



Pasif seri sönümleme direncinin LCL filtreli bir fazlı şebeke etkileşimli evirici üzerine etkisi

Effect of passive series damping resistor on single phase grid connected inverter with LCL filter

Akif KARAFİL^{1*}

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

Geliş Tarihi/Received: 23.10.2019
Kabul Tarihi/Accepted: 07.01.2020

Düzeltilme Tarihi/Revision: 05.01.2020

doi: 10.5505/pajes.2020.99896
Araştırma Makalesi/Research Article

Öz

Bu çalışmada, 600 W gücündeki LCL filtreli bir fazlı şebeke etkileşimli evirici devresinin analizi, tasarımı, benzetimi ve uygulaması gerçekleştirilerek devre üzerinde pasif sönümleme direncinin etkisi incelenmiştir. Aktif güç kontrolü için oransal integral (PI), akım kontrolü için oransal rezonans (PR) denetleyici ve şebeke frekans kontrolü için ise T/4 gecikmeli faz kilitlemeli döngü (PLL) algoritması kullanılmıştır. Sistemde sönümleme direnci olmadan analizler yapılarak değişik güç değerlerinde benzetim ve deneysel sonuçlar elde edilmiştir. Daha sonra evirici devresindeki LCL filtreye sönümleme direnci dâhil edilerek sonuçlar tekrar alınmıştır. Elde edilen benzetim ve deneysel sonuçlara göre sönümleme direncinin devreye dâhil edilmesi ile birlikte şebeke akımındaki osilasyonların azaldığı ve güç geçişlerinin de daha düzgün hale geldiği görülmüştür.

Anahtar kelimeler: Seri sönümleme direnci, LCL filtre, Aktif güç kontrolü, PR akım kontrolü, Bir fazlı şebeke etkileşimli evirici.

Abstract

In this study, analysis, design, simulation and the application of a single phase grid connected inverter circuit with LCL filter were realized at 600 W power and the effect of passive series damping resistor on the circuit was examined. Proportional integral (PI) was used for the active power control, proportional resonant (PR) controller was used for the current control and T/4 delay phase locked loop (PLL) algorithm was used for frequency control of the grid. The analyses were conducted without series damping resistor and the simulation and the experimental results were obtained for different power values. Then, the series damping resistor was connected to the LCL filter in the inverter circuit and the results were obtained again. The obtained simulation and the experimental results showed that the oscillations in the grid current decreased and the power transitions became more uniform with the series damping resistor.

Keywords: Series damping resistor, LCL filter, Active power control, PR current control, Single phase grid connected inverter.

1 Giriş

Enerjiye olan talebin artması ile birlikte yenilenebilir enerji kaynaklarına olan ilgi de artmaktadır. Özellikle güneşten elektrik enerjisi elde edilen fotovoltaik (PV) sistemlere yapılan teşvikler bu sektörün her geçen gün daha fazla ilgi görmesini sağlamaktadır. PV sistemler, sulama, konut, endüstri ve askeri uygulama gibi birçok alanda kullanılmaktadır. Özellikle yönetmeliklerde yapılan düzenlemelerle konut çatılarına yerleştirilen PV paneller ile konutların günlük enerji ihtiyaçları karşılanmaktadır. Üretilen enerjinin fazlası ise şebekeye aktarılmaktadır. Bu da verimli çalışmayı artırarak bu sistemlerin amorti sürelerini kısaltmaktadır. Konut ve küçük güçlü evsel cihazların çalıştırılabilmesi için bir eviriciye ihtiyaç duyulmaktadır. Bir fazlı şebekeye bağlı PV sistemlerinde kullanılan evirici, PV enerji kaynağı ile şebeke arasına bağlanmaktadır. Şebeke etkileşimli eviriciler doğru gerilimi alternatif gerilime çevirmekle birlikte şebeke geriliminin frekansı ve genliği ile senkronize olarak çalışırlar [1]-[4].

Bir eviricinin şebeke ile senkronize çalışabilmesi için şebekeye aktarılan akımın sinüs şeklinde olup akımın harmonikleri IEC 61727 ve IEEE 1547 Uluslararası Standartların belirlediği sınır değerleri içinde olmalıdır. Akımın şebekeye aktarılmasında bu standartlara uyulabilmesi için şebeke etkileşimli eviricinin hemen ardından bir filtre kullanılmalıdır

[5],[6]. Genellikle L, LC, LCL ve LLCL filtre tipleri kullanılmakta olup, bu filtrelerin birbirlerine kıyasla çeşitli üstünlükleri ve sakıncaları vardır. L tipi filtrede tasarım ve transfer fonksiyon çözümü diğer filtre tiplerine göre basittir. Fakat uluslararası standartların belirlediği sınır değerlerinin elde edilebilmesi için filtre endüktans değerinin artırılması gerekir. Bu durum, sistemin hantallaşmasını ve maliyetini artırır. LC, LCL ve LLCL filtre tipleri, filtre boyutunun düşürülerek sistem maliyetinin azaltılmasını sağlayabilir. Ayrıca bu filtre tiplerinde L filtre tipine kıyasla daha düşük toplam harmonik bozulma (THD) sonuçları bulunur. LC filtre tipi, ikinci mertebeden bir filtre tipi olarak çoğunlukla güç kaynağı ve şebekeye bağlı olmayan sistemlerde kullanılmaktadır. Buna karşın, şebeke bağlantılı sistemlerde kullanılan LC filtre tipinde kullanılan kapasitör, bobine paralel bağlı olduğu için yüksek frekans durumlarında düşük empedans oluşsa bile sistemde yüksek frekans harmonikleri oluşur. Bunun sonucunda yüksek ani akımlar meydana gelir. LCL filtre, şebeke bağlantılı sistemlerde sıklıkla kullanılan filtre tiplerinden biridir. LCL filtre üçüncü mertebeden bir filtre tipi olup, diğer filtre tiplerine nazaran küçük hacimde ve düşük maliyetle olmasına rağmen parametre değerlerinin belirlenebilmesi oldukça zordur. Sistemin sürekli olarak kararlı hal durumunda kalabilmesi için değişkenlerin doğru olarak hesaplanmasına gerekir. LLCL filtre tipinde maliyet ve boyut en düşük düzeyde olup harmonikler daha iyi filtre edilir. Buna karşın, sistemin kararlı hal durumunda

*Yazışılan yazar/Corresponding author

kalması zordur [7]-[9]. Bu durumda, bir fazlı şebeke etkileşimli evirici tasarımı için maliyet ve hacim gibi etkenler ele alındığında uygun olan filtre tipinin LCL filtre tipi olduğu anlaşılmaktadır.

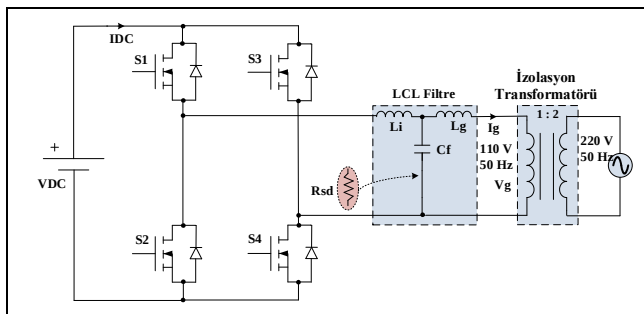
LCL filtredeki osilasyonların azaltılması ve filtrenin kararsız hal durumunun engellenebilmesi için pasif ve aktif sönümlleme metodları kullanılabilir. Pasif sönümlleme metodu basit, etkili ve güvenilirdir. Aynı zamanda endüstriyel uygulamalarda çoğunlukla kullanılmaktadır. Fakat pasif sönümlleme metodu yüksek güç uygulamaları için önemli miktarda güç kaybı oluştururken, düşük güç uygulamaları için oluşan güç kaybı ihmal edilebilecek seviyededir. Aktif sönümlleme metodunda ekstra bir güç kaybı oluşmamasına rağmen bu metodun dezavantajı kontrol karmaşıklığı ve kullanılan sensörler nedeniyle maliyetin artmasıdır [10]-[13]. Maliyet, boyut ve kontrol gibi faktörler düşünüldüğünde uygun olan yöntemin pasif sönümlleme olduğu ortaya çıkmaktadır. Pasif sönümlleme metodunda sönümlleme direnci, LCL filtrenin kapasitörüne seri veya paralel bağlanır. Fakat kararlılık, kayıp ve şebekeye harmonikli akımların aktarılması gibi durumlar dikkate alındığında seri sönümlleme direncinin kullanılmasının uygun olacağı görülmektedir [14].

Bu çalışmada, aktif güç kontrollü LCL filtreli PR akım kontrollü bir faz evirici devresinin önce pasif sönümlleme seri direnci olmadan analizi yapılarak benzetim ve deneysel sonuçları verilmiştir. Daha sonra devreye sönümlleme direnci ilave edilerek benzetim ve deneysel sonuçlar alınarak osilasyonların azaltıldığı kanıtlanmıştır. Devrede PLL algoritması olarak T/4 gecikmeli PLL kullanılmıştır.

Bu makalenin bölümleri şu şekilde düzenlenmiştir: Giriş Bölümü'nden sonra Bölüm 2'de LCL filtre tasarımı anlatılmıştır. Bölüm 3'te kontrol metodları ve PLL yapısı sunulmuştur. Bu bölümde, PR akım kontrolü, T/4 gecikmeli PLL yapısı ve bir fazlı şebeke etkileşimli eviricinin güç kontrolü açıklanmıştır. Bölüm 4'te sistemin PSIM programındaki benzetim ve deneysel sonuçlarına yer verilmiştir. Son olarak sonuç bölümünde seri sönümlleme direncinin evirici devresi üzerindeki etkisi incelenmiştir.

2 LCL filtrenin tasarımı

Şekil 1'de LCL filtre bağlantılı bir fazlı şebeke etkileşimli evirici devresinin şeması gösterilmiştir.



Şekil 1. LCL filtre bağlantılı bir fazlı şebeke etkileşimli evirici.

Figure 1. LCL filtered single phase grid connected inverter.

LCL tipi filtrede değişkenlerin değerlerini hesaplamadan önce bir fazlı şebeke bağlantılı evirici devresine ait değişkenlerin değerlerini belirtmek gerekir. Sisteme ait değişkenlerin değerleri Tablo 1'de gösterilmiştir.

Tablo 1. Evirici devresine ait değişkenlerin değerleri.

Table 1. Values of variables in inverter circuit.

Değişkenler	Değer
Şebekenin Gerilimi (V_g)	110 V
Evirici Çıkış Gücü (P_n)	600 W
DC Giriş Gerilimi (V_{DC})	300 V
Şebeke Frekansı (f)	50 Hz
Anahtarlama Frekansı (f_{sw})	10 kHz

Öncelikle evirici kısmındaki bobinin (L_i) endüktans değerinin hesaplanması gerekir. Bunun için şebekeye transfer edilen akımın (I_g) maksimum %20 dalgalanma oranı (a) ile akım değişimi Denklem (1) ile hesaplanır.

$$\Delta I_{Lmax} = a \frac{P_n \sqrt{2}}{V_g} \leq \%20 I_g \quad (1)$$

Filtre devresinin empedans ve kapasite değerleri Denklem (2) ve Denklem (3) ile hesaplanır.

$$Z_b = \frac{V_g^2}{P_n} \quad (2)$$

$$C_b = \frac{1}{2\pi f Z_b} \quad (3)$$

Evirici tarafındaki bobinin endüktans değeri Denklem (4) ile bulunur.

$$L_i = \frac{V_{DC}}{16 f_{sw} \Delta I_{Lmax}} \quad (4)$$

Filtre kapasitörünün (C_f) değeri hesaplanırken idealde hesaplanan C_b değerinin %5'i alınır. Denklem (5) ile C_f değeri bulunur.

$$Q_c = V_g^2 2\pi f C_f \leq \%5 P_n \quad (5)$$

Şebeke kısmındaki bobinin endüktans değeri (L_g) hesaplanırken şebeke ile evirici kısmındaki bobinler arasındaki ilişki katsayısından yararlanılır. Bu katsayı " r " ile gösterilir ve $0 < r \leq 1$ aralığında bir değer alır. Yüksek güç uygulamalarında bu katsayı değeri 1 olarak alınabilir. Fakat şebeke bağlantılı sistemlerde, şebeke kısmındaki endüktansın değeri de düşünülerek daha küçük bir katsayı değeri belirlenebilir. Bu durumda L_g değeri Denklem (6) ile hesaplanır [15],[16].

$$L_g = r L_i \quad (6)$$

Denklemler yardımıyla $L_i = 3.24$ mH, $C_f = 8$ μ F ve $L_g = 2.5$ mH olarak hesaplanmıştır. LCL filtre tipinin parametre değerleri hesaplandıktan sonra rezonans frekansı bulunabilir. Rezonans frekansı, Denklem (7) ile hesaplanır.

$$f_{res} = \frac{1}{2\pi} \sqrt{\frac{L_i + L_g}{L_i L_g C_f}} \quad (7)$$

Aynı zamanda rezonans frekansı, Denklem (8)'de verilen aralıklarda bulunmalıdır.

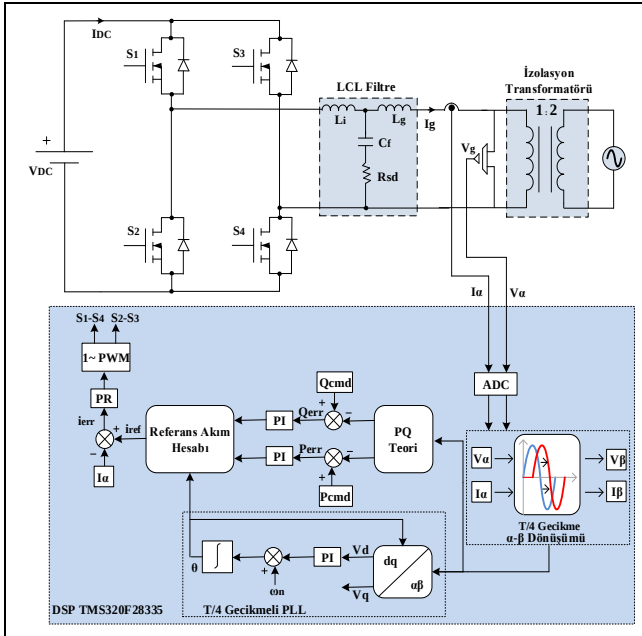
$$10f < f_{res} < 0.5f_{sw} \quad (8)$$

Sönümlleme direnci (R_{sd}) Denklem (9)'daki gibi hesaplanır [8],[17].

$$R_{sd} \geq \frac{1}{3\omega_{res}C_f} \quad (9)$$

3 Bir fazlı şebeke etkileşimli eviricinin kontrolü ve PLL yapısı

Şebeke bağlantılı eviricilerde denetim sistemi ile akım, gerilim ve güç gibi değişkenler denetlenebilir. Bu değişkenlerin denetimi için çeşitli denetleyiciler kullanılmaktadır. Bunlar; doğrusal, doğrusal olmayan, dayanıklı, adaptif, öngörülü ve akıllı denetleyicilerdir. Doğrusal denetleyiciler, klasik geri bildirim kontrol teorisi ile çözümlenir. Öteki denetleyiciler, iyi bir dinamik tepki göstermelerine rağmen sistem içinde bir zaman gecikmesi meydana getirirler. Bundan dolayı genellikle doğrusal denetleyiciler tercih edilir. Doğrusal akım denetleyicileri arasında en yaygın kullanılan PI ve PR denetleyicilerdir [18],[19]. Bir fazlı şebeke etkileşimli eviricinin yapısı ve denetim blok şeması Şekil 2’de verilmiştir.



Şekil 2. Bir fazlı şebeke etkileşimli eviricinin yapısı ve denetim blok şeması.

Figure 2. Structure and control block scheme of single phase grid connected inverter.

3.1 PR akım kontrolü

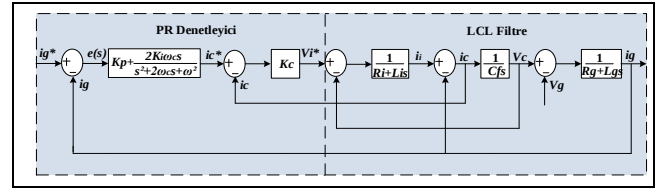
PR denetleyici, şebekeye bağlı bir veya üç fazlı sistemlerde kullanılan kontrol yöntemlerinden biridir. PI ve PR, birbirlerine benzeyen ve birçok ortak noktası olan denetleyicilerdir. PR denetleyici ile PI denetleyicinin bilinen iki önemli dezavantajı ortadan kaldırılır. Birincisi sinüzoidal referanslı sıfır kararlı durum hatasıyla takip edilmesi diğeri ise parazitlerin engellenmesidir. PR denetleyicinin uygulanmasında bazı problemler yer alır. İdeal PR denetleyici, sınırsız kazanç harmonik bileşenlerini artırır. Bu da bu denetleyicinin uygulanmasını zorlaştırır. Bu amaçla kazancın azaltılabilmesi için Denklem (10)’daki formül kullanılır.

$$G_{ipr}(s) = K_p + \frac{2K_i s}{s^2 + \omega_n^2} \quad (10)$$

Denklem (10)’daki formül dahi birçok kez harmonik bileşenlerinin azaltılması için yeterli olmaz. Bu durumda ideal olmayan PR denetleyici kullanılır. Denklem (11)’de ideal olmayan PR denetleyicinin formülü verilmiştir.

$$G_{nipr}(s) = K_p + \frac{2K_i \omega_c s}{s^2 + 2\omega_c s + \omega_n^2} \quad (11)$$

Burada, ω_n şebekenin açısal frekansı, K_p ve K_i değerleri ise sırasıyla oransal ve integral kazanç değerleridir. ω_c ise kesim açısal frekansıdır. İdeal olmayan PR denetleyicide daha düşük kazanç ve bant aralığı mevcuttur. Sistemin dinamik cevabı oransal ve integral kazanç değerleri ile belirlenirken bant genişliği ise kesim açısal frekansı ile belirlenir [20]-[22]. Sistemin PR kontrollü blok şeması Şekil 3’te gösterilmiştir.



Şekil 3. LCL filtre bağlantılı bir fazlı şebeke etkileşimli eviricinin PR kontrol döngüsü.

Figure 3. PR control loop of LCL filtered single phase grid connected inverter.

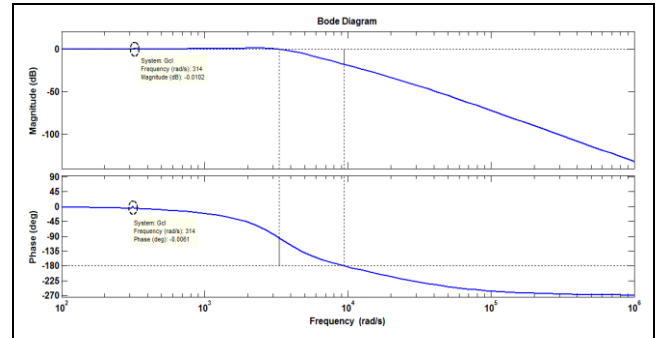
Burada, sistemin kontrol kazancı (K_c) olarak gösterilmiştir. Evirici ve şebeke kısmındaki bobinlerin iç dirençleri (R_i) ve (R_g) olarak gösterilmiştir. Sistemde öncelikle sönümlenme direncinin olmadığı düşünülerek tasarım gerçekleştirilmiştir. Denklem (12) ve Denklem (13)’te PR kontrollü sistemin açık ve kapalı döngü transfer fonksiyonları verilmiştir.

$$G_{opr}(s) = \frac{A_0 s^2 + K_i K_c s + A_0 \omega_n^2}{B_0 s^5 + B_1 s^4 + (B_2 + B_0 \omega_n^2) s^3 + (B_3 + B_1 \omega_n^2) s^2 + B_2 \omega_n^2 s + B_3 \omega_n^2} \quad (12)$$

$$G_{cpr}(s) = \frac{A_0 s^2 + K_i K_c s + A_0 \omega_n^2}{B_0 s^5 + B_1 s^4 + (B_2 + B_0 \omega_n^2) s^3 + (A_0 + B_3 + B_1 \omega_n^2) s^2 + (K_i K_c + B_2 \omega_n^2) s + (A_0 + B_3) \omega_n^2} \quad (13)$$

Burada; $A_0 = K_p K_c$, $B_0 = L_i L_g C_f$, $B_1 = R_i L_g C_f + R_g L_i C_f + L_g C_f K_c$, $B_2 = L_i + L_g + R_i R_g C_f + R_g C_f K_c$, $B_3 = R_i + R_g$ şeklinde olur.

Kapalı döngü transfer fonksiyonu kullanılarak Matlab programında yapılan analiz ile sistemin bode diyagramı Şekil 4’te gösterilmiştir.



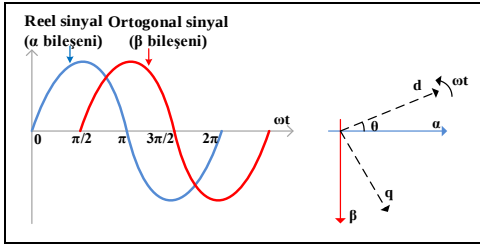
Şekil 4. PR denetleyici sistemin bode diyagramı.

Figure 4. Bode diagram of PR controller system.

Şekil 4'teki bode diyagramında şekil üzerinde gösterilen kısımda frekans 314 rad/s, genlik 0 dB ve faz kaydırma 0°'dir. Elde edilen Matlab sonuçlarına göre kullanılan PR denetleyici ile sıfır kararlı durum hatası ve sıfır faz kaydırma elde edilmiştir.

3.2 T/4 gecikmeli PLL yapısı

Şebeke etkileşimli eviricilerde şebeke ile senkronizasyonun sağlanabilmesi için PLL kullanılması gerekir. Eviricilerde birçok PLL algoritması kullanılmaktadır. T/4 gecikmeli PLL, bir fazlı şebeke etkileşimli uygulamalarda faz açısının çıkarılması için kullanılabilecek algoritmalarından biridir. T/4 gecikmeli PLL algoritmasında α - β ve d-q eksen takımlarına ihtiyaç vardır [23],[24]. Öncelikle PLL algoritmasının oluşturulabilmesi için α - β eksen takımının elde edilmesi gerekir. Ortogonal sanal sinyalin (β bileşeni) elde edilebilmesi için α bileşeni $\pi/2$ kaydırılması gerekir. Bu durumda iki bileşen elde edilir. Bunlardan; α bileşeni reel, β bileşeni ise sanal eksendedir. Reel ve sanal sinyaller ile birlikte d-q eksen takımı Şekil 5'te verilmiştir.

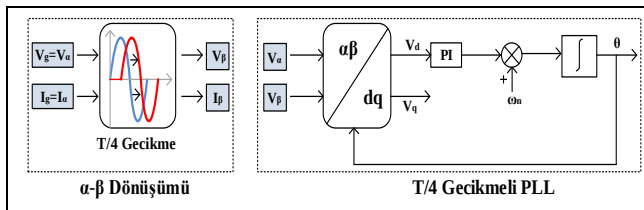


Şekil 5. Reel ve ortogonal sinyaller ile birlikte d-q eksen takımının vektör diyagramı.

Figure 5. The vector diagram of the d-q axis frames with real and orthogonal signals.

Burada şebeke gerilimi (V_g) V_α olarak alınmaktadır. V_β ise $\pi/2$ kaydırılarak elde edilmektedir. T/4 gecikmeli PLL devresinde α - β 'nin Park dönüşümü ile d-q eksen takımına dönüştürülmesi için Denklem (14)'ten yararlanılmıştır [25]-[27]. Şekil 6'da α - β dönüşümü ve T/4 gecikmeli PLL yapısı gösterilmiştir.

$$\begin{bmatrix} V_d \\ V_q \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} \cos \theta & \sin \theta \\ -\sin \theta & \cos \theta \end{bmatrix} \begin{bmatrix} V_\alpha \\ V_\beta \end{bmatrix} \quad (14)$$



Şekil 6. α - β dönüşümü ve T/4 gecikmeli PLL yapısının blok diyagramı.

Figure 6. The block diagram of α - β transform and T/4 delay PLL.

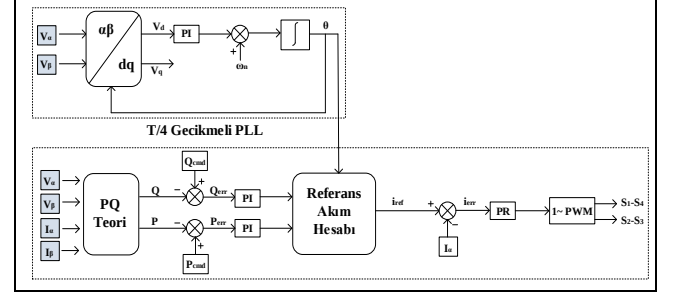
3.3 Sistemin güç kontrolü

V_α , V_β , I_α ve I_β değerleri kullanılarak aktif-reaktif güç (PQ teori) hesabı yapılmıştır. Hesaplanan güç değerleri Denklem (15) ve Denklem (16)'da verilmiştir.

$$P = \frac{1}{2} (V_\alpha I_\alpha + V_\beta I_\beta) \quad (15)$$

$$Q = -\frac{1}{2} (V_\alpha I_\beta - V_\beta I_\alpha) \quad (16)$$

Tasarlanan sistemin güç kontrol blok şeması Şekil 7'de verilmiştir.



Şekil 7. Sistemin güç kontrol blok diyagramı.

Figure 7. The power control block diagram of the system.

Elde edilen güç değerleri, istenilen güç değerleri (P_{cmd} ve Q_{cmd}) ile kıyaslanarak hata değerleri elde edilmiştir. Referans akım hesabında kullanılan referans güç değeri (P_{ref}), istenilen güç değerine (P_{cmd}) eşittir ($P_{ref} = P_{cmd}$). Bu çalışmada reaktif güç kontrolü yapılmadığından Q_{cmd} sıfır olarak alınmıştır.

Elde edilen güç hata değerleri PR denetleyicisinden geçirilmiş ve PLL algoritmasından elde edilen ωt formüllerine dâhil edilerek referans akım hesabı yapılmıştır. Referans akım formülü aşağıdaki Denklem (17), Denklem (18) ve Denklem (19) kullanılarak bulunmuştur [28].

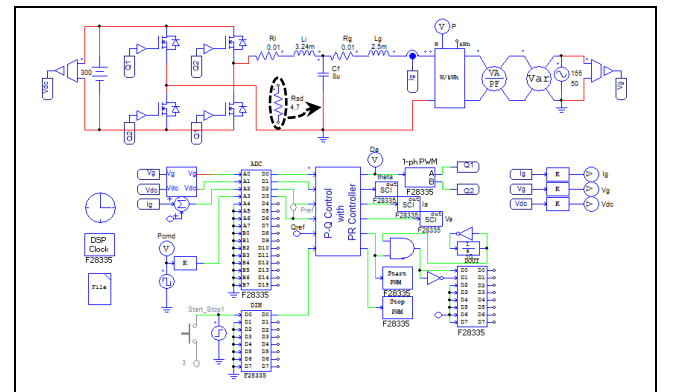
$$\phi = \tan^{-1} \left(\frac{Q_{ref}}{P_{ref}} \right) \quad (17)$$

$$I_g = \frac{P_{ref}}{V_g \cos \phi} \quad (18)$$

$$i_{ref} = \sqrt{2} I_g \sin(\omega t - \phi) \quad (19)$$

4 Benzetim sonuçları

Bir fazlı şebeke etkileşimli evirici devresinin PSIM programındaki benzetim ekran görüntüsü Şekil 8'de gösterilmiştir.

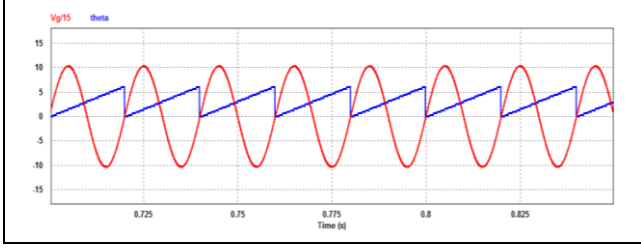


Şekil 8. Bir fazlı şebeke etkileşimli eviricinin benzetimi.

Figure 8. The simulation of single phase grid connected inverter.

Sisteme önce hesaplanan sönümleme direnci ($R_{sd}=4.7 \Omega$) eklenmeden değişik güçlerde benzetim çalışmaları yapılmıştır. Daha sonra sisteme sönümleme direnci dâhil edilerek aynı güç

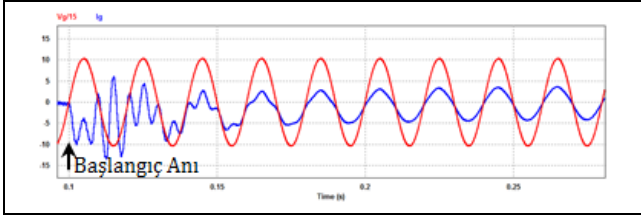
değerleri için benzetim çalışmaları yapılarak aralarındaki fark kıyaslanmıştır. Şebeke gerilimi ve senkronize olarak üretilen açısal hız değerleri Şekil 9'da gösterilmiştir.



Şekil 9. PLL ile üretilen açısal hız değerleri.

Figure 9. The production of angular speed values by PLL.

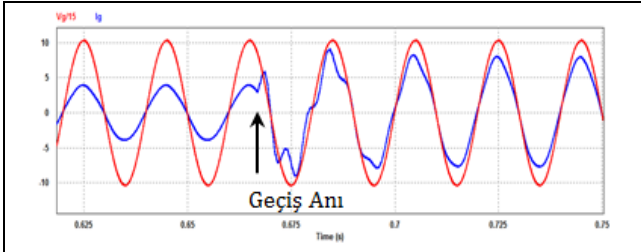
Sistemin aktif gücü $P = 300$ W ve $R_{sd} = 0$ Ω iken şebekenin akım ve gerilim dalga şekli Şekil 10'da gösterilmiştir.



Şekil 10. 300 W aktif güç ve $R_{sd} = 0$ Ω iken şebekenin başlangıç akım ve gerilimi.

Figure 10. The initial current and voltage of the grid at 300 W active power and $R_{sd} = 0$ Ω .

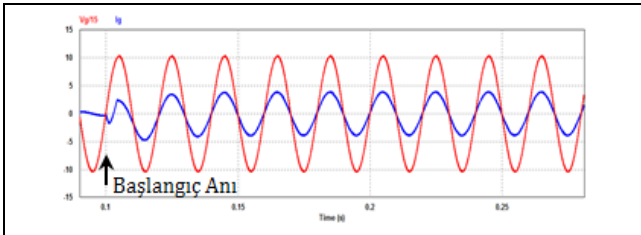
Aktif gücün 300 W'tan 600 W'a çıktığı andaki ($R_{sd} = 0$ Ω) şebeke akım ve gerilim dalga şekilleri Şekil 11'de verilmiştir.



Şekil 11. 300 W'tan 600 W'a geçiş periyodu ($R_{sd} = 0$ Ω).

Figure 11. The period of transition from 300 W to 600 W ($R_{sd} = 0$ Ω).

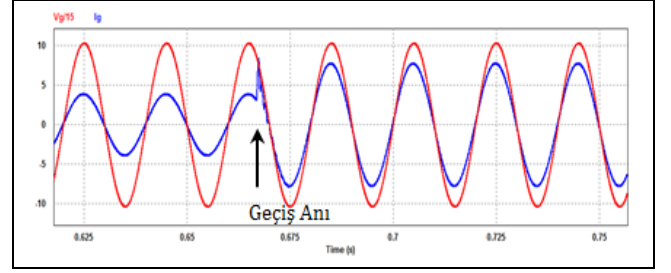
Bu kısımda, sisteme sönümlenme direnci ilave edilerek sönümlenme direncinin etkisi benzetim sonuçlarına göre incelenmiştir. Sistemin aktif gücü $P = 300$ W ve $R_{sd} = 4.7$ Ω iken şebekenin akım ve gerilim dalga şekli Şekil 12'de gösterilmiştir.



Şekil 12. 300 W aktif güç ve $R_{sd} = 4.7$ Ω iken şebekenin başlangıç akım ve gerilimi.

Figure 12. The initial current and voltage of the grid at 300 W active power and $R_{sd} = 4.7$ Ω .

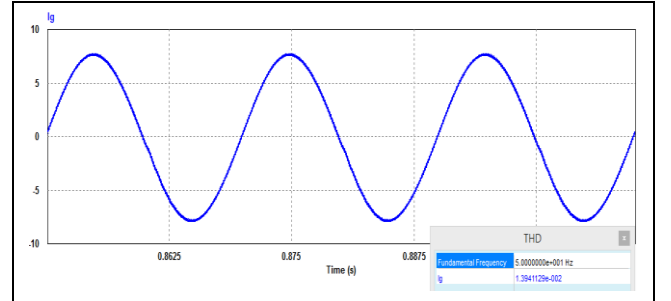
Aktif gücün 300 W'tan 600 W'a çıktığı andaki ($R_{sd} = 4.7$ Ω) şebeke akım ve gerilim dalga şekilleri Şekil 13'te verilmiştir.



Şekil 13. 300 W'tan 600 W'a geçiş periyodu ($R_{sd} = 4.7$ Ω).

Figure 13. The period of transition from 300 W to 600 W ($R_{sd} = 4.7$ Ω).

Sistemin aktif gücü 600 W ve $R_{sd} = 4.7$ Ω iken şebeke akımının THD değeri %1.39'dur. Şebeke akımının THD değeri Şekil 14'te gösterilmiştir.



Şekil 14. 600 W güçte şebekeye aktarılan akımın THD değeri.

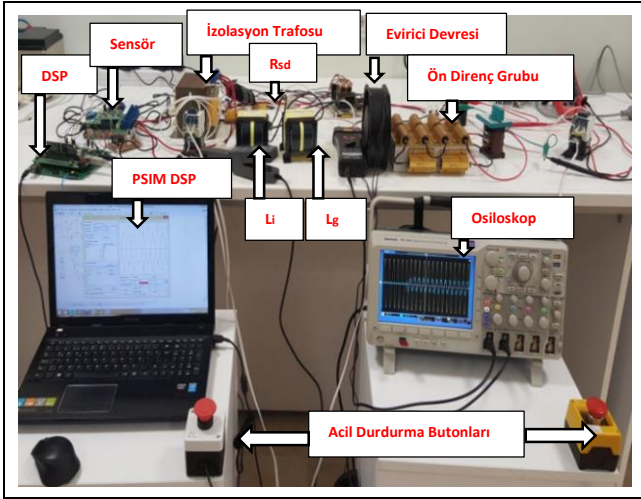
Figure 14. THD value of the current transferred to the grid at 600 W power.

Devrede sönümlenme direnci olmadığı başlangıç anında ve güç geçiş anlarında şebeke akımı osilasyonlu olduğu benzetim sonuçlarından görülmektedir. Bu problem devreye bağlanan sönümlenme direnci ile giderilmiştir. Benzetim çalışmalarına göre seri sönümlenme direncinin yaklaşık olarak 3-5 W kadar bir güç kaybı oluşturduğu hesaplanmıştır.

5 Deneyisel sonuçlar

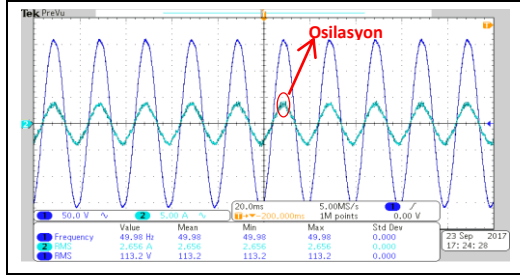
Benzetim sonuçlarından elde edilen durumun kanıtlanabilmesi amacıyla 600 W gücünde bir prototip evirici devresi tasarlanmıştır. Bir fazlı şebeke etkileşimli evirici devresinin deney düzeneği Şekil 15'te gösterilmiştir.

Devrenin girişi için gerekli olan doğru gerilim değeri Ametek SGI 800/13 marka ayarlı güç kaynağı kullanılarak 300 V değerine ayarlanmıştır. Evirici devresinde dört adet IRFP 460N MOSFET güç anahtarları yer almaktadır. Bir fazlı evirici devresinde şebeke akımı ve geriliminin ölçülebilmesi için ACS756SCA-050B ve LV25-P hall etki sensörleri kullanılmıştır. Devrenin kontrolü için bir adet TMS320F28335 sayısal sinyal işlemcisi (DSP) kullanılmıştır. Sönümlenme direncinin sistem üzerindeki etkisini belirlemek amacıyla sistem sönümlenme direnci olmadan, 300-500 ve 600 W güç değerlerinde test edilmiştir. Şekil 16'da şebekeden çekilen akım ve gerilim dalga şekillerinin osiloskop görüntüleri verilmiştir.

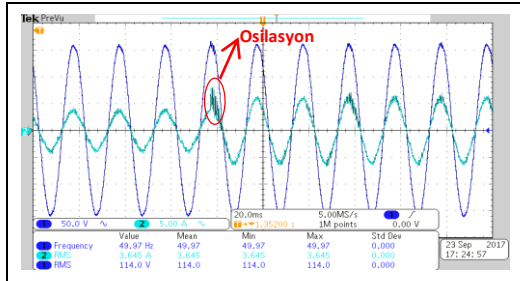


Şekil 15. Bir fazlı şebeke etkileşimli evirici devresinin deney düzeneği.

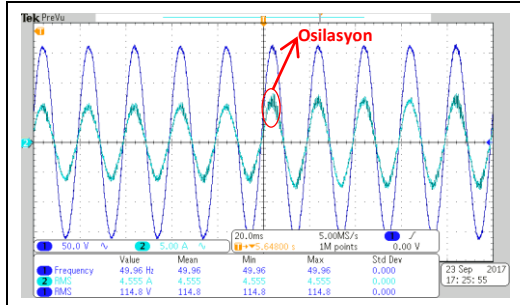
Figure 15. The experimental setup of the single phase grid connected inverter.



(a): 300 W.



(b): 300 W'tan 500 W'a geçiş.

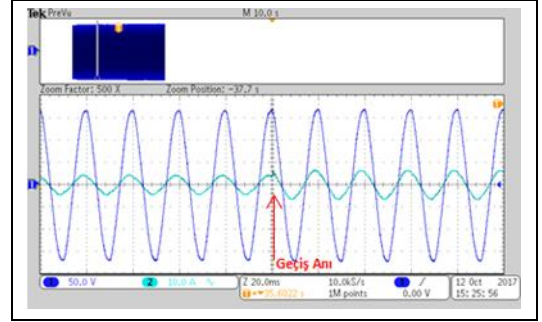


(c): 500 W'tan 600 W'a geçiş.

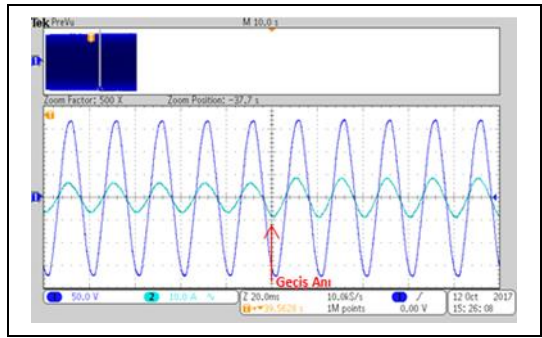
Şekil 16. Değişik güç değerlerinde şebekenin akım ve gerilim değerleri.

Figure 16. The current and voltage values of the grid at different power values. (a): 300 W, (b): Transition from 300 W to 500 W, (c): Transition from 500 W to 600 W

Sönümlenme direnci devreye dâhil edilerek aynı güç değerlerinde deney tekrarlanmıştır. Şekil 17'de şebekeden çekilen akım ve gerilim dalga şekillerinin osiloskop görüntüleri gösterilmiştir.



(a): 300 W'tan 500 W'a geçiş.



(b): 500 W'tan 600 W'a geçiş.

Şekil 17. Seri sönümlenme direnci dâhil edilen evirici devresinde şebeke akım ve gerilim değerleri.

Figure 17. The current and voltage values of the grid in the inverter circuit with the connected series damping resistor. (a): Transition from 300 W to 500 W, (b): Transition from 500 W to 600 W.

Hem benzetim hem de deneysel sonuçlara göre sönümlenme direncinin devreye alınması ile birlikte güç geçişlerinin düzgün hale gelmesi sağlanmıştır. Aynı zamanda şebeke akımındaki osilasyonlar azaltılmıştır. Osilasyonların artması şebeke akımının sinüzoidal formunu bozar. Bu durum enerji kayıplarının artmasına, birçok cihazın anormal çalışmasına, elektronik kart arızalarına, mekanik titreşimlere, koruma elemanlarının ve mikroişlemcilerin hatalı çalışması gibi birçok olumsuz etkilerin oluşmasına neden olur. Aynı zamanda uluslararası standartların belirlemiş olduğu sınır değerleri de aşılabılır. Bu olumsuzlukların giderilmesi için bu çalışmada pasif sönümlenme direnci evirici devresindeki LCL filtreye dâhil edilmiştir. Pasif sönümlenme direncinin dâhil edilmesi ile osilasyonlar azaltılmıştır.

6 Sonuçlar

Bu çalışmada, LCL filtreli bir fazlı şebeke etkileşimli evirici devresi üzerinde pasif sönümlenme direncinin etkisi incelenmiştir. Evirici devresi 10 kHz anahtarlama frekansında 600 W gücünde tasarlanmıştır. Akım kontrolü için PR denetleyici ve şebeke frekans kontrolü için ise T/4 gecikmeli PLL algoritması kullanılmıştır. Sistem önce evirici devresinde pasif sönümlenme direnci olmadan değişik güçlerde benzetim ve deneysel çalışmaları gerçekleştirilmiştir. Daha sonra hesaplanan pasif seri sönümlenme direnci ($R_{sd}=4.7 \Omega$) devreye dâhil edilerek değişik güç değerlerinde benzetim ve deneysel

sonuçlar tekrar alınmıştır. Devrede pasif seri sönümleme direnci olmadığına şebeke akımının sinüzoidal olmayan formda olduğu görülmüştür. Bu durum birçok cihazın arızalanmasına neden olmaktadır. Bu problemin giderilebilmesi için basit, etkili ve düşük maliyetli bir seri direnç evirici devresindeki LCL filtreye eklenmiştir. Pasif seri sönümleme direncinin ilave edilmesi ile birlikte şebeke akımının osilasyonlarının azaldığı ve güç geçişlerinin daha düzgün hale geldiği görülmüştür.

7 Conclusions

In this study, the effect of passive damping resistor on a single phase grid connected inverter circuit with LCL filter was investigated. The inverter circuit was designed at 600 W and 10 kHz switching frequency. PR controller was used for current control and T/4 delay PLL algorithm was used for grid frequency control. The system was first simulated and tested at different powers without passive series damping resistor in inverter circuit. Then, the calculated passive series damping resistor ($R_{sd}=4.7 \Omega$) was connected to the circuit and the simulation and the experimental studies were repeated at different power values. When the circuit did not have passive series damping resistor, it was seen that the grid current was in non-sinusoidal form. This causes many devices to break down. To overcome this problem, a series resistor, which is simple, efficient and inexpensive, was connected to the LCL filter in the inverter circuit. It was seen that when the passive series damping resistor was added, the oscillations of the grid current decreased and the power transitions became more uniform.

8 Kaynaklar

- [1] Gomes CC, Cupertino AF, Pereira HA. "Damping techniques for grid-connected voltage source converters based on LCL filter: An overview". *Renewable and Sustainable Energy Reviews*, 81, 116-135, 2018.
- [2] Asghari F, Safavizadeh A, Karshenas HR. "Investigation of instability in multiple grid-connected inverters with LCL output filters". *Journal of Power Electronics*, 18(3), 757-765, 2018.
- [3] Jia Y, Zhao J, Fu X. "Direct grid current control of LCL-filtered grid-connected inverter mitigating grid voltage disturbance". *IEEE Transactions on Power Electronics*, 29(3), 1532-1541, 2014.
- [4] Peng S, Luo A, Chen Y, Lv Z. "Dual-loop power control for single-phase grid-connected converters with LCL filter". *Journal of Power Electronics*, 11(4), 456-463, 2011.
- [5] Chatterjee A, Mohanty KB. "Current control strategies for single phase grid integrated inverters for photovoltaic applications-a review". *Renewable and Sustainable Energy Reviews*, 92, 554-569, 2018.
- [6] Reznik A, Simoes MG, Al-Durra A, Mueen SM. "LCL filter design and performance analysis for grid-interconnected systems". *IEEE Transactions on Industry Applications*, 50(2), 1225-1232, 2014.
- [7] Büyük M, Tan A, Tümay M, Bayındır KÇ. "Topologies, generalized designs, passive and active damping methods of switching ripple filters for voltage source inverter: A comprehensive review". *Renewable and Sustainable Energy Reviews*, 62, 46-69, 2016.
- [8] Husev O, Chub A, Romero-Cadaval E, Roncero-Clemente C, Vinnikov D. "Voltage distortion approach for output filter design for off-grid and grid-connected PWM inverters". *Journal of Power Electronics*, 15(1), 278-287, 2015.
- [9] Beres RN, Wang X, Liserre M, Blaabjerg F, Bak CL. "A review of passive power filters for three-phase grid-connected voltage-source converters". *IEEE Journal of Emerging and Selected Topics in Power Electronics*, 4(1), 54-69, 2016.
- [10] Wu W, He Y, Tang T, Blaabjerg F. "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, 2013.
- [11] Liu F, Zhou Y, Duan S, Yin J, Liu B, Liu F. "Parameter design of a two-current-loop controller used in a grid-connected inverter system with LCL filter". *IEEE Transactions on Industrial Electronics*, 56(11), 4483-4491, 2009.
- [12] Lee JY, Cho YP, Kim HS, Jung J.H. "Design methodology of passive damped LCL filter using current controller for grid-connected three-phase voltage-source inverters". *Journal of Power Electronics*, 18(4), 1178-1189, 2018.
- [13] Komurcugil H, Altin N, Ozdemir S, Sefa I. "Lyapunov-function and proportional-resonant-based control strategy for single-phase grid-connected VSI with LCL filter". *IEEE Transactions on Industrial Electronics*, 63(5), 2838-2849, 2016.
- [14] Afzal R, Jamil M, Waqas A, Nawaz A, Ali MA, Mailk MH. "Design and analysis of second order passive filters for grid connected inverter with series and parallel damping resistors". *Indian Journal of Science and Technology*, 9(21), 1-5, 2016.
- [15] Bauer J. "Single phase voltage source inverter photovoltaic application". *Acta Polytechnica*, 50(4), 7-11, 2010.
- [16] Ardashir JF, Sabahi M, Hosseini SH, Blaabjerg F, Babaei E, Gharehpetian GB. "A single-phase transformerless inverter with charge pump circuit concept for grid-tied PV applications". *IEEE Transactions on Industrial Electronics*, 64(7), 5403-5415, 2017.
- [17] Kantar E, Usluer SN, Hava AM. "Design and performance analysis of a grid connected PWM-VSI system". *8th International Conference on Electrical and Electronics Engineering (ELECO)*, Bursa, Turkey, 28-30 November 2013.
- [18] Athari H, Niroomand M, Ataei M. "Review and classification of control systems in grid-tied inverters". *Renewable and Sustainable Energy Reviews*, 72, 1167-1176, 2017.
- [19] Arulkumar K, Palanisamy K, Vijayakumar D. "Recent advances and control techniques in grid connected PV system-A review". *International Journal of Renewable Energy Research*, 6(3), 1037-1049, 2016.
- [20] Shen G, Zhu X, Zhang J, Xu D. "A new feedback method for PR current control of LCL-filter-based grid-connected inverter". *IEEE Transactions on Industrial Electronics*, 57(6), 2033-2041, 2010.
- [21] Rajeev M, Agarwal V. "Analysis and control of a novel transformer-less microinverter for PV-grid interface". *IEEE Journal of Photovoltaics*, 8(4), 1110-1118, 2018.
- [22] Zammit D, Staines CS, Apap M, Licari J. "Design of PR current control with selective harmonic compensators using Matlab". *Journal of Electrical Systems and Information Technology*, 4(3), 347-358, 2017.
- [23] Han Y, Luo M, Zhao X, Guerrero JM, Xu L. "Comparative performance evaluation of orthogonal-signal-generators-based single-phase PLL algorithms-A survey". *IEEE Transactions on Power Electronics*, 31(5), 3932-3944, 2016.

- [24] Kulkarni A, John V. "Design of a fast response time single-phase PLL with dc offset rejection capability". *Electric Power Systems Research*, 145, 35-43, 2017.
- [25] Yang Y, Blaabjerg F, Zao Z. "Benchmarking of grid fault modes in single-phase grid-connected photovoltaic systems". *IEEE Transactions on Industry Applications*, 49(5), 2167-2176, 2013.
- [26] Karafil A, Özbay H. "Power control of single phase active rectifier". *Balkan Journal of Electrical and Computer Engineering*, 7(3), 332-336, 2019.
- [27] Gao J, Zhao J, He C, Zhang S, Li F. "Power control strategies for single-phase voltage-controlled inverters with an enhanced PLL". *Journal of Power Electronics*, 18(1), 212-224, 2018.
- [28] Karafil A, Ozbay H, Oncu S. "Design and analysis of single phase grid tied inverter with PDM MPPT controlled converter". *IEEE Transactions on Power Electronics*, 35(5), 4756-4766, 2020.