

PARALEL AKTİF GÜÇ FİLTRESİ İÇİN DSP TABANLI DENETİM ALGORİTMASININ OTOMATİK GÖMÜLÜ KOD ÜRETİMİ İLE HIZLI PROTOTİPLENDİRİLMESİ

Metin KESLER¹ Mehmet UÇAR² Engin ÖZDEMİR³

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

Kocaeli Üniversitesi, 41380, Umuttepe, Kocaeli

¹e-posta: metinkesler@kou.edu.tr

²e-posta: mucar@kou.edu.tr

³e-posta: eozdemir@kou.edu.tr

Anahtar sözcükler: Paralel Aktif Güç Filtresi, Otomatik gömülü kod üretimi, Sayısal İşaret İşlemci (DSP)

ABSTRACT

In this paper, a rapid prototyping of shunt Active Power Filter (APF) control algorithm, which involves the design of Digital Signal Processor (DSP) based control method using Matlab/Simulink blocksets, automated model based real-time embedded code generation and downloading of executable code to the TMS320F2812 DSP board is presented. The Matlab/Simulink based development platform integrated with the DSP provides a useful development tool for design verification of DSP algorithms. Experimental results show that the code developed using the rapid prototyping of the shunt APF control strategy is highly efficient and the development cycle time is greatly reduced, resulting in lower development cost.

1. GİRİŞ

Modern güç elektroniği sistemlerinin giderek gelişmesi ve hızla artan uygulama alanları nedeniyle şebekelerde ve iletim hatlarında reaktif gücün çekilmesine, harmoniklerin üretilmesine ve dolayısıyla enerji kalitesinin düşmesine sebep olmaktadır. Bu sistemler tarafından oluşturulan reaktif güç ve harmonikler, elektromanyetik cihazlarda ısınmaya, mekanik cihazlarda titreşimli ve gürültülü çalışmaya, şebekede güç faktörünün azalmasına, aşırı nötr akımlarına ve nötr iletkeni problemlerine sebep olmaktadır.

Güç sistemlerinde elektrik enerjisinin verimliliğini ve yükün güç kalitesini artırmak, harmonik akımları yok etmek amacıyla pasif LC filtreler yaygın bir şekilde kullanılmaktadır. Fakat pasif LC filtrelerin, kaynak empedansına bağımlı olması, rezonans problemleri

gibi bazı dezavantajları bulunmaktadır. Bu problemleri yok etmek için Aktif Güç Filtreleri (AGF) geliştirilmektedir [1-2].

AGF'lerin gerçek zamanlı denetim algoritmaları sıklıkla DSP gibi özel işlemciler ile gerçekleştirilmektedir. DSP tabanlı denetim stratejileri geliştirmek için, kullanılacak olan DSP'nin iç mimarisini, tasarım ve gömülü kod üretme ölçütlerini yeterli seviyede bilmek gerekmektedir. Ayrıca, farklı DSP'lere ait farklı programlama dillerini öğrenmek, karmaşıklık derecesi arttıkça uygulama geliştirmek, uygulama yazılımda optimizasyon yapmak, hata ayıklamak zahmetli ve uzun zaman almaktadır. Yeni DSP algoritmalarının testi ve yeni uygulamalar için tasarım çevriminin kısaltılması hızlı geliştirme araçları ile mümkün olmaktadır [3].

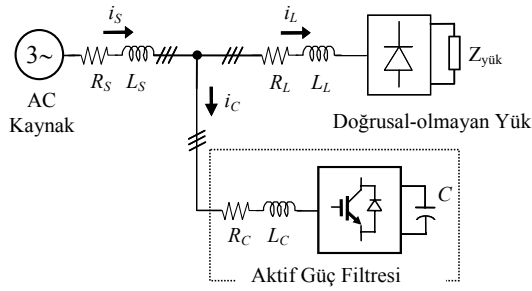
Hızlı prototiplemenin kilit noktası, otomatik kod üretimidir. Otomatik kod üretimi, algoritma kodlamasını otomatik olarak üretmeyi içermekte, hedef DSP kartına kodlamayı, derlemeyi, bağlamayı ve yüklemeyi kapsamaktadır. Bu otomasyon, tasarım değişikliklerinin blok diyagram yoluyla doğrudan yapılabilmesine izin vermekte ve saniyeler içerisinde yeni testler için hazır olmaktadır [4].

Bu çalışmada, paralel AGF denetim algoritmasının hızlı prototipleştirilmesi için Matlab/Simulink [5] ortamında Embedded Target for TIC2000 DSP [6] ve Real Time Workshop (RTW) [7] alt yazılımları kullanılarak DSP kodlarının üretimi otomatik olarak gerçekleştirilmektedir. Otomatik üretilen kodlar TI CCS2000 (Code Composer Studio 2000) yazılım geliştirme ortamında derlenerek F2812 eZdsp kartına yüklenmektedir. Deneysel sonuçlara göre, paralel

AGF denetim tekniğinin hızlı prototiplendirilmesi için otomatik olarak üretilen kodlar oldukça verimlidir ve uygulama geliştirme çevrim süresi oldukça kısalmaktadır.

2. PARALEL AGF DENETİM ALGORİTMASI

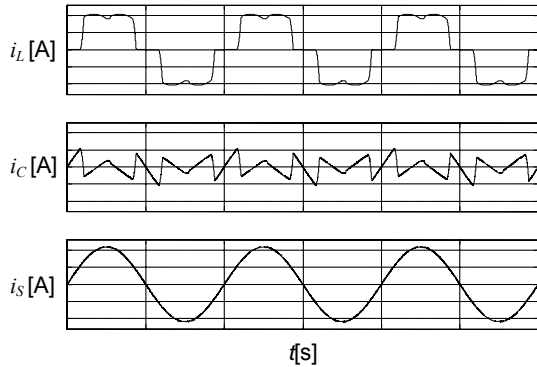
Şekil 1'de görüldüğü gibi paralel AGF, doğrusal olmayan yüke paralel bağlanmış akım kaynağı olarak çalışmaktadır ve akım denetimi sağlayabilmek için DA tarafına bir kondansatör bağlanmış Gerilim Kaynaklı Evirici (GKE) devresinden meydana gelmektedir.



Şekil 1. Paralel AGF temel çalışma prensibi.

Paralel AGF'nin temel fonksiyonu yükün harmoniklerini filtreleyip, reaktif güç ihtiyacını karşılayarak şebekeden sinüzoidal akımlar çekilmesini sağlamaktır. Şekil 2 ve (1) eşitliğinden görüldüğü gibi paralel AGF, doğrusal olmayan yükün çektiği harmonik ve reaktif akımlara eşit genlikte ve ters fazda akım üretecek şekilde kontrol edilmektedir.

$$i_s = i_L + i_c \quad (1)$$



Şekil 2. Doğrusal olmayan yük, filtre ve kaynak akımı dalga şekilleri.

Bu çalışmada, paralel AGF denetimi için anlık güç teorisi (p-q teorisi) tabanlı denetim tekniği kullanılmaktadır. Bu teori, (2) ve (3) eşitliğinde görüldüğü gibi a-b-c koordinatlarındaki 3-fazlı akım ve gerilimlerin, α - β koordinatlarına cebrik dönüşümünden ve sonrasında anlık güç bileşenlerinin hesaplanmasından oluşmaktadır [8].

Bu çalışmada kullanılan 3-fazlı kaynak gerilimleri ve yük akımları dengelidir.

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

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

Yükün anlık gerçek ve sanal güç bileşenleri, yük akımlarının ve faz-nötr gerilimlerinin α - β koordinatlarındaki karşılıklarıyla (4) eşitliğinde görülmektedir.

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

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

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

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. Bu eşitlikteki $\bar{p}_{kayıp}$ gücü, paralel AGF'nin GKE kayıplarını karşılamak amacıyla kullanılmaktadır.

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

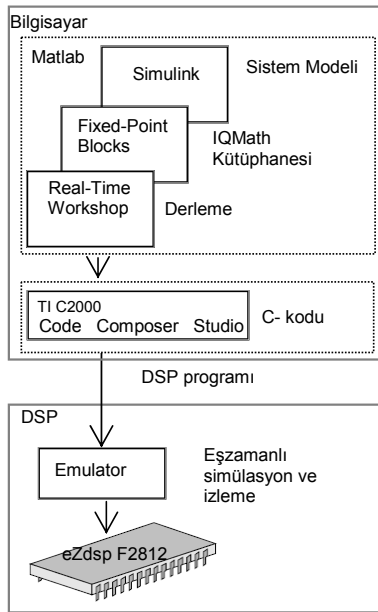
i_{Ca}^* ve i_{Cb}^* , α - β koordinatlarında yükün harmonik ve reaktif akımlarına karşılık gelen ve AGF'nin üretmesi gereken referans akımlardır. Bu akımlar 3-fazlı sisteme (7) eşitliği kullanılarak çevrilmektedir.

$$\begin{bmatrix} i_{Ca}^* \\ i_{Cb}^* \\ i_{Cc}^* \end{bmatrix} = \sqrt{\frac{2}{3}} \begin{bmatrix} 1 & 0 \\ -1/2 & \sqrt{3}/2 \\ -1/2 & -\sqrt{3}/2 \end{bmatrix} \begin{bmatrix} i_{Ca}^* \\ i_{Cb}^* \end{bmatrix} \quad (7)$$

Böylece, 3-fazlı güç sisteminde yükün ürettiği harmonik ve reaktif akımları yok edecek i_{Ca}^* , i_{Cb}^* ve i_{Cc}^* kompanzasyon referans akımları elde edilmektedir. Anahtarlama sinyallerinin üretimi, paralel AGF hat akımlarının anlık denetimi ile sağlanmaktadır. Paralel AGF hat akımları ölçülerek, denetim algoritması tarafından üretilen referans akımlar ile karşılaştırılmakta ve histerezis bant akım denetleyici ile anahtarlama sinyalleri elde edilmektedir.

3. MODEL TABANLI OTOMATİK GÖMÜLÜ KOD ÜRETİMİ

Bu çalışmada, Matlab/Simulink Embedded Target ve Real Time Workshop yazılımı ile model tabanlı otomatik gömülü kod üretimi ve DSP ile paralel AGF denetimi yapılarak çalışmanın verimliliği ve getirdiği kolaylıklar incelenmektedir. Matlab/Simulink, denetim algoritmalarının blok diyagramlarla gösterilebilen benzetimi için model tabanlı bir geliştirme ortamıdır. Blok diyagramlarla verilen DSP algoritmaları, Real Time Workshop (RTW), Link for Code Composer Studio Development Tools ve Embedded Target for TIC2000 DSP alt yazılımları ile Şekil 3'de görüldüğü gibi hedef DSP işlemcileri için makine diline (assembly) çevirmekte ve gerçek zamanda (real time) uygulanması ve tasarım doğrulaması çok hızlı bir şekilde yapılabilmektedir.



Şekil 3. Matlab/Simulink üzerinden otomatik gömülü kod üretimi akış diyagramı.

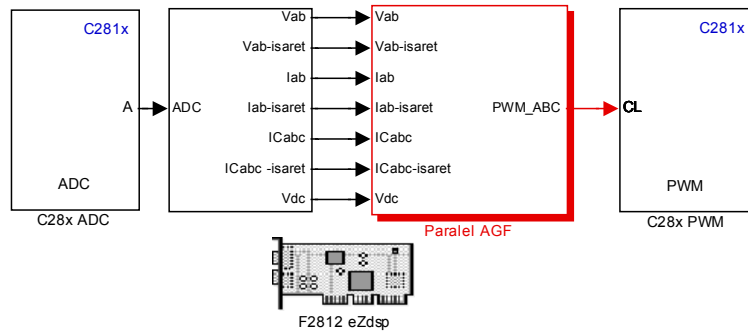
Matlab/Simulink ortamında otomatik gömülü kod üretmek amacıyla, Embedded Target for TI C2000 DSP araç kutusundaki C28x DMC kütüphanesinden Clarke dönüşüm bloğu, C28x IQmath

kütüphanesinden aritmetik işlem ve matematiksel fonksiyon blokları, Simulink, Simulink Fixed Point ve Signal Processing Blockset kütüphanesi kullanılarak paralel AGF denetim algoritması oluşturulmaktadır. Bu Simulink modele, C2800 DSP Core Support kütüphanesinden C28x ADC ve C28x PWM blokları eklenerek F2812 DSP analog girişleri ile PWM çıkışları seçilmekte ve C2000 Target Preferences kütüphanesinden F2812 eZdsp bloğu eklenerek DSP konfigürasyon ayarları yapılmaktadır.

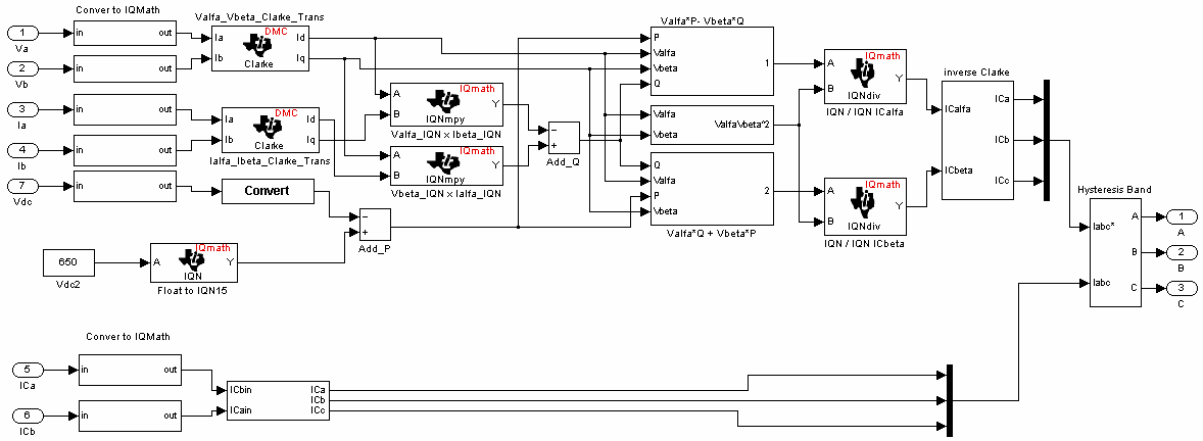
Oluşturulan simulink modelde normal matematiksel fonksiyon blokları yerine IQmath fonksiyonları kullanılmıştır. IQmath, sabit noktalı (fixed point) işlemciler için geliştirilmiş ve kayan noktalı (floating point) işlemciler kadar hassas matematiksel işlem performansı sağlayan, maksimum kod optimizasyonu yapılmış algoritmalarıdır [9]. Şekil 4'de paralel APF'nin model tabanlı gömülü kod üretimi blok diyagramı görülmektedir. Şekil 5'de paralel AGF'nin Matlab/Simulink ortamında IQmath blokları kullanılarak oluşturulan model tabanlı denetim blok diyagramı görülmektedir.

RTW (Real Time Workshop), Simulink ortamında oluşturulan paralel AGF'nin grafiksel blok diyagramından C kodlarını otomatik olarak üretmektedir. Bu kodlar TI CCS2000 (Code Composer Studio 2000) DSP yazılım geliştirme ortamına aktarılarak diğer destek dosyalarıyla birlikte derlenmekte ve bilgisayarın paralel portuna bağlı F2812 DSP'nin üzerindeki emülatör aracılığı ile yüklenmektedir. Böylece, Matlab/Simulink ortamında oluşturulan paralel AGF'nin model tabanlı denetim blok diyagram gerçek zamanlı sinyal işlemine tabi tutulmak üzere DSP ortamında gerçek zamanlı olarak aktarılması ve uygulanması mümkün olmaktadır.

Tüm tasarım işlemi tam otomatik, esnek ve oldukça kolay bir şekilde yapılabilmektedir. Ayrıca, herhangi bir programlama dili içine girmeden DSP bloğu ve tasarım parametreleri gerçek zamanda değiştirilebilmektedir. Grafiksel blok diyagramların kullanımı, DSP üzerinden denetlenen sistem tasarımını, prototiplendirilmesini ve modifikasyonunu oldukça kolaylaştırmaktadır.



Şekil 4. Paralel AGF'nin model tabanlı gömülü kod üretimi blok diyagramı.

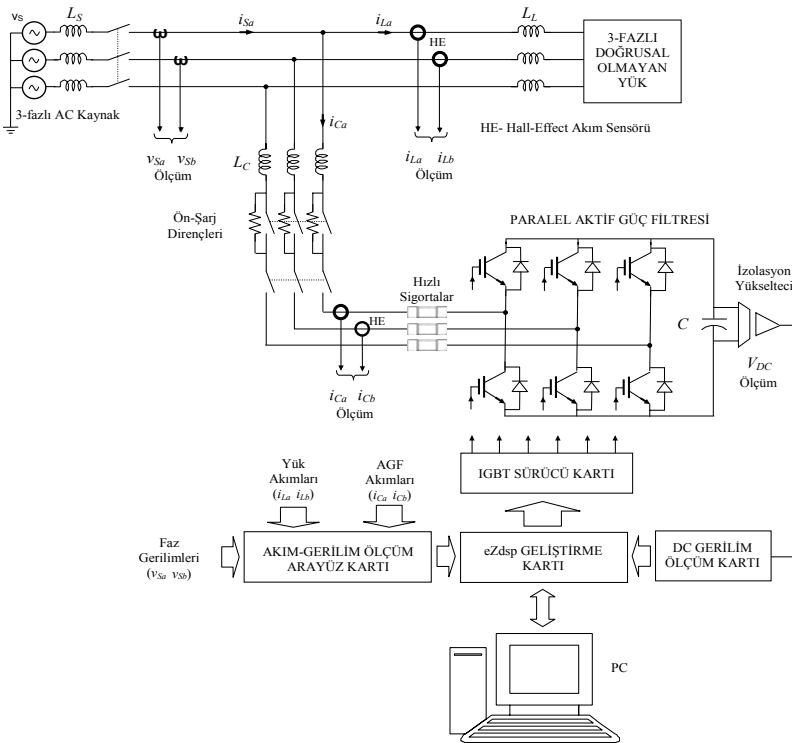


Şekil 5. Paralel AGF model tabanlı denetim algoritması blok diyagramı.

4. DENEYSEL SONUÇLAR

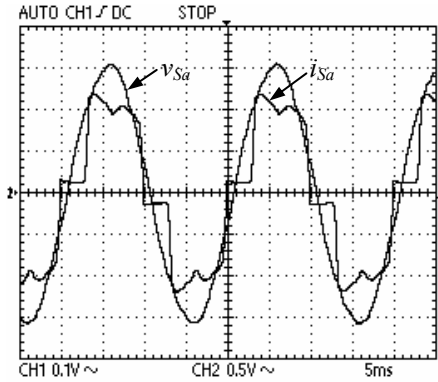
Bu çalışmada, F2812 eZdsp üzerinde paralel AGF'nin gerçek zamanlı denetim algoritmasını gerçekleştirmek için Matlab/Simulink tabanlı otomatik olarak üretilen gömülü kodların performansını test etmek amacıyla bir laboratuvar prototipi hazırlanmıştır. Paralel AGF laboratuvar prototipinde kullanılan TMS320F2812 DSP, 150 MIPS işlem hızı, 36 kB dahili RAM, 2 kB OTP ROM, 256 kB flash, 12 kanal PWM, 12-bit 16 kanal ADC, 128 kB harici SRAM ve paralel port JTAG arayüz özelliklerine sahiptir [10]. Şekil 6'da 3-fazlı paralel AGF deneysel sistemi test devresi görülmektedir. Bu çalışmada, doğrusal olmayan yük olarak omik-endüktif yüklü 3-fazlı denetimsiz doğrultucu kullanılmaktadır.

Kaynak gerilimleri (v_{sa}, v_{sb}) gerilim transformatörleri ile yük akımları (i_{La}, i_{Lb}) ve filtre akımları (i_{Ca}, i_{Cb}) Hall-Effect prensibi ile çalışan LEM akım sensörleri ile ve GKE'nin DA hat gerilimi AD210 izolasyon yükseltici kullanılarak ölçülmektedir. Uygulamada 3-fazlı sistem dengeli olduğu için 'c' fazı kaynak gerilimi ve yük akımı ölçülmemiştir. Bu akım ve gerilim sinyalleri, kalibrasyon ve DSP geliştirme kartının analog girişleri için uygun hale getirilmek üzere ölçüm arayüz kartına gönderilmektedir. F2812 DSP kartı analog girişlerine uygulanan sinyaller ile paralel AGF'nin gerçek zamanlı denetim algoritmasını yürüterek histeresis bant akım denetleyici ile anahtarlama sinyalleri üretmektedir.



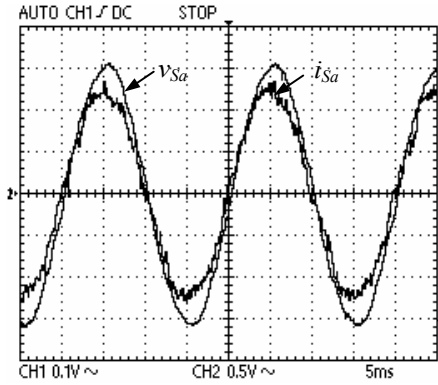
Şekil 6. 3-fazlı paralel AGF deneysel sistemi test devresi.

Paralel AGF denetim algoritması için otomatik olarak üretilen kodlar F2812 eZdsp kartına yüklenerek deneysel çalışma sonuçları elde edilmektedir. Şekil 7’de filtreleme öncesi kaynak akım ve gerilimi dalga şekilleri görülmektedir.



Şekil 7. Filtreleme öncesi kaynak akım ve gerilimi dalga şekilleri ($v_{sa}=100V/div$, $i_{sa}=20A/div$).

Şekil 8’de paralel AGF devreye alındıktan sonra kaynak akım ve gerilim dalga şekilleri görülmektedir. Kompanzasyondan sonra kaynak akımları harmonikleri filtrelenerek sinüzoidal olmakta ve kaynak gerilimiyle aynı faza getirilerek reaktif güç kompanzasyonu işlemi başarıyla yapılmaktadır. 3-fazlı paralel AGF deneysel sisteminin parametreleri Tablo 1’de görülmektedir.



Şekil 8. Filtreleme sonrası kaynak akım ve gerilim dalga şekilleri ($v_{sa}=100V/div$, $i_{sa}=20A/div$).

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

Kaynak	Gerilim (V_s)	380 V/Faz-Faz
	Frekans (f)	50 Hz
AGF	DC Gerilim (V_{DC})	750 V
	DC Kondansatör (C_{DC})	1000 μ F
	Ort. Anahtar. Frek. (f_s)	9 KHz
	Filtre (R_F, L_F)	0.1 Ω , 3.75 mH
Yük	Filtre (R_L, L_L)	1 Ω , 0.45 mH
	Güç	10 kW

6. SONUÇ

Bu çalışmada, 3-fazlı paralel AGF için DSP tabanlı denetim algoritmasının Matlab/Simulink üzerinden otomatik gömülü kod üretimi ile hızlı prototiplendirilmesi gerçekleştirilmiştir. Matlab ve Simulink’in otomatik ve verimli kod üretimi işlemi ile uygulama tasarım çevrimini oldukça kısaltmaktadır.

Paralel AGF denetim algoritmasının Simulink blok diyagramından otomatik C kod üretimi işlemi, gerçek zamanlı işletimin oluşturulması, derleme, bağlama ve gerçek zamanlı DSP kodunu yükleme tümüyle otomatiktir. Deneysel sonuçlara göre, paralel AGF’nin denetim algoritmasının hızlı prototiplenmesi için üretilen kodlar oldukça verimlidir, uygulama geliştirme çevrim süresi oldukça azalmakta ve daha düşük geliştirme maliyeti sağlamaktadır.

TEŞEKKÜR

Bu çalışma, 105E182-HD-08 nolu TÜBİTAK Hızlı Destek Projesi kapsamında desteklenmektedir.

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] K. Karnofsky, Speeding DSP algorithm Design, IEEE SPECTRUM, July 1996.
- [4] K.H. Hong et al. An integrated environment for rapid prototyping of DSP Algorithms using Matlab and Texas instruments’ TMS320C30 MICROPROC. AND MICROSYSTEMS, Vol. 24, pp. 349-363, 2000.
- [5] Simulink, Simulation and Model-Based Design: User’s Guide, Version 6.
- [6] Embedded Target for the TI TMS320C2000 DSP Platform for Use with Real-Time Workshop User’s Guide, Version 6.
- [7] Real-Time Workshop, for use with Simulink: User’s Guide, Version 6.
- [8] 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.
- [9] IQ Math on the Texas Instruments TMS320C28x DSP, Literature Number: SPRC087, 2004.
- [10] TMS320F2812 Data Manual, Literature Number: SPRS174L, 2004.