

G-LED UYGULAMALARI İÇİN GÜÇ KATSAYISI DÜZELTİCİLİ TEK KATLI AC-DC DÖNÜŞTÜRÜCÜLERİN AYRINTILI ANALİZİ

Hasan Yılmaz¹

Ahmet M. Hava²

¹*Bahar Aydınlatma*
Demirhenderek cad. No: 20 Siteler, Ankara
Hasan@baharaydinlatma.com.tr

²*Elektrik ve Elektronik Mühendisliği Bölümü*
Orta Doğu Teknik Üniversitesi, İnönü Bulvarı, Balgat, 06531 Ankara
Hava@metu.edu.tr

Öz-- Bu makalede aydınlatma amaçlı G-LED'ler için yüksek verim ve güç kaliteli modern güç katsayısı düzelticili tek katlı AC/DC dönüştürücülerden üstün nitelikler taşıyan üç devre; kısmi-aktif, flyback ve SEPIC devreleri ayrıntılı incelenip, bilgisayar benzetimleri ile başarımları doğrulanacaktır. Devreler arasında boyut, eleman sayısı, güç katsayı, verimlilik, toplam harmonik bozulma değerleri incelenerek kıyaslama yapılacaktır. Devrelerin denetimi ve yüke bağlı başarımları değerlendirilecektir.

Anahtar sözcükler- AC/DC dönüştürücü, GKD, Tek-katlı devre yapıları, G-LED, güç kaynağı, LED sürme.

I. GİRİŞ

Teknolojik gelişmeler sonrasında yarı-iletken aydınlatma ürünü olan güç ledleri (G-LED), çeşitli aydınlatma alanlarında yaygın bir şekilde kullanılmaya başlanmıştır. G-LED uzun ömürlü olması, kolay uygulanabilmesi, cıva içermemesi ve sürekli yükselen performansı ile geleneksel tip akkor lambalar ve verimli flüoresan lambaların yerini almaya başlamıştır.

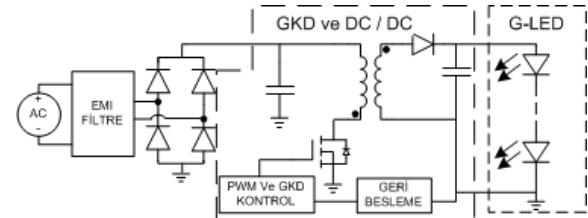
Verimli bir elektronik malzeme olan G-LED' in sürme devresi de aynı şekilde verimli olmalı ve bununla birlikte sunulan standartlara uygun, (Aydınlatma ürünlerinde kullanılan güç kaynaklarına yönelik standart olan IEC 61000-3-2[1-3]), G-LED yüküne göre sabit akım çıkış verebilmelidir.[4],[5]

Kaliteli enerji tüketimi sağlanması için şebekeden çekilen akımın giriş gerilimi gibi sinüs dalga şeklini takip etmesi gerekir. Bu şekilde güç katsayısı düzeltme (GKD) ve şebekeden çekilen akımın harmonik değerleri belirlenen standartlara uygun olması sağlanır. GKD uygulaması geleneksel tip güç kaynakları iki-katlı devre yapısı kullanılarak uygulanır; birinci kat aktif bir anahtar ile kontrol edilen yükseltme devresidir, ikinci kat ise diğer bir anahtar ile kontrol edilen DC/DC güç dönüşüm katından oluşur.

Modern GKD uygulaması enerji çevirimi GKD ve dc/dc katmanını, tek anahtar ile kontrol ederek [6] ac/dc dönüşümünü tek-kat ile yapılması sağlanır

(Şek.1). Bu şekilde iki-katlı devre yapılarında bulunan yükseltme kısmı devreden çıkartılır ve doğru kontrol sistemi ile dc/dc dönüştürücü kısmı kontrol edilerek GKD sağlanır. G-LED için dc/dc çıkış bölümünde sabit akım verecek şekilde tasarlanmalıdır, dolayısıyla tasarlanacak tek-katlı dönüştürücüler de G-LED uygulamalarında belirli kısıtlara göre tasarlanmaları gerekir. Dc/dc dönüştürücüler arasında tüm devre yapıları G-LED uygulamalarında kullanılabilir ve birbirlerine göre avantajları ve dezavantajları bulunur.

Bu bildiride G-LED uygulamalarında kullanılacak ve diğer tek-katlı devre yapılarına göre avantajları olan kısmi-aktif, flyback, SEPIC dönüştürücülerinin detaylı olarak analizi yapılacaktır. Sunulan ikinci ve tamamlayıcı bir bildiri de ise G-LED uygulamaları, genel güç katsayısı düzeltimi, güç kalitesi, enerji verimliliğinin aydınlatma uygulamaları üzerinde ayrıntılı olarak bilgi verilecektir.

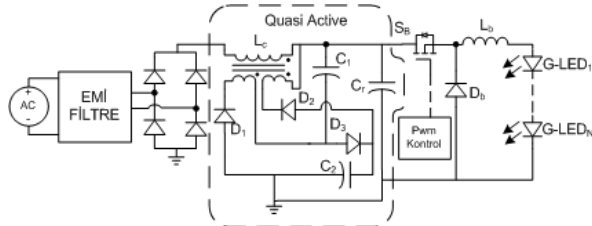


Şek. 1 Modern tek katlı AC/DC G-LED dönüştürücü

II. KISMİ-AKTİF GKD DEVRESİ [7]

Şekil 2' de gösterilen tek-katlı kısmi-aktif GKD devre yapısı iki bölümden oluşmaktadır; GKD bölümü ve dc/dc dönüştürücü bölümü. GKD bölümü vadi-doldurma diyotları ve pasif elemanlardan oluşturulmuş, dc/dc bölümü ise G-LED uygulamalarına uygun bir dönüştürücü kullanılarak (buck, buck-boost, forward, flyback) kurulmuş, bu şekilde tek anahtar ile kontrol edilen tek-katlı bir ac/dc G-LED güç kaynağı üretilmiştir. Pasif devre elemanları kullanılması yüksek verimli, güvenilir ve kolay kontrol edilebilir bir devre yapısı

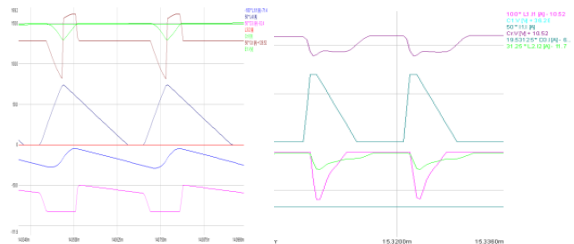
oluşturulmasını sağlar. Aynı zamanda aktif anahtarın dc/dc dönüştürücü bölümünde kullanılması, üzerinde GKD ve giriş akım stresi olmamasını sağlar.



Şek. 2 Kısmi aktif GKD devresi [9]

Devrenin doğru çalıştırılması için ikinci bölüm olan dc/dc dönüştürücünün tüm çalışma zamanı boyunca çektiği akımın kesintili olması gerekir. Benzetimde dc/dc bölümü akım kaynağı olarak modellenmiştir ve çekilecek güce göre kesintili bir darbe sinyali olarak ayarlanmıştır. Devre kontrol yapısı için de yaygın olarak kullanılan tepe akım sınırlama yöntemi sabit frekans içerisinde çalışacak şekilde ayarlanmıştır.

Devre çalışma şekli 2 kip içerisinde incelenir, direk-besleme kipi ve bağlaşık-yükseltme kipi. Şebeke geriliminin her bir depo kondansatör (C₁,C₂) geriliminden yüksek olduğu durum direk-besleme halidir. Dc/dc bölümünün akımı yükseldiği sırada şebekeden, bağlaşık bobinin birincil sargısından (L₁) geçecek şekilde akım akar, yük beslenir ve düşük bir değere sahip olan (0.1uF) tınlama kondansatörü (C_r) kısa sürede şarj edilir. Dc/dc bölümde anahtarlama yapıldığı anda, GKD bölümünün akımı kesilir, C_r kısa sürede C₁,C₂ değerine düşer ve şebeke C₁,C₂ kondansatörlerini şarj eder. Bu kip içerisinde L₁ üzerinden sürekli akım akar ve manyetik alanda enerji depolanır. Bu kip içerisinde bağlaşık bobinin ikinci ve üçüncü sargılarından (L₂,L₃) diyetler sayesinde akım akmaz. Devre dalga şekilleri Şekil 3' de sol bölümde gösterilmiştir.



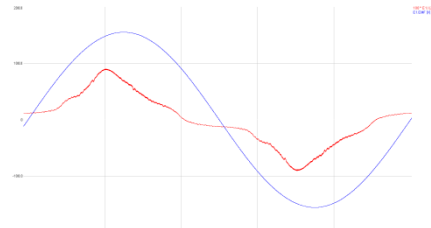
Şek. 3 C₁ gerilim, C_r akım, DC/DC bobin (L_d) akım, L₂ akım, L₁ akım, D₃ akım. (Sol grafik: doğrudan iletim, sağ grafik: bağlaşık-yükseltme bölümü)

Şebeke geriliminin, C₁,C₂' den düşük bir değerde olduğu zaman devre ikinci kip olan, bağlaşık-yükseltme kipinde çalışır. Bu kip süresince GKD bölümünde manyetik alanda depolanan enerjinin, tınlama devresi yaratılarak C₁,C₂' ye aktarılması ve girişten akım çekilmesi sağlanır. Bu kip üç bölüm içerisinde incelenebilir. (Şek.3, sağ bölüm) Önceki kipteki gibi dc/dc bölümü kesintili kipte çalışmaktadır. GKD bölümünün çıkışında akım yükseldiği süre (

dc/dc bölümün iş süresi) boyunca L₁, C₁, C₂ değeri şebeke geriliminden yüksek olduğu için üzerinden akım akmaz ve L₂, L₃, C₁, C₂, C_r arasında tınlama devresi oluşur.

İkinci olarak, dc/dc bölümü kesintiye gittiği anda C_r üzerinde gerilim aniden düşer ve anlık olarak L₁ üzerinden akım akar ve şekilde de görüleceği gibi, L₁ sargısı üzerinden ani olarak akım yükselir ve dc/dc bölümün kesintide olduğu kısımda azalan bir akım ile şebekeden akım çekilir.

Devrenin parametrelerinden L₁, C₁,C₂ ve DC/DC bobin (L_d) değerleri ilgili makalede [9] prototipi üretilen devreden alınmıştır, bunun yanında C_r, L₂, L₃ sargı sayıları, giriş filtre elemanlarının değerleri aritmetik hesaplar ve benzetimdeki dalga şekilleri doğrulanacak şekilde ayarlanmıştır. Kullanılan değerler ile Şekil 4' te gösterilen giriş gerilim ve giriş akım dalga şekilleri elde edilmiştir.

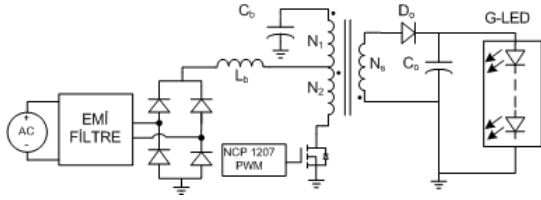


Şek. 4 Giriş gerilim: mavi, giriş akım: kırmızı.

Devre benzetiminde toplam THB_i, GK ve verim değerleri tam yükte çalışmada %30, 0.85 ve %85 olarak bulunmuştur. Bu değerler uygulamanın yapıldığı [9] ile uyumludur. Benzetimde elde edilebilen çıktılar sonucu diğer devrelere göre yüksek güç katsayısı ve yüksek verim değerlerine sahiptir. Devre farklı dc/dc dönüştürücülerin önünde uygulanabilir olması yönüyle avantajlıdır, bununla birlikte G-LED uygulamalarında istenen farklı yüklerde çalıştırılma yönleri geliştirilmelidir.

III. TEK KATLI FLYBACK DEVRESİ [10]

Tek-katlı flyback uygulamasının devre yapısı Şekil 4'de gösterilmektedir. Temel olarak Flyback devre yapısına sahip olan uygulama, flyback trafosunda değişiklik yapılarak, depo kondansatörünü farklı bir şekilde konumlandırarak ve bir yükseltme bobini ekleyerek oluşturulmuştur. Yükseltme bobininden oluşan GKD katı, kesintili iletim kipinde (DCM) çalışır, dc/dc katı içerisinde bulunan flyback trafosu ise sınır iletim kipi olan, kesintili iletim / devamlı iletim kipi (DCM/CCM) arasında çalışır. DCM kipinde çalıştırılan yükseltme bobininin iş zamanı sabit tutularak girişten sinüs dalga şekline yakın akım çekilir, bu sayede giriş harmonik bozulma değeri düşük olur.



Şek. 5 Tek katlı flyback AC/DC dönüştürücü devresi [5]

Uygulanan devrede flyback trafosunun sarım şekli değiştirilmiştir, birincil bölümde sargının arasında bir noktaya, yükseltme bobininden bağlantı yapılarak, sargı iki kola ayrılır. Depo kondansatörü sargının uç noktası ile toprak arasına bağlanır. Normal bağlantıda gerilim değeri yüksek seviyelere ulaşabilir fakat bu tip bir bağlantı ile gerilim değeri belirli bir seviye altında tutulur.

A. DEVRE ÇALIŞMA ŞEKLİ

Giriş gerilimi birincil sargılar üzerindeki gerilimden daha yüksek bir değere ulaştığı zaman doğrultucu üzerindeki diyotlar (D_1, D_4) iletme geçer ve şebekeden akım çekilmeye başlar. İletim süresi; giriş gerilimi kondansatör üzerindeki gerilim’den az bir değere gelene kadar devam eder. Aynı prensip; devrenin negatif döngüsünde de mevcuttur, bu defa diğer iki diyot (D_3, D_2) iletme geçer.

Devre çalışması 5 kip içerisinde incelenebilir. İncelemede aktif eleman olan Mosfet, birinci anahtar, ikincil taraftaki diyot ise ikinci anahtar olarak nitelendirilecektir. İnceleme giriş geriliminin bir periyot içerisindeki pozitif döngüsü için detaylandırılacaktır.

Kip1: Başlangıç olan, $t = 0$ anında birinci anahtar iletme geçer, ikincil taraftaki diyot ters kutuplu bağlantıda olduğu için kesintidedir ve ikincil taraftan akım akmaz. Şebeke ve depo kondansatörü akımı toplamı (denk.1) ve eğimi V_b/L_m olan miktatsızlanma akımı ile flyback trafosunda enerji depolanır. (Depo kondansatör gerilimi, V_b)

$$i_M = i_{CB} + \left(\frac{N_1}{N_p}\right) i_{LB} \quad (1)$$

Kip 2: Birinci anahtar $t=T_1$ anında kesilir, fakat anahtar üzerindeki parazitik kondansatör (C_p) sebebiyle, kısa bir süre boyunca i_M akımı artmaya devam eder. C_p gerilimi belirli bir değere ($V_b + nV_o$) ulaşınca bu kip sona erer.

Kip 3: İkinci anahtar $t=T_2$ anında iletme geçer ve trafo üzerinde depolanan enerji ikincil tarafa aktarılır. Bu süre boyunca şebekeden akım çekilmeye devam edilir, depo kondansatörü yükseltme bobini enerjisi bitene kadar azalan bir akım ile şarj edilir. Bu şekilde birinci anahtar kesimde olmasına rağmen ikinci tarafa enerji aktarılır. Normal flyback operasyonunda olmayan bu kip sayesinde enerjinin doğrudan yüke aktarıldığı zaman artırılır ve bu şekilde verim artar.

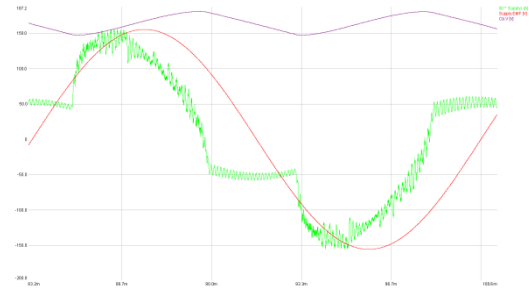
Kip 4: Yükseltme bobinin enerjisi $t=T_3$ anında biter ve yükseltme bobini için DCM kipinin ölü zamanı

başlar. Trafonun enerjisi bitene kadar ikincil tarafta akım akmaya devam eder.

Kip 5: Bu kip trafonun enerjisinin bitmesi ile başlar, ikinci anahtar kesime gider ve tümleşik devrenin özelliği ile oluşan C_b, L_m, C_p arasında tınlaşım devresi sayesinde, anahtar üzerindeki gerilim de dalgacıklaşma oluşur ve gerilim değeri sıfır değerine yakın bir değerde anahtarlama yapıldığı kadar beklenir. (Vadi anahtarlama).

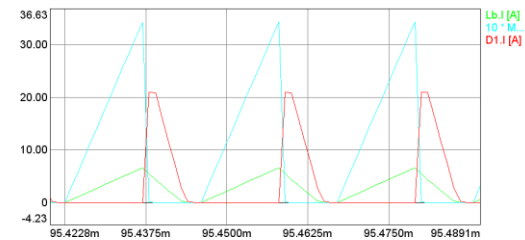
Aritmetik hesaplar ve teorik çalışma yöntemi benzetimlerde doğrulanmıştır. Benzetimde şebeke gerilimi 110 V, sinüs dalgası olarak ayarlanmıştır. Depo kondansatörü üzerindeki gerilim belirli bir değerden yukarı çıktığı zaman giriş bölümünden akım çekilmesi gerekmektedir. Örneğin N_1/N_p değeri 0.5 olduğu zaman; V_{n1} , 75 V olur. Şek. 5 grafiğinde; gerilim değeri 76 V üzerine çıktığı noktada, giriş akımının yükselmeye başladığı gösterilmiştir.

$$V_{n1} = \left(\frac{N_1}{N_p}\right) V_b \quad (1)$$



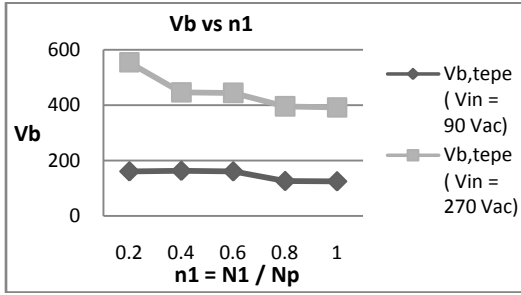
Şek. 6 Kondansatör gerilimi: mavi, giriş gerilimi: kırmızı, giriş akımı: yeşil

İkinci olarak yükseltme bobini ve trafonun çalışma şekli incelenmelidir. Şek. 6’ te görüleceği gibi L_b üzerindeki akım belirli bir süre boyunca devam etmektedir ve dönem bitiminden önce 0 değerine ulaşmaktadır; bu DCM kipinde çalıştığını gösterir. İkincil taraftaki diyot akımı izlendiğinde ise, dönem bitiminde diyot üzerindeki akım “0” değerine ulaşır ve aynı noktada bir sonraki anahtarlama dönemi başlar; bu şekilde devrenin ara bir hal olan DCM/CCM sınırında çalıştığını gösterir.



Şek. 7 Anahtar akımı: mavi, ikincil taraf diyot akımı: kırmızı, yükseltme bobin akımı: yeşil

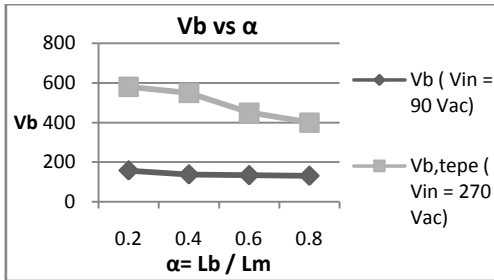
Devrenin çalışmasındaki kritik değerler; birincil bölümdeki sarım sayıları arasındaki orantı (N_1 / N_2) ve yükseltme bobini ile flyback trafosu miktatsızlanma bobini arasındaki orantıdır (L_b / L_m). Bu değişkenlerin devre çalışmasına etkisi grafiklerle (Şek.7, Şek. 8) gösterilmiştir.



Şek. 8 Depo kondansatörünün, flyback trafo birincil taraf sarım sayıları oranı, n_1 : N_1/N_p değerine göre davranışı

Şekil 7' de görüleceği gibi n_1 sayısının, depo kondansatörünün gerilimi üzerinde önemli bir etkisi bulunur ve inceleme sonucu n_1 değerinde asgari bir değer oluşmaktadır, bunun sebebi kondansatör üzerindeki gerilimin, tepe noktasının 600 V olmasının, istenmeyen bir durum olmasıdır. Güvenlik katsayısıyla birlikte, yüksek gerilimde, n_1 değeri 0.6 üzerinde olmalı, düşük gerilimde ise bu değer 0.2 ile 1 arasında olmalıdır.

Devre çalışmasını etkileyen bir diğer faktör $\alpha = L_b/L_m$ değeridir. Yüksek gerilim ve düşük gerilim, uç noktalarında yapılan analizler Şekil 8' de gösterilmiştir. Kondansatör gerilimini güvenilir noktalarda tutmak için; yüksek gerilimde α 'nın 0.5 ile 1, arasında; düşük gerilimde ise α 'nın 0.2 ile 1 arasında tercih edilmesi gerekmektedir.

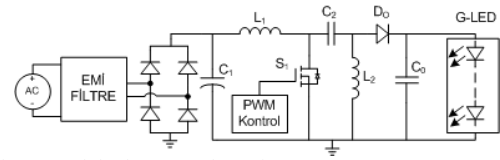


Şek. 9 Depo kondansatör geriliminin, alpha değerine göre değişimi

Devre benzetiminde toplam THB_i , GK ve verim değerleri tam yükte çalışmada %20, 0.85 ve %85 olarak bulunmuştur. Bu değerler uygulamanın yapıldı [10] ile uyumludur. Bu sonuçlardan da görüldüğü gibi uygun devre elemanları seçilmesi durumunda, prototipi yapılan devre klasik tip flyback devresine göre daha iyi performans sergilemekte, çift-katlı bir GKD devresine göre daha az devre elemanı içermektedir. Bunun yanı sıra, yüksek gerilim de tasarım zorlukları bulunmakta, bobinler arasındaki orantı devre çalışma şeklini doğrudan etkilemektedir.

IV. TEK KATLI SEPIC DÖNÜŞTÜRÜCÜ [12]

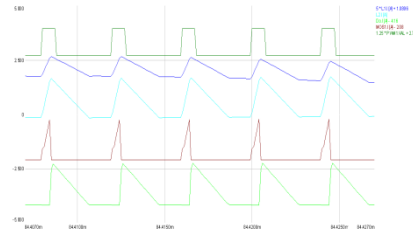
Tek katlı SEPIC devre yapısı Şekil 10' da gösterilmektedir. Devre benzetimi için ilk olarak ISL6745 tümleşik devresi incelenmiş ve özel kontrol sistemi ile benzetim gerçekleştirilmiştir. SEPIC devresinin çalışma şekli, 3 bölüme ayrılır



Şek. 10 Tek katlı SEPIC devresi

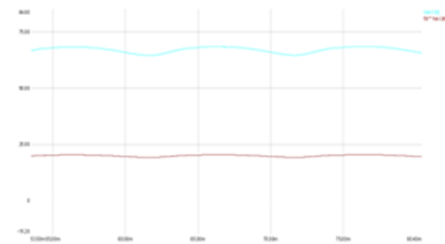
incelenmelidir; anahtar (Mosfet, S_1) iletimde, diyot (D_0) iletimde ve kesim kipi. Devre sabit frekans, DCM kipinde çalışır, çıkış akım hata sinyali oluşturulup, anahtarlama sinyalinin iş zamanı ayarlanır. C_1 kondansatörünün değeri düşük bir değerde olmalıdır, bu şekilde C_1 gerilim dalga şekli, giriş geriliminin doğrultulmuş hali olur. Yapılan teorik analizlerde, C_1 ve C_2 kondansatörlerinin üzerindeki gerilim aynı varsayıp hesaplamalar yapılmıştır ve benzetimde bu doğrulanmıştır; aksi takdirde C_2 değeri gereğinden büyük olması, gerilimin çok daha yavaş yükselmesini ve L_1 'in sıfırlanma süresini değiştirir ve C_1 gerilim dalga şekli devreye bağımlı hale gelir.

Şekil 11' de gösterildiği gibi devre elemanlarının çalışmasının doğrulanması için birkaç anahtarlama zamanı için akım dalga şekilleri gösterilmiştir. S_1 anahtarı ve diyot akım dalga şekillerinden devrenin DCM kipinde çalıştığı gösterilir.



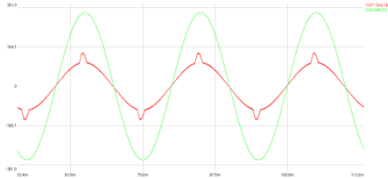
Şek. 11 Şekil 1 Tek aşamalı SEPIC dönüştürücü devre eleman dalga şekilleri (PWM darbe sinyali, L_1 akımı, L_2 akımı, anahtar akımı, çıkış diyot akımı)

Şekil 12' de devrenin yük kısmının gerilim ve akım dalga şekli gösterilmektedir. Akım dalga şeklinde oluşan dalgacıklanma %10 ve ortalama akım değeri 400 mA olarak ölçülmüştür.



Şek. 12 Çıkış Gerilim (Mavi), Çıkış Akım (kırmızı)

Şekil 13' de giriş gerilim ve giriş akım dalga şekli gösterilmiştir. Giriş akım dalga şekli sinüs dalga şekline sahiptir ve gerilim dalga şeklini takip etmektedir.



Şek. 13 Şekil 2 Giriş Gerilim, Giriş Akım Dalga Şekilleri

Devre benzetiminde toplam THB_i, GK ve verim değerleri tam yükte çalışmada %14, 0.95 ve %75 olarak bulunmuştur. Bu değerler uygulamanın yapıldı [12] ile uyumludur. Sonuçlardan da görüldüğü gibi yüksek güç katsayısı ve düşük harmonik bozulma sağlanır. Farklı yüklerle göre güç katsayısında bozulma olmaması ve kullanılan tümleşik devrenin ışık kısıklştırma özelliği ile uygulama odaklı bir devre yapısı oluşturulmuştur. Bunun yanında devreler arasında en çok devre elemanını bulundurması ve düşük verime sahip olması itibariyle dezavantajlı bir devredir.

Tablo 1. BENZETİM PARAMETRELERİ

DEVRE	Trafo	Kondansatör	Bobin
Flyback	Trafo : 615uH	Co=2mF/25V Cb=120uF/420 V	Yükseltme bobin; 110Vac:166uH220 Vac:415uH
SEPIC	L1 L2	C1:240nF,630V C2:0.1uF,630V C3:330uF C4:2.2uF Cer.	L1:820uH L2:82uH
Kısmi Aktif	Akuple- bobin	C1:47uF,E-cap C2:47uF,E-cap Cr:20uF	Ld: 470uH (Buck Dönüştürücü)

V. SONUÇ

G-LED uygulamaları için yüksek verim ve giriş güç kaliteli üç devre olan kısmi-aktif, flyback ve SEPIC devrelerinin ayrıntılı benzetimleri yapıldı, başarımları değerlendirilmiş ve karşılaştırmaları yapılmıştır. Bu devreler geleneksel G-LED besleme kaynaklarına göre yüksek başarımlar göstermekte, verimleri de geleneksel GKD dönüştürücülerine göre daha iyi olmakta, bunun yanında maliyetleri de düşük olmakta, bu yüzden uygulama potansiyelleri yüksek bulunmaktadır. Üç devrenin de uygulama yerleri farklı olmalıdır. Maliyetin ve yük değişiminin önde olduğu uygulamalarda flyback devresi, maliyetin diğerlerine göre sorun olmadığı, geniş giriş geriliminde çalışacak, ışık kısma uygulaması olan, farklı yüklerde de yüksek güç katsayısı istenen uygulamalarda SEPIC devresi, yüksek verimli ve dc/dc katı tasarlanmış uygulamalarda ise kısmi-aktif devresi uygulanabilir.

Benzetimi yapılan devrelerin farklı yüklerle göre detaylı olarak incelemesi, giriş gerilim değişimine

göre performansı, G-LED yüküne göre akım çıkışının değişiminin değerlendirilmesi, devre kontrol sisteminin, devre değerleri aritmetik olarak sabitlendikten sonra iyileştirilmesi gerekmektedir.

REFERANSLAR

- [1] Electromagnetic Compatibility (EMC), Part 3-2: Limits – Limits for harmonic current emissions (equipment input current ≤ 16 A per phase), International Standard IEC 61000-3-2, 2001.
- [2] Electromagnetic Compatibility (EMC), Part 3-2: Limits – Limits for harmonic current emissions (equipment input current ≤ 16 A per phase), International Standard IEC 61000-3-2, 2001.
- [3] B. Singh, B. N. Singh, A. Chandra, K. Al-Haddad, A. Pandey, and D. P. Kothari, "A review of single-phase improved power quality AC-DC converters" *IEEE Trans. Indus. Electron.*, vol. 50, no. 5, pp. 962-981, October 2003.
- [4] Zhongming Ye, Greenfeld, F.; Zhixiang Liang, A topology study of single-phase offline AC/DC converters for high brightness white LED lighting with power factor pre-regulation and brightness dimmable, IECON 2008, Nov. 2008, pp 1961 – 1967.
- [5] B. Ackermann, V. Schulz, C. Martiny, A. Hilgers, X.Zhu, "Control of LEDs" IAS Conference, 2006. 41th IAS Annual Meeting. Conf. Rec. of the 2006 IEEE Oct. 2006.
- [6] Heinz van der Broeck, et al., "Power driver topologies and control schemes for LEDs", IEEE APEC 2007, Feb. 2007, pp. 1319-1325.
- [7] C. Qiao and K. M. Smedley, "A topology survey of single-stage power factor corrector with a boost type input-current-shaper," *IEEE Trans. Power Electron.*, vol. 16, no. 3, pp. 360–368, May 2001.
- [8] K. Zhou, J. G. Zhang, and S. Yuvarajan, "Quasi-active power factor correction circuit for HB LEDdriver," *IEEE Transactions on Power Electronics*, vol. 23, no. 3, pp. 1410 - 1415, May 2008.
- [9] D. F.Weng, "Quasi-active power factor correction circuit for switching power supply," U.S. Patent #6 909 622, Jun. 2005.
- [10] Y. Hu, L. Huber and M. M. Jovanovic, "Single-stage flyback power-factor-correction front-end for HB LED application," *Proc. of IAS 2009*, Oct. 2009.
- [11] ON Semiconductor, "90 W, universal input, single stage, PFC converter," [www.onsemi.com/pub_link/Collateral/ AND8124-D.PDF](http://www.onsemi.com/pub_link/Collateral/AND8124-D.PDF), Dec. 2003.
- [12] Z. Ye, F. Greenfeld, and Z. Liang, Design considerations of a high power factor SEPIC converter for high brightness LED applications, , *Power*