

Comparison of Control Methods Approaches in Microgrid Architectures

Ayşe Bağırın¹⁺, Köksal Erentürk^{2*}

¹Electrical and Electronics Engineering/ College of Engineering, Atatürk University, Erzurum, Turkey

²Electrical and Electronics Engineering/ College of Engineering, Atatürk University, Erzurum, Turkey

*Corresponding author: keren@atauni.edu.tr

+Speaker: ayse.bagiran@atauni.edu.tr

Presentation/Paper Type: Oral / Full Paper

Abstract – A microgrid is a power grid consists of distributed power generation units and loads. Microgrid is also a system that can operate in grid-connected mode and islanding (autonomous) mode. The control of distributed power generation units in microgrids is necessary for reliability and continuity of power grid. In this study, control methods applied for microgrid architectures previously were examined. Advantages and disadvantages of microgrid control methods were compared in tabulated form. These comparisons were evaluated for each control system by considering the conditions such as robustness, response rate of the system against parameter changes, stability of the system, elimination of harmonics in the system and having a nonlinear structure of the system. When determining the most suitable control method that can be applied to a microgrid system, it is necessary to consider the performance of the controller in unbalanced systems, sensitivity to parameter change in the system, switching problems, and response time of the system. As a result of this evaluation, it is concluded that controller design is an important phenomena if the location of the microgrid and the system parts to which it is connected have been taken into account.

Keywords – microgrid, distributed control, hierarchical control, decentralized control, distributed power generation

I. GİRİŞ

Bir mikroşebeke, dağıtık enerji üretim birimlerinden ve yüklerden oluşan bir şebekedir. Bu mikroşebeke, şebekeye bağlantılı modda ve ada (otonom) modda çalışabilen bir sistemdir [1]. Mikroşebekedeki dağıtık enerji üretim sistemi güneş panelleri, rüzgar türbini, küçük hidro türbinler, yakıt hücreleri, gibi yenilenebilir enerji kaynaklarından ve bataryalar, volanlar, sıkıştırılmış hava cihazı gibi enerji depolama birimlerinden oluşmaktadır [2], [3]. Mikroşebekeler, enerji tüketim bölgelerinin yakınında kurulmaktadır. Mikroşebekelerin yerel olarak enerji talebini karşılamaları gerekir. Dağıtık enerji üretim birimlerinin kullanımı, enerji dengelerinin sağlanması açısından dağıtılmış depolama sistemleri kullanmadan bir anlam ifade etmemektedir [4].

Mikroşebekelerdeki dağıtık üretim birimlerinin denetlenmesi şebekenin güvenilirliği ve sürekliliği için gereklidir. Bu çalışmada mikroşebekelerin denetlenmesinde daha önce kullanılmış olan kontrol yöntemleri detaylı olarak incelenmiştir.

II. MATERYAL VE YÖNTEM

Bir mikroşebekedeki dağıtık enerji üretim birimlerindeki güç elektroniği birimlerinin kontrolü için farklı yöntemler kullanılabilir. Dağıtık enerji üretim sistemlerine daha önce literatürde uygulanmış olan iç kontrol döngüleri bu bölümde incelenecektir.

A. Klasik PID Kontrolü

Klasik PID kontrol yöntemi pek çok uygulamada yaygın olarak kullanılmaktadır. Bu kontrol yaklaşımının avantajı, basit olmasıdır. Klasik PI regülatörleri dengesiz sistemler için düzgün performans sağlamamaktadır [5]. PI kontrol

yaklaşımının dezavantajı, kararlı durum hatası olmadan sinusoidal referansın takip edilememesidir. Bu sinusoidal referansın izlenememesi, iyi bir dinamik tepki için şebeke gerilimini ileri besleme terimi olarak kullanma ihtiyacını gerektirir. Klasik PI yaklaşımının başka bir dezavantajı da ilave harmonik telafisine ihtiyaç duymasındır [6]. [7], çalışmalarında tek fazlı şebeke bağlantılı evircili bir LCL filtreye Jüri kararlılık kriterine dayanarak PI regülatör tabanlı bir akım kontrol yöntemi uygulamışlar ve aktif sönümlenimin çözümü için filtre-kapasite akımı geri beslemesi kullanmışlardır.

B. Oransal Rezonans (Proportional Resonant: PR)

Oransal Rezonans (PR) kontrolcüsü, sinusoidal referanslarda çalışmak için daha uygun olan ve PI kontrolcüsünde oluşan dezavantajlardan muzdarip olmayan bir akım kontrolcüsüdür. PR kontrolcüsü, ω rezonans frekansı civarında kazanç sağlarken diğer frekanslarda kazanç oluşturmaz [6]. PR, kararlı durum hatasını ya da rezonans frekansındaki akım harmoniklerini yok etmek için sonlu kazanç sahiptir [8]- [10]. Ancak PR harmonik kompanzatorleri, düşük dereceli harmoniklere sınırlandırılmışlardır. Bant genişliği dışında sistem dengesiz çalışmaktadır [9]. [11], çalışmalarında, iki fazlı statik koordinat altında, şebeke akımının bozulmasını engellemek için PR ve harmonik kompanzatorünü birlikte (PR+HC) kullanmışlardır.

C. Tahminsel Kontrol (Predictive Control)

Tahminsel kontrolün temel özelliği, kontrol edilen değişkenlerin gelecekteki davranışını tahmin etmek için bir sistem modelinin kullanılmasıdır. Tahmin kontrolü, önceden tanımlanmış bir optimizasyon kriterine göre kontrol ünitesi

tarafından en uygun çalışmanın elde edilmesi için kullanılır [13]. Tahminsel kontrol, tahmini hatayı en aza indirecek şekilde geliştirildiği için, referans akımını herhangi bir hata olmadan düzgün bir şekilde takip edebilmektedir [5]. Tahminsel kontrolün başka bir avantajı, değişkenlerin farklı iletim durumları için davranışını hesaplamasından dolayı, tahmine dayalı modelde sistemin doğrusal olmayan bileşenlerini içermeye olasılığının olmasıdır [16]. Tahminsel kontrolün dezavantajı ise, matematiksel yaklaşımının parametrelere karşı duyarlı olmasıdır [15]. [14], çalışmalarında şebeke bağlantısı sırasında rezonans davranışını en aza indirmek için tahminsel aktif sönümleme yöntemini kullanmışlardır.

D. Sönümlü Denetleyici (Dead-beat control)

Sönümlü denetleyici, en iyi bilinen tahminsel kontrol yöntemidir. Bu kontrol yaklaşımı, hızlı bir dinamik tepkiye sahiptir ve PWM ya da uzay vektör modülasyonu (SVM) gibi herhangi bir modülasyon yöntemiyle kullanılabilir [13]. Sönümlü denetleyicinin dezavantajları ise doğrusal olmayan yüklerde yüksek Toplam Harmonik Distorsiyonu (THD) oluşturması, tam filtre modeline ihtiyaç duyması ve yük parametrelerindeki değişimlere karşı çok hassas olmasıdır [18]. Sönümlü denetleyici, öngörülen hatayı en aza indirmek amacıyla tasarlanır ve böylece referans akım, hata olmaksızın düzgün bir şekilde izlenebilir [20]. [21] ve [22] çalışmalarında dağıtık enerji üretim sistemlerindeki gerilim kaynaklı PWM çeviricilerinin akım kontrolünü sönümlü denetleyici ile yapmışlardır.

E. Histerezis Akım Kontrolü (Hysteresis control)

Histerezis akım kontrol yaklaşımı, güç çeviricilerinin doğrusal olmayan doğasından yararlanır. Bu yaklaşımda, güç yarı iletkenlerinin anahtarlama durumları, hata için verilen bir histerezis genişliği dikkate alınarak ölçülen değişkenin referans değer ile karşılaştırılmasıyla belirlenir [13]. Bu kontrol yaklaşımının avantajları basit yapıda, gürbüz ve iyi bir geçici tepkisinin olmasıdır [23]. Histerezis kontrol yaklaşımının dezavantajı ise, sabit bir anahtarlama frekansı olmadığı için geniş frekans spektrumuna sahip olması ve akım dalgalanmasının göreceli olarak yüksek olmasıdır. Dahası, teorik olarak faz akımı, bant sınırının iki katına ulaşabilir [24]. [25], çalışmalarında dinamik olarak modüle edilmiş histerezis bant genişliğini içeren adaptif bir histerezis bant kontrol algoritması sunmuşlardır. Sunmuş oldukları bu kontrol algoritması, şebekeye bağlı eviricilerin, sinüzoidal akımı güç şebekesine enjekte edebildiğini göstermektedir [25].

F. Doğrudan Güç Kontrolü (Direct power control)

Elektrik makinelerindeki doğrudan tork kontrolüne dayanarak [26]- [31] çalışmalarında 3 fazlı DC/AC çeviriciler için doğrudan güç kontrol yaklaşımını geliştirmişlerdir. Doğrudan güç kontrolünün avantajı, hızlı dinamik tepkisiyle basit bir kontrol yapısının olmasıdır [5]. Bu kontrol yaklaşımının dezavantajı, anahtarlama frekansının değişken olmasıdır. Anahtarlama frekansı değişken olduğu için, çevirici-soğutma devrelerinin tasarımı ile AC harmonik filtre tasarımları zorlaşır [32].

G. Kayma Kipli Kontrol Yöntemi (Sliding mode control)

Kayan mod kontrolü oldukça çeşitli çalışma koşullarında iyi bir kararlılığa sahip olan gürbüz bir kontrol yöntemi olarak

kabul edilmektedir [20]. Bu kontrol yöntemi, açma-kapama çalışma modları olan ve değişken yapıda bir denetleyicidir [20]. İyi tasarlandığında kabul edilebilir bir THD gösterir [33]. Bu kontrol yönteminin dezavantajı, ayrık zamanlı uygulamalarda çatırdama etkisi (Chattering Phenomenon) probleminin oluşmasıdır [33]. Ayrıca bu kontrol yönteminin iyi bir geçici tepki ve sıfır kararlı durum hatası açısından tasarımı zorluğudur [34], [35]. [36], çalışmalarında herhangi bir senkron koordinat dönüşümü yapmadan aktif ve reaktif güç hatalarını yok etmek amacıyla istenen çevirici gerilimini doğrudan hesaplamak için doğrusal olmayan bir kayma kipli kontrol yaklaşımı tabanlı doğrudan güç kontrol stratejisi önermişlerdir. Ayrıca, hiçbir ekstra akım kontrol döngüsü olmadan sistem tasarımını basitleştirerek geçici performansı artırmışlardır [36].

H. H_{∞} Kontrol Yöntemi

H_{∞} kontrol yöntemi, hem nominal parametre değerlerini kararlı hale getiren hem de sistem parametrelerinin belirli sınırlar içinde değiştiği durumları kararlı hale getiren denetleyicilerin sentezinde kullanılır. Ayrıca bu kontrol yöntemi, en kötü durumdaki bozulmanın performansını iyileştirmeyi garanti edebilir [5]. Bu kontrol yaklaşımı, çoklu giriş çoklu çıkış (MIMO) birleştirilmiş sistemler için kolayca uygulanabilir [37]. Bu kontrol yaklaşımının dezavantajları, ileri düzeyde matematik bilgisi gerektirmesi ve dinamik tepkisinin yavaş olmasıdır [5]. [38], çalışmalarında THD'yi azaltmak için H_{∞} ve tekrarlamalı kontrol tekniklerine dayanan bir akım denetleyicisi tasarımı yapmışlardır.

I. Tekrarlamalı Kontrol (Repetitive control: RC)

Tekrarlamalı geri besleme kontrolü (RC), yinelemeli öğrenme kontrolünden (ILC) türetilmiş bir kontrol yöntemidir. Bu kontrol yöntemi, dönüştürücülerin periyodik referans sinyalleri veya bozulmalarının kontrolünde kullanılabilir. Basit bir öğrenme kontrol yöntemi olarak kabul edilen RC teorisi, iç model prensibini kullanarak, dinamik sistemlerde periyodik hataların giderilmesinde alternatif sunar [45]. Bu kontrol yönteminde, referans değeri ile akım geri beslemesi arasındaki hata, bir sonraki temel döngüde yeni bir referans oluşturmak için kullanılır [46], [47]. Tekrarlamalı kontrol, oransal rezonans denetleyicilerinden daha kolay uygulanabilme avantajına sahiptir. Ancak, yüksek frekanslarda rezonans kazancı tepe değere ulaşır ve bu da kararsızlığa yol açabilir [46]. Tekrarlamalı kontrol yöntemi kullanılarak kararlı durum takip hatası yok edilebilir ve THD en aza getirilebilir [48].

J. Yapay Sinir Ağı ve Bulanık Mantık Kontrol Yöntemleri

Yapay sinir ağı kontrol yöntemi, yüksek gürbüzlüğü sayesinde akım kontrolünde oldukça kullanılır [5]. [50], çalışmalarında şebekeye bağlı dağıtık üretim birimlerindeki eviricilere yapay sinir ağı tabanlı uyarlamalı ve sensörsüz bir ayrık zamanlı gerilim kontrol yöntemi uygulamışlardır. Doğrusal olmayan kestirim problemini bir yapay sinir ağı şebeke gerilim tahmincisi ile çözmüşlerdir [50]. Yapay sinir ağı adaptasyon algoritmasının kendi kendine öğrenme özelliği, farklı şebeke bozulmalarında ve çalışma koşullarında uygulanabilir ve kolay bir adaptasyon tasarımına izin verir [51].

[52], çalışmalarında akım denetleyici tasarımını optimum duruma getirmek için PI kontrolörü, bulanık mantık kontrolörü

(FLC) ve PI-FLC çift modlu kontrolör tasarlamışlardır. Bu kontrolcülerini, aşmaları azaltmak ve izleme hata performansını iyileştirmek amacıyla kullanmışlardır.

Tablo 1. Mikro şebekelerde kontrol yöntemlerinin avantaj ve dezavantajları

Yöntem	Avantaj	Dezavantaj
Klasik PID Kontrol Yöntemi	Kontrol yapısı basittir [5].	Çalışma koşulları değiştiğinde sistemin performansında düşme meydana gelmektedir [5]. Dengesiz sistemlerde iyi performans sağlamaz [5]. Yüksek harmoniklerde çok iyi çözüm sağlamaz [6].
Oransal Rezonans (PR) Kontrol Yöntemi	Bu yöntem, istenilen performansı elde etmek amacıyla gürbüz bir iç akım denetleyicisi olarak kullanılabilir [12].	Büyük kazanç sağlayarak sıfır kararlı durum hatasını garanti eder; ancak, bunu denetleyicinin rezonans frekansı civarında yapar [6], [8]-[10].
Tahminsel Kontrol Yöntemi	Sistemin doğrusal olmayan bileşenlerini içerme olasılığı vardır [16]. Yüksek güçlü eviriciler için anahtarlama frekansını en aza indirmek ve olası hatayı belirli bir sınırdan tutmak için kullanılır [17].	İstenilen performansa ulaşmak için tam filtre modeli gerekir [5]. Matematiksel yaklaşımı, parametrelere karşı duyarlıdır [15].
Sönümlü Denetleyici	Hızlı tepki sağlar [19]. Düşük örnekleme frekansında çok hızlı geçiş cevabı verir [19].	Doğrusal olmayan yüklerde yüksek THD oluşur [18]. Tam filtre modeli gerekir [18]. Yük parametrelerindeki değişimlere karşı çok hassastır [18].
Histeresis Akım Kontrolü	Basittir, gürbüzdür ve iyi bir geçici tepkisi vardır [23].	Bu denetleyicinin en büyük dezavantajı, rezonans problemlerine neden olabilecek parametre yüklerinde ve çalışma koşullarında meydana gelen değişiklikler sonucu anahtarlama frekansının değişmesidir [5]. Anahtarlama kayıpları, histeresis akım kontrolünün uygulanmasını daha düşük güç seviyelerine sınırlar [16]. Fazlar arasındaki etkileşim nedeniyle akım hatası, histeresis bandının değerine kesin olarak sınırlandırılmaz [5].
Doğrudan Güç Kontrol Yöntemi	Hızlı dinamik tepkisiyle basit bir kontrol yapısı vardır [5].	Anahtarlama frekansı değişken olduğu için çevirici-soğutma devrelerinin tasarımlarını ve AC harmonik filtre tasarımını zorlaştırır [32].
Kayma Kipli Kontrol Yöntemi	Geçici durum boyunca güvenilir performans gösterir [36]. İyi tasarlandığında kabul edilebilir bir THD gösterir [33].	Aynı zamanlı uygulamalarda çatırdama etkisi (Chattering Phenomenon) problemi vardır [33]. İyi bir geçici tepki ve sıfır kararlı durum hatası açısından tasarım zorluğu vardır [34], [35].
∞ Kontrol Yöntemi	Çoklu Giriş Çoklu Çıkış (MIMO) birleştirilmiş sistemler için kolayca uygulanabilir [37]. Sistem belirsizliklerini ve bozulmalarını veya kontrol edilecek sistemin karmaşık veya kötü modellenmiş dinamiklerinin olup olmadığını dikkate alır [44]. Diğer kontrolcülerle karşılaştırıldığında THD oldukça düşüktür ve performansı iyidir. Doğrusal olmayan, dengesiz yükler veya şebeke gerilimi bozulması ve takip hatasının azaltılması durumunda bile iyi performans sağlar. Gerçek uygulamalarda çalışması kolaydır [38]- [43].	İleri düzeyde matematik bilgisi gerektirir. Kontrolör sonuçları yüksek mertebededir. Sistem cevabı yavaştır [5].
Tekrarlamalı Kontrol Yöntemi	Sistemin temel ve harmonik frekanslarında yüksek kazanç sağlar [49]. Temel periyottan daha uzun sürse bile sistemin geçici tepkisi için gürbüzlük gösterir ve sıfır kararlı durum hatasını garanti eder [5], [49].	Dinamik performansı zayıf [49]. Hızlı geçici tepki istenen uygulamalar için uygun değildir [49].
Bulanık Mantık Kontrol Yöntemi	Parametrik değişkenlere ve çalışma noktalarına duyarlıdır [5].	Yavaş bir kontrol yöntemidir [5].
Yapay Sinir Ağı Kontrol Yöntemi	Akım denetleyicilerinde bu yöntem, çevrimiçi veya çevrimdışı yaklaşımlarla geliştirilir ve kullanılır [5].	Yavaş bir dinamik tepkiye neden olabilir ve yalnızca statik moda uygulanır [5].
DROOP Kontrol Yöntemi	Mikroşebekeye yüksek güvenilirlik ve esneklik sağlamaktadır [4].	Önemli bir dezavantajı yüke bağlı frekans saptamalarıdır; ancak bu durum ikincil kontrol çevrimi ile düzeltilmektedir [4].

K. DROOP Kontrol Yöntemi

DROOP kontrol yöntemi DROOP kontrol yöntemi, geleneksel güç şebekesinin birincil frekans düzenleme prensibine benzer bir şekilde çalışmaktadır [53]. DROOP kontrol mikroşebekeye yüksek güvenilirlik ve esneklik sağlamaktadır. DROOP kontrolün önemli bir dezavantajı yüke bağlı frekans saptamalarıdır; ancak bu durum ikincil kontrol çevrimi ile düzeltilmektedir [4].

III. BULGULAR

Mikroşebeke mimarilerinde kullanılan kontrol yöntemleri ile bu yöntemlerin avantaj ve dezavantajları Tablo 1'de verilmiştir.

IV. TARTIŞMA

Klasik PID yöntemi, basit bir kontrol yapısına sahip olmasına rağmen dengesiz sistemlerde iyi performans sağlamaz. PR kontrol yöntemi, gürbüz bir akım kontrol yöntemi olmasına rağmen rezonans frekansı dışında sistemi kararsızlığa götürür. Tahminsel kontrol yöntemi, sistemin doğrusal olmayan bileşenlerini de içermesine rağmen istenen performansı göstermek için tam filtre modeline ihtiyaç duyar. Sönümlü denetleyici, hızlı tepki sağmasına rağmen doğrusal olmayan yüklerde yüksek THD oluşturur. Histerezis akım kontrolü yöntemi, basit yapıdadır, gürbüzdür ve iyi bir geçici tepkisi vardır; ancak, bu denetleyicinin en büyük dezavantajı, rezonans problemlerine neden olabilecek parametre yüklerinde ve çalışma koşullarında meydana gelen değişiklikler sonucu anahtarlama frekansının değişmesidir. Doğrudan güç kontrol yöntemi, basit bir yapıya ve hızlı bir dinamik tepkiye sahip olmasına rağmen anahtarlama frekansı değişken olduğu için çevirici-soğutma devrelerinin tasarımlarını ve AC harmonik filtre tasarımını zorlaştırır. Kayma kipli kontrol yöntemi, geçici durum boyunca güvenilir performans gösterir; ancak, bu yöntemin ayrık zamanlı uygulamalarda çatırdama etkisi problemi vardır. H_∞ kontrol yönteminin THD değeri oldukça düşük ve performansı iyi olmasına rağmen ileri düzeyde matematik bilgisi gerektirir ve sistem cevabı yavaştır. Tekrarlamalı kontrol yöntemi, sistemin temel ve harmonik frekanslarında yüksek kazanç sağlar; ancak, dinamik performansı zayıftır. Bulanık mantık kontrol yöntemi, parametrik değişkenlere ve çalışma noktalarına duyarlı olmasına rağmen yavaş bir kontrol yöntemidir. Yapay sinir ağı kontrol yöntemi çevrimiçi veya çevrimdışı yaklaşımlarla kullanılabilir; ancak, yavaş bir dinamik tepkiye yol açabilir.

V. SONUÇ

Bu çalışmada, daha önce mikroşebeke mimarilerinde kullanılmış kontrol yöntemleri incelenmiştir. Mikroşebeke kontrol yöntemlerinin avantajları ve dezavantajları karşılaştırılmıştır. Bu karşılaştırmalar gürbüzlük, sistemin parametre değişimlerine karşı cevap hızı, sistemin kararlılığı, sistemdeki harmoniklerin ortadan kaldırılması ve sistemin doğrusal olmayan bir yapıya sahip olması gibi durumlar göz önünde bulundurularak her bir kontrol sistemi için değerlendirilmiştir. Bu karşılaştırmalar doğrultusunda DROOP kontrol yönteminin sağladığı yüksek şebeke güvenilirliği ve esnekliği açısından bir mikroşebekede kullanılabilecek en iyi kontrol yöntemi olduğu sonucuna varılmıştır.

KAYNAKÇA

- [1] A. M. Sani ve R. Iravani, «Potential-function based control of a microgrid in islanded and grid-connected modes,» *IEEE Transactions on Power Systems*, cilt 25, no. 4, pp. 1883-1891, 2010.
- [2] M. N. Marwali, J. W. Jung ve A. Keyhani, «Control of distributed generation systems-Part II: Load sharing control,» *IEEE Transactions on power electronics*, cilt 19, no. 6, pp. 1551-1561, 2004.
- [3] J. M. Guerrero, J. Matas, L. G. de Vicuña, M. Castilla ve J. Miret, «Decentralized control for parallel operation of distributed generation inverters using resistive output impedance,» *IEEE Trans. Ind. Electron.*, cilt 54, no. 2, p. 994-1004, April 2007.
- [4] J. M. Guerrero, J. C. Vasquez, J. Matas, L. G. de Vicuña ve M. Castilla, «Hierarchical control of droop-controlled AC and DC microgrids—A general approach toward standardization,» *IEEE Trans. Ind. Electron.*, cilt 58, no. 1, p. 158-172, January 2011.
- [5] A. M. Bouzid, J. M. Guerrero, A. Cheriti, M. Bouhamida, P. Sicard ve M. A. Benhanem, «A survey on control of electric power distributed generation systems for microgrid applications,» *Renewable and Sustainable Energy Reviews*, cilt 44, pp. 751-766, 2015.
- [6] D. Zammit, C. S. Staines ve M. Amap, «Comparison between PI and PR current controllers in grid connected PV inverters,» *WASET, International Journal of Electrical, Electronic Science and Engineering*, cilt 8, no. 2, 2014.
- [7] X. Wang, X. Ruan, C. Bao, D. Pan ve L. Xu, «Design of the PI regulator and feedback coefficient of capacitor current for grid-connected inverter with an LCL filter in discrete-time domain,» *In 2012 IEEE energy conversion congress and exposition (Ecce)*, pp. 1657-1662, September 2012.
- [8] J. G. Hwang, P. W. Lehn ve M. Winkelnkemper, «A generalized class of stationary frame-current controllers for grid-connected AC-DC converters,» *IEEE Transactions on Power Delivery*, cilt 25, no. 4, pp. 2742-2751, 2010.
- [9] G. Shen, X. Zhu, J. Zhang ve D. Xu, «A new feedback method for PR current control of LCL-filter-based grid-connected inverter,» *IEEE Transactions on Industrial Electronics*, cilt 57, no. 6, pp. 2033-2041, 2010.
- [10] M. Liserre, R. Teodorescu ve F. Blaabjerg, «Multiple harmonics control for three-phase grid converter systems with the use of PI-RES current controller in a rotating frame,» *IEEE Transactions on power electronics*, cilt 21, no. 3, pp. 836-841, 2006.
- [11] Y. Jia, J. Zhao ve X. Fu, «Direct grid current control of LCL-filtered grid-connected inverter mitigating grid voltage disturbance,» *IEEE Transactions on Power Electronics*, cilt 29, no. 3, pp. 1532-1541, 2013.
- [12] A. V. Timbus, R. Teodorescu, F. Blaabjerg, M. Liserre ve P. Rodriguez, «Linear and nonlinear control of distributed power generation systems,» *n Conference Record of the 2006 IEEE Industry Applications Conference Forty-First IAS Annual Meeting*, cilt 2, pp. 1015-1023, 2006.
- [13] J. Rodriguez ve P. Cortes, «Predictive control of power converters and electrical drives,» *John Wiley & Sons*, cilt 40, 2012.
- [14] J. Rodriguez, J. Pontt, C. A. Silva, P. Correa, P. Lezana, P. Cortés ve U. Ammann, «Predictive current control of a voltage source inverter,» *IEEE transactions on industrial electronics*, cilt 54, no. 1, pp. 495-503, 2007.
- [15] Y. Baek, K. J. Lee ve D. S. Hyun, «Improved predictive current control for grid connected inverter applications with parameter estimation,» *In 2009 IEEE Industry Applications Society Annual Meeting*, pp. 1-6, October 2009.
- [16] H. S. Heo, G. H. Choe ve H. S. Mok, «Robust predictive current control of a grid-connected inverter with harmonics compensation,» *In 2013 Twenty-Eighth Annual IEEE Applied Power Electronics Conference and Exposition (APEC)*, pp. 2212-2217, March 2013.
- [17] R. G. Mapari ve D. G. Wakde, «A simple predictive PWM voltage controlled technique for implementation of single phase inverter with precession rectifier,» *Journal of Engineering Research and Applications*, cilt 3, pp. 1772-1775, 2013.
- [18] M. A. Sofla, L. Wang ve R. King, «Modeling and control of sustainable power systems,» *Springer*, 2012.
- [19] K. H. Ahmed, A. M. Massoud, S. J. Finney ve B. W. Williams, «A survey of control techniques for three-phase inverter-based distributed generation,» *In Second international conference on microgrid*, 2011.
- [20] M. Jamil, «Repetitive current control of two-level and interleaved three-phase PWM utility connected converters,» *Doctoral dissertation, University of Southampton*, 2012.
- [21] Y. A. R. I. Mohamed ve E. F. El-Saadany, «An improved deadbeat current control scheme with a novel adaptive self-tuning load model for a three-phase PWM voltage-source inverter,» *IEEE Transactions on Industrial Electronics*, cilt 54, no. 2, pp. 747-759, 2007.

- [22] A. V. Timbus, «Grid monitoring and advanced control of distributed power generation systems,» *Institute of Energy Technology, Aalborg University*, 2007.
- [23] M. P. Kazmierkowski ve L. Malesani, «Current control techniques for three-phase voltage-source PWM converters: A survey,» *IEEE Transactions on industrial electronics*, cilt 45, no. 5, pp. 691-703, 1998.
- [24] T. Midsund, «Control of Power Electronic Converters in Distributed Power Generation Systems: Evaluation of Current Control Structures for Voltage Source Converters operating under Weak Grid Conditions,» *Master's thesis, Institutt for elkraftteknikk*, 2010.
- [25] X. Dai ve Q. Chao, «The research of photovoltaic grid-connected inverter based on adaptive current hysteresis band control scheme,» *In 2009 International Conference on Sustainable Power Generation and Supply, IEEE*, pp. 1-8, April 2009.
- [26] T. Noguchi, H. Tomiki, S. Kondo ve I. Takahashi, «Direct power control of PWM converter without power-source voltage sensors,» *IEEE Trans. Ind. Appl.*, cilt 34, no. 3, p. 473-479, May/June 1998.
- [27] G. Escobar, A. M. Stankovic, J. M. Carrasco, E. Galvan ve R. Ortega, «Analysis and design of direct power control (DPC) for a three phase synchronous rectifier via output regulation subspaces,» *IEEE Trans. Power Electron.*, cilt 18, no. 3, p. 823-830, 2003.
- [28] M. Malinowski, M. P. Kazmierkowski, S. Hansen, F. Blaabjerg ve G. D. Marques, «Virtual-flux-based direct power control of three-phase PWM rectifiers,» *IEEE Trans. Ind. Appl.*, cilt 37, no. 4, p. 1019-1027, Jul./Aug. 2001.
- [29] M. Malinowski, M. Jasinski ve M. P. Kazmierkowski, «Simple direct power control of three-phase PWM rectifier using space-vector modulation (DPC-SVM),» *IEEE Trans. Ind. Electron.*, cilt 51, no. 4, p. 447-454, April 2004.
- [30] S. Aurtenechea, M. A. Rodríguez, E. Oyarbide ve J. R. Torrealday, «Predictive control strategy for DC/AC converters based on direct power control,» *IEEE Trans. Ind. Electron.*, cilt 54, no. 3, p. 1261-1271, Jun. 2007.
- [31] S. Vazquez, J. A. Sanchez, J. M. Carrasco, J. I. Leon ve E. Galvan, «A model-based direct power control for three-phase power converters,» *IEEE Trans. Ind. Electron.*, cilt 55, no. 4, p. 1647-1657, April 2008.
- [32] D. Zhi, L. Xu ve B. W. Williams, «Improved direct power control of grid-connected DC/AC converters,» *IEEE Transactions on Power Electronics*, cilt 24, no. 5, pp. 1280-1292, 2009.
- [33] X. Hao, X. Yang, R. Xie, L. Huang, T. Liu ve Y. Li, «A fixed switching frequency integral resonant sliding mode controller for three-phase grid-connected photovoltaic inverter with LCL-filter,» *In 2013 IEEE ECCE Asia Downunder*, pp. 793-798, June 2013.
- [34] S. L. Jung ve Y. Y. Tzou, «Discrete sliding-mode control of a PWM inverter for sinusoidal output waveform synthesis with optimal sliding curve,» *IEEE transactions on power electronics*, cilt 11, no. 4, pp. 567-577, 1996.
- [35] M. A. Sofla ve R. King, «Control method for multi-microgrid systems in smart grid environment—Stability, optimization and smart demand participation,» *In 2012 IEEE PES Innovative Smart Grid Technologies (ISGT)*, pp. 1-5, January 2012.
- [36] J. Hu ve B. Hu, «Direct active and reactive power regulation of grid connected voltage source converters using sliding mode control approach,» *In 2010 IEEE International Symposium on Industrial Electronics*, pp. 3877-3882, July 2010.
- [37] T. Hornik ve Q. C. Zhong, «H ∞ repetitive current controller for grid-connected inverters,» *In 2009 35th Annual Conference of IEEE Industrial Electronics*, pp. 554-559, November 2009.
- [38] T. Hornik ve Q. C. Zhong, «H ∞ current control strategy for the neutral point of a three-phase inverter,» *In 2011 50th IEEE Conference on Decision and Control and European Control Conference*, pp. 2994-2999, December 2011.
- [39] T. Hornik ve Q. C. Zhong, «A Current-Control Strategy for Voltage-Source Inverters in Microgrids Based on H ∞ and Repetitive Control,» *IEEE Transactions on Power Electronics*, cilt 26, no. 3, pp. 943-952, 2010.
- [40] T. Hornik ve Q. C. Zhong, «Voltage control of grid-connected inverters based on H ∞ and repetitive control,» *In 2010 8th World Congress on Intelligent Control and Automation*, pp. 270-275, July 2010.
- [41] T. Hornik ve Q. C. Zhong, «H ∞ repetitive current-voltage control of inverters in microgrids,» *In IECON 2010-36th Annual Conference on IEEE Industrial Electronics Society*, pp. 3000-3005, IEEE November 2010.
- [42] Q. C. Zhong ve T. Hornik, «Cascaded current-voltage control to improve the power quality for a grid-connected inverter with a local load,» *IEEE Transactions on Industrial Electronics*, cilt 60, no. 4, pp. 1344-1355, 2012.
- [43] T. Hornik ve Q. C. Zhong, «Voltage control of grid-connected inverters based on H ∞ and repetitive control,» *In 2010 8th World Congress on Intelligent Control and Automation*, pp. 270-275, July 2010.
- [44] G. W. McLeary, «H-infinity Control Design Approach for Near-zero Speed Submarine Depth Control,» *Doctoral dissertation, George Mason University*, 2005.
- [45] S. Hara, Y. Yamamoto, T. Omata ve M. Nakano, «Repetitive control system: A new type servo system for periodic exogenous signals,» *IEEE Transactions on automatic control*, cilt 33, no. 7, pp. 659-668, 1988.
- [46] M. A. Abusara, M. Jamil ve S. M. Sharkh, «Repetitive current control of an interleaved grid-connected inverter,» *In 2012 3rd IEEE International Symposium on Power Electronics for Distributed Generation Systems (PEDG)*, pp. 558-563, June 2012.
- [47] T. Liu, X. Hao, X. Yang, M. Zhao, Q. Huang ve L. Huang, «A novel repetitive control scheme for three-phase grid-connected inverter with LCL filter,» *In Proceedings of The 7th International Power Electronics and Motion Control Conference*, pp. 335-339, June 2012.
- [48] D. Chen, J. Zhang ve Z. Qian, «An improved repetitive control scheme for grid-connected inverter with frequency-adaptive capability,» *IEEE Transactions on Industrial Electronics*, cilt 60, no. 2, pp. 814-823, 2012.
- [49] D. Chen, J. Zhang ve Z. Qian, «Research on fast transient and 6n \pm 1 harmonics suppressing repetitive control scheme for three-phase grid-connected inverters,» *IET Power Electronics*, cilt 6, no. 3, pp. 601-610, 2013.
- [50] Y. A. R. I. Mohamed ve E. F. El-Saadany, «Adaptive discrete-time grid-voltage sensorless interfacing scheme for grid-connected DG-inverters based on neural-network identification and deadbeat current regulation,» *IEEE Transactions on Power Electronics*, cilt 23, no. 1, pp. 308-321, 2008.
- [51] Y. A. R. I. Mohamed ve E. F. El-Saadany, «A robust natural-frame-based interfacing scheme for grid-connected distributed generation inverters,» *IEEE transactions on energy conversion*, cilt 26, no. 3, pp. 728-736, 2011.
- [52] C. Ma ve D. Huang, «Comparative study of PI controller and fuzzy logic controller for three-phase grid-connected inverter,» *In 2011 IEEE International Conference on Mechatronics and Automation*, pp. 2067-2071, August 2011.
- [53] W. Huang, M. Lu ve L. Zhang, «Survey on Microgrid Control Strategies,» *Procedia*, pp. 206-212, 2011.