

T.C.
BANDIRMA ONYEDİ EYLÜL ÜNİVERSİTESİ
LİSANSÜSTÜ EĞİTİM ENSTİTÜSÜ

YÜKSEK LİSANS TEZİ

E SINIFI REZONANS DÖNÜŞTÜRÜCÜ TEMELLİ LED SÜRÜCÜNÜN
ÇALIŞMA PARAMETRELERİNİN FARKLI KALİTE FAKTÖRLERİ İÇİN
KARŞILAŞTIRILMASI

Onur ZENCİR

Elektrik-Elektronik Mühendisliği Anabilim Dalı

Elektrik-Elektronik Mühendisliği Programı

HAZİRAN 2025

T.C.
BANDIRMA ONYEDİ EYLÜL ÜNİVERSİTESİ
LİSANSÜSTÜ EĞİTİM ENSTİTÜSÜ

YÜKSEK LİSANS TEZİ

E SINIFI REZONANS DÖNÜŞTÜRÜCÜ TEMELLİ LED SÜRÜCÜNÜN
ÇALIŞMA PARAMETRELERİNİN FARKLI KALİTE FAKTÖRLERİ İÇİN
KARŞILAŞTIRILMASI

Onur ZENCİR

DANIŞMAN
Dr. Öğr. Üyesi Salih NACAR

Elektrik-Elektronik Mühendisliği Anabilim Dalı

Elektrik-Elektronik Mühendisliği Programı

HAZİRAN 2025

ONAY

Onur ZENCİR tarafından hazırlanan “**E Sınıfı Rezonans Dönüştürücü Temelli LED Sürücünün Çalışma Parametrelerinin Farklı Kalite Faktörleri İçin Karşılaştırılması**” adlı tez çalışması 30/06/2025 tarihinde yapılan sınavla aşağıdaki jüri tarafından oybirliği ile Bandırma Onyedli Eylül Üniversitesi Lisansüstü Eğitim Enstitüsü Elektrik-Elektronik Mühendisliği Anabilim Dalı’nda YÜKSEK LİSANS TEZİ olarak kabul edilmiştir.

Jüri Üyeleri

İmza

Dr. Öğr. Üyesi Salih NACAR
(Danışman)

Doç. Dr. Abdullah GÖKYILDIRIM
(Üye)

Dr. Öğr. Üyesi Yücel ÇETİNCEVİZ
(Üye)

Bu tezin kabulü, Lisansüstü Eğitim Enstitüsü Yönetim Kurulu’nun .../.../... gün ve .../... sayılı kararı ile onaylanmıştır.

Prof. Dr. Serhat DUMAN

Enstitü Müdürü

**BANDIRMA ONYEDİ EYLÜL ÜNİVERSİTESİ LİSANSÜSTÜ EĞİTİM
ENSTİTÜSÜ
YÜKSEK LİSANS TEZ ÇALIŞMASI
ETİK BEYANI**

Bandırma Onyedi Eylül Üniversitesi Lisansüstü Eğitim Enstitüsü tez yazım kılavuzuna göre hazırlamış olduğum “**E Sınıfı Rezonans Dönüştürücü Temelli LED Sürücünün Çalışma Parametrelerinin Farklı Kalite Faktörleri İçin Karşılaştırılması**” adlı tezimin özgün bir çalışma olduğunu, tez hazırlanırken tüm aşamalarda bilimsel etik ilkelerine uygun davrandığımı, tez kapsamında sunulan tüm verileri bilimsel etik ilkelerine uygun elde ettiğimi, tezde faydalandığım tüm eserlere atıf yaptığımı ve kaynaklar kısmında bu eserleri gösterdiğimi beyan ederim.

30/06/2025

Onur ZENCİR

ÖNSÖZ

Geleneksel enerji kaynaklarının giderek azaldığı ve enerji tüketiminin hızla arttığı günümüz dünyasında, enerji verimliliği konusu hayati bir öneme sahiptir. Özellikle elektrik enerjisinin büyük bir kısmının aydınlatma alanında kullanılıyor olması, bu alandaki teknolojik yenilikleri ve verimlilik çalışmalarını ön plana çıkarmaktadır. Aydınlatma teknolojilerinde geleneksel yöntemlerin yerini almaya başlayan LED teknolojisi, düşük enerji tüketimi, uzun ömürlü olması ve çevre dostu özellikleriyle büyük bir dönüşümü tetiklemiştir.

Bu çalışmada, LED sürücü olarak kullanılan E sınıfı rezonans dönüştürücünün farklı kalite faktörlerine bağlı olarak çalışma parametrelerinin değişimi ele alınmaktadır. Yumuşak anahtarlama DC-DC dönüştürücülerin önemi, sert anahtarlama yumuşak anahtarlama tekniklerine geçişle birlikte detaylandırılmıştır. Yumuşak anahtarlama teknikleri, yarıiletken güç dönüştürücülere yüksek frekanslarda çalışabilme imkânı sunarak enerji tasarrufu hedeflerine ulaşmada önemli bir rol oynamaktadır. Ayrıca yumuşak anahtarlama teknikleri ile özellikle anahtarlama anında meydana gelen enerji kayıpları yok edilerek kullanılan sürücünün verimi arttırılmaktadır.

Bu tez çalışması sırasında, tez konusunun belirlenmesinden başlayarak son aşamaya kadar her konuda benden yardımlarını esirgemeyen danışman hocam Sayın Dr. Öğr. Üyesi Salih NACAR'a şükranlarımı sunarım.

Bu günlere gelmemde büyük emekleri olan annem Emine Hanım'a, babam Menderes Bey'e, yoğun çalışma temposunda benden maddi ve manevi desteğini esirgemeyen eşim Büşra Hanımefendi'ye ve kızım Derin'e, varlıkları ile birer motivasyon kaynağı olan abim Hakan, yengem Servet ve yeğenlerim Çınar, Nehir ve Nil'e teşekkür ederim.

ÖZET

YÜKSEK LİSANS TEZİ

E SINIFI REZONANS DÖNÜŞTÜRÜCÜ TEMELLİ LED SÜRÜCÜNÜN ÇALIŞMA PARAMETRELERİNİN FARKLI KALİTE FAKTÖRLERİ İÇİN KARŞILAŞTIRILMASI

Onur ZENCİR

Bandırma Onyedi Eylül Üniversitesi

Lisansüstü Eğitim Enstitüsü

Elektrik-Elektronik Mühendisliği Anabilim Dalı

Danışman: Dr. Öğr. Üyesi Salih NACAR

Haziran, 65 sayfa

Gelişen teknoloji ve artan nüfus, elektrik enerjisine olan talebin sürekli artmasına neden olmaktadır. Bu durum, yeni enerji kaynaklarının araştırılmasını ve mevcut kaynakların daha verimli kullanılmasını zorunlu kılmaktadır. Elektrik enerjisinin önemli bir bölümünün aydınlatma amacıyla kullanılması, bu alanda kullanılan cihazların verimliliğinin artırılmasını önemli hale getirmektedir. LED'ler, geleneksel aydınlatma elemanlarına kıyasla daha yüksek verimlilik ve daha uzun ömür sunmaları nedeniyle yaygın olarak tercih edilmektedir. Ancak LED'lerin sıcaklığa bağlı olarak değişen ve doğrusal olmayan elektriksel karakteristiği sabit akımla sürülmelerini zorunlu kılmaktadır. Bu sebeple, LED'lerin kararlı ve güvenilir bir şekilde çalışabilmesi için uygun sürücü devrelerine ihtiyaç duyulmaktadır. Geleneksel dirençli ve doğrusal düzenleyicili LED sürme yöntemleri düşük verimli olduklarından yerlerini DC-DC dönüştürücülerle gerçekleştirilen LED sürücü devrelerine bırakmışlardır. DC-DC dönüştürücüler, yüksek frekansta çalıştırıldıklarında maliyet ve hacim açısından avantaj sağlamaktadırlar. Ancak PWM kontrollü dönüştürücülerde sert anahtarlama koşulları, yüksek frekanslarda ciddi anahtarlama kayıplarına yol açmaktadır. PWM anahtarlama dönüştürücülerin

bu dezavantajını ortadan kaldırmak veya azaltmak için yumuşak anahtarlama tekniklerinin kullanıldığı rezonans anahtarlama dönüştürücüler geliştirilmiştir. Bu tez çalışmasında, E sınıfı rezonans dönüştürücü kullanılarak yüksek frekanslarda sıfır gerilim anahtarlama şartlarında çalışabilen bir LED sürücü devresi analiz edilmiş ve tasarlanmıştır. Sürücü devrenin farklı kalite faktörleri (3, 5, 7 ve 9) için çalışma parametrelerindeki değişimleri incelemek amacıyla simülasyon çalışmaları yapılmış ve laboratuvar ortamında deneysel çalışmalar gerçekleştirilmiştir. Simülasyon çalışmaları PSIM programı ortamında gerçekleştirilirken 250 kHz anahtarlama frekansında çalışan 48 W'lık LED sürücünün prototipi gerçekleştirilmiştir. Simülasyon ve deneysel çalışmalar sonucunda giriş akımının, anahtar geriliminin, rezonans akımının ve çıkış gücünün artan kalite faktörü ile azaldığı gözlemlenmiştir. Simülasyon çalışmalarında sürücünün güç anahtarı farklı kalite faktörleri için sıfır gerilim şartlarında ilettime geçmektedir. Ancak düşük kalite faktörleri için anahtarın kapı sinyali uygulanmadan anahtar gerilimi 0 V üzerine çıkmaktadır. Yumuşak anahtarlama yönünden deneysel çalışmalar ile simülasyon çalışmaları uyumlu olmakla birlikte deneysel çalışmalarda kalite faktörü 9 için tasarım kriterlerine göre yumuşak anahtarlama şartları sağlanamamaktadır. Tez çalışması kapsamında farklı kalite faktörleri için elde edilen simülasyon ve deneysel çalışma sonuçları tablolar halinde sunulmuştur.

Anahtar kelimeler: DC-DC Dönüştürücüler, E Sınıfı Rezonans Dönüştürücü, LED, LED Sürücü, Yumuşak Anahtarlama

ABSTRACT

M.Sc. THESIS

COMPARISON OF OPERATING PARAMETERS OF A CLASS E RESONANT CONVERTER BASED LED DRIVER FOR DIFFERENT QUALITY FACTORS

Onur ZENCİR

Bandırma Onyedi Eylül University

Graduate School of Natural and Applied Sciences

Department of Electrical and Electronics Engineering

Supervisor: Asst. Prof. Dr. Salih NACAR

June 2025, 65 pages

Advancing technology and a growing population are driving a constantly increasing demand for electrical energy. This necessitates the search for new energy sources and the more efficient use of existing resources. The fact that a significant portion of electrical energy is used for lighting makes it crucial to increase the efficiency of devices used in this field. LEDs are widely preferred due to their higher efficiency and longer lifespan compared to traditional lighting elements. However, their temperature-dependent and nonlinear electrical characteristics necessitate constant current drive. Therefore, suitable driver circuits are required for stable and reliable LED operation. Traditional resistive and linearly regulated LED drive methods, due to their low efficiency, have been replaced by LED driver circuits implemented with DC-DC converters. DC-DC converters offer advantages in terms of cost and volume when operated at high frequencies. However, the hard switching conditions in PWM-controlled converters lead to significant switching losses at high frequencies. Resonant switching converters employing soft switching techniques have been developed to eliminate or mitigate this disadvantage of PWM-switched

converters. In this thesis, an LED driver circuit capable of operating under zero-voltage switching conditions at high frequencies using a Class E resonant converter is analyzed and designed. Simulation studies and laboratory experiments were conducted to investigate the changes in the operating parameters of the driver circuit for different quality factors (3, 5, 7, and 9). Simulation studies were conducted in the PSIM program, and a 48 W LED driver prototype operating at a 250 kHz switching frequency was implemented. Simulation and experimental studies revealed that the input current, switch voltage, resonant current, and output power decreased with increasing quality factor. In the simulation studies, the driver's power switch conducts under zero voltage conditions for different quality factors. However, for low quality factors, the switch voltage rises above 0 V without the application of a gate signal. While the experimental studies and simulation studies are consistent in terms of soft switching, the soft switching conditions for quality factor 9, according to the design criteria, cannot be achieved in the experimental studies. The results of the simulation and experimental studies obtained for different quality factors within the scope of this thesis are presented in tables.

Keywords: DC-DC Converters, Class E Resonant Converter, LED, LED Driver, Soft Switching

İÇİNDEKİLER

	Sayfa
ÖZET.....	I
ABSTRACT	III
İÇİNDEKİLER	V
ŞEKİL LİSTESİ.....	VIII
TABLO LİSTESİ	X
SİMGE VE KISALTMA LİSTESİ	XI
1. GİRİŞ.....	1
2. LED.....	11
2.1 LED TÜRLERİ	13
2.1.1 Güç Seviyesine Göre LED Türleri.....	14
2.1.1.1 Düşük Güçlü LED.....	14
2.1.1.2 Orta Güçlü LED.....	15
2.1.1.3 Yüksek Güçlü LED.....	15
2.1.2 Yapılarına Göre LED Türleri.....	16
2.1.2.1 DIP (Dual In-Line Package) LED	17
2.1.2.2 SMD (Surface-Mount Device) LED	17
2.1.2.3 COB (Chip-on-Board) LED.....	17
2.1.2.4 GOB (Glue-on-Board) LED.....	17
2.1.2.5 CSP (Chip Scale Package) LED	18
2.2 LED'LERİN TEMEL TASARIM UNSURLARI.....	18
2.2.1 Akım-gerilim karakteristiği	19
2.2.2 Verim-Zaman Karakteristiği	20
2.2.3 Işık Akısı-Akım Karakteristiği	20
2.2.4 Işık Şiddeti-Sıcaklık Karakteristiği.....	21

2.3	LED SÜRME TEKNİKLERİ	22
2.3.1	Direnç ile LED Sürme.....	23
2.3.2	Doğrusal Düzenleyici ile LED Sürme	24
2.3.3	DC-DC Dönüştürücüler ile LED Sürme	25
2.3.3.1	Sert Anahtarlama DC-DC LED Sürücüler	26
2.3.3.2	Yumuşak Anahtarlama LED Sürücüler.....	27
2.3.3.2.1	Sıfır Akımda Anahtarlama (ZCS).....	28
2.3.3.2.2	Sıfır Gerilimde Anahtarlama (ZVS)	29
3.	E SINIFI REZONANS DÖNÜŞTÜRÜCÜ TEMELLİ LED SÜRÜCÜ	31
3.1	E SINIFI REZONANS DÖNÜŞTÜRÜCÜNÜN ANALİZİ.....	32
3.2	E SINIFI REZONANS DÖNÜŞTÜRÜCÜ TEMELLİ LED SÜRÜCÜ TASARIMI.....	36
3.3	E SINIFI REZONANS DÖNÜŞTÜRÜCÜ TEMELLİ LED SÜRÜCÜNÜN SİMÜLASYON ÇALIŞMALARI.....	38
3.3.1	Q=3 için Simülasyon Çalışması.....	39
3.3.2	Q=5 için Simülasyon Çalışması.....	40
3.3.3	Q=7 için Simülasyon Çalışması.....	41
3.3.4	Q=9 için Simülasyon Çalışması.....	42
3.3.5	Simülasyon Sonuçlarının Karşılaştırılması	43
4.	DENEYSEL ÇALIŞMALAR.....	44
4.1	E SINIFI REZONANS DÖNÜŞTÜRÜCÜNÜN UYGULAMA DEVRESİ	44
4.2	FARKLI Q DEĞERLERİ İÇİN LED SÜRÜCÜNÜN ÇALIŞTIRILMASI	48
4.2.1	$Q \cong 3$ için Deneysel Çalışma	48
4.2.2	$Q \cong 5$ için Deneysel Çalışmalar	50
4.2.3	$Q \cong 7$ için Deneysel Çalışmalar	51
4.2.4	$Q \cong 9$ için Deneysel Çalışmalar	52

4.3 FARKLI Q DEĞERLERİ İÇİN DENEYSEL ÇALIŞMA SONUÇLARININ KARŞILAŞTIRILMASI	54
5. SONUÇ.....	55
6. KAYNAKLAR.....	58
ÖZGEÇMİŞ.....	65



ŞEKİL LİSTESİ

Şekil 2-1:LED'lerin Tarihsel Gelişimi [28].....	11
Şekil 2-2: Farklı LED Kullanım Alanları	12
Şekil 2-3: Düşük Güçlü LED'ler [33].	14
Şekil 2-4: Orta Güçlü Otomobil Sinyal Ledi	15
Şekil 2-5: Yüksek Güçlü LED	16
Şekil 2-6: Güç Led'inin Akım-Gerilim Grafiği [38].....	19
Şekil 2-7 : Led'in Işık Akısı - İleri Akım Grafiği [38].....	20
Şekil 2-8: Led'in Işık Çıkışı- Bağlantı Sıcaklığı Grafiği [38]	21
Şekil 2-9: Direnç ile Sürme Tekniği.....	23
Şekil 2-10: a) LM317, b) LM3404 Doğrusal Düzenleyici ile Sürme Tekniği	25
Şekil 2-11: Düşürücü Dönüştürücü ile LED Sürme Devresi.....	26
Şekil 2-12: Sert Anahtarlama Dalga Şekli [70].....	27
Şekil 2-13:Yumuşak Anahtarlama E Sınıfı Rezonans Dönüştürücü Temelli LED Sürücü Devresi	28
Şekil 2-14: Sıfır Akım Anahtarlama.....	29
Şekil 2-15: Sıfır Gerilim Anahtarlama.....	30
Şekil 3-1: E Sınıfı Rezonans Dönüştürücü Temelli LED Sürücü Devresi.....	31
Şekil 3-2: E Sınıfı Rezonans Dönüştürücü Temelli LED Sürücünün Eşdeğer Devresi.....	32
Şekil 3-3: Kararlı Durum Dalga Şekilleri a) Frekans Kontrollü Dönüştürücü b) AC Eşdeğer Devre	34
Şekil 3-4: LED Eşdeğer Devresi.....	36
Şekil 3-5: E-Sınıfı Rezonans Dönüştürücü Temelli LED Sürücünün PSIM Devre Şeması.....	38
Şekil 3-6:a) $Q=3$ için Dalga Şekilleri, b) $Q=3$ için Büyütülmüş Dalga Şekilleri .	39
Şekil 3-7: a) $Q=5$ için Dalga Şekilleri, b) $Q=5$ için Büyütülmüş Dalga Şekilleri	40
Şekil 3-8: a) $Q=7$ için Dalga Şekilleri, b) $Q=7$ için Büyütülmüş Dalga Şekilleri	41
Şekil 3-9: a) $Q=9$ için Dalga Şekilleri, b) $Q=9$ için Büyütülmüş Dalga Şekilleri	42
Şekil 4-1: LED Sürücü Deney Düzenegi, a) Deney Düzenegi, b) Dönüştürücü Devresi.....	44
Şekil 4-2: a) L_i Fiziksel Görünümü, b) Lutron-9184 LCR Metre.....	45

Şekil 4-3: C_s Fiziksel Görünümü	46
Şekil 4-4: L_r ve farklı değerlerde C_r 'lerin Fiziksel Görünümü.....	46
Şekil 4-5: a) $Q \cong 3$ ve $V_i = 22$ V için LED sürücünün çalışma dalga şekilleri, a) v_{M1} , i , V_o ve I_o 'nun Dalga Şekilleri b) v_{gs} , v_{M1} , i ve v_D 'nin Açılmış Dalga Şekilleri	49
Şekil 4-6: $Q \cong 3$ ve $V_i = 22$ V için v_{gs} , v_{M1} , i ve v_D 'nin Açılmış Dalga Şekilleri	49
Şekil 4-7: $Q \cong 5$ ve $V_i = 22$ V için v_{gs} , v_{M1} , v_D ve i 'nin Açılmış Dalga Şekilleri.....	50
Şekil 4-8: $Q \cong 5$ ve $V_i = 24,02$ V için LED Sürücünün Çalışma Dalga Şekilleri a) v_{M1} , i , V_o ve I_o 'nun Dalga Şekilleri b) v_{gs} , v_{M1} , i Açılmış Dalga Şekilleri.....	51
Şekil 4-9: $Q \cong 7$ ve $V_i = 25,51$ V için LED sürücünün çalışma dalga şekilleri a) v_{M1} , i , V_o ve I_o 'nun Dalga Şekilleri b) v_{gs} , v_{M1} , i ve v_D 'nin Açılmış Dalga Şekilleri	52
Şekil 4-10: $Q \cong 9$ ve $V_i = 26,16$ V için LED Sürücünün Çalışma Dalga Şekilleri a) v_{M1} , i , V_o ve I_o 'nun Dalga Şekilleri b) v_{gs} , v_{M1} , i ve v_D 'nin Açılmış Dalga Şekilleri	53
Şekil 4-11: $Q \cong 9$ ve $V_i = 26,16$ V için Şekil 4-8'in Açılmış Hali	53

TABLO LİSTESİ

<u>Tablo</u>	<u>Sayfa</u>
Tablo 2.1: LED, Ampul ve Kompakt Floresan Lamba Karşılaştırılması [31] ...	13
Tablo 3.1: Farklı kalite faktörleri için dönüştürücünün çalışma parametreleri	37
Tablo 3.2: Farklı kalite faktörleri için simülasyon sonuçları.....	43
Tablo 4.1: L_i, C_s, L_r ve C_r'nin Teorik ve Pratik Değerleri	47
Tablo 4.2: L_r ve C_r'nin Pratik Değerleri için Kalite Faktörü	47
Tablo 4.3: Devrede kullanılan Yarı İletken Elemanlar	47
Tablo 4.4 Farklı Kalite Faktörleri İçin Deneysel Çalışma Sonuçları.....	54

SİMGE VE KISALTMA LİSTESİ

Simgeler	Açıklama
AA	: Alternatif akım
A_L	: Endüktans faktörü
C_o	: Filtre kondansatörü
C_r	: Rezonans kapasitansı
C_s	: Paralel kapasitans
DA	: Doğru akım
D_1	: Anahtar gövde diyotu
D_2, D_3	: Doğrultucu diyotlar
DCM	: Kesintili iletim modu
EMI	: Elektromanyetik girişim
f_s	: Anahtarlama frekansı
f_{r1}, f_{r2}	: Rezonans frekansları
IGBT	: Kapı izoleli bipolar transistör
I_f	: LED ileri akımı
i_{s1}	: Anahtar akımı
i_{cs}	: Kondansatör akımı
i	: Rezonans akımı
LED	: Işık yayan diyot
L_i	: Giriş endüktansı
L_r	: Rezonans endüktans
L_f	: Filtre endüktansı
MOSFET	: Metal oksit yarıiletkenli alan etkili transistör
N	: Tur sayısı
n	: Seri bağlanan LED sayısı
M_1	: MOSFET anahtarı
P_{ON}	: İletime geçiş anında oluşan güç kaybı
P_{OFF}	: Kesime geçiş anında oluşan güç kaybı

P_i	: Giriş gücü
P_o	: Çıkış gücü
PFC	: Güç faktörü düzeltme
PSIM	: Güç simülasyonu programı
PID	: Oransal integral türevsel
PWM	: Darbe genişlik modülasyonu
R_e	: Eş değer AC direnç
R_L	: Yük direnci
R_s	: LED sürme direnci
SMPS	: Anahtarlama mod güç kaynağı
THD	: Toplam harmonik bozulma
T	: Periyot
t	: Zaman
T_j	: P-N birleşim sıcaklığı
t_{OFF}	: Anahtar kesim süresi
t_{ON}	: Anahtar iletim süresi
V_{CC}	: Besleme gerilimi
V_D	: D_2 diyot gerilimi
V_{ds}	: MOSFET drain-source gerilimi
V_f	: LED ileri gerilimi
V_i	: Giriş gerilimi
V_o	: Çıkış gerilimi
V_{gs}	: MOSFET gate-source gerilimi
V_{M1}	: Anahtar gerilimi
ZCS	: Sıfır akım anahtarlama
ZCT	: Sıfır akımda geçiş
ZVS	: Sıfır gerilim anahtarlama
ZVT	: Sıfır gerilimde geçiş
Q	: Kalite faktörü
α	: Rezonans akımının faz açısı

ω

: Açısal hız



1. GİRİŞ

Elektrik enerjisine olan talebin artması, insanları farklı enerji kaynakları arayışına ve mevcut enerjiyi daha verimli kullanmaya yönlendirmektedir. Günlük hayatta farklı amaçlar için kullanılan aydınlatma, elektrik enerjisinin tüketiminde önemli bir yer tutmaktadır. Dünya da aydınlatma amacıyla kullanılan elektrik enerjisi, toplam kullanılan elektrik enerjisinin %20'sini oluşturmaktadır [1]. Aydınlatma amacıyla genellikle akkor telli, kompakt flüoresan, halojen, yüksek basınçlı cıva buharlı, sodyum buharlı ve LED (Light Emiting Diode) lambalar kullanılmaktadır. Akkor telli lamba, düşük fiyatlı ve küçük hacimli olmasından dolayı avantajlıdır. Fakat aynı zamanda enerji verimliliğinin düşük, çalışma süresinin kısa olması gibi dezavantajlara sahiptir. Kompakt flüoresan lamba, akkor lambalara göre daha uzun ömürlü ve daha az enerji harcar, ancak ilk maliyeti yüksektir. Halojen lamba küçük boyutlu ve kolay montaj edilebilir. Yüksek maliyet ve gaz içermesi gibi dezavantajlara sahiptir. Yüksek basınçlı cıva buharlı lamba, geniş aydınlatma alanlarında uzun ömürleri ve dayanıklılıkları ile tercih edilir. Uzun ilk yanma süreleri ve yüksek maliyetleri gibi dezavantajlara sahiptir. Sodyum buharlı lamba, sodyumun buharlaşması ile çalışır. Uzun ömürlü, yüksek verimli ve ucuzdur. Ancak bu lambalar zararlı gaz içerdikleri gibi ilk kurulum maliyetleri de yüksektir [2].

Yukarıda belirtilen aydınlatma cihazlarının dezavantajları insanları bu cihazların avantajlarını koruyup dezavantajlarını azaltacakları veya tamamen ortadan kaldıracakları aydınlatma cihazları geliştirmeye yönlendirmektedir. Bu sebeplerle birlikte insanların günlük elektrik enerjisi tüketimin de aydınlatmanın önemli bir yer tutması, düşük karbondioksit emisyon gereksinimi ve enerji tasarrufu hareketi nedeniyle Işık Yayan Diyot (LED) teknolojisi hızla gelişmiştir [3]. LED kullanımları küçük hacim, darbelere karşı dayanıklılık, yüksek güvenilirlik, kullanım süresinin uzunluğu, düşük güç tüketimi, cıva içermemesi, yüksek verim ve geniş renk sıcaklığı gibi özellikleri ile enerji tasarrufu ve çevre koruma açısından tercih edilen ışık kaynağı haline gelmiştir. LED'ler bu avantajlarından dolayı sağlık, haberleşme, eğlence, sokak aydınlatması, otomotiv, dekoratif uygulamalar, sıvı kristal ekran panelleri, ev aydınlatmaları, trafik sinyalleri ve ev aletleri gibi birçok alanda, floresan ve diğer aydınlatma lambalarına karşı tercih edilmeye başlanmıştır [4]. Aynı

zamanda LED'ler, sıfır boyutlu aydınlatmadan (nokta ölçekli aydınlatma), tek boyutlu (çizgi ölçekli aydınlatma), iki boyutlu (alan ölçekli aydınlatma gibi yerel karartma) ve üç boyutlu aydınlatmaya (renk kombinasyonları kullanarak renk karartma) kadar farklı tasarımlarda kullanım potansiyeline sahiptir [5].

LED'lerin bahsedilen bu avantajlarına karşılık bazı yapısal ve işlevsel dezavantajları da mevcuttur. Özellikle, LED'lere uygulanan elektriksel gücün yaklaşık %40'ı ışık enerjisine dönüştürülürken, geri kalan büyük bir kısmı ısı enerjisine dönüşmektedir [1]. LED'lerin yüksek verimlilikle ve güvenli bir şekilde çalışabilmesi için, genellikle üretici tarafından belirlenen nominal çalışma akımlarının dışına çıkılmaması gerekmektedir. Bu durum, LED performansı üzerinde doğrudan etkili olan termal yönetim konusunu ön plana çıkarmaktadır. LED'lerin çalışabileceği maksimum sıcaklık sınırı, p-n birleşim sıcaklığı (T_j) ile belirlenir. Birleşim sıcaklığı; ortam sıcaklığı, LED üzerinden geçen akım ve termal direnç gibi çeşitli parametrelerden etkilenmektedir. T_j değerinin artması, LED'in ışık verimini, maksimum ışık çıkışını, dalga boyunu ve spektral özelliklerini olumsuz yönde etkilemektedir. Aynı zamanda cihazın hizmet süresini kısaltmaktadır. Buna ek olarak, LED'in ileri gerilimi (V_f) de birleşim sıcaklığına bağlı olarak değişkenlik göstermektedir. Dolayısıyla, LED uygulamalarında hem birleşim sıcaklığının etkin bir biçimde yönetilmesi hem de sıcaklığı doğrudan etkileyen akımın kontrolünün sağlanması kritik öneme sahiptir [6]. Tüm bu teknik gereklilikler, LED tabanlı aydınlatma sistemlerinde kullanılan sürücü devrelerinin tasarımını ve kontrolünü önemli bir araştırma konusu haline getirmiştir [7].

Bir sürücü topolojisinin seçimi yapılırken birçok teknik, ekonomik, çevresel ve düzenleyici kısıtlamaya dikkat edilerek seçilmelidir. Bunlar; güç bileşenleri, kontrolörlerin kullanılabilirliği, güvenilirlik, bileşen sayısı, üretilebilirlik, montaj kolaylığı ve toplam maliyet gibi etkenlerdir [8]. LED'ler doğrudan akım sınırlayıcı bir direnç veya düzenleyici tümleşik devreler kullanılarak sürülebilir. Ancak bu ihtiyaçları karşılamak ve enerji verimini korumak amacıyla enerji kaynağı ile LED arasında kontrollü akım kaynağı işlevi gören DC-DC dönüştürücülerin kullanılması tercih edilmektedir. LED sürücü işlevi gören DC-DC dönüştürücüler, anahtarlama tekniklerine göre iki ana grupta incelenebilir. Bunlar, sert anahtarlama tekniği ile darbe genişlik modülasyonlu (PWM) dönüştürücüler ve yumuşak anahtarlama tekniği ile rezonans anahtarlama dönüştürücülerdir [9]. Sert anahtarlama DC-DC

dönüştürücüler arasından düşürücü, yükseltici ve düşürücü-yükseltici gibi birçok sert anahtarlama DC-DC dönüştürücü LED sürücü olarak kullanılmaktadır [10]. PWM tabanlı dönüştürücülerde anahtarlama elemanları iletimden kesime veya kesimden iletime geçiş yaparlarken gerilim ve akım değerleri bir süre üst üste binmektedir. Bu durum, anahtarlama anında enerji kayıpları meydana getirmektedir [11]. Bu kayıplar artan anahtarlama frekansı ile doğru orantılı bir şekilde artmaktadır [12]. Bu nedenle yüksek güç yoğunluğu gerektiren devrelerde anahtarlama frekansının artırılmasına karşılık PWM dönüştürücülerin verimi düşmektedir. PWM tabanlı dönüştürücülerin bu dezavantajını ortadan kaldırmak veya azaltmak amacıyla yumuşak anahtarlama tekniklerinin kullanımına olanak sağlayan rezonans anahtarlama dönüştürücüler geliştirilmiştir.

Rezonans anahtarlama dönüştürücülerde yumuşak anahtarlama birçok farklı şekilde gerçekleştirilmektedir. Yumuşak anahtarlama ile yarı iletken anahtarın iletime, kesime veya her iki durum arasında geçiş yaparken rezonans devre elemanları L ve C arasında rezonans meydana gelerek akım, gerilim veya her iki dalga şeklinin sinüzoidal olması sağlanır. Sinüzoidal şekil alan yarı iletken anahtarın akımının, geriliminin veya her ikisinin sıfır olduğu anda anahtarlama işlemi gerçekleştirilir. Böylece anahtarlama anında meydana gelen kayıpların önüne geçilmiş olur. Temel yumuşak anahtarlama teknikleri genel olarak sıfır akım anahtarlama (ZCS) ve sıfır gerilim anahtarlama (ZVS)'dir. İletimden yalıttan geçiş anında anahtar üzerinden geçen akım sıfıra indirilerek ZCS, yalıttan iletime geçiş anında anahtar üzerindeki gerilim sıfıra indirilerek ZVS oluşturulur. LED sürücü uygulamalarında rezonans anahtarlama DC-DC dönüştürücülerin birçok farklı çeşidi kullanılmaktadır. Bunlar arasında E sınıfı rezonans dönüştürücü yüksek frekanslarda sıfır gerilim şartlarında yüksek verimle çalışabilmektedir. Dahası E sınıfı rezonans dönüştürücünün güç anahtarının toprak bağlantılı olması sürücü ve kontrol devresinin basit ve kolay uygulanabilir olmasını sağlamaktadır [9]. Bu avantajlarından dolayı E sınıfı rezonans dönüştürücü düşük giriş gerilimine ve düşük çıkış gücüne sahip birçok uygulamada tercih edilmektedir. Literatürde kullanılan yumuşak anahtarlama DC-DC dönüştürücüler incelendiğinde özellikle verimi arttırmaya yönelik çözümler uygulandığı ve farklı kullanım alanlarına göre farklı tasarımlar yapıldığı görülmüştür.

S. Doğangüneş [13] çalışmasında sayısal kontrollü bir LLC yarım köprü rezonans dönüştürücünün tasarımını ve uygulanmasını konu almaktadır. Çalışmada öncelikle rezonans dönüştürücülerin temel prensipleri incelenmiş, LLC topolojisinin yapısı, avantajları ve çalışma aralıkları detaylı şekilde açıklanmıştır. Rezonans devre bileşenleri (L_r , C_r) için tasarım prosedürü sunulmuş ve belirli bir tasarım örneği üzerinden hesaplamalar yapılmıştır. Tasarım, 420V DC giriş ve 24V DC çıkışa sahip, 120W gücünde bir dönüştürücü için gerçekleştirilmiş; LTSpice ortamında simülasyonları yapılmış ve sonuçlar değerlendirilmiştir. Ardından, sayısal kontrol için PID kontrolcü yapısı MATLAB Simulink ortamında modellenmiş, parametre ayarları yapılmış ve mikrodenetleyici olarak STM32F429 kullanılmıştır. Son olarak, geliştirilen prototipin deneysel sonuçları paylaşılmış ve elde edilen dalga şekilleri analiz edilmiştir. Bu bağlamda çalışma, LLC rezonans dönüştürücülerin hem donanımsal hem de yazılımsal yönlerini bir bütün olarak ele almakta ve sayısal kontrolün etkinliğini deneysel verilerle ortaya koymaktadır.

A. R. Derin [14] yapmış olduğu çalışmasında yarım dalga L-tipi ZCS kısmi rezonans düşüren tip DC-DC dönüştürücü tabanlı bir LED sürücünün tasarımını ve uygulamasını gerçekleştirmiştir. Sürücü, 142–200 kHz aralığında ZCS şartlarında çalışacak şekilde tasarlanmış ve sıcaklığa bağlı değişken LED akımını dengelemek amacıyla mikrodenetleyici tabanlı frekans modülasyonu kullanan bir kontrol algoritması geliştirilmiştir. Tasarım sürecinde, sistemin matematiksel modeli Laplace dönüşümü yardımıyla analiz edilmiş, simülasyonlar PSIM yazılımı ile gerçekleştirilmiştir. Sürücü gerçekleştirilerek kontrolü PIC18F4550 mikrodenetleyicisi aracılığıyla sağlanmıştır. Uygulamada beş paralel koldan oluşan LED dizini sürülmüştür. Ayrıca yumuşak ve sert anahtarlama sistemlerin deneysel sonuçları karşılaştırmalı olarak sunulmuş, anahtarlama kayıplarındaki azalma ve EMI iyileştirmesi gibi teknik kazanımlar değerlendirilmiştir.

Y. Li ve arkadaşları [15] çalışmalarında, yüksek frekanslı uygulamalarda tercih edilen E sınıfı rezonans DC-DC dönüştürücünün sabit anahtarlama frekansı ile ON-OFF kontrol altında geniş giriş gerilim aralığında verimliliğini artırmaya odaklanmaktadır. Geleneksel ON-OFF kontrolünde giriş gerilimi yükseldikçe ON-OFF kontrolün OFF süresi artmakta ve bu da verimliliği düşürmektedir. Bu sorunu çözmek için anahtarlama kapasitör eklenerek rezonans kolu empedansı artırılmış, böylece yüksek giriş gerilimlerinde giriş gücü azaltılmış ve verimlilik

yükseltilmiştir. 9–18 V giriş gerilimi aralığına ve 20 MHz anahtarlama frekansına sahip 10 W'lık bir dönüştürücünün simülasyonu gerçekleştirilerek test edilmiştir. Önerilen yöntem ile rezonans frekansının değiştirilerek geçiş kayıplarının azaltıldığı ve böylece toplam verimin iyileştirildiği gösterilmiştir.

M. Tuncer [16] çalışmasında, düşük güçlü aydınlatma uygulamaları için uygun maliyetli bir LED sürücü devresi tasarlanmış ve simülasyon tabanlı olarak geliştirilmiştir. Histerezis akım kontrol durumunda çalışan, tek aşamalı güç faktörü düzeltmeli yükseltici bir DA-DA dönüştürücü yapısında tasarım yapılmıştır. Sürücü devresi 72 V ve 350 mA çıkış değerlerini sağlamaktadır. Tasarım sürecinde, devrede tek bir yarı iletken anahtar ve bastırma hücresi kullanılarak hem çıkış gerilim regülasyonu hem de akım sınırlaması gerçekleştirilmiştir. Devrenin teorik analizi gerçekleştirilmiş ve simülasyonu PSIM yazılımı kullanılarak yapılmıştır. Toplam harmonik bozulma (THD) değeri %5'in altında tutulmuştur. Elde edilen sonuçlar doğrultusunda devrenin performansı iyileştirilmiş ve pratik uygulamalar için kullanılabilirliğinin artırıldığı belirtilmiştir.

İ. Çorak [17], tez çalışmasında endoskopik sistemlerde kullanılmak üzere rezonanslı SEPIC dönüştürücü tabanlı, yüksek verimli ve düşük hacimli bir LED sürücü devresi tasarlanmış ve gerçekleştirilmiştir. Tasarlanan sürücü, 8 MHz gibi yüksek bir frekansta çalışacak şekilde optimize edilmiştir. Bu sayede sistemin güç yoğunluğu artırılmış ve hacmi minimize edilmiştir. Simülasyonlar PSIM yazılımı ile gerçekleştirilmiştir. Yük olarak güç LED'inin kullanıldığı prototip devre gerçekleştirilerek test edilmiştir. Elde edilen sonuçlarda maksimum verimlilik yaklaşık %84,5 olarak ölçülmüş; çıkış gerilimi 2,82 V ve çıkış akımı ise yaklaşık 1 A olarak doğrulanmıştır. Bu bulgular, tasarlanan LED sürücünün yüksek performanslı bir çözüm sunduğunu ortaya koymaktadır.

H. Akça [1] çalışmasında, LED sürücü sistemlerinin ömür performanslarını farklı sıcaklık, nem, giriş gerilimi ve yük koşullarında incelemiştir. Çalışmada, piyasada yaygın olarak kullanılan sabit akım ve sabit gerilim çıkışlı LED sürücüler seçilmiştir. Kapalı kabin ortamlarında, hızlandırılmış ömür testi senaryoları gerçekleştirilmiştir. Test süreçlerinde sürücülere termal stres, aşırı gerilim ve değişken yük profilleri uygulanmıştır. Sıcaklık odası, veri toplama modülleri ve termal kamera gibi donanımlar yardımıyla sürücü bileşenlerinin termal tepkileri ve zamana bağlı performans değişimleri izlenmiştir. Ayrıca, sürücülerde kullanılan güç

transistörleri, kondansatörler ve doğrultucu diyotlar gibi temel bileşenlerin yaşlanma davranışı analiz edilerek kritik hata durumları belirlenmiştir. Elde edilen veriler regresyon ve istatistiksel yaşam analizleriyle değerlendirilmiştir. Farklı sürücü mimarilerinin, çevresel ve elektriksel strese karşı gösterdiği dayanıklılık kıyaslanarak sunulmuştur. Bu kapsamlı değerlendirme sonucunda, belirli sürücü tiplerinin yüksek sıcaklık altında daha hızlı performans kaybına uğradığı, bazı mimarilerin ise yük değişimlerine karşı daha kararlı çalıştığı tespit edilmiştir.

S. Y. S. Al-Hajm [18] tez çalışmasında, dağıtık enerji kaynaklarına uygun bir DA-DA dönüştürücü topolojisi geliştirilmiş ve yumuşak anahtarlama prensibiyle çalışan yüksek gerilim kazançlı bir sistem tasarlanmıştır. Sistem, ZVS ve ZCS koşullarında çalışacak şekilde yapılandırılmıştır. Tüm MOSFET'ler ve diyotlar bu çalışma şartlarını karşılayacak biçimde seçilmiştir. Devrenin, PSIM yazılımı kullanılarak simülasyonu gerçekleştirilmiştir. TMS320F28335 mikrodenetleyicisi ile kontrol edilen sistemin prototipi laboratuvar ortamında kurulmuştur. Gerçekleştirilen deneysel ölçümlerde, %50 yük ve tam yük koşullarında sistemin giriş-çıkış dalga şekilleri, anahtar iletim şekilleri ve termal performansları izlenmiştir. Önerilen dönüştürücünün yüksek verimli, düşük stresli ve entegrasyona uygun bir yapı sunduğu doğrulanmıştır.

S. Akdeniz [19], tez çalışmasında LED sürme devrelerinin; yapısal ve performans açısından detaylı analizini gerçekleştirmiştir. Basit LED sürücülerden başlayarak MOSFET'li sabit akım kaynakları, düşürücü (buck), yükseltici (boost), düşürücü-yükseltici (buck-boost) ve geri dönüşlü (flyback) topolojilere kadar farklı sürücü tipleri, aynı çıkış gücü koşulunda simülasyon ortamında karşılaştırılmıştır. Simülasyon verileri doğrultusunda her devre için giriş akım ve gerilim seviyesi, çıkış akım ve gerilim seviyesi, verimlilik, güç faktörü, izolasyon durumu ve güç faktörü düzeltme (PFC) devrelerinin varlığı gibi parametreler analiz edilmiştir. Bu karşılaştırmalar neticesinde en yüksek verimliliğe sahip olan izolasyonlu flyback temelli PAR230VEM LED sürücü devresi uygulama devresi olarak seçilmiştir. Bu devre üzerinde, yarı iletken elemanlar üzerindeki akım ve gerilim streslerini azaltmak amacıyla bastırma (snubber) devreleri tasarlanıp uygulanmıştır. Uygulama öncesi ve sonrası ölçümler alınarak sistem performansında elde edilen iyileşmeler karşılaştırmalı olarak değerlendirilmiştir. Sonuçlar hem verimlilik artışı hem de gerilim-akım streslerinin azaltılması açısından yorumlanmıştır. Bu kapsamda tez,

LED sürücülerinin hem teorik modelleme hem de deneysel uygulama süreçlerine katkı sunmaktadır.

M. Nil [20], doktora çalışmasında evirici sistemlerinde anahtarlama kayıplarını azaltmak amacıyla yeni bir yumuşak anahtarlama devresi tasarlamış, gerçekleştirmiş ve kapsamlı şekilde analiz etmiştir. Tasarlanan devrede, ana anahtarların sıfır gerilimde geçiş (ZVT) ile iletme ve sıfır akımda geçiş (ZCT) ile kesime geçişlerini sağlayan bastırma hücreleri kullanılmıştır. Bu sayede yüksek frekanslı çalışmalarda anahtarlama kayıpları minimize edilmiştir. Devre, ortak hava aralıklı manyetik kuplajlı endüktanslar içeren yeni bir topoloji ile yapılandırılmış ve 51,02 kHz'e kadar sorunsuz çalışabilecek şekilde optimize edilmiştir. Uygulama aşamasında, devre 1200 W çıkış gücüne sahip bir prototip üzerinden test edilmiştir. Deneysel sonuçlar, ana ve yardımcı anahtarlar üzerinde ilave gerilim streslerinin oluşmadığını ve sistemin güvenilirliğinin yüksek olduğunu göstermiştir. İnsulated Gate Bipolar Transistörlü (IGBT) anahtarlar ve özel sürücü entegreleri kullanılarak oluşturulan sistem için güvenilirlik analizi gerçekleştirilmiştir. Ayrıca, devrenin uzun ömürlü ve kararlı bir çalışma performansı sunduğu ortaya konmuştur. Bu bağlamda çalışma, yumuşak anahtarlama evirici teknolojilerine hem teorik hem de uygulamalı düzeyde katkı sağlamaktadır.

Y. Wang ve arkadaşları [21], çalışmalarında yüksek güç faktörüne sahip, tek kademeli ve tek anahtarlı bir LED sürücü devresini analiz etmişler, tasarlamışlar ve gerçekleştirmişlerdir. Önerilen devre, SEPIC tabanlı güç faktörü düzeltme (PFC) devresi ile E sınıfı rezonans DC-DC dönüştürücünün birleştirilmesi ile oluşturulmuştur. SEPIC devresi, kesikli iletim durumunda (DCM) çalıştırılarak neredeyse birim güç faktörü elde edilmesi sağlanmıştır. Dahası E sınıfı rezonans dönüştürücü yumuşak anahtarlama şartlarında çalıştığından anahtarlama kayıpları önemli ölçüde azaltılmıştır. Devre yalnızca bir aktif anahtarla çalışacak şekilde yapılandırılmış olup, bu sayede sistem basitliği ve güvenilirliği artırılmıştır. 100 W çıkış gücüne sahip laboratuvar prototipi üzerinden yapılan deneysel testlerde, 110 V AC giriş altında tam yükte %91,2 verimlilik elde edilmiştir. Bu kapsamda çalışma, LED aydınlatma sistemleri için yüksek güç yoğunluğuna sahip bir sürücü çözümü sunmaktadır.

J. Huang ve arkadaşları [22], yüksek verimlilik ve güç faktörü sağlamak amacıyla, buck–boost tipi güç faktörü düzeltme (PFC) devresi ile E sınıfı rezonans

dönüştürücünün birleştirildiği, tek kademeli ve tek anahtarlı bir LED sürücü devresini analiz etmişler, tasarlamışlar ve gerçekleştirmişlerdir. Buck–boost devresi, kesikli iletim durumunda (DCM) çalışarak giriş akımını şekillendirmiş ve neredeyse birim güç faktörü (0,995) elde edilmesini sağlamıştır. E sınıfı rezonans dönüştürücü, yumuşak anahtarlama özelliği sayesinde anahtarlama kayıplarını azaltarak sistem verimliliğini %90,8 seviyesine çıkarmıştır. Devrede yalnızca bir aktif anahtar kullanılarak hem devre karmaşıklığı hem de maliyet düşürülmüş, aynı zamanda güvenilirlik artırılmıştır. 100 W çıkış gücüne sahip bir prototip üzerinden yapılan deneysel testlerde, teorik analizler doğrulanmıştır. Bu bağlamda çalışma, LED aydınlatma sistemleri için yüksek güç yoğunluğuna sahip bir sürücü çözümü sunmaktadır.

S. Zhang ve arkadaşları [23], çalışmalarında yüksek güç faktörüne sahip, bütünlüştürmüş kademeli bir AC-DC LED sürücü devresi tasarlamış, gerçekleştirmiş ve deneysel olarak doğrulamıştır. Önerilen yapı, PFC işlevi için kesikli iletim durumunda (DCM) çalışan flyback dönüştürücü ile yumuşak anahtarlama sağlayan E sınıfı rezonans DC-DC dönüştürücünün bir araya getirilmesine dayanmaktadır. Her iki dönüştürücü aynı aktif anahtarları paylaşarak sistemin maliyetini ve karmaşıklığını azaltmaktadır. Aynı zamanda yüksek verimlilik ve düşük EMI sağlamaktadır. 100 W çıkış gücüne sahip laboratuvar prototipi üzerinden yapılan deneysel testlerde, sistemin %91 verimlilikle çalıştığı ve 0,995 güç faktörü elde edildiği gösterilmiştir. Ayrıca, E sınıfı rezonans dönüştürücüde ZVS koşulu sağlanarak anahtarlama kayıpları minimize edilmiştir. E sınıfı rezonans dönüştürücüde rezonans akımının olabildiğince sinüzoidal dalga şekline yakın olabilmesi için kalite faktörü 3'ün üzerinde tipik bir değer olan 7 seçilmiştir. Flyback devresinde giriş akımı sinüzoidal hale getirilerek harmonik bozulmalar azaltılmıştır. Bu bağlamda çalışma, LED aydınlatma sistemleri için düşük maliyetli ve yüksek güç yoğunluklu bir sürücü çözümü sunmaktadır.

A. Escultero ve arkadaşları [24], çalışmalarında LCC rezonanslı dönüştürücünün yükten bağımsız sabit akım kaynağı olarak çalışmasını sağlayan doğal rezonans frekansının izlenmesine yönelik bir kontrol yöntemi geliştirmişlerdir. Devrenin tasarımı gerçekleştirilmiş ve simülasyon çalışmaları ile teorik analiz doğrulanmıştır. 64 W gücünde bir LCC dönüştürücü tasarlanarak SIMetrix ortamında simülasyonu yapılmıştır. Giriş voltajı, yük direnci ve sıcaklık değişimlerinin etkileri

analiz edilmiştir. Simülasyon sonuçları, izleme algoritmasının uygulandığı durumda çıkış akımının yük değişimlerinden bağımsız olarak sabit kaldığını ve sıfır gerilimde anahtarlama (ZVS) koşulunun sağlandığını göstermiştir. Kalite faktörünün 5 olduğu durumlarda LLC dönüştürücünün rezonans frekansının, yüksüz doğal rezonans frekansının %99 seviyelerinde olduğu belirtilmiştir. Bu nedenle kalite faktörünün 5'ten büyük seçilmesinin yeterli olacağına değinilmiştir. Bu bağlamda çalışma sabit akım gerektiren LED sürücü sistemlerinde, geri besleme döngüsüne ihtiyaç duymadan kararlı ve verimli bir çalışma sağlayan yenilikçi bir kontrol yaklaşımı sunmaktadır.

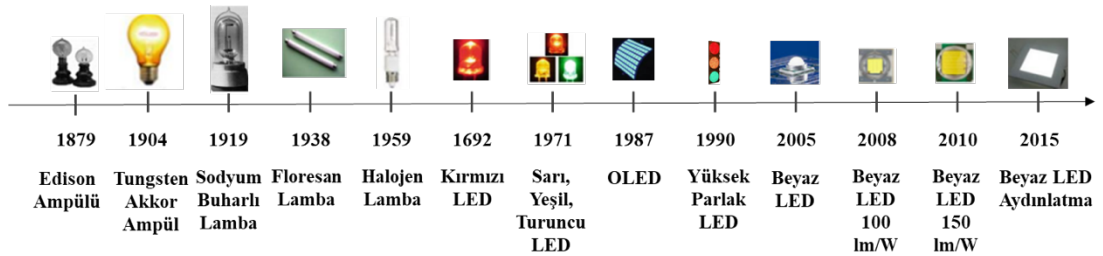
W. Zhu ve arkadaşları [25], çalışmalarında yalnızca bir GaN-FET anahtarı kullanılarak 1 MHz anahtarlama frekansında çalışan, tek kademeli ve tek anahtarlı bir güç faktörü düzeltme (PFC) dönüştürücü tasarlamış, gerçekleştirmiş ve deneysel olarak doğrulamıştır. Önerilen devre, E2 sınıfı topolojisine dayalı olup, E sınıfı rezonans eviricinin ve E sınıfı rezonans doğrultucunun simetrik olarak birleştirilmesiyle oluşturulmuştur. Bu yapı sayesinde ZVS koşulu sağlanarak yüksek frekanslı çalışmalarda anahtarlama kayıpları önemli ölçüde azaltılmıştır. Giriş akımındaki harmonik bozulmaları azaltmak ve çıkış gerilimini düzenlemek amacıyla frekans modülasyonlu bir kontrol yöntemi uygulanmıştır. Çalışmada devrenin sağlıklı bir şekilde çalışması için kalite faktörünün önemine değinilmiş ve bu değerin 5'ten büyük seçilmesinin yeterli olacağı belirtilmiştir. Bu sayede toplam harmonik bozulma (THD) %6,8 seviyesine düşürülmüş ve %99,9 güç faktörü elde edilmiştir. Tasarım sürecinde, ZVS koşulunun tüm şebeke gerilimi periyodu boyunca sağlanabilmesi için sayısal bir tasarım yöntemi geliştirilmiştir. Bu yöntemle belirlenen parametrelerle oluşturulan prototip devre üzerinde yapılan deneysel testler, simülasyon sonuçlarıyla yüksek uyum göstermiştir. Elde edilen %90,5 verimlilik değeri, önerilen yapının yüksek güç yoğunluklu bir PFC çözümü sunduğunu ortaya koymaktadır.

Yumuşak anahtarlama DC-DC dönüştürücüler ile ilgili çalışmalar incelendiğinde yumuşak anahtarlamanın avantajlarından dolayı birçok farklı amaç için kullanıldığı görülmektedir. Çalışmalarda dönüştürücülerde rezonans tank devresinden geçen akımın dalga şeklinin yaklaşık olarak sinüs olabilmesi için kalite faktörü 3'ten büyük seçilmektedir. Bu tez çalışmasında yumuşak anahtarlama E sınıfı rezonans anahtarlama dönüştürücü kullanılarak düşük giriş gerilimine ve

düşük çıkış gücüne sahip yüksek frekanslı LED sürücü uygulaması gerçekleştirilmiştir. Çalışmada öncelikle LED'lerin çalışma karakteristiklerine, türlerine ve farklı sürme tekniklerine değinilmiştir. Giriş enerji kaynağı ile LED arasında bulunan E sınıfı rezonans dönüştürücünün yapısı, teorik analizi, tasarımı, simülasyon ve deneysel çalışması ele alınmıştır. Yük olarak 48 W güce ve 37 V nominal çalışma gerilimine sahip yüksek güçlü LED kullanılmıştır. LED sürücü işlevini yerine getirmesi için kullanılan E sınıfı rezonans dönüştürücünün tasarımı 22 V giriş gerilimi, 250 kHz çalışma frekansı ve güç anahtarının kontrol sinyalinin %50 doluluk oranı için çalışma [26]'ye göre gerçekleştirilmiştir. LED lambanın elektriksel yük karakteristiği dikkate alınarak dönüştürücünün farklı kalite faktörleri için devre bileşenlerinin değerleri belirlenmiştir. Güç anahtarının yumuşak anahtarlama şartlarında iletme geçip geçmediği, güç anahtarı üzerindeki akım ve gerilim streslerinin değişimi ve ayrıca giriş akım, giriş gerilim, çıkış akım, çıkış gerilim ve çıkış güç değişimlerini ortaya koymak amacıyla dönüştürücünün tasarımı gerçekleştirilmiştir. Farklı kalite faktörleri için tüm çalışma parametreleri belirlenen sürücünün PSIM ortamında simülasyon çalışması gerçekleştirilmiştir. Teorik analiz ve simülasyon sonuçlarını pratik uygulama ile doğrulamak ve sonuçları karşılaştırmalı bir şekilde sunmak için sürücünün laboratuvar ortamında prototipi gerçekleştirilmiştir. Farklı kalite faktörleri için sürücü çalıştırılarak simülasyon çalışma sonuçları deneysel çalışma sonuçları ile karşılaştırmalı bir şekilde sunulmuştur.

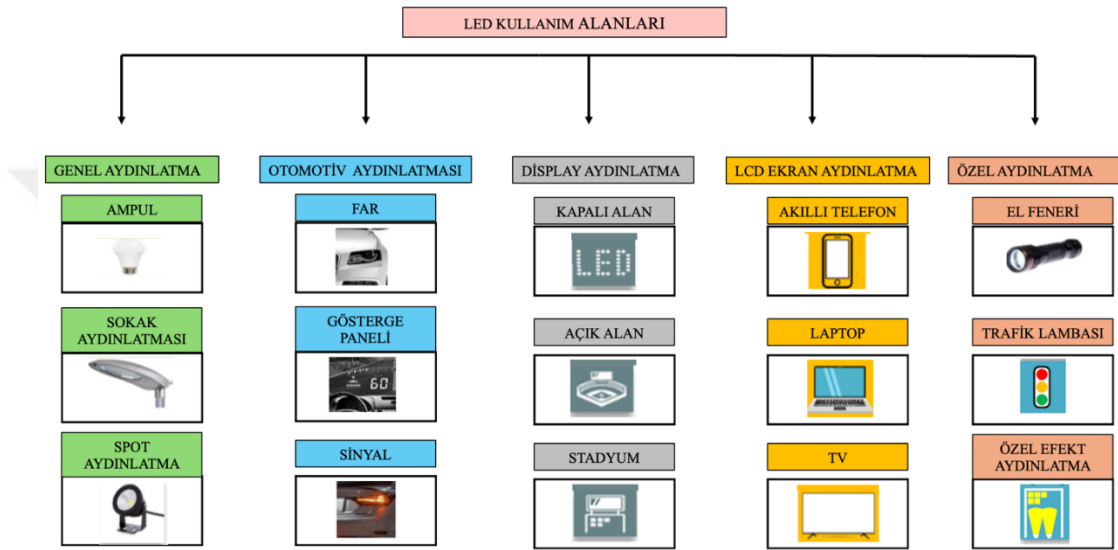
2. LED

LED; temel maddesi silikon olan ve elektrik enerjisinden ışık enerjisi üreten elektronik devre elemanıdır [19]. Bu cihaz yapı bakımından incelendiğinde üst katmanda P tipi yarı iletken malzeme, orta katmana aktif bölge ve alt katmanda ise N tipi yarı iletken malzeme gelecek şekilde üç bölge olarak tasarlanmıştır. Bu maddelerin oluşması için germanyum ve silisyum gibi iletkenliği değiştirilebilen maddelerin farklı maddeler ile katkılanması gerekmektedir. P tipi yarı iletken maddelerin oluşması için yarı iletken malzeme üzerinde oyukların fazla olacağı, N tipi yarı iletken maddelerin oluşması için elektronların fazla olacağı yapılar katkılama işlemleri ile gerçekleştirilir. Aktif bölgelerde ise oyuk fazlalıkları ve elektron fazlalıkları beraber bulunur [17]. LED'ler, temelde bir yarı iletken diyot olarak işlev görürler, ancak geleneksel diyotlardan farklı olarak kendisine uygulanan doğru gerilim ile p-n birleşim bölgesindeki elektronlarla oyukların birleşmesi sonucunda enerji açığa çıkar. Bu enerji, fotonların yayılmasına neden olur ve LED'in ışık emisyonunu gerçekleştirmesini sağlar. Bu özellik, LED'leri diğer yarı iletken bileşenlerden ayıran en önemli özelliktir. Bu özelliği sayesinde LED'ler, aydınlatma ve göstergeleme alanlarında geniş bir kullanım alanına sahiptirler. Özellikle Şekil 2-1'den de görüldüğü üzere aydınlatma sektöründe, son yıllarda büyük bir odak noktası LED teknolojisine yönelmiştir. Aydınlatma firmaları, LED teknolojisinin sunduğu avantajları kullanarak çeşitli ürünleri tasarlamak ve kullanım alanlarını genişletmek için çaba sarf etmektedir [27].



Şekil 2-1:LED'lerin Tarihsel Gelişimi [28].

Bu çabalar, LED aydınlatmanın hem teknolojik hem de estetik açıdan daha ileri seviyelere taşınmasına katkı sağlamaktadır. LED'lerin enerji verimliliği, uzun ömürleri, renk seçenekleri ve çevre dostu özellikleri sebebiyle sokak aydınlatmalarında, otomotiv aydınlatmalarında, dekoratif uygulamalarda ve ev aletleri dahil olmak üzere birçok uygulamada floresan ve diğer deşarj lambaların yerine tercih edilen bir çözüm haline gelmiştir [27]. Şekil 2-2'de LED'lerin farklı kullanım alanları gösterilmiştir.



Şekil 2-2: Farklı LED Kullanım Alanları

LED'ler, diğer aydınlatma cihazlarına kıyasla ışık kaynağı olarak çok sayıda avantaj sunar. Fiziksel olarak sağlam olmaları, küçük boyutlu olmaları, hafif olmaları, uzun kullanım ömürleri, kontrol kolaylıkları, cıva içermemesi, yüksek ışık etkinliği, canlı renk aralığı, düşük güç tüketimi ve yüksek verimlilik bu avantajlara örnek olarak gösterilebilir [28]. LED lambalar; performans, teknoloji, tasarım seçenekleri ve maliyetin en iyi kombinasyonunu sağlar [29]. Yüksek verimliliğe sahip olması bu avantajlar arasında en belirgin olanıdır. Verimlilik, watt başına yayılan lümen olarak tanımlanır ve HID lambalar 90 lm/W, halojen lambalar 20-25 lm/W değerinde olmasına karşılık beyaz LED'ler 150 lm/W değerlerine ulaşabilir [30]. LED'ler, aynı zamanda daha uzun aydınlatma mesafesine, 10-15 kat daha uzun kullanım ömrüne ve daha iyi şekillendirme özelliklerine sahiptir [29]. Farklı aydınlatma cihazlarının farklı yönlerden karşılaştırılması Tablo 2.1'de verilmiştir.

Tablo 2.1: LED, Ampul ve Kompakt Floresan Lamba Karşılaştırılması [31]

Enerji Verimliliği ve Çevre Etkisi	Işık Yayan Diyotlar (LED)	Ampuller	Kompakt Floresan
Ortalama Çalışma Süresi (Saat)	50.000	1.200	10.000
Etkinlik (lm/W)	90-130	12-20	60-100
Enerji Tüketimi (Kwh/Yıl)	329	3285	767
İlk Çalışma Süresi	10-20 ns	0,1-0,3 sn	1-60 sn
Cıva İçeriği	Yok	Yok	Var

LED, aynı zamanda elektrik enerjisini doğrudan ışığa dönüştüren katı hal yarı iletken bir cihazdır [32]. Bu sebeple belirtilen avantajların yanında katı hal aydınlatmasının standardizasyon eksikliği, nispeten yüksek fiyatları, küçük lamba boyutlarından dolayı parlama riski gibi dezavantajları da bulunmaktadır [28]. LED ışıkları sıcaklığa güçlü bir bağımlılık sergiler ve enerjinin çoğu ısıya dönüşür. Bu ısı dağılımı, katı hal lambasının çalışması sırasında kademeli bir sıcaklık artışı üretir. Dolayısıyla aktif bölgenin sıcaklığını ifade eden LED'in bağlantı sıcaklığı LED çalışma performansı için kritik bir parametredir. Yüksek sıcaklıkta çalışma, cihazın ömrünü kısaltır ve verimliliğinin azalmasına sebebiyet verir [30]. Bu sebepten dolayı LED kullanımında ve sürücülerinin tasarımında çalışma gerilimi, çalışma akımı, bağlantı sıcaklığı, ışık akısı ve ışık şiddeti gibi LED'lerin temel tasarım unsurlarına dikkat etmek büyük öneme sahiptir.

2.1 LED TÜRLERİ

LED ışık kaynakları düşük enerji tüketimi, ortam koşullarına karşı dayanıklılığı ve uzun çalışma süresi gibi avantajları sayesinde birçok aydınlatma uygulamasında geleneksel aydınlatma kaynaklarının yerini almıştır [33]. Bununla birlikte, LED'lerin farklı kullanım alanlarına yönelik olarak çeşitli teknik yapılarda

ve güç seviyelerinde üretilmesi, bu ışık kaynaklarının farklı açılardan sınıflandırılmasını gerekli kılmaktadır. Literatürde LED'lerin sınıflandırılmasında güç seviyelerine ve yapılarına (paketleme teknolojilerine) göre olmak üzere iki temel yaklaşım öne çıkmaktadır [34].

2.1.1 Güç Seviyesine Göre LED Türleri

LED'ler ilk dönemlerinde, düşük parlaklıkları sebebiyle genellikle gösterge amaçlı kullanılmıştır. Mavi LED'lerin ortaya çıkışı, özellikle mavi LED paketi ile sarı fosforun uyarılması sonucunda beyaz ışık üretiminin keşfi, LED paketlerinin boyutlarının genişlemesine yol açmıştır. Bu gelişmeler LED teknolojisinin uygulama alanlarını giderek genişletmiştir [35]. LED'ler elektriksel güç seviyelerine dayalı olarak sınıflandırıldığında; düşük güçlü LED, orta güçlü LED ve yüksek güçlü LED olarak üç temel kategoride incelenebilir [36].

2.1.1.1 Düşük Güçlü LED

Güç seviyesi 1 W'ın altında olan LED'ler düşük güçlü LED kategorisine dahil edilir. Bu LED'lerin fiziksel boyutları oldukça küçük olup genellikle birkaç milimetre çapındadır. Yapıları genellikle tek bir yarı iletken malzemeden oluşmaktadır. Şekil 2-3'te farklı düşük güçlü LED'ler gösterilmiştir.



Şekil 2-3: Düşük Güçlü LED'ler [33].

Küçük boyutları ve düşük güç seviyeleri sebebiyle, bu tür LED'ler aydınlatma uygulamaları için uygun değildir. Çalışma akımları genellikle 1 mA ile 20 mA arasında değişkenlik göstermektedir [37].

2.1.1.2 Orta Güçlü LED

Güç seviyesi 1 W ile 3 W arasında olan LED'ler orta güçlü LED kategorisine dahil edilir. Bu tür LED'ler genellikle özel yerlerde, yüksek parlaklık seviyelerinin istenmediği uygulamalarda kullanılır. Örneğin, LED ışık panelleri, acil aydınlatma armatürleri ve otomobil sinyal lambaları bu kategoriye örnek olarak verilebilir [36]. Şekil 2-4'te orta güçlü otomobil sinyal lambası görülmektedir.



Şekil 2-4: Orta Güçlü Otomobil Sinyal LED'i

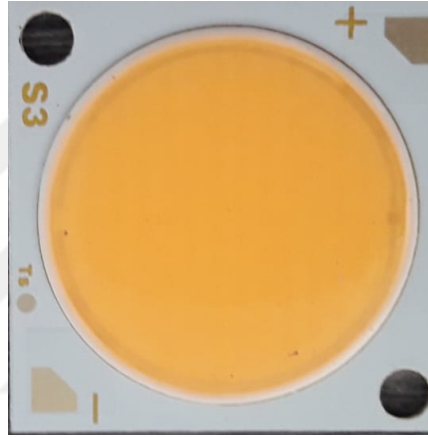
Orta güçlü LED'lerin akımları genellikle 30 mA, 75 mA, 100 mA ve 150 mA seviyelerinde değişkenlik göstermektedir [36].

2.1.1.3 Yüksek Güçlü LED

LED uygulama alanları genişledikçe, artan talepler doğrultusunda yüksek parlaklık, yüksek güç ve homojen aydınlatma ihtiyaçları ortaya çıkmıştır. Bu ihtiyaçlara cevap verebilmek adına güç LED'leri üretimine yönelik çalışmalar hız kazanmıştır. Güç LED'leri aracılığıyla gerçekleştirilen aydınlatma, geleneksel aydınlatma yöntemlerine kıyasla üstün ışık akıları ve enerji verimliliği sunmaktadır.

Bu ilerlemelerle birlikte, güç LED'leri birçok aydınlatma uygulamasında daha etkin ve verimli bir seçenek olarak öne çıkmıştır [28].

Literatürde farklı tanımlar olmakla birlikte, 50 Lümen / Watt değerinden yüksek ışık değerine sahip LED'ler yüksek güçlü LED olarak ifade edilir [8]. Yüksek güçlü LED'lerin yapısında kullanılan yarı iletken malzemenin özelliklerine bağlı olarak, akım değerleri 100 mA ile 1000 mA arasında değişebilir. Bu tür LED'ler genellikle geniş aydınlatma uygulamalarında, özellikle yüksek parlaklık ve enerji ihtiyaçlarını karşılamak üzere kullanılır [37]. Şekil 2-5'te bu tez çalışmasında kullanılan 48 W'lık güç LED'i gösterilmiştir [38].



Şekil 2-5: Yüksek Güçlü LED

Akım kontrolü ve termal yönetim güç LED'lerinin sürülmesinde kritik öneme sahiptir. Bu durum şebekeden beslenen güç LED uygulamalarında çıkış akımını denetleyen sürücü devrelerinin kullanımını zorunlu kılar [39].

2.1.2 Yapılarına Göre LED Türleri

Yüksek güçlü LED uygulamalarında, LED'lerin yapısal özellikleri ve paketlenme teknolojileri LED performansı üzerinde belirleyici öneme sahiptir. Bu bağlamda LED'ler yapılarına göre DIP (Dual In-line Package), SMD (Surface Mounted Device), COB (Chip on board), GOB (Glue on Board), ve CSP (Chip Scale Package) gibi farklı türlerde sınıflandırılmaktadır.

2.1.2.1 DIP (Dual In-Line Package) LED

DIP LED'ler, geleneksel olarak kullanılan ve iki bacaklı bir plastik muhafaza içinde yer alan LED türleridir. Yüksek dayanıklılık ve parlaklıkları ile dış ortam koşullarında tercih edilseler de büyük boyutları ve sınırlı görüş açıları nedeniyle günümüzde daha çok dış mekân ekranlarında veya düşük çözünürlüklü panolarda kullanılmaktadır [40].

2.1.2.2 SMD (Surface-Mount Device) LED

SMD LED'ler, çiplerin doğrudan baskı devre kartına monte edildiği yüzey montaj teknolojisi ile üretilir. Kompakt yapıları sayesinde daha yüksek çözünürlük ve geniş görüş açısı sunan bu LED'ler, iç mekân ekranlarında, televizyon panellerinde ve genel aydınlatma çözümlerinde yaygın biçimde kullanılmaktadır. Ayrıca renk karışımı açısından üstün performans sergilerler [41].

2.1.2.3 COB (Chip-on-Board) LED

COB LED teknolojisinde, çok sayıda LED çipi doğrudan bir tabaka üzerine monte edilerek tek bir ışık kaynağı gibi davranması sağlanır. Bu yapı, yüksek lümen verimliliği ve homojen ışık dağılımı sağlayarak enerji yoğun uygulamalar için ideal bir çözüm sunar. Yüksek güçlü LED, sürücülerle birlikte kullanıldığında yüksek ışık çıkışı elde edilmesine olanak tanır [42]. Bu çalışma kapsamında gerçekleştirilen LED sürücü uygulamasında belirtilen avantajlarından dolayı Seoul Semiconductor firmasının 48 W'lık COB LED'i kullanılmıştır.

2.1.2.4 GOB (Glue-on-Board) LED

GOB LED'ler, SMD LED'lerin üzerine uygulanan şeffaf reçine benzeri bir koruyucu kaplama ile elde edilir. Bu yapı, LED'leri nem, toz ve mekanik darbelere

karşı daha dirençli hale getirir. Özellikle zorlu çevre koşullarında çalışan sistemlerde tercih edilmektedir [43].

2.1.2.5 CSP (Chip Scale Package) LED

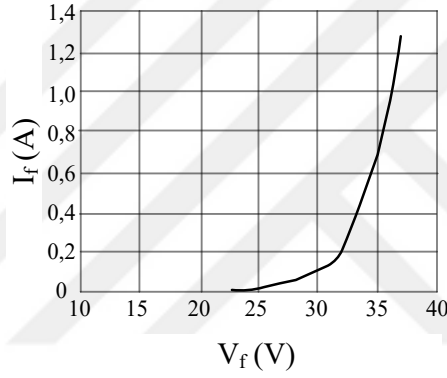
CSP LED'ler, LED çipinin boyutlarına çok yakın bir paketle doğrudan LED montajına olanak tanır. Bu sayede hem daha küçük boyutlarda hem de yüksek ısı yönetimi gerektiren uygulamalarda verimli bir performans sunar. Otomotiv aydınlatması ve taşınabilir cihazlar gibi alanlarda tercih edilen bu yapı, ileri seviye sürücü kontrolü ile küçük boyutlu tasarımlarla uyumludur [44].

2.2 LED'LERİN TEMEL TASARIM UNSURLARI

LED teknolojisinin gelişimiyle birlikte yarı iletken elemanların yalnızca ışık üretimiyle sınırlı olmayan, çok daha karmaşık ve performansa duyarlı bir tasarım yapısına sahip olduğu anlaşılmaktadır [45]. Işık verimliliği, termal kararlılık, sürücü devresi uyumluluğu ve uzun ömür gibi parametreler, LED sistemlerinin güvenilirliği ve etkinliği açısından belirleyici rol oynamaktadır [46]. Bu nedenle bir LED'in etkin bir şekilde çalışabilmesi, yalnızca kullanılan yarı iletken malzemenin özelliklerine değil, aynı zamanda elektriksel, ısı ve optik parametrelerin dengeli bir şekilde tasarlanmasına bağlıdır [47]. Özellikle yüksek güçlü LED uygulamalarında, devre tasarımı, soğutma çözümleri, optik yapılar ve uygun akım sürme tekniklerinin bütüncül olarak ele alınması, sistem performansının optimizasyonu açısından kaçınılmaz hale gelmiştir [48]. Bu bağlamda, LED'lerin temel tasarım unsurlarının ayrıntılı olarak incelenmesi hem ürün geliştirme süreçleri hem de uygulama verimliliği açısından büyük önem taşımaktadır [49]. Bu bölümün devamında tez çalışmasında kullanılan Seoul Semiconductor firmasının 48 W'lık ZC40 güç LED'ine ait temel tasarım unsurları incelenmiştir.

2.2.1 Akım-gerilim karakteristiği

Yüksek parlaklıklarda güç LED'leri akkor lambalara göre daha yüksek etkinlik ve güvenilirlik performansı sağlar. Parlaklık ve renk sıcaklığı güç LED'lerinin ileri akımı ile ilişkili olması nedeniyle sabit ışık çıkışı elde etmek için sabit akımla çalıştırılması gereklidir [50]. ZC40 güç LED'i, yüksek güçlü aydınlatma uygulamaları için tasarlanmış, bir araya getirilmiş çoklu LED yongalarından oluşan bir COB yapıya sahiptir. Bu LED, 37 V ileri gerilimde çalışmakta ve 350 mA ile 1050 mA aralığında sabit akım sürücüler ile beslenmektedir [38]. Şekil-2-6'da kullanılan güç LED'ine ait ileri akım (I_f) - ileri gerilim (V_f) grafiği verilmiştir.



Şekil 2-6: Güç LED'inin Akım-Gerilim Grafiği [38]

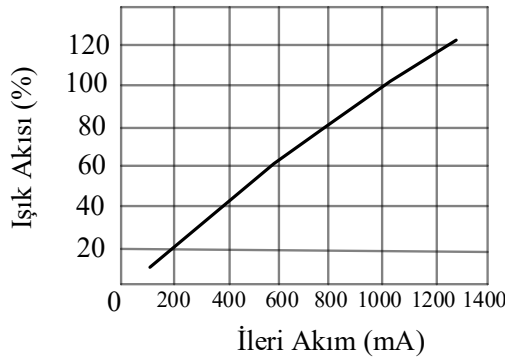
Akım-gerilim karakteristiği diğer LED türlerinde olduğu gibi doğrusal olmayan bir yapı sergilemektedir. Şekil 2-6'dan da görüldüğü üzere LED üzerinden yaklaşık olarak 25 V'a kadar bir akım akışı olmamaktadır. Bununla birlikte LED gerilimi yaklaşık olarak 32 V'un üzerine çıktığında LED gerilimindeki küçük değişimlere karşı LED akımında hızlı yükselişler olmaktadır. Bu noktada LED'e uygulanacak gerilim artışı dikkatle sınırlandırılmalıdır. Gerilim üzerindeki küçük değişiklikler LED akımında büyük salınımlara ve LED'in bozulmasına sebep olabilir [51].

2.2.2 Verim-Zaman Karakteristiği

LED'lerin verimliliği, Lümen başına düşen Watt (lm/W) cinsinden ifade edilmektedir. Güç LED'lerinin lm/W değeri yıllar içerisinde yapılan çalışmalar ile artış göstermiştir. 2006 yılında laboratuvar ortamında 131 lm/W etkinlik değeri ulaşılmış, bu değeri yıllar içerisinde artarak 303 lm/W değeri kadar çıkmıştır [52]. Bu çalışmada kullanılan güç LED'i, 1050 mA sürüş akımı ve 37 V ileri gerilimde çalıştırıldığında 160 lm/W düzeyine varan ışık verimi sağlayabilmektedir [38]. Ancak LED'ler, çalışma süresi boyunca yarı iletken malzeme katmanlarında meydana gelen yıpranma ve ısı bozulma nedeniyle ışık çıktısında azalma gösterirler. Nominal koşullarda 6.000 saate kadar çalışma sonrasında verimin %97 düzeyinde kaldığı, 10.000 saatin sonunda bu oranın genellikle %90–92 seviyelerine düştüğü kabul edilmektedir [49]. LED gücü, nominal çalışma gücünün yarısına düştüğünde, genellikle çalışma ömrünün tamamlandığı kabul edilir [53].

2.2.3 Işık Akısı-Akım Karakteristiği

LED'lerin temel performans göstergelerinden bir diğeri, uygulanan ileri akıma karşılık ürettiğı ışık akısıdır. Bu karakteristik, LED'in enerjiye ne kadar verimli yanıt verdiğini belirlemede kritik bir rol oynamaktadır. Şekil 2-7'de bu çalışmada kullanılan LED'in sürme akımına bağılı olarak ürettiğı ışık çıkışı görülmektedir.

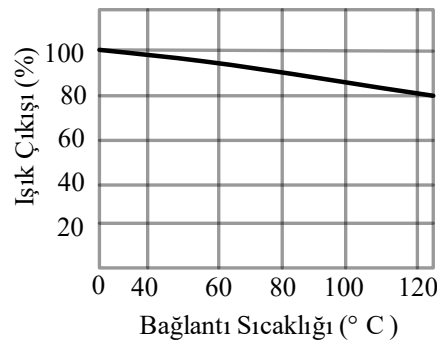


Şekil 2-7 : LED'in Işık Akısı - İleri Akım Grafiği [38]

LED'in yaydığı ışık şiddeti, içinden geçen akım ile doğru orantılı bir şekilde artar. Bu artış belirli bir akım değerine kadar doğrusal bir ilişki gösterir. Kullanılan LED standart çalışma koşullarında 1000 mA sürme akımı altında yaklaşık olarak 5030 lm ışık akısı üretmektedir. Sürme akımı 800 mA seviyelerine düştüğünde ise üretilen ışık akısı 4020 lm seviyelerine düşeceği Şekil 2-7'den hesaplanabilir. Ancak bu ilişki ideal bir lineerlik göstermemekte, sıcaklık etkisiyle yüksek akımlarda lümen veriminde azalma eğilimi oluşmaktadır [54]. Eğer LED'e uygulanan akım, bu doğrusallığın bozulduğu eşik değerini aşarsa, diyot aşırı ısınarak zarar görebilir ve bozulabilir. Bu nedenle, LED sürücü parametreleri belirlenirken kullanılan LED'in akım sınırlarına dikkat edilmesi gerekmektedir [55].

2.2.4 Işık Şiddeti-Sıcaklık Karakteristiği

LED'lerin üzerinden geçen akım sabit olsa da diyotların genel karakteristik özelliklerinden kaynaklanan bir etki olarak, artan ortam sıcaklığı LED'lerin etkinlik faktörlerini azaltır. LED'lerin bağlantı sıcaklıklarının yükselmesi, yayılan ışık akısının azalmasına sebebiyet vermektedir. Bu durum LED'lerin termal yönetiminin son derece önemli olduğunu ve yüksek sıcaklıkların LED performansı üzerinde olumsuz etkiler oluşturabileceğini göstermektedir [33]. Şekil 2-8'de kullanılan güç LED'ine ait ışık çıkışı-bağlantı sıcaklığı grafiği verilmiştir.



Şekil 2-8: LED'in Işık Çıkışı- Bağlantı Sıcaklığı Grafiği [38]

LED'in bağlantı sıcaklığı ile ışık akısı ve ışıksal etkinliği arasında önemli bir ilişki bulunmaktadır. Bu nedenle, Şekil 2-8'de gösterildiği gibi, LED'in bağlantı

sıcaklığındaki artış, LED'den çıkan normalize ışık akısında bir azalmaya neden olmaktadır. Yüksek bağlantı sıcaklığı sadece LED'in ışık çıkışını ve verimliliğini azaltmakla kalmaz, aynı zamanda LED'in tepe dalga boyunu da değiştirir. Verimliliğin azalması ve dalga boyundaki kayma, LED renginin değişmesine neden olmaktadır [56].

LED karakteristik özelliklerinden de görüleceği gibi akım ve gerilim değerlerinde meydana gelen küçük değişimler ışık şiddetinde dalgalanmalara, termal kararsızlığa ve uzun vadede LED yongasında yapısal bozulmalara sebebiyet vermektedir [34]. Bu nedenle LED sistemlerinde akım sınırlaması sağlayan özel sürücü devrelerinin kullanımı gerekmektedir. LED sürücü devreleri, sabit akım kaynağı gibi çalışarak LED'lerin güvenli sınırlar içinde çalışmasını temin eder. Ayrıca EMI, PFC ve kararlı ışık çıkışı gibi performans kriterlerinin sağlanmasında da kritik rol oynar [57].

2.3 LED SÜRME TEKNİKLERİ

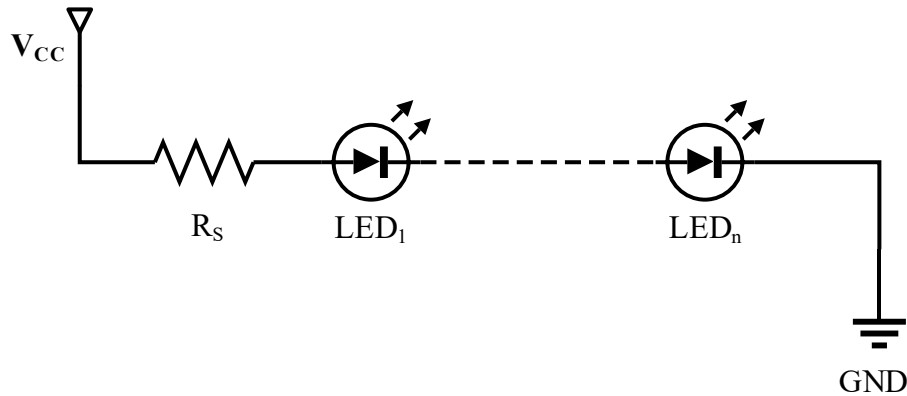
Yüksek güçlü LED'lerin aydınlatma uygulamalarında etkin olarak kullanılabilmesi için güç kaynakları tarafından harici olarak çalıştırılması gerekmektedir. Bu süreçte LED akımı ve ileri kutuplama gerilim düşümü gibi elektriksel parametrelere dikkat edilmesi gerekmektedir. LED akımı, doğrudan ışık çıkış seviyesini etkileyen bir parametre olup, aynı zamanda LED'in ısı performansını da belirler. Akımın artması, LED bileşenlerinde sıcaklık artışına yol açar ve bu durum hem ışık verimliliğinde azalmaya hem de malzeme ömrünün kısılmasına neden olur. Diğer yandan, LED ileri gerilim düşümü çoğunlukla sabit bir değer kabul edilir. Fakat LED'in çalışma sıcaklığı ve içinden geçen akıma bağlı olarak bu değer değişkenlik gösterebilir. Bu durum, ışık çıkışında kararsızlığa yol açabileceğinden, sürücü devrelerinin bu parametreleri dengeleyecek şekilde tasarlanması büyük önem arz eder [58].

LED sürücü devreleri, LED'lerin sabit akım altında çalışmasını sağlayarak güvenli çalışma koşulları sunar ve sistemin genel enerji verimliliğini artırır. Bu bağlamda, LED'leri sürmek için geliştirilen teknikler pasif ve aktif sürme teknikleri olarak temelde iki gruba ayrılır [28]. Pasif yöntemler, basit yapılı ve düşük maliyetli olmalarına rağmen, hassas akım kontrolü açısından sınırlı performans sunar.

Genellikle sabit bir direnç üzerinden LED'e akım verilerek çalışan bu sistemler, değişen ortam koşullarında sabit ışık çıkışı sağlayamaz. Aktif sürme teknikleri anahtarlama güç kaynakları (SMPS) gibi daha karmaşık devre yapıları içeren, yüksek verimlilik ve hassasiyet sağlayan yöntemlerdir [59]. Literatürde farklı ihtiyaçlara yönelik farklı LED sürme teknikleri bulunmaktadır. Fakat genel olarak güvenlik ve verim açısından daha üstün olan anahtarlama dönüştürücülere sahip LED sürücüler tercih edilmektedir [60].

2.3.1 Direnç ile LED Sürme

LED'lerin temel çalışması, doğru akım kaynağı ile sağlanan sabit bir gerilim altında gerçekleşir. Ancak LED'lerin doğrudan bir DC kaynağa bağlanması durumunda, yarı iletken malzemenin düşük iç direnci nedeniyle aşırı akım geçişi meydana gelir. Bu aşırı akım LED'in bozulmasına yol açabilir. Bu durumun önüne geçmek amacıyla, Şekil 2-9'dan da görüleceği üzere LED devrelerinde akım sınırlayıcı bir direnç kullanılması, en basit ve geleneksel sürme yöntemlerinden biri olarak yaygınlık kazanmıştır [61].



Şekil 2-9: Direnç ile Sürme Tekniği

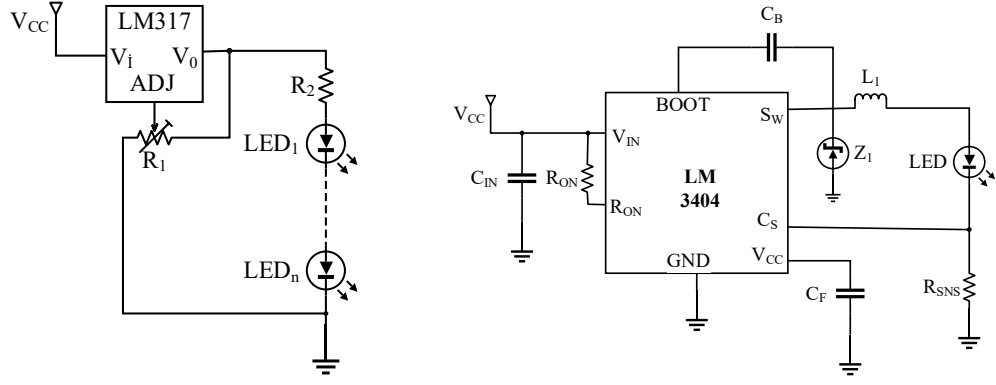
Bu yöntemde LED sürme direnci (R_S), LED grubu ile seri bağlanarak akımın kontrol altına alınmasını sağlar. Direnç değeri, uygulanan besleme gerilimi (V_{CC}), LED'in ileri gerilimi (V_f), LED üzerinden geçecek LED akımı (I_f) ve devreye bağlanan LED sayısı "n" dikkate alınarak eşitlik 2.1 ile hesaplanır.

$$R_s = \frac{V_{cc} - n \cdot V_f}{I_f} \quad 2.1$$

Direnç ile sürme tekniği ile LED'e uygulanan akımın sabit tutulması sağlanır. Ancak, bu yöntemin bazı önemli sınırlamaları da bulunmaktadır. İlk olarak akım kontrolü yalnızca direnç üzerinden pasif bir şekilde sağlandığı için besleme gerilimindeki küçük dalgalanmalar LED akımını etkileyebilir. Ayrıca dirençte harcanan enerji ısıya dönüşerek sürücü verimliliğini düşürür. Bu sebeple direnç ile sürme yöntemi, genellikle düşük güçlü LED uygulamaları için tercih edilmektedir. Ancak yüksek güçlü LED'lerin çalıştırılması için bu yöntem yetersiz kalmakta ve aktif sürücü devrelerinin kullanımı zorunlu hâle gelmektedir [62].

2.3.2 Doğrusal Düzenleyici ile LED Sürme

Doğrusal düzenleyiciler, yarı iletken tabanlı olup belirli bir yük üzerinde meydana gelen gerilim düşümünü referans bir gerilim ile karşılaştırır. Bu sayede çıkış gerilimini istenilen gerilim seviyesinde sabitleyen devre elemanlarıdır [60]. Yapılan çalışmalar incelendiğinde Linear Technology firmasına ait LTC3783, Microchip firmasına ait HV9911, The National Semiconductor firmasına ait LM5020 gibi doğrusal düzenleyiciler bulunmaktadır. Bununla birlikte yaygın olarak bulunabilirliği ve uygun maliyetli olmasından dolayı genellikle LM317 ve LM3404 tümeleşik devreleri tercih edilmektedir [63]. Şekil 2-10a'da LM317 ve Şekil 2-10b'de LM3404 tümeleşik devresi ile gerçekleştirilen doğrusal düzenleyici sürme tekniği gösterilmiştir.



(a)

(b)

Şekil 2-10: a) LM317, b) LM3404 Doğrusal Düzenleyici ile Sürme Tekniği

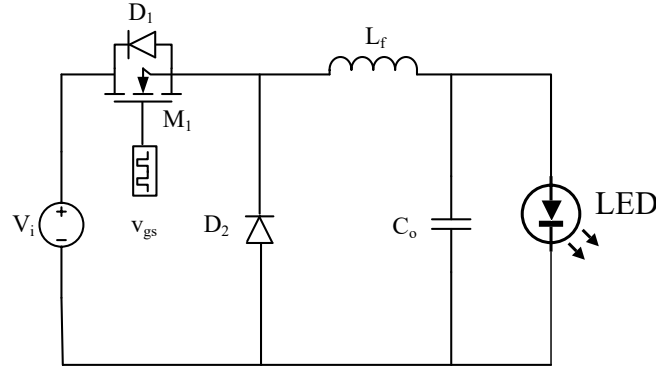
Doğrusal düzenleyici ile LED sürme tekniğinin avantajları, basit ve düşük maliyetli olmasıdır. Özellikle düşük güçlü uygulamalarda, bu tür sürücülerle yüksek verim sağlanabilir. Ancak, giriş-çıkış gerilim farkının büyük olduğu durumlarda güç kaybı ve ısınma önemli bir sorun haline gelmektedir [28]. Bu nedenle, doğrusal düzenleyici tekniği ile LED sürmenin verimli olabilmesi için giriş geriliminin LED ileri voltajına mümkün olduğunca yakın seçilmesi gerekmektedir [64].

2.3.3 DC-DC Dönüştürücüler ile LED Sürme

Elektriksel sinyal genliğinin yüksek frekanslarda kontrol edilebilme tekniğine anahtarlama ile sürme tekniği denmektedir [64]. DC-DC dönüştürücülerde yüksek güç yoğunluğuna yönelik talebi karşılamak için anahtarlama frekansını arttırmak gerekmektedir. Anahtarlama frekansının artırılması, dönüştürücülerde kullanılan bobin, trafo ve kondansatör gibi pasif bileşenlerin boyutlarının azaltılmasına olanak tanıyarak, sistem güç yoğunluğunu artırmada etkili bir yöntem sunar. Ancak anahtarlama frekansının artması anahtarlama kayıplarının büyük ölçüde artmasına sebep olacaktır [65].

DC-DC dönüştürücüler; devrede bulunan bobin, yarı iletken anahtar ve diyotların çeşitli kombinasyonlarda bağlanmasıyla elde edilir. Elde edilen dönüştürücüler arasından düşürücü (buck), yükseltici (boost) ve düşürücü-yükseltici

(buck-boost) dönüştürücüler temel dönüştürücü yapılarıdır [66]. Şekil 2-11’de düşürücü dönüştürücü ile gerçekleştirilen sürme devresi verilmiştir.



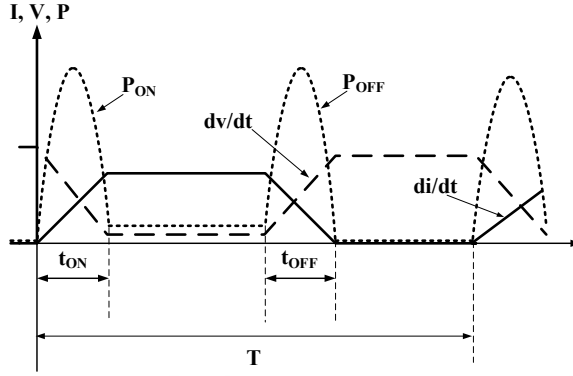
Şekil 2-11: Düşürücü Dönüştürücü ile LED Sürme Devresi

DC-DC dönüştürücüler ile LED sürme tekniği, doğrusal düzenleyiciler ile kıyaslandığında yüksek verimliliğe sahiptir. Bu yüzden özellikle yüksek güç ve yüksek güç yoğunluğu gerektiren devrelerde tercih edilmektedir. Bu sürme tekniğinde dikkat edilmesi gereken unsurlar EMI ve çıkış sinyallerinde meydana gelen gürültülerdir. Meydana gelen bu elektromanyetik girişim ve gürültüleri engellemek amacıyla çıkışa bir filtre eklenerek kullanılması gerekmektedir [67]. Bu dönüştürücülerde kullanılan yarı iletken güç anahtarının/anahtarlarının kesimden ilettime veya iletimden kesim durumuna geçişlerine göre bu dönüştürücüler sert anahtarlmalı ve yumuşak anahtarlmalı dönüştürücüler olarak adlandırılmaktadır.

2.3.3.1 Sert Anahtarlmalı DC-DC LED Sürücüler

Anahtarlama kavramı güç elektroniğinde yarı iletken güç elemanlarının ilettime veya kesime geçirilme sürecini ifade eder [68]. Ek bir düzenek kullanılmadan yarı iletken güç elemanlarının doğrudan anahtarlama işlemine Sert Anahtarlama adı verilir [69]. Sert anahtarlama tekniklerinde, anahtarlama süreci içerisinde akım ve gerilim değerlerinin çakışması sonucu anahtarlama kayıpları meydana gelir. Güç elektroniği dönüştürücülerinde verimliliğin yükseltilmesi, enerji kayıplarının en aza indirilmesi ile doğrudan ilişkilidir. Yüksek anahtarlama frekansına sahip sert anahtarlama sistemlerinde, anahtarlama frekansının artışıyla orantılı olarak

anahtarlama kayıpları artmakta ve bu durum dönüştürücü devrelerinin verimliliğini düşürmektedir [12]. Şekil 2-12’de bir yarı iletken güç anahtarına ait sert anahtarlama dalga şekli verilmiştir.



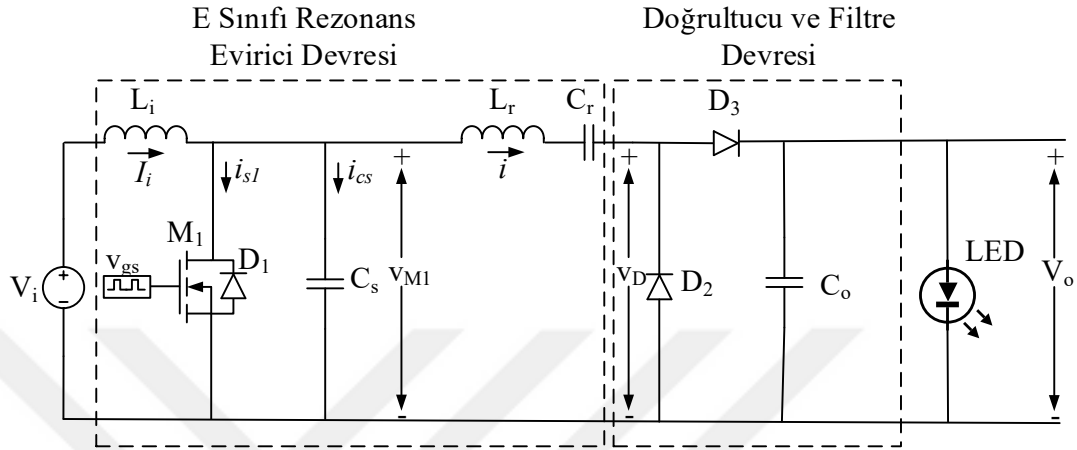
Şekil 2-12: Sert Anahtarlama Dalga Şekli [70].

Şekil 2-12’de t_{ON} anahtarın ilettime girme süresini, t_{OFF} anahtarın kesime girme süresini ve T periyodunu ifade etmektedir. Anahtarın ilettime geçme anında akım ve gerilim değerlerinin çakışması sonucunda P_{ON} anahtarlama kayıpları olduğu görülmektedir. Yine aynı zamanda anahtarın kesime geçme anında akım ve gerilim değerlerinin çakışması sonucu P_{OFF} anahtarlama kayıplarının olduğu görülmektedir. Ayrıca, akım ve gerilimdeki ani değişimler, yüksek seviyede EMI ve radyo frekans girişimi gibi zararlı etkiler meydana getirebilir. Bu etkiler, yarı iletken güç elemanlarının aşırı ısınmasına ve güvenli çalışma sınırlarının aşılmasına yol açabilir. Bu sebeple, sert anahtarlamanın ve anahtarlama frekansının istenmeyen etkilerini minimize etmek veya tamamen ortadan kaldırmak için yumuşak anahtarlama yöntemleri geliştirilmiştir. Yumuşak anahtarlama koşullarının sağlanması için rezonans veya kısmi rezonans devreleri kullanılmaktadır [70].

2.3.3.2 Yumuşak Anahtarlama LED Sürücüler

Anahtarlama süresi içerisinde yarı iletken güç anahtarlarının akım ve gerilim dalgalarının üst üste binmesi sonucunda bu devre elemanlarında oluşan enerji kayıplarını önlemeye yönelik uygulamalara yumuşak anahtarlama denir [71]. Şekil 2-13’te yumuşak anahtarlama E sınıfı rezonans dönüştürücü temelli LED sürücü

devresi verilmiştir. Bu devrede L_i giriş endüktansı, L_r ve C_r sırası ile rezonans bobini ve kondansatörüdür. D_1 anahtar gövde diyotunu gösterirken, C_s bu anahtara paralel bağlanan kondansatörün ve anahtar uçlarındaki kapasitenin toplamıdır. D_2 ve D_3 diyotları yarım dalga doğrultma görevi görmektedir.



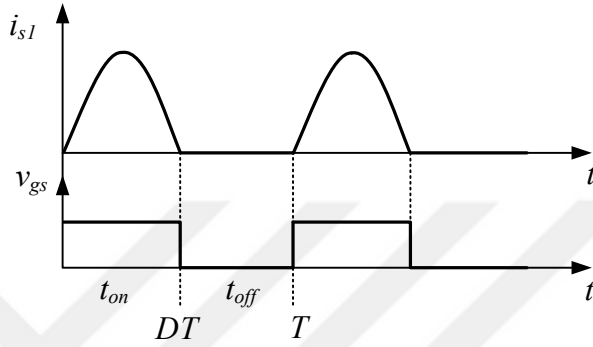
Şekil 2-13: Yumuşak Anahtarlama E Sınıfı Rezonans Dönüştürücü Temelli LED Sürücü Devresi

Güç elektroniği dönüştürücülerinde, özellikle yüksek frekanslı çalışmalarda ortaya çıkan anahtarlama kayıplarını ve elektromanyetik girişimi minimize etmek amacıyla yumuşak anahtarlama teknikleri kullanılmaktadır. Bu teknikler; ZVS, ZCS, sıfır gerilimde geçiş (ZVT) ve sıfır akımda geçiş (ZCT) gibi kategorilere ayrılmaktadır [72]. Bu tekniklerden ZCS ve ZVS temel yumuşak anahtarlama teknikleridir. ZVT ve ZCT, ileri yumuşak anahtarlama yöntemleri olup, anahtarlama kayıplarını tamamen ortadan kaldırma kapasitesine sahiptir [68]. Bu yöntemler, güç anahtarları ve diyotları üzerindeki akım ve gerilim çakışmalarını azaltmakta veya ortadan kaldırmaktadır. Dahası akım ve gerilim streslerini azaltarak, devre verimliliğini artırmakta ve enerji kayıplarını en aza indirmektedir. Böylece, yüksek anahtarlama frekanslarının yol açtığı zorluklar etkili bir biçimde yönetilerek, sistemlerin genel verimliliği iyileştirilmektedir [71].

2.3.3.2.1 Sıfır Akımda Anahtarlama (ZCS)

Sıfır Akımda Anahtarlama (ZCS) tekniği, anahtarın iletme girme sürecinde akımın yükselme hızını sınırlamak amacıyla kullanılan bir yumuşak anahtarlama

teknikidir. Bu teknikte, güç anahtarına seri bir endüktans bağlanarak, akımın yükselme hızı yavaşlatılır [73]. Böylece akım ile gerilimin üst üste binmesi engellenerek anahtarlama kayıpları azaltılır. Şekil 2-14'te verilen i_{s1} güç anahtarı üzerinden geçen akımı, v_{gs} anahtarın kapı devresinin sürülmesinde kullanılan kontrol sinyalini göstermektedir. D anahtarın kontrol sinyalinin doluluk oranını ifade ederken, T anahtarlama periyodunu ifade etmektedir.

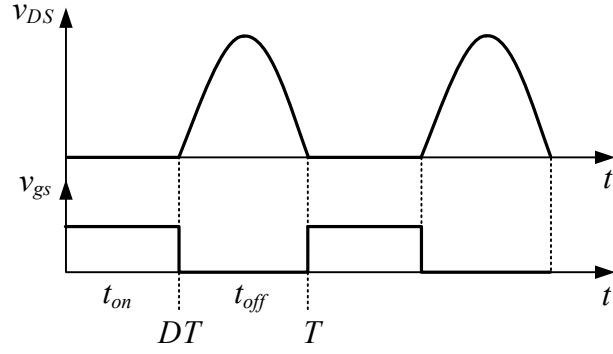


Şekil 2-14: Sıfır Akım Anahtarlama

Anahtarın iletme girme anında ortaya çıkan anahtarlama enerjisi devreye seri olarak bağlanan endüktansa aktarılır. Klasik hücrelerde, endüktansa aktarılan bu enerji bir direnç üzerinde harcanırken, modern hücrelerde ise kısa süreli kısmi rezonans ile gerilim kaynağına veya yüke geri kazandırılır. Ancak, bu seri endüktans elemanı güç anahtarı üzerinde ilave bir gerilim stresi oluşturabilir [69].

2.3.3.2.2 Sıfır Gerilimde Anahtarlama (ZVS)

Sıfır Gerilimde Anahtarlama (ZVS) tekniği, güç anahtarlarının kesime girme sürecinde gerilimin yükselme hızını sınırlamak amacıyla kullanılan bir yumuşak anahtarlama yöntemidir. Bu teknikte, anahtara paralel bir kondansatör bağlanarak, kesime girme esnasında gerilim yavaşlatılır ve anahtarlama kayıpları azaltılır [73]. Şekil 2-15'te verilen v_{DS} güç anahtarı uçlarına düşen gerilimi göstermektedir.

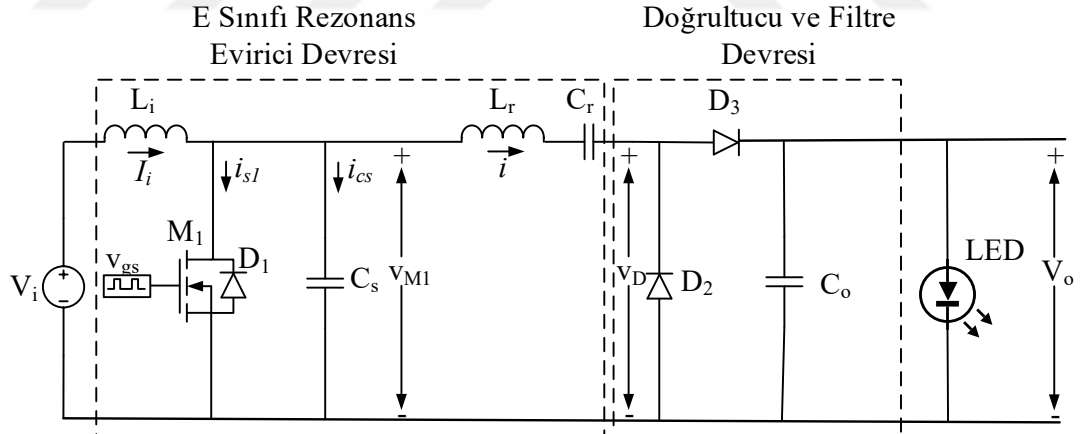


Şekil 2-15: Sıfır Gerilim Anahtarlama

Anahtarlama sırasında meydana gelen enerji anahtara paralel bağlanan kondansatöre aktarılır. Modern hücrelerde bu enerji geri kazanılır. Ancak, paralel bağlanan kondansatör elemanı, güç anahtarı üzerinde ilave gerilim streslerine neden olabilir [74].

3. E SINIFI REZONANS DÖNÜŞTÜRÜCÜ TEMELLİ LED SÜRÜCÜ

Yüksek frekanslı ve düşük güçlü LED sürücü uygulamaları için toprak bağlantılı tek anahtara sahip rezonans dönüştürücüler sıklıkla kullanılmaktadır [26]. Tek anahtarlı rezonans dönüştürücüler arasından E sınıfı rezonans dönüştürücü basit bir yapıya sahip olup yüksek frekanslarda yumuşak anahtarlama şartlarında çalışabilmektedir [72]. Bu dönüştürücülerin başlıca dezavantajı anahtar üzerindeki aşırı gerilim stresinden dolayı yüksek giriş gerilimine ve çıkış gücüne sahip uygulamalar için uygun olmamasıdır. Ayrıca, dönüştürücü birçok farklı değişken ve sabit frekans anahtarlama teknikleri ile kontrol edilebilmekte ve çıkışında kontrollü veya kontrolsüz doğrultma devreleri kullanılabilmektedir. Avantajları ve dezavantajları nedeniyle E sınıfı rezonans dönüştürücü, özellikle düşük giriş gerilimine ve düşük çıkış gücüne sahip yüksek frekanslı LED sürücü uygulamalar için uygundur. Şekil 3-1’de E sınıfı rezonans dönüştürücü temelli LED sürücü devre şeması verilmiştir. E sınıfı rezonans dönüştürücü temelli LED Sürücü devresi E sınıfı rezonans evirici, yarım dalga doğrultucu ve çıkış filtre devrelerinden oluşmaktadır.



Şekil 3-1: E Sınıfı Rezonans Dönüştürücü Temelli LED Sürücü Devresi

E sınıfı rezonans dönüştürücü devresinde giriş gerilimi V_i , giriş endüktansı L_i ve giriş akımı I_i olarak gösterilmiştir. Devrede anahtarlama elemanı olarak bir MOSFET (M_1) kullanılmış olup, bu elemanın gövde diyodu D_1 ve üzerinden geçen akım i_{s1} ile belirtilmiştir. Anahtarın paralelinde yer alan C_s kondansatörü, bu anahtara paralel bağlanan kondansatörün ve anahtar uçlarındaki kapasitenin toplamıdır. D_2 ve D_3

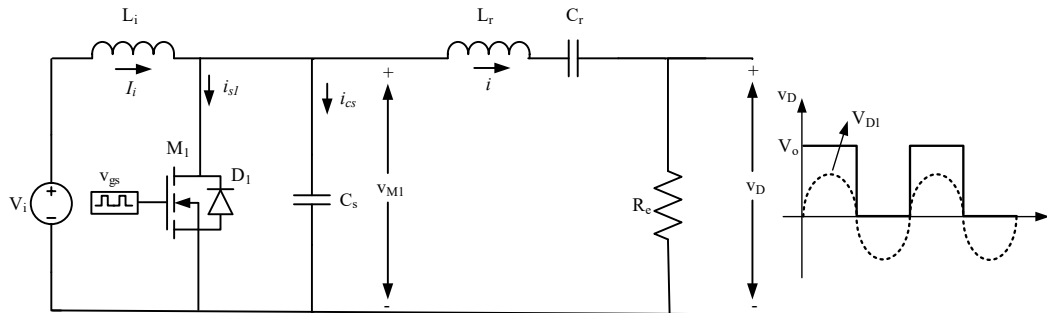
diyotları yarım dalga doğrultucu işlevi görürken C_o kondansatörü çıkış filtre kondansatörüdür. L_r ve C_r elemanları sırasıyla seri rezonans endüktasını ve kapasitesini ifade etmektedir. Güç anahtarının kapı devresi v_{gs} sinyali ile kontrol edilmektedir. v_{gs} sinyali; PWM üretici bir kaynak tarafından üretilen ve %50 doluluk oranı (D) olan sabit frekanslı f_s sinyalin MOSFET sürücüyü uygulanması ile elde edilmektedir. Devre de yük olarak Soul Semiconductor firmasına ait 48 W gücünde ve 37 V nominal çalışma gerilimine sahip beyaz ışık yayan güç COB LED'i kullanılmıştır.

3.1 E SINIFI REZONANS DÖNÜŞTÜRÜCÜNÜN ANALİZİ

E sınıfı rezonans dönüştürücü temelli LED sürücünün analizini gerçekleştirmek amacıyla aşağıda belirtilen varsayımlar kabul edilmiştir.

1. Devre kararlı durum koşulları altında çalışmaktadır.
2. Tüm devre elemanları idealdir.
3. L_i değeri, içerisinde geçen akımın bir periyot içerisindeki salınımlardan etkilenmeyecek kadar yüksek değerlidir.
4. Yük, doğrultucu ve filtre devresi bir direnç olarak modellenmiştir [14].

Belirtilen kabullerle birlikte rezonans akımı i 'nin saf sinüs ve D_2 diyotunun uçlarındaki gerilimin (v_D) tepe değeri V_o olan kare dalga olduğu kabul edilirse E sınıfı rezonans dönüştürücü temelli LED sürücünün eş değer devre şeması Şekil 3-2'de verildiği gibi elde edilir. Eşdeğer devrenin çıkışında gösterilen dalga şekillerinden v_{D1} doğrultulmuş çıkış gerilimi v_D 'nin temel bileşenidir.



Şekil 3-2: E Sınıfı Rezonans Dönüştürücü Temelli LED Sürücünün Eşdeğer Devresi

E sınıfı rezonans dönüştürücü temelli LED sürücü güç anahtarının iletimde veya kesimde olma durumuna göre iki rezonans frekansına sahiptir. Bunlardan birincisi L_r ve C_r 'den kaynaklı rezonans frekansı (f_{r1}) iken ikincisi C_s kondansatörünün de dahil olması ile ortaya çıkan L_r ve C_r/C_s rezonans frekansdır (f_{r2}). Bu iki frekans değeri Eşitlik 3.1 ve Eşitlik 3.2'de verilmiştir.

$$f_{r1} = \frac{1}{2\pi\sqrt{L_r C_r}} \quad 3.1$$

$$f_{r2} = \frac{1}{2\pi\sqrt{L_r(C_r/C_s)}} \quad 3.2$$

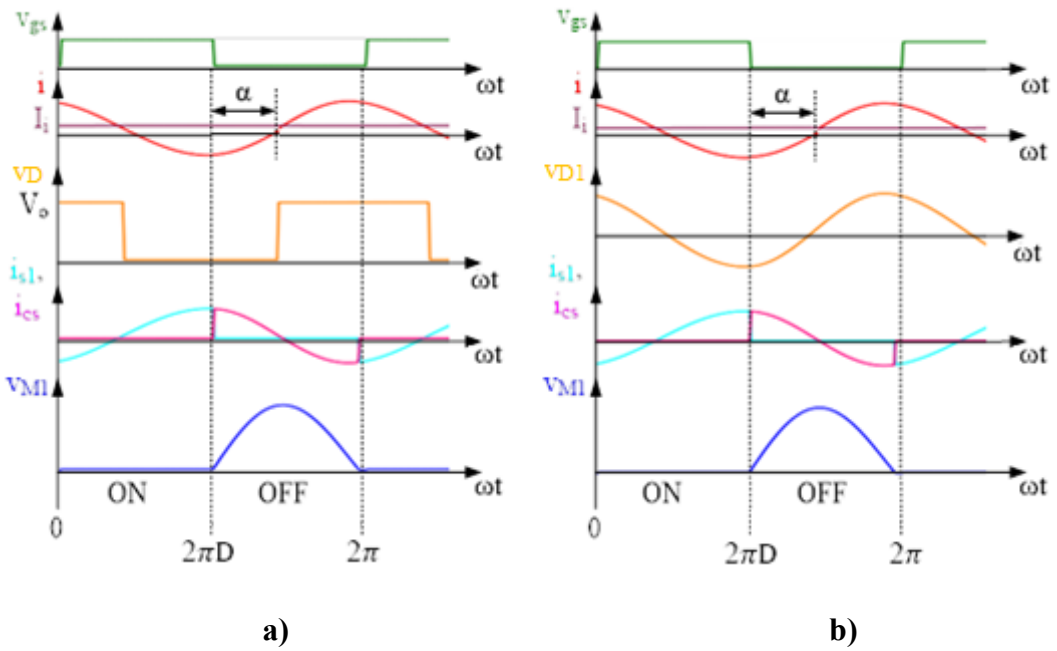
E sınıfı rezonans dönüştürücü temelli LED sürücünün ZVS şartlarında çalışabileceği etkin çalışma frekansı (f_s), $f_{r1} < f_s < f_{r2}$ aralığında seçilmektedir [26]. Böylece rezonans devresi endüktif olmakta ve M_1 anahtarı için sıfır gerilim şartı sağlanmaktadır. Devre de bulunan seri rezonans devresinin kalite faktörü Eşitlik 3.3'te verilmiştir. Kalite faktörü eşitliğinde bulunan R_e , AC direnci ifade etmektedir. R_e temel bileşen yöntemi ile elde edilmiş ve Eşitlik 3.4'te verilmiştir.

$$Q = \frac{2\pi f_s L_r}{R_e} \quad 3.3$$

$$R_e = \frac{V_{D1}}{I_m} = \frac{2V_o}{I_o \pi} = \frac{2R_L}{\pi^2} \quad 3.4$$

Eşitlik 3.3'te görüldüğü gibi devrenin kalite faktörü; yük direnci (R_L), devrenin çalışma frekansı (f_s) ve rezonans devresinin endüktans (L_r) değeri ile ilişkilidir. Çalışma frekans aralığı $f_{r1} < f_s < f_{r2}$ için dönüştürücünün üç farklı çalışma durumu ortaya çıkmaktadır. Bu çalışma durumlarından birisi optimum iken diğer ikisi non-optimum çalışma durumudur. Optimum çalışma durumu sadece tek bir direnç değeri için sağlandığından özellikle değişen sistem parametrelerine sahip uygulamalar için gerçekleştirilmesi oldukça zordur. Non-optimum çalışma

durumlarından birisi, M_1 anahtarına anahtarlama sinyali uygulanmadan anahtar geriliminin ve türevinin negatif olduğu çalışma durumudur. Bu çalışma durumu özellikle değişen çalışma parametrelerine sahip uygulamalar için tercih edilmektedir [26]. Anahtar geriliminin ve türevinin negatif olduğu çalışma durumu için dönüştürücünün frekans kontrollü ve AC eşdeğer devre yapılarının kararlı durum dalga şekilleri Şekil 3-3'te verilmiştir.



Şekil 3-3: Kararlı Durum Dalga Şekilleri a) Frekans Kontrollü Dönüştürücü b) AC Eşdeğer Devre

Dönüştürücünün yarım dalga doğrultucu yapısından dolayı rezonans akımı i 'nin pozitif kısmı yüke aktarılırken negatif kısmı kaynağa dönmektedir. Anahtar gerilimi v_{M1} bir çalışma periyodu tamamlanmadan 0 V seviyesine düşmektedir. Anahtar gerilimi 0 V seviyesinin altına inmesiyle M_1 anahtarının gövde diyotu D_1 iletime geçerek anahtar üzerinde geçen akımın (i_{s1}) negatif kısmını üzerine almaktadır. Böylece M_1 anahtarı için sıfır gerilim anahtarlama şartları oluşmaktadır. Eşitlik 3.9 ve Eşitlik 3.10'da sıra ile seri rezonans devresinin akımı i 'nin ve doğrultulmuş çıkış geriliminin temel bileşeni v_{D1} verilmiştir. Eşitlik 3.10'daki V_{D1} , v_{D1} 'in tepe değeri olup $2V_o/\pi$ 'e eşittir.

$$i(t) = I_m \sin(\omega_s t - \alpha) = I_i - i_{s1}(t) - i_{cs}(t) \quad 3.5$$

$$v_{D1}(t) = V_{D1} \sin(\omega_s t - \alpha) \quad 3.6$$

Devre incelendiğinde devrenin giriş akımı olan I_i , eşitlik 3.11’de gösterildiği gibi bulunur.

$$I_i = i_{s1} + i_{cs} + i \quad 3.7$$

M_1 , MOSFET anahtarı üzerine düşen gerilim v_{m1} olarak gösterildiğinde, bu değer eşitlik 3.12’de verilmiştir.

$$v_{M1} = \frac{1}{\omega C_s} \int_{2\pi D}^{\omega t} i C_s d(\omega t) \quad 3.8$$

Dönüştürücünün kararlı durum koşulları için rezonans akımının (i) ve M_1 anahtarının gerilim (v_{M1}) ifadeleri Eşitlik 3.9 ve Eşitlik 3.12’de verildiği gibidir. Bu iki eşitlik, fazör diyagramları ve ZVS şartları dikkate alınarak dönüştürücünün analizi, çalışmalar [75, 26]’da detaylı bir şekilde gerçekleştirilmiştir. Gerçekleştirilen analizler sonucunda görev oranının artması anahtar üzerindeki gerilim stresini artırırken, akım stresini azalmaktadır. Bu nedenle çalışmalarda anahtarda meydana gelecek kayıpları azaltmak ve anahtardan maksimum fayda elde edebilmek için görev döngüsü (D) sabit ve %50 olarak seçilmektedir [75]. Seçilen çalışma frekansı ve farklı kalite faktörleri için devrede kullanılan diğer bileşen değerleri eşitlik 3.5’ten eşitlik 3.8’e kadar verilen eşitlikler ile hesaplanabilir [26].

$$L_r = \frac{Q \cdot R_e}{2 \cdot \pi \cdot f_s} \quad 3.9$$

$$C_r = \frac{1}{2 \cdot \pi \cdot f_s \cdot R_e \left(Q - \frac{\pi \cdot (\pi^2 - 4)}{8} \right)} \quad 3.10$$

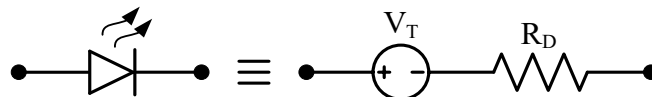
$$C_s = \frac{8}{2 \cdot \pi \cdot f_s \cdot R_e \cdot \pi \cdot (\pi^2 + 4)} \quad 3.11$$

$$L_i = 2 \cdot \left(\frac{\pi^2}{4} + 1 \right) \frac{R_e}{f_s} \quad 3.12$$

ZVS E sınıfı rezonans dönüştürücü temelli LED sürücünün devre bileşenleri olan L_r , C_r , C_s ve L_i yukarıda verilen ilgili eşitlikler kullanılarak hesaplanmıştır.

3.2 E SINIFI REZONANS DÖNÜŞTÜRÜCÜ TEMELLİ LED SÜRÜCÜ TASARIMI

Bu bölümde, E sınıfı rezonans dönüştürücü temelli LED sürücünün tasarım süreci ayrıntılı olarak ele alınmıştır. E sınıfı rezonans dönüştürücü temelli LED sürücünün tasarımı 22 V giriş gerilimine, 48 W çıkış gücüne, 250 kHz anahtarlama frekansına ve %50 görev oranına göre devre parametrelerinin hesaplanmasına dayanmaktadır. Yapılan tasarımda verim %100 olarak kabul edilmiştir. Dönüştürücü tasarımı yapılırken farklı kalite faktörlerine göre Bölüm 3.1’de verilen eşitlikler kullanılarak devre elemanlarının değerleri belirlenmiştir. E sınıfı rezonans dönüştürücüde yük olarak Seoul Semiconductor firmasına ait 48 W’lık COB LED kullanılmıştır. LED için çalışma gerilimi 37 V ve maksimum çalışma akımı 1,29 A olarak belirlenmiştir. Ayrıca kullanılan bu LED’e ait I-V eğrisinden yaklaşık olarak 25 V’a kadar LED üzerinden akımın geçmediği, 25 V’tan sonra akımın geçmeye başladığı görülmektedir [38]. LED’in karakteristik eğrisi dikkate alınarak LED, Şekil 3-4’te verilen eşdeğer devre ile modellenenabilir.



Şekil 3-4: LED Eşdeğer Devresi

LED eş değeri devresinde R_D direnci LED'in statik direncini göstermektedir. V_T LED eşik gerilimi 25 V'u ifade etmektedir. R_D direnci Eşitlik 3.13 ile bulunabilir.

$$R_D = \frac{37 V - V_T}{1,29 A} \quad 3.13$$

Eşitlik 3.13'te kullanılan LED'e ait V_D değerinin yerine konulmasıyla birlikte R_D direnci 9,3 Ω olarak bulunmuştur [76]. Farklı kalite faktörleri ve LED'in çalışma parametreleri dikkate alınarak sürücü çalışma parametreleri Tablo 3.1'de verildiği gibidir. Tablo 3.1'deki R_L direnci, LED gerilimi 37 V'un maksimum çalışma akımı 1,29 A'e bölünmesi ile 28,68 Ω olarak elde edilmiştir. LED'in eş değeri devre modelindeki V_T ve R_D parametreleri sıra ile simülasyon çalışmasında eşik gerilimi ve diyot iç direnci olarak kullanılmıştır. Farklı kalite faktörleri için sürücünün tasarımı çalışma [26]'e göre gerçekleştirilmiştir.

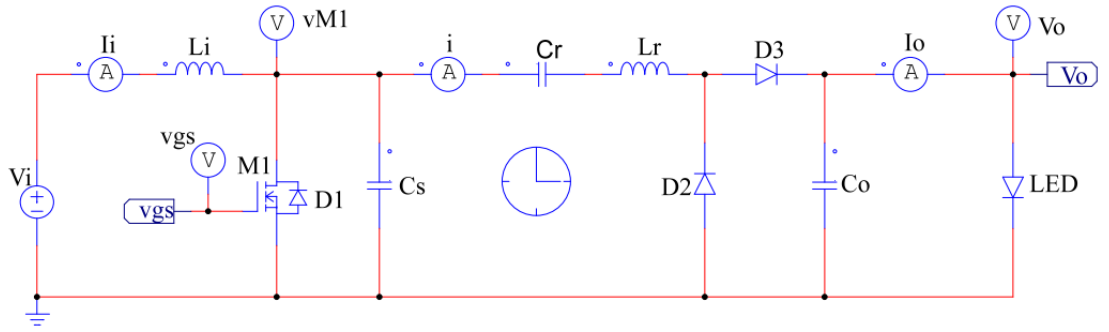
Tablo 3.1: Farklı kalite faktörleri için dönüştürücünün çalışma parametreleri

Q	P_i (W)	V_i (V)	R_e (Ω)	R_L (Ω)	L_r (μ H)	C_r (nF)	C_s (nF)	L_i (μ H)	f_s (kHz)	f_{r1} (kHz)	f_{r2} (kHz)
3	48	22	5,81	28,68	11,1	59,27	20,1	162,7	250	196,3	390
5	48	22	5,81	28,68	18,5	28,47	20,1	162,7	250	219,4	341
7	48	22	5,81	28,68	25,9	18,73	20,1	162,7	250	228,6	318
9	48	22	5,81	28,68	33,3	13,96	20,1	162,7	250	233,6	304

Tablo 3.1 incelendiğinde farklı kalite faktörleri için verilen çalışma parametrelerinden seri rezonans tank devresini oluşturan L_r ve C_r , ve bu değerlere bağlı olarak f_{r1} ve f_{r2} rezonans frekanslarının değiştiği görülmektedir. Simülasyon çalışmasında her bir kalite faktörü için L_r ve C_r 'nin değerleri güncellenerek sürücünün simülasyonu gerçekleştirilmiştir.

3.3 E SINIFI REZONANS DÖNÜŞTÜRÜCÜ TEMELLİ LED SÜRÜCÜNÜN SİMÜLASYON ÇALIŞMALARI

E sınıfı rezonans dönüştürücü temelli LED sürücünün simülasyon çalışmaları PSIM programı kullanılarak gerçekleştirilmiştir. Sürücünün PSIM devre şeması Şekil 3-5'te verilmiştir. Simülasyon çalışmalarında sürücünün farklı kalite faktörlerine ait parametrelerindeki değişimleri karşılaştırmalı bir şekilde sunmak için giriş akımı I_i , rezonans akımı i , anahtar gerilimi v_{M1} , çıkış gerilimi V_o , çıkış akımı I_o ve çıkış gücü P_o ölçülerek kaydedilmiştir. Simülasyon çalışmalarının tamamında dönüştürücü açık çevrimli bir şekilde çalıştırılmış herhangi bir kapalı çevrim kontrol yöntemi uygulanmamıştır.

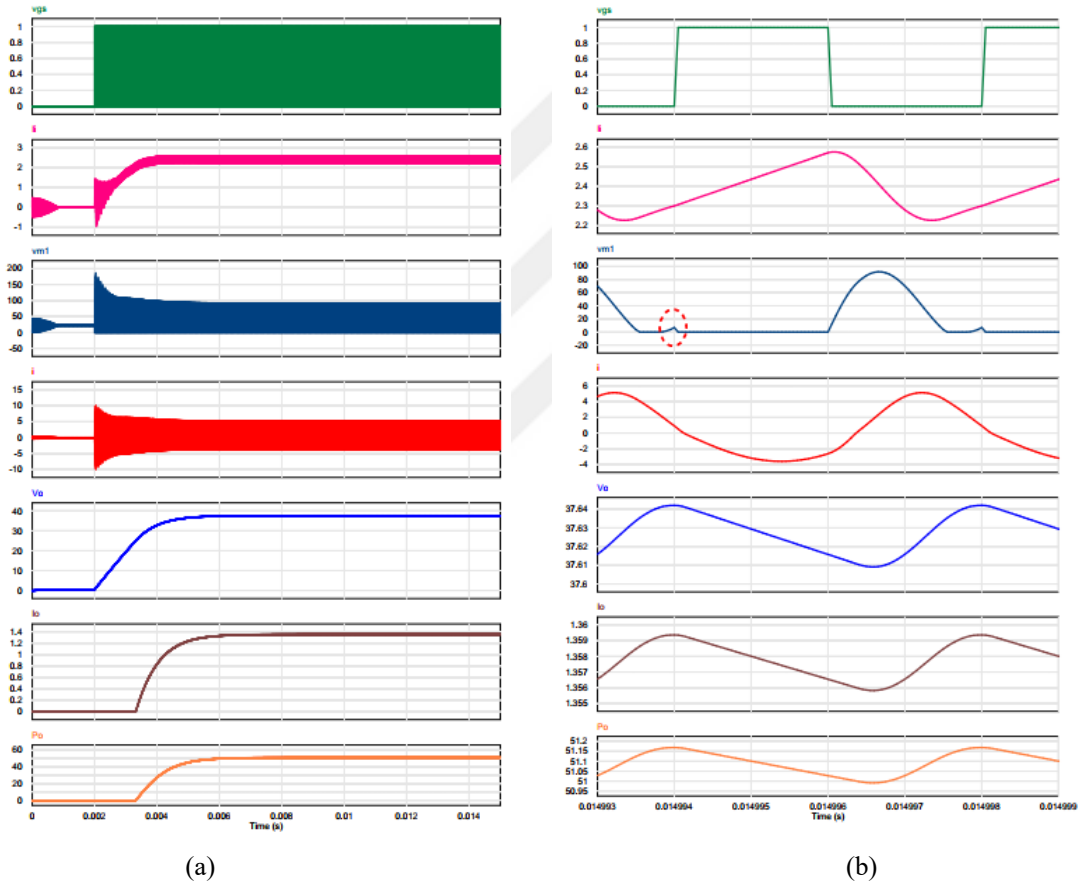


Şekil 3-5: E-Sınıfı Rezonans Dönüştürücü Temelli LED Sürücünün PSIM Devre Şeması

Gerçekleştirilen açık çevrim kontrol ile ilk 2 ms dönüştürücünün güç anahtarına PWM sinyali uygulanmamıştır. Bu süreden itibaren frekansı 250 kHz, görev oranı %50 olan anahtarlama sinyali güç anahtarına uygulanmaktadır. Simülasyon 15 ms çalıştırılmıştır. LED sürücünün kalite faktörü 3, 5, 7 ve 9 olacak şekilde seri rezonans devresinin bileşenleri L_r ve C_r 'nin değerleri her bir kalite faktörü için değiştirilmiştir. Her bir kalite faktörü için LED sürücünün simülasyon çalışmaları tekrarlanarak gerekli ölçümler alınmıştır.

3.3.1 Q=3 için Simülasyon Çalışması

E sınıfı rezonans dönüştürücü, kalite faktörü $Q=3$ için PSIM programında çalıştırılmış ve simülasyon çıktıları Şekil 3-6a'da sunulmuştur. Kalite faktörü 3 için rezonans bobini $L_r=11,1 \mu\text{H}$ ve rezonans kondansatörü $C_r=59,27 \text{ nF}$ olarak hesaplanmış ve devre de kullanılmıştır. Şekil 3-6a'da verilen dalga şekillerinin açılmış halleri Şekil 3-6b'de verilmiştir. Şekil 3-6b'den görüldüğü üzere anahtar sıfır gerilim şartlarında iletme geçse de v_{gs} sinyali uygulanmadan anahtar gerilimi v_{M1} 'in osilasyona başlayarak pozitif değerler aldığı görülmektedir.

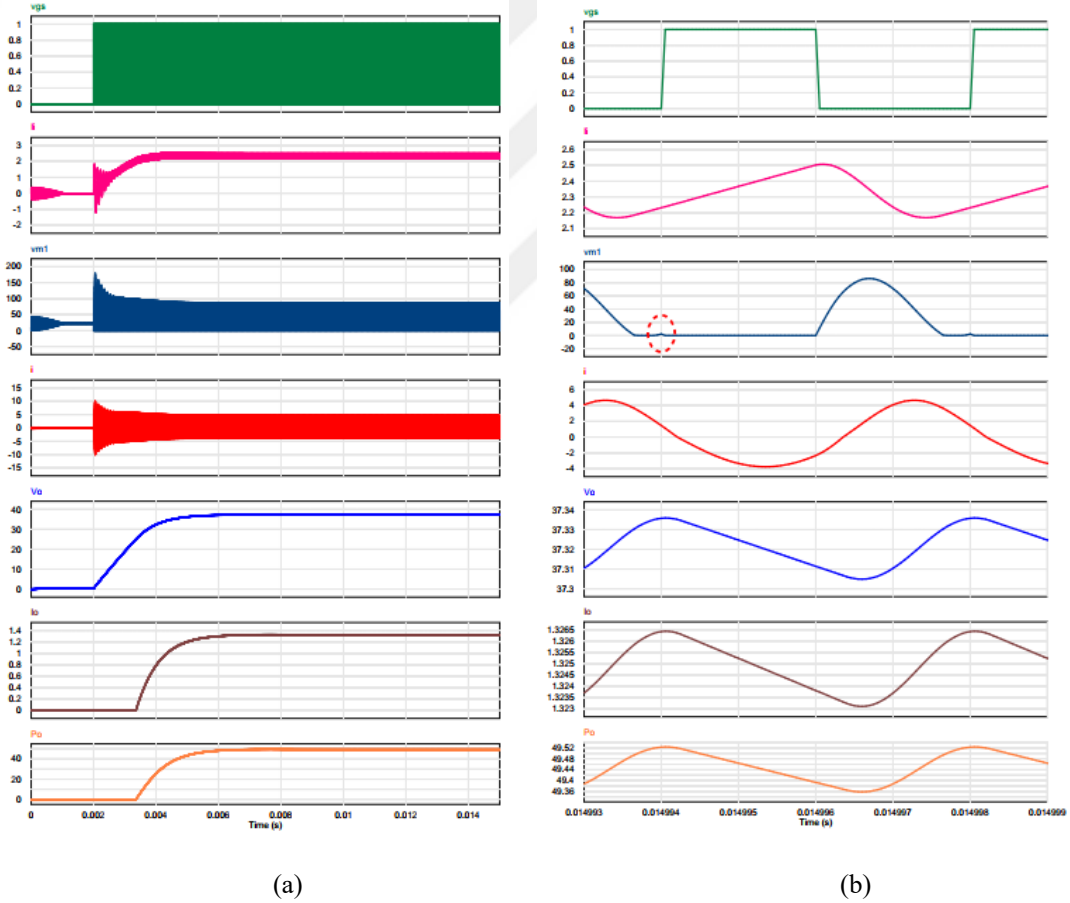


Şekil 3-6:a) Q=3 için Dalga Şekilleri, b) Q=3 için Büyütülmüş Dalga Şekilleri

Kalite faktörü 3 için simülasyonu gerçekleştirilen LED sürücünde giriş akımının maksimum değeri $I_i=2,57 \text{ A}$, anahtar üzerindeki gerilim $v_{M1}=91,88 \text{ V}$, rezonans akımının maksimum değeri $i=5,13 \text{ A}$ ve tepeden tepeye değeri $I_{P-P}=8,72 \text{ A}$, çıkış geriliminin maksimum değeri $V_o=37,64 \text{ V}$, çıkış akımının maksimum değeri $I_o=1,36 \text{ A}$ ve çıkış gücünün maksimum değeri $P_o=51,17 \text{ W}$ olarak ölçülmüştür.

3.3.2 Q=5 için Simülasyon Çalışması

E sınıfı rezonans dönüştürücü, kalite faktörü $Q=5$ için PSIM programında çalıştırılmış ve simülasyon çıktıları Şekil 3-7a'da sunulmuştur. Kalite faktörü 5 için rezonans bobini $L_r=18,5 \mu\text{H}$ ve rezonans kondansatörü $C_r=28,47 \text{ nF}$ olarak hesaplanmış ve devrede kullanılmıştır. Şekil 3.7a'da verilen dalga şekilleri büyütülerek Şekil 3-7b'de verilmiştir. Şekil 3-7b'den görüldüğü üzere anahtar sıfır gerilim şartlarında iletme geçtiği görülmektedir. $Q=5$ için de $Q=3$ 'de olduğu gibi anahtar uçlarındaki gerilim, v_{gs} sinyali uygulanmadan pozitif değerler olarak osilasyona başlamaktadır. Ancak bu değer $Q=3$ 'e göre daha düşüktür.



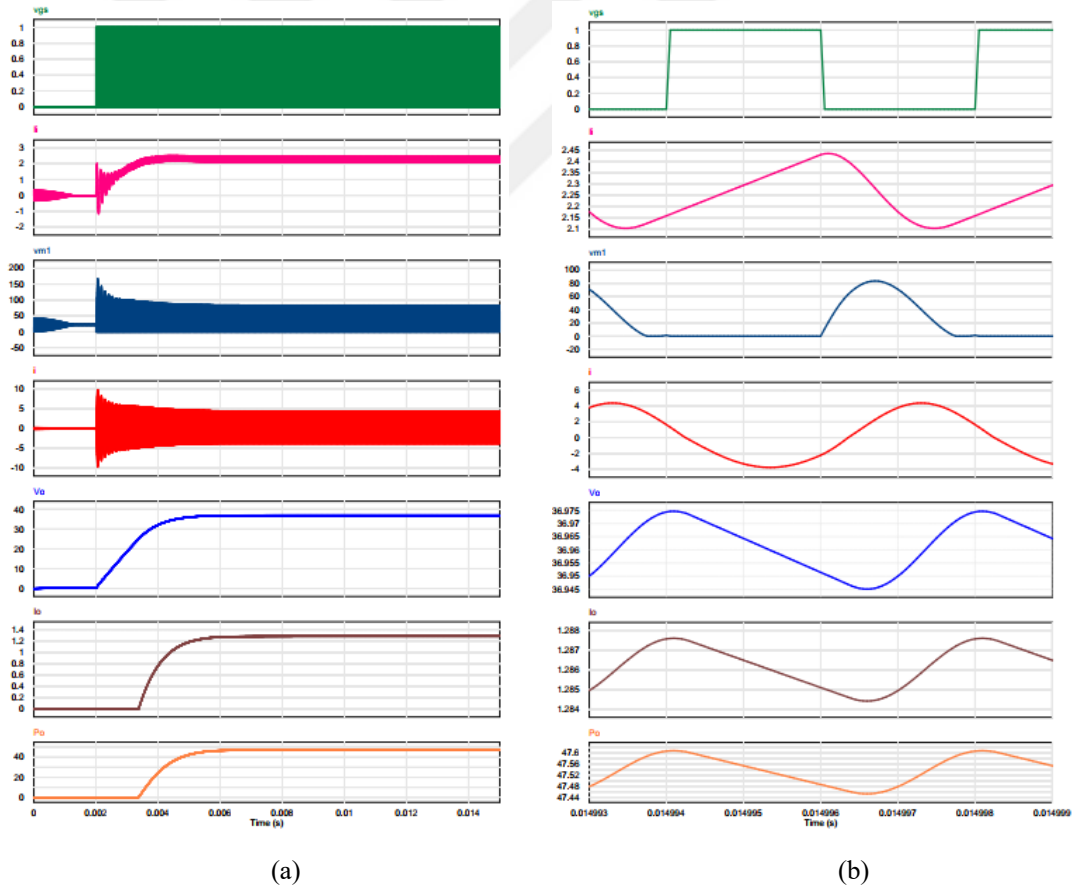
Şekil 3-7: a) $Q=5$ için Dalga Şekilleri, b) $Q=5$ için Büyütülmüş Dalga Şekilleri

Kalite faktörü 5 için simülasyonu gerçekleştirilen LED sürücünde giriş akımının maksimum değeri $I_i=2,5 \text{ A}$, anahtar üzerindeki gerilim $v_{M1}=86,55 \text{ V}$,

rezonans akımının maksimum değeri $i=4,65$ A ve tepeden tepeye değeri $I_{P-P}=8,4$ A, çıkış geriliminin maksimum değeri $V_o=37,33$ V, çıkış akımının maksimum değeri $I_o=1,32$ A ve çıkış gücünün maksimum değeri $P_o=49,52$ W olarak ölçülmüştür.

3.3.3 Q=7 için Simülasyon Çalışması

E sınıfı rezonans dönüştürücü, kalite faktörü $Q=7$ için PSIM programında çalıştırılmış ve simülasyon çıktıları Şekil 3-8a'da sunulmuştur. Kalite faktörü 7 için rezonans bobini $L_r=25,9$ μ H ve rezonans kondansatörü $C_r=18,73$ nF olarak hesaplanmış ve devrede kullanılmıştır. Verilen dalga şekilleri büyütülerek Şekil 3-8b'de verilmiştir. Anahtarın sıfır gerilim şartlarında ilettime geçtiği görülmektedir. Anahtar uçlarındaki gerilimin, v_{gs} sinyali uygulanmadan neredeyse osilasyona başlamadığı görülmektedir.

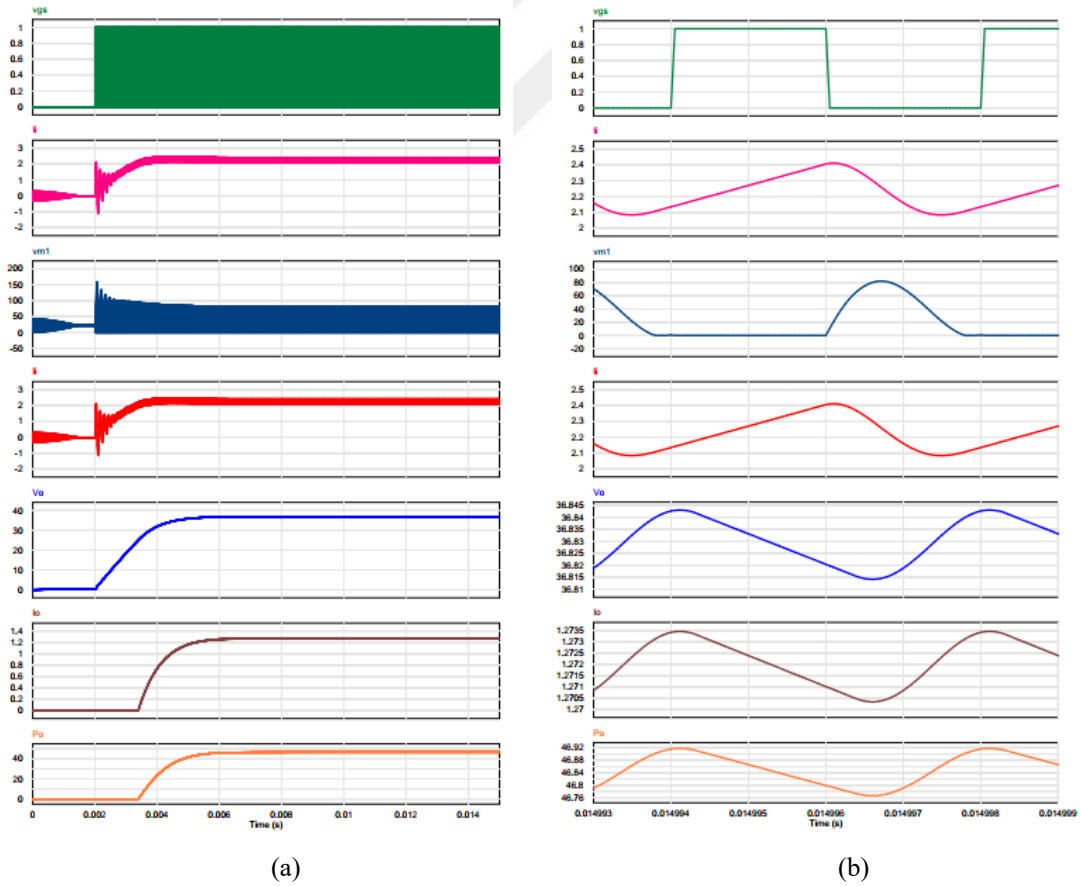


Şekil 3-8: a) $Q=7$ için Dalga Şekilleri, b) $Q=7$ için Büyütülmüş Dalga Şekilleri

Kalite faktörü 7 için simülasyonu gerçekleştirilen LED sürücünde giriş akımının maksimum değeri $I_i=2,43$ A, anahtar üzerindeki gerilim $v_{M1}=83,71$ V, rezonans akımının maksimum değeri $i=4,38$ A ve tepeden tepeye değeri $I_{P-P}= 8,13$ A, çıkış geriliminin maksimum değeri $V_o=36,97$ V, çıkış akımının maksimum değeri $I_o=1,28$ A ve çıkış gücünün maksimum değeri $P_o=47,6$ W olarak ölçülmüştür.

3.3.4 Q=9 için Simülasyon Çalışması

E sınıfı rezonans dönüştürücü, kalite faktörü $Q=9$ için PSIM programında çalıştırılmış ve simülasyon çıktıları Şekil 3-9a'da sunulmuştur. Kalite faktörü 9 için rezonans bobini $L_r=33,3$ μ H ve rezonans kondansatörü $C_r=13,96$ nF olarak hesaplanmış ve devrede kullanılmıştır. Verilen dalga şekilleri büyütülerek Şekil 3-9b'de verilmiştir. Anahtarın sıfır gerilim şartlarında ilettime geçtiği görülmektedir. Anahtar geriliminde osilasyonun sıfıra yakın olduğu görülmektedir.



Şekil 3-9: a) Q=9 için Dalga Şekilleri, b) Q=9 için Büyütülmüş Dalga Şekilleri

Kalite faktörü 9 için simülasyonu gerçekleştirilen LED sürücüde giriş akımının maksimum değeri $I_i=2,41$ A, anahtar üzerindeki gerilim $v_{M1}=82,21$ V, rezonans akımının maksimum değeri $i=4,25$ A ve tepeden tepeye değeri $I_{P-P}=8,03$ A, çıkış geriliminin maksimum değeri $V_o=36,84$ V, çıkış akımının maksimum değeri $I_o=1,27$ A ve çıkış gücünün maksimum değeri $P_o=46,9$ W olarak ölçülmüştür.

3.3.5 Simülasyon Sonuçlarının Karşılaştırılması

Farklı Q değerleri için gerçekleştirilen simülasyon çalışmalarından elde edilen ölçüm sonuçları Tablo 3-2’de verilmiştir. Tabloda verilen I_i , V_o , I_o ve P_o ilgili büyüklüklerin ortalama değerlerini ifade etmektedir. Ayrıca v_{M1} anahtar geriliminin tepe değeri, I rezonans akımının tepe değerini ve I_{P-P} rezonans akımının tepeden tepeye değerini ifade etmektedir.

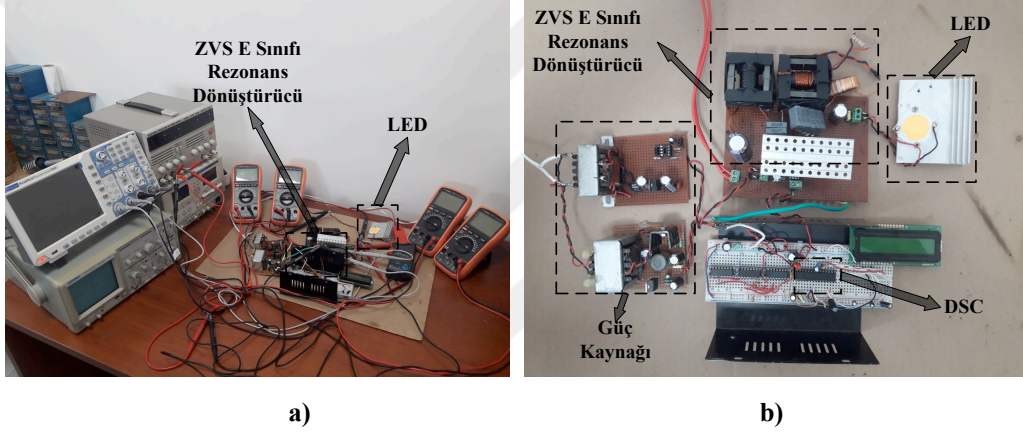
Tablo 3.2: Farklı kalite faktörleri için simülasyon sonuçları

Q	I_i (A)	v_{M1} (V)	I (A)	I_{P-P} (A)	V_o (V)	I_o (A)	P_o (W)
3	2,36	91,88	5,13	8,72	37,62	1,36	51,09
5	2,30	86,55	4,65	8,4	37,32	1,32	49,45
7	2,23	83,71	4,38	8,13	36,96	1,28	47,54
9	2,21	82,21	4,25	8,03	36,83	1,27	46,85

Tablo 3-2’den görüldüğü üzere artan Q değerleri ile giriş akımı, anahtar geriliminin maksimum değeri, rezonans akımının tepe değeri ve tepeden tepeye değeri, çıkış gerilimi, çıkış akımı ve çıkış gücü azalmaktadır. Tablo 3-2’den tasarımı [26]’e göre gerçekleştirilen LED sürücünün tasarım kriterleri olan çıkış gücü 48 W, giriş gerilimi 22 V ve çalışma frekansı 250 kHz için arzu edilen çıkış gücüne en yakın değer kalite faktörü 7 için sağlandığı ve ayrıca diğer kalite faktörleri için de tasarım kriterlerinin karşıladığı görülmektedir.

4. DENEYSEL ÇALIŞMALAR

E sınıfı rezonans dönüştürücü temelli LED sürücünün deney düzeneği Şekil 4-1a'da ve dönüştürücü devresi Şekil 4-1b'de verilmiştir. Güç COB LED'i çalışması sırasında ortaya çıkacak olan ısıнын olumsuz etkilerini önlemek amacıyla termal macun ile soğutucuya monte edilmiştir. Sürücünün güç anahtarının PWM sinyalini üretmek için MICROCHIP firmasına ait DSPIC33FJ16GS502 sayısal sinyal denetleyicisinin (DSC) hızlı PWM modülü kullanılmıştır. DSC'yi ve MOSFET sürücüsünü beslemek amacıyla çıkışları 3,3 V ve 18 V olan güç kaynağı devresi kullanılmıştır.



Şekil 4-1: LED Sürücü Deney Düzeneği, a) Deney Düzeneği, b) Dönüştürücü Devresi

Laboratuvar ortamında teorik ve simülasyon çalışmalarını doğrulamak amacıyla kalite faktörünün 3, 5, 7 ve 9 değerleri için deneysel çalışmalar gerçekleştirilmiştir.

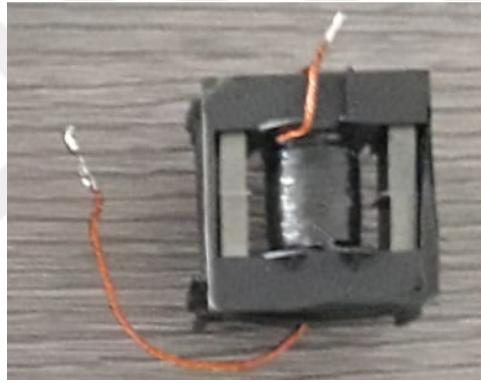
4.1 E SINIFI REZONANS DÖNÜŞTÜRÜCÜNÜN UYGULAMA DEVRESİ

Tasarım çalışmalarında L_i ve C_s değerlerinin değişen kalite faktörüne göre değişmeyip sabit kaldığı görülmektedir. L_i 'nin uygulama devresi için gerçekleştirilmesi aşamasında EPCOS firmasına ait MnZn materyalinden üretilmiş N87 malzemeli ETD34/17/11 ferit nüvesi kullanılmıştır. Nüvenin hava aralığı 0,5 mm'dir. Bu hava aralığı için endüktans faktörü $A_L = 251 \text{ nH/N}^2$ 'dir [77]. A_L eşitliği

Eşitlik 4.1’de verilmiştir. Teorik hesaplamalar sonucu $L_i=162,7 \mu\text{H}$ ’dir. Bu endüktans değerinin elde edilmesi için sarılması gereken tur sayısını (N) belirlemek amacıyla Eşitlik 4.1 kullanılmıştır.

$$N^2 = \frac{L_i}{A_L} \quad 4.1$$

162,7 μH değerini sağlamak için sarılması gereken tur sayısı $N \cong 25$ olarak bulunmuştur. Laboratuvar ortamında 0,35 mm çapında litz tellerden 8 tanesi paralellenerek sarım yapılacak litz tel elde edilmiş ve yaklaşık 25 tur sarılmıştır. İmal edilen L_i ’nin fiziksel görünümü Şekil 4-2a’da verilmiştir.



a)



b)

Şekil 4-2: a) L_i ’nin Fiziksel Görünümü, b) Lutron-9184 LCR Metre

Gerçekleştirilen L_i değeri Şekil 4-2b’de verilen Lutron-9184 LCR metre ile 100 kHz kademesinde 161,5 μH olarak ölçülmüştür. Güç anahtarına paralel bağlı olan C_s kondansatörünü gerçekleştirmek için 6,8 nF değerindeki kutu kılıf tipinde polyester kondansatörlerden 3 adedi paralel olarak bağlanmıştır. Bu durumda Şekil 4-3’de verilen ve deneysel çalışmalarda kullanılan C_s ’nin değeri 20,4 nF olarak elde edilmiştir.



Şekil 4-3: C_s Fiziksel Görünümü

Farklı kalite faktörleri için değişen L_r ve C_r laboratuvar ortamında gerçeklemiştir. L_r 'nin imalatı için L_i de olduğu gibi hava aralığı 0,5 mm olan N87 malzemeli ETD34/17/11 ferit nüvesi kullanılmıştır. Litz tel olarak 0,35 mm çapında litz tellerden 8 tanesi paralellenerek kullanılmıştır. C_r 'yi gerçekleştirmek için farklı değerlerdeki kutu kılıf tipinde polyester kondansatörlerin birbirine paralel bağlanarak teorik tasarımda hesaplanan değerlere olabildiğince yakın değerler elde edilmeye çalışılmıştır. L_r ve soldan sağa sırasıyla 60,7 nF, 13,4 nF ve 18,9 nF değerlerindeki C_r 'ler Şekil 4-4'te verildiği gibidir. Farklı kalite faktörleri için farklı L_r değerleri sarım sayıları güncellenerek elde edilmiştir.



Şekil 4-4: L_r ve farklı değerlerde C_r 'lerin Fiziksel Görünümü

Yapılan çalışmalar sonucunda kalite faktörleri 3, 5, 7, ve 9 için elde edilen L_i , C_s , L_r ve C_r 'nin teorik ve pratikteki değerleri Tablo 4.1'de verilmiştir.

Tablo 4.1: L_i , C_s , L_r ve C_r 'nin Teorik ve Pratik Değerleri

Q	L_i (μ H)		C_s (nF)		L_r (μ H)		C_r (nF)	
	Teorik	Pratik	Teorik	Pratik	Teorik	Pratik	Teorik	Pratik
3	162,7	161,5	20,1	20,4	11,1	11,2	59,2	60,7
5	162,7	161,5	20,1	20,4	18,5	18,8	28,4	28,2
7	162,7	161,5	20,1	20,4	25,9	26,1	18,7	18,9
9	162,7	161,5	20,1	20,4	33,3	34,3	13,9	13,4

Pratikte elde edilen yeni L_r ve C_r değerleri için kalite faktörü Eşitlik 3.5 kullanılarak tekrar hesaplanmış ve Tablo 4.2’de verilmiştir.

Tablo 4.2: L_r ve C_r 'nin Pratik Değerleri için Kalite Faktörü

L_r (μ H)	C_r (nF)	Q
11,2	60,7	3,03
18,8	28,2	5,11
26,1	18,9	7,08
34,3	13,4	9,29

Sürücünün yarı iletken devre elemanları olan güç anahtarı ve yarım dalga doğrultucunun hızlı diyotları için Tablo 4.3’te verilen yarı iletken devre elemanları kullanılmıştır.

Tablo 4.3: Devrede kullanılan Yarı İletken Elemanlar

Yarı İletken Devre Elemanı	Yarı İletken Devre Elemanının Kodu
Güç Anahtarı (M_1)	SCT3060
Doğrultucu Diyotlar (D_2 , D_3)	MBR20100CT

Yarım dalga doğrultucu devresi için yüksek akım kapasitesi, düşük ileri gerilimi, yüksek sıcaklık dayanımı ve hızlı anahtarlama özelliklerinden dolayı VISHAY firmasına ait MBR20100CT Schottky güç diyotları kullanılmıştır. Güç anahtarı olarak Si mosfetlere göre düşük anahtarlama ve iletim kayıplarına sahip olmasından dolayı Rohm firmasına ait SCT3060 SiC güç MOSFET’i kullanılmıştır.

MOSFET sürücü olarak 4,5-35 V değerleri arasında besleme gerilimine izin veren ve tepe çıkış akımı 2 A olan IXYS firmasına ait IXDN602PI tümleşik devresi kullanılmıştır. DSC'nin hızlı PWM modülünden elde edilen frekansı 250 kHz ve doluluk oranı %50 olan PWM sinyali MOSFET sürücü devresine uygulanmış ve MOSFET sürücü devresinin çıkışında güç anahtarı M_1 'in kapı sürme sinyali v_{gs} elde edilmiştir.

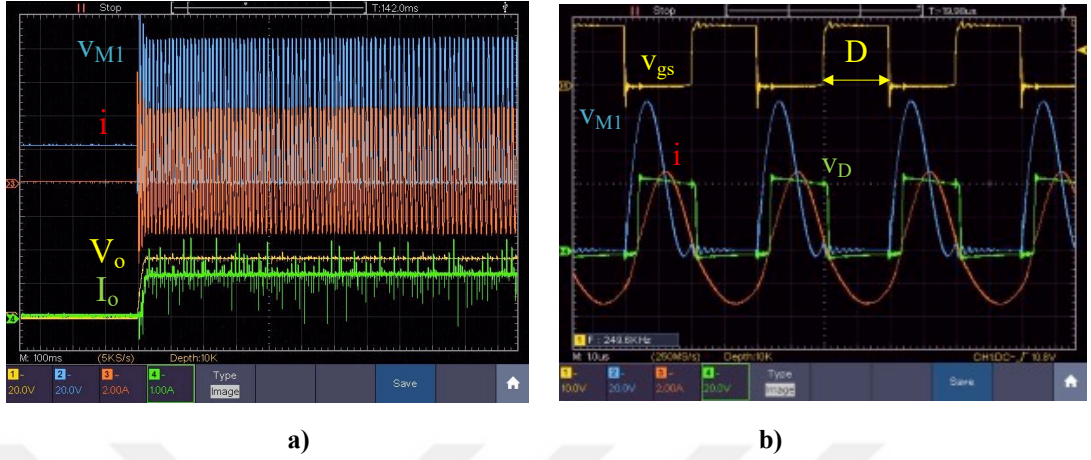
4.2 FARKLI Q DEĞERLERİ İÇİN LED SÜRÜCÜNÜN ÇALIŞTIRILMASI

Teorik hesaplamalar sonucu değerleri elde edilen devre bileşenleri olabildiğince bu değerlere yaklaşık olarak pratikte gerçekleştirilmiştir. Daha sonra pratikte gerçekleştirilen bu devre bileşenleri kullanılarak yaklaşık olarak kalite faktörleri 3, 5, 7 ve 9 için deneysel çalışmalar gerçekleştirilmiştir. Deneysel sonuçları simülasyon sonuçları ile karşılaştırmak amacıyla her bir Q değeri için deney düzeneği üzerinden ölçümler alınmıştır. Çıkış akımı I_o 'nun ölçülmesi için PICO Technology firmasının TA018 AC/DC akım probu kullanılmıştır. Rezonans akımı i 'nin ölçülmesinde 1:100 oranında ve çıkışında 100 Ω direnç olan ferit toroid nüve kullanılmıştır. Giriş gücünün elde edilmesi için giriş akımı I_i ve giriş gerilimi V_i , çıkış gücünün elde edilmesi için çıkış akımı I_o ve çıkış gerilimi V_o dijital multimetre ile ölçülmüştür. LED sürücünün farklı kalite faktörleri için çalışma dalga şekillerinin görüntülenmesi için 100 MHz'lik 4 kanallı sayısal osiloskop kullanılmıştır.

4.2.1 $Q \cong 3$ için Deneysel Çalışma

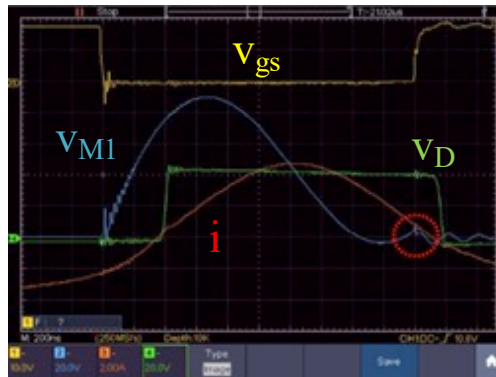
E sınıfı rezonans dönüştürücü temelli LED sürücü, kalite faktörü $Q \cong 3$ için laboratuvar ortamında çalıştırılmış ve çalışma dalga şekilleri Şekil 4-5a'da verilmiştir. Kalite faktörü yaklaşık 3 için $L_i=161,5 \mu H$, $C_s=20,4 nF$, $L_r=11,2 \mu H$ ve $C_r=60,7 nF$ olarak elde edilmiş ve prototip devre de kullanılmıştır. LED sürücünün giriş gerilimi 22 V, çalışma frekansı 250 kHz ve anahtarın kapı sinyali v_{gs} 'nin görev oranı %50'dir. Şekil 4-5a'da anahtar gerilimi v_{m1} , rezonans akımı i , çıkış akımı I_o ve çıkış gerilimi V_o verilmiştir. Şekil 4-5b'de bu çalışma durumuna ait v_{gs} , v_{M1} , v_D ve

i 'nin açılmış dalga şekilleri verilmiştir. v_D , D_2 doğrultucu diyotu uçlarındaki gerilimdir.



Şekil 4-5: a) $Q \cong 3$ ve $V_i = 22$ V için LED sürücünün çalışma dalga şekilleri, a) v_{M1} , i , V_o ve I_o 'nun Dalga Şekilleri b) v_{gs} , v_{M1} , i ve v_D 'nin Açılmış Dalga Şekilleri

$Q \cong 3$ ve $V_i = 22$ V çalışma durumu için giriş akımı $I_i = 2,43$ A, çıkış gerilimi $V_o = 36,62$ V, çıkış akımı $I_o = 1,302$ A olarak ölçülmüştür. Giriş gücü P_i , giriş akımı ve giriş gerilim değerlerinin çarpılması sonucu 53,6 W, çıkış gücü P_o , çıkış akımı ve çıkış gerilim değerlerinin çarpılması sonucunda 47,67 W olarak bulunmuştur. Çıkış gücünün giriş gücüne bölünmesi sonucunda verim %88,97 olarak elde edilmiştir. Bununla birlikte simülasyon çalışmalarında olduğu gibi $Q \cong 3$ ve $V_i = 22$ V için güç anahtarı ZVS ile ilettime geçse de Şekil 4-6'dan görüldüğü üzere v_{gs} uygulanmadan anahtar gerilimi osilasyona başlamaktadır.

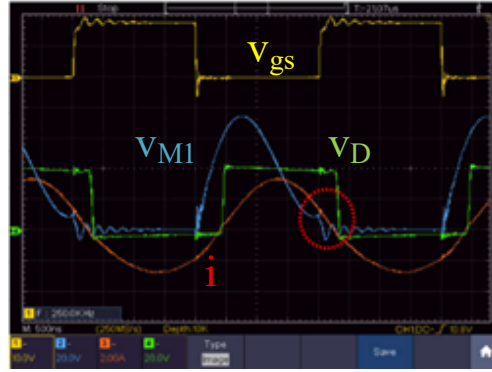


Şekil 4-6: $Q \cong 3$ ve $V_i = 22$ V için v_{gs} , v_{M1} , i ve v_D 'nin Açılmış Dalga Şekilleri

$Q \cong 3$ ve $V_i = 22$ V için gerçekleştirilen deneysel çalışmaların teorik ve simülasyon çalışmaları ile uyum içinde olduğu görülmektedir.

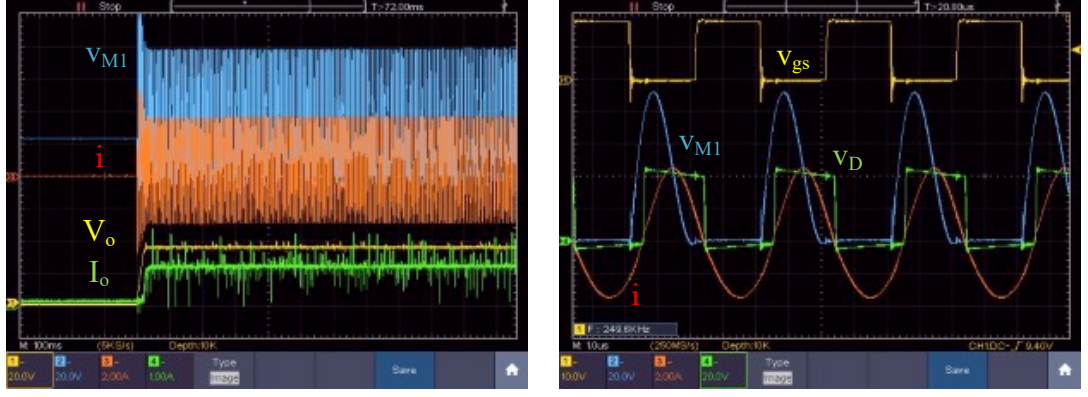
4.2.2 $Q \cong 5$ için Deneysel Çalışmalar

E sınıfı LED sürücü, kalite faktörü $Q \cong 5$ ve $V_i = 22$ V için çalıştırılmış ve çalışma dalga şekilleri Şekil 4-7’de sunulmuştur. Kalite faktörü yaklaşık 5 için $L_i = 161,5$ μ H, $C_s = 20,4$ nF, $L_r = 18,8$ μ H ve $C_r = 28,2$ nF olarak elde edilmiştir. Bu değerler için deneysel çalışmalar tekrarlanmıştır. Tasarım kriteri olan giriş gerilimi 22 V sürücüye uygulanmıştır. Bununla birlikte Şekil 4-7’den görüldüğü üzere 22 V giriş gerilimi ve 250 kHz anahtarlama frekansı için anahtar gerilimi (V_{M1}) sıfır volta düşmemektedir. Dahası bu giriş gerilimi için çıkış akımı 1,01 A olmakta ve gerekli çıkış gücü elde edilememektedir. Bu çalışma şartlarında ZVS ve tasarım kriterleri sağlanamamaktadır. Şekil 4-7’de bu çalışma durumuna ait v_{gs} , V_{M1} , V_D ve i ’nin açılmış dalga şekilleri verilmiştir.



Şekil 4-7: $Q \cong 5$ ve $V_i = 22$ V için v_{gs} , V_{M1} , V_D ve i ’nin Açılmış Dalga Şekilleri

Tasarım kriteri olan 1,3 A çıkış akımını elde etmek için giriş gerilimi artırılmış ve 24,02 V için bu değer elde edilmiştir. Dahası giriş gerilimi 24,02 V için ZVS sağlanmıştır. Bu giriş gerilimi için çalışma dalga şekilleri Şekil 4-8’de verilmiştir. Şekil 4-8a’da anahtar gerilimi V_{M1} rezonans akımı i , çıkış akımı I_o ve çıkış gerilimi V_o olarak gösterilmiştir. Şekil 4-8b’de bu çalışma durumuna ait v_{gs} , V_{M1} , V_D ve i ’nin açılmış dalga şekilleri verilmiştir.



a)

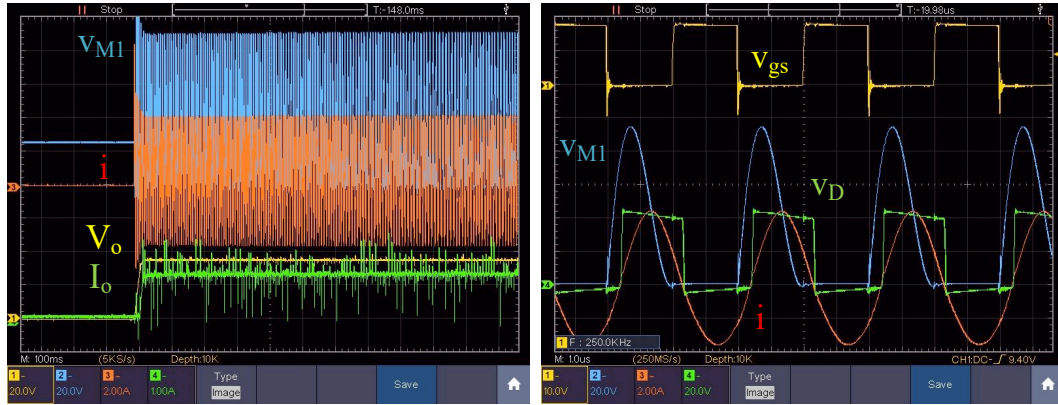
b)

Şekil 4-8: $Q \cong 5$ ve $V_i = 24,02$ V için LED Sürücünün Çalışma Dalga Şekilleri a) V_{M1} , i , V_o ve I_o 'nun Dalga Şekilleri b) v_{gs} , V_{M1} , i Açılmış Dalga Şekilleri

Kalite faktörü $Q \cong 5$ ve giriş gerilimi 24,02 V için giriş akımı $I_i = 2,298$ A, çıkış gerilimi $V_o = 36,48$ V, çıkış akımı $I_o = 1,301$ A olarak ölçülmüştür. Giriş gücü P_i , giriş akımı ve giriş gerilim değerlerinin çarpılması sonucu 55,197 W; çıkış gücü P_o , çıkış akımı ve çıkış gerilim değerlerinin çarpılması sonucunda 47,46 W olarak bulunmuştur. Çıkış gücünün giriş gücüne bölünmesi sonucunda verim %85,98 olarak elde edilmiştir.

4.2.3 $Q \cong 7$ için Deneysel Çalışmalar

LED sürücü, kalite faktörü $Q \cong 7$ ve $V_i = 22$ V için çalıştırılmıştır. Kalite faktörü yaklaşık 7 için $L_i = 161,5$ μ H, $C_s = 20,4$ nF, $L_r = 26,1$ μ H ve $C_r = 18,9$ nF olarak elde edilmiştir. Bu değerler için deneysel çalışmalar tekrarlanmıştır. Kalite faktörü yaklaşık olarak 5'te olduğu gibi tasarım kriteri olan 22 V giriş gerilimi ve 250 kHz anahtarlama frekansı için ZVS sağlanmamakta ve çıkış gücü 48 W elde edilememektedir. Dahası LED akımı 1,3 A elde edilemediğinden dolayı kalite faktörü yaklaşık 7 değeri için giriş gerilimi 25,51 V' a kadar artırılmış ancak bu değerde tasarım kriterleri sağlanmıştır. Şekil 4-9'de $Q \cong 7$ ve $V_i = 25,51$ V için LED sürücünün çalışma dalga şekilleri verilmiştir. Şekil 4-9a'da anahtar gerilimi V_{M1} , rezonans akımı i , çıkış akımı I_o ve çıkış gerilimi V_o olarak gösterilmiştir. Şekil 4-9b'de bu çalışma durumuna ait v_{gs} , V_{M1} , V_D ve i 'nin açılmış dalga şekilleri verilmiştir.



a)

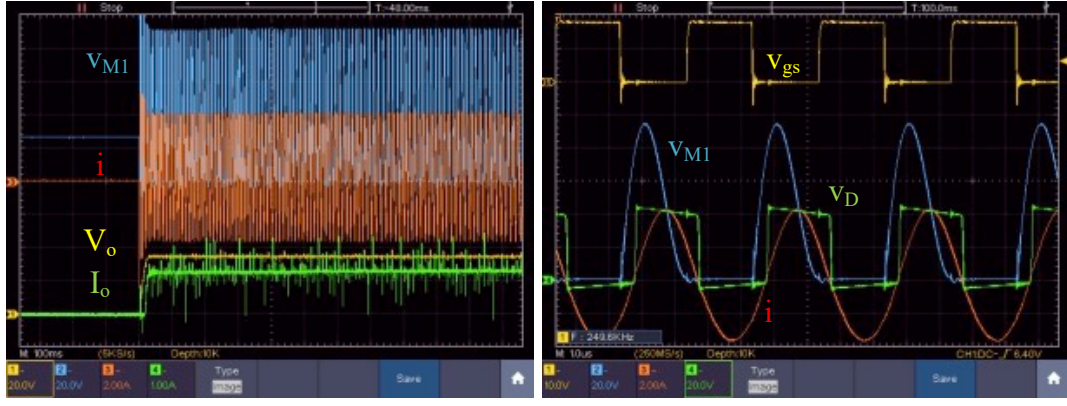
b)

Şekil 4-9: $Q \cong 7$ ve $V_i = 25,51$ V için LED sürücünün çalışma dalga şekilleri a) v_{M1} , i , V_o ve I_o 'nun Dalga Şekilleri b) v_{gs} , v_{M1} , i ve v_D 'nin Açılmış Dalga Şekilleri

Kalite faktörü $Q \cong 7$ ve giriş gerilimi 25,51 V için giriş akımı $I_i = 2,232$ A, çıkış gerilimi $V_o = 36,67$ V, çıkış akımı $I_o = 1,303$ A olarak ölçülmüştür. Giriş gücü P_i , giriş akımı ve giriş gerilim değerlerinin çarpılması sonucu 56,938 W, çıkış gücü P_o , çıkış akımı ve çıkış gerilim değerlerinin çarpılması sonucunda 47,781 W olarak bulunmuştur. Çıkış gücünün giriş gücüne bölünmesi sonucunda verim %83,91 olarak elde edilmiştir.

4.2.4 $Q \cong 9$ için Deneysel Çalışmalar

LED sürücü, kalite faktörü $Q \cong 9$ ve $V_i = 22$ V için çalıştırılmıştır. Kalite faktörü yaklaşık 9 için $L_i = 161,5$ μ H, $C_s = 20,4$ nF, $L_r = 34,3$ μ H ve $C_r = 13,4$ nF olarak elde edilmiştir. Bu değerler için deneysel çalışmalar tekrarlanmıştır. Kalite faktörü yaklaşık olarak 7'de olduğu gibi tasarım kriteri olan 22 V giriş gerilimi ve 250 kHz anahtarlama frekansı için ZVS sağlanmamakta ve çıkış gücü 48 W elde edilememektedir. Dahası LED akımı 1,3 A elde edilemediğinden dolayı kalite faktörü yaklaşık 9 değeri için giriş gerilimi 26,16 V' a kadar arttırılmıştır. Bu değer için çalışma dalga şekilleri Şekil 4-10a'da verilmiştir. Şekil 4-10b'de bu çalışma durumuna ait v_{gs} , v_{M1} , v_D ve i 'nin açılmış dalga şekilleri verilmiştir.

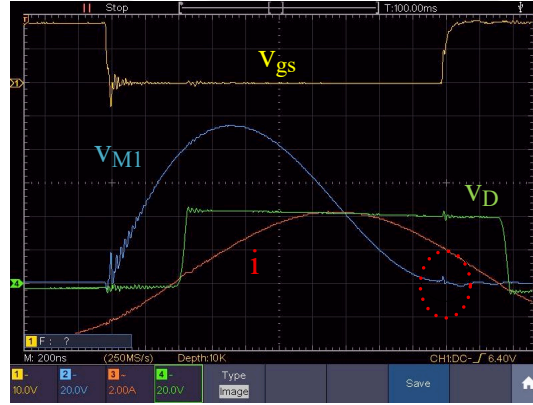


a)

b)

Şekil 4-10: $Q \cong 9$ ve $V_i = 26,16$ V için LED Sürücünün Çalışma Dalga Şekilleri a) v_{M1} , i , V_o ve I_o 'nun Dalga Şekilleri b) v_{gs} , v_{M1} , i ve v_D 'nin Açılmış Dalga Şekilleri

26,16 V giriş gerilimi için 1,3 A çıkış akımı elde edilse de anahtar gerilimi tam olarak sıfır değerine düşmemekte ve ZVS sağlanmamaktadır. ZVS'nin sağlanmadığını daha net bir şekilde gösterebilmek için Şekil 4-10b'deki dalga şekillerinin daha geniş görüntüsü Şekil 4-11'de verilmiştir.



Şekil 4-11: $Q \cong 9$ ve $V_i = 26,16$ V için Şekil 4-8'in Açılmış Hali

Kalite faktörü $Q \cong 9$ ve giriş gerilimi 26,16 V için giriş akımı $I_i = 2,25$ A, çıkış gerilimi $V_o = 36,61$ V, çıkış akımı $I_o = 1,309$ A olarak ölçülmüştür. Giriş gücü P_i , giriş akımı ve giriş gerilim değerlerinin çarpılması sonucu 58,86 W, çıkış gücü P_o , çıkış akımı ve çıkış gerilim değerlerinin çarpılması sonucunda 47,922 W olarak bulunmuştur. Çıkış gücünün giriş gücüne bölünmesi sonucunda verim %81,42 olarak elde edilmiştir.

4.3 FARKLI Q DEĞERLERİ İÇİN DENEYSEL ÇALIŞMA SONUÇLARININ KARŞILAŞTIRILMASI

Farklı Q değerleri için laboratuvar ortamına gerçekleştirilen ZVS E Sınıfı rezonans dönüştürücü temelli LED sürücü devresinden elde edilen ölçüm sonuçları Tablo 4.4'te verilmiştir. Tabloda giriş gerilimi V_i , giriş akımı I_i , çıkış gerilimi V_o , çıkış akımı I_o , giriş gücü P_i ve çıkış gücü P_o olarak gösterilmiştir. Tabloda verilen verim değeri çıkış gücünün giriş gücüne bölünmesiyle elde edilmiştir. Tablo 4.4'te verilen kalite faktörleri deneysel çalışmalar sonucunda elde edilen yaklaşık kalite faktörlerini ifade etmektedir.

Tablo 4.4 Farklı Kalite Faktörleri İçin Deneysel Çalışma Sonuçları

Q	V_i (V)	I_i (A)	V_o (V)	I_o (A)	P_i (W)	P_o (W)	Verim (%)
~3	22	2,436	36,62	1,302	53,592	47,679	88,967
~5	24,02	2,298	36,48	1,301	55,197	47,460	85,982
~7	25,51	2,232	36,67	1,303	56,938	47,781	83,917
~9	26,16	2,25	36,61	1,309	58,860	47,922	81,418

Tablo 4.4' den görüldüğü üzere tasarım kriteri olan 1,3 A çıkış akımının ve 48 W çıkış gücünün $Q \cong 3$ ve $V_i = 22$ V için sağlanmaktadır. Bununla birlikte artan kalite faktörü ile yaklaşık 48 W çıkış gücünün ve 1,3 A çıkış akımının elde edilmesi için giriş gerilimi V_i 'nin artırılması gerekmektedir. Dahası kalite faktörü $Q \cong 9$ için giriş geriliminin artırılması ile gerekli çıkış gücü ve akımının elde edilmesine rağmen sürücünün güç anahtarı ZVS şartlarında ilettime geçememektedir.

5. SONUÇ

Elektrik enerjisine olan ihtiyacın artması ve enerji kaynaklarının sınırlı olması sebebiyle elektrik enerjisinin verimli kullanılması her geçen gün önem kazanmaktadır. Dünya da elektrik enerjisi kullanım oranında, aydınlatma alanında harcanan elektrik enerjisi büyük bir yer tutmaktadır. Bu anlamda düşük enerji tüketimi, yüksek verimlilik ve uzun ömürleri sayesinde LED teknolojisi aydınlatma alanında diğer aydınlatma cihazlarına göre daha fazla tercih edilmeye başlanmıştır. Bu avantajlarının yanında LED ışıkları sıcaklığa güçlü bir bağlılık sergilerler ve uygulanan enerjinin büyük bir bölümü ısıya dönüşür. Bu ısı LED çalışma performansı için kritik bir parametredir.

LED'ler genel olarak güç değerlerine ve yapılarına göre iki ana grupta incelenebilir. Bu tez çalışmasında yük olarak yüksek güçlü LED sürücüler ile birlikte kullanıldığında yüksek lümen verimliliği ve homojen ışık dağılımı sağlamasından dolayı güç değerine göre yüksek güçlü ve yapısına göre COB LED kullanılmıştır.

Birçok uygulamada geleneksel aydınlatmanın yerini alan ve nominal çalışma sıcaklığı, akımı ve gücü olan LED'ler doğrusal olmayan elektriksel yük karakteristiğine sahip DC yüklerdir. LED'lerin doğrusal olmayan bu elektriksel yük karakteristik özelliğine bağlı olarak akım ve gerilim değerlerinde meydana gelen küçük değişimler ışık şiddetinde dalgalanmalara ve çalışma süresinde azalmalara sebebiyet vermektedir. Bu bağlamda yüksek güçlü LED'lerin bir LED sürücü devresi ile kullanılması gerekmektedir. Literatürde direnç ile sürme tekniği, doğrusal düzenleyiciler ile sürme tekniği ve DC-DC dönüştürücüler ile LED sürme teknikleri gibi birçok teknik bulunmaktadır. DC-DC dönüştürücüler diğer sürme teknikleri ile karşılaştırıldığında yüksek verimliliğe sahip olmalarından dolayı yüksek güç ve yüksek güç yoğunluğu gerektiren devrelerde tercih edilmektedir. Bu dönüştürücüler kullanılan yarı iletken devre elamanlarının iletme ve kesime girme durumlarına göre sert anahtarlama ve yumuşak anahtarlama dönüştürücüler olarak ayrılmaktadır. Sert anahtarlama dönüştürücülerde anahtarlama süresi içerisinde akım ve gerilimin üst üste binmesi sonucunda anahtarlama kayıpları meydana gelmektedir. Yumuşak anahtarlama dönüştürücülerde bu akım ve gerilimin üst üste binmesinin önüne geçilerek anahtarlama kayıpları azaltılmaktadır. Yumuşak anahtarlama dönüştürücülerde ZCS ve ZVS temel yumuşak anahtarlama teknikleridir. Bu tez

alışmasında ZVS E sınıfı rezonans dönüştürücü kullanılarak LED sürücü devresi gerçekleştirilmiştir.

Yüksek frekanslı ve düşük güçlü LED sürücü uygulamaları için toprak referanslı tek anahtara sahip rezonans dönüştürücüler sıklıkla kullanılmaktadır. Tek anahtarlı rezonans dönüştürücüler arasından E sınıfı rezonans dönüştürücü basit bir yapıya sahip olup yüksek frekanslarda yumuşak anahtarlama şartlarında çalışabilmektedir. Ayrıca, dönüştürücü birçok farklı değişken ve sabit frekans anahtarlama teknikleri ile kontrol edilebilmekte ve çıkışında kontrollü veya kontrolsüz doğrultma devreleri kullanılabilir. Bu tez çalışmasında ZVS E sınıfı rezonans dönüştürücü belirtilen avantajlarından dolayı ve ayrıca özellikle düşük giriş gerilimine ve çıkış gücüne sahip uygulamalar için uygun olduğundan LED sürücü olarak kullanılmıştır. Çalışma kapsamında öncelikle LED sürücünün teorik analizi daha sonra E sınıfı rezonans dönüştürücünün seri rezonans devresinin farklı kalite faktörleri için simülasyonu ve uygulaması gerçekleştirilmiştir.

LED sürücünün teorik analizi ve tasarımı çalışma [26]' ye göre verimi %100 kabul edilerek gerçekleştirilmiştir. Sürücünün 3, 5, 7 ve 9 kalite faktörlerine göre çalışma parametreleri ayrı ayrı hesaplanmış ve tablo halinde sunulmuştur. Elde edilen veriler PSIM programında simülasyon çalışması sırasında kullanılmıştır. Simülasyon çalışmasında elde edilen veriler ve dalga şekilleri ayrıntılı olarak verilmiştir. Simülasyon alışmasında LED sürücünün tasarım kriterleri olan çıkış gücü 48 W, giriş gerilimi 22 V, alışma frekansı 250 kHz ve güç anahtarının %50 doluluk oranı için arzu edilen çıkış gücüne en yakın değerin kalite faktörü 7 için sağlandığı ve bununla birlikte diğer kalite faktörleri için de tasarım kriterlerini karşıladığı görülmektedir. Teorik analiz sonuçları ile simülasyon sonuçlarının uyum içerisinde olduğu gözlenmiştir.

Teorik analiz ve simülasyon çalışmalarını doğrulamak için LED sürücünün prototipi laboratuvar ortamında gerçekleştirilmiştir. Farklı kalite faktörleri için Prototip devreyi oluşturmak amacıyla teorik analiz sonucunda elde edilen tüm devre elamanları laboratuvar ortamında gerçeklemiştir. L_i 'nin gerçekleştirilmesi aşamasında EPCOS firmasına ait MnZn materyalinden üretilmiş N87 malzemeli ETD34/17/11 ferit nüvesi kullanılmıştır. Nüvenin hava aralığı 0,5 mm'dir. L_r 'nin imalatı için L_i de olduğu gibi hava aralığı 0,5 mm olan N87 malzemeli ETD34/17/11 ferit nüvesi kullanılmıştır. Litz tel olarak 0,35 mm çapındaki tellerden 8 tanesi

paralellenerek kullanılmıştır. C_r ve C_s 'yi gerçekleştirmek için farklı değerlerde kutu kılıf tipinde polyester kondansatörlerden yararlanılmıştır. Farklı değerlerdeki bu kondansatörler birbirine paralel bağlanarak teorik tasarımda hesaplanan değerlere olabildiğince yakın değerler elde edilmeye çalışılmıştır. Elde edilen devre elemanları ile sürücünün prototip devresi kurulmuştur. Her bir kalite faktörü için deneysel çalışmalar tekrarlanarak gerekli ölçümler alınmış ve çalışma dalga şekilleri ayrıntılı olarak verilmiştir. Gerçekleştirilen deneysel çalışma sonuçlarına göre LED sürücünün tasarım kriterleri ($P_o=48$ W, $V_i=22$ V, $f_s=250$ kHz ve $D=50\%$) $Q \geq 3$ için sağlanmaktadır. Bununla birlikte artan kalite faktörü ile yaklaşık 48 W çıkış gücünün ve 1,3 A çıkış akımının elde edilmesi için giriş gerilimi V_i 'nin artırılması gerekmektedir. Dahası kalite faktörü $Q \geq 9$ için giriş geriliminin artırılması ile gerekli çıkış gücü ve akımı elde edilmektedir. Bununla birlikte sürücünün güç anahtarının ZVS şartlarında iletme geçmediği görülmektedir. Sonuç olarak gerçekleştirilen teorik analiz ve simülasyon çalışmaları birbiri ile uyum içindedir. Ancak deneysel çalışmalar tam olarak tasarım kriterlerinin tamamını sağlamamaktadır. Bunun nedeni; dönüştürücü veriminin %100 olmaması ve kullanılan LED'in doğrusal olmayan elektriksel yük karakteristiğine sahip olmasıdır.

6. KAYNAKLAR

- [1] Akça, H. LED sürücü ömürlerinin farklı çalışma koşulları altında incelenmesi.
- [2] Eser, O. (2013). Aydınlatma sistemlerinde enerji verimliliğinin incelenmesi (Master's thesis, Marmara Üniversitesi (Turkey)).
- [3] Cheng, H. H., Huang, D. S., & Lin, M. T. (2012). Heat dissipation design and analysis of high-power LED array using the finite element method. *Microelectronics Reliability*, 52(5), 905-911.
- [4] Juntunen, E., Tapaninen, O., Sitomaniemi, A., Jämsä, M., Heikkinen, V., Karppinen, M., & Karioja, P. (2013). Copper-core MCPCB with thermal vias for high-power COB LED modules. *IEEE Transactions on Power Electronics*, 29(3), 1410-1417.
- [5] Chang, M. H., Das, D., Varde, P. V., & Pecht, M. (2012). Light emitting diodes reliability review. *Microelectronics Reliability*, 52(5), 762-782.
- [6] Abdelmlek, K. B., Araoud, Z., Charrada, K., & Zissis, G. (2017). Optimization of the thermal distribution of multi-chip LED package. *Applied Thermal Engineering*, 126, 653-660.
- [7] Alonso, J. M., Viña, J., Vaquero, D. G., Martínez, G., & Osorio, R. (2011). Analysis and design of the integrated double buck–boost converter as a high-power-factor driver for power-LED lamps. *IEEE Transactions on Industrial Electronics*, 59(4), 1689-1697.
- [8] Esteki, M., Khajehoddin, S. A., Safaee, A., & Li, Y. (2023). LED systems applications and LED driver topologies: A review. *IEEE Access*, 11, 38324-38358.
- [9] Rashid, M. H. (Ed.). (2017). *Power electronics handbook*. Butterworth-heinemann.
- [10] Bodur, H., (2003), “DC-DC Dönüştürücülerde Yumuşak Anahtarlama Teknikleri”, YTÜ Ders Notları, 2003, YTÜ, İstanbul.
- [11] Liu, K. H., & Lee, F. C. (1984, November). Resonant switches-A unified approach to improve performances of switching converters. In *INTELEC'84-International Telecommunications Energy Conference* (pp. 344-351). IEEE.

- [12] Kaysal, A., Köroğlu, S., Oğuz, Y., & Kaysal, K. (2023). Kendinden ayarlı bulanık PI denetleyici tabanlı DA-DA dönüştürücü tasarımı ve deneysel uygulaması. Gazi Üniversitesi Mühendislik Mimarlık Fakültesi Dergisi, 38(1), 483-496
- [13] Doğangüneş, S. (2016). Design of digitally controlled llc resonant converter (Master's thesis, Fen Bilimleri Enstitüsü).
- [14] Derin, A. R. Yumuşak anahtarlama tipi düşüren tip DA-DA dönüştürücü ile LED sürücü tasarımı ve uygulaması (Master's thesis, Fen Bilimleri Enstitüsü).
- [15] Li, Y., & Ruan, X. (2021, November). Constant Switching Frequency Controlled Class E DC-DC Converter with Wide Input Voltage Range. In 2021 IEEE 1st International Power Electronics and Application Symposium (PEAS) (pp. 1-5). IEEE.
- [16] Tuncer, M. (2019). LED sürücü devresinin tasarım ve simülasyonu (Master's thesis, Fen Bilimleri Enstitüsü).
- [17] Çorak, İ. (2022). LED entegre edilmiş endoskopi sistemi için LED sürücü tasarımı (Master's thesis).
- [18] Al-Hajm, S. Y. S. Dağıtık enerji kaynakları için yumuşak anahtarlama DA-DA dönüştürücü tasarımı ve analizi (Master's thesis, Fen Bilimleri Enstitüsü).
- [19] Akdeniz, S. (2018). LED sürme devrelerinin incelenmesi, simülasyonda karşılaştırılması ve izolasyonlu bir uygulama devresinin gerçekleştirilmesi (Master's thesis, Fen Bilimleri Enstitüsü).
- [20] Nil, M. (2009). Eviricilerde yeni bir yumuşak anahtarlama devresinin tasarımı, gerçekleştirilmesi ve analizi.
- [21] Wang, Y., Huang, J., Shi, G., Wang, W., & Xu, D. (2015). A single-stage single-switch LED driver based on the integrated SEPIC circuit and class-E converter. IEEE Transactions on Power Electronics, 31(8), 5814-5824.
- [22] Wang, Y., Huang, J., Wang, W., & Xu, D. (2016). A single-stage single-switch LED driver based on class-E converter. IEEE Transactions on Industry Applications, 52(3), 2618-2626
- [23] Zhang, S., Qiu, Y., Wang, Y., Liu, X., Alonso, J. M., & Xu, D. (2017, October). A high-power-factor integrated-stage AC-DC LED driver based on flyback-class E converter. In 2017 IEEE Industry Applications Society Annual Meeting (pp. 1-5). IEEE.

- [24] Escultero, A., & Odulio, C. M. (2018, October). Constant current frequency tracking in LCC converters. In TENCON 2018-2018 IEEE Region 10 Conference (pp. 2330-2334). IEEE.
- [25] Zhu, W., & Sekiya, H. (2020, March). A 1MHz class-E2 single-stage PFC converter with frequency control. In 2020 IEEE Applied Power Electronics Conference and Exposition (APEC) (pp. 2041-2047). IEEE.
- [26] Kazimierczuk, M. K., & Czarkowski, D. (2012). Resonant power converters. John Wiley & Sons.
- [27] Gürbüz, Y. (2012). Güç Faktörü Düzeltmeli Güç LED Sürücü Tasarımı ve Gerçekleştirilmesi. Selçuk Üniversitesi Fen Bilimleri Enstitüsü, Konya.
- [28] De Almeida, A., Santos, B., Paolo, B., & Quicheron, M. (2014). Solid state lighting review–Potential and challenges in Europe. *Renewable and Sustainable Energy Reviews*, 34, 30-48.
- [29] Singh, R., Mochizuki, M., Yamada, T., & Nguyen, T. (2020). Cooling of LED headlamp in automotive by heat pipes. *Applied Thermal Engineering*, 166, 114733
- [30] Martínez-Pérez, J. R., Martínez-Olmos, A., Santaella, J. J., Escobedo, P., López-Ruiz, N., & Carvajal, M. A. (2024). LED biasing scheme with thermal compensation for automotive industry applications. *Results in Engineering*, 21, 101699.
- [31] Hao, T. (2013). Analysis and Design of High Power Factor LED Drivers Without Electrolytic Capacitor. Queen's University (Canada).
- [32] Lu, X. Y., Hua, T. C., Liu, M. J., & Cheng, Y. X. (2009). Thermal analysis of loop heat pipe used for high-power LED. *Thermochimica Acta*, 493(1-2), 25-29.
- [33] Çelik, İ. (2016). Güç LEDli aydınlatma uygulamaları için tek katlı güç faktörü düzeltmeli sürücülerin tasarımı ve gerçekleştirilmesi (Master's thesis, Fen Bilimleri Enstitüsü).
- [34] 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.
- [35] Liu, S., Luo, X., 2011. LED Packaging For Lighting Applications, Chemical Industry Press, ISBN 978-0-470-82785-7, Noida, pp. 211-232.

- [36] Mach, L., Clemens J., Poppe, A., 2014. Thermal Management for LED Applications, Springer Science-Business media, ISBN 978-1-4614-5090-0, New York, pp. 7-18.
- [37] Krarti, M., 2012. Weatherization and Energy Efficiency Improvement for Existing Homes, CRC Press, ISBN 978-1-4398-5163-0, Boca Raton, pp. 89-91.
- [38] Seoul Semiconductor. (2021). ZC40 Product Datasheet – Z-Power COB Series.
- [39] Yılmaz, H., & Hava, A. M. (2011). G-LED Uygulamaları İçin Güç Katsayısı Düzelticili Tek Katlı AC-DC Dönüştürücülerin İncelenmesi. EVK 2011, IV. Enerji Verimliliği ve Kalitesi Sempozyumu, 144-148.
- [40] Novastar. (2024). Understanding the Differences Between DIP, SMD, and COB in LED Screen Installation.
- [41] TWLED Display. (2023). SMD LED Display vs COB vs GOB.
- [42] Zhang, R., Wen, Z., Li, B., et al. (2022). Research on COB-LED light source with tunable CCT based on screen printing and flip chip technology. Optical and Quantum Electronics, 54, 79.
- [43] ViewSonic. (2024). GOB LED Technology Explained and Its Benefits
- [44] MarketsandMarkets. (2024). LED Packaging Market – Forecast & Trends.
- [45] Steigerwald, D. A., Bhat, J. C., Collins, D., Fletcher, R. M., Holcomb, M. O., Ludowise, M. J., ... & Rudaz, S. L. (2002). Illumination with solid state lighting technology. IEEE journal of selected topics in quantum electronics, 8(2), 310-320.
- [46] Haitz, R., & Tsao, J. Y. (2011). Solid-state lighting: ‘The case’ 10 years after and future prospects. physica status solidi (a), 208(1), 17-29.
- [47] Sze, S. M., Li, Y., & Ng, K. K. (2021). Physics of semiconductor devices. John wiley & sons.
- [48] Pimputkar, S., Speck, J. S., DenBaars, S. P., & Nakamura, S. (2009). Prospects for LED lighting. Nature photonics, 3(4), 180-182.
- [49] Narendran, N., & Gu, Y. (2005). Life of LED-based white light sources. Journal of display technology, 1(1), 167.
- [50] Fang, Y., Wong, S. H., & Ling, L. H. S. (2009, February). A power converter with pulse-level-modulation control for driving high brightness LEDs.

In 2009 Twenty-Fourth Annual IEEE Applied Power Electronics Conference and Exposition (pp. 577-581). IEEE.

- [51] Björkström, M. (2017). Utveckling och realisering av belysningsstyrningssystem för segelbåtar.
- [52] Karayılan, T. (2021). Güç LED'lerinde yapı parametrelerinin ışık emisyonuna etkilerinin belirlenmesi (Master's thesis, Kilis 7 Aralık Üniversitesi, Lisansüstü Eğitim Enstitüsü)
- [53] Demirtürk T., “Elektronik Ders Notları 4”
- [54] Narendran, N., Gu, Y., Jayasinghe, L., Freyssinier, J. P., & Zhu, Y. (2007, November). Long-term performance of white LEDs and systems. In Proceeding of first international conference on white LEDs and solid state lighting (pp. 174-179).
- [55] Akbulut, M., & Gül, Ö. (2009). LED’li Işık Kaynaklarının Karakteristiklerini Belirlemeye Yönelik Ölçmeler. V. Ulusal Aydınlatma Sempozyumu ve Sergisi, 7-8.
- [56] Cheng, J. H., Liu, C. K., Chao, Y. L., & Tain, R. M. (2005, June). Cooling performance of silicon-based thermoelectric device on high power LED. In ICT 2005. 24th International Conference on Thermoelectrics, 2005. (pp. 53-56). IEEE.
- [57] Zissis, G., Bertoldi, P., & Serrenho, T. (2021). Update on the status of LED-lighting world market since 2018
- [58] Loo, K. H., Lun, W. K., Tan, S. C., Lai, Y. M., & Chi, K. T. (2009). On driving techniques for LEDs: Toward a generalized methodology. IEEE transactions on power electronics, 24(12), 2967-2976.
- [59] Chiu, H. J., Lo, Y. K., Chen, J. T., Cheng, S. J., Lin, C. Y., & Mou, S. C. (2009). A high-efficiency dimmable LED driver for low-power lighting applications. IEEE Transactions on Industrial Electronics, 57(2), 735-743.
- [60] Demir, M. (2019). IP66 sınıfı yüksek güçlü bir LED sürücü devresinin güvenilirlik analizi.
- [61] Hu, Y., Huber, L., & Jovanović, M. M. (2010). Single-stage, universal-input AC/DC LED driver with current-controlled variable PFC boost inductor. IEEE Transactions on power Electronics, 27(3), 1579-1588.

- [62] K. Gürçam, “LED sürücü devre tasarımı ve uygulaması”, Doktora Tezi, Fen Bilimleri Enstitüsü, Van Yüzüncü Yıl Üniversitesi. Van, Türkiye, 2023, 844031
- [63] İnal İ., Optimization of Illumination Yields of Buck-Based Power LED Drivers, Yüksek Lisans Tezi, Gaziantep Üniversitesi, Fen Bilimleri Enstitüsü, Gaziantep, 2012, 318447.
- [64] Pressman, A. (1997). Switching power supply design. McGraw-Hill, Inc.
- [65] Perreault, D. J., Hu, J., Rivas, J. M., Han, Y., Leitermann, O., Pilawa-Podgurski, R. C. & Sullivan, C. R. (2009, February). Opportunities and challenges in very high frequency power conversion. In 2009 Twenty-Fourth Annual IEEE Applied Power Electronics Conference and Exposition (pp. 1-14). IEEE.
- [66] Koçyiğit, M. B. (2023). Havacılık Sistemleri İçin LED Aydınlatma Modüllerinin Ve Kontrol Ünitelerinin Tasarımı (Master's thesis, Kayseri Erciyes Üniversitesi Fen Bilimleri Enstitüsü).
- [67] Li, Y., Ruan, X., Dai, J., & Wang, Y. (2018, October). Design considerations for the wide input-voltage range Class E dc-dc converter with ON-OFF control in multi-megahertz applications. In IECON 2018-44th Annual Conference of the IEEE Industrial Electronics Society (pp. 1146-1151). IEEE.
- [68] Çöl, A. (2021). İki yönlü tam köprü dönüştürücüler için ilave gerilim stressiz yumuşak anahtarlama yeni bir kontrol yöntemi (Master's thesis, Erzincan Binali Yıldırım Üniversitesi Fen Bilimleri Enstitüsü).
- [69] Bodur, H., Bakan, A., & Baysal, M. (2003). A detailed analytical analysis of a passive resonant snubber cell perfectly constructed for a pulse width modulated dc–dc buck converter. *Electrical Engineering*, 85, 45-52.
- [70] Nacar, S., & Öncü, S. (2019). Hydrogen production system with fuzzy logic-controlled converter. *Turkish Journal of Electrical Engineering and Computer Sciences*, 27(3), 1885-1895.
- [71] Koç, Y. (2015). Yumuşak anahtarlama çift katlı yükselten da-da dönüştürücü tasarımı, analizi ve uygulaması (Master's thesis, Fen Bilimleri Enstitüsü).

- [72] Aksoy, G. (2007). Yeni Bir Yumuşak Anahtarlama DA-DA Dönüştürücünün Tasarım, Analiz ve Uygulaması (Doctoral dissertation, doktora tezi, basılmamış). YTÜ, Fen Bilimleri Enstitüsü, İstanbul).
- [73] Bodur, H., Güç Elektroniğı, 2. Baskı, Birsal Yayınevi, İstanbul, 2012
- [74] Ergin, M.Ş. (2023). Yumuşak Anahtarlama Güç Dönüştürücü Tasarımı ve Uygulaması (Master's thesis, Fen Bilimleri Enstitüsü).
- [75] Özden Zengin, Ö. High frequency power supply design (Master's thesis, Fen Bilimleri Enstitüsü).
- [76] Winder, S. (2016). Power supplies for LED driving. Newnes.
- [77] TDK. (2022). ZETD 34/17/11Product Datasheet – Ferrites and accessories



ÖZGEÇMİŞ

Kişisel Bilgiler	
Adı Soyadı	Onur ZENCİR
Doğum Yeri	
Doğum Tarihi	
Uyruğu	
Telefon	
E-Posta Adresi	
Web Adresi	

	Eğitim Bilgileri
	Lisans
Üniversite	Kocaeli Üniversitesi
Fakülte	Mühendislik Fakültesi
Bölümü	Elektrik Mühendisliği
Mezuniyet Yılı	2017

	Yüksek Lisans
Üniversite	Bandırma Onyedli Eylül
Enstitü Adı	Lisansüstü Eğitim Enstitüsü
Anabilim Dalı	Elektrik-Elektronik Mühendisliği
Programı	Elektrik-Elektronik Mühendisliği Tezli Yüksek Lisans

Makale ve Bildiriler
O. ZENCİR and S. NACAR, “Rezonans Dönüştürücü Temelli LED Sürücünün Çalışma Parametrelerinin Farklı Kalite Faktörleri için Karşılaştırılması” IV. International Ordu Scientific Research Congress, 304-312,2025.