

DSP KONTROLLÜ PARALEL AKTİF GÜÇ FİLTRESİ İLE HARMONİK VE REAKTİF GÜÇ KOMPANZASYONU

Mehmet UÇAR¹

Metin KESLER²

Engin ÖZDEMİR³

^{1,2,3}Elektrik Eğitimi Bölümü

Teknik Eğitim Fakültesi

Kocaeli Üniversitesi, 41100, İzmit, Kocaeli

¹e-posta: mucar@kou.edu.tr

²e-posta: metinkesler@kou.edu.tr

³e-posta: eozdemir@kou.edu.tr

Anahtar sözcükler: Anlık Güç Teorisi, Aktif Güç Filtresi, Sayısal İşaret İşlemci (DSP)

ABSTRACT

This paper deals with a process of simulation and implementation of a control scheme for a parallel three-phase active power filter (APF) to eliminate harmonics and to compensate the reactive power of a nonlinear load. A three-phase voltage source inverter bridge with a dc bus capacitor is used as an APF. A hysteresis based PWM current control is employed to derive switching signals to the APF. A three-phase diode rectifier with resistive loading is employed as a non-linear load. APF is simulated using Matlab/Simulink Power System Toolbox. Control algorithm of the proposed APF based on the control strategy following from the instantaneous reactive power theory is implemented in the fixed-point DSP ADMC-331. Prototype of the three-phase active power filter was build and tested in the laboratory. Some illustrative and experimental results are also presented in the paper.

1. GİRİŞ

Doğrusal olmayan yükler (doğrultucular, eviriciler, hız kontrol cihazları, kesintisiz güç kaynakları, ark fırınları, manyetik devrelerin doyması, demir çekirdekli aygıtların doyma bölgesinde çalışmaları vb.) akımın dalga şeklinin bozulmasına dolayısıyla harmoniklerin üretilmesine yol açarlar ve elektrik şebekesini kirletirler. Enerji kirliliğini oluşturan başlıca etmenler reaktif güç ve akım-gerilim harmonikleridir. Reaktif güç tüketimini oluşturan reaktif akım, iletim hatlarından ve kablolardan geçer ve bir kayıp oluşturur. Bu açıdan tesislerde daha hassas reaktif güç kontrolü gerekmektedir.

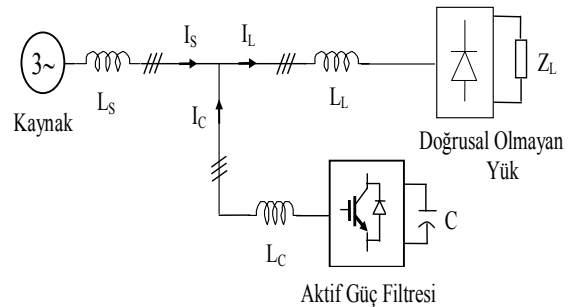
Akım harmonikleri filtrelenerek kontrol edilmedikleri takdirde gerilim harmoniklerine neden olmakta, toplam harmonik bozulma değerinin kontrol edilmediği durumlarda güç faktörünün bozulmasına ve kontrolünün zorlaşmasına, kondansatörlerin

ömürünün azalmasına, enerji taşıyıcı kabloların ısınmasına, hat sonlarındaki gerilimlerin düşmesine, zaman zaman tesislerde ve özellikle kompanzasyon baralarında rezonans durumu meydana getirmekte, bu da şalter açması, kondansatör patlaması gibi istemeyen sonuçlar doğurabilmektedir. Gerilim harmoniklerinin miktarı, yük tarafından çekilmekte olan harmonik akımların miktarına ve kaynağın empedansına bağlıdır.

Pasif LC filtreler yükün güç faktörünü artırmak ve harmonik akımların akışını elimine etmek için oldukça yaygın bir şekilde kullanılmaktadır. Fakat pasif filtreler, büyük fiziksel boyutları, ayar problemleri ve rezonans gibi bir çok dezavantajlara sahiptir. Bunun aksine paralel aktif güç filtreleri (AGF) reaktif güç ve harmonik akım problemini çözmekte pasif filtrelerden daha iyi bir çözüm olmaktadır.

2. PARALEL AKTİF GÜÇ FİLTRESİ

Paralel aktif güç filtresi doğrusal olmayan yüke paralel bağlanmış akım kaynağı olarak çalışır. Şekil 1'de görüldüğü gibi AGF, akım denetimi sağlayabilmek için DA tarafına bir kondansatör bağlanmış üç fazlı gerilim kaynaklı evirici devresinden meydana gelmektedir.



Şekil 1. Paralel aktif güç filtresi

AGF'nin temel fonksiyonu şebekeden sinüzoidal akımlar çekilmesini sağlamak ve yükün reaktif güç ihtiyacını karşılayıp harmonikleri yok etmektir. AGF, doğrusal olmayan yükün çektiği harmonik ve reaktif akımlara ters fazda ve eşit genlikte akım üretecek şekilde kontrol edilmektedir. Böylece kaynak akımı sinüzoidal olmakta ve kaynak gerilimiyle aynı faza getirilmektedir.

3. ANLIK GÜÇ TEORİSİ TABANLI KONTROL STRATEJİSİ

Akagi [1], 1983 yılında, anlık güç teorisi veya p-q teorisi olarak da bilinen "Üç Fazlı Devrelerde Genelleştirilmiş Anlık Reaktif Güç Teorisi"ni önermiştir. Bu teori, nötr hatlı veya hatsız üç fazlı güç sistemindeki anlık değerlere bağlıdır ve genel akım ve gerilim dalga şekillerinde olduğu gibi kararlı hal ve geçici rejim işletiminde de geçerlidir.

p-q teorisi, (1) ve (2) eşitliğinde görüldüğü gibi a-b-c koordinatlarındaki üç fazlı akım ve gerilimlerin, α - β -0 koordinatlarına cebrik dönüşümünden (Clarke dönüşümü) ve sonrasında anlık güç bileşenlerinin hesaplanmasından oluşmaktadır [2].

$$\begin{bmatrix} v_0 \\ v_\alpha \\ v_\beta \end{bmatrix} = \sqrt{\frac{2}{3}} \begin{bmatrix} 1/\sqrt{2} & 1/\sqrt{2} & 1/\sqrt{2} \\ 1 & -1/2 & -1/2 \\ 0 & \sqrt{3}/2 & -\sqrt{3}/2 \end{bmatrix} \begin{bmatrix} v_a \\ v_b \\ v_c \end{bmatrix} \quad (1)$$

$$\begin{bmatrix} i_0 \\ i_\alpha \\ i_\beta \end{bmatrix} = \sqrt{\frac{2}{3}} \begin{bmatrix} 1/\sqrt{2} & 1/\sqrt{2} & 1/\sqrt{2} \\ 1 & -1/2 & -1/2 \\ 0 & \sqrt{3}/2 & -\sqrt{3}/2 \end{bmatrix} \begin{bmatrix} i_a \\ i_b \\ i_c \end{bmatrix} \quad (2)$$

Kaynak gerilimleri ve yük akımları dengeli olduğu için gerilim ve akımın sıfır sıralı bileşenleri sıfır olmaktadır. Bu nedenle sonraki eşitliklerde sıfır dizi bileşenler kullanılmamaktadır. Yükün anlık gerçek ve sanal güç bileşenleri, yük akımlarının ve faz-nötr gerilimlerinin α - β koordinatlarındaki karşılıklarıyla (3) eşitliğinde görülmektedir.

$$\begin{bmatrix} p \\ q \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} v_\alpha & v_\beta \\ -v_\beta & v_\alpha \end{bmatrix} \begin{bmatrix} i_\alpha \\ i_\beta \end{bmatrix} \quad (3)$$

(3) eşitliğinden α - β eksenlerindeki akım bileşenleri, anlık gerçek ve sanal güç bileşenleri ile hat gerilimleri cinsinden aşağıdaki gibi ifade edilmektedir.

$$\begin{bmatrix} i_\alpha \\ i_\beta \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} v_\alpha & v_\beta \\ -v_\beta & v_\alpha \end{bmatrix}^{-1} \begin{bmatrix} p \\ q \end{bmatrix} = \frac{1}{v_\alpha^2 + v_\beta^2} \begin{bmatrix} v_\alpha & -v_\beta \\ v_\beta & v_\alpha \end{bmatrix} \begin{bmatrix} p \\ q \end{bmatrix} \quad (4)$$

Anlık gerçek ve sanal güç AA ve DA bileşenler içermektedir ve aşağıdaki gibi ifade edilmektedir.

$$\begin{aligned} p &= \bar{p} + \tilde{p} \\ q &= \bar{q} + \tilde{q} \end{aligned} \quad (5)$$

p ve q'nun DA bileşenleri (\bar{p} ve \bar{q}), yük akımının pozitif sıralı bileşeninden oluşmaktadır. p ve q'nun AA bileşenleri (\tilde{p} ve \tilde{q}), yük akımının harmonik ve negatif sıralı bileşenlerinden oluşmaktadır [3].

Aynı zamanda hem harmonik hem de reaktif güç kompanzasyonu yapmak için sanal gücün DA ve AA bileşenleri ile gerçek gücün AA bileşeni kullanılarak (6) eşitliğindeki gibi referans akımlar hesaplanmaktadır.

$$\begin{bmatrix} i_{c\alpha}^* \\ i_{c\beta}^* \end{bmatrix} = \frac{1}{v_\alpha^2 + v_\beta^2} \begin{bmatrix} v_\alpha & -v_\beta \\ v_\beta & v_\alpha \end{bmatrix} \begin{bmatrix} -\tilde{p} \\ -q \end{bmatrix} \quad (6)$$

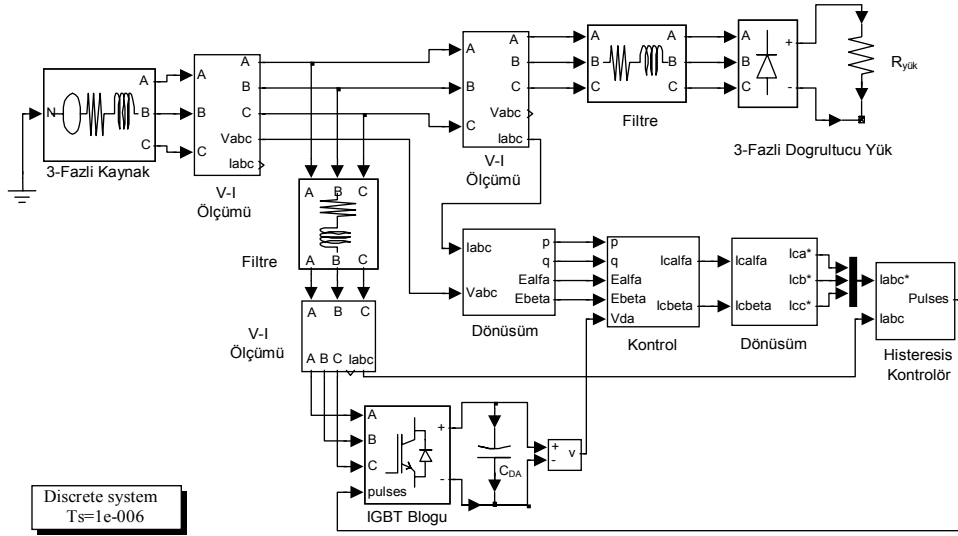
$i_{c\alpha}^*$ ve $i_{c\beta}^*$, α - β koordinatlarında yükün harmonik ve reaktif akımlarına karşılık gelen ve AGF'nin üretmesi gereken akımlardır. Bu akımlar üç fazlı sisteme (7) eşitliği kullanılarak çevrilmektedir.

$$\begin{bmatrix} i_{ca}^* \\ i_{cb}^* \\ i_{cc}^* \end{bmatrix} = \sqrt{\frac{2}{3}} \begin{bmatrix} 1/\sqrt{2} & 1 & 0 \\ 1/\sqrt{2} & -1/2 & \sqrt{3}/2 \\ 1/\sqrt{2} & -1/2 & -\sqrt{3}/2 \end{bmatrix} \begin{bmatrix} i_{c\alpha}^* \\ i_{c\beta}^* \end{bmatrix} \quad (7)$$

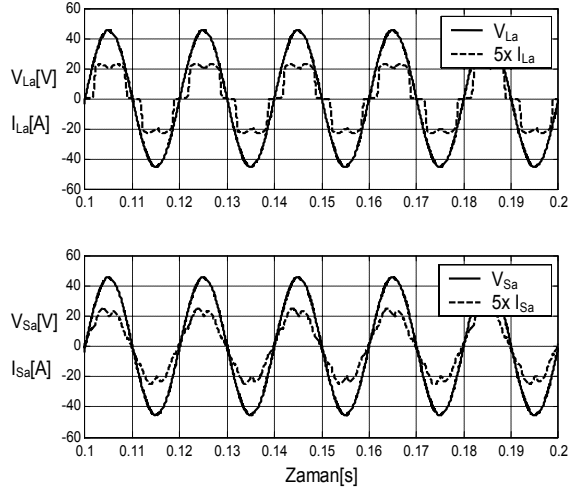
Böylece üç fazlı güç sisteminde yükün ürettiği harmonik ve reaktif akımları yok edecek i_{ca}^* , i_{cb}^* ve i_{cc}^* referans akımları elde edilmektedir.

4. SİMÜLASYON SONUÇLARI

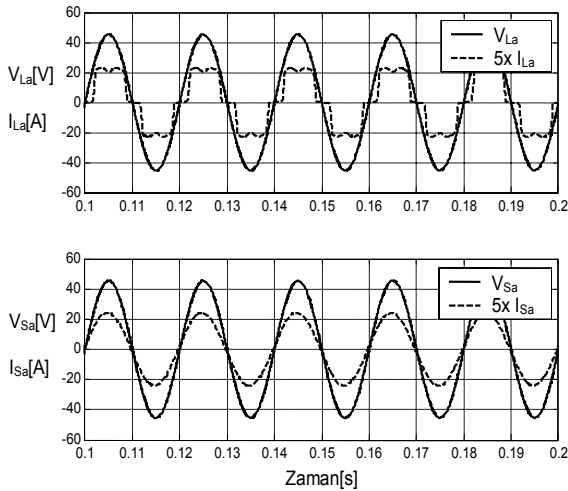
Şekil 2'de AGF sisteminin Matlab/Simulink simülasyon blok diyagramı görülmektedir. Simülasyon sonuçlarında akım değişiminin daha açık görülmesi amacıyla 5 kat büyütülmektedir. Sadece \bar{q} ve \tilde{q} kompanzasyonu yapıldığı durumda yükten ve kaynaktan çekilen akım ve gerilim değişimi Şekil 3'de görülmektedir. Kompanzasyondan sonraki üç faz kaynak akımları ve kaynak gerilimleri aynı fazdadır fakat \tilde{p} filtrelenmediği için şebekeden çekilen akım üzerindeki harmonikler açıkça görülmektedir. Hem harmonik (\tilde{q} ve \tilde{p}) hem de reaktif güç kompanzasyonu (\bar{q}) yapıldığı durumda yükten ve kaynaktan çekilen akım ve gerilim değişimi Şekil 4'de görülmektedir. Bu durumda şebekeden çekilen üç faz kaynak akımları dengeli sinüzoidal ve kaynak gerilimleri ile aynı fazdadır. Simülasyonda kullanılan sistem parametreleri Tablo 1'de verilmektedir.



Şekil 2. AGF sisteminin Matlab/Simulink simülasyon blok diyagramı



Şekil 3. \bar{q} ve \tilde{q} filtrelenmesi simülasyon sonuçları



Şekil 4. \bar{q} , \tilde{q} ve \tilde{p} filtrelenmesi simülasyon sonuçları

Tablo 1. Simülasyonda kullanılan sistem parametreleri

Parametre		Değeri
Kaynak	Gerilimi (V_S)	50V/Faz-Faz
	Frekans (f)	50Hz
	Empedansı (R_S, L_S)	10m Ω 0.2mH/Faz
AGF	DA bara gerilimi (V_{DA})	100V
	DA kondansatör (C_{DA})	1000 μ F
	Anahtarlama frekansı (f_S)	10KHz/Ortalama
	Filtre bobini (R_F, L_F)	0.1 Ω , 2.5mH/Faz
Yük	Yük bobini (R_L, L_L)	1 Ω , 0.45mH/Faz
	DA tarafı yük ($R_{Yük}$)	15.2 Ω

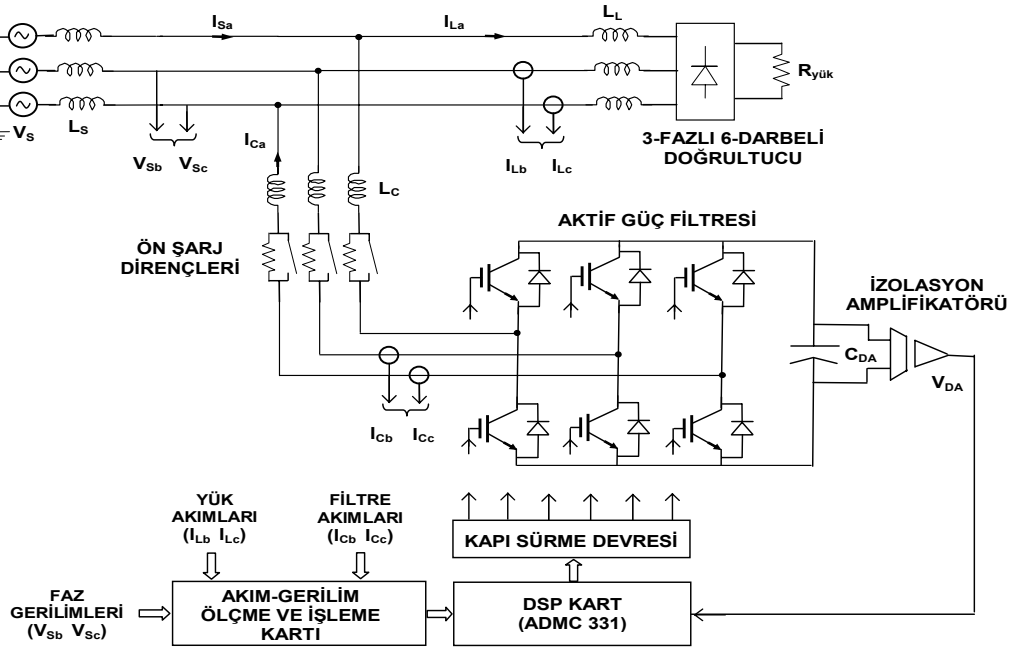
5. DENEYSEL SONUÇLAR

AGF'nin laboratuvar prototipi test devre şekli ve fotoğrafı Şekil 5 ve Şekil 6'da görülmektedir. AGF deneysel düzeneğiyle yapılan ilk çalışmada anlık sanal gücün, DA ve AA bileşenleri kompanse edilmeye çalışılmaktadır. AGF prototipi parametreleri aşağıda verilmektedir.

Kaynak: Laboratuvar da AGF deneysel düzeneğini beslemek için Δ -Y bir düşürücü transformatör kullanılmaktadır. Kaynak gerilimi $V_S=50$ V hat-hat (rms), 50Hz ve transformatörün endüktansı $L_S \approx 3$ mH'dir.

Yük: Omik yüklü 6-darbeli kontrolsüz doğrultucudan oluşmaktadır. $R_{Yük}=15.2\Omega$, 330VA 3.5A (rms). Giriş filtre endüktansı $L_L=0.45$ mH'dir

Akım ve gerilim ölçümü: AGF sisteminde kullanılan üç fazlı kaynak ve yük dengeli olduğundan kaynak gerilimi, yük ve filtre akımları için iki fazın ölçümü yeterli bulunmaktadır. Yük ve filtre akımlarının ölçülmesinde elektrik sistemden galvanik olarak izolasyon sağlayan LEM LA 55-P (1:1000) hall etkili akım sensörleri kullanılmaktadır.



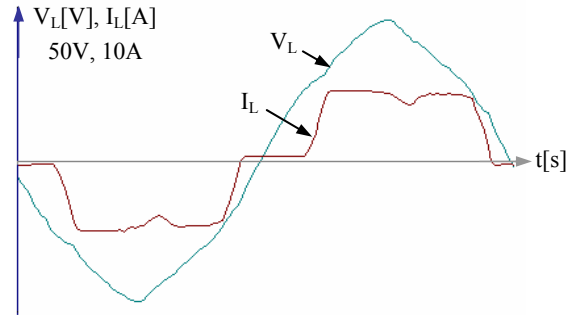
Şekil 5. AGF laboratuvar prototipi test devre şekli

Kaynak gerilimlerinin ölçülmesinde ise düşürücü gerilim transformatörleri kullanılmaktadır. Ölçüm katlarından gelen akım ve gerilimler, işlemsel yükselticiler kullanılarak tasarlanan örnekleme kartları ile DSP kartının analog ve sayısal girişleri için hazırlanmaktadır.

Kontrolör: Kontrol devresinde Analog Devices ADCM 331 sabit nokta sayısal işaret işlemci kullanılmaktadır.

AGF: Gerilim kaynaklı evirici, Semikron SKM75GD123D IGBT modülü ve SKHI 61 IGBT sürüciden oluşan güç katından meydana gelmektedir. Evirici PWM anahtarlama frekansı ortalama 3kHz'dir. AA giriş filtre endüktansı $L_F=2.5\text{mH}$, DA bara gerilimi $V_{DA}=100\text{V}$, DA bara kondansatörü $C_{DA}=1000\mu\text{F}$ 'tır.

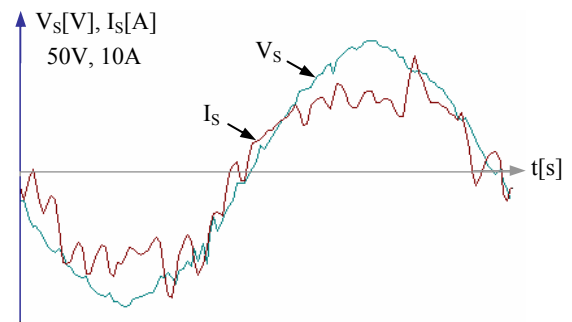
DeneySEL çalışmalar sonucunda, harmonik analizörden alınan yük akım ve gerilim değişimi Şekil 7'de, \bar{q} ve \tilde{q} filtrelenmesi durumunda akım ve gerilim değişimi Şekil 8'de görülmektedir.



Şekil 7. Yük akım ve gerilim değişimi



Şekil 6. AGF laboratuvar prototipi fotoğrafı



Şekil 8. \bar{q} ve \tilde{q} filtrelenmesi durumunda akım ve gerilim değişimi

6. SONUÇ

Bu çalışmada, harmonik akım ve reaktif güç kompanzasyonunda kullanılan paralel aktif güç filtresi uygulaması açıklanmaktadır. Üç fazlı AGF prototipi laboratuvarında kurulup test edilerek deneysel çalışma sonuçları sunulmaktadır. Kaynak olarak kullanılan Δ -Y düşürücü transformatörün kaynak empedansının ($\approx 3\text{mH}$) ve DSP'nin hızından (26MHz) kaynaklanan yazılım döngü zamanının ($\approx 200\mu\text{s}$) çok yüksek olması nedeniyle deneysel sonuçlarda görüldüğü gibi \bar{q} ve \tilde{q} filtrelenmesi tam anlamıyla yapılamamaktadır. Kaynak empedansı ve yazılım gecikmeleri azaltıldığında simülasyon sonuçlarında görüldüğü gibi (\bar{q} ve \tilde{q}) ve hatta (\bar{q} , \tilde{q} ve \tilde{p}) filtrelenmesi başarıyla yapılabilmektedir.

Bu amaçla ileriki çalışmalarda kaynak empedansının etkisini azaltmak amacıyla sistemin doğrudan alçak gerilim hattına bağlanması, yazılım döngü zamanının optimizasyonu veya daha hızlı bir DSP kullanarak hem harmonik akım hem de reaktif güç kompanzasyonu yapılması planlanmaktadır. Ayrıca kaynak empedansı nedeniyle anahtarlama sonucunda meydana gelen harmonik bozulunun azaltılması amacıyla AGF'nin AA tarafına küçük boyutlu sabit bir LC filtre konulması önerilmektedir.

KAYNAKLAR

- [1] Akagi H., Kanazawa Y., Nabae A., Instantaneous Reactive Power Compensators Comprising Switching Devices without Energy Storage Elements, IEEE TRANS. IND. APPL., Vol. IA-20, pp. 625-630, 1984.
- [2] Afonso J., vd., Active Filters with Control Based on the p-q Theory, IEEE INDUSTRIAL ELECTRONICS SOCIETY NEWSLETTER, Vol. 47, No. 3, pp. 5-11, 2000.
- [3] Peng F. Z., G. Ott W., and Adams D. J., Harmonic and Reactive Power Compensation Based on the Generalized Instantaneous Reactive Power Theory for 3-phase 4-Wire Systems, IEEE TRANSACTIONS ON POWER ELECTRONICS, Vol. 13, No. 6, pp. 1174-1181, 1998.
- [4] Ingram D. M. E., Round S. D., A Fully Digital Hysteresis Current Controller for an Active Power Filter, INT. J. OF ELECTRONICS, Vol. 86, No. 10, pp. 1217-32, 1999.
- [5] Dabrowski A., Sozanski, K., Control Circuit for Active Power Harmonic Compensation Filter in Power Systems-Realized with Digital Signal Processor TMS320C50, THIRD EUROPEAN DSP EDU. And RESEARCH CONF., TI, Paris, pp. PP.2.4.1-7, 2000.