



A novel current control strategy for grid connected renewable energy source inverters

Mehmet Emin Meral¹, Doğan Çelik*²

Department of Electrical and Electronics Engineering, Van Yuzuncu Yıl University, Van, 65080, Turkey

Highlights:

- The proposed fast and robust PNS extractor for reference current generation
- The improving dynamic performances of grid connected RESI by use of PCI controller
- The providing controllability of active-reactive power oscillations

Keywords:

- Renewable energy source inverter
- Proportional complex integrator
- PNS components
- Dual average filter based PLL

Article Info:

Research Article
Received: 26.11.2018
Accepted: 21.03.2019

DOI:

10.17341/gazimmfd.487745

Acknowledgement:

The authors are grateful to Scientific Research Foundation of Van Yuzuncu Yıl University (Van, Turkey) for financial support of this study (Project number: FBA-2017-6388).

Correspondence:

Author: Doğan Çelik
e-mail:
dogancelik@yyu.edu.tr
phone: +90 534 873 2815

Graphical/Tabular Abstract

Unbalanced grid voltages include positive and negative sequence (PNS) components. In particular, the negative sequence components that cause oscillations on the control signals, significantly affect the performance of the grid-connected renewable energy source inverters (RESI). In this study, proportional complex integrator (PCI) based current controller is proposed to deal with the disadvantages such as slow dynamic response, steady-state errors and complex structure of the proportional integral (PI) based dual current controller used for the control of grid connected RESI under non-ideal grid voltage conditions. The reference currents based on the active-reactive power reference signals, PNS components and the flexible control parameter are generated for use in control loops. The relationship between the active-reactive power oscillations, which are caused by non-ideal grid conditions, are comprehensively analysed and controlled with a flexible control parameter. An important contribution to similar previous studies is that the PNS voltage-current components required for the reference current generation are separated by the proposed fast and robust dual average filter based phase locked loop (DAPLL). The performance of the proposed PCI-based current control strategy is compared and tested with the PI-based dual current control strategy using various case studies.

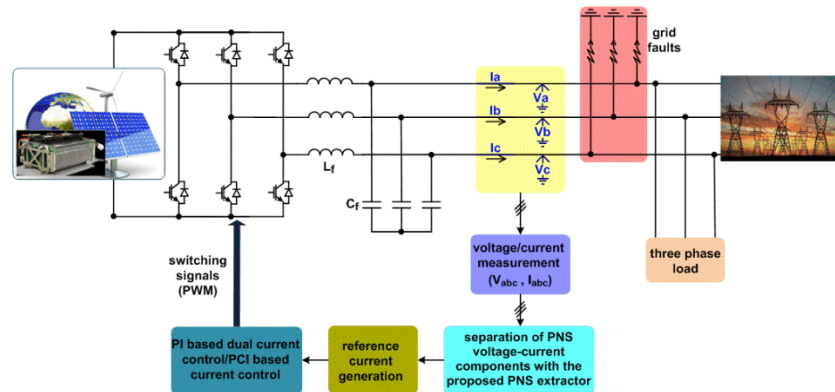


Figure A. General structure of the proposed system

Purpose: In this study, the PCI-based current controller is proposed to overcome the disadvantages such as slow dynamic response, steady-state errors and complex structure of the PI-based dual current controller for grid-connected inverter in non-ideal grid conditions. The main contributions of this study are; i) the proposed average filter-based PNS extractor which is fast, robust and not affected by harmonic components for reference current generation, ii) providing controllability of active and reactive power oscillations with a flexible control parameter, iii) the generation of reference currents both in SRF and STRF for using in control strategies and iv) improving dynamic performance and stability of grid-connected inverter by using the proposed PCI based control strategy.

Results:

The performance of the proposed PNS extractor, the PI-based dual-current controller and the PCI-based current controller for the control of the grid-dependent inverter has been tested and verified under various scenarios such as phase to phase grid faults, grid voltage harmonics and variation of flexible control parameter. The effectiveness and availability of proposed test system is verified by using PSCAD/EMTDC software. The proposed system is shown in Figure A.

Conclusion:

One of the important contributions of this study is the PNS voltage and current components required for use in the reference current generation with a novel PNS extractor, which is fast, robust and not affected by harmonic components. The results show that the proposed PCI-based current control strategy improves the dynamic response and stability of grid-connected RESI, minimizing current errors and harmonic components.



Şebekeye bağlı yenilenebilir enerji kaynaklı eviriciler için yeni bir akım kontrol stratejisi

Mehmet Emin Meral^{ID}, Doğan Çelik*^{ID}

Van Yüzüncü Yıl Üniversitesi, Mühendislik Fakültesi, Elektrik Elektronik Mühendisliği Bölümü, Tuşba Van, 65080, Türkiye

Ö N E Ç İ K A N L A R

- Referans akımını üretmek amacıyla hızlı ve sağlam bir PNS üretici önerilmesi
- PCI kontrolcü kullanılarak şebekeye bağlı YEKE'nin dinamik performansının iyileştirilmesi
- Aktif-reaktif güç salınımlarının kontrol edilebilirliğinin sağlanması

Makale Bilgileri

Araştırma Makalesi
Geliş: 26.11.2018
Kabul: 21.03.2019

DOI:

10.17341/gazimmfd.487745

Anahtar Kelimeler:

Yenilenebilir enerji kaynaklı evirici,
orsal kompleks integratör,
pozitif ve negatif sıralı bileşenler,
ikili ortalama filtre tabanlı PLL

ÖZET

Dengesiz şebeke gerilimleri pozitif ve negatif sıralı (PNS) bileşenleri içermektedir. Özellikle, kontrol sinyallerinin üzerindeki salınımlara sebep olan negatif sıralı bileşenler şebekeye bağlı yenilenebilir enerji kaynaklı eviricilerin (YEKE) performansını önemli derecede etkilemektedir. Bu çalışmada, ideal olmayan şebeke gerilim şartlarında şebekeye bağlı YEKE'nin kontrolü için kullanılan oransal integral (PI) tabanlı ikili akım kontrolcünün yavaş dinamik tepkisi, kararlı hal hataları ve kompleks yapısı gibi dezavantajlarının giderilmesi için oransal kompleks integratör (PCI) tabanlı akım kontrolcüsü önerilmiştir. Aktif-reaktif güç referans sinyali, PNS bileşenleri ve esnek kontrol parametresine dayanan referans akımlar, tüm kontrol döngülerinde kullanılmak üzere üretilmiştir. İdeal olmayan şebeke durumlarından kaynaklanan aktif ve reaktif güç salınımlarının bir biri ile olan ilişkileri ayrıntılı bir şekilde incelenip kontrol edilebilirlikleri esnek kontrol parametresi ile sağlanmıştır. Çalışmanın literatürdeki benzer çalışmalara kıyasla önemli bir katkısı, referans akım üretimi için gerekli PNS gerilim ve akım bileşenlerinin önerilen hızlı ve sağlam ikili ortalama filtre tabanlı faz kilitlemeli döngü (DAPLL) ile ayrılmasıdır. Önerilen PCI tabanlı akım kontrol stratejisinin performansı çeşitli durum çalışmaları kullanılarak PI tabanlı ikili akım kontrolcü ile karşılaştırılıp test edilmiştir.

A novel current control strategy for grid connected renewable energy source inverters

H I G H L I G H T S

- The proposed fast and robust PNS extractor for reference current generation
- The improving dynamic performances of grid connected RESI by use of PCI controller
- The providing controllability of active-reactive power oscillations

Article Info

Research Article
Received: 26.11.2018
Accepted: 21.03.2019

DOI:

10.17341/gazimmfd.487745

Keywords:

Renewable energy source inverter,
proportional complex integrator,
positive and negative sequence components,
dual average filter based PLL

ABSTRACT

Unbalanced grid voltages include positive and negative sequence (PNS) components. In particular, the negative sequence components that cause oscillations on the control signals, significantly affect the performance of the grid-connected renewable energy source inverters (RESI). In this study, proportional complex integrator (PCI) based current controller is proposed to deal with the disadvantages such as slow dynamic response, steady-state errors and complex structure of the proportional integral (PI) based dual current controller used for the control of grid connected RESI under non-ideal grid voltage conditions. The reference currents based on the active-reactive power reference signals, PNS components and the flexible control parameter are generated for use in control loops. The relationship between the active and reactive power oscillations, which are caused by non-ideal grid conditions, are comprehensively analysed and controlled with a flexible control parameter. An important contribution to similar previous studies is that the PNS voltage and current components required for the reference current generation are separated by the proposed fast and robust dual average filter based phase locked loop (DAPLL). The performance of the proposed PCI-based current control strategy is compared and tested with the PI-based dual current control strategy using various case studies.

*Sorumlu Yazar/Corresponding Author: emeral@yyu.edu.tr, dogancelik@yyu.edu.tr / Tel: +90 534 873 2815

1. GİRİŞ (INTRODUCTION)

Son yıllarda, yenilenebilir enerji kaynakları (YEK) tabanlı dağıtılmış üretim (DÜ) sistemleri, artan enerji talebi ve klasik güç üretim sistemlerinden kaynaklanan çevre kirliliğinin azaltılması için hızlı bir şekilde büyümektedir. DÜ sistemleri şebekeye bağlı ya da şebekeden bağımsız olarak çalışabilmektedir. Genel olarak, şebekeye bağlı DÜ sistemlerinde akım kontrollü ya da gerilim kaynaklı eviriciler kullanılır. Bu yüzden yüksek güç kalitesi için şebekeye bağlı eviriciler için hızlı ve uygun kontrol metodlarına ihtiyaç duyulmaktadır [1, 2]. Şebekeye paralel bağlı üç fazlı eviricinin akım regülasyonu için yaygın olarak klasik oransal integral (PI) kullanılır. Ancak, akım regülasyonunun kararlı hal durum hatasını tamamen ortadan kaldırmamaktadır. Özellikle, dengesiz şebeke arızaları; yüksek kayıplara, DA bağlantı kondansatörünün ve güç dönüştürücüsünün ömrünü etkileyen güç salınımlarına, aşırı akım olayına, DA bağdaki gerilim değişimlerine ve yenilenebilir enerji kaynaklı eviricilerin (YEKE) daha düşük kararlılıkları gibi çeşitli olumsuz etkilere neden olmaktadır. Bu yüzden, şebekeye ve yüklere enjekte edilen gücü düzenlemek için pozitif ve negatif sıralı (PNS) gerilim bileşenlerinin kontrol edilmesi gerekir [3].

Literatürde birçok çalışmada, PNS tabanlı çeşitli kontrol algoritmaları ile şebeke ve DÜ sisteminin ara yüzü olan üç fazlı eviricinin kontrolü sağlanmıştır. Şebekeye bağlı tek fazlı eviricinin kontrolü için oransal rezonans (PR) kontrol algoritması önerilmiş ve sistemin senkronizasyonu yeni tek faz kilitlemeli döngüler (PLL) ile sağlanmıştır [4]. Diğer bir çalışmada, ideal olmayan şebeke durumları için, akım sınırlamasını sağlayan üç fazlı şebekeye bağlı fotovoltaik eviricinin kontrolü ayarlanabilen referans akımı ile yapılarak aktif ve reaktif güç üzerindeki salınımlar (oscillations) ortadan kaldırılmıştır [5]. dq dönüşüm tabanlı oransal PI kontrolcü ve PR tabanlı kontrolcünün performansı şebekeye bağlı YEKE'nin kontrolü üzerinde denenmiştir [6]. Yapılan bu çalışmada, PR kontrolcü harmonik bileşenler açısından daha iyi performans sağladığı görülmüştür. Başka bir çalışmada, üç fazlı eviricinin kontrolünü sağlayan geleneksel aktif ve reaktif kontrolcü ve düşüm (droop) kontrolcünün performansları DÜ sistemlerinde karşılaştırılıp gerçekleştirilmiştir. Düşüm kontrolcünün daha güvenilir ve yüksek hızda cevap verdiği gözlemlenmiştir [7]. Diğer bir çalışmada ise PI ve PR kontrolcülerini karşılaştırmalı çalışma yapılmıştır. Ancak, şebeke arızaları durumunda kontrolcülerin performansı hakkında bir tartışma sunulmamıştır [8]. Bununla birlikte, dengesiz şebeke gerilimleri altında, şebekeye bağlı fotovoltaik enerji santralinin kontrolü için PI tabanlı ikili akım (dual current) kontrol stratejisi ve PR tabanlı akım kontrol stratejisi arasında karşılaştırmalı bir analiz sunulmuştur, ancak bu çalışmada, aktif ve reaktif güç salınımlarının kontrol edilebilirliği tartışılmamıştır [9]. Ayrıca, harmoniklerin kontrolcüler üzerinde etkisi incelenmemiş olup daha yavaş bir PNS üreticisi kullanılmıştır. PI tabanlı ikili akım kontrol

stratejisi ile aktif ve reaktif güç salınımlarının kontrol edilebilirliği sağlanmıştır. Bununla birlikte, PNS sıralı bileşenlerinin ayrıştırılmasında kullanılan ayrılmış ikili senkron referans çatı (DDSRF) metodu zaman gecikmesine ve eviricinin kararsız olmasına da sebep olmaktadır [10, 11] çalışmasında, senkron referans çatı (SRF) ekseninde negatif sıralı bileşenler enjekte edilmeden dengesiz şebeke durumlarının etkisi ortadan kaldırılmıştır, ancak dinamik cevap ve kararlı durum hatası halen çözülememiştir. [12, 13] çalışmalarında, geleneksel PI ve PR kontrolcülerinin kararlı hal hataları ve yavaş dinamik tepkileri gibi dezavantajlarını ortadan kaldırmak için oransal kompleks integral (PCI) kontrolcü önerilmiştir. Ancak, şimdiye kadar PCI tabanlı akım kontrolünü dengesiz şebeke gerilimi durumunda inceleyen herhangi bir çalışmaya rastlanmamıştır.

Durağan referans çatıda (STRF) ve SRF'de referans akımın üretmesinde rol oynayan hızlı ve doğru PNS bileşenler özellikle ideal olmayan şebeke durumları şartlarında evirici kontrolünde önemli rol oynamaktadır. Akım kontrolcülerinin giriş sinyallerini oluşturan referans akım sinyalleri üretimi için birçok yazar çeşitli PLL tabanlı PNS üreticilerini önermiştir [14-21]. İkili SOGI (DSOGI) [14], sinyal gecikmesi önleme tabanlı PLL (DSC) [15], ikili senkron referans çatı (DSRF) ya da DDSRF [16, 17] gibi PNS akım/gerilim bileşenleri üretmek için sunulmuştur. Ancak bu metodlar, zaman gecikmeleri, harmonik bileşenlerden etkilenmeleri ve kompleks yapılarından dolayı sıkıntı çekmektedirler. Son zamanlarda, yeni yaklaşımlardan biri çoklu kompleks katsayı filtresi (MCCF) [18] ve diğer ise üçüncü dereceden sinüzoidal integratör (TOSSI)'dir [19]. Bu iki PNS üreticisi hızlı ve güvenilir bir şekilde PNS bileşenlerinin elde edilmesini sağlar. Ancak, gerilim harmoniklerinin etkisi, birçok alt modül içermeleri, DC offset ve hesaplama yükleri gibi problemler halen çözülememiştir.

Bu çalışmada, ideal olmayan şebeke şartlarında şebekeye bağlı YEKE kontrolü için PI tabanlı ikili akım kontrol stratejisinin yavaş dinamik tepkisi, kararlı hal hataları ve kompleks yapısı gibi dezavantajlarının üstesinden gelmek için PCI tabanlı akım kontrol stratejisi önerilmiştir. PI tabanlı ikili akım kontrol stratejisinin ve PCI akım kontrol stratejisinin performansları, dengesiz şebeke arızaları, şebeke gerilim harmonikleri ve esnek kontrol parametresinin etkisi gibi çeşitli durum çalışmaları koşullarında incelenmiş ve karşılaştırılmıştır. Bu çalışmanın literatüre ana katkıları; i) referans akımı üretimi için hızlı, sağlam ve harmonik bileşenlerinden etkilenmeyen yeni bir ikili ortalama filtre tabanlı PNS üreticisinin önerilmesi, ii) aktif ve reaktif güç salınımlarının kontrol edilebilirlikleri esnek kontrol parametresi ile sağlanması, iii) kontrol stratejilerinin kullanılmak üzere gerekli referans akımlar, hem SRF ve hem de STRF üretilmesi ve iv) önerilen PCI tabanlı akım kontrol stratejisi kullanılarak şebekeye bağlı YEKE'nin dinamik performansını ve kararlılığını iyileştirmesi şeklinde sıralanabilir. Önerilen PNS üreticinin ve kontrol stratejilerinin performansları PSCAD/EMTDC programı kullanılarak test edilmiştir.

2. ÖNERİLEN SİSTEMİN YAPISI (THE PROPOSED SYSTEM STRUCTURE)

Bu çalışmanın temel amacı, dengesiz şebeke gerilimi durumunda SRF'de ve STRF'de referans akımı elde etmek için yeni bir PNS üreticini önermek ve bu referans akım PI tabanlı ikili akım kontrolcüsü ve PCI akım kontrolcüsünde kullanarak YEKE'nin kontrollünü sağlamaktır. Şekil 1'de gösterildiği gibi, önerilen sistem, üç fazlı evirici, kontrol blokları, üç fazlı elektrik şebekesi ve evirici anahtarlama sinyallerinin neden olduğu harmonik bileşenleri azaltan LC filtreden oluşmaktadır.

3. REFERANS AKIMI ÜRETİMİ İÇİN ÖNERİLEN PNS ÜRETİCİSİ (THE PROPOSED PNS EXTRACTOR FOR REFERENCE CURRENT GENERATION)

Önerilen ikili ortalama filtresi tabanlı PLL (DAPLL) uyarlanırcı çentik filtresi yapısında iki ortalama filtrelili tabanlı PLL'den meydana gelir. APLL'in yapısı FFT'in yapısal özelliklerine benzer. Ancak, APLL düşük ve yüksek seviyeli harmonik bileşenlerini ve PNS bileşenlerini üretmek için daha hızlı dinamik cevaba ve basit bir uygulamaya sahiptir [22, 23]. Bu çalışmanın katkılarından biri diğeri de, geliştirilmiş APLL'çikış sinyali ($V_p^+ + V_p^-$) ile negatif geri beleme yapılarak bir periyot zaman kadar sistemin dinamik cevabı hızlandırılmasıdır (Şekil 2a).

Önerilen APLL'in literatürde bulunan TOSSI, MCCF ve DSOGI gibi PNS üreticilerden farklı kılan en önemli özellikleri kısa zamanlı senkronizasyonu, düşük ve yüksek harmonik bileşenlerden etkilenmemesi ve DC ofset gerilimini ortadan kaldırmasıdır. Bu çalışmanın en önemli yeniliklerinden biri de, durağan ya da senkron çatıda PNS bileşenlerinin referans akım üretimi için elde edilmesi ve gerilim düşümü/yükselmesi tespitinde kullanılmasıdır. Geliştirilmiş APLL'in tek fazlı ve/veya üç fazlı sistemlerde kullanımı ve PNS akım/gerilim bileşenlerinin elde edilmesini gösteren şematik yapısı Şekil 2a, 2b ve 2c'de gösterilmiştir. Önerilen PNS üreticisi aşağıda verilen

eşitliklerle detaylı bir şekilde analiz edilmiştir. Önerilen DAPLL aralarında 90° faz farkı olan V_α ve $V_{\alpha'}$ 'yi üretir. Eş. 1'de verilen şebeke gerilimi $V_{p+h}(t)$ temel gerilim $V_p(t)$ ve harmonik gerilimlerini içerir. Harmonik gerilimin faz açısı ϕ_h ile temsil edilmiştir [22].

$$V_{p+h}(t) = V_p \sin(\omega t + \phi) + \sum_{n=2}^{\infty} V_n \sin(n\omega t + \phi_n) \quad (1)$$

ω sistemin temel frekansdır. Giriş gerilimi $V_p(t)$, pozitif $V_{p+}(t)$ ve negatif $V_{p-}(t)$ bileşenlerden oluşur. Giriş temel gerilimi ile PNS sinyalleri arasındaki ilişki Eş. 2'de verilmiştir.

$$V_p(t) = V_{p+}(t) + V_{p-}(t) \quad (2)$$

Geliştirilmiş APLL'in algoritması kapalı döngü yapısındadır. Geri besleme sinyali, PNS bileşenlerden ve kararlı durum hatasının toplamından oluşur.

$$F(t) = e(t) + V_{p+}(t) + V_{p-}(t) \quad (3)$$

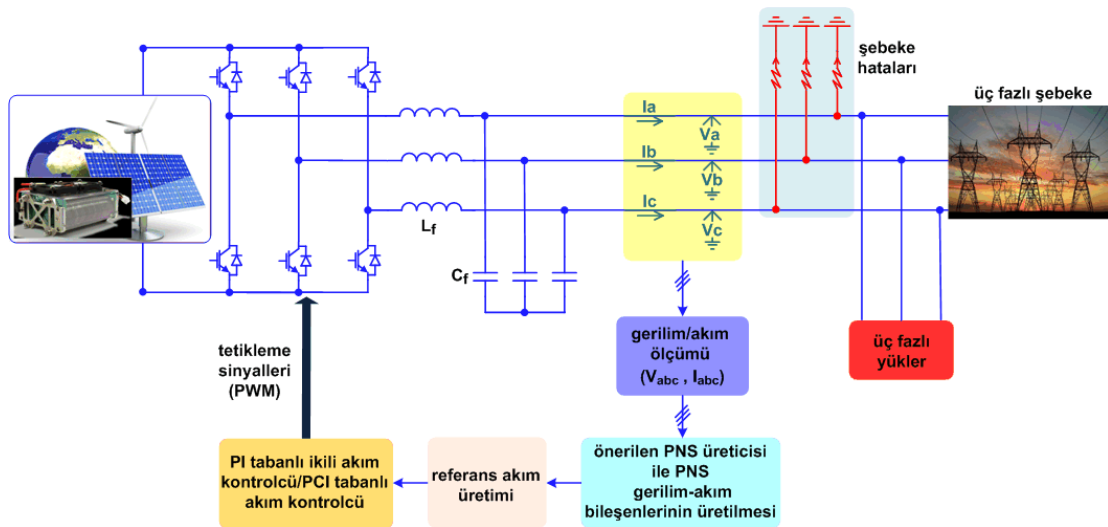
PNS geriliminin genlikleri Eş. 4 ve Eş. 5'de verilmiştir.

$$|V_{Apl+}| = \frac{1}{T} \int_0^T C(t) F(t) dt = \frac{1}{T} \int_0^T \cos(h\phi(t)) F(t) dt = V_h \sin(\phi_h) \quad (4)$$

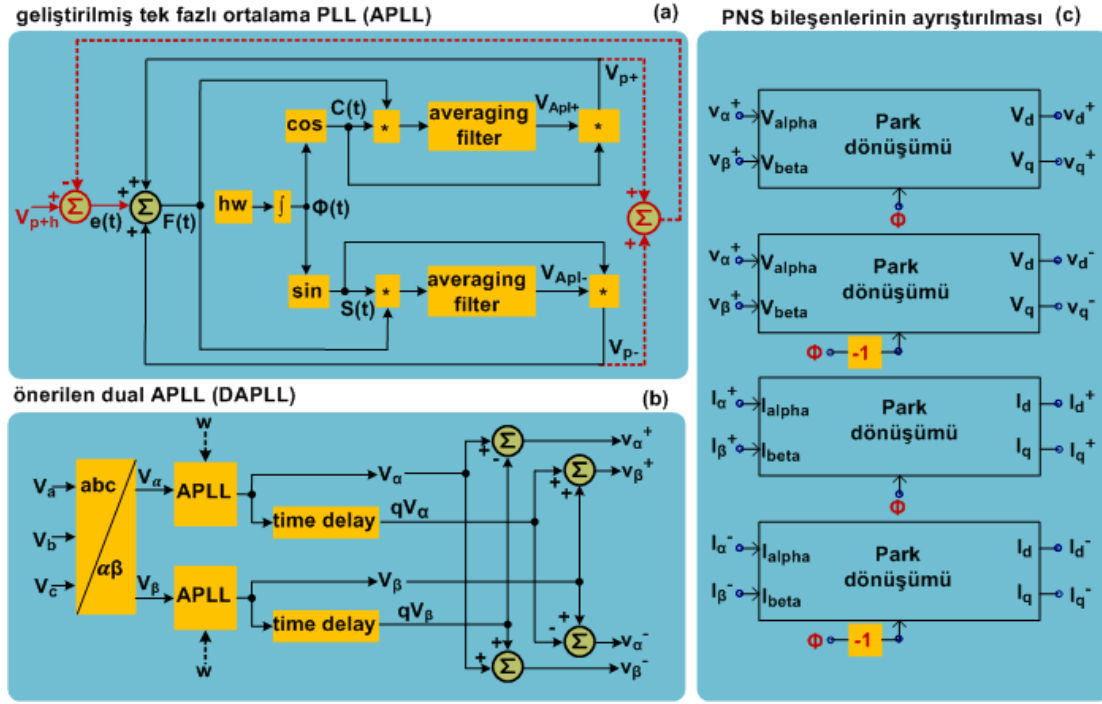
$$|V_{Apl-}| = \frac{1}{T} \int_0^T S(t) F(t) dt = \frac{1}{T} \int_0^T \sin(h\phi(t)) F(t) dt = V_h \cos(\phi_h) \quad (5)$$

Sinüs ve kosinüs terimlerini $S(t)$ ve $C(t)$ temsil eder. Aynı zamanda, her harmonik bileşen için giriş sinyalinin faz açısı ϕ 'dir. h harmonik bileşenlerinin numarası olup, giriş sinyaline istenilen harmonik bileşeni eklenebilir.

$$\phi = \tan^{-1} \left(\frac{|V_{Apl+}|}{|V_{Apl-}|} \right) \quad (6)$$



Şekil 1. Önerilen sistemin genel yapısı (General structure of the proposed system)



Şekil 2. Geliştirilmiş APLL'in a) tek fazlı sistemlerde kullanımı b) üç fazlı sistemlerde kullanımı ve c) PNS akım/gerilim bileşenlerini üretmesi

(Using improved APLL (a) in single-phase systems (b) in three-phase systems and (c) for separation of PNS current/voltage components)

Giriş gerilimin PNS sinyalleri ve genlikleri Eş. 7 ve Eş. 8'de türetilmiştir.

$$V_{p+}(t) = |V_{Ap+}|C(t) = |V_{Ap+}| \cos(\omega t) \sin(\phi) \quad (7)$$

$$V_{p-}(t) = |V_{Ap-}|S(t) = |V_{Ap-}| \cos(\omega t + \phi) \quad (8)$$

PNS gerilim bileşenleri STRF ekseninde elde edilip ayrıca SRF ekseninde de Eş. 9 ile verilmiştir.

$$\begin{bmatrix} V_{\alpha}^+ = V_{\alpha} - qV_{\beta} \\ V_{\beta}^+ = qV_{\alpha} + V_{\beta} \\ V_{\alpha}^- = V_{\alpha} + qV_{\beta} \\ V_{\beta}^- = -qV_{\alpha} + V_{\beta} \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} v^+ \sin(\omega t + \phi_p) \\ -v^+ \cos(\omega t + \phi_p) \\ v^- \sin(\omega t + \phi_n) \\ v^- \cos(\omega t + \phi_n) \end{bmatrix} \quad (9)$$

Pozitif faz açısı ϕ_p , ϕ 'ya ve negatif faz açısı ϕ_n ise $-\phi$ 'ya eşittir. Önerilen DAPLL'den elde edilen PNS gerilim bileşenleri Eş. 11 ve Eş 12'de STRF ekseninden SRF eksenine dönüştürülmüştür.

$$\begin{bmatrix} v_d^+ \\ v_q^+ \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} \cos(\omega t + \phi_p) & \sin(\omega t + \phi_p) \\ -\sin(\omega t + \phi_p) & \cos(\omega t + \phi_p) \end{bmatrix} \begin{bmatrix} V_{\alpha}^+ \\ V_{\beta}^+ \end{bmatrix} \quad (10)$$

$$\begin{bmatrix} v_d^- \\ v_q^- \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} \cos(\omega t + \phi_n) & -\sin(\omega t + \phi_n) \\ \sin(\omega t + \phi_n) & \cos(\omega t + \phi_n) \end{bmatrix} \begin{bmatrix} V_{\alpha}^- \\ V_{\beta}^- \end{bmatrix} \quad (11)$$

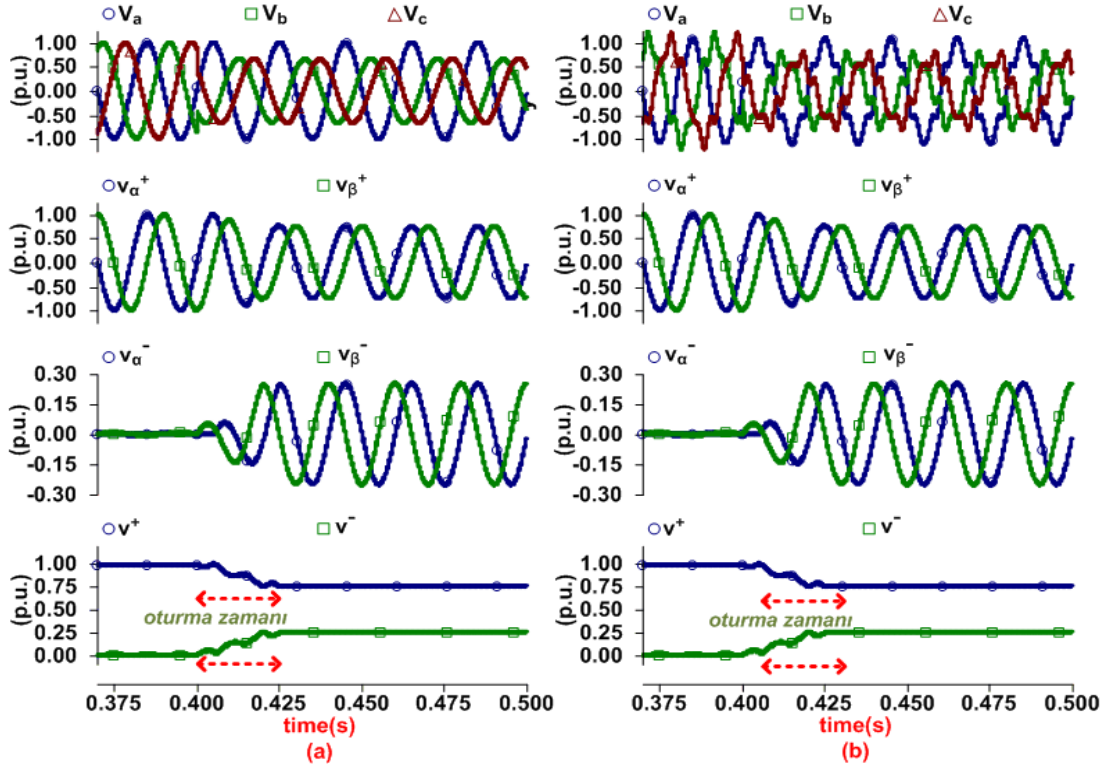
V_{dq+} ve V_{dq-} ortogonal PNS gerilim bileşenleridir. PNS ortogonal gerilim sinyalleri arasındaki ilişki Eş. 12'de verilmiştir.

$$\begin{aligned} v^+ &= v_d^+ + jv_q^+ \\ v^- &= v_d^- + jv_q^- \end{aligned} \quad (12)$$

v_d ve v_q ortogonal gerilim bileşenleri, v^+ ve v^- ise sırasıyla pozitif ve negatif gerilim bileşenlerini temsil eder. Önerilen PNS üreticisinin performansını doğrulamak için, faz-faz şebeke gerilimi arızası ve 5. ve 7. gerilim harmonikleri üç fazlı elektrik şebekesine uygulanmıştır (Şekil 3). 0,4s'de, B ve C faz gerilim değerleri, nominal değerlerinin %65'ine düşürülerek şebeke gerilimlerine faz-faz arızası uygulanmaktadır. Önerilen DAPLL PNS bileşenlerini ve harmonik bileşenlerini ayırmaktadır. PNS bileşenleri önerilen DAPLL'den hızlı tespit edilip ve neredeyse harmoniklerden hiç etkilenmemektedir. Literatürdeki mevcut yöntemlere kıyasla hızlı geçici yanıt (yaklaşık 20ms) sergilemektedir (Şekil 5a ve 5b). Elde edilen hızlı ve güvenilir PNS bileşenler dengesiz şebeke koşulları altında referans akımını üretmek üzere kullanılmaktadır.

4. REFERANS AKIM ÜRETİM İŞLEMİ (REFERENCE CURRENT GENERATION PROCESS)

Geleneksel referans akım üretimi sadece pozitif sıralı bileşenlerini içermektedir. Dengesiz şebeke gerilimleri ve harmonikli şebeke gerilimleri durumunda, negatif sıralı bileşenler sinüzoidal olmayan referans akımlara neden olup kontrol sinyallerinde salınımlara neden olmaktadır. Bu nedenle, negatif sıralı bileşenler kontrol edilerek, çift frekanslı güç salınımlarını ortadan kaldırmak için kullanılır [24]. Genel olarak, anlık güç teoremi SRF ya da STRF



Şekil 3. Önerilen PNS üreticinin a) faz-faz şebeke arızası ve b) hem faz-faz şebeke arızası hem de şebeke harmonikleri koşulları altında performansı (The performance evaluation of the proposed PNS extractor (a) under phase-to-phase grid faults and (b) under both phase-to-phase grid faults and grid voltage harmonics)

ekseninde ifade edilebilir. Şebekeye bağlı YEKE için enjekte edilen aktif ve reaktif güçler P, Q Eş. 13'de verilmiştir [24].

$$P = v \cdot i = v_a i_a + v_b i_b + v_c i_c$$

$$Q = v_{\perp} \cdot i = \frac{1}{\sqrt{3}} [(v_b - v_c) i_a + (v_c - v_a) i_b + (v_a - v_b) i_c] \quad (13)$$

PNS bileşenleri tabanlı üç fazlı sinyaller matris formunda aşağıda yazılmıştır.

$$v = \begin{bmatrix} v^+ \sin(\theta^+) + v^- \sin(\theta^-) \\ v^+ \sin(\theta^+ - 2\pi/3) + v^- \sin(\theta^- - 2\pi/3) \\ v^+ \sin(\theta^+ + 2\pi/3) + v^- \sin(\theta^- + 2\pi/3) \end{bmatrix} \quad (14)$$

$$v_{\perp} = \frac{1}{\sqrt{3}} \begin{bmatrix} 0 & 1 & -1 \\ -1 & 0 & 1 \\ 1 & -1 & 0 \end{bmatrix} v \quad (15)$$

" \perp " matris dönüşümden türetilen bir vektörü belirtir. v ve v_{\perp} birbirine diktir. Aktif ve reaktif gücün anlık hesaplamaları PNS akım ve gerilim bileşenlerine bağlı olarak aşağıdaki gibi yeniden düzenlenmiştir.

$$p = (v^+ + v^-) \cdot (i_p^+ + i_q^+ + i_p^- + i_q^-)$$

$$q = (v_{\perp}^+ + v_{\perp}^-) \cdot (i_p^+ + i_q^+ + i_p^- + i_q^-) \quad (16)$$

SRF ve STRF'de referans akımı üretimi, enjekte edilen aktif-reaktif güçler ve aktif-reaktif güç sınımlarının birbiri ile

olan analitik ilişkileri aşağıdaki alt bölümlerde ayrıntılı bir şekilde açıklanmıştır.

4.1. Senkron referans çatıda referans akımı üretimi (Reference current generation in synchronous reference frame-SRF)

SRF tabanlı kontrol uygulamaları için güç sınımlarının kontrol edilebilirliği, aktif ve reaktif güç sınımlarının tayini için kullanılan ayarlanabilir kontrol parametresi ile sağlanır. Bu bölümde, SRF'de aktif ve reaktif güç sinyalleri ve sınımlarının birbiri ile olan ilişkileri aşağıda verildiği gibi analiz edilip formüle edilmiştir [10, 25].

$$\begin{bmatrix} P \\ Q \\ P_s \\ P_c \\ Q_s \\ Q_c \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} +v_d^+ & +v_q^+ & +v_d^- & +v_q^- \\ +v_q^+ & -v_d^+ & +v_q^- & -v_d^- \\ +v_d^- & +v_q^- & +v_d^+ & +v_q^+ \\ +v_q^- & -v_d^- & -v_q^+ & +v_d^+ \\ +v_q^+ & -v_d^+ & +v_q^- & -v_d^- \\ -v_d^- & -v_q^- & +v_d^+ & +v_q^+ \end{bmatrix} \begin{bmatrix} I_d^+ \\ I_q^+ \\ I_d^- \\ I_q^- \end{bmatrix} \quad (17)$$

Aktif P_s ve P_c , ve reaktif güç Q_s ve Q_c sınımlarının genliklerini temsil etmektedir. P_s ve Q_s $\sin(2\omega t)$ terimi ile ilgili iken ve P_c ve Q_c , $\cos(2\omega t)$ terimi ile ilgilidir. Enjekte edilen güçler P ve Q referans güçlerin P_{ref} ve Q_{ref} değerlerine ayarlandığına, önerilen DAPLL tabanlı pozitif ve negatif referans akım bileşenleri aşağıdaki gibi yazılabilir.

$$\begin{bmatrix} I_{dref}^+ \\ I_{qref}^+ \\ I_{dref}^- \\ I_{qref}^- \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} +v_d^+ & +v_q^+ & +v_d^- & +v_q^- \\ +v_q^+ & -v_d^+ & +v_q^- & -v_d^- \\ +v_d^- & +v_q^- & +v_d^+ & +v_q^+ \\ +v_q^- & -v_d^- & -v_q^+ & +v_d^+ \\ +v_q^+ & -v_d^+ & +v_q^- & -v_d^- \\ -v_d^- & -v_q^- & +v_d^+ & +v_q^+ \end{bmatrix}^{-1} \begin{bmatrix} P_{ref} \\ Q_{ref} \\ P_s \\ P_c \\ Q_s \\ Q_c \end{bmatrix} \quad (18)$$

Yalnızca aktif güç salınımının kontrolü, Eş. 25'de son iki satırın silinmesi ile kontrol edilebilir.

$$\begin{bmatrix} I_{dref}^+ \\ I_{qref}^+ \\ I_{dref}^- \\ I_{qref}^- \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} +v_d^+ & +v_q^+ & +v_d^- & +v_q^- \\ +v_q^+ & -v_d^+ & +v_q^- & -v_d^- \\ +v_d^- & +v_q^- & +v_d^+ & +v_q^+ \\ +v_q^- & -v_d^- & -v_q^+ & +v_d^+ \end{bmatrix}^{-1} \begin{bmatrix} P_{ref} \\ Q_{ref} \\ 0 \\ 0 \end{bmatrix} \quad (19)$$

Maksimum aktif güç enjekte etmek için P_{ref} ve Q_{ref} olarak adlandırılan aktif ve reaktif güç referansları, $P_{ref} = 1$ p.u. ve $Q_{ref} = 0$ olarak sabit güç değerlerine ayarlanmaktadır.

$$\begin{bmatrix} I_{dref}^+ \\ I_{qref}^+ \\ I_{dref}^- \\ I_{qref}^- \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} +v_d^+/M & +v_q^+/N \\ +v_q^+/M & -v_d^+/N \\ -v_d^-/M & +v_q^-/N \\ -v_q^-/M & -v_d^-/N \end{bmatrix} \begin{bmatrix} P_{ref} \\ Q_{ref} \end{bmatrix} \quad (20)$$

M ve N aşağıda verilmiştir.

$$\begin{aligned} M &= (v_d^+)^2 + (v_q^+)^2 - (v_d^-)^2 - (v_q^-)^2 \\ N &= (v_d^+)^2 + (v_q^+)^2 + (v_d^-)^2 + (v_q^-)^2 \end{aligned} \quad (21)$$

Salınım olmadan aktif güç enjekte etmek için reaktif güç sinyali salınım taşınması gerekmektedir. Reaktif güç salınımlarının genlikleri aşağıdaki gibi yazılmıştır.

$$\begin{bmatrix} Q_s \\ Q_c \end{bmatrix} = 2 \begin{bmatrix} \frac{v_d^- v_q^- - v_d^+ v_q^+}{M} & \frac{v_d^- v_d^+ + v_q^- v_q^+}{N} \\ -\frac{v_d^- v_d^+ + v_q^- v_q^+}{M} & \frac{v_d^- v_q^- - v_d^+ v_q^+}{N} \end{bmatrix} \begin{bmatrix} P_{ref} \\ Q_{ref} \end{bmatrix} \quad (22)$$

Benzer şekilde, yalnızca reaktif güç salınımının kontrolü, Eş. 25'de ortadaki satırın silinmesi ile kontrol edilebilir.

$$\begin{bmatrix} I_{dref}^+ \\ I_{qref}^+ \\ I_{dref}^- \\ I_{qref}^- \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} +v_d^+ & +v_q^+ & +v_d^- & +v_q^- \\ +v_q^+ & -v_d^+ & +v_q^- & -v_d^- \\ +v_q^- & -v_d^- & +v_q^+ & -v_d^+ \\ -v_d^- & -v_q^- & +v_d^+ & +v_q^+ \end{bmatrix}^{-1} \begin{bmatrix} P_{ref} \\ Q_{ref} \\ 0 \\ 0 \end{bmatrix} \quad (23)$$

$$\begin{bmatrix} I_{dref}^+ \\ I_{qref}^+ \\ I_{dref}^- \\ I_{qref}^- \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} +v_d^+/M & +v_q^+/N \\ +v_q^+/M & -v_d^+/N \\ +v_d^-/M & -v_q^-/N \\ +v_q^-/M & +v_d^-/N \end{bmatrix} \begin{bmatrix} P_{ref} \\ Q_{ref} \end{bmatrix} \quad (24)$$

Aktif güç salınımlarının genlikleri aşağıda verildiği gibi Eş. (25) ve (32) ile hesaplanır.

$$\begin{bmatrix} P_s \\ P_c \end{bmatrix} = 2 \begin{bmatrix} \frac{v_d^- v_d^+ + v_q^- v_q^+}{N} & \frac{v_d^- v_q^- - v_d^+ v_q^+}{M} \\ \frac{v_d^- v_q^- - v_d^+ v_q^+}{N} & \frac{v_d^- v_d^+ + v_q^- v_q^+}{M} \end{bmatrix} \begin{bmatrix} P_{ref} \\ Q_{ref} \end{bmatrix} \quad (25)$$

Güç salınımları aktif ve reaktif güçler arasında paylaşılabilir. Hem aktif hem de reaktif güç salınımlarının genlikleri aşağıdaki gibi yazılabilir [10, 25]:

$$\begin{bmatrix} P_s \\ P_c \\ Q_s \\ Q_c \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} \frac{v_d^- v_d^+ + v_q^- v_q^+}{(v_d^+)^2 + (v_q^+)^2} & \frac{v_d^- v_q^- - v_d^+ v_q^+}{(v_d^+)^2 + (v_q^+)^2} \\ \frac{v_d^- v_q^- - v_d^+ v_q^+}{(v_d^+)^2 + (v_q^+)^2} & \frac{v_d^- v_d^+ + v_q^- v_q^+}{(v_d^+)^2 + (v_q^+)^2} \\ \frac{v_d^- v_d^+ + v_q^- v_q^+}{(v_d^+)^2 + (v_q^+)^2} & \frac{v_d^- v_q^- - v_d^+ v_q^+}{(v_d^+)^2 + (v_q^+)^2} \\ -\frac{v_d^- v_d^+ + v_q^- v_q^+}{(v_d^+)^2 + (v_q^+)^2} & \frac{v_d^- v_q^- - v_d^+ v_q^+}{(v_d^+)^2 + (v_q^+)^2} \end{bmatrix} \begin{bmatrix} P_{ref} \\ Q_{ref} \end{bmatrix} \quad (26)$$

Ayrıca, aktif ve reaktif güç salınımlarının kontrol edilebilirliğini sağlamak için, referans akımı, aşağıdaki PNS gerilim bileşenlerine, esnek kontrol parametresi ve aktif reaktif güç referanslarına dayanarak hesaplanır.

$$\begin{bmatrix} I_{dref}^+ \\ I_{qref}^+ \\ I_{dref}^- \\ I_{qref}^- \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} +v_d^+/M' & +v_q^+/N' \\ +v_q^+/M' & -v_d^+/N' \\ -kv_d^-/M' & +kv_q^-/N' \\ -kv_q^-/M' & -kv_d^-/N' \end{bmatrix} \begin{bmatrix} P_{ref} \\ Q_{ref} \end{bmatrix} \quad (27)$$

M' ve N' aşağıda verilmiştir.

$$\begin{aligned} M' &= (v_d^+)^2 + (v_q^+)^2 - k \left[(v_d^-)^2 + (v_q^-)^2 \right] \\ N' &= (v_d^+)^2 + (v_q^+)^2 + k \left[(v_d^-)^2 + (v_q^-)^2 \right] \end{aligned} \quad (28)$$

4.2. Durağan referans çatıda referans akımı üretimi (Reference current generation in stationary reference frame-STRF)

Referans akım şebeke arızaları durumunda şebekeye bağlı üç fazlı eviricinin güvenilir çalışması için gerekli olan önemli konulardan biridir. Ayrıca aktif ve reaktif güç kontrolünü de sağlar. Aktif güç-akım referansı $I_{\alpha(p)}$, $I_{\beta(p)}$ ve reaktif güç-akım referansı $I_{\alpha(q)}$, $I_{\beta(q)}$ PNS gerilim bileşenleri ile Eş. 29 ve 30'da verilen denklemlerle hesaplanmıştır [26].

$$\begin{aligned} I_{\alpha(p)} &= \frac{2}{3} \frac{P_{ref}}{\left[(v_\alpha^+)^2 + (v_\beta^+)^2 \right] + k \left[(v_\alpha^-)^2 + (v_\beta^-)^2 \right]} \left[v_\alpha^+ + kv_\alpha^- \right] \\ I_{\beta(p)} &= \frac{2}{3} \frac{P_{ref}}{\left[(v_\alpha^+)^2 + (v_\beta^+)^2 \right] + k \left[(v_\alpha^-)^2 + (v_\beta^-)^2 \right]} \left[v_\beta^+ + kv_\beta^- \right] \end{aligned} \quad (29)$$

$$\begin{aligned} I_{\alpha(q)} &= \frac{2}{3} \frac{Q_{ref}}{\left[(v_\alpha^+)^2 + (v_\beta^+)^2 \right] + k \left[(v_\alpha^-)^2 + (v_\beta^-)^2 \right]} \left[v_\beta^+ + kv_\beta^- \right] \\ I_{\beta(q)} &= \frac{2}{3} \frac{Q_{ref}}{\left[(v_\alpha^+)^2 + (v_\beta^+)^2 \right] + k \left[(v_\alpha^-)^2 + (v_\beta^-)^2 \right]} \left[-v_\alpha^+ - kv_\alpha^- \right] \end{aligned} \quad (30)$$

P_{ref} ve Q_{ref} eviricinin nominal gücüne göre ayarlanabilen aktif ve reaktif güç referanslarıdır. Aşağıda verilen Eş. 31 ve

32’de, PNS bileşenleri tabanlı akım referansları STRF’de esnek kontrol parametresi k ile yeniden formüle edilmiştir [26]. Esnek kontrol parametresinin değeri k $[-1, 1]$ aralığındadır ve esnek kontrol parametresi aktif-reaktif güç sinyalleri üzerindeki sınımlarının belirlenmesinde ve kontrol edilmesinde rol oynar.

$$I_{\alpha(p)} = \frac{2}{3} \frac{P_{ref}}{[\|v^+\|^2 + k\|v^-\|^2]} [v^+ \sin(\phi_p) + k v^- \sin(\phi_n)]$$

$$I_{\beta(p)} = \frac{2}{3} \frac{P_{ref}}{[\|v^+\|^2 + k\|v^-\|^2]} [-v^+ \cos(\phi_p) + k v^- \cos(\phi_n)] \quad (31)$$

$$I_{\alpha(q)} = \frac{2}{3} \frac{Q_{ref}}{[\|v^+\|^2 + k\|v^-\|^2]} [-v^+ \cos(\phi_p) + k v^- \cos(\phi_n)]$$

$$I_{\beta(q)} = \frac{2}{3} \frac{Q_{ref}}{[\|v^+\|^2 + k\|v^-\|^2]} [-v^+ \sin(\phi_p) - k v^- \sin(\phi_n)] \quad (32)$$

$\| \cdot \|$ bir vektörün genliğini temsil eder. Toplam referans akımlar Eş. 33’de verilmiştir.

$$\begin{bmatrix} I_{\alpha ref} \\ I_{\beta ref} \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} I_{\alpha(p)} + I_{\alpha(q)} \\ I_{\beta(p)} + I_{\beta(q)} \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} M_1 \sin(\phi_p - \delta_1) + M_2 \sin(\phi_n - \delta_2) \\ -M_1 \cos(\phi_p - \delta_1) + M_2 \cos(\phi_n - \delta_2) \end{bmatrix} \quad (33)$$

Ayrıca PNS aktif-reaktif akım referans sinyalleri detaylı bir şekilde Eş. 34’de verilmiştir.

$$I_{\alpha(p)} = I_{\alpha(p^+)} + I_{\alpha(p^-)}$$

$$I_{\alpha(q)} = I_{\alpha(q^+)} + I_{\alpha(q^-)}$$

$$I_{\beta(p)} = I_{\beta(p^+)} + I_{\beta(p^-)}$$

$$I_{\beta(q)} = I_{\beta(q^+)} + I_{\beta(q^-)} \quad (34)$$

Eş. 34’de verilen M_1 , M_2 , δ_1 and δ_2 terimleri Eş. 35’de verilmiştir. Üç fazlı eviricinin tetikleme sinyallerini elde etmek için, referans gerilim sinyalleri $V_{\alpha ref}$, $V_{\beta ref}$ PCI

kontrolcüde işlenerek elde edilmiştir. PCI, geleneksel PI ve PR kontrolcülerini [8] ile karşılaştırıldığında daha düşük kararlı durum hatasına sahiptir. Ayrıca, şebeke arızaları durumunda referans akım izleme hatlarını minimize edip daha hızlı dinamik cevaba sahiptir. Özellikle, PR kontrolcü frekans değişiminden daha çok etkilenmektedir.

$$M_1 = \sqrt{\left[\frac{v^+ P_{ref}}{\|v^+\|^2 + k\|v^-\|^2} \right]^2 + \left[\frac{v^+ Q_{ref}}{\|v^+\|^2 + k\|v^-\|^2} \right]^2}$$

$$\delta_1 = \tan^{-1} \frac{Q_{ref} [\|v^+\|^2 + k\|v^-\|^2]}{P_{ref} [\|v^+\|^2 + k\|v^-\|^2]}$$

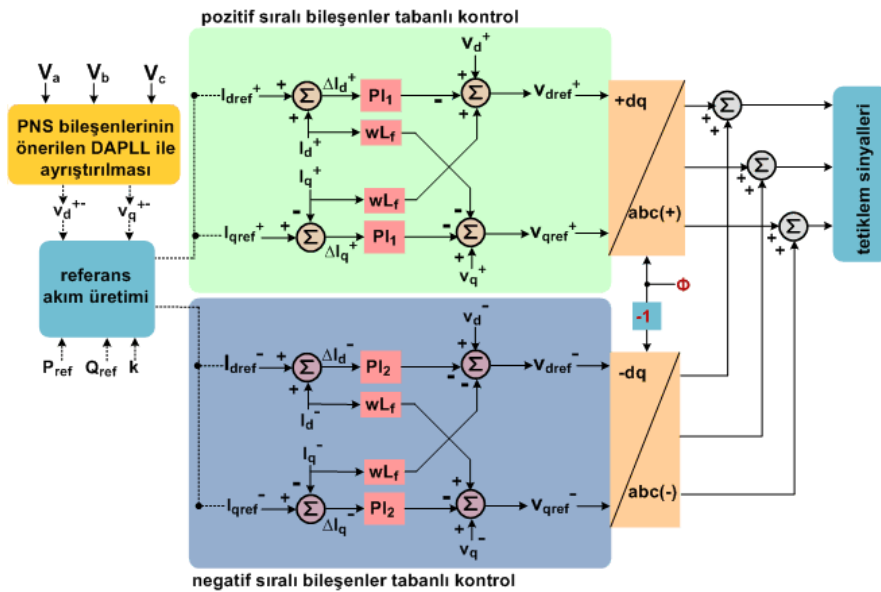
$$M_2 = \sqrt{\left[\frac{kv^- P_{ref}}{\|v^+\|^2 + k\|v^-\|^2} \right]^2 + \left[\frac{kv^- Q_{ref}}{\|v^+\|^2 + k\|v^-\|^2} \right]^2}$$

$$\delta_2 = \tan^{-1} \frac{kQ_{ref} [\|v^+\|^2 + k\|v^-\|^2]}{kP_{ref} [\|v^+\|^2 + k\|v^-\|^2]} \quad (35)$$

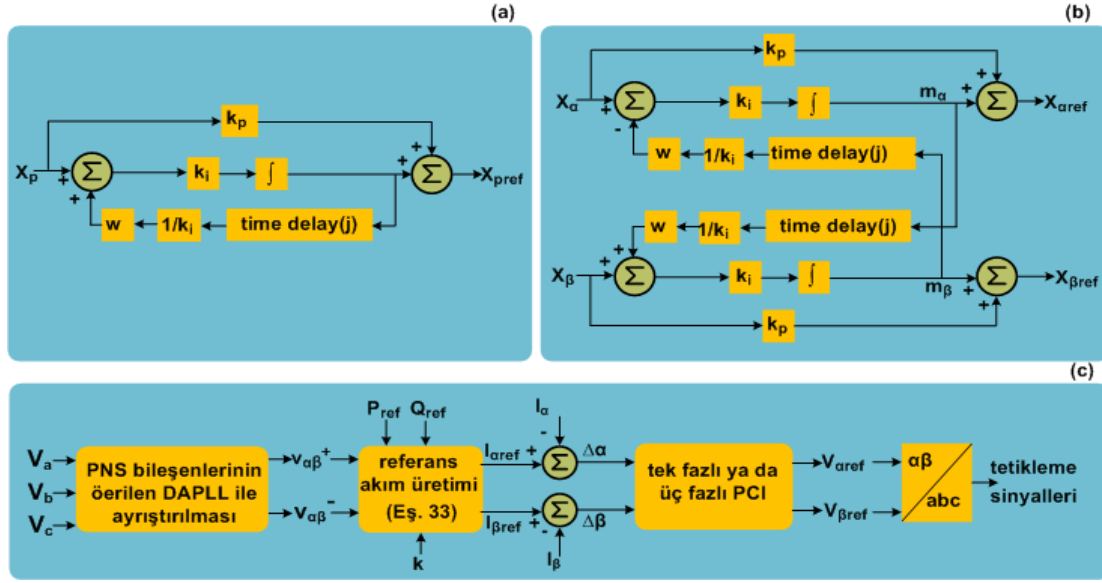
5. AKIM KONTROL STRATEJİLERİ (CURRENT CONTROL STRATEGIES)

5.1. PI tabanlı ikili akım kontrol stratejisi (PI based dual current control strategy)

Dengesiz şebeke gerilimi ve akımı, önerilen DAPLL ile PNS bileşenlerine ayrılmaktadır. Ölçülen PNS bileşenleri, evirici kontrolü kontrolünde kullanılmak üzere referans akımı üretimi için kullanılmaktadır. Şekil 4’de gösterildiği gibi, pozitif sıralı akım bileşenleri sadece pozitif sıralı gerilim bileşenlerine bağlı iken, negatif sıralı akım bileşenleri ise sadece negatif sıralı gerilim bileşenlerine bağlıdır. PNS bileşenlerinin geleneksel kontrolü için iki kontrol döngüsüne ihtiyaç vardır. Şekil 4’de gösterildiği gibi, her bir döngü; iki adet PI kontrolcü, dekuplaj terimlerini wL_f ve abc/dq ile dönüştürülmüş şebeke gerilimlerinden ileri beslemeli terimleri içermektedir [27]. Ayrı ayrı ölçülen PNS akım bileşenleri, iki geri besleme ile PI kontrolcülerde kullanılır. Kontrol döngülerinden biri sadece SRF’deki pozitif sıralı



Şekil 4. PI tabanlı ikili akım kontrol stratejisi (PI-based dual current control strategy)



Şekil 5. PCI kontrolcünün; a) tek fazlı sistemlerde uygulanması b) üç fazlı sistemlerde uygulanması ve c) YEKE'nin kontrolünde kullanılması

(Using PCI controllers (a) in single-phase systems (b) in three-phase systems and (c) in the control of the RESI)

akımları düzenlerken, diğeri ise SRF'deki negatif sıralı akımları düzenler. SRF'de, pozitif ve negatif akım döngüleri gerçekleştikten sonra tetikleme sinyalleri elde edilip sistemin kontrolü sağlanmaktadır.

$$\begin{aligned} V_{dref}^+ &= V_d^+ + I_q^+ w L_f - [I_{dref}^+ - I_d^+] [PI_1] \\ V_{qref}^+ &= V_q^+ - I_d^+ w L_f - [I_{qref}^+ - I_q^+] [PI_1] \end{aligned} \quad (36)$$

$$\begin{aligned} V_{dref}^- &= V_d^- - I_q^- w L_f - [I_{dref}^- - I_d^-] [PI_2] \\ V_{qref}^- &= V_q^- + I_d^- w L_f - [I_{qref}^- - I_q^-] [PI_2] \end{aligned} \quad (37)$$

5.2. Önerilen PCI tabanlı akım kontrol stratejisi
(The proposed PCI based current control strategy)

Sıfır kararlı hal hatasını sağlamak için oransal kompleks integral (PCI), geleneksel PI kontrolcünden türetilmiştir. PCI kontrolcü geleneksel PI ve PR kontrolcülerden daha güvenilir ve daha hızlı akım regülasyonunu sağlar [12]. Geliştirilmiş geleneksel PI kontrolcünün transfer fonksiyonu Eş. 38'de verilmiştir.

$$\frac{X_{pref}}{X_p} = k_p + \frac{k_i}{s-jw} \quad (38)$$

Dijital (sayısal) uygulamalarda s domeninden z domeni için Bilinear (Tustin) dönüşümü çoğunlukla Taylor serisinden ($z = e^{sT}$) üretilir. Ayrık zamanlı sistemlerde z ve z^{-1} sırasıyla e^{sT} and e^{-sT} işlemlerin yerini tutar. Şekil 5'de görüldüğü gibi, PCI kontrolcünün çıkış sinyalleri ayrık zamanda Eş. 39-41 arasındaki denklemler ile verilebilir.

$$\begin{aligned} m_\alpha &= m_\alpha(k-1) + \frac{k_i T}{2} \left[X_\alpha(k) - \frac{w}{k_i} m_\beta(k) \right] \\ &+ \frac{k_i T}{2} \left[X_\alpha(k-1) - \frac{w}{k_i} m_\beta(k-1) \right] \end{aligned} \quad (39)$$

$$\begin{aligned} m_\beta &= m_\beta(k-1) + \frac{k_i T}{2} \left[X_\beta(k) - \frac{w}{k_i} m_\alpha(k) \right] \\ &+ \frac{k_i T}{2} \left[X_\beta(k-1) - \frac{w}{k_i} m_\alpha(k-1) \right] \end{aligned} \quad (40)$$

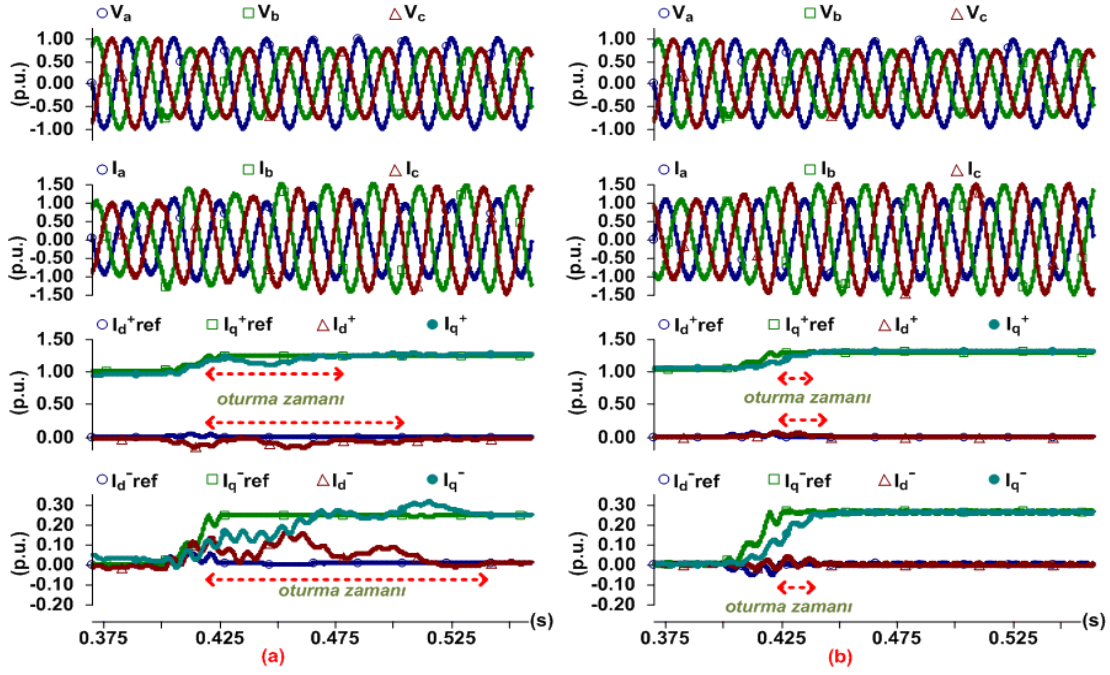
$$\begin{aligned} X_{aref}(k) &= k_p X_\alpha(k) + m_\alpha(k) \\ X_{bref}(k) &= k_p X_\beta(k) + m_\beta(k) \end{aligned} \quad (41)$$

$j m_\beta = m_\alpha$ ve $m_\beta = -j m_\alpha$. PCI kontrolcüyü geleneksel kontrolcülerden (PI ve PR) ayıran diğer önemli bir özelliği ise hem tek fazlı hem de üç fazlı sistemlerde uygulamaya sahip olmasıdır (Şekil 5a ve 5b). Üç fazlı uygulamalarda birden fazla PI ve PR modülleri kullanılırken, sadece bir tane PCI modülü kullanılabilir.

6. KONTROL STRATEJİLERİNİN PERFORMANSLARININ DOĞRULANMASI (VERIFICATION OF THE PERFORMANCE OF CONTROL STRATEGIES)

Bu bölümde, şebekeye bağlı YEKE'nin kontrolü için PI tabanlı ikili akım kontrolcünün ve önerilen PCI tabanlı akım kontrolcünün performansları şebeke gerilimi arızaları, şebeke gerilim harmonikleri ve esnek kontrol parametrelerinin değişimi gibi çeşitli senaryolar altında test edilip doğrulanmıştır. Önerilen test sisteminin uygunluğu, PSCAD/EMTDC paket programı kullanılarak doğrulanmıştır. Sistemde kullanılan parametreler Tablo 1'de verilmiştir.

Kontrolcülerin performanslarını daha iyi değerlendirmek için, Şekil 6 karşılaştırmalı bir analiz sunulmuştur. 0,4s'de B ve C faz gerilimleri 0,76 p.u. değerine düşürülerek faz-faz arızası şebekeye uygulanmıştır. Enjekte edilen akımlar ve PNS akım bileşenleri her iki kontrolcü için Şekil 6'da verilmiştir. Şekil 6a'da görüldüğü gibi, PI tabanlı ikili akım



Şekil 6. Faz-faz şebeke arızası durumunda a) PI tabanlı ikili akım kontrolcünün ve b) PCI tabanlı akım kontrolcünün performansları

(The performance of (a) PI based dual current controller and (b) PCI based current controller under phase-to-phase grid faults)

kontrolcünün dinamik cevabının çok yavaş ve kararsız olduğu gözlemlenmiştir. Sonuç olarak dengesiz şebeke gerilimi şartlarında, şebekeye bağlı YEKE'nin performansı, PCI tabanlı akım kontrolcü ile geliştirilmiştir. Faz-faz şebeke arızası olduğu durumda, PNS akım bileşenlerinin cevabı PCI tabanlı kontrolcü ile yaklaşık olarak 20ms'de gerçekleştirilmiştir (Şekil 6b). Şekil 7'deki durum senaryosu ile hem faz-faz şebeke arızasının ve hem de esnek kontrol parametresinin etkileri kontrolcüler üzerinde denenmiştir. Esnek kontrol parametresi $k,-1$ ile 1 aralığında değişmektedir. PI tabanlı ikili akım kontrolcüsü PCI tabanlı akım kontrolcüyeye göre esnek kontrol parametresinin değişiminden daha fazla etkilenmektedir. Şekil 7a'da açıkça gözlemlendiği gibi, PNS akım bileşenlerinin oturma zamanının çok uzun olduğu ve kararsız olduğu görülmektedir. PCI tabanlı akım kontrolcü ile şebekeye bağlı YEKE'nin dinamik cevabı geliştirilmiştir (Şekil 7b).

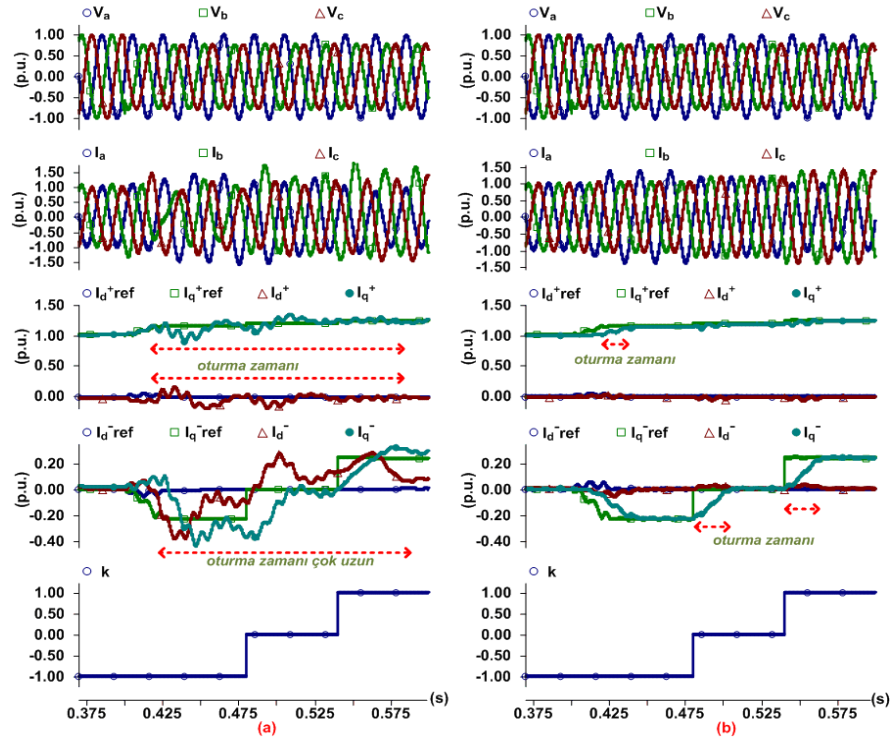
Tablo1. Önerilen test sistemi için parametreler
(The parameters for proposed test system)

Parametreler	Değerler	
DA bara gerilimi	0,8 kV	
Şebeke hat-hat gerilimi (rms)	0,38 kV	
Şebeke frekansı	50 Hz	
LC filtresi	L_f	0.5mH
	C_f	16 uF
Yükün gücü	0,6 MW	
Anahtarlama frekansı	2500 Hz	
Benzetim parametreleri	Çalışma süresi	2s
	Çözümleme aralığı	25us
	Grafik çözümleme aralığı	50us

Şekil 8'deki durum senaryosunda ise hem faz-faz şebeke arızasının ve hem de harmoniklerin etkisi kontrolcüler üzerinde incelenmiştir. PI tabanlı akım kontrolcüsü enjekte akımlar için yüksek toplam harmonik bozulma (THD) ve güç sinyallerindeki salınımların varlığı gibi kötü performanslara sahiptir. PI tabanlı ikili akım kontrolcü ile enjekte edilen akımlar için faz akımları için THB değerleri sırasıyla yaklaşık %7, %3,9 ve %4,21 olarak elde edilmiştir (Şekil 8a). PCI tabanlı kontrolcü ile sisteme enjekte edilen akımların harmonikleri önemli derece azaltılmıştır (<%0,5) (Şekil 8b). Ayrıca, PI tabanlı akım kontrolcüsü ile salınımların elimine edilmediği ve enjekte edilen akımların referans akımları yavaş takip ettiği görülmektedir.

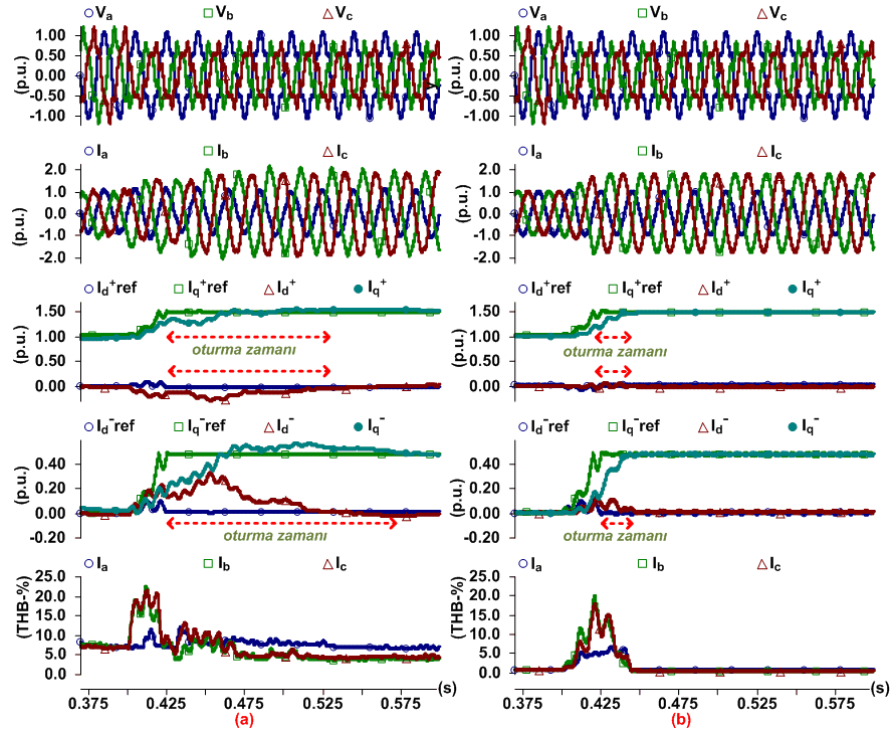
İstenen PNS akım referansları ve enjekte edilen PNS akımlar bileşenleri arasındaki hatalar ΔI_d^+ , ΔI_q^+ , ΔI_d^- ve ΔI_q^- , Şekil 9'da verilmiştir. Şekil 9a'da görüldüğü gibi, PI tabanlı ikili akım kontrolcüsünde mevcut referans akımlar ile ölçülen akımların DC değerleri birbirine uymamaktadır çünkü bozulma olduğunda, salınımlar tamamen iptal edilmemektedir. Şekil 9a'da ve 9b'de elde edilen sonuçlar karşılaştırıldığında, PCI tabanlı akım kontrolcünün PI tabanlı ikili akım kontrolcüsünden daha iyi bir performans sağladığı görülmektedir. PCI tabanlı akım kontrolcü ile enjekte edilen akımın referans akımını daha hızlı takip ettiği ve akım izleme hatasının daha iyi minimize edildiği görülmektedir. Ayrıca, PNS bileşenleri üzerindeki salınımlarının da elimine edildiği görülmektedir.

Şekilde 10'da görüldüğü gibi, faz-faz şebeke arızasının, harmoniklerin ve esnek kontrol parametresinin etkileri kontrolcüler üzerinde incelenmiştir. Esnek kontrol



Şekil 7. Faz-faz şebeke arızasının ve esnek kontrol parametresinin a) PI tabanlı ikili akım kontrolcü ve b) PCI tabanlı akım kontrolcü üzerinde etkileri

(The impact of phase-to-phase grid faults and flexible control parameter on (a) PI based dual current controller and (b) PCI based current controller)



Şekil 8. Faz-faz şebeke arızasının ve harmoniklerin a) PI tabanlı ikili akım kontrolcü ve b) PCI tabanlı akım kontrolcü üzerinde etkileri

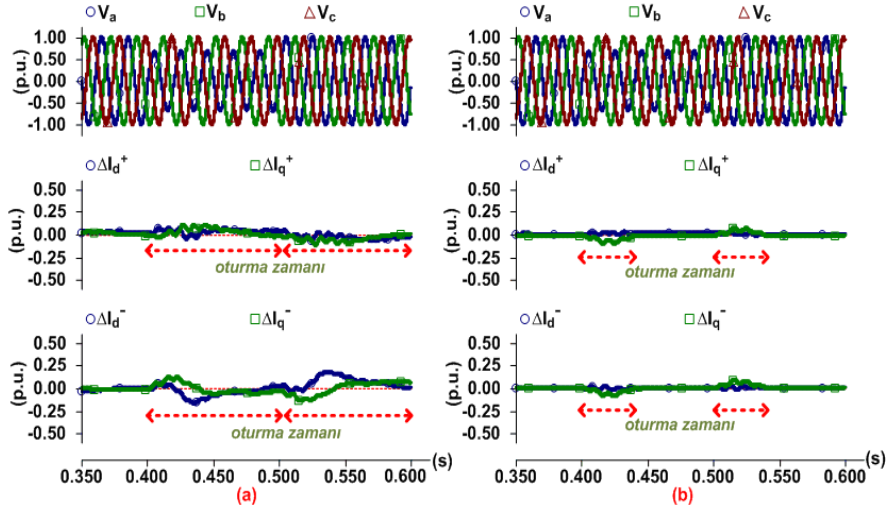
(The impact of phase-to-phase grid faults and harmonics on; a) PI based dual current controller and b) PCI based current controller)

parametresinin değeri $k = -1$ ve 1 olduğunda, enjekte edilen akım dengesizdir ve aktif veya reaktif güç

salınımlardan arındırılmıştır. k sıfır (0) olduğunda, enjekte edilen akımlar dengelidir. k değeri 1 'e yaklaştıkça, aktif güç

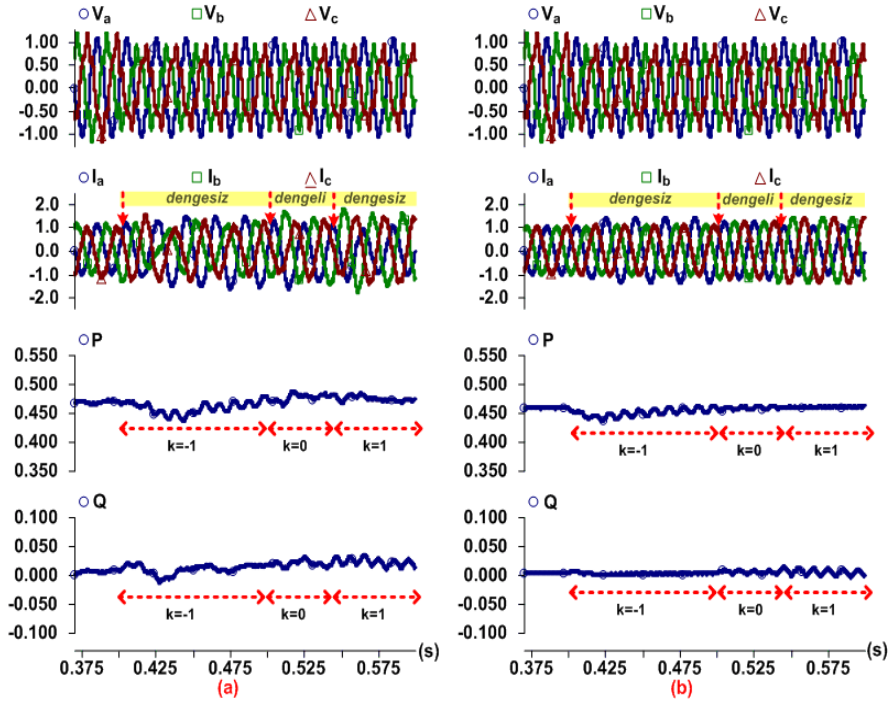
üzerindeki salınımlar azalmaktadır. Benzer şekilde, k değeri -1 değerine yaklaştıkça, reaktif güç salınımları azalır. k değeri 0 olarak ayarlandığında ise, hem aktif hem de reaktif güç sinyalleri üzerinde salınımlar bulunmaktadır. Şekil 10b’de görüldüğü gibi PCI tabanlı akım kontrolcü PI tabanlı ikili akım kontrolcüsüne göre daha iyi performans sağladığı görülmektedir (Şekil 10a). PI tabanlı ikili akım kontrolcüsü ve PCI tabanlı akım kontrolcüsü için performans

karşılaştırılması Tablo 2’de verilmiştir. Elde edilen sonuçlar ve analizlere bakıldığında, STRF yapısında sadece iki PCI kontrolcü kullanılırken, SRF yapısında dört tane PI kontrolcüsü kullanılmıştır. PCI tabanlı akım kontrolcüsü daha basit bir yapıda iken PI tabanlı ikili akım kontrolcüsü kompleks bir yapıdadır. Tablo 2’de de görüldüğü gibi PCI tabanlı akım kontrol stratejisi daha hızlı dinamik cevaba sahip olup harmonik bileşenlerden çok az etkilenmektedir.



Şekil 9. Faz-nötr şebeke arızası durumunda akım hatalarının a) PI tabanlı ikili akım kontrolcü ve b) PC tabanlı akım kontrolcü kullanarak elde edilmesi

(Current tracking errors for (a) PI based dual current controller and (b) PC based current controller under phase-to-phase grid faults)



Şekil 10. Faz-faz şebeke arızasının, harmoniklerin ve esnek kontrol parametresinin a) PI tabanlı ikili akım kontrolcü ve b) PCI tabanlı akım kontrolcü üzerinde etkileri

(The impact of phase-to-phase grid faults, harmonics and flexible control parameter on; a) PI based dual current controller and b) PCI based current controller)

Tablo 2. Kontrol stratejilerinin karşılaştırılması (Comparison of control strategies)

Kontrol metotları	Kontrolcü sayısı	Yapıları	Dinamik cevapları	THB		
				A Fazı	B Fazı	C Fazı
PI tabanlı ikili akım kontrolü	4	Kompleks	84ms	%7,0	%3,9	%4,21
PCI tabanlı akım kontrolü	2	Basit	20ms	%0,6	%0,23	%0,34

4. SONUÇLAR (CONCLUSIONS)

Bu çalışmada, şebekeye bağlı YEKE'nin kontrolünü sağlayan PI tabanlı ikili akım kontrol stratejisi ve PCI tabanlı akım kontrol stratejisi arasında detaylı bir karşılaştırma sunulmuştur. Bu çalışmanın önemli katkılarından biri, referans akım üretiminde kullanılmak için gerekli olan PNS akım ve gerilim bileşenleri, mevcut yöntemlere kıyasla hızlı, sağlam ve harmonik bileşenlerden etkilenmeyen yeni bir PNS üretici ile sağlamasıdır. Kontrol stratejilerinin performansları, şebeke gerilimi arızaları, şebeke gerilim harmonikleri ve esnek kontrol parametresinin etkisi gibi çeşitli durum çalışmaları altında test edilmiştir. Elde edilen sonuçlar önerilen PCI tabanlı akım kontrol stratejisinin şebekeye bağlı YEKE'nin dinamik cevabını ve kararlılığını iyileştirdiğini, akım hatalarını ve harmonik bileşenlerini en aza indirdiğini göstermiştir. Enjekte edilen akımlar, PCI kontrolcüsü kullanıldığında daha düşük THB'ye (<%0,5) sahiptir. Kontrolcülerin performanslarını daha iyi göstermek amacıyla ayrıca sayısal bir karşılaştırma Tablo 2'de verilmiştir. Benzetim sonuçlarında da açıkça görüldüğü gibi, önerilen PCI tabanlı kontrol stratejisi şebekeye bağlı YEKE'nin dinamik cevabını yaklaşık bir periyot (20ms) ile sağlarken PI tabanlı ikili akım kontrol stratejisi ise yaklaşık 4 periyot (84ms) ile sağladığı görülmektedir.

TEŞEKKÜR (ACKNOWLEDGEMENT)

Bu çalışma Van Yüzüncü Yıl Üniversitesi (Van, Türkiye), Bilimsel Araştırmalar Koordinasyon Birimi tarafından desteklenmektedir (Proje Numarası: FBA-2017-6388).

KAYNAKLAR (REFERENCES)

- Sarıbulut, L., Teke, A., Latran, M. B., Multi-functional static synchronous compensator for distribution systems, *Journal of the Faculty of Engineering and Architecture of Gazi University*, 31(3), 727-736, 2016.
- Latran, M. B., Teke A., Investigation of inverter based shunt compensators for mitigation of power quality problems in power distribution system. *Journal of the Faculty of Engineering and Architecture of Gazi University*, 29(4), 793-805, 2014.
- Cupertino, A. F., Xavier, L. S., Brito, E. M., Mendes, V. F., Pereira, H. A., Benchmarking of power control strategies for photovoltaic systems under unbalanced conditions, *International Journal of Electrical Power & Energy Systems*, 106, 335-345, 2019.
- Nguyen, T. H., Al Hosani, K., Al Sayari, N., Grid integration improvement for single-phase inverters of small wind turbines under distorted voltage conditions, *International Journal of Electrical Power & Energy Systems*, 87, 144-153, 2017.
- Afshari, E., Moradi, G.R., Rahimi, R., Farhangi, B., Yang, Y., Blaabjerg, F., Farhangi, S., Control strategy for three-phase grid connected PV inverters enabling current limitation under unbalanced faults, *IEEE Transactions on Industrial Electronics*, 64(11), 8908–8918, 2017.
- Guerrero-Rodríguez, N.F., Rey-Boué, A.B., Reyes-Archundia, E., Overview and comparative study of two control strategies used in 3-phase grid-connected inverters for renewable systems, *Renewable Energy Focus*, 19, 75-89, 2017.
- Bai, W., Lee, K., Distributed Generation System Control Strategies in Microgrid Operation, *Control Engineering Practice*, 53, 184–193, 2016.
- Meral, M. E., Çelik, D., Comparison of SRF/PI-and STRF/PR-based power controllers for grid-tied distributed generation systems, *Electrical Engineering*, 100(2), 633-643, 2018.
- Mirhosseini, M., Pou, J., Karanayil, B., Agelidis, V. G., Resonant versus conventional controllers in grid-connected photovoltaic power plants under unbalanced grid voltages, *IEEE Transactions on Sustainable Energy*, 7(3), 1124-1132, 2016.
- Kabiri, R., Holmes, D. G., McGrath, B. P., Control of active and reactive power ripple to mitigate unbalanced grid voltages, *IEEE Transactions on Industry Applications*, 52(2), 1660-1668, 2016.
- Liu, B., Yoshino, T., Kawamura, A., Seamless Control of Grid-Connected Inverter during Single Phase Disconnection after Single Phase Fault in a Weak Grid, *IEEJ Journal of Industry Applications*, 7(6), 506-516, 2018.
- Guo, X.Q., Wu, W.Y., Improved current regulation of three-phase grid-connected voltage-source inverters for distributed generation systems, *IET Renewable Power Generation*, 4(2), 101-115, 2010.
- Yang, Q., Gao, J., Xu, R., Ren, Y., Research on control strategy for single-phase grid-connected inverter based on Proportional Complex Integral Control, *In Intelligent Human-Machine Systems and Cybernetics (IHMSC)*, 2, 108-111, 2010.
- Sun, L. X., Chen, Y., Wang, Z., Ju, P., Jin, Y.Q., Optimal control strategy of voltage source converter-based high-voltage direct current under unbalanced grid voltage conditions, *IET Generation, Transmission & Distribution*, 10(2), 444-451, 2016.
- Jin, P., Li, Y., Li, G., Chen, Z., Zhai, X., Optimized hierarchical power oscillations control for distributed

- generation under unbalanced conditions, *Applied Energy*, 194, 343-352, 2017.
16. Reyes, M., Rodriguez, P., Vazquez, S., Luna, A., Teodorescu, R., Carrasco, J.M., Enhanced decoupled double synchronous reference frame current controller for unbalanced grid-voltage conditions, *IEEE Transactions on power electronics*, 27(9), 3934-3943, 2012.
 17. Rodríguez, 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.
 18. Guo, X., Wu, W., Chen, Z., Multiple-complex coefficient-filter-based phase-locked loop and synchronization technique for three-phase grid-interfaced converters in distributed utility networks, *IEEE Transactions on Industrial Electronics*, 58, 1194-1204, 2011.
 19. Chilipi, R., Al Sayari, N., Al Hosani, K., Beig, A.R., Control scheme for grid-tied distributed generation inverter under unbalanced and distorted utility conditions with power quality ancillary services, *IET Renewable Power Generation*, 10(2), 140-149, 2016.
 20. Chilipi, R., Al Sayari, N., Al Hosani, K., Fasil, M., Beig, A.R., Third order sinusoidal integrator (TOSSI)-based control algorithm for shunt active power filter under distorted and unbalanced voltage conditions. *International Journal of Electrical Power & Energy Systems*, 96, 152-162, 2018.
 21. İnci, M., Bayındır, K. Ç., Tümay, M., A novel method improvement for detection of voltage problems in dynamic voltage restorers, *Journal of the Faculty of Engineering and Architecture of Gazi University*, 31(4), 997-1006, 2016.
 22. Sarıbulut, L., A novel average filter based phase-locked loop for FACTS devices, *Electric Power Systems Research*, 136, 289-297, 2016.
 23. Meral, M. E., Çelik, D. Benchmarking simulation and theory of various PLLs produce orthogonal signals under abnormal electric grid conditions, *Electrical Engineering*, 100(3), 1805-1817, 2018.
 24. Wang, F., Duarte, J. L., Hendrix, M. A. M., Design and analysis of active power control strategies for distributed generation inverters under unbalanced grid faults, *IET generation, transmission & distribution*, 4 (8), 905-916, 2010.
 25. Çelik, D., Meral, M. E., Current control based power management strategy for distributed power generation system, *Control Engineering Practice*, 82, 72-85, 2019.
 26. Guo, X., Liu, W., Lu, Z., Flexible power regulation and current-limited control of grid-connected inverter under unbalanced grid voltage faults, *IEEE Transactions on Industrial Electronics*, 64(9), 7425- 7432, 2017.
 27. Song, H. S., Nam, K., Dual current control scheme for PWM converter under unbalanced input voltage conditions, *IEEE transactions on industrial electronics*, 46(5), 953-959, 1999.