

## **Tek Fazlı Şebeke Bağlantılı Eviricilerde L, LCL ve LLCL Tipi Filtre Tasarımı**

Akif KARAFİL<sup>1\*</sup>

### **Öz**

Bu çalışmada, tek fazlı şebeke bağlantılı evirici için L, LCL ve LLCL tipi filtre tasarımları yapılarak filtre tipleri birbirleri ile kıyaslanmıştır. Tasarım için şebeke akımının toplam harmonik bozulma (THD) değeri %5'in altında oluşacak şekilde filtre parametre değerleri hesaplanmıştır. Filtre parametre değerleri belirlendikten sonra PSIM programında simülasyon çalışmaları gerçekleştirilmiştir. Çalışmada aktif güç kontrolü, oransal-rezonans (PR) akım kontrolü ve gelişmiş faz kilitlemeli döngü (PLL) kontrolü için gerekli olan kodlar C bloğu içerisine yazılmıştır. Simülasyon sonuçlarına göre 1 kW güç, 220 V AC şebekeye aktarılırken en yüksek THD değeri %4.92 olarak L tipi filtrede elde edilirken, en düşük THD değeri %0.99 olarak LLCL filtre tipinde oluşmuştur. Yapılan filtre tasarımına göre endüktans değeri en yüksek olan filtre tipi de L filtredir. LCL ve LLCL filtre tiplerinde THD değerleri düşük çıkmasına rağmen uygun parametre değerlerinin seçilmesinin önemli olduğu görülmüştür.

**Anahtar Kelimeler:** Tek fazlı şebeke bağlantılı evirici, Filtre tasarımı, Gelişmiş PLL algoritması.

## **Design of L, LCL and LLCL Type Filter for Single Phase Grid Connected Inverters**

### **Abstract**

In this study, L, LCL and LLCL type filters were designed for single phase grid connected inverter and filter types were compared with each other. For the design, filter parameter values were calculated so that the total harmonic distortion (THD) value of the grid current would be below 5%. After the filter parameter values were determined, simulation studies were carried out in the PSIM program. In the study, the codes required for active power control, proportional-resonant (PR) current control and enhanced phase locked loop (PLL) control were written in the C block. The simulation results showed that while the 1 kW power was transferred to the 220 V AC grid, the highest THD value was obtained as 4.92% in the L type filter, while the lowest THD value was as 0.99% in the LLCL filter type. According to the filter design, the filter type with the highest inductance value was found to be the L filter. Although THD values were low in LCL and LLCL filter types, it was seen that it was important to choose appropriate parameter values.

**Keywords:** Single phase grid connected inverter, Filter design, Enhanced PLL algorithm.

<sup>1</sup>Yalova Üniversitesi, Mühendislik Fakültesi, Elektrik-Elektronik Mühendisliği Bölümü, Yalova, Türkiye, akif.karafil@yalova.edu.tr

<sup>1</sup><https://orcid.org/0000-0002-7844-9014>

## 1. Giriş

Dünyada elektrik enerjisine olan talep giderek artmaktadır. Bununla birlikte enerji piyasalarında yaşanan fiyat artışları da enerji sektöründe alternatif çözüm arayışını gerekli kılmıştır. Özellikle üretim ile tüketim arasında yaşanan enerji kayıplarını azaltabilmek için dağıtık enerji üretim sistemleri yaygınlaşmaya başlamıştır. Dağıtık enerji üretimi, tüketicilerin buldukları yerde ihtiyaç duyduğu elektrik enerjisinin şebekeye bağlı veya şebekeden bağımsız olarak güneş, rüzgâr vb. kaynaklardan karşılanmasıdır. Dağıtık enerji üretim sistemlerinde kayıplar azaltılırken aynı zamanda iletim ve dağıtımda yaşanan aksaklıkların önlenmesi, çevreye daha az zarar verilmesi, enerji güvenliğinin sağlanması gibi birçok açıdan avantajlar sağlanmaktadır. Konut, okul, fabrika vb. yapılarda kolaylıkla kullanılabilen ve giderek yaygınlaşan fotovoltaik enerji sistemleri, dağıtık enerji üretim sistemleri için güzel bir örnektir. Yakın zamanda çatılarında fotovoltaik panellerin olduğu kendi enerjisini kendi karşılayabilen konut, okul ve fabrika gibi yapıların daha sık görüleceği öngörülmektedir. Özellikle bu sistemlerden, şebekeye bağlı olanlar sayesinde enerjinin daha verimli kullanılması sağlanarak sistemin amorti süresinin kısaltılması mümkün olmaktadır (Akpolat ve ark., 2021; Gökçek ve Ateş, 2019).

Şebekeye bağlı fotovoltaik enerji sistemlerinde kullanılan eviriciler sayesinde şebeke ile paralel çalışma sağlanarak ihtiyaçtan fazla olan enerji şebekeye aktarılmaktadır. Şebeke bağlantılı eviricilerin şebekeye aktardığı akımın sinüs şeklinde olması ve toplam harmonik bozulma (THD) değerinin IEC 61727, IEEE 1547-2003 ve IEEE 929-2000 gibi uluslararası standartlara göre %5'i geçmemesi gerekir. Bunun için evirici anahtarlama devresinden sonra mutlaka bir filtre kullanılmalıdır. Genel olarak evirici çıkışında kullanılan filtre çeşitleri; L, LCL ve LLCL tipi filtrelerdir. Bu filtre tiplerinin birbirlerine göre avantajları ve dezavantajları bulunmaktadır. L tipi filtrenin tasarımı kolaydır. Ancak L tipi filtrenin endüktans değerinin büyük seçilmesi durumunda akımın THD değeri %5'i geçmeyebilir. Ayrıca bu durumda sistemin maliyeti artmakla birlikte devrenin boyutları da büyür. Endüktans değerinin küçük olabilmesi için evirici anahtarlama devresinin frekansını yükseltmek gerekir. Fakat bu durum da kayıpların artarak verimin düşmesine, anahtarlama elemanları, sürücüler ve soğutucular gibi donanımsal elemanların maliyetlerinin artmasına neden olur. LCL filtre üçüncü dereceden filtre tipi olup parametrelerinin belirlenmesi karmaşıktır. Fakat L tipi filtreye göre maliyeti daha düşük olup boyutu da daha küçüktür. LLCL filtre tipi ise maliyet ve boyut açısından diğer filtre tiplerine göre daha uygundur. Fakat sistemin kararlı halde kalabilmesi parametrelerin doğru belirlenmesine bağlıdır (Sosa ve ark., 2014; Karafil ve ark., 2018; Li ve ark., 2015; Wu ve ark., 2012).

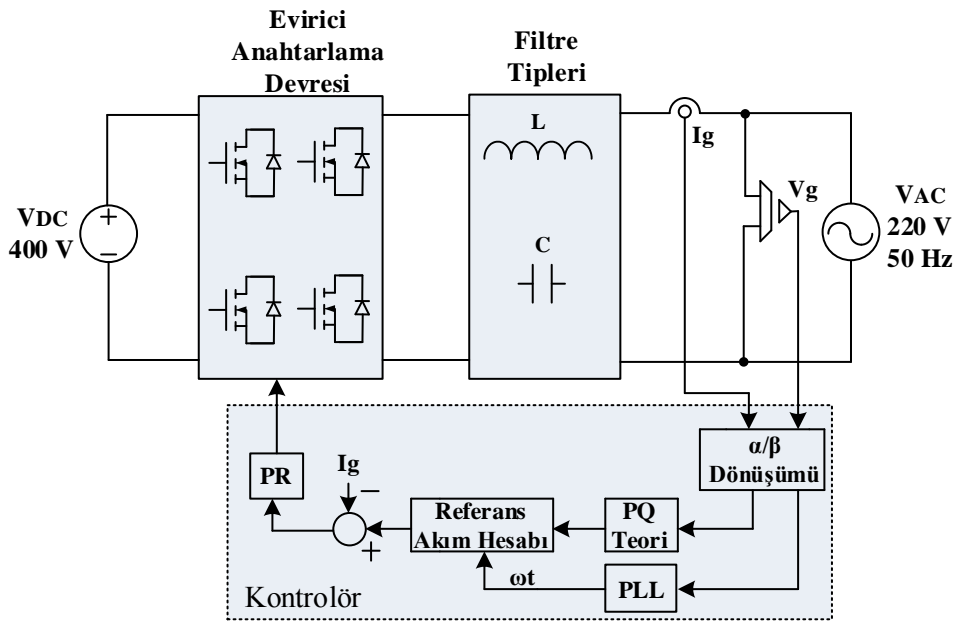
Literatür incelendiğinde konuya ilişkin Sanatkar-Chayjani ve Monfared çalışmalarında 3 kW gücündeki tek fazlı şebekede LCL ve LLCL tipi filtrelerin analizini gerçekleştirmişlerdir (Sanatkar-

Chayjani ve Monfared, 2016). Benzer bir çalışmada Wu ve ark., PR akım kontrollü 2 kW gücündeki tek fazlı şebekede pasif sönümlü LCL ve LLCL tipi filtreleri analiz etmişlerdir (Wu ve ark., 2013). Fu ve Li, sinir ağı tabanlı vektör kontrolü ile tek fazlı şebeke bağlantılı eviricilerde L, LC ve LCL filtrelerini karşılaştırmışlardır (Fu ve Li, 2016). Karaca ve ark., fotovoltaik eviriciler için L, LC ve LCL tipi filtreleri simülasyon çalışması yaparak karşılaştırmışlardır (Karaca ve ark., 2019). Saleem ve ark., üç fazlı şebekede L ve LCL tipi filtrenin simülasyon ve deneysel çalışmalarını yaparak her iki filtrenin performansını karşılaştırmışlardır (Saleem ve ark., 2021).

Bu çalışmada, tek fazlı şebeke bağlantılı eviricilerde kullanılmak üzere L, LCL ve LLCL tipi filtrelerin parametreleri hesaplanarak PSIM programında simülasyon çalışmaları gerçekleştirilmiştir. Sistemin kontrolü (aktif güç kontrolü, oransal-rezonans (PR) akım kontrolü ve faz kilitlemeli döngü (PLL) kontrolü) için gerekli olan kodlar basitleştirilmiş C bloğu içerisine yazılmıştır. Simülasyon sonuçlarına göre şebekeye aktarılan akımın THD değerinin %5'i geçmemesi dikkate alınarak filtre tiplerine göre en uygun parametre değerleri belirlenmiştir.

## 2. Tek Fazlı Şebeke Bağlantılı Evirici

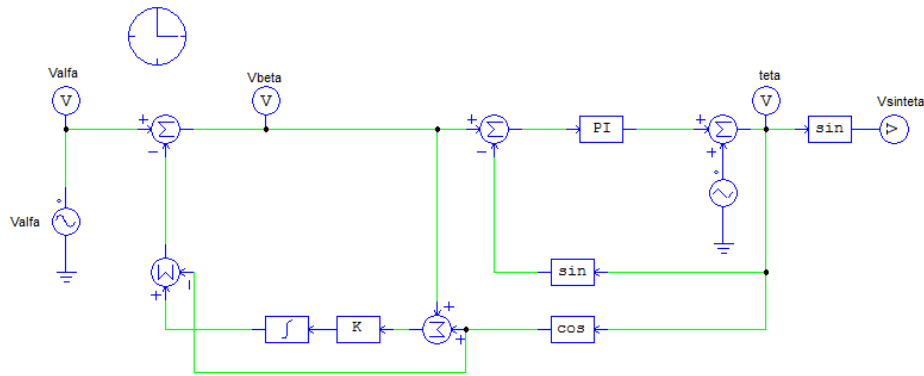
Şebeke bağlantılı eviriciler, doğru gerilimi alternatif gerilime dönüştürerek şebeke frekansı ile senkronize çalışırlar. Sisteme ait tek fazlı şebeke bağlantılı evirici blok şeması Şekil 1'de gösterilmiştir.



Şekil 1. Tek fazlı şebeke bağlantılı evirici.

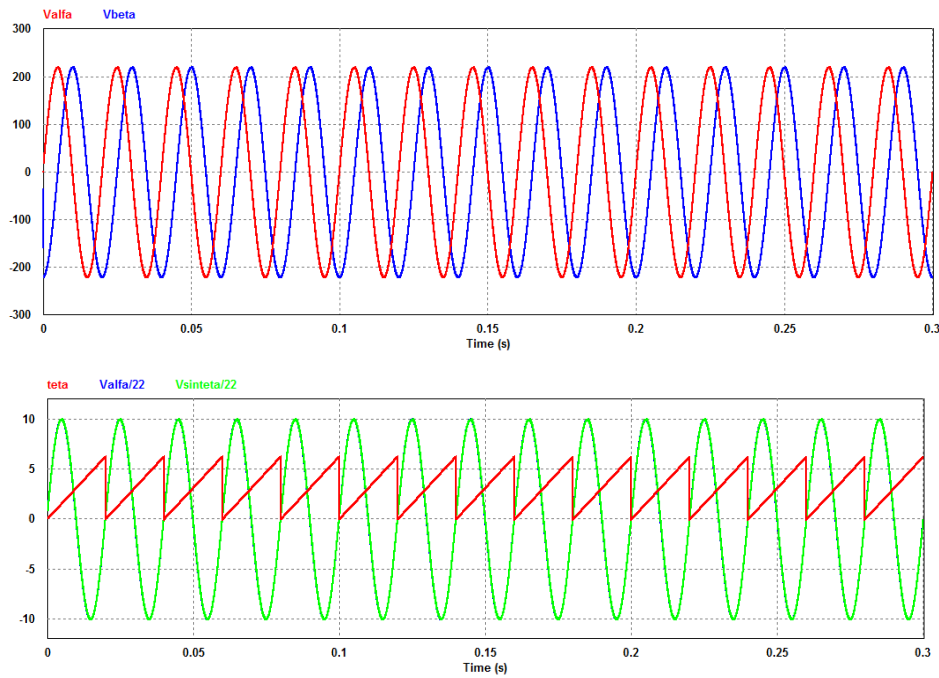
Tek fazlı şebeke bağlantılı sistemlerin en önemli kısımlarından biri de senkronizasyon birimidir. Senkronizasyon birimi, senkronizasyon ve kontrolü sağlamak amacıyla şebeke gerilim

bilgisinin (frekans, faz ve genlik) elde edilmesini sağlar. Şebeke senkronizasyonunun sağlanabilmesi için kullanılan PLL algoritmaları dört grupta incelenebilir. Bunlar; T/4 gecikmeli PLL, ters park dönüşümlü PLL, gelişmiş PLL ve ikinci dereceden genelleştirilmiş integratör (SOGI) tabanlı PLL algoritmalarıdır. PLL algoritmasının performansı, hem güç (PQ) kontrolörünün hem de akım kontrolörünün çalışmasını etkiler. Bu yüzden sistem için hızlı, etkili ve uygun bir PLL algoritması belirlenmelidir. Bu çalışmada, gelişmiş PLL algoritması kullanılmıştır. Gelişmiş PLL algoritmasının yapısı Şekil 2’de verilmiştir (Santos ve ark., 2008; Nicastrı ve Nagliero, 2010; Karafil, 2021). Çalışmada gelişmiş PLL algoritmasının kodları da C bloğunun içerisine yazılmıştır.



Şekil 2. Gelişmiş PLL algoritmasının yapısı.

Gelişmiş PLL algoritması ile elde edilen reel ( $\alpha$  bileşeni) sinyal, ortogonal ( $\beta$  bileşeni) sanal sinyal ve üretilen açısız hız değerleri ile giriş-çıkış sinyalleri Şekil 3’te gösterilmiştir.

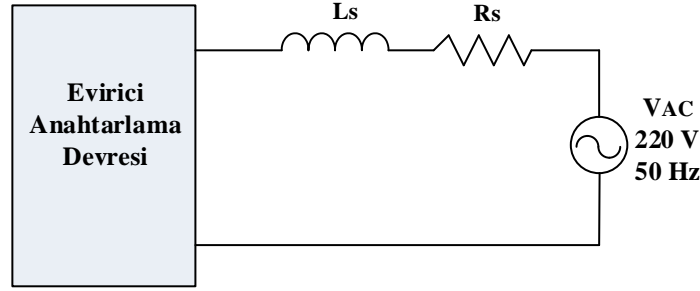


Şekil 3. Gelişmiş PLL algoritması ile elde edilen reel-ortogonal sinyaller ve üretilen açısız hız değerleri ile giriş-çıkış sinyalleri.

Çalışmada akım kontrolörü için doğrusal kontrolör grubunda yer alan PR kontrolör kullanılmıştır. Referans akım hesabı,  $\alpha/\beta$  dönüşümü, PQ teori ve PR akım kontrolörü için ayrıntılar referans çalışmada (Karafil, 2020) verilmiştir.

## 2.1. L Tipi Filtrenin Tasarımı

L tipi filtrenin yapısı Şekil 4'te verilmiştir. Burada,  $L_s$  filtre endüktansı,  $R_s$  ise filtre endüktansının iç direncidir.



Şekil 4. L tipi filtre yapısı.

L filtre tasarımı için endüktansın değeri aşağıdaki eşitlikler yardımıyla bulunabilir.

$$\Delta I_{Lmax} = a \frac{P\sqrt{2}}{V_g} \quad (1)$$

$$L_s = \frac{V_{DC}}{16 \cdot f_{sw} \cdot \Delta I_{Lmax}} \quad (2)$$

Burada,  $a$  şebekeye aktarılan akımın dalgalanma oranıdır. Devreye ait parametreler Tablo 1'de verilmiştir.

**Tablo 1.** Devre parametreleri.

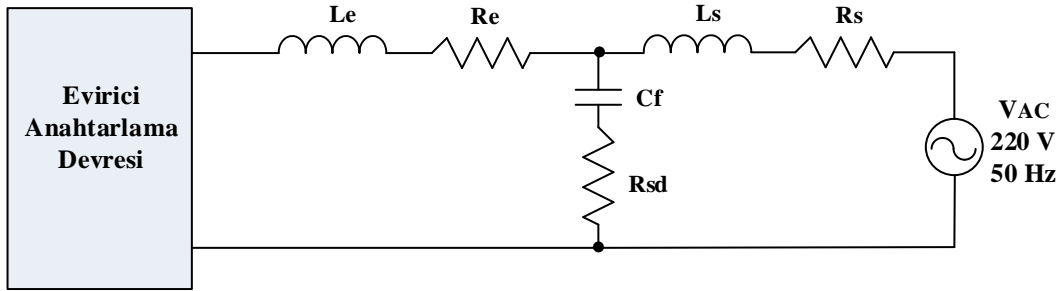
Parametre	Değeri
Tek faz gücü (P)	1 kW
Şebeke faz gerilimi ( $V_g$ )	220 V
DC bara gerilimi ( $V_{DC}$ )	400 V
Anahtarlama frekansı ( $f_{sw}$ )	10 kHz
Şebeke frekansı ( $f_s$ )	50 Hz

L filtre tasarımı için akımın dalgalanma oranı yüksek seçilirse filtrenin değeri düşük bulunur. Filtrenin düşük değerde olması durumunda şebeke akımının THD değeri %5'ten büyük olur. Bu yüzden akımın dalgalanma oranının düşük değerde seçilmesi gerekir (Radwan ve ark., 2021.; Husev ve ark., 2015). Bu çalışmada,  $L_s=19$  mH ve  $R_s=1 \Omega$  olarak belirlenmiştir. Bu değerlere ait Şekil

7'de verilen simülasyon gerçekleştirilmiş ve şebeke akımının THD'si %5'in altında olduğu bulunmuştur.

## 2.2. LCL Tipi Filtrenin Tasarımı

Seri sönümlenme dirençli LCL tipi filtrenin yapısı Şekil 5'te gösterilmiştir. Burada,  $L_e$  ve  $L_s$  sırasıyla evirici ve şebeke tarafındaki endüktans değerleri,  $R_e$  ve  $R_s$  ise evirici ve şebeke tarafındaki endüktansların iç dirençleridir.  $C_f$  filtre kondansatörü olup  $R_{sd}$  ise seri sönümlenme direncidir.

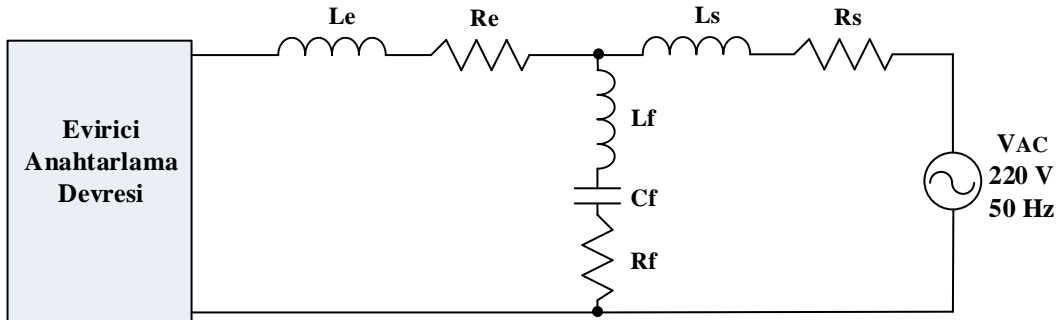


Şekil 5. Seri sönümlenme dirençli LCL tipi filtre yapısı.

Evirici tarafındaki endüktans değeri belirlenirken Denklem (1) ve (2) kullanılır. Şebeke tarafındaki endüktans değeri de düşünülerek akımın dalgalanma oranının yüksek seçilmesi gerekir. Şebeke tarafındaki endüktans değeri, evirici tarafındaki endüktans değerine eşit veya daha küçük seçilebilir. Genellikle yüksek güç uygulamalarında eşit alınır (Kantar ve ark., 2013). Referans çalışma (Karafil, 2020) temel alınarak LCL filtre için en uygun parametre değerleri;  $L_e=3.9$  mH,  $R_e=0.1$   $\Omega$ ,  $L_s=2.6$  mH,  $R_s=0.1$   $\Omega$ ,  $C_f=2.2$   $\mu$ F,  $R_{sd}=4.4$   $\Omega$  olarak belirlenmiştir.

## 2.3. LLCL Tipi Filtrenin Tasarımı

LLCL tipi filtrenin yapısı Şekil 6'da verilmiştir. Burada, filtre kondansatörüne seri bağlanan  $L_f$  endüktansı ile seri bir rezonans devresi oluşmaktadır.  $R_f$  ise  $L_f$  endüktansının iç direncidir.



Şekil 6. LLCL tipi filtre yapısı.

LCL tipi filtreye kıyasla LLCL tipi filtrede şebeke tarafındaki endüktansın ( $L_s$ ) değeri düşürülebilir. Seri rezonans devre parametrelerinden biri olan  $L_f$  endüktansının değeri, Denklem (3) ile hesaplanır.

$$L_f = \frac{1}{(2\pi f_{sw})^2 C_f} \quad (3)$$

LLCL tipi filtrenin parametre değerleri;  $L_e=3.9$  mH,  $R_e=0.1$   $\Omega$ ,  $L_f=115$   $\mu$ H,  $C_f=2.2$   $\mu$ F,  $R_f=0.2$   $\Omega$ ,  $L_s=1.5$  mH,  $R_s=0.1$   $\Omega$  olarak belirlenmiştir. LLCL filtrenin parametreleri belirlendikten sonra rezonans frekansı ( $f_r$ ) hesaplanabilir. Rezonans frekansı, Denklem (4) ile hesaplanır.

$$f_r = \frac{1}{2\pi} \frac{1}{\sqrt{[(L_e L_s)/(L_e + L_s) + L_f] \cdot C_f}} \quad (4)$$

Ayrıca rezonans frekans değeri, Denklem (5) ile gösterilen aralıklarda olmalıdır.

$$10 \cdot f_s \leq f_r \leq \frac{1}{2} \cdot f_{sw} \quad (5)$$

$L_f$  ve  $C_f$  seri rezonans devresinin oluşturduğu kalite faktörü ( $Q$ ) Denklem (6) ile hesaplanmalı ve değeri Denklem (7) de gösterilen aralıkta olmalıdır (Wu ve ark., 2012; Alemi ve ark., 2016; Liu ve ark., 2019).

$$Q = \frac{1}{R_f} \cdot \sqrt{\frac{L_f}{C_f}} \quad (6)$$

$$10 \leq Q \leq 50 \quad (7)$$

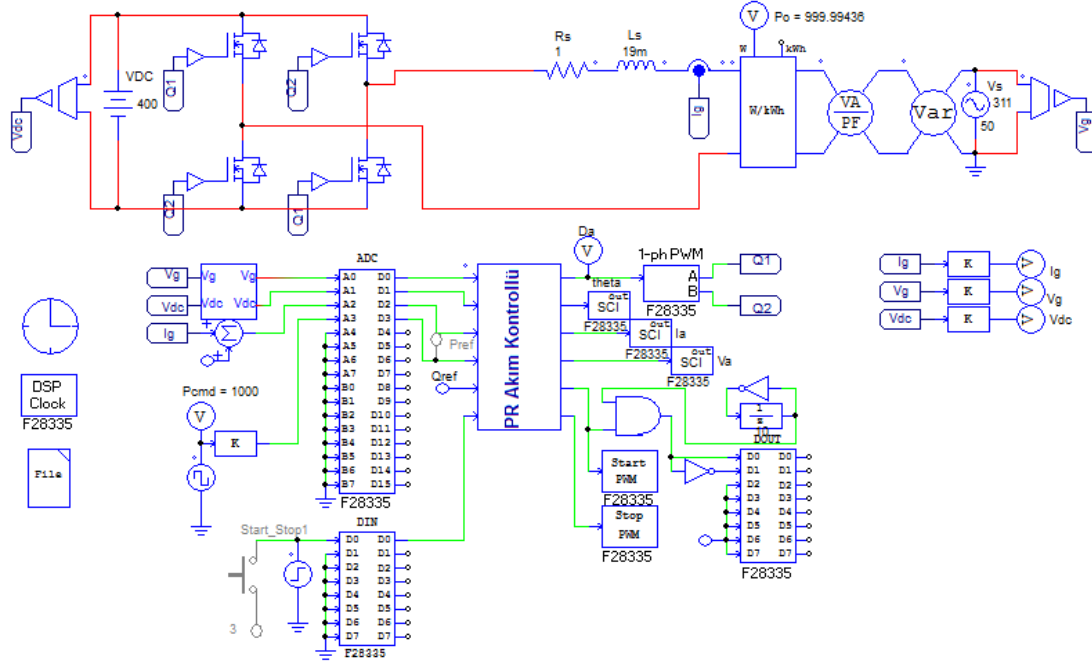
Eğer Denklem (7) deki değer aralıklarına uyulmayıp farklı bir  $L_f$  değeri seçilirse şebeke akımının THD değerinin arttığı görülmüştür. Şekil 11'deki LLCL filtre tipine ait simülasyon çalışması yapılmış ve Tablo 2'deki değerler elde edilmiştir.

**Tablo 2.** Farklı  $L_f$  değerlerine göre şebeke akımının THD değerleri.

$L_f$ Değerleri	THD Değerleri
4 $\mu$ H	%2.13
10 $\mu$ H	%2.01
115 $\mu$ H	%0.99
300 $\mu$ H	%2.82
400 $\mu$ H	%3.84

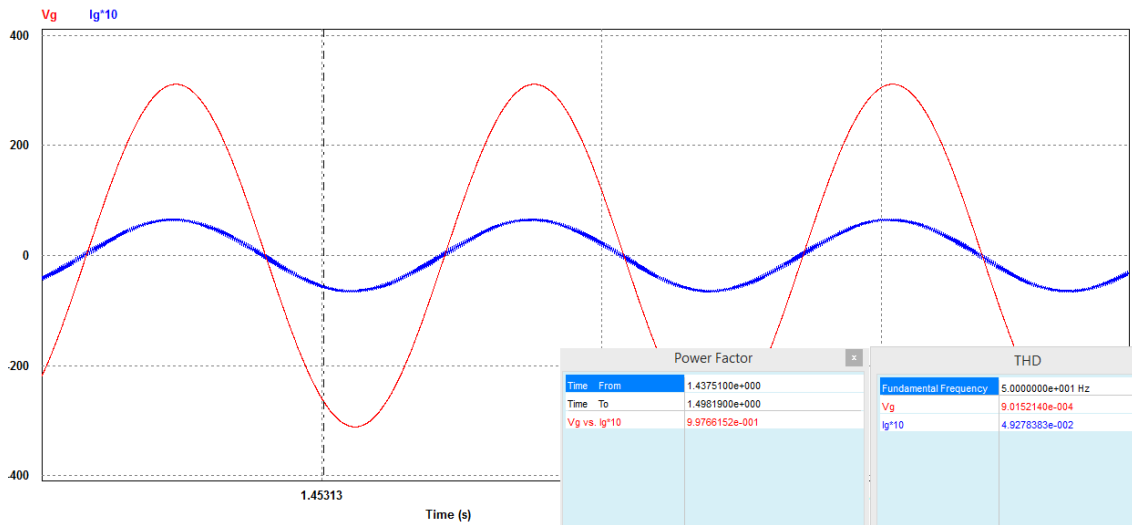
### 3. Simülasyon Sonuçları

Tasarlanan L tipi filtreli tek fazlı şebeke bağlantılı evirici devresinin PSIM ekran görüntüsü Şekil 7’de verilmiştir.



Şekil 7. Tasarlanan L tipi filtreli tek fazlı şebeke bağlantılı evirici devresi.

Devrenin giriş gerilimi 400 V olup 220 V 50 Hz AC şebekeye 1 kW aktif güç aktarılmıştır. Şebekeye aktarılan akım ve gerilimin dalga şekilleri ile birlikte THD ve güç faktörü değerleri Şekil 8’de gösterilmiştir.

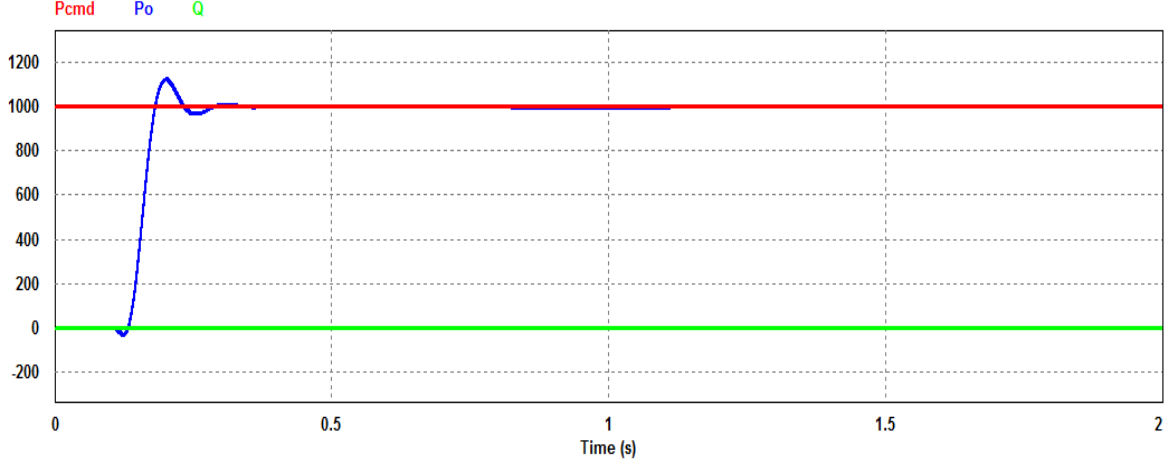


Şekil 8. L filtreli tek fazlı şebeke bağlantılı eviricide şebekeye aktarılan akım ve gerilimin dalga şekilleri.



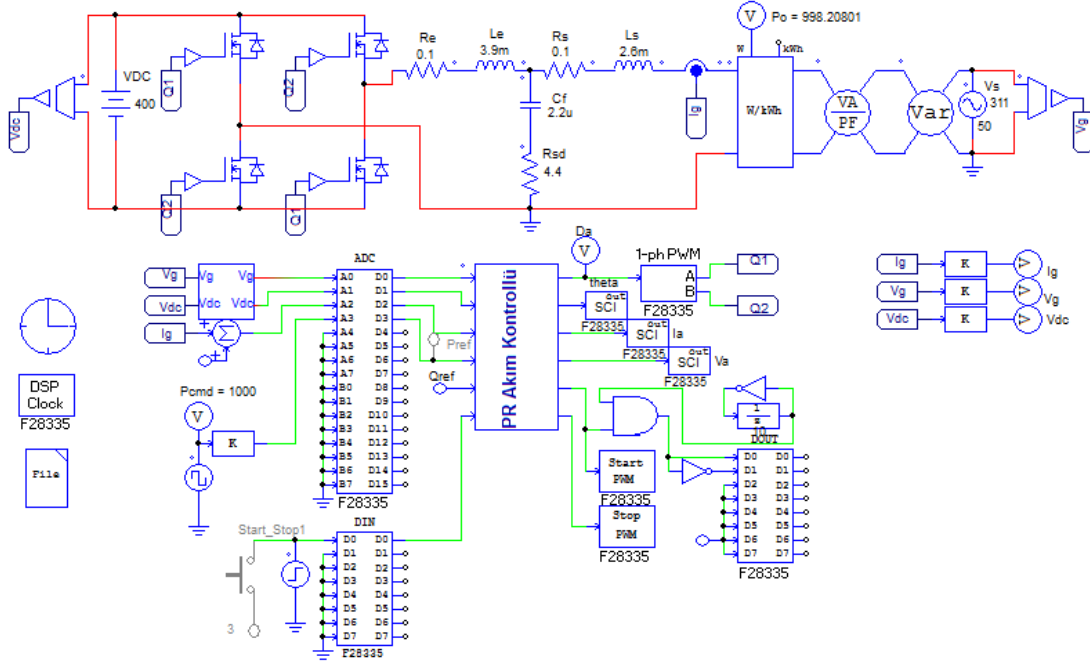
Şekil 8'den de görüleceği üzere şebekeye aktarılan akımın THD değeri %4.92 iken güç faktörü 0.99 olarak bulunmuştur. Elde edilen sonuçların uluslararası standartlarda belirtilen sınırlar içinde olduğu görülmektedir.

Şebekeye aktarılan aktif güç ( $P_o$ ) Şekil 9'da gösterilmiştir. Reaktif gücün ( $Q$ ) sıfır olduğu görülmektedir.



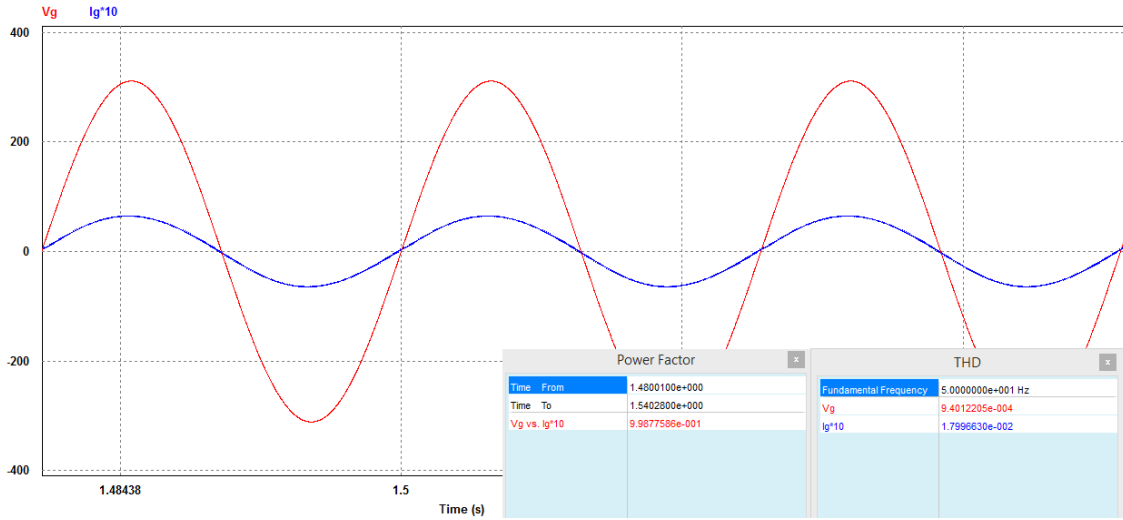
Şekil 9. Şebekeye aktarılan güç.

Tasarlanan LCL tipi filtreli tek fazlı şebeke bağlantılı evirici devresinin PSIM ekran görüntüsü Şekil 10'da verilmiştir.



Şekil 10. Tasarlanan LCL tipi filtreli tek fazlı şebeke bağlantılı evirici devresi.

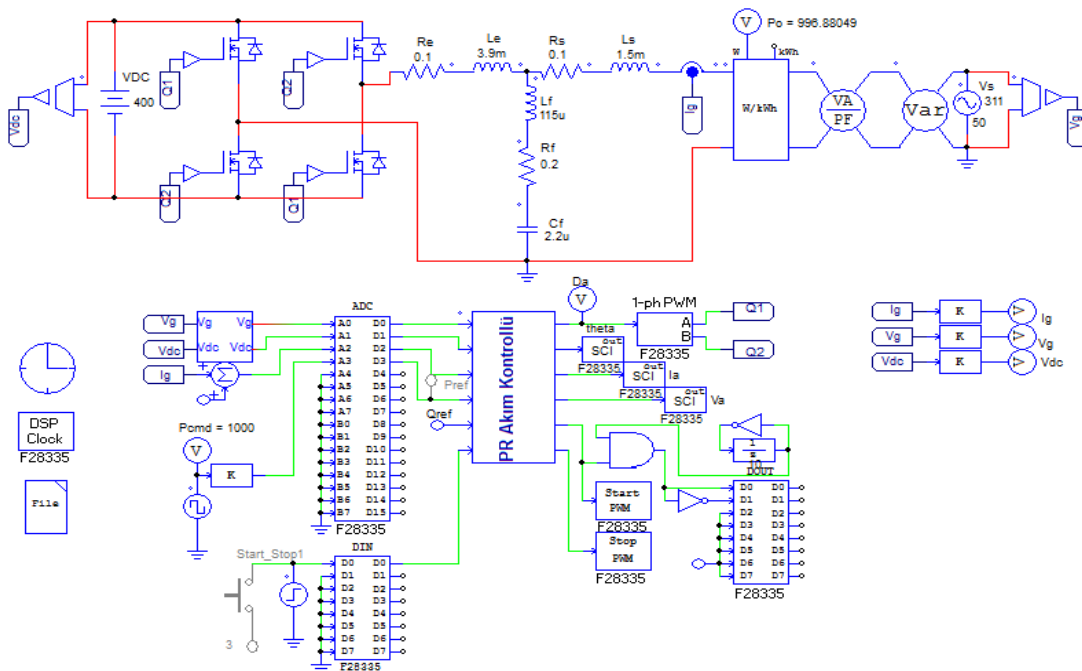
Devrenin giriş gerilimi 400 V olup 220 V 50 Hz AC şebekeye 1 kW aktif güç aktarılmıştır. Şebekeye aktarılan akım ve gerilimin dalga şekilleri ile birlikte THD ve güç faktörü değerleri Şekil 11'de gösterilmiştir.



Şekil 11. LCL filtrelili tek fazlı şebeke bağlantılı eviricide şebekeye aktarılan akım ve gerilimin dalga şekilleri.

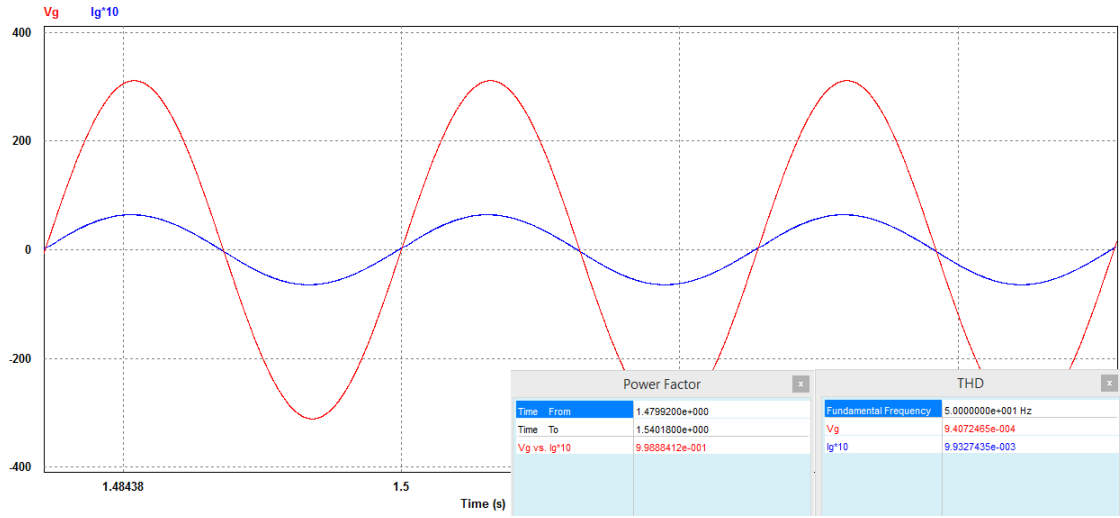
Şekil 11'den de görüleceği üzere şebekeye aktarılan akımın THD değeri %1.79 iken güç faktörü 0.99 olarak bulunmuştur. Elde edilen sonuçların uluslararası standartlarda belirtilen sınırlar içinde olduğu görülmektedir.

Tasarlanan LLCL tipi filtrelili tek fazlı şebeke bağlantılı evirici devresinin PSIM ekran görüntüsü Şekil 12'de verilmiştir.



Şekil 12. Tasarlanan LLCL tipi filtrelili tek fazlı şebeke bağlantılı evirici devresi.

Devrenin giriş gerilimi 400 V olup 220 V 50 Hz AC şebekeye 1 kW aktif güç aktarılmıştır. Şebekeye aktarılan akım ve gerilimin dalga şekilleri ile birlikte THD ve güç faktörü değerleri Şekil 13'te gösterilmiştir.



**Şekil 13.** LLCL filtreli tek fazlı şebeke bağlantılı eviricide şebekeye aktarılan akım ve gerilimin dalga şekilleri.

Şekil 13'ten de görüleceği üzere şebekeye aktarılan akımın THD değeri %0.99 iken güç faktörü de 0.99 olarak bulunmuştur. Elde edilen sonuçların uluslararası standartlarda belirtilen sınırlar içinde olduğu görülmektedir.

Tasarlanan L, LCL ve LLCL tipi filtrelerin parametre değerleri ile simülasyon sonuçlarından elde edilen şebeke akımının THD değerleri Tablo 3'te verilmiştir.

**Tablo 3.** Filtre tipleri ve simülasyon sonuçlarından elde edilen THD değerleri.

Filtre Tipi ve Parametre Değerleri	THD Değerleri
L Filtre $L_s=19$ mH, $R_s=1$ $\Omega$	%4.92
LCL Filtre $L_e=3.9$ mH, $R_e=0.1$ $\Omega$ , $L_s=2.6$ mH, $R_s=0.1$ $\Omega$ , $C_f=2.2$ $\mu$ F, $R_{sd}=4.4$ $\Omega$	%1.79
LLCL Filtre $L_e=3.9$ mH, $R_e=0.1$ $\Omega$ , $L_s=1.5$ mH, $R_s=0.1$ $\Omega$ , $L_f=115$ $\mu$ H, $C_f=2.2$ $\mu$ F, $R_f=0.2$ $\Omega$	%0.99

#### 4. Sonuçlar ve Öneriler

Bu çalışmada, şebeke akım THD'sinin %5'in altında olması durumu göz önünde bulundurularak tek fazlı şebeke bağlantılı evirici için L, LCL ve LLCL filtre tipleri tasarlanmış ve PSIM programında simülasyon çalışmaları gerçekleştirilmiştir. Yapılan simülasyon çalışmalarına

göre en yüksek THD değeri L filtrede oluşurken aynı zamanda kullanılan filtrenin endüktans değerinin de diğer filtre tiplerine göre oldukça büyük olduğu görülmüştür. Buna rağmen L filtre tasarımı diğer filtre tiplerine göre kolaydır. LCL filtre tasarımı ise L filtreye göre daha zordur. Fakat şebeke akımının THD değeri L filtreye göre daha küçüktür. En düşük THD değeri ise LLCL filtre tipinde elde edilmiştir. Fakat istenen düşük THD değeri için uygun parametrelerin seçilmesi çok önemlidir. Aksi takdirde yüksek THD değeri ile karşılaşılabilir. Dolayısıyla, filtre parametrelerinin belirlenmesinde birçok etkene (şebeke faz gerilimi, faz gücü, anahtarlama frekansı vb.) dikkat edilmesi gerekmektedir.

### Araştırma ve Yayın Etiği Beyanı

Yapılan çalışmada araştırma ve yayın etiğine uyulmuştur.

### Kaynaklar

- Akpolat, A. N., Dursun, E., and Siano, P. (2021). Inverter-Based Modeling and Energy Efficiency Analysis of Off-Grid Hybrid Power System in Distributed Generation. *Computers & Electrical Engineering*, 96, 107476.
- Alemi, P., Bae, C. J., and Lee, D. C. (2016). Resonance Suppression Based on PR Control for Single-Phase Grid-Connected Inverters with LLCL Filters. *IEEE Journal of Emerging and Selected Topics in Power Electronics*, 4(2), 459-467.
- Fu, X., and Li, S. (2016). A Novel Neural Network Vector Control for Single-Phase Grid-Connected Converters with L, LC and LCL Filters. *Energies*, 9(5), 328.
- Gökçek, T., ve Ateş, Y., (2019). Dağıtık Güç Üretiminin Şebekeye Entegrasyonu ve Olası Etkilerinin İncelenmesi. *Avrupa Bilim ve Teknoloji Dergisi*, (15), 216-228.
- Husev, O., Chub, A., Romero-Cadaval, E., Roncero-Clemente, C., and Vinnikov, D. (2015). Voltage Distortion Approach for Output Filter Design for Off-Grid and Grid-Connected PWM Inverters. *Journal of Power Electronics*, 15(1), 278-287.
- Kantar, E., Usluer, S. N., ve Hava, A. M. (2013, November). Design and performance analysis of a grid connected PWM-VSI system. *In 2013 8th International Conference on Electrical and Electronics Engineering (ELECO)* (pp. 157-161). Bursa, Turkey.
- Karaca, M., Mamizadeh, A., Genc, N., ve Sular, A. (2019, November). Analysis of Passive Filters for PV Inverters Under Variable Irradiances. *In 2019 8th International Conference on Renewable Energy Research and Applications (ICRERA)* (pp. 680-685). Brasov, Romania.
- Karafil, A., Özbay, H., ve Öncü, S. (2018, Ekim). Bir Fazlı Şebeke Etkileşimli Evirici Tasarımı için LCL Filtre Analizi. *International Conference on Data Science and Applications (ICONDATA)* (s.560-574). Yalova.
- Karafil, A. (2020). Effect of Passive Series Damping Resistor on Single Phase Grid Connected Inverter with LCL Filter. *Pamukkale University Journal of Engineering Sciences*, 26(5), 927-934.
- Karafil, A. (2020). Change Effect of LCL Filter Parameter Values and Series Damping Resistor Value in Single Phase Grid Connected Inverter. *EMO Bilimsel Dergi*, 10(1), 38-44.
- Karafil, A. (2021, Nisan). Bir Fazlı Şebeke Etkileşimli Eviricilerde Kullanılan PLL Algoritmaları. *5. Uluslararası Mühendislik ve Teknoloji Yönetimi Kongresi* (s. 482-490). İstanbul.
- Li, S., Fu, X., Ramezani, M., Sun, Y., and Won, H. (2015). A Novel Direct-Current Vector Control Technique for Single-Phase Inverter with L, LC and LCL Filters. *Electric Power Systems Research*, 125, 235-244.

- Liu, Y., Jin, D., Jiang, S., Liang, W., Peng, J., and Lai, C. M. (2019). An Active Damping Control Method for the LLCL Filter-Based SiC MOSFET Grid-Connected Inverter in Vehicle-to-Grid Application. *IEEE Transactions on Vehicular Technology*, 68(4), 3411-3423.
- Nicastri, A., and Nagliero, A. (2010, July). Comparison and Evaluation of the PLL Techniques for the Design of the Grid-Connected Inverter Systems. In *2010 IEEE International Symposium on Industrial Electronics* (pp. 3865-3870). Bari, Italy.
- Radwan, E., Nour, M., Baniyounes, A., and Al-Olimat, K. S. (2021). Design of Type-1 Servo Controller for Grid Voltage Modulated Direct-Power Control of Single-Phase Grid-Connected PV Inverter. *International Journal of Electrical & Computer Engineering*, 11(3), 1912-1923.
- Saleem, M., Ahmed Khan Khushik, M. H., Tahir, H., and Kim, R. Y. (2021). Robust L Approximation of an LCL Filter Type Grid-Connected Inverter Using Active Disturbance Rejection Control under Grid Impedance Uncertainty. *Energies*, 14(17), 5276.
- Sanatkar-Chayjani, M., and Monfared, M. (2016). Design of LCL and LLCL Filters for Single-Phase Grid Connected Converters. *IET Power Electronics*, 9(9), 1971-1978.
- Santos Filho, R. M., Seixas, P. F., Cortizo, P. C., Torres, L. A., and Souza, A. F. (2008). Comparison of Three Single-Phase PLL Algorithms for UPS Applications. *IEEE Transactions on Industrial Electronics*, 55(8), 2923-2932.
- Sosa, J. M., Escobar, G., Martinez-Rodriguez, P. R., Vazquez, G., Juarez, M. A., and Diosdado, M. (2014, November). Comparative Evaluation of L and LCL Filters in Transformerless Grid Tied Converters for Active Power Injection. In *2014 IEEE International Autumn Meeting on Power, Electronics and Computing (ROPEC)* (pp. 1-6). Ixtapa, Mexico.
- Wu, W., He, Y., and Blaabjerg, F. (2012). An LLCL Power Filter for Single-Phase Grid-Tied Inverter. *IEEE Transactions on Power Electronics*, 27(2), 782-789.
- Wu, W., He, Y., Tang, T., and Blaabjerg, F. (2013). A New Design Method for the Passive Damped LCL and LLCL Filter-Based Single-Phase Grid-Tied Inverter. *IEEE Transactions on Industrial Electronics*, 60(10), 4339-4350.