



BİLECİK ŞEYH EDEBALI ÜNİVERSİTESİ
Fen Bilimleri Enstitüsü
Bilgisayar Mühendisliği Anabilim Dalı

SMSM DENETİM SİSTEMİNİN HIZLI MODELLENMESİ
ve DSP GÖMÜLÜ KODLARININ OTOMATİK ÜRETİLMESİ

Cem MORKOÇ
Yüksek Lisans Tezi

Tez Danışmanı
Doç. Dr. Metin KESLER

BİLECİK, 2014

Ref. No: 10039246



BİLECİK ŞEYH EDEBALI ÜNİVERSİTESİ
Fen Bilimleri Enstitüsü
Bilgisayar Mühendisliği Anabilim Dalı

SMSM DENETİM SİSTEMİNİN HIZLI MODELLENMESİ
ve DSP GÖMÜLÜ KODLARININ OTOMATİK ÜRETİLMESİ

Cem MORKOÇ
Yüksek Lisans Tezi

Tez Danışmanı
Doç. Dr. Metin KESLER

BİLECİK, 2014



BİLECİK SEYH EDEBALI UNIVERSITY
Graduate School Of Sciences
Department of Computer Engineering

RAPID PROTOTYPING of PMSM CONTROL SYSTEM
and AUTOMATIC GENERATING of DSP EMBEDDED CODES

Cem MORKOÇ
Master's Thesis

Thesis Advisor
Associate Professor, Metin KESLER

BİLECİK, 2014

 <p>BİLECİK ŞEYH EDEBALI ÜNİVERSİTESİ FEN BİLİMLERİ ENSTİTÜSÜ</p>	<p>YÜKSEK LİSANS</p> <p><u>JÜRİ ONAY FORMU</u></p>
--	--

Bilecik Şeyh Edebali Üniversitesi Fen Bilimleri Enstitüsü Yönetim Kurulu'nun tarih ve sayılı kararıyla oluşturulan jüri tarafından 04.06.2014, 10:00 tarihinde tez savunma sınavı yapılan Cem MORKOÇ'un "SMSM Denetim Sisteminin Hızlı Modellenmesi ve DSP Gömülü Kodlarının Otomatik Üretilmesi" başlıklı tez çalışması Bilgisayar Mühendisliği Anabilim Dalında YÜKSEK LİSANS tezi olarak oy birliği/oy çokluğu ile kabul edilmiştir.

JÜRİ

ÜYE
(TEZ DANIŞMANI) : Doç. Dr. Metin KESLER



ÜYE : Yrd. Doç. Dr. Uğur YÜZGEÇ



ÜYE : Yrd. Doç. Dr. Murat KARABACAK



ONAY

Bilecik Şeyh Edebali Üniversitesi Fen Bilimleri Enstitüsü Yönetim Kurulu'nun .../.../..... tarih ve/..... sayılı kararı.

İMZA/MÜHÜR

ÖZET

Sürekli Mıknatıslı Senkron Motor'un, (SMSM) 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 arttırmaktadır. 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 tez çalışmasında ise SMSM'nin Alan Yönlendirmeli Kontrol (Field Oriented Control, FOC) yöntemi ile denetim sisteminin hızlı modellenmesi ve bu model üzerinden hiçbir kodlama işlemine girilmeden DSP gömülü kodlarının otomatik olarak üretimi ele alınmaktadır.

Anahtar Kelimeler

SMSM, DSP, Matlab, PSIM, Gömülü Kod Üretimi

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 were performed by special processors such as Digital Signal Processors (DSP). But in that applications generally code generating methods were limited by classical methods and were needed for writing long and different codes for each application. In this paper, rapid modelling of control system of PMSM was presented by Field Oriented Control (FOC) method and by generating of embedded code automatically without writing any codes on this model.

Key Words

SMSM, DSP, Matlab, PSIM, Embedded Code Generation

TEŞEKKÜR

Yüksek lisans öğrenimim ve bu tez çalışması süresince değerli fikirleriyle ufkumu genişleten ve engin tecrübeleriyle beni yönlendiren danışman hocam Sayın Doç. Dr. Metin KESLER'e göstermiş olduğu yakın alakadan dolayı teşekkürlerimi sunarım.

Ayrıca, bu tez çalışması sürecinde manevi desteklerini hiç esirgemeyen, Sayın Yrd. Doç. Dr. Şenol AVCI hocama ve Sayın Yrd. Doç. Dr. Cemalettin HATİPOĞLU hocama ve bana sağladığı teknik yardım ve desteklerden dolayı Sayın Öğr. Gör. Harun ÖZBAY hocama da teşekkür ederim.

Elbette ki, hayatımın her safhasında olduğu gibi tez çalışmam süresince de sabırla bana destek olan sevgili eşim İlkur KIRAN MORKOÇ'a ve birlikte geçireceğimiz oyun zamanımızdan azıcık eksiltmek zorunda kaldığım biricik kızım Duru'ya da teşekkürü bir borç bilirim.

İÇİNDEKİLER

Sayfa No

ÖZET	ii
ABSTRACT	iii
TEŞEKKÜR	iv
İÇİNDEKİLER	v
ÇİZELGELER DİZİNİ	vii
ŞEKİLLER DİZİNİ	viii
KISALTMALAR DİZİNİ	xi
SİMGELER DİZİNİ	xii
1. GİRİŞ	1
2. SABİT MIKNATISLI SENKRON MOTOR (SMSM) ve DENETİM YÖNTEMLERİ	4
2.1 SMSM'nin Elektrik Motorları Ailesindeki Yeri ve Türleri	4
2.2 SMSM'nin Yapısı.....	8
2.3 SMSM'nin Çalışma Prensipleri.....	9
2.4 SMSM'nin Avantaj / Dezavantaj ve Kullanım Alanları	11
2.5 SMSM'nin Matematiksel Modeli.....	12
2.6 SMSM'nin Alan Yönlendirmeli Kontrol (AYK)Yöntemi ile Denetimi	19
2.6.1 AYK Denetim Yöntemi	19
2.6.2 Sensörsüz AYK Yöntemleri.....	22
2.6.2.1 İndüklenen Gerilime Dayanan Konum Tahmini	22
2.6.2.2 İşaret Enjeksiyonuna Dayanan Konum Tahmini.....	23
2.6.2.3 Adaptif Yöntemler ve Yapay Sinir Ağları.....	23
2.6.2.4 Gözlemleyici Kullanılarak Yapılan Konum Tahmini	23
2.6.3 Darbe Genişlik Modülasyonu (DGM) Teknikleri.....	24
2.6.3.1 Sinüzoidal DGM.....	24
2.6.3.2 Uzay Vektör DGM	25
3. MODEL TABANLI GÖMÜLÜ KOD ÜRETİM ORTAMLARI	30
3.1 Matlab.....	30
3.1.1 Simulink	31
3.1.2 Real Time Workshop	32
3.1.3 The Embedded Target for TI C2000 DSP.....	33

3.2	Power SIM (PSIM).....	34
3.2.1	SimCoder	35
3.2.2	TI DMC.....	35
3.3	Code Composer Studio (CCS)	36
3.4	Yüksek Voltaj Motor Denetim ve Güç Faktör Kompanzasyonu Kiti	37
4.	MODEL TABANLI GÖMÜLÜ KOD ÜRETİM AŞAMALARI	40
4.1	Sayısal Sinyal İşlemci (Digital Signal Processor, DSP, SSİ).....	40
4.2	Model Tabanlı Gömülü Kod Üretimi	44
4.2.1	Matlab Ortamında Model Tabanlı Gömülü Kod Üretimi	46
4.2.2	PSIM Ortamında Model Tabanlı Gömülü Kod Üretimi	46
5.	DENEYSEL ÇALIŞMALAR.....	48
5.1	Matlab Ortamında AYK Yöntemi ile SMSM Denetim Sistemi Modelinin Oluşturulması	48
5.2	PSIM Ortamında AYK Yöntemi ile SMSM Denetim Sistemi Modelinin Oluşturulması	57
5.3	Sistem Modelinden Gömülü Kodların Otomatik Olarak Üretilmesi ve Hedef DSP'ye Yüklenmesi	68
5.4	Deneysel Sonuçlar	70
6.	SONUÇ ve ÖNERİLER	78
	KAYNAKLAR	80

ÇİZELGELER DİZİNİ

Sayfa No

Çizelge 2.1. Altı bölge için inverter güç anahtarlarının doluluk süreleri.....28

ŞEKİLLER DİZİNİ

	Sayfa No
Şekil 2.1. Rotor ve statora birer örnek.....	4
Şekil 2.2. SMSM'nin elektrik motorları ailesindeki yeri.....	5
Şekil 2.3. SMSM'lerin sınıflandırılması.....	5
Şekil 2.4. (a) Yüzey mıknatıslı senkron motorların yapısı (b) içten mıknatıslı senkron motorların yapısı.....	7
Şekil 2.5. SMSM'nin kesit görünümü (Çelik, E., 2012).....	8
Şekil 2.6. SMSM motor sürücü sistemi.....	10
Şekil 2.7. Üç fazlı rotoru iki kutuplu bir SMSM'nin (a) stator sargılarının dağılımı (b) sargı akımları ve yönleri.....	10
Şekil 2.8. SMSM'nin iki faz eşdeğeri (Karabacak, 2012).....	13
Şekil 2.9. SMSM'nin durağan ve senkron hızda dönen rotor eksen takımlarındaki eşdeğeri (Karabacak, 2012).....	16
Şekil 2.10. SMSM'nin birleşik yapıda dinamik d-q modeli ($T_e=L/R$) (Karabacak, 2012).....	18
Şekil 2.11. SMSM'un ayrık yapıda dinamik d-q modeli elektriksel eşdeğer devreleri (Karabacak, 2012).....	18
Şekil 2.12. SMSM'nin AYK yöntemine ilişkin blok diyagramı.....	20
Şekil 2.13. SMSM'nin sürekli durum vektör diyagramı.....	22
Şekil 2.14 Sinüzoidal DGM'nin prensip şeması.....	25
Şekil 2.15. Üç fazlı gerilim kaynaklı evirici anahtar durumları (Jung, 2005).....	26
Şekil 2.16. Her bir ayrık uzay vektörü için çıkış gerilimleri (Jung, 2005).....	26
Şekil 2.17. Sabit eksen takımındaki anahtarlama vektörleri (Karabacak, 2012).....	27
Şekil 2.18. Örnek anahtarlama deseni (Karabacak, 2012).....	29
Şekil 3.1. Simulink ekran görünümü.....	32
Şekil 3.2. TI C2000 işlemcisi için Simulink kütüphanesi ve kütüphanedeki blokların görünümü.....	33
Şekil 3.3. PSIM ve kütüphanesinin ekran görünümü.....	35
Şekil 3.4. PSIM içerisindeki TI DMC Kütüphanesi.....	36
Şekil 3.5. CCS işleyiş blok şeması.....	37
Şekil 3.6. Yüksek Voltaj Motor Denetim ve Güç Faktör Kompanzasyonu Kiti.....	38
Şekil 3.7. Yüksek Voltaj Motor Denetim ve Güç Faktör Kompanzasyonu Kiti'nin blok diyagramı bir C2000 DSP ile birlikte.....	39
Şekil 4.1. Tipik bir mikroişlemcinin blok diyagramı.....	41
Şekil 4.2. Tipik bir mikro bilgisayarın blok diyagramı.....	42
Şekil 4.3. TMS320F2833x Blok Diyagramı.....	44
Şekil 4.4. Model tabanlı gömülü kod üretimi ortamlarının birbiri ve DSP ile ilişkisi....	45
Şekil 4.5. Matlab ortamında gömülü kod üretimi aşamaları.....	46
Şekil 4.6. PSIM ortamında gömülü kod üretimi aşamaları.....	47
Şekil 5.1. AYK yöntemi ile SMSM denetim sisteminin Matlab / Simulink'te oluşturulmuş model tabanlı denetim blok diyagramının genel görünümü.....	50

Şekil 5.2. Target Preferences bloğunun ayarları.....	51
Şekil 5.3. Fonksiyon - Çağırma alt sisteminin yapısı.....	51
Şekil 5.4. Ölçekleme alt sisteminin yapısı.....	52
Şekil 5.5. Başlangıç Rampa Sinyali alt sisteminin yapısı.....	52
Şekil 5.6. Uzay Vektor Üretici alt sisteminin yapısı.....	53
Şekil 5.7. Uzay Vektor Üretimi alt sisteminin yapısı.....	53
Şekil 5.8. DSP'nin PWM modüllerinin parametre ayarları.....	54
Şekil 5.9. DSP'nin ADC modülünün parametre ayarları.....	55
Şekil 5.10. DSP'nin ADC modülünün parametre ayarları.....	55
Şekil 5.11. IIR Filtre alt sisteminin yapısı.....	56
Şekil 5.12. Hiz Hesaplayıcı alt sisteminin yapısı.....	56
Şekil 5.13. Hiz Denetimi alt sisteminin yapısı.....	57
Şekil 5.14. AYK yöntemi ile SMSM denetim sisteminin PSIM ortamında oluşturulmuş model tabanlı denetim blok diyagramının genel görünümü.....	58
Şekil 5.15. SMSM parametrelerinin ayarlanması.....	59
Şekil 5.16. Simülasyon parametrelerinin ayarlanması.....	60
Şekil 5.17. Serial Peripherals Interface Device ve Configuration parametrelerinin ayarlanması.....	61
Şekil 5.18. Serial Communitaion Interface parametrelerinin ayarlanması.....	61
Şekil 5.19. Serial Peripherals Interface Output parametrelerinin ayarlanması.....	61
Şekil 5.20. Parameter File bloğunda saklanan parametre değerleri.....	62
Şekil 5.21. DSP'nin ADC modülü için yapılan parametre ayarları.....	63
Şekil 5.22. DSP'nin 3 faz PWM modülü için yapılan parametre ayarları.....	63
Şekil 5.23. DSP'nin sayısal çıkış modülü için yapılan parametre ayarları.....	64
Şekil 5.24. AYK yöntemiyle SMSM'nin denetimi için yürütülen işlem basamaklarını içeren "AYK Yöntemi ile SMSM Denetimi" alt devresinin yapısı.....	65
Şekil 5.25. AYK Yöntemi ile SMSM Denetimi alt devresinin içeriği.....	66
Şekil 5.26. AYK Yöntemi ile SMSM Denetimi alt devresinin içeriği.....	66
Şekil 5.27. AYK Yöntemi ile SMSM Denetimi alt devresinin içeriği.....	67
Şekil 5.28. AYK Yöntemi ile SMSM Denetimi alt devresinin içeriği.....	68
Şekil 5.29. Hedef DSP'ye uygun gömülü kodların otomatik üretilmesi, derlenmesi ve yüklenmesi için gerçekleştirilen adımların ekran görüntüsü.....	70
Şekil 5.30. DSP Oscilloscope penceresi ve SCI iletişim arayüzü vasıtası ile elde edilen Ta, Tb ve Tc 3 faz gerilimleri Speedref1=0.25 iken.....	71
Şekil 5.31. DSP Oscilloscope penceresi ve SCI iletişim arayüzü vasıtası ile elde edilen Ta, Tb ve Tc 3 faz gerilimleri Speedref1=0.3 iken.....	71
Şekil 5.32. Yüksek Voltaj Motor Denetim ve Güç Faktör Kompanzasyonu Kiti ile dört kanallı DAC arasındaki bağlantı.....	72
Şekil 5.33. SMSM'nin AYK yöntemi ile denetim sistemi.....	73
Şekil 5.34. DAC çıkışında elde edilen osiloskop ölçüm sonuçları Ta (mavi), Tb (turkuaz), Tc (mor) ve Theta (yeşil).....	73

Şekil 5.35. DAC çıkışında elde edilen osiloskop ölçüm sonuçları Ta (mavi), Tb (turkuaz), Tc (mor) ve Theta (yeşil).....	74
Şekil 5.36. DAC çıkışında elde edilen osiloskop ölçüm sonuçları Ta (mavi), Tb (turkuaz), Tc (mor) ve Vab (kırmızı).....	74
Şekil 5.37. Sistem açık çevrim ile çalıştırıldığında elde edilen referans hız ve tahmini hız sinyalleri.....	75
Şekil 5.38. Sistem kapalı çevrim ile çalıştırıldığında elde edilen referans hız ve tahmini hız sinyalleri.....	76
Şekil 5.39. Referans ve tahmin edilen Theta sinyalleri Speedref1=0.35 iken.....	76
Şekil 5.40. Referans ve tahmin edilen Theta sinyalleri Speedref1=0.5 iken.....	77

KISALTMALAR DİZİNİ

AA	: Alternatif Akım (AC)
ADC	: Analog Digital Converter (Analog Sayısal Çevirici)
ALU	: Arithmetic Logic Unit
AYK	: Alan Yönlendirmeli Kontrol (Field Oriented Control – FOC)
CCS	: Code Composer Studio
CPU	: Central Processing Unit
DA	: Doğru Akım (DC)
DAC	: Digital Analog Converter (Sayısal Analog Çevirici)
DGM	: Darbe Genişlik Modülasyonu
DMC	: Digital Motor Control
DSC	: Digital Signal Controller (Sayısal Sinyal Denetleyici)
DSP	: Digital Signal Processor (Sayısal Sinyal İşlemci)
eQEP	: Enhanced Quadrature Encoder Pulse
GPIO	: General Purpose Input Output (Genel Amaçlı Giriş – Çıkış)
IGBT	: Insulated-Gate Bipolar Transistor
IPM	: Intelligent Power Module (Akıllı Güç Modülü)
IR	: Instruction Register
İMSM	: İçten Mıknatıslı Senkron Motor
LSI	: Large Scale Integration
PFC	: Power Factor Correction (Güç Faktör Kompanzasyonu)
PWM	: Pulse Width Modulation (Darbe Genişlik Modülasyonu)
RTW	: Real Time Workshop
SCI	: Serial Communication Interface
SMO	: Sliding Mode Observer (Kayan Mod Gözlemleyici)
SMSM	: Sabit Mıknatıslı Senkron Motor
SPI	: Serial Peripheral Interface
TI	: Texas Instruments
UVDGM	: Uzay Vektör Darbe Genişlik Modülasyonu
USB	: Universal Serial Bus
VLSI	: Very Large Scale Integration
YMSM	: Yüzey Mıknatıslı Senkron Motor

SİMGELER DİZİNİ

i_a	: a faz akımı
i_b	: b faz akımı
i_{sd}	: Sabit d eksen akımı
i_{sq}	: Sabit q eksen akımı
i_{sdref}	: Akı referansı
i_{sqref}	: Moment referansı
$i_{s\alpha}$: Dönen eksen akımı (α)
$i_{s\beta}$: Dönen eksen akımı (β)
L_d, L_q	: d-q eksenli indüktansları
L_s	: Stator indüktansı
P_{em}	: Elektromekanik Güç
P_{in}	: Motorun Giriş Gücü
R_s	: Stator direnci
T_{ind}	: Elektromekanik Moment
T_e	: SMSM'de üretilen elektromanyetik moment
T_s	: Anahtarlama periyodu
T_y	: Yük momenti
V_a, V_b, V_c	: a, b, c faz gerilimleri
V_d, V_q	: d, q eksenli stator gerilimleri
V_{sdref}	: Referans gerilim vektörü
V_{sqref}	: Referans gerilim vektörü
$\lambda_a, \lambda_b, \lambda_c$: Faz sargılarının toplam akıları
λ_d, λ_q	: d, q eksenli toplam akıları
λ_s	: Stator akısı
θ_e	: Rotorun elektriksel yer değiştirmesi
θ_{rm}	: Rotorun mekanik yer değiştirmesi
ω_e	: Elektriksel açısal hız

1. GİRİŞ

Yarı iletken tümleşik devreler ve otomasyon teknolojilerinde meydana gelen gelişmeler, insandan bağımsız olarak çalışabilen sistemlerin oluşturulabilmesi fikrini de beraberinde getirmektedir. Her ne kadar bu tarz sistemlerin oluşturulma ve satın alma maliyetleri oldukça yüksek olsa da işletme ve bakım maliyetlerinin nispeten daha düşük olduğu görülmektedir. Ayrıca insan kaynaklı hataların meydana gelme olasılığı da oldukça azdır. Bu tarz sistemlerin tasarımında öncelikli olarak, kullanılacak elektrik makinasının, akabinde de denetim yönteminin belirlenmesi sistemin performansını doğrudan etkileyeceği için büyük önem arz etmektedir.

Teknolojideki gelişmelere rağmen, hızla artan insan nüfusu karşısında yetersiz kalan enerji kaynakları, daha verimli cihazlar kullanmayı veya cihazları daha verimli çalıştıracak sistemlerin tasarımını zorunlu hale getirmektedir. Bu doğrultuda, elektrik makinalarının yapısında, verimi arttırmak üzere sabit mıknatıslar kullanma fikri ortaya çıkmıştır.

Sürekli Mıknatıslı Senkron Motor'un, (SMSM) 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 arttırmaktadır. Ayrıca rotor kütlelerinin 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 (Morkoç ve Kesler, 2012; Akyazı vd., 2011).

Elektrik makinalarının denetimi için kullanılan skaler kontrol yöntemleri, istenilen performansı sağlayamadığından, günümüzde bu kontrol yöntemlerinin yerini yüksek performanslı vektör kontrol yöntemleri almaktadır. SMSM'nin vektör kontrol yöntemlerinden olan Alan Yönlendirmeli Kontrol (AYK), güç elektroniği ve yarı iletken tümleşik devre teknolojisindeki gelişmeler ile birlikte yaygın bir şekilde kullanılmaya başlanmıştır. Bu kontrol yönteminde 3 fazlı motor denklemleri d-q dönüşümü yapılarak iki boyutlu vektör düzlemine aktararak – doğru akım motoruna

benzetilerek - motor kontrolü gerçekleştirilmektedir (Çelik, 2012; Bal vd., 2007; Er, 2007; Kaewjinda ve Konghirun, 2007; Kazan ve Bilgin, 2006; Öksüztepe, 2008; Platnic, 1998; Teker, 2008).

Günümüzde geliştirilen motor denetim uygulamaları halihazırda Sayısal İşaret İşlemci (DSP – SSİ) 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 yazılmasına gereksinim duyulmaktadır (Morkoç ve Kesler, 2012; Güven vd., 2011).

Ayrıca DSP tabanlı denetimin yapılabilmesi için kullanılmak istenen DSP'lere ait yapı, tasarım yöntemleri ve kod üretimine dair ileri seviyede bilgiye sahip olmak gerekmektedir. Kullanılan DSP ve yapılan uygulamaya uygun kodların oluşturulma işleminin kısa tutulması ve uygulamanın geliştirme sürecinde bu program üzerinde hızlı bir şekilde değişiklik yapılabilmesi, hızlı modelleme ve beraberinde gerçekleştirilen otomatik kod üretimi ile mümkün olmaktadır. Otomatik kod üretimi, algoritma kodlamasını otomatik olarak üretmeyi içermekte, hedef DSP kartına kodlamayı, derlemeyi, bağlamayı ve yüklemeyi kapsamaktadır. Bu otomasyon, sistemi optimum hale getirebilmek adına yapılması gereken tasarım değişikliklerinin de blok diyagram üzerinden çok kısa sürelerde yapılabilmesine izin vermekte ve yine çok kısa sürelerde yeni testler için hazır olmasını sağlamaktadır (Kesler vd., 2006; Hong vd., 2000).

Bu süreçte, kullanılan aracı programlar yardımıyla sistem modellendikten sonra kod üretimi, derlenmesi ve yardımcı donanımlar vasıtası ile DSP'ye aktarılması gibi aşamalar otomatik olarak gerçekleşmektedir. Böylelikle, sistemde yapılması gereken değişiklikler için sadece aracı program üzerinde oluşturulan modelde değişiklikler yapılması yeterli olmaktadır (Kesler vd., 2006; Güven vd., 2011).

Bu tezde, SMSM'nin Alan Yönlendirmeli Kontrol (Field Oriented Control – FOC) yöntemi ile denetim sisteminin Matlab/Simulink ve PSIM ortamında hızlı modellenmesi ve hedef DSP kodlarının üretiminin otomatik olarak gerçekleştirilmesi amaçlanmaktadır. Bu amaç doğrultusunda, Matlab'da Real Time Workshop (RTW), PSIM'de Simcoder alt yazılımları ve Embedded Target for TI C2000 DSP kütüphanesi kullanılarak sistem modeli oluşturulmaktadır. Bu sistem modeli üzerinden otomatik üretilen kodlar, TI CCS2000 (Code Composer Studio 2000) yazılım geliştirme ortamında derlenerek High Voltage Motor Control & Power Factor Correction Kit

(Yüksek Voltaj Motor Denetim ve Güç Faktör Kompanzasyonu Kiti) üzerindeki emulatör vasıtasıyla hedef DSP'ye yüklenmekte ve aynı kit üzerinde bağlı olan SMSM'nin hız kontrolü sağlanmaktadır.

Bu tezde gerçekleştirilen uygulama sonucunda SMSM'nin hız denetimi gerçekleştirilmekte ve model tabanlı gerçekleştirilen tasarım süreci sayesinde hem sistem tasarımı süreci hem de bu süreçteki maliyetler oldukça azaltılmaktadır.

Bu tez kapsamında altı bölüm yer almaktadır. İlk bölümde tez çalışması için ele alınan problemin tanımına ve önemine, tezin amacına ve kapsamına yer verilmektedir.

İkinci bölümde, elektrik motorları ailesinin yapısına, çalışmada kullanılan Sabit Mıknatıslı Senkron Motor'un (SMSM) elektrik motorları ailesindeki yerine, SMSM'nin yapısına, çalışma prensibine, avantaj, dezavantaj ve kullanım alanlarına, matematiksel modeline ve Alan Yönlendirmeli Kontrol (AYK) yöntemi ile denetimine yer verilmektedir.

Üçüncü bölümde, model tabanlı gömülü kod üretme ortamlarından çalışmada ele alınacak olan Matlab, PSIM ve Code Composer Studio (CCS) programlarına, bu programların çalışmada yararlanılan alt programlarına ve çalışmada büyük öneme sahip olan Yüksek Voltaj Motor Denetim ve Güç Faktör Kompanzasyonu Kiti'ne yer verilmektedir.

Dördüncü bölümde, çalışmada kullanılan Sayısal İşaret İşlemci'ye (DSP – SSİ), üçüncü bölümde ele alınan model tabanlı gömülü kod üretim ortamlarında DSP için uygun otomatik kod üretimini gerçekleştirebilmek adına izlenmesi gereken aşamalara, her iki model tabanlı gömülü kod üretimi ortamı için ayrı ayrı yer verilmektedir.

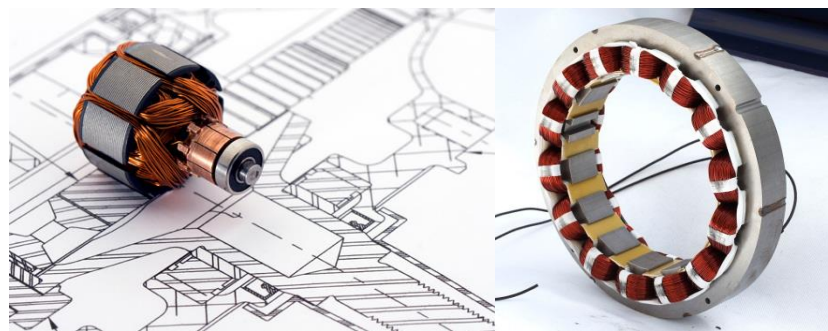
Beşinci bölümde, SMSM'nin AYK yöntemi ile denetim sisteminin hızlı modellenmesi ve DSP gömülü kodlarının otomatik üretimini sağlayacak olan çalışmanın uygulama aşamalarına yine her iki model tabanlı gömülü kod üretimi ortamı için ayrı ayrı yer verilmiştir.

Son olarak altıncı bölümde ise yapılan tez çalışması sonucu elde edilen kazanımlar belirtilerek çalışma ile ilgili bir değerlendirme yapılmıştır.

2. SABİT MIKNATISLI SENKRON MOTOR (SMSM) ve DENETİM YÖNTEMLERİ

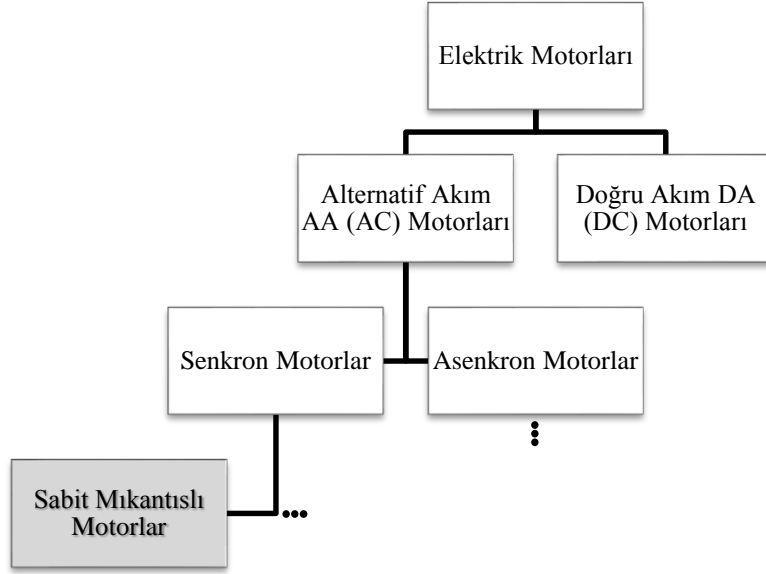
2.1 SMSM'nin Elektrik Motorları Ailesindeki Yeri ve Türleri

Elektrik motorları, elektrik enerjisini mekanik (hareket) enerjiye çeviren makinalardır. Bu tanımın, motorlar için kullanılan tanımların arasında oldukça fazla yer aldığı görülmektedir. Her elektrik makinası biri sabit, stator ve diğeri kendi çevresinde dönen, rotor ya da endüvi olarak adlandırılan iki ana kısımdan oluşmaktadır. Bu ana kısımlar da elektrik akımını ileten parçalar (sargılar), manyetik akıyı ileten parçalar ve motor yapısını oluşturan parçalar (vidalar, yataklar) olmak üzere alt kısımlara ayrılabilir. Şekil 2.1'de rotor ve statorun birer örnek resmi görülmektedir.



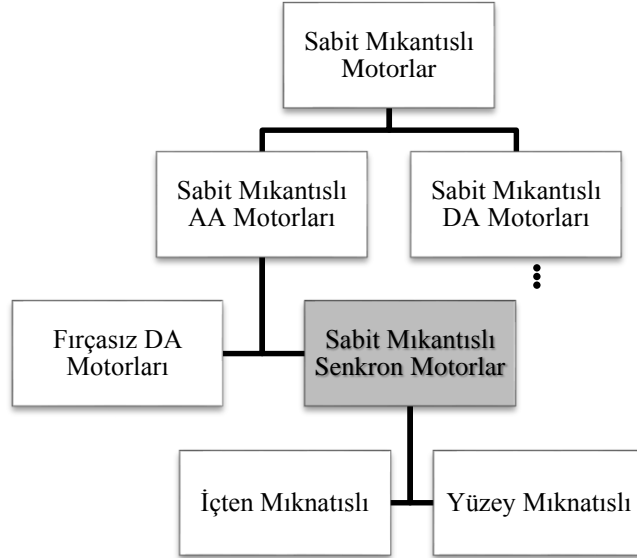
Şekil 2.1. Rotor ve statora birer örnek.

Doğası gereği çok farklı ihtiyaçları karşılamak amacıyla birçok farklı motor türü geliştirildiğinden, motor türlerini sınıflandırma söz konusu olduğunda, farklı açılardan bakılarak birçok farklı sınıflandırma yapılabilmektedir. Hal böyle iken, tanımda bahsi geçen mekanik enerjiye dönüştürülen elektrik enerjisi türü temel alınarak yapılan sınıflandırma türünün diğerlerine nazaran daha sık kullanıldığı görülmektedir. Bu sınıflandırma türü doğrultusunda motorlar, mekanik enerjiye dönüştürülen elektrik enerjisi türü alternatif akım olan alternatif akım motorları (AA veya AC motorlar) ve doğru akım olan doğru akım motorları (DA veya DC motorlar) olmak üzere iki ana grupta incelenmektedir. Bu doğrultuda elektrik motorları Şekil 2.2'de görüldüğü üzere sınıflandırılabilirler. Bu sınıflandırmada da görüldüğü üzere mevcut çalışmada kullanılan motor türü olan SMSM, AA motorları ailesinin bir üyesidir.



Şekil 2.2. SMSM'nin elektrik motorları ailesindeki yeri.

Sabit mıknatıslı motorlar Şekil 2.3'te görüldüğü üzere öncelikle besleme gerilimine göre sabit mıknatıslı DA motorları ve sabit mıknatıslı AA motorları olarak iki gruba ayrılmaktadır. Sabit mıknatıslı DA motorları genellikle düşük güçlüdür ve stator manyetik alanı mıknatıslar tarafından sağlanmaktadır. Geleneksel DA motorlarında olduğu gibi yapılarında fırça ve kollektör barındırmaktadır (Çelik, 2012; Wijenayake ve Schmidt, 1997).



Şekil 2.3. SMSM'lerin sınıflandırılması.

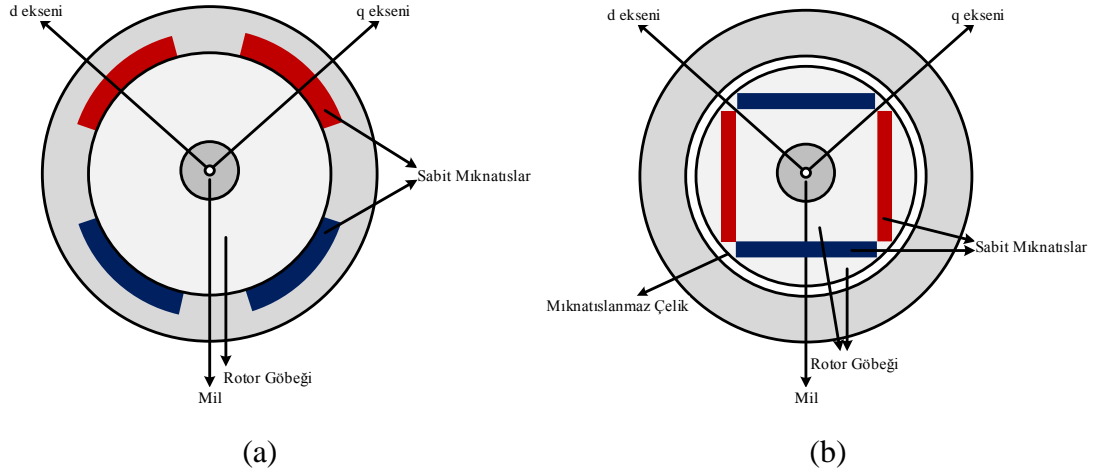
Sabit mıknatıslı AA motorlarında, uyarım akısı rotora yerleştirilen mıknatıslar tarafından oluşturulmakta ve bu durumun sonucu olarak da yapılarında fırça ve kolektör düzeneğine olan ihtiyaç ortadan kalkmaktadır. Fırça ve kolektör düzeneğinin bulunmamasından dolayı, geleneksel DA motorlarının patlamalı ve tozlu ortamlarda çalışmama ve sık bakım gerektirme gibi dezavantajları bu motorlarda söz konusu olmamaktadır. Bunun yanı sıra, rotor dönme frekansı ile statora uygulanan gerilimin frekansının senkronize edilmesi gereksinimi ve dolayısı ile bunu gerçekleştirmek üzere bir konum algılayıcısına ihtiyaç duymaları bu motorların dezavantajları arasında sayılabilmektedir (Çelik, 2012; Demirbaş, 2001; Haque vd., 2003; Perera, 2002).

Sabit mıknatıslı AA motorları, Fırçasız DA motoru ve SMSM olarak ikiye ayrılmaktadır. Fırçasız DA motorlarında manyetik alan yamuk biçiminde olduğundan bu motorlar Yamuk Tip Sabit Mıknatıslı Motor olarak da bilinmektedir. Bu motorun çalışma prensibi geleneksel DA motorlarına benzerdir. Bu motorlarda fırça ve komütatör takımı bulunmadığından, fırça ve kolektör takımının yapmış olduğu komütasyon işlemini güç elektroniği elemanları elektronik olarak gerçekleştirmektedir. “Fırçasız” kavramı da kaynağını buradan almaktadır. Bahsi geçen komütasyon işlemi, rotor sargılarındaki akım yönünün değiştirilmesi işlemidir ve bu yön değiştirme işlemi de bu tip motorlarda elde edilen momentin değişken olmasına neden olmaktadır. Ayrıca, yüksek hızlar elde etmek için anahtarlama frekansının artırılmasına da gereksinim duyulmaktadır (Bal, 2006; Çelik, 2012; Jang-Mok ve Seung-Ki, 1997; Petrovic vd., 2000).

SMSM’lerin stator sargılarına uygulanan üç faz gerilimler ile rotorun dönme frekansının senkronize edilmesi gerekmektedir. Statorlarındaki sargılar düzgün dağıtılmış yapıda olduğundan statorda oluşan manyetik alan sinüzoidal şeklindedir. Bu nedenle bu tip motorlar aynı zamanda sinüzoidal tip sabit mıknatıslı motor olarak da bilinmektedir. Bu motorlarda stator yapısı asenkron motorun stator yapısına benzemektedir ve fırçasız DA motoruna göre momenti daha düzgündür.

Bu motorlar rotora mıknatısların yerleştirilme biçimine göre Yüzey Mıknatıslı Senkron Motor (YMSM, surface magnet) ve İçten Mıknatıslı Senkron Motor (İMSM, interior magnet) olmak üzere iki gruba ayrılmaktadır. YMSM basit yapısı nedeniyle yaygın bir şekilde kullanılmakla birlikte yüksek hızlarda rotora yerleştirilen mıknatısların merkezkaç kuvvetine karşı koyamaması gibi bir dezavantaja sahiptir. Bu

durum da kullanımının genellikle düşük hız uygulamaları ile sınırlı kalmasına neden olmaktadır (Çelik, 2012; Perera, 2002). Şekil 2.4 (a)'da YMSM Şekil 2.4 (b)'de ise İMSM iç yapısı görülmektedir.



Şekil 2.4. (a) Yüzey mıknatıslı senkron motorların yapısı (b) İçten mıknatıslı senkron motorların yapısı.

İMSM'lerde mıknatıslar, rotorda açılan oluklara yerleştirilmektedir. Bu motor tipinde, mıknatısın etrafı hava yerine manyetik malzeme ile dolu olduğundan relüktans momenti oluşmaktadır. İMSM'lerin YMSM'lere göre en büyük avantajı, mıknatıslarının rotora gömülü olmasından dolayı merkezkaç kuvvetine karşı koyabilmesi ve böylelikle yüksek hızlarda çalışabilmesidir. Ayrıca, YMSM'den daha dayanıklı bir mekanik yapıya sahiptir. Maliyetlerinin yüksek olması ve üretiminin zor olması ise dezavantajları arasında sayılabilmektedir (Çelik, 2012; Boldea vd., 2009; Haque vd., 2003).

Ayrıca, İMSM'nin q eksenli endüktansı, d eksenli endüktansından ihmal edilemeyecek seviyede daha büyüktür. Bu nedenle, q ve d eksenli endüktansları arasındaki bu farkın, denetleyici tasarımında dikkate alınması gerekmektedir ve bu durum da denetleyici tasarımının daha karmaşık olmasına neden olmakta, dolayısıyla kullanım yaygınlığını olumsuz etkilemektedir (Karabacak, 2012).

Yukarıda bahsi geçen özelliklerinin sağladığı avantajlarından dolayı bu çalışmada yüzey mıknatıslı SMSM tercih edilmiştir. Çalışmanın ilerleyen kısımlarında, "yüzey mıknatıslı" tabiri kullanılmayıp, yalnızca "SMSM" kavramı kullanılmıştır.

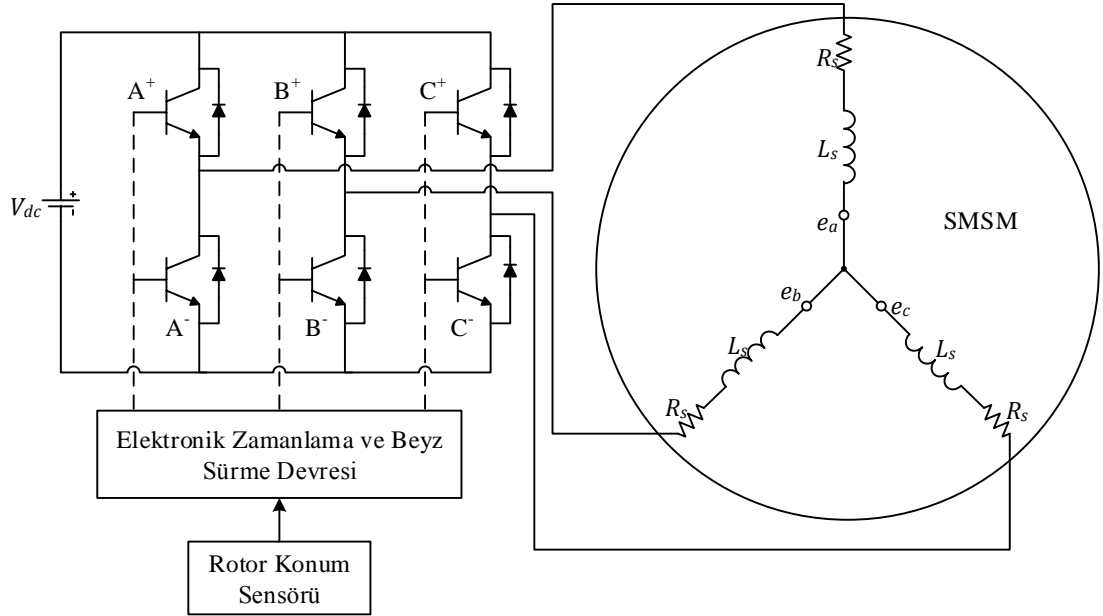
SMSM'lerde güç elektroniği elemanları ile elektronik olarak gerçekleştirilen komütasyon işleminin zamanlamasının doğru olabilmesi için rotor konum bilgisine ihtiyaç duyulmaktadır. Bu doğrultuda, çoğu zaman motorun bir parçası olarak kabul edilen konum algılayıcılar, rotor dönme frekansı ile statora uygulanan frekansın senkronize edilmesi için büyük önem taşımaktadırlar. Konum algılayıcısı olarak, bir LED ve bir fotodiyottan oluşan optik sensörler veya stator üzerinde belirli bölgelere konumlandırılarak etkisinde kaldığı, rotor ile birlikte dönen mıknatısların manyetik alanına göre çıkış darbeleri üreten hall etkili sensörler kullanılabilir (Bal, 2006; Adam, 2007).

2.3 SMSM'nin Çalışma Prensipleri

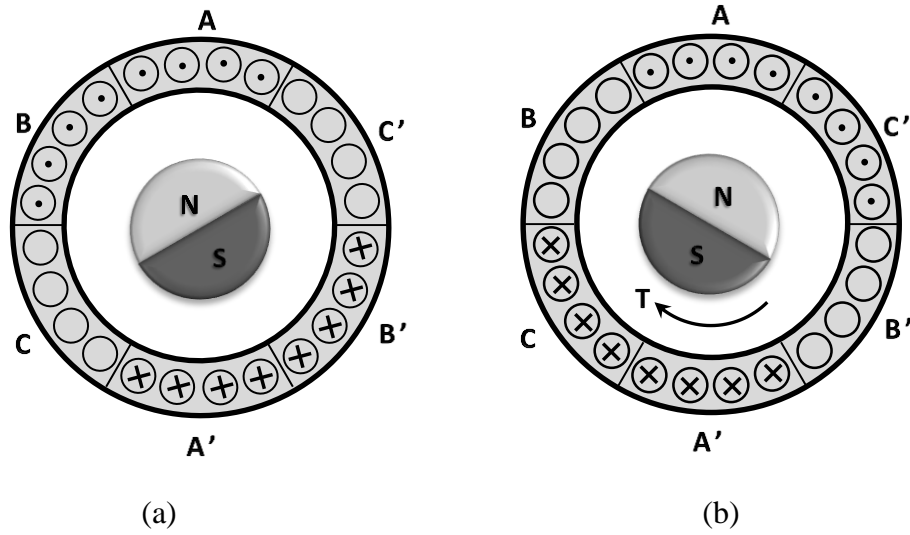
Şekil 2.6'daki yapı incelendiğinde, motor çalışırken invertördeki altı güç anahtarlama elemanından biri yüksek diğeri alçak taraf anahtarı olmak üzere, sadece iki tanesi aynı anda aktif olmaktadır. Ayrıca motor sargıları Y bağlı olduğundan, biri pozitif akım taşırken diğeri negatif akım taşımaktadır. Bu bilgiler doğrultusunda motorun çalışma prensibi şöyle açıklanabilir:

İlk anda Şekil 2.6'da gösterilen A^+ ve B^- anahtarlama elemanının iletimde olduğu farz edildiğinde Şekil 2.7 (a)'da gösterildiği üzere A fazından pozitif, B fazından da negatif akım akmaktadır. C^+ ve C^- güç anahtarlama elemanları aktif olmadığından C fazından akım akmamaktadır. Şekil 2.6'da gösterilen A^+ ve C^- güç anahtarlama elemanları iletimde iken sargıların akım yönleri Şekil 2.7 (b)'deki gibi olmaktadır. B^+ ve B^- güç anahtarlama elemanları aktif olmadığından B fazından akım akmamaktadır. Rotor ve stator akıları mevcut konumundan bir sonraki konumuna doğru hareket ederken üretilen moment Şekil 2.7 (b)'de gösterildiği yönde olmaktadır. Rotor bir sonraki konumuna doğru hareket ederken, üretilen moment de aynı yöndedir. Çünkü aynı rotor yüzeyi aktif stator sargıları tarafından çevrelenmektedir. Rotor yeni konumuna ulaşıncaya kadar moment sabit kalmakta, daha da ileri hareket ettiğinde her bir rotor kutbunun 120° 'den az kısmı aktif stator sargıları tarafından çevrelenerek moment azaltılmaktadır. Rotor, Şekil 2.7 (b)'de gösterilen yeni konumuna ulaştığı zaman A fazının kesime ve B^+ güç anahtarlama elemanının iletime geçirilmesi gerekmektedir. Rotor 60° lik bir dönme daha yaparken sabit moment üretmektedir. Rotorun her bir 60° dönmesi sonrası yeni bir güç anahtarlama elemanı dolayısıyla de faz iletime geçirilmekte ve iletimde olan bir güç anahtarlama elemanı dolayısıyla de

fazlardan birinin kesime geçirilmesi gerekmektedir. Bahsi geçen, fazları iletme veya kesime geçirme işlemleri komütasyon olarak adlandırılmaktadır.



Şekil 2.6. SMSM motor sürücü sistemi.



Şekil 2.7. Üç fazlı rotoru iki kutuplu bir SMSM'nin (a) stator sargılarının dağılımı (b) sargı akımları ve yönleri.

Fakat mıknatıs akı dağılımı mükemmel derecede dikdörtgen forma sahip değildir. Yüksek koersiviteye sahip mıknatıslar kullanılsa bile 10-20° genişliğinde bir geçiş bölgesi bulunmaktadır. Bu nedenle akı dağılımı trapezoidal şekildedir. Bundan dolayı aktif fazların değiştiği her 60°'lik harekette momentte bir dalgalanma oluşmaktadır. Konum bilgisinin değerlendirilmesinin önemi de tam burada ortaya çıkmaktadır. Konum algılayıcılardan gelen bilgiler doğru biçimde değerlendirilmeli ve kullanılmalıdır. Güç anahtarlama elamanlarının iletme ve kesime geçirilmeleri için gerekli bu zamanlama bilgileri konum sensörlerinden veya mikrodenetleyiciler yardımı ile geliştirilen sensörsüz uygulamalardan elde edilebilmektedir. Bu çalışmada, zamanlama bilgileri biri sensörlü ve diğeri sensörsüz olacak şekilde iki yöntemden de yararlanılarak geliştirilen uygulamaları içermektedir (Çelik, 2012; Yazıcı, 2008; Genç, 2002; Toliyat ve Campbell, 2004).

2.4 SMSM'nin Avantaj / Dezavantaj ve Kullanım Alanları

SMSM'lerin 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 denetim sistemlerinde kullanım yaygınlığını giderek arttırmaktadır. Komütatör ve fırça yapısını bünyesinde barındırmaması patlamalı ve tozlu ortamlardaki uygulamalarda da kullanımını mümkün kılmaktadır. Bunun yanı sıra, rotor kütlelerinin düşük olması nedeniyle uygulanan gerilime çok hızlı tepki göstermesi ve rotor akısının sabit mıknatıslar tarafından sağlanması nedeniyle enerji darboğazına giren dünyamızda ilerleyen yıllarda bu motor tipine olan ilginin dolayısı ile de kullanım yaygınlığının daha da artacağı öngörülmektedir (Morkoç ve Kesler, 2012; Akyazı vd., 2011).

Ayrıca, son yıllarda mıknatıs teknolojisindeki gelişmeler sonucunda, yüksek manyetik akı sağlayan mıknatısların üretilmesi ve SMSM'lerin kontrolünde kullanılan güç elektroniği ve mikrodenetleyici teknolojilerindeki gelişmeler de bu motor tipinin kullanımını destekleyici diğer öğeler olarak sıralanabilmektedir (Çelik, 2012; Adam, 2007; Öztürk, 2008; Perera, 2002; Swierczynski, 2005).

SMSM'lerin dezavantajları ise aşağıda sıralanmaktadır.

- Dışarıdan ilave uygulanacak güç elektroniği aygıtlarına ihtiyaç duyması,
- Doğası gereği, komütasyon işleminin elektronik olarak doğru zamanda yapılabilmesi için rotor konum bilgisine ihtiyaç duyması,
- Bu doğrultuda optik / hall etkili sensörlere veya mikrodenetleyiciler yardımı ile geliştirilen sensörsüz uygulamalara ihtiyaç duyması,
- Kullanılan mıknatısların gücünün üretilen moment ile dolayısı ile motor maliyeti ile de doğru orantılı olması,

Gerek yapısında, gerekse kontrol yöntemlerinde kullanılan malzeme ve yan ürünlerin artan teknolojik olanaklara bağlı olarak gelişimiyle birlikte, SMSM'ler, özellikle klasik sargılı doğru akım motorlarına ciddi bir rakip haline gelmektedir. Bu nedenle SMSM'ler;

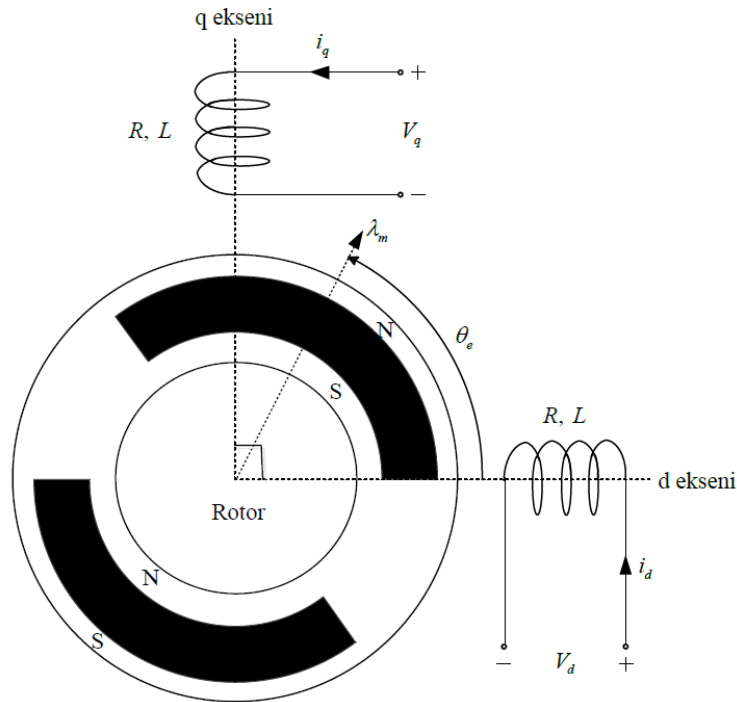
- Isıtma ve havalandırma sistemlerinde,
- Soğutucularda,
- Sağlık endüstrisinde,
- Robot endüstrisinde,
- Sabit disk sürücü ve CD/DVD-ROM ve yazıcı gibi bilgisayar donanımlarında,
- Endüstride yürüyen bantlarda,
- Pompa ve fan motoru uygulamalarında,
- Uzay endüstrisinde,
- Fırçalı tip makinaların kullanımının sakınca doğurabileceği, yanıcı ve parlayıcı çalışma ortamlarında,

özellikle yüksek hız ve yüksek güç yoğunluğu gerektiren birçok uygulamada giderek artan biçimde kullanılmaktadır (Kesler vd., 2006; Singh vd., 1999; Hong vd., 2000).

2.5 SMSM'nin Matematiksel Modeli

SMSM'lerde gerek motora uygulanan üç fazlı gerilim veya akımlar, gerekse bu gerilimlerin veya akımların frekansı ve yük momenti sürekli değişim gösterdiğinden bu değişimlerin motor ve sürücü sistemi üzerindeki etkilerini değerlendirebilmek için, bir dinamik matematiksel modele ihtiyaç duyulmaktadır.

Bu doğrultuda SMSM'nin dinamik matematiksel modeli motorun d ve q eksenlerindeki iki faz eşdeğeri kullanılarak elde edilmekte ve bu nedenle de d-q model olarak da adlandırılmaktadır. Stator üç fazlı sargı endüktanslarının, rotor pozisyonuna göre değişkenlik göstermesi nedeni ile, rotor referanslı d-q model tercih edilmektedir. SMSM'nin rotor referanslı d-q modelinde, stator üç fazlı akımları, rotorun elektriksel hızı ile dönen sanal iki fazlı d-q eksen akımlarına dönüştürülmektedir. Böylelikle, stator sargılarının d-q eksen takımı üzerindeki sanal karşılığı için, rotor pozisyonundan bağımsız sabit endüktans değerleri elde edilmektedir. Rotor hızı senkron hıza eşit olduğundan, SMSM'nin rotor referanslı d-q modeli, senkron referanslı d-q model olarak da anılmaktadır. Bahsi geçen matematiksel modelin elde edilmesi için, üç fazlı gerilim, akım ve akı değişkenlerinin üç fazdan senkron hızda dönen rotor referanslı iki faza dönüştürülmesi gerekmektedir. Bu da Clarke ve Park dönüşümleri kullanılarak gerçekleştirilmektedir. Güç değişmezliği ilkesinin de işaret ettiği üzere, üç fazlı değişkenlerin iki fazlı eşdeğerleri vasıtası ile SMSM'nin elektromanyetik momenti hesaplanabilir hale gelmektedir. Benzer şekilde, iki fazdan üç faza ilgili dönüşümler yapılırken ters Clarke ve ters Park dönüşümleri kullanılmaktadır. Şekil 2.8'de üç fazlı SMSM'nin d-q eksen takımındaki eşdeğeri görülmektedir (Karabacak, 2012).



Şekil 2.8. SMSM'nin iki faz eşdeğeri (Karabacak, 2012).

SMSM'nin dinamik d-q modeli elde edilirken, aşağıdaki varsayımlar kabul edilmektedir.

- Üç fazlı stator sargıları sinüzoidal bir hava aralığı akısı oluşturacak ve kutup sayısına bağlı olarak 120°'lik elektriksel açı sağlayacak şekilde statora düzgün bir şekilde (dengeli) dağıtılmıştır.
- Stator sargılardaki sinüzoidal zıt elektromotor kuvvetleri dengelidir.
- Manyetik doyum ve parametre değişimleri ihmal edilmektedir.
- Histerezis ve fuko kayıpları ihmal edilmektedir.
- Direnç ve endüktans değerlerinin sıcaklık ve frekanstan etkilenmediği kabul edilmektedir.
- Sabit mıknatısların oluşturduğu toplam manyetik akı değeri sıcaklıktan bağımsız ve sabit olarak kabul edilmiştir (Çelik, 2012; Adam, 2007; Er, 2007; Öksüztepe, 2008).

Bu varsayımlar da göz önünde bulundurularak, SMSM'nin üç fazlı stator faz gerilim eşitlikleri, anlık üç fazlı akım ve akılar cinsinden E. 2.1'deki gibi yazılmaktadır. (Karabacak, 2012)

$$\vec{V}_{abc} = R_{abc}\vec{i}_{abc} + \frac{d\vec{\lambda}_{abc}}{dt} \quad (\text{E.2.1})$$

$$\begin{aligned} \vec{V}_{abc} &= [V_a \quad V_b \quad V_c]^T & \vec{\lambda}_{abc} &= [\lambda_a \quad \lambda_b \quad \lambda_c]^T \\ \vec{i}_{abc} &= [i_a \quad i_b \quad i_c]^T & R_{abc} &= \text{diag}[R_a \quad R_b \quad R_c] \end{aligned} \quad (\text{E.2.2})$$

E. 2.2'deki toplam faz akılarının eşitlikleri aşağıdaki gibi verilmektedir.

$$\vec{\lambda}_{abc} = L_{abc}\vec{i}_{abc} + \vec{\lambda}_{abcm} \quad (\text{E.2.3})$$

Bu eşitlikteki sabit mıknatıs akı matrisi aşağıdaki gibi hesaplanmaktadır.

$$\vec{\lambda}_{abcm} = \vec{\lambda}_m \begin{bmatrix} \sin(\theta_e) \\ \sin(\theta_e - 2\pi/3) \\ \sin(\theta_e + 2\pi/3) \end{bmatrix} \quad (\text{E.2.4})$$

$$\omega = \frac{d\theta}{dt}, \quad \omega_e = \frac{d\theta_e}{dt}, \quad \omega_e = P\omega, \quad \theta_e = P\theta$$

Bu doğrultuda E. 2.1 daha açık şekilde aşağıdaki gibi ifade edilmektedir.

$$\begin{bmatrix} V_a \\ V_b \\ V_c \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} R_a & 0 & 0 \\ 0 & R_b & 0 \\ 0 & 0 & R_c \end{bmatrix} \begin{bmatrix} i_a \\ i_b \\ i_c \end{bmatrix} + \frac{d}{dt} \left\{ \begin{bmatrix} L_{aa} & L_{ab} & L_{ac} \\ L_{ba} & L_{bb} & L_{bc} \\ L_{ca} & L_{cb} & L_{cc} \end{bmatrix} \begin{bmatrix} i_a \\ i_b \\ i_c \end{bmatrix} + \lambda_m \begin{bmatrix} \cos(\theta_e) \\ \cos(\theta_e - 2\pi/3) \\ \cos(\theta_e + 2\pi/3) \end{bmatrix} \right\} \quad (\text{E.2.5})$$

Clarke dönüşüm matrisi E. 2.6'daki gibi ifade edilmektedir.

$$[T_{qd0}^s] = \begin{bmatrix} 1 & -1/2 & -1/2 \\ 0 & -\sqrt{3}/2 & \sqrt{3}/2 \\ 1/2 & 1/2 & 1/2 \end{bmatrix} \quad (\text{E.2.6})$$

Benzer şekilde ters Clarke dönüşüm matrisi de E. 2.7'deki gibi ifade edilmektedir.

$$[T_{qd0}^s]^{-1} = \begin{bmatrix} 1 & 0 \\ -1/2 & -\sqrt{3}/2 \\ -1/2 & \sqrt{3}/2 \end{bmatrix} \quad (\text{E.2.7})$$

E. 2.6'daki durağan eksen dönüşümü, E. 2.5'e uygulanarak (Clarke dönüşümü), yüzey mıknatıslı SMSM'nin durağan eksen takımındaki stator faz gerilimlerinin aşağıdaki ifadesine ulaşılmaktadır.

$$\begin{bmatrix} V_q^s \\ V_d^s \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} R & 0 \\ 0 & R \end{bmatrix} \begin{bmatrix} i_q^s \\ i_d^s \end{bmatrix} + \frac{d}{dt} \left\{ \begin{bmatrix} L & 0 \\ 0 & L \end{bmatrix} \begin{bmatrix} i_q^s \\ i_d^s \end{bmatrix} + \lambda_m \begin{bmatrix} \sin(\theta_e) \\ \cos(\theta_e) \end{bmatrix} \right\} \quad (\text{E.2.8})$$

E. 2.8'de görüldüğü üzere "0" nolu bileşen, üç fazlı sistem dengeli olduğu için yok olmaktadır. İki fazlı durağan eksen takımından, senkron hızda dönen rotor referanslı eksen takımına geçmek için Park dönüşüm matrisi kullanılmaktadır.

Park dönüşüm matrisi E. 2.9'daki gibi ifade edilmektedir.

$$[T_{qd0}^s] = \begin{bmatrix} \cos \theta & -\sin \theta \\ \sin \theta & \cos \theta \end{bmatrix} \quad (\text{E.2.9})$$

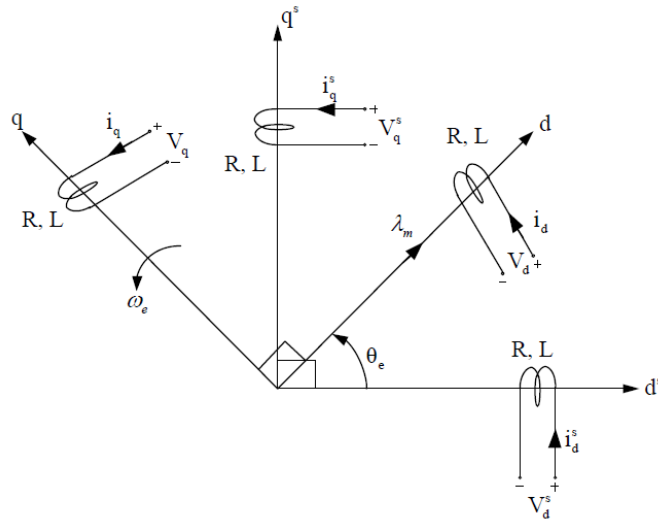
Benzer şekilde, ters Park dönüşümü de E. 2.10'daki gibi ifade edilmektedir.

$$[T_{qd0}^s]^{-1} = \begin{bmatrix} \cos \theta & \sin \theta \\ -\sin \theta & \cos \theta \end{bmatrix} \quad (\text{E.2.10})$$

E. 2.9'da verilen Park dönüşümü, SMSM'nin durağan eksen takımındaki gerilim eşitliği olan E. 2.8'e uygulanarak, SMSM'nin senkron hızda dönen rotor referanslı d ve q eksen gerilimleri, E. 2.11'deki gibi elde edilmektedir.

$$\begin{bmatrix} V_q \\ V_d \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} R + Lp & L\omega_e \\ -L\omega_e & R + Lp \end{bmatrix} \begin{bmatrix} i_q \\ i_d \end{bmatrix} + \begin{bmatrix} \omega_e \lambda_m \\ 0 \end{bmatrix} \quad (\text{E.2.11})$$

E. 2.11'deki p türev operatörüdür. Şekil 2.9'daki SMSM'nin d-q vektör diyagramı, üç fazlı büyüklüklerin iki fazlı durağan eksen ve senkron hızda dönen rotor eksen takımlarındaki ifadelerini göstermektedir.



Şekil 2.9. SMSM'nin durağan ve senkron hızda dönen rotor eksen takımlarındaki eşdeğeri (Karabacak, 2012).

SMSM'nin elektromekanik moment eşitliği ise, diğer elektrik motorlarında olduğu gibi, E. 2.12'deki gibi elde edilmektedir.

$$\frac{d\omega}{dt} = \frac{1}{J} T_{ind} - \frac{B}{J} \omega - \frac{T_L}{J} \quad (\text{E.2.12})$$

E. 2.12’de indüklenen momentin ifadesine ulaşmak için üç faz ile d-q model arasındaki güç değişmezliği ilkesinden faydalanılmaktadır. Güç değişmezliği ilkesi doğrultusunda, SMSM’nin giriş gücü E. 2.13 ile ifade edilmektedir.

$$P_{in} = [V_a \quad V_b \quad V_c] \begin{bmatrix} i_a \\ i_b \\ i_c \end{bmatrix} = \frac{3}{2} [V_q \quad V_d] \begin{bmatrix} i_q \\ i_d \end{bmatrix} \quad (\text{E.2.13})$$

E. 2.13’te, E. 2.11’den çekilen d ve q eksenli gerilimleri yerine konulduğunda ve model ile ilgili varsayımlar doğrultusunda, direnç kayıpları ve manyetik enerjinin değişimi ile ilgili terimler kaldırıldığında, momentini oluşturan elektromekanik güç E. 2.14’teki gibi ifade edilmektedir.

$$P_{em} = \frac{3P}{2} \omega (\lambda_d i_q - \lambda_q i_d) \quad (\text{E.2.14})$$

Elektromekanik güç rotor hızına bölünerek, elektromekanik moment E 2.15’teki gibi elde edilmektedir.

$$T_{ind} = \frac{3P}{2} (\lambda_d i_q - \lambda_q i_d) \quad (\text{E.2.15})$$

SMSM’nin nihai dinamik d-q modeli, üç durum değişkeni için üç ayrı eşitlik ile E. 2.16, E. 2.17 ve E. 2.18’de olduğu gibi verilmektedir. Bu eşitlikler sonucunda, SMSM’nin dinamik d-q modeli Şekil 2.10’daki gibi ifade edilmektedir.

$$\frac{di_q}{dt} = -\frac{R}{L} i_q - \omega_e i_d - \frac{\lambda_m}{L} \omega_e + \frac{1}{L} V_q \quad (\text{E.2.16})$$

$$\frac{di_d}{dt} = -\frac{R}{L} i_d + \omega_e i_q + \frac{1}{L} V_d \quad (\text{E.2.17})$$

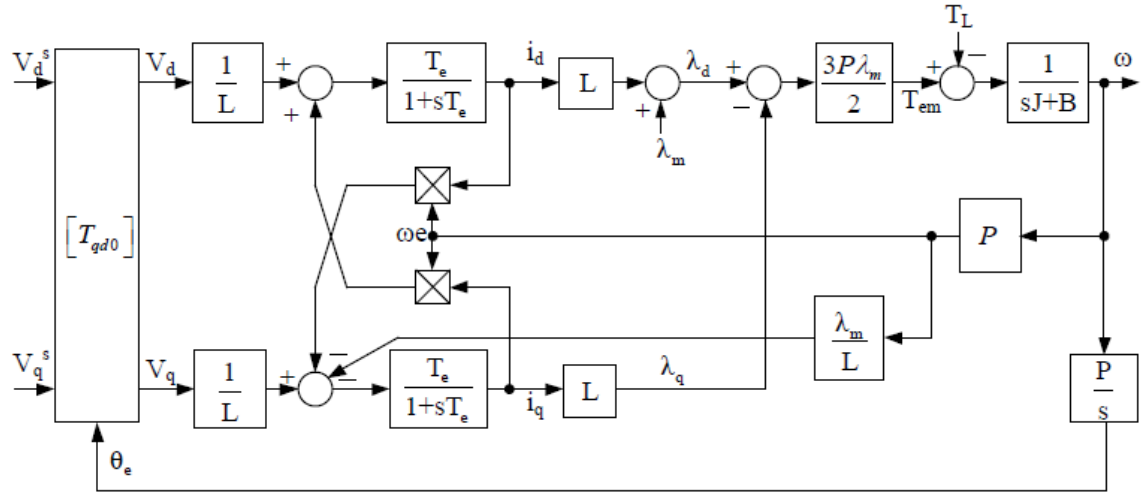
$$\frac{d\omega}{dt} = -\frac{3P}{2J} (\lambda_d i_q - \lambda_q i_d) - \frac{B}{J} \omega - \frac{T_L}{J} \quad (\text{E.2.18})$$

Burada d ve q eksenini toplam akı değerleri E. 2.19 ve E. 2.20'deki gibi ifade edilmektedir.

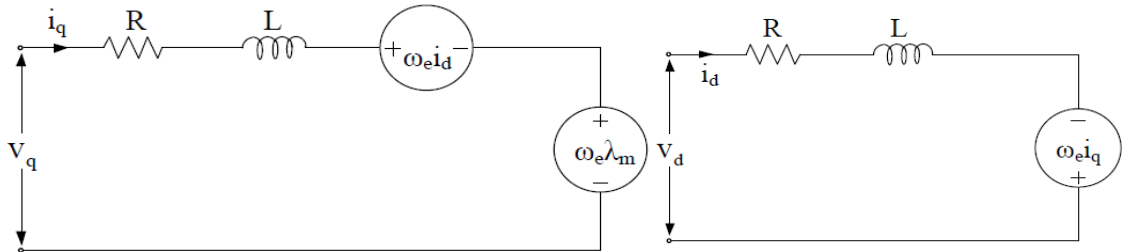
$$\lambda_d = Li_d + \lambda_m \quad (E.2.19)$$

$$\lambda_q = Li_q \quad (E.2.20)$$

Şekil 2.11'de ise SMSM'nin demir kayıpları ihmal edilmiş d-q modelinin elektriksel eşdeğer devreleri gösterilmiştir (Karabacak, 2012; Novotny ve Lipo, 1996; Quang ve Dittrich, 2010).



Şekil 2.10. SMSM'nin birleşik yapıda dinamik d-q modeli ($T_e=L/R$) (Karabacak, 2012).



Şekil 2.11. SMSM'un ayrık yapıda dinamik d-q modeli elektriksel eşdeğer devreleri (Karabacak, 2012).

2.6 SMSM'nin Alan Yönlendirmeli Kontrol (AYK) Yöntemi ile Denetimi

SMSM'lerin stator yapısı asenkron motorlar ile aynı olduğundan, genel olarak bu motorlarda kullanılan kontrol yöntemlerinin tümü SMSM'lerde de kullanılabilir. Bu yöntemlerden bazıları ise v/f Kontrol, Doğrudan Moment Kontrolü (DMK) ve Alan Yönlendirmeli Kontrol (AYK)'dür. Motor denetim uygulamalarında en yaygın kullanım oranına sahip olan ve dolayısı ile en çok bilinen yöntem olarak öne çıkan AYK yöntemi, bu çalışmada da SMSM'nin kontrol yöntemi olarak tercih edilmiştir.

2.6.1 AYK denetim yöntemi

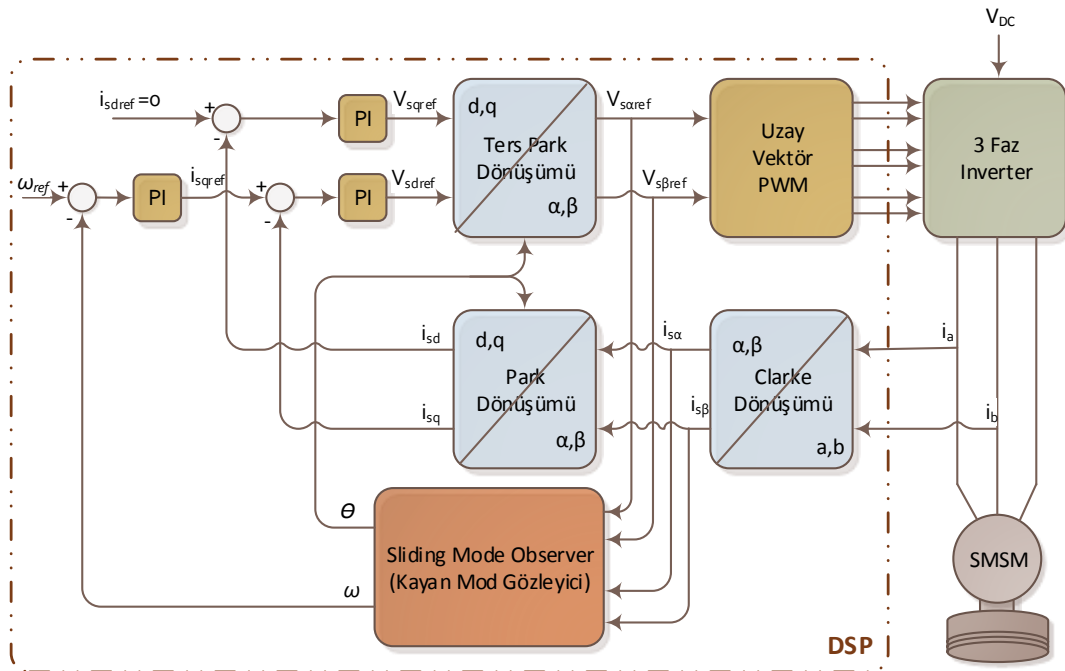
SMSM'nin AYK yöntemiyle denetlenmesi, AC motoru DC motora benzeterek kontrolünü sağlama temel prensibine dayanmaktadır. Böylece DC motorlarda olduğu gibi yüksek dinamik performans elde edilebilmektedir. Bu yöntem, 1968'de Hasse ve 1971'de Blaschke tarafından önerilmiştir.

Bahsi geçen benzetim stator akımlarının, dönen d-q eksen şeklindeki iki bileşene ayrılmasına ve bu bileşenlerin bağımsız olarak kontrol edilmesine dayanmaktadır. Bu akımlardan d eksen bileşeni ile motorun manyetik alanının genliği ve q eksen bileşeni ile de elektromekanik momentin büyüklüğü temsil edilmektedir. Burada q eksen bileşeninin kontrolü ile motorun elektromekanik momenti de kontrol edilmiş olmakta ve böylelikle yukarıda bahsi geçen AC motoru DC motora benzeterek kontrolünü sağlama temel prensibi de işlerlik kazanmaktadır. (Kazan ve Bilgin, 2006)

Böylelikle hali hazırda rotorda bulunan sabit mıknatısların oluşturduğu manyetik akının sabit olması durumu da göz önünde bulundurularak, DC motordaki gibi tek akım (I_q) kontrol edilerek moment kontrolü sağlanmış olmaktadır. d eksen bileşeninin moment üzerinde bir etkisi olmadığından bakır kayıplarını azaltmak için sıfırda tutulduğu bu yöntem AYK (Field Oriented Control, Vektör Kontrol) olarak isimlendirilmektedir (Çelik, 2012; Adam, 2007; Kazan ve Bilgin, 2006).

Şekil 2.12'de, SMSM'nin AYK yönteminin blok diyagramı görülmektedir. Burada, öncelikle SMSM'yi besleyen " i_a " ve " i_b " akımları ölçülerek, birbirine 90° dik olan sabit eksen takımına dönüştürülmek üzere Clarke dönüşümü uygulanmaktadır. Clarke dönüşümü sonrası sabit eksen α - β cinsinden elde edilen " $i_{s\alpha}$ " ve " $i_{s\beta}$ " akımlarına, çıkışında d-q dönen ekseninde " i_{sd} " ve " i_{sq} " akımlarını verecek olan Park Dönüşümü uygulanmaktadır. Elde edilen " i_{sd} " ve " i_{sq} " akımları " i_{sdref} " (akı referansı) ve

“ i_{sqref} ” (moment referansı) referans akımları ile karşılaştırılarak elde edilen fark, bir PI denetleyiciden geçirilmek suretiyle, gerilim referans vektörleri oluşturulmaktadır. Burada AYK yönteminin temel prensipleri doğrultusunda “ i_{sdref} ” akımı sıfır olarak alınmaktadır. Elde edilen “ V_{sdref} ” ve “ V_{sqref} ” gerilimlerine bu kez ters Park dönüşümü uygulanarak α - β eksenindeki stator vektör gerilimlerine dönüştürülmektedir. Son olarak bu gerilimler Uzay Vektör PWM (Darbe Genişlik Modülasyonu) bloğu vasıtası ile motoru kontrol edecek olan sinyaller elde edilerek inverterdeki güç anahtarlama elemanlarına uygulanmaktadır (Akin ve Bhardwaj, 2010).



Şekil 2.12. SSM'nin AYK yöntemine ilişkin blok diyagramı.

Rotorun hız ve konum bilgisi, AYK yönteminin çekirdeğidir. Konum bilgisi Park ve ters Park dönüşümleri için kullanılırken, hız verisi bir PI denetleyici vasıtasıyla referans hız ile karşılaştırılarak hız kontrolü sağlanmış olmaktadır. Bu doğrultuda bu bilgiler, motorun çektiği akımlar, inverterin çıkışındaki gerilimler veya invertera uygulanan referans gerilimleri kullanılarak sensörsüz olarak bir gözleyici veya bunun yerine konum veya hız sensörü içeren sensörlü uygulamalar ile elde edilebilmektedir (Bayat, 2009).

Bu çalışmada hem sensörlü hem de kayan mod gözleyici ile iki ayrı uygulama gerçekleştirilmektedir.

AYK temel prensipleri doğrultusunda d ekseni akımının sıfır olarak alınmasının gerekliliğine daha önce değinilmiştir. E. 2.15'te ifade edilen elektromekanik moment ve E. 2.19'da ifade edilen d ekseni toplam akısı, bu doğrultuda yeniden düzenlendiğinde sırası ile E. 2.21 ve 2.22'deki gibi ifade edilmektedir.

$$T_{ind} = \frac{3P}{2} \lambda_m i_q \quad (\text{E.2.21})$$

$$\lambda_d = \lambda_m \quad (\text{E.2.22})$$

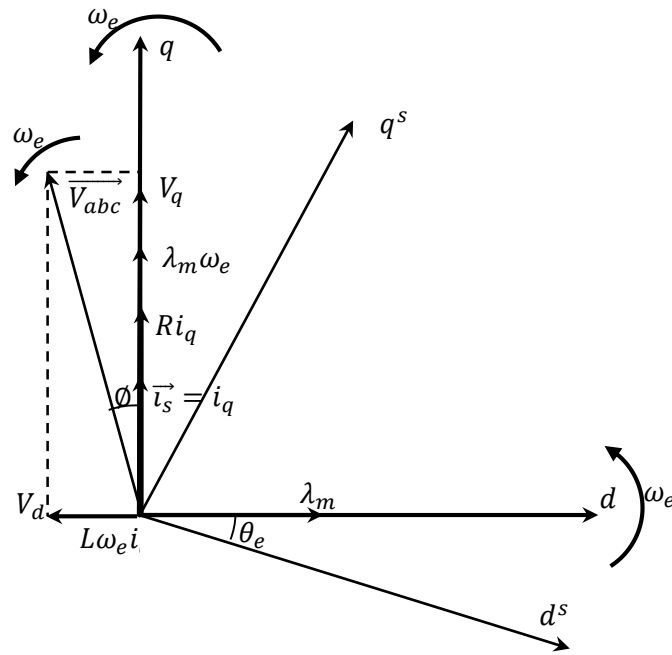
Ayrıca yine d ekseni akımı sıfır olduğunda d ve q ekseni gerilimleri ise E. 2.23 ve E. 2.24'teki gibi ifade edilmektedir.

$$V_d = -L\omega_e i_q \quad (\text{E.2.23})$$

$$V_q = \lambda_m \omega_e + R i_q \quad (\text{E.2.24})$$

Bu doğrultuda AYK sisteminin vektörel diyagramı Şekil 2.13'teki gibi ifade edilmektedir.

Hız kontrolü için, referans hız ile ölçülen veya tahmin edilen hız karşılaştırılarak bir PI denetleyiciye uygulanmakta ve referans moment, dolayısıyla "i_{sqref}", elde edilmiş olmaktadır. Konum kontrolü de yine benzer şekilde gerçekleştirilebilmektedir (Bayat, 2009).



Şekil 2.13. SMSM'nin sürekli durum vektör diyagramı.

2.6.2 Sensörsüz AYK yöntemleri

SMSM'nin kontrolünde konum bilgisi hayati önem arz etmektedir. Dolayısı ile konum bilgisinin elde edilmesi için, çoğu zaman SMSM'nin parçası olarak kabul edilebilecek kadar öneme sahip, mekanik veya optik algılayıcıların kullanılması gerekmektedir. Bu tarz sensörlerin kullanımı, yanıcı ve patlayıcı veya elektromanyetik gürültünün bulunduğu ortamlardaki uygulamalarda uygun olmamaktadır. Ayrıca motora ek olarak kullanıldıklarından gerek maliyetin gerekse hacminin artmasına neden olan bu sensörler dar alanlardaki uygulamalarda da dezavantajlı duruma düşmektedirler. Bu gibi nedenlerle, hız ve konum bilgisinin tahmin edilmesine dayanan sensörsüz kontrol sistemleri gün geçtikçe daha çok uygulamada kendisine yer bulmaktadır (Bayat, 2009; Maiti vd., 2009).

2.6.2.1 İndüklenen gerilime dayanan konum tahmini

Bu tahmin yönteminde temel prensip, rotor konumuyla değişen indüklenen gerilimin hesaplanması ve bu değişimden konum bilgisinin elde edilmesi şeklinde ifade edilmektedir. Bu yöntem orta ve yüksek hızlı uygulamalar için oldukça pratik bir yöntem olarak kullanılmaktadır. Fakat düşük hızlarda indüklenen gerilim, sıfır veya çok

düşük olduğundan düşük hız uygulamalarında kullanımı mümkün olmamaktadır (Bayat, 2009).

2.6.2.2 İşaret enjeksiyonuna dayanan konum tahmini

SMSM içerisinde bulunan mıknatıslar nedeni ile rotorun çıkık kutup özelliği göstermesinden yararlanılarak hız tahmini yapılmasına dayalı bir sistemdir. Ortak endüktanstan dolayı rotorun konum değiştirmesine bağlı olarak stator sargılarının endüktans değeri değişmektedir. Bu değişimden de rotorun konum bilgisi elde edilmektedir. Bu yöntemin avantajı, düşük hızlarda etkin olmasıdır. Dezavantajı ise, yüksek hız uygulamalarına uygun olmaması ve yuvarlak rotorlu SMSM'lerde kullanılamamasıdır (Bayat, 2009; Maiti vd., 2009).

2.6.2.3 Adaptif yöntemler ve yapay sinir ağları

Model referanslı adaptif kontrol yönteminde, referans model ve ayarlanabilir model olmak üzere iki model kullanılır. Bu iki model arasındaki hatadan yararlanılarak tahmin edilmek istenen değişken hesaplanır. Bu hesaplama işleminin gerçek zamanda sürekli ve çok hızlı olarak gerçekleştirilmesi gerekmektedir. Bu yöntemde de parametre değişimi veya integral hata birikmesi gibi sorunlar dezavantaj olarak sayılabilmektedir (Bayat, 2009).

Bunun yanı sıra gözlemleyici kullanan yöntemlere alternatif olarak kendi kendini eğitebilen yapay sinir ağları kullanılarak da hız ve konum tahmini yapılabilmektedir. Adaptif yöntemdeki gibi sistem modeline ihtiyaç duyulmayan bu yöntemde, sinir ağlarının eğitilmesi için yoğun matematiksel işlemlerin yerine getirilmesi gerekmektedir.

Her iki yöntem için de oldukça hızlı gerçekleştirilmesi gereken yoğun matematiksel işlemler için çoğu kez mikrodenetleyicilerin kullanıldığı görülmektedir.

2.6.2.4 Gözlemleyici kullanılarak yapılan konum tahmini

Gözlemleyici kullanılarak geliştirilen tahmin yöntemleri, deterministik (Luenberger Gözlemleyicisi) veya stokastik (Kalman Filtresi) araçlar kullanmaktadır. Motor denetim sistemleri lineer olmadığından bu gözlemleyicilerin, lineer olmayan sistemler için genişletilmiş versiyonları tercih edilmektedir. Yine yukarıda değinilen genişletilmiş gözlemleyicilere benzer bir algoritma olan, kayan mod gözlemleyici de, hız ve konum tahmininde kullanılmaktadır. Gözlemleyici ile yapılan tahminlerin

işlemsel yoğunluk ve gözlemleyicinin ayarlanması gibi dezavantajlarının yanı sıra sistem parametrelerinin durum değişkeni olarak ele alınabilmesi ve böylece parametre değişimlerinin de gözlemlenebilmesi gibi avantajları da beraberinde getirmektedir (Bayat, 2009).

Yine bu yöntem için de oldukça hızlı gerçekleştirilmesi gereken yoğun matematiksel işlemler için çoğu kez mikrodenetleyicilerin kullanılması gerekmektedir. Bu çalışmadaki sensörsüz yöntemle gerçekleştirilen uygulamada kayan mod gözlemleyici kullanılmaktadır.

2.6.3 Darbe genişlik modülasyonu (DGM) teknikleri

Bir motor sürücü sisteminin en önemli bölümlerinden biri olan inverter, DC gerilimden, motoru çalıştırmak için kullanılan genliği ve frekansı değiştirilebilen bir AC gerilim elde etmek için kullanılmaktadır. İnverterin bu işlemi gerçekleştirebilmesi ise Darbe Genişlik Modülasyonu (DGM) teknikleri ile mümkün olmaktadır (Karabacak vd., 2009).

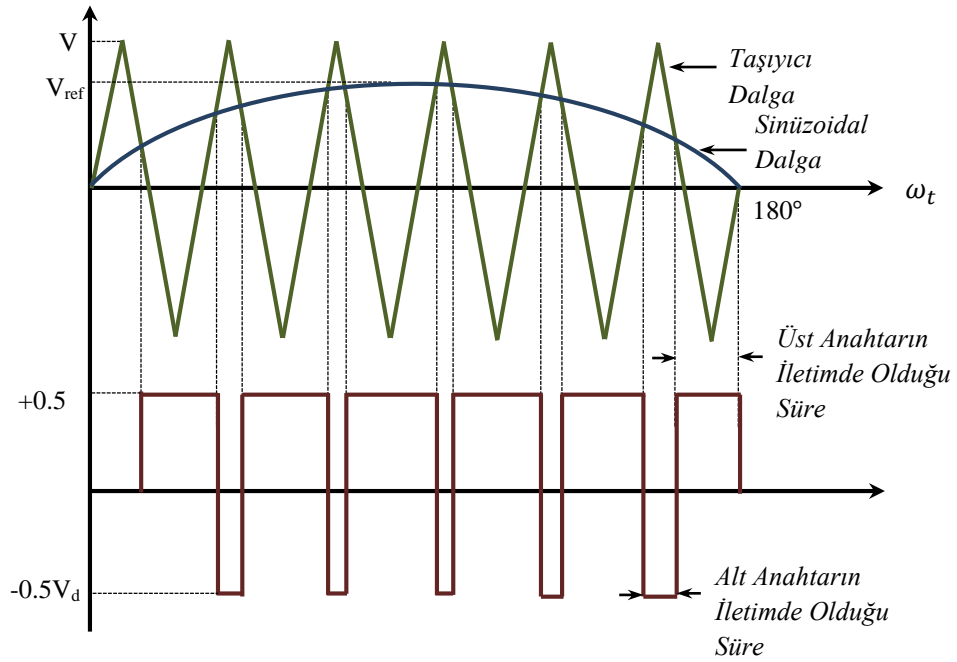
DGM yöntemindeki temel prensip, inverterde bulunan güç anahtarları elemanlarının doğru zamanlama ile tetiklenerek, motorun çalışması için gerekli olan, genliği ve frekansı değişen, üç faz gerilimleri elde edilmektir. Motor denetim uygulamalarında kullanılan birçok DGM tekniği bulunmakla birlikte, bu bölümde nispeten daha yaygın olarak kullanılan sinüzoidal DGM ve Uzay Vektör DGM (UVDGM) tekniklerine değinilmektedir. Bu çalışmada ise kullanılan sayısal işaret işlemcinin içerisinde bir modül olarak mevcut olması nedeni ile uygulamada oldukça kolaylık sağlayacak olan UVDGM tekniği kullanılmıştır. Ayrıca bu yöntemin diğer yöntemlere nazaran daha yüksek harmonik performansına sahip olması da uygulamada tercih edilmesinin önemli nedenlerinden birisidir.

2.6.3.1 Sinüzoidal DGM

En temel ve en iyi bilinen bu yöntemde, Şekil 2.14'te görüldüğü gibi bir referans sinüzoidal dalga, yüksek frekanslı bir taşıyıcı üçgen ile karşılaştırılarak, güç anahtarlama elemanları için gereken anahtarlama süreleri belirlenmektedir. Üç fazlı inverterlerde her bir faz için aynı taşıyıcı üçgen dalga aynı temel prensipte kullanılmaktadır. Şekil 2.14'ten görüldüğü gibi, referans sinüzoidal dalganın taşıyıcı üçgen dalgadan büyük olduğu durumlarda, inverterin bir kolundaki üst güç anahtarlama

elemanı iletime geçerken, alt güç anahtarlama elemanı kesimde, tam tersi durumlarda ise aynı koldaki alt güç anahtarlama elemanı iletime geçerken üst güç anahtarlama elemanı kesime gitmektedir. Ayrıca alt ve üst güç anahtarlama elemanlarının iletimden kesime ve kesimden iletime geçtikleri anlarda kısa devre oluşmasını önlemek amacı ile bir ölü zaman bölgesi de bırakılmaktadır, bu ölü zaman bölgesi Şekil 2.14'te ihmal edilmiştir.

İnverter çıkışında elde edilen üç fazlı AC gerilimlerin frekansı ve genliği referans sinüzoidal dalganın frekansı ve genliği ile ayarlanmaktadır. Taşıyıcı üçgen dalganın frekansı ise eviricinin anahtarlama frekansını belirlemektedir ki bu frekans genellikle çalışma esnasında sabit tutulmaktadır (Karabacak, 2012; Ned vd., 2002; Wu, 2006).



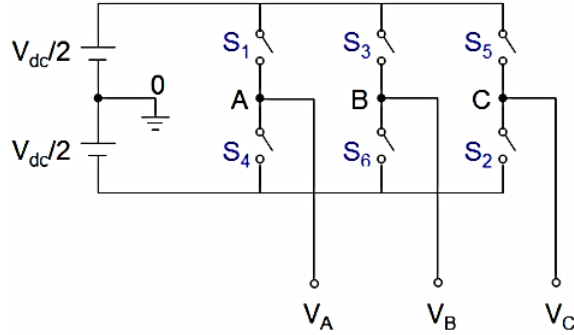
Şekil 2.14 Sinüzoidal DGM'nin prensip şeması.

2.6.3.2 Uzay vektör DGM

Son yıllarda geliştirilen uygulamalarda, mikrodenetleyicilerin motor denetim sistemlerinde yoğun olarak yer bulması, UVDGM gibi sayısal modülasyon tekniklerinin kullanım yaygınlığının da artış göstermesini beraberinde getirmektedir.

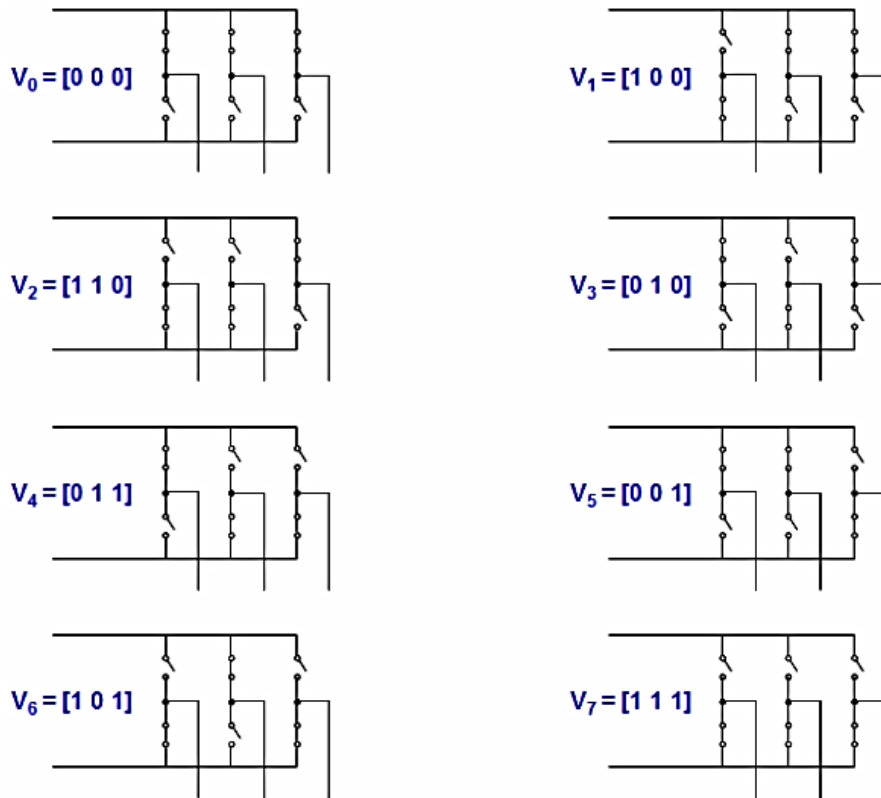
Şekil 2.15'te tipik bir inverter devresi görülmektedir. İnverter içerisindeki güç anahtarlama elemanlarının anahtarlar ile temsil edildiği düşünülerek, Şekil 2.15'teki

yapı incelendiğinde, bir faz için ancak iki durumun söz konusu olduğu görülmektedir. Üst anahtar kapalı iken $+V_{dc}/2$ ve alt anahtar kapalı iken $-V_{dc}/2$ değerlerini almaktadır. Bu değerler sayısal olarak değerlendirildiğinde ise pozitif değer 1 negatif değer ise 0 olmaktadır (Jung, 2005).



Şekil 2.15. Üç fazlı gerilim kaynaklı evirici anahtar durumları (Jung, 2005).

Bu doğrultuda V_A , V_B ve V_C 'nin farklı sayısal değerlerinden meydana gelen toplam sekiz adet anahtarlama vektörü Şekil 2.16'da gösterildiği gibi olmaktadır.

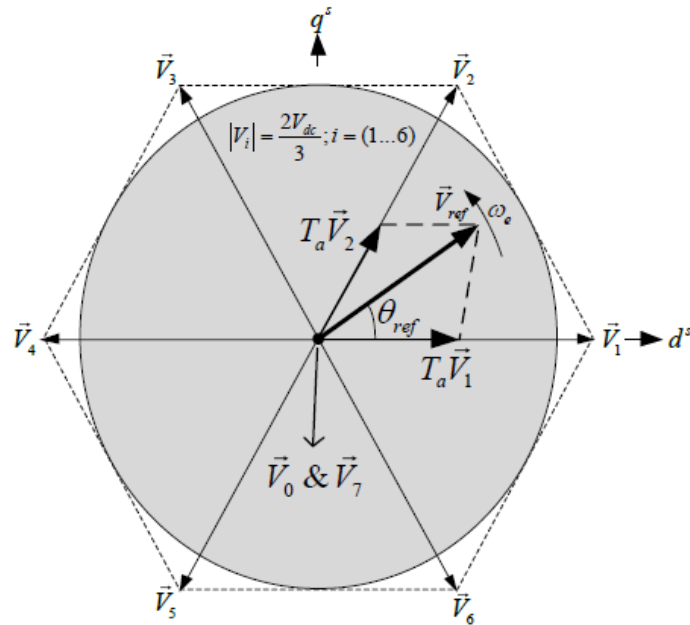


Şekil 2.16. Her bir ayrık uzay vektörü için çıkış gerilimleri (Jung, 2005).

Bu gerilim vektörlerinden altı tanesi ($V_1, V_2, V_3, V_4, V_5, V_6$) aktif gerilim vektörleri ve V_0 ile V_7 'de, sıfır gerilim vektörleridir. Aktif gerilim vektörleri vektörel olarak E. 2.25 ile hesaplanmaktadır (Bayat, 2009; Jung, 2005).

$$\vec{V}_k = \frac{2}{3} V_{dc} e^{j(k-1)\frac{\pi}{3}} \quad (k = 1, \dots, 6) \quad (\text{E.2.25})$$

Bu aktif gerilim vektörleri; sabit d - q eksen takımında gösterildiğinde, Şekil 2.17'de de ifade edildiği üzere, d - q düzlemini her biri 60° 'ar derecelik altı eşit bölgeye ayırmaktadır (Bayat, 2009; Jung, 2005).



Şekil 2.17. Sabit eksen takımındaki anahtarlama vektörleri (Karabacak, 2012).

Gerilim vektörlerinin temsil ettiği anahtarlama desenleri, belirli sürelerle uygulanarak, istenen bir referans gerilim değeri elde edilebilir (Bayat, 2009, Jung, 2005).

Anahtarlama işlemine, her zaman bir sıfır durum vektörü ile başlanır ve diğer sıfır durum vektörü ile bitirilir. Elde edilmek istenen gerilim değerlerinin genliği ve açısı biliniyor veya belirlenmiş ise, hangi anahtarlama vektörünün ne kadar süre uygulanacağı E. 2.26, E. 2.27 ve E. 2.28'deki eşitlikler kullanılarak hesaplanmakta ve bunun sonucunda da anahtarlama desenleri elde edilmektedir. Elde edilen bu

anahtarlama desenleri doğrultusunda anahtarlama vektörleri uygulanarak güç anahtarlama elemanlarının tetiklenmesi sağlanmış olmaktadır. Böylelikle motorun çalışması için gerekli gerilimler elde edilmiş olmaktadır.

$$T_a = \frac{\sqrt{3} \cdot V_{qref}}{V_{dc}} T_s \quad (E.2.26)$$

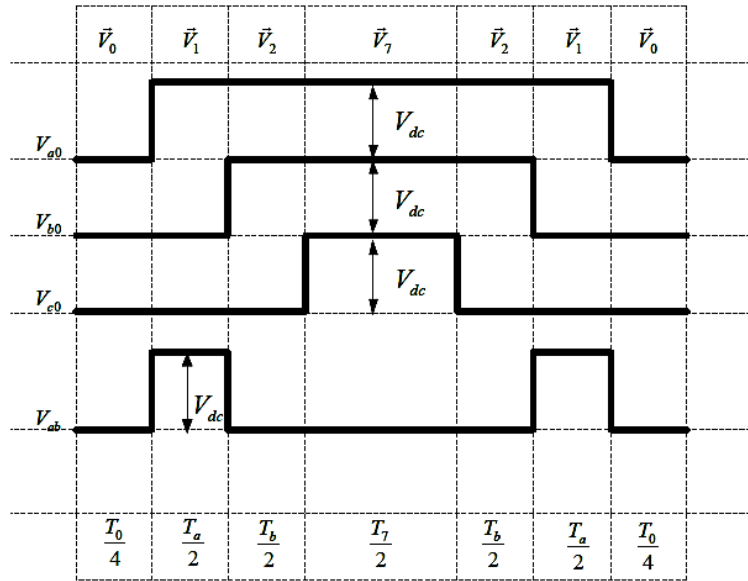
$$T_b = \frac{3 V_{dref}}{2 V_{dc}} T_s - \frac{T_2}{2} \quad (E.2.27)$$

$$T_0 = T_s - T_1 - T_2 \quad (E.2.28)$$

Çizelge 2.1’de, Şekil 2.17’deki 6 bölge için güç anahtarlarının doluluk süreleri görülmektedir. Bu çizelge doğrultusunda oluşturulan anahtarlama desenlerinden birine örnek olarak 1. Bölge için oluşturulan anahtarlama deseni Şekil 2.18’deki gibi gösterilebilir.

Çizelge 2.1. Altı bölge için inverter güç anahtarlarının doluluk süreleri.

SEKTÖR	a fazındaki üst güç anahtarının doluluk süresi	b fazındaki üst güç anahtarının doluluk süresi	c fazındaki üst güç anahtarının doluluk süresi
1	$\frac{T_0}{2}$	$\frac{T_0}{2} + T_b$	$\frac{T_0}{2} + T_a + T_b$
2	$\frac{T_0}{2} + T_a$	$\frac{T_0}{2}$	$\frac{T_0}{2} + T_a + T_b$
3	$\frac{T_0}{2} + T_a + T_b$	$\frac{T_0}{2}$	$\frac{T_0}{2} + T_b$
4	$\frac{T_0}{2} + T_a + T_b$	$\frac{T_0}{2} + T_a$	$\frac{T_0}{2}$
5	$\frac{T_0}{2} + T_b$	$\frac{T_0}{2} + T_a + T_b$	$\frac{T_0}{2}$
6	$\frac{T_0}{2}$	$\frac{T_0}{2} + T_a + T_b$	$\frac{T_0}{2} + T_a$



Şekil 2.18. Örnek anahtarlama deseni (Karabacak, 2012).

Sinüsoidal DGM ile karşılaştırıldığında; UVDGM’de eviriciden % 15.47 kat daha fazla gerilim alındığı görülmektedir. Aynı zamanda, UVDGM yönteminde, çıkış gerilim ve akımlarındaki harmonik bozulma da daha düşük olmaktadır (Bayat, 2009; Jung, 2005).

Gerek bahsi geçen üstünlük ve avantajları gerekse çalışmada kullanılan DSP’nin bu yöntemi destekleyici nitelikteki modüllerinin varlığı nedeni ile çalışmada UVDGM yöntemi tercih edilmiştir.

3. MODEL TABANLI GÖMÜLÜ KOD ÜRETİM ORTAMLARI

3.1 Matlab

Matrix laboratory (matris laboratuvarı) kelimelerinden türetilerek isimlendirilmiş olan MATLAB, 1985 yılında Cleve Moler tarafından özellikle matris esaslı matematik hesaplamalarında kullanılmak üzere geliştirilmiş, etkileşimli, teknik bir programlama dilidir. Önceleri yalnızca matematiksel hesaplamaların gerçekleştirilmesinde kullanılan bu program, daha sonra her yeni sürümü ile daha da genişleyen toolboxları sayesinde kullanım alanı yelpazesini oldukça genişletmiştir. Bahsi geçen toolboxlar, kontrol, görüntü işleme, istatistik, optimizasyon, bulanık mantık, sinir ağları, sayısal işaret işleme, güç sistemleri, filtre dizaynı, genetik algoritma, grafik veritabanı, web sunucusu, finans gibi çok farklı alanlardaki çalışmaların Matlab üzerinde gerçekleştirilebilmesini sağlayan araç kutularıdır.

Matlab'ın önemli özelliklerinden birisi, gerek programcı tarafından yazılması, gerekse işlemci tarafından işlenmesi zor olan klasik algoritmaların çok daha kolay ve kısa olarak yazılabilesine olanak sağlamasıdır. Geliştirilen uygulamaların, M-dosyası (M-file) olarak adlandırılan alt fonksiyonlar şeklinde oluşturulması diğer programlama dillerine nazaran daha az komut ile çözüme ulaşılmasını sağlamaktadır. Bu özelliği de işlemci ve bellek üzerindeki yükün azalmasını beraberinde getirmektedir.

Bu programın diğer bir özelliği de herhangi bir yüksek seviye programlama dilinin yeteneklerine sahip iken bu dillerin aksine programı derlemeyip (compile) – isteğe bağlı olarak uygulama dosyası olarak derleyebilme olanağı olmakla beraber – sadece yorumlayarak (interpret) çalıştırır.

Ayrıca MATLAB, 10^{-308} ile 10^{308} hesaplama aralığında işlem yapabilmekte, buna ilave olarak oldukça güçlü ve kullanışlı grafik çizim imkânları da sunabilmektedir (Arifoğlu, 2005).

MATLAB'ın kullanım alanlarından bazıları şöyle sıralanabilir:

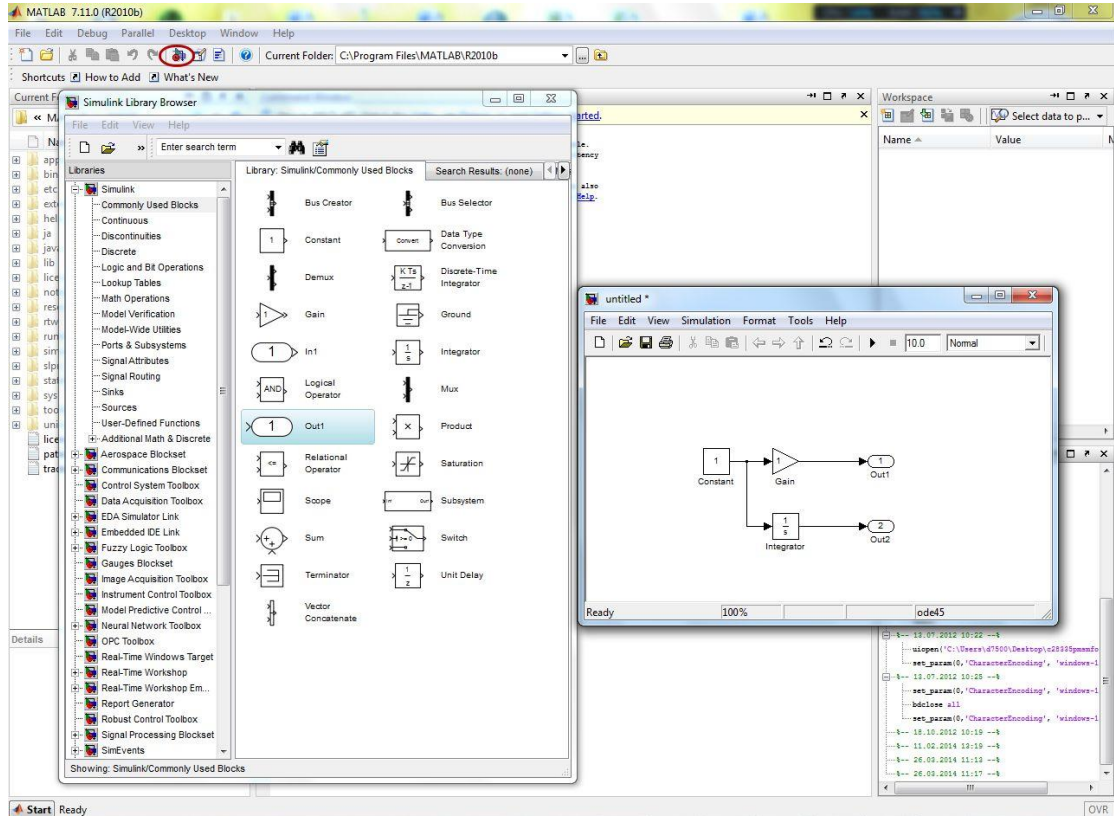
- Eşitlik takımlarının çözümü, doğrusal ve doğrusal olmayan diferansiyel eşitliklerin çözümü, integral hesabı gibi sayısal hesaplamalar,
- Veri çözümleme işlemleri,
- İstatistiksel hesaplamalar ve çözümlenmeler,
- Grafik çizimi ve çözümlenmeler,
- Bilgisayar destekli denetim sistemi tasarımı, vs.

3.1.1 Simulink

Simulink; dinamik sistem modellerinin kurulması, benzetimi ve çözümlemesinde kullanılan bir Matlab ara yüzüdür. Bu benzetim işlemi en geniş kapsamı ile gerçek veya teorik fiziksel bir sistemin bilgisayar üzerinde tasarlanma disiplini ve analiz işlemi olarak tanımlanmaktadır. Burada temel amaç, oluşturulan sistem modeli aracılığı ile mevcut veya henüz tasarı aşamasındaki herhangi bir sistemin temsil edilmesini sağlamaktır.

Simulink ile zamanın tek bir noktasında incelenen ayrık veya zamana bağlı olarak ara verilmeksizin incelenen sürekli olaylardan, zamandan bağımsız statik veya zamana bağlı dinamik sistemlere; geri beslemesi olmayan açık veya geri beslemeli kapalı döngülü sistemlerden, tahmini sistem davranışlı stokastik veya belirli sistem davranışlı deterministik sistemlere kadar birçok sistemin benzetimi gerçekleştirilebilmektedir. Bu denli karmaşık yapıların benzetimini mümkün kılan Simulink, herhangi bir sistemi kod yazarak gerçeklemek yerine, içerisinde barındırdığı blokları sürükleyip bırak tekniği ile birbirine bağlayarak, kağıt üzerinde blok diyagram çizimi gerçekleştirir gibi modeli oluşturma mantığı üzerine kurulmuştur. Bahsi geçen bu bloklar modellenecek sistemin girişlerini, parçalarını ve nihayet çıkışlarını temsil edecek şekilde kullanılmak üzere geniş bir yelpazede Simulink blok kütüphaneleri içerisinde yer almaktadır.

Kullanıcılar standart kütüphanelerden yararlanabileceği gibi belirli bir alanda kullanılacak özel kütüphaneleri alarak hatta kendi bloklarını oluşturarak uygulamalarını geliştirebilmektedir. Bahsi geçen kütüphane ve içerisinde bulunan bloklar Şekil 3.1'deki sol pencerede görülmektedir, sağ pencere ise Simulink'te oluşturulmakta olan bir örnek modeli temsil etmektedir.



Şekil 3.1. Simulink ekran görünümü.

Yukarıda da değinildiği üzere bir Matlab arayüzü olan Simulink, Şekil 3.1’de yuvarlak içerisinde alınan buton vasıtası ile veya Matlab komut penceresinde “simulink” komutu yazılarak açılabilir.

Gerçek dünyadaki olası sistemlerin modelleri Simulink üzerinde oluşturulup tıpkı sistem mevcutmuş gibi denemeler yapılabilmekte, ilgili parametreler değiştirilerek sistemin güncellenmesi veya değiştirilmesi ve bu değişikliklerin sonuçlarının anında elde edilmesi - gerçek zamanlı olarak - mümkün olabilmektedir. Böylelikle gerek pahalı sistemlerin henüz oluşturulmadan denenmesi gerekse sistemin optimum hale getirilmesi sırasındaki gereksiz maliyetlerin ve zaman kayıplarının azalması sağlanmaktadır.

3.1.2 Real time workshop

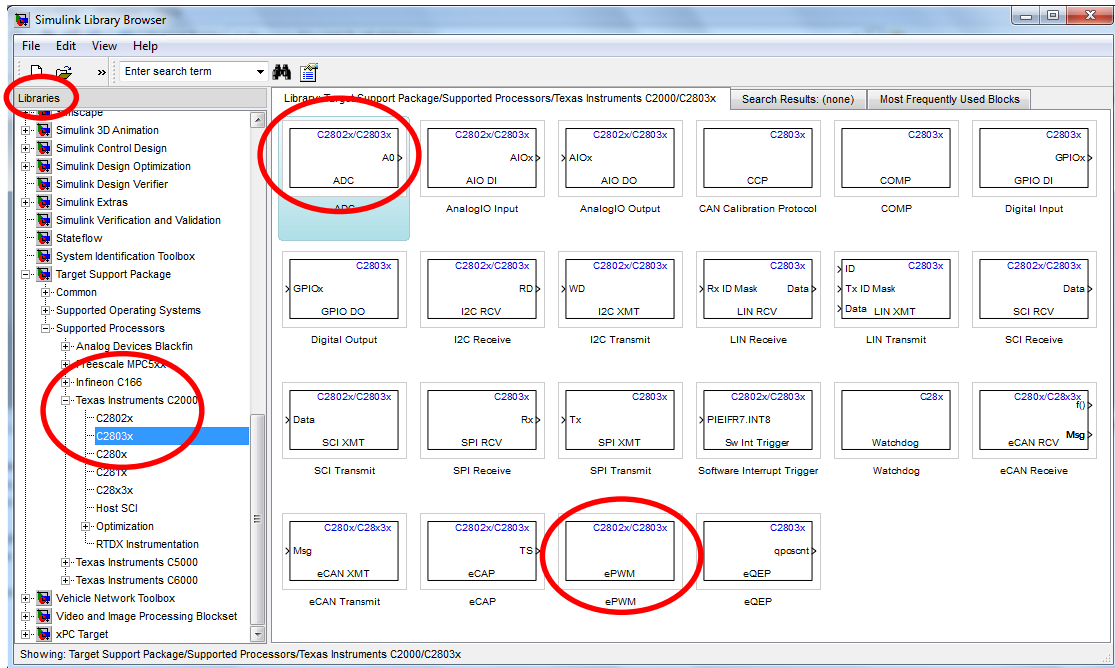
Matlab’da bazı özel problemlerin çözümü için özelleşmiş araç kutuları (toolbox) bulunmaktadır. Bu araç kutularının birçoğu Simulink gibi Matlab altında çalışırken bazıları da Matlab ile birlikte Simulink altında çalışmaktadır. Bu gruba örnek olarak

gösterilebilecek olan Real Time Workshop araç kutusu, oluşturulan modelden, Simulink için optimum ve uyarlanabilir ANSİ C kodunu otomatik olarak üretmektedir.

Real Time Workshop'a eklenen Embedded Coder ürünü, gömülü işlemcilere özel olarak kod üretmektedir. Bu yöntemde kodlar, elde yazılmış profesyonel kod ile kıyaslanabilir düzeyde verimli şekilde üretilmektedir. Simulink'in kod üretme araçları, üretilen kodu doğrudan doğruya gömülü işlemcinin belleğine yükleyebilecek araçlar içermektedir. Bu süreçte, Real Time Workshop ve Embedded Coder, C kodunu seçilen gömülü işlemciye özel olarak üretmektedir (Ergen, 2009).

3.1.3 The embedded target for TI C2000 DSP

The Embedded Target for TI C2000 DSP, uygulamada da kullanılan Texas Instruments (TI) firmasının DSP'lerinin Simulink modelinde tanımlanmasını sağlayan blokları içermektedir. Şekil 3.2'de gösterilen bu bloklar ilgili kütüphaneden modele eklenerek DSP için gerekli kodların Matlab tarafından otomatik olarak üretilebilmesi sağlanabilmektedir.

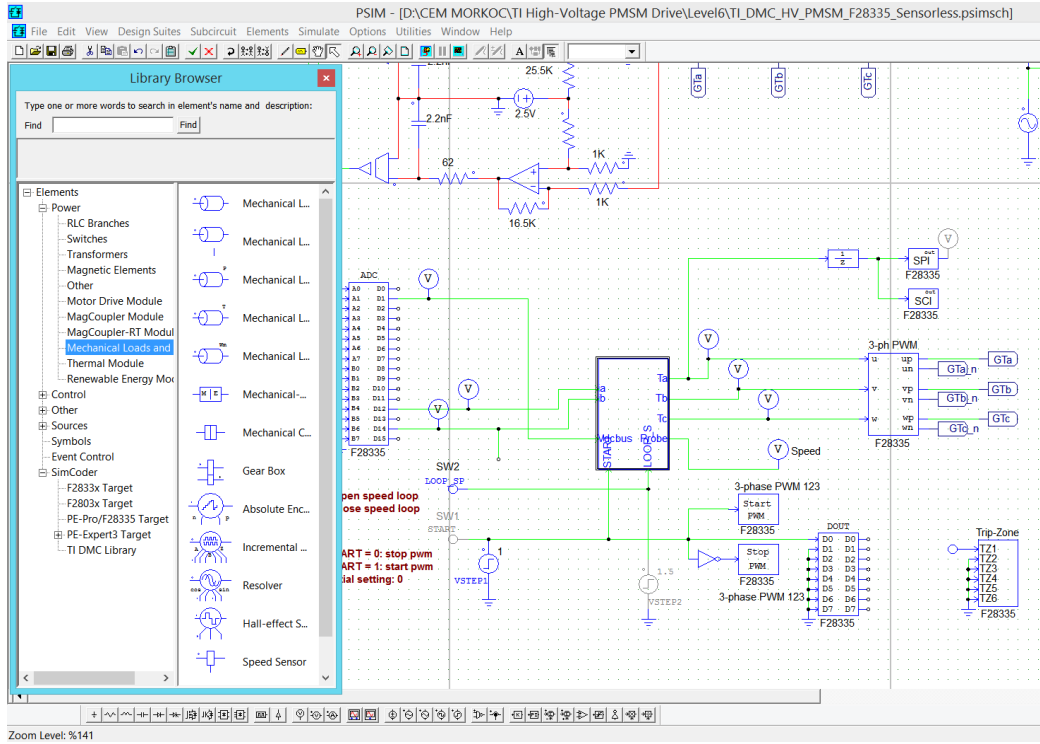


Şekil 3.2. TI C2000 işlemcisi için Simulink kütüphanesi ve kütüphanedeki blokların görünümü.

3.2 Power SIM (PSIM)

PSIM, birçok alanda kullanılmakla birlikte özellikle güç elektroniği, motor denetleme sistemlerinin tasarımı ve simülasyonu için geliştirilmiş bir programdır. Kullanıcı dostu arayüzü ve hızlı simülasyon yapabilme gibi özellikleri nedeniyle uygulama geliştiriciler tarafından tercih edilmektedir. PSIM, motor sürücü uygulamaları elektrik makinaları ve mekanik yük modellerinin oluşturulmasını sağlayan motor sürücü modülü, otomatik kod üretimini sağlayan SimCoder modülü gibi üzerinde uygulama geliştirmeyi kolaylaştıran birçok modüle sahiptir. Matlab veya Simulink ile hatta farklı amaçlar için kullanılan farklı programlarla iletişim kurup koordineli olarak çalışabilme özelliğine sahip PSIM, bu çalışmada Matlab'ın Simulink bölümünde olduğu gibi AYK yöntemi ile SMSM denetim sisteminin modelini oluşturmak ve otomatik kod üretimi işlem basamaklarını yönetmek amacı ile kullanılmaktadır.

PSIM, kütüphanesinde barındırdığı blokları sürükleyip bırak tekniği ile birbirine bağlayarak, kağıt üzerinde blok diyagram çizimi gerçekleştirir gibi modelini oluşturma mantığı üzerine kurulmuş bir programdır. Bahsi geçen bu bloklar sistemin tüm bölümlerini temsil edecek şekilde kullanılmak üzere geniş bir yelpazede, "Elements" başlığının altındaki dört grupta (Power, Control, Others ve Sources) PSIM kütüphanesi içerisinde yer almaktadır. Bahsi geçen kütüphane ve içerisinde bulunan bloklar Şekil 3.3'teki sol pencerede (Library Browser) görülmektedir. Şekil 3.3'teki sağ bölümde ise PSIM'de oluşturulmakta olan bir örnek model görülmektedir. Gerçek dünyadaki olası sistemlerin modelleri PSIM üzerinde oluşturulup simülasyonu yapılabilmekte, model üzerindeki blokların parametreleri değiştirilerek sistemin güncellenmesi veya değiştirilmesi ve bu değişikliklerin sonuçlarının anında elde edilmesi mümkün olabilmektedir. Böylelikle gerek pahalı sistemlerin henüz oluşturulmadan denenmesi gerekse sistemin iyileştirilmesi sırasındaki gereksiz maliyetlerin ve zaman kayıplarının azalması sağlanmaktadır.



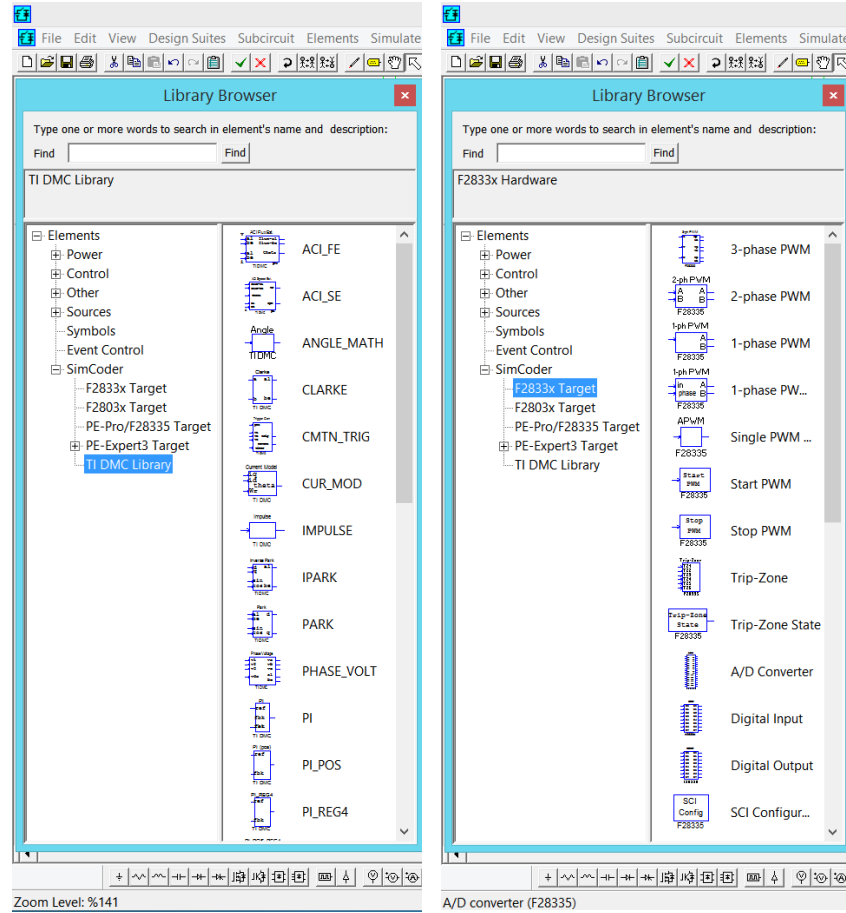
Şekil 3.3. PSIM ve kütüphanesinin ekran görünümü.

3.2.1 SimCoder

SimCoder, PSIM üzerinde çalışan, PSIM’de oluşturulmuş model üzerinden ilgili gömülü işlemciye uygun C kodlarını otomatik üreten bir eklentidir. SimCoder, bahsi geçen C kodlarını, doğrudan işlemciye yükleyebilecek ve oldukça verimli bir yapıda üretebilmektedir.

3.2.2 TI DMC

TI DMC (Digital Motor Control – Sayısal Motor Denetimi) kütüphanesi, uygulamada da kullanılan TI firmasının DSP’lerinin PSIM modelinde tanımlanması ve sayısal motor denetimi için kullanılan blokları içermektedir. Bu bloklar Şekil 3.4’te görülen kütüphaneden modele eklenerek DSP için gerekli kodların PSIM / SimCoder tarafından otomatik olarak üretilebilmesi sağlanmaktadır.



Şekil 3.4. PSIM içerisindeki TI DMC kütüphanesi.

3.3 Code Composer Studio (CCS)

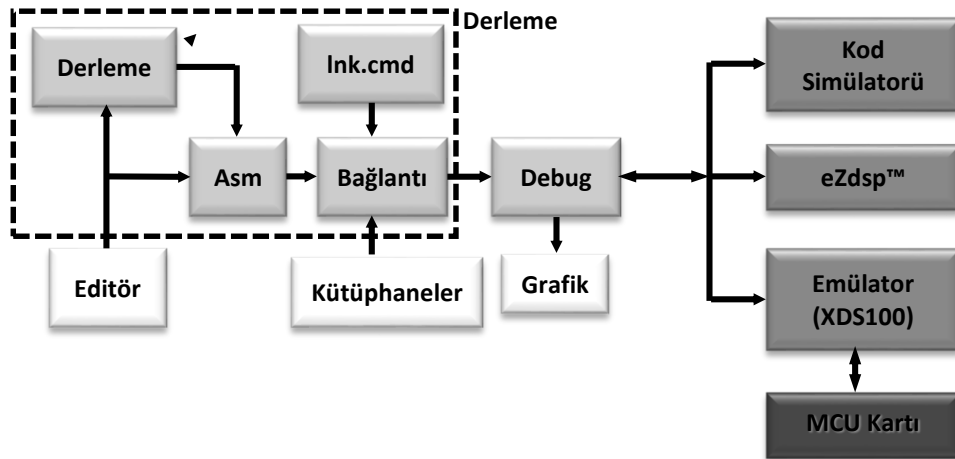
Code Composer Studio (CCS), gerçekleştirilecek sisteminin Matlab / Simulink veya PSIM programında oluşturulan modelinden üretilmiş olan C kodlarını, ilgili program tarafından çağırılarak TI firmasının ilgili işlemcisi için uygun kodlara dönüştürme işlemini gerçekleştiren, yine TI firması tarafından geliştirilmiş bir yazılımdır. Çalışmada kullanılan DSP'nin programlanması C++ veya ASM dilleri kullanılarak gerçekleştirilebildiği gibi MATLAB/Simulink, PSIM gibi özel paket programlar tarafından model tabanlı olarak da gerçekleştirilebilmektedir. Ancak nihai adım olan oluşturulan program kodlarının işlemciye uygun biçimde derlenerek yüklenmesi işlemi yine CCS aracılığıyla gerçekleştirilmektedir.

Bu yazılım aynı zamanda sayısal sinyal işleme temelli uygulamaların tasarım sürecinde doğrudan kart üzerinde olmaksızın, yazılım üzerinden çalışmasına imkân veren bir geliştirme ortamını da beraberinde getirmektedir. Böylelikle CCS, uygulama

geliştiricilere nispeten pahalı işlemciler edinilmeden tıpkı sisteme bir işlemci mevcutmuş gibi uygulama geliştirebilme olanağı sağlamaktadır(Ergen, 2009).

CCS’de açılan her yeni proje için öncelikle kullanılan işlemciye ilişkin başlık, kütüphane ve kullanıcı tarafından değiştirilebilen kaynak dosyalarının eklenmesi gerekmektedir. Daha sonra ise işlemcinin kullanılan birimlerine göre (giriş/çıkış kapıları, ADC girişleri, PWM çıkışları, sayısal veri çıkışları, işlemci ve kullanılan birimlerin uygun çalışma hızları) uygun ayarlar yapılması gerekmektedir (Kesler, 2008).

Fakat bu çalışmada sistemin modeli üzerinden, CCS programı, Matlab veya PSIM tarafından çağırılarak, DSP gömülü kodları otomatik üretilmektedir. Dolayısı ile herhangi bir kod yazma işleminin olmadığı gibi yukarıda bahsedilen işlem basamaklarının hiçbirinin de gerçekleştirilmesine gereksinim duyulmamaktadır. Bütün bu işlem basamakları otomatik olarak gerçekleştirilmektedir. CCS işleyiş blok diyagramı Şekil 3.5’te görülmektedir.



Şekil 3.5. CCS işleyiş blok şeması.

3.4 Yüksek Voltaj Motor Denetim ve Güç Faktör Kompanzasyonu Kiti

Bu çalışmada, Yüksek Voltaj Motor Denetim ve Güç Faktör Kompanzasyonu Kiti'nin görevi, denetim algoritması için otomatik olarak oluşturulan uygun kodları yürütmek, DSP'ye bu kodların yüklenmesine içerisinde barındırdığı emülatör ile aracılık etmek ve algoritma sonucunda SMSM'nin çalıştırılmasında kullanılan gerilimleri SMSM'ye uygulamaktır. TI firması tarafından geliştirilmiş Şekil 3.6'da gösterilen bu kit, üç fazlı yüksek gerilim AC motorlarının sayısal denetimi için deneysel uygulamalar yapmak üzere, gerekli olan birçok birimi bünyesinde birleştirmiştir.

Gerçek zamanlı olarak komutları ve değişken parametrelerini almak ve ölçüm sonuçlarını göndermek için iletişimi sağlayan yalıtılmış bir Universal Serial Bus (USB) ve SCI (RS-232) bu birimlerin bazıları olarak verilmektedir. Ayrıca bir yüksek güç doğrultucuya, 1.5 KW'lık bir üç faz invertere, ısınmayı engellemek üzere bir fan ve bir soğutucuya, altı adet 20 A'lık IGBT içeren bir akıllı güç modülüne (IPM) ve giriş değişken değerlerini görmek üzere kullanılabilir dört adet PWM sayısal analog çeviriciye sahiptir.

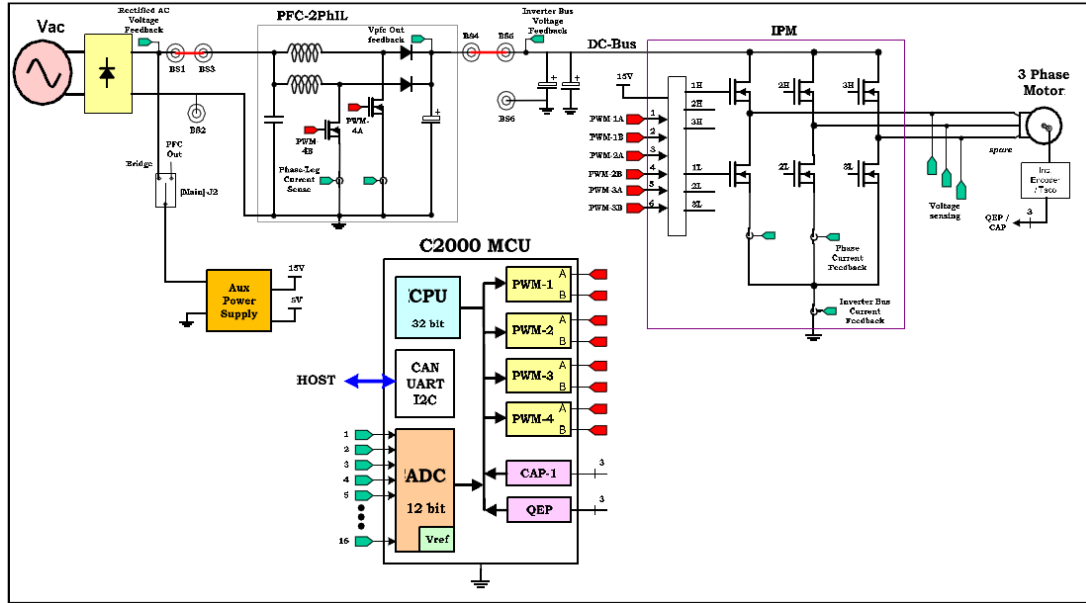


Şekil 3.6. Yüksek voltaj motor denetim ve güç faktör kompanzasyonu kiti.

Bu çalışmada en büyük rolü DSP üstlenmektedir. TI firmasının üretmiş olduğu bu kit aynı firmanın C2000 serisindeki tüm DSP'ler için kullanılabilir. DSP ve kit üzerindeki çevresel birimler, model tabanlı gömülü kod üretimi ortamlarından uygulamada kullanılan Matlab ve PSIM programları ile birlikte denetim sisteminin hızlı modellenmesi, simülasyonu, otomatik kodların üretilmesi ve nihayet sistemin çalıştırılması sağlanmış olmaktadır.

Çalışmada kullanılan DSP ve SSM bu kit üzerine bağlanmaktadır. Kitin bu çalışmadaki görevi, USB portu ile bilgisayara bağlanarak gerek üretilen DSP otomatik kodlarının DSP'ye yüklenmesini sağlamak gerekse DSP kodları çalıştırıldığında elde edilen besleme gerilimlerinin SSM'ye gönderilip motorun çalışmasını sağlamaktır.

Ayrıca bu çalışmada kitin güç faktör kompanzasyonu özelliği kullanılmamaktadır. Yüksek Voltaj Motor Denetim ve Güç Faktör Kompanzasyonu Kiti'nin blok diyagramı bir C2000 DSP ile birlikte Şekil 3.7'de görülmektedir.



Şekil 3.7. Yüksek voltaj motor denetim ve güç faktör kompanzasyonu kitinin blok diyagramı bir C2000 DSP ile birlikte.

4. MODEL TABANLI GÖMÜLÜ KOD ÜRETİM AŞAMALARI

4.1 Sayısal Sinyal İşlemci (Digital Signal Processor, DSP, SSI)

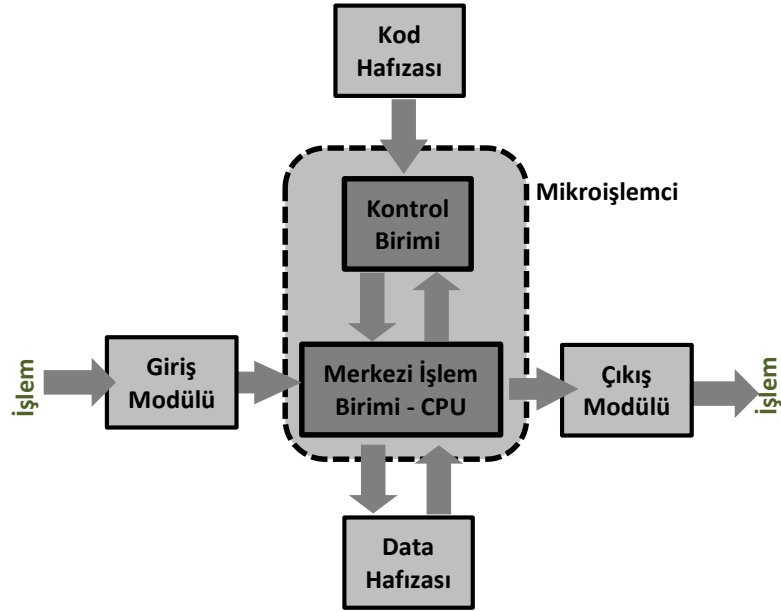
Büyük çapta tümleştirme (Large Scale Integration – LSI) ve çok büyük çapta tümleştirme (Very Large Scale Integration – VLSI) teknolojilerindeki gelişmeler diğer birçok alanda olduğu gibi güç elektroniği ve motor denetimi alanlarında tümleşik devrelerin (Integrated Circuits) kullanımının yaygınlaşmasını da beraberinde getirmektedir. Bu tarz tümleşik devreler, uygulamalarda kullanılacak birçok elemanın yerini alabildikleri gibi bu tür elemanlarla gerçekleştirilebilmesine olanak olmayan modern denetim algoritmalarının motor denetiminde uygulanabilmesini ve aynı zamanda da uygulama maliyetlerinin oldukça azalmasını sağlamaktadır.

Tümleşik devreleri tanımlamak için Mikroişlemci (Microprocessor), Mikro bilgisayar (Microcomputer), veya Mikrodenetleyici (Microcontroller) gibi kavramlar kullanılmaktadır. Konu sayısal sinyal işleme olduğunda ise tercih edilen kavramlar Sayısal Sinyal İşlemciler (Digital Signal Processors) veya Sayısal Sinyal Denetleyiciler (Digital Signal Controllers – DSC) olmaktadır. Öncelikle bahsi geçen bu çok sık kullanılan ve birbirine karıştırılabilecek kavramları açıklamak ve aralarındaki farklara değinmek gerekmektedir. Dolayısı ile izleyen bölümde sırasıyla Mikroişlemci, Mikro bilgisayar, Mikrodenetleyici, Sayısal sinyal işlemci ve Sayısal sinyal denetleyici kavramlarına değinilmektedir.

Mikroişlemci (Microprocessor - μ P): Mikroişlemciler; kod hafızasından gelen yeni makina kodu komutlarını oku, komutu çöz, data hafızasından opsiyonel verileri oku, komutu işle ve sonuç yaz şeklinde gerçekleşen basit ardışıl bir prosedür üzerine inşa edilmiştir. Bu prosedür sonsuz olarak çalışmaktadır. Mikroişlemciler çalışabilmek için kendilerine ek olarak hafıza ve ilave harici aygıtlara ihtiyaç duymaktadır.

Şekil 4.1’de verilen mikroişlemci blok diyagramında da görüldüğü gibi mikroişlemci, Kontrol birimi ve merkezi işlem birimi - CPU olmak üzere iki bölümden oluşmaktadır. Tipik bir mikroişlemci, giriş sinyallerini işlemekte, data hafızasından gelen verileri okuyup, sonuçları yine data hafızasına yazmakta ve çıkış modülünü güncellemektedir. Bütün hesaplama kod hafızasında saklanan makina kod komutları vasıtası ile Kontrol Birimi tarafından yönlendirilmektedir. Bir mikroişlemcinin kalbi

Merkezi işlem birimidir (CPU). CPU, içerisinde birkaç dahili hafıza hücre (register), hesaplama görevini üstlenmiş Aritmetik ve lojik birimi (ALU), komutları saklayan komut registerini (Instruction Register – IR), o anda işlenen ve ardından gelecek olan komutları analiz eden komut çözücüyü ve hafızadan data ve komutları okuyan ve hafızaya veri yazma görevini üstlenmiş adres ünitesini barındırır.

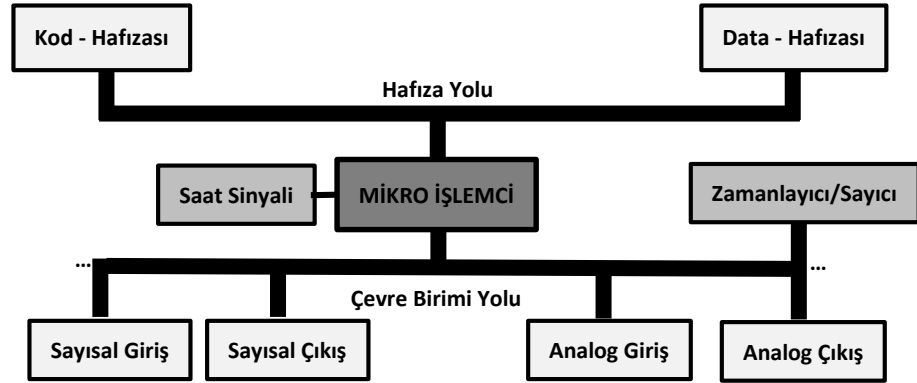


Şekil 4.1. Tipik bir mikroişlemcinin blok diyagramı.

Mikro Bilgisayar (Microcomputer): Bir mikroişlemciye komutlar ve verinin saklanması için bir harici bellek, dış dünya ile bilgisayar sisteminin iletişimini sağlamak amacı ile sayısal ve analog giriş / çıkış olarak adlandırılan bazı bağlantılar eklenerek bir bilgisayar sisteminin temeli oluşturulmuş olmaktadır.

Şekil 4.2’de basit bir mikro bilgisayarın blok diyagramı görülmektedir. Bir mikro bilgisayar içindeki mikroişlemci, hafıza yolu (bus) üzerinden hafıza sistemi ile iletişim kurmaktadır. Bu yol Von Neumann mikroişlemci mimarisinde kod ve program hafızası tarafından ortaklaşa kullanılmakta iken Harvard mikroişlemci mimarisinde ise iki bağımsız ve paralel yol sistemine ayrılmaktadır. Çevre birimi yolu ise mikroişlemciyi dış dünya ile iletişimini sağlayan sayısal giriş ve çıkış hatları, analog

sayısal dönüştürücü (ADC), sayısal analog dönüştürücü (DAC), seri iletişim ara yüzü (SCI), universal serial bus (USB) gibi çevresel birimlere bağlanmaktadır.



Şekil 4.2. Tipik bir mikro bilgisayarın blok diyagramı.

Mikrodenetleyici (Microcontroller - μ C): Silikon ve yarı iletken teknolojisindeki ilerlemeler, bir mikro bilgisayarın içerisindeki birimleri tek bir silikon çip içerisine koyma fikrini gündeme getirmiştir. Bir mikro bilgisayarın tüm birimleri ile tek bir chip içine sığdırılamayacağı gerçeği, gerçekleştirilecek uygulamaya yönelik olarak yalnızca gerekli birimleri ihtiva eden mikrodenetleyiciler üretilmesine neden olmaktadır. Bu durum da birçok farklı kapasitede, içerikte ve doğal olarak farklı maliyette mikrodenetleyicilerin üretilmesini beraberinde getirmektedir. Dolayısı ile mikrodenetleyiciler ailesi günümüzde çok geniş bir yelpazede değerlendirilmektedir.

Her ne kadar farkında olunmasa da kullanılan birçok üründe mikrodenetleyiciler bulunmaktadır. Bu durumun nedeni ise mikrodenetleyicilerin bir diğer ismi ile açıklanabilir: Gömülü bilgisayar (embedded computer) veya gömülü denetleyici (embedded controller). Mikrodenetleyiciler tek bir çip içinde bir bilgisayar yapısını barındırdığından dışarıdan bakıldığında içerisinde barındırdığı birimlerin fazlalığının fark edilmesi oldukça zordur. Örneğin, günümüz modern arabalarında en karmaşık fren sistemlerinin (ABS) kontrolünden, en basit elektrikli ayna kontrolüne kadar birçok bölümünde yaklaşık 80 ayrı mikrodenetleyici kullanılabilmektedir.

Sayısal Sinyal İşlemci (Digital Signal Processor – DSP): Amacı veriyi mümkün olduğunca hızlı, gerçek zamanda yeni veriden oluşan çıktı akışı üretecek şekilde işlemek olan sayısal sinyal işlemci, sinyal sensörleri tarafından ölçülen sayısal verileri tipik matematiksel işlemler çerçevesinde işleyebilecek şekilde tasarlanmış, özelleşmiş bir aygıt olarak tanımlanmaktadır.

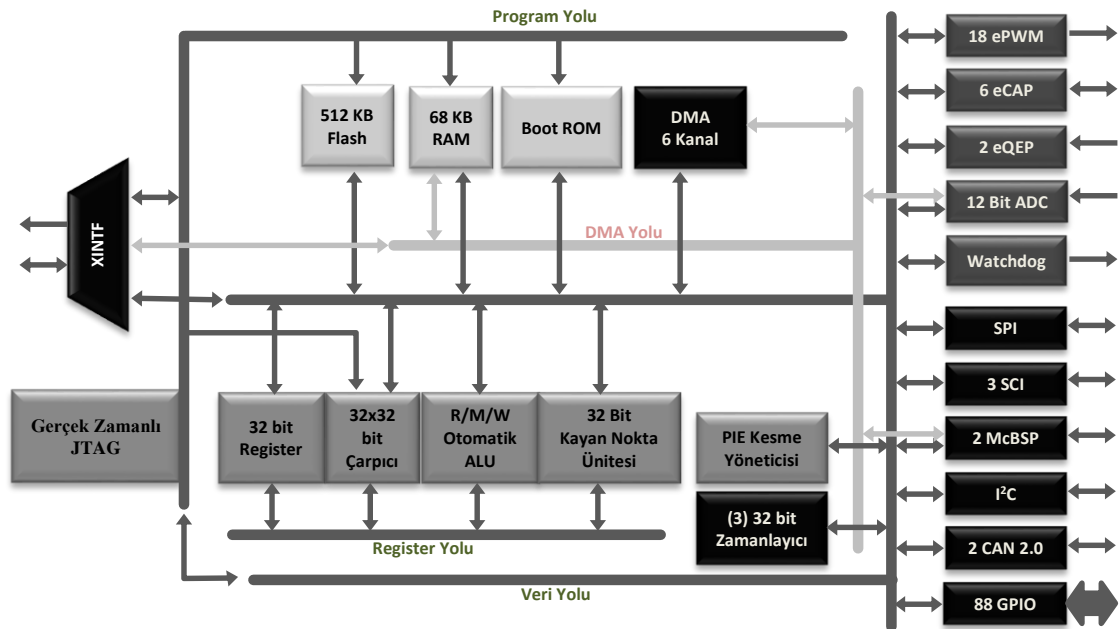
Sayısal Sinyal Denetleyici (Digital Signal Controller – DSC): Sayısal sinyal denetleyiciler bir sayısal sinyal işlemcinin hesap gücü ile bir mikrodenetleyicinin gömülü çevrebirimlerini bünyesinde birleştiren yeni nesil mikrodenetleyicilerdir. Bu nedenle çok fazla karmaşık matematiksel işlemleri bünyesinde barındıran gelişmiş gerçek zamanlı kontrol sistemi uygulamalarında sayısal sinyal denetleyiciler kullanım yaygınlıklarını giderek arttırmaktadırlar. Burada bahsedilmesi gereken bir diğer ayrıntı da bazı üreticilerin bu ürünlerini hala mikrodenetleyici olarak isimlendirmeye devam ediyor olmalarıdır. Bu durumun nedenleri arasında birçok hedef uygulamanın isminin mikrodenetleyici soketi olarak kabul ediliyor olması ve uygulama geliştiricilerin büyük oranda sayısal sinyal denetleyici kavramına alışkın olmamasıdır.

Gerçekleştirilen uygulamada TI firmasının TMS320F28335 32 bit kayan noktalı sayısal sinyal denetleyicisi kullanılmıştır. Zira bu üretici de yer yer DSC kavramı veriye mikrodenetleyici hatta çoğu zaman Sayısal Sinyal İşlemci (DSP) kavramını kullanmaktadır. İlerleyen kısımlarda da kavram kargaşasına yol açmamak ve genel teamülden uzaklaşmamak adına kullanılan işlemci için DSP kavramı kullanılacaktır.

Bu çalışmada kullanılan TMS320F28335 DSP, sabit noktalı işlem yapabilen, 32-bit, 150Mhz C/C++ programlama desteğine sahip bir işlemcidir. Buna ek olarak programlanabilir PWM çıkışı, Analog/Sayısal çevirici, 4 adet sayısal yakalama ve 4 adet kare dalga kodlayıcı girişi. 16-bit 7 port programlanabilir sayısal giriş-çıkış, 18K word RAM ve 128K word Flash EEROM'a sahip 16 kanal 12-bit 80ns dönüşüm zamanlı ve 16-kanal 6.67ns çözünürlüklü ölü zaman ayarlı bir işlemcidir. Uygulamada kullanılan TI firmasının TMS320F28335 DSP'sinin blok diyagramı Şekil 4.3'te görülmektedir.

Gerçekleştirilen çalışmada, TMS320F28335'nin tercih edilmesinin diğer nedenlerinden birkaçı şöyle sıralanabilir:

- Sayısal kontrol sistemlerinde ve motor kontrol uygulamalarında yaygın olarak kullanılıyor olması,
- Düşük maliyeti ile tercih ediliyor olması,
- Sabit (fixed point) veya kayan (floating point) noktalı olarak çalışabilmesi,
- PWM (Pulse With Modulation), ADC (Analog to Digital Converter), CAN, SPI, I²C gibi uygulama geliştiricilere kolaylık sağlayan birçok modülünün bulunması.

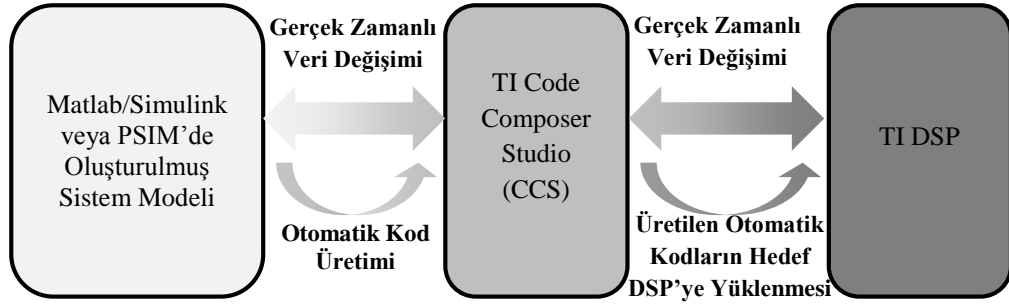


Şekil 4.3. TMS320F2833x blok diyagramı.

4.2 Model Tabanlı Gömülü Kod Üretimi

Hızlı modelleme, denetim algoritmalarının blok diyagramlarla gösterilebilen benzetimi için model tabanlı geliştirme ortamları (bu çalışmada Matlab / Simulink ve PSIM kullanılmaktadır) vasıtası ile sistemin modeli oluşturulma işlemidir. Bu alanda yapılmış birçok çalışmanın aksine bu çalışmada hızlı modellemenin nihai amacı yalnızca sistemin simülasyonunu yapmak değil aynı zamanda otomatik kod üretimini de sağlamaktır. Otomatik kod üretimi, hedef DSP kartına kodlamayı, derlemeyi, bağlamayı

ve yüklemeyi içermenin yanı sıra algoritma kodlamasını otomatik olarak üretmeyi de kapsamaktadır. Bu otomasyon, tasarım değişikliklerinin blok diyagram yoluyla doğrudan yapılabilmesine izin vermekte ve saniyeler içerisinde yeni testler için hazır olmasını sağlamaktadır (Kesler vd., 2006; Hong vd., 2000).



Şekil 4.4. Model tabanlı gömülü kod üretimi ortamlarının birbiri ve DSP ile ilişkisi.

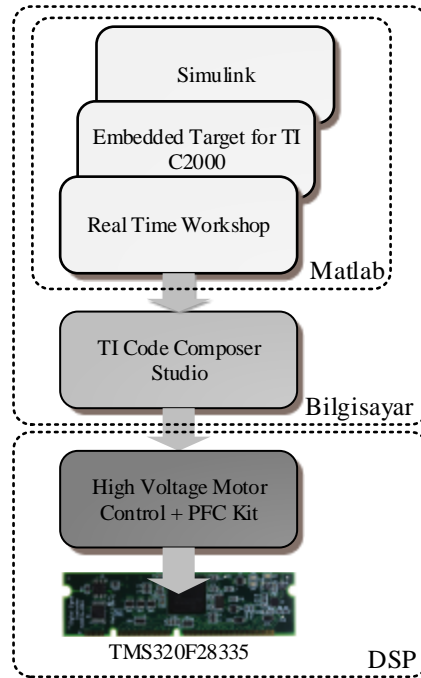
Oluşturulan simulink modelinde normal matematiksel fonksiyon blokları yerine TI firması tarafından geliştirilmiş IQmath fonksiyonları kullanılmaktadır. IQmath, sabit noktalı (fixed point) işlemciler için geliştirilmiş ve kayan noktalı (floating point) işlemciler kadar hassas matematiksel işlem performansı sağlayan, maksimum kod optimizasyonu yapılmış algoritmalarıdır (Sarioğlu vd., 2003).

Hızlı modelleme ve beraberinde getirdiği otomatik kod üretiminin sağladığı yararlar şöyle sıralanabilir;

- Herhangi bir programlama dili içine girmeden tüm sistemin parametreleri gerçek zamanda değiştirilebilmektedir.
- Grafikselsel blok diyagramların kullanımı, DSP üzerinden denetlenen sistem tasarımını, modellenmesini ve modifikasyonunu oldukça kolaylaştırmaktadır.
- Kodların üretimi için herhangi bir kod bilgisine gereksinim duyulmamakla birlikte sistemin modelinin değiştirilmesi gerekmedikçe bilgisayar kullanım bilgisine dahi gereksinim duyulmayacak kadar süreci kolaylaştırmaktadır.
- Üretilen kodlar optimum algoritmalar kullanılarak üretildiği için elle yazılmış kodlar kadar verimli çalışabilmektedir.

4.2.1 Matlab ortamında model tabanlı gömülü kod üretimi

RTW (Real Time Workshop), Simulink ortamında oluşturulan SMSM denetim sisteminin grafiksel blok diyagramından C kodlarını otomatik olarak üretmektedir. Bu kodlar CCS ortamına aktarılarak diğer destek dosyalarıyla birlikte derlenmekte ve bilgisayarın USB portuna bağlı Yüksek Voltaj Motor Denetim ve Güç Faktör Kompanzasyonu Kiti'nin içerisindeki emülatör aracılığı ile hedef DSP'ye yüklenmektedir. Böylece, Matlab/Simulink ortamında oluşturulan SMSM denetim sisteminin model tabanlı denetim blok diyagramının, gerçek zamanlı sinyal işleme tabi tutulmak üzere DSP ortamında gerçek zamanlı olarak aktarılması ve uygulanması mümkün olmaktadır. Şekil 4.5'te de aşamaları ifade edilen tüm bu süreç de gömülü kod üretimi olarak isimlendirilmektedir (Kesler vd., 2006).



Şekil 4.5. Matlab ortamında gömülü kod üretimi aşamaları.

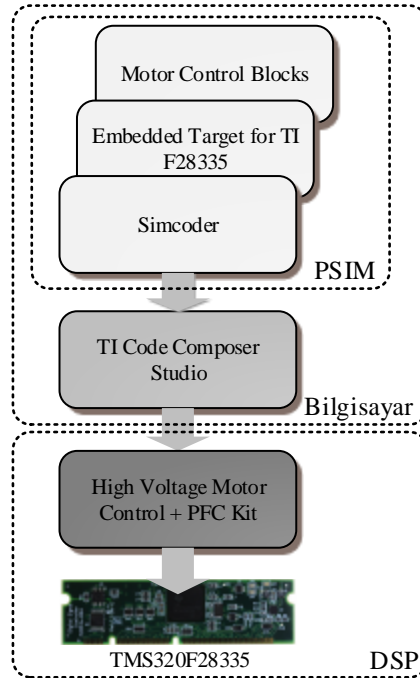
4.2.2 PSIM ortamında model tabanlı gömülü kod üretimi

Motor hız denetim sisteminin laboratuvar ortamında DSP üzerinden denetimi için öncelikle PSIM içerisindeki motor denetim ve TI DMC kütüphanelerinde bulunan bloklar kullanılarak SMSM denetim sisteminin simülasyon modeli oluşturulmaktadır. Akabinde oluşturulan sistem modeli, SimCoder vasıtası ile DSP için uygun C kodlarına

dönüştürülmektedir. Ayrıca SimCoder, elde edilen C kodlarının yanı sıra CCS için gerekli tüm proje dosyalarını da oluşturmaktadır. Böylelikle PSIM tarafından çağırılan CCS programı, bu proje dosyaları ve C kodlarını kullanarak DSP için uygun kodları derlemekte, bağlamakta ve sonrasında da Yüksek Voltaj Motor Denetim ve Güç Faktör Kompanzasyonu Kiti üzerindeki emulatör aracılığı ile DSP'ye yüklemektedir.

Şekil 4.6'daki adımlar izlendiğinde, PSIM ortamında oluşturulan motor hız denetim sisteminin model tabanlı denetim blok diyagramı üzerinden SimCoder vasıtası ile oluşturulan C kodlarının CCS programı vasıtası ile gerçek zamanlı sinyal işleme tabi tutulmak üzere DSP ortamında aktarılması ve uygulanması mümkün olmaktadır. Bu da gerek uygulama geliştirme zamanını, gerekse sistem üzerinden planlanan değişikliklerin oldukça kısa sürede gerçekleştirilebilmesini sağlamaktadır.

Ayrıca PSIM'de, modellerinin oluşturulması ile gerçek dünyada bulunmayan ve henüz tasarı aşamasındaki sistemler için simülasyon da yapabilmektedir. Böylelikle uygulama geliştiricilere, oluşturulması pahalı veya zor sistemlerin henüz oluşturulmadan simüle edilebilmesi hatta en iyi performansı sağlamak adına güncellenebilmesi gibi avantajları sağlamaktadır.



Şekil 4.6. PSIM ortamında gömülü kod üretimi aşamaları.

5. DENEYSEL ÇALIŞMALAR

5.1 Matlab Ortamında AYK Yöntemi ile SMSM Denetim Sistemi Modelinin Oluşturulması

Tez çalışmasının bu kısmında, SMSM hız denetim sisteminin laboratuvar ortamında Sayısal İşaret İşlemci (DSP) geliştirme kartı üzerinden denetimi için Matlab Simulink Embedded Target yazılımı ile kod üretimi otomatik olarak gerçekleştirilmiştir. Matlab Simulink yazılımı ile benzetimi yapılan Motor hız denetim sisteminin DSP üzerinden denetimi için gerekli C kodları Embedded Target TI C2000 DSP ve RTW (Real Time Workshop), alt yazılımları ile otomatik olarak üretilmiştir. Bu kodlar TI CCS2000 (Code Composer Studio 2000) DSP yazılım geliştirme ortamına aktarılarak diğer destek dosyalarıyla birlikte derlenmekte ve bilgisayarın USB portuna bağlı Yüksek Voltaj Motor Denetim ve Güç Faktör Kompanzasyonu Kiti içerisindeki emulatör vasıtası ile TMS320F28335 DSP kartına gönderilerek motor hız denetim sisteminin kontrolü sağlanmaktadır.

Bu yöntem sayesinde tüm tasarım basamakları otomatik, esnek ve oldukça kolay bir şekilde yapılabilmektedir. Grafikselsel blok diyagramların kullanımı, DSP üzerinden denetlenen sistemin tasarımının, modellenmesinin ve gerekli değişikliklerin gerçek zamanda gerçekleştirilmesini herhangi bir programlama dili içine girmeden sağlamaktadır. Ayrıca bu yöntem, tüm bu sürecin oldukça kolay ve kısa sürelerde gerçekleşmesini de beraberinde getirmektedir.

Matlab/Simulink ortamında otomatik gömülü kod üretmek amacıyla, Embedded Target for TI C2000 DSP araç kutusundaki C28x DMC kütüphanesinden Clarke dönüşüm bloğu, C28xxx Motor Control bloğu, C28x IQmath kütüphanesinden aritmetik işlem ve matematiksel fonksiyon blokları, Simulink, Simulink Fixed Point ve Signal Processing Blockset kütüphanesi kullanılarak SMSM denetim algoritması oluşturulmuştur. Ayrıca oluşturulan Simulink modelinde, C2800 DSP Core Support kütüphanesinden C28x ADC, C28x eQEP ve C28x PWM blokları eklenerek F28335 DSP analog girişleri ile PWM çıkışları seçilmiş ve C2000 Target Preferences kütüphanesinden F28335 eZdsp bloğu eklenerek DSP yapılandırma ayarları yapılmıştır.

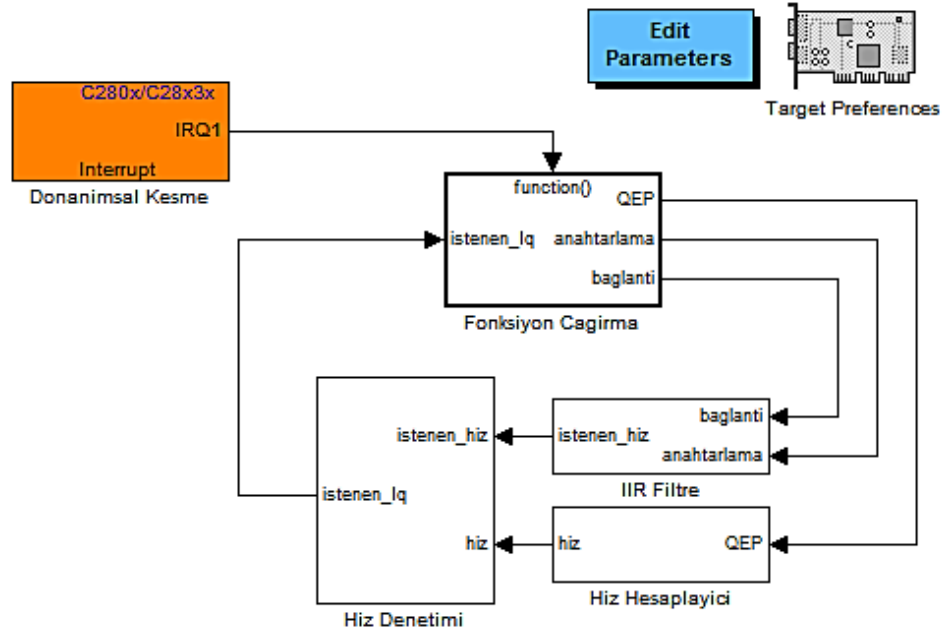
Oluşturulan simulink modelinde normal matematiksel fonksiyon blokları yerine IQmath fonksiyonları kullanılmıştır. Burada “I” integer (tam) , “Q” Quotient (kesir) anlamında kullanılır. IQmath, sabit noktalı (fixed point) işlemciler için geliştirilmiş ve kayan noktalı (floating point) işlemciler kadar hassas matematiksel işlem performansı sağlayan, maksimum kod optimizasyonu yapılmış algoritmalarıdır.

Ayrıca birçok blok ve alt sistemin diğer blok ve alt sistemlerle olan bağlantısı dahilinde birbirleri ile olan veri alışverişini sağlayabilmek adına veri tipi değişimini sağlayan “Data Type Conversion” olarak isimlendirilen bloklar kullanılmaktadır.

Matlab / Simulink’te herhangi bir sistemin modeli oluşturulurken, bir blok diyagram oluşturur gibi ilgili blokların birbiri ardına eklenmesi ve birbirine bağlanması şeklinde bir yöntem izlenilmesi gerekmektedir. Bu doğrultuda, bu tez çalışmasında olduğu gibi gerek matematiksel işlemlerin gerekse kullanılan blokların fazlalığından dolayı anlaşılması zor ve karmaşık bir sistem modeli ortaya çıkabilmektedir. Simulink’te, bu durumun önüne geçip oluşturulan modelin daha anlaşılır hale getirilmesini sağlamak amacı ile “alt sistem” yapısı kullanılmaktadır. Alt sistem, sistemin belirli bir kısmının, tek bir blok altında toplanarak daha az karmaşık bir yapı oluşturmak üzere betimlenmesi olarak tanımlanabilir. Bu tez çalışmasında da yukarıda değinilen amaç doğrultusunda alt sistemler oluşturulmuş ve oluşturulan alt sistemlerin her birinin içeriği sırasıyla açıklanmıştır. Matlab’da Türkçe karakterlerin kullanılması beraberinde bazı sorunlar getirdiğinden alt sistemler isimlendirilirken Türkçe karakterler kullanılmamıştır.

Şekil 5.1’de AYK yöntemi ile SMSM denetim sistemi için Matlab / Simulink’te oluşturulmuş model tabanlı denetim blok diyagramının genel şeması görülmektedir. Bu modelde görüldüğü üzere motorun mekanik hızını ölçmek için DSP’nin “eQEP modülü”nden alınan veri “Hiz Hesaplayıcı” bloğu vasıtası ile motorun hız bilgisine dönüştürülmektedir. “Hiz Denetimi” bloğunda motorun anlık hızı ile istenilen hızı karşılaştırılarak PID kontrolör vasıtası ile istenilen Iq akımının değeri belirlenmektedir.

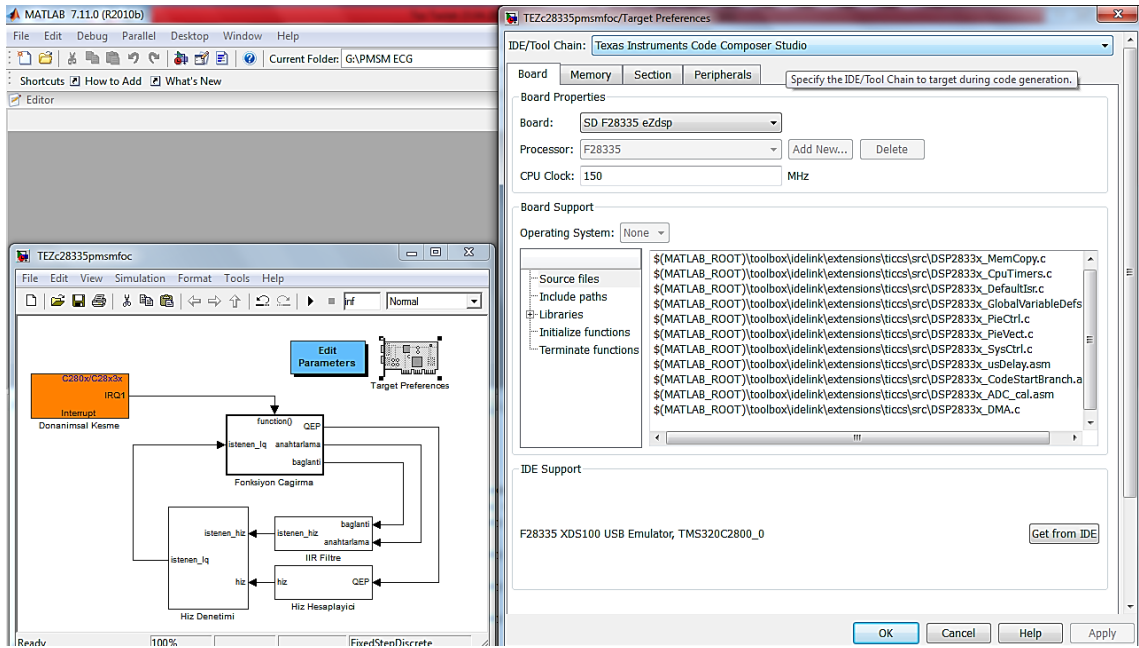
Tabii ki sistem modeli oluşturulurken, gerek SMSM gerekse DSP, emulasyon ve CCS için bazı parametre ayarlarının yapılması büyük önem arz etmektedir. SMSM parametrelerini ayarlamak için C2000_demo_controls kütüphanesinden “Edit Parameters” bloğu kullanılmaktadır. Bu blok vasıtası ile, Pole Pairs, Encoder Resolution ve Index Offset parametreleri ayarlanmaktadır.



Şekil 5.1. AYK yöntemi ile SMSM denetim sisteminin Matlab / Simulink'te oluşturulmuş model tabanlı denetim blok diyagramının genel görünümü.

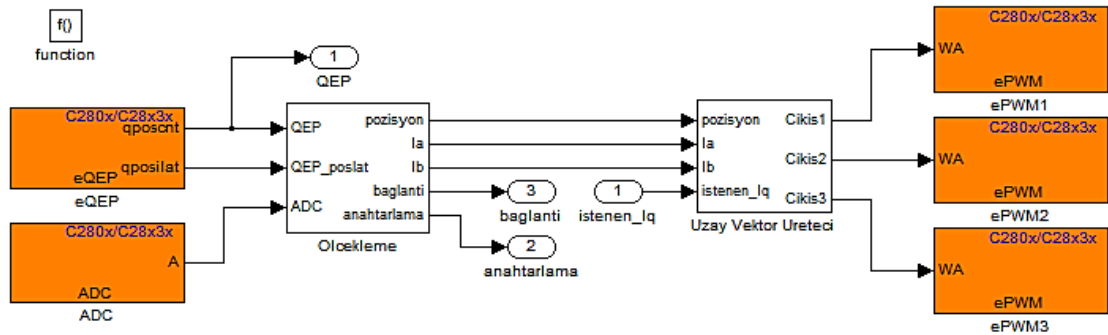
Ayrıca “Target Preferences” bloğu, başta modelde kullanılan DSP olmak üzere otomatik kodların üretimi, derlemesi ve yüklenmesi için kullanılan emulatör ve yardımcı programların seçilmesi ve parametre ayarlarının yapılması için kullanılmaktadır. “Target Preferences” bloğu ayarlarının ekran görüntüsü Şekil 5.2’de gösterilmektedir. Burada IDE/Tool Chain için otomatik üretilen kodları hedef DSP’ye uygun olarak derleyecek olan program olarak Texas Instruments Code Composer Studio seçeneği, Board için SD F28335 eZdsp seçeneği, Processor için F28335 seçeneği, CPU clock için 150MHz seçilmiştir.

Birçok sistem için harici olaylara gerçek zamanlı olarak gönderilmesi gereken cevaplar için timer kesmelerini kullanmak uygun olmamaktadır. Bu gibi durumlarda, oluşturulan modelde de örneği görülen, bir fonksiyon çağırma alt sistemini tetikleyecek donanımsal kesme kullanılmaktadır. Burada temel prensip sistemin başlamasını tetikleme amacı ile DSP’nin donanımsal kesmelerinden yararlanmaktır. Bu doğrultuda, “Donanımsal Kesme” bloğundan gelen sinyal ile “Fonksiyon Çağırma” alt sistemi tetiklenmiş olmakta dolayısı ile de tüm sistem çalışmaya başlamaktadır.



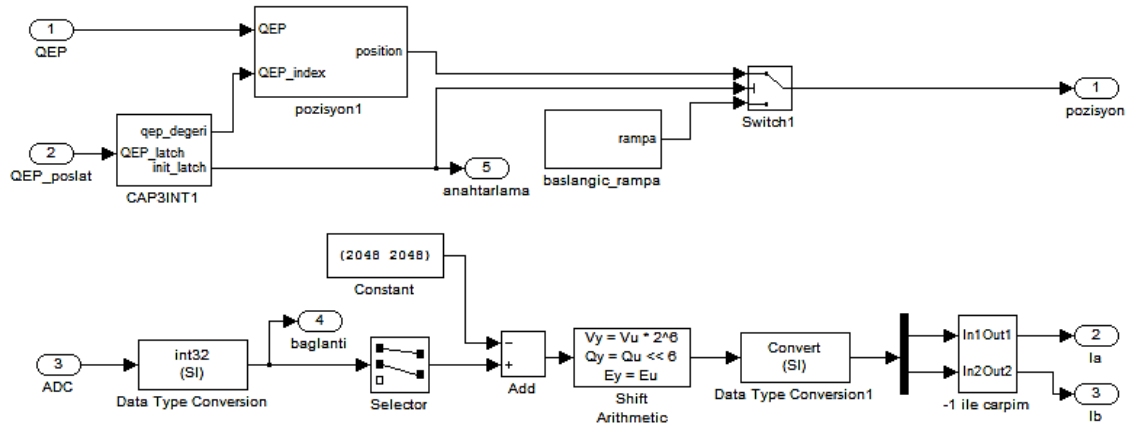
Şekil 5.2. Target Preferences bloğunun ayarları.

Şekil 5.3'te, "Fonksiyon – Çağırma" alt sisteminin içeriği görülmektedir. Burada, istenen Iq akımı, DSP'nin "ADC modülü"nden gelen verilerden "Ölçeleme" alt sistemi çıkışında elde edilen Ia ve Ib akımları ve DSP'nin "eQEP modülü"nden gelen pozisyon bilgisi "Uzay Vektör Üretici" alt sisteminde işlenerek SMSM'nin kontrolü için gerekli PWM sinyallerine dönüştürülmekte ve DSP'nin PWM modüllerine (bu çalışmada ePWM1, ePWM2 ve ePWM3 kullanılmaktadır) gönderilmektedir.



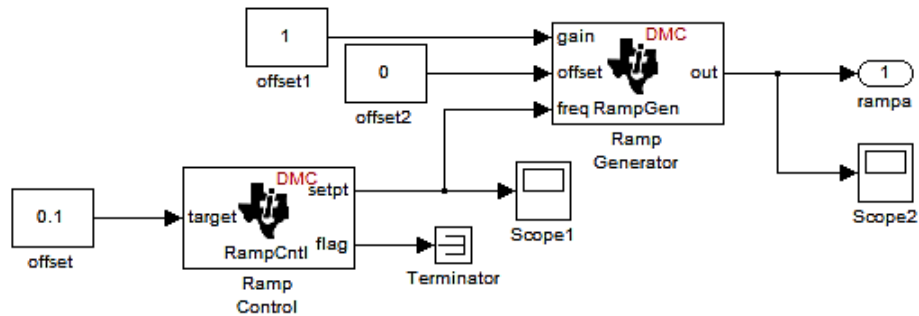
Şekil 5.3. Fonksiyon - Çağırma alt sisteminin yapısı.

Şekil 5.4'te “Fonksiyon – Çağırma” alt sistemi içerisinde bulunan “Ölçekleme” alt sisteminin içeriği görülmektedir. Burada, DSP'nin eQEP modülünden gelen sinyale gerekli veri tipi dönüşümleri ve hesaplamalar uygulanarak yine aynı modülden elde edilen anahtarlama başlangıç sinyalleri doğrultusunda ve “başlangic_rampa” alt sisteminden elde edilen rampa sinyali de kullanılarak SMSM'nin rotor pozisyon bilgisi elde edilmektedir.



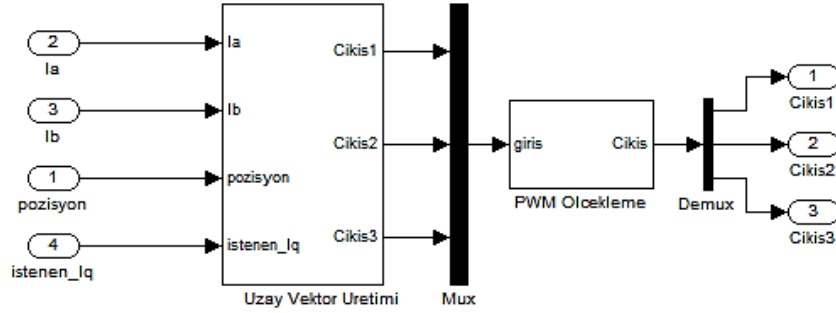
Şekil 5.4. Ölçekleme alt sisteminin yapısı.

Şekil 5.5'te “Ölçekleme” alt sistemi içerisinde bulunan “Başlangic_rampa” alt sisteminin içeriği görülmektedir. Burada, rampa sinyali elde etmek üzere DMC (Digital Motor Control) kütüphanesinden “Ramp Control” ve “Ramp Generator” blokları kullanılmıştır.



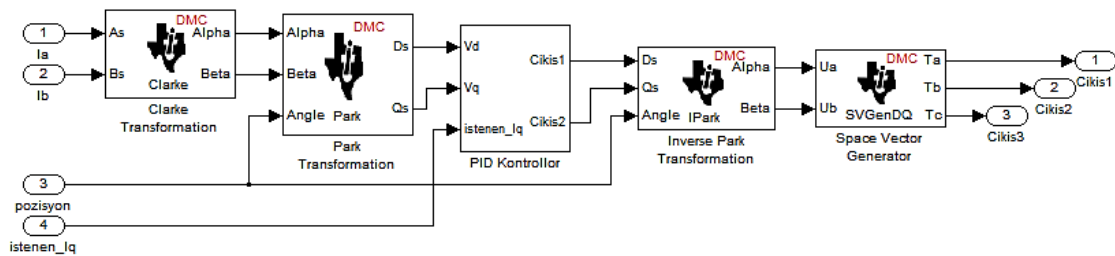
Şekil 5.5. Başlangıç Rampa Sinyali alt sisteminin yapısı.

Şekil 5.6’da “Fonksiyon Çağırma” alt sistemi içerisinde bulunan “Uzay Vektor Üretici” alt sisteminin içeriği görülmektedir. Burada, I_a ve I_b akımları, gerekli dönüşümlere tabi tutulmak suretiyle PWM sinyallerini oluşturmak üzere bu alt sistemde işlenmektedir.



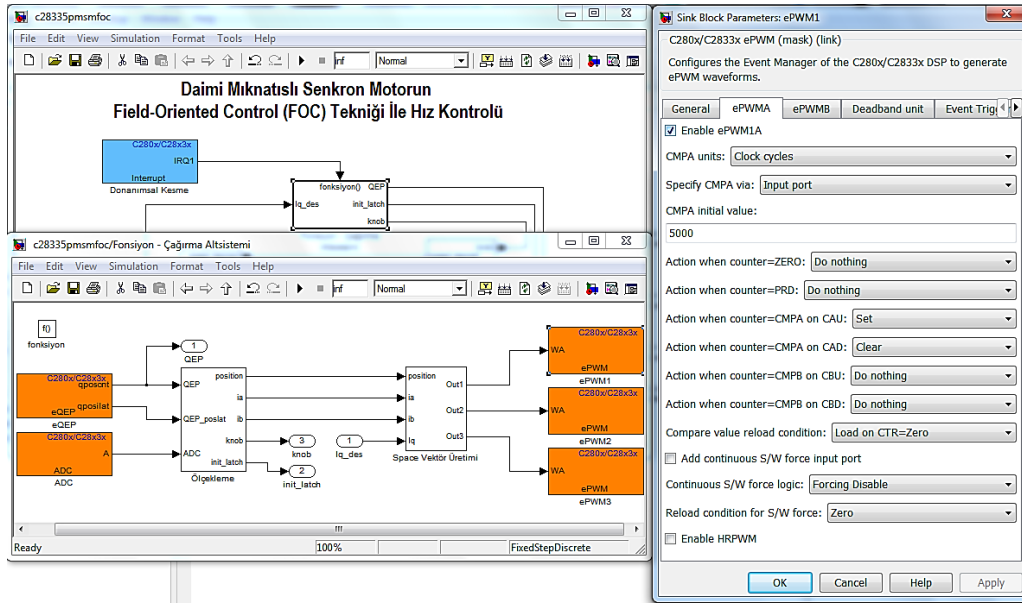
Şekil 5.6. Uzay Vektor Üretici alt sisteminin yapısı.

Şekil 5.7’de “Uzay Vektor Üretici” alt sistemi içerisinde bulunan “Uzay Vektor Üretimi” alt sisteminin içeriği görülmektedir. Burada, öncelikle I_a ve I_b akımları, birbirine 90° dik olan sabit eksen takımına dönüştürülmek üzere DMC kütüphanesinde bulunan “Clarke Transform” bloğuna uygulanmaktadır. “Clarke Transform” bloğu çıkışında sabit eksen α - β cinsinden elde edilen akımlar, çıkışında d-q dönen eksen gerilimlerini verecek olan yine DMC kütüphanesinde bulunan “Park Transform” bloğuna uygulanmaktadır. Elde edilen gerilimler, istenen I_q akımı ile birlikte “PID Kontrolör” bloğundan geçirilmek suretiyle, gerilim referans vektörleri oluşturulmaktadır. Elde edilen referans gerilimleri bu kez de DMC kütüphanesindeki “Inverse Park Transformation” bloğuna uygulanarak α - β eksenindeki stator vektör gerilimlerine dönüştürülmektedir. Son olarak bu gerilimler DMC kütüphanesindeki “Space Vector Generator” bloğu vasıtası ile motoru kontrol edecek olan sinyaller elde edilmek üzere DSP’nin PWM modüllerine gönderilmektedir.



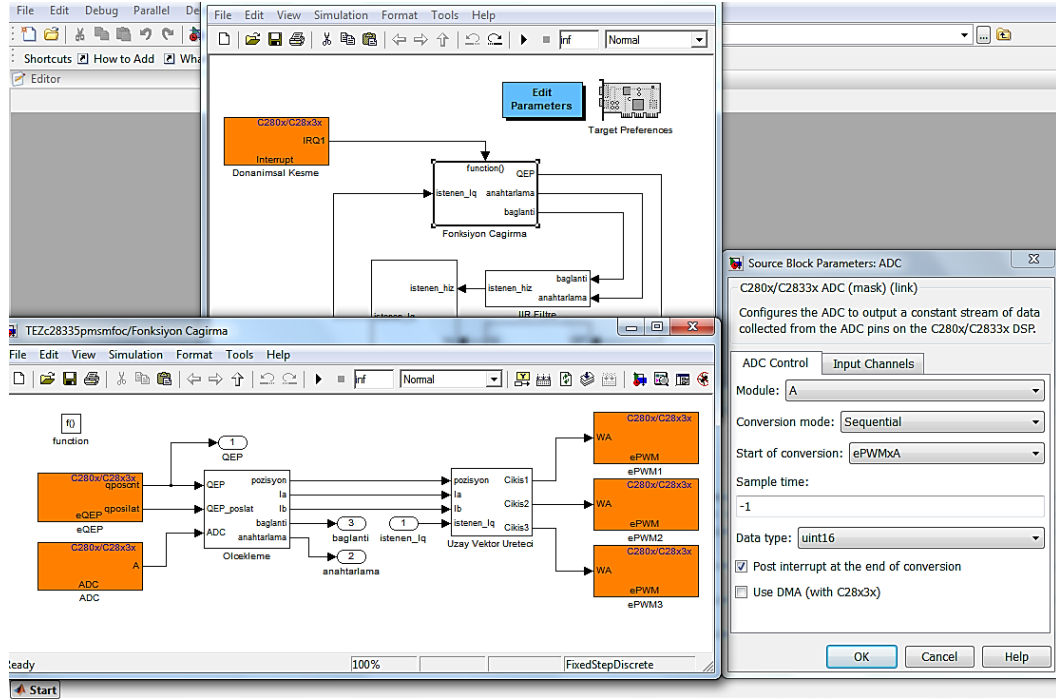
Şekil 5.7. Uzay Vektor Üretimi alt sisteminin yapısı.

Şekil 5.8’de “Fonksiyon Çağırma” alt sistemi içerisinde bulunan DSP’nin PWM modüllerinin parametre ayarlarının yapıldığı pencere görülmektedir. Burada uygulamada kullanılan ePWM1, ePWM2 ve ePWM3 için ePWMA aktif ePWMB ise kullanılmadığından pasif olarak seçilmiştir. Ayrıca ölü zaman, tetikleme ve timer periyodu da ayarlanmıştır.



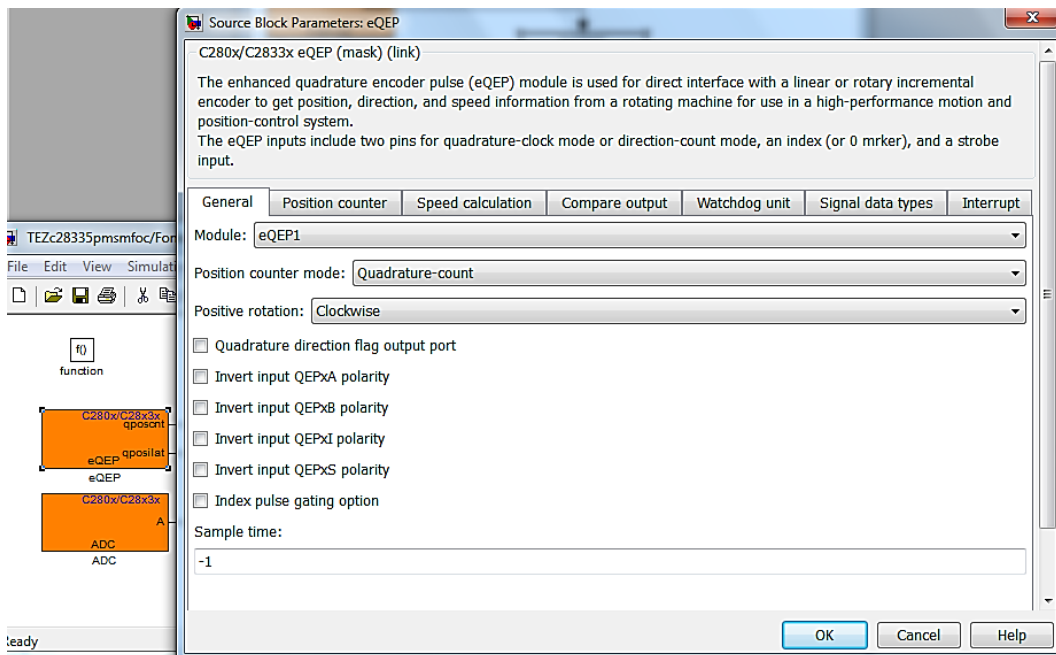
Şekil 5.8. DSP'nin PWM modüllerinin parametre ayarları.

Şekil 5.9’da “Fonksiyon Çağırma” alt sistemi içerisinde bulunan DSP’nin ADC modülünün parametre ayarlarının yapıldığı pencere görülmektedir. Burada, ADC’nin yalnızca ADCINA0 – ADCINA7 aralığı kullanıldığından A modülü seçilmiştir. Seçilen kanalı ardışıl olarak örnekleme için çevrim modu sequential olarak, örneklemenin tetikleyicisi olarak ePWMxA seçilmiştir. Ayrıca, analogtan sayısala çevrim yapılacak kanal sayısı 3 olarak belirlenmiş ve bu üç kanalın da ADCINA0, ADCINA1 ve ADCINA7 olduğu belirtilmiştir. Sample Time örnekleme zamanı değeri bu bloğu asenkron olarak çalıştırmak üzere -1 olarak belirlenmiştir.



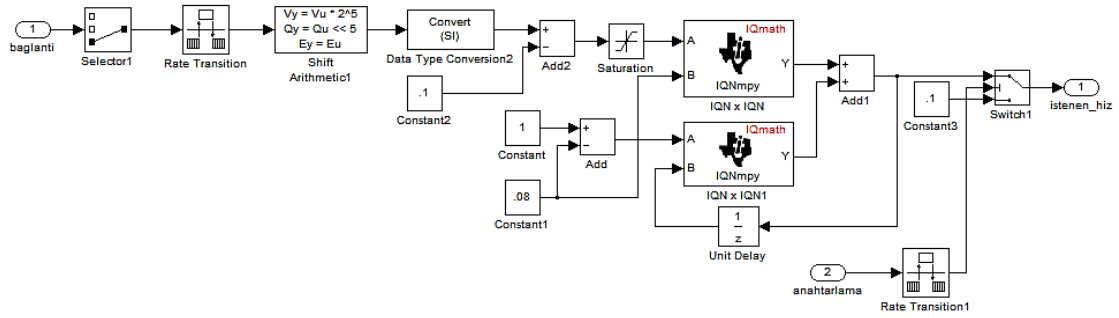
Şekil 5.9. DSP'nin ADC modülünün parametre ayarları.

Şekil 5.10'da "Fonksiyon Çağırma" alt sistemi içerisinde bulunan DSP'nin eQEP modülünün parametre ayarlarının yapıldığı pencere görülmektedir. Burada hangi modülün kullanılacağı, sayma modu gibi ayarlar yapılmaktadır.



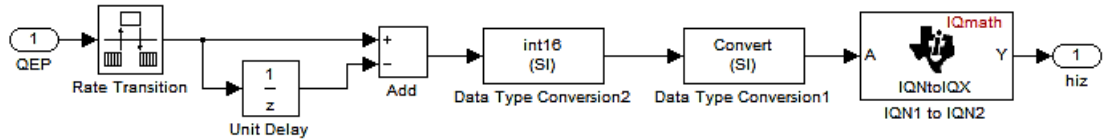
Şekil 5.10. DSP'nin ADC modülünün parametre ayarları.

Şekil 5.11’de “Fonksiyon Çağırma” alt sistemi içerisinde bulunan “IIR Filtre” alt sisteminin içeriği görülmektedir. Burada, DSP’nin ADC modülünden gelen sinyale gerekli veri tipi dönüşümleri ve hesaplamalar uygulanarak yine DSP’nin eQEP modülünden elde edilen anahtarlama başlangıç sinyalleri doğrultusunda tipik IIR filtre mantığı ile istenen hız bilgisi elde edilmektedir.



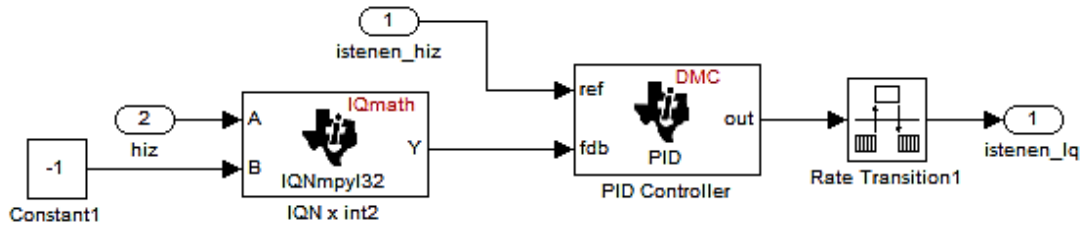
Şekil 5.11. IIR Filtre alt sisteminin yapısı.

Şekil 5.12’de “Fonksiyon Çağırma” alt sistemi içerisinde bulunan “Hız Hesaplayıcı” alt sisteminin içeriği görülmektedir. Burada, DSP’nin eQEP modülünden gelen veri, “Hız Hesaplayıcı” alt sisteminde gerekli veri tipi dönüşümleri ve hesaplamalar yapılarak hız bilgisine dönüştürülmektedir.



Şekil 5.12. Hız Hesaplayıcı alt sisteminin yapısı.

Şekil 5.13’te “Fonksiyon Çağırma” alt sistemi içerisinde bulunan “Hız Denetimi” alt sisteminin içeriği görülmektedir. Burada, “Hız Hesaplayıcı” bloğundan gelen hız bilgisi ile “IIR Filtre” bloğundan gelen istenen hız bilgisi, bir DMC kütüphanesinden alınan “PID Controller” bloğu vasıtası ile istenen Iq akımına dönüştürülmektedir. Böylelikle gerçek zamanda sürekli olarak istenen hız ile mevcut hız karşılaştırılmakta aradaki fark ise sistemin geri beslemesi olarak işlev bulmaktadır.

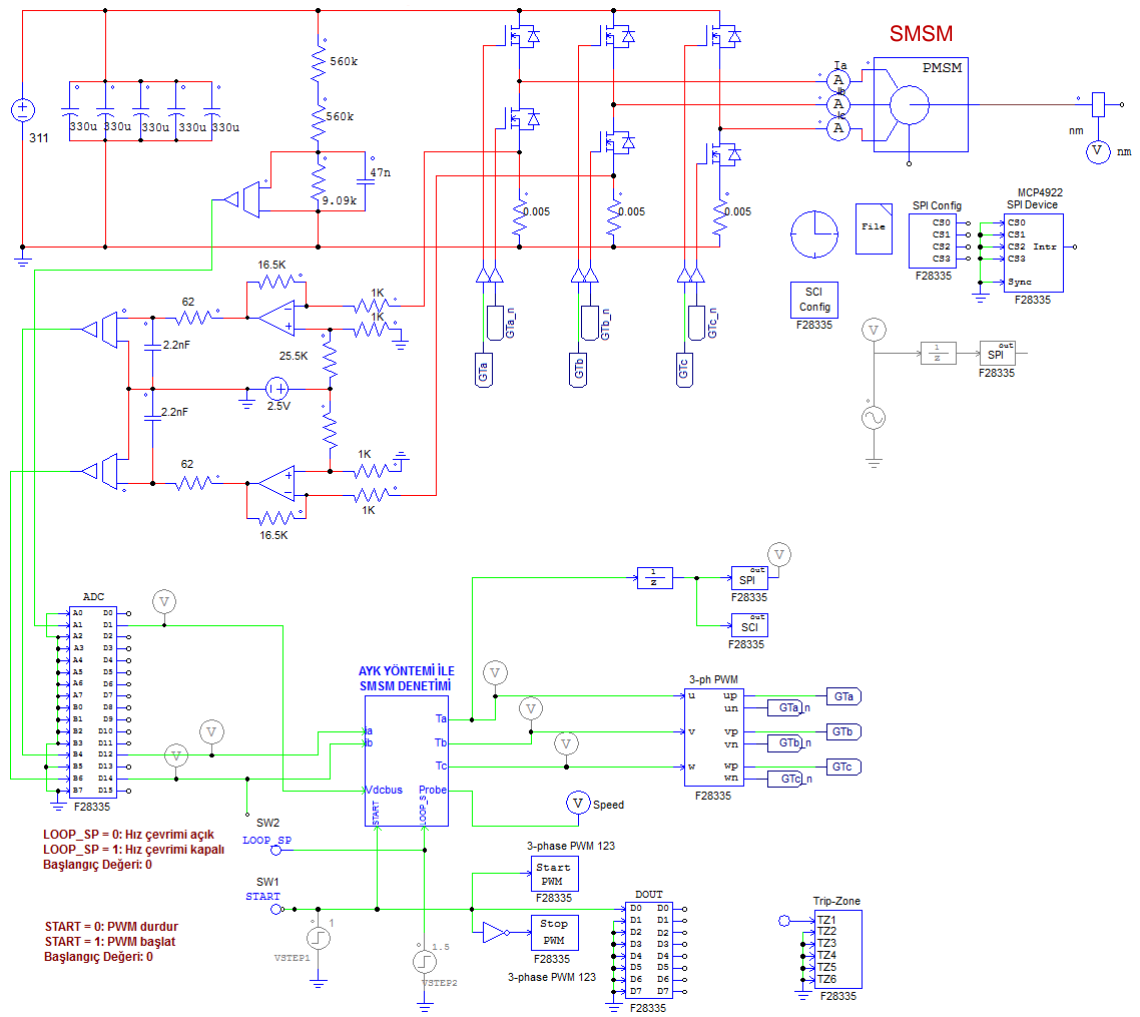


Şekil 5.13. Hiz Denetimi alt sisteminin yapısı.

5.2 PSIM Ortamında AYK Yöntemi ile SMSM Denetim Sistemi Modelinin Oluşturulması

Şekil 5.14'te AYK yöntemi ile SMSM denetim sistemi için PSIM'de oluşturulmuş model tabanlı denetim blok diyagramının genel şeması görülmektedir. Bu modelde görüldüğü üzere, motoru besleyen inverter çıkışındaki I_a ve I_b akımları ve V_{DC} gerilimi DSP nin ADC bloğunda sayısal verilere dönüştürülmektedir. Akabinde, bu veriler motoru harekete geçirecek olan 3 fazlı akımları elde etmek üzere kullanılan inverter anahtarlama sinyallerinin üretilmesi için “AYK Yöntemi ile SMSM Denetimi” alt devresinde işlenmektedir. Bu genel görünümde, yeşil hatlarla birbirine bağlı olan bölümde DSP içerisindeki modüller ve bu modüllerin birbiri ile olan bağlantısı, bir anlamda DSP'nin PSIM modeli temsil edilmekte iken kırmızı hatlarla birbirine bağlı olan üst bölümde ise Yüksek Voltaj Motor Denetim ve Güç Faktör Kompanzasyonu Kiti içerisindeki DC güç kaynağı ve inverter katmanları ile SMSM ve bunlar arasındaki bağlantılar, bir anlamda bahsi geçen kit ve SMSM'nin PSIM modeli temsil edilmektedir. Oluşturulan bu yapı sayesinde, herhangi bir donanımın hatta motorun dahi mevcudiyetine gereksinim duyulmadan sistem modellenmiş ve simülasyona veya istendiği takdirde bahsi geçen donanımlar dahilinde otomatik gömülü kod üretimine de hazır hale getirilmiştir. Böylelikle sistemin çalışmasının denetlenmesi ve daha etkin çalışabilmesi adına değişikliklerin gerçekleştirilmesi mümkün olmaktadır. Hatta istendiği takdirde CCS programının da yardımı ile donanımsal olarak DSP ve SMSM olmadan tıpkı fiziksel olarak mevcutmuş gibi otomatik kodların üretilmesinin de simülasyonu gerçekleştirilebilmektedir.

Yüksek Voltaj Motor Denetim ve Güç Faktör Kompanzasyonu Kiti İçerisindeki
Güç Kaynağı ve İnverter Devreleri

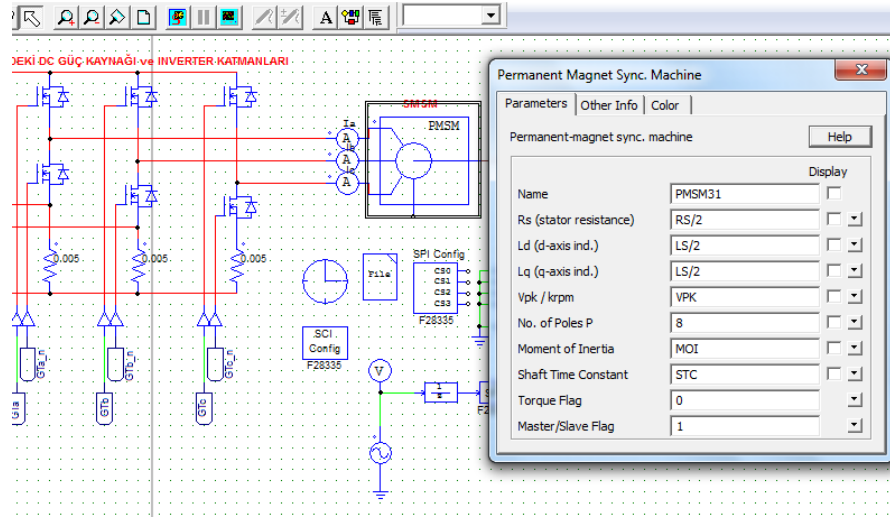


Şekil 5.14. AYK yöntemi ile SMSG denetim sisteminin PSIM ortamında oluşturulmuş model tabanlı denetim blok diyagramının genel görünümü.

Şekil 5.14’te, SMSG parametre ayarlarını temsil eden bloklar, sistem modeli için yapılması gereken parametre ayarları ve bu ayarları temsil eden bloklar ve DSP’nin ADC ve 3 faz PWM modülleri ve bu modüllerin parametre ayarlarını temsil eden bloklar görülmektedir. İlgili bloklar çift tıklanarak bahsi geçen parametre ayarları yapılmaktadır. Parametre ayarlarının ekran görüntüleri izleyen şekillerde verilmiştir.

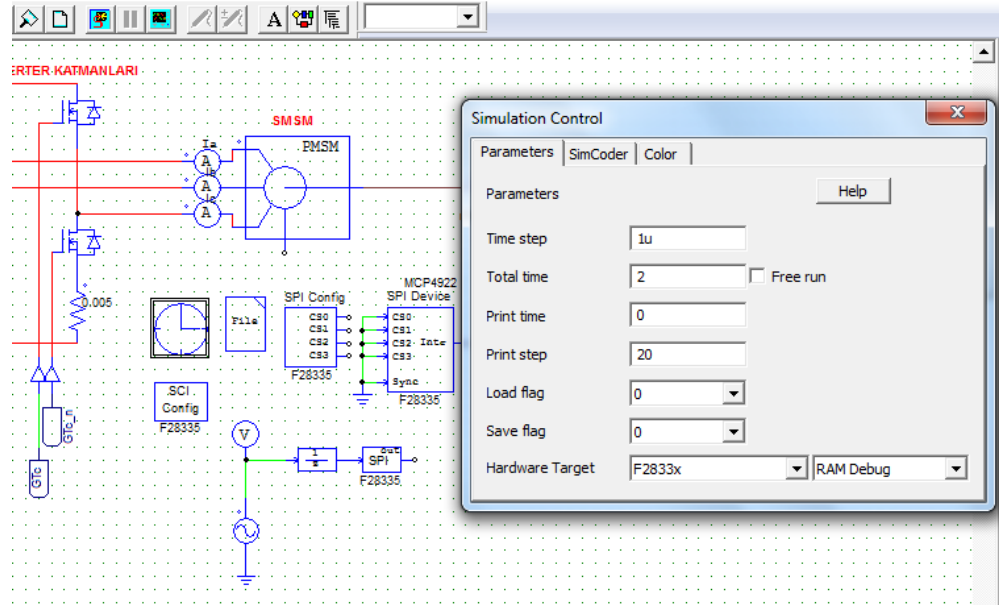
SMSG’nin parametrelerini ayarlamak üzere “PMSM” bloğuna çift tıklanmış ve Şekil 5.15’te görüldüğü üzere parametre ayarları yapılmıştır. Burada uygulamada kullanılan SMSG’nin parametreleri doğrultusunda, “ R_s ” stator direncinin değeri $RS/2$, “ L_d ve L_q ” d ve q eksenli endüktansının değerleri $LS/2$, “ $V_{pk}/krpm$ ” değeri VPK, “No. Of Poles P” kutup sayısının değeri 8, “Moment of Inertia” değeri MOI, “Shaft Time

Constant” değeri STC, “Torque Flag” kullanılmadığından değeri 0 ve “Master/Slave Flag” değeri ise motor master olarak kullanıldığından 1 olarak ayarlanmıştır.



Şekil 5.15. SMSM parametrelerinin ayarlanması.

Simülasyon parametrelerini ayarlamak üzere “Simulation Control” bloğuna çift tıklanmış ve Şekil 5.16’da görüldüğü üzere parametre ayarları yapılmıştır. Burada, “Time Step” simülasyonun zaman adımı değeri $1\mu\text{sn}$, “Total Time” toplam simülasyon süresi değeri 2 sn, “Print Time” simülasyon sonuçlarının kaydının gerçekleşmesi için başlama zamanı değeri simülasyonun başlamasıyla sonuçların kaydedilmesi için 0, “Print Step” bir kayıt tutulması için kaç veri noktasının atlanacağını değeri 20, “Load Flag ve Save Flag” eski kayıtlı verilerin yüklenmesi veya yeni verilerin otomatik kaydı istenmediğinden değerler 0, “Hardware Target” SimCoder ile otomatik kod üretimi için hedef donanımın belirlenmesi değeri ise uygulamada kullanılan DSP’ye uygun olarak F2833x olarak ayarlanmıştır.

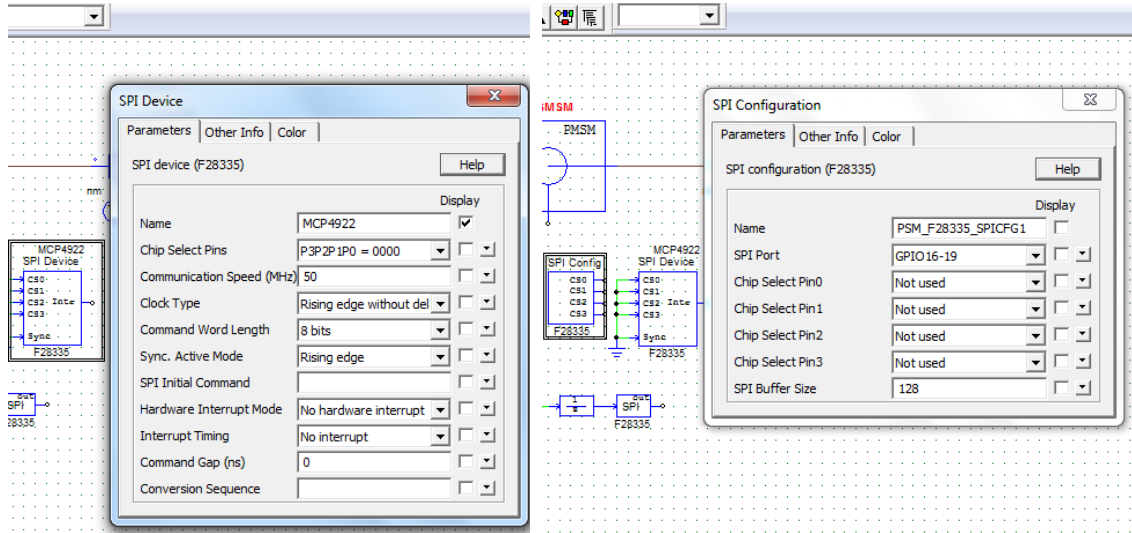


Şekil 5.16. Simülasyon parametrelerinin ayarlanması.

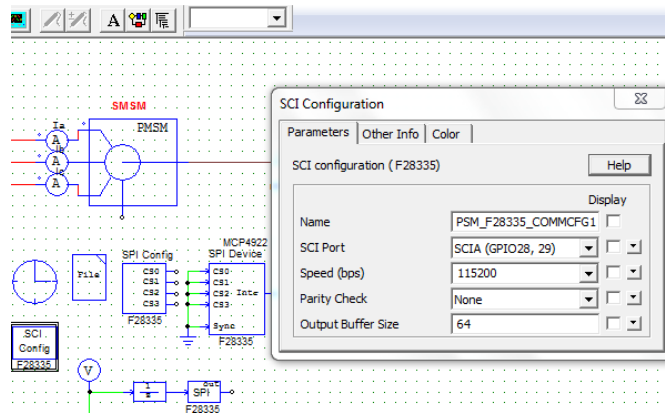
Seri iletişim için DSP'nin hangi uçlarının kullanılacağı gibi parametreleri ayarlamak üzere sırasıyla "SPI Device", "SPI Configuration", "SCI Configuration" ve "SPI Output" blokları uygulamada kullanılan TMS320F28335 DSP'nin parametreleri doğrultusunda ayarlanmıştır. Yapılan ayarların ekran görüntüsü Şekil 5.17, Şekil 5.18 ve Şekil 5.19'da gösterilmiştir. Burada, SPI için Yüksek Voltaj Motor Denetim ve Güç Faktör Kompanzasyonu Kiti'nin bağlantı şeması doğrultusunda DSP'nin genel amaçlı giriş/çıkış uçlarından 16 ile 19 arasındakiler, SCI için ise 28 ve 29 nolu uçlar tanımlanmıştır.

SCI, DSP'nin belirli uçlarındaki ve modelde belirtilen belirli bölgelerin değerlerini PSIM'de utilities menüsünün altında bulunan DSP Oscilloscope ekranında gerçek zamanlı olarak görmeyi veya değiştirmeyi sağlamak adına kullanılmaktadır.

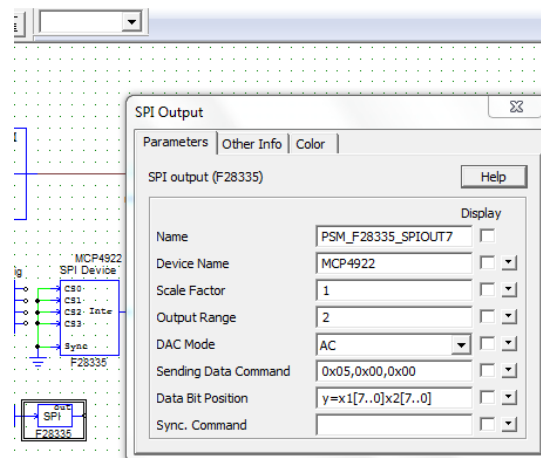
SPI ise yine DSP'nin belirli uçlarındaki ve modelde belirtilen belirli bölgelerin değerlerini, harici bağlanan dört kanallı bir sayısal analog çevirici (DAC) vasıtası ile gerçek zamanlı olarak gerçek dünyaya aktararak sanal olmayan bir osiloskop ile ölçülmesini sağlamaktadır.



Şekil 5.17. Serial Peripherals Interface Device ve Configuration parametrelerinin ayarlanması.

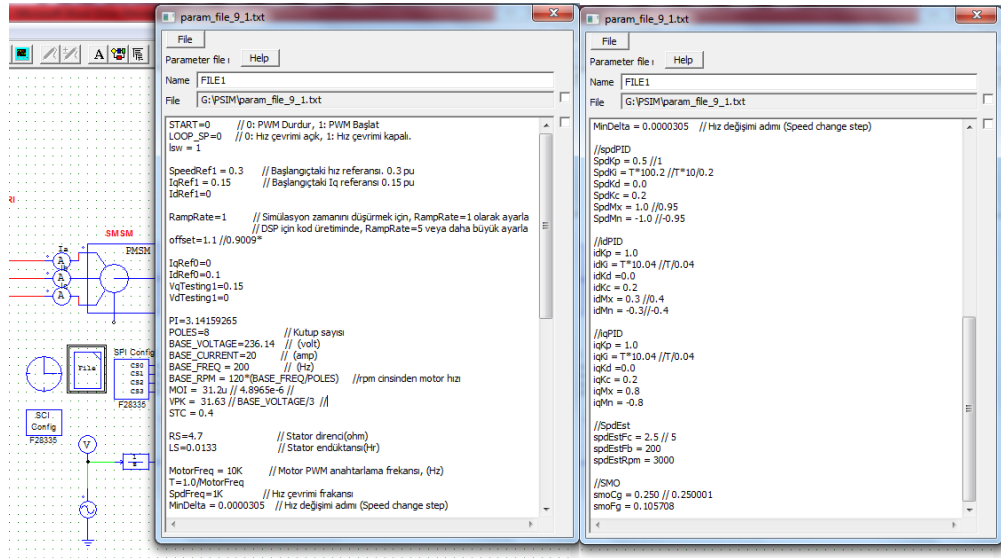


Şekil 5.18. Serial Communitaion Interface parametrelerinin ayarlanması.



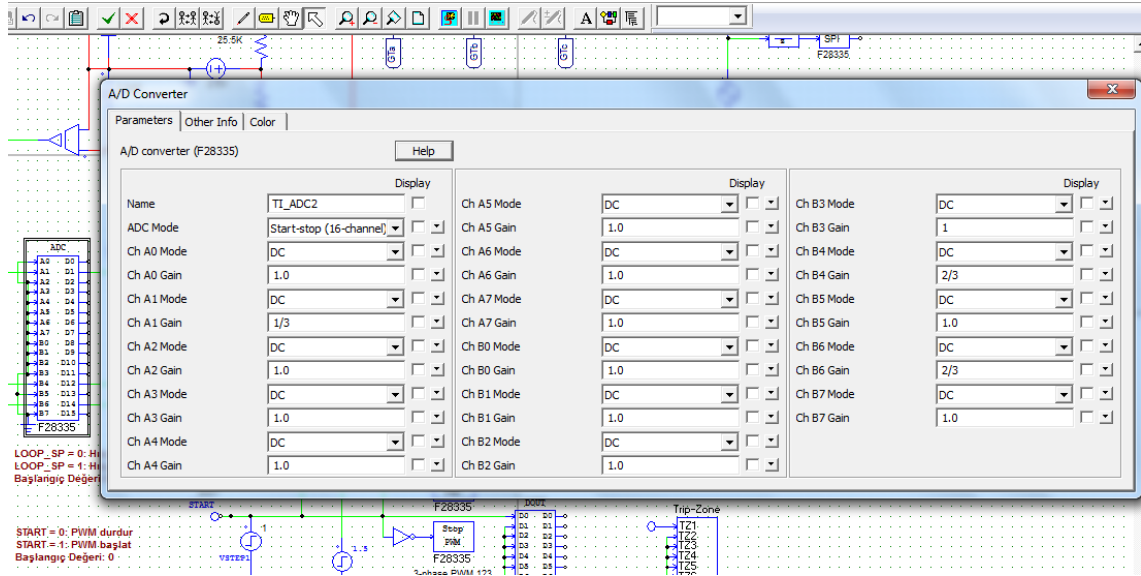
Şekil 5.19. Serial Peripherals Interface Output parametrelerinin ayarlanması.

Buraya kadar yapılan parametre ayarlarında bazı parametrelerin değerleri rakamsal olarak verilmesine karşın birçok parametrenin değerlerinin bir değişken ile tanımlandığı görülmektedir. Bu değişkenlerin karşılığındaki değerleri belirleyebilmek için PSIM’de “Parameter File” olarak adlandırılan bir blok kullanılmaktadır. Şekil 5.20’de görüldüğü üzere bu blok, içerisinde tanımlanan değişkenlerin değerlerini saklamaktadır. Böylelikle, bu değişkenler kullanılarak parametrelere tanımlanan değerlerde herhangi bir düzenleme yapılmak istendiğinde, ilgili bloklara ayrı ayrı gitmek yerine tek bir blok içerisinde tüm parametre değerleri düzenlenebilmektedir. Bu doğrultuda, Şekil 5.20’de Parameter File” bloğu içerisinde saklanan, oluşturulan SMSM denetim sisteminin modeli için kullanılan blokların parametre değişkenleri ve bu değişkenlere atanan değerler görülmektedir.



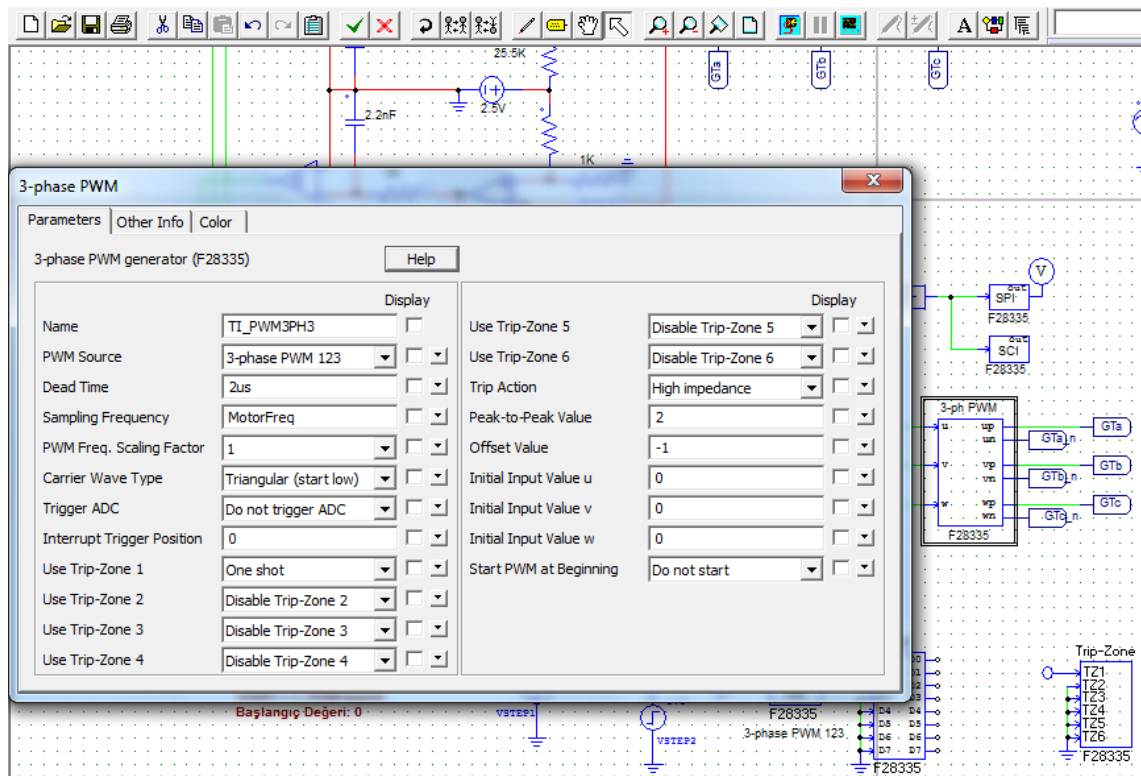
Şekil 5.20. Parameter File bloğunda saklanan parametre değerleri.

DSP’nin ADC modülünün parametrelerini ayarlamak üzere “ADC” bloğuna çift tıklanır. Burada, SMSM denetim sisteminin modelinde DSP’nin ADC modülünün kullanılan uçları belirlenmekte ve bu uçlar için kazanç değerleri ayarlanmaktadır. DSP’nin ADC modülü için yapılan parametre ayarları Şekil 5.21’de görülmektedir.



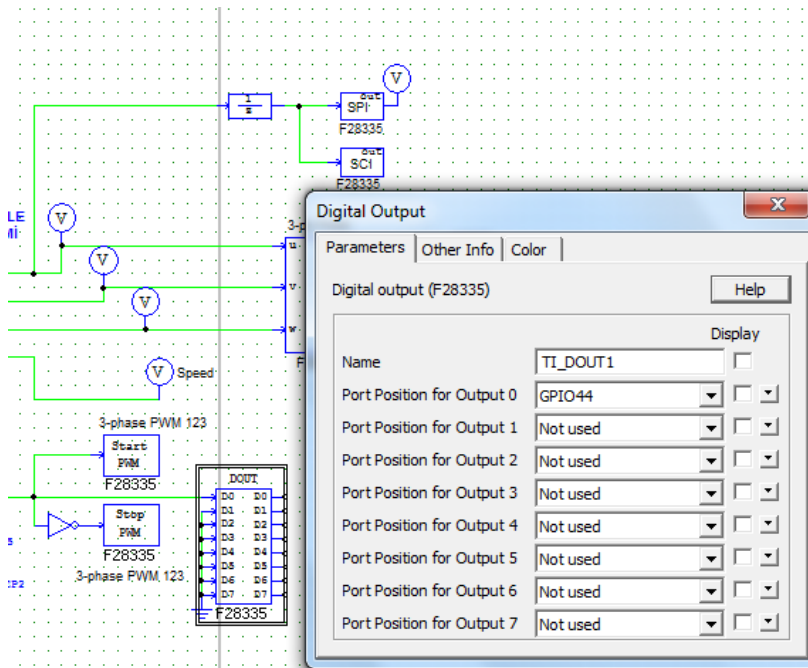
Şekil 5.21. DSP'nin ADC modülü için yapılan parametre ayarları.

DSP'nin 3 faz PWM modülünün parametrelerini ayarlamak üzere “3-phase PWM” bloğuna çift tıklanır. Burada, ölü zaman, örnekleme frekansı gibi parametreler ayarlanmaktadır. DSP'nin 3 faz PWM modülü için yapılan parametre ayarları Şekil 5.22'de görülmektedir.



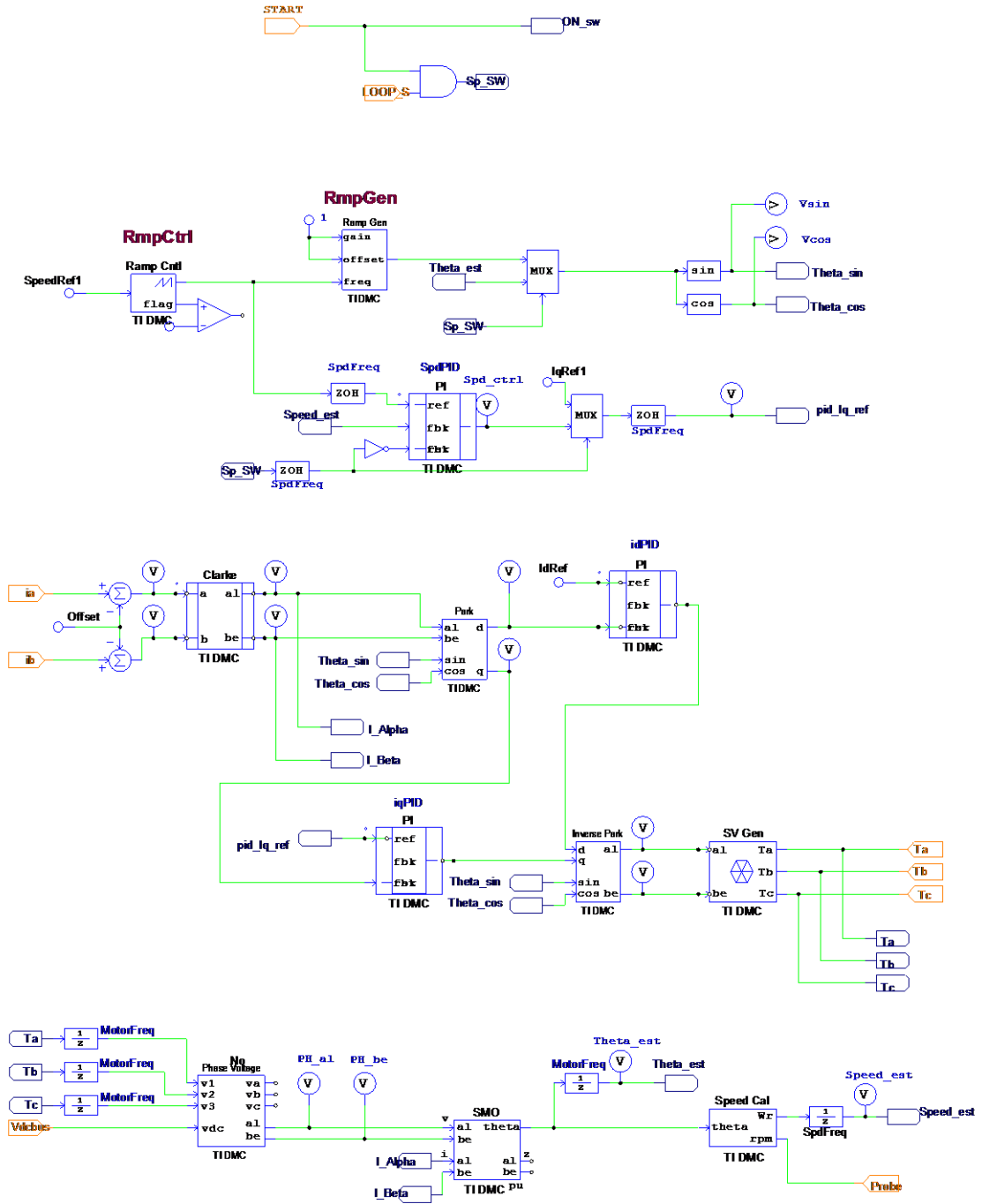
Şekil 5.22. DSP'nin 3 faz PWM modülü için yapılan parametre ayarları.

DSP'nin sayısal çıkış modülünün parametrelerini ayarlamak üzere "Digital Output" bloğuna çift tıklanır. Burada, DSP'nin uygulamada kullanılan çıkışları ayarlanmaktadır. Şekil 5.23'te de görüldüğü üzere uygulamada kullanılan tek çıkışın port pozisyonu için GPIO44 (genel amaçlı giriş/çıkış) nolu port seçilmiştir. Diğer çıkışlar ise kullanılmamaktadır.



Şekil 5.23. DSP'nin sayısal çıkış modülü için yapılan parametre ayarları.

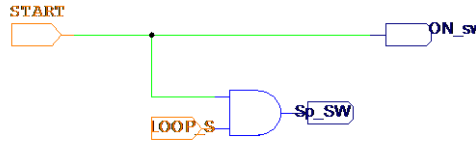
AYK yöntemiyle SMSM'nin denetimi için yürütülen işlem basamaklarını içeren bloklar, çok karmaşık bir yapı oluşması engellenmek üzere "AYK Yöntemi ile SMSM Denetimi" adındaki bir alt devre içerisine alınmıştır. Şekil 5.24'te bu alt sistemin içeriği görülmektedir. Daha önce de belirtildiği üzere buraya kadar olan kısımda SMSM parametre ayarlarını temsil eden bloklar, sistem modeli için yapılması gereken parametre ayarları ve bu ayarları temsil eden bloklar ve DSP'nin ADC ve 3 faz PWM modülleri ve bu modüllerin parametre ayarlarını temsil eden bloklar ele alınmıştır. İzleyen bölümde ise bahsi geçen alt devre içerisindeki yapı ayrıntılı olarak ele alınmaktadır.



Şekil 5.24. AYK yöntemiyle SSM'nin denetimi için yürütülen işlem basamaklarını içeren "AYK Yöntemi ile SSM Denetimi" alt devresinin yapısı.

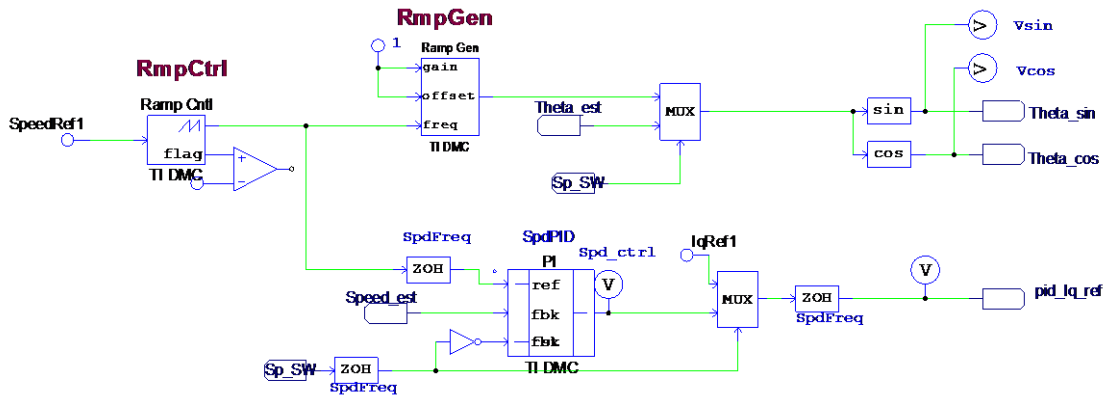
Şekil 5.24'teki "AYK Yöntemi ile SSM Denetimi" alt devresinin yapısı ilk bakışta birbirinden ayrı dört bölümden oluşmuş gibi görünse de ayrıntılı olarak incelendiğinde birbirleri ile bağlantılı olarak çalışan bölümlerin söz konusu olduğu görülmektedir.

İlk olarak Şekil 5.25'te görülen “START” anahtarından gelen sinyal doğrultusunda PWM başlatılmakta veya durdurulmakta iken “LOOP_SP” anahtarından gelen sinyal doğrultusunda ise hız çevrimi açılmakta veya kapatılmaktadır.



Şekil 5.25. AYK yöntemi ile SMSM denetimi alt devresinin içeriği.

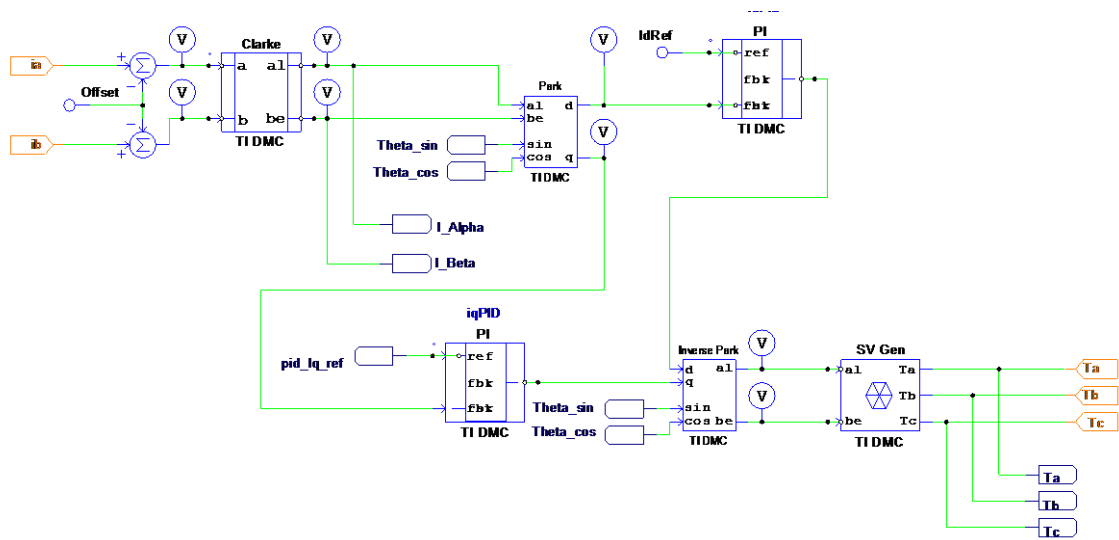
Akabinde Şekil 5.26'da görüldüğü üzere, “Parameter File” bloğundan gelen “SpeedRef1” referans hız bilgisi doğrultusunda TI DMC kütüphanesindeki “RmpCtrl” ve “RmpGen” blokları kullanılarak Park, Ters Park ve Clarke bloklarında kullanılmak üzere sinüs sinyali “Theta_sin” ve “Theta_cos” üretilmektedir. Ayrıca SMO bloğu çıkışında elde edilen “Speed_est” tahmin edilen hız bilgisi, “RmpCtrl” bloğu çıkışındaki sinyali referans olarak “SpdPID” PID kontrolöründen geçirilmekte ve “pid_iq_ref” PID kontrolörler için kullanılan referans Iq akımı bilgisi elde edilmektedir.



Şekil 5.26. AYK yöntemi ile SMSM denetimi alt devresinin içeriği.

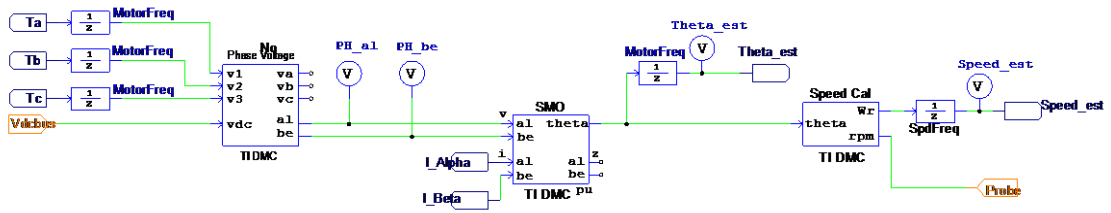
İnverterdan elde edilen, Ia ve Ib akımları, Şekil 5.27'de görüldüğü üzere, birbirine 90° dik olan sabit eksen takımına dönüştürülmek üzere TI DMC kütüphanesinde bulunan “Clarke” Clarke dönüşümü bloğuna uygulanmaktadır. “Clarke” bloğu çıkışında sabit eksen α - β cinsinden elde edilen akımlar, çıkışında d - q dönen eksen gerilimlerini verecek olan yine TI DMC kütüphanesinde bulunan “Park” Park

dönüşümü bloğuna uygulanmaktadır. Elde edilen gerilimlerden, d ekseninde olan, AYK yönteminin temel prensipleri doğrultusunda “Parameter File” bloğunda değeri sıfır olarak belirlenen, IdRef ile; q ekseninde olan ise bir önceki bölümde elde edilme yöntemine değinilen “pid_iq_ref” referans Iq akımı ile birlikte “PID Kontrolör” bloklarından geçirilmek suretiyle, gerilim referans vektörleri oluşturulmaktadır. Elde edilen referans gerilimleri bu kez de TI DMC kütüphanesinde bulunan “Inverse Park” Ters park dönüşümü bloğuna uygulanarak α - β eksenindeki stator vektör gerilimlerine dönüştürülmektedir. Son olarak bu gerilimler TI DMC kütüphanesindeki “SV Gen” uzay vektör üretici bloğu vasıtası ile motoru kontrol etmek üzere DSP’nin PWM modüllerine gönderilecek uzay vektör sinyallerine dönüştürülmektedir.



Şekil 5.27. AYK yöntemi ile SMSM denetimi alt devresinin içeriği.

Üretilen bu üç faz gerilim vektörleri “Ta”, “Tb” ve “Tc” ve inverterden elde edilen “Vdcbus” gerilimi, Şekil 5. 28’de görüldüğü üzere TI DMC kütüphanesinde bulunan “Phase Voltage” bloğu ile iki faz sabit eksen gerilimlerine dönüştürülmekte ve yine TI DMC kütüphanesinde bulunan “SMO” kayan mod gözlemci bloğunda “Theta_est” tahmin edilen theta ve bu değer kullanılarak elde edilen “Speed_est” tahmin edilen hız bilgisine dönüştürülmektedir.



Şekil 5.28. AYK yöntemi ile SSM denetimi alt devresinin içeriği.

Tam bu noktada, PSIM’de oluşturulmuş model tabanlı denetim blok diyagramının genel şemasının bir önceki bölümde Matlab / Simulink’ te oluşturulan model tabanlı denetim blok diyagramının genel şeması ile program bazlı bazı farklılıklar dışında oldukça benzerlik gösterdiğinden bahsetmek gerekmektedir. İki modelin de temelinde AYK denetim sisteminin olmasından dolayı bu olağan bir durum olarak gözlenmiştir. Aralarındaki yegane farklılık ise motorun hız ve konum bilgisinin elde edilme yöntemidir. Uygulamanın bir önceki basamağında Matlab / Simulink’te oluşturulan modelde, hız ve konum motora bağlı bir sensör vasıtası ile DSP’nin eQEP modülünden elde edilirken PSIM’de oluşturulan modelde, hız ve konum bilgisi, kayan mod gözlemleyiciyi temsil eden TI DMC kütüphanesi içerisinde bulunan ve “SMO” olarak adlandırılan bir blok vasıtası ile elde edilmektedir.

TI DMC kütüphanesi TI firmasının PSIM programında sayısal motor denetimi için geliştirdiği blokları içermektedir. Bu bloklar kullanılarak bu uygulamada olduğu gibi motor denetim sistemleri PSIM üzerinde modellenebilmektedir.

5.3 Sistem Modelinden Gömülü Kodların Otomatik Olarak Üretilmesi ve Hedef DSP’ye Yüklenmesi

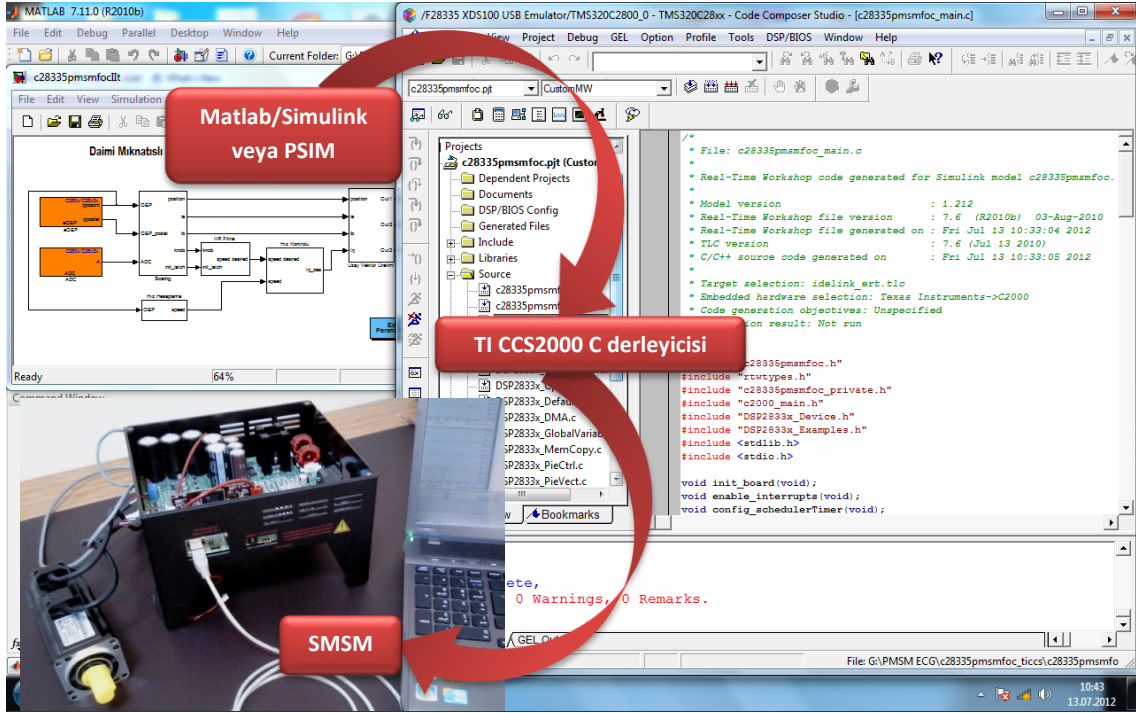
Bölüm 5.2 ve 5.1’de aşamalarına değinilen, SSM’nin AYK yöntemi ile denetim sistemi için Matlab / Simulink ve PSIM modelinin oluşturulması işleminin akabinde, SSM ve DSP bağlanmadan adeta fiziksel olarak mevcutmuş gibi denetim sistemi simülasyonu gerçekleştirilmiş ve sistemin kararlı bir şekilde çalıştığı gözlenmiştir.

Ayrıca, oluşturulan motor denetim sisteminin modeli üzerinden hedef DSP’ye uygun gömülü kodların otomatik üretilmesi, derlenmesi ve yüklenmesi işlemleri gerçekleştirilmiştir. Gerçekleştirilen bu işlemlerin uygulama adımlarının ekran

görüntüsü Şekil 5.29’da görülmektedir. Burada gerçekleştirilen işlem basamakları sırası ile şöyledir:

- SMSM’nin AYK yöntemi ile denetim sistemi için Matlab / Simulink ve PSIM’de oluşturulan model tabanlı denetim blok diyagramı, Matlab ‘da “Build”, PSIM’de ise Simulate menüsü altındaki Generate Code butonu ile derlenmiştir.
- CCS programı açılarak (Matlab’da otomatik olarak CCS programını çağırarak, PSIM’de ise oluşturulan proje CCS açılarak çağırılmaktadır) sistem modeline uygun proje dosyalarının oluşturulmasını sağlamıştır.
- Akabinde CCS üzerinde header dosyaları, c dosyaları gibi proje için gerekli tüm kaynak dosyaları üretilmiştir.
- Proje tamamlandığında bu dosyalar tekrar derlenerek DSP için uygun kodlar oluşturulmuş ve Yüksek Voltaj Motor Denetim ve Güç Faktör Kompanzasyonu Kiti içerisindeki emulatör vasıtası ile DSP’ye yüklenmiştir.
- Böylelikle DSP için gerekli kodlar otomatik olarak üretilmiş ve DSP’ye yüklenmiştir. DSP, Yüksek Voltaj Motor Denetim ve Güç Faktör Kompanzasyonu Kiti üzerinden motor denetimi için kullanıma hazır hale gelmiştir.

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



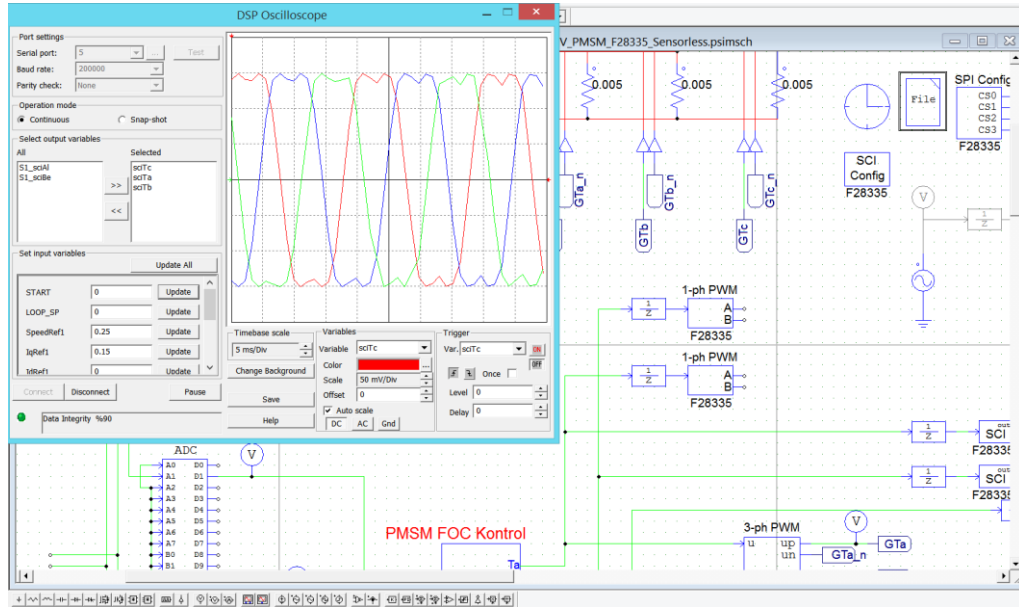
Şekil 5.29. Hedef DSP'ye uygun gömülü kodların otomatik üretilmesi, derlenmesi ve yüklenmesi için gerçekleştirilen adımların ekran görüntüsü.

5.4 Deneysel Sonuçlar

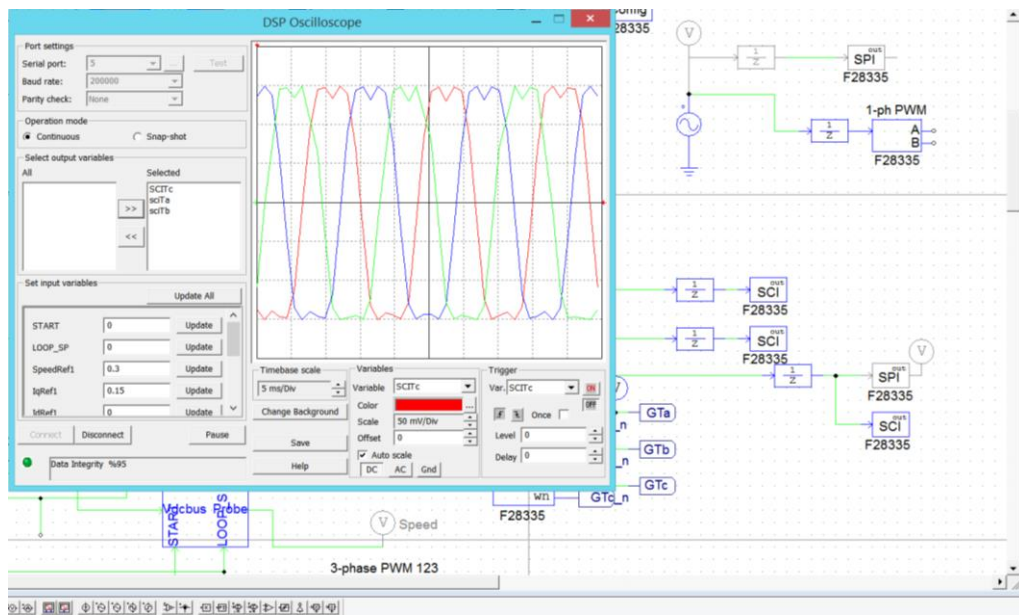
“SCI Configuration” modülünde belirlenen ayarlar doğrultusunda modelde ilgili yerlere eklenen “SCI out” blokları vasıtası ile elde edilen veriler ve “Parameter File” bloğunda tanımlanan değişkenlerin değerleri PSIM’de “Utilities” menüsünde bulunan “DSP Oscilloscope” penceresinde görüntülenmektedir. Bu penceredeki “Select output variables” bölümünde istenen verilerin seçilerek grafik ekranında görüntülenmesi sağlanmaktadır. Buraya istenildiği kadar değişken eklenebilmektedir. Grafik ekranının altında bulunan “Time scale” bölümünde grafiğin periyodu ayarlanmakta iken “Variables” bölümünde ise birden fazla verinin grafik ekranında olduğu durumlarda verilerin birbirleri ile karışmasını engellemek üzere renklerinin belirlenmesi gibi işlemler gerçekleştirilmektedir.

Bunun yanı sıra, aynı pencerede bulunan “Connect” butonuna basılarak DSP ile iletişim kurulmakta ve “Set input variables” bölümünde “Parameter File” bloğunda tanımlanan değişkenlerin değerleri görülmektedir. Burada görüntülenenen değişkenlerin değerleri değiştirilerek yanlarında bulunan “Update” butonu ile gerçek zamanlı olarak sistemdeki parametreler değiştirilebilmekte ve anlık olarak sonuçları gözlenmektedir. Şekil 5.30’da sistem çalıştırılıp DSP ile bağlantı kurulduktan sonra “Parameter File”

bloğunda verilen değişkenlerin değerleri ve grafiksel sonuçları gösteren “DSP Oscilloscope” penceresi görülmektedir. Şekil 5.31’de ise “Speedref1” referans hız değeri (0 ile 1 aralığında) değiştirilmekte ve bu değişimin sonucundaki yeni değerler ve grafiksel sonuçlar görülmektedir.

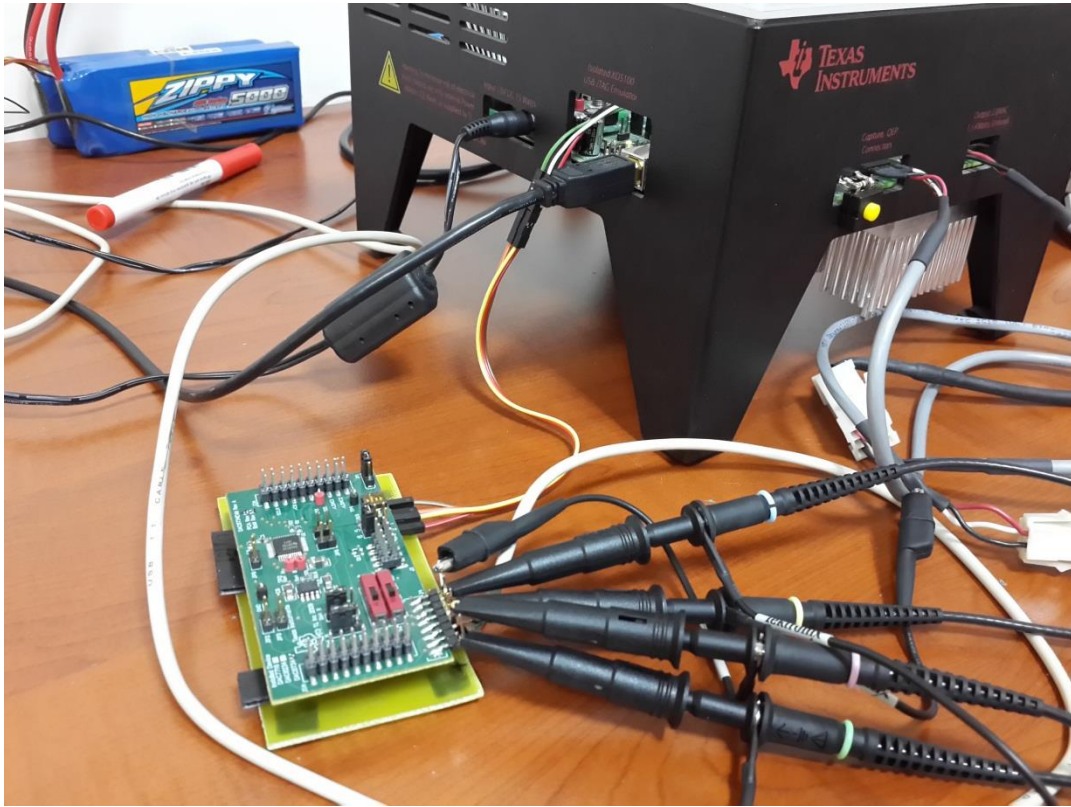


Şekil 5.30. DSP Oscilloscope penceresi ve SCI iletişim arayüzü vasıtası ile elde edilen Ta, Tb ve Tc 3 faz gerilimleri Speedref1=0.25 iken.



Şekil 5.31. DSP Oscilloscope penceresi ve SCI iletişim arayüzü vasıtası ile elde edilen Ta, Tb ve Tc 3 faz gerilimleri Speedref1=0.3 iken.

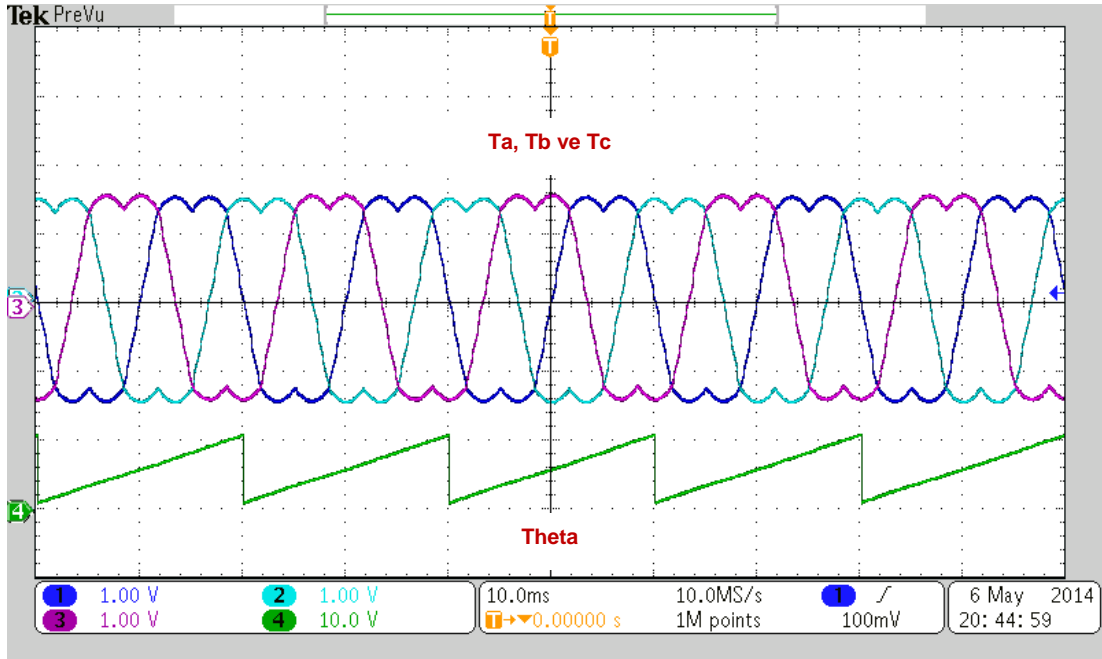
“SPI Configuration” modülünde belirlenen ayarlar doğrultusunda GPIO16-GPIO19 uçlarından “SPI Device” modülünde belirlenen ayarlar doğrultusunda alınan sayısal veriler 4 kanallı bir DAC ile analog sinyallere dönüştürülmüş ve elde edilen bu sinyaller (T_a , T_b ve T_c gerilimleri ve T_{θ} sinyali) bir osiloskop yardımı ile ölçülmüştür. Şekil 5.32’de DAC ile kurulan bağlantı Şekil 5.33’te oluşturulan sistemin görüntüsü Şekil 5.34, Şekil 5.35 ve Şekil 5.36’da ise elde edilen osiloskop ölçüm sonuçları görülmektedir. Şekil 5.34 ve Şekil 5.35’te ölçülen T_a , T_b ve T_c sinyallerinin olması gerektiği gibi 120° lik faz farklı olduğu ve bu 3 faz gerilimlerin frekansının rampa sinyalinde üretilen θ ile aynı frekansa sahip olduğu görülmektedir. Ayrıca Şekil 5.36’da T_a , T_b ve T_c 3 faz gerilimlerin yanı sıra V_{ab} gerilimi de görülmektedir.



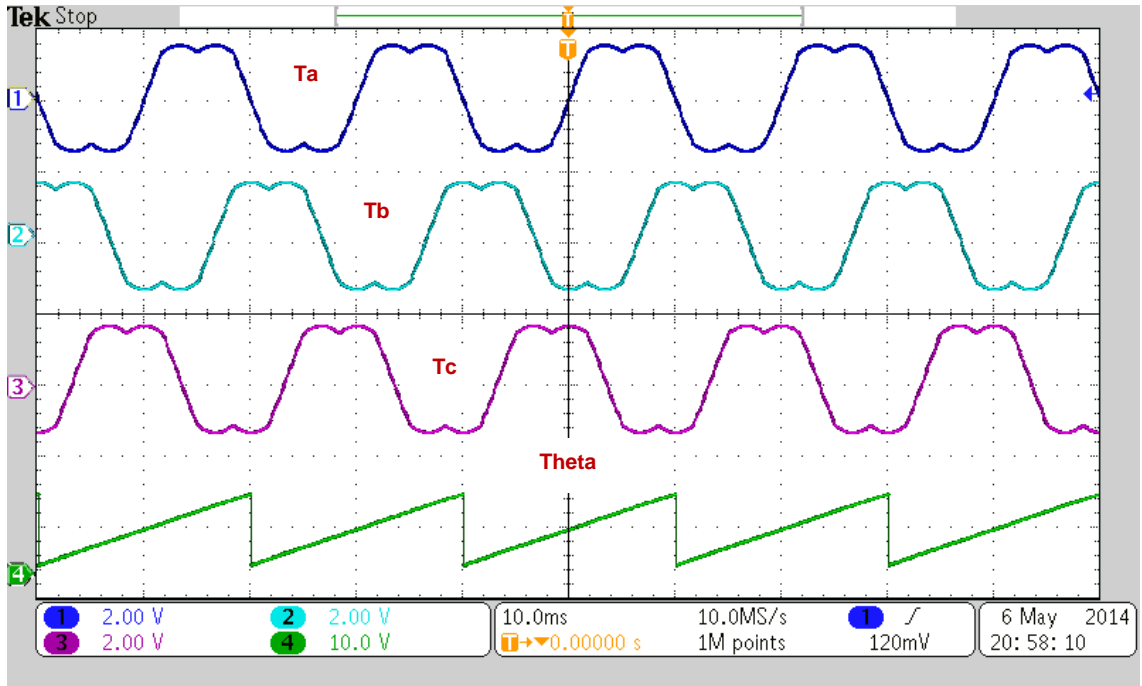
Şekil 5.32. Yüksek voltaj motor denetim ve güç faktör kompanzasyonu kiti ile dört kanallı DAC arasındaki bağlantı.



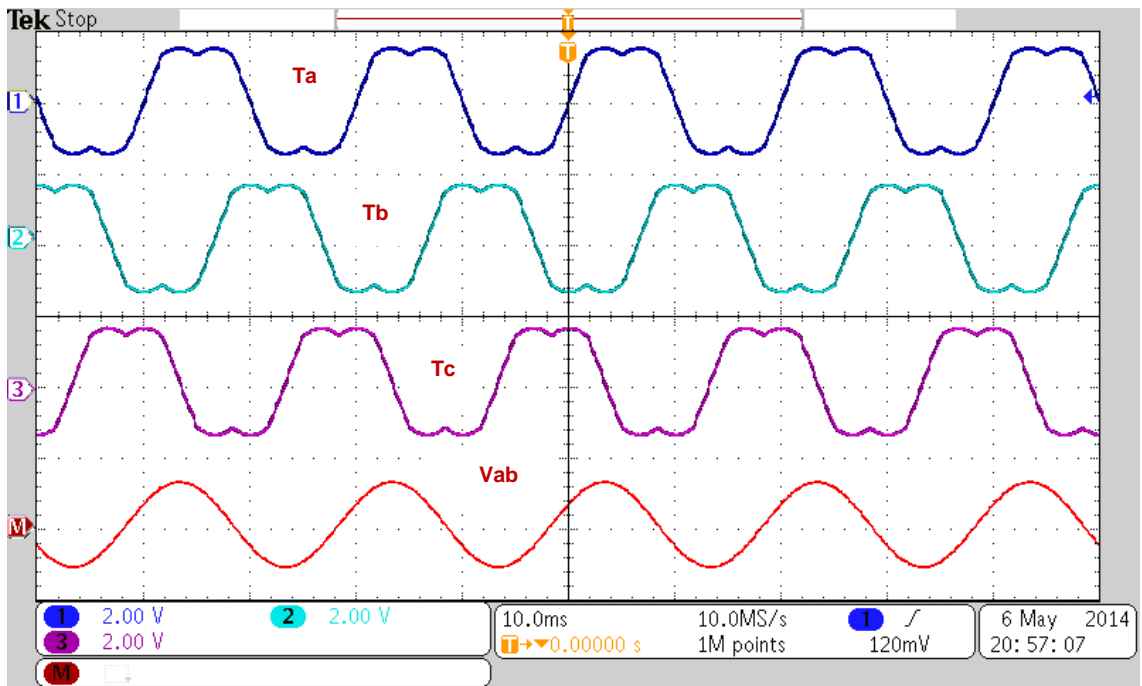
Şekil 5.33. SMSM'nin AYK yöntemi ile denetim sistemi



Şekil 5.34. DAC çıkışında elde edilen osiloskop ölçüm sonuçları Ta (mavi), Tb (turkuaz), Tc (mor) ve Theta (yeşil).

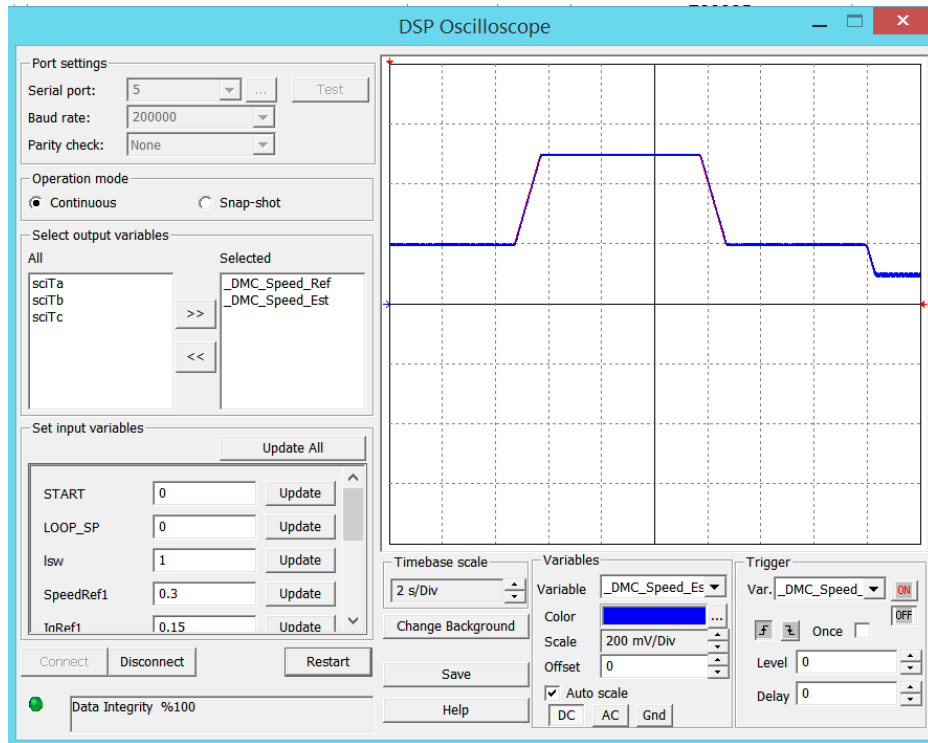


Şekil 5.35. DAC çıkışında elde edilen osiloskop ölçüm sonuçları Ta (mavi), Tb (turkuaz), Tc (mor) ve Theta (yeşil).

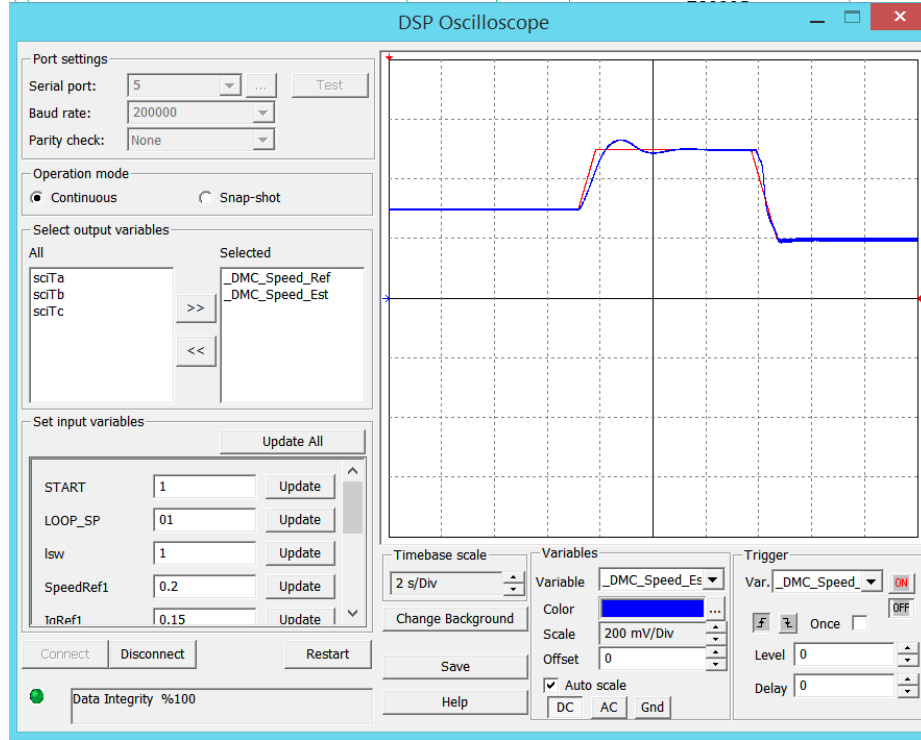


Şekil 5.36. DAC çıkışında elde edilen osiloskop ölçüm sonuçları Ta (mavi), Tb (turkuaz), Tc (mor) ve Vab (kırmızı).

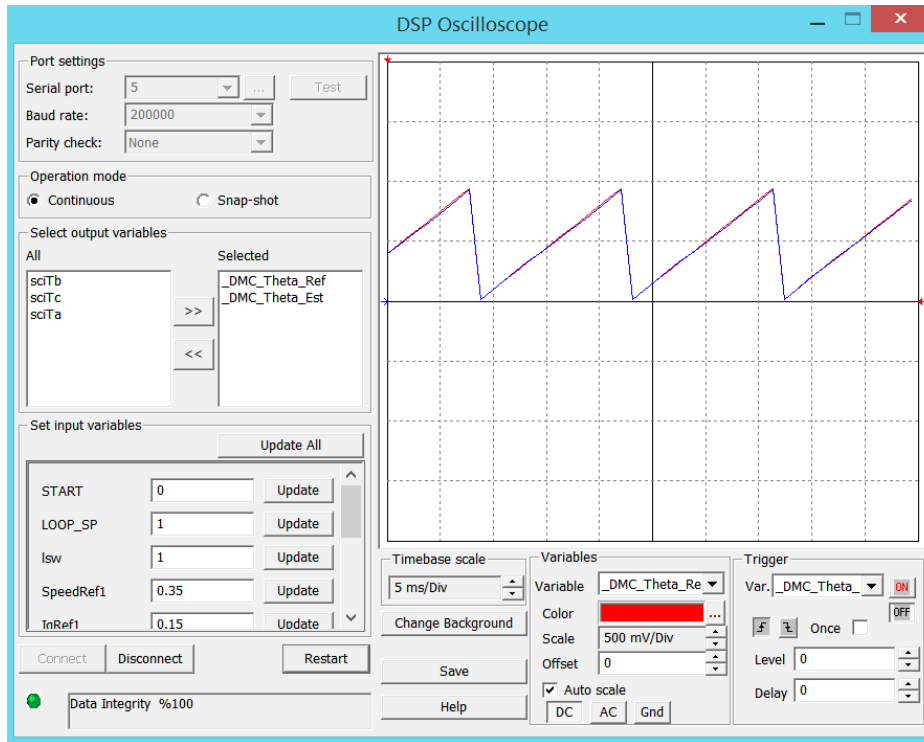
Ayrıca Şekil 5.37 ve Şekil 5. 38’de sırası ile SMSM hız denetim sistemi açık çevrim ile çalıştırıldığında ve kapalı çevrim ile çalıştırıldığında elde edilen referans ve tahmini hız değerleri görülmektedir. Burada teoride olması gerektiği gibi kapalı çevrimde sinyallerde herhangi bir dalgalanma olmazken açık çevrimde bir geri besleme söz konusu olmadığından sinyallerde meydana gelen dalgalanmalar görülmektedir. Şekil 5.39 ve Şekil 5.40’ta ise tahmin edilen ve referans Theta sinyallerinin yine teoride olması gerektiği gibi referans hızın değişimi ile frekanslarının değiştiği görülmektedir. Referans hızın neden olduğu bu theta sinyalindeki frekans değişikliği Ta, Tb, ve Tc sinyallerinin ve en nihayetinde SMSM’nin hızının değişimini de beraberinde getirmektedir.



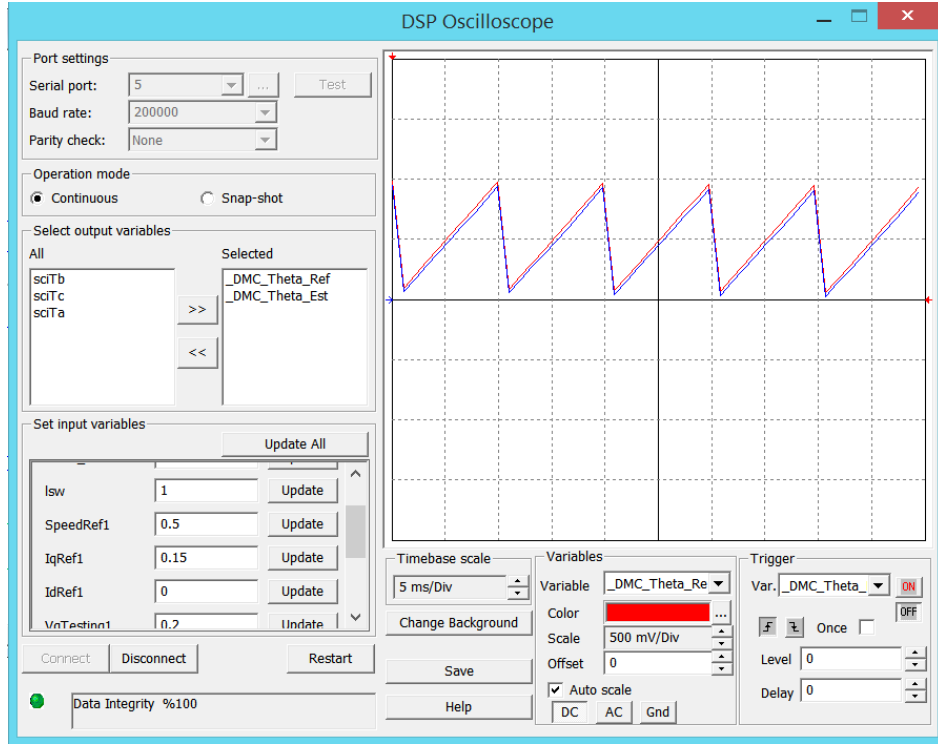
Şekil 5.37. Sistem açık çevrim ile çalıştırıldığında elde edilen referans hız ve tahmini hız sinyalleri.



Şekil 5.38. Sistem kapalı çevrim ile çalıştırıldığında elde edilen referans hız ve tahmini hız sinyalleri.



Şekil 5.39. Referans ve tahmin edilen Theta sinyalleri Speedref1=0.35 iken.



Şekil 5.40. Referans ve tahmin edilen Theta sinyalleri Speedref1=0.5 iken.

DAC çıkışında elde edilen deneysel osiloskop ölçüm sonuçları ile “DSP Oscilloscope” penceresinden elde edilen deneysel ölçüm sonuçlarının sinyallerdeki küçük bozulmalar dışında benzer olması oluşturulan denetim sisteminin kararlı çalıştığını göstermektedir.

Referans hız bilgisinin değiştirilmesi ile SMSM'nin hızının değişmesi aynı zamanda elde edilen ölçüm sonuçlarının da bu doğrultuda değişim göstermesi ve bu ölçümlerin teorik olarak elde edilmesi gereken sinyaller ile paralellik göstermesi de oluşturulan denetim sisteminin doğru çalıştığını göstermektedir.

6. SONUÇ ve ÖNERİLER

Bu tez çalışmasında, SMSM'nin AYK yöntemi ile denetim sisteminin Matlab / Simulink ve PSIM programları üzerinde hızlı modellenmesi ve bu modeller üzerinden hiçbir kodlama işlemine girilmeden dolayısı ile hiçbir kodlama bilgisine ihtiyaç duyulmadan gömülü kodların otomatik olarak üretilmesi ile SMSM'nin hız denetimi gerçekleştirilmiştir.

Otomatik üretilen DSP kodları Yüksek Voltaj Motor Denetim ve Güç Faktör Kompanzasyonu Kiti'ne bağlı olan DSP'ye yine otomatik olarak yüklenmektedir. Akabinde yine bu kite bağlı olan SMSM'nin hız kontrolü otomatik üretilen bu DSP kodları doğrultusunda kit içerisinde bulunan inverterde üretilen üç fazlı gerilimler ile sağlanmaktadır. Gerek SCI iletişim arayüzü ve sonrasında kullanılan DAC çıkışında osiloskop ile ölçülen değerler gerekse SPI iletişim arayüzü ile elde edilen sonuçlar sistemin çalışmasını doğrular niteliktedir. Hız referans bilgisi gibi değişkenlerin değerlerindeki değişikliklerin etkileri de gerçek zamanlı olarak hem SMSM üzerinde hem de elde edilen ölçüm sonuçlarında görülmektedir.

Yapılan bu çalışmada sistemin modelinin kullanılması ve bu modelin pahalı ve çabuk zarar görmesi olası donanımlar olmaksızın simülasyonunun gerçekleştirilebilmesi, uygulamanın geliştirilmesi aşamasında maliyetlerin azaltılabileceği açısından oldukça fayda sağlamaktadır. Bunun yanı sıra, gerek uygulama geliştirme süreci içerisinde gerekse sonrasında sistemin optimum olarak çalışabilmesi adına yapılması gereken değişikliklerin de oldukça hızlı ve kolay bir şekilde gerçekleştirilebilmesini de sağlamaktadır.

Ayrıca, elde edilen sonuçlara göre otomatik üretilen kodların oldukça verimli olduğu görülmüştür. Bu da sistemde gerçekleştirilmek istenen değişiklikler söz konusu olduğunda uygulama geliştirme çevrim süresini oldukça kısaltmakta ve böylelikle sistemin yeni hali çok kısa sürelerde çalışmaya hazır hale gelmektedir.

Bu çalışmada SMSM'nin AYK yöntemi ile denetim sisteminin sistem modelinin oluşturulması aşaması dışındaki tüm aşamalar otomatik olarak gerçekleştirilmiştir. Otomatik olarak gerçekleştirilen bu aşamalar için herhangi bir kodlama veya elektronik bilgisine sahip olma gereksinimi söz konusu değildir. Sistem modelinin oluşturulması aşaması için ise başta Matlab veya PSIM kullanım bilgisi olmak üzere birçok alanda ayrıntılı bilgiye sahip olmak gerekmektedir. Ayrıca, sadece üzerinde çalışılan bir sistem

için (SMSM'nin AYK yöntemi ile denetim sistemi) işleyişin otomatik olması sağlanmaktadır. Başka bir sistem için ya mevcut modelin değiştirilmesi ya da yeni sistemin modelinin oluşturulması gerekmektedir.

Tüm bu olumsuzlukların üstesinden gelmek adına bu tez çalışması, belirli özellikler seçilmek ve parametre değerleri girilmek suretiyle sistem modelinin de otomatik olarak oluşturulabildiği bir arayüz tasarlanması ile bir üst aşamaya geçirilmesi hedeflenmektedir.

KAYNAKLAR

- Adam, A. A., “Sabit mıknatıslı senkron motorda moment dalgalanması ve gürültünün azaltılması”, Doktora Tezi, *Yıldız Teknik Üniversitesi Fen Bilimleri Enstitüsü*, İstanbul, 2007.
- Akin, B. ve Bhardwaj, M., “Sensorless field oriented control of 3-phase permanent magnet synchronous motors”, *Texas Instruments*, 2010.
- 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*, 311 – 315 (2011).
- Altun, H., “Lineer asenkron motorun vektör kontrolü”, Doktora Tezi, *Fırat Üniversitesi Fen Bilimleri Enstitüsü*, Elazığ, 2001.
- Arifoğlu, U., “MATLAB Simulink ve mühendislik uygulamaları I”, *Alfa Basım Yayım Dağıtım Ltd. Sti.*, İstanbul, 2005.
- Bal, G., “Özel Elektrik Makinaları”, *Seçkin Yayıncılık*, Ankara, 2006.
- Bal, G., Özgenel, M. C. ve Demirbaş, Ş., “Vektör denetimli kalıcı mıknatıslı senkron motorun uzay vektör darbe genişliği modülasyonu ile performans analizi”, *Politeknik Dergisi*, 1 : 7-13 (2007).
- Bayat, F. K., “Sürekli mıknatıslı senkron makinenin sensörsüz vektör kontrolü”, Yüksek Lisans Tezi, *Yıldız Teknik Üniversitesi Fen Bilimleri Enstitüsü*, İstanbul, 2009.
- Boldea, I., Paicu, M. C. ve Andreescu, G. D., “Active flux DTFC-SVM sensorless control of IPMSM”, *IEEE Transaction on Energy Conversion*, 24 (2) : 314-322 (2009).
- Bose, B. K., “Modern power electronics and AC drives”, *Prentice Hall PTR*, U.S.A., 2002.
- Chapman, S. J., “Electric machinery fundamentals”, *McGraw – Hill*, U.S.A., 2004.
- Cui, Y. L, He, K., Fan, Z. W. ve Fan, H. L., “Study on DSP-based PLL-controlled superaudio induction heating power supply simulation”, *Fourth International Conference on Machine Learning and Cybernetics*, Guangzhou, 1082-1087 (2005).
- Çelik, E., “Sürekli mıknatıslı senkron motor hız denetiminin genetik tabanlı bulanık mantık denetleyici ile arayüz destekli simülasyonu”, Yüksek Lisans Tezi, *Gazi Üniversitesi Fen Bilimleri Enstitüsü*, Ankara, 2012.

KAYNAKLAR (devam ediyor)

- Çelik, H., “Sabit mıknatıslı senkron motorun DSP tabanlı doğrudan moment kontrolü”, Doktora Tezi, *Fırat Üniversitesi Fen Bilimleri Enstitüsü*, Elazığ, 2012.
- Çelik, H., “Uzay vektör darbe genişlik modülasyonu ile üç fazlı asenkron motorun hız kontrolü”, Doktora Tezi, *Fırat Üniversitesi Fen Bilimleri Enstitüsü*, Elazığ, 2004.
- Demirbaş, Ş., “Sürekli mıknatıslı senkron motorun konum algılayıcısız denetimi”, Doktora Tezi, *Gazi Üniversitesi Fen Bilimleri Enstitüsü*, Ankara, 2001.
- Doğruer, V., “Elektrik güç sistemlerinde Matlab Simulink ile kısa devre arıza analizi ve bir örnek olarak Van enerji nakil hattının incelenmesi”, Yüksek Lisans Tezi, *Yüzüncü Yıl Üniversitesi Fen Bilimleri Enstitüsü*, Van, 2007.
- Er, B. H., “Sürekli mıknatıslı senkron motorların mekanik algılayıcısız konum kontrolü”, Yüksek Lisans Tezi, *İstanbul Teknik Üniversitesi Fen Bilimleri Enstitüsü*, İstanbul, 2007.
- Ergen, S., “Model öngörülmesi denetimin bir sistemde DSP ile gerçekleştirilmesi”, Yüksek Lisans Tezi, *Eskişehir Osmangazi Üniversitesi Fen Bilimleri Enstitüsü*, Eskişehir, 2009.
- Ertuğrul, B. T., “Sensorless vector control of induction motor based on flux and speed estimation”, Degree of Master of Science, *The Graduate School of Natural and Applied Sciences of Middle East Technical University*, Ankara, 2008.
- Fırat, A., “Tek fazlı şebeke kalkışlı sürekli mıknatıslı senkron motor”, Yüksek Lisans Tezi, *İstanbul Teknik Üniversitesi Fen Bilimleri Enstitüsü*, İstanbul, 2006.
- Genç, N., “Fırçasız doğru akım (DA) motorlarının bulanık mantık yöntemi ile kontrolü”, Yüksek Lisans Tezi, *Yüzüncü Yıl Üniversitesi Fen Bilimleri Enstitüsü*, Van, 2002.
- 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 ELECO*, Elazığ, 178-183 (2011).
- Haque, M. E., Zhong, L. ve Rahman, M. F., “A sensorless initial rotor position estimation scheme for a direct torque controlled interior permanent magnet synchronous motor drive”, *IEEE Transactions on Power Electronics*, 18 (6) : 1376-1383 (2003).

KAYNAKLAR (devam ediyor)

- Hong, K. H., Gan, W. S., Chong, Y. K., Chew, K. K., Lee, C. M. ve Koh, T. Y., “An integrated environment for rapid prototyping of DSP algorithms using Matlab and Texas Instruments’ TMS320C30”, *Microprocessors and microsystems*, 24 (7): 349-363(2000).
- Jang-Mok, K. ve Seung-Ki, S., “Speed control of interior permanent magnet synchronous motor drive for the flux weakening operation”, *IEEE Transactions on Industry Applications*, 33 : 43-48 (1997).
- Jung, J. W., “Project#2 sapce vector PWM inverter”, http://www2.ece.ohio-state.edu/ems/PowerConverter/SapceVector_PWM_Inverter.pdf, 2005.
- Kaewjinda ve, W. ve Konghirun, M., “Vector control drive of permanent magnet motor using resolver sensor”, *ECTI Transactions on Electrical Eng., Electronics and Communications*, 5 (1) : 134-138 (2007).
- Karabacak, M., “Sürekli mıknatıslı senkron motorun doğrusal olmayan ve uyarlamalı geri adımlı hız denetimi”, *Sakarya Üniversitesi Fen Bilimleri Enstitüsü*, Sakarya, 2012.
- Karabacak, M., Saraçoğlu, B., Eskikurt, H. İ. ve Kesler, M., “Harmonik optimal uzay vektör darbe genişlik ayarı”, *Enerji Verimliliği ve Kalitesi Sempozyumu*, Kocaeli, 143 – 148 (2009).
- Kazan, F. A. ve Bilgin, O., “Sabit mıknatıslı senkron motorun alan yönlendirmeli kontrolü ve simülasyonu”, *Elektrik-Elektronik ve Bilgisayar Mühendisliği Sempozyumu (ELECO 2008)*, Bursa, (2006).
- Kesler, M., Uçar, M. ve Özdemir, E., “Paralel aktif güç filtresi için dsp tabanlı denetim algoritmasının otomatik gömülü kod üretimi ile hızlı prototiplendirilmesi”, *Elektrik – Elektronik ve Bilgisayar Sempozyumu ELECO*, Bursa, (2006).
- Kesler, S., “Elektrik makinaları denetim sistemlerinde TMS320F2812 DSP kullanımı”, *Akademik Bilişim 2008*, Çanakkale, 685 – 697 (2008).
- Maiti, S, Chakraborty, C. ve Sengupta, S, “Simulation studies on model reference adaptive controller based speed estimation technique for the vector controlled permanent magnet synchronous motor drive”, *Elsevier, Simulation Modelling Practice and Theory*, 17 (4) : 585-596 (2009).

KAYNAKLAR (devam ediyor)

- Morkoç, C. ve Kesler, M., “PMSM denetim sisteminin hızlı modellenmesi ve DSP gömülü kodlarının otomatik üretilmesi”, *Elektrik-Elektronik ve Bilgisayar Mühendisliği Sempozyumu (ELECO 2012)*, Bursa, (2012).
- Ned, M., Undeland, T. M. ve Robbins, W. P., “Power electronics: converters, applications, and design”, Zobirst B., Yglecias J., *John Wiley & Sons Inc.*, U.S.A., 2002.
- Novotny ve , D. W. ve Lipo, T. A., “Vector control & dynamics of AC drives”, *Oxford University Press*, USA, 1996.
- Öksüztepe, E., “Sürekli mıknatıslı senkron motorların algılayıcısız kontrolü”, Doktora Tezi, *Fırat Üniversitesi Fen Bilimleri Enstitüsü*, Elazığ, 2008.
- Öztürk, S. B., “Direct torque control of permanent magnet synchronous motors with non-sinusoidal back-EMF”, Doctor of Philosophy, *Texas A&M University*, U.S.A, 2008.
- Perera, P. D. C., “Sensorless control of permannet-magnet synchronous motor drives, Doctor of Philosophy, *Aalborg University Institute of Energy Technology*, Aalborg, 2002.
- Petrovic, V., Ortega R., Stankovic A. M. ve Tadmor G., “Design and implementation of an adaptive controller for torque ripple minimization in PM synchronous motors”, *IEEE Trans. Power Electronics.*, 15 : 871 (2000).
- Platnic, M., “Implementation of vector control for PMSM using the TMS320F240 DSP”, *Texas Instruments, SPRA494 Application Reports*, 1998.
- Quang, N. P. ve Dittrich, J. A., “Vector control of three-phase AC machines: System development in the practice, *Springer*, Berlin, 2010.
- Sarioğlu, M. K., Gökaşan, M. ve Boğosyan, S. 2003. “Asenkron makineler ve kontrolü”. *Birsan Yayınevi*, İstanbul, 2003.
- Singh, B., Al-Haddad, K. ve Chandra, A. A., “A review of active power filters for power quality improvement”, *IEEE Trans. Industrial Electronics*, 46, 1-12, 1999.
- Swierczynski, D., “Direct torque control with space vector modulation (DTC-SVM) of inverter-fed permanent magnet synchronous motor drive”, Doctor of Philosophy, *Warsaw University of Technology*, Warszawa, 2005.

KAYNAKLAR (devam ediyor)

- Teker, A., “Sürekli mıknatıslı senkron motorun bulanık mantık ile hız kontrolü”, Yüksek Lisans Tezi, *Kocaeli Üniversitesi Fen Bilimleri Enstitüsü*, Kocaeli, 2008.
- Toliyat, H.A. ve Campbell, S., “DSP-Based Electromechanical Motion Control”, *CRC Press*, New York, 2004.
- Wijenayake, A. H. ve Schmidt, P. B., “Modeling and analysis of permanent magnet synchronous motor by taking saturation and core loss into account”, *Power Electronics and Drive Systems (PEDS 1997)*, 2: 530 - 534 (1997).
- Wu, B., “High power converter and AC drives”, *IEEE Press - John Wiley & Sons Inc.*, U.S.A., 2006.
- Yazıcı, Y., “Fırçasız Doğru akım motorunun sayısal sinyal işlemci (DSP) ile kontrolü”, Yüksek Lisans Tezi, *Gazi Üniversitesi Fen Bilimleri Enstitüsü*, Ankara, 2008.
- Yücel, F., “DSP tabanlı çevrimiçi durum izleme sistemi”, Yüksek Lisans Tezi, *Süleyman Demirel Üniversitesi Fen Bilimleri Enstitüsü*, Isparta, 2008.

ÖZGEÇMİŞ



Kişisel Bilgiler

Adı Soyadı : Cem MORKOÇ
Doğum Yeri ve Tarihi : İzmit – 16.08.1982

Eğitim Durumu

Lisans Öğrenimi :Sakarya Üniversitesi - Teknik Eğitim Fakültesi –
Elektronik ve Bilgisayar Eğitimi Bölümü
Bildiği Yabancı Diller :İngilizce
Bilimsel Faaliyetleri :Morkoç, C. ve Kesler, M., “PMSM denetim sisteminin hızlı modellenmesi ve DSP gömülü kodlarının otomatik üretilmesi”, Elektrik-Elektronik ve Bilgisayar Mühendisliği Sempozyumu (ELECO 2012), Bursa, (2012).

İş Deneyimi

Stajlar :
Projeler :
Çalıştığı Kurumlar : 2008–... Bilecik Şeyh Edebali Üniversitesi
Gölpazarı M.Y. O.
2007–2008 Jandarma Eğitim Komutanlığı
Uzman Jandarma Okulu Jandarma Astsubay
Meslek Yüksek Okulu

İletişim

Adres :Bahçelievler Mah. Necmettin Şener Cad. Zümrüt
Sit. K:3 D:14 Merkez / BİLECİK
Tel :05058661146
E-Posta Adresi :cem.morkoc@bilecik.edu.tr

Diğer:

Tarih: 04.06.2014

İmza