

Hybrid Controlled Zero Voltage Switching SEPIC Converter for Constant-Current LED Driver

Kenan ÜNAL^{1*} 

^{1*}Gazi Üniversitesi, TUSAŞ Kazan Meslek Yüksekokulu, Motorlu Araçlar ve Ulaştırma Teknolojileri Bölümü, Ankara, Türkiye

Article Info

Research article
Received: 09/12/2025
Revision: 29/01/2026
Accepted: 09/02/2026

Keywords

-Quasi Resonant Converter
-LED Driver
-ZVS SEPIC Converter
-Polynomial Regression

Makale Bilgisi

Araştırma makalesi
Başvuru: 09/12/2025
Düzeltilme: 29/01/2026
Kabul: 09/02/2026

Anahtar Kelimeler

-Kısmi Rezonans Konvertör
-LED Sürücüsü
-SGA SEPIC Güç
Dönüştürücü
-Polinom Regresyon

Graphical/Tabular Abstract (Grafik Özet)

Polinom regresyon temelli frekans tahmini ve gözlem tabanlı hibrit kontrol ile SGA SEPIC LED sürücüsü, analitik t_{off} modeli ile yumuşak anahtarlama koruyarak geniş giriş gerilimi değişimlerinde 1.3 A sabit çıkış akımı sağlar. /The ZVS SEPIC LED driver uses polynomial regression and observation based hybrid control to estimate frequency. It also uses the analytical t_{off} model to keep soft switching, which provides a constant output current of 1.3 A over a large input voltage range.

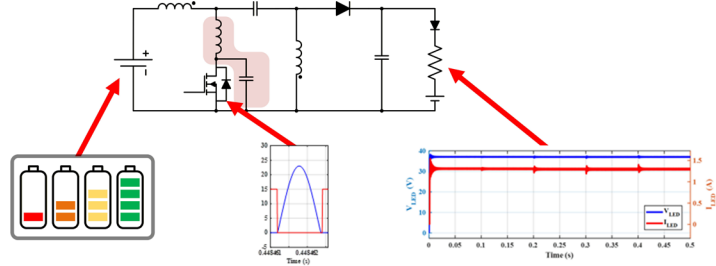


Figure A: Proposed hybrid quasi resonant ZVS SEPIC LED driver system. /Şekil A: Önerilen hibrit kısmi rezonanslı SGA SEPIC LED sürücü sistemi.

Highlights (Önemli noktalar)

- Hibrit kontrol ile geniş giriş aralığında kararlı 1.3 A sabit akım sağlanmıştır. / Stable 1.3 A constant current is achieved over wide input variations using hybrid control.
- Anahtarlama frekansı, giriş gerilimine bağlı olarak polinom regresyon ile gerçek zamanlı belirlenmiştir. / The switching frequency is determined in real time with polynomial regression based on input voltage.
- Analitik t_{off} modeli ile tüm çalışma aralığında SGA korunmuştur. / ZVS is maintained across the all operating range using an analytical t_{off} model.

Aim (Amaç): Bu çalışmanın amacı, değişken giriş gerilimlerinde yumuşak anahtarlama olarak çalışan ve kararlı sabit çıkış akımı sağlayan LED sürücüsünün hibrit kontrolle SGA SEPIC DA-DA dönüştürücüsünün geliştirilmesidir. /The aim of this study is the development of a hybrid controlled ZVS SEPIC DC-DC converter that operates with soft switching under variable input voltage and provides a stable constant output current for the LED driver.

Originality (Özgünlük): Bu çalışmanın özgünlüğü, polinom regresyon temelli frekans tahmini, gözlem tabanlı düzeltme ve analitik t_{off} modelinin birleştirilerek SEPIC LED sürücüsünde SGA koşullarında sabit akım kontrolünün sağlanmasıdır. /The originality of this study is the integration of polynomial regression based frequency prediction, observation based correction, and an analytical t_{off} model to provide constant current control under ZVS condition in a SEPIC LED driver.

Results (Bulgular): Benzetim sonuçları, önerilen hibrit kontrollü SGA SEPIC dönüştürücüsünün tüm çalışma koşullarında ZVS sağlayarak daha düşük anahtarlama kayıpları ile kararlı 1.3 A çıkış akımı sağladığını göstermektedir. /Simulation results show that the proposed hybrid controlled ZVS SEPIC converter provides ZVS under all operating conditions, resulting in lower switching losses and provide a constant 1.3 A output current.

Conclusion (Sonuç): Bu çalışma, hibrit kontrol ile tüm çalışma koşullarında SGA şartlarını sağlayan SGA SEPIC LED sürücüsünün etkinliğini doğrulamaktadır. /This study validates the effectiveness of the ZVS SEPIC LED driver, which achieve ZVS under all operating conditions with hybrid control.



Hybrid Controlled Zero Voltage Switching SEPIC Converter for Constant-Current LED Driver

Kenan ÜNAL^{1*}

^{1*}Gazi Üniversitesi, TUSAŞ Kazan Meslek Yüksekokulu, Motorlu Araçlar ve Ulaştırma Teknolojileri Bölümü, Ankara, Türkiye

Article Info

Research article

Received: 09/12/2025

Revision: 29/01/2026

Accepted: 09/02/2026

Keywords

-Quasi Resonant Converter
-LED Driver
-ZVS SEPIC Converter
-Polynomial Regression

Abstract

In this study, a quasi resonant zero voltage switching (ZVS) SEPIC DC–DC converter is proposed as a constant current LED driver powered by a battery or a DC source. The proposed converter provides constant output current regulation using a hybrid control strategy that integrates a polynomial regression based model with an observation based algorithm. The polynomial regression model predicts the appropriate switching frequency in real time as a function of the input voltage, while the observation based correction mechanism dynamically regulates the output current at its reference level. To preserve soft switching conditions, a turn-off time (t_{off}) model derived from the analytical calculation of the converter is implemented. This allows enabling efficient ZVS quasi resonant operation across the entire operating range. Simulation studies conducted in the MATLAB/Simulink show that the proposed hybrid control approach maintains a constant 1.3 A output current with reduced switching losses. The results show that the hybrid controlled quasi resonant ZVS SEPIC converter offers higher efficiency compared to conventional PWM controlled SEPIC converters.

Sabit Akım LED Sürücü için Hibrit Kontrollü Sıfır Gerilim Anahtarlama SEPIC Dönüştürücü

Makale Bilgisi

Araştırma makalesi

Başvuru: 09/12/2025

Düzeltilme: 29/01/2026

Kabul: 09/02/2026

Anahtar Kelimeler

-Kısmi Rezonans Konvertör
-LED Sürücü
-SGA SEPIC Güç Dönüştürücü
-Polinom Regresyon

Öz

Bu çalışmada, batarya veya doğru akım (DA) kaynakla beslenen sabit akımlı LED sürücüsü için kısmi rezonanslı sıfır gerilim anahtarlama (SGA) SEPIC DA-DA dönüştürücü önerilmektedir. Önerilen dönüştürücü, giriş gerilimindeki değişimlere karşı kararlı çıkış akımı regülasyonunu polinom regresyon tabanlı bir model ile gözlem tabanlı bir algoritmanın birleştirildiği hibrit bir kontrol stratejisi ile sağlamaktadır. Polinom regresyon modeli, giriş geriliminin bir fonksiyonu olarak uygun anahtarlama frekansını gerçek zamanlı olarak tahmin etmekte, gözlem tabanlı düzeltme mekanizması ise çıkış akımının referans değerinden olan sapmaları dinamik olarak sabit tutmaktadır. Yumuşak anahtarlama koşullarının korunması için devrenin analizinden türetilmiş bir kapama süresi (t_{off}) modeli uygulanmış olup, bu sayede dönüştürücü tüm çalışma aralığında verimli SGA kısmi rezonanslı çalışma gerçekleştirmektedir. MATLAB/Simulink ortamında yapılan benzetim çalışmaları, önerilen hibrit kontrol yaklaşımının 1.3 A sabit çıkış akımını düşük anahtarlama kayıplarıyla koruduğunu göstermektedir. Elde edilen sonuçlar, hibrit SGA SEPIC dönüştürücünün geleneksel DGM kontrollü SEPIC dönüştürüclere kıyasla daha yüksek verimlilik sunmaktadır.

1. GİRİŞ (INTRODUCTION)

Batarya veya doğru akım (DA) kaynakla beslenen güç elektroniği sistemleri, sınırlı enerji kapasitesi nedeniyle yüksek verimlilik gerektiren uygulamalarda önemli bir yere sahiptir. Bu tür yapılarda giriş gerilimi yük koşullarına, batarya seviyesine veya çevresel etkilere bağlı olarak geniş aralıkta değişebildiğinden, kullanılan dönüştürücülerin bu değişimlere uyum sağlayarak kararlı ve verimli çalışması da önem taşımaktadır. Güç elektroniği tabanlı dönüştürücüler; yalnızca

temel güç bileşenlerini değil, aynı zamanda aydınlatma, kontrol birimleri, soğutma ve haberleşme gibi çeşitli yardımcı sistemleri beslemeye de rol üstlenmektedir. Bu nedenle, depolanan enerjinin mümkün olan en verimli şekilde kullanılabilmesi için dönüştürücü topolojilerinin ve kontrol stratejilerinin optimize edilmesi gerekmektedir.

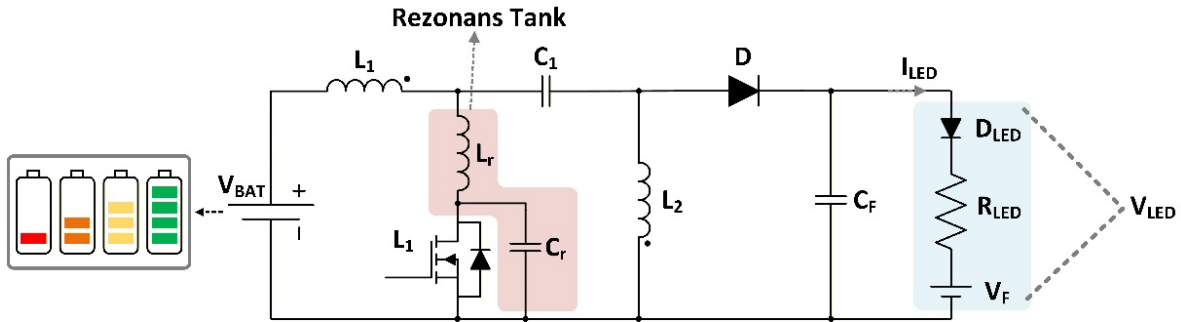
Batarya destekli güç elektroniği sistemlerinde, özellikle far ve iç aydınlatma uygulamalarında kullanılan LED'ler, sistemin toplam güç tüketimine

ve yük profiline olumlu yönde katkı sağlamaktadır. LED'ler; düşük güç tüketimi, uzun ömür, kompakt yapı ve yüksek ışık verimliliği gibi avantajları nedeniyle tercih edilmektedir [1–3]. Ancak, LED'lerin doğrudan batarya gerilimiyle beslenememesi, kararlı bir akıma ihtiyaç duymaları ve geniş giriş gerilimi değişimlerine rağmen sabit çıkış akımının korunması gerekliliği, bu sistemlerde uygun güç dönüştürücülerinin kullanılmasını gerektirmektedir. LED eşik gerilimi ile enerji kaynağı arasındaki gerilim seviyelerinin farklı olması dikkate alındığında, kullanılacak güç dönüştürücüleri temel olarak alçaltıcı (buck) ve yükseltici (boost) tip DA-DA dönüştürücüler olarak sınıflandırılabilir [4]. LED'leri sürmek için iki temel yöntem bulunmaktadır. Bunlar sabit gerilim (SG) ve sabit akım (SA) olarak belirtilebilir. LED'lerin doğrusal olmayan karakteristikleri nedeniyle, gerilimdeki küçük değişimler LED akımında önemli artışlara yol açabilmektedir [4]. Ayrıca LED'ler çalışırken ısınmakta ve bu durum aynı gerilim seviyesinde çekilen akımın değişmesine de neden olabilir. Bu sebeple, LED'lerin SA ile sürülmesi, kararlı çalışma ve uzun kullanım ömrü açısından önemlidir [4–6].

Ayrıca, LED sürücülerin yüksek frekanslarda çalıştırılması da pasif bileşenlerin özellikle de bobin boyutlarının küçülmesine olanak sağlayarak devre boyutunun azaltılmasına yardımcı olur [7]. Ancak, geleneksel darbe genişlik modülasyonu (DGM) tabanlı DA-DA güç dönüştürücüler yüksek anahtarlama frekanslarında çalıştığında, güç anahtarı üzerinden akan akım ile anahtar üzerindeki gerilimin çakışması sonucunda anahtarlama kayıpları olarak bilinen ek kayıplara ve elektromanyetik girişime (EMI) neden olur [8–10]. Batarya veya DA kaynakla beslenen güç elektroniği sistemlerinin sınırlı bir enerji kaynağına sahip olduğu göz önünde bulundurulduğunda, bu kayıpların en aza indirilmesi büyük önem taşımaktadır. Anahtarlama kayıplarını azaltmak için DA-DA dönüştürücülerin Sıfır Akımda

Anahtarlama (SAA) veya Sıfır Gerilimde Anahtarlama (SGA) koşulları altında çalışması gerekir [6], [11]. SAA veya SGA çalışma durumunda, açılma ve kapanma geçişleri sırasında anahtar akımı ve gerilimi birbiriyle çakışmaz ve bu sayede anahtarlama kayıpları minimuma indirilir [12]. Bu amaçla, düşük güçlü uygulamalarda SAA veya SGA koşullarında çalışan kısmi rezonanslı güç dönüştürücüleri tercih edilebilir. Kısmi rezonanslı güç dönüştürücüleri geleneksel DGM anahtarlama buck, boost veya buck-boost dönüştürücülerine ek bir bobin ve kapasitör eklenip bir rezonans kolu oluşturulmasıyla elde edilirler [7], [13]. SGA ve SAA tabanlı kısmi rezonanslı güç dönüştürücüleri yüksek frekanslarda düşük anahtarlama kayıplarıyla anahtarlatabilirler [13], [14]. Bu durum ise daha yüksek verim, düşük hacim ve azaltılmış anahtarlama kayıpları sağlar.

Bu çalışmada, batarya veya DA kaynakla beslenen ve giriş geriliminin geniş aralıkta değişebildiği uygulamalarda LED aydınlatmanın sabit akımda çalışmasını sağlamak amacıyla SGA tabanlı bir SEPIC dönüştürücü yapısı önerilmektedir. Geleneksel SEPIC topolojilerinden farklı olarak, önerilen tasarımda çıkış gücü, anahtarlama frekansının dinamik olarak ayarlanmasıyla kontrol edilmektedir. Bu dinamik kontrol yaklaşımı sayesinde hem yüksek verimlilik hem de kararlı bir akım regülasyonu elde edilmektedir. Geliştirilen hibrit kontrol algoritmasında, polinom regresyon tabanlı bir frekans kestirimcisi ile gözlem tabanlı bir düzeltme mekanizması birleştirilmiş olup, uygun anahtarlama frekansı giriş gerilimindeki değişimlere göre gerçek zamanlı olarak belirlenmektedir. Böylece çıkış akımının referans değerinden sapmaları etkin bir şekilde önlenmiş olur. Ayrıca dönüştürücüde yumuşak anahtarlama koşullarının sürdürülebilmesi için devrenin analizinden elde edilen kapanma süresi (t_{off}) modeli tanımlanmış ve bu sayede yapının SGA bölgesinde güvenli çalışması sağlanmıştır.



Şekil 1. SGA SEPIC DA-DA Güç Dönüştürücüsü (ZVS SEPIC DA-DA Power Converter)

MATLAB/Simulink ortamında elde edilen benzetim sonuçları, önerilen hibrit kontrol yaklaşımının giriş gerilimindeki değişimlere karşı LED akımını başarıyla sabit tuttuğunu göstermektedir.

2. SGA SEPIC Dönüştürücü (ZVS SEPIC Converter)

SGA SEPIC güç dönüştürücüsüne sahip LED sürücünün devre şeması Şekil 1’de sunulmuştur. Şekil 1’de, L_r rezonans indüktansını, C_r rezonans kapasitörünü, L_1 ve L_2 ise SEPIC dönüştürücüsünün indüktanslarını ifade etmektedir. Yük kısmında ise D_{LED} , R_{LED} ve V_F ise LED’in eşdeğer devre parametrelerini temsil etmektedir. SGA SEPIC güç dönüştürücüsünün gerilim kazancı (M_v), kalite faktörü (Q) ve rezonans açısıl frekansı (ω_r) sırasıyla (1), (2) ve (3) numaralı eşitlikler kullanılarak hesaplanabilir [15].

$$M_v = \frac{V_{LED}}{V_{BAT}} \quad (1)$$

$$Q = \frac{R_{LED}}{\sqrt{L_r/C_r}} \quad (2)$$

$$\omega_r = \frac{1}{\sqrt{L_r C_r}} \quad (3)$$

SGA SEPIC dönüştürücüsünün teorik dalga şekilleri Şekil 2’de sunulmuştur [16]. Şekil 2’de görüldüğü üzere, teorik dalga şekilleri belirli zaman aralıklarına ayrılmış ve karşılık gelen modlar tanımlanmıştır. Teorik analizlerde, SGA SEPIC dönüştürücüsünün kararlı durum koşullarında çalıştığı ve tüm devre elemanlarının ideal olduğu varsayılmaktadır. Bu varsayımlar doğrultusunda, dönüştürücüsünün çalışma modları ve teorik hesaplamaları aşağıda sunulmuştur [16], [17].

Mod I (Mode I)

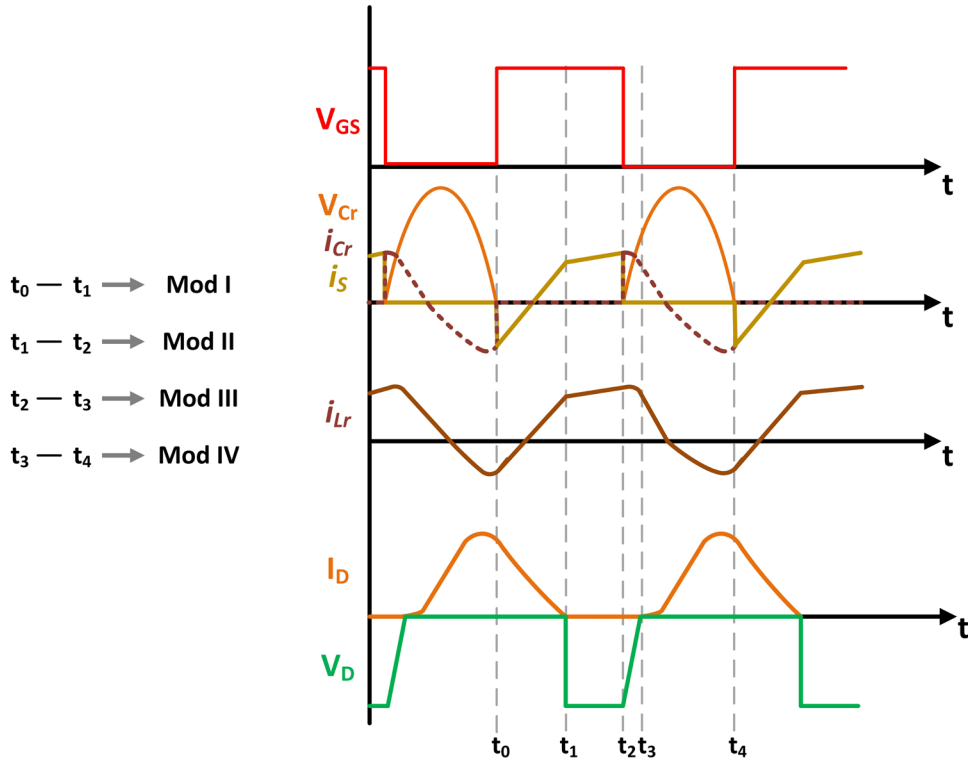
Mod I’de güç anahtarı (S) ve diyot (D) iletimdedir. Bu modda, S üzerinden akan akım Eşitlik 4’e göre doğrusal olarak artmaktadır.

$$i_s = \frac{(I_{IN} - I_{LED})Q\omega t}{\left(\frac{f}{f_r}\right)M_v} - i_s(0) \quad (4)$$

S anahtarı üzerinden akan akım arttıkça, diyot akımı (I_D) Eşitlik 5’e göre azalmaktadır.

$$I_D = (I_{IN} + I_{LED}) - \frac{(I_{IN} + I_{LED})Q\omega t}{\left(\frac{f}{f_r}\right)M_v} - i_s(0) \quad (5)$$

Mod I, I_D ’nin sifıra düştüğü t_1 anında sona erer.



Şekil 2. SGA SEPIC DA-DA Dönüştürücüsünün Teorik Dalga Şekilleri (Theoretical Waveforms of ZVS SEPIC DC-DC Converter)

Mod II (Mode II)

Mod II’de güç anahtarı iletimde olup D diyodu ise ters kutuplanmaktadır. Bu durumda, anahtar üzerinden akan akım (i_s) hafif artsa da yaklaşık sabit kabul edilebilir ve Eşitlik 6 hesaplanabilir.

$$i_s = I_{IN} + I_{LED} \quad (6)$$

Mod II’de, D diyodu üzerindeki gerilim (v_D) Eşitlik 7 ile ifade edilir. Bu gerilim negatif polaritelidir ve giriş ile çıkış gerilimlerinin toplamına eşittir. Mod II, güç anahtarının yalıtıma geçmesiyle sona erer.

$$v_D = -(V_{IN} + V_{LED}) \quad (7)$$

Mod III (Mode III)

Mod III’de hem S anahtarı hem de D diyodu yalıtımdadır. Güç anahtarı S yalıtıma geçtiğinde, C_r kapasitörü uçlarındaki gerilim (v_{Cr}) artmaya başlar. Bu gerilim Eşitlik 8 ile ifade edilebilir.

$$v_{Cr} = \frac{M_v(V_{IN} + V_{LED})}{\left(\frac{f}{f_r}\right)Q} (\omega t - 2\pi D) \quad (8)$$

Ayrıca bu mod sırasında, diyot gerilimi (v_D), Mod II’deki değerden başlayarak doğrusal bir şekilde yükselir ve sifıra ulaşana kadar artmaya devam eder.

$$v_D = (V_{IN} + V_{LED}) \left(-1 + \left[\frac{M_v}{\left(\frac{f}{f_r}\right)Q} (\omega t - 2\pi D) \right] \right) \quad (9)$$

Bu modda v_D Eşitlik 9 ile ifade edilir. Mod III ise v_D geriliminin sifıra ulaşmasıyla sona erer.

$$t_3 - t_2 = \frac{Q}{\omega_r M_v} \quad (10)$$

Mod III’ün zaman aralığı Eşitlik 10 kullanılarak hesaplanır.

Mod IV (Mode IV)

Bu modun başlangıcında D diyodu yalıtım durumundadır ve eşik gerilimi aşıldıktan sonra ilettime geçer. Ayrıca bu mod boyunca S anahtarı yalıtımda kalır. Mod IV boyunca v_{Cr} gerilimi önce maksimum değerine kadar yükselir, ardından sifıra doğru azalır. Bu süreç boyunca, C_r kapasitörü

uçlarındaki gerilim Eşitlik 11 kullanılarak hesaplanabilir.

$$v_{Cr} = (V_{IN} + V_{LED}) \left(1 + \frac{M_v}{Q} \sin \left(\frac{\omega t - \omega t_3}{\left(\frac{f}{f_r}\right)} \right) \right) \quad (11)$$

I_D akımı ise Eşitlik 12 kullanılarak hesaplanabilir.

$$I_D = (I_{IN} + I_{LED}) \left(1 - \cos \left(\frac{\omega t - \omega t_3}{\left(\frac{f}{f_r}\right)} \right) \right) \quad (12)$$

Rezonans bobininden akan akım, anahtar ve kapasitör üzerinden akan akımların toplamına eşittir ve Eşitlik 13 kullanılarak hesaplanabilir.

$$i_{Lr} = (I_{IN} + I_{LED}) \cos \left(\frac{\omega t - \omega t_3}{\left(\frac{f}{f_r}\right)} \right) \quad (13)$$

Bu mod, S anahtarı ilettime geçtiğinde sona erer. SGA koşulunun sağlanabilmesi için v_{Cr} geriliminin t_4 anında sifıra ulaşması gerekir. Mod IV’ün zaman aralığı Eşitlik 14 kullanılarak hesaplanır.

$$t_4 - t_3 = \frac{1}{\omega_r} \left[\pi + \sin^{-1} \left(\frac{Q}{M_v} \right) \right] \quad (14)$$

Mod III ve Mod IV’ün zaman aralıkları dikkate alındığında, SGA koşulunun sağlanabilmesi için anahtar S’nin kapalı kaldığı süre (t_{off}) Eşitlik 15 kullanılarak hesaplanabilir.

$$t_{off} = \frac{1}{\omega_r} \left[\frac{Q}{M_v} + \pi + \sin^{-1} \left(\frac{Q}{M_v} \right) \right] \quad (15)$$

Eşitlik 15’den görüldüğü üzere, SGA’nın sağlanması için kritik bir parametre olan t_{off} süresi, rezonans açılmal frekansı üzerinden anahtarlama frekansına bağlıdır. Bu nedenle, anahtarlama frekansındaki değişimlere bağlı olarak t_{off} süresinin yeniden hesaplanması gerekmektedir.

3. Önerilen Hibrit Kontrol Algoritması (Proposed Hybrid Control Algorithm)

Polinom regresyon tabanlı kontrol algoritmasının geliştirilmesi için, farklı giriş gerilimleri altında sabit çıkış akımını korumak amacıyla gereken

anahtarlama frekansları öncelikle belirlenmiş ve Tablo 1’de sunulmuştur.

Tablo 1. Simülasyondan elde edilen anahtarlama frekansının giriş gerilimine bağlı değişimi (The variation of the switching frequency obtained from the simulation as a function of the input voltage)

V_{BAT}	f
14.2 V	87 kHz
13.5 V	79.5 kHz
13 V	76.5 kHz
12.5	72.5 kHz
12 V	68 kHz
11.5 V	64 kHz
11 V	59 kHz
10.5 V	55 kHz
10 V	50 kHz

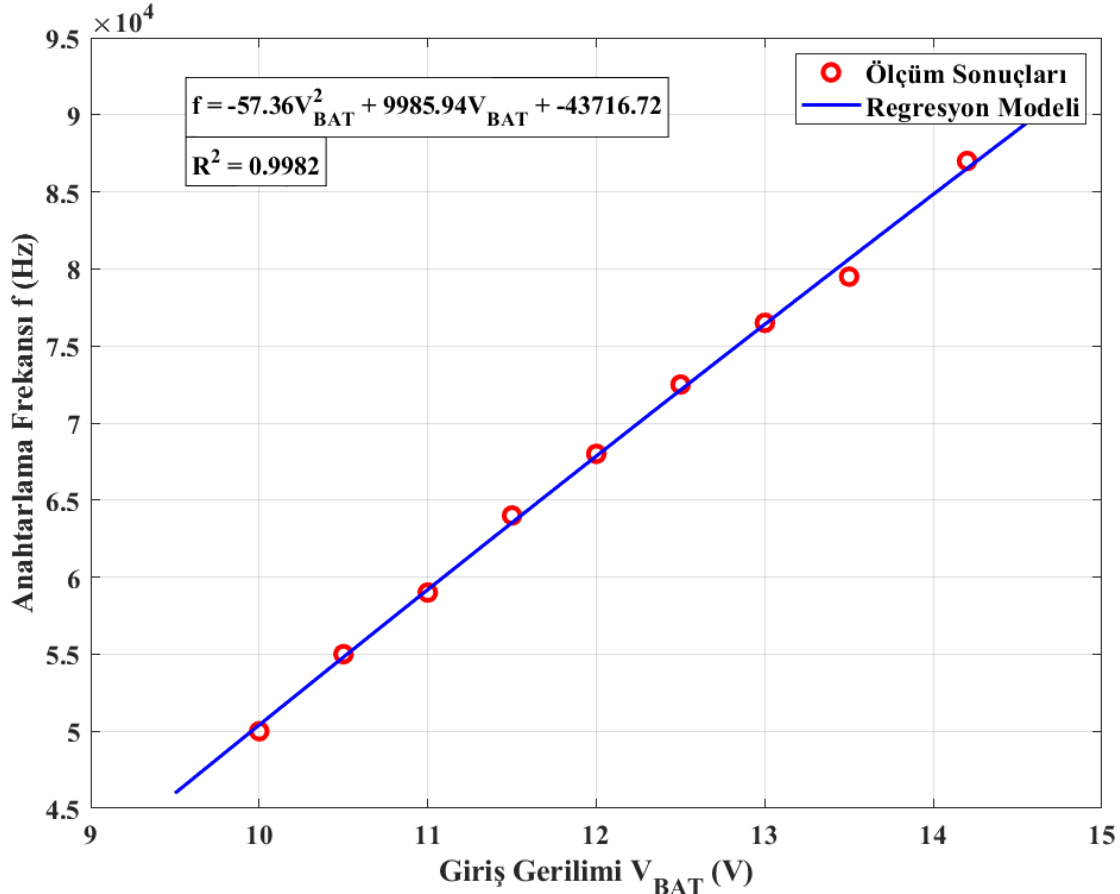
Tablo 1’den elde edilen veriler kullanılarak, bunun dışındaki gerilim değerleri için anahtarlama frekansını tahmin etmeye yönelik ikinci dereceden bir polinom regresyon modeli geliştirilmiştir. Bu yaklaşım, giriş gerilimindeki değişimlere karşılık uygun anahtarlama frekansının hesaplanmasına olanak sağlamaktadır. İkinci dereceden regresyon modeline göre giriş gerilimi (V_{BAT}) ile anahtarlama

frekansı (f) arasındaki ilişkiyi Eşitlik 16 ile tanımlamaktadır.

$$f(V_{BAT}) = a^2V_{BAT}^2 + bV_{BAT} + c \quad (16)$$

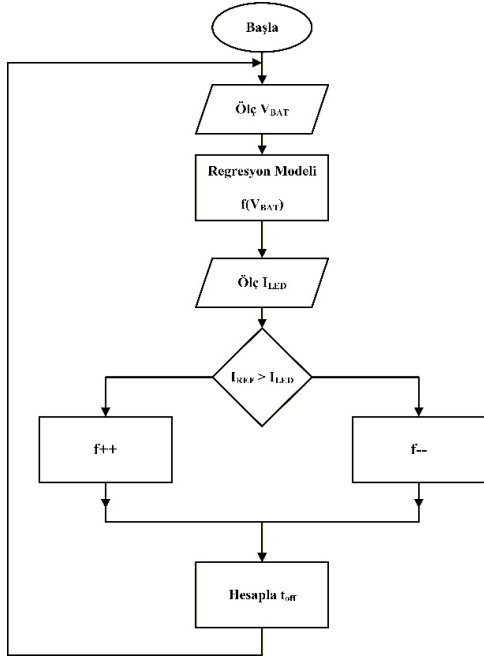
Tablo 1’den elde edilen verilerle regresyon analizine dayalı olarak eğri uydurma işlemi gerçekleştirilmiş ve elde edilen ikinci dereceden eğrinin sonucu Şekil 3’te sunulmuştur.

Eğri uydurma işlemi sonucunda ikinci dereceden denklemin katsayıları $a = -57.36$, $b = 9985.94$ ve $c = -43716.22$ ’dir. Bu eğri ile deneysel veriler ile karşılaştırılarak değerlendirilmiş ve korelasyon katsayısı $R^2 = 0.9982$ sonucu elde edilmiştir. Bu sonuç, giriş gerilimi V_{BAT} (V) ile anahtarlama frekansı f (Hz) arasındaki ilişkiyi tanımlayan ikinci dereceden polinom regresyon modelinin, sistemin gerilim frekans karakteristiğini yüksek hassasiyetle temsil ettiğini göstermektedir. Buna ek olarak, çıkış akımının kararlılığını sağlamak amacıyla, regresyon modeli tarafından belirlenen frekans değerinin sistem dinamikleri ve parametre belirsizlikleri nedeniyle yol açabileceği referans sapmalarını önlemek için gözlem tabanlı bir kontrol algoritması kullanılmıştır.



Şekil 3. Önerilen Kontrolün Polinom Regresyon Modeli (The proposed polynomial regression model of the control group)

Kullanılan gözlem tabanlı algoritmaya ait akış şeması Şekil 4'te sunulmuştur.



Şekil 4. Önerilen Hibrit Kontrol Algoritmasının Akış Şeması (Flowchart of the Proposed Hybrid Control Algorithm)

Algoritmanın sonunda, belirlenen frekansa bağlı olarak Eşitlik 15 kullanılarak t_{off} süresi hesaplanmakta ve böylece çıkış akımının referans akım değerinde SGA koşullarını sağlayarak sabit kalması sağlanmaktadır.

4. SGA SEPIC Dönüştürücünün Benzetim

Çalışmaları (Simulation Studies of ZVS SEPIC Converter)

Önerilen SGA SEPIC güç dönüştürücüsünde sabit çıkış akımını korumak amacıyla

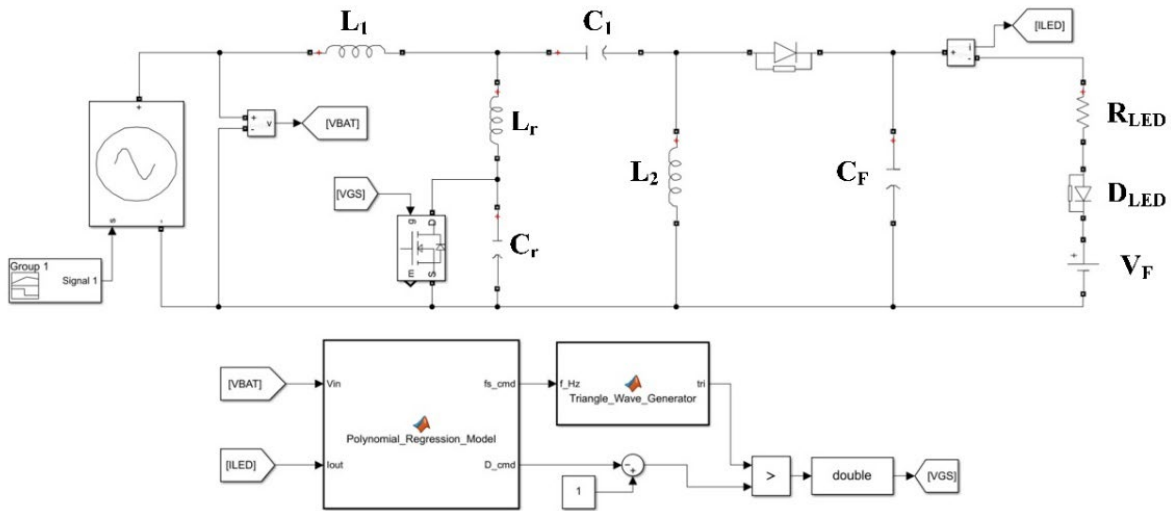
MATLAB/Simulink'te bir benzetim çalışması gerçekleştirilmiştir. Benzetim çalışmasında kullanılan devre şeması Şekil 5'te sunulmaktadır.

MATLAB/Simulink 2021a ortamında, değişken frekanslı ve darbe genişlik oranlı anahtarlama sinyali üreticisi MATLAB Function bloğu kullanılarak gerçekleştirilmiştir. Polinom regresyon bloğunun çıkışındaki anahtarlama frekansı değerine göre üçgen bir dalga formu üretilmiştir. Yine aynı blok çıkışında t_{off} süresinin değişken frekansa göre hesaplanması sonucunda görev oranı belirlenmiş ve bu değer üçgen dalga ile karşılaştırılmıştır. Bu sayede polinom regresyon modeline V_{BAT} ve I_{LED} değerlerini giriş olarak uygulanmakta ve hesaplanan frekans ile görev oranına bağlı olarak V_{GS} sinyali üretilmiştir. Benzetim çalışmasında kullanılan devre parametreleri Tablo 2'de sunulmaktadır.

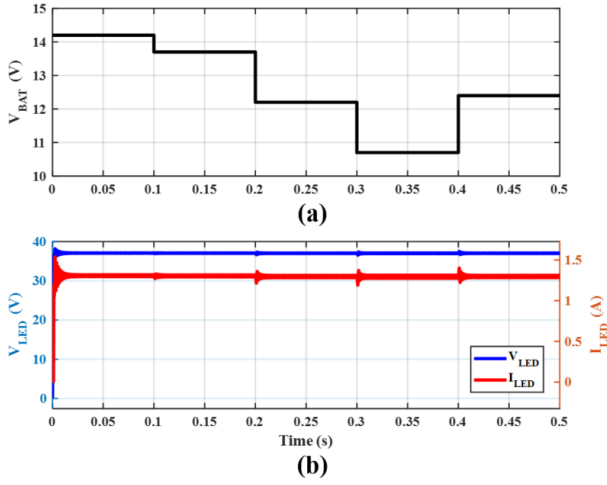
Tablo 2. Devre Parametreleri (Circuit Parameters)

Parametre	Değer
L_1	500 μ H
L_2	500 μ H
C_1	60 μ F
C_F	100 μ F
L_r	10 μ H
C_r	10 nF
R_{LED}	4.8 Ω
V_F	30 V
L_1	500 μ H

Benzetim çalışmaları sırasında V_{BAT} gerilimi, Şekil 6-a'da gösterildiği üzere gibi 14.2 V, 13.7 V, 12.2 V, 10.7 V ve 12.4 V olarak ayarlanmıştır.

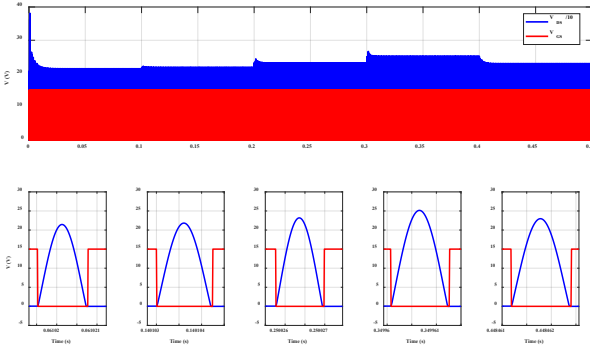


Şekil 5. Simülasyon Devresi (Simulation Circuit)



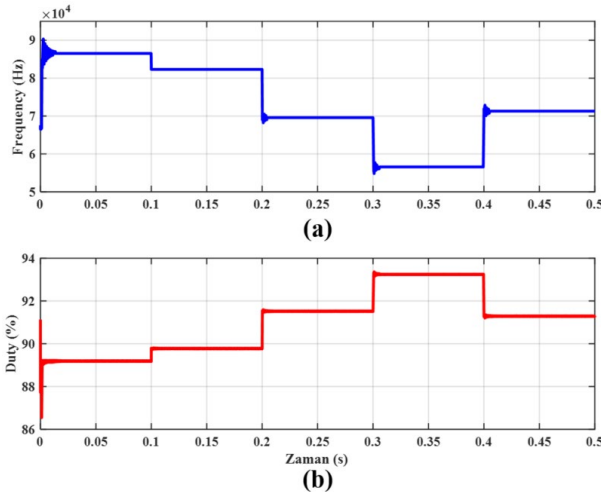
Şekil 6. Simülasyon Sonuçları, a) V_{BAT} , b) V_{LED} ve I_{LED} (Simulation Results, a) V_{BAT} , b) V_{LED} ve I_{LED})

Değişken giriş gerilimlerine karşı çıkış gerilimi (V_{LED}) ve çıkış akımı (I_{LED}) Şekil 6-b'de gösterilmiştir.



Şekil 7. v_{Cr} ve v_{Gs} sonuçları (v_{Cr} and v_{Gs} results)

Şekil 6-b'den görüldüğü üzere, farklı giriş gerilimi koşullarında çıkış gerilimi ve çıkış akımı sırasıyla 37 V ve 1.3 A değerlerinde sabitlemektedir.



Şekil 8. Anahtarlama Sonuçları, a) Anahtarlama Frekansı, b) Görev Oranı (Switching Results: a) Switching Frequency, b) Duty Cycle)

SGA SEPIC güç dönüştürücüsünün, geleneksel DGM ile anahtarlanan SEPIC dönüştürücüsüne kıyasla başlıca avantajı anahtarlama kayıplarının önemli ölçüde azaltılmasıdır. Önerilen hibrit kontrol yöntemi kullanılarak yapılan çalışmalarda, her frekans için bir t_{off} süresi hesaplanmış ve çıkış akımını regüle etmek için hem anahtarlama frekansı hem de görev oranı dinamik olarak ayarlanmıştır. Farklı giriş gerilimlerine karşılık gelen V_{GS} ve v_{Cr} üst üste çizdirilmiş dalga şekilleri Şekil 7'de sunulmuştur.

Şekil 7'den görüldüğü üzere, her bir V_{BAT} gerilimi için v_{Cr} gerilimi güç anahtarının iletme girme anında sıfıra düşmekte ve bu durum sistemin tüm çalışma aralığında SGA koşulunu sağladığını doğrulamaktadır. Şekil 7'de, belirtilen V_{BAT} gerilimleri için anahtarlama frekansı ve görev oranındaki değişimler sırasıyla Şekil 8-a ve Şekil 8-b'de gösterilmiştir. Elde edilen sonuçlara göre, farklı V_{BAT} gerilimleri için anahtarlama frekansı ve görev oranı değerleri Tablo 3'te gösterilmektedir.

Tablo 3. Anahtarlama frekansı ve görev oranının giriş gerilimi ile değişimi (Switching frequency and duty cycle vary with input voltage.)

V_{BAT}	f	D
14.1 V	86.518 kHz	% 89.18
13.7 V	82.325 kHz	% 89.76
12.2 V	69.574 kHz	% 91.51
10.7 V	56.565 kHz	% 93.23
12.4 V	71.289 kHz	% 91.28

Tablo 3'den görüldüğü üzere, V_{BAT} gerilimi azaldıkça anahtarlama frekansı da azalmakta, buna karşılık görev oranı artmaktadır. Böylece dönüştürücü, önerilen algoritma ile geniş bir giriş gerilimi aralığında sabit çıkış akımını koruyacak şekilde kendini dinamik olarak ayarlamaktadır.

5. Sonuç (Results)

Bu çalışmada, batarya veya DA kaynakla beslenen LED aydınlatma sistemlerini sabit akımla sürmeyi sağlamak amacıyla, ayarlanabilir anahtarlama frekansı ve görev oranına sahip bir SGA SEPIC güç dönüştürücü önerilmiştir. Geleneksel SEPIC dönüştürücülerden farklı olarak, önerilen yapıda çıkış akımı; polinom regresyon modeli ile gözlem tabanlı algoritmanın hibrit bir biçimde entegre edildiği frekans tabanlı bir kontrol stratejisiyle regüle edilmektedir. MATLAB/Simulink ortamında gerçekleştirilen benzetim çalışmaları, sistemin değişen giriş gerilimleri altında kararlı şekilde çalıştığını, SGA koşullarını koruduğunu ve çıkış

akımını 1.3 A seviyesinde sabit tuttuğunu göstermektedir. Geliştirilen polinom regresyon tabanlı hibrit kontrol algoritması, giriş gerilimindeki değişimlere bağlı olarak uygun anahtarlama frekansını ve görev oranını dinamik olarak belirlemekte ve böylece SGA SEPIC dönüştürücü geniş bir giriş gerilimi aralığında SGA koşullarında yüksek verimlilikle sabit akım sağlamaktadır.

ETİK STANDARTLARIN BEYANI (DECLARATION OF ETHICAL STANDARDS)

Bu makalenin yazarı çalışmalarında kullandıkları materyal ve yöntemlerin etik kurul izni ve/veya yasal-özel bir izin gerektirmediğini beyan ederler.

The author of this article declares that the materials and methods they use in their work do not require ethical committee approval and/or legal-specific permission.

YAZARLARIN KATKILARI (AUTHORS' CONTRIBUTIONS)

Kenan ÜNAL: Benzetim çalışmalarını yapmış, sonuçlarını analiz etmiş ve maklenin yazım işlemini gerçekleştirmiştir.

He has performed simulation studies, evaluated the results, and write the manuscript.

ÇIKAR ÇATIŞMASI (CONFLICT OF INTEREST)

Bu çalışmada herhangi bir çıkar çatışması yoktur.

There is no conflict of interest in this study.

KAYNAKLAR (REFERENCES)

[1] Young W. R., Wilson W. Efficient electric vehicle lighting using LEDs. Southcon/96 Conference Record, 276-280, (1996).

[2] Esteki M., Khajehoddin S. A., Safae A., Li Y. LED Systems Applications and LED Driver Topologies: A Review. IEEE Access, 11(38324-38358), (2023).

[3] Demirtaş M., Çelik K. PV Beslemeli LED Sokak Armatürünün Çoklu Modlu Çalışmasının Panel Gücü ve Akü Ömrü Üzerine Etkisi. Gazi Üniversitesi Fen Bilimleri Dergisi Part C: Tasarım ve Teknoloji, 5(257-270), (2017).

[4] Yadlapalli R. T., Narasipuram R. P., Kotapati A. An overview of energy efficient solid state LED driver topologies. International Journal of Energy Research, 44(612-630), (2020).

[5] Hsia S., Chen W. A temperature compensation technique for constant current LED driver. Microelectronics Journal, 153(106396), (2024).

[6] Derin A. R. (2018). Yumuşak anahtarlama düşüren tip DA-DA dönüştürücü ile LED sürücü tasarımı ve uygulaması, Yüksek Lisans Tezi, Karabük Üniversitesi Fen Bilimleri Enstitüsü, Karabük.

[7] Castro I., Lopez S., Martin K., Arias M., Lamar D. G., Sebastian J. High frequency dc-dc AC-LED driver based on ZCS-QRCs. 2017 IEEE Energy Conversion Congress and Exposition (ECCE), 3688-3695, (2017).

[8] Karafil A., Özbay H., Oncu S. Comparison of regular and irregular 32 pulse density modulation patterns for induction heating. IET Power Electronics, 14(78-89), (2021).

[9] Özbay H., Karafil A., Öncü S. Sliding mode PLL-PDM controller for induction heating system. Turkish Journal of Electrical Engineering & Computer Sciences, 29(1241-1258), (2021).

[10] Chuang Y. C. High-efficiency ZCS buck converter for rechargeable batteries. IEEE Transactions on Industrial Electronics, 57(2463-2472), (2010).

[11] Nacar S., Öncü S., Bal G. Comparison of Control Techniques for Series Resonant Converter. Gazi Üniversitesi Fen Bilimleri Dergisi Part C: Tasarım ve Teknoloji, 9(283-296), (2021).

[12] Baig M. J., Singh R. K. A Soft-Switched ZVS-ZCS Boost Converter Design and Analysis. 2024 IEEE 3rd International Conference on Electrical Power and Energy Systems (ICEPES), 1-4, (2024).

[13] Lee F. C. High-frequency quasi-resonant converter technologies. Proceedings of the IEEE, 76(377-390), (1988).

[14] Nacar S. (2014). PV sistemler için yumuşak anahtarlama maksimum güç noktası izleyici tasarımı ve uygulaması, Yüksek Lisans Tezi, Karabük Üniversitesi Fen Bilimleri Enstitüsü, Karabük, 111.

[15] Kazimierczuk M. K., Czarkowski D. (2012). Resonant power converters. Hoboken, NJ: John Wiley & Sons.

[16] Arslan L., Özbay H. Fotovoltaik Enerji Dönüşümü için Yumuşak Anahtarlama Yaklaşımı:

ZVS SEPIC Tabanlı Dönüştürücü Tasarımı ve Uygulaması. Mühendislik Bilimleri ve Araştırmaları Dergisi, 7(120-134), (2025).

[17] T. Duman and M. Boztepe, Evaluation of zero voltage switching SEPIC converter for module integrated distributed maximum power point tracking applications, 2017 10th Int. Conf. Electr. Electron. Eng. ELECO 2017, vol. 2018-Janua, pp. 1480–1484, (2017).