

PMSM Denetim Sisteminin Hızlı Modellenmesi ve DSP Gömülü Kodlarının Otomatik Üretilmesi

Rapid Prototyping of PMSM Control System and Automatic Generating of DSP Embedded Codes

Cem MORKOÇ¹, Metin KESLER²

¹Bilgisayar Mühendisliği, Fen Bilimleri Enstitüsü

Bilecik Üniversitesi

cem.morkoc@bilecik.edu.tr

²Bilgisayar Mühendisliği, Mühendislik Fakültesi

Bilecik Üniversitesi

metin.kesler@bilecik.edu.tr

Özet

Daimi mıknatıslı senkron motorun (Permanent Magnet Synchronous Motor, PMSM) yüksek güç, yüksek hız ve moment üretebilme kapasitesi, yüksek verim gibi avantajları kompakt bir yapı içerisinde barındırması, bu motor tipinin son yıllarda geliştirilen yüksek performanslı kontrol sistemlerinde kullanım yaygınlığını giderek artırmaktadır. Günümüzde motor kontrol uygulamaları halihazırda dijital sinyal işlemciler (Digital Signal Processors, DSP) gibi özel işlemciler ile gerçekleştirilmektedir. Ancak gerçekleştirilen bu uygulamalarda kod üretme yöntemleri genellikle klasik yöntemlerle sınırlı kalmakta ve her bir uygulama için farklı ve uzun kodlar yazma gereksinimi duyulmaktadır. Bu çalışmada ise PMSM motorun Alan Yönlendirmeli Kontrol (Field Oriented Control, FOC) yöntemi ile denetim sisteminin hızlı modellenmesi ve bu model üzerinden hiçbir kodlama işlemine girilmeden gömülü kodun otomatik olarak üretimi ele alınacaktır.

Abstract

Containing advantages such as high power, high speed and moment considering current rate, high efficiency, low rotor inertia and low motor size of Permanent Magnet Synchronous Motor (PMSM) in a compact package, increases usage rate of this type of motor in high performance control systems which developed last years. Nowadays, motor control applications already performed by special processors such as Digital Signal Processors (DSP). But in that applications generally code generating methods limited with classical methods and need for writing long and different codes for each application. In this paper addressed that rapid modelling of control system of PMSM with Field Oriented Control (FOC) method and generating of embedded code automatically without writing any code over this model.

1. Giriş

Daimi mıknatıslı senkron motorun (PMSM) yüksek güç / ağırlık oranı, yüksek ivmelenme, moment geçişlerinin düzgünlüğü, akım oranına göre yüksek hız ve moment üretebilme kapasitesi, yüksek verim ve düşük atalet gibi avantajları kompakt bir yapı içerisinde barındırması, bu motor tipinin son yıllarda geliştirilen yüksek performanslı kontrol sistemlerinde kullanım yaygınlığını giderek artırmaktadır. Ayrıca rotor kütesinin düşük olması nedeniyle uygulanan gerilime çok hızlı tepki göstermesi ve rotor akısının sabit mıknatıslar tarafından sağlanması nedeniyle enerji darboğazına giren dünyamızda ileriki yıllarda bu motor tipine olan ilginin dolayısı ile de kullanım yaygınlığının daha da artacağı öngörülmektedir [1].

AC motorlarda en yaygın kullanılan kontrol yöntemleri skaler kontrol (V/f), Doğrudan moment kontrol (DTC) ve vektör kontrol (FOC – Field Oriented Control) yöntemleridir [2]. Günümüzde motor kontrol uygulamaları halihazırda DSP gibi özel işlemciler ile gerçekleştirilmektedir. Ancak gerçekleştirilen bu uygulamalarda kod üretme yöntemleri genellikle klasik yöntemlerle sınırlı kalmakta ve her bir uygulama için farklı ve uzun kodlar yazılma gereksinimi duyulmaktadır [3].

Bu çalışmada PMSM motorun FOC yöntemi ile kontrol sisteminin hızlı modellenmesi için Matlab/Simulink [4] ortamında Embedded Target for TIC2000 DSP [5] ve Real Time Workshop (RTW) [6] 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.

2. PMSM'nin Matematiksel Modeli ve FOC Yöntemi

Burada d ve q senkron olarak dönen eksen takımını, L_d, L_q endüktansı, R rotor sargı direncini, i_d, i_q akımı, V_d, V_q gerilimi, ψ_d, ψ_q akıyı, ψ_m sabit mıknatıs akısını, T_e elektriksel momenti, T_y yük momentini, B manyetik akı yoğunluğunu, w_r rotor hızını, w_e elektriksel hızı, θ_r rotor açısını temsil etmektedir [2,9].

PMSM'nin d-q modeli;

$$V_d = R i_d + L_d \frac{di_d}{dt} - w_r L_q i_q \quad (1)$$

$$V_q = R i_q + L_q \frac{di_q}{dt} - w_r L_d i_d + w_r \psi_m \quad (2)$$

$$\psi_d = L_d i_d + \psi_m \quad (3)$$

$$\psi_q = L_q i_q \quad (4)$$

$$T_e = 1.5P(\psi_m i_q + (L_d - L_q) i_d i_q) \quad (5)$$

$$\frac{dw_r}{dt} = \frac{T_e - T_y - B w_r}{J} \quad (6)$$

$$\frac{d\theta_r}{dt} = w_r \quad (7)$$

$$w_e = w_r * P \quad (8)$$

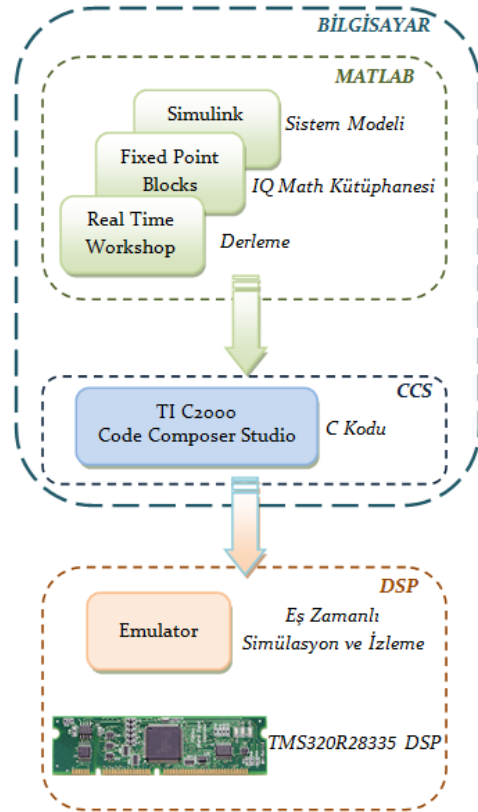
Daimi mıknatıslı senkron motorun FOC yöntemiyle denetlenmesinde amaç AC motoru DC motora benzeterek kontrolünü sağlamaktır. Bu benzetim ise stator akımlarının dönen d-q eksen akımına dönüştürülmesiyle yapılır. Bu akımlardan q bileşeni moment ile doğru orantılıdır. Dolayısı ile bu bileşenin kontrolü ile moment de kontrol edilmiş olur [7]. PMSM'de ($L_d=L_q$) iki eksen endüktansları birbirine eşittir. Buna göre eşitlik 5'teki moment ifadesi eşitlik 9'daki gibi hesaplanır.

$$T_e = 1.5P(\psi_m i_q) \quad (9)$$

Böylelikle akının sabit mıknatıstan dolayı sabit olması durumu da göz önünde bulundurularak DC motordaki gibi tek akım (I_q) kontrol edilerek moment kontrolü sağlanmış olur [2]. d-eksen akımının sıfırda tutulduğu bu yöntem Field Oriented Control (Alan Yönlendirmeli Kontrol, Vektör Kontrol) olarak isimlendirilir.

3. Hızlı Modelleme ve Model Tabanlı Gömülü Kod Üretimi

Hızlı modelleme, denetim algoritmalarının blok diyagramlarla gösterilebilen benzetimi için model tabanlı bir geliştirme ortamı olan Matlab / Simulink vasıtası ile sistem modelinin oluşturulma işlemidir. Hızlı modellemenin kilit noktası, otomatik kod üretimidir. Otomatik kod üretimi, algoritma kodlamasını otomatik olarak üretmeyi, hedef DSP kartına kodlamayı, derlemeyi, bağlamayı ve yüklemeyi kapsamaktadır. Herhangi bir programlama dili içine girilmeden DSP bloğu ve tasarım parametreleri gerçek zamanda değiştirilebilmektedir. Bu otomasyon, tasarım değişikliklerinin blok diyagram yoluyla doğrudan yapılabilmesine izin vermekte ve saniyeler içerisinde yeni testler için hazır olmasını sağlamaktadır. Gömülü kodların otomatik üretimi aşamaları Şekil 1'de görüldüğü üzere betimlenebilir.



Şekil 1: Gömülü kod üretiminin aşamaları

Oluşturulan simulink modelinde normal matematiksel fonksiyon blokları yerine Texas Instruments (TI) firması tarafından geliştirilen ve optimize edilmiş 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[8].

Simulink ortamında oluşturulan PMSM denetim sisteminin grafiksel blok diyagramından C kodları, RTW (Real Time Workshop) vasıtasıyla otomatik olarak üretilmektedir. Bu kodlar TI CCS2000 (Code Composer Studio 2000) DSP yazılım geliştirme ortamına aktarılacak diğer destek dosyalarıyla birlikte derlenmekte ve bilgisayarın usb portuna bağlı eZdspF28335 emülatör aracılığı ile DSP'ye yüklenmektedir. Böylece, Matlab/Simulink ortamında oluşturulan PMSM denetim sisteminin model tabanlı denetim blok diyagramının gerçek zamanlı sinyal işlemine tabi tutulmak üzere DSP ortamında gerçek zamanlı olarak aktarılması ve uygulanması mümkün olmaktadır.

Matlab / Simulink blok diyagramlarıyla modeli oluşturulan DSP algoritmaları, Real Time Workshop (RTW), Link for Code Composer Studio Development Tools ve Embedded Target for TIC2000 DSP alt yazılımları ile hedef DSP işlemcileri için makine diline (assembly) çevrilerek gerçek zamanda (real time) uygulaması ve tasarım doğrulaması çok hızlı bir şekilde yapılabilir. Bütün bu süreç ise gömülü kod üretimi olarak adlandırılmaktadır [8].

4. PMSM Denetim Sisteminin Simulink Modeli

FOC yöntemi ile PMSM denetim sistemi için Matlab / Simulink'te oluşturulmuş model tabanlı denetim blok diyagramı Şekil 2'de görülmektedir. Bu modelde görüldüğü üzere motorun mekanik hızını ölçmek için DSP'nin eQEP modülünden alınan veri Hız Hesaplama bloğu tarafından işlenerek motorun hız bilgisine dönüştürülmektedir. Hız Kontrolü bloğunda motorun anlık hızı ile istenilen hız karşılaştırılarak PID kontrolör vasıtası ile istenilen Iq akımının değeri belirlenmektedir. Akabinde istenen Iq akımı, ADC'den (Analog Digital Converter, Analog Dijital Çevirici) gelen Ia ve Ib akımları ve Enkoderden gelen pozisyon bilgisi Uzak Vektör Üretimi bloğundaki clark park dönüşümleri ve

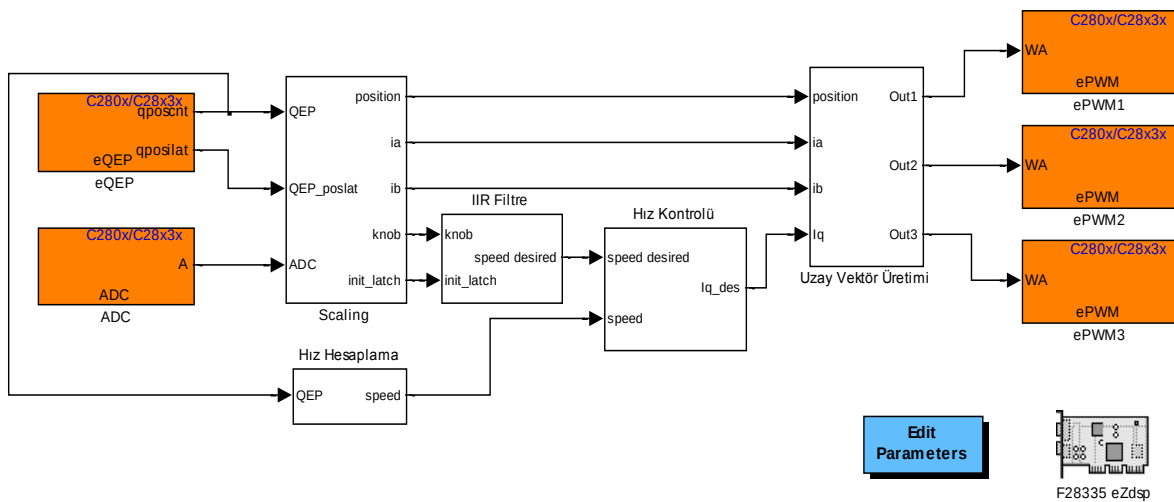
PWM ölçekleme blokları vasıtası ile PMSM'nin kontrolü için gerekli PWM sinyallerine dönüştürülmektedir.

Gömülü kodların otomatik üretimi ve uygulama adımlarının ekran görüntüsü Şekil 3'te görülmektedir. Burada gerçekleştirilen adımlar sırası ile şöyledir:

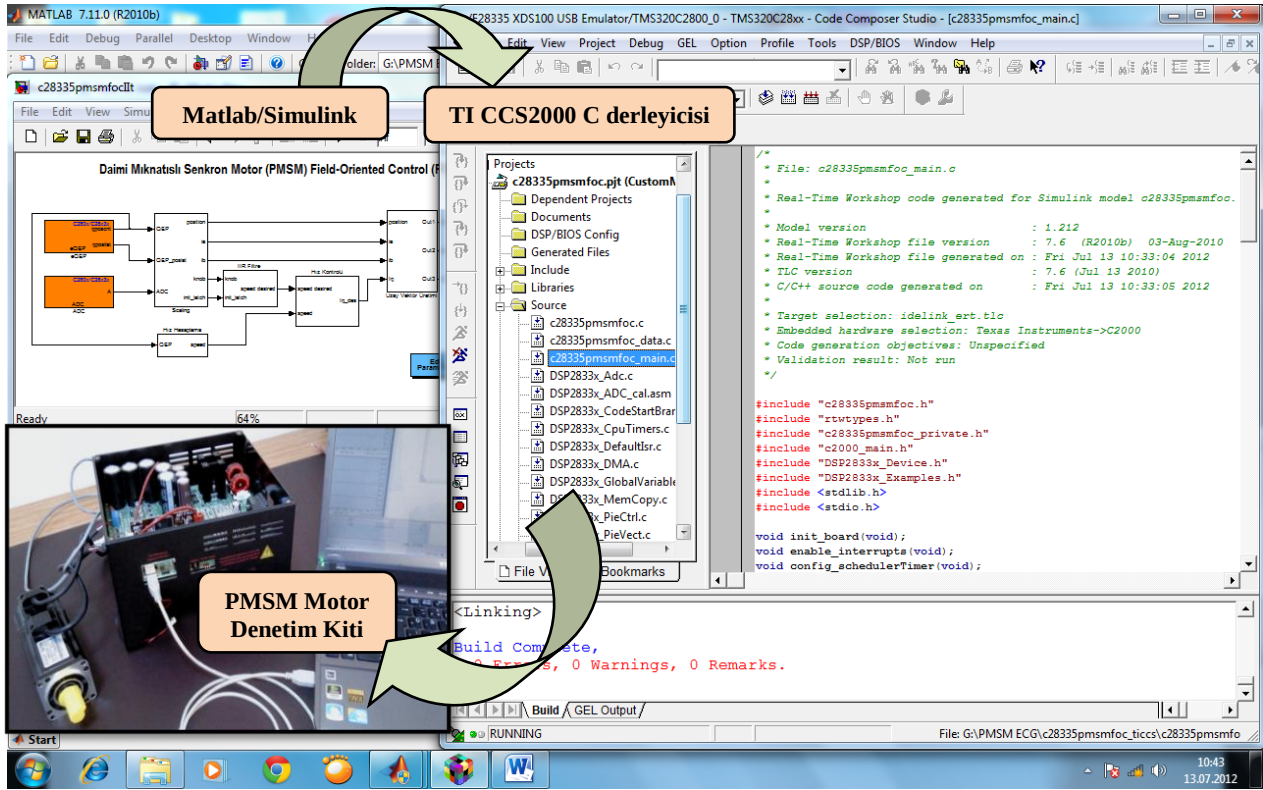
- PMSM denetim sistemini için Matlab / Simulink'te oluşturulmuş model tabanlı denetim blok diyagramı penceresinde model build edilmiştir.
- Sorunsuz gerçekleşen Build işleminden sonra Matlab otomatik olarak Code Composer Studio programını çağırmış ve bu program üzerinde projeyi oluşturmuştur.
- Akabinde header dosyaları, c dosyaları gibi proje için gerekli tüm kaynak dosyalar otomatik olarak üretilmiştir.
- Proje tamamlandığında bu dosyalar tekrar derlenerek DSP için gerekli kodlar oluşturulmuş ve DSP'ye yüklenmiştir.
- Böylelikle DSP için gerekli kodlar otomatik olarak üretilmiş DSP'ye yüklenmiş ve DSP, PMSM Motor Denetim Kiti üzerinden motor denetimi için kullanıma hazır hale getirilmiştir.

Bütün bu aşamalar hiçbir kodlama işlemi içerisine girilmeden otomatik olarak gerçekleştirilmiştir.

Daimi Mıknatıslı Senkron Motor (PMSM) Field-Oriented Control (FOC)



Şekil 2: PMSM Denetim Sisteminin Simulink Modeli



Şekil 3: Çalışmada kullanılan yüksek voltaj dijital PMSM motor denetim kiti (sol alt) ve gömülü kodların otomatik üretimi için gerçekleştirilen adımların ekran görüntüsü

5. Sonuçlar

Bu çalışmada PMSM motorun Alan Yönlendirmeli Kontrol (Field Oriented Control, FOC) yöntemi ile denetim sisteminin hızlı modellenmesi ve bu model üzerinden hiçbir kodlama işlemine girilmeden gömülü kodların otomatik olarak üretimi gerçekleştirilmiştir. Otomatik üretilen DSP kodları yine otomatik olarak Şekil 3'te görülen Yüksek Voltaj Dijital Motor Kontrol Kiti'ne bağlı olan DSP'ye yüklenmektedir. Akabinde yine bu kite bağlanmış durumda olan PMSM'nin kontrolü otomatik üretilen kodlar vasıtasıyla sağlanmaktadır. Motor kontrol algoritmasının Simulink blok diyagramından otomatik C kod üretimi işlemi, derleme, bağlama ve gerçek zamanlı DSP kodunun yüklenmesi işlemlerinin tamamı otomatik olarak gerçekleşmektedir. Dolayısı ile sistemde yapılacak herhangi bir değişikliğin model üzerinde gerçekleştirilmesiyle saniyeler içerisinde yeni otomatik kodların üretilmesi sağlanabilmektedir. Ayrıca, deneysel sonuçlara göre otomatik üretilen kodlar oldukça verimlidir. Bu da uygulama geliştirme çevrim süresini oldukça kısaltmakta ve maliyetin azalmasını sağlamaktadır.

6. Teşekkür

Bu çalışma, Bilecik Şeyh Edebali Üniversitesi BAP (Bilimsel Araştırma Projeleri) 2010-02-BİL.01-003 nolu proje kapsamında desteklemiştir.

7. Kaynaklar

[1] Akyazı, Ö., Küçükali, M. ve Akpınar A. S., "Sürekli Mıknatıslı Senkron Motorun Hız Denetiminin Farklı

Bulanık Üyelik Fonksiyonları Kullanılarak Gerçekleştirilmesi", *Elektrik-Elektronik ve Bilgisayar Sempozyumu*, 2011, 1.

- [2] Asker, M. E., Özdemir, M. ve Bayındır İ. B., "Kalıcı Mıknatıslı Senkron Motorun Hız Kontrol Sisteminde UVDGM ile Yapılan V/f ve Vektör Kontrol Yöntemlerinin İncelenmesi", *5. Uluslararası İleri Teknolojiler Sempozyumu*, 2009, 1-4.
- [3] Güven, S., Okumuş, H. İ. ve Yaşar İ., "SMDA Motorlu Otonom Araçların Gömülü Kod Üretimi ile TMS320F2808 DSP Tabanlı Hız Denetimi", *Elektrik-Elektronik ve Bilgisayar Sempozyumu*, 2011, 1.
- [4] Simulink, Simulation And Model – Based Design: User's Guide, Version 6.
- [5] Embedded Target for the TI TMS320C2000 DSP Platform for Use with Real – Time Workshop User's Guide, Version 6.
- [6] Real – Time Workshop, for use with Simulink: User's Guide, version 6.
- [7] Kazan, F. A. ve Bilgin, O., "Sabit Mıknatıslı Senkron Motorun Alan Yönlendirmeli Kontrolü ve Simülasyonu", *ELECO Elektrik, Elektronik, Bilgisayar Mühendisliği Sempozyumu*, 2008, 1.
- [8] Kesler, M., Uçar, M. ve Özdemir, E., "Paralel Aktif Güç Filtresi İçin DSP Tabanlı Denetim Algoritmasının Otomatik Gömülü Kod Üretimi ile Hızlı Prototiplendirilmesi", *ELECO Elektrik, Elektronik, Bilgisayar Mühendisliği Sempozyumu*, 2006, 1-3.
- [9] Akin, B. ve Bhardwaj M., Sensorless Field Oriented Control of 3-Phase Permanent Magnet Synchronous Motors, Texas Instruments, Application Notes.