

Genelleştirilmiş Aktif Olmayan Güç Teorisi ile Birleşik Seri-Paralel Aktif Filtre Sisteminin Denetimi

Control of a Combined Series-Parallel Active Filter System with Generalized Non-Active Power Theory

Mehmet Uçar¹, Şule Özdemir², Engin Özdemir³

^{1,2,3}Teknik Eğitim Fakültesi, Elektrik Eğitimi Bölümü
Kocaeli Üniversitesi

mucar@kocaeli.edu.tr, sozlaslan@kocaeli.edu.tr, eozdemir@kocaeli.edu.tr

Özet

Bu çalışmada, Birleşik Seri-Paralel Aktif Filtre (BSPAF) sistemi için genelleştirilmiş aktif olmayan güç teorisi temelli denetim stratejisi sunulmaktadır. BSPAF sistemi, kaynak gerilimi ve yük akımını birlikte kompanse etmek için ortak bir Doğru Akım (DA) hattına bağlı Seri Aktif Filtre (SAF) ve Paralel Aktif Filtre (PAF) birleşiminden oluşmaktadır. Önceki çalışmalarda PAF denetimi için uygulanmış olan genelleştirilmiş aktif olmayan güç teorisi, bu çalışmada BSPAF sistemi denetimi için kullanılmaktadır. Bu denetim stratejisinde anlık aktif ve aktif olmayan güçler a-b-c faz gerilimleri ve hat akımlarından doğrudan hesaplanmaktadır. Matlab/Simulink kullanılarak elde edilen simülasyon sonuçlarına göre önerilen BSPAF denetim sistemi, hem periyodik hem de sinüzoidal olmayan akım ve gerilim dalga şekli bozukluklarının yanı sıra harmonik, reaktif güç, dengesizlik ve nötr akımı kompanzasyonlarını da başarıyla yapmaktadır.

Abstract

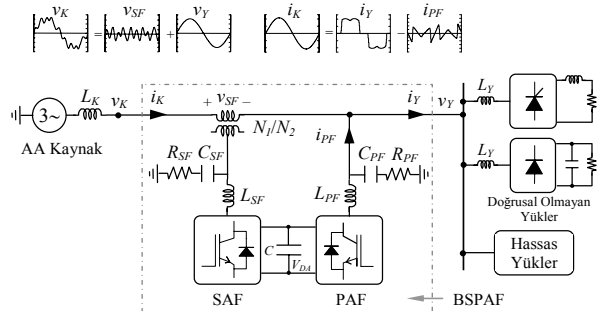
In this study, generalized non-active power theory based control strategy is presented for a Combined Series-Parallel Active Filter (CSPAF) system. The CSPAF system consists of a Series Active Filter (SAF) and a Parallel Active Filter (PAF) combination connected a common Direct Current (DC) link for simultaneous compensating the source voltage and the load current. The generalized non-active power theory was applied in previous studies for the PAF control, in this study this is used for the CSPAF system control. In this control strategy, instantaneous active and non-active powers are directly calculated from a-b-c phase voltages and line currents. In the simulation results by using the Matlab/Simulink, the proposed CSPAF control system performs successfully in both non-periodic and non-sinusoidal current and voltage waveform disturbances, in addition harmonic, reactive power, unbalance and neutral current compensation.

1. Giriş

Doğrusal olmayan yüklerin ve güç elektroniği dönüştürücülerinin yaygın kullanımıyla elektrik güç sistemlerinde hem sinüzoidal hem de periyodik olmayan

akımlar ve gerilimler artmaktadır. Genel olarak güç elektroniği dönüştürücülerini şebeke frekansının tam katlarında harmonik bileşenler üretmektedir. Fakat bazı durumlarda doğrudan frekans dönüştürücüler (cycloconverter), hat komutasyonlu 3-fazlı tristör temelli doğrultucular, ark fırınları ve kaynak makineleri gibi yüklerin akımları, güç sisteminin temel frekansından daha düşük veya daha yüksek bileşenler içerebilmektedir. Bu akımlar, güç dağıtım sisteminin empedansı ile etkileşime girerek ortak bağlantı noktasında (PCC) diğer yükleri de etkileyen gerilim dalga şekli bozmaktadır. Bu dalga şekilleri matematiksel olarak periyodik olarak görülse de gerilim veya akımların periyodu güç sisteminin temel bileşeninin periyoduna eşit olmadığı için periyodik olmayan dalga şekilleri olarak dikkate alınmaktadır [1], [2].

Bir çok çalışmada hem periyodik hem de sinüzoidal olmayan akımlardan daha çok periyodik olan ve sinüzoidal olmayan akımların kompanzasyonunun dikkate alındığı görülmektedir [3]. Genelleştirilmiş aktif olmayan güç teorisi, hem periyodik hem de sinüzoidal olmayan yük akım dalga şekillerinin kompanzasyonu amacıyla PAF'de ve statik kompanzasyonda uygulanmıştır [4], [5]. Bu çalışmada genelleştirilmiş aktif olmayan güç teorisi, BSPAF sistemi denetiminde kullanılarak, hem periyodik hem de sinüzoidal olmayan yük akım ve kaynak gerilim dalga şekillerinin ve böylece neredeyse tüm güç kalitesi problemlerinin düzeltilmesi amaçlanmaktadır. BSPAF sistemi, ortak bir DA hattına bağlı SAF ve PAF olmak üzere iki Gerilim Kaynaklı Evirici (GKE) güç devresinden oluşmaktadır [6], [7]. PAF akım, SAF ise gerilim ile ilgili güç kalitesi düzeltimi yapmaktadır. Şekil 1'de BSPAF sistemi blok diyagramı görülmektedir.



Şekil 1: BSPAF sistemi blok diyagramı.

2. Genelleştirilmiş Aktif Olmayan Güç Teorisi

Genelleştirilmiş aktif olmayan güç teorisi [8] Fryze'nin aktif olmayan güç/akım fikrine [9] dayanmakta ve [10]'da önerilen teorisinin genişletilmesidir [5]. 3-fazlı bir sistemde gerilim vektörü $v(t)$ ve akım vektörü $i(t)$,

$$v(t) = [v_1(t), v_2(t), v_3(t)]^T, \quad (1)$$

$$i(t) = [i_1(t), i_2(t), i_3(t)]^T. \quad (2)$$

Anlık güç $p(t)$ ve $[t-T_c, t]$ zaman aralığında ortalama güç $P(t)$ sırasıyla (3) ve (4) eşitliğinde verilmektedir.

$$p(t) = v^T(t)i(t) = \sum_{f=1}^3 v_f(t)i_{f}(t) \quad (3)$$

$$P(t) = \frac{1}{T_c} \int_{t-T_c}^t p(\tau) d\tau \quad (4)$$

Ortalama zaman aralığı (T_c) periyodik veya periyodik olmayan dalga şekillerinin kompanzasyonu amacına göre sıfırdan sonsuza isteğe bağlı olarak seçilebilmekte ve farklı T_c değerleri için aktif akım ve aktif olmayan akım farklı karakteristiklere sahip olmaktadır. T periyotlu periyodik bir sistemde T_c akım ve gerilim harmoniklerini kompanze etmek için normal olarak $T/2$ 'nin tam katları olarak seçilmektedir [8]. Anlık aktif akım $i_a(t)$ ve anlık aktif olmayan akım $i_{ao}(t)$ sırasıyla aşağıdaki eşitliklerdeki gibi belirlenmektedir.

$$i_a(t) = \frac{P(t)}{V_r^2(t)} v_r(t) \quad (5)$$

$$i_{ao}(t) = i(t) - i_a(t) \quad (6)$$

Referans gerilim $v_r(t)$ kompanzasyon amacına bağlı olarak seçilmekte ve etkin değeri $V_r(t)$ (7) eşitliğinde verilmektedir.

$$V_r(t) = \sqrt{\frac{1}{T_c} \int_{t-T_c}^t v_r^T(\tau) v_r(\tau) d\tau} \quad (7)$$

Anlık aktif olmayan güç $p(t)$ ve $[t-T_c, t]$ aralığında ortalama aktif olmayan güç $P(t)$ sırasıyla (8) ve (9) eşitliği ile tanımlanmaktadır.

$$p_{ao}(t) = v^T(t)i_{ao}(t) = \sum_{f=1}^3 v_f(t)i_{aof}(t) \quad (8)$$

$$P_{ao}(t) = \frac{1}{T_c} \int_{t-T_c}^t p_{ao}(\tau) d\tau \quad (9)$$

Genelleştirilmiş anlık aktif olmayan güç teorisinde yapılan tanımlamalar 3-fazlı temel sinüzoidal sistemler için kullanılan standart tanımlamalar ile benzerdir. Ayrıca ortalama zaman aralığı (T_c) ve referans gerilim $v_r(t)$ 'yi değiştirerek tek fazlı sistemler, sinüzoidal olmayan sistemler ve periyodik olmayan sistemler gibi diğer farklı durumlar için de geçerli olmaktadır [4]. Bu teoride tüm tanımlamalar anlık olarak verildiğinden gerçek zamanlı denetim için uygundur.

3. BSPAF Sisteminin Denetimi

Bu çalışmada, BSPAF yapısında iki adet ardı ardına bağlı 3-kollu 4-telli Gerilim Kaynaklı Evirici (GKE) ile akım ve gerilim denetimi için genelleştirilmiş aktif olmayan güç teorisi temelli denetim stratejisi ve histerezis bant anahtarlama tekniği kullanılmaktadır.

3.1. Gerilim denetim stratejisi

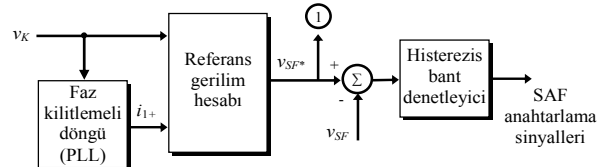
Harmonik içeren, dengesiz ve/veya periyodik olmayan kaynak gerilimleri (v_{Ka}, v_{Kb}, v_{Kc}) faz kilitlemeli döngü (PLL) devresine uygulanmakta ve çıkışta referans akım $i_r(t)$ olarak kullanılan temel pozitif sıralı kaynak gerilimleri ($v_{Ka1+}, v_{Kb1+}, v_{Kc1+}$) ile aynı fazda birim genliğe sahip temel pozitif sıralı akımlar ($i_{a1+}, i_{b1+}, i_{c1+}$) elde edilmektedir. Referans akımın etkin değeri $I_r(t)$ aşağıdaki eşitlikte verilmektedir.

$$I_r(t) = \sqrt{\frac{1}{T_c} \int_{t-T_c}^t i_r^T(\tau) i_r(\tau) d\tau} \quad (10)$$

Kaynak gerilimleri ve bu akımlardan (4) eşitliği ile ortalama güç değeri hesaplanmakta ve kaynak geriliminin temel pozitif sıralı bileşeninin genliğinde ve faz açısında istenilen sinüzoidal yük gerilimleri ($v_{Ya1+}, v_{Yb1+}, v_{Yc1+}$) (11) eşitliği ile elde edilmektedir. SAF tarafından enjekte edilecek kompanzasyon referans gerilimleri ($v_{SFa*}, v_{SFb*}, v_{SFc*}$), kaynak geriliminden istenilen yük gerilimi çıkarılarak (12) eşitliği ile belirlenmektedir. Referans gerilimler ile SAF gerilimleri karşılaştırılarak histerezis bant denetleyiciye uygulanmakta ve çıkışta SAF anahtarlama sinyalleri üretilmektedir. Şekil 2'de gerilim denetim blok diyagramı görülmektedir.

$$v_a(t) = \frac{P(t)}{I_r^2(t)} i_r(t) \quad (11)$$

$$v_{ao}(t) = v(t) - v_a(t) \quad (12)$$



Şekil 2: Gerilim denetim blok diyagramı.

3.2. Akım denetim stratejisi

Yük akımları (i_{Ya}, i_{Yb}, i_{Yc}) ve referans gerilim $v_r(t)$ olarak SAF gerilim denetim devresinde elde edilen temel pozitif sıralı gerilimler ($v_{Ya1+}, v_{Yb1+}, v_{Yc1+}$) ile (4) eşitliği kullanılarak $[t-T_c, t]$ aralığında ortalama güç değeri hesaplanmaktadır. Bu gerilimler ile aynı fazda istenilen sinüzoidal kaynak akımının aktif bileşenleri ($i_{Ka1+}, i_{Kb1+}, i_{Kc1+}$) (5) eşitliği ile elde edilmektedir. Yük akımından istenilen sinüzoidal kaynak akımı çıkarılarak yük akımının aktif olmayan bileşeni, (6) eşitliği ile belirlenmektedir. Ayrıca, BSPAF sisteminin güç kayıplarını ve geçici durumlarda DA gerilim dalgalanmalarını kompanze etmek için PAF ile kaynaktan (13) eşitliğinde verilen ilave aktif akım $i_{a}(t)$ çekilmektedir. Böylece PAF tarafından enjekte edilecek kompanzasyon referans akımları ($i_{PFa*}, i_{PFb*}, i_{PFc*}$),

5. Periyodik olmayan akım ve gerilim kompanzasyonu

Bu çalışmada, periyodu temel bileşenin periyodundan farklı periyodik olmayan akım ve gerilimler ele alınmaktadır. Ortalama zaman aralığı (T_c) değerinin periyodik olmayan akım ve gerilimlerin kompanzasyonunda seçimi açıklanmaktadır. Aşağıda farklı periyodik olmayan akım ve gerilimlerin kompanzasyonuna ait Matlab/Simulink simülasyon sonuçları verilmektedir.

5.1. Alt harmonik akım ve gerilim

Bu gruptaki periyodik olmayan akım ve gerilimler tekrarlı bir periyoda sahip olabilmekle birlikte alt harmoniklerinin (güç sisteminin temel bileşen periyodundan daha küçük periyotlu) periyodu temel bileşen periyodunun tam katı değildir. Güç elektroniği dönüştürücüleri tarafından üretilen akımlar bu grupta yer alabilmektedir. Eğer temel bileşen, alt harmonik bileşenin tek katı ise minimum ortalama zaman aralığı T_c ortak periyodun yarısı, çift katı ise ortak periyot değeri seçilerek alt harmonik bileşeni tamamen kompanze edilebilmektedir [8]. Bu çalışmada kullanılan 3-fazlı kaynak gerilimi ve yük akımı değerleri Tablo 3'de verilmektedir. Şekil 6'da alt harmonik akım ve gerilim kompanzasyonu simülasyon sonuçları görülmektedir. $T_c=2,5T$ seçildiğinde sırasıyla Şekil 6(b) ve Şekil 6(d)'de görüldüğü gibi alt harmonikler tamamıyla kompanze edilmektedir.

Tablo 3: 3-fazlı kaynak gerilimi ve yük akımı değerleri

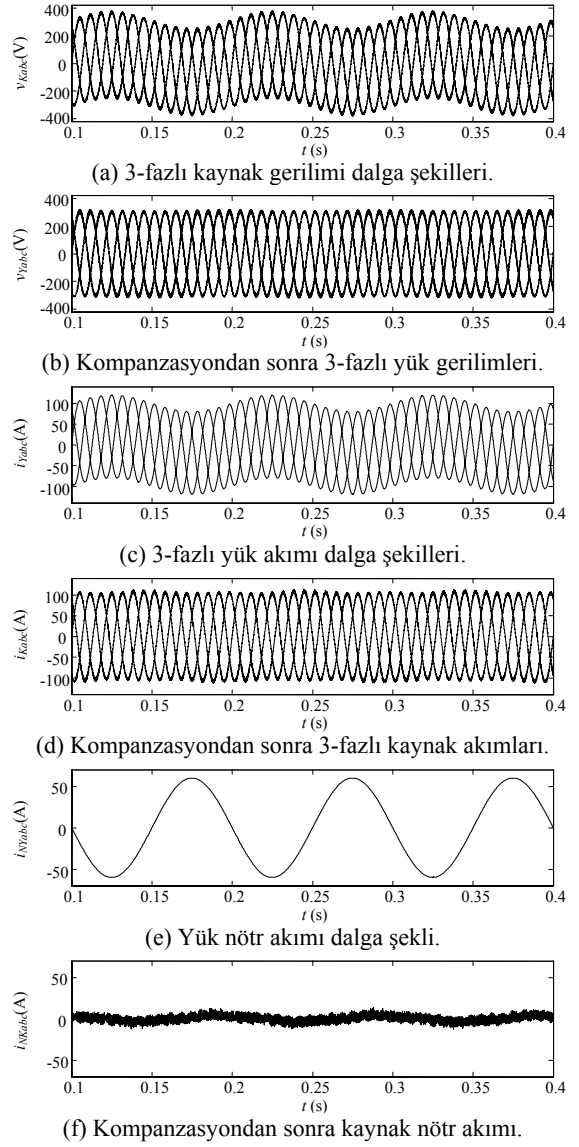
	Temel	Alt Harmonik
Frekans (Hz)	50	10
Akım	70 A	% 20
Gerilim	220 V	% 20

5.2. Stokastik periyodik olmayan akım ve gerilim

Ark fırınları, kaynaktan tipik olarak oldukça düzensiz akımlar çekmektedir. Teorik olarak periyodik olmayan bu tip yüklerin (güç sisteminin temel bileşen periyodundan daha büyük periyotlu) periyodu sonsuz olabilmektedir [11]. Bu sebeple T_c değeri $T/2$, T veya hatta T 'nin birkaç katı seçilerek stokastik (rastgele) periyodik olmayan akım ve gerilimler tamamen kompanze edilememektedir. Teorik olarak T_c sonsuza yaklaştıkça kaynak akımı ve yük gerilimi saf sinüs olmaktadır. Ancak T_c yeterince büyük seçildiğinde T_c 'yi daha fazla büyütmek Toplam Harmonik Bozulma (THB) değerine çok fazla etki etmemektedir. T_c 'nin büyük seçilmesiyle DA baradaki enerji depolama elemanlarının oranlarında dolayısıyla maliyet artışı nedeniyle T_c 'ye daha büyük değer vermeye gerek olmamaktadır [4]. Bu çalışmada, stokastik periyodik olmayan dalga şekilleri olarak dikkate alınan 3-fazlı kaynak gerilimi ve yük akımı bileşenleri Tablo 4'de verilmektedir. Şekil 7'de hem periyodik hem de periyodik olmayan bu akım ve gerilimlerin kompanzasyonuna ait simülasyon sonuçları gösterilmektedir.

Tablo 4: 3-fazlı kaynak gerilimi ve yük akımı bileşenleri

	Temel	Bileşen (%)				
Frekans (Hz)	50	104	117	134	147	250
Akım	35 A	30	40	20	20	50
Gerilim	220 V	7,5	10	5	5	12,5

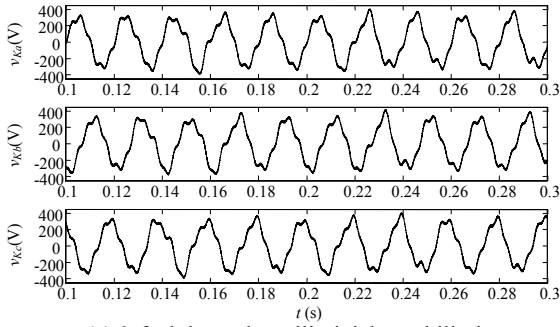


Şekil 6: Alt harmonik akım ve gerilim kompanzasyonu.

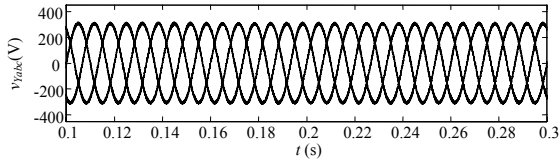
Şekil 7(b) ve Şekil 7(d)'de $T_c=5T$ ile kompanzasyondan sonra kaynak akımları ve yük gerilimlerinin sinüs dalga şeklinde olduğu ve nötr akımının kompanze edildiği görülmektedir. Simülasyonda kullanılan sistem parametreleri Tablo 5'de verilmektedir.

Tablo 5: Simülasyonda kullanılan sistem parametreleri

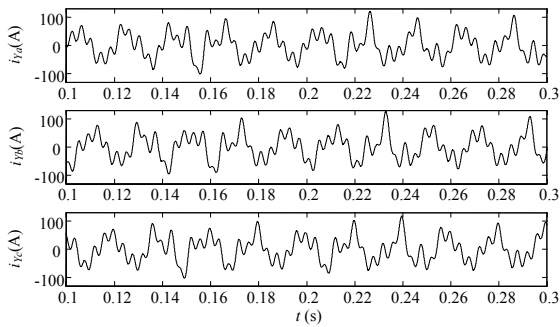
Güç Sistemi Parametreleri		
Bileşenler	V_{Kabc}, f_K, L_K	220V, 50Hz, 50 μ H
BSPAF Sistemi Parametreleri		
Seri transformatör	N_1/N_2	1
SAF AA filtre	L_{SF}, R_{SF}, C_{SF}	2mH, 2 Ω , 50 μ F
PAF AA filtre	L_{PF}, R_{PF}, C_{PF}	1mH, 2 Ω , 50 μ F
DA bara	V_{DA}, C_1, C_2	800V, 5600 μ F
Ort. anahtarlama	f_{SAF}, f_{PAF}	10kHz
Doğrultucu Yük Parametreleri		
3-fazlı tristörlü	L_{Y1}, L_{DA}, R_{DA1}	3mH, 20mH, 5 Ω
1-fazlı diyotlu	L_{Y2}, C_{DA}, R_{DA2}	3mH, 470 μ F, 15 Ω



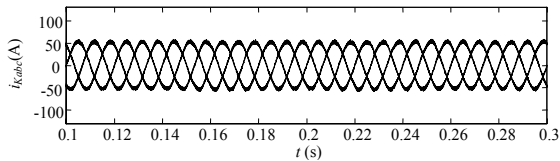
(a) 3-fazlı kaynak gerilimi dalga şekilleri.



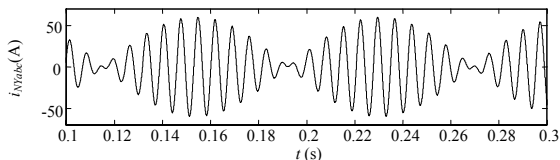
(b) Kompanzasyondan sonra 3-fazlı yük gerilimleri.



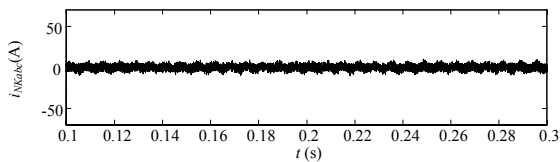
(c) 3-fazlı yük akımı dalga şekilleri.



(c) Kompanzasyondan sonra 3-fazlı kaynak akımları.



(d) Yük nötr akımı dalga şekli.



(e) Kompanzasyondan sonra kaynak nötr akımı.

Şekil 7: Stokastik periyodik olmayan akım ve gerilim kompanzasyonu.

6. Sonuçlar

Ark fırınları, kaynak makineleri, hat komutasıyonlu tristör temelli doğrultucular gibi doğrusal olmayan yükler kaynaktan dalga şekli ve genliği sürekli olarak değişen periyodik olmayan akımlar çekmektedir. Bu akımlar, güç dağıtım sisteminin empedansı ile etkileşime girmekte ve ortak bağlantı noktasında

diğer yükleri de etkileyen gerilim dalga şeklini bozmaktadır. Bu çalışmada 1-fazlı veya 3-fazlı, sinüzoidal veya sinüzoidal olmayan, periyodik veya periyodik olmayan, dengeli veya dengersiz sistemlerde geçerli olan genelleştirilmiş aktif olmayan güç teorisi açıklanmakta ve 3-fazlı BSPAF sisteminin denetimi sunulmaktadır. BSPAF sisteminin performansı Matlab/Simulink simülasyonu ile test edilmektedir. Simülasyon sonuçları, güç sistemlerinde varolan değişik tipte periyodik olmayan akım ve gerilimlerin kompanzasyonu için farklı ortalama zaman aralıkları (T_c) seçilerek aktif olmayan güç teorisinin uygulanabilirliğini göstermektedir. Ayrıca, yapılacak uygulama çalışmaları sonucunda da sistemin verimli ve uygulanabilir olduğu öngörülmektedir.

7. Teşekkür

Bu çalışma, TÜBİTAK tarafından EEEAG 108E083 numaralı proje ve Kocaeli Üniversitesi Bilimsel Araştırma Projeler Birimi Hızlı Destek projesi kapsamında desteklenmektedir.

8. Kaynaklar

- [1] Watanabe, E. H. and Aredes, M., "Compensation of Nonperiodic Currents Using The Instantaneous Power Theory", *IEEE Power Engineering Soc. Summer Meeting*, 2000, 994-999.
- [2] Czarnecki, L. S., "Non-Periodic Currents: Their Properties, Identification and Compensation Fundamentals", *IEEE Power Engineering Soc. Summer Meeting*, 2000, 971-976.
- [3] Tolbert, L. M. and Habetler, T. G., "Survey of Active and Non-Active Power Definition", *IEEE International Power Electronics Congress*, 2000.
- [4] Xu, Y., Tolbert, L. M., Chiasson, J. N., Campbell, J. B. and Peng, F. Z., "Active Filter Implementation Using a Generalized Nonactive Power Theory", *IEEE Industry Applications Conference*, 2006, 153-160.
- [5] Xu, Y., Tolbert, L. M., Chiasson, J. N., Campbell, J. B. and Peng, F. Z., "A Generalised Instantaneous Non-Active Power Theory for STATCOM", *Electric Power Applications, IET*, 853-861, 2007.
- [6] Fujita, H. and Akagi, H., "The Unified Power Quality Conditioner: The Integration of Series and Shunt Active Filters", *IEEE Trans. on Power Electr.*, 13 (2), 1998.
- [7] Aredes, M., "Active Power Line Conditioners", Ph.D. Dissertation, Technischen Universität, Berlin, 1996.
- [8] Xu, Y., Tolbert, L. M., Peng, F. Z., Chiasson, J. N. and Chen, J. "Compensation-Based Non-Active Power Definition", *IEEE Power Electron. Letter*, 1 (2), 45-50, 2003.
- [9] Fryze, S. "Active, Reactive, and Apparent Power in Non-Sinusoidal Systems", *Przeglad Elektrot.*, 7, 193-203 (in Polish), 1931.
- [10] Peng, F. Z., and Tolbert, L. M. "Compensation of Non-Active Current In Power Systems - Definitions from Compensation Standpoint", *IEEE Power Eng. Soc. Summer Meeting*, 2000, 983-987.
- [11] Tolbert, L. M., Xu, Y., Chen, J., Peng, F. Z., Chiasson, J. N., "Compensation of Irregular Currents with Active Filters," *IEEE Power Engineering Society General Meeting*, 2003, 1278-1283.