

Yüksek Güç Faktörlü SEPIC LED Sürücünün Tasarımı ve Uygulanması

Design and Application of High Power Factor SEPIC LED Driver

Erdal Şehirli¹, Özgür Üstün²

¹Kastamonu Meslek Yüksekokulu
Kastamonu Üniversitesi
esehirli@kastamonu.edu.tr

²Elektrik Elektronik Fakültesi, Elektrik Mühendisliği Bölümü
İstanbul Teknik Üniversitesi
oustun@itu.edu.tr

Özet

Bu çalışmada, köprü tipi doğrultmaç devresinin çıkışına doğru akım SEPIC (Single Ended Primary Inductor Converter) dönüştürücünün bağlanmasıyla elde edilen yüksek güç faktörlü SEPIC LED sürücü devresinin tasarımı ve uygulanması gerçekleştirilmiştir. SEPIC dönüştürücü 88 kHz anahtarlama frekansında çalıştırılmıştır. Ayrıca, gerekli bobinler manyetik kuplajlı olarak sarılmışlardır. Bununla birlikte, uygulama piyasada kolaylıkla ve ucuz olarak bulunabilen entegre devreler ile gerçekleştirilmiştir. Yük olarak ise yaklaşık olarak 6W güce sahip, paralel iki kol üzerinde üçerli toplam altı adet güç LED'i kullanılmıştır. Yapılan uygulama sonucunda, şebeke akımı ve geriliminin harmonik içeriği, şebekenin güç faktörü ölçülmüştür. Ek olarak, şebeke ve güç LED'lerinin akım ve gerilimlerinin şekilleri de gösterilmiştir. Ayrıca, şebeke akımı harmonik içeriğinin IEC61000-3-2 standardına uygunluğu da incelenmiştir.

Abstract

In this paper, the design and implementation of high power factor SEPIC LED driver which is containing a diode rectifier are studied. SEPIC converter is operated at 88 kHz switching frequency both for voltage gain performance and input current modulation. Furthermore, the required inductors for converter operation are manufactured as coupled. The design solution is realized by using integrated circuits that can be found in market easily and cheaply. As the loading set, six power LEDs having approximately 6 W power that are connected in two parallel branches are used. The harmonic content of supply voltage, current and voltage waveforms of AC mains and power LEDs are shown. Furthermore, the compatibility of input current harmonic spectrum to IEC 61000-3-2 standard is also examined.

1. Giriş

Fosil yakıtların azalması ve çevreye olumsuz etkilerinden dolayı yenilenebilir enerji kaynaklarının kullanımı ve özellikle elektrik enerjisinin verimli olarak tüketilmesi son yıllarda çok önemli hale gelmiştir. Ek olarak, aydınlatma teknolojisi

elektrik enerjisinin en çok kullanıldığı alanlardan birisidir. Bu nedenle, aydınlatma cihazları kullanılırken enerji verimliliği göz önünde bulundurulmak zorundadır.

Bununla birlikte, aydınlatma cihazlarının içerisinde son yıllarda yüksek verimlerinden dolayı güç LED'leri kullanımı da artmaktadır. Güç LED'leri doğru gerilime ihtiyaç duyar. Bu doğru gerilim, doğrudan batarya ya da güneş pillerinden elde edilebileceği gibi şebeke geriliminin doğrultularak kullanımı en çok tercih edilen yoldur. Güç LED'leri düşük güçlü cihazlar oldukları için bir fazlı gerilimin doğrultulması daha uygun olur. Uygulamaların basitliği ve maliyetin de düşük olmasını sağlamak için kontrolsüz doğrultucular bir fazlı gerilimin doğrultulmasında tercih sebebidir. Ancak, sadece kontrolsüz doğrultucular kullanıldığında, şebeke akımında harmonikler oluşturabilirler ve güç faktörünü düşürebilirler. Bu durum elektrik enerjisinin verimsiz olarak kullanılması anlamına gelir ve bu nedenle yüksek güç faktörlü sürücüler kullanılmalıdır.

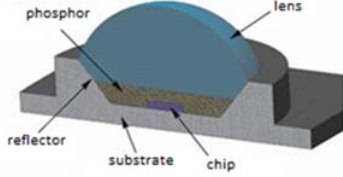
Literatürde, yüksek güç faktörlü dönüştürücüler ya da güç faktörü düzeltme yapılarının çeşitleri, aralarındaki farklar, avantaj ve dezavantajları [1] de açıklanmıştır. [2-3] de şebeke akımının uyması gereken harmonik sınırlarını içeren standartlar belirtilmiştir. Güç faktörü düzeltimi işleminde temel DA dönüştürücü kullanımlarının aralarındaki farklar ve avantaj, dezavantajları [4-5] de ifade edilmektedir. [6] da DA dönüştürücülerin analizleri ve tasarımlarının nasıl yapıldığı geniş bir şekilde verilmiştir. Güç LED'lerinin diğer aydınlatma türlerine göre avantaj ve dezavantajları da [7-9] da açıklanmıştır. [10-11] de ayrıntılı olarak anahtarlama ve lineer LED sürücü yapıları ele alınmıştır, çeşitleri, çalışmaları ve aralarındaki farklar detaylı olarak irdelenmiştir. Düşürücü-yükseltici, Cuk, Flyback ve SEPIC dönüştürücü tabanlı yüksek güç faktörlü LED sürücü uygulamaları ayrı ayrı [12-15] de gerçekleştirilmiştir. [16-17] de ise güç LED'lerinin yapısı, çeşitleri ve çalışması detaylı olarak anlatılmıştır.

Bu çalışmada, yüksek güç faktörlü SEPIC LED sürücü devresinin tasarımı ve uygulanması gerçekleştirilmiştir. Uygulamalar piyasada kolaylıkla bulunan ve ucuz entegrelerle yapılmıştır. SEPIC LED sürücü 88 kHz anahtarlama frekansında çalıştırılmış ve bobinleri aynı nüve üzerine

sarılarak yani kuplajlı olarak elde edilmiştir. Yük olarak ise, iki paralel kolda üçerli olmak üzere yaklaşık 6W lık toplam altı adet güç LED'i kullanılmıştır. Yapılan uygulamalar sonucunda, şebeke gerilimi ve akımının harmonik içeriği, güç faktörü ölçülmüştür. Ayrıca, güç LED'lerinin ve şebeke akımı ve geriliminin, akım ve gerilimleri de gösterilmiştir. Bununla birlikte, yüksek güç faktörlü SEPIC LED sürücünün şebeke akımı harmoniklerinin IEC61000-3-2 standardına uygunluğu da incelenmiştir.

2. Güç LED'leri

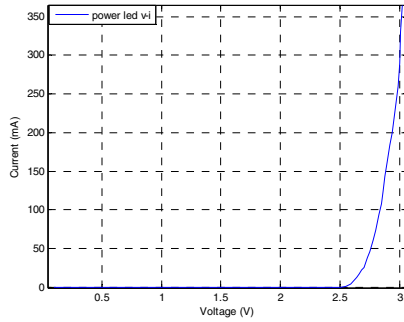
Son zamanlarda güç LED'lerinin aydınlatmada kullanılması yaygınlaşmaktadır. Şekil 1' de güç LED'inin yapısı gösterilmektedir [18].



Şekil 1: Güç Led'i [18].

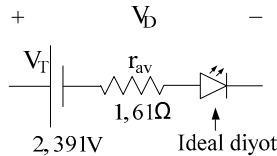
Şekilden görüleceği gibi güç LED'i, çip, alt katman, fosfor bir katman, yansıtıcı ve lensten oluşmaktadır.

Güç LED'inin akım ve gerilim karakteristiği Şekil 2' de verilmiştir [12].



Şekil 2: Güç Led'i akım-gerilim karakteristiği.

Güç LED'inin akım-gerilim karakteristiği diyotun karakteristiğine çok benzemektedir. Bununla birlikte, gerilimde ufak bir değişiklik akımda daha yüksek değişimlere neden olmaktadır. Bu nedenle güç LED'leri sürücü devrelere ihtiyaç duymaktadır. Ek olarak, Şekil 3' de akım-gerilim karakteristiğinden çıkarılan güç LED'i elektriksel devre modeli gösterilmektedir [19].

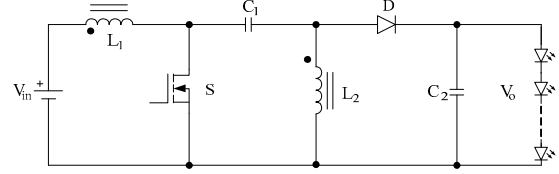


Şekil 3: Güç LED'i elektriksel devre modeli.

3. SEPIC DA Dönüştürücü

SEPIC DA dönüştürücü temel DA dönüştürücüler olan düşürücü, yükseltici, düşürücü-yükseltici dönüştürücülerle karşılaştırıldığında iki tane bobin ve iki tane kondansatörden

oluşmaktadır. Bununla birlikte, çıkış gerilimi giriş geriliminden, düşürücü-yükseltici dönüştürücüde olduğu gibi daha düşük ya da daha yüksek olabilmektedir ve düşürücü-yükselticide olduğu gibi ters değil aynı polaritededir. Şekil 4' de SEPIC DA dönüştürücü gösterilmektedir.



Şekil 4: SEPIC DA dönüştürücü.

SEPIC DA dönüştürücünün çalışmasını S anahtarının iletimde ve kesimde olması durumlarına göre incelemek mümkündür. S anahtarı iletimde iken L₁ bobini enerjilenir, akım lineer olarak artar, aynı zamanda C₁ kondansatörü deşarj olur ve enerjisini L₂ bobinine aktarır. L₂ bobini de enerjilenir ve akımı lineer olarak artar. Diğer taraftan, C₂ kondansatörü yükü beslemeye devam eder. S anahtarı kesime götürüldüğünde ise, D diyotu iletime geçer, C₁ kondansatörü, L₁ bobini ve DA kaynak tarafından şarj edilir. Aynı zamanda, C₂ kondansatörü de DA kaynak, L₁ ve L₂ bobinleri tarafından şarj edilir ve yük beslenir [20-21].

SEPIC DA dönüştürücünün diğer dönüştürücü yapılarına göre bir takım avantajları vardır. Bunlar aşağıda sıralanmıştır [21].

- Tek anahtar kullanması
- Sürekli giriş akımı
- Ayarlı çıkış gerilimi
- Girişteki akım dalgalanmasının, filtre ihtiyacının azaltılarak düşürülmesi.
- Aşırı akım sınırlama yeteneği
- Yarı iletken anahtarı sürme kolaylığı
- Pozitif çıkış gerilimi

3.1. SEPIC Dönüştürücü Tasarımı

Bu çalışmada yapılacak uygulama da tek fazlı köprü tipi doğrultmaç çıkışına SEPIC dönüştürücü bağlanacak ve bu sayede yüksek güç faktörü elde edilmeye çalışılacaktır. Öncelikle SEPIC dönüştürücü tasarlanacaktır ve elde edilen değerler uygulamada kullanılacaktır.

Giriş gerilimi olarak 12 V ve çıkış gerilimi olarak ise 10,5V ve dönüştürücünün gücü 8 W olarak alındığında gerekli eleman değerleri aşağıdaki gibi belirlenebilir [22-23].

Darbeleme oranı (D) denklem (1) ile bulunabilir.

$$D = \frac{V_o + V_D}{V_{in} + V_o + V_D} \Rightarrow D = 0,495 \quad (1)$$

L₁ ve L₂ bobinlerinin minimum değerleri denklem (2-4) ile bulunur. Diğer yapılara göre iki adet bobin bulunmasına karşın, bu bobinlerin aynı nüve üzerine sarılması ve değerlerinin nispeten küçük olması nedeniyle genel maliyeti arttırmayacağı aşikârdır.

$$P_{out}=V_o \cdot I_{out} \Rightarrow 8=10,5 \cdot I_{out} \Rightarrow I_{out}=0,75 \text{ A} \quad (2)$$

$$\Delta I_L=I_{in} \cdot \%40=I_{out} \cdot V_o/V_{in}=0,76 \cdot 10,5/12=0,75 \text{ A} \quad (3)$$

$$L_{1m}=L_{2m}=D \cdot V_{in}/\Delta I_L \cdot f_{sw}=0,49 \cdot 12/2,076 \cdot 88 \cdot 10^3=44 \mu\text{H} \quad (4)$$

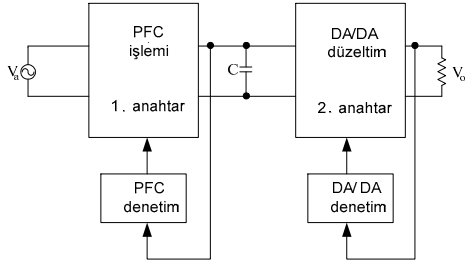
C_1 ve C_2 kondansatörlerinin değerleri de denklem (5-6) deki gibi belirlenir.

$$C_2 \geq I_{out} \cdot D / V_{ripple} \cdot f_{sw} \Rightarrow C_2 \geq 423 \mu\text{F} \quad (5)$$

$$C_1 = I_{out} \cdot D / \Delta V_{C_1} \cdot f_{sw} \Rightarrow C_1 = 10 \mu\text{F} \quad (6)$$

4. Yüksek Güç Faktörlü SEPIC LED Sürücü

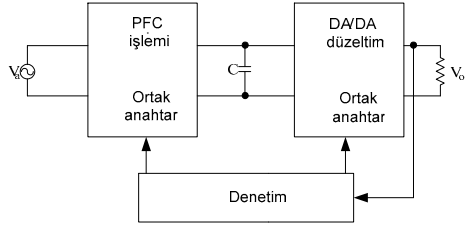
Tek fazlı güç faktörü düzeltme devreleri temel olarak tek aşamalı ve çift aşamalı olmak üzere ikiye ayrılır. Şekil 5’de iki aşamalı yapının temel prensip diyagramı gösterilmektedir.



Şekil 5: İki aşamalı güç faktörü düzeltme yapısı.

Bu yapıda güç faktörü ve doğru gerilim düzeltimi ayrı iki yapı ile gerçekleştirilir ve genellikle iki farklı devre kullanılır [1, 4-5].

Şekil 6’ da ise tek aşamalı güç faktörü düzeltimi temel yapısı gösterilmektedir.

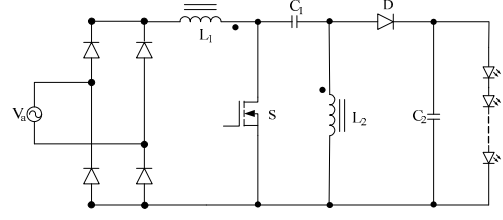


Şekil 6: Tek aşamalı güç faktörü düzeltme yapısı.

Bu yapıda ise hem güç faktörü hem de doğru gerilim düzeltimi tek bir yapı ile gerçekleştirilir [1, 4-5]. Ayrıca bu tip uygulamalarda, kontrolsüz köprü doğrultucunun çıkışına, herhangi bir DA dönüştürücü bağlanarak ve bu dönüştürücü yüksek frekansta çalıştırılarak güç faktörü düzeltme işlemi gerçekleştirilmeye çalışılır [4-5].

İki aşamalı ve tek aşamalı güç faktörü düzeltme yapıları [1] de karşılaştırılmıştır. Bununla birlikte, düşük güçlerde tek aşamalı yapının kullanılması daha avantajlı olmaktadır. Bu nedenle, güç LED’lerinin sürülmesinde tek aşamalı yapının kullanılması daha uygundur.

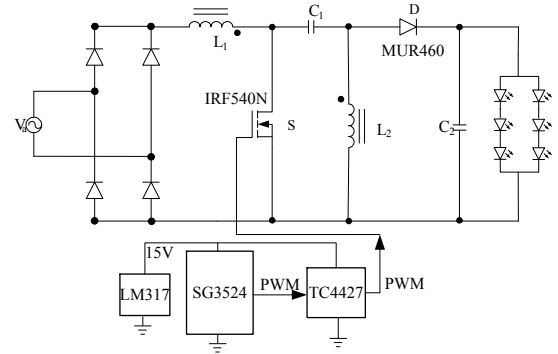
Şekil 7’ de uygulaması yapılacak olan yüksek güç faktörlü SEPIC LED sürücü yapısı gösterilmiştir. Bu yapıda, SEPIC dönüştürücü kontrolsüz köprü tipi doğrultmaç devresinin çıkışına bağlanmış ve yüksek frekansta çalıştırılmıştır. L_1 ve L_2 bobinleri aynı nüve üzerine sarılmışlardır [20-23].



Şekil 7: Yüksek güç faktörlü SEPIC LED sürücü.

5. Uygulama

Şekil 8’ de uygulama devresinin prensip şeması gösterilmektedir. Bu uygulamada piyasada kolaylıkla bulunabilen SG3524 PWM entegresi, TC4427 MOSFET sürücü entegresi, IRF540N tipi MOSFET ve MUR460 hızlı diyotu kullanılmıştır. Şebeke gerilimi 220/2x12 V bir düşürücü transformator vasıtasıyla düşürülmüştür. Entegrelerin besleme gerilimi ise LM317 entegresiyle sağlanmıştır.



Şekil 8: Uygulama devresi prensip şeması.

Tektronix TPS2024B osiloskop ile gerekli ölçümler yapılmış ve dalga şekilleri kayıt edilmiştir. Ayrıca, Lutron LCR 9184 vasıtasıyla gerekli bobinler kuplajlı olarak sarılmıştır. Uygulama ortamı Şekil 9’ da gösterilmektedir.

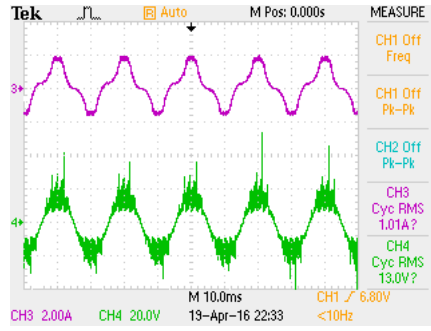


Şekil 9: Deney düzeneği.

Yapılan uygulamalar sonucunda şebeke akımı ve geriliminin dalga şekilleri, harmonik içerikleri, güç faktörü ve güç LED’lerinin akım ve gerilimlerinin dalga şekilleri elde edilmiştir.

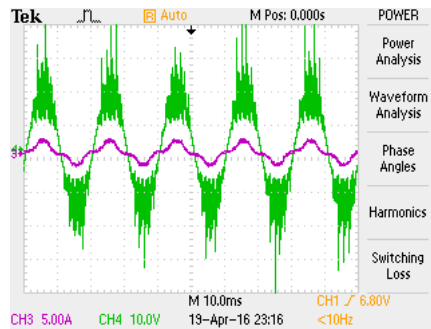
Şekil 10’ da şebeke akımı ve gerilimi gösterilmektedir. Bu şekilden de görüleceği gibi şebekeden çekilen akım tam olarak sinüs olmasa bile ideal sinüs dalga şekline yakındır. Şebeke

gerilimi sinüsoidal olmasına karşın, anahtarlama frekansından dolayı yüksek frekanslı bozunumlar içermektedir.



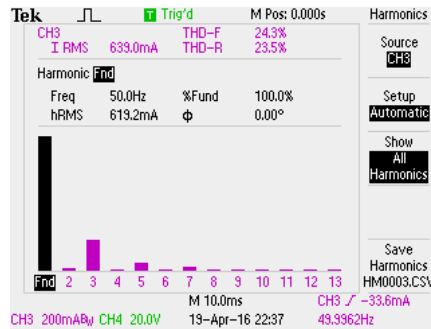
Şekil 10: Şebeke akımı (üstte) ve gerilimi.

Şekil 11’de şebeke akımı ve gerilimi üst üste gösterilmiştir. Görüleceği gibi akım ve gerilim arasında faz farkı neredeyse yok gibidir. Buna karşın güç faktörü 0,927 olarak ölçülmüştür.



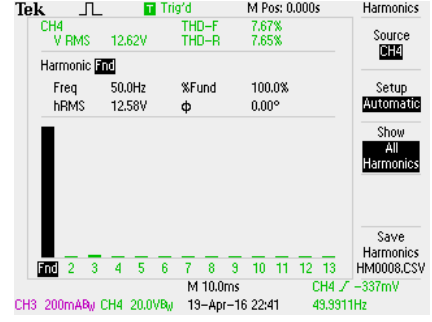
Şekil 11: Şebeke akımı ve geriliminin birlikte gösterimi.

Şebeke akımı toplam harmonik bozunumu Şekil 12’de de gösterildiği gibi %24,3 tür. Aynı şekilde şebeke akımının 13. harmonik içeriğine kadar olan kısmı gösterilmiştir.



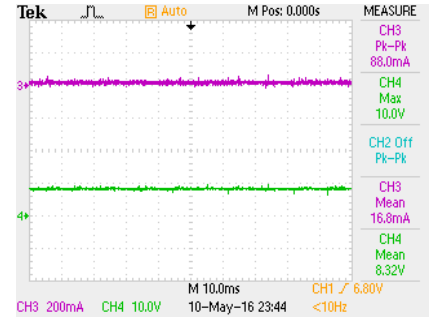
Şekil 12: Şebeke akımı harmonik içeriği.

Şebeke gerilimi harmonik içeriği ise Şekil 13’ de gösterilmektedir ve toplam harmonik bozunumu %7.7 olarak ölçülmüştür ve 13. harmonik bozunumuna kadar olan bileşenler gösterilmiştir.

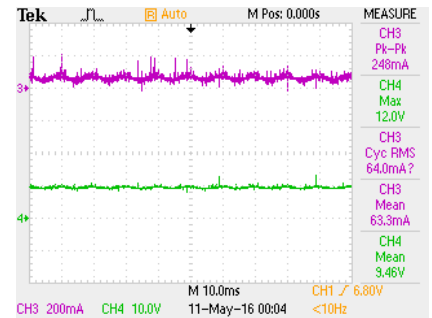


Şekil 13: Şebeke gerilimi harmonik içeriği.

Güç LED’i akım ve gerilim farklı gerilim değerlerine göre Şekil 14 ve Şekil 15’de gösterilmiştir.



Şekil 14: Çıkış gerilimi 8,32V iken güç LED’i akımı (üstte) ve gerilimi.



Şekil 15: Çıkış gerilimi 9,46V iken güç LED’i akımı (üstte) ve gerilimi.

6. Sonuç

Bu çalışmada, yüksek güç faktörlü SEPIC LED sürücü tasarımı ve uygulaması gerçekleştirilmiştir. Gerçekleştirilen bu uygulama sonucunda, kaynak gerilimi ve akımının harmonik bozunumları ve güç faktörleri ölçülmüştür, güç LED’i akım ve gerilimleri gösterilmiştir.

Yapılan uygulamada, piyasada kolaylıkla bulunabilen entegreler kullanılmıştır. Ayrıca, EMI filtre devresi ve güç anahtarı için bastırma devresi kullanılmamıştır. Bununla birlikte, [12]’deki düşürücü-yükseltici de olduğu gibi güç LED’i akımı üzerindeki dalgalanma çok değil daha azdır.

Ölçümler sonucunda, güç faktörü 0,927, şebeke akımı harmonik bozunumu %24,3 ve şebeke gerilimi harmonik bozunumu %7,67 olarak elde edilmiştir. Güç faktör düzeltimli yapılar kullanılmadığında daha kötü değerler elde edilmektedir [12]. Ek A, kısmında gösterildiği gibi, elde edilen harmonik bozunumları 50. dereceye kadar listelenmiştir. Bu

değerler, IEC61000-3-2 standardı ile karşılaştırıldığında, standart sağlanmaktadır. Ancak, 2. harmonik, %2 yerine, %2.7 olarak tespit edilmiştir. Bu durum, bir EMI filtresi eklenerek düzeltilebileceği düşünülmektedir.

Daha sonraki uygulamalarda, 2. harmonik istenilen değerin altına düşürülmeye çalışılacak olup, şebeke gerilimi altında, akım kontrol yapısı içeren kapalı döngülü denetim yapılmaya çalışılacaktır.

7. Kaynaklar

- [1] Zhang, J., Jovanovich, M.M. ve Lee, F.C., "Comparison Between CCM Single Stage and Two Stage Boost PFC Converters", *The 14th Annual Applied Power Electronics Conference and Exposition*, 1999, 335-341.
- [2] IEEE Standat 512-1992, "IEEE Recommended Practices and Requirements for Harmonic Control in Electrical Power System", 1993.
- [3] TS EN 61000-3-2, "Limits for Harmonic Current Emissions", Türk Standartları Enstitüsü, Ankara, 2014.
- [4] Bodur, H., Akboy, E. ve Aksoy, İ., "Tek Aşamalı Güç Faktörü Düzeltme Yapılarının İncelenmesi", *Elektrik-Elektronik Bilgisayar Sempozyumu*, 2011, 168-172.
- [5] Grigore, V., "Topological Issue in Single-Phase Power Factor Correction", Doktora Tezi, Helsinki Teknoloji Üniversitesi, 2001.
- [6] Kazmierczuk, M.K., *Pulse-width Modulated DC-DC Power Converters*, Wiley, Singapore, 2008.
- [7] Soni, N.B. ve Devendra, P., "The Transition to LED Illumination: A Case Study on Energy Conservation", *Journal of Theoretical and Applied Information Technology*, 11., 1083-1087, 2008.
- [8] Bourget, C.M., "An Introduction to Light-emitting Diodes", *HortScience*, 43., 1944-1946, 2008.
- [9] Racz, D.A., "Why Invest in Energy Efficiency? The Example of Lighting", *Journal of Environmental Sustainability*, 2., 83-98, 2012.
- [10] Winder, S., *Power Supplies for Led Driving*, Elsevier, Oxford, 2008.
- [11] Arias, M., Vazgues, A. ve Sebastian, J., "An Overview of the AC-DC and DC-DC Converters for Led Lighting Applications", *Journal for Control, Measurement, Electronics, Computig and Communications*, 53., 156-172, 2012.
- [12] Şehirli, E., Altınay, M. ve Çakır, B., "Comparison of Single-phase Linear and Buck-boost Led Driver", *Light&Engineering*, 23., 78-84, 2016.
- [13] Mohammed, L., Saudin, N., Hamid, N.F.A., Ramly, N.H., Isa, Z.M. ve Ahamad, N.B., "Cuk Converter as a Led Lamp Driver", *IEEE International Conference on Power and Energy*, 2012, 262-267.
- [14] Lamar, D.G., Arias, M., Rodrigues, A., Fernandes, A., Hernando, M.M. ve Sebastian., "Design Oriented Analysis and Performance Evaluation of a Low Cost High-birghtness Led Driver Based on Flyback Power Factor Corrector", *IEEE transaction on Industrial Electronics*, 60., 2614-2626, 2013.
- [15] Ma, H., Lai, J.S., Feng, Q., Yu, W., Zheng, C. ve Zhao, Z., "A Novel Valley-Fill SEPIC derived Power Supply without Electrolytic Capacitors for Led Lighting Appliaiton ", *IEEE Transaction on Power Electronics*, 20., 3057-3071, 2012.
- [16] Schubert, E.F., *Light Emitting Diode*, Cambridge Press, New York, 2003.
- [17] Mottier, P., *Leds for Lighting Applications*, Wiley, London, 2009.
- [18] Liu, Z., Liu, S., Wang, K. ve Luo, X., "Status and Prospects for Phospor-based White Led Packaging", *Frontiers of Optoelectronics in China*, 2., 119-140, 2009.
- [19] Şehirli, E., "Yüksek Güç Faktörlü Düşürücü-Yükseltici Led sürücünün tasarlanması ve Gerçeklenmesi", Yüksek Lisans Tezi, Kocaeli Üniversitesi, 2016.
- [20] Ridley, R. ve Vorperian, V., *Analyzing the Sepic Converter*, Ridley Engineering, Georgia, 2006.
- [21] Falin, J., *Designing DC/DC converters based on SEPIC topology*, Texas Instruments, Texas, 2008.
- [22] Zhang, D., *AN-1484 Designing a SEPIC Converter*, Texas Instruments, Texas, 2013.
- [23] Dixon, L., *Seminar 900 Topic 6 – High Power Factor Preregulator Using the SEPIC Converter*, Texas Instruments, Texas, 2001.

Ek A

IEC61000-3-2 standardı, ülkemizde TSEN61000-3-2 olarak geçerlilik gören standart tablo halinde Çizelge 1'de gösterilmektedir. Bu standartta aydınlatma cihazları için Sınıf C, geçerli olmaktadır.

Çizelge 1: IEC61000-3-2 (TSEN61000-3-2)

n	Sınıf A (A)	Sınıf B (A)	Sınıf C (%)	Sınıf D (mA/W)
3	2.3	3.45	30*λ	3.4
5	1.13	1.71	10	1.9
7	0.77	1.155	7	1
9	0.4	0.6	5	0.5
11	0.33	0.495	3	0.35
13	0.21	0.315	3	3.85/13
15≤n≤39	0.15x15/n	0.225x15/n	3	3.85/n
2	1.08	1.62	2	-
4	0.43	0.645	-	-
6	0.3	0.45	-	-
8≤n≤10	0.23x8/n	0.345x8/n	-	-

Çizelge 2' de ise şebeke akımı harmonik bozunumunun 50. harmoniğe kadar ölçüm sonuçları verilmiştir.

Çizelge 2: Şebeke akımının 50. harmoniğine kadar ölçüm sonuçları

n	Harm. (%)	n	Harm. (%)	n	Harm. (%)
1	100	18	0.183	35	0.137
2	2.7269	19	0.367	36	0.0159
3	23.666	20	0.107	37	0.144
4	1.7264	21	0.171	38	0.022
5	7.6446	22	0.068	39	0.13
6	0.7799	23	0.087	40	0.049
7	4.44	24	0.049	41	0.081
8	0.097	25	0.216	42	0.011
9	1.0421	26	0.0755	43	0.063
10	0.2458	27	0.135	44	0.006
11	1.097	28	0.045	45	0.11
12	0.264	29	0.11	46	0.0358
13	0.7716	30	0.0518	47	0.108
14	0.139	31	0.246	48	0.025
15	0.162	32	0.029	49	0.09
16	0.042	33	0.151	50	0.0102
17	0.49	34	0.032		