



Tek Fazlı Tek Aşamalı İzoleli Güç Faktörü Düzeltme Devrelerinin İncelenmesi

A Review of Single Phase Single Stage Isolated Power Factor Correction Circuits

Işıl Balcı¹, Hacı Bodur², Abdülkerim Gündoğan³

^{1,2,3}Elektrik Mühendisliği Bölümü

Yıldız Teknik Üniversitesi

ibalcı@yildiz.edu.tr, bodur@yildiz.edu.tr, kering@yildiz.edu.tr

Özet

Bu çalışmada, literatürde sıkça karşılaşılan bazı izoleli Güç Faktörü Düzeltme (PFC) devreleri incelenmiş ve bu devrelerin bir karşılaştırması yapılmıştır. Bu izoleli PFC devrelerinin şemaları, çalışma prensipleri, çalışma aralıkları, temel dalga şekilleri ve önemli özellikleri hakkında detaylı bilgi verilmiştir. Bu kapsamda, bu devrelerde çok öne çıkan iki aşamalı ve tek aşamalı PFC, güç faktörü (PF), toplam harmonik distorsiyonu (THD), doğrudan güç transferi (DPT) ve yumuşak anahtarlama (SS) kavramları ile ileri yönlü (forward) ve geri dönüşlü (flyback) dönüştürücülerin avantaj ve dezavantajları ele alınmıştır. Sonuç olarak, PF, THD, DPT, SS, aktif eleman sayısı, pasif eleman sayısı, trafo sayısı, anahtarlama frekansı, anahtar gerilim stresi, depolama kondansatörü gerilim stresi, verim, vb. açılardan, izoleli PFC devrelerinin detaylı bir karşılaştırması yapılmıştır.

Abstract

In this study, some isolated Power Factor Correction (PFC) circuits, which are frequently encountered in the literature, are examined and a comparison of these circuits is made. Detailed information is given about the schematics, working principles, working ranges, basic waveforms and important features of these isolated PFC circuits. In this context, two-stage and single-stage PFC, power factor (PF), total harmonic distortion (THD), direct power transfer (DPT) and soft switching (SS) concepts, and the advantages and disadvantages of (flyback) converters are discussed. As a result, a detailed comparison of isolated PFC circuits has been made according to parameters such as PF, THD, DPT, SS, number of active elements, number of passive elements, number of transformers, switching frequency, switch voltage stress, storage capacitor voltage stress, efficiency, etc.

1. Giriş

Son yıllarda teknoloji alanındaki gelişmeler ile birlikte enerjiye olan talep gün geçtikçe artmaktadır. Bu durum, enerji kaynaklarının verimli kullanılmasını daha da önemli hale getirmektedir. Şebekeye bağlanan kesintisiz güç kaynakları, güç dönüştürücü devreleri, elektronik balastlar gibi lineer olmayan sistemler, mikroişlemci ve bilgisayar birimleri gibi hassas cihazların çalışmasını olumsuz yönde etkilemektedir. Bu sistemler çektikleri harmonik içerikli akımlar nedeniyle şebeke tarafını olumsuz etkilemekte ve aynı zamanda ilave kayıplara

neden olmaktadır. Bunun yanında yaydıkları elektro manyetik girişim (EMI) vb. gürültüler nedeni ile de diğer cihazlar üzerinde bozucu etkiler oluşturmaktadır.

Bundan dolayı elektronik sistemler için güç faktörü (PF) ve çektikleri harmonik içerikli akımlar yönünden, ulusal ve uluslararası düzeyde farklı kısıtlamalar ve standartlar getirilmiştir. Bu standartlar ve kısıtlamalara uygun olarak yüksek PF ve düşük toplam harmonik distorsiyon (THD) sağlamak amacıyla Güç Faktörü Düzeltme (PFC) devreleri üzerine akademik ve endüstriyel alanda birçok çalışma yapılmaktadır.

PFC devrelerinde çok uzun zamandır pasif ve aktif filtreler kullanılmaktadır. Pasif filtreler, endüktans ve kondansatörden oluşmaktadır. Geniş bir yük aralığında kullanılmayan bu filtreler oldukça hantal ve maliyetlidirler. Aktif filtreler, şebekenin akımını takip ederek şebekenin sinüs formunda olmasını sağlayan bir inverter devresinden oluşmaktadır. Ancak bu filtrelerin devre yapıları karmaşık, kontrolü zor ve maliyeti yüksektir. Bu nedenle son yıllarda yapılan çalışmalar yüksek frekanslı, basit yapılı ve kontrolü kolay AC-DC dönüştürücü tabanlı PFC devreleri üzerine yoğunlaşmaktadır [1, 2].

PFC devreleri, iki aşamalı veya tek aşamalı olmak üzere iki farklı grupta incelenir. İki aşamalı PFC devrelerinde, PFC ve regülasyon kalitesi yüksek olmasına rağmen, gücün iki defa işlenmesi nedeniyle verim düşüktür. Bu devreler yüksek dinamik cevap verme süresine ve maliyete, karmaşık devre yapısına sahiptir. Tek aşamalı PFC devrelerinde ise, PFC ve regülasyon işlemi için iki ayrı devre kullanılmasına rağmen, devrede tek bir anahtar ve bir kontrol devresi kullanılmasından dolayı düşük dinamik cevap verme süresi, basit devre yapısı ve düşük maliyet avantajları sağlanmaktadır [3].

Tek aşamalı topolojilerde izolasyon, doğrudan güç aktarımı (DPT) ve çıkış gerilim regülasyonu sağlamak amacıyla genellikle geri dönüşlü (Flyback) ya da ileri yönlü (Forward) devre topolojileri üzerinde çalışmalar yapılmaktadır. İki aşamalı topolojilerde ise genellikle yarım köprü (Half-Bridge) ya da tam köprü (Full-Bridge) topolojileri kullanılmaktadır [4].

Geri dönüşlü dönüştürücüler, basit devre yapısı ve düşük maliyet gibi avantajlara sahip olmasına rağmen, trafonun kaçak endüktansına bağlı olarak yarı iletken elemanlar üzerinde oluşan ilave akım ve gerilim stresleri gibi dezavantajlar da

barındırmaktadır. İleri yönlü dönüştürücülerde ise çıkış geriliminin giriş geriliminden yüksek olduğu aralıklarda AC girişten enerji çekilememesi nedeniyle PFC kalitesi bozulmaktadır.

Bu sorunların çözülmesi için geri dönüşlü ve ileri yönlü topolojilerinin üstün yanlarının birleştirilmesi üzerinde çalışmalar yapılmaktadır [5]. Örneğin, bu iki topolojinin beraber kullanıldığı [6] nolu yapıda, çıkış geriliminin giriş geriliminden yüksek olduğu aralıklarda ileri yönlü dönüştürücü yerine geri dönüşlü dönüştürücüsünün çalıştırılması ile AC taraftaki enerji çekilemeyen bölgeler ortadan kaldırılır ve böylece PFC kalitesi artırılır. Ayrıca kullanılan trafo geri dönüşlü çalışma esnasında resetlenir ve ek bir resetleme sargısına gerek duyulmaz.

PFC uygulamalarında verimi artırmak ve maliyeti düşürmek için, gücün bir kısmının doğrudan çıkışa aktarılmasıyla DPT sağlanmaktadır. DPT'nin sağlandığı izoleli dönüştürücülerin ve rezonans devrelerinin bir arada kullanıldığı çalışmalar yapılmıştır [7-10]. Bu yapılarda rezonans devresi ile PFC, izoleli dönüştürücüler ile de DPT ve çıkış gerilim regülasyonu sağlanır.

Geleneksel AC-DC LED sürücülerinde düşük PF ve yüksek THD'ye neden olan bozucu etkilere karşı savunmasızdır. Bu nedenle LED sürücülere ilave bir PFC devresi eklenmesi üzerine çalışmalar yapılmıştır. LED sürücü devrelerinde emniyetli kullanım amacı ile izoleli dönüştürücüler tercih edilir. Bu durumda izolasyon için kullanılan trafoların kaçak endüktansları ilave kayıplara neden olur. Bu kayıplar, devrenin verimini önemli ölçüde etkileyebilmektedir. Bu nedenle, oluşan bu kayıp enerjilerin geri kazanılması amacıyla önerilen devre yapıları da bulunmaktadır [11-13]. Bu kayıp enerjileri geri kazanmak amacıyla tasarlanan bastırma hücreleri, aynı zamanda kaçak endüktanstan kaynaklanan gerilim stresini bastırmakta ve kesim anındaki kayıpları da önlemektedir.

Yüksek güçlü uygulamalarda mükemmel enerji aktarımı, düşük akım dalgalanması vb. nedenlerle sürekli akım modunda (CCM) çalışma tercih edilmektedir. Fakat CCM çalışma, diyodun ters toparlanma enerji kaybına, anahtarın akım altında iletme girmesine ve EMI'ya neden olmaktadır [14]. Düşük güçlü uygulamalarda, diyodun ters toparlanma enerji kaybının neden olduğu problemlerden kaçınmak ve anahtarlama kayıplarını düşürmek amacıyla kesintili akım modunda (DCM) çalışma tercih edilir. DCM çalışmada, aynı güç değeri için akımın tepe değeri yükselir ve enerji aktarımı kötüleşir. Bununla birlikte CCM çalışmaya göre daha düşük THD sağlar. Buna rağmen CCM çalışma daha küçük EMI filtresi gerektirir.

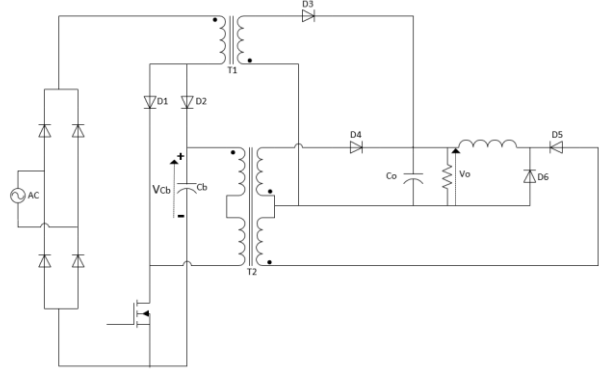
Kaliteli bir PFC işlemi için frekansın artması, anahtarlama kayıpları ve EMI'yı artırmaktadır. Bu sorunlar önlenerek frekansın artırılması için yumuşak anahtarlama (SS) teknikleri kullanılmaktadır. SS teknikleri genel olarak pasif veya aktif hücrelerden oluşabilir ve ilave eleman gerektirebilir. Bu da maliyetin artmasına sebep olmaktadır. Bu nedenle maliyeti ve kayıpları azaltmak için en az sayıda eleman ile SS sağlayan PFC devresi üzerine çalışmalar yapılmaktadır [15]. Bu yumuşak anahtarlama teknikleri sıfır gerilimde anahtarlama (ZVS), sıfır akımda anahtarlama (ZCS), sıfır gerilimde geçiş (ZVT) ve sıfır akımda geçiş (ZCT) olarak adlandırılmaktadır [16].

2. Tek Fazlı Tek Aşamalı İzoleli PFC Devreleri

Teknolojideki gelişmelerle birlikte literatürde, DPT, SS ve izolasyon gibi özelliklere sahip, yüksek verimli PFC devrelerine olan ilgi gün geçtikçe artmaktadır. Literatürde özellikle yüksek PF, yüksek verim, düşük maliyet vb. konularda birçok PFC topolojisi önerisi yer almaktadır.

2.1. Tek Aşamalı Tek Anahtarlı Yüksek Güç Faktörlü DPT-PFC Topolojisi [5]

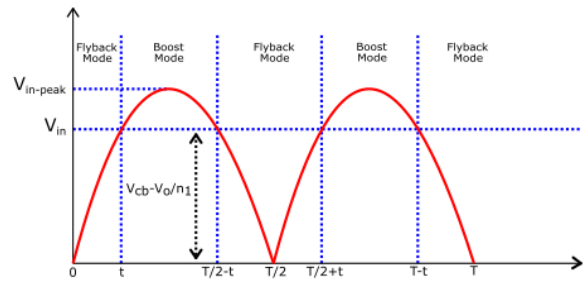
Bu çalışmada, [4]'te verilen Flyback-Yükseltici (Flyboost) yapısına ilave olarak bir Forward-Flyback yapısının da yer aldığı DPT sağlayan bir PFC devresi önerilmiştir. Burada Flyboost hücresi PFC, Forward-Flyback hücresi ise çıkış gerilim regülasyonu amacıyla kullanılmaktadır. Bu hücrelerin her ikisi de bir depolama kondansatörü C_b ile ayrılır. Önerilen topoloji Şekil 1'de gösterilmiştir.



Şekil 1: Önerilen yüksek güç faktörlü DPT-PFC topolojisi [5].

Önerilen topoloji, T_1 trafosunun çalışmasına bağlı olarak Flyback veya Yükseltici (Boost) olmak üzere iki farklı moda çalışmaktadır.

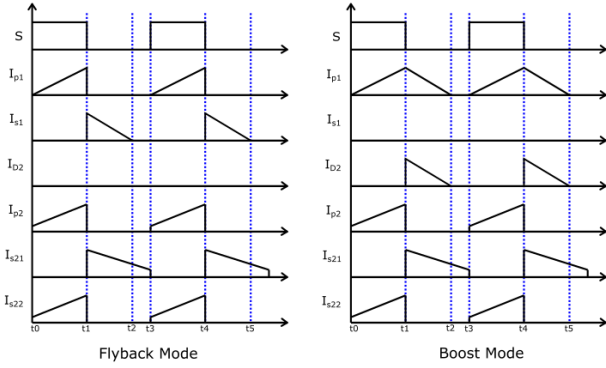
Doğrultulmuş giriş gerilimi, C_b gerilimi ile primere yansıyan çıkış geriliminin farkından düşük olduğunda, devre Flyback modunda çalışır. Anahtara sinyal verildiğinde T_1 trafosunun mıknatıslama endüktansında depolanan enerji, anahtar sinyali kesildiğinde doğrudan çıkışa aktarılır. Doğrultulmuş giriş gerilimi, C_b gerilimi ile primere yansıyan çıkış geriliminin farkından büyük olduğunda, devre Boost modunda çalışır. C_b gerilimi, doğrultulmuş giriş gerilimi ile primere yansıyan çıkış geriliminin toplamına eşit olana kadar C_b 'ye enerji aktarımı devam eder. Dönüştürücünün doğrultulmuş giriş gerilimine bağlı çalışma modları Şekil 2'de gösterilmiştir.



Şekil 2: Doğrultulmuş giriş gerilimine bağlı çalışma modları [5].

Her iki çalışma modunda da güç, anahtar sinyaline bağlı olmaksızın, Forward-Flyback hücresi üzerinden çıkışa aktarılır. Forward-Flyback hücresi, iletim kayıplarını azaltmak için CCM çalışacak şekilde tasarlanmıştır. CCM çalışma ile geniş giriş gerilimi ve geniş yük aralığında yüksek PFC kalitesi sağlanmıştır.

Flyboost hücresinin Flyback dönüştürücüsü, DCM çalıştırılarak, devrenin geniş giriş gerilimi ve geniş yük aralığında çalışması sağlanmıştır. Şekil 3'te önerilen devrenin, Flyback ve Boost modunda, CCM ve DCM çalışmaları gösterilmektedir. Buna ek olarak C_b 'nin geriliminin sınırlandırılması ile yarı iletken elemanlardaki gerilim stresi de düşürülmüştür.



Şekil 3: CCM ve DCM çalışma dalga şekilleri [5].

Geleneksel iki aşamalı ve tek aşamalı dönüştürücülerde giriş gücü, önce PFC sonra regülasyon amacıyla iki aşamada işlenmektedir. Bu durum, gücün iki defa işlenmesi nedeniyle verimin düşmesine neden olmaktadır. Bundan dolayı DPT tekniği ile dönüştürücülerin verimlerinin artırılmasına yönelik yoğun çalışmalar yapılmaktadır. Burada amaç, giriş gücünün büyük bir kısmını iki defa işlemeyen doğrudan çıkışa aktarmaktır. Bundan dolayı bu çalışmada, DPT tekniği kullanılarak geleneksel devre yapılarına göre verim artırılmıştır. (1) nolu denklemde geleneksel verim ifadesi verilmiştir. (2) nolu denklemde ise DPT'nin verime katkısı ifade edilmiştir. Burada p doğrudan çıkışa aktarılan güç değerini, η_1 PFC aşamasının, η_2 ise regülasyon aşamasının verimini ifade etmektedir. (2) denklemden de görüleceği üzere DPT verimi arttırmada önemli bir etkiye sahiptir.

$$\eta = \eta_1 \eta_2 \quad (1)$$

$$\eta = \eta_1 \eta_2 + p \eta_1 (1 - \eta_2) \quad (2)$$

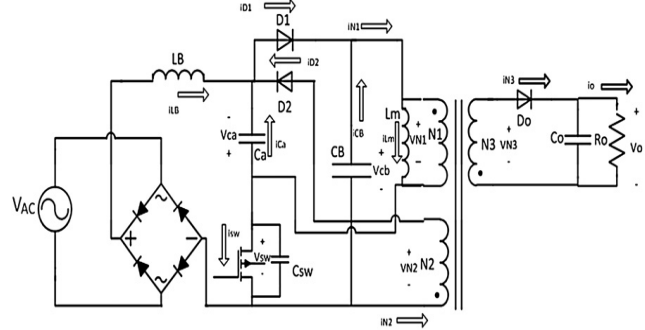
2.2. Tek Aşamalı Tek Anahtarlı Yumuşak Anahtarlamalı PFC Topolojisi [15]

Bu çalışmada, yeni bir tek aşamalı tek anahtarlı SS'li PFC devresi önerilmiştir. Topoloji, PFC işlemini gerçekleştiren bir Boost dönüştürücüsü ile çıkış gerilim regülasyonunu sağlayan Flyback dönüştürücüsünden oluşmaktadır. Önerilen devre topolojisi Şekil 4'te verilmiştir.

Bu çalışmada, ilk aralıkta anahtara sinyal verildiğinde giriş endüktansı (L_B) enerjilenmektedir. Anahtar, sıfır akımda anahtarlamaya (ZCS) ile iletme girer. Rezonans kondansatörü (C_a) ile transformatörün ikinci sargısının kaçak endüktansı arasında

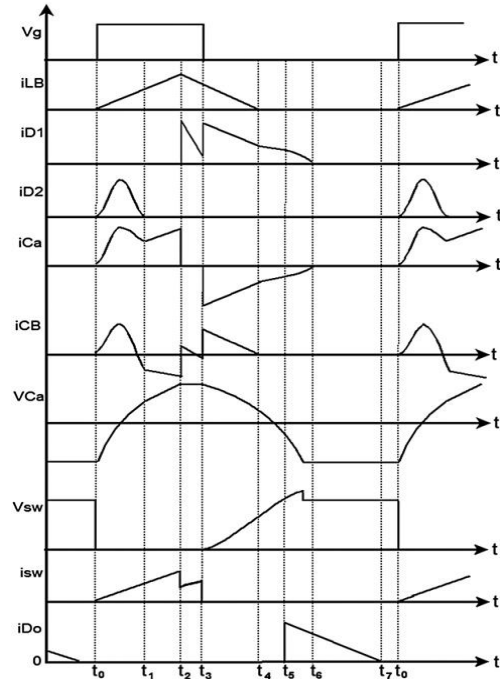
bir rezonans başlar. Depolama kondansatörü (C_b) enerjisini hem mıknatıslama endüktansına (L_m) hem de C_a 'ya aktarmaktadır. Böylece, anahtar sinyali kesildiğinde paraleldeki C_a sayesinde sıfır gerilimde anahtarlamaya (ZVS) ile kesime girer. Anahtar akımı (3) nolu denklemde verilmiştir.

$$i_{sw} = i_{LB} + i_{D2} + i_{N1} \quad (3)$$



Şekil 4: Önerilen yumuşak anahtarlamalı PFC topolojisi [15].

Bir sonraki aralıkta da yine C_a sayesinde çıkış diyodu D_o , ZVS ile iletme girer. Tüm endüktansların enerjilerini aktarması ile çalışma aralıkları tamamlanır. Anahtara yeniden sinyal verilmesiyle yeni bir çalışma periyodu başlar. Bu dönüştürücünün çalışma aralıkları Şekil 5'te gösterilmektedir.



Şekil 5: Önerilen devrenin temel dalga şekilleri [15].

Kararlı rejimde primer ve sekonder endüktans akımlarının artma ve azalma miktarları birbirine eşittir. Böylece primer ve sekonder gerilimlerinin pozitif ve negatif alanları eşitliğinden elde edilen (4) nolu denklemde maksimum doluluk ve minimum V_{CB} gerilimi denklemde yerine konularak trafonun dönüşüm oranı N_1/N_3 (5) nolu denklemle hesaplanır.

Bu topolojilerin, PF, THD, DPT, SS, anahtarlama frekansı, aktif eleman sayısı, pasif eleman sayısı, trafo sayısı, anahtar gerilim stresi, depolama kondansatörü gerilim stresi, verim, vb. açılardan detaylı bir karşılaştırması Tablo 1'de verilmiştir.

Karşılaştırılan topolojilerde, devre verimine etkisi olan en yüksek çalışma frekansı [17] nolu çalışmaya aittir. Ayrıca [5] nolu çalışmada da DPT sağlanması devre verimini etkilemektedir. Buna rağmen [15] nolu çalışmada SS varlığı ve yarı iletken eleman sayısının [17] ve [5]'deki topolojiye göre daha az olması, devrede yarı iletken elemanlarda oluşan iletim kayıplarını azaltmıştır. Böylece daha yüksek verim elde edilmiştir. Topolojilerde, depolama kondansatörlerinde oluşan gerilim seviyeleri dengelendiği için güç anahtarlarında aşırı gerilim stresleri oluşmamaktadır.

Özet olarak, Tablo 1'de görüldüğü gibi, [5] nolu çalışma DPT ve yüksek PF, [15] nolu çalışma SS ve yüksek verim ile düşük THD, [17] nolu çalışma ise düşük maliyet ve düşük kondansatör gerilimi özellikleri öne çıkmaktadır.

4. Sonuçlar

Bu çalışmada, önemli bazı izoleli PFC devreleri incelenmiş ve bu devrelerin bir karşılaştırması yapılmıştır. Bu devrelerin şemaları, çalışma prensipleri, çalışma aralıkları, temel dalga şekilleri ve önemli özellikleri hakkında detaylı bilgi verilmiştir. Bu devrelerde çok öne çıkan iki aşamalı ve tek aşamalı PFC, PF, THD, DPT ve SS kavramları ile ileri yönlü (forward) ve geri dönüşlü (flyback) dönüştürücülerin avantaj ve dezavantajları ele alınmıştır. Sonuç olarak, PF, THD, DPT, SS, aktif ve pasif eleman sayıları, trafo sayısı, anahtarlama frekansı, anahtar ve depolama kondansatörü gerilim stresleri, verim, vb. açılardan, bu PFC devreleri detaylı olarak karşılaştırılmıştır.

5. Kaynaklar

- [1] Jiang, Y., Lee, F. C., Hua, G. ve Tang, W., "A Novel Single-Phase Power Factor Correction Scheme," Proceedings Eighth Annual Applied Power Electronics Conference and Exposition, 1993, 287-292.
- [2] Garcia, O., Cobos, J. A., Prieto, R., Alou, P. ve Uceda, J., "Single Phase Power Factor Correction: A Survey," in IEEE Transactions on Power Electronics, vol. 18, no. 3, 749-755, 2003.
- [3] Bodur, H. ve Akboy, E., "A New Resonance Based Single-Switch PFC Converter" *Electrica*, 2021, 160-167.
- [4] Luo, S., Qiu, W., Wu, W. ve Batarseh, I., "Flyboost Power Factor Correction Cell and Its Applications in Single-Stage AC-DC Converters," 2002 IEEE 33rd Annual IEEE Power Electronics Specialists Conference, 2002, 1375-1380.
- [5] Mishra, S. K., Fernandes, B. G. ve Chatterjee, K., "Single Stage Single Switch AC/DC Converters with High Input Power Factor and Tight Output Voltage Regulation," 30th Annual Conference of IEEE Industrial Electronics Society, 2004, 2690-2695.
- [6] Xie, X., Li, J., Peng, K., Zhao, C. ve Lu, Q., "Study on The Single-Stage Forward-Flyback PFC Converter With QR Control," in IEEE Transactions on Power Electronics, vol. 31, no. 1, 430-442, 2016.
- [7] Bodur, H. Akboy, E. ve Aksoy, İ., "A New Single Stage Power Factor Correction Circuit With Resonant Circuit and Soft Switching," 4th International Conference on Power Engineering, Energy and Electrical Drives, 2013, 834-839.
- [8] Bodur, H., Kaya, K. Y., Akboy, E. ve Aksoy, İ., "A New Forward-Flyback Based Single Switch Single Stage PFC Converter," 2015 IEEE 6th International Symposium on Power Electronics for Distributed Generation Systems (PEDG), 2015, 1-3.
- [9] Ki, S.-K. ve Lu, D. D.-C., "A Transformerless Single-Stage AC/DC Converter With Low Output Voltage," 2011 IEEE Energy Conversion Congress and Exposition, 2011, 3458-3465.
- [10] Ki, S.-K. ve Lu, D. D.-C., "A High Step-Down Transformerless Single-Stage Single-Switch AC/DC Converter," in IEEE Transactions on Power Electronics, vol. 28, no. 1, 36-45, 2013.
- [11] Chen, L., Hu, H., Zhang, Q., Amirahmadi, A. ve Batarseh, I., "A Boundary-Mode Forward-Flyback Converter With an Efficient Active LC Snubber Circuit," in IEEE Transactions on Power Electronics, vol. 29, no. 6, 2944-2958, 2014.
- [12] Li, Y.-C. ve Chen, C.-L., "A Novel Single-Stage High-Power-Factor AC-to-DC LED Driving Circuit With Leakage Inductance Energy Recycling," in IEEE Transactions on Industrial Electronics, vol. 59, no. 2, 793-802, 2012.
- [13] Luo, Q., Huang, J., He, Q., Ma, K. ve Zhou, L., "Analysis and Design of a Single-Stage Isolated AC-DC LED Driver With a Voltage Doubler Rectifier," in IEEE Transactions on Industrial Electronics, vol. 64, no. 7, 5807-5817, 2017.
- [14] Qiao, C. ve Smedley, K. M., "A Topology Survey of Single-Stage Power Factor Corrector With a Boost Type Input-Current-Shaper," in IEEE Transactions on Power Electronics, vol. 16, no. 3, 360-368, 2001.
- [15] Abasian, A., Farzaneh-fard, H. ve Madani, S., "Single Stage Soft Switching AC/DC Converter Without Any Extra Switch", IET Power Electronics, vol. 7, no. 3, 745-752, 2014.
- [16] Bodur, H. ve Yıldırım, S., "A New ZVT Snubber Cell for PWM-PFC Boost Converter," in IEEE Transactions on Industrial Electronics, vol. 64, no. 1, 300-309, 2017.
- [17] Lu, D. D.-C., "High Voltage Stress in Single-Phase Single-Stage PFC Converters: Analysis and an Alternative Solution," in IEEE Transactions on Industrial Electronics, vol. 63, no. 1, 133-143, 2016.