



POLİTEKNİK DERGİSİ

JOURNAL of POLYTECHNIC

ISSN: 1302-0900 (PRINT), ISSN: 2147-9429 (ONLINE)

URL: <http://dergipark.gov.tr/politeknik>

ÇRE-FKÇ yönteminin sabit noktalı işaret işleyicilerle giriş gerilimi dengesizliği olan sistemlerde kullanımı için adaptasyonu

Adaptation of MRF-PLL method to be utilized with fixed point digital signal processors under unbalanced input voltage conditions

Yazar(lar) (Author(s)): Mustafa Cem ÖZKILIÇ¹, Atiye Hülya OBDAN²

ORCID¹: 0000-0001-9369-984X

ORCID²: 0000-0002-6578-0293

Bu makaleye şu şekilde atıfta bulunabilirsiniz (To cite to this article): Özkılıç M. C., Obdan A. H, “ÇRE-FKÇ yönteminin sabit noktalı işaret işleyicilerle giriş gerilimi dengesizliği olan sistemlerde kullanımı için adaptasyonu”, *Politeknik Dergisi*, 21(3): 591-596, (2018).

Erişim linki (To link to this article): <http://dergipark.gov.tr/politeknik/archive>

DOI: 10.2339/politeknik.389598

ÇRE-FKÇ Yönteminin Sabit Noktalı İşaret İşleyicilerle Giriş Gerilimi Dengesizliği Olan Sistemlerde Kullanımı için Adaptasyonu

Araştırma Makalesi / Research Article

Mustafa Cem ÖZKILIÇ*, Atiye Hülya OBDAN

¹Elektrik-Elektronik Fakültesi, Elektrik Mühendisliği Bölümü, Yıldız Teknik Üniversitesi, Türkiye
(Geliş/Received : 08.05.2017 ; Kabul/Accepted : 01.12.2017)

ÖZ

Elektrik enerjisi elde etmek için nükleer ve fosil türü yakıtların kullanımının doğaya verdiği zararlar göz önüne alınarak, son yıllarda yenilenebilir enerji kaynaklarının kullanımı tercih edilmeye başlanmış ve çalışmalar hız kazanmıştır. Şebeke bağlantılı çevirici kullanılan yenilenebilir enerji sistemlerinde temel gerilimin frekans ve genliğinin hızlı bir şekilde takip edilmesi ve bağlantı yapılacak sistemin, şebeke hattında yaşanacak bozukluklara rağmen, şebekeye adaptasyonunun gerçekleştirilmesi gerekmektedir. Bu tip adaptasyon için kapalı çevrim algılama yöntemleri kullanılarak değişken frekans ve genlik bilgisi elde edilir. Elde edilen bu bilgi ile sistemin güç faktörü, şebekeye aktarılan aktif veya reaktif güç kontrolü sağlanabilir. En sık kullanılan frekans adaptasyon yöntemi, faz kilitlemeli çevrim (FKÇ) yöntemidir. Bu çalışmada senkron referans eksen (SRE) ile çoklu referans eksen (ÇRE) faz kilitlemeli çevrim (FKÇ) yöntemleri incelenmiş ve SRE-FKÇ ile ÇRE-FKÇ'nin sabit noktalı işaret işleyiciler/mikrokontrolörler ile kullanımına yönelik Matlab- Simulink benzetim karşılaştırmaları yapılmıştır

Anahtar Kelimeler: Faz kilitlemeli çevrim (FKÇ), senkron referans eksen (SRE), çoklu referans eksen (ÇRE), şebeke bağlantılı sistem, üç fazlı dengesiz sistem.

Adaptation of MRF-PLL Method to be Utilized with Fixed Point Digital Signal Processors Under Unbalanced Input Voltage Conditions

ABSTRACT

Considering the pollution created by the fossil and nuclear type fuels during electrical energy production, utilization of renewable energy has been preferred and studies have accelerated in recent years. In grid connected renewable energy systems, the amplitude and the frequency of the fundamental voltage have to be tracked quickly and the system connected to the grid, even under grid disturbances, has to be adapted to the grid quickly. For this kind of adaptation, closed loop detection methods are used in order to gather the frequency and the amplitude information. By having this information, it would be possible to control the power factor, active and reactive power flow of the system. The most frequent used adaptation method is phased locked loop (PLL) method. In this study, Synchronous Reference Frame (SRF) and Multiple Reference Frame (MRF) Phased Locked Loop (PLL) methods have been investigated and applications of SRF-PLL along with MRF-PLL with fixed point digital signal processors/microcontrollers by utilizing Matlab-Simulink simulation comparisons have been done.

Keywords: Phase locked loop (PLL), synchronous reference frame (SRF), multiple reference frame (MRF), grid connected system, three phase unbalanced system

1. GİRİŞ (INTRODUCTION)

Elektrik enerjisi elde etmek için nükleer ve fosil türü yakıtların kullanımının doğaya verdiği zararlar göz önüne alınarak, son yıllarda yenilenebilir enerji kaynaklarının kullanımı tercih edilmeye başlanmış ve çalışmalar hız kazanmıştır. Yenilenebilir enerji kaynağı denildiğinde ilk akla gelen türler güneş enerjisi ve rüzgar enerjisidir. Bu kaynaklardan elde edilen enerji ya DC gerilim olarak akü gibi depolama elemanlarında saklanır ya da AC gerilime çevrilerek şebekeye aktarılır.

Yenilenebilir enerji sistemlerinde enerjinin şebekeye aktarılması, tek fazlı ya da üç fazlı çeviricilerle sağlanmaktadır [1-3].

Yenilenebilir enerji sistemlerine olan talebin artması nedeniyle şebekeye yapılan bağlantıların şebeke kodları ile uyumlu olması gerekmektedir. Özellikle, yüksek güçlü şebeke bağlantılarında şebekenin kararlı bir şekilde çalışmasının ve oluşan hatanın yayılarak başka hatalara dönüşmesinin engellenmesinin garanti edilmesi gerekmektedir. Bu sebeple temel gerilimin frekans ve genliğinin hızlı bir şekilde takip edilmesi ve bağlantı yapılacak sistemin, şebeke hattında yaşanacak

* Corresponding Author
e-posta : mcozkilic@gmail.com

bozukluklara rağmen, şebekeye adaptasyonunun gerçekleştirilmesi gerekmektedir. Daha da ileri gidilerek asimetrik gerilim çökme ve dalgalanmalarında, temel bileşenin pozitif ve negatif sıralarının belirlenmesi gerekmektedir. Bu tip adaptasyon için kapalı çevrim algılama yöntemleri kullanılarak değişken frekans ve genlik bilgisi elde edilir. En sık kullanılan frekans adaptasyon yöntemi, FKÇ (faz kilitlemeli çevrim) yöntemidir [1-2], [4-7].

Şebeke bağlantılı çeviricilerin, üretilmiş olan enerjii şebekeye aktarması sırasında gerilim algılaması için faz kilitlemeli çevrim kullanılmaktadır. FKÇ kullanımı ile temel gerilimin fazı ve genliği eşzamanlı olarak belirlenmekte ve dolayısıyla şebekeye verilebilecek aktif ve reaktif temel gücün kontrolü sağlanmaktadır. Reaktif güç bileşenin kontrolü ile şebeke de oluşan salınımların bastırılması ve harmoniklerin filtrelendirilmesi sağlanabilmektedir. Örneğin, şebeke frekans seviyesinde çalışma ile şebekede ihtiyaç duyulan reaktif güç kompanzasyonu sağlanması mümkün olabilir [2].

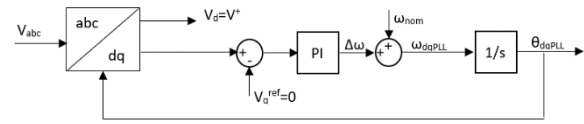
2. FAZ KİLİTLEMELİ ÇEVİRİM (FKÇ) YÖNTEMLERİ (PHASE LOCKED LOOP (PLL) METHODS)

Gerilim kontrollü osilatörlerin kullanıldığı donanım bazlı FKÇ tekniklerinin yanı sıra, yazılım bazlı senkron referans eksen FKÇ (SRE-FKÇ) yöntemleri de sıkça kullanılmaktadır. Şebeke kodları ile uyumlu olacak şekilde, SRE-FKÇ üzerine kurulmuş değişik tipte FKÇ teknikleri geliştirilmiştir. Bu metotlar, basit olarak, temel gerilimin pozitif ve negatif sıralarının çıkartılması için faz algılama sırasında ön filtreleme kullanımı ve genişletilmiş döngü filtresi kullanımına göre sınıflandırılmaktadırlar. İlk gruba giren FKÇ yöntemleri: dekuple senkron referans eksen FKÇ (DSRF-FKÇ), çoklu referans eksen FKÇ (ÇRE-FKÇ), pozitif sekans filtreli FKÇ (PSF-FKÇ), sinüzoidal sinyal entegrasyonlu FKÇ (SSI-FKÇ), geliştirilmiş karmaşık katsayı filtreli FKÇ (ECCF-FKÇ), geciktirilmiş işaret elemeli FKÇ (DSC-FKÇ) ve çift ikinci derece genelleştirilmiş entegrasyon FKÇ (DSOGI-FKÇ) şeklindedir [8-21].

İkinci gruba giren FKÇ yöntemleri ise, adapte edilmiş çentik filtreli FKÇ (ANF-FKÇ), adapte edilmemiş çentik filtreli FKÇ (NNF-FKÇ) ve ikinci derece kompanzasyonlu FKÇ (SOLC-FKÇ)'dir [7-22].

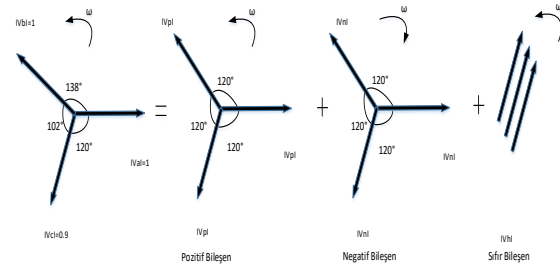
2.1. Senkron Referans Eksenli Faz Kilitlemeli Çevrim (SRE-FKÇ) (Senkron Reference Frame Phase Locked Loop (SRF-PLL))

Basit yapılı Senkron Referans Eksenli Faz Kilitlemeli Çevrim (SRE-FKÇ) için blok diyagramı Şekil 1'de gösterilmektedir. SRE- FKÇ yöntemi, dengeli şebeke yapıları için temel gerilimin frekans ve genliğini düzgün bir şekilde sağlamaktadır ancak dengesiz ve gürültülü bir şebeke yapısı için elde edilecek sonuçlar güvenilir olmamaktadır. Bunun nedeni ise dengesizlik yapan bileşenler ortadan kaldırılmadan faz ve frekans bilgisinin elde edilmeye çalışılmasıdır [8].



Şekil 1. SRE-FKÇ blok diyagramı (SRF-PLL block diagram)

Şekil 2' de üç fazlı dengesiz bir sistemdeki temel gerilim /akım ifadesinin bileşenlerine ayrılması görülmektedir.



Şekil 2. Üç fazlı dengesiz bir sistemdeki temel gerilim /akım ifadesinin bileşenlerine ayrılması (Fundamental components of voltage /current in a three phase unbalanced system)

Fortescue Teoremine göre, N elemanlı dengesiz fazörlerden oluşan bir küme, dengeli N adet simetrik fazör kümelerinin toplamı şeklinde ifade edilebilir. Bu teoreme göre Şekil 2' de görüldüğü gibi V_{abc} , pozitif ($\vec{V}_p = [V_{ap} \ V_{bp} \ V_{cp}]^T$), negatif ($\vec{V}_n = [V_{an} \ V_{bn} \ V_{cn}]^T$) ve sıfır (ya da aynı fazlı) ($\vec{V}_h = [V_{ah} \ V_{bh} \ V_{ch}]^T$) bileşenlere ayrılmaktadır. Pozitif bileşen normal döner eksen yönünde dönen bileşenleri, negatif bileşen zıt yönde dönen bileşenleri ve sıfır bileşenler ise faz bileşenleri arasında dönmeyen fakat yalnızca titreşen bileşenleri oluşturmaktadır. Pozitif bileşenler dışındaki diğer bileşenler fazlardaki dengesizliğin dolayısıyla da asimetrik hataların göstergesidir. Bu dengesizlik bileşenleri kullanılarak jeneratörlerdeki, trafolarındaki, rüzgar enerji sistemlerinin şebeke bağlantılarındaki ve iletim hatlarındaki hatalar algılanmaktadır. [4-7]

$|V_p|$, \vec{V}_p vektörünün genliği olduğundan yola çıkarak \vec{V}_{abc} aşağıdaki gibi ifade edilebilir.

$$\vec{V}_{abc} = \vec{V}_p + \vec{V}_n + \vec{V}_h \quad (1)$$

θ_{1p} , \vec{V}_p vektörünün anlık faz açısı, θ_{1p_n} ise faz açısının ilk değeridir. Benzer şekilde $|V_n|$, \vec{V}_n vektörünün genliği, θ_{1n} anlık faz açısıdır. Senkronizasyondaki amaç \vec{V}_p 'nin faz ve frekansını takip etmek ve θ_{1p} değerini bulmaktır. Bunun için \vec{V}_n , \vec{V}_h ve diğer harmoniklerin etkilerinin elenmesi gerekmektedir.

$$\vec{V}_{abc} = \begin{bmatrix} |V_p| \cos(\theta_p) \\ |V_p| \cos(\theta_p - 2\pi/3) \\ |V_p| \cos(\theta_p + 2\pi/3) \end{bmatrix} + \begin{bmatrix} |V_n| \cos(\theta_n) \\ |V_n| \cos(\theta_n + 2\pi/3) \\ |V_n| \cos(\theta_n - 2\pi/3) \end{bmatrix} + \vec{V}_h + f_{abc}(3\omega_1, 5\omega_1, \dots) \quad (2)$$

$$\theta_{1p} = \int \omega_1 dt + \theta_{1p0} = \theta_1 + \theta_{1p0} \quad (3)$$

$$\theta_{1n} = \int \omega_1 dt + \theta_{1n0} = \theta_1 + \theta_{1n0} \quad (4)$$

\vec{V}_{abc} 'nin bir an için \vec{V}_p ve \vec{V}_n vektörlerinden oluştuğunu varsayarak Clarke dönüşümü ve sonrasında da hem pozitif hem de negatif yönde θ_r açısı ile d/q dönüşümleri uygulanarak, $\theta_{1p0} = \theta_{1n0} = 0$ alındığında aşağıdaki ifadeler bulunur.

$$\vec{V}_{dq}^+ = |V_p| \begin{bmatrix} \cos(\theta_1 - \theta_r) \\ \sin(\theta_1 - \theta_r) \end{bmatrix} + |V_n| \begin{bmatrix} \cos(-\theta_1 - \theta_r) \\ \sin(-\theta_1 - \theta_r) \end{bmatrix} \quad (5)$$

$$\vec{V}_{dq}^- = |V_p| \begin{bmatrix} \cos(\theta_1 + \theta_r) \\ \sin(\theta_1 + \theta_r) \end{bmatrix} + |V_n| \begin{bmatrix} \cos(-\theta_1 + \theta_r) \\ \sin(-\theta_1 + \theta_r) \end{bmatrix} \quad (6)$$

$\theta_r \cong \theta_1$ olması durumunda,

$$\vec{V}_{dq}^+ = |V_p| \begin{bmatrix} 1 \\ 0 \end{bmatrix} + |V_n| \begin{bmatrix} \cos(-2\theta_1) \\ \sin(-2\theta_1) \end{bmatrix} \quad (7)$$

$$\vec{V}_{dq}^- = |V_p| \begin{bmatrix} \cos(2\theta_1) \\ \sin(2\theta_1) \end{bmatrix} + |V_n| \begin{bmatrix} 1 \\ 0 \end{bmatrix} \quad (8)$$

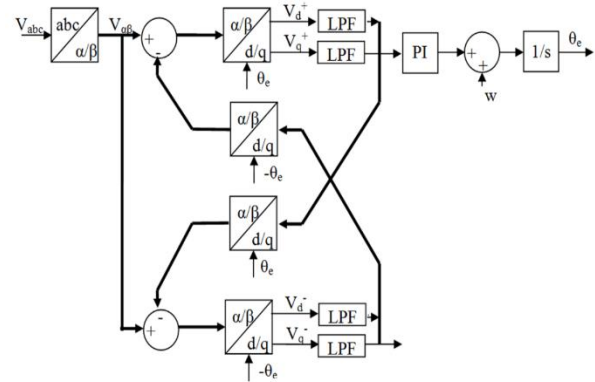
Denklemlerden de görüleceği üzere d/q dönüşümü alınmış negatif bileşen ve pozitif bileşen vektörleri sabit değerli bileşenlere ek olarak, eksenler ve vektörler arasındaki kuplaj dolayısıyla $2\theta_1 = 2\omega_1 t$ frekanslı salınım yapan bileşenleri de içermektedir. Bu kuplajı ortadan kaldırmak için alt geçiren filtre kullanımı mümkün olmakla birlikte sistem dinamiğini arttırmak için kuplajı ortadan kaldıracak bir ara yüz kullanılması gerekmektedir [8-13].

2.2. Çoklu Referans Eksen Faz Kilitlemeli Çevrim (ÇRE-FKÇ) (Multiple Reference Frame Phase Locked Loop (MRF-PLL))

SRE-FKÇ kullanımı ile dengeli şebeke gerilimi durumu söz konusu olduğunda faz kilitlenme başarıyla gerçekleşebilmektedir fakat dengesizlik olduğunda faz kilitlemeli çevrim çıkışında oluşan salınım dolayısıyla sistemin çalışmasında bozukluklar oluşabilmektedir [8].

Çoklu Referans Eksen Faz Kilitlemeli Çevrim (ÇRE-FKÇ) uygulamasında, pozitif ya da negatif yönde dönüşe bağlı olarak negatif ve pozitif bileşenlerden bağımsız hale gelebilmek için alt geçiren filtreler ve d/q ters dönüşüm matrisleri kullanılarak α/β eksenlerinde etkiler azaltılarak d/q dönüşümleri yapılmaktadır. Şekil 3'de

çoklu referans eksen FKÇ devre yapısının blok diagramı görülmektedir.



Şekil 3. Çoklu referans eksen FKÇ blok diyagramı (Block diagram of multiple reference frame PLL)

Çoklu referans eksen FKÇ kullanımı ile dengesiz gerilim girişi sebebiyle oluşan faz açısındaki salınımın üstesinden gelinemez fakat düşük maliyetli evirici tasarımlarına kolay adaptasyon mümkün olmamaktadır. Burada kullanılan alt geçiren filtre yapıları sayısal işaret işleyiciler kullanıldığı durumda FIR (sonlu girdili cevap) veya IIR (sonsuz girdili cevap) filtrelerle gerçekleştirilebilir. Bu tip filtrelerin gerçekleştirilebilmesi için yüksek hızlı ve kayan noktalı işaret işleyicilerin tercih edilmesi yaygın olarak görülmektedir. Kayan noktalı işaret işleyiciler hesaplama yoğunluğu yüksek ve geliştirme süreci görece olarak daha kısa ve az maliyetli uygulamalar için etkin olmaktadır. Sabit noktalı işaret işleyiciler/mikrokontrolörler ise hesaplama sürecinin uzunluğu ve sistem davranışının kontrol altına alınmasındaki zorluklar dolayısıyla geliştirme süreci uzun genel uygulamalar için tercih edilmektedir. Son ürün maliyeti açısından incelendiğinde ise, sabit noktalı işaret işleyicili/mikrokontrolörlü sistemler kayan noktalı sistemlere göre avantaj getirmektedir.

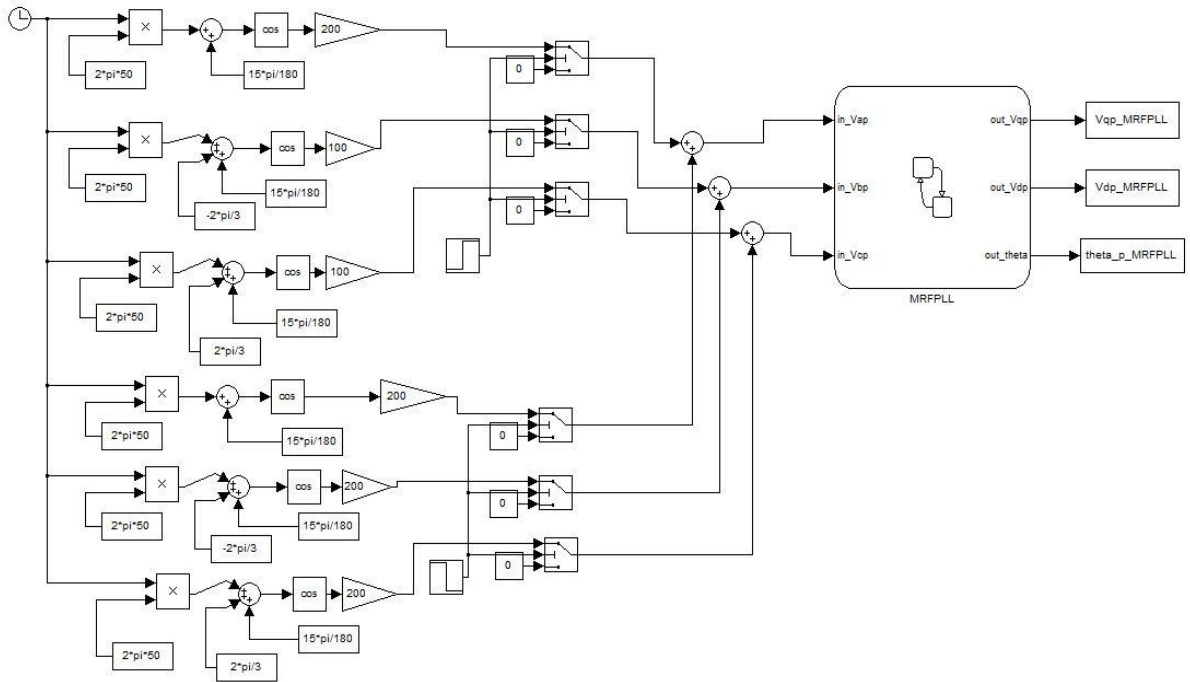
Bu avantaj dikkate alınarak, çoklu referans eksen FKÇ devresinin, sabit noktalı işaret işleyici/mikrokontrolör ile FIR ya da IIR tipi filtre gerektirmeden basit RC filtre yaklaşımı ile gerçekleştirilmesi hedeflenmiş ve bu amaçla benzetimi yapılacak sistemin sabit noktalı hesaplamaya uygun hale getirilmesi için sistemin gerçek sayılar yerine tam sayılar kullanılması için bir algoritma geliştirilip adaptasyonu sağlanmıştır. Bu tip bir algoritmada, kayan noktalı aritmetik kullanımı mümkündür ancak sistem maliyetine yük getirecek sayısal işaret işleyici yerine düşük sistem maliyet avantajı sağlayacak sabit noktalı işaret işleyici/ mikrokontrolör kullanımının önünü açabilecektir. Örneğin, 16 bit veri hattı ve 20MHz saat hızı olan mikrokontrolör tabanlı şebeke bağlantılı çevirici tasarımı mümkün hale gelebilecektir.

2.3. Senkron Referans Eksen Faz Kilitlemeli Çevrim (SRE-FKÇ) (Synchronous Reference Frame Phase Locked Loop (SRF-PLL))

SRE-FKÇ (Şekil-1) ve ÇRE-FKÇ (Şekil-3) blok diyagramları karşılaştırıldığında, ÇRE-FKÇ diğer yonteme göre ek olarak dört adet alt geçiren filtre bloğu, bir adet α/β -d/q ve iki adet d/q- α/β dönüşüm bloğu içermektedir. SRE-FKÇ'nin gerçek sayılar yerine tam sayılar kullanarak adaptasyonu ek bloklar çıkartılarak sağlanmıştır.

3. SRE-FKÇ VE ÇRE-FKÇ YÖNTEMLERİNİN KARŞILAŞTIRILMASI (COMPARISON BETWEEN SRF-PLL AND MRF-PLL METHODS)

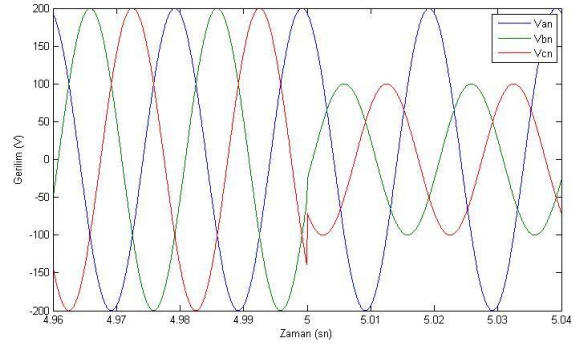
Giriş gerilimindeki dengesizliğin giderilmesi amacıyla, senkron referans eksenli (SRE) ve çoklu referans eksenli (ÇRE) iki farklı faz çevrim kilitleme algoritmasının karşılaştırması yapılarak, en uygun yöntem belirlenmeye çalışılmıştır. Şekil 4' de benzetim devresinin şeması görülmektedir. Sistemin örnekleme frekansı 20kHz olarak seçilmiştir. Bu frekans, IGBT yapılı şebeke bağlı eviriciler için yeterince yüksek olup, sabit noktalı işaret işleyici ile gerçekleştirilecek düşük maliyetli şebeke bağlı evirici için referans alınabilir.



Şekil 4. SRE-FKÇ ve ÇRE-FKÇ yöntemlerinin karşılaştırılması için tasarlanan benzetim devresi (Simulation circuit used for comparison of SRF-PLL and MRF-PLL)

Senkron referans eksen (Şekil 1) ve çoklu referans eksen (Şekil 3) FKÇ karşılaştırması uygulanan giriş geriliminde dengesizlik dikkate alınarak yapılmıştır.

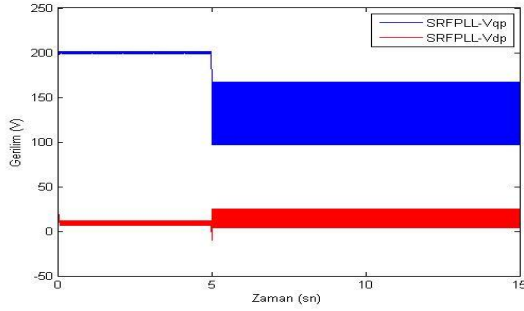
Şekil 5'de giriş geriliminde, 5. saniyede B ve C fazlarında dengesizlik oluştuğu görülmektedir.



Şekil 5. FKÇ devresinin girişine uygulanan faz gerilimleri (Phase voltages applied at the input of the PLL circuit)

Giriş gerilimindeki dengesizliğin giderilmesi amacıyla, senkron referans eksenli (SRE) ve çoklu referans eksenli (ÇRE) iki farklı faz çevrim kilitleme algoritmasının karşılaştırması yapılarak, en uygun yöntem belirlenmeye çalışılmıştır. Şekil 4' de benzetim devresinin şeması görülmektedir. Sistemin örnekleme frekansı 20kHz olarak seçilmiştir. Bu frekans, IGBT yapılı şebeke bağlı eviriciler için yeterince yüksek olup, sabit noktalı işaret

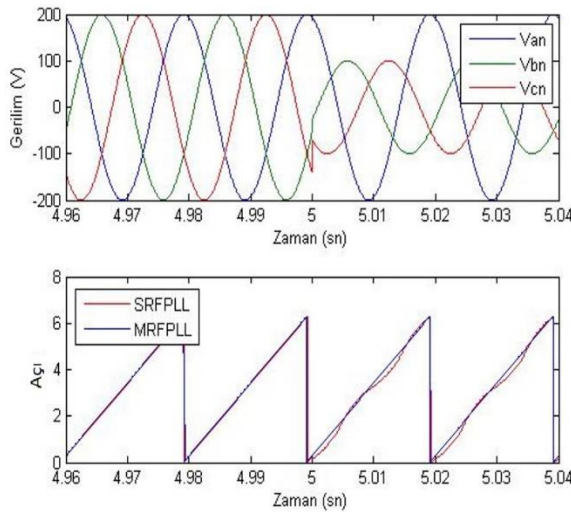
işleyici ile gerçekleştirilecek düşük maliyetli şebeke bağlı evirici için referans alınabilir.



Şekil 6. SRE-FKÇ için pozitif V_{dq} bileşenleri (V_{dq} components of SRF-PLL)

SRE-FKÇ ile, fazlardaki dengesizlik durumunda, V_d ve V_q döner eksen gerilimlerinin negatif bileşenleri dolayısıyla, V_d ve V_q döner eksen gerilimlerinin pozitif bileşenlerinde Şekil 6’ da görüldüğü gibi salınım meydana gelmiştir. Bu nedenle faz açısına kilitleme sağlıklı bir şekilde sağlanamamıştır. Faz açısı üstünde salınım varlığı gözlemlenmektedir.

ÇRE-FKÇ devresi, fazlardaki dengesizlik durumunda, alt geçiren filtre ve ayrıklaştırma devresi, hem pozitif bileşeni hem de negatif bileşeni ayırarak çıkışta temel frekansın 2 katı frekanslı bileşenleri bastırmıştır. Pozitif bileşenin, negatif bileşenden bağımsız hale gelmesinden dolayı, Şekil 7’ de görüldüğü gibi geçici rejim sonrası salınım oluşmadan faz kilitlemesi gerçekleşmiştir.



Şekil 8. Giriş faz bileşenlerindeki dengesizlik ve buna karşılık gelen SRE-FKÇ ile ÇRE-FKÇ faz açıları (Unbalanced voltage input and corresponding phase angles of SRF-PLL and MRF-PLL)

Şekil 8’de SRE-FKÇ ve ÇRE-FKÇ faz açılarındaki değişim fazlarda dengesizlik olduğu anda gösterilmektedir.

4. SONUÇLAR (CONCLUSIONS)

Çoklu referans eksen FKÇ devresinin, basit sabit noktalı işaret işleyici/mikrokontrolör için uygun yalnızca tam sayılar kullanılarak, RC filtreli yapı temel alınarak

adaptasyonu sağlanmıştır. 20kHz örnekleme frekansı seçilerek, aynı zamanda IGBT yapılı şebekeye bağlı eviriciler için de kullanılabilir, FKÇ benzetimi yapılmış ve bu benzetim sırasında dengesiz şebeke gerilimi giriş olarak uygulandığı durumda bile sistemin kararlı olarak faz kilitlemeyi başarı ile gerçekleştirdiği görülmüştür. Karşılaştırma amacıyla, aynı dengesiz şebeke gerilimi girişi için SRE-FKÇ benzetimi yapılmış ve ÇRE-FKÇ ile elde edilen faz bilgisinin üstünlüğü belirgin olarak ortaya konulmuştur. Benzetimi yapılan sistemin sabit noktalı hesaplamaya uygun hale getirilmesi amacıyla, gerçek sayılar yerine tam sayılar kullanılması için bir algoritma geliştirilip adaptasyonu sağlanmıştır. Bu algoritma ile sistem maliyetine yük getirecek sayısal işaret işleyici yerine düşük fiyat avantajı sağlayacak sabit noktalı işaret işleyici/ mikrokontrolör kullanımının önünü açabilecektir.

KAYNAKLAR (REFERENCES)

- [1] Kim Y., Kim K., Kwon B., Choi C, “A fast and robust PLL of MCFC PCS under unbalanced grid voltages”, *IEEE Power Electronics Specialists Conference*, Rodos, Greece, 4712 – 4716, (2008).
- [2] Lyons J.P., Vlatkovic V., “Power electronics and alternative energy generation” *IEEE Power Electronics Specialists Conference*, Aachen, Germany, 16 – 21, (2004).
- [3] Kaura V., Blasko V., “Operation of a phase locked loop system under distorted utility conditions” *IEEE Transactions on Industry Application*, 33(1): 58 – 63, (1997).
- [4] Chung I., Moon S., “A New Islanding Detection Method using Phase-Locked Loop for Inverter-Interfaced Distributed Generators”, *Journal of Electrical Engineering and Technology*, 2(2): 165 – 171, (2007).
- [5] Sim J., Kim K., Son R., Oh J., “Ride-through of PMSG Wind Power System Under the Distorted and Unbalanced Grid Voltage Dips”, *Journal of Electrical Engineering and Technology*, 7(6): 898- 904, (2012).
- [6] Lee W., Sung K., Lee T., “Fast Detection Algorithm for Voltage Sags and Swells Based on Delta Square Operation for a Single-Phase Inverter System”, *Journal of Electrical Engineering and Technology*, 11(1): 157- 176, (2016).
- [7] Hoffmann N., Lohde R., Fischer M., Fuchs F.W., Asiminoaci L., Thogersen P.B., “A review on fundamental grid-voltage detection methods under highly distorted conditions in distributed power-generation networks”, *IEEE Energy Conversion Congress and Exposition*, Phoenix, USA, 3045 – 3052, (2011).
- [8] Golestan S., Monfared M., Freijedo FD., “Design-Oriented Study of Advanced Synchronous Reference Frame Phase-Locked Loops”, *IEEE Transactions on Power Electronics*, 28(2): 765 – 778, (2013).
- [9] Zhang S., Chen J., Zhou W., “A Method for Electrical Network Voltage Compensation without PLL Based on Coordinate Transformation” *International Conference on Electrical Machines and Systems*, Wuhan, China, 2150 – 2153, (2008).

- [10] Hadjidemetriou L., Kyriakides E., Blaabjerg F., “A New Hybrid PLL for Interconnecting Renewable Energy Systems to the Grid” *IEEE Transactions on Industry Application*, 49(6): 2709 – 2719, (2013).
- [11] Xiong F., Yue W., Ming L., Ke W., Wnjun L., “A Novel PLL for Grid Synchronization of Power Electronic Converters in Unbalanced and Variable-Frequency Environment” *International Symposium on Power Electronics for Distributed Generation Systems*, Hefei, China, 466 – 471, (2010).
- [12] Rodriguez P., Pou J., Bergas J., Candela J.I., Burgos R.P., Boroyevich D., “Decoupled Double Synchronous Reference Frame PLL for Power Converters Control”, *IEEE Transactions on Power Electronics*, 22(2): 584 – 592, (2007).
- [13] Limongi L.R., Bojoi R., Pica C., Profum F., Tenconi A., “Analysis and Comparison of Phase Locked Loop Techniques for Grid Utility Applications”, *Power Conversion Conference*, Nagoya, Japan, 674 – 681, (2007).
- [14] Freijedo F.D., Doval-Gandoy J., Lopez O., Acha E., “A Generic Open Loop Algorithm for Three Phase Grid Voltage/Current Synchronization With Particular Reference to Phase, Frequency, and Amplitude Estimation”, *IEEE Transactions on Power Electronics*, 24(1): 94 – 107, (2009).
- [15] Gonzales O.L., Buja G., “Novel PLL Scheme for Grid Connection of Three-Phase Power converters”, *IEEE International Symposium on Diagnostics for Electric Machines, Power Electronics & Drives*, Bologna, Italy, 372 – 377, (2011).
- [16] Ghoshal A., John V., “Performance evaluation of three phase SRF-PLL and MAF-SRF-PLL”, *Turkish Journal of Electrical Engineering & Computer Sciences*, 23: 1781 – 1804, (2015).
- [17] Ramezani M., Golestan S., Shuhui L., Guerrero J.M., “A Simple Approach to Enhance the Performance of Complex-Coefficient Filter-Based PLL in Grid Connected Applications” *IEEE Transactions on Industrial Electronics*, 99: 1-6, (2017).
- [18] Guo X, Wu W, Chen Z. “Multiple-Complex Coefficient-Filter-Based Phased Locked Loop and Synchronization Technique for Three-Phase Grid-Interfaced Converters in Distributed Utility Networks”, *IEEE Transactions on Industrial Electronics*, 58(4): 1194 – 1204, (2011).
- [19] Rashed M., Klumpner C., Asher G., “Dynamic Phasor Analysis and Design of Phase Locked Loops for Single Phase Grid Connected Converters”, *Compel*, 34(4): 1122-1143, (2015).
- [20] Rodriguez P., Teodorescu R., Candela I., Timbus A.V., Liserre M., Blaabjerg F., “New Positive-sequence Voltage Detector for Grid Synchronization of Power Converters under Faulty Grid Conditions”, *IEEE Power Electronics Specialists Conference*, Jeju, South Korea, 1 – 7, (2006).
- [21] Chaoui H., Okoye O., Khayamy M., “Grid Synchronization Phase-Locked Loop Strategy for Unbalance and Harmonic Distortion Conditions”, *Journal of Control, Automation and Electrical Systems*, 27(4): 463–471, (2016).
- [22] Khazraj H., da Silva F.F., Bak C.L., Golestan S., “Analysis and Design of notch filter-based PLLs for Grid-Connected Applications”, *Electric Power Systems Research*, 147: 62-69, (2017).