

Şebekeye Bağlı SOGI-PLL Tabanlı Tek Fazlı Eviricinin PR ve HCC ile Güç Kontrolü

Doğan ÇELİK, Mehmet Emin MERAL

Elektrik-Elektronik Mühendisliği Bölümü, Yüzüncü Yıl Üniversitesi, Van
dogancelik@yyu.edu.tr
emeralm@yahoo.com

Özet: Şebeke ile güç alışverişini düzenlemek ve harmonik bileşenleri azaltmak için literatürde farklı kontrol yöntemleri önerilmiştir. Bu çalışmada, şebekeye bağlı ikinci dereceden genelleştirilmiş integratör (SOGI) tabanlı tek fazlı faz kilitlemeli döngü (PLL) kullanılan tek fazlı evirici sisteminin oransal rezonans (PR) ve histerezis akım kontrolcü (HCC) kullanılarak güç/akım kontrolü yapılmıştır. SOGI algoritmali PLL vasıtasıyla, normalde üç fazlı şebekelerde kullanılan geleneksel PLL' in tek fazlı şebekede kullanımı sağlanarak, şebeke frekans ve gerilim için senkronizasyonunu sağlanmıştır. PR ve HCC tabanlı kontrolcüler, evirici ile şebeke arasındaki aktif gücün değişimini sağlayan kontrolcülerdir. SOGI tabanlı PLL sistemi ve PR ve HCC tabanlı kontrolcü kullanılan evirici-şebeke sistemleri PSCAD/EMTDC paket yazılımı kullanılarak analiz edilmiş, her iki yöntem harmonik ve dinamik cevap açısından karşılaştırılmıştır.

Anahtar Kelimeler: HCC tabanlı kontrolcü, PR tabanlı kontrolcü, SOGI, Tek fazlı PLL,

The Power Control of Grid Tied SOGI-PLL Based Single Phase Inverter with PR and HCC

Abstract: To regulate the power exchange with the grid and reduce the harmonic components, various control strategies have been proposed in literature. In this paper present single phase grid tied inverter system using single phase phase-locked loop (PLL) based second order generalized integrator (SOGI) with proportional resonant (PR) and hysteresis current controller (HCC) power/current controllers. The SOGI algorithm is used, in interaction with a conventional PLL that is used in three phase grid to enable single phase grid for voltage and frequency synchronization. PR and HCC based controllers are discussed in order to obtain the control of grid side inverter along with the variation of active power and grid voltage drop. PR and HCC based controllers are analysed using PSCAD/EMTDC software package; both controllers are compared with harmonic component and dynamic response.

Keywords: SOGI, single phase PLL, PR based controller, HCC based controller

Giriş

Son yıllarda fosil yakıtlardan kaynaklanan çevresel kirlilik ve artan enerji talebi ile birlikte dağıtılmış üretim ve yenilenebilir enerji kaynaklarının önemi gittikçe artmaktadır. Genellikle üretilen enerji, şebeke sistemine güç elektroniği dönüştürücüleri ile iletilir. Gerilim kaynaklı evirici (VSI) düşük güçlü yenilenebilir enerji kaynaklarını şebekeye bağlamak için en uygun çözümdür. Şebeke ile güç değişimini düzenlemek için ve aynı zamanda alternatif akım tarafında harmonik bileşenleri azaltmak için Histerezis Tabanlı Akım Kontrolcü (HCC) ve Oransal Rezonans (PR) tabanlı akım kontrolcü gibi farklı kontrol stratejileri geliştirilmiştir (Monfared ve ark., 2012). Eviricide kontrol sisteminin şebeke senkronizasyonu için şebeke gerilimini izleyen faz kilitlemeli döngü (PLL) kullanılabilir (Assefa ve ark., 2009). PLL şebeke geriliminin fazını takip etmek için kullanılır ve bu amaçla ortogonal gerilim sistemi ihtiyacı doğar. Tek fazlı sistemlerde üç faz bilgisi olmadığından, ortogonal gerilim sistemini oluşturmak için gelişmiş metotlar ihtiyacı doğar (Salam ve ark., 2009).

İkinci dereceden genelleşmiş integrator (SOGI) PLL giriş sinyali olarak yapay ortogonal gerilimi üretmek için kullanılabilir. SOGI algoritması genellikle şebeke gerilimi ve frekansı ile senkronizasyon için PLL ile birlikte kullanılır. Temel frekansta, kendi frekansından dolayı zaman gecikmesi olmadan giriş sinyalini filtreleyebilir ve uygulaması kolaydır. SOGI algoritması giriş sinyalinin gürültüsünden etkilenmeden ortogonal sinyal sistemini sağlayan etkili bir yöntemdir (Matas ve ark., 2010). VSI için akım kontrolcülerini literatürde kontrol yapısı ve en uygun özelliğine göre sınıflandırılır. VSI' nin

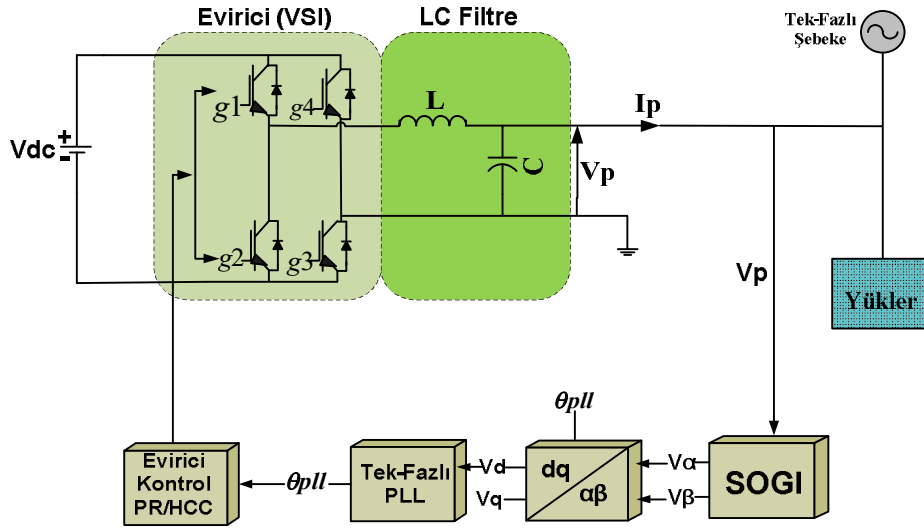
akım kontrolcü tasarımında en önemli noktalar; akım dinamiği, transistörleri anahtarlama frekansı, akım harmonikleri ve gerilim kazancıdır. Literatürdeki VSI akım kontrolcülerden ikisi, HCC ve PR akım kontrolcüleridir (Tilli ve Tonielli, 1998).

HCC uygulamadaki basitliği, doğası gereği akım sınırlayıcı ve hızlı cevap vermesi gibi özelliklerinden dolayı en önemli akım kontrolcülerinden biridir. Fakat PR akım kontrolcü ile kıyaslandığında, anahtarlama frekansının daha yüksek olması gerekliliği ve yüksek harmonik içermesi gibi dezavantajları vardır. Genellikle literatürde tek-bantlı HCC ve çift bantlı HCC gibi iki yöntem kullanılarak uygulanır (Dahono, 2009).

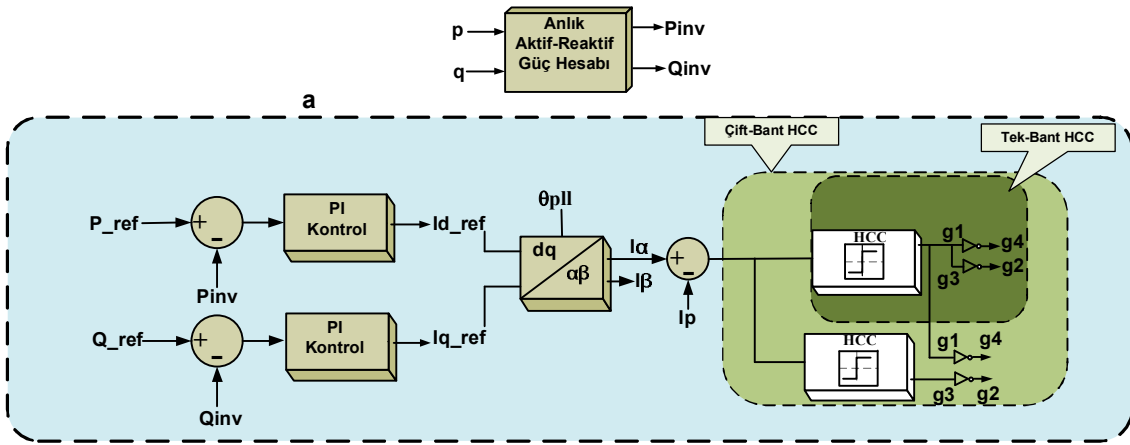
PR akım kontrolcüsü şebekeye bağlı evirici ile birlikte bir çok güç elektroniği uygulamalarında kullanılır. PR kontrolcü geleneksel PI kontrolcülerle kıyaslandığında kararlı hal hata oranı daha düşüktür (Ye ve ark., 2015).

Şebekeye bağlı evirici sisteminin modeli Şekil 1'de verilmiştir. Sistemin her bölümünün teknik detayları aşağıdaki bölümlerde ayrı şekilde verilmiştir.

Şekil 2-a' da anlık aktif ve reaktif güç hesabı yapıldıktan sonra istenilen referans güce çekmek için evirici çıkış gücüyle kıyaslanıp referans ortogonal akımları (I_{d_ref} ve I_{q_ref}) elde edilmiştir. Evirici geriliminin şebeke gerilimi ile aynı faz, frekans ve genliğe sahip olması için SOGI-PLL kullanılıp HCC kontrolü ile evirici anahtarlama sağlanmıştır.

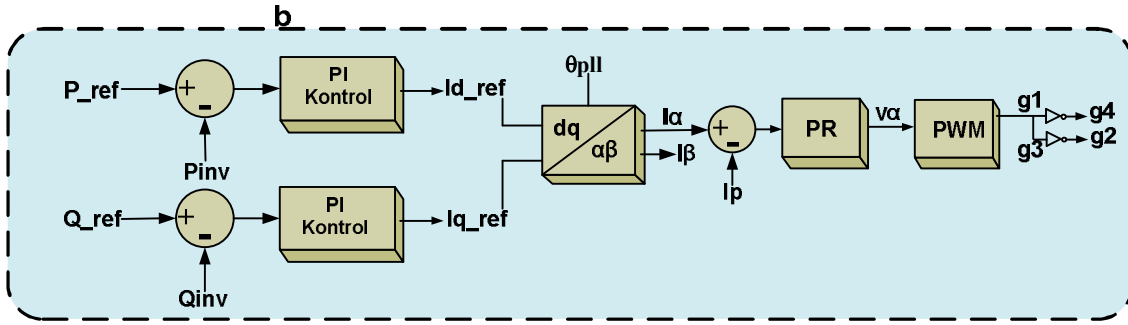


Şekil 1. Evirici ile şebeke ve yük bağlantısı.



Şekil 2-b' de Şekil 2-a' da olduğu gibi güç hesabı yapıldıktan sonra istenilen referans güce çekmek için evirici çıkış gücüyle kıyaslanıp referans ortogonal akımları (I_{d_ref} ve

I_{q_ref}) elde edilmiştir. Eviricinin şebeke senkronizasyonu sağlanması için SOGI-PLL kullanılıp PR kontrolü ile evirici anahtarlamaları sağlanmıştır.



Şekil 2. Aktif-Reaktif güç kontrolü ile a)Tek/Çift bantlı HCC tabanlı evirici anahtarlamaları veya b) PR akım kontrolü.

Bu çalışmada, tek fazlı şebeke ile eviricinin senkronizasyonunu sağlamak için SOGI tabanlı tek fazlı PLL ile birlikte PR ve HCC akım kontrolcülerini kullanarak evirici ile şebeke senkronizasyonu sağlanmıştır. Üç fazlı sistemlerde kolay elde edilen ortogonal yapının, tek fazlı sistemde SOGI ile üretilmiştir. SOGI tabanlı tek fazlı PLL' in giriş gerilimini takip etme performansı incelenmiş ve yenilenebilir enerji kaynaklarından çekilecek referans gücün değişimine göre kontrolcülerin tepkisi incelenmiştir. Bununla birlikte, her iki kontrolcünün şebekeye verdiği akımların harmonikleri incelenmiştir.

Materyal ve Yöntem

Bu çalışmada şebekeye bağlı evirici kontrolü, PR ve HCC akım kontrol yöntemleri ve tek fazlı PLL için SOGI kullanılarak yapılmıştır. Evirici sistemi ve kontrol yöntemlerin teknik detayları aşağıdaki bölümlerde aktarılmıştır.

Evirici Tasarımı

Bu çalışmada tek fazlı evirici tasarımı, IGBT elemanlı VSI ile yapılmıştır. Evirici, Şekil 1' de gösterildiği gibi, her biri iki güç anahtarlama elemanını (IGBT) içeren

iki köprü koluna sahiptir (Garcia, 2014). Şebekeye bağlı evirici sisteminde IGBT anahtarlama sinyalleri, aktif ve reaktif güç kontrol sisteminden elde edilmiştir.

Çıkış gerilimin rms değeri;

$$V_p = \left(\frac{2}{T_0} \int_0^{T_0/2} V_s^2 \cdot dt \right)^{1/2}$$

$$= V_{dc}$$

İkinci Dereceden Genelleştirilmiş İntegrator (SOGI) Tabanlı Tek Fazlı PLL

Tek fazlı PLL tasarımı üç fazlı PLL ile kıyaslandığında biraz farklıdır. Tek fazlı eviricide referans gerilimin, şebeke gerilimi ile aynı faz, frekans ve genliğe sahip olması için bir çift ortogonal gerilimi üretme ihtiyacı vardır. Üç fazlı PLL sisteminden, sabit üç fazdan iki faz (α - β) kolay elde edilir. Ancak, tek fazlı sistemlerde zaman alanlı akım ya da gerilimin ortogonal sinyali mevcut değildir (Vishnu, 2013). Literatürde yapay ortogonal sinyalleri üretmek için farklı yöntemler önerilmiştir. Bu çalışmada bu yöntemlerin en önemlilerinden biri olan SOGI kullanılmıştır (Assefa, 2009). SOGI algoritması şebeke gerilimi ve frekans senkronizasyonu için genellikle

PLL ile birlikte kullanılır. SOGI, giriş sinyali gürültüsünden etkilenmeden ortogonal sinyali oluşturmak için etkili bir yöntemdir. SOGI yapısı, kapalı döngüde çalışan iki kaskat integratörün uygulamasıyla oluşan, ayarlanabilen rezonans frekans yapısına dayalıdır. Bu yapı PLL ile birlikte şebeke gerilim ve frekansın tam senkronizasyonunu sağlamak için kullanılır. SOGI kolay uygulama, hızlı ve doğru sinyal izleme kapasitesi ve giriş sinyali azaltma kapasitesi gibi özelliklere sahiptir (Matas ve ark., 2010).

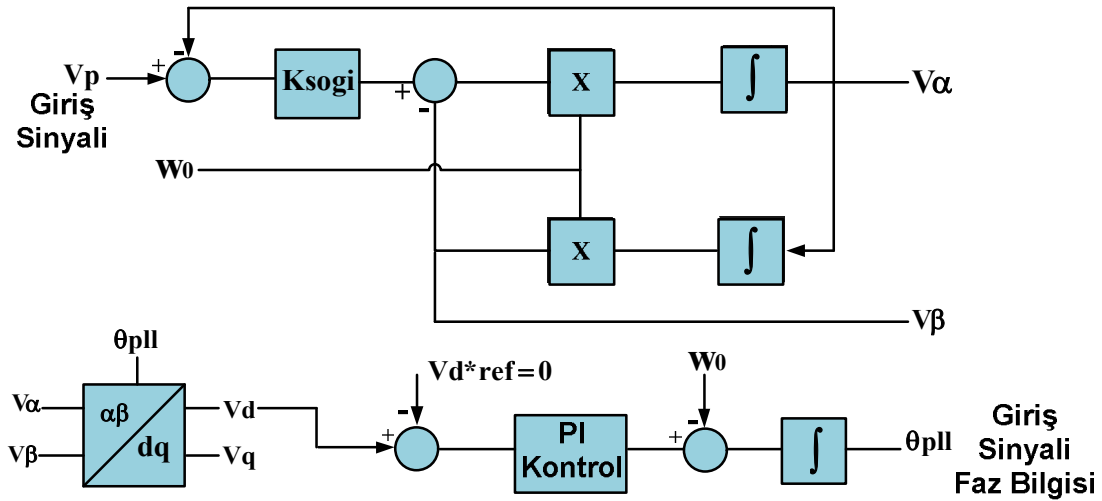
Kapalı çevrim transfer fonksiyonları olan V_α/V_p ve V_β/V_p oranları aşağıdaki eşitliklerde verilmiştir.

$$H_\alpha(s) = \frac{K_{sogi}\omega_0 s}{s^2 + K_{sogi}\omega_0 s + \omega_0^2}$$

$$H_\beta(s) = \frac{K_{sogi}\omega_0^2}{s^2 + K_{sogi}\omega_0 s + \omega_0^2}$$

ω_0 doğal frekans sinyali ve çıkış (V_d ve V_q) olarak iki ortogonal sinüs dalgası üretir. V_d çıkışı, V_p giriş sinyali temel bileşeni ile aynı fazdadır. SOGI'nin bant aralığı kazançtan etkilenir. K_{sogi} azalırsa filtre daha çok daralır fakat sistemin dinamik cevabı aynı zamanda yavaşlar. Bu yapının ayarlanması frekansa bağlıdır ve şebeke frekansında salınım olduğunda problemler oluşabilir. Bu yüzden SOGI'nin rezonans frekansı PLL yapısının çıkış frekansıyla ayarlanmalıdır (Vishnu, 2013, Wang ve ark., 2015).

(2)



Şekil 3. SOGI tabanlı tek fazlı PLL.

PLL tabanlı algoritmalar, kararlılık ve şebeke ile frekans uyumundan (Sarıbulut, 2016; Thakar, 2015) dolayı tercih

edilir. Tek fazlı PLL' de kullanılan park dönüşümü Eşitlik 4' de verilmiştir.

$$\begin{bmatrix} V_d \\ V_q \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} \cos(\theta_{pll}) & \sin(\theta_{pll}) \\ -\sin(\theta_{pll}) & \cos(\theta_{pll}) \end{bmatrix} \begin{bmatrix} V_\alpha \\ V_\beta \end{bmatrix}$$

Oransal Rezonans (PR) Akım Kontrolcü

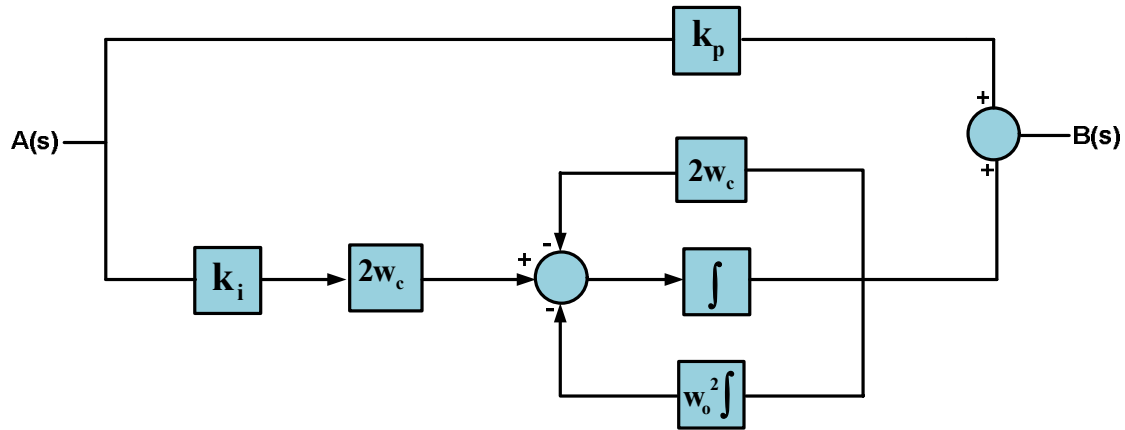
PR kontrolcü, şebekeye bağlı eviricide akım/güç kontrolünü sağlayan başarılı bir yöntemdir. PR akım kontrolcü kararlı hal hatasını yaklaşık sifira indirgeyerek şebeke akımındaki harmonikleri ortadan kaldırır (Jun- L ve ark., 2015). Ancak PR kontrolü, gerçekte uygulaması zor olduğundan bazı problemlere sahiptir. Bunlardan biri, PR kontrolcü tarafından sağlanan sınırsız kazanç, analog ya da sayısal sistem işlemcide uygulamasını zorlaştırır. Diğer, PR kontrolcünün kazancı çok azaltıldığında harmonik bileşenleri elemeye yeterli olmaz (Sultani, 2013, Monfared ve Golestan, 2012).

Eşitlik 5’de PR kontrolcünün kazancı çok azaltılmıştır ancak bu şekilde harmonik bileşenleri azaltmak yeterli olmaz. Bu sorunu çözmek için Eşitlik 6’da lineer olmayan PR kontrolcü kullanılmıştır.

$$G(s) = k_p + \frac{k_i s}{s^2 + \omega_o^2}$$

$$G(s) = k_p + \frac{k_i \omega_c s}{s^2 + 2\omega_c s + \omega_o^2}$$

Eşitlik 6’ da; ω_o şebekenin temel açısıl frekansı, k_p ve k_i sırasıyla PR kontrolcünün oransal ve integral kazançları ve ω_c kesim açısıl frekansdır. Transfer fonksiyonu ideal olmayan PR kontrolcü (Eşitlik 6) rezonans frekansta ideal PR kontrolcüye göre daha düşük kazanç ve bant aralığına sahiptir. Bu yüzden referans ve kontrol sinyali arasında kararlı hal hatası ihmal edilebilir. Rezonans noktasına yakın frekans bant genişliği integral zaman sabitine bağlıdır ve yüksek dinamik performansa sahiptir (Hojabri ve ark., 2012).



Şekil 4. PR akım kontrollü blok diyagramı (Jang, 2011).

Sitemin kararlı hal cevabı ve istenilen dinamik cevabı k_p ve k_i sabitleri ile belirlenir. Frekans değişimlerinde hassaslığı azaltan

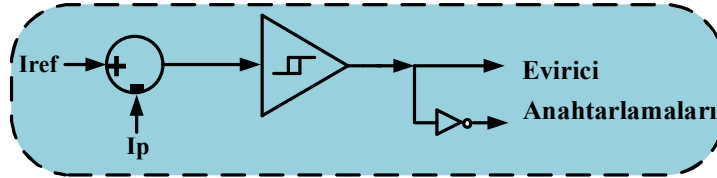
kontrolcünün bant genişliği kesim açısıl frekans ile azaltılabilir (Komurcugil, 2014).

Histerezis Akım Kontrolcileri (HCC)

Tek Bantlı Histerezis Akım Kontrolcü

Genellikle tek bantlı HCC yöntemi eviricinin anahtarlama frekans kontrolü için önemli rol oynar (Komurcugil, 2014). Şekil 5’ de verilen tek bantlı HCC tabanlı kontrolcünün blok diyagramında hat akımı ile referans akımı eviricinin anahtarlarını kontrol etmek için kullanılmıştır. Alt ve üst histerezis bant sınırları maksimum ve minimum hataları ile ilgilidir. Referans

akım azaltıldığında ve artırıldığında hata akımı bu sınırlar içerisinde kalır. Hata oranı histerezis bandı olarak adlandırılan evirici çıkış akımındaki dalgalıkların miktarını kontrol eder. Bu kontrolcülerin anahtarlama frekansı bant aralığını değiştiren yük parametrelerin değişimi ile değiştirilir ve bu rezonans problemine sebep olur. Anahtarlama kayıpları düşük güç seviyelerinde histerezis kontrolcünün uygulamalarını sınırlar. Bu problem sınırların ayarlanmasıyla çözülür (Hojabri ve ark., 2012).



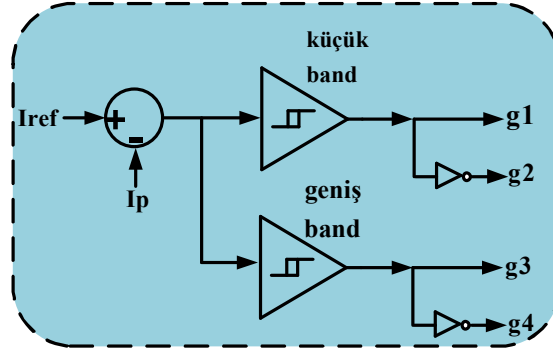
Şekil 5. Tek bantlı HCC blok diyagramı.

Bu kontrolcüler değişken anahtarlama frekansına sahiptir ve bu yüzden yüksek harmonikler içerirler. Akım dalgalıkların büyüklüğü histerezis bant aralığı ile orantılıdır. Histerezis bant çıkış akımının harmoniği azaltılabilir fakat anahtarlama kayıplarını da artırır. Diğer şekilde daha geniş histerezis bandı harmonikleri artırır. Bu yüzden histerezis bandı düşük anahtarlama kaybı ve düşük harmonik içerecek şekilde seçilmelidir. Kontrolcünün bant

genişliği sistemin parametrelerine bağlıdır (Sultani, 2013).

Çift Bantlı Histerezis Akım Kontrolcü

Çift bantlı HCC çıkış akımını kontrol eder. Bu kontrolcü Şekil 4’ de verilmiştir. Bu kontrolcünde daha düşük bir çift anahtar (g1 ve g2) ve daha geniş diğer çift anahtar (g3 ve g4) histerezis bandı ile kontrol edilir. Daha geniş bant aktif iken daha düşük bant akım hatasını kontrol etmez. Bu durumda daha geniş bant çıkış gerilimin polaritesini değiştirir.



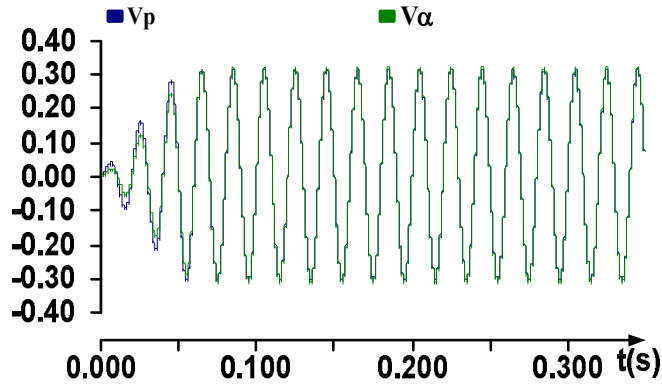
Şekil 6. Tek bantlı HCC blok diyagramı (Dahono, 2009).

Çift bantlı HCC tek bantlı HCC'den daha düşük anahtarlama frekansına sahiptir. Çift bantlı HCC daha iyi performans göstermesine rağmen dört anahtarlama elemanı aynı frekansta çalışmıyor (Dahono, 2004)

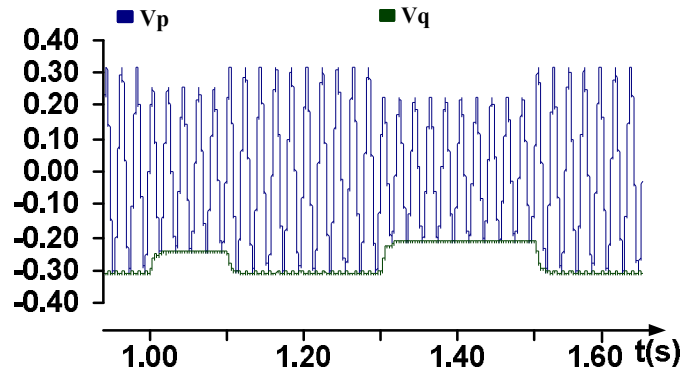
Bulgular

Şekil 7'de verilen grafikte SOGI'den elde edilen V_α çıkışı, V_p faz

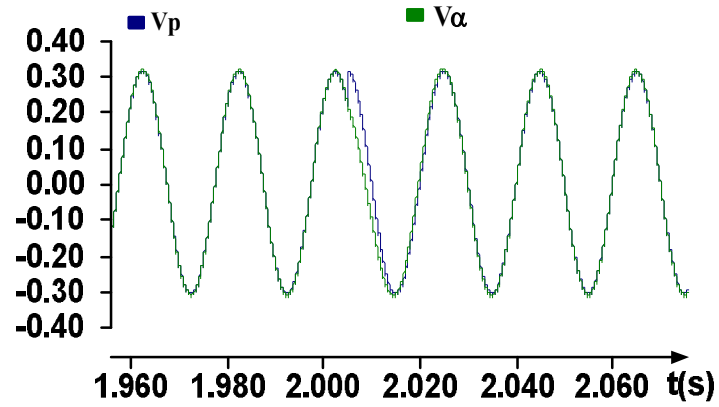
gerilimini takip ederek PLL girişi için senkronizasyon sağlamasını sağlar. SOGI'den elde edilen $(\alpha\beta)$ çıkışlarından ters park dönüşümü yapılarak oluşturulan V_q ortogonal sinyali şebeke geriliminde 1-1.1s %20 arasında ve 1.3-1.5s arasında %30 gerilim düşümü olduğunda V_p faz genliğini takip eden grafik Şekil 8'de verilmiştir.



Şekil 7. Evirici ve SOGI alpha çıkış gerilimleri.



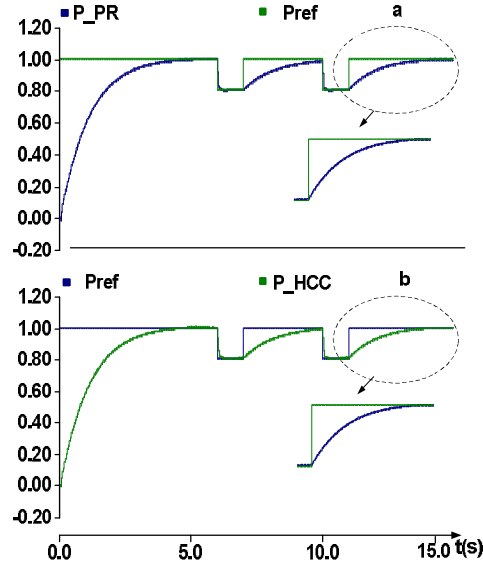
Şekil 8. Evirici çıkış gerilimi ve Vq ortogonal sinyali.



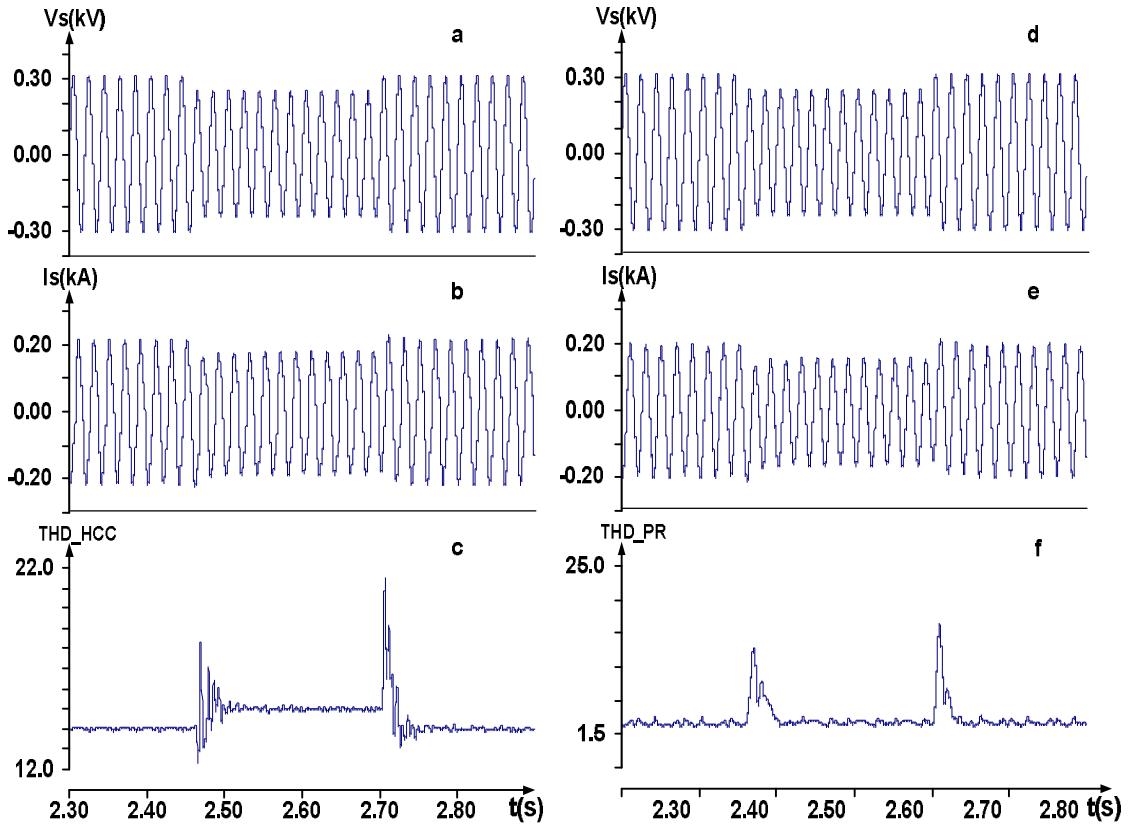
Şekil 9. Evirici ve SOGI alpha çıkış gerilimleri.

Şekil 9'da 2.01s'de 45° faz kayması olduğunda SOGI-PLL ile faz takibi sağlandığı görülmüştür. Şekil 10'da gösterilen PR ve HCC akım kontrolcülerin referans güçleri, 6-8s ve 10-12s arasında $1pu$ ' dan $0.8pu$ 'ya düşürüldüğünde ve tekrar artırıldığında dinamik cevapları referans güce göre aktif güç değişim tepkileri aynıdır.

Ancak, Şekil 11'de gösterildiği gibi gerilim düşümünde PR kontrolcü daha iyi performansa sahiptir. Şebeke geriliminde 2.46-2.72s arasında %20 gerilimi düşümü olduğunda PR akım kontrolü şebeke akımında olan harmonik miktarı (%2), çift bantlı HCC'deki harmonik miktarından (%13.5) daha azdır.



Şekil 10. (a) PR-Referans güce göre aktif güç değişimi, (b) HCC-Referans güce göre aktif güç değişimi.



Şekil 11. (a, d) Şebeke Gerilimi, (b-e) Şebeke akımı, (c) THD-HCC, (f) THD-PR.

Aşağıda verilen çizelge 3.1.' de sistemde kullanılan parametreler ve

kullanılan kontrolcülerin performansları verilmiştir.

Çizelge 3.1. Sistemin parametreleri ve kontrolcülerin performansları

Parametreler	Değer
L	0.0036 [H]
C	1.5 [μ F]
Vdc	220 V
Vp	311 V
THD - HCC	%13
THD - PR	%2

Sonuç

Bu çalışmada, SOGI tabanlı tek fazlı PLL kullanılan gerilim kaynaklı evirici PSCAD/EMTDC paket yazılımı kullanılarak modellenip analizi yapılmıştır. Tek fazlı sistemlerde ortogonal gerilim üretme ihtiyacı vardır. Bu yüzden SOGI kullanılarak, yapay bir şekilde ortogonal yapı üretilip PLL ile birlikte şebeke ile eviricinin faz ve genlik senkronizasyonu sağlanmış ve test edilmiştir. Bu yüzden SOGI kullanılarak, yapay bir şekilde ortogonal yapı üretilip PLL ile birlikte şebeke ile eviricinin faz senkronizasyonu sağlanmış ve test edilmiştir. Bununla birlikte, aktif güç kontrolü yapılarak PR ve HCC tabanlı kontrolcülerin performansları kıyaslanmış ve her iki kontrolcü için harmonik bozulmalar hesaplanmıştır. Anahtarlama kayıplarını azaltmak için tek bantlı HCC yerine anahtarlama frekansı daha düşük olan çift bantlı HCC kullanılmıştır. Sonuçlar, her iki akım kontrolcünün enjekte edilecek referans gücün değişmesi durumunda birbirine yakın performans sunduğunu, ancak harmonik bozulmalar açısından PR tabanlı kontrolcünün daha avantajlı olduğunu göstermiştir.

Kaynaklar

Assefa, H. Y., Danielsen, S., Molinas, M., 2009. Impact of PWM switching on modeling of low frequency power oscillation in

electrical rail vehicle. 13th European Conference on 8-10 Sept. 2009, Barcelona.

Assefa, H. Y., 2009. Stability Investigation of an Advanced Electrical Rail Vehicle. Norwegian University of Science and Technology Department of Electric Power Engineering, Norway.

Dahono, P.A., 2009. New hysteresis current controller for single-phase full-bridge Inverters. IET Power Electronics. 2;5: 585-594.

Dahono, P.A. , 2004. New Current Controllers for Single-Phase Full-Bridge Inverters. Power System Technology, 21-24 Nov. 2004.

Garcia, C. A., Llorens , F., Garcia, P., Fernandez, L. M., Jurado, F., 2014. Improving voltage harmonic compensation of a single phase inverted-based PEM fuel cell for standalone applications. International Journal Of Hydrogen Energy. 39;9: 4483-4492.

Hojabri, M., Ahmad , A. Z., Toudeshki, A., Soheilrad, M., 2012. An Overview on Current Control Techniques for Grid Connected Renewable Energy Systems. 2nd International Conference on Power and Energy Systems (ICPES 2012). 56;22:119-126.

Jang, M., Ciobotaru, M., Agelidis, V. G., 2011. Grid-Connected Fuel

- Cell System Based on a Boost-Inverter with a Battery Back-Up Unit. Power Electronics and ECCE Asia (ICPE & ECCE), May 30 2011-June 3 2011, Jeju.
- Jun- Li, Z., Yu- Ren, L., Peng, W., Bo, L., Long- Fei, F., 2015. The Analysis and Implementation of Proportional Resonant Control Algorithm-based Pwm Inverter Imbalanced Grid-connected, Journal of Software Engineering, 9: 548-560.
- Komurcugil, H., 2014. Combined use Of Double-Band Hysteresis Current And Proportional Resonant Control Methods for Single-Phase UPS Inverters. Industrial Electronics Society, IECON 2014 - 40th Annual Conference of the IEEE, Oct. 29 2014-Nov. 1 2014, Dallas, TX.
- Matas, J., Castilla, M., Vicu~na, L. G., Miret, J., Vasquez, J. C., 2010. Virtual Impedance Loop for Droop-Controlled Single-Phase Parallel Inverters Using a Second-Order General-Integrator Scheme. IEEE Transactions on Power Electronics. 25;10: 2993-3002.
- Monfared, M., Sanatkar, M., Golestan, S. 2012. Direct active and reactive power control of single-phase grid-tie converters. IET Power Electronics. 5;8: 1544–1550.
- Monfared, M., Golestan, S., 2012. Control strategies for single-phase grid integration of small-scale renewable energy sources. Renewable and Sustainable Energy Reviews. 16;7: 4982-499.
- Salam, A. A., Mohamed, A., Hannan, M. A., 2009. Improved Control Strategy for fuel cell and photovoltaic Inverter in a Microgrid. Wseas Transactions on Power Systems. 4;10: 331-340.
- Saribulut, L., 2016. A novel average filter based phase-locked loop for FACTS devices, Electric Power Systems Research 136: 289–297.
- Sultani, J. F., 2013. Modelling, Design And Implementation Of D-Q Control In Single-Phase Grid-Connected Inverters For Photovoltaic Systems Used In Domestic Dwellings. De Montfort University, Leicester, UK.
- Thakar, J., 2015. Analysis of Grid Synchronization Techniques for Distributed Generation System During Grid Abnormalities. Indian Journal Of Applied Research, 6: 532-534.
- Tilli, A., Tonielli, A., 1998. Sequential Design of Hysteresis Current Controller for Three-Phase Inverter. IEEE Transactions on Industrial Electronics. 45;5: 771-781.
- Vishnu, M., 2013. DC Bus Current Ripple Management in Single Phase PWM Inverters. Department of Electrical Engineering Indian Institute of Science, Bangalore, India.
- Ye, T., Dai, N., Lam, C.S., Wong, M.C., Guerrero, J.M., 2015. Analysis, design and implementation of a quasi-proportional-resonant controller for multifunctional capacitive-coupling grid-connected inverter. Energy Conversion Congress and Exposition (ECCE), 20-24 Sept. 2015, Montreal, QC.
- Wang, Y., Liu, H., Han, X., Wang, K., 2015. Frequency-adaptive grid-virtual-flux synchronization by multiple second-order generalized integrators under distorted grid conditions. Turkish Journal of Electrical Engineering & Computer Sciences, 23: 1930 – 1945.