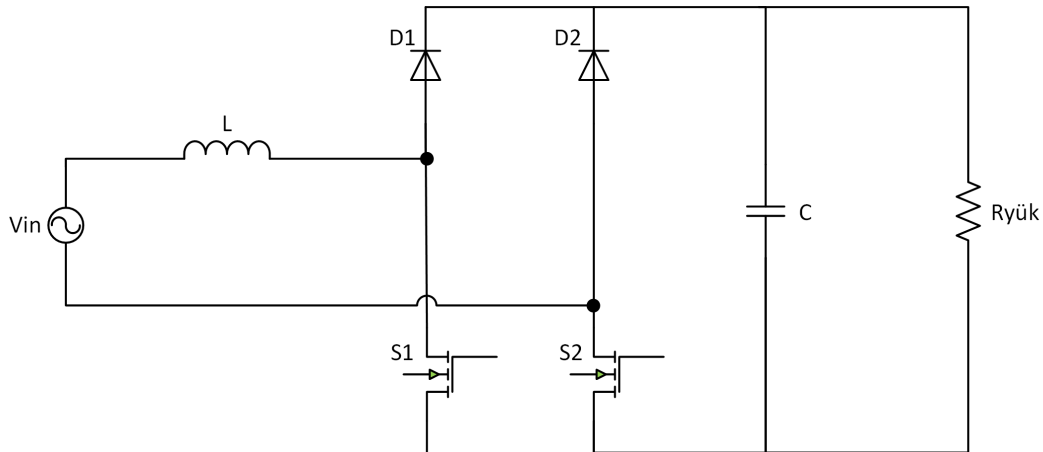
aralığında kalmasını sağlayacak enerjiyi depolar ve aktarır. Anahtar iletim durumundayken hattın gelen ve köprü diyot tarafından doğrultulmuş akım endüktansı besler. Anahtar kesim durumundayken hattın ve şarj edilmiş endüktanstan gelen enerji çıkış kapasitörlerini şarj eder ve yükü besler [45].

Yükseltici PFC devresinde MOSFET anahtarlama elemanının uçlarından geçen akım en fazla giriş akımı veya endüktans akımı kadar olabilir. Bu değer giriş gücünün giriş gerilimine bölünmesiyle bulunur. PFC uygulamaları için elemanların üzerinden geçebilecek maksimum akım değeri hesaplanır ve buna göre uygun anahtarlama elemanı seçilir. Çıkış kapasitörünün değeri de çıkış gerilimine göre seçilmelidir.

Endüktans ve kapasitans değerlerinin seçimi sistemin genel verimliliğini artırmak için kritik öneme sahiptir. Anahtarlama elemanlarının doğru seçimi ve optimize edilmiş kontrol algoritmaları güç kayıplarını minimize eder ve sistemin uzun vadeli güvenilirliğini sağlar. Bu tür devrelerin enerji verimliliği ve güç kalitesini artırma yetenekleri, modern enerji yönetim sistemlerinde önemli bir rol oynar [46].

2.2.2 Temel Köprüsüz PFC Devresi

Temel köprüsüz yükseltici PFC topolojisinde, giriş geriliminin pozitif alternansında S1 anahtarı iletimdeyken endüktans enerji depolar. S1 kesim durumuna geçtiğinde ise, depolanan enerji D1 diyotu üzerinden çıkışa aktarılır ve S2 anahtarı üzerinden kaynağa geri döner. Benzer şekilde, giriş geriliminin negatif alternansında S2 ve D2 elemanları aynı prensipte çalışır. Bu topoloji, düşük kayıp ve yüksek verimlilik sunar.



Şekil 2.2 Temel köprüsüz PFC devresi

Ancak, indüktör akımının algılanıp örneklenmesi gerektiğinden, bu topoloji karmaşık bir algılama devresi gerektirir [47].

Ayrıca S1 ve S2 anahtarlarının gövde diyotları CCM mooda kullanıma uygun değildir. Çünkü bu diyotlar yüksek frekanslı anahtarlama sırasında ek kayıplar ve bozulmalara neden olur. Bu durum PFC devresinin verimliliğini düşürür ve istenen güç faktörünü elde etmeyi zorlaştırır.

Temel köprüsüz PFC devresinde PFC'nin sağlanabilmesi için indüktörün endüktans değerinin yüksek olması gereklidir. Bu durum maliyeti artırır. Ancak düşük güç uygulamalarında tercih edilebilir. Yükseltici PFC topolojisine kıyasla köprüsüz yükseltici PFC topolojisi Akım her çevrimde iki yarı iletken elemanın iletime girmesi sebebiyle iletim kayıpları daha düşüktür dolayısıyla daha verimlidir.

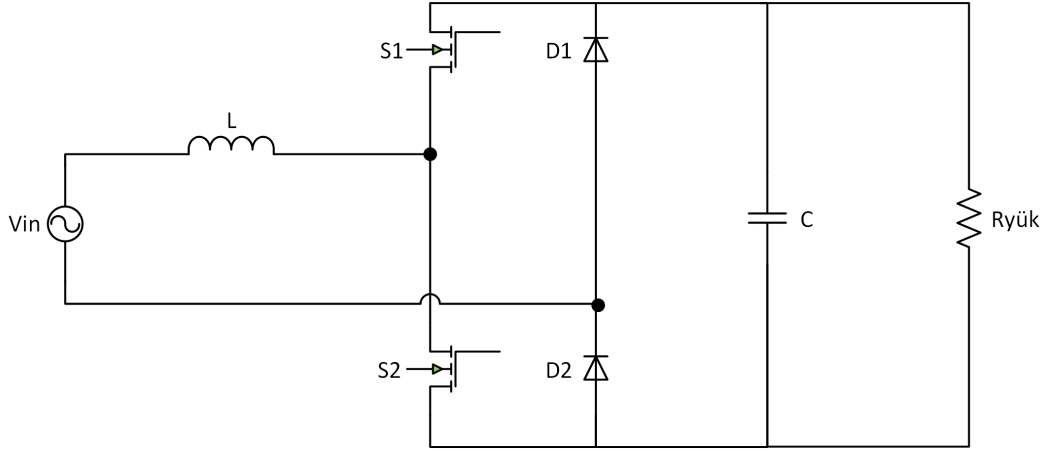
Ek olarak bu topolojinin etkinliği, kullanılan yarı iletken elemanların özelliklerine ve devre tasarımının optimize edilmesine bağlıdır. Doğru seçilmiş elemanlar ve uygun kontrol algoritmaları sistemin genel verimliliğini ve performansını artırır. Yükseltici PFC devrelerinin düşük maliyetli ve yüksek verimli tasarımı özellikle enerji tasarrufu ve sürdürülebilir enerji yönetimi açısından çok sık kullanılan bir devre olmasından kaynaklı olarak büyük önem taşır [48].

2.2.3 Totem Kutuplu Yükseltici PFC Devresi

AC-DC dönüştürücülerin mümkün olduğu kadar yüksek frekansta çalıştırılması prensibi, PFC'li AC-DC dönüştürücülerin geniş bir kullanım alanına sahip olmasına olanak tanır. Totem-Kutuplu Köprüsüz PFC dönüştürücüler, basit yapısı, kontrol kolaylığı ve yüksek güç yoğunluğu sebebiyle yaygın olarak kullanılır [35]. Totem-Kutuplu PFC dönüştürücülerin çalışma modları CCM, DCM ve CRM olmak üzere üçe ayrılır [49]. Sürekli iletim modu, düşük akım dalgalanmaları ve yüksek güç faktörü ile yüksek güçlü uygulamalar için uygundur, ancak bu modun sağlanması genellikle çift kontrol döngüsü gerektirir [50]. [50]'de konvansiyonel çift kapalı döngü kontrolü kullanılarak Si bazlı bir totem-kutuplu PFC dönüştürücüsünün CCM'de çalışması sağlanmış ve yüksek verim elde edilmiştir. Ancak, çift kapalı döngü kontrol yapısının karmaşık olması ve program kodunun yoğunluğu, yüksek frekanslarda gerçek zamanlı kontrol uygulamaları veya güç yoğunluğunun daha da artırılması açısından bazı zorluklar yaratabilir. Ayrıca, anahtarlama frekanslarının daha da artırılması, Si MOSFET'lerin ters toparlanması gibi istenmeyen kayıplara neden olabilir. Bu yüzden, ters toparlanma problemi olmayan geniş bant aralıklı yarı iletken malzemeler, özellikle silisyum karbür (SiC) ve galyum nitrat (GaN), giderek daha fazla ilgi görmektedir [51], [52].

Bu gelişmiş malzemeler, yüksek frekanslı uygulamalarda ve güç yoğunluğu gereksinimlerinde önemli avantajlar sunar. SiC ve GaN tabanlı yarı iletkenler,

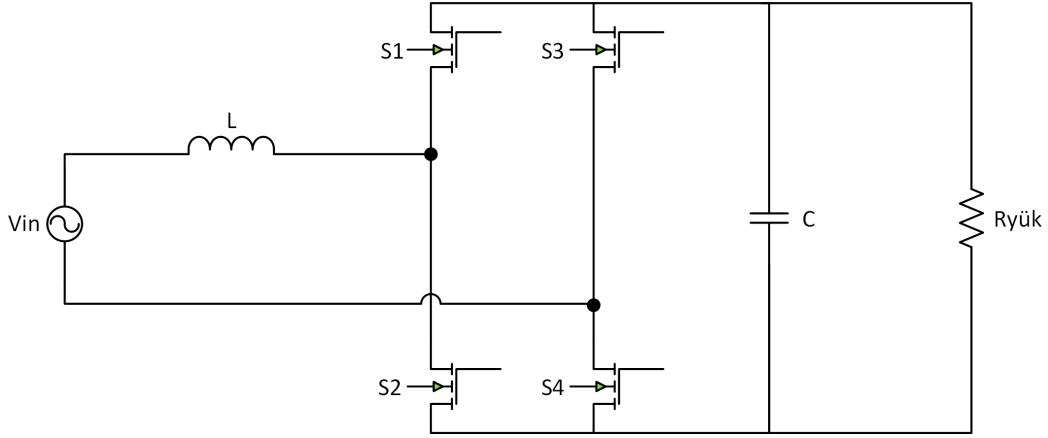
daha az kayıpla çalışarak enerji verimliliğini artırır ve güç elektroniği sistemlerinin performansını iyileştirir [53], [54].



Şekil 2.3 Totem kutuplu köprüsüz yükseltici PFC devresi diyotlu

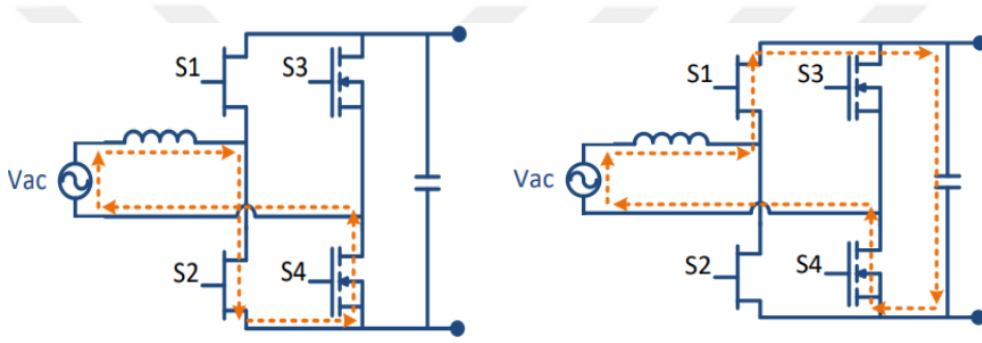
Totem kutuplu PFC devresi temel köprüsüz PFC devresinin anahtarlama elemanlarının konumunun değiştirilmesiyle elde edilir. Çalışma süreci boyunca düşük iletim kayıpları meydana gelir. Bu topoloji basit devre yapısı ve devre bileşenlerinin aktif ve yoğun bir biçimde kullanımı gibi özelliklere sahiptir. S1 ve S2 anahtarlarının bulunduğu hatta yüksek frekans hattı, D1-D2 diyotunun bulunduğu hatta ise düşük frekans hattı denir. S1 ve S2 MOSFET’leri GaN veya SiC MOSFET olarak tercih edilir. Ters toparlanma akımının çok düşük olması sebebiyle yüksek frekans uygulamalarında sıkça kullanılır. Düşük frekans hattında ise diyot veya Si MOSFET tercih edilir. Devre çalışma esnasında pozitif alternansta, ilk etapta S2 anahtarı ve D2 diyotu üzerinden endüktans şarj olur. Akabinde şarj olan endüktansın enerjisi ve şebekeden gelen enerji S1 anahtarı ve D2 diyotu üzerinden yükü besler. Bu durum pozitif alternansın tamamlanmasına kadar devam eder. Negatif alternansta ise S1 anahtarının açılması ile birlikte endüktans D1 diyotu ve S1 anahtarı üzerinden şarj edilir [53]. Akabinde endüktansın ve şebekenin enerjisi D1 diyotu ve S2 anahtarı üzerinden yükü besler. Pozitif alternansta D2 diyotu negatif alternansta ise D1 diyotu sürekli iletimdedir. Hem pozitif hem de negatif alternansta endüktans belirli döngülerde hem şarj edilip hem de enerji aktardığı için endüktans akımının algılanıp örneklenmesi bakımından bu topoloji karmaşık bir algılama devresi gerektirir, [54], [36].

Şekil 2.4’te, yukarıda bahsedilen D1 ve D2 diyotları yerine S3 ve S4 anahtarları kullanılmıştır. Bu durumda iletim güç kaybı azalacaktır. Şekil 2.3’te pozitif alternansta D2 diyotu ve negatif alternansta ise D1 diyotu sürekli olarak iletim halindedir. Şekil 2.4’te ise bu durum, D1 ve D2 diyotlarının yerini S3 ve S4 anahtarlarının almasıyla değiştirilmiştir. Şekil 2.5 pozitif alternansı, Şekil 2.6 ise



Şekil 2.4 Totem kutuplu köprüsüz yükseltici PFC MOSFET’li

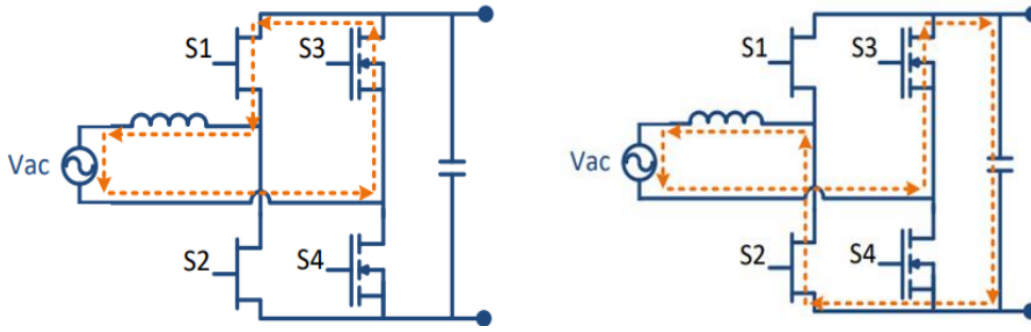
negatif alternansı göstermektedir.



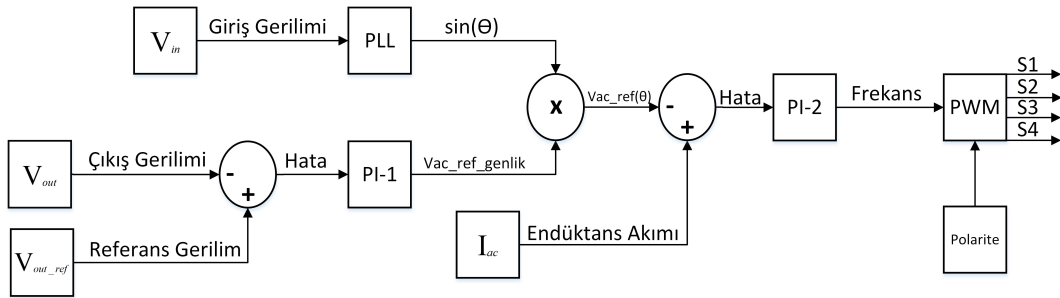
Şekil 2.5 Totem kutuplu köprüsüz yükseltici PFC MOSFET’li pozitif alternans [55]

PFC dönüştürücülerini kullanan güç şebekesi, dönüştürücü akımının endüktans akımıyla aynı olmasından dolayı giriş akımını da sürekli hale getirir. Genellikle sürekli iletim modlu PFC dönüştürücülerini sinüzoidal bir giriş akımı elde etmek için sabit frekansta anahtarlanır. PFC yükseltici dönüştürücülerdeki CCM modu düşük tepe akımı değerleri, anahtarlama elemanı iletim kayıplarının daha az olması ve kesime girme kayıplarının daha düşük olması gibi sebeplerden dolayı DCM ve CrCM modlarına kıyasla daha çok tercih edilir. GaN MOSFET’leri, yüksek güç yoğunluğu ve hızlı anahtarlama özellikleri nedeniyle totem pole güç dönüştürücülerinde yaygın olarak kullanılmaya devam etmektedir.

Şekil 2.7’de totem kutuplu PFC dönüştürücünün kapalı döngü kontrol şeması açıklanmaktadır. İlk olarak, AC giriş geriliminin algılanması gerekir ve gerilimin polaritesini tespit etmek için bir mekanizmaya ihtiyaç duyulur. Ayrıca, gerilimin mutlak değeri ve RMS değeri belirlenmelidir. Giriş gerilimi ile aynı fazda ve frekansta bir referans sinüs gerilimi elde edilir. Bu referans sinüs gerilimi, çıkış tarafından istenen gerilim olan referans gerilim ile gerçek çıkış gerilimi arasındaki



Şekil 2.6 Totem kutuplu köprüsüz yükseltici PFC MOSFET'li negatif alternans [55]



Şekil 2.7 Totem kutuplu köprüsüz PFC kontrolör

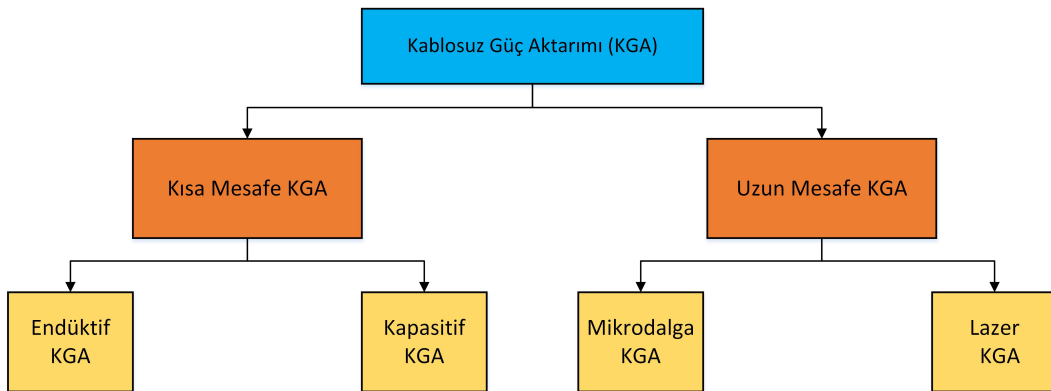
hata bulunarak bir PI denetleyicisine aktarılır. PI denetleyicisinin çıkışı, akım referansını belirlemek için giriş gerilimi aracılığıyla elde edilen referans sinüs gerilimi ile çarpılır. Sonrasında, bu çarpım sonucu elde edilen referans akım, gerçek indüktör akımı ile karşılaştırılır ve bir PI denetleyicisine aktarılır. Akım, pozitif ve negatif yarı döngüler sırasında indüktör üzerinden ters yönde aktığından, kontrolörde pozitif yarı döngü sırasında pozitif indüktör akımı I_L ve negatif yarı döngü sırasında negatif indüktör akımı $-I_L$ dikkate alınmalıdır. Son olarak, akım denetleyicisinin çıkışına dayalı olarak PWM sinyalleri oluşturulur. Bu aşamada, AC giriş geriliminin polaritesini dikkate alınmalıdır. Çünkü yüksek frekans anahtarlarının doluluk oranı pozitif ve negatif alternansta farklılık gösterir. Bu kontrol şeması, totem-kutuplu PFC dönüştürücünün verimli ve doğru bir şekilde çalışmasını sağlar.

Ek olarak, kapalı döngü kontrol sistemleri, PFC dönüştürücülerinin dinamik performansını artırmak için kritik öneme sahiptir. Doğru kontrol algoritmaları ve optimizasyon teknikleri sistemin kararlılığını ve enerji verimliliğini artırır. [56].

3

KABLOSUZ GÜÇ AKTARIMI

KGA elektriksel bağlantıların mümkün olmadığı veya istenmediği durumlarda iki nokta arasında enerji transferini sağlayan literatürde geniş geniş çapta araştırılan bir teknolojidir. Bu teknoloji elektriksel izolasyon sağlaması ve temassız güç transferi özelliği nedeniyle tercih edilmektedir. Elektrikli cihazların, özellikle mobil cihazların ve taşınabilir elektronik sistemlerin şarj işlemlerinde hızlı ve pratik çözümler sunması, kablolama gerektirmemesi zaman ve konfor kaybını önlemektedir. KGA, yalnızca kısa mesafeli uygulamalarla sınırlı kalmayıp, uzun mesafeli enerji aktarımı için de çeşitli kullanım alanlarına sahiptir. Örneğin uzaydan yeryüzüne veya yeryüzünden uzaya, hareket halindeki hava, deniz ve kara araçlarına enerji aktarmak için kablolamanın mümkün olmadığı veya zor olduğu sistemlerde kritik bir rol oynamaktadır. Ayrıca endüstriyel otomasyondan medikal cihazlara kadar geniş bir yelpazede de çalışılmaktadır. KGA, enerji verimliliğini artırırken, aynı zamanda bakım ve işletim maliyetlerini de düşürmektedir [57]. KGA yöntemleri Şekil 3.1’de gösterildiği üzere 4 grupta incelenir.



Şekil 3.1 KGA teknikleri

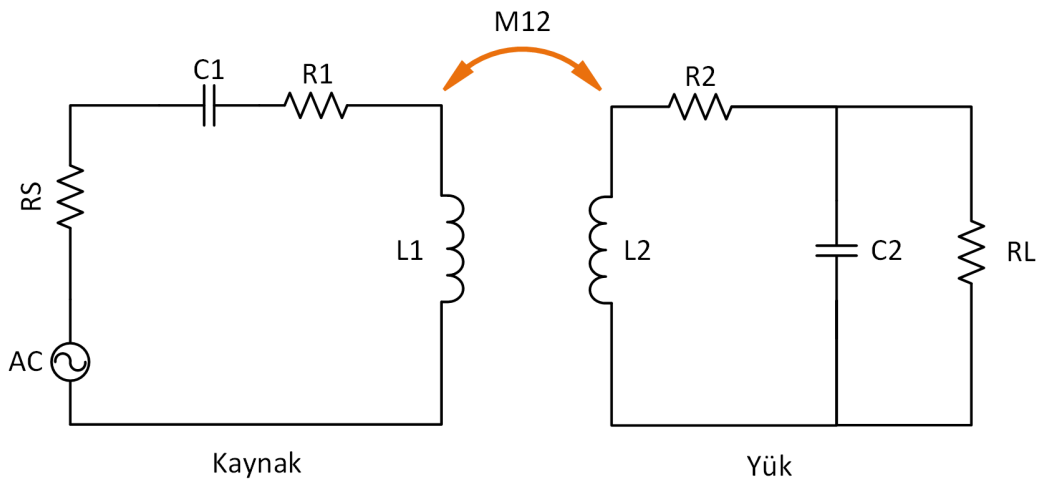
3.1 Endüktif KGA

Endüktif KGA yöntemi kablosuz enerji transferinin en yaygın ve etkili yöntemlerinden biridir. Bu yöntemde enerji transferi verici ve alıcı bobinler arasında manyetik alan kullanılarak gerçekleştirilir [58]. Verici bobine yüksek frekanslı AC akım uygulandığında bu bobin etrafında bir manyetik alan oluşur. Alıcı bobin bu manyetik alanın içerisinde yer aldığı anda, alıcı bobinde indüklenen elektromotor kuvveti (EMF) sayesinde enerji aktarımı sağlanır [59].

Endüktif KGA, genellikle kısa mesafelerde yüksek verimlilikle çalışır ve çeşitli taşınabilir elektronik cihazların şarj edilmesinde yaygın olarak kullanılır [60]. Elektrikli araçların kablosuz şarj istasyonları, ev içi kablosuz şarj üniteleri ve endüstriyel uygulamalarda otomasyon sistemleri gibi alanlarda büyük avantajlar sunar [61]. Bu yöntemin avantajları arasında güvenli ve hızlı enerji transferi, kullanıcı konforunun artırılması ve kablo kullanımının ortadan kalkmasıdır .

Endüktif KGA teknolojisi enerji kayıplarını minimize etmek amacıyla rezonans teknolojileriyle de desteklenebilir . Rezonanslı endüktif KGA sistemleri verici ve alıcı devrelerin rezonans frekanslarında çalıştırılması sayesinde daha yüksek verimlilik ve daha uzun aktarım mesafeleri sunabilir [62].

Bu teknoloji elektromanyetik uyumluluk ve güvenlik standartlarına uygun olarak tasarlandığında, medikal cihazlardan tüketici elektroniğine kadar geniş bir yelpazede güvenle kullanılabilir [63]. Ayrıca, gelişen teknoloji ile birlikte endüktif KGA sistemlerinin enerji transfer kapasitesi ve verimliliği sürekli olarak iyileştirilmektedir [64].



Şekil 3.2 Endüktif KGA devre şeması

Şekil 3.2'de endüktif kablosuz güç aktarımını temsil eden bir devre şeması

gösterilmiştir . Bu devre kaynaktan yüke enerji aktarımını manyetik indüksiyon prensibi ile gerçekleştirir. Şemada, kaynak tarafında RS, C1, R1, ve L1 elemanları yer almakta olup, bu elemanlar kaynak devresinin parçalarını oluşturur. Yük tarafında ise, R2, L2, C2 ve RL elemanları bulunmaktadır. M12, L1 ve L2 indüktörleri arasındaki manyetik bağlantıyı temsil eder. Kaynak tarafında AC akım kaynağı tarafından sağlanan enerji RS direnci üzerinden geçer ve C1 kapasitansı tarafından filtrelenir. R1 direnci ve L1 indüktörü enerjinin manyetik alan oluşturmak üzere depolanmasını sağlar. Bu manyetik alan M12 ile gösterilen bağlantı aracılığıyla L2 indüktörüne aktarılır. Yük tarafında L2 indüktörü tarafından alınan enerji C2 kapasitansı ve R2 direnci üzerinden geçerek RL yüküne iletilir. Bu yapı C2 kapasitansı tarafından sağlanan bir filtreleme işlemi ile enerji aktarımının stabil ve verimli olmasını sağlar.

Enerjinin verimli bir şekilde aktarılması için kaynak ve yük devrelerindeki elemanların doğru bir şekilde seçilmesi ve manyetik bağlantının etkin bir şekilde kurulması gereklidir.

3.2 Kapasitif KGA

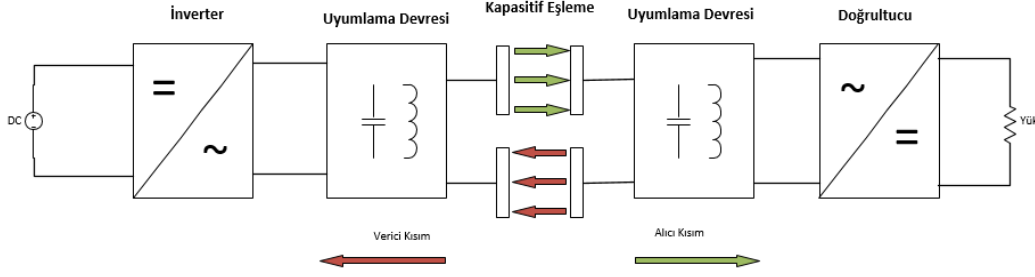
Kapasitif KGA, enerji transferinin elektrik alanları kullanılarak gerçekleştirildiği bir yöntemdir. Bu yöntemde enerji transferi verici ve alıcı elektrotlar arasındaki kapasitif bağlantı ile sağlanır [65]. Verici elektrotlara yüksek frekanslı AC sinyal uygulandığında, bu elektrotlar arasında bir elektrik alan oluşur. Alıcı elektrotlar bu elektrik alanın etkisiyle kapasitif bir bağlantı oluşturur ve böylece enerji transferi gerçekleşir [66].

Kapasitif KGA genellikle kısa mesafelerde kullanılır ve düşük güç uygulamaları için uygundur. Bu teknoloji özellikle taşınabilir elektronik cihazların ve medikal implantların kablosuz şarj edilmesinde yaygın olarak kullanılmaktadır . Kapasitif KGA'nın avantajları arasında düşük elektromanyetik parazit (EMI) üretimi, kompakt ve hafif tasarımlar ve güvenli enerji transferi sayılabilir [67].

Kapasitif KGA sistemlerinin verimi verici ve alıcı elektrotlar arasındaki kapasite değerini optimize ederek artırılabilir. Rezonans teknolojileri de bu sistemlere entegre edilerek daha yüksek verimlilik ve daha uzun mesafeli enerji transferi sağlanabilir [46].

Kapasitif KGA elektromanyetik uyumluluk (EMC) ve güvenlik standartlarına uygun olarak tasarlandığında, geniş bir yelpazede uygulama alanı bulabilir. Kapasitif KGA teknolojisinin enerji transfer kapasitesi ve verimliliği gelişen

malzeme bilimi ve elektronik devre tasarımlarıyla birlikte sürekli olarak iyileştirilmektedir. [68].



Şekil 3.3 Kapasitif KGA blok diyagramı [72]

Şekil 3.3'te kapasitif bir ortam kullanarak kablosuz güç aktarımı gerçekleştiren bir devrenin blok diyagramını göstermektedir. Bu tür sistemler enerji verimliliği ve güvenilirlik açısından oldukça avantajlıdır. İlk olarak sistemin giriş kısmından uygulanan doğru akım bir inverter tarafından alternatif akıma dönüştürülür. İnverterden gelen AC sinyali uyumlama devresine aktarılır. Uyumlama devresi genellikle bir endüktans ve kapasitanstan oluşur ve iletim hattının empedansını düzenleyerek enerji transferini optimize eder. Kapasitif eşleme ortamı enerji transferini sağlayan kapasitif bir ortamdır. Bu ortam verici ve alıcı arasında konumlanmıştır. Amacı ise kapasitif plakalar aracılığıyla elektrik alan oluşturmaktır. Oluşturulan bu elektrik alan enerjii vericiden alıcıya iletir.

Kapasitif ortamdan geçen enerji alıcı kısmındaki uyumlama devresine iletilir. Bu devre yine endüktans ve kapasitans bileşenlerinden oluşur ve enerji transferini alıcı devreye uyarlayacak şekilde optimize eder. Alıcı devredeki AC sinyali bir AC-DC doğrultucu tarafından tekrar doğru akıma dönüştürülür ve yük tarafından kullanılabilir forma dönüştürülür. Bu sayede kapasitif KGA yöntemi tamamlanmış olur.

Bu sistemin verimliliği, her bir bileşenin doğru tasarımı ve optimize edilmesi ile doğrudan ilişkilidir. Kapasitif ortamın kullanımı, enerji transferinde yüksek verimlilik sağlar ve elektromanyetik girişimi minimize eder [69].

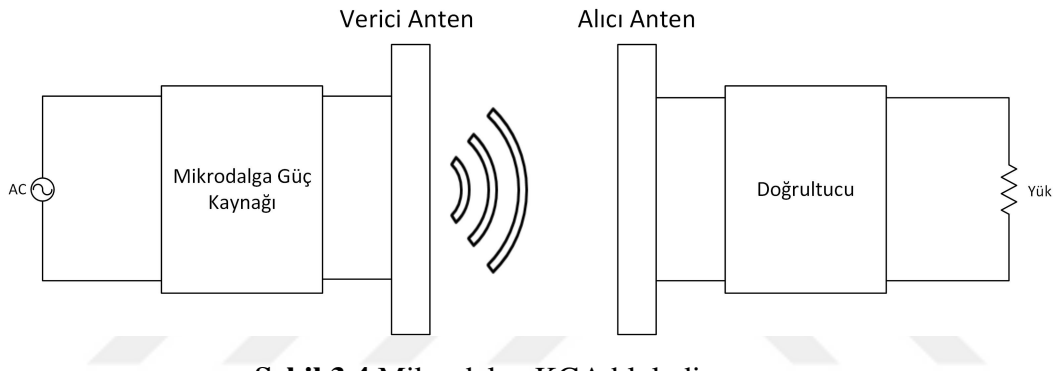
3.3 Mikrodalga KGA

MGA enerji transferi, mikrodalga frekanslarında elektromanyetik dalgaların kullanıldığı bir teknolojidir [70]. Bu yöntem özellikle yüksek güç gereksinimleri ve uzun mesafeli enerji transferi için uygundur. MGA sistemlerinde verici birim tarafından üretilen mikrodalga sinyalleri yönlendirilmiş bir ışın şeklinde alıcı birime iletilir [71]. Alıcı birim bu sinyalleri toplayarak elektrik enerjisine dönüştürür.

Mikrodalga KGA yöntemi genellikle uzaydan yeryüzüne enerji transferi, insansız hava araçlarının (İHA) güçlendirilmesi ve uzak mesafedeki cihazların kablosuz olarak çalıştırılması gibi uygulamalarda kullanılır [72].

Bu sistem verici ve alıcı birimlerin yüksek doğrulukla hizalanmasını gerektirir ve genellikle GHz aralığında çalışır. Anten tasarımı ve sinyal yönlendirme gibi ileri teknolojilerin entegrasyonu, mikrodalga KGA sistemlerinin verimliliğini artırmak için kritik öneme sahiptir [73].

Gelişen mikrodalga teknolojileri ve anten tasarım teknikleri MGA teknolojisinin enerji transfer kapasitesini ve verimliliğini sürekli olarak iyileştirmektedir. Bu iyileştirmeler daha uzak mesafelere ve daha yüksek güç seviyelerine enerji transferini mümkün kılar.



Şekil 3.4 Mikrodalga KGA blok diyagramı

Şekil 3.4'te mikrodalga frekansları kullanarak kablosuz güç aktarımını gösteren bir sistemin temel blok diyagramını sunmaktadır. Bu sistemde, güç kaynağı ve alıcı arasında enerji transferi mikrodalga teknolojisi kullanılarak gerçekleştirilir.

Sistemin verici bölümünde yer alan mikrodalga güç kaynağı şebekeden enerjisini alır ve bunu mikrodalga frekanslarına dönüştürür. Bu dönüşüm enerjinin kablosuz olarak iletilmesi için gerçekleştirilir. Mikrodalga güç kaynağı, ürettiği mikrodalgaları verici antene gönderir. Verici anten mikrodalga sinyallerini serbest uzaya yayar.

Mikrodalga sinyalleri alıcı anten tarafından yakalanır. Alıcı anten bu sinyalleri toplar ve bir doğrultu devresine iletir. Doğrultucu alınan mikrodalga sinyallerini DC gerilime dönüştürür. Bu dönüşüm enerjinin yüke iletilmesi için gerçekleştirilir.

MGA teknolojisi mikrodalga frekanslarının yüksek verimli enerji iletim kabiliyeti nedeniyle tercih edilir. Mikrodalga güç aktarımı özellikle uzak mesafeler arasında enerji transferi gerektiğinde kullanışlıdır.

3.4 Lazer KGA

LGA teknolojisi enerji transferini lazer ışınları kullanarak gerçekleştiren bir yöntemdir [19]. Bu teknoloji, lazer vericisi tarafından üretilen ışığın bir ışın demeti şeklinde alıcı birime yönlendirilmesiyle çalışır. Alıcı birim genellikle fotovoltaiik (FV) hücrelerle donatılmış olup gelen lazer ışığını elektrik enerjisine dönüştürür.

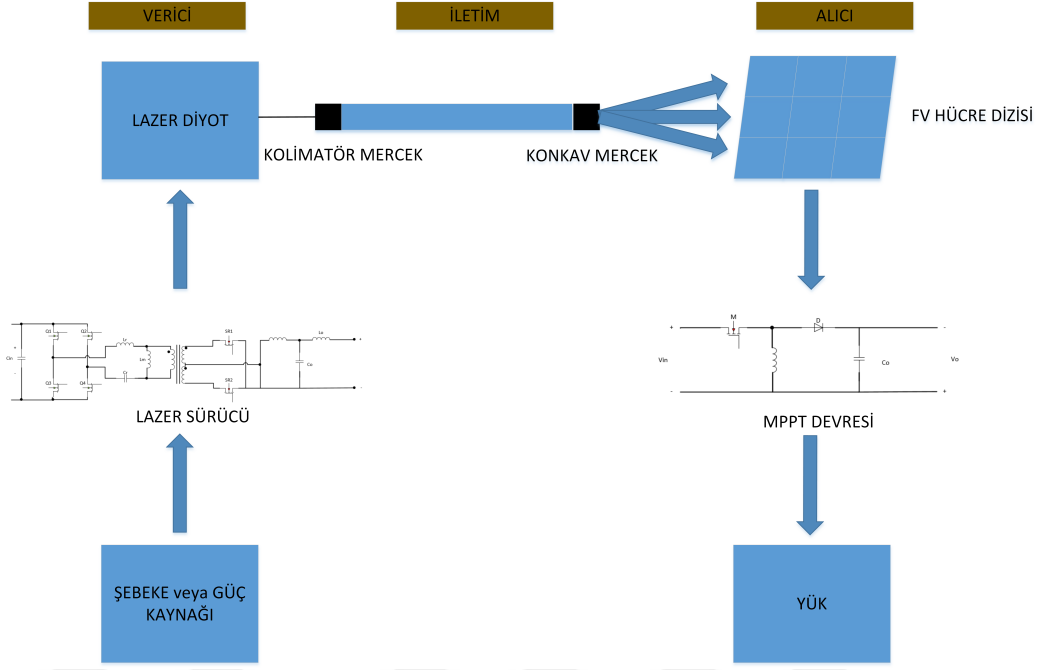
Lazer KGA, özellikle uzun mesafeli ve yüksek güçlü enerji transferi gerektiren uygulamalar için uygundur. Bu teknoloji uzaydan yeryüzüne enerji transferi, uzak mesafelerdeki sensörlerin güçlendirilmesi ve çeşitli askeri ve endüstriyel uygulamalarda yaygın olarak kullanılır. LGA'nın can alıcı avantajları arasında yüksek enerji yoğunluğu ve uzun mesafelerde etkin enerji transferi bulunmaktadır [74].

Lazer KGA sistemlerinin verimliliği lazer sürücü verimliliği, lazer ışınının uygunluğu, optik merceklerin verimi, FV hücrelerin dönüştürme verimliliği ve MPPT devresinin verimi gibi faktörlere bağlıdır [75]. Lazer ışınının düzgün bir şekilde odaklanması ve alıcı birime doğru şekilde yönlendirilmesi, enerji kaybını en aza indirerek verimliliği artırır. Ayrıca FV hücrelerin verimliliği, gelen lazer ışığının ne kadar etkili bir şekilde elektrik enerjisine dönüştürebildiğiyle doğrudan ilişkilidir [28].

Gelişen lazer teknolojileri ve fotovoltaiik malzeme bilimindeki ilerlemeler, LGA sistemlerinin enerji transfer kapasitesini ve verimliliğini sürekli olarak iyileştirmektedir. Özellikle daha yüksek güç kapasitelerine sahip lazerler ve daha verimli FV hücreler, lazer KGA sistemlerinin performansını önemli ölçüde arttırmaktadır [69].

LGA sisteminin genel şeması Şekil 3.5'te görülmektedir. Bu sistem verici, iletim ve alıcı bölümlerinden oluşur. Her bir bölüm enerji transferinin verimli ve etkili bir şekilde gerçekleştirilmesi için kritik öneme sahiptir. İlk olarak sistemin enerji kaynağı şebeke veya alternatif bir güç kaynağı olabilir. Bu kaynak lazer sürücüyü beslemek için gerekli olan elektrik enerjisini sağlar. Güç kaynağından elde edilen enerji lazer sürücü devresi aracılığıyla lazere uygun gerilim ve akım seviyelerinde aktarılır. Lazer, bu sürecin merkezinde yer alarak elektrik enerjisini yüksek yoğunluklu lazer ışınına dönüştürür. Bu lazer ışını sistemin diğer bileşenlerine enerji iletmek için yoğunlaştırılır ve yönlendirilir [76].

Lazer'den çıkan ışın, kolimatör mercek tarafından paralel bir ışın demeti haline getirilir. Bu paralel ışın demeti uzun mesafelerde sapmadan ilerleyebilme potansiyeline sahiptir. Böylece enerji kaybı minimize edilir ve ışının enerjisi



Şekil 3.5 Lazer KGA genel şeması

korunur. Paralel ışın demeti hale getirilmiş olan lazer ışını daha sonra konvav mercek tarafından alıcı birimdeki FV hücrelere odaklanır. Bu odaklama lazer ışınının enerjisini doğrudan FV hücrelere iletir. Optik bileşenlerin kullanımı Lazer ışın demetinin bütünlüğünü ve enerji yoğunluğunu mümkün mertebe bozmadan LGA sistemlerinin verimliliğini en üst düzeye çıkarır [34].

Alıcı bölümde FV hücre dizisi gelen lazer ışığını elektrik enerjisine dönüştürür. Bu hücreler lazer ışınıyla iletilen enerjiyi toplar ve elektrik enerjisine dönüştürür. Bu dönüştürme işleminin verimliliği, FV hücrelerin performansıyla doğrudan ilişkilidir. FV hücrelerinden elde edilen elektrik enerjisi maksimum güç noktası takibi (MPPT) devresi tarafından optimize edilir. MPPT devresi FV hücrelerin üretebileceği maksimum gücü yüke iletmeye programlanır. Son olarak dönüştürülen ve optimize edilen elektrik enerjisi çeşitli cihazlara veya sistemlere güç sağlamak için kullanılır.

4 LD SÜRÜCÜLERİ

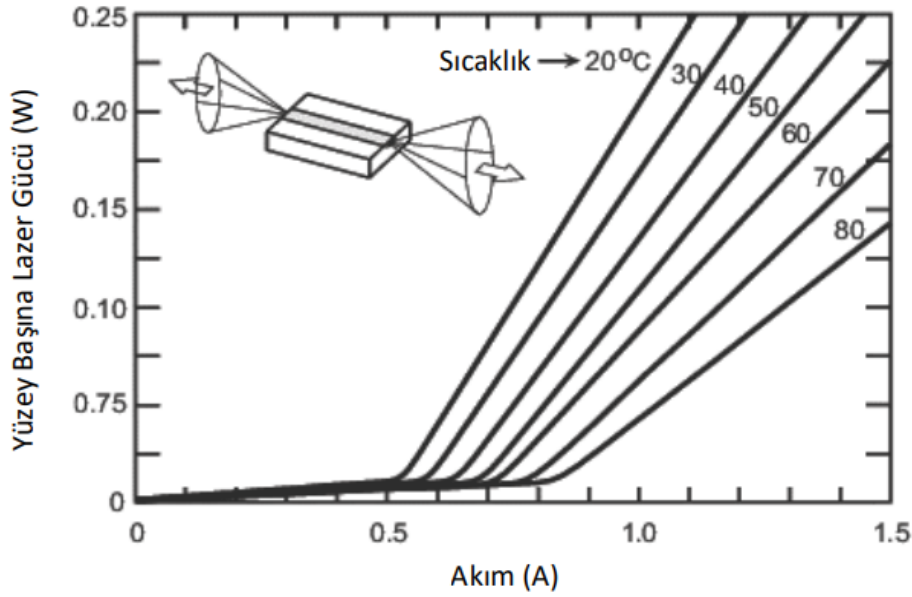
Lazerler, LGA sisteminin en önemli yapı taşlarından biridir. LGA sistemlerinde kullanılacak lazerin seçimi, birçok önemli faktörü göz önünde bulundurmaya gerektirir. Bu faktörler arasında havanın geçirgenliği ve lazer ışınının uzak mesafeye iletilebilme kapasitesi yer alır. Lazer ışınının parlaklığı, sistemin verimli çalışabilmesi için kritik bir unsur olarak öne çıkar. Atmosferde farklı dalga boylarındaki ışınların iletim verimliliği değişkenlik gösterir. Genel olarak, atmosferdeki iletim verimliliği yüksek olan bazı dalga boyları tercih edilir. Bu bağlamda, lazer ışınının 800 nm, 900 nm ve 1500 nm dalga boyları aralıkları, yüksek iletim verimliliği nedeniyle LGA uygulamaları için özellikle uygundur [76].

LGA sistemlerinde günümüzde çoğunlukla LD'ler kullanılmaktadır. Ancak geçmişte Nd:YAG ve disk lazerler de bu tür sistemlerde yer almıştır. Fiber ve disk lazerler gibi diyet pompalı katı hal lazerleri yüksek güç ve üstün ışın kalitesi sunarak yüksek güçlü ve uzun menzilli LGA sistemleri için uygun bir seçenek olmuştur. Ancak bu lazerlerin nispeten düşük verimliliği, büyük ölçekli LGA uygulamalarında kullanımlarını kısıtlayıcı bir faktör olmuştur.

Alternatif olarak yüksek güçlü LD'ler daha verimli, kompakt ve ekonomik çözümler sunmaktadır [77]. Bugüne kadar yapılan birçok çalışma LD'lerin LGA uygulamalarında etkili olduğunu ortaya koymuştur. Ayrıca LD teknolojisinin sürekli gelişimi, gelecekte yüksek güçlü LD'lerin daha yaygın hale gelmesini sağlayarak potansiyel büyük ölçekli LGA uygulamalarının önünü açacaktır [74].

Bu bağlamda LGA sistemlerinde lazer seçimi yapılırken hem lazerin atmosferdeki iletim verimliliği hem de uygulamanın gerektirdiği güç ve dalga boyu dikkate alınmalıdır. Uygun dalga boyunun seçimi ve lazerin performans özellikleri sistemin genel etkinliğini ve verimliliğini doğrudan etkileyen faktörlerdir. Yarı iletken lazerler çalışma prensipleri açısından belirli bir eşik akım ile tıpkı bir diyet gibi çalıştıkları için lazer diyet olarak adlandırılırlar. Şekil 4.1'de bir LD'nin karakteristik akım-ışınma gücü eğrisi gösterilmektedir. Bu eğri LD'nin sıcaklığa ve

akıma bağılı olarak gücün değişimini göstermektedir. LD'ler belirli bir eşik akımının üzerine çıkıldığında ışımaya yapabilirler.



Şekil 4.1 LD akım-ışınım gücü eğrisi [77]

Eşik akımının üzerinde lazer diyotunun çıkışındaki ışınım gücü, akımın artmasıyla birlikte belirli bir doyum bölgesine kadar artmaya devam eder. Doyum bölgesine ulaşıldığında ise akım arttırılmaya devam edilse bile LD'nin ürettiği ışımaya gücünde önemli bir artış gözlenmez. Bu durum, LD'lerin çalışma verimliliği açısından kritik bir noktadır.

Lazer diyotlarının performansı yalnızca akım ile değil aynı zamanda sıcaklık ile de doğrudan ilişkilidir. Sıcaklığın sabit tutulması koşuluyla akım arttıkça elde edilen ışınım gücü artar. Ancak sıcaklık arttığında lazer diyotunun ışımaya gücünde azalma meydana gelir. Bu durum lazer diyotlarının sıcaklık kontrolünün önemini vurgular. Yüksek sıcaklıklar LD'lerin verimini ve çıkış gücünü düşürebilir. Bu nedenle lazer diyotlarının çalışma sıcaklıklarının optimize edilmesi gerekir [78].

Bu özellikler, LD'lerin çeşitli uygulamalarda nasıl performans göstereceğini belirler ve bu nedenle lazer diyotlarının tasarımı ve işletiminde dikkate alınması gereken oldukça önemli faktörlerdir.

LD sürücüsü LD'lerin istenilen performans ve verimlilikle çalışmasını sağlar. LD'ye uygun akım ve gerilim sağlayarak lazer ışınının performansını doğrudan etkiler. Bu nedenle LD sürücüsünün tasarımı LGA sisteminin genel performansını doğrudan etkiler. LD sürücülerini tasarlanırken verimlilik, akım dalgalanması, dinamik yanıt, güç yönetimi ve tasarım karmaşıklığı gibi kriterler dikkate

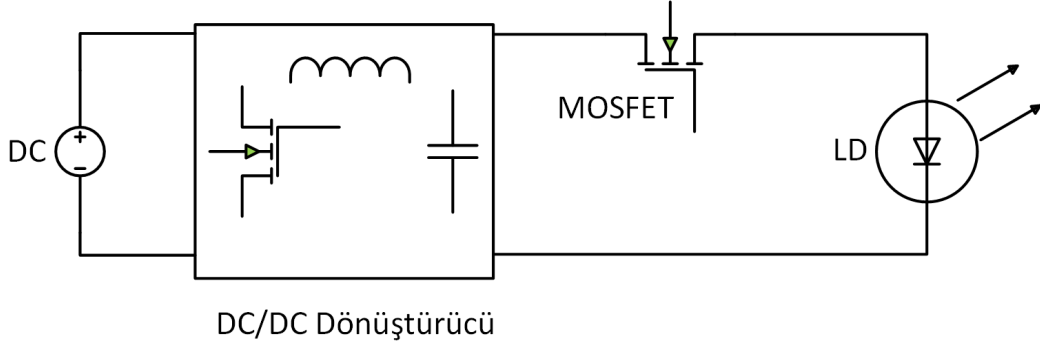
alınmalıdır. Verimlilik, enerji tüketimi ve ısıl yönetimi belirleyerek yüksek performans sunar ve özellikle yüksek güçlü uygulamalarda kritik bir rol oynar. Akım dalgalanmasının düşük olması lazerin düzgün ışın üretmesini sağlar ve LD'leri korur. Bu durum uzun süreli iletim için oldukça önemlidir. Dinamik yanıt LD'lerin hızlı ve değişen yük taleplerine yanıt verebilme yeteneğini ifade eder ve lazerin çeşitli uygulamalarda etkin bir şekilde kullanılmasını mümkün kılar. Güç yönetimi farklı güç seviyelerinde verimli çalışabilme yeteneğini belirleyerek sürücünün enerji tüketimini optimize eder ve yük değişikliklerine uyum sağlamasını sağlar. Tasarım karmaşıklığı ise üretim maliyetlerini ve bakım gereksinimlerini etkiler. Daha basit tasarımlar genellikle daha düşük maliyetli ve daha güvenilir olabilir ancak performans açısından sınırlamalar getirebilir. Bu parametrelerle oluşturulan LD sürücüleri karşılaştırma tablosu Tablo 4.1'de gösterilmiştir.

Tablo 4.1 LD Sürücü Türleri

LD Sürücü Türü	Verimlilik (%)	Akım Dalgalanması (%)	Dinamik Yanıt	Karmaşıklık	Güç Seviyesi
Lineer akım regülatörü	50-70	< 0.5	Orta	Basit	Düşük
Aktif dalgalanma filtreli [34]	85-90	0.1-0.5	Orta	Orta	Yüksek
Seri bağlantılı transistör anahtarlama [29]	70-85	0.5-2	Yüksek	Orta	Orta
Çift yönlü dönüştürücü ile paralel DC-DC dönüştürücü [23]	85-90	1-3	Orta	Yüksek	Yüksek
Tek aşamalı filtreli [28]	85-90	0.1-0.5	Orta	Orta	Yüksek

4.1 Lineer Akım Regülatörleri

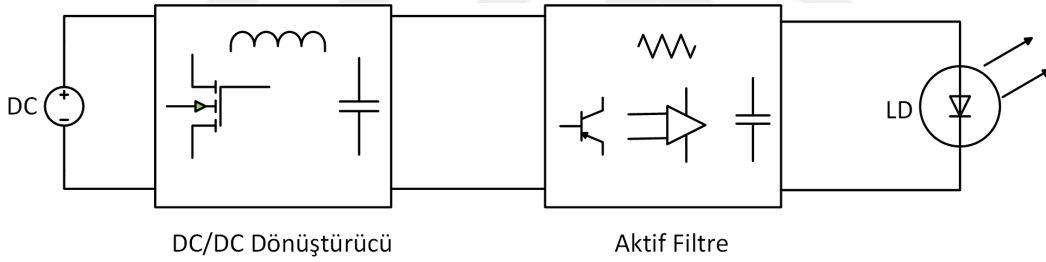
Lineer akım regülatörleri düşük güçlü lazer uygulamaları için uygundur. Bu sürücüler LD'nin ihtiyaç duyduğu akımı akım dalgalanması düşük olacak şekilde sunar. Akım dalgalanmaları yaklaşık $<0,5$ civarındadır. Verimlilikleri %50-70 arasında değişir. Basit yapıları nedeniyle düşük maliyetli ve güvenilir bir çözüm sunarlar ancak yüksek güç gerektiren uygulamalarda yüksek enerji kayıpları nedeniyle sınırlı kalırlar .



Şekil 4.2 Lineer akım regülatörlü LD sürücü

4.2 Aktif Dalgalanma Filtreli LD Sürücü

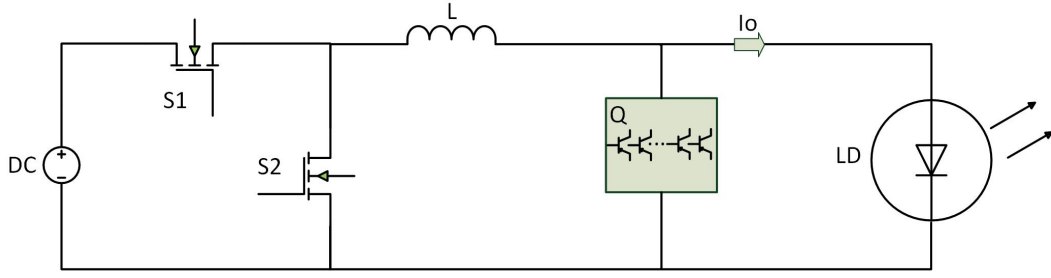
Aktif dalgalanma filtreli LD sürücü modeli Şekil 4.3’de gösterilmiştir. Bu sürücüler yüksek güç uygulamalarında %0,1-0,5 arasında düşük akım dalgalanması ile %85-90 arasında yüksek verimlilik sağlar. Dalgalanma filtreleme teknikleri LD’nin talebi olan akımı dalgalanması minimum olacak şekilde ileterek ısıl performansa yardımcı olur ve lazerin ışın kalitesini optimize eder. Bu sürücüler hem performans hem de verimlilik açısından avantaj sağlar [34].



Şekil 4.3 Aktif dalgalanma filtreli LD sürücü

4.3 Seri Bağlantılı Transistör Anahtarlama LD Sürücü

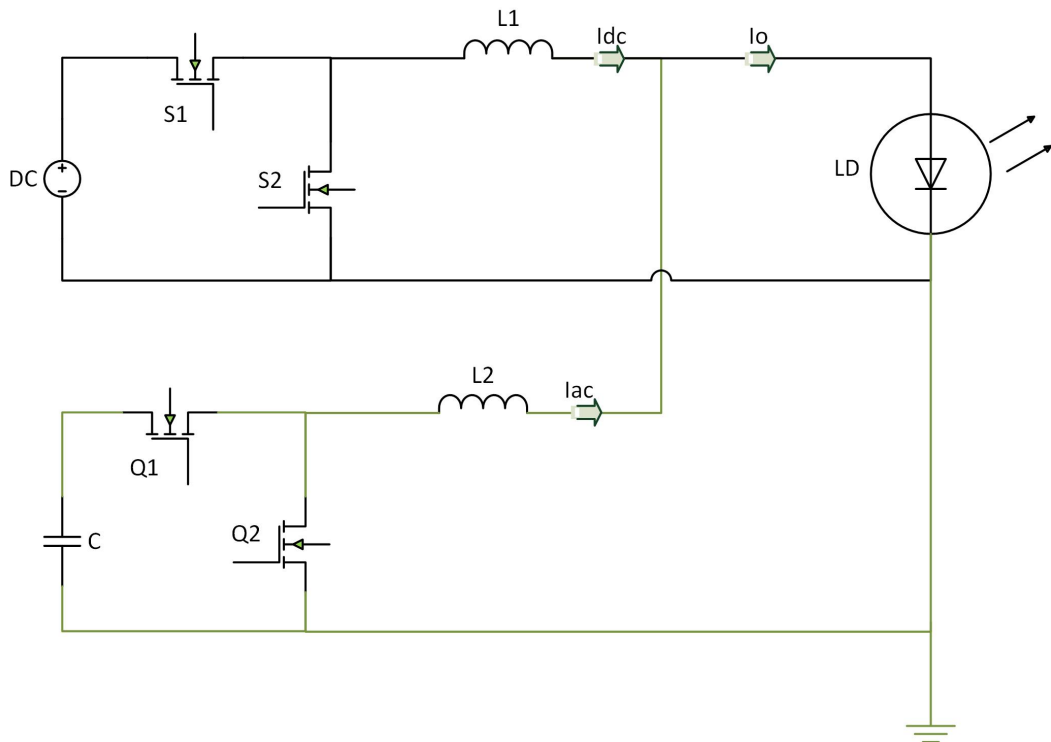
Seri bağlantılı transistör anahtarlama LD sürücü bir düşürücü dönüştürücü ve yüksek hızlı seri bağlantılı transistör grubu kullanarak LD’ye akım sağlar. %70-85 aralığında verimlilikle çalışır ve akım dalgalanması %0,5-2 arasındadır. Yüksek dinamik cevap hızı sayesinde ani değişen yük taleplerine etkin bir şekilde yanıt verir. Bu tür sürücüler yüksek dinamik yanıt gerektiren orta güç uygulamaları için uygundur [29] .



Şekil 4.4 Seri bağlantılı transistör anahtarlama LD sürücü

4.4 Çift Yönlü Dönüştürücü ile Paralel DC-DC Dönüştürücülü LD Dürücü

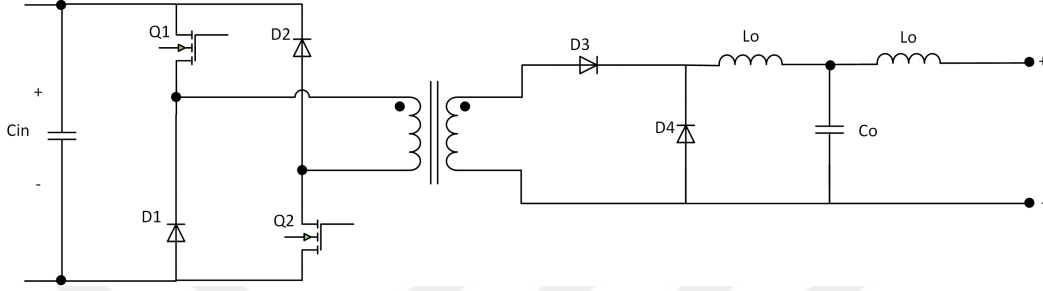
Çift yönlü dönüştürücü ile paralel DC-DC dönüştürücülü LD sürücü LD'nin ihtiyacı olan akımı sağlamak için bir DC-DC dönüştürücü ve depolama birimi olarak bir çift yönlü dönüştürücü kullanır. %85-90 aralığında yüksek verimlilik sağlar ve akım dalgalanması %1-3 arasında değişir. Yüksek güç yoğunluğu ve kompakt tasarımı ile öne çıkar, ancak tasarımın karmaşıklığı nedeniyle üretim ve bakım maliyetlerini yüksektir. Bu tür sürücüler, kompakt tasarım gerektiren yüksek güç uygulamaları için uygundur.



Şekil 4.5 Çift yönlü dönüştürücü ile paralel DC-DC dönüştürücülü LD sürücü

4.5 Tek Aşamalı Filtreli LD Sürücü

Tek aşamalı filtreli LD sürücü, iki transistör ve pasif filtre kullanılarak oluşturulan ileri yönlü dönüştürücü LD'ye ihtiyaç duyduğu akımı sağlar. Akım dalgalanmasını %0,1-0,5 gibi çok düşük seviyelerde tutan üçüncü dereceden pasif filtreler kullanır. Verimlilik %85-90 arasında değişir ve sistem yüksek güç yoğunluğu ile çalışır. Bu tür sürücüler hem performans hem de verimlilik açısından optimal çözümler sunarak yüksek güç yoğunluğu gerektiren uygulamalar için idealdir [28].



Şekil 4.6 Tek Aşamalı ileri yönlü dönüştürücü tabanlı filtrelili LD sürücü

LD sürücülerinin optimum tasarımı LGA sisteminin genel verimliliğini ve performansını doğrudan etkiler. LLC rezonans devresi bu amaç doğrultusunda LD sürücü olarak kullanılabilecek en uygun topolojilerden biri olarak öne çıkmaktadır.

LLC rezonans devresi modern güç elektroniği sistemlerinde yaygın olarak kullanılan bir topolojidir. Yüksek verimliliği ve geniş giriş gerilim aralığında çalışabilme yeteneği başlıca kullanım sebeplerindendir. Telekomünikasyon sektöründe sürekli güç gerektiren ekipmanlar için yüksek verimli ve sürekli olması, baz istasyonları ve veri merkezleri gibi yüksek kapasiteli telekomünikasyon altyapılarında enerji tasarrufu sağlar ve sistemin ısıl yönetimini optimize eder. Endüstriyel uygulamalarda ise, robotik sistemlerden otomatik montaj hatlarına kadar geniş bir yelpazede enerji verimliliğini artırarak operasyonel maliyetleri düşürür. Özellikle endüstriyel lazer kesim ve kaynak makinelerinde LLC devreleri sıklıkla kullanılır [79].

Tıbbi cihazlar, hassas enerji kontrolü gerektiren kritik uygulamalardır. LLC rezonans devreleri değişken giriş gerilimlerine karşı çok düşük dalgalanmalı çıkış gerilimi sağladığından tıbbi cihazların güvenli ve etkili bir şekilde çalışmasını destekler [80]. Yüksek hassasiyet gerektiren lazer cerrahi cihazları LLC devreleri kullanılarak enerji verimliliği ve operasyonel doğruluk elde eder. Elektrikli araç şarj sistemlerinde de LLC rezonans devreleri önemli bir rol oynar. Araçların bataryalarını yüksek verimlilikle şarj ederek enerji kaybını minimize eder. Bunun yanı sıra elektrikli araçların batarya yönetim sistemlerinde enerji tasarrufu ve hızlı şarj avantajları sunar. Bu sayede elektrikli araçların genel verimliliğini artırır ve

kullanım ömrünü uzatır [81].

Tüketici elektroniği alanında yüksek performanslı güç kaynakları gerektiren modern cihazlar için LLC rezonans devrelerisıklıkla tercih edilir. Dizüstü bilgisayarlar, akıllı telefonlar ve ev elektronik sistemleri gibi cihazlar LLC devreleri kullanarak daha uzun batarya ömrü ve düşük ısı kayıp sağlar. LLC devresi cihazların kompakt ve hafif tasarımlarla yüksek performans sunmasına yardımcı olur. Bu durum kullanıcı deneyimini iyileştirir ve cihazların güvenilirliğini artırır [80].

LLC rezonans devreleri geniş giriş gerilim aralığında çalışabilir ve çıkış gerilimini düşük dalgalanma seviyelerinde tutarlar. Bu durum şebeke bağlantılı LLC devresi çalışmalarının da önünü açmaktadır [82], [83].



5

PFC LLC LD SÜRÜCÜ TASARIMI

Farklı yük koşulları ve güç seviyelerinde yüksek verimlilikle çalışabilme yeteneği LLC devresinin LD sürücüsü olarak kullanılmasını mümkün kılar. Yüksek güç yoğunluğuna sahip olması LLC rezonans devrelerinin kompakt tasarımlar halinde üretilmesini sağlar. Bu özellik LGA sisteminin de kompakt yapıda olmasının önünü açacaktır.

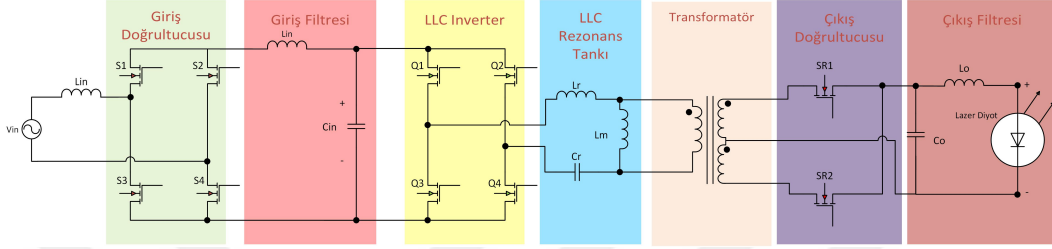
Bu tez çalışmasında LD sürücülerinin verimliliğini artırmak için önemli bir adım olarak tek aşamalı PFC'li AC-DC LLC dönüştürücüsü LD sürücüsü olarak tasarlanmıştır.

5.1 Sistem Tasarımı

LD'nin verimli bir şekilde çalışması için uygun bir sürücü tasarımı elzemdir. Bu bağlamda yüksek verimli bir LLC tabanlı izole edilmiş tek aşamalı PFC dönüştürücü LD taleplerini karşılamak için tasarlanmıştır. Önerilen LD sürücü devresi şeması Şekil 5.1'de görülmektedir

- Giriş Doğrultucu ve Filtresi: Giriş doğrultucusu kısmında S1-S4 anahtarları tam köprü yapılandırmasında senkron doğrultma sağlamak amacıyla kullanılır. Senkron doğrultma, konvansiyonel diyot köprüsüne kıyasla daha düşük iletim kayıpları sunar. Giriş filtresi bölümünde L_{in} ve C_{in} doğrultulmuş giriş akımını filtreleyerek harmonik bozulmaları azaltır ve düzgün bir giriş akımı sağlar.
- LLC Inverter ve Rezonans Tankı: LLC inverter kısmında Q1-Q4 anahtarları DC gerilimi yüksek frekanslı AC gerilime dönüştürür. Bu bölümde ZVS sağlanarak anahtarlama kayıpları minimize edilir. Rezonans kapasitesi C_r , rezonans endüktansı L_r ve transformatörün magnetizasyon endüktansı L_m , LLC rezonans tankını oluşturur. Enerji rezonans tankından transformatör aracılığıyla yüke iletilir.

- **Çıkış Doğrultucusu ve Filtresi:** Çıkış doğrultucu bölümünde SR1-SR2 anahtarları AC gerilimi DC gerilime dönüştüren tam dalga doğrultucusunu oluşturur. Konvansiyonel dört anahtarlı tam köprü doğrultucu yerine iki anahtarlı tam dalga doğrultucu kullanımı iletim kayıplarını azaltır. Çıkış filtre bölümünde L_o endüktansları ve C_o kapasitesi çıkış akımını filtreleyerek akım dalgalanmalarını minimuma indirir. Çıkış filtresi LD'nin düşük akım dalgalanması gereksinimini karşılamak için kritik bir rol oynamaktadır.



Şekil 5.1 Önerilen PFC LLC LD sürücüsü

5.1.1 Hesaplamalar

LLC dönüştürücünün kapasitif, endüktif ve rezistif olmak üzere üç çalışma bölgesi vardır. LLC devresinin hangi bölgede çalıştığı anahtarlama frekansına bağlıdır. LLC dönüştürücünün bu üç bölgede çalışması f_s anahtarlama frekansının f_p kritik rezonans frekansından yüksek veya düşük olmasına bağlıdır. Kritik rezonans frekansı f_p , mıknatıslandırma endüktansı L_m , rezonans endüktansı L_r ve rezonans kapasitesinin C_r birlikte rezonansa girdiği frekanstır. Kapasitif bölgede anahtarlama frekansı f_s denklem (5.1)'deki gibi hesaplanan ve transformatörün magnetizasyon endüktansının da rezonansa katıldığı kritik rezonans frekansı f_p 'den daha düşüktür, devre kapasitif davranış sergiler ve ZVS sağlanamaz. Bu durumda anahtarlama kayıpları artar ve devrenin verimliliği azalır. Kapasitif bölgede çalışmak LLC devresinin en az verimli olduğu bölgedir ve bu nedenle bu durumdan kaçınılması gereklidir.

$$f_p = \frac{1}{2\pi \sqrt{(L_r + L_m)C_r}} \quad (5.1)$$

Kritik rezonans frekansı verimlilik açısından devrenin çalışması gereken minimum frekanstır. Bu frekanstan daha düşük bir frekansta çalışmak ZVS sağlanamamasına ve dolayısıyla yüksek güç kayıplarına sebep olur. Bu nedenle hem rezonans frekansının hem de anahtarlama frekansının f_p kritik rezonans frekansından yüksek olması gerekir.

Rezonans frekansı denklem (5.2)'deki gibi hesaplanır.

$$f_r = \frac{1}{2\pi\sqrt{L_r C_r}} \quad (5.2)$$

LLC inverterin uygun frekans aralığının belirlenmesi ZVS sağlanmasıyla anahtarlama kayıplarını önemli ölçüde azaltır ve devrenin endüktif bölgede çalışmasını sağlar. Uygun frekans aralığı belirlenemezse LLC devresi kapasitif bölgede çalışır. Bu durum ZVS özelliğinin kaybolmasına ve dolayısıyla anahtarlama kayıplarının artmasına yol açar. Sonuç olarak, kapasitif bölgede çalışmak verimlilik kaybına neden olur.

Endüktif bölgede anahtarlama frekansı ancak kritik rezonans frekansından daha yüksek olduğunda sağlanır. Endüktif bölge ZVS özelliğinin sağlandığı minimum anahtarlama kayıpları ile çalışılan dolayısıyla verimin en yüksek olduğu optimum çalışma bölgesidir. Bu nedenle LLC devresinin endüktif bölgede çalışması hedeflenir.

LLC devresinin gerilim kazancı M , anahtarlama frekansı ile doğrudan ilişkilidir. Gerilim kazancı denklem (5.3)'teki gibi hesaplanır. M , transformatörün dönüşüm oranı ile birlikte giriş geriliminin çıkış gerilimine oranını belirler.

$$M_{LLC_total}(f_s, \Theta) = \frac{1}{2n} \cdot \frac{1}{\sqrt{\left(1 + \frac{1}{Y} \left(1 - \frac{f_r^2}{f_s^2}\right)\right)^2 + 4(\sin(\Theta))^4 \left(\frac{(f_s^2 - f_r^2)}{f_s f_r} Q_{full_load}\right)^2}} \quad (5.3)$$

Transformatörün dönüştürme oranı n denklem (5.4)'teki gibi hesaplanır.

$$n = \frac{N_p}{N_s} \quad (5.4)$$

Transformatörün mıknatıslandırma endüktansı L_m ile rezonans endüktansı L_r oranı Y olarak ifade edilir ve denklem (5.5)'teki kelimde hesaplanır.

$$Y = \frac{L_m}{L_r} \quad (5.5)$$

Denklem (5.3)'te verilen Q devrenin kalite faktörüdür ve denklem (5.6)'da gösterildiği şekilde hesaplanır.

$$Q_{\text{full_load}} = \frac{\pi^2}{8n^2} \cdot \frac{I_{\text{out}}}{V_{\text{out}}} \sqrt{\frac{L_r}{C_r}} \quad (5.6)$$

LLC devresinin kazanç değeri M giriş gerilimindeki değişikliklerle eşzamanlı olarak değişmelidir. AC-DC PFC uygulamalarında giriş geriliminin anlık olarak değişmesi nedeniyle LLC'nin kazanç noktası anlık olarak bu değişime ayak uydurmak durumundadır. Kazanç değerinin anlık olarak değişebilmesi LLC devresinin geniş bir giriş gerilim aralığında sabit bir çıkış sağlayabilmesini sağlar ve yüksek verimliliğin korunmasına yardımcı olur [83].

Bu parametreler LLC devresinin verimli bir şekilde çalışmasını ve ZVS özelliğini koruyarak yüksek verimlilik elde edilmesini sağlar. LD'lerin gereksinimi olan düşük dalgalanmalı ve eşik değerinin üzerindeki akım gereksinimlerini karşılamak için devrenin M değeri giriş gerilimindeki değişimlere bağlı olarak sürekli olarak değişir.

LD'nin modellemesi, diyotlara benzer elektriksel parametreleri göz önünde bulundurularak modellenmiştir. LD'nin direnç değeri denklem(5.7)'deki şekilde hesaplanır.

$$R_{\text{on}} = \frac{(V_{\text{op}} - V_{\text{th}})}{I_{\text{op}}} \quad (5.7)$$

Burada R_{on} LD'nin direncidir, V_{op} LD'nin çalışma gerilimi, V_{th} LD'nin eşik gerilimi ve I_{op} LD'nin çalışma akımıdır. Parametreler değerleri ile birlikte Tablo 5.1' de gösterilmiştir.

Tablo 5.1 LD parametreleri ve değerleri

Parametre	Değer
Eşik Akımı (A)	1,7 A
Eşik Gerilimi (V)	24 V
Çalışma Akımı (A)	20 A
Çalışma Gerilimi (V)	27,7 V

LD'nin düşük akım dalgalanma talebi göz önüne alındığında çıkış filtresi değeri yüksek olmalı ve PFC kontrolörü anlık olarak çıkış akımını izleyecek şekilde tasarlanmalıdır. Bu sebeple kontrolör akım değişimlerini izleyecek ve akım dalgalanmasını minimize edecek şekilde tasarlanmıştır. Bu durum kontrolörü konvansiyonel PFC kontrolörlerinden daha karmaşık hale getirmiştir.

5.1.2 Kontrolör Tasarımı

PFC LLC LD Sürücü Devresinin kontrol diyagramı Şekil 5.2’de gösterilmiştir. LD’nin gereksinimleri göz önüne alınarak tasarlanan kontrolör konvansiyonel PFC kontrolörlerinden bazı farklılıklar göstermektedir. Konvansiyonel PFC kontrolörlerinde devrenin istenen çıkış gerilimini elde etmek için PFC kontrolörüne talep edilen çıkış gerilimi seçilir. Ancak, Şekil 5.2’de görüldüğü üzere LD’nin sabit akım ve akım dalgalanmalarının minimize edilmesi gerekliliği dikkate alınarak LD’nin gereksinimlerini karşılamak amacıyla talep edilen çıkış akımını sürkeli olarak LD’nin talep ettiği akıma yakınsamak amacıyla I_{outref} PFC kontrolörünün referans sinyali olarak seçilmiştir. PI-1 ve PI-2 parametreleri Tablo 5.2’de verilmiştir.

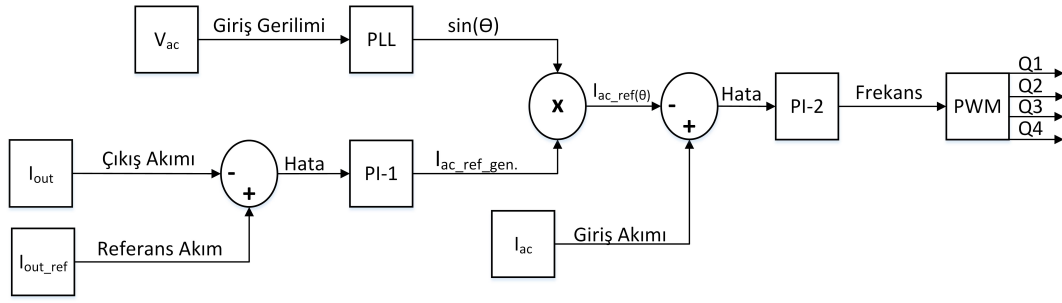
Tablo 5.2 PI-1 ve PI-2 parametreleri

PI-1 Parametreleri	Değer	PI-2 Parametreleri	Değer
K_{P1}	0,64706	K_{P2}	2000
K_{I1}	2,22	K_{I2}	500000000

Talep edilen çıkış akımı I_{outref} ’dır. LD’nin gereksinimlerini karşılamak amacıyla devrenin referans sinyali olarak çıkış akımı seçilmiştir. PI-1 $I_{ac_ref_gen.}$ değerini oluşturmak için kullanılır ve bu şekilde çıkış akımı düzenlenir. I_{outref} ve I_{out} arasındaki fark hata sinyalidir ve bu sinyal PI-1’in giriş parametresidir. $I_{ac_ref_gen.}$ sinyali talep edilen giriş akımının büyüklüğüdür. Faz Kilitleme Döngü PLL giriş gerilimi V_{ac} sinyalinden referans sinyalini almak için kullanılır. PLL V_{ac} ile aynı faz ve frekansta bir referans $\sin \theta$ sinyali üretir. PI-1’den elde edilen $I_{ac_ref_gen.}$ devrenin giriş akımının büyüklüğünü belirlemek için kullanılır ve PLL’den elde edilen $\sin \theta$ giriş akımının saf sinüs dalga şekline yakın dalga formunda olması için kullanılır. $I_{ac_ref_gen.}$ sinyali, referans $\sin \theta$ sinyalinin ve talep edilen giriş akımının büyüklüğünün çarpılmasıyla oluşturulur. $I_{ac_ref_gen.}$ talep edilen giriş akımıdır. Giriş akımı I_{ac} ile talep edilen giriş akımı $I_{ac_ref_gen.}$ arasındaki fark PI-2’nin giriş parametresidir. PI-2, Q1-4 anahtarlarının kapılarına uygun frekansı üretmek için kullanılır. Bu kontrolör sayesinde, LD’nin talep ettiği akım değeri ve düşük akım dalgalanmaları elde edilir.

5.1.3 Simülasyon Sonuçları

Önerilen tek aşamalı PFC LLC LD sürücüsünün simülasyonu, MATLAB Simulink kullanılarak gerçekleştirilmiş ve yukarıda belirtilen teorik hesaplamalar doğrulanmıştır. Simülasyon, 425 nano saniye örnekleme süresi ve 1 saniye süresince çalıştırılmış olup detaylı bir analiz sunmaktadır.



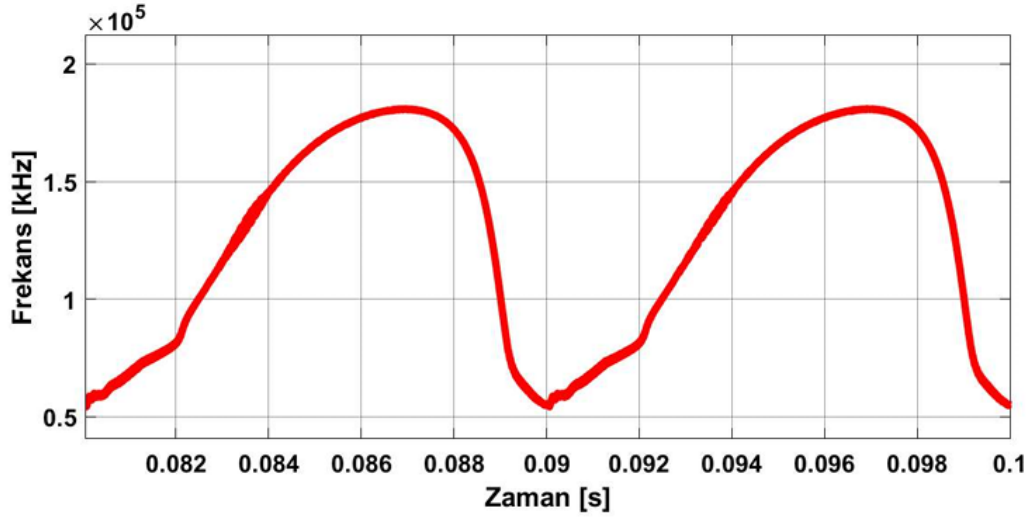
Şekil 5.2 Önerilen PFC LLC LD sürücüsü kontrolörü

Tablo 5.3 Devre Parametreleri

Parametre	Açıklama	Parametre	Açıklama
V_{in}	220 V	L_r	46 μ H
I_{in}	2,57 A	L_m	319,7 μ H
P_{in}	574,1 W	C_r	24 nF
V_{out}	27,7 V	n	7
I_{out}	20 A	f_s	54,2 kHz – 180,9 kHz
P_{out}	554 W	f_r	148,28 kHz
Verimlilik	96,5%	f_p	53,7 kHz
Çıkış Filtresi	900 μ H X2	S1-4 Anahtarları	600 V $R_{DS(on)} = 60$ m Ω
Çıkış Filtresi	50 mF	Q1-4 Anahtarları	650 V $R_{DS(on)} = 41$ m Ω
Y	7	SR1-2 Anahtarları	60 V $R_{DS(on)} = 2$ m Ω

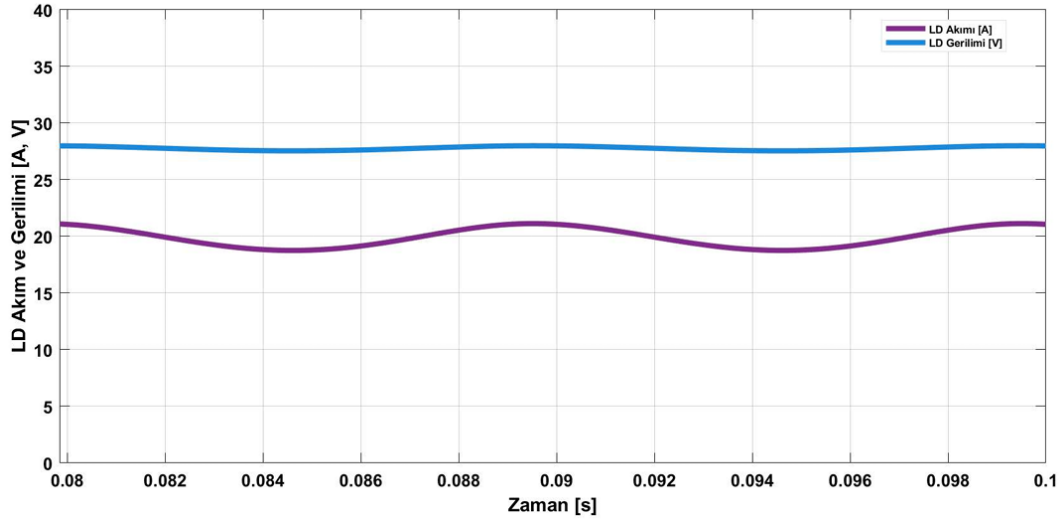
Tablo 5.3 simülasyonun elektriksel parametrelerini özetlemektedir. Simülasyon sonuçları önerilen sürücü devresinin LD'nin taleplerini başarıyla karşıladığını ve %96,5 gibi yüksek bir verimlilik elde edildiğini göstermektedir. Verimlilik, aktif ve pasif bileşenlerde meydana gelen kayıplardan kaynaklanmaktadır. Pasif bileşen kayıpları endüktans, kapasitans ve direnç nedeniyle oluşurken, aktif bileşen kayıpları anahtarlama kayıplarından kaynaklanır. LLC inverter bölümünde ZVS özelliğinin kullanılması, anahtarlama kayıplarını minimize ederek devrenin yüksek verimlilik sağlamasına katkıda bulunur. MOSFET'lerin $R_{DS(on)}$ değerlerinin düşük değerli olması da anahtarlama iletim kayıplarını minimumda tutarak verimliliği olabilecek en yüksek seviyede tutmaya katkı sağlamaktadır.

Giriş geriliminin bir periyodu süresince anahtarlama frekansının değişimi Şekil 5.3'te gösterilmiştir. Değişken giriş gerilimine bağlı olarak uygun M değerini elde etmek için anahtarlama frekansı sürekli olarak değişmektedir. Giriş gerilimi minimum değerindeyken minimum frekans elde edilir. Buna karşılıklı giriş gerilimi en değerine ulaştığında ise maksimum frekans elde edilir. Sistem performansını optimize etmek için, f_s frekansının tüm periyot boyunca sürekli olarak f_p frekansından yüksek tutulması esastır. Bu sayede ZVS sağlanarak sistem verimliliği artırılmış olur.



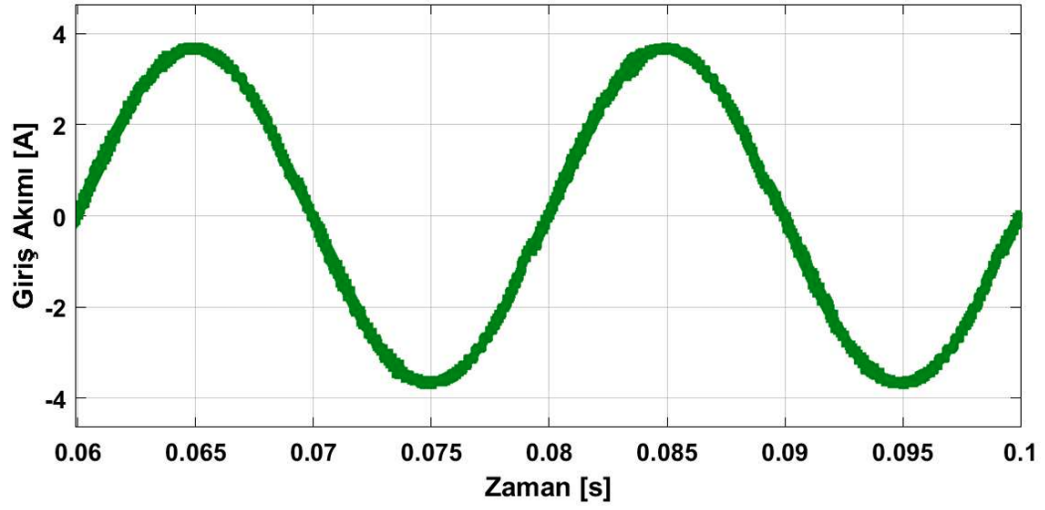
Şekil 5.3 Frekansın zamana bağlı değişimi

Şekil 5.4 LD'nin 27,7 V ve 20 A taleplerinin başarıyla karşılandığını göstermektedir. %5'e yakın akım dalgalanması, çıkış filtresi ve PFC kontrolörünün etkinliği sayesinde elde edilmiştir.

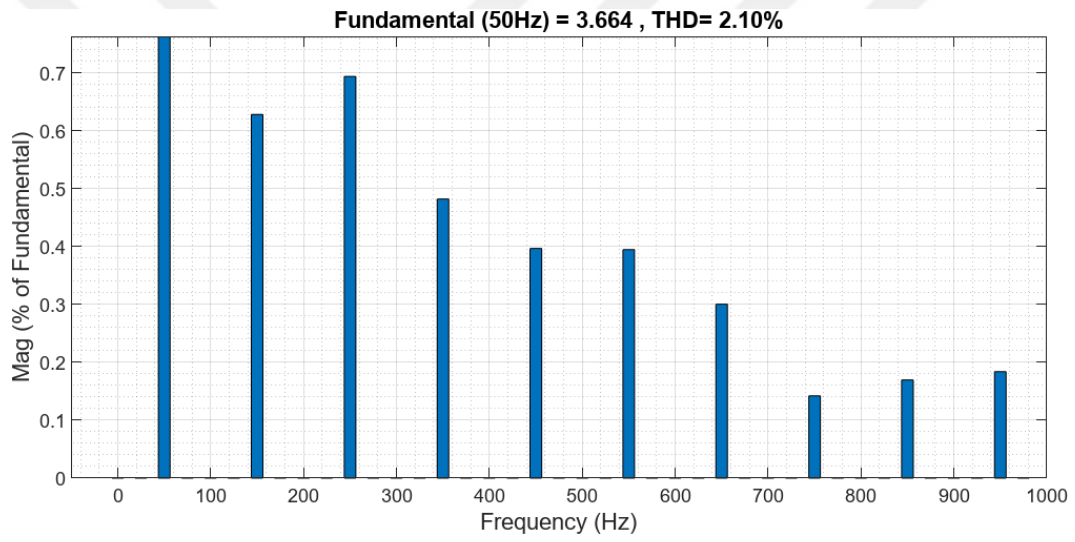


Şekil 5.4 LD akım ve gerilimi

Şekil 5.5(a)'da gösterildiği gibi giriş akımı neredeyse saf bir sinüs dalgası profili elde edildiğini ortaya koymaktadır. Ayrıca yine Şekil 5.5(b)'de gösterildiği üzere elde edilen düşük akım THD'si değeri olan %2,10, sistemin harmonik bozulmaları egale ettiğini göstermektedir. THD seviyelerindeki bu düşük değer PFC kontrolörünün giriş akım dalga formunu düzenlemedeki etkinliğini göstermekte ve böylece geliştirilmiş güç kalitesi ve azalmış elektriksel gürültü sağlamaktadır. Bu bulgular, önerilen yaklaşımın başarılı bir şekilde uygulandığını ve minimize edilmiş giriş akımı dalgalanması ile neredeyse ideal bir sinüzoidal giriş akımı üretilmesini sağladığını vurgulamaktadır.



(a)

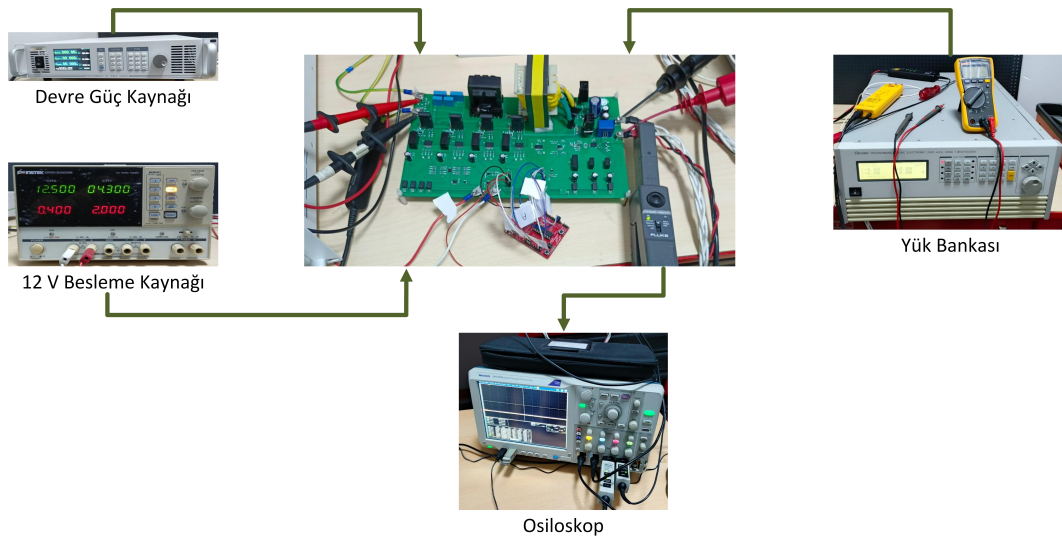


(b)

Şekil 5.5 Giriş Akımı ve THD Değeri

5.1.4 Deneysel Çalışma

Şekil 5.6'da LD sürücü için hazırlanan deney düzeneği görülmektedir. Bu deney setinde, devre güç kaynağı devrenin güç hattı beslemesi için kullanılmıştır. Devre güç kaynağı 200 V 5 A değeri ile sınırlandırılmıştır. 12 V besleme kaynağı ise devredeki gate driverları besleyen DC/DC dönüştürücüleri, akım-gerilim koruma devrelerini ve kontrolcü beslemektedir. Kontrolcü olarak Texas Instruments firmasının MSP430 geliştirme kiti kullanılmıştır. Yük bankası LD'nin akım ve gerilim ihtiyacını yansıtan LD ile çalışmadan önce kullanılan LD'nin yükünü temsil eden LD'nin değerleri ile aynı akım ve gerilim değerleri ile beslenmeye ayarlanmış kaynaktır. Osiloskop devreden akım, gerilim, frekans ve PWM sinyallerinin doluluk oranını ölçmek için kullanılmıştır.



Şekil 5.6 LD sürücü deney seti

5.1.4.1 Ön Sonuçlar

Şekil 5.7 10 ohm yük değerinde osiloskoptan ölçülen sonuçlar görülmektedir. Şekil 5.8 ise 5 ohm yük değerinde osiloskoptan ölçülen sonuçları göstermektedir. C1 kanalı yük bankasının akımını C2 kanalı yük bankasının gerilimini C3 kanalı devre güç kaynağından çekilen akımı, C4 kanalı devre güç kaynağının gerilimini göstermektedir. Şekil 5.7'den görüldüğü üzere 10 ohm yük değeri için bu değerler sırasıyla 2,91 A, 30,3 V, 572,3 mA, 201,1 V ölçülmüştür. Şekil 5.8'den görüldüğü üzere 5 ohm yük değeri için sırasıyla 5,294 A, 29,18 V, 930,4 mA, 201,5 V olarak ölçülmüştür.



Şekil 5.7 10 ohm değerinde ölçülen deneysel sonuçlar



Şekil 5.8 5 ohm değerinde ölçülen deneysel sonuçlar

6 SONUÇ

Bu tez çalışmasında ilk defa PFC dikkate alınarak LD sürücüsü tasarımı gerçekleştirilmiştir. LGA teknolojisi kapsamında LD sürücü sistemlerinin verimliliğinin artırılmasına yönelik katkılar sağlanmıştır. Literatürde belirtilen diğer LD sürücülerine kıyasla yüksek güç ve verimlilik sunmaktadır. Diğer şebeke bağlantılı devre topolojilerine kıyasla ek bir anahtara ihtiyaç duyulmaması nedeniyle daha az maliyetlidir. Ancak daha karmaşık bir kontrolör gerektirmektedir.

PFC'nin ve ZVS'in sağlanması bu tez çalışmasındaki önemli noktalardandır. LLC rezonans devresi yüksek frekansta çalışarak düşük kayıplarla enerji dönüşümünü sağlar. Bu durum LGA sisteminin toplam verimliliğini artırırken aynı zamanda ısı yönetimini de iyileştirir.

Önerilen LD sürücüsünün etkinliği %96,5 gibi yüksek bir verimlilik ve %2,10 gibi oldukça düşük giriş akım THD değeri ile vurgulanmaktadır. Bu yüksek verimlilik enerji tasarrufu sağlamakla kalmaz aynı zamanda LD'lerin uzun ömürlü ve güvenilir bir şekilde çalışmasına da katkıda bulunur. Düşük THD değeri harmonik bozulmaların minimize edilmesini sağlayarak güç kalitesini de artırır. Ayrıca LD gibi hassas cihazların da bozulmasını önler. LLC rezonans devresinin kullanımı sadece yüksek verimlilik sağlamakla kalmaz, aynı zamanda düşük akım dalgalanması ve sabit çıkış gerilimi ile LD'lerin çalışmasını iyileştirir.

Sonuç olarak bu tez çalışmasında LGA alanında LD sürücü devrelerinin verimliliğini ve performansını arttırmada katkı sağlanmıştır. Önerilen PFC LLC rezonans dönüştürücüsü enerji verimliliği ve güç kalitesi açısından üstün performans sunarak LD'lerin daha verimli ve güvenilir bir şekilde çalışmasını sağlamaktadır. Bu durum LGA teknolojisinin çeşitli uygulama alanlarında daha yaygın ve etkin bir şekilde kullanılmasına olanak tanımaktadır.

- [1] X. Lu, P. Wang, D. Niyato, D. I. Kim Z. Han, “Wireless Charging Technologies: Fundamentals, Standards, and Network Applications,” *IEEE Communications Surveys Tutorials*, c. 18, ss. 1413–1452, 2016.
- [2] A. Triviño, J. M. González-González J. A. Aguado, “Wireless Power Transfer Technologies Applied to Electric Vehicles: A Review,” *Energies*, c. 14, 2021.
- [3] S. Kim, G. A. Covic J. T. Boys, “Tripolar Pad for Inductive Power Transfer Systems for EV Charging,” *IEEE Transactions on Power Electronics*, c. 32, ss. 5045–5057, 2017.
- [4] S. Li C. C. Mi, “Wireless Power Transfer for Electric Vehicle Applications,” *IEEE Journal of Emerging and Selected Topics in Power Electronics*, c. 3, ss. 4–17, 2015.
- [5] K. Ramalingam C. Indulkar, “Overview of Plug-in Electric Vehicle Technologies,” *Power Systems*, c. 91, 2015.
- [6] M. N. Boukoberine, Z. Zhou M. Benbouzid, “A critical review on unmanned aerial vehicles power supply and energy management: Solutions, strategies, and prospects,” *Applied Energy*, c. 255, s. 113 823, 2019.
- [7] M. Shidujaman, H. Samani M. Arif, “Wireless Power Transmission Trends,” *2014 International Conference on Informatics, Electronics and Vision, ICIEV 2014*, IEEE, 2014, ss. 1–6.
- [8] J. H. Park, D. In Kim K. W. Choi, “Experiments and Modeling of 5.8GHz Microwave Wireless Power Transfer with Multiple Antennas,” *2020 IEEE Wireless Power Transfer Conference (WPTC)*, IEEE, 2020, ss. 115–118.
- [9] K. Jin W. Zhou, “Wireless Laser Power Transmission: A Review of Recent Progress,” *IEEE Transactions on Power Electronics*, c. 34, ss. 3842–3859, 2019.
- [10] F. Steinsiek, “Wireless power transmission experiment as an early contribution to planetary exploration missions,” *54th International Astronautical Congress of the International Astronautical Federation, the International Academy of Astronautics, and the International Institute of Space Law*, AIAA, 2003, R–3.
- [11] T. Blackwell, “Recent demonstrations of Laser power beaming at DFRC and MSFC,” *Beamed Energy Propulsion*, AIP, 2005, ss. 73–85.

- [12] N. Kawashima, K. Takeda, H. Matsuoka, Y. Fujii M. Yamamoto, "Laser Energy Transmission for a Wireless Energy Supply to Robots," *Proceedings of the 22nd International Symposium on Automation and Robotics in Construction*, International Association for Automation ve Robotics in Construction (IAARC), 2005.
- [13] U. Ortabasi H. Friedman, "Powersphere: A Photovoltaic Cavity Converter for Wireless Power Transmission using High Power Lasers," *2006 IEEE 4th World Conference on Photovoltaic Energy Conference*, IEEE, 2006, ss. 126–129.
- [14] N. Kawashima K. Takeda, "Laser energy transmission for a wireless energy supply to robots," *Robotics and Automation in Construction*, c. 10, ss. 373–380, 2008.
- [15] D. E. Raible, *High intensity laser power beaming for wireless power transmission*. Cleveland State University, 2008.
- [16] M. D. Smith H. W. Brandhorst, "Support to a Wireless Power System Design," DTIC, 2011.
- [17] J. Mukherjee, W. Wulfken, H. Hartje, F. Steinsiek, M. Perren S. J. Sweeney, "Demonstration of eye-safe (1550 nm) terrestrial laser power beaming at 30 m and subsequent conversion into electrical power using dedicated photovoltaics," *2013 IEEE 39th Photovoltaic Specialists Conference (PVSC)*, IEEE, 2013, ss. 1074–1076.
- [18] T. He ve diğ., "High-Power High-Efficiency Laser Power Transmission at 100 m Using Optimized Multi-Cell GaAs Converter," *Chinese Physics Letters*, c. 31, s. 104 203, 2014.
- [19] K. J. Duncan, "Laser based power transmission: Component selection and laser hazard analysis," *2016 IEEE PELS Workshop on Emerging Technologies: Wireless Power Transfer (WoW)*, IEEE, 2016, ss. 100–103.
- [20] Y. Katsuta T. Miyamoto, "Design and experimental characterization of optical wireless power transmission using GaAs solar cell and series-connected high-power vertical cavity surface emitting laser array," *Japanese Journal of Applied Physics*, c. 57, 08PD01, 2018.
- [21] D. E. Becker, R. Chiang, C. C. Keys, A. W. Lyjak, J. A. Nees M. D. Starch, "Photovoltaic-concentrator based power beaming for space elevator application," *AIP Conference Proceedings*, American Institute of Physics, 2010, ss. 271–281.
- [22] F. Träger, *Springer Handbook of Lasers and Optics*. Springer Handbook of Lasers ve Optics, 2012.
- [23] W. Zhou K. Jin, "Efficiency Evaluation of Laser Diode in Different Driving Modes for Wireless Power Transmission," *IEEE Transactions on Power Electronics*, c. 30, ss. 6237–6244, 2015.
- [24] *An Overview of Laser Diode Characteristics*. erişim adresi: <https://rb.gy/jcdivi> (erişim tarihi 20/06/2024).
- [25] H. Liu, Y. Zhang, Y. Hu, Z. Tse ve diğ., "Laser Power Transmission and Its Application in Laser-Powered Electrical Motor Drive: A Review," *Power Electronics and Drives*, c. 6, ss. 167–184, 2021.

- [26] H. Yigit A. R. Boynuegri, “Pulsed Laser Diode Based Wireless Power Transmission Application: Determination of Voltage Amplitude, Frequency, and Duty Cycle,” *IEEE Access*, c. 11, ss. 54 544–54 555, 2023.
- [27] F.-Z. Chen, Y.-C. Song F.-S. Ho, “An Efficiency Improvement Driver for Master Oscillator Power Amplifier Pulsed Laser Systems,” *Processes*, c. 10, 2022.
- [28] A. Sharma, C. Panwar R. Arya, “High power pulsed current Laser Diode driver,” *2016 International Conference on Electrical Power and Energy Systems (ICEPES)*, IEEE, 2016, ss. 120–126.
- [29] M. Thompson M. Schlecht, “High power laser diode driver based on power converter technology,” *IEEE Transactions on Power Electronics*, c. 12, ss. 46–52, 1997.
- [30] W. Zhou K. Jin, “Efficiency Evaluation of Laser Diode in Different Driving Modes for Wireless Power Transmission,” *IEEE Transactions on Power Electronics*, c. 30, ss. 6237–6244, 2015.
- [31] A. Sharma, C. Panwar R. Arya, “High power pulsed current Laser Diode driver,” *2016 International Conference on Electrical Power and Energy Systems (ICEPES)*, IEEE, 2016, ss. 120–126.
- [32] A. Arranz-Gimon, A. Zorita-Lamadrid, D. Morinigo-Sotelo O. Duque-Perez, “A Review of Total Harmonic Distortion Factors for the Measurement of Harmonic and Interharmonic Pollution in Modern Power Systems,” *Energies*, c. 14, 2021.
- [33] A. Arranz-Gimon, A. Zorita-Lamadrid, D. Morinigo-Sotelo O. Duque-Perez, “A Review of Total Harmonic Distortion Factors for the Measurement of Harmonic and Interharmonic Pollution in Modern Power Systems,” *Energies*, c. 14, 2021.
- [34] N. Poon, J. Liu M. Tse Chi an d Pong, “Techniques for input ripple current cancellation: classification and implementation [in SMPS],” *Power Electronics, IEEE Transactions on*, c. 15, ss. 1144–1152, 2000.
- [35] Y.-S. Kim, W.-Y. Sung B.-K. Lee, “Comparative performance analysis of high density and efficiency PFC topologies,” *IEEE transactions on power electronics*, c. 29, ss. 2666–2679, 2013.
- [36] L. Zhou, Y. Wu, J. Honea Z. Wang, “High-efficiency True Bridgeless Totem Pole PFC based on GaN HEMT: Design Challenges and Cost-effective Solution,” *Proceedings of PCIM Europe 2015; International Exhibition and Conference for Power Electronics, Intelligent Motion, Renewable Energy and Energy Management*, IEEE, 2015, ss. 1–8.
- [37] T. Mert, “Güç faktörü düzeltme yöntemlerinin incelenmesi ve bir uygulama devresinin gerçekleştirilmesi,” Yüksek Lisans Tezi, Yıldız Teknik Üniversitesi, İstanbul, Haziran 2007, ss. 14–72.
- [38] B. Akın, “Yeni bir yumuşak anahtarlamalı tek fazlı güç faktörü düzeltme devresinin geliştirilmesi ve gerçekleştirilmesi,” Doktora Tezi, Yıldız Teknik Üniversitesi Fen Bilimleri Enstitüsü, İstanbul, 2008, ss. 15–80.

- [39] H. Yeşilyurt, “Geliştirilmiş bir kayıpsız pasif bastırma hücreli pfc devresinin tasarımı ve gerçekleştirilmesi,” Yüksek Lisans Tezi, Yıldız Teknik Üniversitesi, İstanbul, Haziran 2013, ss. 10–50.
- [40] K. Y. Kaya, *İleri yönlü – geri dönüşlü tabanlı yeni bir tek aşamalı PFC topolojisinin geliştirilmesi*, Yüksek Lisans Tezi, İstanbul, Ekim 2016.
- [41] G. Yanık, “Güç faktörü düzeltme devrelerinin incelenmesi ve bir uygulama devresinin gerçekleştirilmesi,” Yüksek Lisans Tezi, Yıldız Teknik Üniversitesi, İstanbul, Haziran 2010, ss. 12–35.
- [42] B. M. Hasaneen A. A. Elbaset Mohammed, “Design and simulation of DC/DC boost converter,” *2008 12th International Middle-East Power System Conference*, IEEE, 2008, ss. 335–340.
- [43] J. P. M. Figueiredo, F. L. Tofoli B. L. A. Silva, “A review of single-phase PFC topologies based on the boost converter,” *2010 9th IEEE/IAS International Conference on Industry Applications - INDUSCON 2010*, IEEE, 2010, ss. 1–6.
- [44] *How the Boost PFC Converter Circuit Improves Power Quality*. erişim adresi: <https://www.allaboutcircuits.com/technical-articles/how-the-boost-pfc-converter-circuit-improves-power-quality/>.
- [45] D. de Castro Pereira, M. Silva, E. Silva F. Tofoli, “Comprehensive review of high power factor AC-DC boost converters for PFC applications,” *International Journal of Electronics*, c. 102, ss. 1361–1381, 2014.
- [46] J. P. M. Figueiredo, F. L. Tofoli B. L. A. Silva, “A review of single-phase PFC topologies based on the boost converter,” *2010 9th IEEE/IAS International Conference on Industry Applications - INDUSCON 2010*, IEEE, 2010, ss. 1–6.
- [47] Y.-S. Kim, W.-Y. Sung B.-K. Lee, “Comparative Performance Analysis of High Density and Efficiency PFC Topologies,” *IEEE Transactions on Power Electronics*, c. 29, ss. 2666–2679, 2014.
- [48] E. Firmansyah, S. Tomioka, S. Abe, M. Shoyama T. Ninomiya, “A critical-conduction-mode bridgeless interleaved boost power factor correction,” *INTELEC 2009 - 31st International Telecommunications Energy Conference*, IEEE, 2009, ss. 1–5.
- [49] W. Y. SUN Zhan, “Soft switch control transformation based on totem pole bridgeless PFC,” c. 41, s. 70, 2022.
- [50] K. Zhu, M. O’Grady, J. Dodge, J. Bendel J. Hostetler, “1.5 kW single phase CCM totem-pole PFC using 650V SiC cascodes,” *2016 IEEE 4th Workshop on Wide Bandgap Power Devices and Applications (WiPDA)*, IEEE, 2016, ss. 90–94.
- [51] Z. Zhang, S. Li, X. Li, P. Cheng Q. Luo, “A High Efficiency Totem-pole Bridgeless PFC Converter in CCM Mode,” *Zhongguo Dianji Gongcheng Xuebao/Proceedings of the Chinese Society of Electrical Engineering*, c. 42, ss. 1957–1967, 2022.

- [52] J. Sun, L. Zhu, R. Qin, D. J. Costinett L. M. Tolbert, “Single phase GaN-based T-Type totem-pole rectifier with full-range ZVS control and reactive power regulation,” *IEEE Transactions on Power Electronics*, c. 38, ss. 2191–2201, 2022.
- [53] M.-H. Park, J. Baek, Y. Jeong G.-W. Moon, “An Interleaved Totem-Pole Bridgeless Boost PFC Converter with Soft-Switching Capability Adopting Phase-Shifting Control,” *IEEE Transactions on Power Electronics*, c. 34, ss. 10 610–10 618, 2019.
- [54] M.-H. Park, J. Baek, Y. Jeong G.-W. Moon, “An Interleaved Totem-Pole Bridgeless Boost PFC Converter with Soft-Switching Capability Adopting Phase-Shifting Control,” *IEEE Transactions on Power Electronics*, c. 34, ss. 10 610–10 618, 2019.
- [55] *CoolGaN™ totem-pole PFC design guide and power loss modeling*. erişim adresi: https://www.infineon.com/dgdl/Infineon-Design_guide_Gallium_Nitride-CoolGaN_totem-pole_PFC_power_loss_modeling-ApplicationNotes-v01_00-EN.pdf?fileId=5546d4626d82c047016d95daec4a769a (erişim tarihi 20/06/2024).
- [56] L. Xie, Y. Shi, Y. T. Hou A. Lou, “Wireless power transfer and applications to sensor networks,” *IEEE Wireless Communications*, c. 20, ss. 140–145, 2013.
- [57] F. Lu, H. Zhang, H. Hofmann C. Mi, “A Double-Sided LCLC-Compensated Capacitive Power Transfer System for Electric Vehicle Charging,” *IEEE Transactions on Power Electronics*, c. 30, ss. 6011–6014, 2015.
- [58] C. Park, S. Lee, G.-H. Cho C. T. Rim, “Innovative 5-m-Off-Distance Inductive Power Transfer Systems With Optimally Shaped Dipole Coils,” *IEEE Transactions on Power Electronics*, c. 30, ss. 817–827, 2015.
- [59] C. C. Mi, G. Buja, S. Y. Choi C. T. Rim, “Modern Advances in Wireless Power Transfer Systems for Roadway Powered Electric Vehicles,” *IEEE Transactions on Industrial Electronics*, c. 63, ss. 6533–6545, 2016.
- [60] J.-Q. Zhu, Y.-L. Ban, R.-M. Xu C. C. Mi, “An NFC-Connected Coupler Using IPT-CPT-Combined Wireless Charging for Metal-Cover Smartphone Applications,” *IEEE Transactions on Power Electronics*, c. 36, ss. 6323–6338, 2021.
- [61] C. Lecluyse, B. Minnaert M. Kleemann, “A Review of the Current State of Technology of Capacitive Wireless Power Transfer,” *Energies*, c. 14, 2021.
- [62] L. Huang, A. P. Hu, A. Swain, S. Kim Y. Ren, “An overview of capacitively coupled power transfer — A new contactless power transfer solution,” *2013 IEEE 8th Conference on Industrial Electronics and Applications (ICIEA)*, IEEE, 2013, ss. 461–465.
- [63] M. T. Arslan K. Erkan, “Manyetik Rezonans Kuplaj Yöntemiyle Kablosuz Güç Aktarımı Üzerine Literatür Taraması,” *Avrupa Bilim ve Teknoloji Dergisi*, ss. 118–125, 2022.
- [64] F. Lu, H. Zhang C. Mi, “A Review on the Recent Development of Capacitive Wireless Power Transfer Technology,” *Energies*, c. 10, 2017.

- [65] R. Erfani, F. Marefat, S. Nag P. Mohseni, "A 1–10-MHz Frequency-Aware CMOS Active Rectifier With Dual-Loop Adaptive Delay Compensation and >230-mW Output Power for Capacitively Powered Biomedical Implants," *IEEE Journal of Solid-State Circuits*, c. 55, ss. 756–766, 2020.
- [66] M. Tamura, Y. Naka, K. Murai T. Nakata, "Design of a Capacitive Wireless Power Transfer System for Operation in Fresh Water," *IEEE Transactions on Microwave Theory and Techniques*, c. 66, ss. 5873–5884, 2018.
- [67] E. Abramov, J. M. Alonso M. M. Peretz, "Analysis and behavioural modelling of matching networks for resonant-operating capacitive wireless power transfer," *IET Power Electronics*, c. 12, ss. 2615–2625, 2019.
- [68] X. Zhu, K. Jin, Q. Hui, W. Gong D. Mao, "Long-Range Wireless Microwave Power Transmission: A Review of Recent Progress," *IEEE Journal of Emerging and Selected Topics in Power Electronics*, c. 9, ss. 4932–4946, 2021.
- [69] X. Yi, X. Chen, L. Zhou, S. Hao, B. Zhang X. Duan, "A Microwave Power Transmission Experiment Based on the Near-Field Focused Transmitter," *IEEE Antennas and Wireless Propagation Letters*, c. 18, ss. 1105–1108, 2019.
- [70] S. Sasaki, K. Tanaka K.-i. Maki, "Microwave power transmission technologies for solar power satellites," *Proceedings of the IEEE*, c. 101, ss. 1438–1447, 2013.
- [71] *A step forward for space solar power*. erişim adresi: <https://www.thespacereview.com/article/1210/1> (erişim tarihi 20/06/2024).
- [72] S. Bai, "Wireless power transfer technologies for electric vehicles: Principles, challenges and opportunities," *Journal of Physics: Conference Series*, c. 2649, s. 012 065, 2023.
- [73] L. Summerer O. Purcell, "Concepts for wireless energy transmission via laser," 2008.
- [74] T. He ve diğ., "Analysis and Experiment of Laser Energy Distribution of Laser Wireless Power Transmission Based on a Powersphere Receiver," *Photonics*, c. 10, 2023.
- [75] Y. Wang ve diğ., "Organic laser power converter for efficient wireless micro power transfer," *Nature Communications*, c. 14, s. 5511, 2023.
- [76] *A Practical Guide to Handling Laser Diode Beams*. erişim adresi: <https://endurancelasers.com/wp-content/uploads/2021/02/A-Practical-Guide-to-Handling-Laser-Diode-Beams-Springer-Netherlands-2015.pdf> (erişim tarihi 14/06/2024).
- [77] *Fundamentals of Laser Diode Control*. erişim adresi: <https://www.newport.com/n/laser-diode-control> (erişim tarihi 14/06/2024).
- [78] S. De Simone, C. Adragna, C. Spini G. Gattavari, "Design-oriented steady-state analysis of LLC resonant converters based on FHA," *International Symposium on Power Electronics, Electrical Drives, Automation and Motion, 2006. SPEEDAM 2006.*, IEEE, 2006, ss. 200–207.

- [79] Y. Wei, Q. Luo, J. Chen H. Alan Mantooth, “Analysis and design of LLC resonant converter with variable magnetising inductance control,” *IET Power Electronics*, c. 13, ss. 3528–3536, 2020.
- [80] T. Zheng H.-J. Kim, “Research on the medical Nd:YAG laser power system using LLC resonant converter,” *2015 IEEE International Conference on Advanced Intelligent Mechatronics (AIM)*, IEEE, 2015, ss. 1694–1698.
- [81] H. Luo ve diğ., “Power Boundary Controlled Single-Stage LLC Power Factor Correction Converter and Its Optimal Parameter Design,” *IEEE Transactions on Industrial Electronics*, c. 70, ss. 12 219–12 232, 2023.
- [82] J. Zeng, G. Zhang, S. S. Yu, B. Zhang Y. Zhang, “LLC resonant converter topologies and industrial applications — A review,” *Chinese Journal of Electrical Engineering*, c. 6, ss. 73–84, 2020.
- [83] M. Forouzesh, Y.-F. Liu P. C. Sen, “A Line Cycle Synchronous Rectification Strategy Based on Time-Domain Analysis for Single- Stage AC–DC LLC Converters,” *IEEE Transactions on Power Electronics*, c. 38, ss. 5077–5091, 2023.

TEZDEN ÜRETİLMİŞ YAYINLAR

Makale

1. A. Y. Sarı, A. R. Boynuegri 'DESIGN OF AN EFFICIENT LASER DIODE DRIVER WITH SINGLE STAGE POWER FACTOR CORRECTION', Clean Energy Technologies Journal, 2024 basım aşaması

Proje

1. Lazer Kullanılarak Yüksek Verimli ve Uzun Mesafeli Kablosuz Güç Aktarımı, Ali Rıfat BOYNUEĞRİ, 121E564, 1.04.2022 - 1/10/2024, Bursiyer