

# DSP TABANLI PARALEL AKTİF GÜÇ FİLTRESİNİN TASARIMI VE UYGULANMASI

Mehmet UÇAR<sup>1</sup>

Metin KESLER<sup>2</sup>

Engin ÖZDEMİR<sup>3</sup>

<sup>1,2,3</sup>Elektrik Eğitimi Bölümü

Teknik Eğitim Fakültesi

Kocaeli Üniversitesi, 41380, Umuttepe, Kocaeli

<sup>1</sup>e-posta: mucar@kou.edu.tr

<sup>2</sup>e-posta: metinkesler@kou.edu.tr

<sup>3</sup>e-posta: eozdemir@kou.edu.tr

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

## ABSTRACT

*In this study, design and implementation of TMS320F2812 DSP based shunt Active Power Filter (APF) is realized and simulated using PSIM software. The instantaneous reactive power theory based control technique is implemented using C programming language in TIs C2000 Code Composer Studio (CCS) Integrated Development Environment (IDE). A three-phase voltage source inverter bridge with a dc bus capacitor is used as an APF. Three hysteresis band current controllers are employed to derive switching signals to the shunt APF. A three-phase half controlled rectifier with resistive-inductive loading is employed as a non-linear load. Experimental prototype of the three-phase APF was build and tested in the laboratory. Simulation and experimental results are also presented in the paper.*

## 1. GİRİŞ

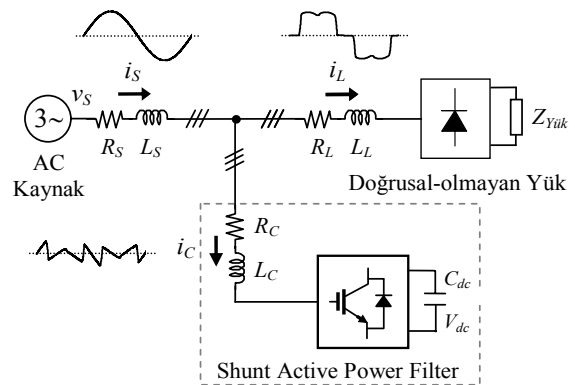
Son yıllarda, modern güç elektroniği cihazlarının kullanımı hızla artmaktadır. Doğrusal olmayan bu tip yükler akımın dalga şeklinin bozulmasına dolayısıyla harmoniklerin üretilmesine yol açmakta ve elektrik şebekesini kirletmektedir. Harmonikler, şebekede düşük güç faktörüne, elektromanyetik cihazlarda ısınmaya, mekanik cihazlarda titreşimli ve gürültülü çalışmaya, verimin düşmesine ve kayıplara neden olmaktadır.

Geleneksel pasif LC filtreler, harmonik akımları filtrelemek ve güç kondansatörleri yükün güç faktörünü artırmak amacıyla oldukça yaygın bir şekilde kullanılmaktadır. Fakat pasif filtreler, büyük fiziksel boyutları, ayar problemleri ve seri/paralel rezonans gibi bir çok dezavantajlara sahiptir. Bu çalışmada, doğrusal olmayan yüklerde harmonik akımların filtrelenmesi ve reaktif güç kompanzasyonu için paralel Aktif Güç Filtresi (AGF) önerilmektedir [1-4].

Bu çalışmada, paralel AGF denetim sisteminin PSIM yazılımı ile simülasyonu yapılmakta ve TMS320F2812 DSP kullanılarak laboratuvar prototipi gerçekleştirilmektedir. Geliştirilen paralel AGF'de anlık güç teorisi tabanlı denetim algoritması ve histeresis bant anahtarlama tekniği uygulanmaktadır.

## 2. PARALEL AGF VE DENETİM STRATEJİSİ

Paralel AGF, Şekil 1'de görüldüğü gibi doğrusal olmayan yüke paralel bağlanmış akım kaynağı olarak çalışmaktadır ve akım denetimi sağlayabilmek için bir DA kondansatörü ile Gerilim Kaynaklı Evirici (GKE) devresinden oluşmaktadır. Paralel AGF'nin temel fonksiyonu yükün harmoniklerini filtreleyerek ve reaktif güç ihtiyacını karşılayarak şebekeden sinüzoidal akımlar çekilmesini sağlamaktır. Paralel AGF, doğrusal olmayan yükün çektiği harmonik ve reaktif akımlara eşit genlikte ve ters fazda akım üretecek şekilde kontrol edilmektedir. Böylece kaynak akımı sinüzoidal olmakta ve kaynak gerilimiyle aynı faza getirilmektedir.



Şekil 1. Paralel AGF temel çalışma prensibi.

Bu çalışmada, paralel AGF'nin gerçek zamanlı denetimi için anlık güç teorisi (p-q teorisi) tabanlı denetim algoritması kullanılmaktadır. p-q teorisi, (1) ve (2) eşitliğinde görüldüğü gibi  $a$ - $b$ - $c$  koordinatlarındaki üç fazlı akım ve gerilimlerin,  $\alpha$ - $\beta$  koordinatlarına cebrik dönüşümünden (Clarke dönüşümü) ve sonrasında anlık güç bileşenlerinin hesaplanmasından oluşmaktadır [5-6]. Bu çalışmada kullanılan 3-fazlı kaynak gerilimleri ve yük akımları dengelidir.

$$\begin{bmatrix} v_\alpha \\ v_\beta \end{bmatrix} = \sqrt{\frac{2}{3}} \begin{bmatrix} 1 & -1/2 & -1/2 \\ 0 & 3/\sqrt{2} & -\sqrt{3}/2 \end{bmatrix} \begin{bmatrix} v_{Sa} \\ v_{Sb} \\ v_{Sc} \end{bmatrix} \quad (1)$$

$$\begin{bmatrix} i_\alpha \\ i_\beta \end{bmatrix} = \sqrt{\frac{2}{3}} \begin{bmatrix} 1 & -1/2 & -1/2 \\ 0 & 3/\sqrt{2} & -\sqrt{3}/2 \end{bmatrix} \begin{bmatrix} i_{La} \\ i_{Lb} \\ i_{Lc} \end{bmatrix} \quad (2)$$

Yükün anlık gerçek ve sanal güç bileşenleri, yük akımlarının ve faz-nötr gerilimlerinin  $\alpha$ - $\beta$  koordinatlarındaki karşılıklarıyla (3) eşitliğinde görülmektedir.

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

Anlık gerçek ve sanal güç AA ve DA bileşenler içermektedir ve aşağıdaki eşitlikteki gibi ifade edilmektedir.  $p$  ve  $q$ 'nin DA bileşenleri ( $\bar{p}$  ve  $\bar{q}$ ), yük akımının pozitif sıralı bileşeninden, AA bileşenleri ( $\tilde{p}$  ve  $\tilde{q}$ ), yük akımının harmonik ve negatif sıralı bileşenlerinden oluşmaktadır [6].

$$\begin{bmatrix} p \\ q \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} \bar{p} + \tilde{p} \\ \bar{q} + \tilde{q} \end{bmatrix} \quad (4)$$

Aynı zamanda hem harmonik hem de reaktif güç kompanzasyonu yapmak amacıyla sanal gücün DA ve AA bileşenleri ile gerçek gücün AA bileşeni seçilerek (5) eşitliğindeki gibi referans akımlar hesaplanmaktadır. Bu eşitlikteki  $\bar{p}_{kayıp}$  gücü, paralel AGF'nin GKE kayıplarını karşılamak için kullanılmaktadır.

$$\begin{bmatrix} i_{Ca}^* \\ i_{Cb}^* \end{bmatrix} = \frac{1}{v_\alpha^2 + v_\beta^2} \begin{bmatrix} v_\alpha & -v_\beta \\ v_\beta & v_\alpha \end{bmatrix} \begin{bmatrix} \tilde{p} + \bar{p}_{kayıp} \\ -q \end{bmatrix} \quad (5)$$

$i_{Ca}^*$  ve  $i_{Cb}^*$ ,  $\alpha$ - $\beta$  koordinatlarında yükün harmonik ve reaktif akımlarına karşılık gelen ve paralel AGF'nin üretmesi gereken akımlardır. Bu akımlar 3-fazlı sisteme (6) eşitliği kullanılarak çevrilmektedir. Böylece, 3-fazlı güç sisteminde yükün ürettiği harmonik ve reaktif akımları yok edecek  $i_{Ca}^*$   $i_{Cb}^*$  ve  $i_{Cc}^*$  referans akımları elde edilmektedir.

$$\begin{bmatrix} i_{Ca}^* \\ i_{Cb}^* \\ i_{Cc}^* \end{bmatrix} = \sqrt{\frac{2}{3}} \begin{bmatrix} 1 & 0 \\ -1/2 & \sqrt{3}/2 \\ -1/2 & -\sqrt{3}/2 \end{bmatrix} \begin{bmatrix} i_{Ca}^* \\ i_{Cb}^* \end{bmatrix} \quad (6)$$

Anahtarlama sinyallerinin üretimi paralel AGF hat akımlarının anlık denetimi ile başarılmaktadır. Paralel AGF hat akımları ölçülerek, denetim algoritması tarafından üretilen referans akımlar ile karşılaştırılmakta ve histerezis bant akım denetleyici ile anahtarlama sinyalleri elde edilmektedir. Histerezis-bant akım denetimi, minimum donanım ve yazılım ile hızlı ve basit bir denetim metodudur fakat değişken anahtarlama frekansı önemli dezavantajdır [7].

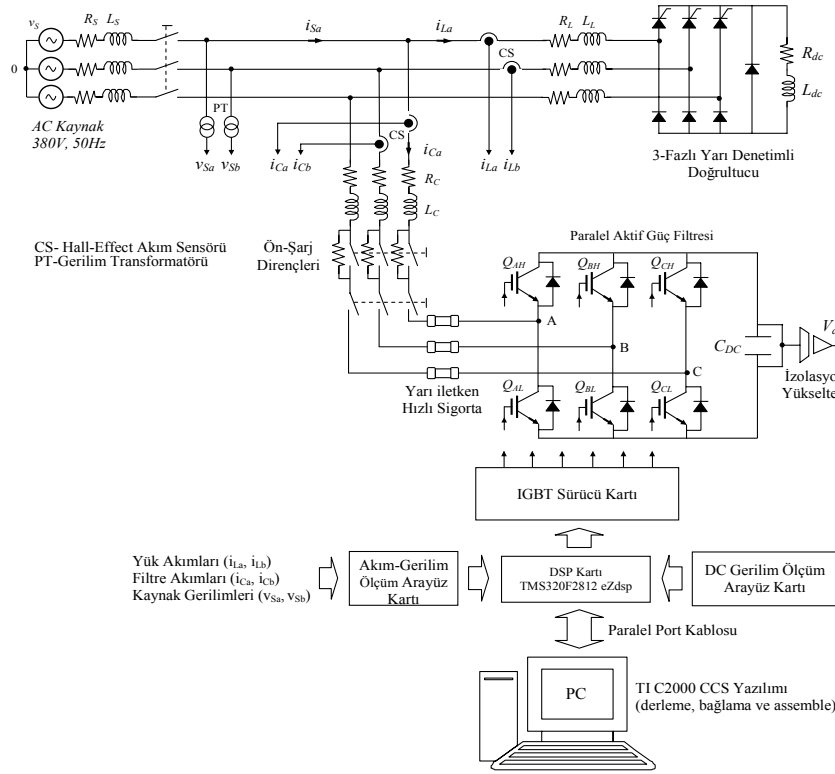
### 3. PARALEL AGF TASARIMI VE UYGULANMASI

Bu çalışmada, p-q teorisi tabanlı denetim tekniği kullanılarak 3-fazlı paralel AGF'nin tasarımı ve uygulaması yapılmıştır. Doğrusal olmayan yük olarak, R-L yüklü 3-fazlı yarı denetimli tristörlü doğrultucu kullanılmıştır. Şekil 2'de 10kVA paralel AGF laboratuvar prototipinin test devresi görülmektedir.

Paralel AGF'nin p-q teorisi tabanlı denetim algoritması, F2812 eZdsp kartı üzerinde TI C2000 Code Composer Studio (CCS) geliştirme ortamında C programlama dili kullanılarak uygulanmıştır. Ayrıca denetim algoritmasındaki matematiksel işlemlerde, sabit noktalı (fixed point) işlemciler için geliştirilmiş ve kayan noktalı (floating point) işlemciler kadar hassas matematiksel işlem performansı sağlayan, maksimum kod optimizasyonu yapılmış IQmath algoritmaları kullanılmıştır [8].

TMS320F2812 DSP, 150 MIPS işlem hızı, 36 kB dahili RAM, 2 kB OTP ROM, 256 kB flash, 16 kanal PWM, 12-bit 16 kanal ADC, 128 kB harici SRAM ve paralel port JTAG arayüz özelliklerine sahiptir [9].

Paralel AGF deneysel sisteminde kaynak gerilimleri ( $v_{Sa}$ ,  $v_{Sb}$ ) gerilim transformatörleri (PT) ile yük akımları ( $i_{La}$ ,  $i_{Lb}$ ) ve filtre akımları ( $i_{Ca}$ ,  $i_{Cb}$ ) Hall-Effect prensibi ile çalışan LEM akım sensörleri (CS) ile ölçülmektedir. Uygulamada, 3-fazlı kaynak ve yük dengeli olduğu için 'c' fazı kaynak gerilimi ve yük akımı ölçülmemiştir. GKE'nin DA hat geriliminin ölçümü için AD210 izolasyon yükseltici kullanılmıştır. Bu akım ve gerilim sinyalleri, kalibrasyon ve DSP geliştirme kartının analog girişleri için uygun hale getirilmek üzere ölçüm arayüz kartına gönderilmektedir. Analog girişlerine uygulanan sinyaller ile F2812 DSP, paralel AGF'nin gerçek zamanlı denetim algoritmasını yürüterek histerezis bant akım denetleyici ile Darbe Genişlik Modülasyonlu (DGM) anahtarlama sinyalleri üretmektedir.

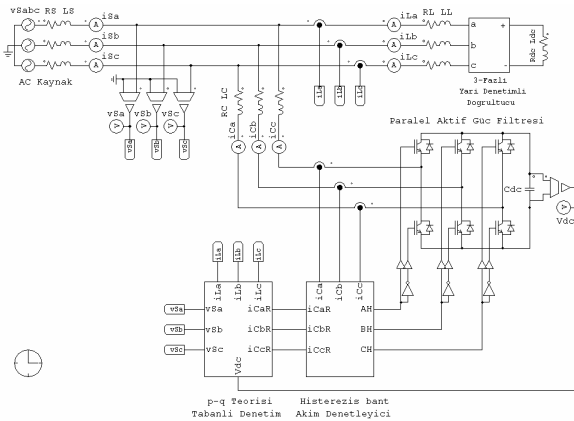


Şekil 2. 3-fazlı paralel AGF laboratuvar prototipi test devresi.

Bu DGM sinyalleri ile IGBT'lerin sürülmesi için CONCEPT 6SD106EI IGBT sürücü modülü kullanılmıştır. Bu sürücü, DSP'ye uygulanan tüm DGM sinyallerinin elektriksel izolasyonunu sağlamakta ve her bir IGBT için kısa devre ve aşırı akım koruma fonksiyonlarına sahiptir. Laboratuvar prototipinde kullanılan ön şarj dirençleri ile paralel AGF'nin sürekli hale yumuşak geçişi sağlanmaktadır. IGBT elemanları denetim sistemi olumsuzluklarına karşı yarı iletken hızlı sigortalar ile korunmaktadır.

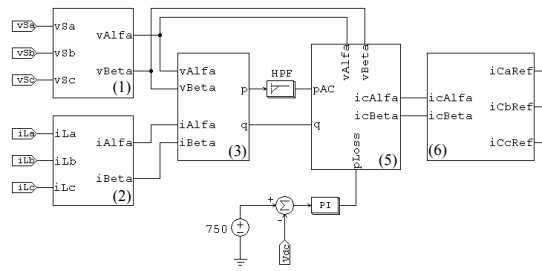
#### 4. SİMÜLASYON SONUÇLARI

Şekil 3'de paralel AGF sisteminin PSIM simülasyon modeli görülmektedir.



Şekil 3. Paralel AGF sisteminin PSIM simülasyon modeli.

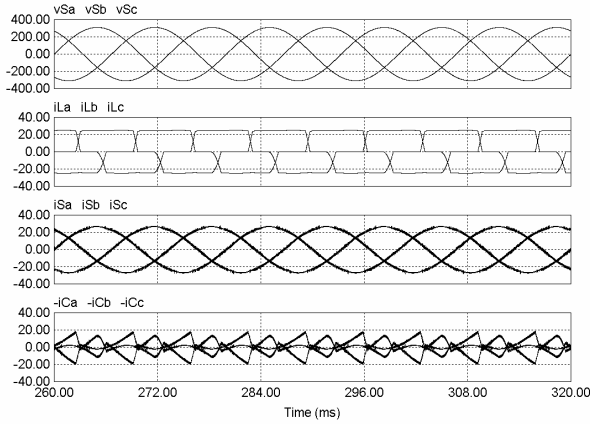
Paralel AGF'nin PSIM'de p-q teorisi tabanlı denetim blok diyagramı Şekil 4'de görülmektedir. Bu, p-q dönüşüm, yüksek geçiren filtre (HPF), DA gerilim düzenleyici için oransal-integral (PI) denetleyici, referans akım hesabı ve histerezis bant akım denetleyiciden oluşmaktadır. İlgili matematiksel eşitlik numaraları blok diyagram üzerinde verilmektedir.



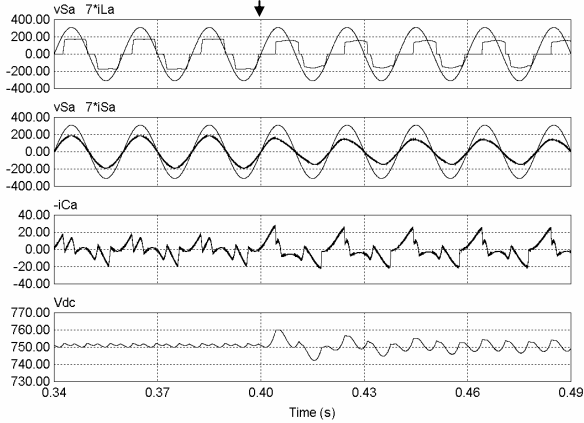
Şekil 4. Paralel AGF PSIM denetim blok diyagramı

Şekil 5'de 3-fazlı yarı denetimli doğrultucu yükünün  $\alpha=15^\circ$  tetikleme açısında, paralel AGF sisteminin sürekli haldeki kaynak gerilimleri, yük akımları, filtrelenmiş kaynak akımları ve filtre akımları simülasyon sonuçları görülmektedir. Paralel AGF devreye alındıktan sonra 3-faz kaynak akımları dengeli ve sinüzoidal olmaktadır. Şekil 6'da 0.4. s'de tristörlerin tetikleme açısı  $\alpha=15^\circ$ 'den  $\alpha=45^\circ$ 'ye değiştirilerek paralel AGF sisteminin geçici hal cevabı gösterilmektedir. Şekil 6'daki yük ve kaynak akımı dalga şekillerinin daha açık görülmesi amacıyla 7 kat

büyütülmüştür. Kaynak akımı yaklaşık 1 periyotta dengeye oturmuştur. Aynı zamanda, kaynak akımı kaynak gerilimi ile aynı faza getirilerek reaktif güç kompanzasyonunun başarıyla yapıldığı görülmektedir.



Şekil 5. Sürekli hal durumunda PSIM simülasyon sonuçları.

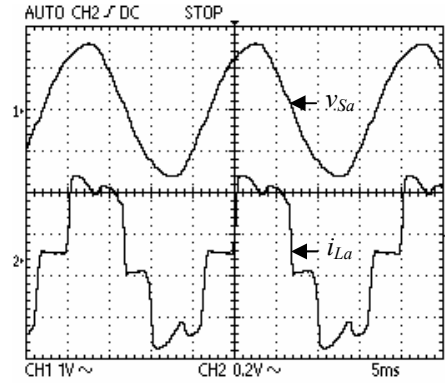


Şekil 6. Geçici hal durumunda PSIM simülasyon sonuçları.

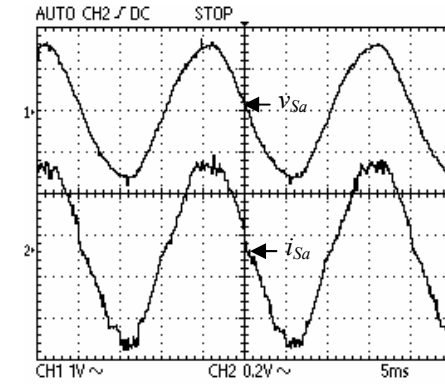
## 5. DENEYSEL SONUÇLAR

Paralel AGF'nin reaktif güç kompanzasyonu ve akım harmoniklerini filtreleme performansını göstermek amacıyla RL yüklü 3-fazlı yarı denetimli tristörlü doğrultucu kullanılmaktadır. Tristörlerin tetikleme açısı  $\alpha=15^\circ$ 'dir. Şekil 7'de kaynak gerilimi ve yük akımı dalga şekilleri görülmektedir. Paralel AGF devreye alındıktan sonra kaynak gerilimi ve akımı dalga şekilleri Şekil 8'de, yük ve filtre akımı dalga şekilleri Şekil 9'da gösterilmektedir.

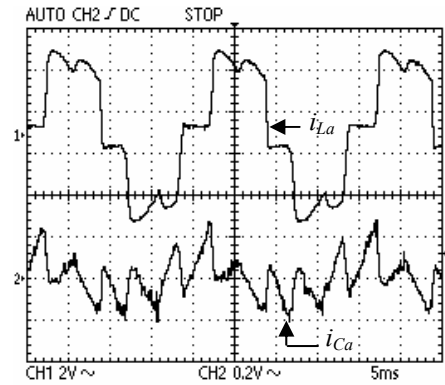
Kompanzasyondan sonra kaynak akımları sinüzoidal olmakta ve kaynak gerilimiyle aynı faza getirilmektedir. Böylece gerçekleştirilen paralel AGF deneysel sistemiyle hem harmonik filtreleme hem de reaktif güç kompanzasyonu işleminin başarıyla yapıldığı görülmektedir. Şekil 10'da paralel AGF laboratuvar prototipinin fotoğrafı görülmektedir. Tablo 1'de 3-fazlı paralel AGF deneysel sisteminin parametreleri verilmektedir.



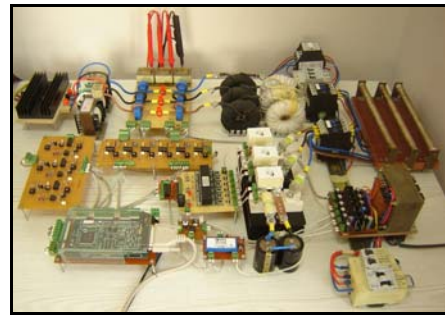
Şekil 7. Kaynak gerilimi ve yük akımı dalga şekilleri [ $v_{Sa}$  (200V/div);  $i_{La}$  (20A/div)].



Şekil 8. Kaynak gerilimi ve akımı dalga şekilleri [ $v_{Sa}$  (200V/div);  $i_{Sa}$  (20A/div)].



Şekil 9. Yük ve filtre akımı dalga şekilleri [ $i_{La}$ ,  $i_{Ca}$  (20A/div)].



Şekil 10. Paralel AGF laboratuvar prototipi fotoğrafı.

Tablo 1. 3-fazlı paralel AGF deneysel sistemi parametreleri.

Kaynak Parametreleri		
Kaynak gerilimi	$V_{Sabc}$	220 V <sub>rms</sub>
Kaynak frekansı	$f_S$	50 Hz
AGF Parametreleri		
DC bara gerilimi	$V_{dc}$	750 V
DC taraf kapasitans	$C_{dc}$	1100 $\mu$ F
AC taraf endüktans	$L_C$	3.75 mH
Ort. anahtarlama frekansı	$f_{Sw}$	10 kHz
Yük Parametreleri		
AC taraf endüktans	$L_{Lac}$	1 mH
DC taraf direnç	$R_{Ldc}$	18 $\Omega$ ,
DC taraf endüktans	$L_{Ldc}$	85 mH

## 6. SONUÇ

Bu çalışmada, 3-fazlı paralel AGF'nin TMS320F2812 DSP tabanlı tasarımı ve uygulaması gerçekleştirilmiştir. Paralel AGF'nin gerçek zamanlı denetiminde anlık güç teorisi kullanılmıştır ve akım denetimi DSP üzerinde histerezis bant akım denetleyici ile yapılmıştır. Doğrusal olmayan yük olarak omik-endüktif yüklü 3-fazlı yarı denetimli bir tristörlü köprü doğrultucu kullanılmıştır. Paralel AGF denetim algoritması F2812 eZdsp kartı üzerinde TI C2000 Code Composer Studio ortamında C programlama dili kullanılarak uygulanmıştır. Deneysel test sonuçlarına göre paralel AGF, doğrusal olmayan yükün reaktif güç kompanzasyonu ve harmoniklerinin filtrelenmesi açısından oldukça yeterli bulunmuştur.

## TEŞEKKÜR

Bu çalışma, 105E182-HD-08 sayılı TÜBİTAK Hızlı Destek Projesi ile desteklenmektedir. Yazarlar, bu çalışmada kullanılan PSIM yazılımının ücretsiz lisans desteği için POWERSYS firmasına teşekkür etmektedir.

## 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] B. Singh, K. Al-Haddad and A. A. Chandra, A review of active power filters for power quality improvement, IEEE TRANS. INDUSTRIAL ELECTRONICS, Vol. 46, pp. 1-12, Oct. 1999.
- [3] M.E. Habrouk, M.K. Darwish, P. Mehta, Active power filters: a review, IEE PROCEEDINGS ELECTRICAL POWER APPLICATIONS, Vol. 147, No.5, pp. 403-413, Sep. 2000.
- [4] A. Emadi, A. Nasiri and S. B. Bekiarov, Uninterruptible Power Supplies and Active Filters. New York: CRC Pres, pp. 73-111, 2005.
- [5] Afonso J., vd., Active Filters with Control Based on the p-q Theory, IEEE IND. ELECTRONICS SOCIETY NEWSLETTER, Vol. 47, No. 3, pp. 5-11, 2000.
- [6] F. Z. Peng and J. S. Lai, Generalized instantaneous reactive power theory for three-phase power systems, IEEE TRANS. INSTRUM. MEAS., Vol. 45, Feb. pp. 293-297, 1996.
- [7] L. Malesani, P. Mattavelli and Paolo Tomasin, High-performance hysteresis modulation technique for active filters, IEEE TRANS. POWER ELECTRONICS, Vol. 12, No. 5, pp. 876-884, September 1997.
- [8] IQ Math on the Texas Instruments TMS320C28x DSP, Literature Number: SPRC087, 2004.
- [9] TMS320F2812 Data Manual, Literature Number: SPRS174L, 2004.