

**T.C.
ERZİNCAN BİNALİ YILDIRIM ÜNİVERSİTESİ
FEN BİLİMLERİ ENSTİTÜSÜ**

YÜKSEK LİSANS TEZİ

**GÖRÜNÜR IŞIK HABERLEŞMESİNDE KULLANILAN
İZOLESİZ DC-DC GÜÇ DÖNÜŞTÜRÜCÜLERİNİN
KARŞILAŞTIRMALI ANALİZİ VE BİR DÜŞÜRÜCÜ DC-DC
DÖNÜŞTÜRÜCÜ UYGULAMASININ GERÇEKLEŞTİRİLMESİ**

Tuba ŞENOCAK

Danışman: Doç. Dr. Naim Süleyman TİNÇ

**ELEKTRİK ELEKTRONİK MÜHENDİSLİĞİ
ANABİLİM DALI**

ERZİNCAN

2022

Her Hakkı Saklıdır.

ÖZET

Yüksek Lisans Tezi

GÖRÜNÜR IŞIK HABERLEŞMESİNDE KULLANILAN İZOLESİZ DC-DC GÜÇ DÖNÜŞTÜRÜCÜLERİNİN KARŞILAŞTIRMALI ANALİZİ VE BİR DÜŞÜRÜCÜ DC-DC DÖNÜŞTÜRÜCÜ UYGULAMASININ GERÇEKLEŞTİRİLMESİ

Tuba ŞENOCAK

Erzincan Binali Yıldırım Üniversitesi
Fen Bilimleri Enstitüsü
Elektrik Elektronik Mühendisliği Anabilim Dalı

Danışman: Doç. Dr. Naim Süleyman TING

Bu tez çalışmasında görünür ışık haberleşmesinde yaygın olarak kullanılan izolesiz DC-DC güç dönüştürücüleri incelenmiştir. Görünür ışık haberleşmesinde bu dönüştürücülerin sistem içerisindeki çalışmaları analiz edilmiştir. Dönüştürücülerin analizleri için görünür ışık haberleşmesi yapılan bir benzetim çalışması gerçekleştirilmiştir. Bu çalışma ile veri aktarımı gerçekleştirilirken sistem içerisinde önemli bir kısım olan verici için tasarım yapılmıştır. Vericinin çalışması esnasında güç elektroniği dönüştürücülerinin davranışları üzerinde durulmuştur.

Bu tezin amacı görünür ışık haberleşme sistemleri içerisinde yer alan güç elektroniği dönüştürücülerin tasarım yapılırken yol gösterici olabilecek bazı özelliklerin incelenmesidir. Tezde benzetim çalışmasında elde edilen sonuçlar kıyaslanmıştır. Bu sonuçlardan yola çıkarak gerçek hayatta kullanılabilecek bir görünür ışık haberleşme sistemi üzerinde çalışılarak bir prototip geliştirilmiştir. Geliştirilen prototip aracılığıyla güç elektroniği dönüştürücüsü olan düşürücü tür DC-DC dönüştürücü kullanılarak görünür ışık haberleşmesi ile veri aktarımı başarılı şekilde sağlanmıştır.

2022, 75 Sayfa

Anahtar Kelimeler: Düşürücü DC-DC dönüştürücü, Görünür ışık haberleşmesi, Güç elektroniği dönüştürücüleri

ABSTRACT

MSc Thesis

COMPARATIVE ANALYSIS OF NON-ISOLATED DC-DC POWER CONVERTERS USED IN VISIBLE LIGHT COMMUNICATION AND IMPLEMENTATION OF A BUCK DC-DC CONVERTER

Tuba ŞENOCAK

Erzincan Binali Yildirim University
Graduate School of Natural and Applied Sciences
Department of Electrical and Electronics Engineering

Supervisor: Assoc. Prof. Dr. Naim Süleyman TINÇ

In this thesis, non-isolated DC-DC power converters, which are widely used in visible light communication, are examined. In visible light communication, the operation of these converters in the system has been analyzed. For the investigation of converters, a simulation research based on visible light communication has been performed. With this study, a design was made for the transmitter, which is an important part of the system while data transfer is being carried out. The behavior of power electronics converters during transmitter operation focused on.

This thesis aims to examine some features that can be guiding while designing power electronic converters in visible light communication. In this thesis, the results are obtained in the simulation were compared. Based on these results, a prototype has been developed by working on a visible light communication system that can be used in real life. Visible light communication and data transfer have been successfully achieved by using a buck DC-DC converter, which is a power electronics converter, through the developed prototype.

2022, 75 Pages

Keywords: Buck DC-DC converter, Power electronics converter, Visible light communication

TEŞEKKÜR

Yüksek lisans eğitimim süresince danışmanlığımı yürüten, tez çalışmamda değerli bilgilerini benimle paylaşan, bu sürecin her aşamasında bana destek veren ve yol gösteren sayın hocam Doç. Dr. Naim Süleyman TING' a tüm değerli katkılarından dolayı sonsuz teşekkürlerimi sunarım. Hayatım boyunca her zaman ve her koşulda benim yanımda olan ve bana daima destek olan aileme teşekkür ederim.

Tuba ŞENOCAK

Aralık, 2022

İÇİNDEKİLER

ÖZET.....	i
ABSTRACT	ii
TEŞEKKÜR	iii
İÇİNDEKİLER	iv
ŞEKİLLER LİSTESİ.....	vi
SİMGELER ve KISALTMALAR	ix
1. GİRİŞ.....	1
2. KAYNAK ÖZETLERİ	3
3. KURAMSAL TEMELLER.....	9
3.1. Görünür Işık Haberleşmesinin Temelleri	9
3.1.1. Görünür ışık haberleşme sisteminin temel bileşenleri	9
3.1.2. Modülasyon teknikleri.....	10
3.1.3. Veri kodlama yöntemleri.....	13
3.1.4. Optik güç dönüşümleri	15
3.2. İzolesiz DC-DC Güç Dönüştürücüleri	18
3.2.1. Düşürücü (Buck) DC-DC dönüştürücü	20
3.2.2. Yükseltici (Boost) DC-DC dönüştürücü	24
3.2.3. Düşürücü- Yükseltici (Buck - Boost) DC-DC dönüştürücü.....	26
4. MATERYAL VE YÖNTEM	29
4.1. VLC Uygulamalarında Kullanılan İzolesiz DC-DC Dönüştürücülerin İncelenmesi ve Simülasyon Sonuçları	29
4.2. VLC Uygulamalarında Düşürücü DC-DC Dönüştürücü Kullanımı ve Simülasyonu	33
4.3. VLC Uygulamalarında Yükseltici DC-DC Dönüştürücü Kullanımı ve Simülasyonu	45

4.4. VLC Uygulamalarında Düşürücü-Yükseltici DC-DC Dönüştürücü Kullanımı ve Simülasyonu	54
4.4.1. Simülasyon çalışması sonuçları	62
5. ARAŞTIRMA BULGULARI	63
5.1. Düşürücü DC-DC Dönüştürücülü Örnek VLC Uygulaması.....	63
5.2. Uygulama Çalışmasının Temel Kısımları	63
5.2.1. VLC verici devresi	63
5.2.2. VLC alıcı devresi	66
5.3. Deneysel Sonuçlar	67
6. SONUÇLAR ve TARTIŞMA	70
KAYNAKLAR	72

ŞEKİLLER LİSTESİ

Şekil 3.1. VLC sisteminin genel blok şeması	10
Şekil 3.2. Temel modülasyon şeması.....	11
Şekil 3.3. OOK sinyali dalga şekli (Chi, 2018)	12
Şekil 3.4. Sayısal verinin iletimi	13
Şekil 3.5. Manchester kodlayıcı (AI-Sammak vd., 1992).....	14
Şekil 3.6. Manchester kodlama şeması	14
Şekil 3.7. Manchester kod çözücü devresi (AI-Sammak vd., 1992).....	14
Şekil 3.8. Manchester kodlayıcı ve kod çözücüye ait dalga şekilleri (AI-Sammak vd., 1992)	15
Şekil 3.9. Boş uzayda yayılma modeli.....	16
Şekil 3.10. TIA genel gösterimi (Höher, 2019)	18
Şekil 3.11. DC-DC dönüştürücüler (Bodur, 2014)	18
Şekil 3.12. Anahtarlama DC-DC dönüştürme yöntemi ve temel dalga şekilleri	19
Şekil 3.13. PWM blok şeması ve karşılaştırma sinyalleri.....	20
Şekil 3.14. (a) Düşürücü dönüştürücü devre şeması (b) İletim modu devre şeması (c) Kesim modu devre şeması (d) Temel dalga şekilleri	22
Şekil 3.15. (a) Yükseltici dönüştürücü devre şeması (b) İletim modu devre şeması (c) Kesim modu devre şeması (d) Temel dalga şekilleri	25
Şekil 3.16. (a) Düşürücü-Yükseltici dönüştürücü devre şeması (b) İletim modu devre şeması (c) Kesim modu devre şeması (d) Temel dalga şekilleri.....	27
Şekil 4.1. VLC vericisi genel gösterim (Teixeira vd., 2019)	30
Şekil 4.2. Sabit gerilim kaynaklı LED sürücü topolojisi	31
Şekil 4.3. Gerilim kaynağı modeli ve çıkış gerilimi (Teixeira vd., 2022)	31
Şekil 4.4. Sabit akım kaynağı kontrollü	32
Şekil 4.5. Akım kaynağı modeli ve çıkış grafiği (Teixeira vd., 2022).....	32

Şekil 4.6. DC-DC düşürücü dönüştürücü kullanılan bir VLC uygulaması.....	34
Şekil 4.7. DC-DC düşürücü dönüştürücü temelli SSM VLC topolojisi	34
Şekil 4.8. DC-DC düşürücü dönüştürücü kullanılan VLC verici devresi.....	35
Şekil 4.9. DC-DC düşürücü dönüştürücü kullanılan VLC simülasyon çalışması	36
Şekil 4.10. Giriş sinyali, clock sinyali ve kodlanmış veri sinyali	37
Şekil 4.11. PWM Sinyalleri	38
Şekil 4.12. DC-DC Düşürücü dönüştürücü çıkış gerilimi	38
Şekil 4.13. (a) MOSFET gerilimine ait dalga şekli, (b) Diyot gerilimine ait dalga şekli	39
Şekil 4.14. Endüktans akımına ait dalga şekli.....	40
Şekil 4.15. Kodlanmış veri ve LED akımı	40
Şekil 4.16. Kanal girişinde ve çıkışında oluşan optik güç sinyalleri	41
Şekil 4.17. LOS kanal DC kazancı.....	42
Şekil 4.18. Kuvvetlendirici ve karşılaştırmacı bloğu giriş ve çıkış sinyalleri	43
Şekil 4.19. Demodülatör bloğu giriş ve çıkış sinyalleri	44
Şekil 4.20. Sistemin girişinde gönderilen sinyal ve sistemin çıkışında elde edilen sinyal	44
Şekil 4.21. DC-DC düşürücü dönüştürücü için THD hesaplaması.....	45
Şekil 4.22. DC-DC yükseltici dönüştürücü kullanılan VLC verici devresi	46
Şekil 4.23. DC-DC yükseltici dönüştürücü çıkış gerilimi	48
Şekil 4.24. (a) MOSFET gerilimi dalga şekli, (b) Diyot gerilimi dalga şekli.....	49
Şekil 4.25. Endüktans akımına ait dalga şekli.....	50
Şekil 4.26. Kodlanmış veri ile LED akımına ait dalga şekilleri.....	50
Şekil 4.27. Kanal girişindeki LED optik gücü ve kanal çıkışında oluşan optik güç.....	51
Şekil 4.28. Kuvvetlendirici ve karşılaştırmacı bloğu giriş, çıkış sinyalleri	52
Şekil 4.29. Demodülatör bloğunun giriş ve çıkış sinyalleri	52

Şekil 4.30. Sistemin girişinde uygulanan veri sinyali ile sistem çıkışında elde edilen dalga şekli	53
Şekil 4.31. DC-DC yükseltici dönüştürücü için THD hesaplaması	54
Şekil 4.32. DC-DC düşürücü yükseltici dönüştürücü kullanılan VLC verici devresi ...	54
Şekil 4.33. DC-DC düşürücü yükseltici dönüştürücü çıkış gerilimi.....	57
Şekil 4.34. (a) MOSFET gerilimine ait dalga şekli, (b) Diyot gerilimine ait dalga şekli	58
Şekil 4.35. Endüktans akımına ait dalga şekli.....	58
Şekil 4.36. Kodlanmış veri sinyali ve LED akımına ait sinyal	59
Şekil 4.37. LED optik gücü ile algılanan güç sinyali.....	59
Şekil 4.38. Kuvvetlendirici ve karşılaştırmacı bloğunun girişi ve çıkış sinyali	60
Şekil 4.39. Demodülatör bloğuna uygulanan giriş sinyali ve çıkış sinyali	60
Şekil 4.40. Sistemin girişine uygulanan sinyal ve çıkışta elde edilen sinyal	61
Şekil 4.41. Düşürücü-yükseltici DC-DC dönüştürücü için THD hesaplaması	62
Şekil 5.1. Uygulamada kullanılan sistemin genel bir gösterimi	63
Şekil 5.2. Düşürücü DC-DC dönüştürücü ile SSM topolojisi.....	65
Şekil 5.3. VLC verici devresinin 3 boyutlu PCB çizimi.....	65
Şekil 5.4. Deneysel uygulama devresi	66
Şekil 5.5. VLC alıcı devre şeması.....	67
Şekil 5.6. Gönderilen mesaj sinyali	68
Şekil 5.7. Alınan sinyal	68
Şekil 5.8. Düşürücü dönüştürücünün giriş ve çıkış sinyalleri.....	69

SİMGELER ve KISALTMALAR

Simgeler

$m(t)$	Mesaj Sinyali
f_c	Taşıyıcı Sinyalin Frekansı
θ	LED'den Gönderilen Işığın Normalle Yaptığı Aç
$L(\theta)$	Lambert Işık Yoğunluğu
m	Lambert Yayılımı Mertebesi
$P_{T,opt}$	İletilen Optik Güç
$P_{R,opt}$	Alınan Optik Güç
$S(t)$	Modüle Edilmiş Sinyal
$\theta_{1/2}$	Yarı Hüzme Açısı
η	LED'in Kuantum Verimliliği
λ	LED'in Dalga Boyu
$H(0)$	Kanal DC Kazancı
e	Elektron Yüğü
A_R	Fotodiyotun Etki Alanı
d	Verici İle Alıcı Arasındaki Uzaklık
Φ	Fotodiyot Üzerine Düşen Işığın Normalle Yaptığı Aç
i_{PD}	Fotodiyot Çıkışında Oluşan Akım
h	Planck Sabiti
c	Işık Hızı
T_P	Anahtarlama Periyodu
T_d	Anahtarın İletimde Kalma Süresi
T_b	Anahtarın Kesimde Kalma Süresi
D	Doluluk Oranı
V_g	Giriş Gerilimi
$V_{\text{Ç}}$	Çıkış Gerilimi
ΔI_{Lp}	Endüktans Akımındaki Artış Miktarı
ΔI_{Ln}	Endüktans Akımındaki Azalış Miktarı
ΔI_L	Endüktans Akımındaki Değişim
I_g	Giriş Akımı
$I_{\text{Ç}}$	Çıkış Akımı

I_L	Endüktans Akımı
f_p	Anahtarlama Frekansı
ΔV_C	Kapasitör Gerilimindeki Değişim
$P_{\text{Ç}}$	Çıkış Gücü

Kısaltmalar

ASK	Amplitude-Shift Keying
BASK	Binary Amplitude-Shift Keying
CCM	Continuous Current Mode
DCM	Discontinuous Current Mode
DD	Direct Detection
LED	Light Emitting Diode
IM	Intensity Modulation
NRZ	Non-Return-to-Zero
OOK	On-Off Keying
PFC	Power Factor Correction
PSM	Parallel Switch Modulator
PWM	Darbe Genişlik Modülasyonu
RF	Radyo Frekansı
RZ	Return-to-Zero
SCM	Single-Carrier Modulation
SSM	Series Switch Modulator
THD	Total Harmonic Distortion
TIA	Transimpedance Amplifier
OKH	Optik Kablosuz Haberleşme
VLC	Visible Light Communication

1. GİRİŞ

Geçmişten günümüze kadar insanlar birbirleriyle haberleşme ihtiyacı duymuşlardır. Bu ihtiyaç doğrultusunda insanlar birbirleriyle iletişim kurmak için çeşitli yöntemler geliştirmişlerdir. Teknolojinin gelişmesiyle birlikte insanların birbirleriyle haberleşmek için kullandıkları yöntemlerde çeşitlenmiş ve gelişmiştir. Teknolojinin gelişiminin sağladığı imkânlar ile günümüzde insanlar birbiriyle hızlı ve kolay bir biçimde haberleşebilmektedir. Sürekli gelişen haberleşme teknolojilerinde insanlar kablolu haberleşme teknolojilerinden faydalanarak uzak mesafeler için haberleşme sağlamışlardır. Kablolu haberleşme teknolojilerinin devamında kablosuz haberleşme teknikleri geliştirilmiş ve kablo olmadan elektromanyetik dalgalar kullanılarak haberleşme sağlanmıştır. Kablosuz haberleşme yöntemlerinden birisi de ışık ile haberleşmedir. Işığın veri iletimi için kullanılması uzun yıllardan beri uygulanan bir yöntemdir. Ateş ve duman kullanılarak haberleşme aslında ışık ile haberleşmenin tarihte bilinen ilk örneğidir. İnsanların kullandıkları yöntemler gün geçtikçe ihtiyaçlar doğrultusunda çeşitlenmiştir ve haberleşme mesafesinin artırılması, daha fazla kişiye mesaj ulaştırma gibi kaygılarla kullanılan teknikler gelişme göstermiştir. Işığın farklı şekillerde kullanılmasıyla geliştirilen teknikler zamanla daha hızlı, güvenli, düşük maliyetli haberleşme sağlamanın yollarını bulmaya yöneliktir.

Ateş ve duman kullanarak veri aktarımının sağlanması ile başlayan ışık haberleşmesi daha sonra köylerde, şehirlerde sinyal kulelerinin inşa edilmesi ile daha uzak mesafelerde haberleşmenin gelişimine ilk adım atılmıştır. Fransız mühendis Claude Chappe'nin ilk görsel telgrafi kullanması ardından Morse kodlarının kullanımı ile geliştirilen Helyograf isimli kablosuz güneş telgrafi ışık haberleşmesinin önemli gelişmeleri olarak görülmektedir. Görünür ışık haberleşmesinin ilk önemli temsili olarak Graham Bell ve Charles Sumner tarafından geliştirilen 'photo-phone' isimli cihazdır (Höher, 2019).

İnsanların aydınlatma ihtiyacı duyması ve buna bağlı olarak kullanılan aydınlatma elemanları ve teknikleri de tarih boyunca gelişme göstermiştir. Kapalı mekânlarda, sokaklarda ve daha birçok alanda aydınlatma gereksinimi bulunmaktadır. Birçok alandaki bu aydınlatma ihtiyacı beraberinde daha az enerji tüketimi sağlayan aydınlatma cihazlarının gelişimini teşvik etmiştir. Aydınlatma için kullanılan geleneksel yöntemler

(ampuller, akkor floresan lambalar gibi) yavaş yavaş yerini ışık yayan diyot (Light emitting diode, LED) elemanlara bırakmaktadır. LED elemanların aydınlatma amacıyla enerji tasarrufu sağlayan bir teknoloji olması ve aynı zamanda veri iletimine olanak sağlayan bir aydınlatma elemanı olması ışık ile haberleşme teknolojisinin aydınlatma cihazı olarak kullanılan bir elemanla yapılmasına olanak tanımaktadır. Görünür ışık haberleşme sistemlerinde yapılan çalışmalarda farklı üstünlükler sunması açısından LED elemanlar sıklıkla tercih edilmektedir. LED elemanlar uzun ömürlü, enerji verimliliği yüksek ve insan sağlığına zararlı olmayan bir aydınlatma sağladığı için çevre dostu bir teknoloji olarak gösterilmektedir. LED'lerin aydınlatma amaçlı kullanılması için bazı standartlara uyması gerekmektedir. Bu standartlara uygun olarak LED aydınlatmasının gerçekleştirilebilmesi için LED sürücü devreler kullanılmaktadır. LED sürücülerin tasarımı, aydınlatma işlevi boyunca insan gözünü rahatsız edecek kırpışma etkisinin oluşmaması, aydınlık seviyesinin istenen düzeyde sürekliliğinin sağlanması, enerji verimliliğinin yüksek olması gibi görevlerin yerine getirilmesi konusunda oldukça büyük öneme sahiptir. LED'lerin aydınlatma konusunda kullanımının yaygınlaşması LED sürücüler konusunda çalışmaların ilerlemesiyle hız kazanmıştır. Aydınlatma amacıyla tasarlanan LED sürücülerin haberleşme işlevi kazanması için de çalışmalar yapılmaya devam etmektedir. Bu iki işlevin yerine getirilmesi için yapılan LED sürücü tasarımı çalışmalarında güç elektroniği alanından faydalanılmaktadır. LED'lerin çalışması için gereken güç, LED sürücü devrelerindeki güç dönüştürücüleri kullanılarak elde edilmektedir. Bu kapsamda LED sürücü tasarımında kullanılacak güç dönüştürücülerinin iyi tasarlanmış olması hem aydınlatma hem de haberleşme işlevlerinin başarılı bir şekilde yapılması ve sürdürülebilmesi açısından önemlidir.

2. KAYNAK ÖZETLERİ

Optik kablosuz haberleşme (OKH); kızılötesi, görünür ışık veya ultraviyole bantların kullanımı ile kablosuz bağlantıya olanak tanıyan optik haberleşme sistemidir. Lisanslandırılmamış spektrum, düşük maliyet ve yüksek bant genişliği sağlaması gibi üstünlükleri olan bu teknoloji mevcut olarak kullanılan bazı kablosuz teknolojilere alternatif veya tamamlayıcı olabilir. OKH sistemin görünür bant aralığında (390-750 nm) çalışması genellikle görünür ışık haberleşmesi (visible light communication, VLC) olarak adlandırılır (Uysal ve Nouri, 2014). Günlük hayatımızda genellikle haberleşme amacıyla radyo frekansı (RF) temelli sistemler kullanılmaktadır. Ancak artan kullanıcı sayısı kablosuz ağ trafiğinde yoğunluk oluşturmakta ve bu artış beraberinde bazı sınırlamalar getirmektedir (Karunatilaka vd., 2015). VLC spektrumunun kullanılmasıyla beraber düşük maliyetli ve yüksek hızlı haberleşme sağlanabilir. Ayrıca VLC sinyallerinin duvarlardan geçmemesi güvenli bir haberleşme olanağı sağlamaktadır (Jovicic vd., 2013).

OKH sağlayan bu teknolojilerin sistem yapısı; alıcı, verici ve kanal olmak üzere üç temel kısımdan oluşmaktadır. Verici olarak LED veya lazerler kullanılırken alıcı kısmında da foto diyot gibi ışığa duyarlı elemanlar kullanılmaktadır. VLC sistemlerde genellikle verici olarak kullanılan LED'ler akkor ve floresan lambalara göre yüksek verimlilik sağlamaktadır ve nispeten daha uzun ömürlü, ekonomik bir aydınlatma için kullanılmaktadır (Ghassemloooy vd., 2015). Bahsedilen bu üstünlüklerinin yanı sıra LED üretim süreçlerinde kaydedilen gelişmelerle birlikte LED elemanlar daha az maliyetle üretilen aydınlatma cihazları haline gelmiştir. Ayrıca LED elemanların düşük maliyetle kolay ulaşılabilir olması sokak aydınlatmasında, ekranlarda, mimari aydınlatma veya sera aydınlatması gibi birçok alanda kullanımının yaygınlaşmasını sağlamıştır. LED elemanların kullanımının yaygınlaşmasıyla beraber enerji verimliliği sağlanması açısından LED sürücü devrelerinin kullanımı ve sistem verimliliğini göz önünde bulundurarak sürücülerin tasarlanması da önem kazanmıştır (Wang vd., 2017).

LED sürücü devreleri en temelde LED üzerinden geçen akım miktarını kontrol ederek sistemi koruma ve LED parlaklık seviyesini kontrol ederek insanların gözlerine zarar verecek herhangi bir etkinin oluşması engellemekle görevli kısımdır (Vappangi ve Mani, 2019). Ancak VLC uygulamalarının yaygınlaşmasıyla birlikte aydınlatma açısından ve

veri aktarımı açısından LED sürücü devrelerinin görevleri de farklılaşmıştır. Bu kapsamda verimli, kontrol edilebilir, insan gözüne zarar vermeyecek şekilde aydınlatmanın sağlandığı ve haberleşme görevini de bozmayacak LED sürücü devresi tasarımlarında güç elektroniği alanından faydalanılmaktadır. Öncelikle literatürde aydınlatma görevinin gerçekleştirilmesi için geliştirilen LED sürücü devreleri ile ilgili çalışmalar incelenmiştir. Bu kapsamda LED sürücü devrelerinin kullanılacağı uygulamaya göre tercih edilebilecek olan topolojilerin değişkenlik göstermesinden dolayı literatürde bazı sınıflandırmalar mevcuttur (Li vd., 2015). Bu sınıflandırmalar yapılırken LED sürücü devrelerinin sistemde yerine getirmesi istenen özelliklere göre (güç değerleri, akım-gerilim değerleri gibi) bazı sınıflandırmalar yapılmıştır.

Li vd. (2015) ticari amaçlı kullanılan LED sürücü devrelerini güç değerlerine ve izolasyon gerektirip gerektirmediğine göre sınıflandırmışlardır. Güç oranına göre yaptıkları sınıflandırmada LED sürücü devresinin 25 W değerinin altında kullanıldığı uygulamalar düşük güçlü, 25 ile 100 W arasındaki uygulamalar orta güçlü ve 100 W üzerindeki uygulamalar ise yüksek güçlü uygulamalar olarak adlandırılmıştır. LED sürücü topolojisine karar verilirken önemli olan bir diğer ölçüt ise çıkış gerilim ve akım değeridir. LED'lerin seri ya da paralel bağlantıda olması da bu değerleri doğrudan etkilediği için tasarım seçimi yapılırken bu değerler dikkate alınmalıdır. Ayrıca LED sürücü tasarımlarının güç oranına göre elektriksel izolasyon gerektirip gerektirmediğini de inceleyen bu çalışmaya göre 10 W ve altında olan uygulamalar için izolesiz sürücüler kullanılırken 10 W değerinin üstü uygulamalarda izoleli sürücüler kullanılmıştır (Li vd., 2015).

Aydınlatma amaçlı tasarlanan LED sürücü devrelerinde AC-DC ve/veya DC-DC dönüştürücü temelli topolojilerden faydalanılmaktadır. Literatürde yer alan anahtarlamalı güç dönüştürücülerinden (düşürücü, yükseltici, düşürücü-yükseltici gibi) faydalanılarak yapılan çalışmalarda güç kaybının azaltılması önemli bir çalışma konusu olmuştur. Van der Broeck vd. (2007) LED aydınlatmasında kullanılan DC-DC güç dönüştürücü topolojilerini ve kontrol yöntemlerini incelenmiştir. Çalışmalarında LED veya LED dizilerinin seri bağlantılı omik yüklerle sürülmesinin güç kaybını artıran ve verimliliği azaltan bir yöntem olduğunu belirtmişlerdir. Güç kaybının azaltılması için anahtarlamalı güç kaynakları temelli LED sürücü devrelerde, LED yükleri için kullanılan darbe şeklinde

akımlar sayesinde sürücü devrelerin verimliliği artmaktadır. Ayrıca bu kullanım dönüştürücü ve kontrol tasarımlarını basitleştirmekte ve kullanılan elektronik eleman sayısını azaltmaktadır. LED yükün birden fazla olması ve LED dizisi şeklinde kullanılması da tasarım aşamasında önem taşımaktadır. Çünkü bu şekilde kullanım olduğunda seri dirençlerden kaynaklanan ilave kayıplarında dikkate alınması gerekmektedir. Bu sebeple toplam güç tüketimini ve seri dirençlerden kaynaklanan ilave kayıpları göz önünde bulundurmak gerekmektedir. Ayrıca LED akımının da kontrol edilmesi de sürücü tarafından sağlanmalıdır. Bu sebeplerden dolayı LED aydınlatmasında güç elektroniğinden faydalanılarak ilave güç kayıpları azaltılmakla birlikte LED akımının da kontrol edilmesi sağlanmaktadır. Van der Broeck ve arkadaşları yaptıkları çalışmada geleneksel olarak kullanılan güç dönüştürücülerin LED sürücü olarak kullanıldığı devre topolojileri incelenmiştir. Düşürücü dönüştürücü (buck converter), yükseltici dönüştürücü (boost converter), düşürücü-yükseltici dönüştürücü (buck-boost converter), galvanik izoleli dönüştürücü LED sürücü olarak incelenmiştir (Van der Broeck vd., 2007).

Patmavathi ve Natarajan (2019) yaptıkları çalışmada LED aydınlatmasında belirlenen standartlar ve düzenlemelerle ilgili güncel verileri aktarmışlardır. LED sürücü topolojisini seçerken uygulamaya bağlı olarak kullanılacak topolojinin üstünlüklerine ve zayıflıklarına dair incelemeler yapılmıştır. Aydınlatmanın verimliliği için önemli bir rol sahibi olan LED sürücü devrelerinde AC-DC ve DC-DC dönüştürücü topolojileri kullanılmaktadır (Padmavathi ve Natarajan, 2019). Arias vd. (2012) LED aydınlatmasında kullanılan AC-DC ve DC-DC dönüştürücü topolojileri ve bu topolojilerin kullanıldıkları uygulamalara göre sağlayacağı üstünlükleri ve zayıflıkları incelemişlerdir. Ayrıca çalışmada dönüştürücülerin LED sürücü olarak tasarlanırken kullanılan kontrol yöntemleri de açıklanmıştır (Arias vd., 2012). Ye vd. (2008) çalışmalarında LED aydınlatmalarında kullanılan AC-DC dönüştürücü topolojileri incelenmiştir. Güç dönüştürücü olarak kullanılan devrenin AC girişli olmasından dolayı ilave güç faktörü düzeltme (Power Factor Correction, PFC) ünitesi gerektiren bu topolojiler için yüksek güç faktörü elde etmek ve düşük harmonik bileşen içermesi öncelikli tasarım ölçütlerindendir (Ye vd., 2008). Yadlapalli vd. (2020) yaptıkları çalışmada çeşitli LED sürücü topoloji incelenmiştir. Ticari olarak kullanılan LED aydınlatma sistemlerinin kullanım alanlarının geliştirilmesi için uzun ömür, yüksek

verimlilik, yüksek güvenilirlik sağlayan LED sürücü topolojilerine ihtiyaç duyulmaktadır. Bu sebeple topolojiler incelenirken güç yoğunluğu, yenilenebilir enerji kullanımı, yumuşak anahtarlama, optik kablosuz haberleşme gibi göze çarpan özelliklere odaklanılmıştır. Odaklanılan bu konularla ilgili topolojilerin performansları incelenirken içerdiği komponent sayısı, dönüştürücünün anahtarlama frekansı, güç oranları ve verimlilik açısından analizler yapılmıştır (Yadlapalli vd., 2020).

Görünür ışık haberleşme sistemlerinde verici kısmında LED sürücü devreler kullanılmaktadır. Kullanılan LED sürücü topolojisinin aydınlatma ve haberleşme görevlerini yerine getirebilecek uygun tasarımlar olması literatürde çalışılan konulardandır. Öte yandan LED sürücülerin günlük hayatımızda kullanılabilir olması için aydınlatma için hali hazırda kullanılan sistemlerin altyapısını kullanabilmesi ve sistemin tamamıyla uyumlu olması önem taşımaktadır. Aydınlatma işlevi için geliştirilen LED sürücü devrelerinin VLC kapsamında da kullanılabilmesi için en temel ifadeyle aydınlatma için kullanılan LED elemanın aynı zamanda da veri iletimine olanak sağlaması gerekmektedir. Bu sebeple LED sürücü devrelere ilaveten bir modülasyon ünitesi kullanılması gerekmektedir. Kullanılan LED sürücü devrelerinin birbirlerine göre zayıflıkları, üstünlükleri bulunmaktadır. Tasarım aşamasında uygulamanın istenen çıktılarına göre LED sürücü topolojisinin belirlenmesi önemlidir. VLC sistemlerin piyasada ticari olarak kullanılabilmesi için aydınlatma ve haberleşme görevlerini aynı zamanda gerçekleştirmeye imkân tanıyan iki amaçlı LED sürücü devrelerinin geliştirilmesi gerekmektedir. Endüstriyel amaçlı kullanımlarda LED'lere giden gücün kontrol altında tutulabilmesi için genellikle anahtarlama güç kaynakları kullanılmaktadır. LED sürücü devre tasarımı güç elektroniği mühendisliğinin kapsamına girmekte ve bu alanda yapılan çalışmalar güç faktörü düzeltme, sürücü ömrünün artırılması ve güç dönüşümü verimliliğinin artırılması gibi amaçlara yöneliktir.

Loose vd. (2017) yaptıkları çalışmada VLC görevinin yerine getirilmesi için kullanılacak modülasyon teknikleri ve fiziksel sınırlamalar açısından sistemde kullanılacak LED sürücü topolojisinin öneminden bahsetmiştir. İki amaçlı olarak geliştirilen LED sürücü devrelerinin çoğunda ilave aktif bir eleman eklenerek (sayısal kontrollü anahtarlar veya doğrusal güç yükselticileri) VLC gerçekleştirilmektedir. Bu topolojilerin dışında tek bir

dönüştürücü kullanarak tasarlanmış iki amaçlı LED sürücüler de bulunmaktadır (Loose vd., 2017).

Teixeira vd. (2022) çalışmalarında VLC sistemlerinde kullanılan LED sürücüler için devre türüne göre sınıflandırma yapmıştır. Çalışmada yapılan sınıflandırmaya göre devre topolojileri dört ana başlıkta incelenmektedir. Devre topolojileri doğrusal güç yükselticiler, anahtarlamalı güç kaynakları, seri anahtarlı modülatör ve paralel anahtarlı modülatör şeklinde sınıflandırılmıştır (Teixeira vd., 2022). VLC sistemlerinde kullanılan LED sürücü devrelerinin yüksek hızlarda iletişim istenen durumlarda verimlilik kaybı yaşanmaması için güç elektroniği kullanımının önemi ile ilgili literatür çalışmaları bulunmaktadır. Çalışmalarda LED sürücü olarak kullanılan geleneksel dönüştürücüler, VLC için istenen görevleri yerine getirirken aydınlatma işlevinin düzgün şekilde sürdürülebilmesi amacıyla bazı yöntemler kullanılarak geliştirilmiştir. Rodríguez vd. (2018) tarafından yapılan çalışmada geleneksel anahtarlamalı DC-DC dönüştürücülerinin VLC uygulamalarından doğan ihtiyaçlar için bazı değişikliklerle daha verimli sistemler elde edileceğini belirtmişlerdir. Çalışmalarında güç elektroniğinin VLC uygulamalarında önemli bir rolü olduğunu ve DC-DC dönüştürücülerin güç verimliliğinin sağlanması için gerekli olduğunu vurgulamışlardır. DC-DC düşürücü dönüştürücü temelli LED sürücü devre yüksek dereceli bazı filtreler kullanılarak VLC sistemler için daha verimli hale getirilmiştir (Rodríguez vd., 2018). Lineer güç yükselticileri kullanılarak tasarlanan LED sürücü devrelerinin verimlilik sorununa yol açtığı ve buna çözüm olarak hızlı yanıtı DC-DC dönüştürücülerin kullanımını öneren Sebastian vd. (2018) yaptıkları çalışmada DC-DC düşürücü dönüştürücüye ilaveten yüksek dereceli bir filtre kullanarak yeni bir sürücü tasarımı önermişlerdir (Sebastian vd., 2018). Rodriguez vd. (2019) yüksek hız gerektiren VLC uygulamalarında kullanılan LED sürücü devrelerinin güç verimliliğini iyileştirmek üzerine bir çalışma yapmıştır. LED sürücülerde hızlı akım dalga şekillerinin yeniden üretilebilmesi için kullanılan lineer güç yükseltici devrelerinin güç verimliliğini azaltmaktadır. Bu problemin üstesinden gelmek için iki tane DC-DC düşürücü temelli güç dönüştürücüsünden oluşan bir LED sürücü tasarlanmıştır. Kullanılan dönüştürücülerden biri haberleşme işlevini gerçekleştirirken diğer dönüştürücü ise aydınlatmanın devam etmesi için kullanılmaktadır (Rodriguez vd., 2019). Loose vd. (2017) DC-DC düşürücü temelli bir VLC LED sürücü tasarlamışlardır (Loose vd., 2017). Lee vd. (2016) yaptıkları çalışmada geleneksel olarak kullanılan DC-DC düşürücü

dönüştürücü temelli LED sürücü devresinde kullanılan diyotu GaN güç elemanı ile değiştirerek veri aktarım hızını artırmışlardır. Ayrıca çalışmalarında diyot yerine MOSFET kullanarak daha verimli bir sistem elde ettiklerini belirtmişlerdir (Lee vd., 2016). Deng vd. (2014) geleneksel düşürücü dönüştürücü ile tasarlanan LED sürücü devrenin VLC uygulamasına entegre edilmesi ve bu şekilde tasarlanan sürücünün veri modülasyonundan kaynaklanan güç kayıplarını incelemiştir. Çalışmada performans karşılaştırması yapılabilmesi için düşürücü dönüştürücü temelli iki farklı LED sürücü tasarımı kullanılmıştır (Deng vd., 2014).

Loose vd. (2021) yaptıkları çalışmada, LED aydınlatmasında kullanılan yüksek verimliliğe sahip ve yüksek veri aktarımına elverişli hibrit bir düşürücü dönüştürücü kullanılarak VLC sürücü tasarlamışlardır. Önerdikleri yöntem sayesinde anahtarlamalı güç kaynaklarının yüksek verimli olmasıyla doğrusal güç yükselticilerin geniş bant aralığı sağlama özelliklerinin birleştirilerek yüksek hızlı veri aktarımı elde edilmesi sağlanmıştır. Tasarımda aydınlatma ve VLC için gerekli güç, birleştirilmiş indüktörlü bir anahtarlamalı düşürücü DC-DC dönüştürücüden elde edilmektedir (Loose vd., 2021).

Deng vd. (2015) VLC için kullanılan LED sürücü devrelerinin kusurlarının haberleşme performansına olan etkisini incelemiştir. DC-DC düşürücü dönüştürücünün kendisinden dolayı oluşan osilasyonları gürültü olarak modellemişler ve haberleşme performansına etkisini incelemiştir (Deng vd., 2015).

Aller vd. (2020) düşürücü ve yükseltici tip DC-DC dönüştürücüler kullanarak bir VLC LED sürücü devresi önermişlerdir. Yapılan çalışmada gücün düşürücü ve yükseltici dönüştürücüler arasında bölünmesiyle yüksek verimlilik ve yüksek haberleşme performansı elde edilmiştir. Çalışmada yükseltici dönüştürücü gücün büyük kısmını karşılarlarken düşürücü dönüştürücü ile haberleşme sinyalleri üretilmektedir (Aller vd., 2020).

Salmento vd. (2018) yaptığı çalışmada düşürücü-yükseltici DC-DC dönüştürücü ile bir VLC sistem tasarlanmıştır. Çalışmanın verici kısmında temel eleman olarak düşürücü-yükseltici dönüştürücü kullanılmış olup böylelikle yüksek verimliliğe sahip, az eleman içeren bir dönüştürücü ile sistem tasarlanmıştır (Salmento vd., 2018).

3. KURAMSAL TEMELLER

Tezin kuramsal temelleri kapsamında; ilk bölümde VLC sistemlerin yapısına ve çalışmasına ait genel bilgilendirme yapılmış ve VLC sistemlerde yer alan temel kısımlar hakkında bilgi verilmiştir. İkinci kısımda ise endüstriyel alanda en yaygın kullanılan izolesiz DC-DC güç dönüştürücü türlerinden olan düşürücü, yükseltici ve düşürücü-yükseltici dönüştürücüler ve bu dönüştürücülerin çalışma prensipleri hakkında bilgi verilmiştir.

3.1. Görünür Işık Haberleşmesinin Temelleri

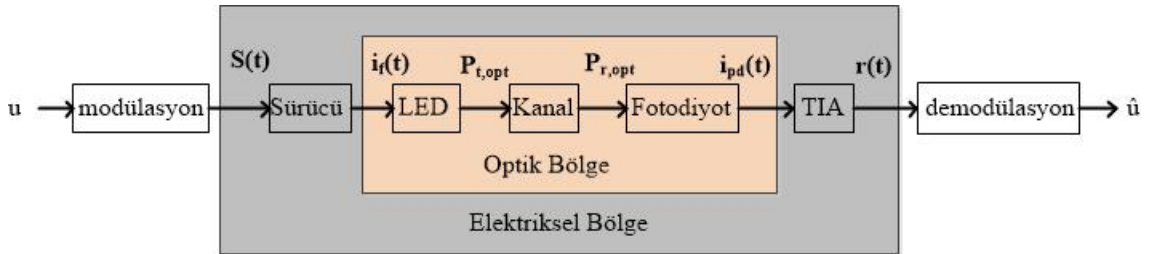
VLC sistemler, görünür ışık sinyallerinin uygun alıcı ve verici tasarımları aracılığıyla veri iletimine ve algılanmasına olanak tanıyan kablosuz bir haberleşme teknolojisidir. Çeşitli uygulama alanlarında kullanılan ve geliştirilmekte olan bu teknoloji ile hızlı, güvenilir, düşük maliyetli haberleşme sağlanması hedeflenmektedir.

VLC uygulamaları bazı durumlar için tek başına uygulanırken bazı senaryolar için RF haberleşmesi sistemlerinin tamamlayıcı bir uygulaması olarak genel performansın iyileştirilmesi için kullanılmaktadır. VLC teknolojisinin kullanıldığı temel uygulamaları yüksek hızlı ve düşük hızlı uygulamalar ile sınıflandırmak mümkündür. Örneğin; yüksek hızlı veri iletimi yapmak amacıyla gerçekleştirilen bir uygulama olan Li-Fi teknolojisi bir VLC uygulamasıdır. Diğer bir sınıflandırma ise iç ve dış mekân uygulamaları şeklinde yapılabilir. İç mekân uygulamalarına kapalı mekânlarda yapılan konumlandırma çalışmaları gösterilebilir. Dış mekân aydınlatmaları için ise örnek olarak ulaşım sistemleri veya araçlar arası haberleşme uygulamaları verilebilir (Udvary, 2019).

3.1.1. Görünür ışık haberleşme sisteminin temel bileşenleri

VLC sistemlerinin, uygulama alanına ve sistemden istenen özelliklere göre farklı yapılarda tasarlanması mümkündür. Ancak bir VLC sisteminin hangi kısımlardan oluştuğu, sistem baştan sona incelendiğinde kullanılan bloklarda hangi görevlerin gerçekleştirdiği temel olarak ele alınabilir. Bu kapsamda temel olarak VLC sistemlere ait genel bir blok diyagram Şekil 3.1’de gösterilmiştir. Şekilde elektriksel ve optiksel bölgeler olarak ayrılmış iki temel kısım içerisinde yer alan bloklar bulunmaktadır. Bu

blokların her birinin sistem içerisinde farklı görevi bulunmaktadır. Şekilde modülasyon bloğuna giren ve “u” ile sembolize edilen kısım iletilmek istenen veriyi temsil etmektedir. Modülasyon ünitesinden geçen veri $S(t)$ sinyali olarak sürücü ünitesine gönderilmektedir. Sürücü aracılığıyla verici elemana (LED veya lazer) bilginin şekline uygun olarak anahtarlama sinyalleri gönderilerek bu elemanın veriyi optik olarak iletmesi sağlanır. Alıcı kısmında ışığa duyarlı bir sensör (fotodiyot gibi) kullanılarak vericiden yayılan sinyallerin algılanması sağlanmaktadır. Verici ile alıcı arasında gösterilen kanalda, fiziksel olarak ışık boşlukta yayılmaktadır. Kanal, alıcı ve vericinin birbirlerine göre sahip oldukları konumlarına bağlı olarak farklı şekillerde modellenmektedir. Alıcı kısmındaki ışığa duyarlı elemanın üzerine düşen ışık yoğunluğunun değişimine bağlı olarak çıkışta üretilen akım değeri de değişmektedir. Alıcıda kullanılan elemanın çıkışta ürettiği i_{pd} akımının değerinin yükseltilmesi ve gerilime dönüştürülmesi için TIA ile gösterilen blok kullanılmaktadır. TIA bloğu demodülasyon işlemi için gerekli olan anlamlı değişikliklere sahip sinyalin oluşturulmasını sağlar. Son olarak demodülasyon ünitesine giren $r(t)$ sinyali “û” ile sembolize edilen sinyale dönüştürülerek görünür ışık ile haberleşme süreci tamamlanmış olur. Bu sistemin tamamı incelendiğinde optiksel ve elektriksel süreçlerin birbiriyle iç içe olduğu görülmektedir.

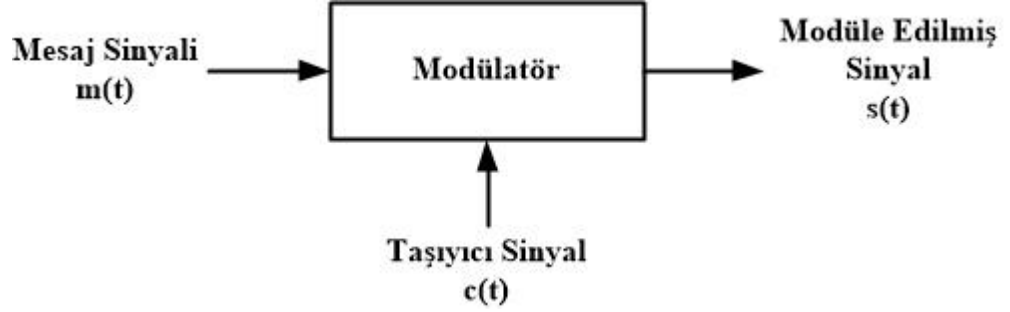


Şekil 3.1. VLC sisteminin genel blok şeması

3.1.2. Modülasyon teknikleri

Modülasyon, iletilmek istenen mesaj sinyalinin kullanılan kanalda veri aktarımı için uygun biçime dönüştürülmesi işlemidir. Modülasyon işleminin gerçekleştirilebilmesi için kanal karakteristiğine uygun olacak şekilde taşıyıcı sinyal kullanılmaktadır. Şekil 3.2’de verilen temel modülasyon şemasından da görüldüğü gibi mesaj sinyali taşıyıcı sinyal ile modüle edilmektedir. Modülasyon işlemi ile haberleşme amacıyla kullanılan belirli bir ortam üzerinde mevcut frekans spektrumunun daha verimli kullanılması

amaçlanmaktadır. Bu amaçla çok sayıda analog ve sayısal modülasyon teknikleri geliştirilmiştir. Bu tekniklerin her birinin kendi içerisinde üstünlükleri ve zayıflıkları bulunmaktadır (Smillie, 1999).



Şekil 3.2. Temel modülasyon şeması

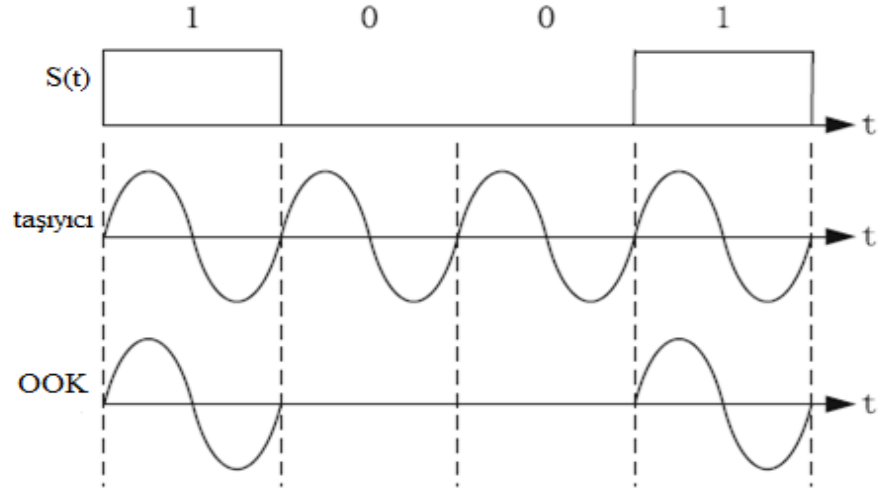
OKH sistemlerinde veri aktarımı yapmak için kullanılan çeşitli modülasyon teknikleri bulunmaktadır. VLC özelinde kullanılan modülasyon tekniklerinde modüle edilen ışığın insan gözü üzerinde oluşturduğu etki de göz önüne alınarak modülasyon işlemi yapılmaktadır. Ayrıca VLC sistemlerinde genellikle verici olarak kullanılan LED elemanların yapısından dolayı kullanılan modülasyon tekniklerinin de bu yapıyı destekleyecek teknikler olması gerekmektedir. LED’ler evre uyumsuz (noncoherent) elemanlardır. Bu özelliğinden dolayı kullanılacak modülasyon tekniklerinin gerçek zamanlı dalga şekilleri temelli teknikler kullanılmalıdır. Bu kısıtlama ile beraber kullanılan teknikler yoğunluk modülasyonu (intensity modulation, IM) temellidir. Yoğunluk modülasyonu ile gönderilen bilginin alıcı kısmında algılanması için de doğrudan sezim (direct detection, DD) tekniğinden faydalanılmaktadır. Yoğunluk modülasyonu, ışık kaynağının parlaklık seviyesinin modüle edilmesi temelli bir tekniktir. Parlaklık doğası gereği negatif değer alamaz bu yüzden iletilen sinyal gerçek ve pozitif değerli olmalıdır. İletilen sinyalin pozitif değerli olması amacıyla kullanılan başlıca modülasyon teknikleri tek taşıyıcılı modülasyon teknikleri ve çok taşıyıcılı modülasyon teknikleri olarak sınıflandırılabilir (Dimitrov ve Haas, 2015).

Tek taşıyıcılı modülasyon tekniklerinde (Single-Carrier Modulation, SCM) mesaj sinyali tek bir taşıyıcı sinyal kullanılarak modüle edilmektedir. SCM sınıfına dâhil olan modülasyon teknikleri içerisinde birçok iki seviyeli modülasyon tekniği bulunmaktadır (Höher, 2019).

Açma- kapama anahtarlama (On – Off Keying, OOK) modülasyonu görünür ışık haberleşmesinde kullanılan temel bir tekniktir. Bu teknik aynı zamanda ikili genlik kaydırmalı anahtarlama (binary amplitude-shift keying, BASK) olarak da bilinmektedir. OOK modülasyonda taşıyıcının genliği, “0” ve “1” ikili bilgisine karşılık gelen iki durumda değişir. Gelen bit değerinin “0” olması LED’in kapalı (OFF) durumuna, bit değerinin “1” olması LED’in açık (ON) durumuna karşılık gelmektedir (Chi, 2018).

İkili sinyallere genlik kaydırmalı anahtarlama (amplitude shift keying, ASK) modülasyon uygulandığında düşük değerli giriş için 0 çıkış elde edilirken yüksek değerli girişler için taşıyıcı sinyal çıkış olarak elde edilmektedir. ASK modülasyon Eş. (3.1)’de ile ifade edilmektedir. Denklemden yer alan A taşıyıcı sinyalin genliğini, m(t) mesaj sinyalini ifade eder ve bu değer 0 veya 1 değerini alabilir. T bit aralığını ve f_c ise taşıyıcı dalganın frekansını ifade etmektedir. Eş. (3.1) incelendiğinde m(t) sinyalinin 0 değeri için modüle edilmiş sinyal olan S(t) değerinin de 0’a eşit olduğu ve m(t) sinyalinin 1 olduğu durumlarda S(t) sinyalinin $A.\cos(2\pi f_c t)$ değerine eşit olduğu görülmektedir (Bharati vd., 2020).

$$S(t) = A.m(t).\cos(2\pi f_c t) \quad 0 \leq t \leq T \quad (3.1)$$



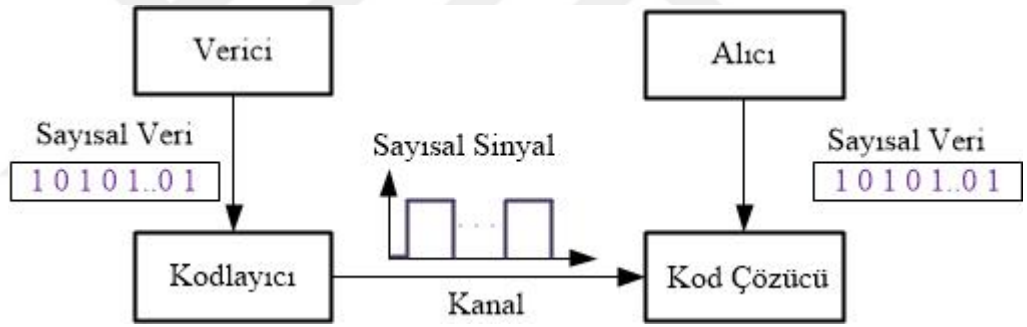
Şekil 3.3. OOK sinyali dalga şekli (Chi, 2018)

Şekil 3.3’te OOK modülasyona ait dalga şekilleri verilmiştir. VLC sistemlerde verici olarak kullanılan LED’in iletilmek istenen bilgi sinyaline göre ON ve OFF durumlarına

anahtarlanması ile veri aktarımı sağlanması OOK modülasyonunu bu sistemler için kullanışlı hale getirmektedir. OOK modülasyonunun en önemli üstünlüğü uygulamasının kolay olmasıdır (Khan, 2017). OOK modülasyon tekniğine sıfıra dönüşsüz (Non-Return-to-Zero, NRZ) ve sıfıra dönüşlü (Return-to-Zero, RZ) gibi seri kodlama yöntemleri uygulanmaktadır (Idris vd., 2019).

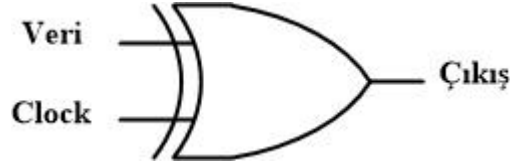
3.1.3. Veri kodlama yöntemleri

Sayısal veri, sayısal sinyaller kullanılarak ifade edilebilmektedir. Sayısal bir verinin sayısal sinyal kullanılarak vericiden alıcıya gönderilebilmesi için verici kısmında sayısal veri sayısal sinyale dönüştürülmektedir. Bu dönüşüm için verici kısmında kodlayıcı (encoder) kullanılır. Alıcı tarafında ise sayısal sinyalin tekrar sayısal veriye dönüştürülmesi için kod çözücü (decoder) kullanılır. Şekil 3.4'te sayısal verinin kodlayıcı ve kod çözücü kullanılarak iletilmesi gösterilmiştir.



Şekil 3.4. Sayısal verinin iletimi

Verici kısmında sayısal verinin sayısal sinyale dönüştürülmesi için hat kodlaması (line coding) işlemi gerçekleştirilir. Hat kodlaması ile bit dizisi sayısal sinyale dönüştürülmektedir (Forouzan ve Fegan, 2007). Hat kodlama türlerinden olan Manchester kodlama yöntemi sayısal verinin sayısal sinyale dönüştürülmesi için kullanılmaktadır. Vericiden gönderilen sayısal verinin kanala uygun bir şekilde sayısal sinyale dönüştürülmesi için ilk olarak Manchester kodlayıcı ile kodlanması gerekmektedir. Şekil 3.5'te Manchester kodlayıcı olarak kullanılan XOR kapısı gösterilmektedir. Bu kodlama işleminde veri sinyali ile clock sinyali XOR mantık kapısının girişleri olarak kullanılır. Şekil 3.6'da gösterilen şemada ise Manchester kodlamasıyla elde edilen çıkış sinyalinin değerleri verilmiştir.

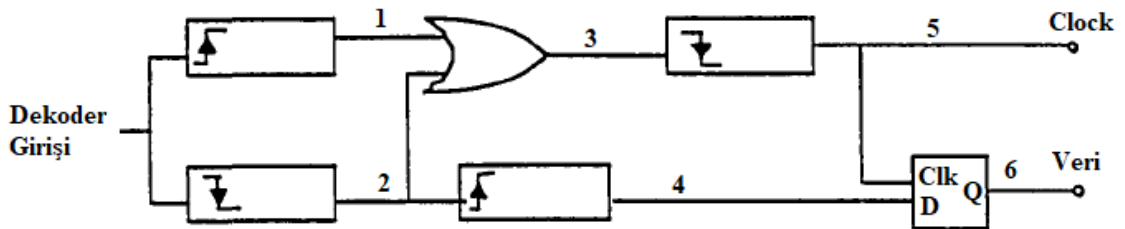


Şekil 3.5. Manchester kodlayıcı (AI-Sammak vd., 1992)

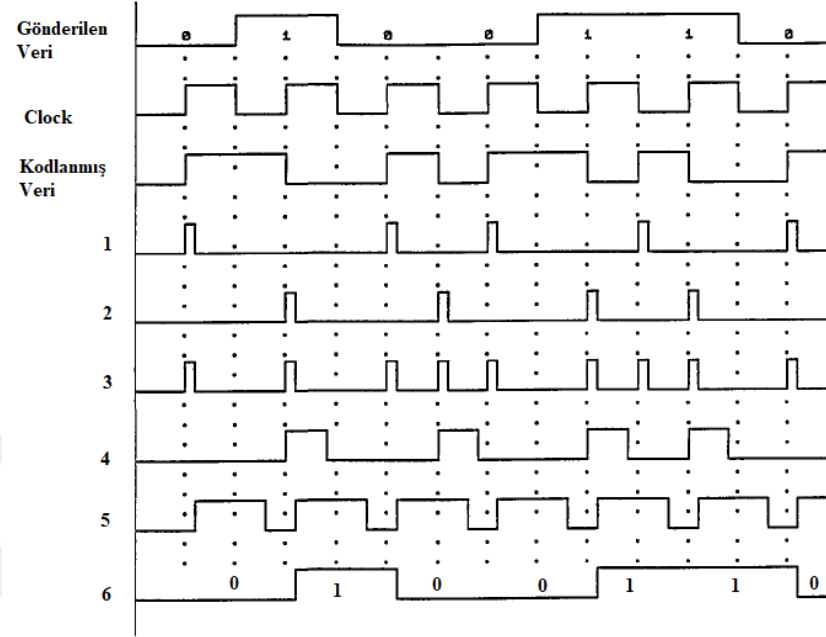
Veri	0		1	
Clock	0	1	1	1
Çıkış	0	1	1	0

Şekil 3.6. Manchester kodlama şeması

Giriş verisinin tekrar elde edilebilmesi için Manchester kod çözücü kullanılmaktadır. Şekil 3.5'te gösterilen Manchester kodlayıcının çıkışında elde edilen kodlanmış sinyal, kod çözücü devrenin giriş sinyalini oluşturmaktadır. Şekil 3.7'de Manchester kod çözücü devre gösterilmektedir. Dekoder girişi olarak gösterilen sinyal Şekil 3.5'in çıkışında oluşan sinyaldir. Şekil 3.7'de yer alan kod çözücü devresinde giriş sinyalinin yükselen ve alçalan kenarları tespit edilmektedir. Kod çözücü devrede OR mantık kapısı ve D flip-flop kullanılmıştır. Kod çözücü devresinin çıkışında clock sinyali ile veri sinyali elde edilmektedir. Şekil 3.8'de Manchester kodlayıcıda bulunan giriş verisi (gönderilen veri), clock sinyali ve kodlayıcının çıkışında elde edilen sinyal (kodlanmış veri) gösterilmektedir.



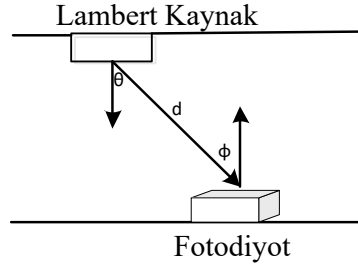
Şekil 3.7. Manchester kod çözücü devresi (AI-Sammak vd., 1992)



Şekil 3.8. Manchester kodlayıcı ve kod çözücüye ait dalga şekilleri (AI-Sammak vd., 1992)

3.1.4. Optik güç dönüşümleri

Şekil 3.1’de gösterilen temel VLC blok şemasında verici (LED) ve alıcı (fotodiyot) elemanlarının optik güç denklemlerinden faydalanılarak LED’in çıkışında oluşan optik güç $P_{T,opt}$ ve fotodiyot tarafından alınan güç $P_{R,opt}$ değerleri hesaplanabilmektedir. VLC sistemlerde verici olarak kullanılan LED aynı zamanda bir ışık kaynağıdır. LED Lambert karakteristiğine göre modellenebilir. Bu model kullanılarak LED’in çıkışında oluşan optik güç değeri hesaplanabilir. Şekil 3.9’da Lambert kaynak olarak modellenen LED ile fotodiyotun boş uzayda yayılım modeli gösterilmektedir. Boş uzayda birbirlerine göre konumlarının da önemli olduğu bu model ile verici ve alıcının optik güç bağıntıları elde edilebilmektedir.



Şekil 3.9. Boş uzayda yayılma modeli

Lambert yayılım modeli Eş. (3.2) 'de gösterilen eşitlik elde edilmektedir. Eş. (3.2)'de yer alan $L(\theta)$ değeri Lambert karakteristiğine göre elde edilen LED ışık yoğunluğunu ifade etmektedir.

$$L(\theta) = \frac{m+1}{2\pi} P_{T,opt} \cos^m(\theta) \quad (3.2)$$

Eşitlikte yer alan m değeri Lambert yayılımı mertebesini göstermektedir ve bu m değeri Eş. (3.3) ile gösterilmektedir. Eş. (3.3)'te yer alan θ açısı LED'den gelen ışığın açısını ve $\theta_{1/2}$ ise yarı hüzmeye açısını temsil etmektedir (Bhalerao vd., 2017).

$$m = \frac{\ln(2)}{\ln(\cos(\theta_{1/2}))} \quad (3.3)$$

Şekil 3.1'de ifade edilen elektriksel güç ile optik güç arasındaki dönüşümlerin ilki LED elemana oluşmaktadır. LED elemana gelen elektriksel akım (I), LED ile birlikte optik güce ($P_{T,opt}$) dönüştürülmektedir. Bu dönüşümü ifade etmek için Eş. (3.4)'ten yararlanılabilir. Eş. (3.4) içerisinde yer alan parametrelerden η LED'in kuantum verimliliğini, λ LED ışığının dalga boyunu, e elektron yükünü ve son olarak I LED'e uygulanan akım değerini ifade etmektedir (Chi, 2018).

$$P_{T,opt} = \frac{\eta h \lambda I}{e} \quad (3.4)$$

Verici kısmında LED aracılığıyla yayılan ışık, haberleşme kanalından geçerek alıcı kısımdaki algılayıcı sensör olan fotodiyot üzerine düşmektedir. VLC sistemler için temel kanal modelleri bulunmaktadır. Bu kanal modelleri verici eleman ile algılayıcı sensörün birbirlerine göre konumlarına göre LOS ve N-LOS kanal olarak iki temel başlık altında toplanabilir. LOS kanal modelinde verici ile alıcı arasında direkt görüş hattı bulunmakta ve aralarında engel olmadığı kabul edilmektedir. N-LOS kanal modelinde ise verici ile

alıcı sensör arasında olası engellerde kabul edilmekte ve yansımalar dikkate alınmaktadır. Eş. (3.5)'te LOS kanal modeline ait DC kanal kazancı verilmiştir. Şekil 3.9'da verilen senaryo için bu denklemde verilen parametrelerden A_r fotodiyotun etki alanını ifade ederken ϕ açısı da LED'den gelen ışığın fotodiyot üzerine düşerken normal ile yaptığı açı olarak ifade edilebilir. Eş. (3.5)'te yer alan d Şekil 3.9'da verilen LED ile fotodiyot arasındaki mesafedir.

$$H(0) = \frac{m+1}{2\pi d^2} A_r \cos^m(\theta) \cos(\phi) \quad (3.5)$$

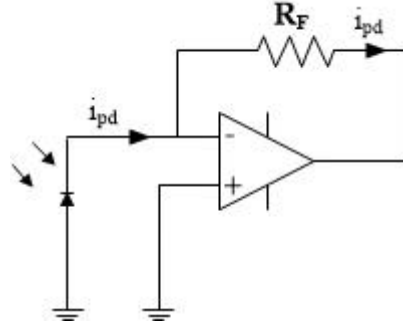
Eş. (3.5)'te verilen kanalın DC kazancından yararlanılarak alıcı kısımda oluşan optik güç hesaplanabilir. Şekil 3.1 incelendiğinde alıcıya ulaşan optik gücün LED çıkışının kanaldan geçmesi sonucunda oluştuğu görülmektedir. Alıcı kısmında yer alan ışığa duyarlı sensörün üzerine düşen ışık bu eleman üzerinde optik güç oluşturmaktadır. Alınan ışık ile ışığa duyarlı elemanda oluşan optik güç değeri olan $P_{R,opt}$ Eş. (3.6)'da gösterildiği gibi hesaplanabilmektedir (Kisacik vd., 2019).

$$P_{R,opt} = H(0)P_{T,opt} \quad (3.6)$$

Şekil 3.1'de gösterilen optik bölgede gerçekleşen bir diğer dönüşüm ise algılanan optik gücün fotodiyot tarafından akıma (i_{pd}) dönüştürülmesidir. Optik gücün akıma dönüştürülmesiyle birlikte optik bölgeden elektriksel bölgeye geçiş sağlanır. Bu dönüşüm Eş. (3.7)'de gösterildiği gibi ifade edilmektedir (Chi, 2018). Eş. (3.7)'de verilen h parametresi Plank sabitini ifade ederken, c parametresi ışık hızını belirtmektedir.

$$i_{pd} = \frac{qe\lambda}{hc} P_{R,opt} \quad (3.7)$$

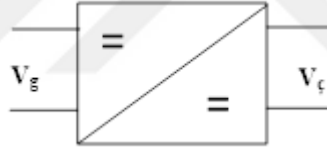
Şekil 3.1'de gösterilen TIA bloğunda akımı gerilime dönüştüren ve kuvvetlendiren bir yükseltici kullanılmaktadır. Fotodedektör olarak kullanılan sensörlerin çıkışında üretilen düşük akım değerlerinin yükseltilmesi için kullanılan bu yükselticinin temel gösterimi Şekil 3.10'da verilmiştir. Bu şekilde yer alan R_F geri besleme direncidir ve i_{pd} sensörün çıkış akımıdır. TIA devresinin çıkışında elde edilen gerilim değeri R_F direncinin i_{pd} akımıyla çarpımına eşittir.



Şekil 3.10. TIA genel gösterimi (Höher, 2019)

3.2. İzolesiz DC-DC Güç Dönüştürücüleri

DC-DC dönüştürücü en temel şekilde giriş gerilimi DC olan ve çıkışında yine bir DC gerilim elde etmek için kullanılan devrelerdir. DC kıyıcı veya DC gerilim ayarlayıcı olarak da adlandırılan bu dönüştürücülere ait temel blok şeması Şekil 3.11’de gösterilmiştir (Bodur, 2014).

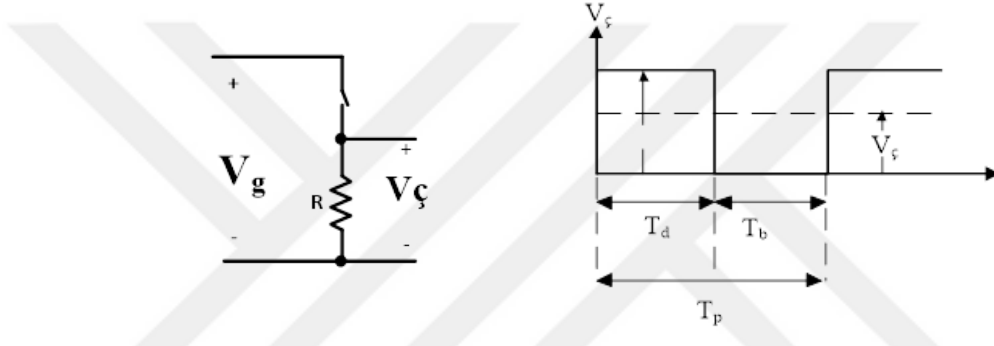


Şekil 3.11. DC-DC dönüştürücüler (Bodur, 2014)

DC-DC dönüştürücüler motor kontrolü, anahtarlama güç kaynakları gibi uygulamalarda kullanılmaktadır. DC-DC dönüştürücülerde giriş geriliminde ve çıkış yükünde meydana gelebilecek olası dalgalanmalara rağmen ortalama çıkış geriliminin istenen değerde olması için dönüştürücünün kontrol edilmesi gerekmektedir. DC-DC dönüştürücülerde, DC giriş gerilimini bir seviyeden başka bir seviyeye dönüştürülmesi için bir veya birden fazla anahtarlama elemanı kullanılmaktadır. Çıkışta istenen gerilim değerinin kontrolü için dönüştürücüde kullanılan anahtarın iletimde ve kesimde olduğu süreler kontrol edilerek çıkışta giriş geriliminden daha düşük veya daha yüksek gerilim elde edilmektedir. Çıkış gerilimini kontrol etmek için yaygın olarak kullanılan yöntemlerden olan darbe genişlik modülasyonu (pulse width modulation, PWM) ile sabit frekansta anahtarlama işlemi yapılır ve anahtarlama periyodu $T_p = T_d + T_b$ şeklinde anahtarın

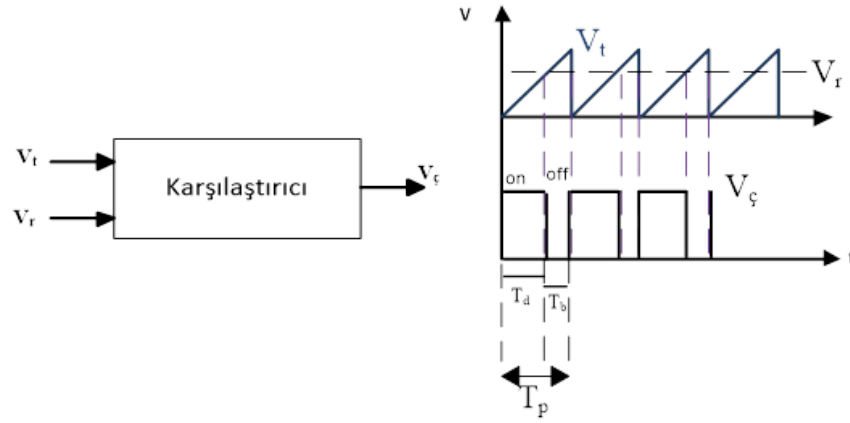
iletimde (T_d) ve kesimde (T_b) olduğu sürelerin toplamına eşittir. PWM tekniğinde anahtarın iletimde kalma süresi değiştirilerek çıkışta elde edilen ortalama gerilim değeri ayarlanmaktadır. Bu teknik uygulanırken önemli olan doluluk oranıdır. Eş. (3.8)'de verilen doluluk oranı anahtarın iletimde kaldığı sürenin toplam periyoda oranını ifade eder ve D sembolü ile gösterilir. Şekil 3.12'de en temel anahtarlama DC-DC dönüştürme işlemi ve anahtarlama periyodu boyunca çıkışta oluşan sinyal gösterilmiştir (Mohan vd., 2003).

$$D = \frac{T_d}{T_p} \quad (3.8)$$



Şekil 3.12. Anahtarlama DC-DC dönüştürme yöntemi ve temel dalga şekilleri

Şekil 3.13'te PWM kontrol sinyalinin elde edilişi gösterilmiştir. V_t ile gösterilen sinyal tekrar eden bir testere dişi sinyalidir, V_r ile gösterilen ise sabit bir referans sinyalidir. Bu iki sinyal bir karşılaştırıcı ünitesi ile karşılaştırılarak PWM kontrol sinyali elde edilmektedir. V_r sinyalinin V_t sinyalinden daha büyük değerli olduğu kısımlarda yarı iletken güç elemanı iletimde iken V_t sinyalinin referans sinyalinden daha küçük olduğu zaman diliminde yarı iletken güç elemanı kesimdedir.



Şekil 3.13. PWM blok şeması ve karşılaştırma sinyalleri

DC-DC dönüştürücülerin farklı özelliklerine bakılarak yapılan sınıflandırmalar mevcuttur. Bu sınıflandırmalardan endüktanslı ve izolesiz DC-DC dönüştürücüler grubuna dâhil temel topolojiler düşürücü (buck), yükseltici (boost), düşürücü-yükseltici (buck-boost), CUK, SEPIC ve ZETA dönüştürücülerdir. Endüktanslı dönüştürücülerde temel prensip devre içerisinde yer alan aktif ve pasif güç elemanının endüktans ile bağlantı şeklinin değiştirilmesidir. Endüktanslı dönüştürücülerde temel çalışma şekli, yarı iletken güç elemanının iletim aralığında girişte bulunan DC kaynaktan beslenen endüktansın güç elemanının kesimde olduğu aralık boyunca depoladığı enerjiyi çıkışa aktarmasıdır. DC-DC dönüştürücüler sürekli akım modu (continuous current conduction mode, CCM) ve kesintili akım modu (discontinuous current conduction mode, DCM) olmak üzere iki ayrı çalışma modunda çalışır. Bu modlarda çalışma, devrenin frekansına ve endüktans değerine bağlı olarak gerçekleştirilmektedir (Bodur, 2014).

3.2.1. Düşürücü (Buck) DC-DC dönüştürücü

Düşürücü dönüştürücüler girişte uygulanan gerilim değerinden daha küçük çıkış gerilimi elde etmek için kullanılmaktadır. Şekil 3.14 (a)'da düşürücü dönüştürücüye ait temel devre şeması gösterilmiştir. Dönüştürücü iletim ve kesim olmak üzere iki aralıkta incelenebilir. Şekil 3.14 (b)'de dönüştürücünün iletim aralığına ait devre şeması verilmiştir. Bu aralıkta yarı iletken güç anahtarı (T) iletimde ve diyot (D) kesimdedir. Aralık süresince giriş gerilimi aracılığıyla hem çıkışta yer alan yük hem de L ile sembolize edilen endüktans beslenmektedir. Bu aralıkta endüktansın üzerinden geçen

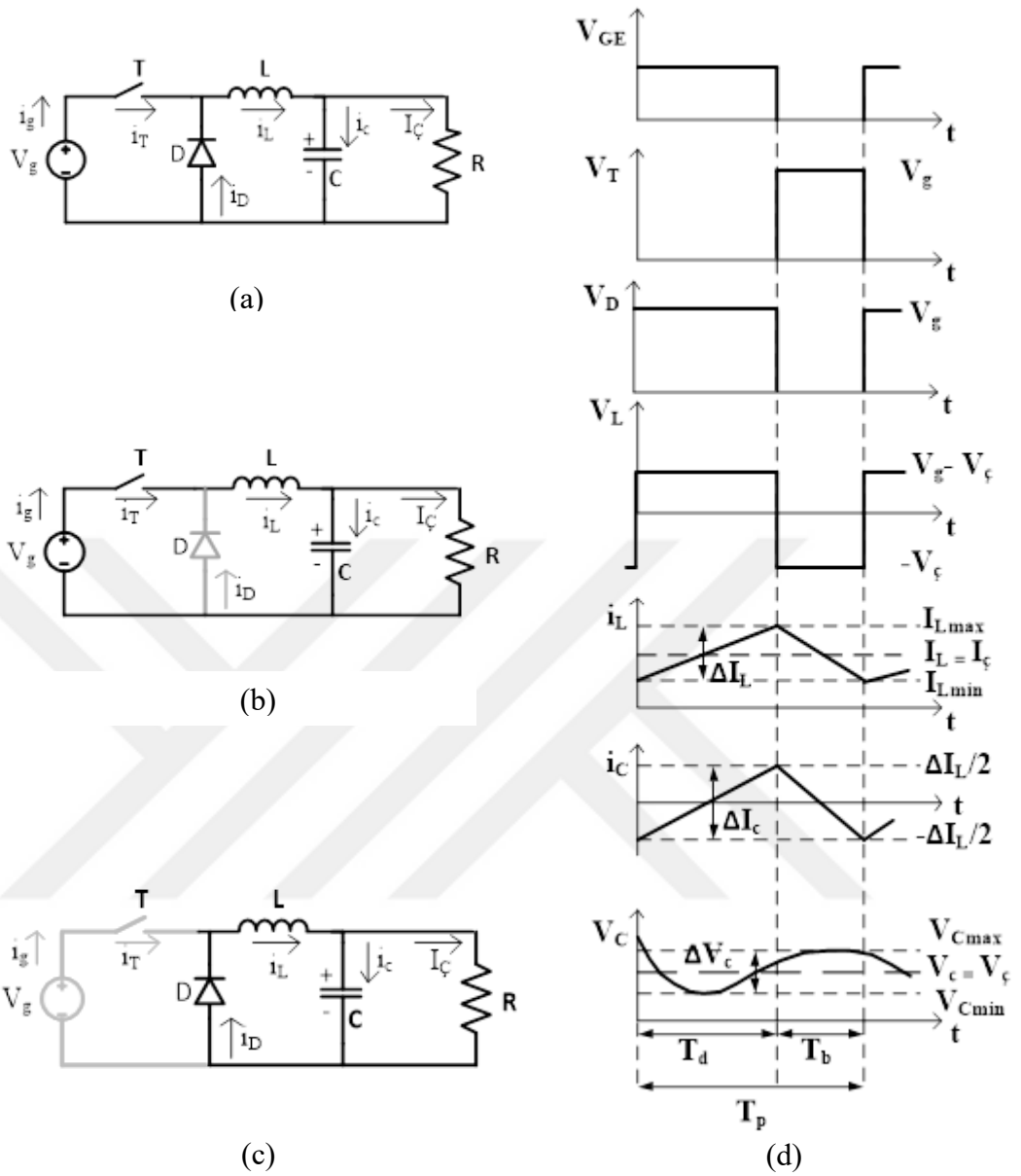
akım değeri ve endüktansın enerji seviyesi artmaktadır. Güç anahtarının $t = T_d$ anında sinyalinin kesilmesiyle birlikte anahtar kesime girer ve 2. aralık başlar.

Şekil 3.14 (c)'de eş değer devre şeması verilen bu aralıkta diyot ilettime girer ve çıkış yükünü 1. aralık boyunca enerjilenmiş olan endüktans beslemeye başlar. Endüktansta depolanan enerji azalır ve endüktans akımı lineer olarak düşer. Şekil 3.14 (d)'de kararlı rejimde CCM modunda ve $2/3$ doluluk oranına sahip bir düşürücü DC-DC dönüştürücünün çalışmasına ait temel dalga şekilleri gösterilmiştir.

Eş. (3.9) transistörün iletimde ve diyotun kesimde olduğu aralık için, Eş. (3.10) transistörün kesimde diyotun iletimde olduğu aralık için endüktans gerilimi dalga şekline göre elde edilmektedir.

$$V_g - V_\varsigma = L \frac{di_L}{dt} \quad (3.9)$$

$$-V_\varsigma = \frac{di_L}{dt} \quad (3.10)$$



Şekil 3.14. (a) Düşürücü dönüştürücü devre şeması (b) İletim modu devre şeması (c) Kesim modu devre şeması (d) Temel dalga şekilleri

Eş (3.11), 1. aralıkta endüktans akımının artma miktarını, Eş (3.12) ise 2. aralıkta endüktans akımında meydana gelen azalma miktarını ifade etmektedir.

$$\Delta I_{Lp} = \frac{V_g - V_C}{L} T_d \quad (3.11)$$

$$\Delta I_{Ln} = \frac{V_C}{L} T_b \quad (3.12)$$

Eş. (3.11) ve Eş. (3.12) ile ifade edilen endüktans akımındaki artış ve azalış miktarları kararlı rejimde çalışan dönüştürücü için incelendiğinde birbirine eşittir ve bu eşitlik kullanılarak Eş. (3.13) elde edilmektedir.

$$(V_g - V_\zeta)T_d = V_\zeta T_b \quad (3.13)$$

DC dönüştürücünün çıkışında elde edilen gerilim değeri ise kararlı rejimde endüktans geriliminin pozitif ve negatif alanlarının birbirine eşitliğinden faydalanılarak Eş. (3.14)'te yer alan eşitlikle ifade edilebilir.

$$V_\zeta = DV_g \quad (3.14)$$

Eş. (3.15) dönüştürücünün girişindeki ve çıkışındaki aktif güçlerin eşitliğinden faydalanılarak elde edilen giriş akımı ile çıkış akımı arasındaki bağıntıyı ifade etmektedir.

$$I_g = DI_\zeta \quad (3.15)$$

Ortalama endüktans akımını elde etmek için kararlı rejimdeki kondansatör akımının pozitif ve negatif alanlarının eşitliğinden faydalanılmaktadır ve (3.16)'da yer alan eşitlik yazılabilmektedir.

$$I_L = I_\zeta \quad (3.16)$$

DC-DC düşürücünün tasarım aşamasında endüktans ve kapasitans değerlerinin hesaplanması için bazı eşitliklerden faydalanılmaktadır. Endüktans değerinin hesaplanması için öncelikle dönüştürücünün çıkışında ne kadar dalgalanmaya izin verileceği belirlenmelidir. Kararlı rejimde $\Delta I_{Lp} = \Delta I_{Ln} = \Delta I_L$ bağıntılarının birbirine eşitliğinden faydalanılarak oluşturulan Eş. (3.17) ile endüktans akımındaki dalgalanma miktarı bulunur. ΔI_L dalgalanma miktarına göre L değeri hesaplanır. Denklemden yer alan f_p anahtarlama frekansını ifade etmektedir.

$$\Delta I_L = D(1-D) \frac{V_g}{f_p L} \quad (3.17)$$

Tasarım için gerekli olan kapasitör değeri ise gerilim değerinde ne kadar dalgalanmaya izin verileceğine göre hesaplanır ve Eş. (3.18)'de gösterilmiştir.

$$\Delta V_C = \frac{\Delta I_L}{8f_p C} \quad (3.18)$$

3.2.2. Yükseltici (Boost) DC-DC dönüştürücü

Yükseltici dönüştürücüler girişte uygulanan gerilim değerinden daha büyük çıkış gerilimi elde etmek için kullanılmaktadır. Şekil 3.15 (a)'da yükseltici dönüştürücüye ait temel devre şeması verilmiştir. Dönüştürücü iletim ve kesim olmak üzere iki aralıkta incelenebilir. Şekil 3.15 (b)'de dönüştürücünün iletim aralığına ait devre şeması verilmiştir. Bu aralıkta yarı iletken güç anahtarı (T) iletimde ve diyot (D) kesimdedir. Aralık süresince giriş gerilimi aracılığıyla L ile gösterilen endüktans beslenmektedir. Bu aralıkta endüktansın üzerinden geçen akım değeri ve endüktansın enerji seviyesi artmaktadır. Transistörün $t = T_d$ anında sinyalinin kesilmesiyle birlikte transistör kesime girer ve 2. aralık başlar.

Şekil 3.15 (c)'de eşdeğer devre şeması verilen bu aralıkta diyot ilettime girer, çıkış yükünü V_g ile gösterilen giriş gerilimi ve 1. aralık boyunca enerjilenmiş olan L endüktansı beslemeye başlar. Endüktansta depolanan enerji azalır ve endüktans akımı lineer olarak düşer. Şekil 3.15 (d)'de kararlı rejimde CCM modunda ve 2/3 doluluk oranına sahip bir yükseltici dönüştürücü çalışmasına ait temel dalga şekilleri gösterilmiştir.

Eş. (3.19) 1. aralıktaki, Eş. (3.20) ise 2. aralıktaki endüktans geriliminin dalga şekillerine göre elde edilmiştir.

$$\Delta I_{Lp} = \frac{V_g}{L} T_d \quad (3.19)$$

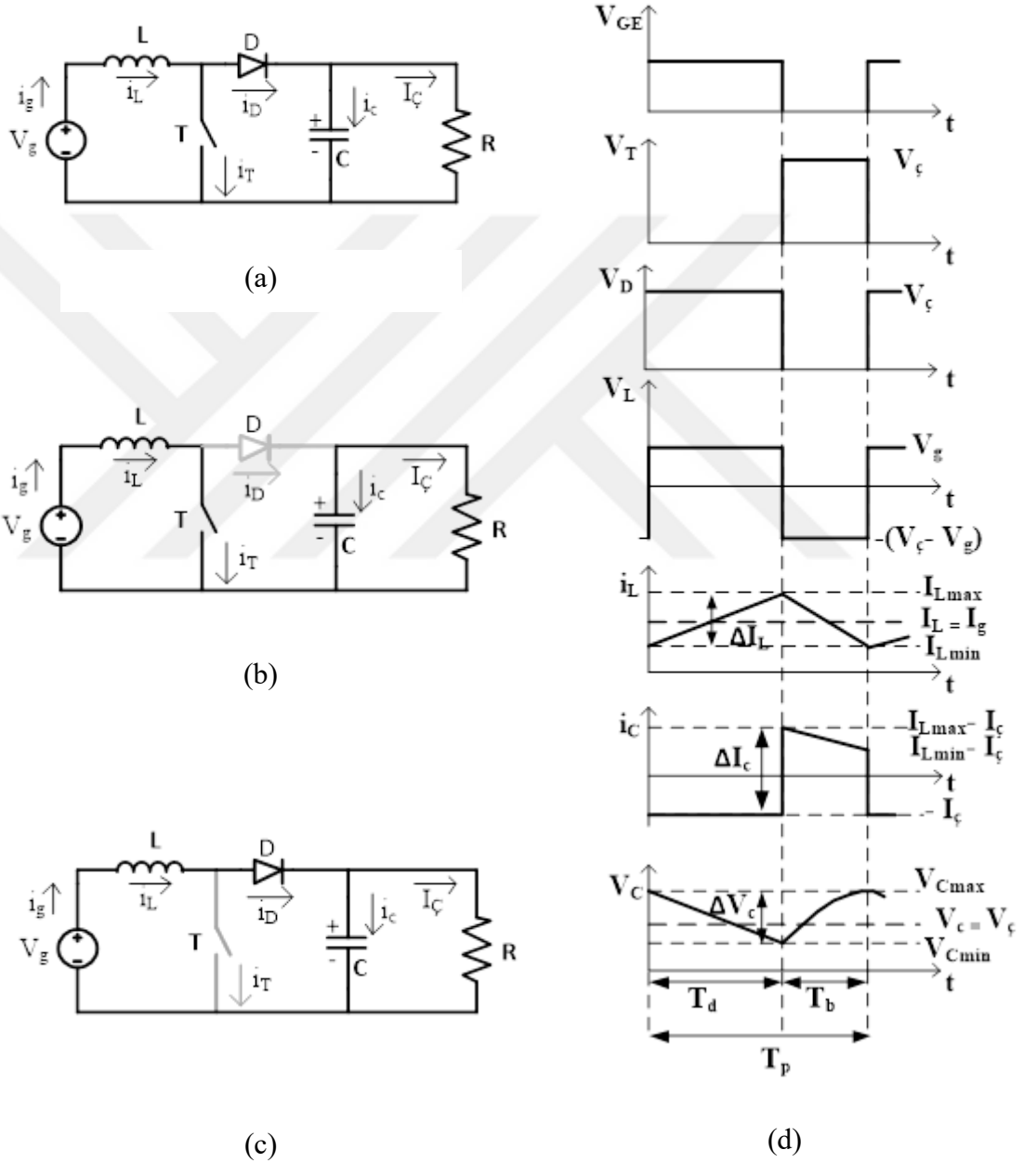
$$\Delta I_{Ln} = \frac{(V_C - V_g)}{L} T_b \quad (3.20)$$

Endüktans geriliminin negatif ve pozitif alanlarının eşit olmasından yararlanılarak kararlı rejimdeki dönüştürücünün ortalama DC çıkış gerilimi Eş. (3.21) ile hesaplanabilmektedir.

$$V_C = \frac{1}{1-D} V_g \quad (3.21)$$

Çıkışta giriş geriliminden daha yüksek bir gerilim elde edilen yükseltici dönüştürücünün giriş ve çıkışındaki güçlerin birbirine eşit olmasından dolayı akımlar arasında Eş. (3.22)'de gösterildiği gibi bir bağıntı bulunmaktadır.

$$I_g = \frac{1}{1-D} I_\zeta \quad (3.22)$$



Şekil 3.15. (a) Yükseltici dönüştürücü devre şeması (b) İletim modu devre şeması (c) Kesim modu devre şeması (d) Temel dalga şekilleri

Yükseltici dönüştürücüde giriş akımı ortalaması endüktans akımına eşittir ve bu Eş. (3.23) ile gösterilmektedir.

$$\Delta I_L = D(1-D) \frac{V_C}{f_p L} I_L = I_g \quad (3.23)$$

Yükseltici tasarımı yapılırken $\Delta I_{Lp} = \Delta I_{Ln} = \Delta I_L$ bağıntısından faydalanılarak endüktans akımında ne kadar dalgalanma olacağına karar verilerek endüktans değeri L Eş. (3.24) ile hesaplanabilir. Kapasitör değeri C, gerilim dalgalanma miktarının ne kadar olacağına karar verilerek Eş. (3.25) ile kullanılarak hesaplanabilir.

$$L = D(1-D) \frac{V_C}{f_p \Delta I_L} \quad (3.24)$$

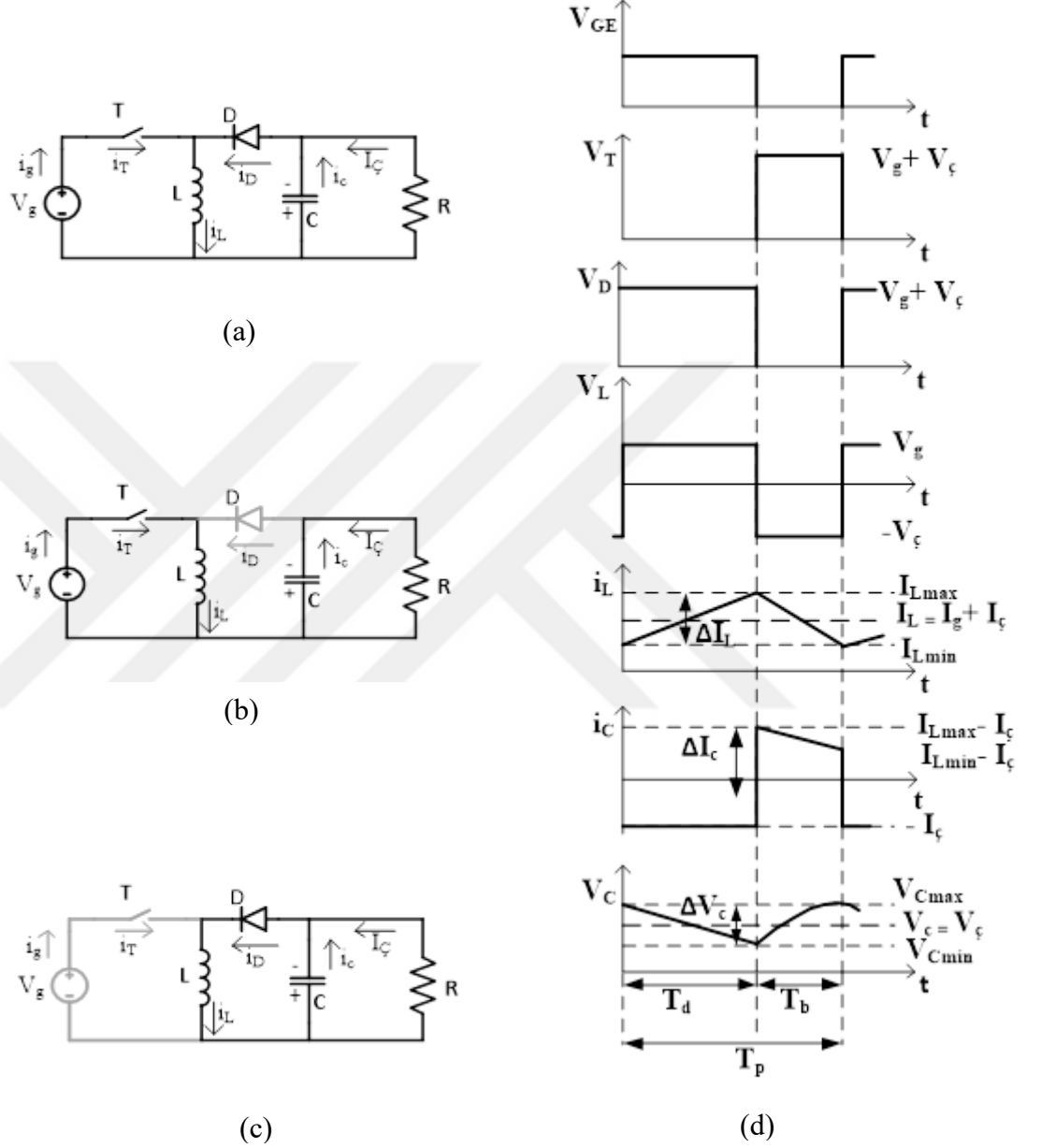
$$C = \frac{DI_C}{f_p \Delta V_C} \quad (3.25)$$

3.2.3. Düşürücü- Yükseltici (Buck - Boost) DC-DC dönüştürücü

Düşürücü-yükseltici dönüştürücüler sıfır ile istenen maksimum bir gerilim değeri arasında çıkış elde etmek için kullanılır. Düşürücü ve yükseltici dönüştürücülerden farklı olarak çıkışta elde edilen gerilimin yönü girişe göre terstir, bu nedenle ters çıkışlı devre de denilmektedir. Şekil 3.16 (a)'da düşürücü-yükseltici dönüştürücüye ait temel devre şeması gösterilmiştir. Dönüştürücü iletim ve kesim olmak üzere iki aralıkta incelenebilir. Şekil 3.16 (b)'de dönüştürücünün iletim aralığına ait devre şeması verilmiştir. Bu aralıkta yarı iletken güç anahtarı (T) iletimde ve diyot (D) kesimdedir. Aralık süresince giriş gerilimi V_g aracılığıyla L ile gösterilen endüktans beslenmektedir. Bu aralıkta endüktansın üzerinden geçen akım değeri ve endüktansın enerji seviyesi artmaktadır. Bu aralık boyunca yükseltici dönüştürücü gibi çalışan dönüştürücüde çıkış yükünü C ile gösterilen kapasitör beslemektedir. Transistörün $t = T_d$ anında sinyalinin kesilmesiyle birlikte transistör kesime girer ve 2. aralık başlar.

Şekil 3.16 (c)'de eş değer devre şeması verilen bu aralıkta diyot iletime girer ve çıkış yükünü 1. aralık boyunca enerjilenmiş olan endüktans beslemeye başlar. Endüktansta depolanan enerji azalır ve endüktans akımı lineer olarak düşer. Bu aralıktaki çalışma düşürücü dönüştürücü ile aynıdır. Şekil 3.16 (d)'de kararlı rejimde CCM modunda ve 2/3

doluluk oranına sahip bir düşürücü-yükseltici dönüştürücü çalışmasına ait temel dalga şekilleri gösterilmiştir.



Şekil 3.16. (a) Düşürücü-Yükseltici dönüştürücü devre şeması (b) İletim modu devre şeması (c) Kesim modu devre şeması (d) Temel dalga şekilleri

Endüktans gerilimin dalga şekline göre iletim ve kesim aralıkları için Eş. (3.26) (iletim aralığı) ve Eş. (3.27) (kesim aralığı) bağıntıları yazılabilir.

$$\Delta I_{Lp} = \frac{V_g}{L} T_d \quad (3.26)$$

$$\Delta I_{Ln} = \frac{V_\zeta}{L} T_b \quad (3.27)$$

Ortalama DC çıkış gerilimi Eş. (3.28) ile gösterilirken giriş gücünün çıkış gücüne eşit olmasından faydalanılarak elde edilen akım Eş. (3.29) ile ifade edilmiştir.

$$V_\zeta = \frac{D}{1-D} V_g \quad (3.28)$$

$$I_g = \frac{D}{1-D} I_\zeta \quad (3.29)$$

Düşürücü-yükseltici dönüştürücülerde endüktans akımı Eş. (3.30)'da gösterilmiştir.

$$I_L = I_g + I_\zeta \quad (3.30)$$

Tasarım yapmak için gerekli olan L değerinin hesaplanması için Eş. (3.31) ve C değerinin hesaplanması için Eş. (3.32) kullanılabilir.

$$L = D(1-D) \frac{(V_g + V_\zeta)}{f_p \Delta I_L} \quad (3.31)$$

$$C = \frac{D I_\zeta}{f_p \Delta V_C} \quad (3.32)$$

4. MATERİYAL VE YÖNTEM

4.1. VLC Uygulamalarında Kullanılan İzolesiz DC-DC Dönüştürücülerin İncelenmesi ve Simülasyon Sonuçları

Tezin bu bölümünde VLC uygulamalarında yaygın olarak kullanılan izolesiz DC-DC dönüştürücü türlerinin analizi için MATLAB/Simulink programı kullanılarak simülasyon çalışması yapılmış ve sonuçları sunulmuştur. Simülasyon çalışmasında VLC sistemlerinin en temel kısımları olan verici, alıcı ve kanal kullanılarak sistemin baştan sona analizi gerçekleştirilmiştir. Simülasyon çalışmasında VLC uygulamalarında verici kısmında kullanılan DC-DC izolesiz dönüştürücü türlerinden düşürücü dönüştürücü, yükseltici dönüştürücü ve düşürücü-yükseltici dönüştürücü olmak üzere 3 temel tür incelenmiştir. Öncelikle bu dönüştürücü türlerinin istenen akım, gerilim ve güç değerlerine göre tasarımı gerçekleştirilmiş ve simülasyonda bu dönüştürücülerin çalışması analiz edilmiştir. Verici kısmında veri iletimi için LED kullanılmıştır. LED'in belirlenen bir giriş verisinin modüle edilmiş sinyali kanal boyunca aktarması sağlanmıştır. Simülasyon çalışmasında alıcı kısmında fotodiyot kullanılmış ve bu eleman aracılığıyla verici kısımdan gelen verinin algılanması gerçekleştirilmiştir. Simülasyonda LOS kanal modelinden faydalanılarak verici ve alıcı arasında optik güç dönüşümleri denklemleri aracılığıyla veri aktarımı gerçekleştirilmiştir. Simülasyon sonuçlarında dönüştürücülerde kullanılan temel elemanların çalışma aralıkları boyunca akım, gerilim grafikleri sunulmuştur. Ayrıca simülasyon sonuçlarında VLC işlevinin gerçekleştirildiğini göstermek amacıyla giriş verisinin tüm süreçten geçtikten sonra sistem çıkışında tekrar elde edilmesine ait sonuçlar da bu çalışmada verilmiştir.

VLC sistemlerde kullanılan LED sürücülere ait temel blok şeması Şekil 4.1'de gösterilmiştir. VLC LED sürücü yapısı PFC birimi, Güç Kontrol birimi ve haberleşmenin gerçekleştirilebilmesi için eklenen modülatör ünitesinden oluşmaktadır. Güç faktörü düzeltme ünitesi girişte kullanılan AC sinyalin enerji kalite standartlarına uygun olarak doğrultulmasından sorumludur. Güç kontrolü ünitesi LED'in nominal çalışma noktasında çalışmasını sağlamak amacıyla uygun regüleli DC akım veya gerilim elde etmek için kullanılmaktadır. Güç faktörü düzeltme bloğundan gelen çıkış geriliminin regüle edilmesi ve düşük frekans dalgalanmalarının filtrelenmesi bu blokta gerçekleştirilir. Modülatör bloğu geleneksel LED sürücü devrelerine VLC işlevi kazandırmak için kullanılan ilave

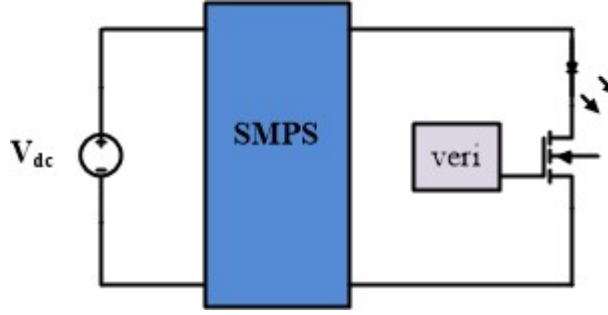
bloktur. LED'in verici olarak kullanıldığı uygulamalarda veri girişinin üretilmesi gerekmekte ve bu verinin LED'in girişi olarak kullanılması için akım ve gerilim sinyallerinin veriye uygun olarak şekillendirilmesi gerekmektedir. Bu işlemler modülatör bloğu ile gerçekleştirilir. Modülasyon bloğu tasarımı yapılırken modülasyon tipi, maliyet, devre karmaşıklığı gibi özellikler göz önüne alınarak tasarım yapılmaktadır. Şekil 4.1'de gösterilen ve üç temel blok içeren yapı en genel gösterim olup uygulamanın gerekliliklerine göre bazı bloklar kullanılmayabilir (Teixeira vd., 2022).



Şekil 4.1. VLC vericisi genel gösterim (Teixeira vd., 2019)

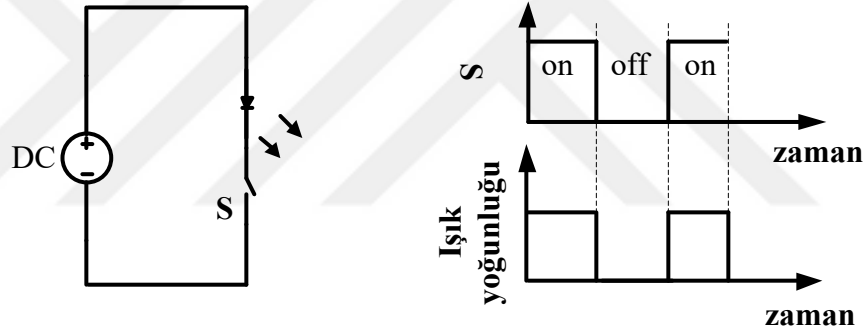
VLC sisteminin girişinde DC gerilim olan uygulamalar için DC-DC güç dönüştürücüleri kullanılarak giriş gerilimi LED için istenen değere dönüştürülmektedir. Literatürde yer alan çalışmalarda modülatör olarak kullanılacak devreler için topolojiler farklı açılardan sınıflandırılmıştır. Kullanılan ilave elemanlara göre yapılan sınıflandırmada LED sürücü topolojileri dijital kontrollü ilave anahtar içeren, lineer kuvvetlendirici içeren ve sadece DC-DC dönüştürücü kullanılan topolojiler olarak üç kısma ayrılmıştır. Dijital kontrollü anahtar içeren LED sürücü topolojilerinde LED elemana paralel veya seri bağlantılı olacak şekilde yarı iletken bir güç elemanı kullanılarak VLC işlevi gerçekleştirilir.

Şekil 4.2'de sabit gerilim kaynaklı LED sürücü topolojisine ait genel gösterim verilmiştir. Seri anahtarlı modülatör (series switch modulator, SSM) olarak da isimlendirilen bu topoloji oldukça basit bir yapıya sahiptir. Şekilde anahtarlama güç kaynağı olarak gösterilen blok içerisinde geleneksel DC-DC güç dönüştürücülerinden herhangi biri kullanılabilir. Bu topolojide veri bloğu VLC ile iletmek istenen bilgiyi ifade eder ve bu blok bir anahtarlama elemanı ile bağlantılıdır. MOSFET yarı iletken güç elemanı ile bağlantılı olan veri bloğundaki anahtarlama sinyaline göre LED anahtarlanır. Bu tasarımlarda veri ile LED anahtarlama eş zamanlı olarak yapılmaktadır.



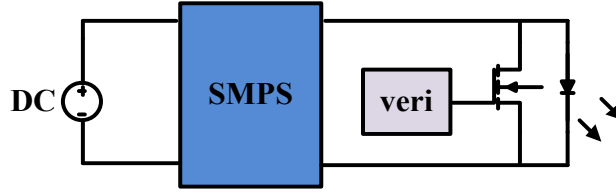
Şekil 4.2. Sabit gerilim kaynaklı LED sürücü topolojisi

Şekil 4.3'te SSM topolojisiinde örnek bir devre ve bu devrenin çalışmasının sonucunda oluşan örnek dalga şekilleri gösterilmiştir. Temel prensip olarak S ile gösterilen anahtarın açık olduğu (ON) aralıkta LED üzerinden geçen akımla orantılı olarak LED'in ışık yoğunluğu yüksektir. S anahtarının kesimde olduğu (OFF) aralıkta ise LED'in ışık yoğunluğu düşüktür.



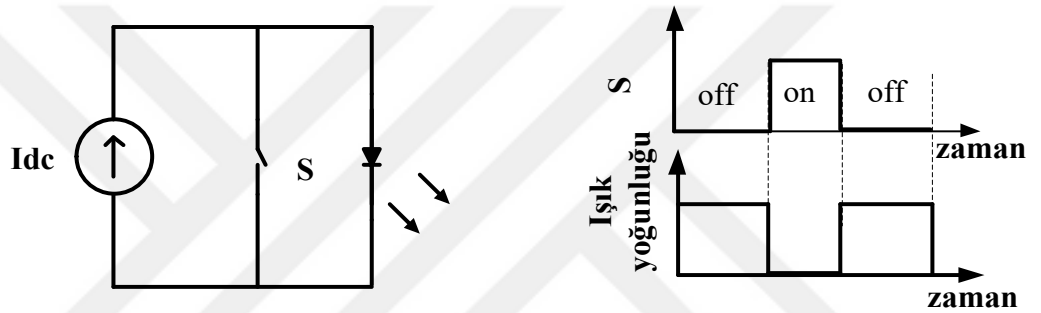
Şekil 4.3. Gerilim kaynağı modeli ve çıkış gerilimi (Teixeira vd., 2022)

Şekil 4.4'te Paralel Anahtarlı Modülatör (parallel switch modulator, PSM) olarak da adlandırılan sabit akım kaynağı beslemeli LED sürücü topolojisi gösterilmektedir. Bu topolojide VLC veri bloğu ile anahtarlama elemanı paralel bağlantıdadır ve MOSFET ile eşzamanlı bir şekilde anahtarlanan LED ile veri aktarımı gerçekleştirilmiş olur. Bu topolojide anahtarlama güç kaynağı bloğu için düşürücü, yükseltici, düşürücü-yükseltici gibi geleneksel dönüştürücü devreleri kullanılabilir (Modepalli ve Parsa, 2013).



Şekil 4.4. Sabit akım kaynağı kontrollü

Şekil 4.5'te PSM topolojisiinde örnek bir devre ve bu devrenin çalışmasının sonucunda oluşan örnek dalga şekilleri gösterilmiştir. Temel prensip olarak S ile gösterilen anahtarın kapalı olduğu (OFF) aralıkta LED'in ışık yoğunluğu yüksektir. S anahtarının iletimde olduğu (ON) aralıkta ise LED'in ışık yoğunluğu düşüktür.



Şekil 4.5. Akım kaynağı modeli ve çıkış grafiği (Teixeira vd., 2022)

Her iki topoloji için de S anahtarına uygulanan ON ve OFF sinyallerinin iletilmek istenen VLC verisi ile uyumlu olması LED'in VLC verisine göre anahtarlanmasını ve LED ışık yoğunluğunun değişimi ile verinin iletilmesini sağlamaktadır.

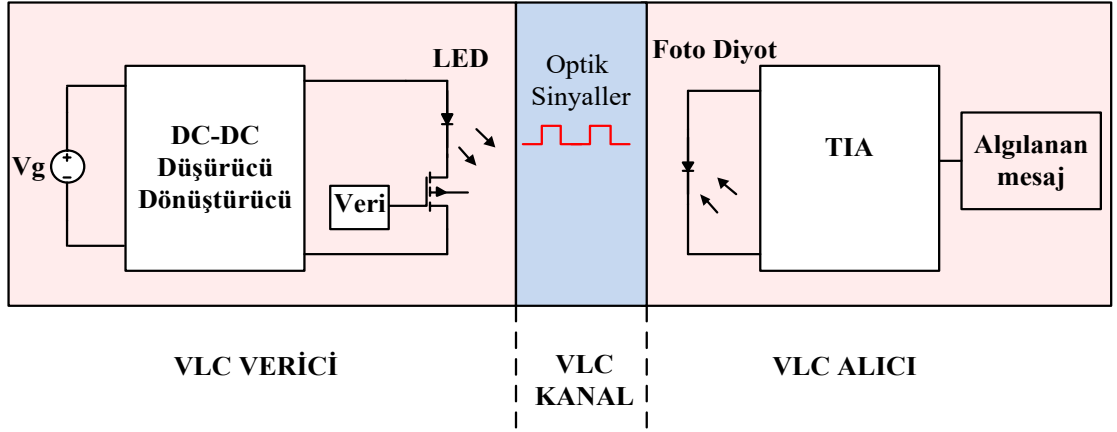
VLC uygulamalarında yaygın olarak kullanılan izolesiz DC-DC dönüştürücüler, bu sistemlerin verici kısmında yer almaktadır. VLC sistemin verici devresinin sonunda yer alan ve veri iletiminden sorumlu olan LED veya LED dizileri için istenen gerilim değerinin elde edilmesi büyük önem taşımaktadır. VLC uygulamalarında farklı DC-DC dönüştürücülerin kullanımının baştan sona bir VLC sistemi içerisinde nasıl bir çalışma gerçekleştirdiğini analiz etmek için bir simülasyon çalışması yapılmıştır. Bu simülasyon çalışmasında sabit gerilim kaynağı topolojisi kullanılarak DC-DC dönüştürücüler aracılığıyla verici olarak kullanılan LED elemana sabit gerilim sağlanmaktadır ve seri anahtarlı modülatör ile LED veriye uygun olarak anahtarlanmaktadır. Sistemin baştan sona incelenmesi için VLC sistemine ait kanal ve alıcı kısmı da simülasyon çalışmasında

yer almaktadır. Gerçekleştirilen simülasyon çalışmasında endüstriyel alanda en yaygın kullanılan dönüştürücülerden DC-DC düşürücü dönüştürücü, DC-DC yükseltici dönüştürücü, DC-DC düşürücü-yükseltici dönüştürücülerin VLC simülasyon çalışması içerisinde çalışmaları analiz edilmiştir. Bu dönüştürücü türlerinin her biri için çıkışta istenen gerilim değerlerine göre devrede kullanılan elemanları değerleri hesaplanmıştır.

Ayrıca bazı VLC uygulamalarında giriş AC kaynak olarak kullanılmaktadır. Bu uygulamalarda DC-DC dönüştürücüler ile AC giriş sinyali arasında trafo ve doğrultucu devreler kullanılmaktadır. AC giriş kaynağının kullanıldığı uygulamalar için toplam harmonik bozulma (total harmonic distortion, THD) önemli bir parametredir. Simülasyon çalışmasında kullanılan DC-DC dönüştürücülerin girişinin AC kaynak olması durumu için THD değerleri incelenmiştir.

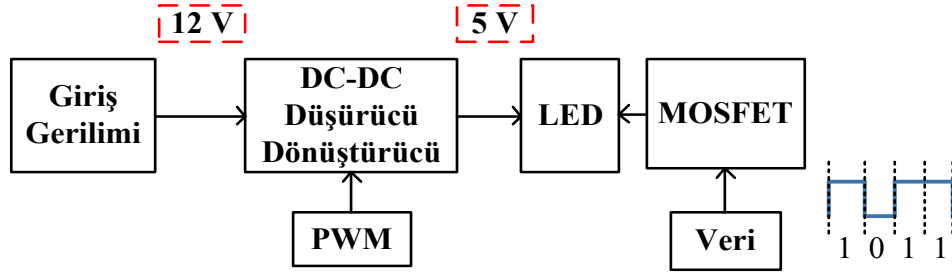
4.2. VLC Uygulamalarında Düşürücü DC-DC Dönüştürücü Kullanımı ve Simülasyonu

VLC uygulamalarında giriş gerilim değerinin LED için istenen gerilim değerinden daha büyük olduğu durumlar için DC-DC düşürücü dönüştürücüler kullanılmaktadır. Bu dönüştürücüler kullanılarak giriş gerilimi LED için gerekli gerilim seviyesine düşürülmektedir. Şekil 4.6’da verici, alıcı ve kanal kısımlarını içeren DC-DC düşürücü dönüştürücü içeren örnek bir VLC sistemi gösterilmektedir. Sistemin verici kısmında yer alan DC-DC düşürücü dönüştürücü ile LED için istenen düzgün gerilim elde edilir. LED ile seri bağlantılı modülatör aracılığıyla da MOSFET veriye uygun olarak anahtarlanmakta ve LED’in parlaklık seviyesi bu anahtarlama işlemine göre değişmektedir. LED’in yaydığı optik sinyaller kanalda ilerledikten sonra sistemde yer alan VLC alıcı devresine ulaşır. VLC alıcı devresinin ilk kısmında bulunan fotodiyot, LED elemandan yayılan farklı parlaklık seviyelerine göre farklı akım seviyesinde çıkış sinyali üretilir. Fotodiyot tarafından üretilen akım Transimpedans Yükseltici (Transimpedance Amplifier, TIA) devresinde kuvvetlendirilir ve gerilim değerine dönüştürülür. Bu gerilim değerlerinin demodülasyon ile anlamlandırılması işlemi sonucunda da VLC vericisinden gönderilen giriş verisi çıkışta yeniden elde edilmiş olur.



Şekil 4.6. DC-DC düşürücü dönüştürücü kullanılan bir VLC uygulaması

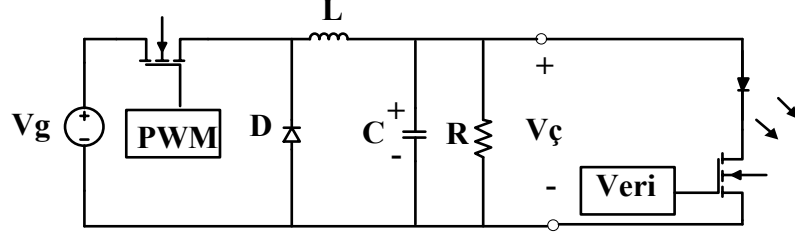
Şekil 4.7’de DC-DC düşürücü dönüştürücünün VLC vericisinde kullanımı ve LED ile olan bağlantısı gösterilmektedir. DC-DC düşürücü dönüştürücü LED için istenen 5V gerilim değerini sağlamaktan sorumludur. Ayrıca LED’in akımında meydana gelebilecek olası dalgalanmaların da azaltılması dönüştürücü ile sağlanmaktadır. Simülasyon çalışmasında kullanılan DC-DC düşürücü dönüştürücünün girişinde 12V gerilim uygulanmış ve çıkışta 5V gerilim değeri elde edilmiştir. DC-DC düşürücü dönüştürücünün anahtarlama frekansı 20 kHz olarak belirlenmiştir.



Şekil 4.7. DC-DC düşürücü dönüştürücü temelli SSM VLC topolojisi

Şekil 4.8’de VLC vericisi için kullanılan DC-DC düşürücü dönüştürücünün devre şeması gösterilmektedir. Devrede kullanılan elemanların istenen değerlerde olması ile düzgün bir V_C gerilimi elde edilerek LED yükü beslenmektedir. Dönüştürücüde kullanılan elemanların değerleri LED yükü için istenen akım-gerilim değerlerine göre belirlenmiştir. MOSFET’e uygulanan PWM sinyalinin frekansı 20 kHz değerindedir. Dönüştürücünün çıkışında 5V elde edilmek istendiği için Eş. (3.8)’de verilen bağıntıdan faydalanılarak doluluk oranı 0.4 olarak belirlenmiştir. VLC verici devresinden yük olarak kullanılacak

LED'in güç değeri P_C 1W olarak belirlenmiştir. Bu güç değeri kullanılarak çıkış akımının değeri olan I_C değeri aşağıdaki gibi hesaplanmıştır.



Şekil 4.8. DC-DC düşürücü dönüştürücü kullanılan VLC verici devresi

$$P_C = V_C I_C$$

$$1 = 5 I_C$$

$$I_C = 200mA$$

DC-DC düşürücü dönüştürücü tasarımında endüktans akımındaki dalgalanma değerinin %25 olması istenmektedir. Çıkış akımı 200 mA olduğu için ΔI_L değeri 50 mA olmaktadır. Bu dalgalanma değerine göre L değeri aşağıdaki gibi hesaplanmıştır.

$$\Delta I_L = D(1-D) \frac{V_g}{f_p L}$$

$$L = D(1-D) \frac{V_g}{f_p \Delta I_L}$$

$$L = 0.4(1-0.4) \frac{12}{(20 \times 10^3)(50 \times 10^{-3})}$$

$$L = 2.88mH$$

DC-DC düşürücü dönüştürücü tasarımında kapasitans gerilimindeki dalgalanma değerinin %25 olması istenmektedir. Çıkış gerilimi 5 V olduğu için ΔV_C değeri 0.25 V olmaktadır. Bu dalgalanma değerine göre C değeri aşağıdaki gibi hesaplanmıştır.

$$\Delta V_C = \frac{\Delta I_L}{8 f_p C}$$

$$C = \frac{\Delta I_L}{8 f_p \Delta V_C}$$

$$C = \frac{(50 \times 10^{-3})}{8(20 \times 10^3)(0.25)}$$

$$C = 1.25\mu F$$

Dönüştürücünün çıkış yükü R değeri aşağıdaki gibi hesaplanmıştır.

$$V_c = I_c R$$

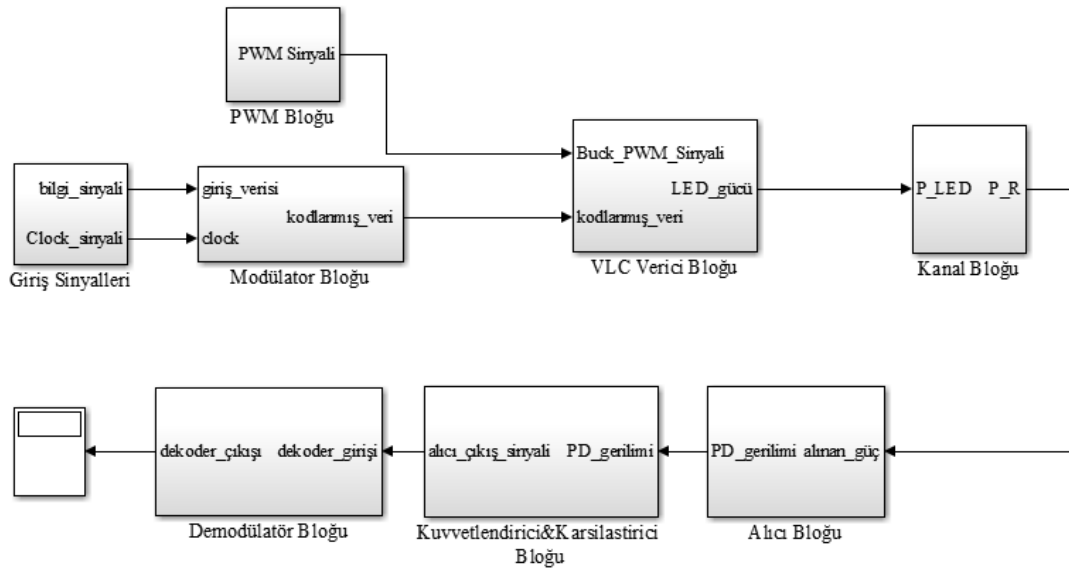
$$5 = (0.2)R$$

$$R = 25\Omega$$

Dönüştürücünün çalışma modunu belirlemek için çıkış akımı ile akım dalgalanması karşılaştırılmıştır. Çıkış akımı ile akım dalgalanması arasındaki bağıntı aşağıdaki gibi olduğu için dönüştürücü CCM modunda çalışmaktadır.

$$I_c > \frac{\Delta I_L}{2} = 25mA$$

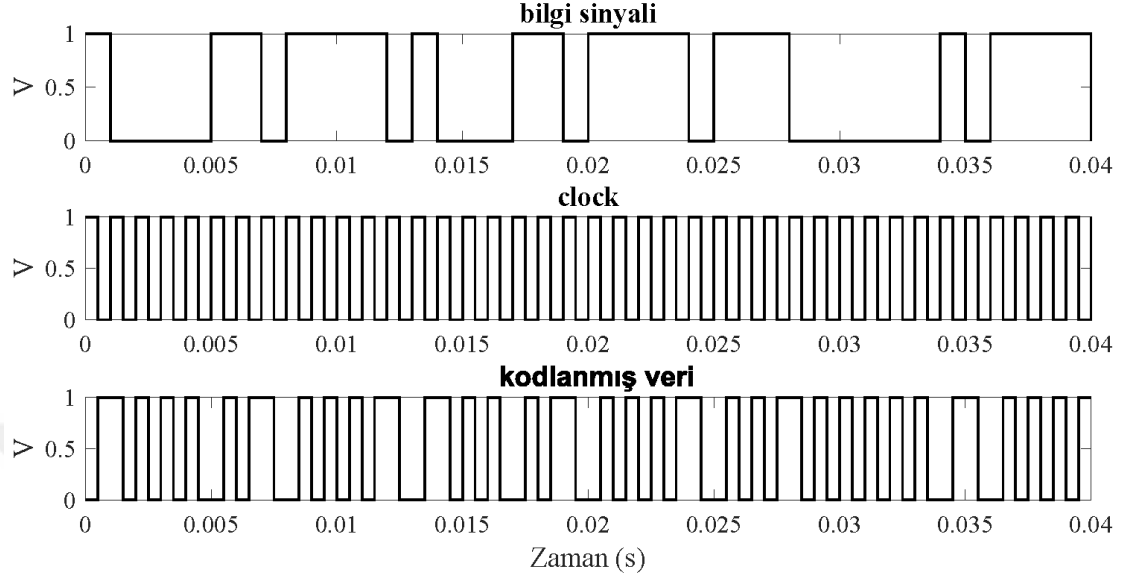
Şekil 4.9’da MATLAB/Simulink programı kullanılarak gerçekleştirilen VLC simülasyonu blokları gösterilmiştir. Simülasyon çalışmasında öncelikle VLC sisteme ait verici bloğu, alıcı bloğu, modülatör bloğu, kanal bloğu ve demodülatör bloğu oluşturulmuştur. Giriş Sinyalleri bloğu içerisinde iletilmek istenen bilgi sinyali ve modülasyon işlemi için kullanılacak olan clock sinyali üretilmektedir.



Şekil 4.9. DC-DC düşürücü dönüştürücü kullanılan VLC simülasyon çalışması

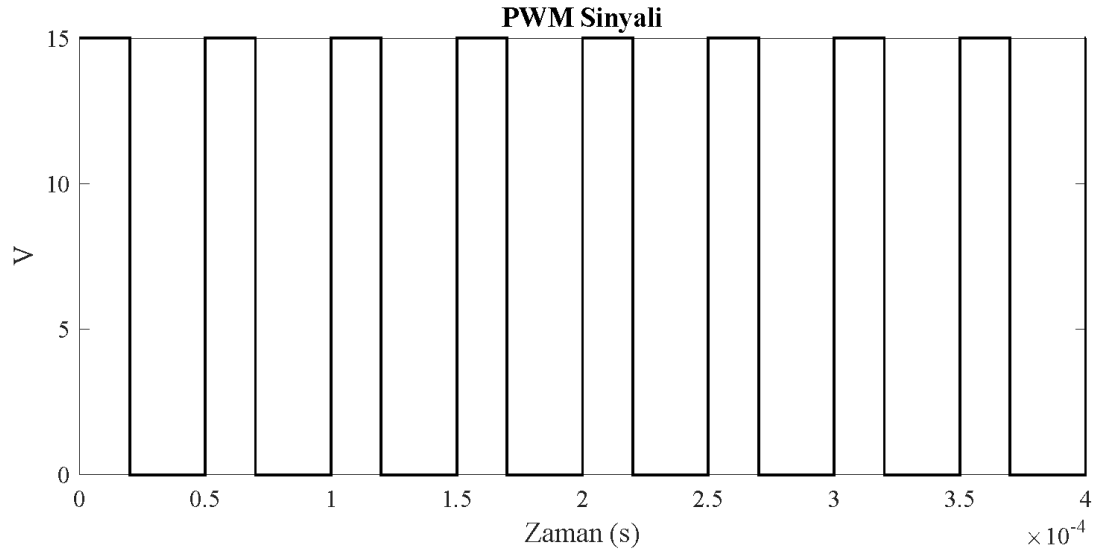
Şekil 4.10’da modülatör bloğunun girişinde kullanılan bilgi sinyali ve clock sinyali ile Manchester kodlaması uygulanarak elde edilen çıkış sinyali gösterilmektedir. Bilgi sinyali 1 kHz frekans değerine sahip ikili sistemden oluşan bir veridir. Bu iki sinyal modülatör bloğunun giriş sinyalleridir. Sistemde yer alan modülatör bloğu ile giriş verisi modüle edilmiş sinyale dönüştürülmektedir. Manchester kodlama tekniğinden yararlanılarak OOK modülasyon ile bilgi sinyali modüle edilmiştir. Bu blok ile VLC

verici kısmında LED'in anahtarlanması için kullanılacak olan kodlanmış veri sinyali elde edilmektedir.



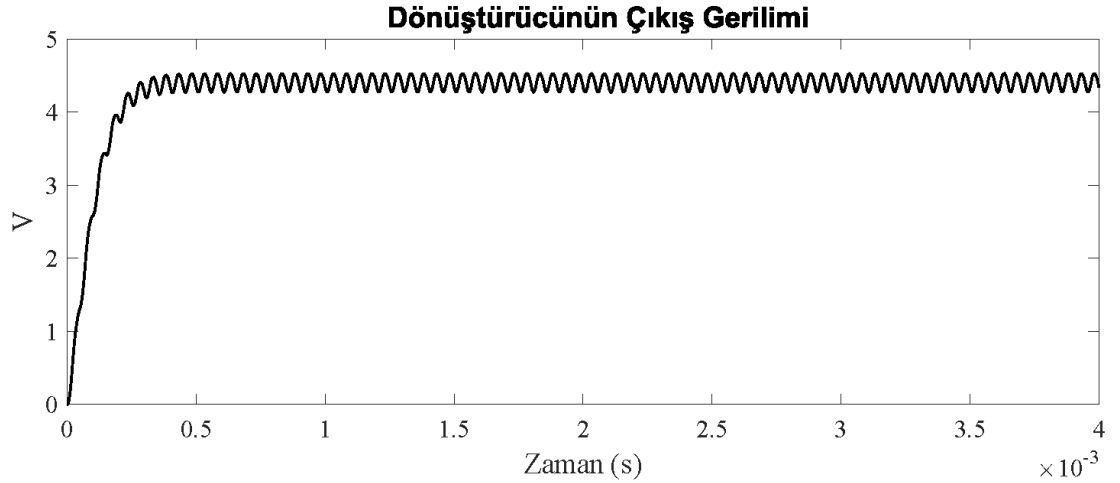
Şekil 4.10. Giriş sinyali, clock sinyali ve kodlanmış veri sinyali

PWM bloğu olarak gösterilen kısım VLC verici bloğu içerisinde yer alan DC-DC düşürücü dönüştürücü için gerekli kontrol sinyalinin üretildiği bloktur. Bu simülasyon çalışması için 0.4 doluluk oranına sahip 20 kHz çalışma frekansında bir PWM sinyali üretilmiştir. PWM sinyali ile DC-DC düşürücü dönüştürücüde yer alan anahtarlama elemanı tetiklenmektedir. Bu yüzden üretilen PWM sinyali 0-15 V olacak şekilde kuvvetlendirilmiştir. Şekil 4.11'de PWM bloğu kullanılarak elde edilen kontrol sinyali gösterilmiştir.



Şekil 4.11. PWM Sinyalleri

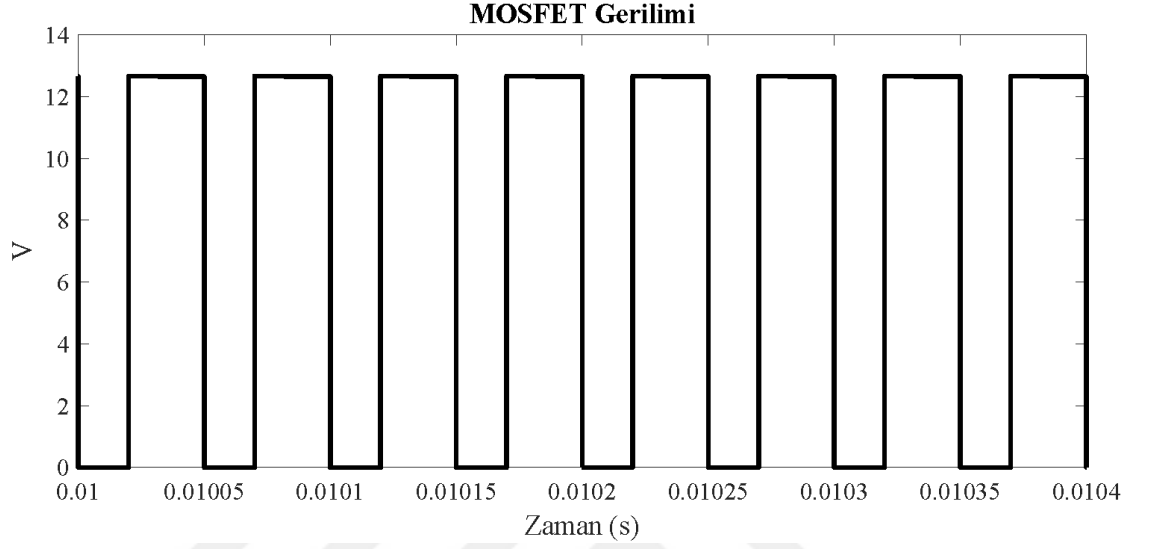
VLC simülasyon çalışmasında oluşturulan VLC verici bloğu içerisinde DC-DC düşürücü dönüştürücü, LED ve MOSFET bulunmaktadır. DC-DC düşürücü dönüştürücü LED için sabit gerilim üretmektedir. Çalışmada DC-DC dönüştürücünün girişinde 12V gerilim kaynağı kullanılmıştır. Dönüştürücünün çıkışında elde edilen gerilim sinyali Şekil 4.12’de verilmiştir. Şekilden de görüldüğü gibi 5 V’luk bir DC çıkış gerilimi sağlanmıştır.



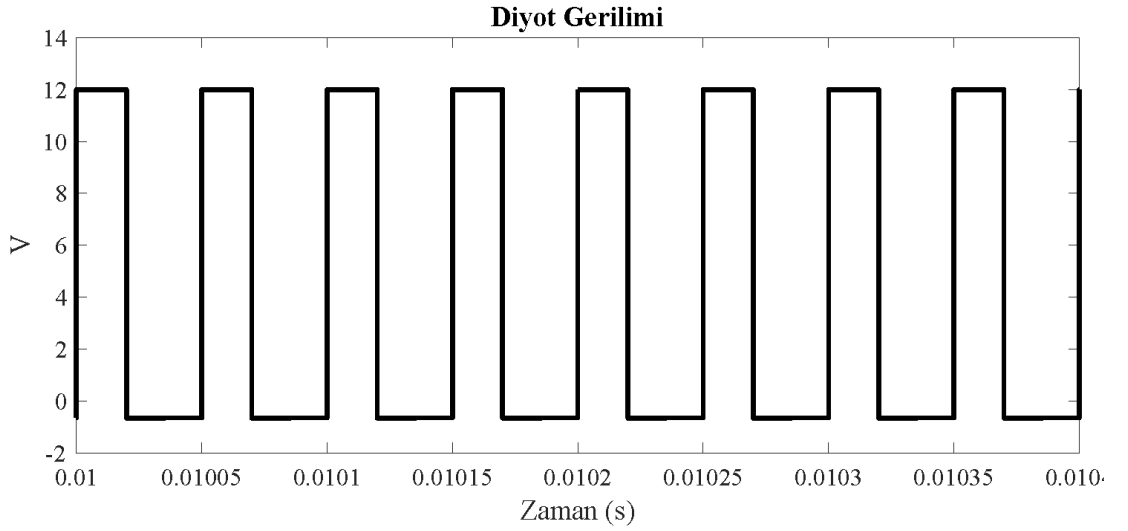
Şekil 4.12. DC-DC Düşürücü dönüştürücü çıkış gerilimi

Verici bloğunda yer alan düşürücü dönüştürücünün anahtarlama elemanı olan MOSFET, PWM bloğundan üretilen PWM sinyali ile tetiklenmektedir. Bu kontrol sinyaline göre MOSFET’in ve diyotun gerilim sonuçları sırasıyla Şekil 4.13 (a) ve Şekil 4.13 (b)’de

gösterilmiştir. Şekilden de görüldüğü gibi MOSFET iletimde iken diyot kesimde; diyot iletimde iken MOSFET kesimdedir. Ayrıca endüktansın akım değişimi de Şekil 4.14'te gösterilmiştir. Şekilden de gözüktüğü gibi dönüştürücü de endüktans akımı sürekli olup dönüştürücü CCM modunda çalışmaktadır.

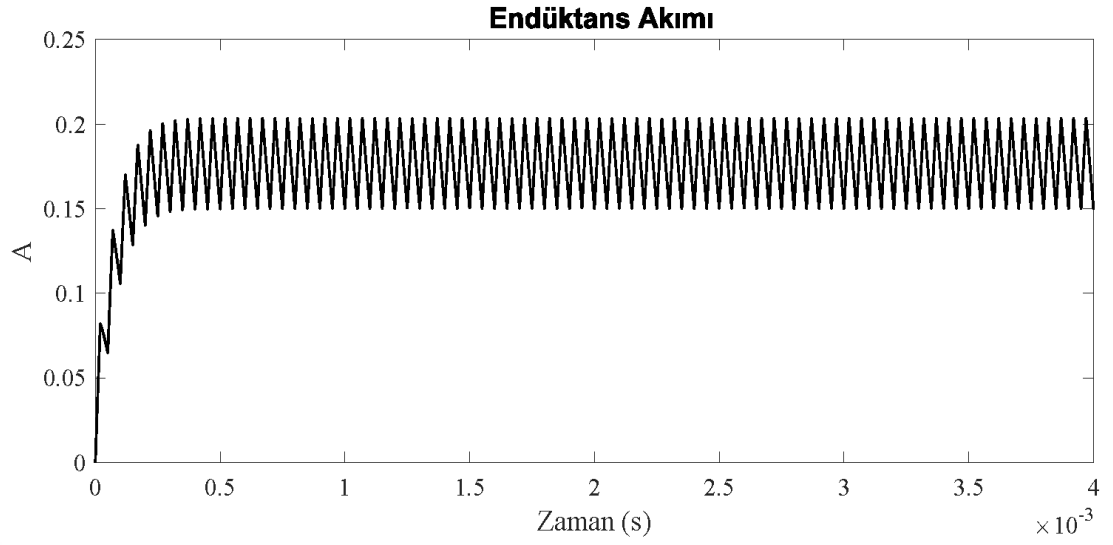


(a)



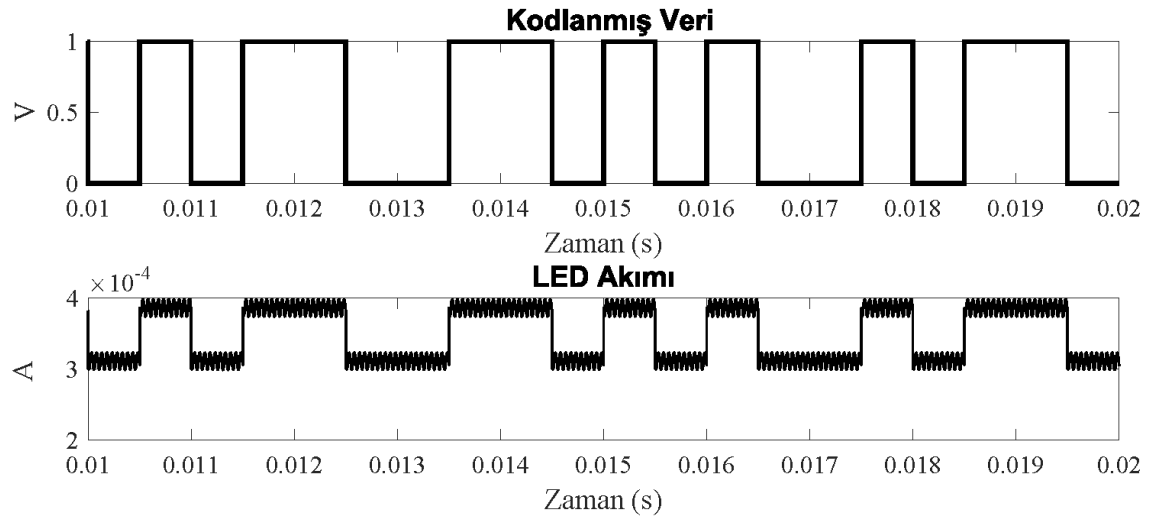
(b)

Şekil 4.13. (a) MOSFET gerilimine ait dalga şekli, (b) Diyot gerilimine ait dalga şekli



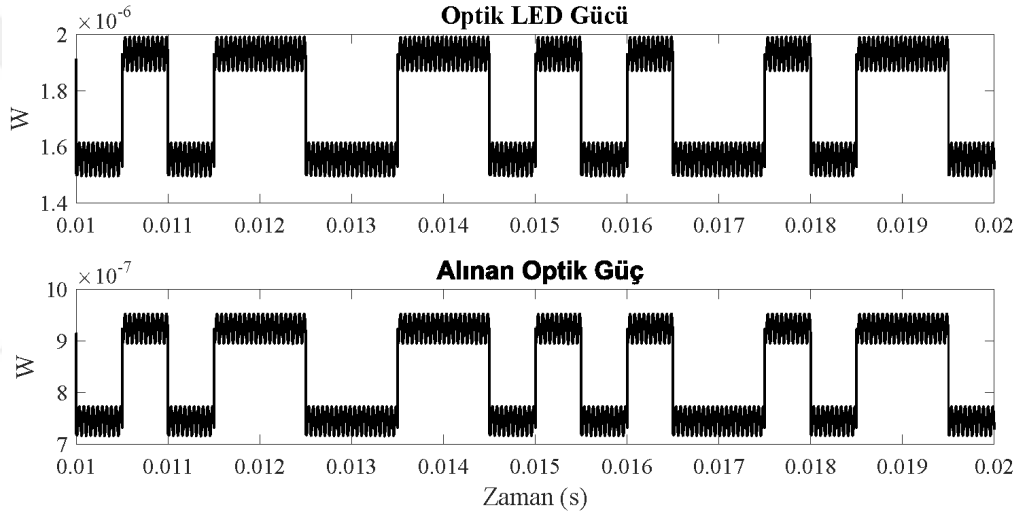
Şekil 4.14. Endüktans akımına ait dalga şekli

MATLAB/Simulink kullanılarak gerçekleştirilen DC-DC düşürücü dönüştürücü temelli simülasyon çalışmasının sonucunda elde edilen Şekil 4.15'te kodlanmış veri ile LED akımına ait dalga şekilleri gösterilmektedir. VLC verici bloğunda yer alan LED'in kodlanmış veri sinyaline göre anahtarlandığı gözükmemektedir. Böylece LED'in akım değeri kodlanmış veri sinyaline göre değişmektedir LED ile seri bağlantılı MOSFET eleman kullanılarak veriye uygun olarak LED'i anahtarlanması sağlanmaktadır.

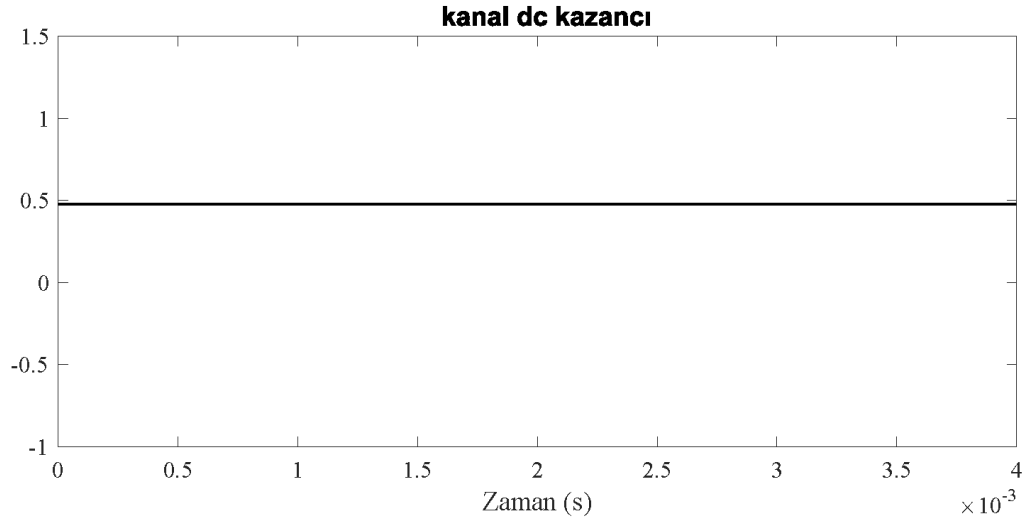


Şekil 4.15. Kodlanmış veri ve LED akımı

Simülasyon çalışmasında alıcı ile verici arasında kanal bloğu ile gösterilen kısım haberleşme kanalıdır. Bu kanal bloğunun tasarımı yapılırken LOS kanal modelinden faydalanılmıştır. Şekil 4.16’da kanal girişinde LED tarafından yayılan optik güç ve kanal modelinden geçtikten sonra elde edilen alıcı tarafında algılanan optik güç sinyalleri gösterilmektedir. Çalışmada kullanılan LOS kanal modelinin DC kanal kazancı ise Şekil 4.17’de gösterilmektedir. Şekil 4.17’de gösterilen DC kanal kazancı Eş. (3.5)’te gösterildiği gibi hesaplanmıştır. Bu değer Eş. (3.6)’da gösterildiği üzere optik LED gücünün zayıflatılarak alıcı kısmına gönderilmesini ifade etmektedir. Şekil 4.16 incelendiğinde alınan optik LED güç değerinin optik LED gücünden daha düşük değerli olduğu görülmektedir.

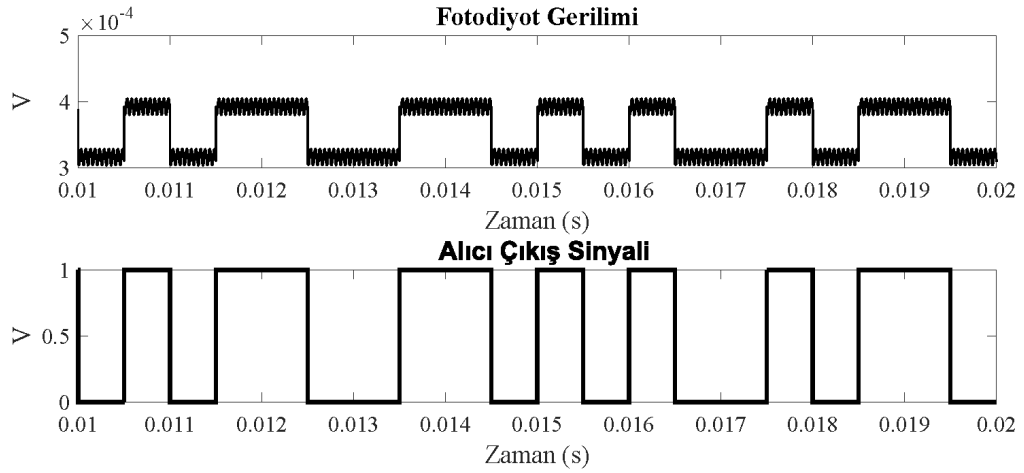


Şekil 4.16. Kanal girişinde ve çıkışında oluşan optik güç sinyalleri



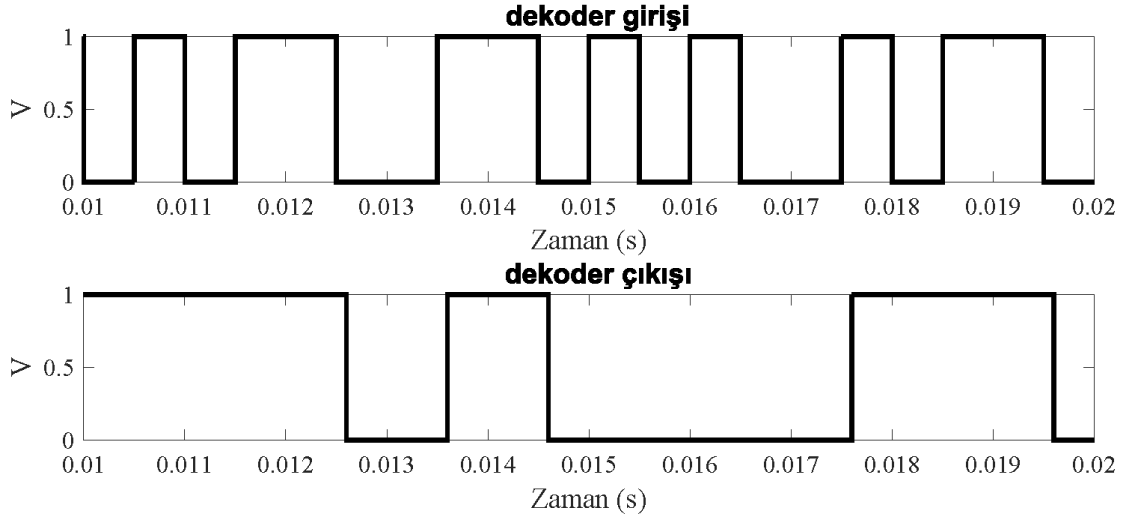
Şekil 4.17. LOS kanal DC kazancı

Simülasyon çalışmasında kullanılan bir diğer önemli kısım ise alıcı bloğudur. Alıcı bloğunda kanaldan geçtikten sonra fotodiyot elemanın üzerine düşen optik sinyalin algılanması sonucunda bu elemanın ürettiği akım değeri Eş. (3.7)'de verilen eşitliğe göre elde edilmiştir. Işığa duyarlı bu elemana gelen optik gücün giriş verisine göre değişimi ile elemanın çıkışında üretilen akım değeri değişmektedir. Bu blok ile fotodiyot çıkışında oluşan akım değeri gerilim değerine dönüştürülmüştür. Alıcı bloğunun çıkışında elde edilen gerilim sinyalinin demodülatör bloğuna gönderilmeden önce de kuvvetlendirilmesi gerekmektedir. Kuvvetlendirme işleminden sonra karşılaştırmacı kullanılarak blok girişindeki sinyal ikili veri şekline dönüştürülerek demodülatör bloğuna gönderilmektedir. Şekil 4.18'de bu bloğun girişindeki fotodiyot gerilimi sinyali ile çıkışta oluşan sinyal gösterilmektedir.



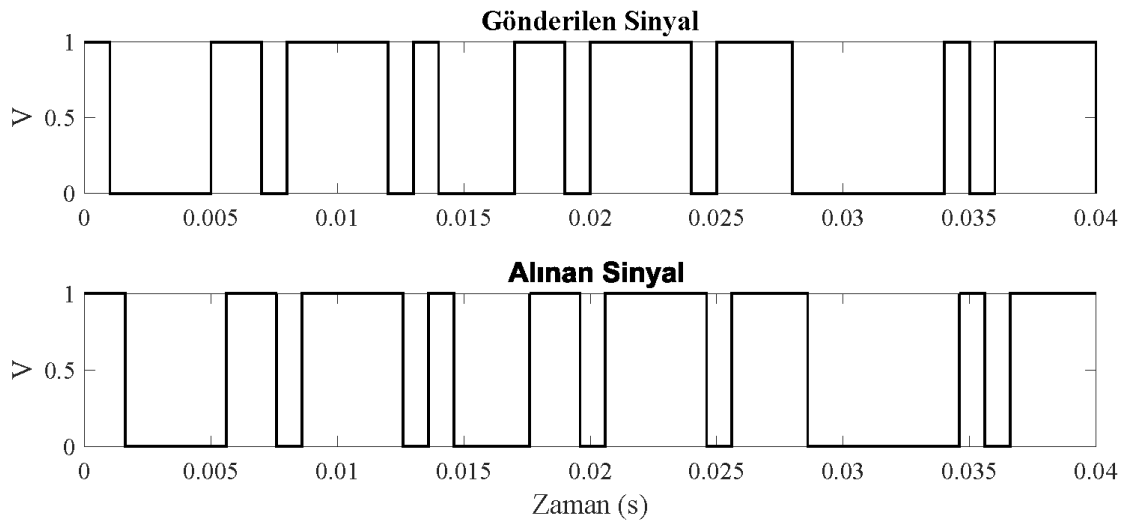
Şekil 4.18. Kuvvetlendirici ve karşılaştırıcı bloğu giriş ve çıkış sinyalleri

Simülasyon çalışmasında kullanılan demodülatör bloğu ile alıcı devresinde oluşan sinyallerin kuvvetlendirilmesi ve karşılaştırılması sonucunda elde edilen sinyallerin demodülasyonu gerçekleştirilmiştir. Verici kısmında giriş verisinin modülasyonu için Manchester kodlaması kullanıldığı için demodülatör bloğunda da Manchester kod çözücü kullanılmıştır. Demodülasyon bloğuna gelen dekoder giriş sinyali ve demodülasyon işlemi sonucunda elde edilen dekoder çıkış sinyali Şekil 4.19’da gösterilmiştir. Şekil 4.19’da gösterilen dalga şekillerinin elde edilmesi için MATLAB/Simulink blokları kullanılarak Şekil 3.7’de gösterilen Manchester kod çözücü devresi gerçekleştirilmiştir. Şekil 4.19’da dekoder girişi olarak gösterilen sinyal Şekil 3.8’de kodlanmış veri olarak gösterilen sinyal gibi gönderilen veri ve clock sinyalinin Manchester kodlaması sonucunda elde edilmiştir. Şekil 4.19’da gösterilen dekoder çıkışı ise Şekil 3.7’de gösterilen devrenin çıkışında elde edilen sinyaldir. Şekil 3.8 incelendiğinde 6 numara ile gösterilen sinyale benzer şekilde Şekil 4.19’da dekoder çıkış sinyali elde edilmiştir.



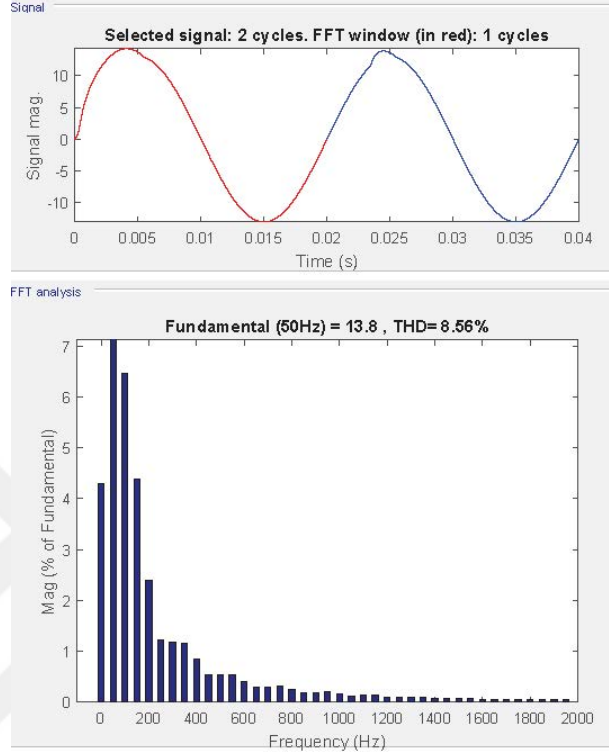
Şekil 4.19. Demodülatör bloğu giriş ve çıkış sinyalleri

Simülasyon çalışmasında oluşturulan VLC sistemin girişinde gönderilen bilgi sinyalinin sistemin tüm aşamalarından geçtikten sonra elde edilen sinyal ile birlikte gösterimi Şekil 4.20’de verilmiştir. Şekil 4.20 incelendiğinde gönderilen sinyal ile alınan sinyal arasında gecikme olduğu fakat gönderilen sinyalin alıcı kısmına algılandığı gözlemlenmektedir. Şekil 3.7’de gösterilen kod çözücü devrenin gerçekleştirilebilmesi için Şekil 4.19’da gösterilen dekoder girişı sinyalinin yükselen ve alçalan kenarlarının tespit edilmesi ve lojik kapılara uygulanması gerekmektedir. MATLAB/Simulink bloklarıyla bu işlemler gerçekleştirilirken kullanılan bu bloklardan dolayı gönderilen sinyal ile alınan sinyal arasında gecikme bulunmaktadır.



Şekil 4.20. Sistemin girişinde gönderilen sinyal ve sistemin çıkışında elde edilen sinyal

VLC uygulamalarında düşürücü DC-DC dönüştürücü kullanımına ait simülasyon çalışmasının sonucunda Şekil 4.20 elde edilmiştir. Elde edilen sonuç sinyalleri incelendiğinde VLC işleminin başarılı bir şekilde gerçekleştirildiği gözlemlenmektedir.



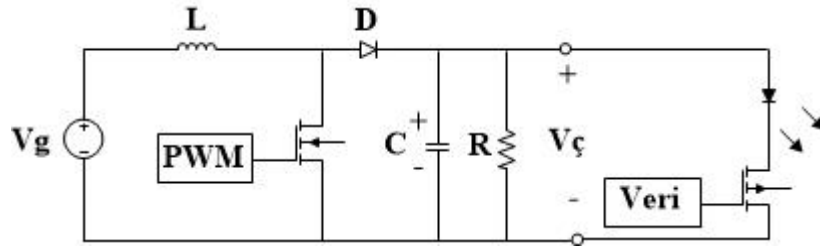
Şekil 4.21. DC-DC düşürücü dönüştürücü için THD hesaplaması

Simülasyon çalışması kapsamında DC-DC düşürücü dönüştürücünün girişinde kullanılan DC sinyalin AC şebeke ile beslendiği durum için THD analizi gerçekleştirilmiştir. Girişte 220 V, 50 Hz değerine sahip bir sinyal uygulanmış ve trafo kullanılarak bu sinyalin değeri önce 12 V'a düşürülmüştür. Daha sonra doğrultucu bir devre kullanılarak 12 V DC giriş gerilimi elde edilerek dönüştürücünün besleme gerilimi oluşturulmuştur. Bu durum için THD analizi yapılmıştır. Şekil 4.21'de THD hesaplamasının sonucunda elde edilen sonuç verilmiştir. Sonuçtan görüldüğü üzere düşürücü DC-DC dönüştürücünün AC giriş gerilimi ile beslenmesi durumunda THD değeri % 8.56 olarak hesaplanmıştır.

4.3. VLC Uygulamalarında Yükseltici DC-DC Dönüştürücü Kullanımı ve Simülasyonu

VLC uygulamalarında giriş gerilim değerinden daha yüksek bir gerilim değerine ihtiyaç olması durumunda DC-DC yükseltici dönüştürücüler kullanılmaktadır. Şekil 4.22'de

VLC uygulamasında verici kısmında yer alan bir DC-DC yükseltici dönüştürücü topolojisi ile veri anahtarlama işlevinin gerçekleştirilebilmesi için kullanılan bir yarı iletken güç elemanı gösterilmektedir. Devrede gösterilen eleman değerlerinin çıkışta istenen akım, gerilim değerlerine uygun olarak seçilmesiyle birlikte çıkış yükü olan LED eleman düzgün bir V_C gerilimi ile beslenmektedir.



Şekil 4.22. DC-DC yükseltici dönüştürücü kullanılan VLC verici devresi

Dönüştürücüde kullanılan elemanların değerleri LED yükü için istenen akım-gerilim değerlerine göre belirlenmiştir. Dönüştürücünün yarı iletken güç elemanına verilen kontrol sinyalinin frekansı 20 kHz değerindedir. Dönüştürücünün girişinde 5V gerilim değeri uygulanmış ve çıkışta 12V elde edecek şekilde tasarım parametreleri belirlenmiştir. Dönüştürücünün doluluk oranı Eş. (3.21) kullanılarak 0.6 olarak hesaplanmıştır. VLC verici devresinden yük olarak kullanılacak LED'in güç değeri P_C 1W olarak belirlenmiştir. Bu güç değeri kullanılarak çıkış akımının değeri olan I_C değeri aşağıdaki gibi hesaplanmıştır.

$$P_C = I_C V_C$$

$$1 = I_C 12$$

$$I_C = 83mA$$

DC-DC yükseltici dönüştürücü tasarımında endüktans akımındaki dalgalanma değerinin %25 olması istenmektedir. Çıkış akımı 83 mA olduğu için ΔI_L değeri 20.75 mA olmaktadır. Bu dalgalanma değerine göre L değeri aşağıdaki gibi hesaplanmıştır.

$$\Delta I_L = D(1-D) \frac{V_C}{f_p L}$$

$$L = D(1-D) \frac{V_C}{f_p \Delta I_L}$$

$$L = 0.6(1-0.6) \frac{12}{(20 \times 10^3)(20.75 \times 10^{-3})}$$

$$L \cong 7mH$$

DC-DC yükseltici dönüştürücü tasarımında kapasitans gerilimindeki dalgalanma değerinin %5 olması istenmektedir. Çıkış gerilimi 12 V olduğu için ΔV_C değeri 0.6 V olmaktadır. Bu dalgalanma değerine göre C değeri aşağıdaki gibi hesaplanmıştır.

$$\Delta V_C = \frac{D I_C}{f_p C}$$

$$C = \frac{D I_C}{f_p \Delta V_C}$$

$$C = \frac{0.6(83 \times 10^{-3})}{(20 \times 10^3)(0.6)}$$

$$C = 4.15 \mu F$$

Dönüştürücünün çıkış yükü R değeri aşağıdaki gibi hesaplanmıştır.

$$V_C = I_C R$$

$$12 = (0.083)R$$

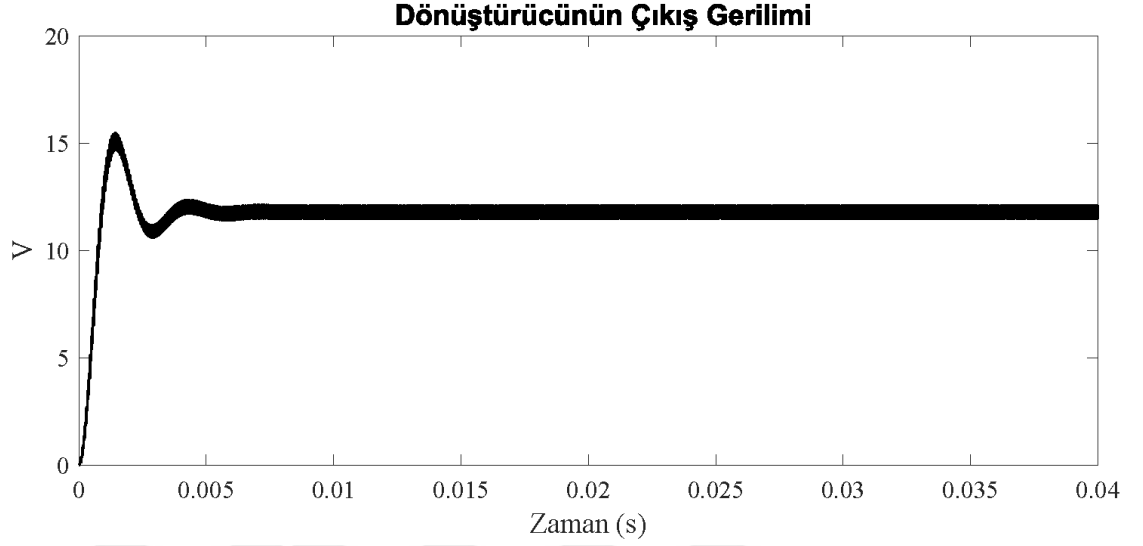
$$R = 140\Omega$$

Dönüştürücünün çalışma modunu belirlemek için giriş akımı ile akım dalgalanması karşılaştırılmıştır. Giriş akımı 207.5 mA olarak hesaplanmıştır. Giriş akımı ile akım dalgalanması arasındaki bağıntı aşağıdaki gibi olduğu için dönüştürücü CCM modunda çalışmaktadır.

$$I_g > \frac{\Delta I_L}{2} = 10.375mA$$

Şekil 4.9’da DC-DC düşürücü dönüştürücü kullanılarak verilen MATLAB/Simulink VLC simülasyon çalışması blok diyagramında düşürücü dönüştürücü yerine yükseltici dönüştürücü kullanılarak yükseltici VLC simülasyonu gerçekleştirilmiştir. Böylece simülasyonda sistem verici bloğu, alıcı bloğu, modülasyon bloğu, kanal bloğu ve demodülasyon bloğu oluşturulmuştur. Düşürücü dönüştürücüde olduğu gibi benzer işlemler yükseltici dönüştürücüde de yapıldığında doluluk oranının 0.6’ya ayarlanmasıyla

birlikte çıkışta 12 V DC bir gerilim elde edilmiş ve bu gerilime ait simülasyon sonucu Şekil 4.23'te verilmiştir.

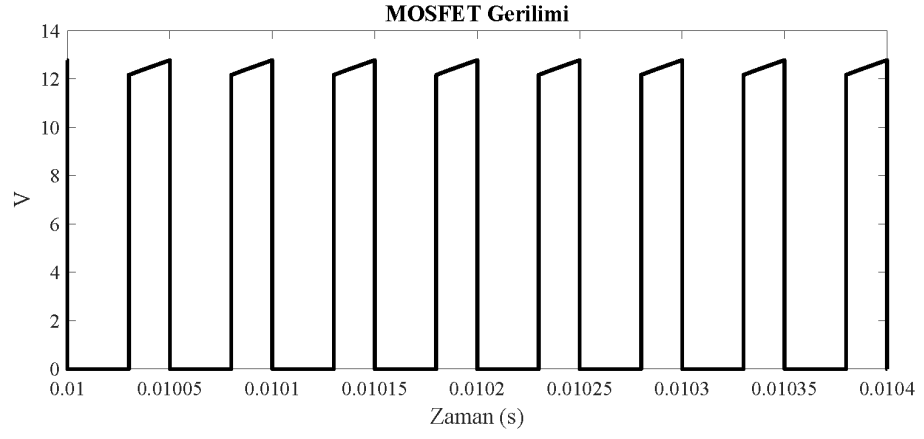


Şekil 4.23. DC-DC yükseltici dönüştürücü çıkış gerilimi

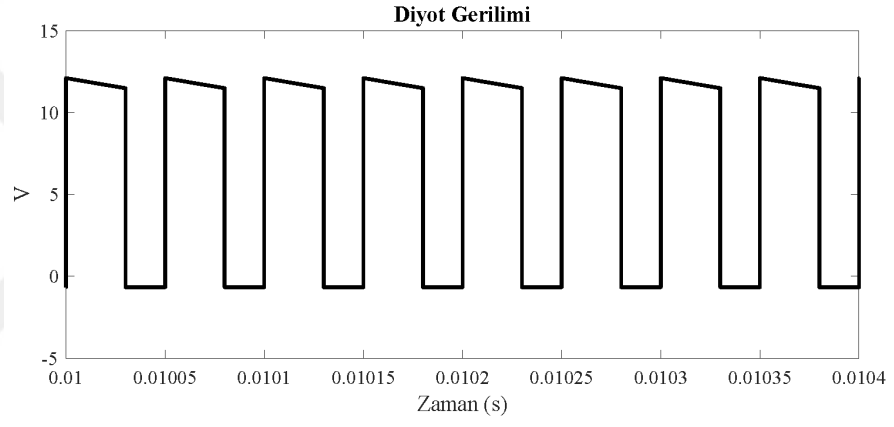
DC-DC yükseltici dönüştürücünün yarı iletken güç elemanına uygulanan PWM kontrol sinyalleri sonucunda MOSFET'in gerilim değerinin değişimi

Şekil 4.24 (a)'da ve diyotun gerilim değişimi Şekil 4.24 (b)'de gösterilmiştir.

Şekil 4.24 incelendiğinde diyot iletimdeyken MOSFET kesimde; MOSFET iletimdeyken diyot kesimdedir. Bunlara ilave olarak endüktans akımına ait dalga şekli Şekil 4.25'te gösterilmiştir. Şekilden de görüldüğü gibi dönüştürücü endüktans akımı sürekli olup dönüştürücü CCM modunda çalışmaktadır.

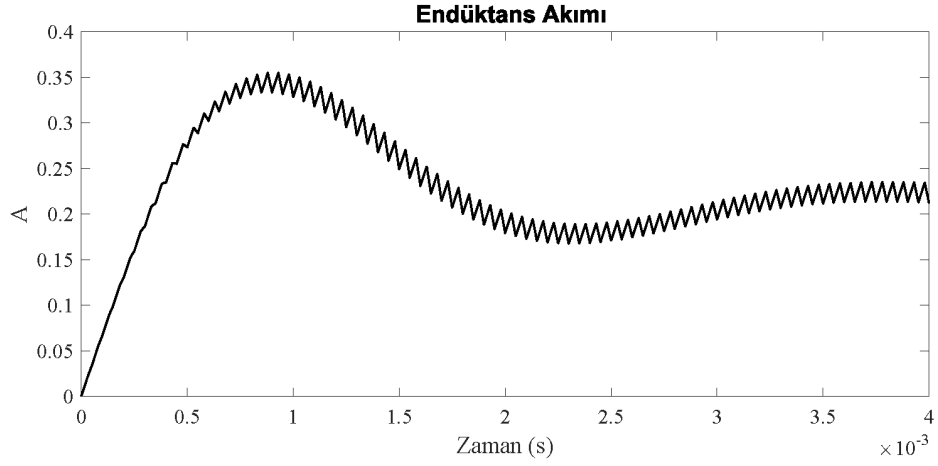


(a)



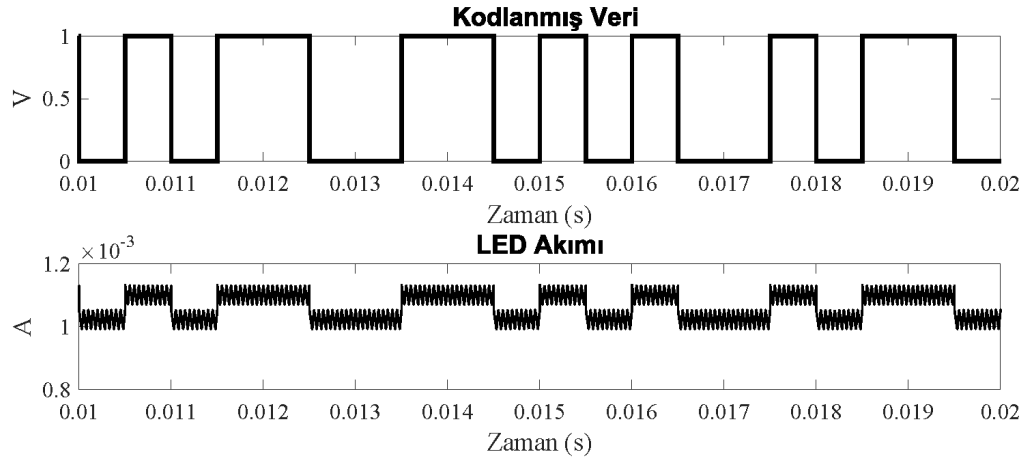
(b)

Şekil 4.24. (a) MOSFET gerilimi dalga şekli, (b) Diyot gerilimi dalga şekli



Şekil 4.25. Endüktans akımına ait dalga şekli

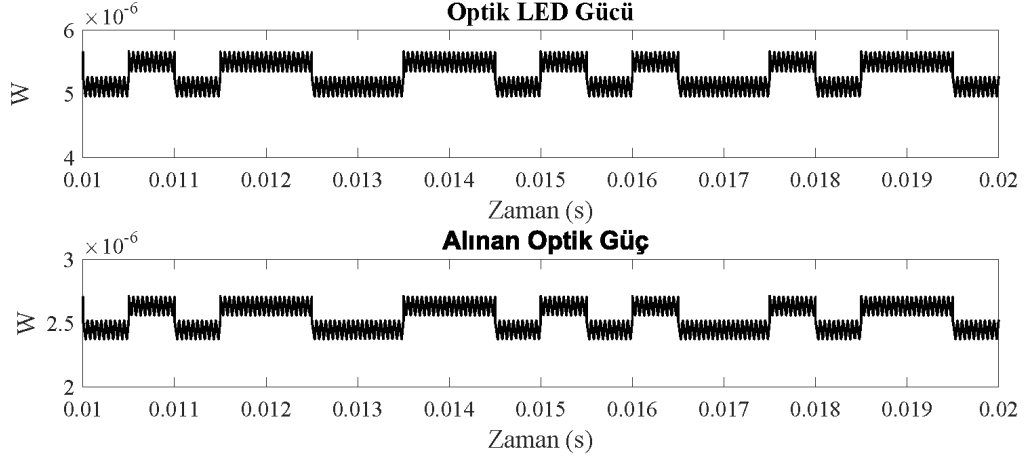
MATLAB/Simulink kullanılarak gerçekleştirilen DC-DC yükseltici dönüştürücü temelli simülasyon çalışması sonucunda elde edilen kodlanmış veri ile LED akımının dalga şekli Şekil 4.26’da verilmiştir. VLC verici kısmında yer alan LED, yarı iletken güç anahtarıyla kodlanmış veri sinyaline göre anahtarlanmaktadır.



Şekil 4.26. Kodlanmış veri ile LED akımına ait dalga şekilleri

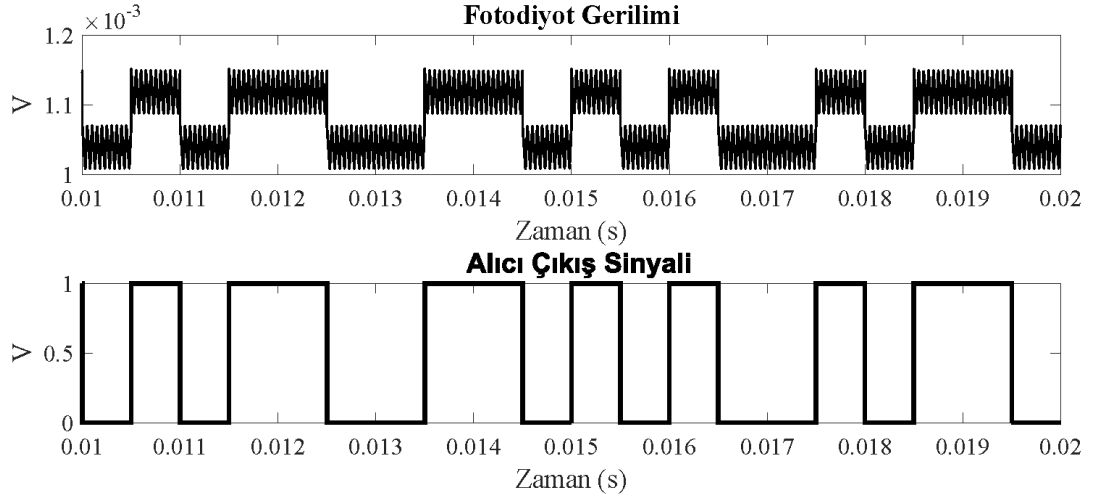
Simülasyon çalışmasında kanal bloğu ile gösterilen kısımda LOS kanal modeli kullanılmıştır. Şekil 4.27’de kanalın girişine uygulanan optik LED gücü ile kanaldan geçtikten sonra elde edilen optik güç verilmiştir. Kullanılan modelin DC kanal kazancı Şekil 4.17’de gösterildiği gibidir. Alınan optik güç alıcı bloğunun giriş sinyali olarak kullanılan sinyali olup Eş. (3.6) kullanılarak elde edilmiştir. Şekil 4.27 incelendiğinde

kanaldaki zayıflamadan dolayı optik LED gücünün alınan optik güçten büyük olduğu gözlemlenmektedir.



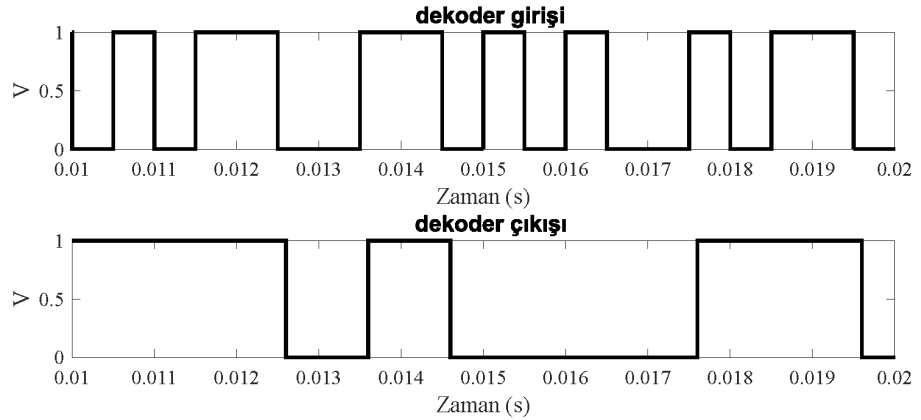
Şekil 4.27. Kanal girişindeki LED optik gücü ve kanal çıkışında oluşan optik güç

VLC simülasyon çalışmasında yer alan alıcı bloğu için kanal bloğunun çıkışında elde edilen optik güç sinyali ile fotodiyot eleman için giriş sinyali oluşturulmaktadır. Alınan optik sinyalin gücünün değişimi ile fotodiyotun çıkışında ürettiği akım değeri değişmektedir. Fotodiyot tarafından üretilen akım Eş. (3.7)'de verilen formül ile hesaplanmıştır. Kuvvetlendirici ve karşılaştırıcı blok kullanılarak fotodiyotun ürettiği akım gerilim sinyaline dönüştürülmektedir. Demodülasyon işlemi için karşılaştırma işleminden geçen sinyal demodülatör bloğuna gönderilmiştir. Şekil 4.28'de fotodiyot gerilimi ve demodülatör bloğuna gönderilen alıcı çıkış sinyali gösterilmektedir.



Şekil 4.28. Kuvvetlendirici ve karşılaştırıcı bloğu giriş, çıkış sinyalleri

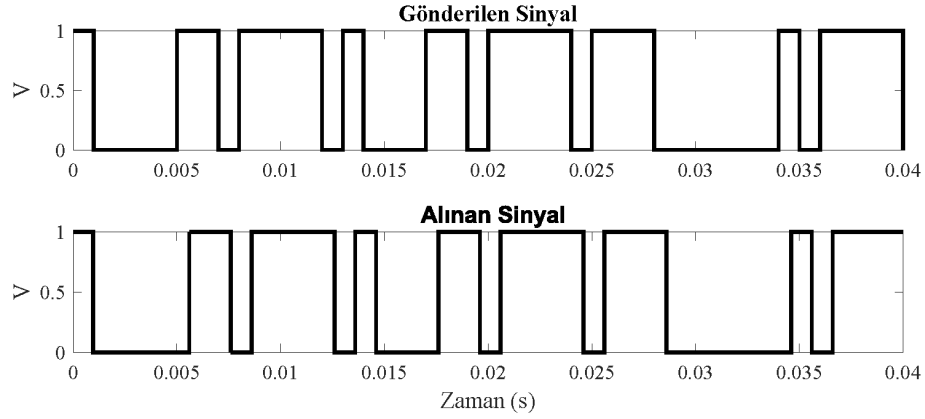
Simülasyon çalışmasında demodülatör bloğu aracılığıyla alıcı devre çıkışında elde edilen kodlanmış veri sinyalinin demodülasyonu gerçekleştirilmektedir. DC-DC düşürücü dönüştürücü simülasyon çalışmasında olduğu gibi bu çalışmada da demodülasyon işlemi için Manchester kod çözücü kullanılmıştır. Demodülasyon bloğunun girişine uygulanan dekoder girişi sinyali Şekil 3.8’de gösterilen kodlanmış veri sinyali ile Clock sinyalinin Manchester kodlaması ardından elde edilen sinyaldir. Dekoder giriş sinyali ve Manchester kod çözücü devresinin çıkışında elde edilen dekoder çıkış sinyali Şekil 4.29’da gösterilmiştir.



Şekil 4.29. Demodülatör bloğunun giriş ve çıkış sinyalleri

MATLAB/Simulink kullanılarak gerçekleştirilen bu simülasyon çalışmasının son aşamasında girişte gönderilen sinyalin verici kısmı çıkışında tekrar elde edilmesi

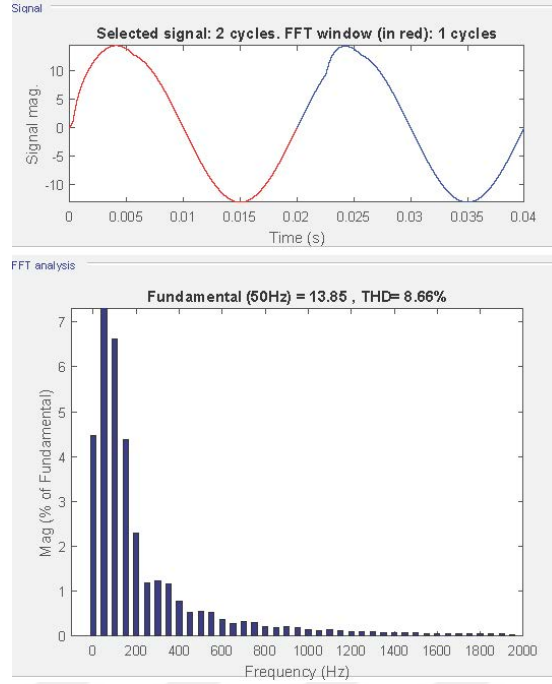
gerçekleştirilmiştir. Sisteme giriş olarak gönderilen veri sinyali ile alınan sinyale ait dalga şekilleri Şekil 4.30'da gösterilmektedir.



Şekil 4.30. Sistemin girişinde uygulanan veri sinyali ile sistem çıkışında elde edilen dalga şekli

MATLAB/Simulink kullanılarak gerçekleştirilen DC-DC yükseltici dönüştürücü kullanılan VLC uygulaması simülasyonunun sonucunda elde edilen ve Şekil 4.30'da gösterilen sinyaller incelendiğinde VLC işlevinin başarılı bir şekilde gerçekleştirildiği gözlemlenmektedir.

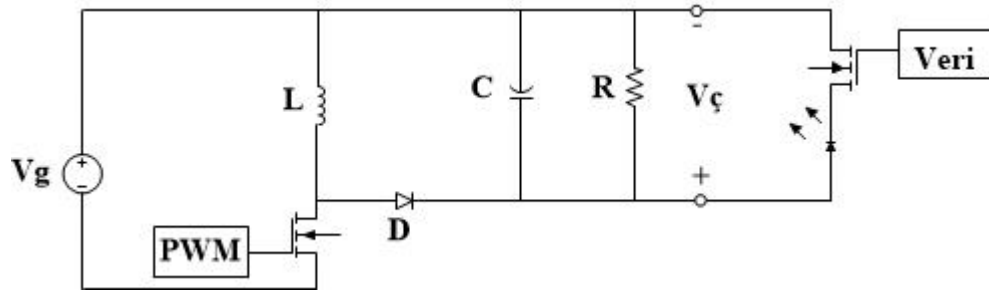
Simülasyon çalışması kapsamında yükseltici DC-DC dönüştürücünün girişinde kullanılan DC sinyalin AC şebeke ile beslendiği durum için THD analizi gerçekleştirilmiştir. Girişte 220 V, 50 Hz değerine sahip bir sinyal uygulanmış ve trafo kullanılarak bu sinyalin değeri önce 5V'a düşürülmüştür. Daha sonra doğrultucu bir devre kullanılarak 5V V DC giriş gerilimi elde edilerek dönüştürücünün giriş gerilimi oluşturulmuş ve THD analizi yapılmıştır. Şekil 4.31'de THD hesaplamasının sonucunda elde edilen sonuç verilmiştir. Sonuçtan görüldüğü üzere yükseltici DC-DC dönüştürücünün AC giriş gerilimi ile beslenmesi durumunda THD değeri %8,66 olarak hesaplanmıştır.



Şekil 4.31. DC-DC yükseltici dönüştürücü için THD hesaplaması

4.4. VLC Uygulamalarında Düşürücü-Yükseltici DC-DC Dönüştürücü Kullanımı ve Simülasyonu

VLC uygulamalarında DC-DC düşürücü yükseltici dönüştürücüler kullanılarak giriş geriliminden daha büyük veya daha küçük değerli çıkış gerilimi elde edilebilmektedir. Şekil 4.32’de bir VLC verici devresi gösterilmektedir. Devrede gösterilen eleman değerlerinin çıkışta istenen akım, gerilim değerlerini elde edecek şekilde kullanılmasıyla çıkışta düzgün bir V_{ϕ} gerilimi elde edilmektedir.



Şekil 4.32. DC-DC düşürücü yükseltici dönüştürücü kullanılan VLC verici devresi

Dönüştürücüde kullanılan elemanların değerleri LED yükünün istenen akım-gerilim değerlerine göre belirlenmiştir. Dönüştürücünün yarı iletken güç elemanının anahtarlama frekansı 20 kHz değerindedir. Dönüştürücünün giriş gerilimi 5V ve çıkış gerilimi 9V

olarak belirlenmiştir. Dönüştürücünün çıkışında 9V gerilim elde edilebilmesi için yarı iletken güç elemanına uygulanan PWM kontrol sinyalinin doluluk oranı Eş. (3.28) kullanılarak 0.64 olarak hesaplanmıştır. Verici devresinde yük olarak kullanılan LED elemanın gücü 1W olarak belirlendiği için çıkış akımının değeri aşağıdaki gibi hesaplanmıştır.

$$P_{\zeta} = I_{\zeta} V_{\zeta}$$

$$1 = I_{\zeta} (9)$$

$$I_{\zeta} \cong 111mA$$

DC-DC düşürücü yükseltici dönüştürücünün giriş akımı I_g değeri aşağıdaki gibi hesaplanmıştır.

$$I_g = \frac{D}{1-D} I_{\zeta}$$

$$I_g = \frac{0.64}{1-0.64} (111 \times 10^{-3})$$

$$I_g = 197mA$$

DC-DC düşürücü yükseltici dönüştürücünün endüktans akımındaki dalgalanma değeri %25 olarak belirlenmiştir. Endüktans akımı I_L değeri giriş akımı I_g ile çıkış akımı I_{ζ} değerinin toplamına eşittir. Bu durumda endüktans değeri L aşağıdaki gibi hesaplanmaktadır. Endüktans akımının değeri 308 mA olduğu için ΔI_L değeri %25 dalgalanma değeri için 77 mA olmaktadır.

$$I_L = I_g + I_{\zeta}$$

$$I_L = (197 \times 10^{-3}) + (111 \times 10^{-3})$$

$$I_L = 308mA$$

$$\Delta I_L = D(1-D) \frac{V_g + V_{\zeta}}{f_p L}$$

$$L = D(1-D) \frac{V_g + V_{\zeta}}{f_p \Delta I_L}$$

$$L = 0.64(1-0.64) \frac{5+9}{(20 \times 10^3)(77 \times 10^{-3})}$$

$$L = 2.09mH$$

DC-DC düşürücü yükseltici dönüştürücüde kullanılacak kapasitör değerinin hesaplanması için gerilim dalgalanma değerinin %5 olması istenmektedir. Bu değer için

hesaplanan ΔV_C değeri 0.7 V olarak bulunmuştur. Bu gerilim dalgalanması değerine göre C kapasitans değeri aşağıdaki gibi hesaplanmaktadır.

$$\Delta V_C = \frac{DI_C}{f_p C}$$

$$C = \frac{DI_C}{f_p \Delta V_C}$$

$$C = \frac{0.64(111 \times 10^{-3})}{(20 \times 10^3)(0.7)}$$

$$C = 5.07 \mu F$$

Dönüştürücünün çıkış direnci olan R ise aşağıdaki gibi hesaplanmaktadır.

$$V_C = I_C R$$

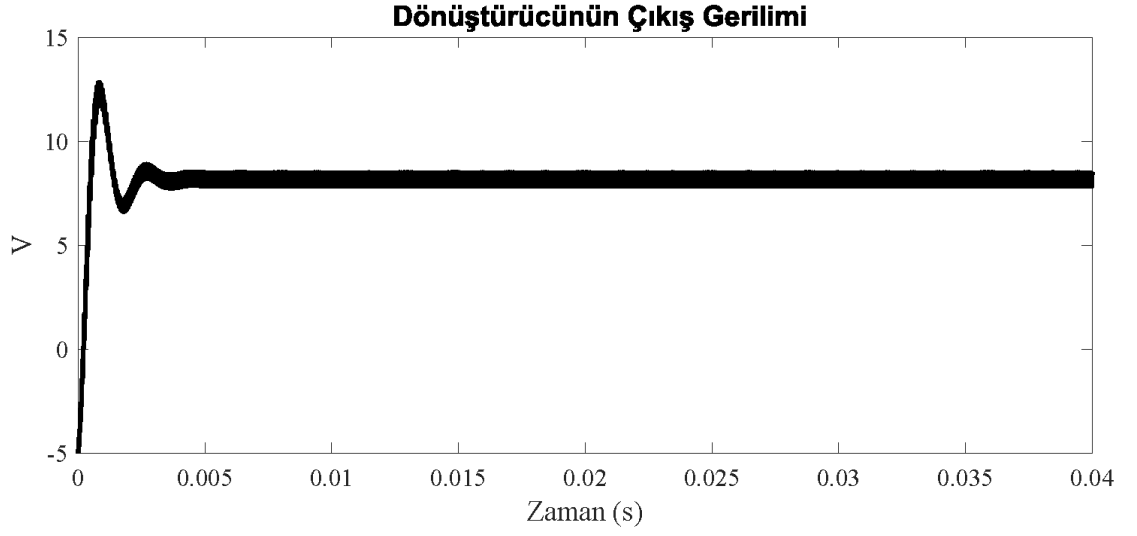
$$9 = (0.011)R$$

$$R = 81 \Omega$$

Dönüştürücünün çalışma modunu belirlemek için akım değerleri karşılaştırılmıştır. Dönüştürücünün endüktans akımı 308 mA değeri ile akım dalgalanması değerinin aşağıdaki gibi kıyaslanması sonucunda dönüştürücü çalışma modu CCM olarak belirlenmiştir.

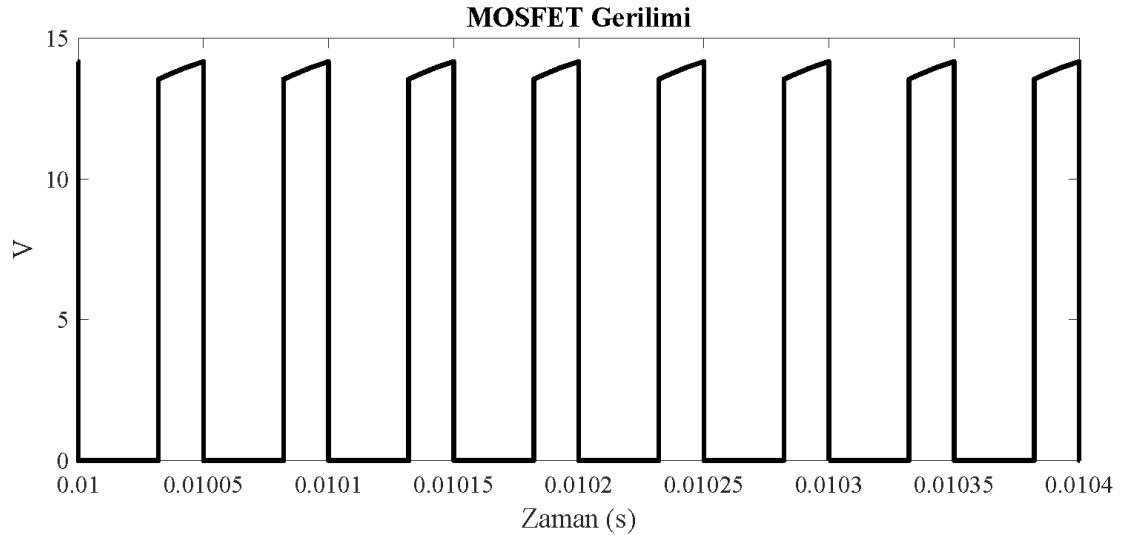
$$I_g + I_C > \frac{\Delta I_L}{2} = 38.5 mA$$

Şekil 4.9’da DC-DC düşürücü dönüştürücü kullanılarak verilen MATLAB/Simulink VLC simülasyon çalışması blok diyagramında düşürücü dönüştürücü yerine düşürücü-yükseltici dönüştürücü kullanılarak düşürücü-yükseltici VLC simülasyonu gerçekleştirilmiştir. Böylece simülasyonda sistem verici bloğu, alıcı bloğu, modülasyon bloğu, kanal bloğu ve demodülasyon bloğu oluşturulmuştur. Düşürücü dönüştürücüde olduğu gibi benzer işlemler düşürücü-yükseltici dönüştürücüde de yapıldığında doluluk oranının 0.64’e ayarlanmasıyla birlikte çıkışta 9 V DC bir gerilim elde edilmiş ve bu gerilime ait simülasyon sonucu Şekil 4.33’de verilmiştir. Gerçekleştirilen bu simülasyon çalışmasında düşürücü dönüştürücü simülasyonunda yer alan modülasyon bloğu içerisinde gerçekleştirilen ve Şekil 4.10’da gösterilen sinyaller kullanılmıştır. Manchester kodlama tekniğinden faydalanılarak bilgi sinyali modüle edilmiştir.



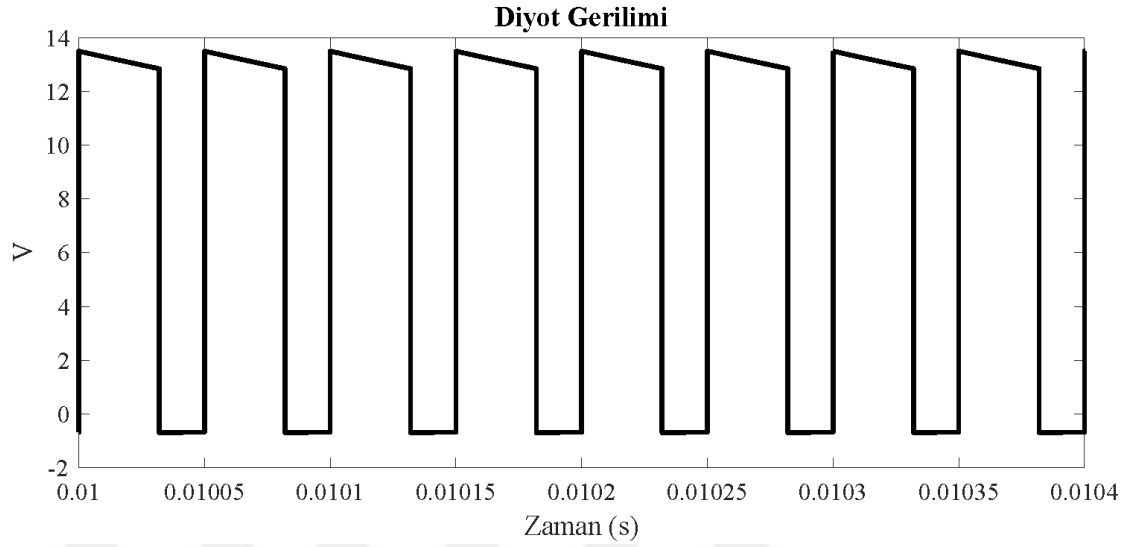
Şekil 4.33. DC-DC düşürücü yükseltici dönüştürücü çıkış gerilimi

DC-DC düşürücü yükseltici dönüştürücünün yarı iletken güç elemanına PWM sinyali uygulanması ile MOSFET'in gerilimi, diyotun gerilimi, endüktansın akımına ait simülasyon sonuçları sırasıyla Şekil 4.35 (a), Şekil 4.35 (b) ve Şekil 4.36'da verilmiştir. Şekil 4.35 incelendiğinde diyotun iletimde olduğu zaman aralığında MOSFET'in kesimde, MOSFET'in kesimde olduğu aralıkta ise diyotun iletimde olduğu görülmektedir. Şekil 4.36'da verilen endüktans akımına ait dalga şekli incelendiğinde ise dönüştürücünün CCM modunda çalıştığı görülmektedir.



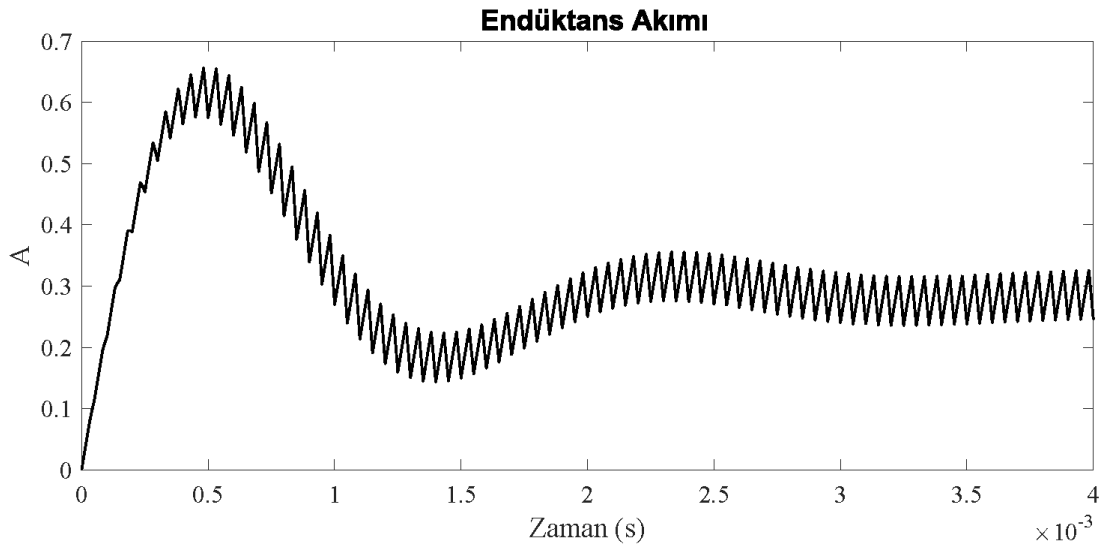
(a)

Şekil 4.34. (a) MOSFET gerilimine ait dalga şekli, (b) Diyot gerilimine ait dalga şekli



(b)

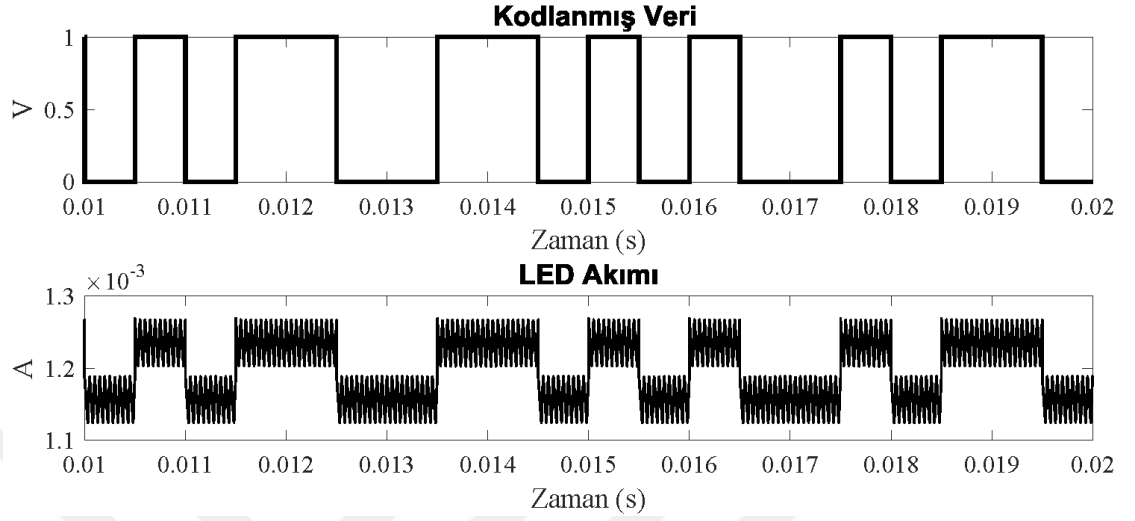
Şekil 4.35. (a) MOSFET gerilimine ait dalga şekli, (b) Diyot gerilimine ait dalga şekli



Şekil 4.36. Endüktans akımına ait dalga şekli

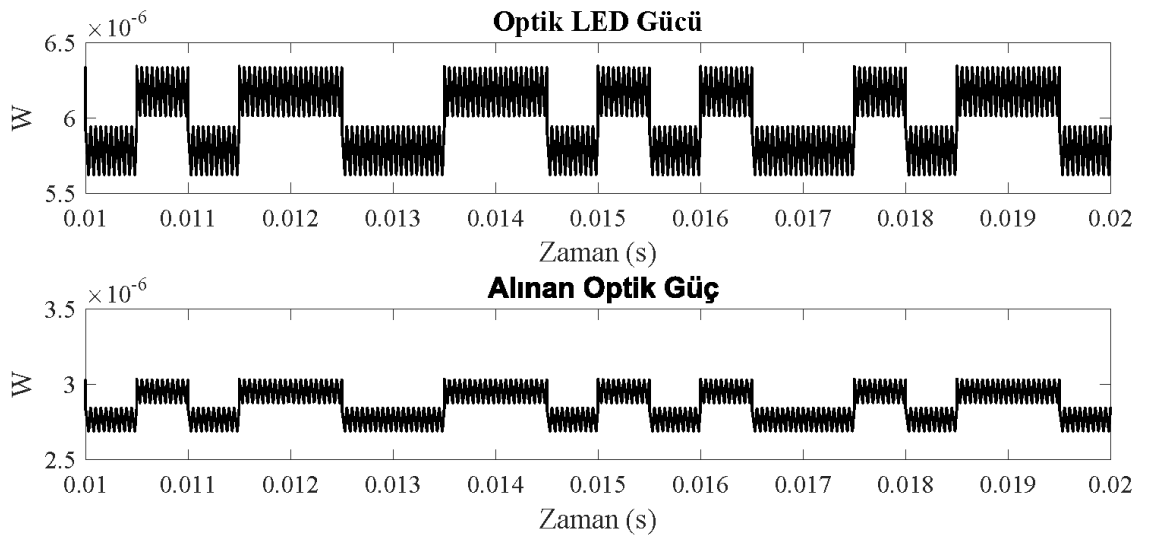
MATLAB/Simulink programı kullanılarak gerçekleştirilen DC-DC düşürücü-yükseltici temelli VLC simülasyon çalışmasında kullanılan LED'in, MOSFET aracılığıyla kodlanmış veri sinyaline göre anahtarlandığını gösteren dalga şekilleri Şekil 4.37'de verilmiştir. DC-DC düşürücü ve DC-DC yükseltici dönüştürücü çalışmalarında olduğu

gibi bu dönüştürücüde de LED ile seri bağlantılı MOSFET kullanılarak LED akımının kodlanmış veri sinyaline göre değişmesi sağlanmıştır.



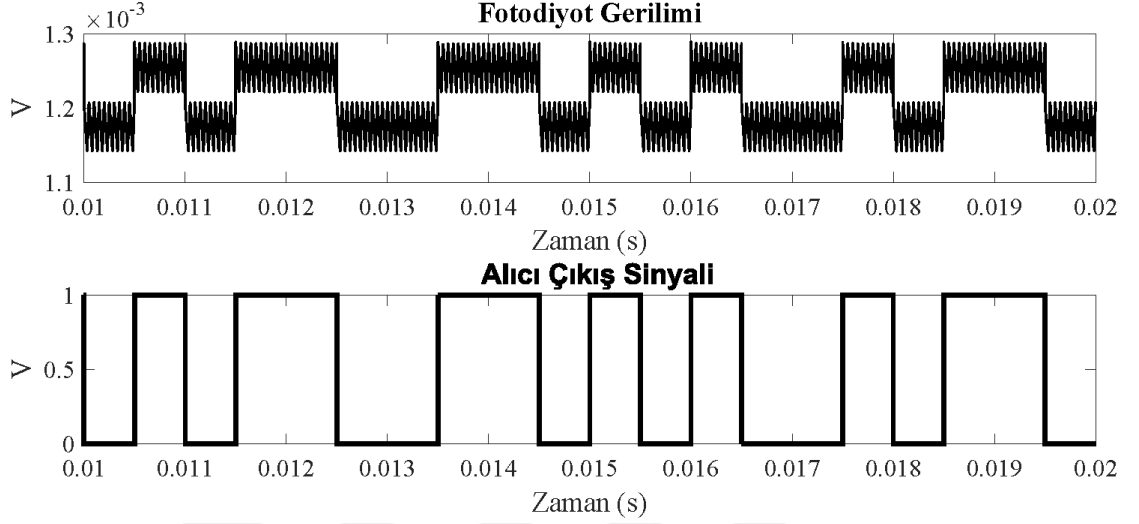
Şekil 4.37. Kodlanmış veri sinyali ve LED akımına ait sinyal

Kanal bloğunda LOS kanal modeli kullanılmıştır. LOS kanal modeli kullanılırken modele ait DC kanal kazancı Eş. (3.5) kullanılarak hesaplanmıştır. Bu simülasyon çalışmasında LED çıkışında oluşan optik güç sinyali ve bu sinyalin LOS kanal modelinden geçmesi sonucunda alıcı kısmında algılanan optik güç sinyaline ait dalga şekilleri Şekil 4.38’te verilmiştir. Alınan optik güç ile optik LED gücü arasındaki ilişki ise Eş. (3.6) kullanılarak oluşturulmuştur.



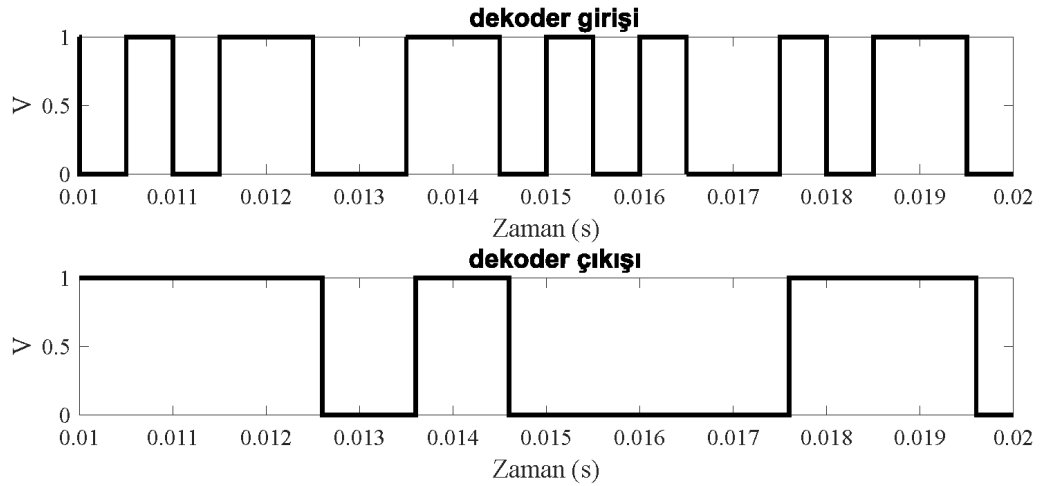
Şekil 4.38. LED optik gücü ile algılanan güç sinyali

Çalışmada DC-DC düşürücü ve yükseltici dönüştürücü temelli simülasyonlarda olduğu gibi alınan optik güç sinyali Eş. (3.7) kullanılarak akıma dönüştürülmüştür. Akıma dönüştürülen sinyalin kuvvetlendirici ve karşılaştırıcı blok sonrasında gerilim ve alıcı çıkış sinyaline dönüştürülmesine ait dalga şekilleri Şekil 4.39’da gösterilmektedir.



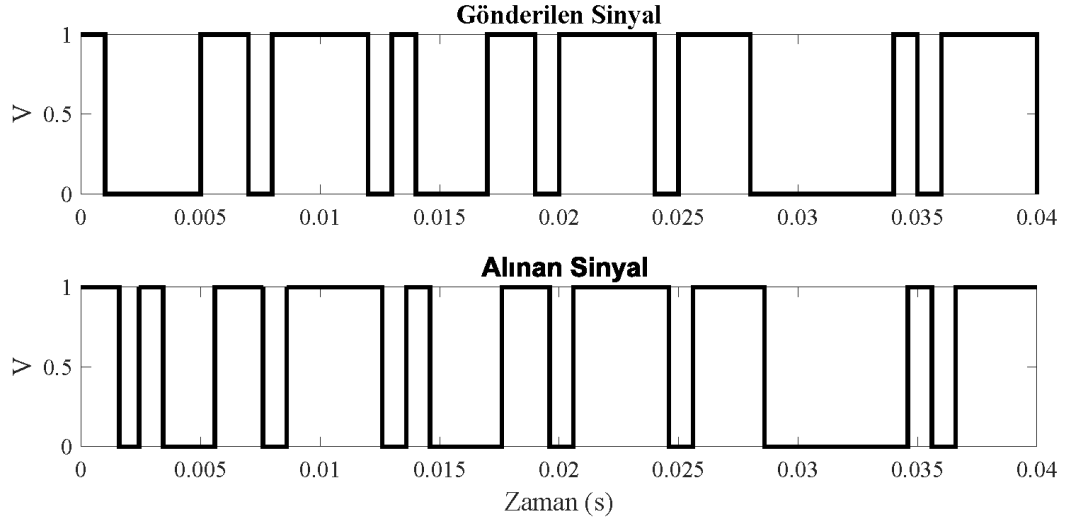
Şekil 4.39. Kuvvetlendirici ve karşılaştırıcı bloğunun girişi ve çıkış sinyali

Simülasyon çalışmasında demodülatör bloğunun girişine alıcı bloğundan elde edilen alıcı çıkış sinyali uygulanmaktadır. Demodülasyon bloğunda Şekil 3.7’de gösterilen Manchester kod çözücü devresinden faydalanılarak demodülasyon işlemi gerçekleştirilmektedir. Bu bloğun girişine uygulanan sinyal ile çıkışta elde edilen sinyaller Şekil 4.40’da gösterilmiştir.



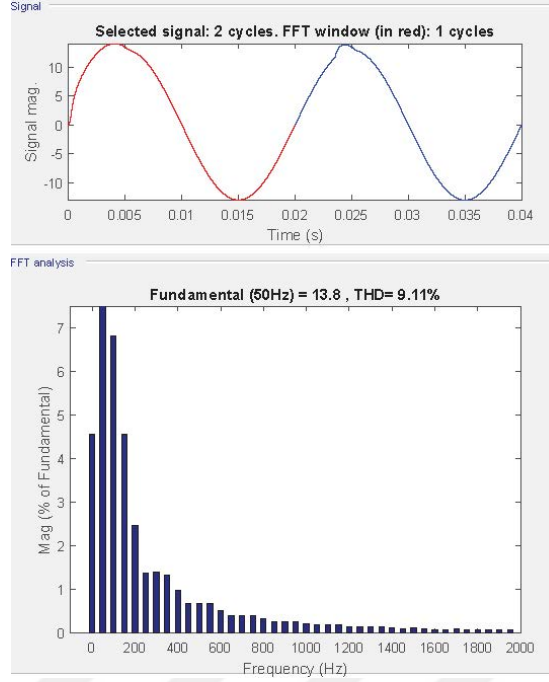
Şekil 4.40. Demodülatör bloğuna uygulanan giriş sinyali ve çıkış sinyali

VLC simülasyon çalışmasında oluşturulan tüm blokların çalışması ile sistemin girişinde uygulanan veri sinyali sistem çıkışında tekrar elde edilmiştir. Sistemin girişine uygulanan veri sinyali ile çıkışta elde edilen sinyal Şekil 4.41’de gösterilmektedir. Şekil 4.41 incelendiğinde sistemin girişinde gönderilen sinyalin çıkışta elde edildiği gözlemlenmektedir.



Şekil 4.41. Sistemin girişine uygulanan sinyal ve çıkışta elde edilen sinyal

Simülasyon çalışması kapsamında DC-DC düşürücü-yükseltici dönüştürücünün girişinde kullanılan DC sinyalin AC şebeke ile beslendiği durum için THD analizi gerçekleştirilmiştir. Girişte 220 V, 50 Hz değerine sahip bir sinyal uygulanmış ve trafo kullanılarak bu sinyalin değeri önce 5 V’a düşürülmüştür. Daha sonra doğrultucu bir devre kullanılarak 5 V DC giriş gerilimi elde edilerek dönüştürücünün besleme gerilimi oluşturulmuştur. Şekil 4.42’de THD hesaplamasının sonucunda elde edilen sonuç verilmiştir. Sonuçtan görüldüğü üzere düşürücü-yükseltici DC-DC dönüştürücünün AC giriş gerilimi ile beslenmesi durumunda THD değeri % 9.11 olarak hesaplanmıştır.



Şekil 4.42. Düşürücü-yükseltici DC-DC dönüştürücü için THD hesaplaması

4.4.1. Simülasyon çalışması sonuçları

MATLAB/Simulink programı kullanılarak gerçekleştirilen simülasyon çalışmalarında yaygın olarak kullanılan DC-DC dönüştürücü topolojilerinin VLC sistemi içerisinde incelenmesi gerçekleştirilmiştir. VLC sisteminin girişinde uygulanan bilgi sinyali sistemin çıkışında tekrar elde edilmiştir. VLC verici kısmında veri iletiminden sorumlu LED için gereken düzgün gerilim DC-DC topolojiler ile elde edilirken her bir dönüştürücünün kendi çalışma aralıklarına uygun davrandığı gözlemlenmiştir. Simülasyon çalışmalarında veriye göre anahtarlanan LED'in çıkışında oluşan optik gücün, veriye uygun olarak değişmesi sağlanırken aynı zamanda bu elemanın üzerinden geçen akımın sıfıra düşmemesi önemli bir sonuçtur. DC-DC dönüştürücüler ile beslenen LED'in akımının sıfıra düşmeden veri iletimi sağlaması aynı zamanda aydınlatma işlevinin de sürdürülebilmesi anlamına gelmektedir. Gerçekleştirilen simülasyon çalışması sonuçlarında bu iki görev gerçekleştirilmiştir.

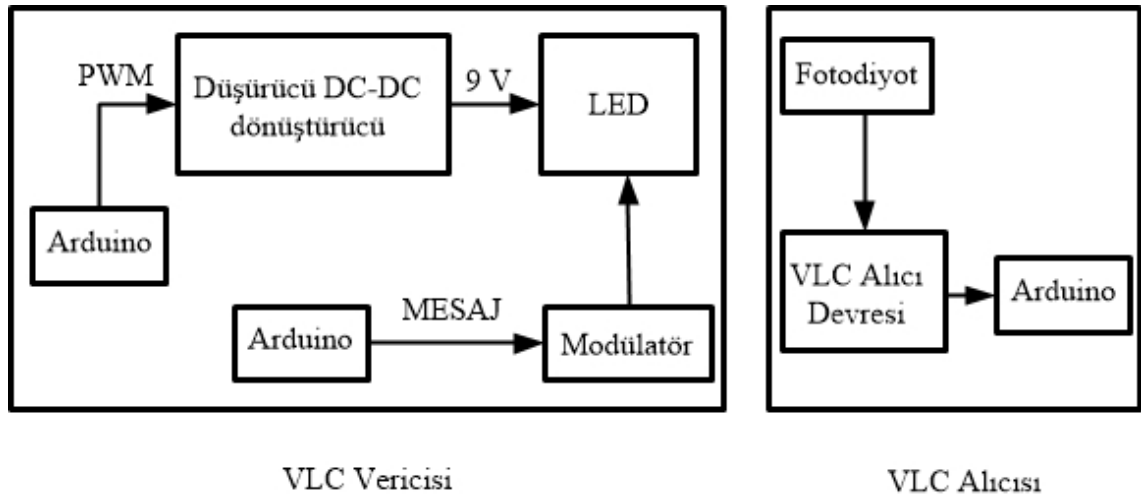
5. ARAŞTIRMA BULGULARI

5.1. Düşürücü DC-DC Dönüştürücülü Örnek VLC Uygulaması

Tez kapsamında düşürücü DC-DC dönüştürücü, yükseltici DC-DC dönüştürücü ve düşürücü-yükseltici DC-DC dönüştürücüler incelenmiştir. Yapılan simülasyon çalışmalarında düşürücü DC-DC dönüştürücülerin VLC uygulamalarında kullanımında diğer dönüştürücülere göre üstünlükleri bulunmaktadır. Bundan dolayı tez çalışmasında düşürücü DC-DC dönüştürücü temelli bir VLC verici devresinin uygulaması gerçekleştirilmiştir. Yapılan bu çalışmanın amacı düşürücü DC-DC dönüştürücünün de kullanıldığı bir sistem oluşturmak ve VLC ile veri aktarımı gerçekleştirmektir.

5.2. Uygulama Çalışmasının Temel Kısımları

Bu çalışmada VLC sistemini oluşturabilmek için gerekli temel kısımlar olan verici ve alıcı devreleri tasarlanmıştır. Çalışmada VLC vericisi olarak tasarlanan devrenin giriş geriliminin DC kaynak olarak kullanıldığı bir uygulama üzerinde çalışılmıştır. Şekil 5.1’de uygulama çalışmasının genel bloklarla gösterimi verilmektedir.



Şekil 5.1. Uygulamada kullanılan sistemin genel bir gösterimi

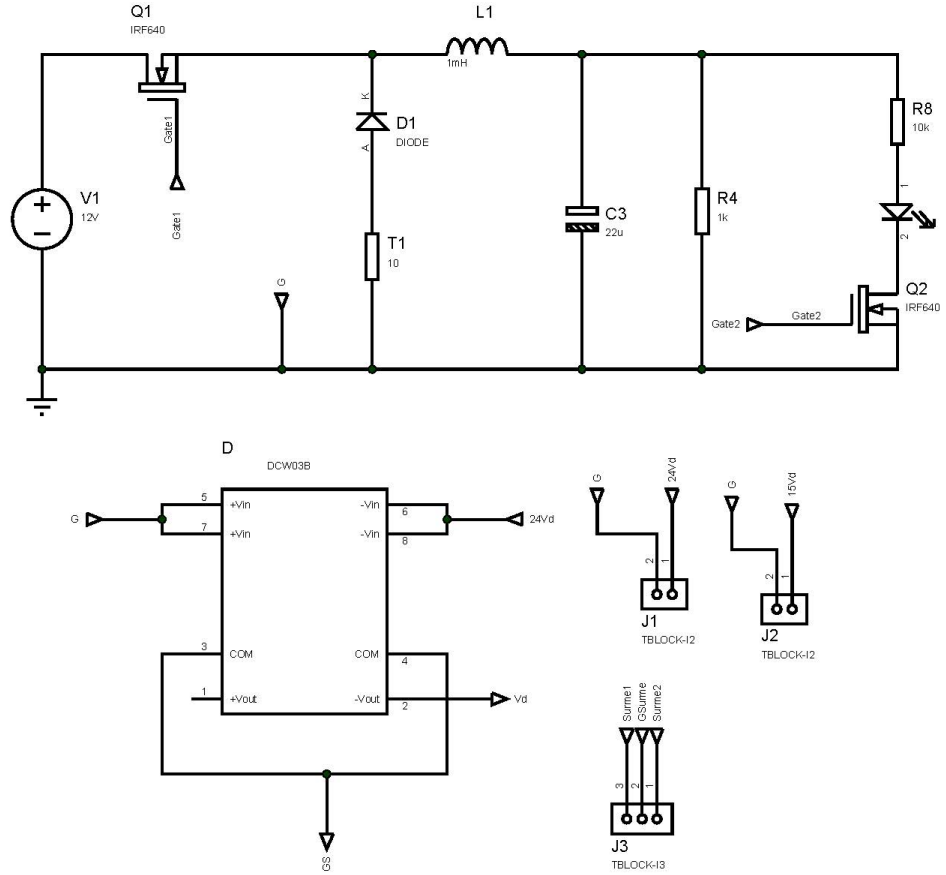
5.2.1. VLC verici devresi

Uygulama çalışması kapsamında VLC verici devresi geliştirilmiştir. Bu devrede düşürücü DC-DC dönüştürücü, VLC modülatörü ve LED bulunmaktadır. Uygulamada düşürücü

DC-DC dönüştürücü kullanımının amacı vericinin girişinde uygulanan DC gerilimin değerinin düşürülmesidir. Gerçekleştirilen çalışmada veri iletiminden sorumlu olarak LED kullanılmıştır. VLC verici devresinde yer alan dönüştürücü aslında bir LED sürücü devresi işlevi görmektedir. Çalışmada kullanılan VLC modülatörünün amacı ise veri aktarımı sağlamaktır. Bu çalışmada modülatör olarak kullanılan topolojiler arasından SSM topolojisi seçilmiştir. SSM topolojisi kullanıldığı için düşürücü DC-DC dönüştürücü sabit gerilim kaynağı gibi davranmaktadır.

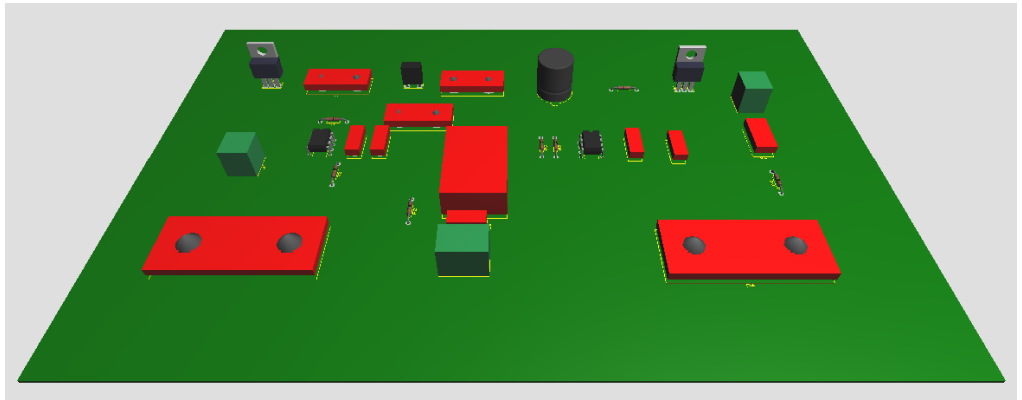
VLC vericisi olarak kullanılan devre şeması Şekil 5.2’de gösterilmektedir. Verici devrenin girişinde 12 V değerinde DC gerilim kaynağı kullanılmaktadır. DC-DC düşürücü dönüştürücü girişte verilen 12 V gerilimi 9 V değerine düşürmektedir. Dönüştürücü çıkışında VLC işlevinin gerçekleştirilebilmesi için LED ve anahtarlama elemanından oluşan SSM topolojisi kullanılmıştır.

Veri iletimi için 1W gücünde gün ışığı LED kullanılmaktadır. Şekil 5.2’de düşürücü dönüştürücünün anahtarlama elemanı Q1 ile gösterilmektedir. SSM yapısında kullanılan veriye uygun olarak LED anahtarlamasından sorumlu olan MOSFET ise Q2 ile gösterilmiştir. Q1 ve Q2 elemanlarına PWM sinyalleri uygulanmaktadır. Bu sinyaller Arduino MEGA 2560 ile üretilmektedir.



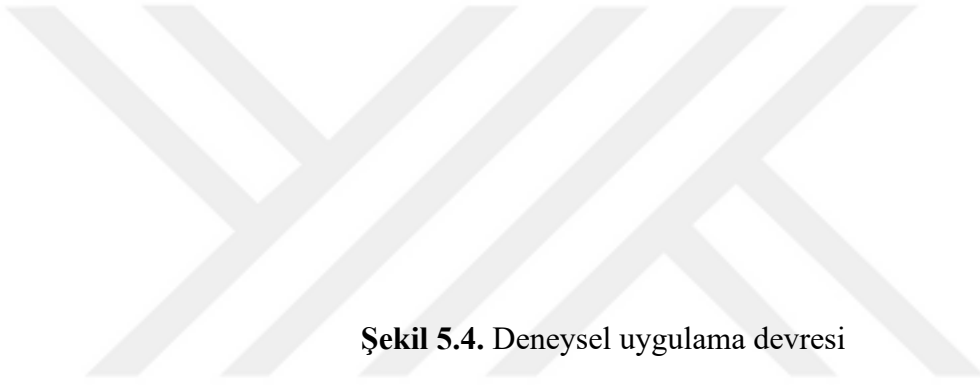
Şekil 5.2. Düşürücü DC-DC dönüştürücü ile SSM topolojisi

Düşürücü DC-DC dönüştürücü ve SSM topolojisinin birlikte kullanılmasıyla oluşturulan VLC verici devresine ait PCB çiziminin 3 boyutlu görüntüsü Şekil 5.3’de verilmiştir.



Şekil 5.3. VLC verici devresinin 3 boyutlu PCB çizimi

Tasarlanan VLC verici devresinin deneysel uygulama devresi Şekil 5.4’te gösterilmiştir.



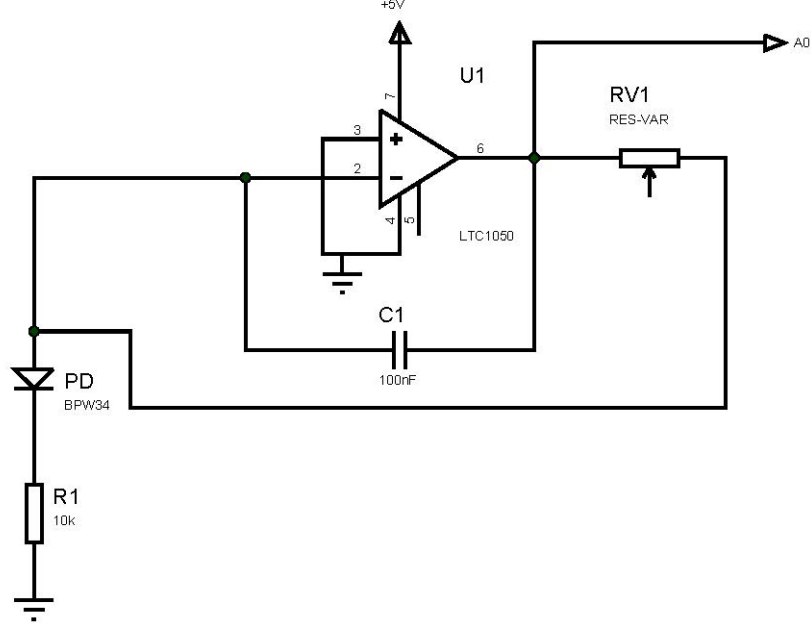
Şekil 5.4. Deneyisel uygulama devresi

VLC vericisi olarak kullanılan ve Şekil 5.4 gösterilen devrenin çalışması sonucunda LED 9 V değerinde sabit bir gerilim ile sürekli beslenmektedir. Verici kısmının ucunda yer alan LED ise veri sinyaline uygun olarak anahtarlanmaktadır.

5.2.2. VLC alıcı devresi

Çalışma kapsamında VLC uygulamasının diğer bir önemli kısmı olan alıcı devresi gerçekleştirilmiştir. Verici olarak kullanılan LED aracılığıyla aktarılan verinin anlamlandırılması ve mesaj sinyalinin tekrar elde edilmesi için VLC alıcı devresi Şekil 5.5'te verilmiştir. Devrenin giriş kısmında bir fotodiyot bulunmaktadır. Uygulama için BPW34 fotodiyot kullanılmıştır. Bu elemanın çıkışında LED tarafından gönderilen ışığın yoğunluğuna bağlı olarak değişen bir akım üretilmektedir. LTC1050 entegresi ile fotodiyot çıkışında elde edilen sinyalin kuvvetlendirme ve karşılaştırma işlemleri gerçekleştirilmektedir. Şekil 5.5'te A0 ile gösterilen kısım alıcı devresinin analog çıkış kısmıdır. A0 ile elde edilen sinyal Arduino karta gönderilmektedir. A0 sinyalinin

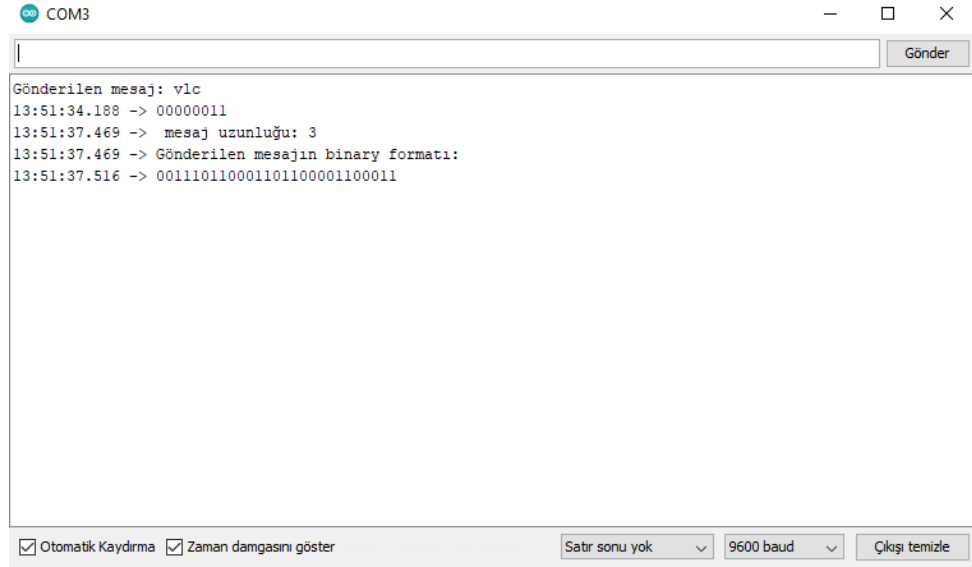
belirlenen bir eşik değeri ile karşılaştırılması sonucunda demodülasyon işlemi gerçekleştirilerek giriş sinyalinin tekrar elde edilmesi sağlanmaktadır.



Şekil 5.5. VLC alıcı devre şeması

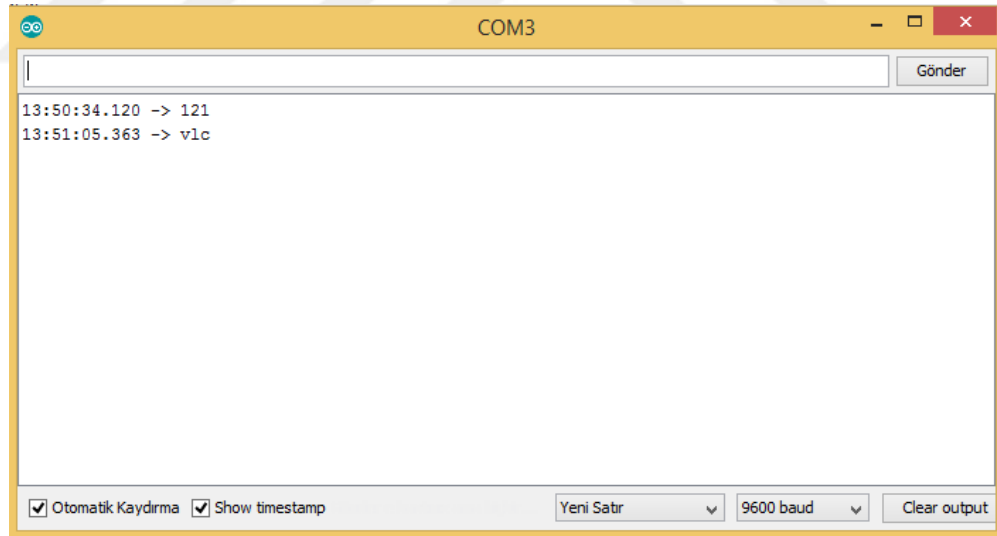
5.3. DeneySEL Sonuçlar

Şekil 5.1’de verilen alıcı ve verici devrelerinin çalışmasıyla birlikte VLC kullanılarak veri aktarımı sağlanmıştır. Verici kısmının LED ile veri aktarımını sağlamak için kullanılan Arduino aracılığıyla mesaj sinyali ikili veri sinyaline dönüştürülmüştür. Şekil 5.6’da gönderilen mesaj sinyali ve bu mesaj sinyalinin ikili veri formatındaki karşılığı gösterilmektedir. Mesaj sinyalinin ikili veri formatına dönüştürülmüş şekli 1 ve 0’lardan oluşmaktadır. LED seri bağlı olduğu MOSFET aracılığıyla bu veriye göre anahtarlansaktadır. Böylelikle LED’in parlaklığında anlamlı değişiklikler oluşmaktadır.



Şekil 5.6. Gönderilen mesaj sinyali

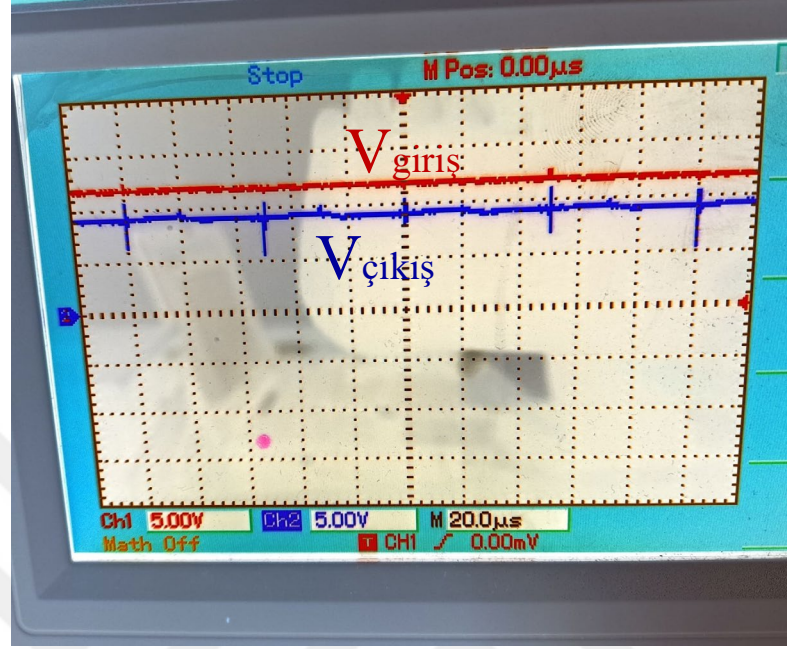
Vericiden LED aracılığıyla alıcıya gönderilen sinyaller alıcı devresinde algılanmaktadır. Şekil 5.7’de algılanan sinyal gösterilmektedir. Alıcı devresi aracılığıyla algılanan sinyalin demodüle edilmesiyle girişte gönderilen mesaj sinyali tekrar elde edilmektedir.



Şekil 5.7. Alınan sinyal

Şekil 5.8’de de düşürücü dönüştürücünün giriş ve çıkış gerilimine ait dalga şekilleri verilmiştir. Şekilde düşürücü dönüştürücünün girişinde uygulanan 12 V değerindeki DC sinyaldir ve dönüştürücünün çıkışında 9 V sinyal elde edilmiştir. VLC verisi olarak

tasarlanan DC-DC düşürücü dönüştürücünün LED için regüleli bir DC gerilim sağladığı şekilde gözlemlenmiştir.



Şekil 5.8. Düşürücü dönüştürücünün giriş ve çıkış sinyalleri

6. SONUÇLAR ve TARTIŞMA

Bu tezde VLC sistemlerde yaygın olarak kullanılan üç temel izolesiz DC-DC dönüştürücü olan düşürücü, yükseltici ve düşürücü-yükseltici tür DC-DC dönüştürücülerin sistem içerisindeki davranışları MATLAB/Simulink programında simüle edilerek incelenmiştir. VLC sistemlerde LED sürücü olarak kullanılan bu dönüştürücülerin LED için sürekli ve regüleli bir gerilim sağlaması önemlidir.

İlk olarak bu üç dönüştürücü için VLC sisteme dahil oldukları simülasyon çalışması yapılmıştır. Simülasyon çalışmasının sonuçları incelendiğinde her bir dönüştürücünün istenen parametrelere uygun olarak düzgün bir çıkış gerilimi ürettiği gözlemlenmiştir. Bu üç dönüştürücüye ait sonuçlar incelendiğinde düşürücü DC-DC dönüştürücünün bazı üstünlükleri olduğu gözlemlenmiştir. Düşürücü dönüştürücünün kararlı hale gelme süresi diğerlerine göre daha kısadır. Bu dönüştürücü daha kısa sürede sisteme gereken gerilim değerini stabil olarak verebilmektedir. Dolayısıyla genel sistemin cevap verme hızı en yüksek olan dönüştürücü düşürücü tür DC-DC dönüştürücüdür. Ayrıca düşürücü dönüştürücünün çıkış akımındaki dalgalanma miktarı diğer iki dönüştürücüye göre daha azdır.

Tez kapsamında VLC ile veri aktarımının gerçekleştirilebilmesi için bir uygulama devresi gerçekleştirilmiştir. Uygulamada VLC vericisi olarak kullanılabilen bir prototip geliştirilmiştir. Bu prototip 1 W gücünde bir LED ile veri iletimine imkân tanıyacak şekilde tasarlanmıştır. Tasarlanan VLC verici devresinde LED sürücü olarak düşürücü DC-DC dönüştürücü kullanılmıştır. İlk kısımda gerçekleştirilen simülasyon çalışmalarının sonuçlarında düşürücü dönüştürücünün sahip olduğu üstünlükler göz önüne alınarak uygulama çalışmasında bu dönüştürücü kullanılmıştır. Bu dönüştürücü ile girişte verilen gerilim değeri LED için istenen değere düşürülmüştür. LED sürücü olarak kullanılan bu dönüştürücü, LED için regüleli ve sabit bir gerilim üretmektedir. Aydınlatma amacıyla kullanılan LED elemanın VLC işlevi kazanabilmesi için ilave bir modülatör ünitesi kullanılmıştır. VLC uygulamalarında haberleşme ve aydınlatma işlevinin eş zamanlı bir şekilde kesintiye uğramadan sağlanabilmesi için dönüştürücü ve modülatörün kontrol edilebilmesi önemlidir. Prototip olarak geliştirilen devre uygun tasarım parametreleri göz önüne alınarak daha büyük LED ve LED dizileri için

geliştirilmeye açık bir devredir. Uygulama çalışmasının sonucu olarak VLC sistemin girişinde gönderilmek istenen mesaj sinyali alıcıda tekrar elde edilmiştir. Tez kapsamında geliştirilen bu prototip başarılı olarak çalışmaktadır.



KAYNAKLAR

- Aller, D. G., Lamar, D. G., Arias, M., Rodríguez, J., Miaja, P. F., & Sebastián, J. (2020, March). Design of a Two Input Buck converter (TIBuck) for a Visible Light Communication LED driver based on splitting the power. *IEEE Applied Power Electronics Conference and Exposition (APEC)* (pp. 1309-1314). IEEE.
- AI-Sammak, A. J., AI-Ruwaihi, K., & AI-Kooheji, I. (1992). Manchester encoder–decoder for optical data communication links. *Applied Optics*, 31(12), 2001.
- Arias, M., Vázquez, A., & Sebastián, J. (2012). An overview of the AC-DC and DC-DC converters for LED lighting applications. *automatika*, 53(2), 156-172.
- Bhalerao, M. V., Sumathi, M., & Sonavane, S. S. (2017). Line of sight model for visible light communication using Lambertian radiation pattern of LED: Line of Sight model for Visible Light Communication. *International Journal of Communication Systems*, 30(11), e3250.
- Bharati, S., Rahman, M. A., & Podder, P. (2020). Implementation of ASK, FSK and PSK with BER vs. SNR comparison over AWGN channel. *arXiv:2002.03601*.
- Bodur, H. (2014). *Güç Elektronik, Birsen Yayınevi*, 2014
- Chi, N. (2018). *LED-Based Visible Light Communications* (1st ed. 2018). Springer Berlin Heidelberg : Imprint: **Springer**.
- Deng, X., Wu, Y., Arulandu, K., Zhou, G., & Linnartz, J. P. M. (2014, December). Performance comparison for illumination and visible light communication system using buck converters. *IEEE Globecom Workshops (GC Wkshps)* (pp. 547-552). IEEE.
- Deng, X., Linnartz, J. P. M., Arulandu, K., Zhou, G., & Wu, Y. (2015, June). Effect of buck driver ripple on BER performance in visible light communication using LED. *IEEE International Conference on Communication Workshop (ICCW)* (pp. 1368-1373). IEEE.
- Dimitrov, S., & Haas, H. (2015). *Principles of LED Light Communications: Towards Networked Li-Fi*. **Cambridge University Press**.
- Forouzan, B. A., & Fegan, S. C. (2007). *Data communications and networking* (4th ed). **McGraw-Hill Higher Education**.
- Ghassemlooy, Z., Arnon, S., Uysal, M., Xu, Z., & Cheng, J. (2015). Emerging optical wireless communications-advances and challenges. *IEEE journal on selected areas in communications*, 33(9), 1738-1749.
- Höher, P. A. (2019). *Visible Light Communications: Theoretical and Practical Foundations*. **Hanser**.

- Idris, S., Aibinu, A. M., Koyunlu, G., & Sanusi, J. (2019). A Survey of Modulation Schemes in Visible Light Communications. *3rd International Conference on Trends in Electronics and Informatics (ICOEI)*, 1-7.
- Jovicic, A., Li, J., & Richardson, T. (2013). Visible light communication: opportunities, challenges and the path to market. *IEEE communications magazine*, 51(12), 26-32.
- Karunatilaka, D., Zafar, F., Kalavally, V., & Parthiban, R. (2015). LED based indoor visible light communications: State of the art. *IEEE communications surveys & tutorials*, 17(3), 1649-1678.
- Khan, L. U. (2017). Visible light communication: Applications, architecture, standardization and research challenges. *Digital Communications and Networks*, 3(2).
- Kisacik, R., Efe, B. C., Pusane, A. E., Uysal, M., Baykas, T., Dundar, G., & Yalcinkaya, A. D. (2019). Distance and Power based Experimental Verification of Channel Model in Visible Light Communication. *27th Signal Processing and Communications Applications Conference (SIU)*, 1-4.
- Lee, Y. C., Lai, J. L., Yu, C. H., & Gong, C. S. A. (2016, July). The high-efficiency LED driver for visible light communication applications. *Eighth International Conference on Ubiquitous and Future Networks (ICUFN)* (pp. 56-58). IEEE.
- Li, S., Tan, S. C., Lee, C. K., Waffenschmidt, E., Hui, S. Y., & Chi, K. T. (2015). A survey, classification, and critical review of light-emitting diode drivers. *IEEE Transactions on Power Electronics*, 31(2), 1503-1516.
- Loose, F., Duarte, R. R., Barriquello, C. H., Dalla Costa, M. A., Teixeira, L., & Campos, A. (2017, October). Ripple-based visible light communication technique for switched LED drivers. *IEEE Industry Applications Society Annual Meeting* (pp. 1-6). IEEE.
- Loose, F., Teixeira, L., Brum, J. P., Barriquello, C. H., Reguera, V. A., Alonso, J. M., & Dalla Costa, M. A. (2021). Efficient Hybrid Buck Converter for Visible Light Communication in LED Drivers. *IEEE Transactions on Industrial Electronics*, 69(2), 1877-1887.
- Modepalli, K., & Parsa, L. (2013). Dual purpose HB-LED driver for illumination and visible light communication. *Twenty-Eighth Annual IEEE Applied Power Electronics Conference and Exposition (APEC)*, 875-880.
- Mohan, N., Undeland, T. M., & Robbins, W. P. (2003). *Power electronics: converters, applications, and design*. John Wiley & sons.
- Padmavathi, P., & Natarajan, S. (2019, March). A survey on efficient converter driver techniques for LED lighting applications. *Innovations in Power and Advanced Computing Technologies (i-PACT)* (Vol. 1, pp. 1-7). IEEE.

- Rodríguez, J., Aller, D. G., Lamar, D. G., & Sebastián, J. (2018, March). Performance evaluation of a VLC transmitter based on the split of the power. *IEEE Applied Power Electronics Conference and Exposition (APEC)* (pp. 1179-1186). IEEE.
- Rodríguez, J., Lamar, D. G., Miaja, P. F., Aller, D. G., & Sebastian, J. (2018). Power-efficient VLC transmitter based on pulse-width modulated DC–DC converters and the split of the power. *IEEE Transactions on Power Electronics*, 34(2), 1726-1743.
- Salmento, M. L. G., Soares, G. M., Alonso, J. M., & Braga, H. A. (2018). A dimmable offline LED driver with OOK-M-FSK modulation for VLC applications. *IEEE Transactions on Industrial Electronics*, 66(7), 5220-5230.
- Sebastián, J., Lamar, D. G., Aller, D. G., Rodriguez, J., & Miaja, P. F. (2018). On the role of power electronics in visible light communication. *IEEE Journal of Emerging and Selected Topics in Power Electronics*, 6(3), 1210-1223.
- Smillie, G. (1999). *Analogue and digital communication techniques*. Arnold.
- Teixeira, L., Loose, F., Alonso, J. M., Barriquello, C. H., Alfonso Reguera, V., & Dalla Costa, M. A. (2022). A Review of Visible Light Communication LED Drivers. *IEEE Journal of Emerging and Selected Topics in Power Electronics*, 10(1), 919-933.
- Teixeira, L., Loose, F., Barriquello, C. H., Reguera, V. A., Costa, M. A. D., & Alonso, J. M. (2019). Review of LED drivers for Visible Light Communication. *IECON 2019 - 45th Annual Conference of the IEEE Industrial Electronics Society*, 4274-4279.
- Udvary, E. (2019). Visible Light Communication Survey. *Infocommunications journal*, 2, 22-31.
- Uysal, M., & Nouri, H. (2014). Optical wireless communications; An emerging technology. *16th International Conference on Transparent Optical Networks (ICTON)*, 1-7.
- Van der Broeck, H., Sauerlander, G., & Wendt, M. (2007, February). Power driver topologies and control schemes for LEDs. *APEsC 07-twenty-second annual IEEE applied power electronics conference and exposition* (pp. 1319-1325). IEEE.
- Vappangi, S., & Mani, V. V. (2019). Concurrent illumination and communication: A survey on Visible Light Communication. *Physical Communication*, 33, 90-114.
- Wang, Y., Alonso, J. M., & Ruan, X. (2017). A review of LED drivers and related technologies. *IEEE Transactions on Industrial Electronics*, 64(7), 5754-5765.
- Yadlapalli, R. T., Narasipuram, R. P., & Kotapati, A. (2020). An overview of energy efficient solid state LED driver topologies. *International Journal of Energy Research*, 44(2), 612-630.

Ye, Z., Greenfield, F., & Liang, Z. (2008, November). A topology study of single-phase offline AC/DC converters for high brightness white LED lighting with power factor pre-regulation and brightness dimmable. *34th Annual Conference of IEEE Industrial Electronics* (pp. 1961-1967). IEEE.

