SETSCI conference proceedings
SETSCI Conference Proceedings
9, 258-261, 2019

4th International Symposium on Innovative Approaches in Engineering and Natural Sciences
November 22-24, 2019, Samsun, Turkey

https://doi.org/10.36287/setsci.4.6.072
2687-5527/ © 2019 The Authors. Published by SETSCI
ISAS WINTER - 2019

Design of Droop Controller in Microgrid Architectures

Ayşe Bağıran[1+], Köksal Erentürk[2*]

[1]Electrical and Electronics Engineering/ College of Engineering, Atatürk University, Erzurum, Turkey
[2] Electrical 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, the droop control method which is widely used in the control of distributed power generation units in intelligent microgrids has been examined. The droop control method, which operates similarly to the primary frequency regulation system of the conventional power grid, does not have communication with other distributed generation units. In this study, the design steps of the droop controller which is designed in order that linearly considering the relationship between active power – frequency (P-f) and reactive power – voltage (Q-V) and regulating the deviations that occur have been examined in detail. The designed droop controller has been compared with voltage - current control and hierarchical control methods.

Keywords *– microgrid, droop 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]. Sistemin dağıtık yapısı nedeni ile evirici ve filtre arabirimlerinin yerel ölçümlere dayalı olarak kontrol edilmesi gerekmektedir. Akıllı mikroşebekelerdeki dağıtık enerji üretim birimlerinin denetiminde DROOP kontrol yöntemi yaygın olarak kullanılmaktadır.

[2], bir mikroşebekede merkezi olmayan paralel evirici kontrolü kavramı üzerine ilk çalışmayı yapmışlardır. Klasik güç sistemlerinde kullanılan merkezi olmayan kontrol tabanlı DROOP kontrol yöntemi, çıkış aktif gücüne göre frekans ayar noktasını ve çıkış reaktif gücüne göre gerilim büyüklüğünün ayar noktasını uyarlamaktadır [2]. [2], bu uyarlamayı yaparak DROOP kontrol yönteminin jeneratörlerde bu şekilde kullanımını başlatmışlardır. DROOP kontrolün bu şekilde kullanımı, dağıtık sistemin faz kilitleme çevrimi (PLL) kullanmaksızın çalıştırılabildiğini ve toplam yükün aktif ve reaktif güçlerinin çevirici hızına göre paylaşılabildiğini göstermiştir [2].

DROOP kontrol yönteminde 2 yaklaşım vardır. [3], hat empedansının aktif ve reaktif güç akışlarına olan etkisini analiz ve kompanze ederek gerilim ve frekans DROOP kontrollerini birbirinden ayırmak olan ilk yaklaşımı benimsemişlerdir. [3], ara bağlantı hattının farklı indüktans/rezistans (L/R) oranları için frekans ve gerilimin aktif ve reaktif güçlere olan etkisi incelemişlerdir. [3], hattın reaktans/rezistans (X/R) oranı bilgisine dayalı referans çerçeve dönüşümünü kullanarak frekans ve gerilim kontrol DROOP'larını birbirinden ayırma yöntemini önermişlerdir [3].

[4], hat empedansı konusunu ele almak için kapalı çevrim çevirici aracılığı ile çevirici çıkışında sanal empedans kullanmak olan ikinci yaklaşımı çalışmalarında benimsemişlerdir. [4], çalışmalarında sanal rezistif çıkış empedansını, çıkış geri besleme akımına göre çıkış referans gerilimini uyarlayarak oluşturmuşlardır. Sanal rezistif çıkış empedansı ile gerilim ve frekans DROOP denetleyicileri birbirinden ayrılmıştır [4].

Bu çalışmada, aktif güç ile frekans ve reaktif güç ile gerilim arasındaki ilişkiyi doğrusal olarak göz önüne alan ve oluşan sapmaları düzenlemek amacıyla tasarlanan bir DROOP denetleyicisinin tasarım aşamaları detaylı olarak incelenmiştir. Tasarlanan DROOP denetleyicisi gerilim-akım kontrolü ve hiyerarşik kontrol yöntemleri ile karşılaştırılmıştır.

II. MATERYAL VE YÖNTEM

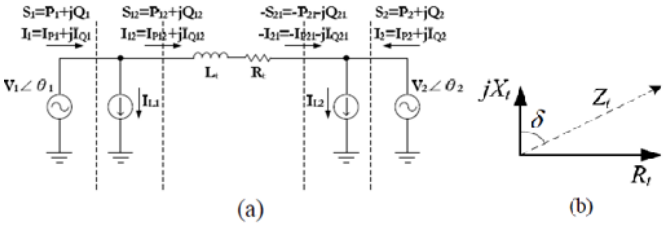
A. *DROOP Denetleyici Tasarımı*

DROOP kontrol yöntemi, geleneksel güç şebekesinin birincil frekans düzenleme prensibine benzer bir şekilde çalışmaktadır [5]. DROOP kontrol yönteminde, diğer dağıtık üretim kaynağı birimleri ile haberleşme bulunmamaktadır. Burada dağıtık üretim kaynağının çıkış reaktif gücü ile gerilimin genliği birbirleriyle doğrusal ilişkili iken çıkış aktif gücü ile frekansı da birbirleriyle doğrusal ilişkili olmaktadır. Ancak bu durum, regülasyonda sapmalara yol açmaktadır. Bu sapmalar, mikroşebeke frekansını elde etmeyi önlemektelerdir [5].

Şekil 1(a) basitleştirilmiş güç hattı devresini göstermektedir ve bu devrenin empedans karakteristiği Şekil 1(b)'de verilmektedir. Hat boyunca güç akışı denklem (1) ve (2) ile ifade edilmektedir.

$$P_{12} = \frac{X_t}{Z_t}\frac{V_1 V_2}{Z_t}\sin\theta_{12} + \frac{R_t}{Z_t}\frac{V_1(V_1 - V_2\cos\theta_{12})}{Z_t} \quad (1)$$

$$Q_{12} = -\frac{R_t}{Z_t}\frac{V_1 V_2}{Z_t}\sin\theta_{12} + \frac{X_t}{Z_t}\frac{V_1(V_1 - V_2\cos\theta_{12})}{Z_t} \quad (2)$$



Şekil 1. (a) Eş değer devre - (b) İletim hattı karakteristiği [6].

Güç hattı genellikle kayıpsız ve indüktif olarak modellenir ve bu $R_t = 0$ ($\delta = 0°$) 'da (1) ve (2) denklemlerinin özel durumu olarak düşünülebilmektedir. Bu özel durum güç akışı sonucu (3) ve (4) denklemlerinde verilmektedir. Buradaki denklemler klasik P-f DROOP ve Q-V DROOP kontrolü temellini oluşturmaktadır.

$$P_{12,\delta=0°} = \frac{X_t}{Z_t}\frac{V_1 V_2}{Z_t}\sin\theta_{12} \quad (3)$$

$$Q_{12,\delta=0°} = \frac{X_t}{Z_t}\frac{V_1(V_1 - V_2\cos\theta_{12})}{Z_t} \quad (4)$$

R-L hattında güç akışını kontrol etmek için (1) ve (1) numaralı denklemler (5) numaralı denkleme dönüştürülmektedir [3].

$$\begin{bmatrix} P'_{12} \\ Q'_{12} \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} \frac{V_1 V_2}{Z_t}\sin\theta_{12} \\ \frac{V_1(V_1 - V_2\cos\theta_{12})}{Z_t} \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} \frac{X_t}{Z_t} & -\frac{R_t}{Z_t} \\ \frac{R_t}{Z_t} & \frac{X_t}{Z_t} \end{bmatrix} \begin{bmatrix} P_{12} \\ Q_{12} \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} \cos\delta & -\sin\delta \\ \sin\delta & \cos\delta \end{bmatrix} \begin{bmatrix} P_{12} \\ Q_{12} \end{bmatrix} \quad (5)$$

(5) denkleminde uyarlanmış olan gerçek güç P'_{12} ve reaktif güç Q'_{12} , δ açısında döndürülerek türetilir. Burada δ açısı Şekil 1(b)'deki gibi hattın empedans üçgenine bağlıdır [6].

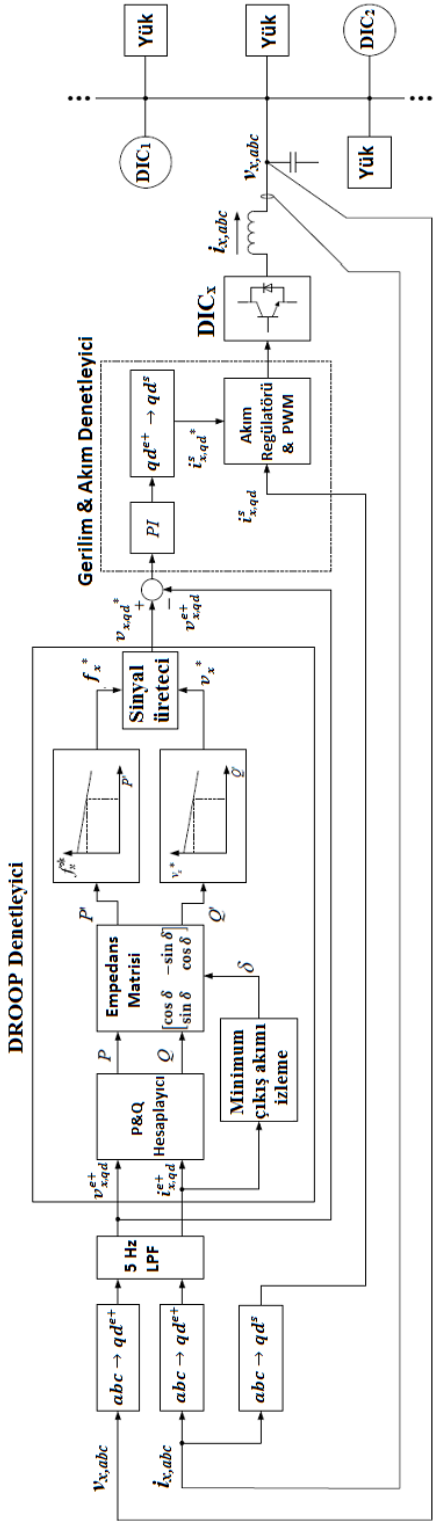
Uyarlanmış gerçek güç P'_{12} ve reaktif güç Q'_{12}, klasik P-f DROOP ve Q-V DROOP denetleyicilerin değişkenleri olarak kullanılmaktadır. (6) ve (7) numaralı denklemlerde, her dağıtık kaynak arabirim çeviricinin (DIC) çalışma frekansı f_x^* ve gerilim genliği V_x^* hesaplanmaktadır [6].

$$f_x^* = f_0 - m_x(P_{0x} - P'_x) \quad (6)$$

$$V_x^* = V_0 - n_x(Q_{0x} - Q'_x) \quad (7)$$

Denklem (6)'daki m_x frekans DROOP katsayısı, f_0 anma frekansı, P_{0x} anma gerçek güç kapasitesi iken denklem (7)'deki n_x gerilim DROOP katsayısı, V_0 anma faz gerilimi genliği ve Q_{0x} de anma reaktif güç kapasitesidir [6].

Şekil 2'deki blok diyagram, uyarlanmış P'-f DROOP ve Q'-V DROOP denetleyicilerinin çalışmasını göstermektedir. Geri besleme gerilim ve akımı, gerçek güç ve reaktif güç çıkışları hesaplanarak ölçülmektedir. Daha sonra (5) numaralı denkleme dayanan dönüşüm, güç hattının R-L yapısı hesaba katılarak, aktif ve reaktif güçlere uygulanmaktadır. P' ve Q' sonucu, denklem (6) ve (7)'den hesaplanmakta, P'-f DROOP ve Q'-V DROOP denetleyicilere uygulanmaktadır. Buradaki amaç, çalışma frekansı f_x^* ve gerilim büyüklüğü V_x^* değerlerini üretmektir. Sonra çalışma frekansı f_x^* ve gerilim büyüklüğü V_x^* tarafından, çeviricinin gerilim referansı $v_{x,qd}^*$, senkron referans çerçeve çalışmasında sentezlenmektedir. Senkron çerçeve gerilimi ve sabit çerçeve akımı denetleyicileri çeviricinin PWM komutlarını üretmek için kullanılmaktadır.



Şekil 2. DROOP denetleyici blok diyagramı [6].

B. Gerilim-akım Kontrolü, Hiyerarşik Kontrol ve DROOP Kontrolün Karşılaştırılması

[7], tek bir bağımsız dağıtık enerji üretim sisteminde kullanılan 3 fazlı PWM gerilim eviricileri için dijital kontrol stratejisini ele almışlar ve dengesiz yük durumunda performans hızını artırmak için bir servo mekanizma kontrol teorisini uygulamışlardır. Bu çalışmada, 3 fazlı PWM gerilim eviricileri için dijital kontrol stratejisi, doğrusal olmayan yük altında çıkış gerilimindeki istenmeyen gerilim harmoniklerinin ortadan kaldırılmasına olanak sağlamıştır [7]. Bu teknik, aşırı yüklenme ya da kısa devre şartları altında gerekli hızlı akım sınırlama yeteneği sağlayan ayrık zamanlı kayma kipli akım denetleyici ile birleştirilmiştir [7].

[8], dağıtık üretim sistemlerinin paralel çalışması için kullanılan gerilim-akım kontrol stratejisini ele almışlardır. Bu kontrol yönteminde, üretim sistemleri arasındaki düşük bant genişlikli veri haberleşmesi sinyallerini ve yerel olarak ölçülebilen geri besleme sinyallerini kullanmışlardır. Bu yöntem, DROOP kontrol ve ortalama güç kontrol yöntemlerinin birleşiminden elde edilmiştir. Ortalama güç kontrol yöntemi, gerilim ve akım ölçüm hatalarını daha hassas ölçmek için kullanılmıştır [8]. Ayrıca, yük akımlarının harmonik akım paylaşımı için harmonik DROOP kontrol şeması, [7]'deki gerilim ve akım kontrol algoritmasına dayanarak önerilmiştir [8].

[8], DROOP kontrolü ile ortalama güç kontrol yönteminin birleştirilmesi için dağıtık üretim birimleri arasındaki gerçek gücün (P) ve reaktif gücün (Q) net yük paylaşımını belirlemek amacı ile klasik DROOP yönteminin yeni kontrol algoritmasına uyarlanması gerektiğini önermişlerdir. Bu uyarlamayı yapmak için, DROOP yöntemi, ortalama güç kontrol yöntemi ve harmonik paylaşımlı kontrol yöntemlerinden oluşan kombinasyonu paralel bağlı eviricilerin yük paylaşımı için sunmuşlardır. Bu çalışmada, klasik DROOP yönteminde kontrol değişkeni olarak kullanılan frekans değişkeni yerine, faz açısı kontrol değişkeni olarak seçilmiştir. Burada, kararlı durumda gerçek güç sabit olduğundan ve frekans 60 *Hz* anma frekansında kaldığı için faz açısının değişim özelliği olmaması bir avantaj olmuştur. Frekansı kontrol değişkeni olarak kullanan klasik DROOP yönteminde kararlı durumda frekans anma değerinden sapabilmektedir. Ayrıca her dağıtık üretim kaynağı biriminin aktif güçleri ile ortalama gerçek güçler arasındaki fark, kararlı durum anında, ayrık zamanlı integratör etkisiyle, sıfıra eşittir. Sonuç olarak, dağıtık üretim kaynağı birimleri arasındaki aktif güç her dağıtık üretim kaynağı biriminin güç oranına göre düzgün bir şekilde paylaşılmaktadır [8].

[9], otonom ve şebeke bağlantılı modda çalışan dağıtık üretim sistemli mikro şebekelerde hiyerarşik kontrol mimarileri için araştırma çalışması sunmuşlardır. Burada en önemli hedef, ikincil kontrol seviyesinde merkezi kontrol sistemi işlevinin azaltılmasıdır. Merkezi olmayan kontrol için bazı yöntemler vardır; ancak bu yöntemler sistemin tamamına değil yalnızca bir bölümüne uygulanmaktadır. İkinci önemli hedef olarak merkezi olmayan kontrol için enerji depolama sistemlerinin genişletilme gereksinimi vardır. Ayrıca beklenmedik enerji kesintilerine sebep olabilen mikro şebekelerdeki en üst birim için bu gereksinimin giderilmesi gerekir [9].

Table 1. Mikro şebekeler için kontrol stratejileri

Kontrol stratejileri	**Uygulanma Yeri**	**Referans**
Gerilim-akım kontrolü	Dağıtık üretim sistemli mikro şebekeler	[7]
DROOP kontrol	Dağıtık üretim sistemli mikro şebekeler	[8]
Hiyerarşik kontrol	Otonom ve şebeke bağlantılı çalışan dağıtık üretimli mikro şebekeler	[9]

III. BULGULAR

Tasarlanan DROOP denetleyicisinin etkinliğini gösterebilmek için bir standartlaşma çalışması olan, [10] nolu referans göz önüne alınmış ve bulguları paylaşılmıştır.

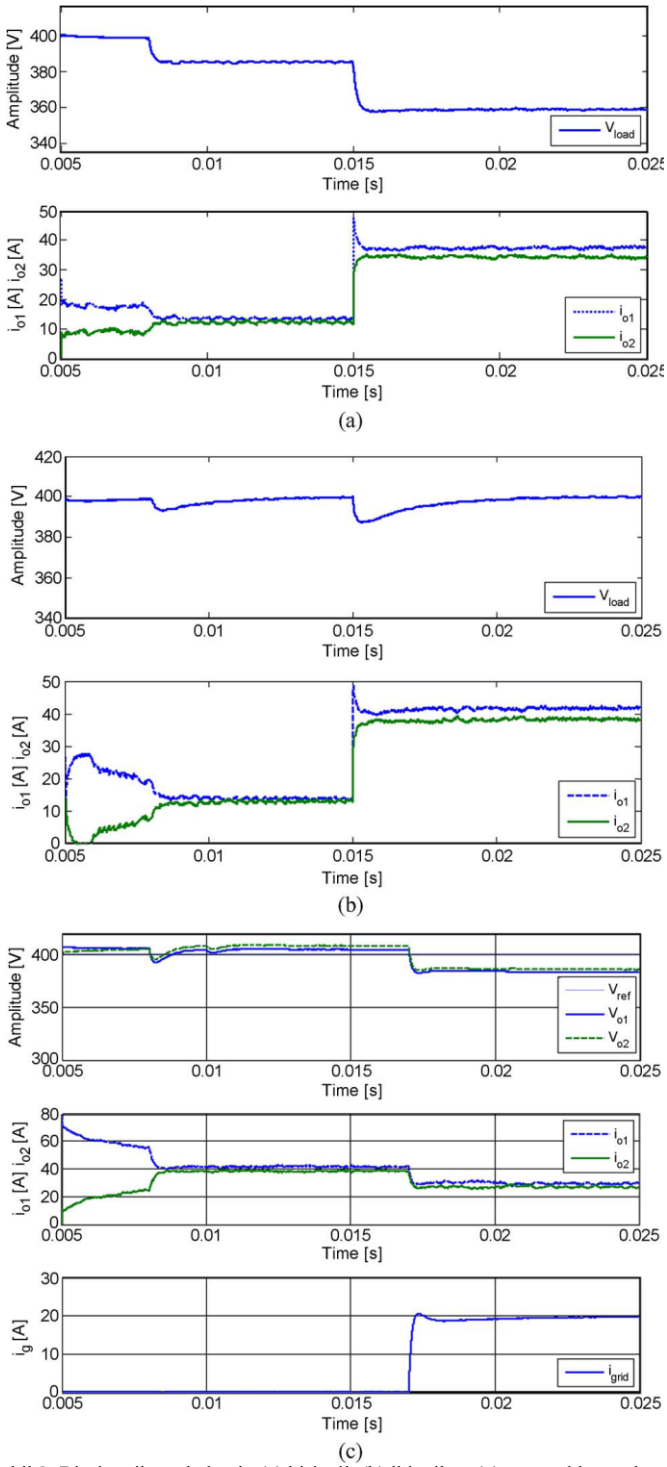
Bu çalışmada tasarlanan ve daha önce hiyerarşik kontrol yönteminin esnekliğini göstermek amacıyla bir dc mikroşebekedeki paralel bağlanmış iki adet dc/dc çeviriciye uygulanmış olan, [10]'daki DROOP denetleyicinin simülasyon sonuçları Şekil 3'te verilmiştir. Burada mikroşebeke gerilimi 40 V olarak seçmiştir. Gerilim ve akım döngüleri kullanarak kontrolü gerçekleştirilmiş ve sanal çıkış empedansını 2 **Ω** olarak seçilmiştir.

Şekil 3, DROOP kontrollü hiyerarşik kontrol yönteminin farklı seviyelerinin kullanımından türetilmiş bir dizi dalga formunu göstermektedir. Bu dalga formlarının hepsinde, 8. ms'de, birincil kontrol aktif edilmiş ve 15. ms'de de, ani bir basamak yükü eklenmiştir. Şekil 3 (a), birincil kontrolün yol açtığı gerilim sapmasını göstermektedir. Dikkat edilirse, akım artışının gerilimde daha çok düşme oluşturduğu görülmektedir.

Şekil 3 (b), birincil kontrolün yol açtığı gerilim sapmalarını kompanze eden ikincil kontrolün etkisini göstermektedir. Son olarak, Şekil 3 (c), mikroşebekeye bağlı bir dc kaynağına gelen / kaynaktan çıkan akım akışını regüle eden üçüncül kontrolün etkisini göstermektedir. 17. ms'de, istenen referans akımı enjekte etmek için, gerilim referansı içinde gerilim sapması meydana getiren bu denetleyici tarafından 20 A'lik bir akım referansı dc şebekeye verilmiştir.

IV. TARTIŞMA

DROOP kontrollü hiyerarşik kontrol yöntemi yaklaşımı kullanılarak, bir akıllı şebeke oluşturan çoklu mikroşebeke kümesi gerçekleştirilebilir. Bu anlamda, üçüncül kontrol, daha fazla mikroşebekeyi birbirine bağlamak için yüksek seviyeli ataletler sağlayabilir ve böylece kümenin birincil kontrolü olarak işlev görür. Bu anlamda, mikroşebekeler, yüksek ataletli bir gerilim kaynağı gibi davranacaktır. Bu nedenle, üçüncül kontrol seviyesi, frekansı ve genliği eski haline getirmek için, her mikroşebeke kümesine tüm referansları gönderebilir. Son olarak, üçüncül küme kontrolü, bu küme tarafından sağlanacak aktif ve reaktif gücü sabitleyebilir veya daha fazla kümeyi birbirine bağlamak için bir birincil kontrol gibi davranabilir. Sonuç olarak, kontrol hiyerarşisi gerektiği gibi ölçeklendirilebilir [10].



Şekil 3. Bir dc mikroşebekenin (a) birincil, (b) ikincil ve (c) üçüncül kontrol kullanarak elde edilen gerilim ve akım karakteristikleri [10].

V. SONUÇ

Bu çalışma çalışmada aktif güç ile frekans ve reaktif güç ile gerilim arasındaki ilişkiyi doğrusal olarak göz önüne alan ve oluşan sapmaları düzenlemek amacıyla tasarlanan bir DROOP denetleyicisinin tasarım aşamaları detaylı olarak incelenmiştir. Tasarlanan DROOP denetleyicisi gerilim-akım kontrolü ve hiyerarşik kontrol yöntemleri ile karşılaştırılmıştır. Tasarlanan denetleyicinin etkinliği daha önceden tasarlanmış olan literatürdeki bir çalışmanın bulguları ile desteklenmiştir.

KAYNAKÇA

[1] A. M. Sani and R. Iravani, "Potential-function based control of a microgrid in islanded and grid-connected modes," *IEEE Transactions on Power Systems*, vol. 25, no. 4, pp. 1883-1891, 2010.

[2] M. Chandorkar, D. Divan and R. Adapa, "Control of paralel connected inverters in standalone AC supply systems.," *IEEE Trans. Ind. Appl.*, vol. 29, no. 1, pp. 136-143, 1993.

[3] K. De Brabandere, B. Bolsens, J. Van den Keybus, A. Woyte, J. Driesen and R. Belmans, "A voltage and frequency droop control method for parallel inverters," *IEEE Transactions on power electronics*, vol. 22, no. 4, pp. 1107-1115, 2007.

[4] J. M. Guerrero, J. Matas, L. de Vicuña, M. Castilla and J. Miret, "Decentralized control for parallel operation of distributed generation inverters using resistive output impedance," *IEEE Trans. Ind. Electron*, vol. 54, no. 2, pp. 994-1004, 2007.

[5] W. Huang , M. Lu and L. Zhang, "Survey on Microgrid Control Strategies," *Procedia*, pp. 206-212, 2011.

[6] C. T. Lee, C. C. Chuang, C. C. Chu and P. T. Cheng, "Control strategies for distributed energy resources interface converters in low voltage microgrid," *Proc. ECCE*, pp. 2022-2029, 2009.

[7] M. N. Marwali, J. W. Jung and A. Keyhani, "Control of distributed generation systems - Part I: Voltage and Currents control," *IEEE Trans. Power Electron.*, vol. 19, no. 6, pp. 1541-1550, 2004.

[8] M. N. Marwali, J. W. Jung and A. Keyhani, "Control of distributed generation systems-Part II: Load sharing control," *IEEE Transactions on power electronics*, vol. 19, no. 6, pp. 1551-1561, 2004.

[9] O. Palizban and K. Kauhaniemi, "Hierarchical control structure in microgrids with distributed generation: Island and grid-connected mode," *Renewable and Sustainable Energy Reviews*, vol. 44, no. 2015, pp. 797-813, 2015.

[10] J. M. Guerrero, J. C. Vasquez, J. Matas, L. G. De Vicuña and M. Castilla, "Hierarchical control of droop-controlled AC and DC microgrids—A general approach toward standardization," *IEEE Transactions on industrial electronics*, vol. 58, no. 1, pp. 158-172, 2010.