

See discussions, stats, and author profiles for this publication at: <https://www.researchgate.net/publication/382443021>

The Effect Of RC Snubber Utilization On The Performance Of DC-DC Buck Converters

Conference Paper · July 2024

DOI: 10.5281/zenodo.12580602

CITATIONS

0

READS

28

4 authors:



Mehmet Yildirim

Sakarya University

2 PUBLICATIONS 0 CITATIONS

SEE PROFILE



Buğra Er

14 PUBLICATIONS 2 CITATIONS

SEE PROFILE



Cenk Yavuz

Sakarya University

41 PUBLICATIONS 165 CITATIONS

SEE PROFILE



Onur Akiner

3 PUBLICATIONS 0 CITATIONS

SEE PROFILE

**RC SNUBBER KULLANIMININ DC-DC BUCK DÖNÜŞTÜRÜCÜLERDEKİ
PERFORMANSI ÜZERİNDEKİ ETKİSİ**

**THE EFFECT OF RC SNUBBER UTILİZATION ON THE PERFORMANCE OF DC-
DC BUCK CONVERTERS**

Mehmet YILDIRIM^{*1,2}

Buğra ER¹

Onur AKINER¹

Cenk YAVUZ^{2,3}

^{*1}SANEL Sanayi Elektroniği İmalat ve Ticaret A.Ş., R&D Center, Tuzla, İstanbul

²Sakarya University, Engineering Faculty, Electrical and Electronics Eng. Dept., Serdivan,
Sakarya

³Innovation Center of Sakarya University, Serdivan, Sakarya

ORCID Code: <https://orcid.org/0009-0008-7659-0138>

ORCID Code: <https://orcid.org/0000-0002-3982-5654>

ORCID Code: <https://orcid.org/0000-0002-1859-0163>

ORCID Code: <https://orcid.org/0000-0002-4325-2852>

ABSTRACT

This study investigates the effect of using RC snubbers on the performance of DC-DC buck converters. Interference caused by voltage fluctuations during the switching process in DC-DC buck converters can be reduced by using snubber circuits. In this study, the design, integration and effect of the snubber circuit are investigated in detail. In addition, applications of different values are given to optimise the snubber circuit. The results show that the use of

RC snubber can improve the converter performance and reduce the switching induced noise. The results of this study show that the induced noise can be reduced.

In particular, it is observed that the snubber circuit developed for buck converters is effective in solving the problems encountered by conventional structures and provides high efficiency. These results emphasise the potential advantages of RC snubber circuits in power electronics systems. In addition, it has been observed that this solution can be used in various applications such as lighting and integrated circuits in the automotive industry. In determining the optimum values for the use of RC snubber, improvements in the r and c values determined as ideal in the test and homologation results were recorded. The r and c values for the RC Snubber were calculated and tested on the application and the results obtained were supported with result graphs. As a result, optimising the r and c values of RC snubber circuits for buck converters offers an important strategy to increase the performance of high efficiency and power conversion systems and to solve electrical problems encountered. This study will encourage research in the field of power electronics and offer new possibilities for future applications in high power circuits.

Keywords: DC-DC Converter, Buck Converter, Passive Snubber

ÖZET

Bu çalışma, RC snubber kullanımının DC-DC buck dönüştürücülerinin performansı üzerindeki etkisini incelemektedir. DC-DC buck dönüştürücülerdeki anahtarlama işlemi sırasında gerilim dalgalanmalarından oluşan parazitlenmeleri, snubber devreleri kullanılarak azaltılabilir. Bu çalışmada, snubber devresinin tasarımı, entegrasyonu ve etkisi detaylı bir şekilde incelenmektedir. Ayrıca, snubber devresinin optimize edilmesi için farklı değerlerde uygulamalara yer verilmiştir. Sonuçlar, RC snubber kullanımının dönüştürücü performansını artırabileceğini ve anahtarlama kaynaklı gürültünün azaltılabileceğini göstermiştir.

Özellikle, buck dönüştürücüler için geliştirilen snubber devresinin klasik yapıların karşılaştığı sorunları çözmede etkili olduğu ve yüksek verimlilik sağladığı gözlemlenmiştir. Bu sonuçlar, güç elektroniği sistemlerinde RC snubber devrelerinin potansiyel avantajlarını vurgulamaktadır. Ayrıca, bu çözümün otomotiv endüstrisinde, aydınlatma ve tümleşik devreleri gibi çeşitli uygulamalarda kullanımının mümkün olduğu görülmüştür. RC snubber kullanımında optimum değerlerin belirlenmesinde yapılan test ve homologasyon sonuçlarında

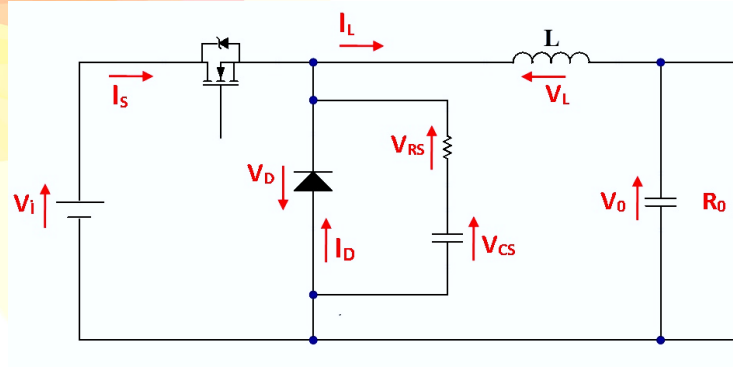
ideal olarak belirlenen r ve c değerlerinde görülen iyileşmeler kayıt altına alınmıştır. RC Snubber için r ve c değerleri hesaplanarak uygulama üzerinde test edilmiş ve elde edilen sonuçlar sonuç grafikleriyle desteklenmiştir. Sonuç olarak, buck dönüştürücü için yapılan RC snubber devrelerinin r ve c değerlerinin optimize edilmesi, yüksek verimlilik ve güç dönüşüm sistemlerinin performansını artırmak ve karşılaşılan elektriksel problemleri çözmek için önemli bir strateji sunmaktadır. Bu çalışma, güç elektroniği alanında araştırmaları teşvik edecek ve ileriye dönük yüksek güçlü devrelerdeki uygulamalar için yeni olanaklar sunacaktır.

Anahtar Kelimeler: DC-DC Dönüştürücü, Buck Converter, Pasif Snubber

1. GİRİŞ

LED'lerin kompakt yapısı, mekanik şoklara, titreşimlere, neme karşı dayanımları ve uzun ömürleri, otomotiv endüstrisinde aydınlatma uygulamalarında kullanımlarını mümkün kılmıştır [1]. Özellikle, yönlendirilebilir LED farlar, adaptif yönlendirme özelliğiyle ışığın güvenliği ve kullanıcı deneyimini artırır [2]. Işık yayan diyotlar (LED'ler), sağlıklı kontrollerinin sağlanması için bir LED sürücüyü ihtiyaç duyar. LED sürücüsü, denetleyici ile parlaklık kontrolü ve LED ömrü gibi konularda katkıda bulunabilir [3]. LED kontrolünde birçok farklı topoloji kullanılmaktadır, otomotiv alanında sıklıkla kullanılan topoloji örnekleri olarak, buck [4], SEPIC [5], boost [6], buck-boost [7], half-bridge [8], Cuk [9] gösterilebilir. Bu topolojiler, karşılık gelen kontrol stratejileri aracılığıyla yüksek verimlilik, geniş kontrol aralığı, geniş giriş gerilim aralığı ve maliyet tasarrufu gibi bir veya daha fazla optimizasyon hedefine ulaşır. Buck dönüştürücü, yüksek verimliliği ve çıkış geriliminin girişten düşük olması nedeniyle LED lambalar için balast olarak geniş bir şekilde kullanılmaktadır [10].

Bir buck düzenleyici, bir giriş gerilimini keser ve istikrarlı bir çıkış sağlamak için bir LC filtresinden geçirerek giriş geriliminden daha düşük bir gerilim elde eder. Aktif elemanlar, girişten bobine anahtarlama yapmak için anahtarlama elemanı ve diyottur. Otomotiv uygulamalarında ağırlıklı olarak anahtarlama elemanı olarak MOSFET seçilir. Pasif elemanlar ise bobin (L) ve çıkış kondansatörüdür (COUT). Bunlar, aktif elemanlar tarafından oluşturulan dalgalanmayı azaltan bir LC filtresi oluşturur [11]. Geleneksel DC-DC buck dönüştürücü, çeşitli gerilimlere düşürmek için kullanılır.



Şekil 1. Buck Konverter Topolojisi

PWM, LED voltaj kontrolüne dayanan bir kısımla yöntemidir. LED voltajındaki dalgalanma kolayca LED akımı dalgalanmasına neden olabileceğinden, büyük bir çıkış kondansatörü regüle için gereklidir [12]. PWM, yükü bir anahtara paralel olarak bağlayarak kontrolü gerçekleştirir. Bu yöntem ile, yüksek frekans ve geniş bir kontrol aralığı elde edebilir. Anahtarlama sırasında oluşan çakışma, sert anahtarlama olarak adlandırılan sorunlara yol açar ve bu da anahtarlama kayıplarını ve elektromanyetik girişim seviyelerini artırabilir. Bu sorunları azaltmak ve verimliliği artırmak için, yumuşak anahtarlama teknikleri kullanılabilir [13]. Kısa devre anahtarlama LED akımının ani yükselmesine ve gerilim salınımına neden olabilir. RC ve CD gibi Snubber devreleri, akımın ani değişimini engellemek için kullanılır [14]. Buck topolojisine seri olarak bağlanmış bir sönümleme direnci, gerilim salınımı bastırmak için kullanılır [15].

Aşırı gerilim sönümleyicileri, pasif ve aktif olmak üzere iki türe ayrılır. Aktif sönümleyici, bir aktif devre denetleyicisi kullanarak anahtarlama aşırı gerilimini azaltır. Aktif sönümleyicinin pasif sönümleyiciye göre tipik avantajı, sıfır gerilim anahtarlama (ZVS) veya sıfır akım anahtarlama (ZCS) olmasıdır. Ancak, daha fazla anahtar ve denetleyici gerektirir, bu da genel sistem boyutunu, maliyetini ve karmaşıklığını artırır. Ayrıca devrenin güvenilirliğini tehlikeye atar [16]. Geleneksel pasif sönümleyici, bir direnç-kapasitör (RC) sönümleyici olarak bilinir [17]. Anahtarlama aşırı gerilimini azaltmak için düşük maliyetli ve basit bir çözümdür. Ancak, sönümleyici kaybı ısıya dönüşür, bu da LED sürücüsünün verimliliğini azaltır [18]. Pasif snubber devreleri, aktif olanlara göre avantajlar sunar, Aktif anahtar kullanılmadan basit bir yapı kullanılabilir. Ancak, kapasitör değerinin seçilmesi zor olabilir ve yumuşak anahtarlamanın sağlandığı sınırlı yük aralığı bir dezavantaj olabilir. RC snubber devrelerinin tasarımı basit olsa da, bu tür devrelerin genellikle düşük güç seviyelerinde kullanılması yaygındır [19]. Burada anahtarlama elemanı üzerindeki gerilim

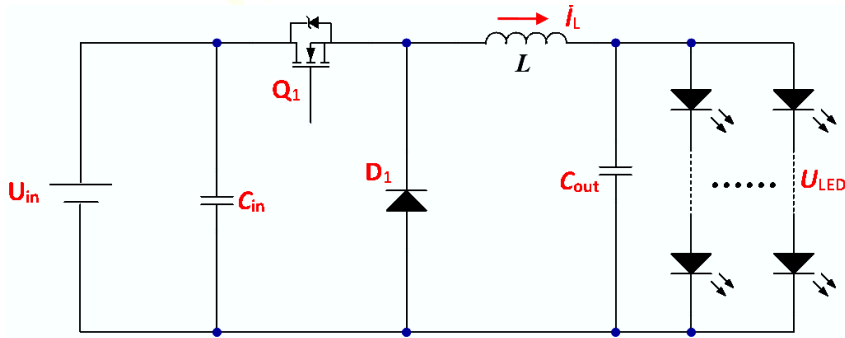
direnç ve kapasitör üzerinde sönümlenir. Dolayısıyla direnç üzerinde oluşan termal problemlerin çözülmesi ve optimizasyon gereklidir.

Yüksek frekanslı anahtarlama, dönüştürücülerin boyutunu küçültür ve verimliliği azaltır aynı zamanda frekans arttıkça yarı iletken anahtarlama kayıpları artmaktadır. Fakat elektromanyetik girişimini (EMI) artırır [20]. Gürültülerin tamamen ortadan kaldırılması mümkün değildir, ancak gürültü seviyeleri belirli seviyelere kadar azaltılabilir. Yüksek frekansta çalışan DC-DC dönüştürücüdeki anahtarlama cihazı, büyük dv/dt ve di/dt dalgalanmalarına neden olur. Anahtarlama sırasındaki büyük dalgalanmalar, anahtarlar üzerinde yüksek stres ve güç kayıplarına neden olur. İletken ve yayılan emisyonların ana kaynağı, anahtarların açma ve kapatma işlemleri sırasında geçici voltaj ve akımların hızlı değişimleridir. MOSFET üzerindeki VDS salınım ve dalgalanmanın ana nedeni, DC-DC dönüştürücülerdeki parazit indüktansıdır. MOSFET'in yüksek anahtar hızları, uzun salınım sürelerine ek olarak yüksek sivri uçlar oluşturur. Yüksek frekanslı anahtarlama ayrıca EMI üretir [23]. Özellikle, bu sorun yüksek akım seviyelerine sahip tasarımlarda daha belirgindir. EMI gürültü akımları, dönüştürücüden DC güç kaynağına (örneğin, batarya) yayılır. Devrede EMI gürültüsü belirli seviyeleri aştığında, devre arızaları veya hatalarla karşılaşır. Ayrıca, devre, çevredeki diğer devreleri bir gürültü kaynağı olarak etkiler.

Bir anahtarlama devresinde akımın kapatılması, kaçak indüktans ve kendiliğinden indüktans nedeniyle gerilimde bir artışa sebep olur. Gerilimdeki bu artışı azaltmanın en önemli yolu ise kaçak indüktansını azaltmaktır. Gerilim salınımı parazitik indüktans ve kapasitenin bir rezonans devresi oluşturması sonucunda meydana gelir. Snubber, bir akım kapatıldığında oluşan geçici gerilimleri bastıran bir koruma devresidir. Mekanik anahtarlar, transistörler ve diyotlar gibi anahtarlama cihazlarının ürettiği gerilim dalgalanmalarını bastırmak için kullanılır [19]. RC snubber, gerilim dalgalanmalarını ve salınımı bastırırken, snubber direnci R_{SNB} ve snubber kapasitörü C_{SNB} 'nin seçimi önemlidir. Bu seçim, salınımı bastırma etkisi ile R_{SNB} 'nin güç kaybı arasında bir denge kurulmasını gerektirir [24].

2. DC-DC BUCK DÖNÜŞTÜRÜCÜ

DC-DC Buck Dönüştürücü, bir anahtarlama güç dönüştürücüsü olarak, yüksek bir DC giriş gerilimini daha düşük bir DC çıkış voltajına dönüştürmek için kullanılır. Bu dönüştürücü, anahtarın iletim ve kesim durumları ile kontrol edilen bir bobin, bir diyot ve bir kapasitörden oluşur [25]. Dönüştürücünün anahtarlama elemanı genellikle bir MOSFET'tir. Anahtarlama sırasında, anahtarlama elemanı devrede açıktır ve bobin aracılığıyla enerji depolar [21]. Ardından, anahtarlama elemanı kapatıldığında, bobine depolanan enerji diyot aracılığıyla çıkış devresine iletilir.

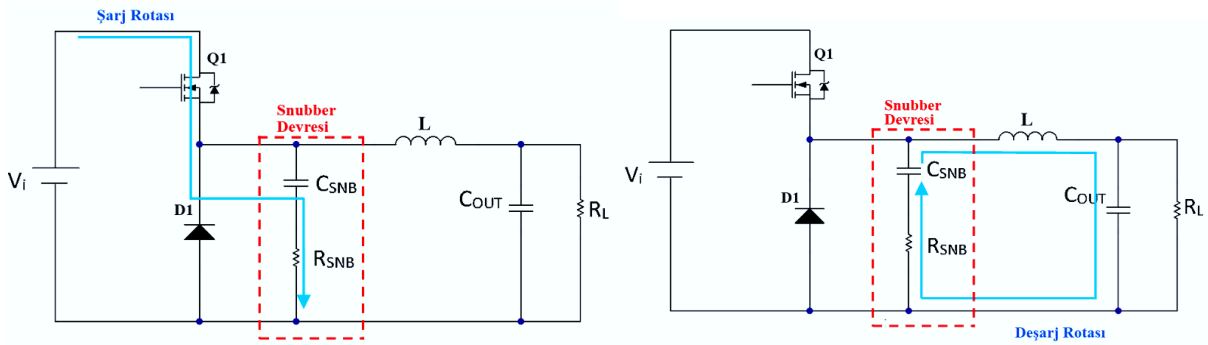


Şekil 2. Buck Konverter Led Sürücü Uygulaması

DC-DC Buck Dönüştürücü, çıkış voltajını kontrol etmek için PWM (Pulse Width Modulation -Darbe Genişliği Modülasyonu) tekniğini kullanır. Bu teknikte, anahtarlama transistorünün devredeki süresi, çıkış voltajını belirler. PWM sinyali, bir geribesleme devresi aracılığıyla gerçek zamanlı olarak kontrol edilir, böylece istenilen çıkış voltajı elde edilir [26]. DC-DC Buck Dönüştürücü, enerji verimliliği ve düşük maliyeti nedeniyle geniş bir uygulama alanına sahiptir. Özellikle, taşınabilir cihazlar, güneş enerjisi sistemleri, araç güç sistemleri ve endüstriyel otomasyon gibi birçok alanda yaygın olarak kullanılmaktadır.

DC-DC Buck Dönüştürücü, yüksek bir giriş voltajını daha düşük bir çıkış voltajına dönüştürmek için kullanılan bir anahtarlama güç dönüştürücüsüdür. Tasarım süreci, belirli bir uygulama için optimum performans sağlamak üzere bir dizi adımı içerir. Bu adımlar arasında, giriş ve çıkış gereksinimlerinin analizi, anahtarlama frekansının belirlenmesi, endüktans ve kapasitör değerlerinin seçimi, PWM kontrol devresinin tasarımı ve geribesleme döngüsünün oluşturulması bulunur. DC-DC Buck Dönüştürücü tasarımı, güç elektroniği alanında temel bir bileşendir ve çeşitli endüstriyel ve taşınabilir cihazlarda geniş bir kullanım alanına sahiptir.

RC Snubber devresi, anahtarlama transistörlerinin veya diyotların devreye sokulması veya kapatılması sırasında oluşan ani gerilim değişimlerini sınırlamak için kullanılan bir koruma devresidir. Bu devre, bir direnç (R) ve bir kapasitör (C) ögesinden oluşur. İşlevi, devre elemanlarından kaynaklanan parazitik indüktans ve kapasitans nedeniyle oluşan gerilim dalgalanmasını azaltarak, devrenin kararlılığını artırmak ve anahtarlama elemanlarda oluşabilecek zararlı etkileri önlemektir. RC Snubber devresinin doğru bir şekilde tasarlanması, anahtarlama güç dönüştürücülerin verimliliğini artırabilir, elektromanyetik parazitleri azaltabilir ve sistem performansını iyileştirebilir.



Şekil 3. Buck Konverter Pasif Snubber Uygulaması

3. DC-DC BUCK DÖNÜŞTÜRÜCÜ RC SNUBBER ENTEGRASYONU

DC-DC Buck dönüştürücüsü, yüksek bir giriş gerilimini daha düşük bir çıkış gerilimine dönüştürmek için kullanılan anahtarlama bir güç dönüştürücüdür. RC Snubber entegrasyonu, bu dönüştürücünün performansını iyileştirmek ve istenmeyen gerilim dalgalanması ve salınımı azaltmak için kullanılan bir tekniktir. RC Snubber devresi, anahtarlama transistörlerinin veya diyotların devreye sokulması veya kapatılması sırasında oluşan ani gerilim değişimlerini sınırlamak için kullanılan bir koruma devresidir. Bu entegrasyon sürecinde, uygun bir snubber devresinin tasarımı ve uygulanması gerektiği gibi, anahtarlama elemanlarının özellikleri ve dönüştürücünün çalışma koşulları da göz önünde bulundurularak yapılır.

$$C_s = \frac{V_s}{\Delta V_s R_s f_s} \quad (1)$$

Snubber kapasitansı, devredeki ani gerilim değişimlerini sönmek için kullanılan kapasitörün değerini belirler. Formül 1'de V_s anahtarlama gerilimini (volt cinsinden), ΔV_s

gerilimdeki istenen değişimi (volt cinsinden), R_S snubber direncini (ohm cinsinden) ve f_S anahtarlama frekansını (hertz cinsinden) temsil eder. Kapasitör, ani gerilim değişimlerini sönümlemek için kullanılır ve bu formül, devrede ihtiyaç duyulan kapasitans değerini belirlemeye yardımcı olur.

$$R_s = \frac{V_S^2}{\frac{1}{2} L_{kp} I_{p_tepe}^2 \frac{V_S}{V_S - V_R} f_S} \quad (2)$$

Snubber direnci, devredeki kapasitörün aşırı yüklenmesini önlemek amacıyla kullanılır. Direnç, anahtarlama sırasında oluşan enerji dalgalanmalarını sönümleyerek kapasitörün korunmasını sağlar. Formül 2'de V_S anahtarlama gerilimini (volt cinsinden), L_{kp} paralel indüktansı (henry cinsinden), I_{p_tepe} tepe akımını (amper cinsinden), V_R direncin üzerindeki gerilim düşüşünü (volt cinsinden) ve f_S anahtarlama frekansını (hertz cinsinden) temsil eder. Bu formül, snubber devresindeki direncin doğru bir şekilde hesaplanmasını sağlar ve kapasitörün korunmasına yardımcı olur.

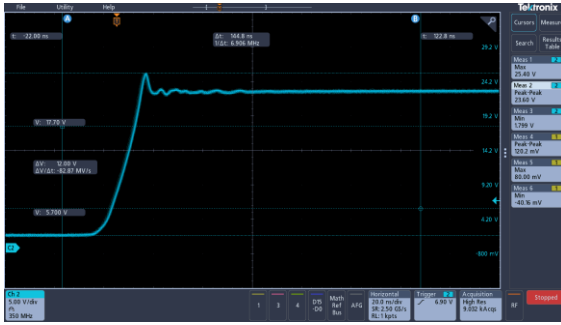
$$P_s = \frac{V_S^2}{R_S} \quad (3)$$

Snubber devresindeki güç tüketimi, direnç üzerinden kaybedilen enerji miktarını ifade eder. Formül 3'de V_S anahtarlama gerilimini (volt cinsinden) ve R_S snubber direncini (ohm cinsinden) temsil eder. Snubber devresindeki güç tüketimi, devrenin enerji verimliliğini belirler ve bu formül, devrede kaybedilen enerji miktarını hesaplamada kullanılır.

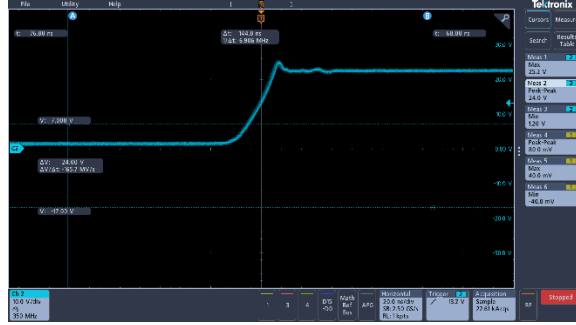
DC-DC Buck dönüştürücüsünün tasarımında, anahtarlama güç dönüştürücülerin performansını etkileyen bir dizi parametre bulunmaktadır. Bu parametreler arasında endüktans ve kapasitör değerleri, anahtarlama frekansı, snubber devresi bileşenleri ve geri besleme döngüsü parametreleri bulunmaktadır. Parametre seçimi ve optimizasyon süreci, belirli bir uygulama için en uygun performansı sağlamak üzere bu parametrelerin doğru bir şekilde seçilmesi ve ayarlanmasını içerir. Doğru parametre seçimi, dönüştürücünün verimliliğini, kararlılığını ve EMC performansını artırabilir. Bu nedenle, parametre seçimi ve optimizasyon, DC-DC Buck dönüştürücüsünün tasarım sürecinde kritik bir adımdır.

4. ÖLÇÜMLER VE ANALİZ

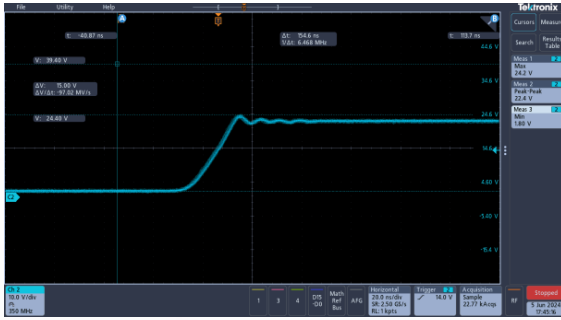
DC-DC Buck dönüştürücüsünün performansının değerlendirilmesi için gerçekleştirilen ölçümler ve analizler bu bölümde ele alınır. Bu ölçümler, dönüştürücünün çıkış gerilimi, verimliliği, dalgalanma ve EMC performansı gibi önemli özelliklerini belirlemek için yapılır. Ayrıca, dönüştürücünün farklı çalışma koşullarında farklı test senaryoları kullanılabilir. Bu ölçümler ve analizler, tasarım sürecinin doğruluğunu ve dönüştürücünün belirlenen gereksinimleri karşılamak için önemlidir. Şekil 4’de 8 adet farklı grafik verilmiştir. Bu testler 26V giriş geriliminden 7V elde edilirken Buck konverter üzerinden alınmıştır. 400kHz anahtarlama frekansı ile bobin anahtarlanarak 1A akım da 7W Led driver ile çalışılmıştır. Snubber devresinde yapılan değişiklikler oturma zamanı ve tepe değerini doğrudan değiştirmiştir. Buradaki çalışma ısınma ve grafik olarak uygun noktayı bulmayı amaçlamıştır.



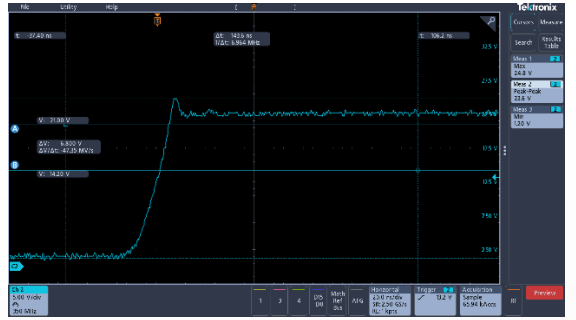
Şekil 4a. CSNB = 0nF RSNB = 0R



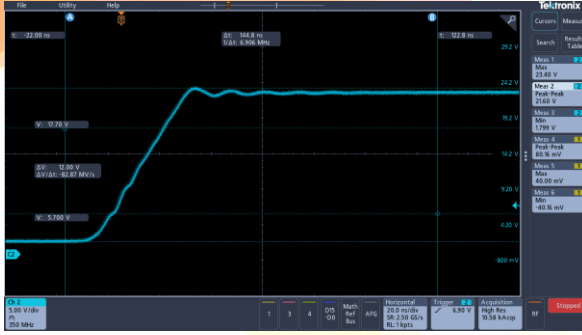
Şekil 4b. CSNB = 0nF RSNB = 2R2



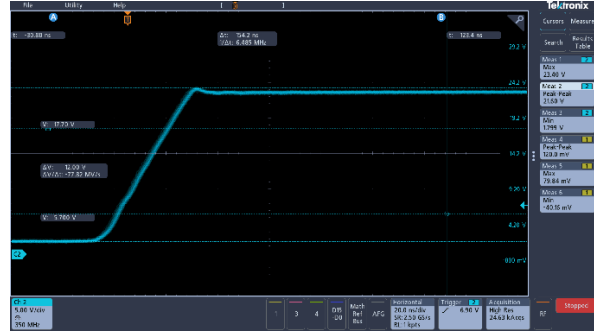
Şekil 4c. CSNB = 330pF RSNB = 0R



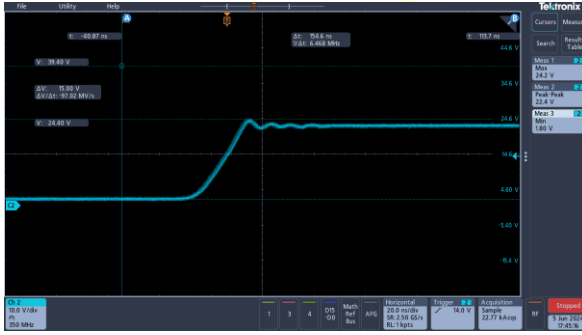
Şekil 4d. CSNB = 330pF RSNB = 2R2



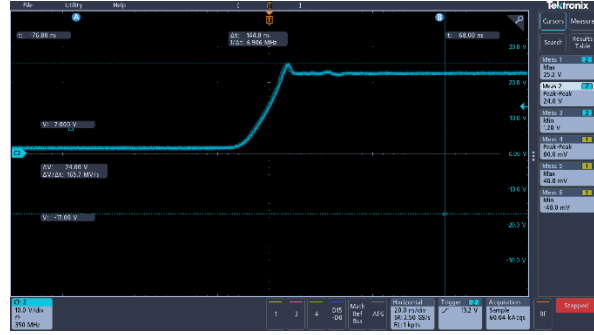
Şekil 4e. CSNB = 1nF RSNB = 0R



Şekil 4f. CSNB = 1nF RSNB = 2R2



Şekil 4g. CSNB = 330pF RSNB = 0R



Şekil 4h. CSNB = 100nF RSNB = 2R2

5. SONUÇ

Bu çalışma, yüksek performanslı buck dönüştürücüsünün ayrıntılı bir açıklamasını ve devre tasarımını, bir LED sürücü için snubber ile sunmuştur. Anahtarlama frekansına bağlı olarak ortaya çıkan snubber etkisinin performansını araştırmıştır. LED akımının düşüş kenarında meydana gelen parazitik salınımların oluşumunu incelemiştir. Sonuç olarak, daha istikrarlı bir LED akımı dalgası elde edilmiş ve karartma lineerliği ile devre güvenilirliği artırılmıştır.

Ayrıca, bu çalışma, tasarım özelliklerinde belirtilen gerilim kazancı ve nominal güç ile ilişkilendirilen bobinin şarj ve deşarj sürelerine dayalı bir yaklaşım sunmuştur. Bu yaklaşımın doğru uygulanması, dönüştürücünün güvenilirliğini artırırken bileşenlerin maliyetini azaltır ve çıkış voltajı kontrolünde daha iyi bir dinamik tepki sağlar. RC Snubber için r ve c değerleri hesaplanarak uygulama üzerinde test edilmiş ve elde edilen sonuçlar sonuç grafikleriyle desteklenmiştir. Sonuç olarak, buck dönüştürücü için yapılan snubber devresi kombinasyonunun klasik yapıların karşılaştığı sorunları aştığı ve yüksek verimlilik sağladığı gösterilmiştir. Sunulan çözümün otomotiv endüstrisinde aydınlatma ve şarj devrelerinde kullanılabilirliği mümkündür.

Kaynakça

- [1] J. Moisel, "Requirements for future high resolution ADB modules," in Proc. 11th Int. Symp. Automot. Lighting (ISAL), vol. 16. Munich, Germany: Herbert Utz Verlag, 2015, p. 161.
- [2] S. Mukherjee, A. Sepahvand, and D. Maksimović, "High-frequency LC3L resonant DC–DC converter for automotive LED driver applications," in Proc. IEEE Appl. Power Electron. Conf. Expo. (APEC), Mar. 2018, pp. 797–802.
- [3] Lifetime and Reliability, U.S. Department of Energy, Washington, DC, USA, 2014, p. 3.
- [4] Q. Wang, T. Li, and Q.-H. He, "Dimmable and cost-effective DC driving technique for flicker mitigation in LED lighting," J. Display Technol., vol. 10, no. 9, pp. 766–774, Sep. 2014.
- [5] H. Ma, J.-S. Lai, Q. Feng, W. Yu, C. Zheng, and Z. Zhao, "A novel valley-fill SEPIC-derived power supply without electrolytic capacitor for LED lighting application," IE
- [6] P.-J. Liu, Y.-C. Hsu, and S.-R. Hsu, "Drain-voltage balance and phaseshifted PWM control schemes for high-efficiency parallel-string dimmable LED drivers," IEEE Trans. Ind. Electron., vol. 65, no. 8, pp. 6168–6176, Aug. 2018.
- [7] H.-L. Cheng, C.-A. Cheng, Y.-N. Chang, Y.-H. Lin, and C.-H. Chang, "High-power-factor dimmable LED driver with low-frequency pulsewidth modulation," IET Power Electron., vol. 9, no. 10, pp. 2139–2146, Aug. 2016.
- [8] J. M. Alonso, M. S. Perdigao, M. A. Dalla Costa, G. Martinez, and R. Osorio, "Analysis and experiments on a single-inductor half-bridge LED driver with magnetic control," IEEE Trans. Power Electron., vol. 32, no. 12, pp. 9179–9190, Dec. 2017.
- [9] L. Mohamed, N. F. Abdul Hamid, Z. M. Isa, N. Saudin, N. H. Ramly, and N. B. Ahamad, "Cuk converter as a LED lamp driver," in Proc. IEEE Int. Conf. Power Energy (PECon), Kinabalu Sabah, Malaysia, Dec. 2012, pp. 262–267.
- [10] Mosely I., "Buck converter LED drive systems for automotive applications," LEDs Magazine, Drivers, September/October 2007.
- [11] Kraft, J., "Convert a Buck Regulator into a Smart LED Driver, Including Dimming," Analog Devices, Analog Dialogue, vol. 47, no. 03, March 2013.

- [12] G. Z. Abdelmessih, J. M. Alonso, and M. A. Dalla Costa, "Analysis, design, and experimentation of the active hybrid-series-parallel PWM dimming scheme for high-efficient off-line LED drivers," *IET Power Electron.*, vol. 12, no. 7, pp. 1697–1705, Jun. 2019.
- [13] Y.-M. Li, Q. Tong, X.-B. Yang, K.-K. Wu, H. Chai, C.-B. Wen, and Y.-Z. Qiu, "Fixed-frequency adaptive off-time controlled buck current regulator with excellent pulse-width modulation and analogue dimming for lightemitting diode driving applications," *IET Power Electron.*, vol. 8, no. 11, pp. 2229–2236, Nov. 2015.
- [14] H. Ma, J.-S. Lai, Q. Feng, W. Yu, C. Zheng, and Z. Zhao, "A novel valley-fill SEPIC-derived power supply without electrolytic capacitor for LED lighting application," *IEEE Trans. Power Electron.*, vol. 27, no. 6, pp. 3057–3071, Jun. 2012.
- [15] D. Gacio, J. M. Alonso, J. Garcia, L. Campa, M. J. Crespo, and M. Rico-Secades, "PWM series dimming for slow-dynamics HPF LED drivers: The high-frequency approach," *IEEE Trans. Ind. Electron.*, vol. 59, no. 4, pp. 1717–1727, Apr. 2012.
- [16] Ahmad, S., Tan, N. M. L., Baharuddin, M. Z., & Buticchi, G. (2021). A high-performance isolated SEPIC converter for non-electrolytic LED lighting. *IEEE Access*, 9, 149894-149905.
- [17] S. Liu, H. Lin, and T. Wang, "Comparative study of three different passive snubber circuits for SiC power MOSFETs," in *Proc. IEEE Appl. Power Electron. Conf. Expo. (APEC)*, Mar. 2019, pp. 354–358.
- [18] Esteki, M., Khajehoddin, S. A., Safaee, A., & Li, Y. (2023). LED systems applications and LED driver topologies: A review. *IEEE Access*.
- [19] Çelik, İ. (2016). Güç LEDli aydınlatma uygulamaları için tek katlı güç faktörü düzeltmeli sürücülerin tasarımı ve gerçekleştirilmesi (Master's thesis, Fen Bilimleri Enstitüsü).
- [20] Bhatt, K., Gupta, R. A., & Gupta, N. (2019). Design and development of isolated snubber based bidirectional DC–DC converter for electric vehicle applications. *IET Power Electronics*, 12(13), 3378-3388.
- [21] HIZARCI, H., KALAYCI, K., Demirel, O., & Arifoğlu, U. (2021). Reducing electromagnetic interference in three-level T-type isolated bidirectional DC-DC converter using a snubber circuit. *International Journal of Applied Mathematics Electronics and Computers*, 9(3), 26-34.

- [22] Ghasemikashtiban, M. Yükseltici DA/DA dönüştürücü devrelerde yumuşak anahtarlama analizi ve deneysel çalışmaları (Master's thesis, Fen Bilimleri Enstitüsü).
- [23] Vaz, A. R., & Tofoli, F. L. (2017, November). Practical design of a DC-DC buck converter using an RCD snubber. In 2017 Brazilian Power Electronics Conference (COBEP) (pp. 1-6). IEEE.
- [24] Altıntaş, N. (2007). Yumuşak anahtarlama DC-DC dönüştürücülerin incelenmesi (Master's thesis, Fen Bilimleri Enstitüsü).
- [25] Derin, A. R. Yumuşak anahtarlama düşüren tip DA-DA dönüştürücü ile LED sürücü tasarımı ve uygulaması (Master's thesis, Fen Bilimleri Enstitüsü).
- [26] Wang, Y., Wu, X., Hou, Y., Cheng, P., Liang, Y., & Li, L. (2020). Full-range LED dimming driver with ultrahigh frequency PWM shunt dimming control. IEEE Access, 8, 79695-79707.