**T.C.**

**SELÇUK ÜNİVERSİTESİ**

**FEN BİLİMLERİ ENSTİTÜSÜ**

# KALICI MIKNATISLI SENKRON MOTORUN KONTROLÜ

Fatih Alpaslan KAZAN

YÜKSEK LİSANS TEZİ

ELEKTRİK-ELEKTRONİK MÜHENDİSLİĞİ
ANABİLİM DALI

KONYA, 2009

# ÖZET

**Yüksek Lisans Tezi**

**KALICI MIKNATISLI SENKRON MOTORUN KONTROLÜ**

**Fatih Alpaslan KAZAN**

**Selçuk Üniversitesi**
**Fen Bilimleri Enstitüsü**
**Elektrik-Elektronik Mühendisliği Anabilim Dalı**

**Danışman: Yrd. Doç. Dr. Osman BİLGİN**
**2009, 101 sayfa**

**Jüri:** **Prof. Dr. Saadetdin HERDEM**
**Yrd. Doç. Dr. Mehmet ÇUNKAŞ**
**Yrd. Doç. Dr. Osman BİLGİN**

Bu tez çalışmasında Matlab/Simulink paket programı kullanılarak KMSM'nin alan yönlendirmeli vektör kontrol yöntemine dayalı simülasyonu yapılmıştır. Simülasyon sonuçları Lenze firmasına ait MCS 06C41 ürün koduyla üretilen 0,25 kW'lık KMSM, EVS9322-ESV004 kodlu motor sürücüsü ve Global Drive Control arayüz programı kullanılarak test edilmiştir. Simülasyondan elde edilen değerler deneysel çalışmalarla karşılaştırılmıştır. Sürücünün alan yönlendirmeli vektör kontrol yöntemine göre tasarlanmış olması nedeniyle simülasyonda da alan yönlendirmeli kontrol yöntemi tercih edilmiştir. Oluşturulan Simulink modeli ilâve olarak 1,1 kW'lık bir KMSM üzerinde denenerek modelin geçerliliği sınanmıştır. Yapılan bu çalışma ile farklı güçlerdeki KMSM'lerin, farklı yüklere vereceği akım, hız ve moment tepkilerini deneysel çalışma yapmadan inceleyerek tasarım ve geliştirme çalışmalarına katkıda bulunmak hedeflenmiştir.

**Anahtar Kelimeler:** KMSM, alan yönlendirmeli vektör kontrol, Matlab/Simulink, simülasyon.

## ABSTRACT

**Master Thesis**

**CONTROL OF PERMANENT MAGNET SYNCHRONOUS MOTOR**

**Fatih Alpaslan KAZAN**

**Selçuk University**
**Graduate School of Natural and Applied Sciences**
**Department of Electrical-Electronics Engineering**

**Supervisor: Asst. Prof. Dr. Osman BİLGİN**
**2009, 101 pages**

**Jury:** **Prof. Dr. Saadetdin HERDEM**
**Asst. Prof. Dr. Mehmet ÇUNKAŞ**
**Asst. Prof. Dr. Osman BİLGİN**

In this thesis, a simulation of permanent magnet synchronous motor (PMSM) based on field oriented vector control was done by using Matlab/ Simulink packet program. The results were tested via MCS 06C41 coded 0,25 kW PMSM, and EVS9322-ESV004 coded motor driver both of which were produced by Lenze Company. Additionally, Global Drive Control interface program was also used in order to test the results. After simulation, the acquired data was compared with experimental studies. As the driver was designed according to the process of field oriented control, field oriented control was also preferred during the simulation. The simuling model was also tested on a 1.1kW PMSM in order to confirm the availability of the model.Via this research, it was aimed to examine different powered PMSMs' speed, torque and current response under different load conditions without depending on experimental studies, and subsequently providing contributions for design and development studies.



**Key Words:** PMSM, field oriented vector control, Matlab/Simulink, simulation.

# ÖNSÖZ

Henüz tasarım aşamasında olan motor ve sürücülerin farklı çalışma ve yük koşulları altında nasıl bir karakteristik sergileyeceğini görmek, geliştirilmiş benzetim programları kullanılarak yapılan benzetimler sayesinde artık mümkün olmaktadır. Simülasyonlar sayesinde AR-GE çalışmalarında tüm deneylerin doğrudan laboratuarlarda yapılabilmesi için gereken büyük maddi kaynakların azaltılabilmesi mümkün olabilmektedir. Fakat yapılan simülasyonların doğru ve gerçekçi olması ve ayrıca simülasyondan alınan değerlerin gerçek deneyler yapıldığında alınacak değerlerle örtüşüyor olması çok önemlidir. Bu tez çalışmasında elde edilen simülasyon sonuçları deneysel çalışmalarla desteklenmiş olduğundan, bu çalışma, konuyla ilgili teorik ve pratik çalışma yapan kişi ve firmalara katkı sağlayacaktır.

Yüksek lisans çalışmalarım boyunca bilgi ve tecrübesiyle beni yönlendiren ve desteklerini esirgemeyen danışmanım Sayın Yrd. Doç. Dr. Osman BİLGİN'e teşekkür ederim.

Ayrıca tezin hazırlanması sırasında yardımlarını esirgemeyen saygıdeğer ağabeyim Öğr. Gör. İsmail KAZAN, değerli hocalarım Dr. Ali KURT, Öğr. Gör. H. Bekir GÖKGÜNDÜZ, Yrd. Doç. Dr. Ünal KURT ile Okutman Mehmet ÖZGEN, Öğr. Gör. Şakir YAZMAN ve diğer mesai arkadaşlarıma teşekkür ederim.

Bilhassa kendilerine ayırmam gereken zamandan fedakârlık gösterip maddi ve manevi destekleriyle beni hiçbir zaman yalnız bırakmayan değerli eşime, kızıma ve anneme en kalbî teşekkürlerimi sunarım.

## İÇİNDEKİLER

**ÖZET** ..... iii

**ABSTRACT** ..... iv

**ÖNSÖZ** ..... v

**İÇİNDEKİLER** ..... vi

**SİMGELER VE KISALTMALAR** ..... ix

Simgeler ..... ix

Kısaltmalar ..... xi

**ŞEKİL VE ÇİZELGE LİSTESİ** ..... xii

Şekiller ..... xii

Çizelgeler ..... xvi

**1. GİRİŞ** ..... 1

**2. KAYNAK TARAMASI** ..... 3

**3. KALICI MIKNATIS ÇEŞİTLERİ VE ÖZELLİKLERİ** ..... 14

3.1 Giriş ..... 14

3.2 Kalıcı Mıknatıs Çeşitleri ..... 14

3.2.1 AlNiCo Mıknatıslar ..... 14

3.2.2 Sert Ferrit Mıknatıslar ..... 15

3.2.3 Nadir Toprak Elementli Mıknatıslar ..... 16

3.3 Sıcaklığın Kalıcı Mıknatıs Üzerindeki Etkisi ..... 17

**4. KMSM'LERE GENEL BİR BAKIŞ** ..... 19

4.1 Giriş ..... 19

4.2 Elektrik Motorlarının Sınıflandırılması ..... 19

4.3 Fırçasız Doğru Akım Motoru ve KMSM ..... 20

4.4 KMSM'nin Olumlu Özellikleri ..... 23

4.5 KMSM'nin Olumsuz Özellikleri ..... 24

4.6 KMSM'nin Uygulama Alanları ..... 25

**5. KMSM'NİN YAPISI, ÇALIŞMA İLKESİ VE KONTROLÜ** ..... 27
5.1 Giriş ..... 27
5.2 KMSM'nin Yapısı ..... 27
5.3 KMSM'nin Çalışma İlkesi ..... 31
5.4 KMSM'nin Matematik Modeli ..... 32
5.5 KMSM Kontrol Yöntemleri ..... 35

**6. KMSM'NİN VE ALAN YÖNLENDİRMELİ VEKTÖR KONTROLLÜ SÜRÜCÜSÜNÜN SİMÜLASYONU** ..... 38
6.1 Giriş ..... 38
6.2 KMSM'nin Modellenmesi ..... 38
6.2 KMSM'nin Sürülmesinde Kullanılan Alan Yönlendirmeli PWM Sürücünün Modellenmesi ..... 41
6.3 PI Denetleyici Parametrelerinin En İyileştirmesi ..... 45
6.4 Simülasyonda Kullanılan Arayüzler ..... 49

**7. KMSM'NİN ALAN YÖNLENDİRMELİ VEKTÖR KONTROLÜNE İLİŞKİN DENEYSEL ÇALIŞMA VE SİMÜLASYON SONUÇLARI** ..... 53
7.1 Giriş ..... 53
7.2 Deneyde kullanılan Ara Yüz Programı Ve Sürücü ..... 53
7.3 Deneyde Kullanılan KMSM Ve Özellikleri ..... 60
7.4 Deneysel Çalışma Ve Sonuçları ..... 61
7.5 Simülasyon Sonuçları ..... 66
7.6 Oluşturulan Simulink Modelinin Farklı Bir KMSM Üzerinde Denenmesi ..... 85
7.6.1 Modelde Kullanılacak KMSM'nin Parametreleri ..... 86
7.6.2 Farklı Parametrelere Sahip KMSM'nin Simülasyon Sonuçları ..... 86

**8. SONUÇLARIN TARTIŞILMASI** ..... 91

**9. SONUÇLAR VE ÖNERİLER** ..... 94
9.1 Sonuçlar ..... 94
9.2 Öneriler ..... 95

**10. KAYNAKLAR** ..... 96

**EK-A** Deneysel Çalışmada Kullanılan KMSM'deki Kalıcı Mıknatısın Manyetik Özellikleri ..... 101

## SİMGELER VE KISALTMALAR

### Simgeler

| | |
|---|---|
| $B_m$ | : Motorun sönüm katsayısı |
| $B_r$ | : Artık mıknatıslanma |
| d-q | : İki boyutlu eksen takımı |
| $e$ | : İndüklenen emk'nın ani değeri |
| $e_i$ | : Ölçüm sonucundan simülasyon sonucunun çıkartılmasıyla elde edilen akım hatası |
| $e_m$ | : Ölçüm sonucundan simülasyon sonucunun çıkartılmasıyla elde edilen moment hatası |
| $H_c$ | : Koerzitif kuvvet |
| $I$ | : Faz akımının etkin değeri |
| $I_{em}$ | : Motor etiketinde belirtilen akıma ait en büyük etkin değer |
| $I_m$ | : Faz akımının en büyük ani değeri |
| $i$ | : Faz akımının ani değeri |
| $i_d$, $i_q$ | : d-q ekseni stator akımları |
| $K_i$ | : İntegral katsayısı |
| $K_p$ | : Oransal kazanç katsayısı |
| kW | : Kilowatt |
| $J$ | : Motorun atalet momenti katsayısı |
| $L$ | : Sargı endüktansı |
| $L_d$ | : d ekseni endüktansı |
| $L_q$ | : q ekseni endüktansı |
| MW | : Megawatt |
| $n$ | : Hız |
| $P$ | : Güç |
| $P_{mil}$ | : Mil gücü |
| $P_{cu}$ | : Sargılarda meydana gelen bakır kaybı |

| | |
|---|---|
| $p$ | : Rotordaki çift kutup sayısı |
| $R$ | : Stator sargı direnci |
| $R_1$ | : $t_1$ sıcaklığındaki sargı direnci |
| $R_2$ | : $t_2$ sıcaklığındaki sargı direnci |
| $T$ | : Sıcaklık |
| $T_e$ | : Elektromanyetik moment |
| $T_s$ | : Sabit yükte motorun ürettiği sürekli moment |
| $T_l$ | : Yük momenti |
| $T_m$ | : Maksimum moment |
| $t_m$ | : Maksimum momente ulaşma süresi |
| $t_s$ | : Sürekli momente ulaşma süresi |
| $t_y$ | : Yerleşme zamanı |
| $t_1$ | : Sargı sıcaklığının ilk değeri |
| $t_2$ | : Sargı sıcaklığının son değeri |
| $U$ | : Generatör uç gerilimi |
| $v$ | : Faz geriliminin ani değeri |
| $v_a$, $v_b$, $v_c$ | : Stator faz gerilimlerinin ani değerleri |
| $v_d$, $v_q$ | : d-q ekseni gerilimleri |
| $V$ | : Sargılara uygulanan faz gerilimi |
| $V_{ABC}$ | : 3 fazlı şebeke gerilimi |
| $\theta_r$ | : Rotor konumu açısı |
| $\lambda_d$, $\lambda_q$ | : d-q ekseni akıları |
| $\lambda_m$ | : Sabit mıknatıstan dolayı meydana gelen karşılıklı manyetik akı |
| $\omega_r$ | : Rotorun açısal hızı |
| $\omega_m$ | : Rotorun mekanik hızı |
| $\alpha_1$ | : $t_1$ sıcaklığındaki direnç sıcaklık katsayısı |

**Kısaltmalar**

| | |
|---|---|
| AA | : Alternatif akım |
| Al-Ni-Co | : Alüminyüm-Nikel-Kobalt |
| AR-GE | : Araştırma ve geliştirme |
| Ba | : Baryum |
| DA | : Doğru akım |
| emk | : Elektromotor kuvvet |
| GDC | : Global drive control |
| FDAM | : Fırçasız doğru akım motoru |
| KMSM | : Kalıcı mıknatıslı senkron motor |
| Nd-Fe-B | : Neodymium-Demir-Bor |
| PI | : Oransal integral |
| PID | : Oransal integral türev |
| PWM | : Darbe genişlik modülasyonu |
| Sm-Co | : Samaryum-Kobalt |
| Sr | : Stronsiyum |

# ŞEKİL VE ÇİZELGE LİSTESİ

## Şekiller


Şekil No: Sayfa No:

Şekil 3.1 Neomag S 28VC ürün kodlu kalıcı mıknatısa ait –B/H eğrisi ..... 18
Şekil 4.1 Elektrik motorlarının sınıflandırılması ..... 20
Şekil 4.2 KMSM'deki üç fazlı zıt emk . ..... 21
Şekil 4.3 FDAM'deki üç fazlı zıt emk. ..... 22
Şekil 4.4 Farklı güçlerde imal edilmiş KMSM'ler ..... 23
Şekil 5.1 Yüzey montajlı KMSM'nin yapısı ..... 28
Şekil 5.2 İçsel mıknatıslı KMSM'nin yapısı ..... 29
Şekil 5.3 Radyal akılı KMSM'nin yapısı ..... 30
Şekil 5.4 Eksenel akılı KMSM'nin yapısı ..... 30
Şekil 5.5 KMSM'nin rotor referans düzlemindeki d ekseni eşdeğer devresi ..... 33
Şekil 5.6 KMSM'nin rotor referans düzlemindeki q ekseni eşdeğer devresi ..... 33
Şekil 5.7 Alan yönlendirmeli vektör kontrol yönteminin prensip şeması ..... 37
Şekil 6.1 $i_d$ akımı modeli ..... 39
Şekil 6.2 $i_q$ akımı modeli ..... 39
Şekil 6.3 Motorun ürettiği elektromanyetik moment modeli ..... 39
Şekil 6.4 Eksen akımları ve elektromanyetik moment modellemesi için oluşturulan alt sistem blokları ..... 40
Şekil 6.5 KMSM'nin d-q ekseni modeli ..... 40
Şekil 6.6 KMSM'nin elektromekanik hız modeli ..... 41
Şekil 6.7 KMSM'nin d-q ve elektromekanik hız modellerini içeren bloklar ..... 41
Şekil 6.8 Alan yönlendirmeli PWM sürücünün tek blok hâlindeki gösterimi ..... 42
Şekil 6.9 KMSM'nin sürülmesinde kullanılan alan yönlendirmeli sürücünün Simulink modeli ..... 43
Şekil 6.10 KMSM'nin alan yönlendirmeli vektör kontrolüne ait Simulink şeması ..... 44
Şekil 6.11 Signal Constraint bloğunun KMSM modeline yerleştirilmesi ..... 46
Şekil 6.12 Basamak yanıtı karakteristiklerinin tanımlanması ..... 46
Şekil 6.13 En iyileştirme işleminin yönetildiği Signal Constraint penceresi ..... 47

Şekil 6.14 Basamak yanıtı karakteristiklerinin belirlendiği pencere ..... 47
Şekil 6.15 En iyileştirme işleminin başarısız olduğunu gösteren ekran görüntüsü ..... 48
Şekil 6.16 KMSM'ye ait arayüz ve simülasyon parametreleri ..... 48
Şekil 6.17 KMSM'ye ait arayüz ve simülasyon parametreleri ..... 50
Şekil 6.18 Alan yönlendirmeli PWM sürücüye ait ara yüz ve parametreler ..... 51
Şekil 6.19 Motorun yüklenmesini sağlayan moment bloğuna ait arayüz ..... 52
Şekil 7.1 GDC ile programlanabilecek motorlara ilişkin temel bilgilerin sunulduğu Lenze ürünleri ..... 54
Şekil 7.2 Motor ve sürücüye ait temel verilerin sunulduğu sistem kontrol penceresi .. 55
Şekil 7.3 Ekranda görüntülenecek parametre seçiminin yapıldığı pencere ..... 56
Şekil 7.4 Seçilen parametrelerin eş zamanlı olarak görüntülenmesi ..... 56
Şekil 7.5 KMSM'ye ait boş çalışma değerleri ..... 57
Şekil 7.6 KMSM'ye ait boş çalışma değerleri ..... 57
Şekil 7.7 KMSM'ye ait boş çalışma değerleri ..... 58
Şekil 7.8 KMSM'ye ait boş çalışma değerleri ..... 58
Şekil 7.9 KMSM'ye ait tam yük çalışma değerleri ..... 59
Şekil 7.10 KMSM'ye ait tam yük çalışma değerleri ..... 59
Şekil 7.11 Deneyde kullanılan KMSM'nin etiketi ..... 60
Şekil 7.12 Deneysel çalışma düzeneği ..... 61
Şekil 7.13 Tam yük (0,62Nm) durumunda GDC'den alınan anlık ekran kaydı ..... 63
Şekil 7.14 0,54Nm durumunda GDC'den alınan anlık ekran kaydı ..... 63
Şekil 7.15 0,46Nm durumunda GDC'den alınan anlık ekran kaydı ..... 64
Şekil 7.16 0,38Nm durumunda GDC'den alınan anlık ekran kaydı ..... 64
Şekil 7.17 0,25Nm durumunda GDC'den alınan anlık ekran kaydı ..... 65
Şekil 7.18 Boşta çalışma (0,04Nm) durumunda GDC'den alınan anlık ekran kaydı .... 65
Şekil 7.19 0,62 Nm için elde edilen moment eğrisi ..... 66
Şekil 7.20 0,62 Nm için elde edilen hız eğrisi ..... 67
Şekil 7.21 0,62 Nm için elde edilen faz akımları eğrisi ..... 68
Şekil 7.22 0,62 Nm için elde edilen faz akımı etkin değer eğrisi ..... 68
Şekil 7.23 0,62 Nm için faz akımı etkin değer eğrisinin büyütülmüş hâli ..... 69
Şekil 7.24 0,62 Nm için elde edilen d-q eksen akımları eğrisi ..... 69
Şekil 7.25 0,54 Nm için elde edilen moment eğrisi ..... 70

Şekil 7.26 0,54 Nm için elde edilen hız eğrisi ..... 70
Şekil 7.27 0,54 Nm için elde edilen faz akımları eğrisi ..... 71
Şekil 7.28 0,54 Nm için elde edilen faz akımı etkin değer eğrisi ..... 71
Şekil 7.29 0,54 Nm için faz akımı etkin değer eğrisinin büyütülmüş hâli ..... 72
Şekil 7.30 0,54 Nm için elde edilen d-q eksen akımları eğrisi ..... 72
Şekil 7.31 0,46 Nm için elde edilen moment eğrisi ..... 73
Şekil 7.32 0,46 Nm için elde edilen hız eğrisi ..... 73
Şekil 7.33 0,46 Nm için elde edilen faz akımları eğrisi ..... 74
Şekil 7.34 0,46 Nm için elde edilen faz akımı etkin değer eğrisi ..... 74
Şekil 7.35 0,46 Nm için faz akımı etkin değer eğrisinin büyütülmüş hâli ..... 75
Şekil 7.36 0,46 Nm için elde edilen d-q eksen akımları eğrisi ..... 75
Şekil 7.37 0,38 Nm için elde edilen moment eğrisi ..... 76
Şekil 7.38 0,38 Nm için elde edilen hız eğrisi ..... 76
Şekil 7.39 0,38 Nm için elde edilen faz akımları eğrisi ..... 77
Şekil 7.40 0,38 Nm için elde edilen faz akımı etkin değer eğrisi ..... 77
Şekil 7.41 0,38 Nm için faz akımı etkin değer eğrisinin büyütülmüş hâli ..... 78
Şekil 7.42 0,38 Nm için elde edilen d-q eksen akımları eğrisi ..... 78
Şekil 7.43 0,25 Nm için elde edilen moment eğrisi ..... 79
Şekil 7.44 0,25 Nm için elde edilen hız eğrisi ..... 79
Şekil 7.45 0,25 Nm için elde edilen faz akımları eğrisi ..... 80
Şekil 7.46 0,25 Nm için elde edilen faz akımı etkin değer eğrisi ..... 80
Şekil 7.47 0,25 Nm için faz akımı etkin değer eğrisinin büyütülmüş hâli ..... 81
Şekil 7.48 0,25 Nm için elde edilen d-q eksen akımları eğrisi ..... 81
Şekil 7.49 0,04 Nm için elde edilen moment eğrisi ..... 82
Şekil 7.50 0,04 Nm için elde edilen hız eğrisi ..... 82
Şekil 7.51 0,04 Nm için elde edilen faz akımları eğrisi ..... 83
Şekil 7.52 0,04 Nm için elde edilen faz akımı etkin değer eğrisi ..... 83
Şekil 7.53 0,04 Nm için faz akımı etkin değer eğrisinin büyütülmüş hâli ..... 84
Şekil 7.54 0,04 Nm için elde edilen d-q eksen akımları eğrisi ..... 84
Şekil 7.55 2,8 Nm için elde edilen moment eğrisi ..... 87
Şekil 7.56 2,8 Nm için elde edilen hız eğrisi ..... 87
Şekil 7.57 2,8 Nm için elde edilen faz akımları eğrisi ..... 88

Şekil 7.58 2,8 Nm için elde edilen faz akımı etkin değer eğrisi ..... 89
Şekil 7.59 2,8 Nm için faz akımı etkin değer eğrisinin büyütülmüş hâli ..... 89
Şekil 7.60 2,8 Nm için elde edilen d-q eksen akımları eğrisi ..... 90

**Çizelgeler**

Çizelge No : Sayfa No:

Çizelge 7.1 Deneysel çalışmada kullanılan KMSM'nin özellikleri ..... 60

Çizelge 7.2 Deney sonuçları ..... 62

Çizelge 7.3 Deney ve simülasyon sonuçlarının kıyaslanması ..... 85

Çizelge 7.4 Modelde kullanılacak KMSM'nin özellikleri ..... 86

# 1. GİRİŞ

Teknolojideki hızlı gelişme, tüm alanlarda olduğu gibi elektrik makinelerinde de görülmektedir. Bu gelişim bir taraftan makinenin performansını artırmaya yönelik olurken, diğer yandan motor boyutlarının küçülmesine katkı sağlamayı hedeflemektedir. Kimi malzemelerin farklı alanlarda sıklıkla kullanılmaya başlanması nedeniyle seri üretime geçilmesi, önceden maliyet nedeniyle fazla kullanılamayan elemanların artık motor teknolojisinde de kullanılabilir olmasını sağlamıştır.

1980'li yıllarda mıknatıs teknolojisinde yaşanan gelişmeler kalıcı mıknatıslı senkron motor (KMSM)'ların daha yaygın kullanımına olanak sağlamıştır. Günümüzde bu motorlar çamaşır makinesi, bulaşık makinesi, buzdolabı, klimalar, elektrik süpürgeleri, fanlar, robot teknolojisi ve otomotiv sektöründe yaygın olarak kullanılmaktadır.

Ancak tüm bu gelişmelere ve yaygın kullanıma rağmen bu motorların maliyetleri aynı güçteki farklı bir motora göre daha yüksektir. Örneğin 0,25 kW'lık bir doğru akım (DA) motoru ile aynı güçteki bir KMSM kıyaslandığında, KMSM fiyatının DA motoruna göre çok daha pahalı olduğu görülmektedir. Ayrıca bu motorların bir DA motorundan farklı olarak sürücüye de ihtiyaç duyması, KMSM'lerin toplam maliyetini oldukça artırmaktadır.

Bu noktada motor ve sürücülerin benzetiminin yapılması önem kazanmaktadır. Çünkü bu benzetimler, henüz tasarım aşamasında olan motor ve sürücülerin farklı çalışma ve yük koşulları altında nasıl bir karakteristik sergileyeceğini görmeyi mümkün kılmaktadır. Simülasyonlar sayesinde AR-GE çalışmalarında tüm deneylerin doğrudan laboratuarlarda yapılabilmesi için gereken büyük maddi kaynakların azaltılabilmesi mümkün olabilmektedir. Fakat yapılan simülasyonların doğru ve gerçekçi olması ve ayrıca simülasyondan alınan değerlerin gerçek deneyler yapıldığında alınacak değerlerle örtüşüyor olması çok önemlidir.

Bu nedenle bu tez çalışmasında, farklı güçlerdeki KMSM'lerin, farklı yüklere vereceği akım, hız ve moment tepkilerini deneysel çalışma yapmadan Matlab/Simulink paket programında yapılan simülasyon ile inceleme ve böylelikle AR-GE çalışmalarına katkıda bulunma hedeflenmiştir. Simülasyondan elde edilen sonuçların doğruluğu Lenze firması tarafından üretilen KMSM ve sürücüsü kullanılarak test edilmiştir. Oluşturulan Simulink modeli ilâve olarak 1,1 kW'lık bir KMSM üzerinde denenerek modelin geçerliliği sınanmıştır.

Tezin ikinci bölümünde, konuyla ilgili daha önceden yapılan çalışmaların literatür özetleri sunulmuştur. Üçüncü bölümde motorlarda kullanılan mıknatıs türleri hakkında genel bilgiler verilmiştir. Elektrik motorlarının sınıflandırılmasında KMSM'lerin aldığı yerin belirtildiği dördüncü bölümde, bu motorlara ilişkin avantaj, dezavantaj ve uygulama alanları da verilmiştir. Beşinci bölümde ise KMSM'nin yapısı, çalışma ilkesi, matematiksel modeli ve kontrol yöntemleri sunulmuştur. Tezin altıncı bölümünde 0,25 kW gücündeki bir KMSM'nin alan yönlendirmeli kontrolüne ilişkin Matlab/Simulink ile yapılan simülasyonu detaylı olarak anlatılmıştır. Ayrıca PI denetleyici parametrelerinin en iyileştirmesi de bu bölümde detaylı olarak sunulmuştur. Simülasyondan elde edilecek sonuçlarının doğruluğunu kanıtlamak için yapılan deneysel çalışma ile deneysel çalışma sonunda elde edilen değerlere göre yapılan simülasyon sonuçları yedinci bölümde yer almıştır. Ayrıca bu bölümde, tezin beşin bölümünde oluşturulan Simulink modeli 1,1 kW'lık bir KMSM üzerinde denenerek modelin geçerliliği test edilmiştir. Elde edilen tüm sonuçlar sekizinci bölümünde tartışılmıştır. Ulaşılan sonuçlar tezin dokuzuncu bölümünde verilmiş olup bundan sonraki çalışmalara ışık tutacak bazı önerilerde de bulunulmuştur. Tezin yazılması sırasında yararlanılan kaynaklar onuncu bölümünde alfabetik sırayla takdim edilmiştir.

## 2. KAYNAK TARAMASI

Özçıra ve ark. (2008) tarafından yapılan teorik çalışmada KMSM'nin yapısı ve doğrudan moment kontrol yöntemi anlatılmıştır. Yüzey mıknatıslı olarak tasarlanmış, düşük gerilimli ve yüksek güçlü bir KMSM'ye ait hız kontrol sisteminin simülasyonu gerçekleştirilmiştir. PID denetleyicinin kullanıldığı simülasyonda PID parametrelerinin tespiti için Ziegler-Nichols metodu kullanılmıştır.

Elektrikli sürme sistemlerindeki elemanların geçici rejimlerdeki davranışlarını anlamak amacıyla çeşitli modelleme ve dinamik simülasyon araçları kullanılmaktadır. Modran (2008) tarafından teorik olarak yapılan bu çalışmada, Matlab/Simulink paket programı kullanılarak indüksiyon motoru ve KMSM'nin yol almasına ilişkin benzetim yapılmıştır. İndüksiyon motorun benzetiminde doğrudan, üç kademeli reostayla ve PWM invertörle yol verme yapılmıştır. KMSM'nin benzetiminde ise altı anahtarlı dönüştürücü kullanılmıştır. Simülasyon sonuçları tork, hız ve akım bakımından analiz edilmiştir.

Kalıcı mıknatıslı senkron motorun (KMSM) yüksek performanslı kontrol ve model tabanlı sensörsüz kontrolü için model parametreleri gereklidir. Morimoto ve ark. (2007) tarafından yapılan çalışmada KMSM için önceden parametre bilgilerine ihtiyaç duymayan bir sensörsüz kontrol yöntemi önerilmiştir. Sürücü sisteminin parametreleri durma ve çalışma koşullarında tanımlanır. Öncelikle motor parametrelerini gerektirmeyen sensörsüz yöntem sayesinde başlangıç rotor konumu tahmin edilir. Ardından motor duruyorken IGBT direncini de içeren omik direnç, gerilim hatası ve d-q eksenleri endüktansı saptanır. Sinyal enjeksiyonlu sensörsüz yöntem sayesinde motor çalışmaya başladıktan sonra sensörsüz yöntem genişletilmiş emk tahmin planını değiştirir. Direnç ile d-q ekseni endüktansları için tahmin edilen parametreler böylelikle sensörsüz kontrolde kullanılır. Durağan halde tahmin edilemeyen manyetik akı orta ve yüksek hızlardaki sensörsüz çalışmada tespit edilir. Önerilen yöntemin etkinliği birkaç deneyle doğrulanmıştır.

Jeffrey ve ark. (2007) tarafından yapılan çalışma KMSM'lerde hız kontrolüne yöneliktir. Bu çalışmada öncelikle vektör kontrol yöntemi KMSM modelini formüle

etmek için kullanılmıştır. Daha sonra uygun kapalı döngülü sistemi tasarlamak için kayan kipli bulanık denetleyiciyi kullanan modern kontrol teorisi sunulmuştur. Bilgisayar ile benzetiminde Matlab/Simulink yazılımı kullanılmıştır. Önerilen bulanık kayan kipli denetleyici hem aşma problemini gidermiştir hem de kararlı hâl hataları olmadan çok iyi izleme performansı sergilemiştir. Denetleyicinin gereksiz titreşimleri bastırmak için robot silahlarını konumlandırma kullanılabileceği vurgulanmıştır.

Sakamoto ve ark. (2007) tarafından elektrikli ev aletlerinde kullanıma uygun olan KMSM için konum sensörsüz vektör kontrolünün anlatıldığı çalışmada konum sensörsüz kontrolün yanı sıra basit bir konum kestirim denklemi de gösterilmiş ve denklemin türetilmesi izah edilmiştir. Ayrıca bu çalışmada KMSM'ler için basitleştirilmiş bir vektör kontrol yöntemi önerilmiştir. Önerilen yöntem herhangi bir otomatik hız regülâtörü veya otomatik akım regülâtörü kullanmayı gerektirmez. Önerilen yöntemin sürücü performansı, sabit yük ve sabit hız gibi karalı durumlardaki geleneksel vektör kontrolü ile neredeyse aynıdır. Yapılan benzetimler ve deney sonuçları ile bu durum gösterilmiştir. Önerilen yöntem bataryadan beslenen elektrikli bir süpürge üzerinde uygulanmıştır.

Yamada ve ark. (2007) tarafından yapılan çalışmada dâhili KMSM'lerde diğer performansları bozmadan momentteki dalgalılığı azaltmak için kalıcı mıknatısın en iyi şekilde nasıl tasarlanacağı ele alınmıştır. Momentteki dalgalılığı analiz etmek için çeşitli motor modelleri üretilmiştir. Bu motorlar iki boyutlu sonlu elemanlar yöntemi kullanılarak aynı koşullar altında ele alınmıştır. Önerilen bu yeni tasarım yönteminin momentteki dalgalılığı diğer standart motor modellerine göre %50 oranında azalttığı yapılan deneyler ile kanıtlanmıştır.

Zhao ve ark. (2007) tarafından yapılan çalışmada çıkış gücü 2kW, hızı 200.000d/d ve verimi yaklaşık %90 olan bir KMSM'nin geliştirilmesi anlatılmıştır. Geliştirilen motor sistemi tüm çalışma hız limitlerini kararlı bir şekilde aşmayı açık döngü ile garanti etmesi nedeniyle küçük ve düşük maliyetlidir. Ayrıca kapalı döngülü denetleyicilerin tasarımındaki karmaşadan da uzaktır. Performans gereksinimi ve tüm çalışma hız limitlerindeki kararlılığı temin etmek amacıyla müşterek motor sistemi tasarım yaklaşımı tanıtılmıştır. Ardından motor sisteminin

gerçekleştirilmesi tartışılmıştır. Son olarak bilgisayar benzetimleri ve deneyler ile önerilen tasarımın etkinliği ve geçerliliği kanıtlanmıştır.

KMSM'nin manyetik alan dağılımı ve parametrelerini hesaplamak için analitik bir çözümün sunulduğu yayınlarında Jang ve ark. (2007) yüzey montajlı mıknatıs kullanmış olup, elektromanyetik transfer ilişkileri teoreminden faydalanmışlardır. Bu çalışmada transfer ilişkileri teoreminin taslağı çıkartılmış ve yüzey montajlı KMSM'ye uygulanmıştır. Paralel mıknatıslanmış kalıcı mıknatıslı rotora sahip KMSM'nin manyetik alan dağılımı, zıt emk ve tork sabiti verilmiştir. Sonlu eleman analizleri ve deney sonuçları kıyaslanarak analitik sonuçların geçerliliği kanıtlanmaya çalışılmıştır.

Bal ve ark. (2007) tarafından yapılan çalışmada vektör denetimli KMSM'nin performansı incelenmiştir. Vektör denetimini gerçekleştirebilmek için Analog Devices firması tarafından geliştirilen ADMC 401 sayısal işaret işlemcili denetim kartı kullanılmıştır. Akım ve hız denetimi PI denetim algoritması ile gerçekleştirilmiştir. Vektör denetim yöntemi ile KMSM'nin yabancı uyartımlı DA motoruna benzer biçimde uyartım ve moment akımları birbirinden bağımsız olarak denetlenmiş ve motorun yüksek performansta çalışması sağlanmıştır.

6 oluklu 4 kutuplu KMSM'ler daha az sargıya ihtiyaç göstermesi ve imalatındaki kolaylık nedeniyle son zamanlarda çok popülerdir. 6 oluklu stator sargılarında üretilen manyetomotor kuvvet 4 kutup altında simetrik değildir ve hava aralında daha fazla harmonikler bulunur ki bu durum moment dalgalılığına ve gürültüye neden olacaktır. Zheng ve ark. (2007) daha iyi bir hava aralığı manyetik alan dağılımı ve moment eğrileri elde etmek için rotoru sonlu eleman yöntemi ile optimize etmişlerdir. Yapılan en iyileştirme sonunda torkta % 3.2'lik bir artış elde edilirken tork dalgalılığında % 8.7'lik bir azalma sağlanmıştır.

Luukko ve ark. (2007) tarafından yapılan çalışmada doğrudan tork kontrollü KMSM sürücülerinde rotor ve yük açısı kestirim yönteminin en iyi şekilde gerçekleştirilmesi sunulmuştur. Yük açısının sınırlandırılmasında rotor veya yük açısı örnek olarak gereklidir. Yöntem, doğrudan tork kontrolünde kullanılan faydalı akı kestiriminin aynını kullanır ve yük ile rotor açısını doğrudan motor

denklemlerinden hesaplar. Faydalı akı kestirim yönteminin etkisi simülasyon sayesinde analiz edilmiştir. Kararlı durum ve dinamik ölçüm sonuçlarının her ikisi de önerilen yöntemin iyi bir performans sergilediğini göstermiştir.

Beş fazlı KMSM sürücüleri ile geleneksel doğrudan tork kontrolünde kontrol edilen tek şey, tork üretimi ile ilgili alt uzayında akı uzay vektörüdür. O nedenle pek çok harmonik oluşur. Stator akım şekli sinüzoidal olan beş fazlı KMSM için doğrudan tork kontrol yöntemi ilk kez Gao ve Parsa (2007) tarafından yapılan çalışmada sunulmuştur. Sinüzoidal stator akım dalga şekli elde etmek için iki vektör uzayındaki akı bileşenleri etkili bir şekilde kontrol edilmeye gerek duyarlar. Bu çalışmada tanımlanmış olan iki alt uzaydaki modelin temelinde, taramalı tablodan seçilen anahtarlama vektörü yerine iki adım işlemi benimsenmiştir. Önerilen doğrudan tork kontrolü sinüzoidal stator akım dalga şeklini elde etmiş ve geleneksel doğrudan tork kontrolünün hızlı yanıtı ve basitlik gibi avantajlarını muhafaza etmiştir.

Kurt (2006), doktora tezinde eksenel akılı sürekli mıknatıslı senkron makinelerin tasarım ve en iyileştirilmeleri için yeni bir yöntem sunmuştur. Alan sargıları ve uyartım akımları olmamasından dolayı sürekli mıknatıslı generatörler yüksek işletme verimi, basit ve sağlam yapı ile yüksek güç yoğunluğu sağlamaktadırlar. Sürekli mıknatısların çekiciliği, azrak toprak elemanlı (NdFeB) mıknatıslar gibi yüksek enerjili magnetik malzemelerin gelişimleri ile daha da artmıştır. Tasarım geliştirme ve en iyileştirme için deneysel tasarımın özel bir uygulaması olan Taguchi tekniğini kullanan Kurt (2006), magnetostatik çözümlemeler için de sonlu elemanlar yöntemini kullanmıştır.

Maiti ve Chakraborty (2006) tarafından yapılan çalışmada değişik hız aralıklarındaki vektör kontrollü KMSM'nin hızını tahmin edebilmek için reaktif güç tabanlı model referanslı uyarlanabilir bir sistem kullanılmıştır. Model referanslı uyarlanabilir sistemin bu yeni yapısı stator direncinden bağımsız olup daha az parametreye bağımlıdır (sadece q eksenindeki stator endüktansına bağımlıdır). Ayrıca reaktif gücün basitleştirilmiş anlatımının kullanımı, projenin uygulamaya konulmasını daha da kolaylaştırmıştır. Geleneksel vektör kontrollü KMSM

sürücülerine herhangi bir yeni donanım eklemeden kullanılabilen bu tekniğin geçerliliği yapılan benzetimler ile kanıtlanmıştır.

KMSM, parametreleri belirli bir değere düştüğünde karmaşa yaşar. Bu karışıklık nedeniyle performansı azalacağından karışıklığın bastırılması veya yok edilmesi gerekir. Ren ve Liu (2006), mevcut kontrol yöntemlerinin dezavantajlarını bu motorun özelliklerine uygun olarak analiz etmiş ve KMSM'lerdeki bu karmaşayı kontrol etmek için doğrusal olmayan geri beslemeli kontrol yöntemi önermişlerdir. Bu kontrolde hedef; doğrusal olmayan geri besleme altında benzersiz bir asimtotik kararlı denge sağlamaktır. Yapılan benzetim ile önerilen yöntemin geçerliliği kanıtlanmaya çalışılmıştır.

Zhao ve ark. (2006) tarafından yapılan çalışmada, düşük maliyetli fakat performansı ve kararlılığı garanti edilen yüksek hızlı (50.000d/d) bir KMSM'nin tasarım şeması ve ona ait sayısal denetleyicisi sunulmuştur. Basit ve güvenilir olan açık döngülü denetleyicinin tüm hızların üzerinde kararlı çalışması garanti edilmiş olup, optimal sayısal denetleyici verim ve performansı arttırmak amacıyla ayrıca tasarlanmıştır. Önerilen optimal V/f kontrolündeki benzersiz özellik, stator direncini hesaba katmış olmasıdır. Birçok V/f kontrolünde bu değer genellikle ihmal edilir fakat çok küçük boyutlu motor isteği nedeniyle bu durum çok yüksek hızlı motorlarda ihmal edilemez. Yapılan çalışmada değişik tasarım seçenekleri için simülasyon ve kararlılık analizi verilmiştir. Simülasyon ve deney sonuçları ile tasarım tekniği ve geçerliliği kanıtlanmıştır.

Ichikawa ve ark. (2006) tarafından yapılan çalışmada, sensörsüz kontrol altında çevrimiçi parametre tanılama metodu önerilmiştir. Önerilen yöntem önceden parametre ölçümleri gerektirmez ve rotor konum bilgisi veya hız olmaksızın motor parametrelerini bulabilir. Bu nedenle tanımlı parametreler konum bilgisinin doğruluk veya yanlışlığından etkilenmezler. Önerilen yöntemin geçerliliği yüzey montajlı ve dâhili KMSM'lerin her ikisi için de deneysel olarak kanıtlanmıştır.

Alışılagelmiş yüksek performanslı sürücüler kendini karmaşık matematiksel işlemleri gerçekleştirmeye adamış denetleyicileri kullanır. Ama bununla birlikte birkaç faktör bu senaryoyu süratle değiştirmektedir. Şimdiki DSP'li denetleyiciler

çeşitli karmaşık çevre birimlerini bütünleştirebilir. Bir takım faydalı güç elektroniği çevre birimleri ile DSP'nin bütünleştirilmesi, sürücü tasarımını önemli derecede kolaylaştırır ve tasarımcının tek DSP'li denetleyici kullanarak yüksek performanslı sürücüleri gerçekleştirmesine imkân sağlar. Mohammed ve ark. (2006) tarafından yapılan çalışmada, tek DSP'li denetleyicinin kullanıldığı çift KMSM sürücüsünün gerçekleştirilmesi sunulmuştur. Sürücüler yüksek performansı elde etmek için alan yönlü kontrolü kullanır. DSP'li denetleyici ilave herhangi bir yonga bileşeni olmaksızın her bir sürücünün denetimini bağımsız olarak gerçekleştirebilmek amacıyla yonga halindeki güç elektroniği çevre birimlerini kullanmıştır. Bu durum toplam sistem maliyetini azaltmakla birlikte sistem tasarımının önemli derecede kolaylaşmasını sağlamıştır. Çalışma sonunda çift KMSM sürücüsünü gerçekleştirmek için kullanılan tüm donanım ve yazılım parçaları verilmiştir.

Zhu (2006) tarafından yapılan yüksek lisans tezinde çok fazlı KMSM'lerin değişken hızlı sürücü sistemleri için vektör kontrolünün modellenmesi, simülasyonu ve uygulamaya konulması anlatılmıştır. Düşünülen motorlar çıkıntısız yüzey montajlı rotorlara sahiptir. Bu kontrol yöntemini incelemek için Matlab/Simulink içerisindeki basitleştirilmiş model geliştirilmiştir. Ardından DSP kullanarak uygulaması yapılmıştır. Önce 3 fazlı statora, ardından 7 fazlı statora sahip motorlar ile uygulamanın geçerliliği kanıtlanmaya çalışılmıştır.

Arroyo (2006) tarafından yapılan tezde, KMSM sürücü sisteminin Simulink'te detaylı olarak modellenmesi ele alınmıştır. Sürme işleminde alan yönlü kontrol kullanılmıştır. Simülasyon, sistemin tüm bileşenlerini gerçeğe uygun olarak içermektedir. Bu durum motor geçici ve kararlı durumdayken invertörün farklı bölümlerinde akım ve gerilim değerlerinin hesaplanmasını mümkün kılmaktadır. İnvertör tasarımı kolaylaştırılarak farklı bölümlerdeki kayıplar hesaplanmıştır. Hız döngüsünde PI denetleyicinin bulunduğu kapalı döngülü kontrol sistemi, motoru sabit tork ve akının zayıfladığı bölgelerde çalıştırmak için tasarlanmıştır. Uygulaması ise Simulink'te yapılmıştır. Akım denetleyicileri ile birleştirilmiş histerisiz ve PWM kontrol planlarının kıyaslamalı bir incelemesi, harmonik spektrum ve toplam harmonik distorsiyon açısından yapılmıştır. Simülasyon sonuçları anma hızının

altında ve üstündeki iki işletme hızında elde edilerek yapılan çalışmanın geçerliliği kanıtlanmaya çalışılmıştır.

Zhang ve ark. (2006), KMSM için doğrudan kendinden öz denetimli bir yaklaşım sunmuşlardır. Bu yöntem sinir ağı tabanlıdır. Sinir ağı, invertörün anahtarlama anını saptamak için kullanılmıştır. Anahtarlama çizelgesindeki girdiler sayısal sinyallere dönüştürülmüştür. Önerilen üç katmanlı sinir ağlı denetleyici, sayısal işaret işlemcinin hesaba dayalı gereksinimlerini en aza indirgemek için sadece 12 nöron içerir. KMSM ve sinir ağı sistemi için Matlab/Simulink ortamında benzetimler yapılmıştır. Yapılan benzetimlerden elde edilen sonuçlar KMSM'nin sinir ağlı denetleyici tarafından doğrudan özdenetiminin, anahtarlama çizelgesine dayalı kontrolün yerini alabileceğini göstermiştir. Ayrıca bu denetleyicinin yüksek tork yanıtına sahip olduğu vurgulanmıştır.

Elektrikli ve hibrit elektrikli araçlar çok hızlı bir şekilde geliştirilmektedir. Bir hibrit elektrikli aracın motor tasarımı yüksek verim, yüksek güç/ağırlık oranı ve düşük hızlardan çok yüksek hızlara kadar güvenilir olma gibi özellikleri karşılamalıdır. Bu gereksinimleri yerine getirebilmek için Nakai ve ark. (2005) yaptıkları çalışmada KMSM kullanmışlardır. Bu çalışmanın amacı tüm hızlarda KMSM kontrol yöntemini geliştirmektir. Bu yöntem alışılagelmiş akım hatası geri bildirim yöntemi ile kıyaslandığında yüksek hızlarda tork ve verimi artırır. Bu amaca ulaşmak için iki kompanzatörün birleştirildiği bir yöntem önerilmiştir. Kompanzatörlerin ilki faz gerilimini kullanarak torku kontrol eder. Diğeri ise bilindik akım hatası geri beslemesidir. Önerilen yöntemin geçerliliği benzetim ve deney sonuçları kullanılarak doğrulanmıştır.

Liu ve ark. (2005), matris konvertör tabanlı KMSM sürücü sistemleri için sistematik bir denetleyici tasarımı ve uygulaması gerçekleştirmişlerdir. KMSM sisteminin hız ve konum yanıtlarını geliştirmek için doğrusal olmayan backstepping denetleyici önerilmiştir. Önerilen backstepping denetleyici kullanıldığında, sistemin zamanla değişen hız komutunu ve zamanla değişen konum komutunu izleyebildiği ve iyi bir yükü bozucu etkileri reddetme yeteneğine sahip olduğu vurgulanmıştır. Akım döngüsü, hız döngüsü ve konum döngüsünü içeren tüm kontrol döngüleri 32

bitlik TMS320C40 sayısal işaret işlemcisi (DSP) ile gerçekleştirilmiştir. Teorik analizin geçerliliğini onaylamak için birkaç deney sonucu verilmiştir.

Zheng1 ve ark. (2005) tarafından yapılan yayında 77 kelvinlik kriyojenik sıcaklıkta çalışan çok yüksek hızlı (200.000d/d) KMSM'nin tasarım ve simülasyonu sunulmuştur. Yapılan çalışmada elektromanyetik ve termal sonlu eleman analizi, kriyojenik uygulamalar için materyal seçimi, gerilme analizi ve rotorun dinamik analizi bulunmaktadır.

Sürekli mıknatıstaki akı değişimi ve manyetik doyumun dâhili KMSM'lerin sensörsüz kontrolü üzerindeki etkisinin değerlendirildiği çalışmalarında Imai ve ark. (2005), sonlu eleman analizini kullanarak akının kısmi diferansiyel değerlerini hesaplamışlardır. Motor gerilim denkleminin yüksek hız analizi, hesaplanan kısmi diferansiyel değerlere interpolasyon uygulanarak gerçekleştirilmiştir. Sonuçlar analiz edildiğinde deney sonuçları ile bağıntılı olduğu görülmüştür. Analiz edilen sonuçlar kullanılarak algılayıcısız kontrolün performansı daha da iyileştirilmiş ve kalıcı mıknatıstaki akı değişiminin etkisi çok daha iyi tahmin edilmiştir.

Hossain ve ark. (2005) tarafından kaleme yayında KMSM'deki moment dalgalılığını ölçmek için kullanılan bir yöntem tartışılmıştır. Motorda üretilen momentin dalgalılığını ölçmek için gerekli tasarım ölçütleri detaylarıyla verilmiştir. Denetleyiciden kaynaklanan dalgalanma, önerilen ölçme işlemi sırasında ihmal edilmiştir. Kuplaj elemanının etkisi, volan ataleti ve motor yüklendiğinde momentteki titreşim konuları ele alınmıştır. Motor anma akımındayken momentteki dalgalılığın doğru/kesin ölçümünün motor üretim işleminin sonunda objektif olarak yapılması gerektiği vurgulanmış ve yapılan deneylerden elde edilen sonuçlar takdim edilmiştir.

Lu ve ark. (2005) tarafından yapılan çalışmada, KMSM'nin Matlab/Simulink ortamında doğrudan tork kontrolüne ilişkin modellenmesi detaylı olarak ele alınmıştır. Yapılan benzetimde yüksek sistem performansı elde etmek için PI denetleyici parametrelerinin ($K_p$ ve $K_i$'nin) uygun değerlerde olması gerektiği vurgulanmıştır.

Dandıl ve Gökbulut (2004), KMSM'nin hız denetimi için giriş değişkenleri olarak hata ve hatanın integralini kullanan bir bulanık sinir ağı denetleyici (BSAD) önermişlerdir. Doğrusal olmayan ve modellenemeyen motor dinamikleri, bozucu girişler, parametre ve yük değişimleri nedeniyle KMSM'ler uyarlanabilir ve dayanıklı bir hız denetim sistemine ihtiyaç duyarlar. Bu amaçla BSAD'ler, elektrik sürücülerinin hız/konum ya da vektör denetimlerinde kullanılmaya başlanmıştır. Bu çalışmada, bazı BSAD yapılarında karşılaşılan sürekli durum hatalarını gidermek amacıyla, giriş değişkenleri olarak hata ve hatanın integralini kullanan bir BSAD önerilmiştir. Yapılan çalışmada değişik referans hız değerlerinde, sabit ve doğrusal olmayan yükler kullanılarak önerilen integral etkili BSAD'nin dayanıklılığı ve sürekli durum hatalarını giderebilme yeteneği incelenmiştir. Elde edilen benzetim sonuçlarından, integral etkili BSAD'nin uyarlanabilir ve dayanıklı yapısıyla değişen yük koşullarına uyum sağladığı ve literatürde kullanılan diğer BSAD yapılarında ortaya çıkan sürekli durum hatalarını da giderdiği gözlenmiştir.

Abido ve ark. (2003) tarafından yapılan çalışmada dâhili KMSM'nin hız kontrolü için yeni bir bulanık mantıklı denetleyici takdim edilmiştir. Önerilen denetleyici daha az işlem yüküne sahip olmak için tasarlanmıştır. Bulanık mantıklı denetleyici parametreleri genetik algoritma sayesinde optimize edilmiştir. Bulanık mantıklı denetleyiciyi içeren tam vektör kontrol planı, DS1102 DSP bordu kullanarak 1 beygirlik KMSM'ye gerçek zamanda başarıyla uygulanmıştır. Önerilen bulanık mantıklı denetleyicinin etkinliği ani yük değişimi, parametre değişimleri, komut hızı değişimi v.b. farklı işletme koşullarında elde edilen deney sonuçları ve simülasyonlar ile tasdik edilmiştir.

Bianchi ve Canova (2002) tarafından yapılan çalışmada dâhili KMSM'nin parametre analizi sunulmuştur. Tasarımda hedeflenen şey dalgalılığı azaltılmış maksimum torku elde etmektir. Bazı öncelikli tasarım düşüncelerinden sonra analitik modele dayalı bir çalışma yapılmıştır. Ardından sonlu eleman modeli vasıtasıyla parametrik analiz ve optimizasyon gerçekleştirilmiştir. Optimizasyon işleminde yapılanlar en uygun iç ve dış bariyer/engel açısını bulmaktan ibarettir. Prototip olarak üretilen bir motor üzerinde yapılan deneylerden elde edilen sonuçlar ile

hesaplama işleminin doğruluğu gösterilmiştir. Optimizasyon sırasında genetik algoritma kullanılmıştır.

Üç fazlı bir asenkron motorun devredeki bir kondansatör yardımıyla tek fazlı bir kaynaktan beslendiği çalışma şekli çok iyi bilinmektedir. Literatürde asenkron motorun bu şekilde çalışması durumunda performansının nasıl olacağına dair detaylı araştırmalar yapılmıştır. Ancak senkron motorlar için böyle bir çalışma rapor edilmemiştir. Chaudhari ve Femandes (2001), yaptıkları çalışmada üç fazlı bir senkron motorun tek fazlı kaynaktan beslenmesi durumunda nasıl bir performans sergileyeceğini analitik ve deneysel olarak izah etmişlerdir. Yol alma ve çalışma süresince stator fazlarının ikisi arasına bir kondansatör bağlanmıştır. Analiz için simetrik bileşen kavramı kullanılmıştır. Maksimum verim, maksimum güç katsayısı ve maksimum tork isteği gibi bazı ölçütleri elde etmek için kondansatör değeri uygulamalı olarak tespit edilmiştir. Yapılan deney ve simülasyonlar ile analiz tamamlanmıştır.

Nakashima ve ark. (2000), KMSM'nin başlangıçtaki rotor konumunun konum sensörü olmadan tahmin edildiği bir yöntem sunmuşlardır. Bu kestirim işlemi, rotor mıknatısının neden olduğu statordaki doğrusal olmayan mıknatıslanma karakteristikleri kullanılarak gerçekleştirilmiştir. Bu yöntemin temelinde motora uygulanan gerilim vektörü için d ekseni akım yanıtı vardır. Kestirim işlemi süresince rotor gerçekte durmaktadır ve kestirim işlemi 17ms sürmektedir. Önerilen yöntemin kullanıldığı deneysel sonuçlardan elde edilen ortalama kestirim hatası ± 3,8 elektrikî derece, maksimum hata ise 18,75 elektrikî derecedir.

Sabit güç kaybı kavramı ilk kez Monajemy (2000) tarafından yapılan doktora tezinde ortaya konulmuştur. Bu tezde sabit güç kaybı ile çalışan KMSM sürücüsünün kontrol ve dinamikleri analiz edilmiş ve önerilen yöntem geliştirilmiştir. Farklı kontrol yöntemlerinde motor performansı analiz edilmiş ve sabit güç kaybı kavramı ile kıyaslanmıştır. Böyle bir bilginin özel uygulamalar için motor sürücüsünü optimize edecek olan en uygun kontrol yönteminin seçimine imkân vereceği vurgulanmıştır. Maksimum hıza ulaşma, maksimum akım gereksinimleri, maksimum tork ve diğer performans göstergeleri, sabit güç konsepti üzerine kurularak

sunulmuştur. Ayrıca KMSM sürücü performansının analiz ve simülasyonunu önemli ölçüde kolaylaştıracak yeni bir normalleştirme tekniği tanıtılmıştır.

Cho ve ark. (1999) tarafından dahili KMSM'nin optimal tasarımının anlatıldığı çalışmada motor verimi ve ağırlığına ilişkin iki tane amaç fonksiyon kullanılmıştır. Optimal sonuçları bulmak için çok amaçlı optimizasyon tekniği uygulanmıştır. Genetik algoritma kullanarak ikinci dereceden olmayan çözüm kümesi ve en iyi uzlaşma çözümünün belirlendiği optimal tasarım yöntemi önerilmiştir. Teklif edilen algoritma geleneksel genetik algoritma yapısını uyarlar fakat uygun değer ve yakınsama ölçütü yeniden tanımlanmıştır. Algoritmanın bazı temel parametreleri çok amaçlı optimizasyona göre ayarlanmıştır. Motor verimini daha doğru olarak öngörmek için nüve kaybı formülü hem stator akımının hem de mıknatısın neden olduğu akı değişimi göz önünde tutularak türetilmiştir. Yapılan optimizasyonla motor kaybı ve ağırlığı azaltılmıştır.

Chun ve ark. (1998), yaptıkları çalışmada çeşitli optimizasyon problemlerini araştırma yöntemi olarak faydalı algoritmaları incelemişlerdir. Bazı sayısal fonksiyonların optimal değerini araştırmak için bağışık algoritma, genetik algoritma ve gelişim stratejisi kullanılmış ve ardından bu sonuçlar birbirleri ile kıyaslanmıştır. Yapılan kıyaslama sonucunda bağışık algoritmanın pek çok problem için daha kullanışlı olduğu görülmüştür. Özellikle bağışık algoritmanın yapısı ve karakteristiği ayrıntılı olarak incelenmiş ve ardından bu algoritmalar kullanılarak yüzey montajlı KMSM tasarlanmıştır.

Sim ve ark. (1997), dâhili KMSM'lerdeki verimi yükseltmek için uygun bir tasarım yöntemi sunmuşlardır. Motorun verim formülü eşdeğer manyetik ve elektriksel devre analizi kullanılarak türetilmiştir. Motor verimi amaç fonksiyon (objective function) olarak alınmış ve amaç fonksiyonunun en iyi tasarım değişkenlerini bulmak için optimizasyon algoritması olarak genetik algoritma kullanılmıştır. Öngörülen performansı yakalamak için analitik yolla elde edilen hava aralığı akı yoğunluğu ve d-q ekseni endüktansları sonlu eleman yönteminden elde edilen sonuçlar kullanılarak kompanze edilmiştir. Önerilen algoritma 600W gücündeki 3 fazlı, 4 kutuplu KMSM'ye uygulanmış ve tatminkâr sonuçlar elde edilmiştir.

# 3. KALICI MIKNATIS ÇEŞİTLERİ VE ÖZELLİKLERİ

## 3.1 Giriş

Akustik transduserler, motorlar ve generatörler gibi büyük gruplar dışında televizyon, telefon, bilgisayar, ses sistemleri ve otomobiller gibi birçok üründe kalıcı mıknatıslara rastlamak mümkündür.

Üretimi ilk olarak kobalt-tungsten ve krom-demir alaşımlarına dayanan kalıcı mıknatıslar, 1930'lu yıllara gelindiğinde Al-Ni-Co (alüminyüm-nikel-kobalt) alaşımlarından üretilmeye başlanmıştır. 1966 yılında Sm-Co (samaryum-kobalt) alaşımlı, 1982 yılında da Nd-Fe-B (neodymium-demir-bor) mıknatısların üretilmeye başlanmasıyla kalıcı mıknatısların motor teknolojisindeki kullanımı ivme kazanmaya başlamıştır.

## 3.2 Kalıcı Mıknatıs Çeşitleri

Kimyasal bileşenlerine ve yapılış teknolojilerine göre genelde metal ve seramik olarak iki gruba ayrılan kalıcı mıknatısların yaygın olarak kullanılan türleri şunlardır:

- AlNiCo mıknatıslar
- Sert Ferrit mıknatıslar
- Nadir toprak elementli mıknatıslar

### 3.2.1 AlNiCo Mıknatıslar

Alüminyum, nikel ve kobalt alaşımı olan ve az miktarda da bakır ve diğer bazı metallerden oluşan AlNiCo mıknatıslar, döküm teknolojisi veya toz metalürjisi yöntemiyle üretilirler.

Bu mıknatıslar çok sert olmakla birlikte çok kolay kırılabilmektedirler. Üretim yöntemleri sıvı alaşımların dökümü veya metal tozların preslenerek sıkıştırılması ile sınırlıdır. Üretimdeki ilk işlem Al-Ni-Fe-Co malzemeleri etrafındaki ince manyetik

parçacıkların ısı ile kontrollü olarak çökelmesini sağlamaktır. Bu parçacıklar, bittiğinde yüksek koersiviteye sahip ve eş yönsüz olarak şekillendirilmiş biçimde uzatılır ve filiz şekline çevrilir. AlNiCo'ların eş yönlü veya eş yönsüz olması, şekil verme süreci boyunca manyetik parçacıkların yönlendirilip yönlendirilmediklerine bağlıdır. Bunlar yüksek kalıcı indüksiyon ve yüksek sıcaklıklara karşı son derece büyük direnç gösterirler ve nispeten yüksek enerji üretirler. Fakat düşük koersif kuvvetleri nedeniyle kullanım alanları biraz sınırlıdır (Kurt 2006). Uygulama alanlarına örnek olarak voltmetre, ampermetre, manyetik sensörler, ısı ve basınç algılayıcıları, işitme cihazları, küçük hoparlörler ve otomobil çakmağı verilebilir (www.aksamagnet.com.tr erişim 14.09.2008).

### 3.2.2 Sert Ferrit Mıknatıslar

Kalıcı mıknatıslar içindeki en ucuz mıknatıslar olup, mıknatıslık özelliğini uzun süre muhafaza edebilirler. Bu mıknatıslar demir oksit tozlar kullanılarak üretilirler. Bu tozlara kristal kafes yapısını geliştirmek için baryum (Ba) veya stronsiyum (Sr)'dan herhangi biri eklenir. Formülü M.n($Fe_2O_3$) olup buradaki M ifadesi Ba veya Sr'dir, n ise 5,8 ile 6 arasında değişen bir katsayıdır. Üretim süreci $Fe_2O_3$ bileşiminin Ba veya Sr'nin herhangi biriyle uygun oranda karıştırılmasıyla başlar. Karışım 1000–1350 C° arasında ısıtılarak toz haline getirildikten sonra ezilip öğütülerek ince pudra hâline getirilir. Eş yönlü mıknatıslar ince pudra taneciklerinin istenilen biçimde kurutulup preslenmesiyle üretilirler. Ardından 1100–1300 C°de ısıtılarak kütle haline getirilirler (www.magnetweb.com erişim 14.09.2008).

Eş yönsüz ferrit mıknatıslar ise tane boyutu yaklaşık 1µm olan tek domenli parçacıkların kullanılmasıyla üretilir. Toz taneleri suyla birlikte bir harç oluşturacak biçimde karıştırılır. Bu karışım preslendikten sonra katılaştırılır. Bitmiş mıknatıslar katılaşmış malzemenin parlatılmasıyla son hâlini alır (Kurt 2006).

Sert ferrit mıknatıslar, diğer mıknatıs malzemelere göre çok ucuz olmaları nedeniyle geniş uygulama alanı bulmaktadır. Sert ve kırılgan olmalarına rağmen korozyona karşı büyük direnç gösterirler. Seramik mıknatıslar olarak da anılan bu mıknatısların manyetik akı yoğunluğu, koersif kuvveti ve mıknatıslığının giderilmesine karşı gösterdiği direnç oldukça yüksektir (www.stanfordmagnets.com,

erişim 14.09.2008). Akı yoğunluğu AlNiCo mıknatıslardan daha azdır. Zayıf yapısal karakteristiklerine rağmen yaygın mıknatıslar içinde en hafif olan mıknatıstır. Bu mıknatısların enerji üretimi diğer mıknatıslarla kıyaslandığında daha düşüktür (Özgenel 2003). DA motorlar, manyetik filtreler, jeneratörler, telefon zilleri, oyuncaklar, radyolar ve manyetik rezonans gibi uygulamalar bu mıknatısların kullanım alanlarından birkaçıdır.

### 3.2.3 Nadir Toprak Elementli Mıknatıslar

Kalıcı mıknatıs ailesi genelde nadir toprak elementli olmayan kalıcı mıknatıslar ve nadir toprak elementli kalıcı mıknatıslar olarak isimlendirilir. Nadir toprak elementli olmayan mıknatıslar AlNiCo mıknatısları ve seramik (stronsiyum ve baryum ferrit) mıknatısları kapsar. Nadir toprak elementli mıknatıslar ise SmCo mıknatısları ve NdFeB mıknatısları içerir. Nadir toprak elementli olmayan mıknatıslar maliyete bağlı uygulamaların çoğunda kullanılmasına rağmen nadir toprak elementli mıknatıslar büyük maksimum enerji çarpımı gibi ayırt edici birçok özelliğe sahiptirler. Son zamanlarda nadir toprak element içeren düzinelerce manyetik malzeme geliştirilmiştir. Nadir toprak elementli mıknatısların iki büyük ailesi olan SmCo ve NdFeB mıknatıslar değişik uygulama alanlarında çok sık kullanılmaya başlanmıştır (www.stanfordmagnets.com, erişim 14.09.2008).

SmCo mıknatısın giderici kuvveti seramik mıknatısın 3-5 katı kadardır. AlNiCo ve seramik mıknatıslarla kıyaslandığında genelde daha gelişmiş fiziksel karakteristiğe sahiptir. Teknik açıdan incelendiğinde döner elektrik makineleri için idealdir. Nadir toprak elementli mıknatıslar içinde ısıya en dayanaklı mıknatıstır. NdFeB mıknatıslar ise enerji üretimi bakımından en iyi mıknatıstır. Bu mıknatıslardaki enerji üretimi ve akı yoğunluğunun yüksek olması, yüksek performans gerektiren servo uygulamalarda NdFeB mıknatısların kullanımını mümkün kılmıştır. Üretim maliyeti düşük olmakla birlikte korozyona karşı dayanımı zayıftır. Bu nedenle bazı özel uygulamalarda mıknatıs yüzeyi epoxy gibi manyetik olmayan madde ile kaplanır. Isıya karşı dayanıklılığı SmCo mıknatıslardan daha azdır (Özgenel 2003).

Genel olarak nadir toprak elementli kalıcı mıknatısların koersif kuvvetleri

ferritlere oranla oldukça yüksektir. Artık mıknatıslık değeri de AlNiCo'larla karşılaştırılabilecek değerlere ulaşmıştır. Bu iki iyi özelliğin bir araya gelmesiyle enerji çarpımı değerleri diğer tüm mıknatıslara göre çok üstündür (Yaman 1999).

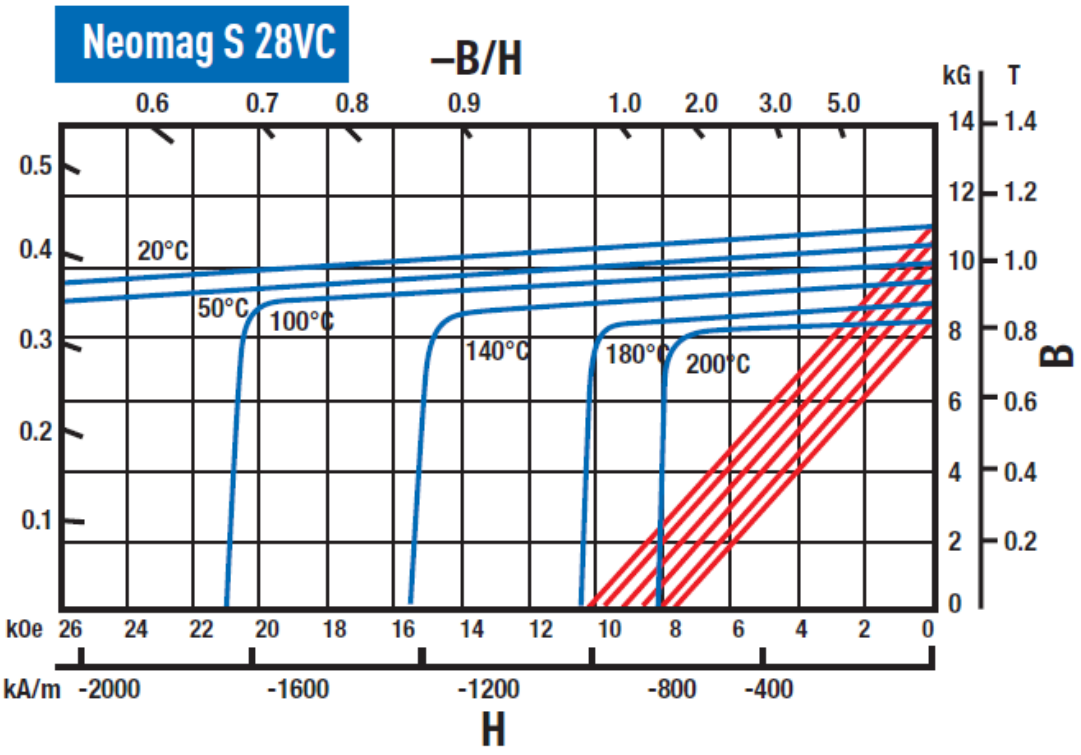
Pazar payı giderek yükselen bu mıknatısların kullanım alanları arasında tüm elektrik motorları, tıbbi cihazlar, otomotiv başlatma motoru ve elektronik sektörü bulunmaktadır.

### 3.3 Sıcaklığın Kalıcı Mıknatıs Üzerindeki Etkisi

Sıcaklık, mıknatısların manyetik özelliklerinde köklü değişimlere yol açan önemli bir faktördür. Mıknatısların mıknatıslığını giderebilecek metalurjik değişimler, malzemenin belli bir sıcaklığın üzerinde belli bir süre kalması sonucu oluşmaktadır.

Demagnetizasyon karakteristiğinin en çok etkilendiği fiziksel olay sıcaklık değişimleridir. Bu durum bazı manyetik büyüklüklerin sıcaklığa bağlı değişim göstermesinden kaynaklanmaktadır. Özellikle alan şiddeti ile akı yoğunluğunun ve genel olarak demagnetizasyon yolunun sıcaklığa çok bağımlı olması, mıknatıslı manyetik devre tasarımının en zor bölümlerinden biridir. Curie sıcaklığı olarak bilinen bir noktada tüm manyetik malzemeler manyetiklik özelliklerini tamamen ve kalıcı olarak kaybederler. Bu nokta farklı manyetik malzemelerde farklı değerler göstermektedir (Duru 1997).

Tezin deneysel çalışma bölümünde kullanılan yüzey montajlı KMSM'nin üretiminde Neomag S 28VC ürün kodlu kalıcı mıknatıs kullanılmıştır. Bu mıknatıs toz metalürjisi yöntemiyle üretilen eş yönsüz bir kalıcı mıknatıstır. Bu mıknatısa ait B-H eğrisi Şekil 3.1'de verilmiştir. Manyetik özellikleri ise EK-A'da sunulmuştur.




Şekil 3.1 Neomag S 28VC ürün kodlu kalıcı mıknatısa ait –B/H eğrisi.

# 4. KMSM'LERE GENEL BİR BAKIŞ

## 4.1 Giriş

Kalıcı mıknatıslı alternatif akım motorları senkron motorlardır. Çok fazlı olarak üretilen bu motorlar genelde üç fazlı olup rotorları üzerine yerleştirilmiş mıknatıslara sahiptirler. Armatür sargıları ise statora yerleştirilmiştir. Bu motorlardaki alan kalıcı mıknatıslar tarafından sağlandığından indüksiyon veya anahtarlamalı relüktans motorlara göre daha yüksek verime sahiptirler (Toliyat ve Campbell 2004).

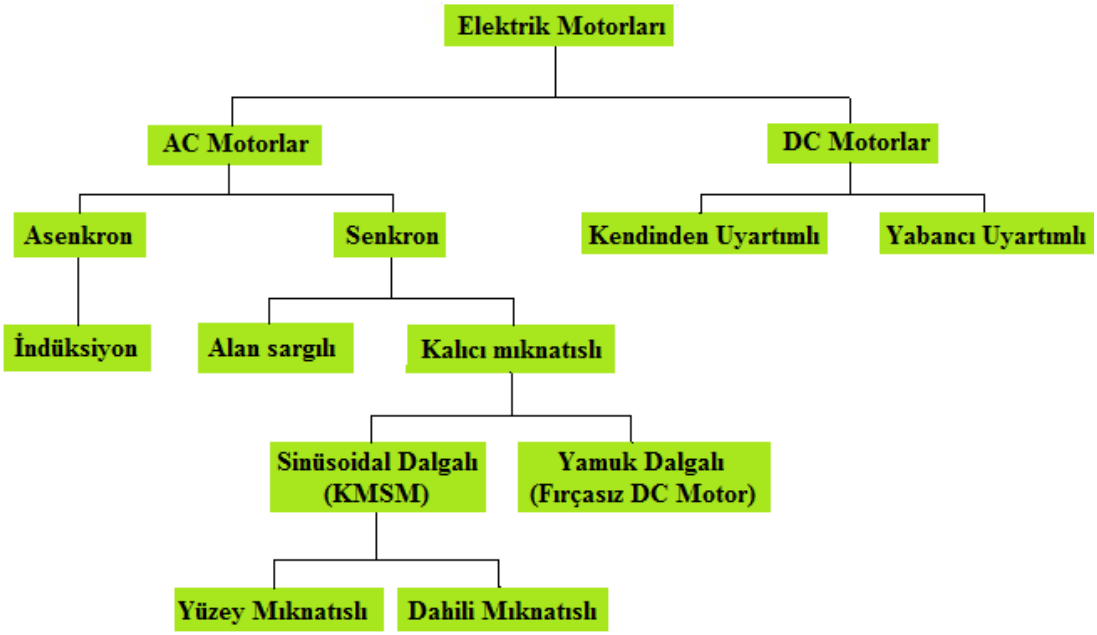
Senkron motorlar kaynağın frekansına ve motorun kutup sayısına bağlı olarak her zaman senkron hızda dönen çift uyartımlı makinelerdir. Bu motorların statorları alternatif akım (AA), rotorları ise doğru akım (DA) ile beslenmektedir. Ancak senkron motorlarda rotor manyetik alanı, rotora yerleştirilen kalıcı mıknatıslar ile sağlanarak ikinci kaynağa olan ihtiyaç giderilmiş ve böylece kalıcı mıknatıs uyartımlı senkron motorlar elde edilmiştir. KMSM'lerde fırça ve kollektör düzeneği yerine komütasyonu sağlamak için elektronik sürücüler ve bu sürücülerin uygun sargıları anahtarlamasını sağlayan konum algılayıcıları kullanılmaktadır. Motorun rotorunda herhangi bir akım olmadığından rotor bakır kayıpları söz konusu değildir. Ayrıca stator akımının bileşeni olan mıknatıslama akımının ortadan kalkması motorun güç katsayısını yükseltmektedir (Pillay ve Krishnan 1989). Dolayısıyla bu motorları diğer motorlara göre aynı güçte ama daha küçük boyutlarda ve yüksek verimle tasarlamak mümkündür. Bu ise, yüksek güç/ağırlık oranı istenen robot ve uçak teknolojisi için aranan bir özelliktir.

## 4.2 Elektrik Motorlarının Sınıflandırılması

Günümüzde kullanılan başlıca elektrik motorları asenkron motor, senkron motor ve doğru akım motorlarıdır. Bu motorlar elektronik devrelerle kontrol edilerek mekanik çıkışları iyileştirilebilir. Doğru akım motorları kontrolü en kolay motor olmasına rağmen fırça ve kollektörlerinin zamanla aşınması, bakım gerektirmesi**,** boyutunun diğer motorlardan büyük olması, maliyeti ve patlayıcı ortamlarda kullanılamaması gibi nedenlerden dolayı yerini yavaş yavaş asenkron ve senkron

motora bırakmaktadır. Bu iki motor türüne genel olarak alternatif akım motorları denilmektedir.

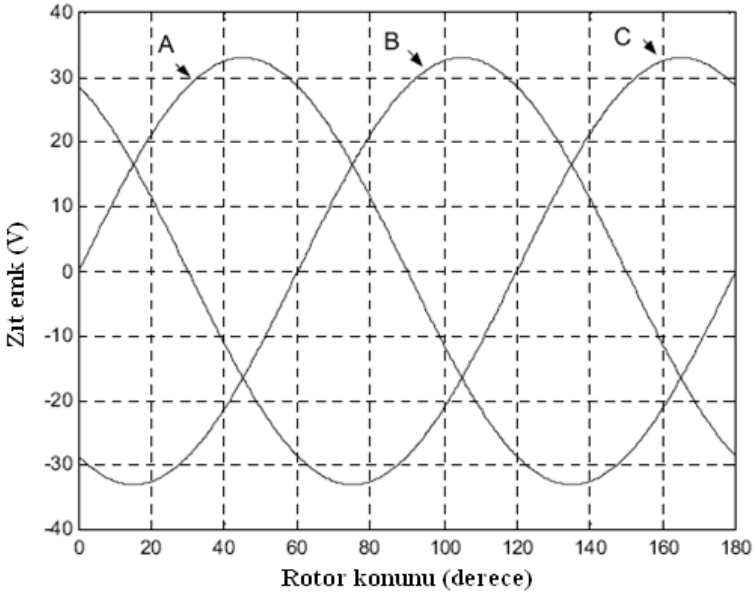
Şekil 4.1'de elektrik motorlarına ait genel bir sınıflandırma görülmektedir.




Şekil 4.1 Elektrik motorlarının sınıflandırılması.

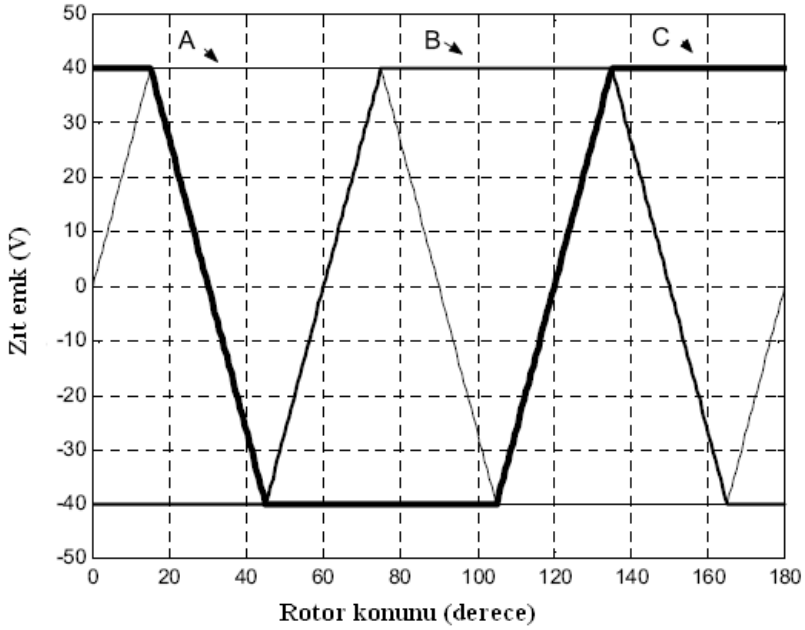
### 4.3 Fırçasız Doğru Akım Motoru ve KMSM

Kalıcı mıknatıslı alternatif akım motorları, rotorunda kullanılmakta olan kalıcı mıknatısların stator sargılarında indüklediği zıt emk dalga şekline göre genelde iki tipte kategorize edilirler. İlk tip KMSM olarak isimlendirilir. Bu motorlarda üretilen zıt emk dalga şekli, Şekil 4.2'de de görüleceği üzere sinüzoidal olup bu motorların sinüzoidal bir kaynaktan beslenmeleri gerekir. KMSM'nin elektronik kontrol ve sürücü sistemi motoru sinüzoidal akım veya gerilimle beslemek için rotor konum geri beslemesini ve darbe genişlik modülasyonunu (PWM) kullanır. Bu sayede çok küçük bir dalgalanmaya sahip sabit moment üretilir.




Şekil 4.2 KMSM'deki üç fazlı zıt emk.

Kalıcı mıknatıslı alternatif akım motorlarının ikinci tipi Şekil 4.3'de görüldüğü gibi trapezoidal bir zıt emk üretir ve fırçasız doğru akım motoru (FDAM) olarak adlandırılır. FDAM sürücü sistemi rotor konum geri beslemesi üzerine kuruludur. Bu geri besleme KMSM'deki gibi sürekli değildir. Fakat faz akımlarının komütasyonu için tercihen elektriksel olarak her 60 derecelik sabitlenmiş noktalarda elde edilir. FDAM, dikdörtgen biçimli akımların motoru beslemesine gereksinim duyar. Alternatif olarak motorun kapasitesini aşmadan akımları belli bir sınır değerde tutarak her 120 derecede bir motora gerilim uygulanabilir. Çünkü faz akımları zıt emk'nın sabit bölümü ile eşzamanlı olarak uyartılarak sabit moment üretilir (Toliyat ve Campbell 2004).




Şekil 4.3 FDAM'deki üç fazlı zıt emk.

KMSM'ler fırçasız motor sınıfına girmektedirler. Oysaki adım motoru ve asenkron motorda da fırça ve kollektör bulunmamasına rağmen fırçasız motor olarak nitelendirilmezler. Çünkü fırçasız motor, fırça ve kollektöre sahip bir doğru akım servo motora benzer bir performans elde etmek için fırça ve kollektör takımının mekanik sınırlamalarını ortadan kaldırmak amacıyla komütasyon işlemi elektronik olarak yerine getirilecek şekilde tasarlanmaktadır. Bilindiği gibi komütasyon terimi, genellikle doğru akım makinelerinde endüvi sargılarından geçen akımın yönünü değiştirmek olarak bilinir. Fırçasız motor terimi; alternatif akım makinesi, invertör ve rotor konumunu belirleyen konum sensörünün bir birleşimini isimlendirmek için kullanılır. Bu birleşim sonucunda klasik doğru akım makinelerindeki gibi doğrusal hız-moment karakteristiğine sahip bir sürücü sistemi meydana getirilir. Bir alternatif akım makinesi stator ve rotordan meydana gelmektedir. Stator kısmında faz sargıları ve rotor yatakları bulunur. Motorun rotoru dönen kısım olup kalıcı mıknatıslardan yapılır. Bu mıknatıslar manyetik akının kaynağı durumundadırlar (Bal 2004).

FDAM'lerde hata oranı daha yüksek olan daha basit rotor konum sensörleri kullanılabilir. Ancak KMSM'ler daha hassas konum bilgisine ihtiyaç duyarlar. Çünkü faz sargılarına uygulanacak akımın dalga şeklinin hassas olarak izlenmesi gerekir. Zıt emk dalga şekillerindeki bu farklılıklar, bu motorların ürettikleri

momentler için de geçerlidir. FDAM'de moment fonksiyonu yamukken KMSM'de moment fonksiyonu sinüzoidaldir.

Bu iki motor arasındaki farklardan birisi de besleme geriliminin FDAM'Ierde trapezoidal, KMSM'lerde ise sinüzoidal olmasıdır. Aynı zamanda akım değişimleri FDAM'lerde trapezoidal, KMSM'lerde ise sinüzoidaldir. Denetim işlevinin basitliği nedeniyle ilk olarak fırçasız motorlar üretilmiştir. Ancak fırçasız motorlarda moment değişiminin dalgacıklı olması nedeni ile bu motorların yüksek performanslı hareket denetim uygulamalarında kullanılması uygun görülmemiştir. Daha sonra, AA motorlarının vektör denetim prensibi ile yüksek performansı elde edilebildiğinden sinüzoidal motor geliştirilmiştir.

Farklı güçlerde imal edilmiş KMSM'lere ait resimler Şekil 4.4'de görülmektedir.



Şekil 4.4 Farklı güçlerde imal edilmiş KMSM'ler.

## 4.4 KMSM'nin Olumlu Özellikleri

Son birkaç yılda yapılan çalışmalarla (Zheng ve ark. 2005, Zhao ve ark. 2007) hızları 200.000 d/d'ya kadar çıkartılan ve indüksiyon motorlarıyla kıyaslandığında rotor kayıpları ihmal edilebilir düzeyde kalan KMSM'lerin sahip olduğu olumlu özellikler aşağıda maddeler halinde sunulmuştur.

- Basit bir yapıya sahiptir.
- Doğrusal bir hız moment ilişkisine sahiptir.

- Kalıcı mıknatıslar nedeniyle hava aralığı indüksiyonu arttığı için stator sargıları azaltılarak motorun dış çapı küçültülmüştür. Bu nedenle DA ve asenkron motorlara göre moment/hacim oranı daha büyüktür.
- Fırça, bilezik ve kollektör olmadığından fazla bakım gerektirmezler. Bu durum motor verimini artırır.
- Hızları çok geniş sınırlar içerisinde kontrol edilebilir.
- Yüksek hızlarda çalışabilirler.
- Rotorda sargı kullanılmadığından rotor bakır kayıpları söz konusu değildir.
- Rotorunda sargı bulunmadığından motorun soğutulması daha kolaydır.
- Rotorunda sargı bulunmadığından aynı güçteki diğer motorlara göre daha hafif olup atalet momenti düşüktür.
- Eylemsizlik momenti daha düşük olduğundan daha hızlı tepki verirler. Yani bu motorlarda moment/eylemsizlik momenti oranı daha yüksektir (Pillay ve Krishnan 1991).
- Moment dalgalanması küçüktür.
- DA motorlarındaki komütasyon sınırlaması (hız x akım sınırı) bu motorlar için söz konusu değildir.
- Asenkron motorlara göre verimi ve güç faktörü daha iyidir.
- Çalışırken ark çıkarmadıklarından her ortamda güvenle kullanılabilir.
- Stator akım bileşeni olan mıknatıslama akımının olmayışı nedeniyle, besleme ünitesi olarak kullanılan doğrultucu ve invertörde daha küçük anma değerli yarı iletken eleman kullanılmaktadır.

### 4.5 KMSM'nin Olumsuz Özellikleri

KMSM'nin sahip olduğu dezavantajlar şu şekilde sıralanabilir:

- Stator alanı ile rotor alanının senkronize edilmesi gerektiğinden hassas bir rotor konum bilgisine gerek duyarlar.
- Rotor konum bilgisi için kullanılan konum sensörü maliyeti arttırır.
- Motor hacminin küçülmesine büyük katkı sağlayan kalıcı mıknatıslar motor maliyetini arttırır. O nedenle DA ve asenkron motorlara göre daha pahalıdırlar.
- Doğrudan yol alamadıkları için harici güç elektroniği devrelerine ihtiyaç

duyarlar.

- Algılamasız denetim için yazılımda ve donanımda özel önlemler almayı gerektirir. Dolayısıyla daha pahalı ve karmaşık düzenlere ihtiyaç göstermektedir.
- Uyartım akımı olmadığından motorun generatör olarak çalıştırılması durumunda gerilim ayarı yapılamaz.
- Kalıcı mıknatısların kalitesiz olması durumunda motorun performans özellikleri bozulur.
- Uzun süreli kullanımda termal etkiler nedeniyle kalıcı mıknatısların indüksiyonları az da olsa zayıflamaktadır. Bu da uygulama alanlarının kısmen daralmasına neden olmaktadır.
- Motor yeterince soğutulmadığı takdirde mıknatısların indüksiyonundaki zayıflama nedeniyle moment üretiminde küçük düşüşler söz konusu olmaktadır. Bu nedenle ısıl sınırlara çok dikkat edilmesi gerekir.
- Yüzey mıknatıslı KMSM'lerde çok yüksek hızlarda kalıcı mıknatısların kopma riskleri vardır.

### 4.6 KMSM'nin Uygulama Alanları

KMSM'lerin uygulama alanları birkaç Watt'tan birkaç MW'a kadar geniş bir aralıkta değişmektedir. Son yıllarda çok çeşitli uygulama alanları bulan KMSM'lerin bazı kullanım alanları aşağıda görülmektedir.

- Çamaşır makinesi.
- Bulaşık makinesi.
- Buzdolabı.
- Klima.
- Servo sürücüler.
- Endüstriyel sürücüler.
- Otomasyon uygulamaları.
- Robot uygulamaları.
- Uçak teknolojisi.

- Süpürgeler ve fanlar.
- Elektrikli araçlar.
- Gemi sürücülerinde.
- Enerji üretiminde.
- Tekstilde ip sarma makinesini tahrik etmede.

# 5. KMSM'NİN YAPISI, ÇALIŞMA İLKESİ VE KONTROLÜ

## 5.1 Giriş

KMSM, geniş uygulama alanı bulan çok popüler bir motordur. Bu motorlarda komütatör bulunmadığından DA motorlarından daha güvenilirdir. Ayrıca AA indüksiyon motorlarıyla kıyaslandığında birçok avantaja sahiptir. Çünkü rotor manyetik akısı rotordaki mıknatıslarlarla sağlandığından oldukça yüksek verim elde edilir. Bu ise üst düzeyde verim ve emniyet istenen çamaşır makinesi, bulaşık makinesi ve buzdolabı gibi beyaz eşyalarda aranan bir özelliktir (Freescale 2005).

## 5.2 KMSM'nin Yapısı

Bilindiği gibi senkron motorlar çift uyartımlı motorlar sınıfındadır. Bu motorların statorlarına AA, rotorlarına ise fırça ve bilezikler yardımıyla DA uygulanmaktadır. Ancak KMSM'lerin rotorundaki alan mıknatıslar ile sağlandığından harici bir DA kaynağına ve dolayısıyla fırça ve bileziklere ihtiyaç duymazlar. Stator bakımından asenkron motorlarla aynı yapıya sahiptirler.

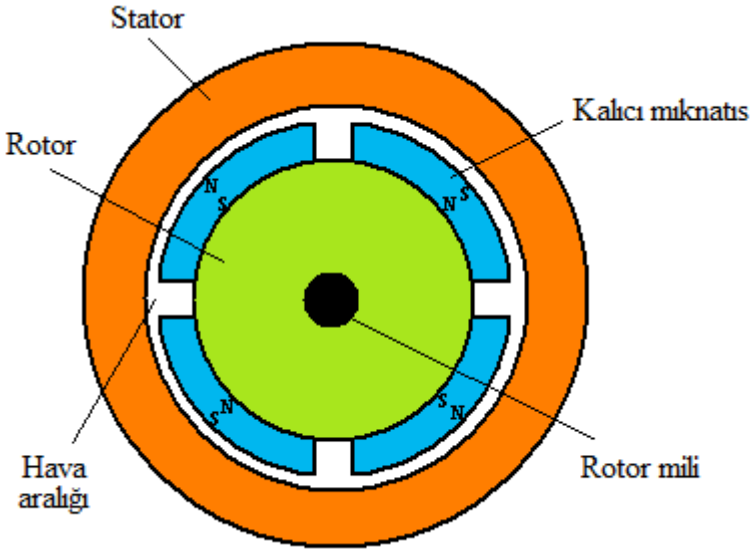
Motorda kullanılacak kalıcı mıknatısların seçiminde kalıcı mıknatısın ağırlığına, verimliliğine, çalışma sıcaklığı üst sınırına, motor performansına sağlayacağı katkıya ve maliyetine bakılır. Motor performansını etkileyen faktörlerin bir diğeri de mıknatısların rotora yerleştirilme biçimleridir. KMSM'ler, kalıcı mıknatısların rotora yerleştirilme biçimlerine göre ikiye ayrılır. Bunlar:

- Kalıcı mıknatısların rotor yüzeyine yerleştirildiği yüzey montajlı veya yüzeysel mıknatıslı olarak isimlendirilen KMSM türü.
- Kalıcı mıknatısların rotor içine yerleştirildiği dâhili veya içsel mıknatıslı olarak anılan KMSM türü.

Bu iki tasarım türünden başka bir de radyal ve eksenel mıknatıslanmalı

tasarımlar vardır ki esasında bunlar dâhili mıknatıslı KMSM modellerinin farklı biçimlerde tasarımından ibarettir. Bu karma rotor yapısında kalıcı mıknatıslardan başka kısa devre çubukları da bulunabilmektedir. Bunun nedeni ise senkron motorlarda yaşanan kalkış problemini gidermektir.

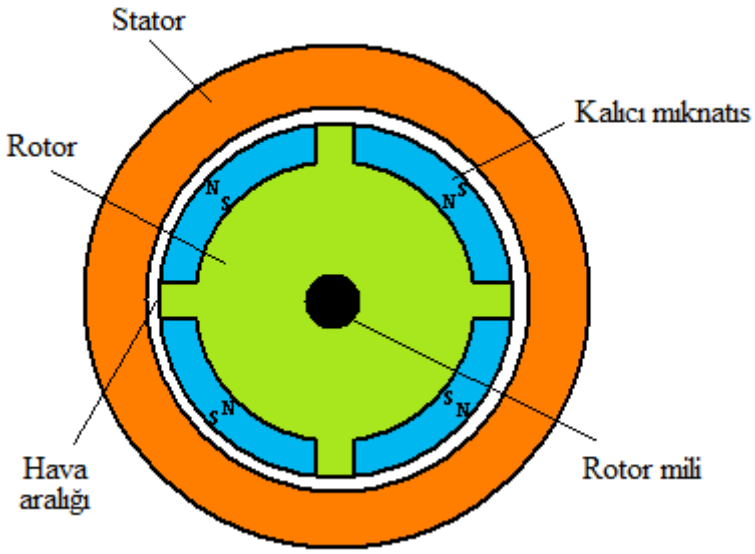
Şekil 5.1'de yapısı görülmekte olan yüzey mıknatıslı KMSM'lerde kalıcı mıknatıslar çelik nüveli rotor üzerine yerleştirilir. Kalıcı mıknatısın alan şiddeti ($H_c$) yüksek olduğundan kolay demagnetize olmamaktadır. Bu motor türünde etkin hava aralığı geniş olduğundan bununla ters orantılı olarak endüktans ($L_d$) düşüktür. Yani endüktans, kalıcı mıknatıs olan ve olmayan rotor bölümlerinde sabit ve eşit kabul edilebilir ($L_q$=$L_d$). Mıknatıslardaki kaçakların hava aralığındakine göre küçük olması daha küçük mıknatıs kullanımını sağlar. Tezin deneysel çalışma bölümünde kullanılan KMSM de yüzey montajlı olup bu motora ilişkin bilgi deneysel çalışma bölümünde detaylı olarak verilecektir.




Şekil 5.1 Yüzey montajlı KMSM'nin yapısı.

Kalıcı mıknatısın alan şiddetindeki azalma, demagnetizasyon riskini ortaya çıkarmaktadır. Bu durumu engellemek amacıyla mıknatıs, rotor içerisine doğru büyütülerek yerleştirilir. Elde edilen bu yeni yapı içsel (dâhili) mıknatıslı KMSM olarak adlandırılır (Şekil 5.2). Bu motor yapısında mıknatısların bulunduğu bölgelerde hava aralığı etkinken, mıknatısların bulunmadığı ve çelik nüve tarafından

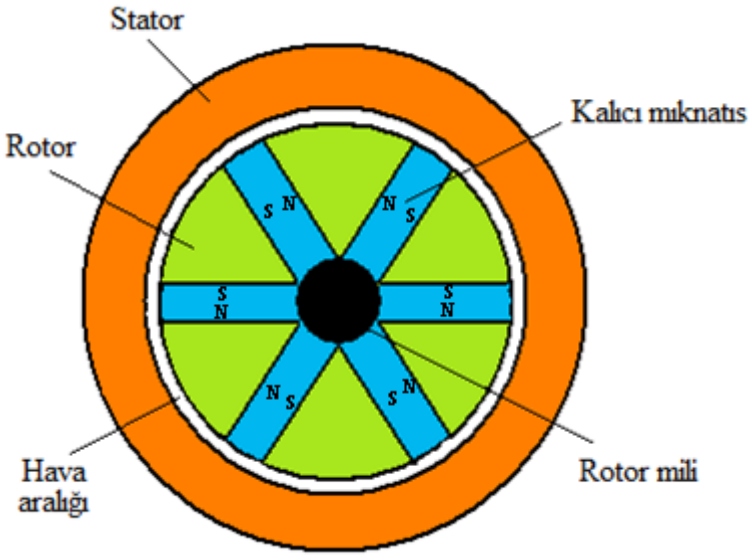
doldurulan bölgelerde hava aralığı etkisi azdır. Bu nedenle bu motor yapısı çıkıntılı kutuplu senkron motor gibi davranış sergiler. Aynı mıknatıs boyutlarına göre kıyaslandığında yüzey montajlı yapıya göre daha yüksek pik moment üretir. Çünkü dâhili mıknatıslı rotor yapısı relüktans moment üretir. Aynı momenti üretecek mıknatıs kalınlığı dâhili mıknatıslı rotor yapısında daha incedir. Bunun sonucunda $L_d$ daha büyüktür (Bal 2004).



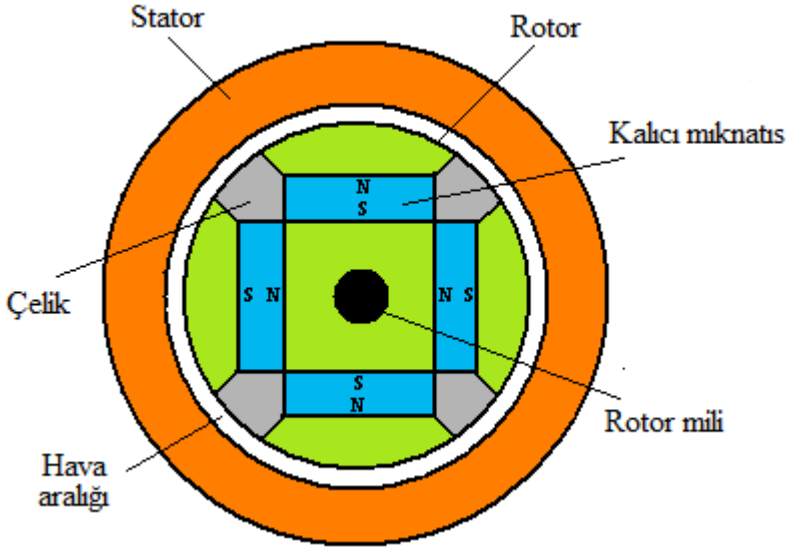

Şekil 5.2 İçsel mıknatıslı KMSM'nin yapısı.

Radyal akılı KMSM'lerde kalıcı mıknatıslar, rotor içine radyal (merkezden çevreye doğru) mıknatıslanacak biçimde yerleştirilirler. Şekil 5.3'de yapısı verilen bu motor yüzey montajlı ve dâhili mıknatıslı ile karşılaştırıldığında $L_d$ ve $L_q$ değerleri daha büyüktür.

Şekil 5.4'de yapısı görülmekte olan eksenel akılı KMSM'de ise akı odaklayıcı etkiden dolayı radyal mıknatıslanmaya göre çok daha büyük bir hava aralığı akısı meydana gelir. Çıkıntılı kutuplu senkron makine özelliği gösteren bu KSMM türünde, eksenel mıknatıslanma düzeni akı yoğunluğunda artışa neden olduğundan, akı yoğunluğu bakımından düşük olan ferrit mıknatısların bu motorlarda kullanılabilmelerine olanak sağlanmış olur.




Şekil 5.3 Radyal akılı KMSM'nin yapısı.




Şekil 5.4 Eksenel akılı KMSM'nin yapısı.

Kalıcı mıknatısların rotora yerleştirilme şekilleri motorun analizi sırasında büyük önem taşımaktadır. Çünkü yüzey montajlı KMSM'lerde d ekseni endüktansı ile q ekseni endüktansları eşitken ($L_q$=$L_d$), dâhili KMSM'lerde q ekseni endüktansı d ekseni endüktansından büyüktür ($L_q$>$L_d$). Aynı durum radyal akılı KMSM'ler için de geçerlidir ($L_q$>$L_d$). Ancak eksenel akılı KMSM'lerde bu durum tam tersidir ($L_q$<$L_d$).

Dolayısıyla yüzey montajlı KMSM'lerin matematik modeli diğer tasarım türlerine göre biraz daha kolay yapılabilmektedir.

### 5.3 KMSM'nin Çalışma İlkesi

KMSM'nin rotorundaki kutuplar, kalıcı mıknatısların rotor miline N-S kutup çifti oluşturacak şekilde yerleştirilmeleri ile elde edilir. Stator kutupları ise sargılardan geçen akımlarla sağlanır. Rotor kutupları sabit olmasına karşın stator kutupları uygulanan gerilimin frekansına bağlı olarak sürekli değişir ve buna bağlı olarak döner alan oluşur. Rotor kutuplarının oluşturduğu alan ile stator döner alanı, motorun dönüşü için gerekli olan momenti üretir.

KMSM'ler besleme türlerine göre doğrudan hat beslemeli (line started) ve evirici beslemeli (inverter feed) olarak ikiye ayrılır. Doğrudan hat beslemeli KMSM'lerin rotorlarında, asenkron motorlarda kullanılan kısa devre çubuklarının işlevine sahip kafes çubuklar bulunur. KMSM'nin kalkınma anında hızı sıfır olduğundan stator döner alanı kalkınma anında bu çubukları tam olarak keser ve böylelikle motorun kalkınması için gereken moment oluşur. Motor senkron hıza ulaştığında stator döner alanı ile rotor hızı eşitlendiğinden çubuklarda gerilim düşümü olmaz. Bu nedenle çubuklar sadece kalkınma anında güç harcarlar. Doğrudan hat beslemeli bu KMSM'ler geri beslemeli veya geri beslemesiz olarak çalıştırılabilir.

Evirici beslemeli KMSM'ler kafesli olabileceği gibi çoğunlukla kafessizdir. Bu besleme türüne sahip motorlar da geri beslemeli veya geri beslemesiz üretilebilirler. Geri besleme olmayan yapıda motor frekansı düşük seviyeden başlayıp rampa şeklinde arttırılarak motorun senkron hıza ulaşması sağlanır. Geri beslemelide ise motorun konum ve faz akımı bilgilerinin algılanması gerekir. Algılanan konum bilgisi ile gerçek hız elde edilerek referans hız değeriyle arasındaki hata bulunur ve bu bilgi kullanılarak evirici için gereken anahtarlama sinyalleri üretilir. Bu yapıda evirici frekansı ve gerilimi ayarlanarak hemen hemen tüm hızlarda senkronizasyon bozulmamış olur (Üstün, 2004).

## 5.4 KMSM'nin Matematik Modeli

Elektrik motorlarının denetiminde motorun matematik modelinin çok iyi bilinmesi gerekir. Çünkü yapılacak olan denetim, çıkarılacak olan bu matematik modeline göre yapılmaktadır. Dolayısıyla motorun matematik modelindeki hata denetim işleminde başarısızlığa neden olacaktır.

KMSM'nin modellenmesinde 3 çeşit matematik modeli kullanılmaktadır. Bunlar:

- Değişkenlerin stator referans düzleminde ifade edildiği 3 faz modeli.
- Değişkenlerin rotor referans düzleminde ifade edildiği 2 faz d-q modeli.
- Değişkenlerin 2 fazlı sabit düzleme aktarıldığı 2 faz α-β modeli.

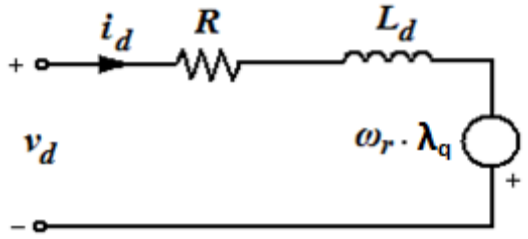
Üç fazlı motorların modelleri uygun iki fazlı modele çevrilerek motorun dinamik denklemlerindeki karmaşıklık azaltılır. Stator büyüklüklerinin rotor referans düzleminde ifade edildiği 2 faz d-q modeli, yabancı uyartımlı DA motor modeline benzemekte olup bu model kullanıldığında motorun denetimi kolaylaştırılmış olur. Böylelikle denklemlerin çözüm süreleri kısaltılmış olur. Tezin deneysel çalışma bölümünde kullanılan sürücü alan yönlendirmeli vektör kontrol yöntemini kullanmaktadır. Bilindiği gibi bu kontrol yönteminde d eksen akımı sıfırda tutulur ve motorun üreteceği moment q ekseni akımıyla kontrol edilir. Bu yüzden burada KMSM'nin rotor referans düzlemindeki matematik modeli detaylı olarak verilecektir. Modeli çıkartılacak olan yüzey montajlı KMSM 3 fazlı olup sargıları yıldız bağlıdır.

Motorun matematik modeli çıkartılmadan önce bazı kabullenimler yapılmaktadır. Muni ve ark.'na (1996) göre bu kabullenimler şu şekilde sıralanabilir:

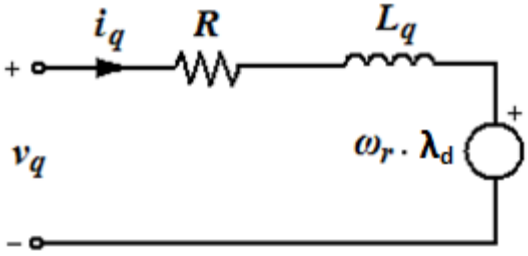
- Kalıcı mıknatıslara bağlı hava aralığındaki akı dağılımı sinüzoidaldir. Dolayısıyla stator sargılarında indüklenen zıt emk sinüzoidaldir.
- Stator sargılarının dağılımı sinüzoidaldir.
- Rotor üzerinde damper sargısı bulunmamaktadır.
- Kalıcı mıknatısa bağlı kutup akısı sabittir.
- Doyma ihmal edilmiştir.

- Girdap akımları ve histerisiz kayıpları ihmal edilmiştir.

Buna göre KMSM'nin rotor referans düzlemindeki eşdeğer devresi Şekil 5.5 ve 5.6'daki gibi çizilebilir.




Şekil 5.5 KMSM'nin rotor referans düzlemindeki d ekseni eşdeğer devresi.




Şekil 5.6 KMSM'nin rotor referans düzlemindeki q ekseni eşdeğer devresi.

Şekil 5.5 ve 5.6 kullanılarak KMSM'nin rotor referans düzlemindeki stator d-q gerilim denklemleri Pillay ve Krishnan'a (1988) göre şu şekilde yazılabilir:

$$v_d = R\, i_d + \frac{d}{dt}\, \lambda_d - \omega_r\, \lambda_q \tag{5.1}$$

$$v_q = R\, i_q + \frac{d}{dt}\, \lambda_q + \omega_r\, \lambda_d \tag{5.2}$$

Burada:

| | |
|---|---|
| $v_d, v_q$ | : d,q eksen gerilimleri (V) |
| $i_d, i_q$ | : d,q ekseni stator akımları (A) |
| $R$ | : Stator sargı direnci (Ω) |
| $\lambda_d, \lambda_q$ | : d,q ekseni akıları (Wb) |
| $\omega_r$ | : Rotorun açısal hızı (rad/s) |

Motorun d ve q ekseni manyetik akıları sırasıyla denklem (5.3) ve (5.4) verilmiştir.

$$\lambda_d = L_d\, i_d + \lambda_m \tag{5.3}$$

$$\lambda_q = L_q\, i_q \tag{5.4}$$

Denklem (5.3)'teki $\lambda_m$ ifadesi sabit mıknatıstan dolayı meydana gelen karşılıklı manyetik akıyı simgelemektedir. $L_d$ ve $L_q$ ise d-q ekseni endüktanslarını ifade etmektedir.

Motorun ürettiği elektromanyetik moment, denklem (5.5)'te görülmektedir.

$$T_e = \frac{3}{2}\, p\, \left[\lambda_m\, i_q + \left(L_d - L_q\right) i_q\, i_d\right] \tag{5.5}$$

Moment denklemindeki $p$ ifadesi motorun çift kutup sayısını temsil etmektedir. Denkleme bakıldığında motorun üreteceği momentin d-q eksen akımlarına bağlı olduğu görülmektedir. Bu denklem, sabit mıknatısı rotor yüzeyinde olan KMSM'lerde d ve q eksen endüktanslarının eşit olduğu (Juming ve ark. 2003, Modran 2008) göz önünde bulundurularak tekrar yazıldığında denklem (5.6) elde edilir.

$$T_e = \frac{3}{2}\, p\, \lambda_m\, i_q \tag{5.6}$$

Denklem (5.6)'da, motordaki moment kontrolünün yalnızca q eksen akımına bağlı olduğu açıkça görülmektedir.

d-q ekseni akımları, rotorun açısal hızı ve rotorun konumu durum uzay formunda sırasıyla (5.7), (5.8), (5.9) ve (5.10) numaralı denklemlerle verilmiştir.

$$\frac{d}{dt}\, i_d = \frac{\left(v_d - R\, i_d + \omega_r\, L_q\, i_q\right)}{L_d} \tag{5.7}$$

$$\frac{d}{dt}\, i_q = \frac{\left(v_q - R\, i_q + \omega_r\, L_d\, i_d - \omega_r\, \lambda_m\right)}{L_q} \tag{5.8}$$

$$\frac{d}{dt}\omega_r = \frac{T_e - B_m\,\omega_r - T_l}{J} \tag{5.9}$$

$$\frac{d}{dt}\theta_r = \omega_r \tag{5.10}$$

Denklem (5.9)'daki $T_l$ ifadesi yük momentini, $B_m$ ise sönüm katsayısını simgelemektedir.

d-q eksen gerilimleri Park dönüşümü kullanılarak stator faz gerilimlerinden şu şekilde elde edilebilir:

$$\begin{bmatrix} v_q \\ v_d \\ v_0 \end{bmatrix} = \frac{2}{3}\begin{bmatrix} \cos(\theta) & \cos(\theta - 2\pi/3) & \cos(\theta + 2\pi/3) \\ sin(\theta) & sin(\theta - 2\pi/3) & sin(\theta + 2\pi/3) \\ 1/2 & 1/2 & 1/2 \end{bmatrix}\begin{bmatrix} v_a \\ v_b \\ v_c \end{bmatrix} \tag{5.11}$$

d-q eksen gerilimlerinden stator faz gerilimlerinin elde edilmesi ise ters Park dönüşümü kullanılarak denklem (5.12)'deki gibi yapılabilmektedir.

$$\begin{bmatrix} v_a \\ v_b \\ v_c \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} \cos(\theta) & sin(\theta) & 1 \\ \cos(\theta - 2\pi/3) & sin(\theta - 2\pi/3) & 1 \\ \cos(\theta + 2\pi/3) & sin(\theta + 2\pi/3) & 1 \end{bmatrix}\begin{bmatrix} v_q \\ v_d \\ v_0 \end{bmatrix} \tag{5.12}$$

Motorun toplam giriş gücü 3 faz modelindeki değişkenler kullanılarak şu şekilde yazılabilir:

$$P = v_a\, i_a + v_b\, i_b + v_c\, i_c \tag{5.13}$$

Motor giriş gücünün d-q değişkenlerine göre ifadesi ise denklem (5.14)'de görülmektedir.

$$P = \frac{3}{2}\left(v_d\, i_d + v_q\, i_q\right) \tag{5.14}$$

### 5.5 KMSM Kontrol Yöntemleri

KMSM'ler bir çeşit AA motoru olduğundan üç farklı kontrol yöntemi ile kontrol edilebilirler. Bu yöntemler V/f kontrol, doğrudan moment kontrolü ve alan etkili kontrol olarak sıralanabilirler.

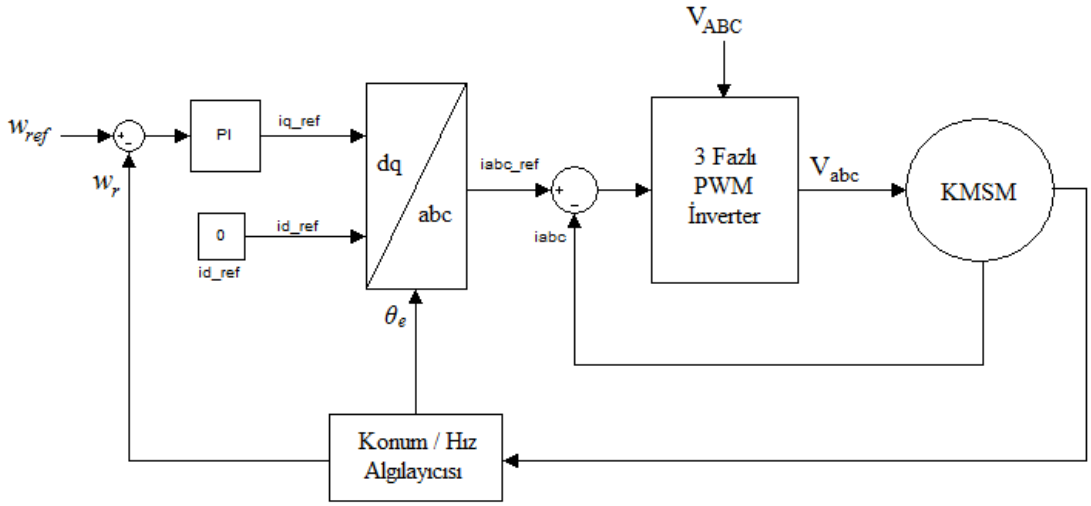
Basit yapılı ve düşük maliyetli olan V/f kontrol yöntemi orta ve yüksek hız bölgelerinde avantajlıdır. Moment yanıtı motorun zaman sabitine bağlı olup, kontrol parametrelerinin ayarlanmasını gerektirmez. Fan ve pompa gibi basit olan değişken hız uygulamalarında en iyi seçimdir. Açık çevrimli kontrol yapısı nedeniyle rotor konum bilgisi gerektirmez. Ayrıca kontrol işleminde yüksek performanslı bir işlemciye gereksinim duymaz. Bu kontrol yöntemindeki kontrol değişkenleri frekans ve gerilimdir. Motorda sabit bir akıya sahip olmak için çıkış frekansı ile çıkış gerilimi arasındaki oran sabit tutulur (Itoh ve ark. 2002).

Doğrudan moment kontrolündeki kontrol değişkenleri ise mıknatıslanma akısı ve momenttir. Bu vektör kontrol yönteminde güç anahtarları, önceden belirlenen anahtarlama tablosundaki gerilim vektör değerinin, stator akı bağı ve moment değerlerine göre seçilmesiyle anahtarlanır. Doğrudan moment kontrolü yönteminde yüksek performans ve en hızlı moment cevabı elde edilir. Eviricinin anahtarlama frekansı, akı ile momentin histerisiz bant genişliklerine bağlı olup değişkendir. Moment dalgalanması ise örnekleme süresi ile bant genişliğine bağlıdır. Bu kontrol yönteminde hız denetimi için tek bir PI denetleyicinin kullanılması yeterlidir.

Alan etkili kontrol yöntemini kendi içerisinde alan yönlendirmeli ve alan zayıflatmalı olarak ikiye ayırmak mümkündür. Her iki yöntemdeki kontrol işlemi, stator akımlarının dönen d-q eksen takımına dönüştürülmesiyle yapılır. Bu akımlardan q bileşeni momentle doğru orantılıdır. d eksen akımının sıfırda tutulduğu alan yönlendirmeli yöntem, özellikle KMSM'lerin yüzey mıknatıslı olanlarında yaygın olarak kullanılmaktadır. d eksen akımının sıfırdan farklı bir değerde tutulduğu alan zayıflatmalı yöntem ise dâhili KMSM'lerde yaygın olarak kullanılmaktadır. Bu tezin deneysel çalışma bölümünde kullanılan motorun yüzey mıknatıslı KMSM olması ve sürücüsünün de alan yönlendirmeli kontrol yöntemine göre tasarlanmış olması nedeniyle simülasyonda alan yönlendirmeli vektör kontrol yöntemi tercih edilmiştir. Bu kontrol yöntemine ait blok şeması Şekil 5.7'de görülmektedir.

Bu kontrol yönteminde Şekil 5.7'de görüldüğü gibi mekanik hız geri beslemesi ile referans hız karşılaştırılarak bir hata sinyali elde edilir. Bu sinyal PI denetleyiciden geçirilerek $i_q$ akımı için referans değer elde edilir. Kullanılan vektör kontrol yöntemi alan yönlendirmeli olduğundan d ekseni akımı için referans değer

sıfırda tutulur. Ardından rotor referans düzlemindeki d-q akım referansları, dönüşüm bloğu ile üç fazlı sisteme dönüştürülerek üç faz için referans akım değerleri elde edilir. Bu değerler, gerçek üç faz akım değerleri ile karşılaştırılarak üç faz için hata sinyali üretilir. Elde edilen bu hata sinyallerinin PWM bloğunda belirlenen histerisiz aralığın dışına çıkıp çıkmadıklarına bakılır. Histerisiz bandın dışına çıkılması durumunda ilgili faz sargısına uygulanan gerilimin yönü ters çevrilerek motorun istenen hız ve momenti üretmesi sağlanır.




Şekil 5.7 Alan yönlendirmeli vektör kontrol yönteminin prensip şeması.

# 6. KMSM'NİN VE ALAN YÖNLENDİRMELİ VEKTÖR KONTROLLÜ SÜRÜCÜSÜNÜN SİMÜLASYONU

## 6.1 Giriş

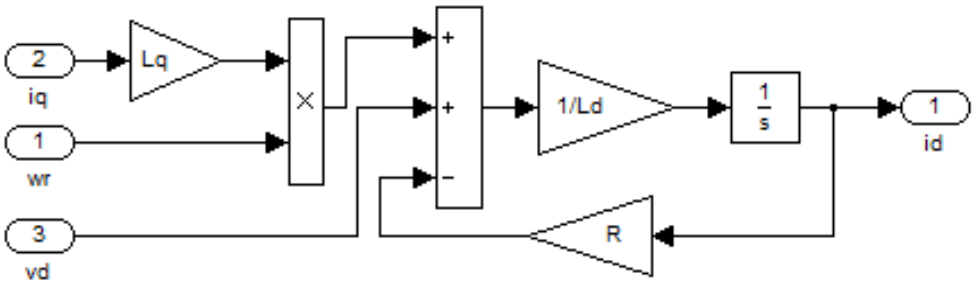
Bilindiği gibi Simulink, dinamik sistem modellerinin kurulması, benzetimi ve çözümlenmesinde kullanılan bir Matlab eklentisidir. Kullanıcılarına blok diyagramlar halinde sistemi modelleme, sistem davranışını simüle etme, sistem performansını değerlendirme ve tasarımını iyileştirme imkânı tanır. Kurulan sistemler bir laboratuar ortamındaymış gibi incelenerek bu sistemlere ait analiz ve geliştirme işlemleri yapılabilir. Simulink birçok matematiksel ifadeyle birlikte elektrik, elektronik, sinyal, ses, kontrol sistemleri gibi özel alanlara kadar yayılmış birçok blok diyagramına sahiptir. Geliştirilebilme özelliğine sahip olan Matlab, kullanıcıların kendi bloklarını oluşturmasına da olanak sağlar.

Tezin bu bölümünde 8 kutuplu bir KMSM ve onun sürülmesinde kullanılan alan yönlendirmeli PWM sürücünün Matlab/Simulink paket programında benzetimi yapılmıştır. Benzetim bütünüyle Simulink kütüphanesinde bulunan bloklar kullanılarak yapılmıştır. Benzetim sırasında kullanılan motor modeli, deneysel çalışmada kullanılan sürücü dikkate alınarak oluşturulmuştur. Daha önce de ifade edildiği gibi sürücü, alan yönlendirmeli vektör kontrol yöntemine göre tasarlanmıştır. Bu nedenle KMSM benzetimi, rotor referans düzleminde modellenerek gerçekleştirilmiştir.

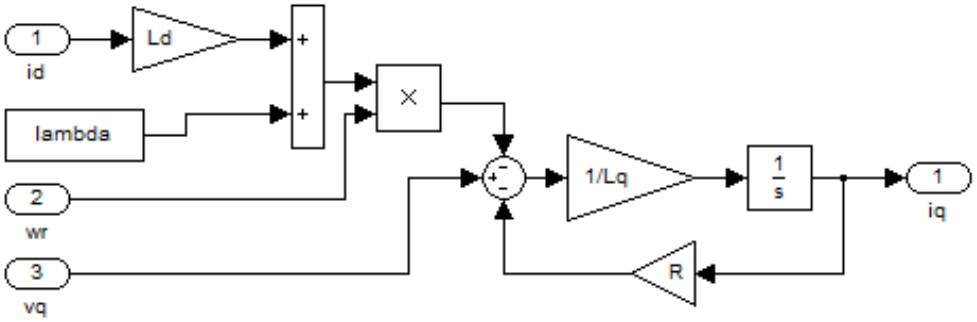
## 6.2 KMSM'nin Modellenmesi

KMSM'nin simülasyonu, yukarıda verilen (5.5), (5.7), (5.8), (5.9) ve (5.10) numaralı denklemler kullanılarak gerçekleştirilmiştir. Simülasyona başlamadan önce birtakım kabuller yapılmıştır. Bunlar; parametre değişimine neden olmasına rağmen doymanın ihmal edilmesi; indüklenen zıt emk'nın tam olarak sinüzoidal olduğu; girdap akımları ve histerezis kayıplarının ihmal edilmesi gibi kabullerdir (Muni ve ark. 1996).

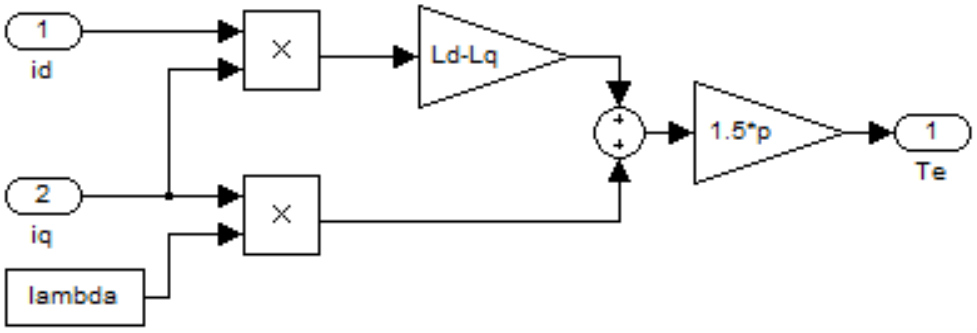
Motorun d eksen akımı, q eksen akımı ve elektromanyetik momenti için oluşturulan bloklar sırasıyla Şekil 6.1, 6.2 ve 6.3'de görülmektedir.




Şekil 6.1 $i_d$ akımı modeli.

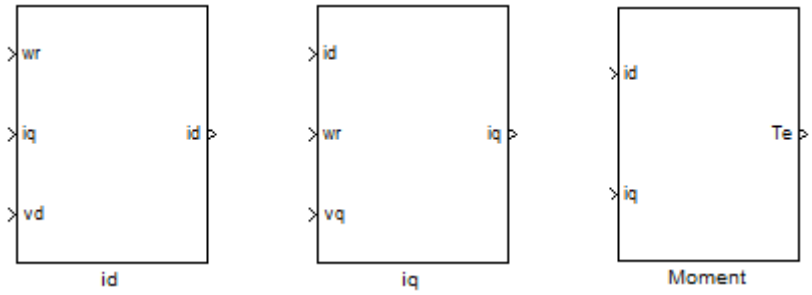



Şekil 6.2 $i_q$ akımı modeli.



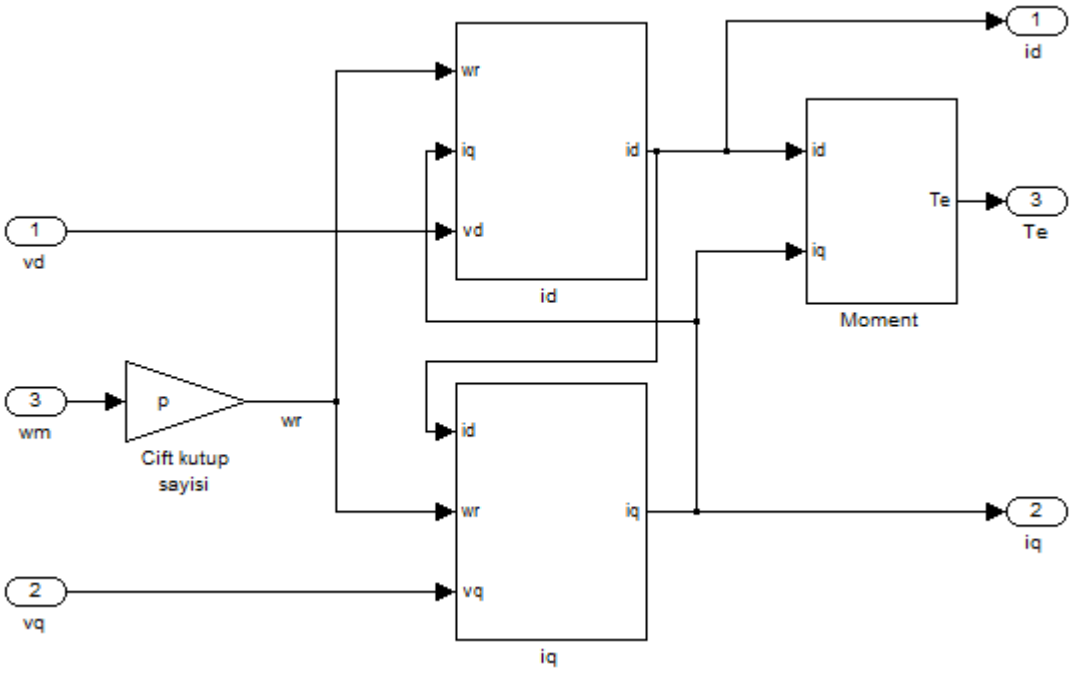

Şekil 6.3 Motorun ürettiği elektromanyetik moment modeli.

Şekil 6.1, 6.2 ve 6.3'de görülmekte olan modeller, simülasyonun oluşturulmasını ve anlaşılmasını kolaylaştırmak için alt bloklara dönüştürülmüştür. Buna göre eksen akımları ve elektromanyetik moment modellemesi için oluşturulan alt sistem blokları Şekil 6.4'de verilmiştir.

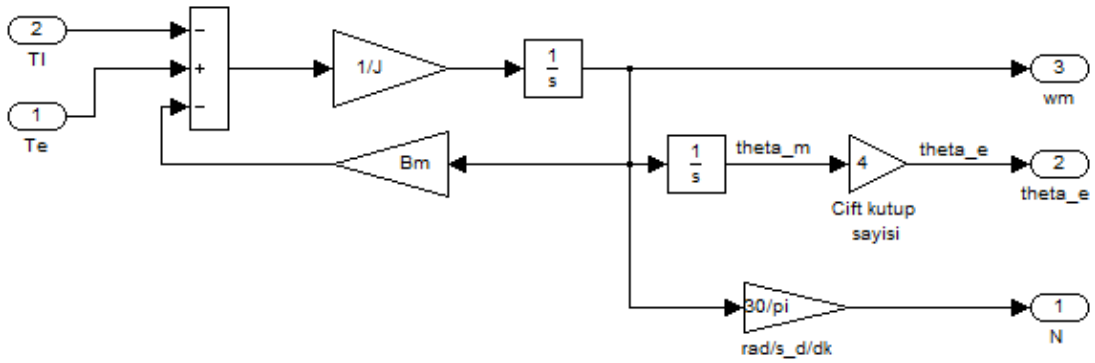



Şekil 6.4 Eksen akımları ve elektromanyetik moment modellemesi için oluşturulan alt sistem blokları.

Şekil 6.4'de verilen alt sistem blokları kullanılarak elde edilen KMSM'ye ait d-q ekseni modeli Şekil 6.5'de görülmektedir. Elektromekanik hız modeli ise Şekil 6.6'da verilmiştir.

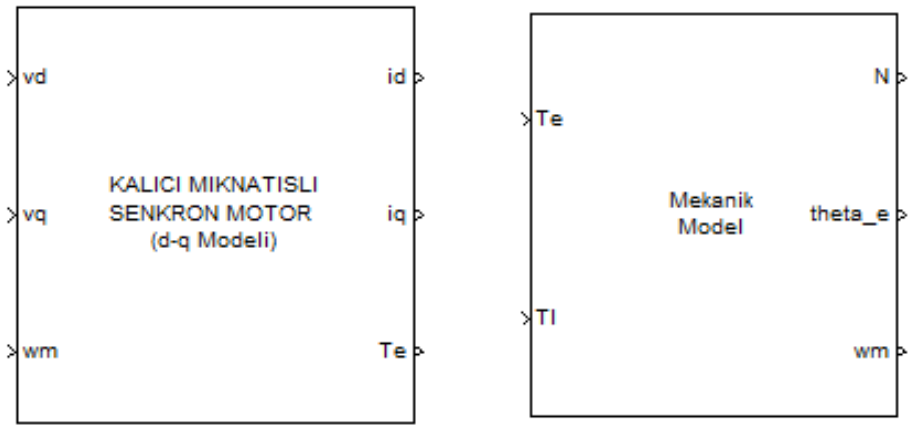



Şekil 6.5 KMSM'nin d-q ekseni modeli.




Şekil 6.6 KMSM'nin elektromekanik hız modeli.

Şekil 6.5 ve 6.6'da verilen alt sistemlerden oluşturulmuş d-q modeli ve elektromekanik hız modelleri de tek blok haline dönüştürülmüştür (Şekil 6.7).



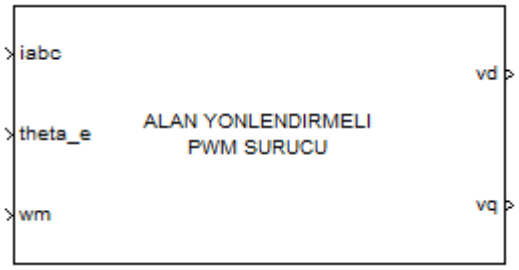

Şekil 6.7 KMSM'nin d-q ve elektromekanik hız modellerini içeren bloklar.

## 6.2 KMSM'nin Sürülmesinde Kullanılan Alan Yönlendirmeli PWM Sürücünün Modellenmesi

Akım kontrollü PWM invertörün kullanıldığı simülasyonda histerisiz akım kontrolü kullanılmıştır. Sürücü simülasyonunda mekanik hız geri beslemesi ile referans hız karşılaştırılarak bir hata sinyali elde edilmiştir. Bu sinyal PI denetleyiciden geçirilerek $i_q$ akımı için referans değer elde edilmiştir. Referans akım değerinin motora ait maksimum akım değerini geçmesini engellemek için akım sınırlayıcı blok kullanılmıştır. Kullanılan vektör kontrol yöntemi alan yönlendirmeli olduğundan d ekseni akımı için referans değer sıfırda tutulmuştur. Ardından rotor

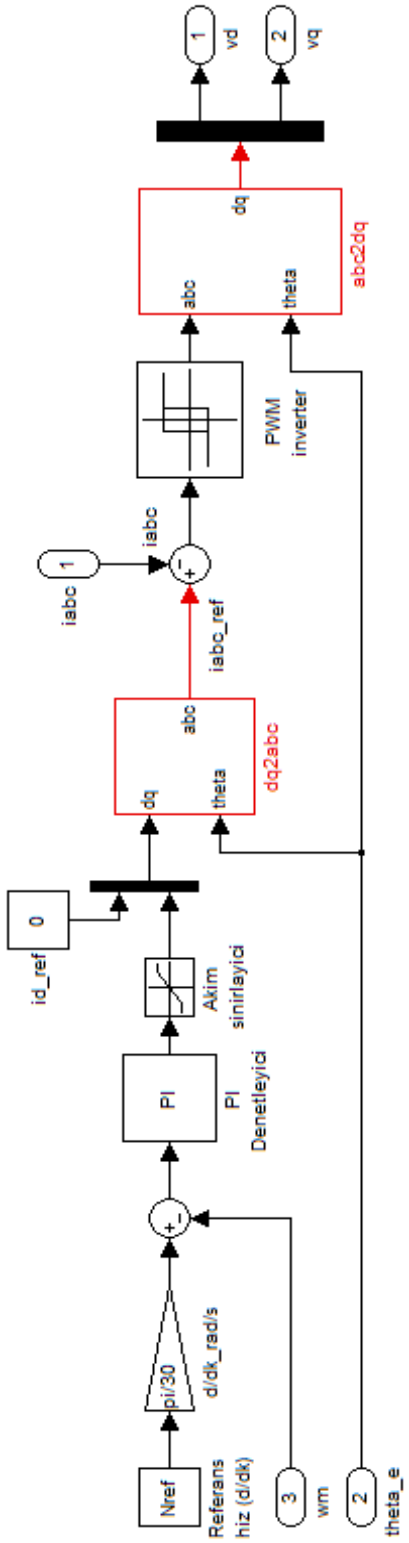
referans düzlemindeki d-q akım referansları, dönüşüm (dq2abc) bloğu ile üç fazlı sisteme dönüştürülerek üç faz için referans akım değerleri elde edilmiştir. Bu değerler, gerçek üç faz akım değerleri ile karşılaştırılarak üç faz için hata sinyali üretilmiştir. Elde edilen bu hata sinyalleri, PWM bloğunda belirlenen histerisiz aralığın dışına çıkılıp çıkılmadığına bakılarak histerisiz bandın dışına çıkılması durumunda ilgili faz sargısına uygulanan gerilimin yönü ters çevrilmiştir. Bu işlem 6 anahtarlı invertörde ilgili sargıya ait üst anahtarın kesime götürülüp alt anahtarın iletime alınmasıyla gerçekleştirilmektedir. Üç fazlı sistemde gerçekleşen bu işlemler abc2dq bloğu ile rotor referans (d-q) düzlemine aktarılarak motorun istenen momenti üretmesi sağlanmıştır.

Tüm bu işlemlerin yapıldığı alan yönlendirmeli PWM sürücüye ait blok Şekil 6.8'de görülmektedir. Bu modelin iç yapısını gösteren Simulink modeli ise Şekil 6.9'da verilmiştir.

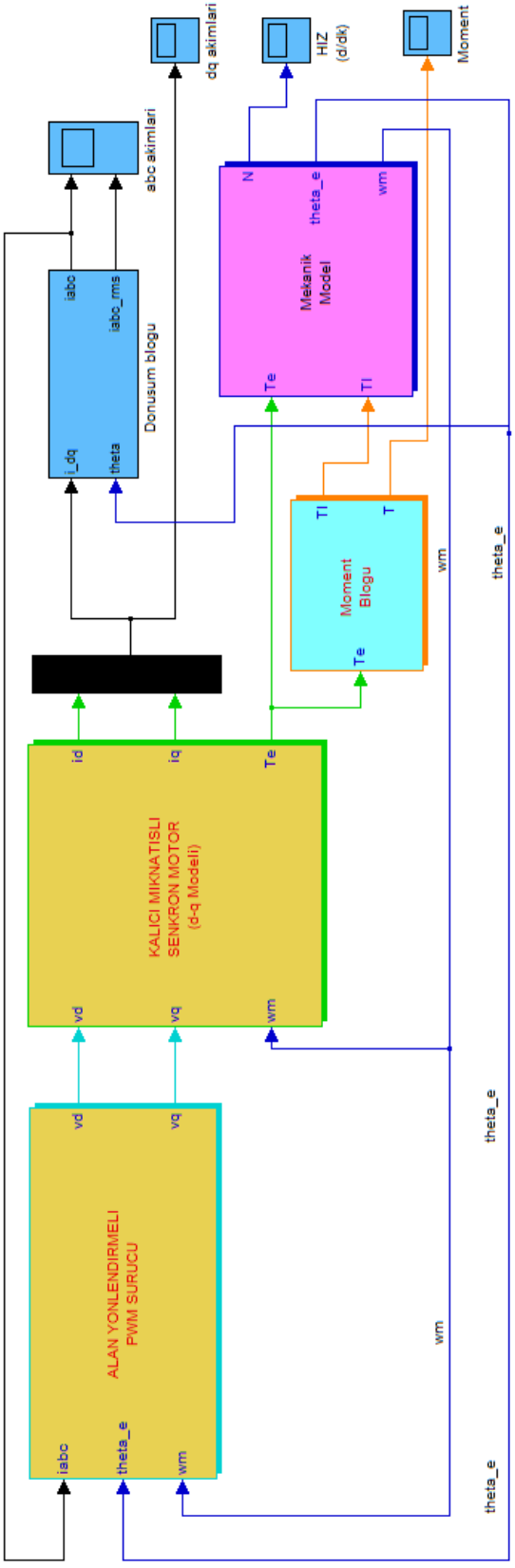



Şekil 6.8 Alan yönlendirmeli PWM sürücünün tek blok hâlindeki gösterimi.

KMSM'nin alan yönlendirmeli vektör kontrolüne ilişkin komple Simulink şeması Şekil 6.7 ve 6.8'de verilen bloklar bir araya getirilerek elde edilmiştir. Elde edilen Simulink modeli Şekil 6.10'da görülmektedir.




Şekil 6.9 KMSM'nin sürülmesinde kullanılan alan yönlendirmeli sürücünün Simulink modeli.



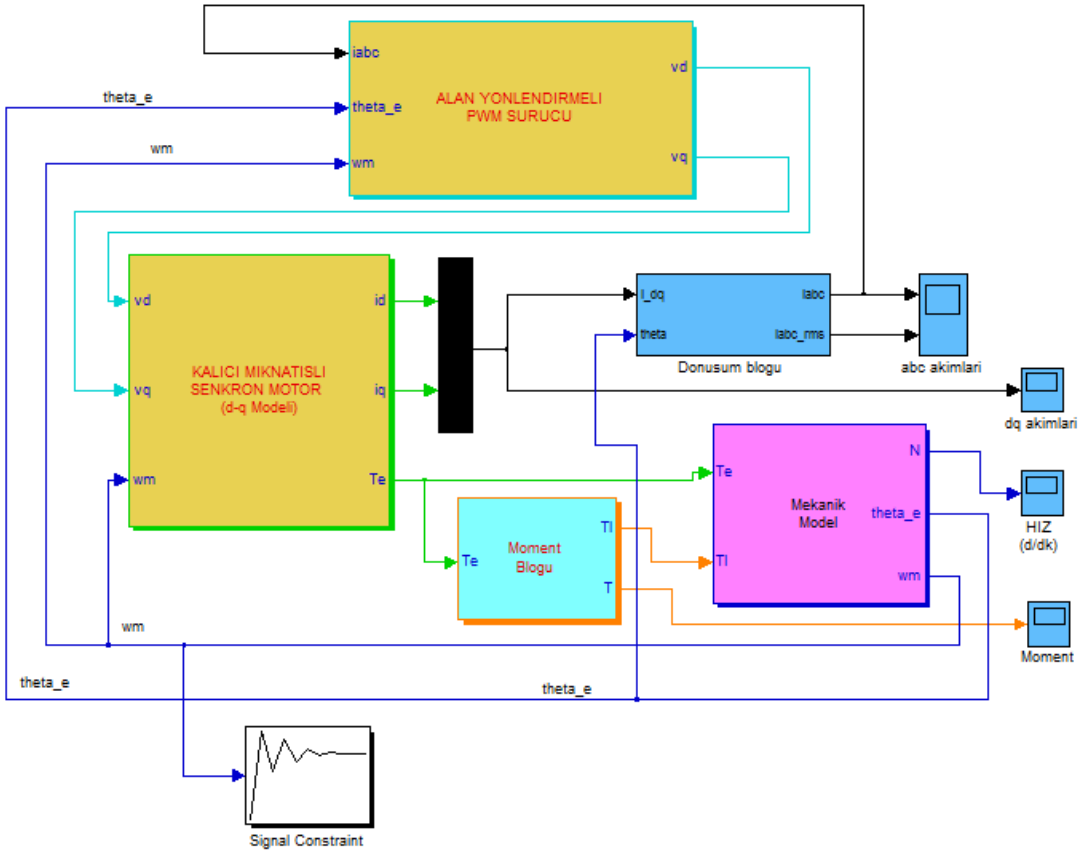

Şekil 6.10 KMSM'nin alan yönlendirmeli vektör kontrolüne ait Simulink şeması.

### 6.3 PI Denetleyici Parametrelerinin En İyileştirmesi

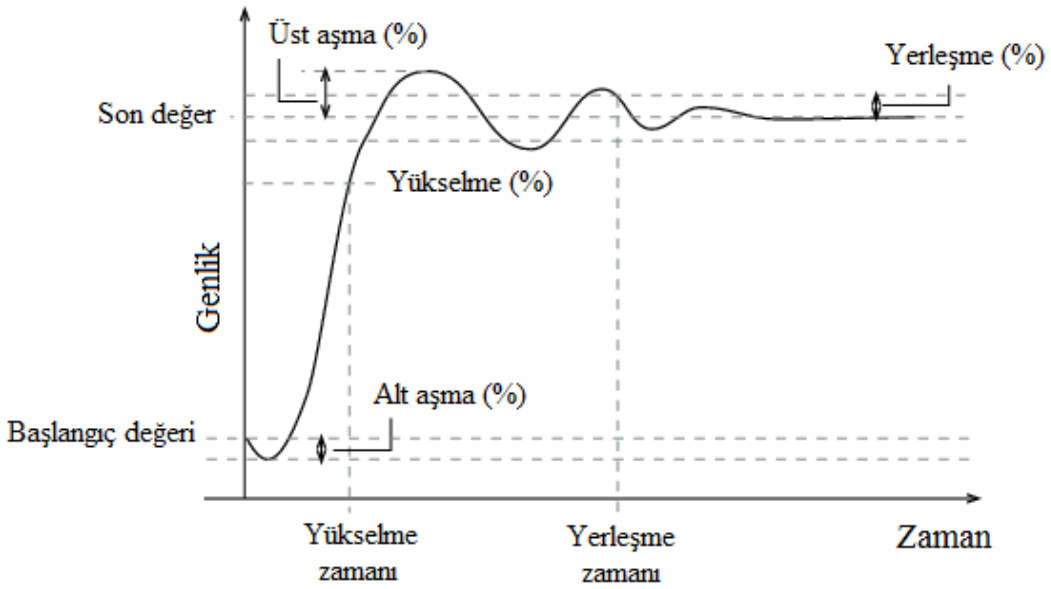
Şekil 6.9'da görülmekte olan alan yönlendirmeli PWM sürücüdeki PI denetleyicinin parametreleri, Simulink Responze Optimization araç kutusundaki Signal Constraint bloğu ile en iyileştirilerek bulunmuştur. En iyileştirme işlemi sırasında bu bloğun kullandığı algoritmalar Gradient Descent, Pattern Research ve Simplex Search'dür. Bu algoritmalardan Gradient Descent, Matlab fonksiyonlarından Optimization Toolbox fonksiyonu olan *fmincon* fonksiyonunu kullanmaktadır. İkinci algoritma olan Pattern Research algoritması ise geliştirilmiş bir yöntem olup Genetic Algorithm and Direct Search Toolbox fonksiyonlarından *patternsearch* fonksiyonunu kullanmaktadır. Üçüncü algoritma olan Simplex Search de Gradient Descent gibi Optimization Toolbox fonksiyonlarından *fmincon* fonksiyonunu kullanmaktadır. Ancak basit problemlerin çözümünde çok kullanışlıdır ve süreksizlik içeren modeller için Gradient Descent algoritmasına göre bazen daha hızlı çözüm üretebilmektedir.

En iyileştirme işleminde Signal Constraint bloğu, sistemin basamak yanıtını en iyileştirmesi istenilen ilgili bölüme yerleştirilir. Burada hız yanıtının en iyileştirmesi yapılacağından ilgili blok Şekil 6.11'de görüldüğü gibi hız geri beslemesi üzerine konulmuştur.

Şekil 6.12'de görülmekte olan yükselme zamanı, yerleşme zamanı ve aşma gibi istenilen basamak yanıtı karakteristiklerini belirlemek mümkündür. Basamak yanıtı karakteristiklerini belirlemek için Signal Constraint penceresindeki Goals menüsü altında bulunan Desired Response seçilir (Şekil 6.13). Buna ulaşmanın bir diğer yolu da Signal Constraint penceresindeki boş bir yerde bilgisayar faresinin sağ tuşunu tıklayıp açılan menüden Desired Response seçeneğini tıklamaktır. Bu işlem yapıldığında Şekil 6.14'de görülmekte olan pencereye ulaşılacaktır.

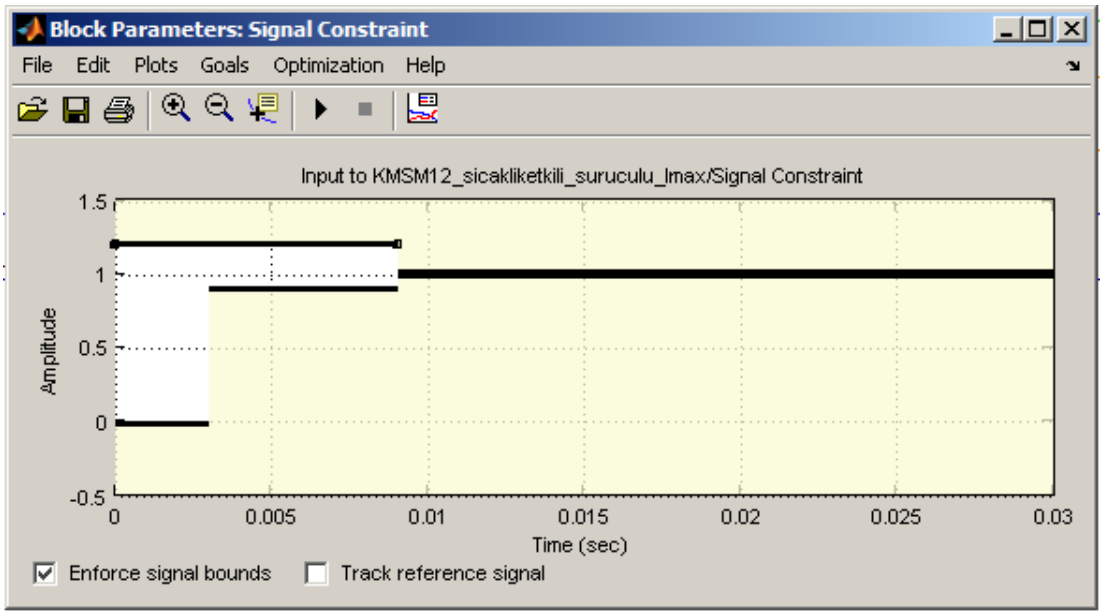



Şekil 6.11 Signal Constraint bloğunun KMSM modeline yerleştirilmesi.

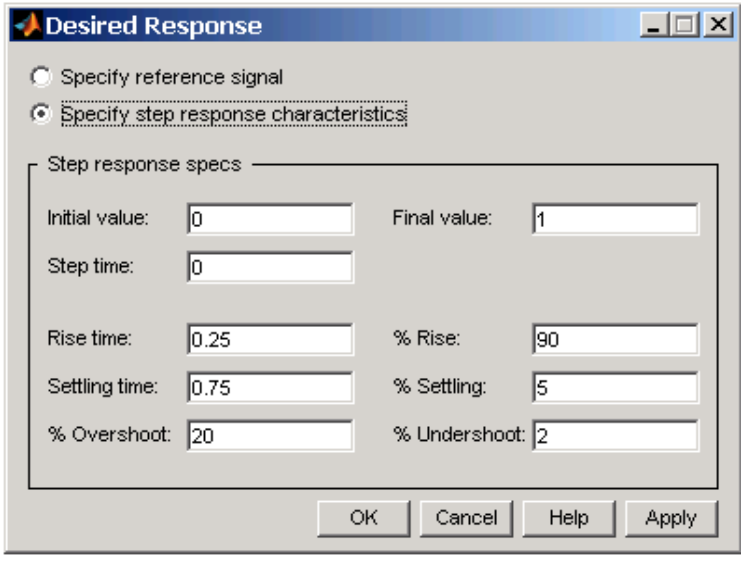



Şekil 6.12 Basamak yanıtı karakteristiklerinin tanımlanması.

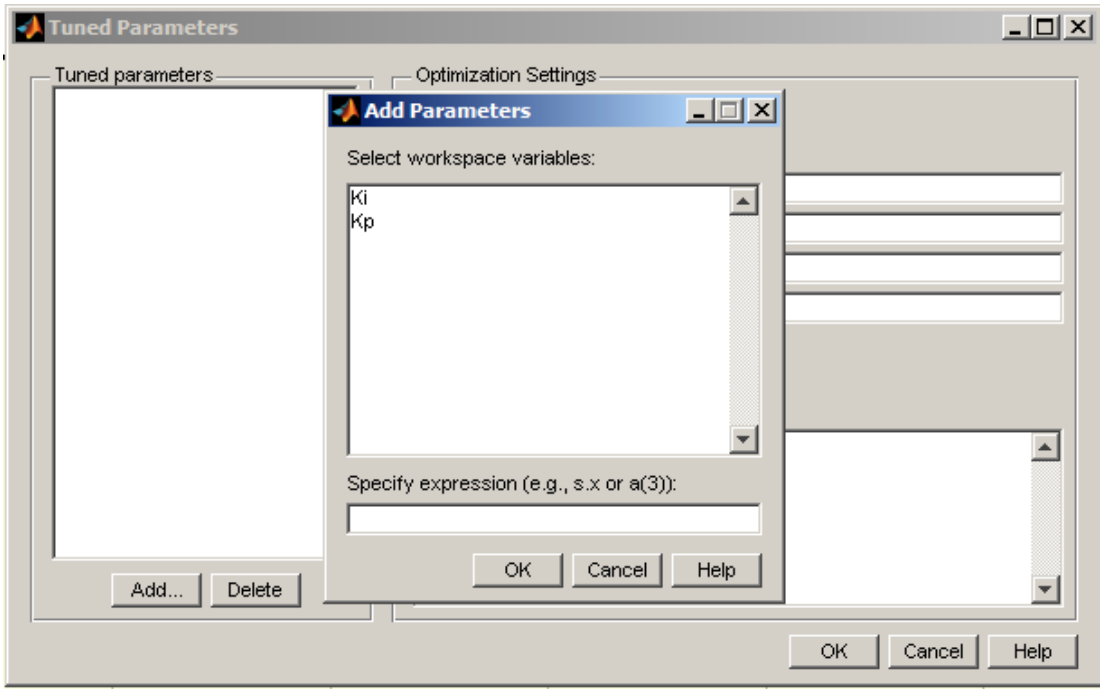
Şekil 6.14'deki pencerede arzu edilen başlangıç değeri, son değer, adım zamanı, yükselme zamanı, % olarak yükselme, % olarak yerleşme, % olarak üst ve alt aşma değerleri belirlenerek en iyileştirmenin sınırları tespit edilir. Ardından PI parametreleri olan $K_p$ ve $K_i$, Matlab'da (workspace'de) değişken olarak atanır. Bu değişkenler, Şekil 6.13'deki pencerede görülmekte olan Optimization menüsü altındaki Tuned Parameters seçeneği kullanılarak en iyileştirme işlemindeki değişkenler olarak atanır. Bu işlemin yapıldığı ekran Şekil 6.15'de görülmektedir.




Şekil 6.13 En iyileştirme işleminin yönetildiği Signal Constraint penceresi.

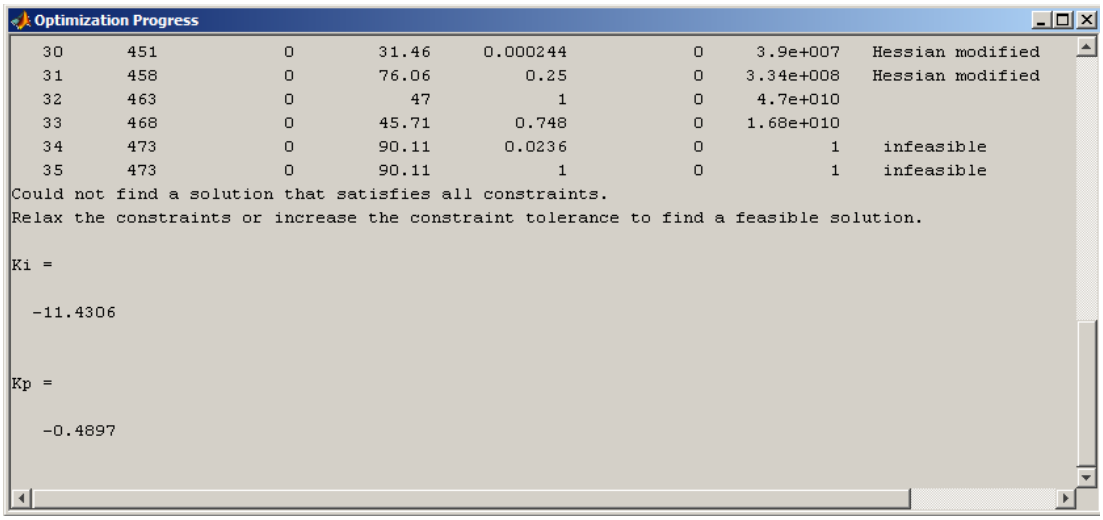



Şekil 6.14 Basamak yanıtı karakteristiklerinin belirlendiği pencere.




Şekil 6.15 PI parametrelerinin Signal Contraint bloğuna değişken olarak tanıtılması.

Tüm bu atamalar ve sınır tespitlerinden sonra en iyileştirme işlemi başlatılır. En iyileştirme işleminin sonuçlanması, sınır değerlerin durumuna bağlı olarak 3-4 saatlik bir süreyi bulabilir. Bu en iyileştirmede, şayet sınır değerleri çok bastırılmış ise işlem başarısızlıkla sonuçlanır (Şekil 6.16). Sınır değerleri biraz daha toleranslı olarak yeniden girildiğinde en iyileştirme işleminde istenilen sonuca ulaşmak mümkün olacaktır.




Şekil 6.16 En iyileştirme işleminin başarısız olduğunu gösteren ekran görüntüsü.

Yapılan bu en iyileştirme işlemleri sonucunda $K_p$=0,1786 ve $K_i$=1,87 değerlerine ulaşılmıştır.

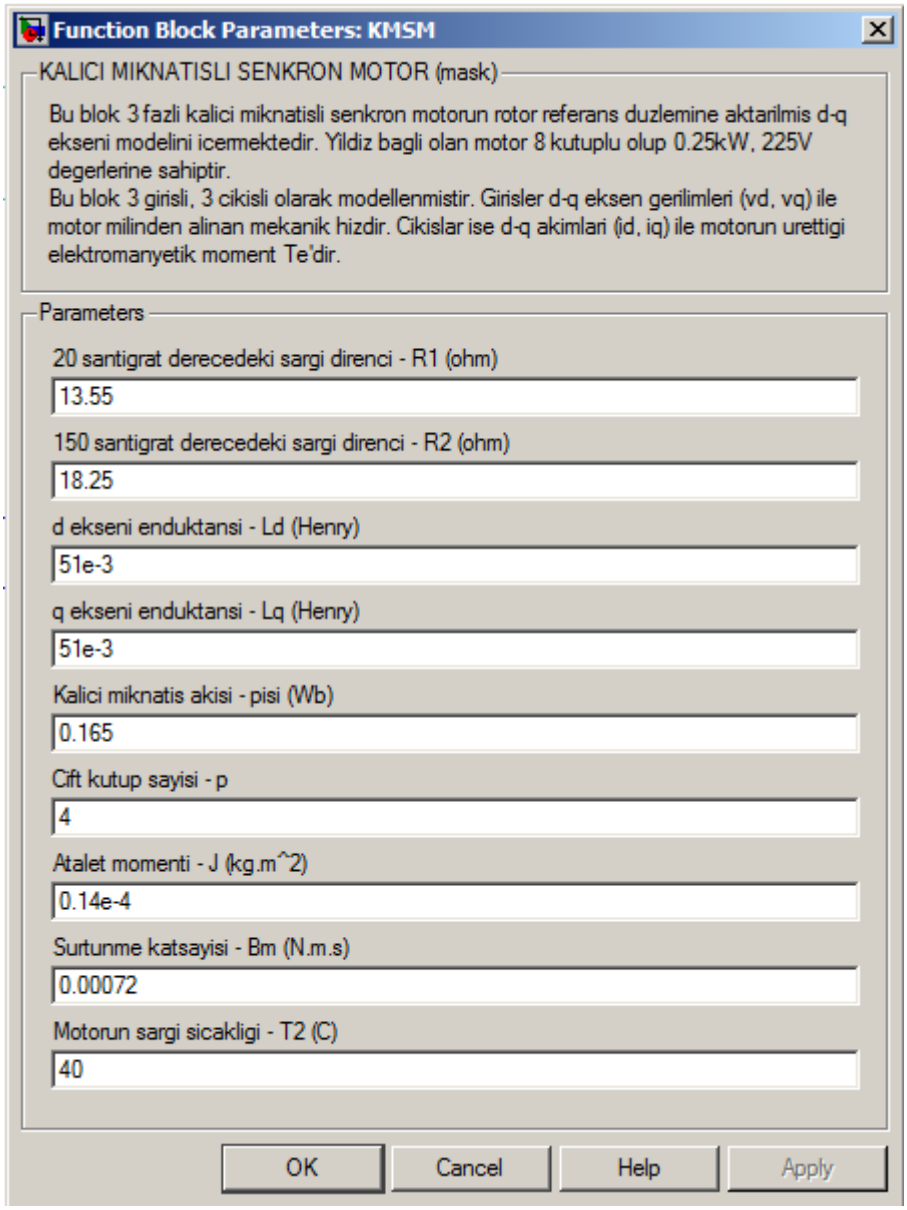
### 6.4 Simülasyonda Kullanılan Arayüzler

Simülasyonda kullanılan motor parametreleri bir noktada toplanarak verilerin girilmesi ve farklı değerler için yeniden tekrarlanması kolaylaştırılmıştır. Sargı sıcaklığındaki değişimin sargı direnci üzerindeki ve dolayısıyla akım ve diğer veriler üzerindeki etkisini görebilmek ve simülasyonun daha gerçekçi olmasını sağlamak amacıyla motor sıcaklığı da hesaplamaya dâhil edilmiştir. Deneysel çalışmada kullanılan KMSM'nin katalog bilgisinde 20 °C ve 150 °C için sargı dirençlerinin değerleri sırasıyla 13,55 Ω ve 18,25 Ω olarak verilmiştir. Bu bilgiler ışığında motorun deneyler sırasında ulaştığı sıcaklık değerine denk gelen sargı direnci denklem (6.1) ile hesaplatılmıştır.

$$R_2 = R_1\,[1 + \alpha_1(t_2 - t_1)] \tag{6.1}$$

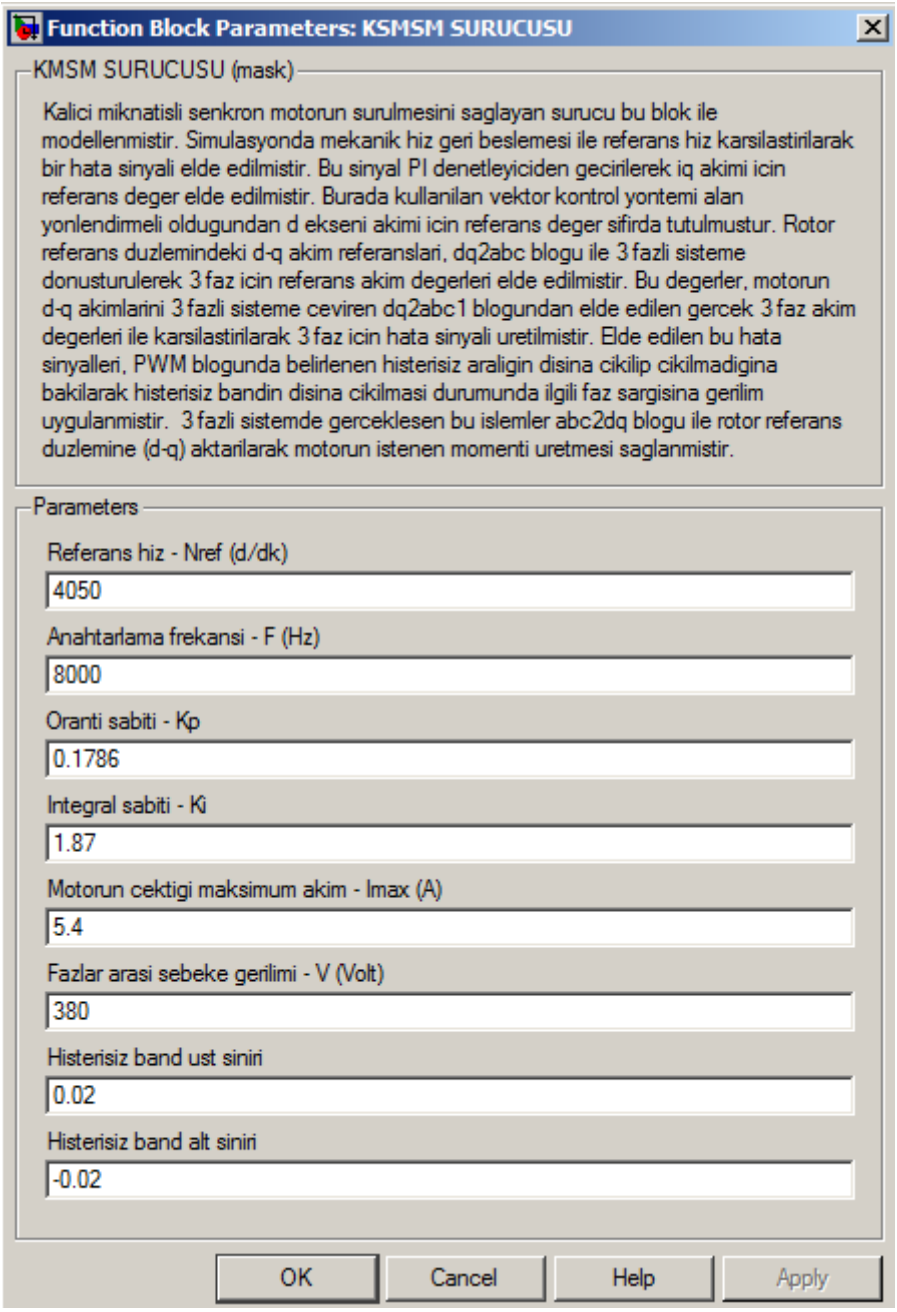
Denklemdeki $R_1$, $t_1$ sıcaklığındaki sargı direncini, $R_2$ ise $t_2$ sıcaklığındaki sargı direncini ifade etmektedir. $\alpha_1$ ise $t_1$ sıcaklığındaki direnç sıcaklık katsayısı olup 0,002668 olarak hesaplanmıştır.

Motor parametrelerinin girilmesi için oluşturulan arayüz Şekil 6.17'de görülmektedir. Arayüzdeki değerler, deneysel çalışmada kullanılan KMSM'ye ait değerlerdir.



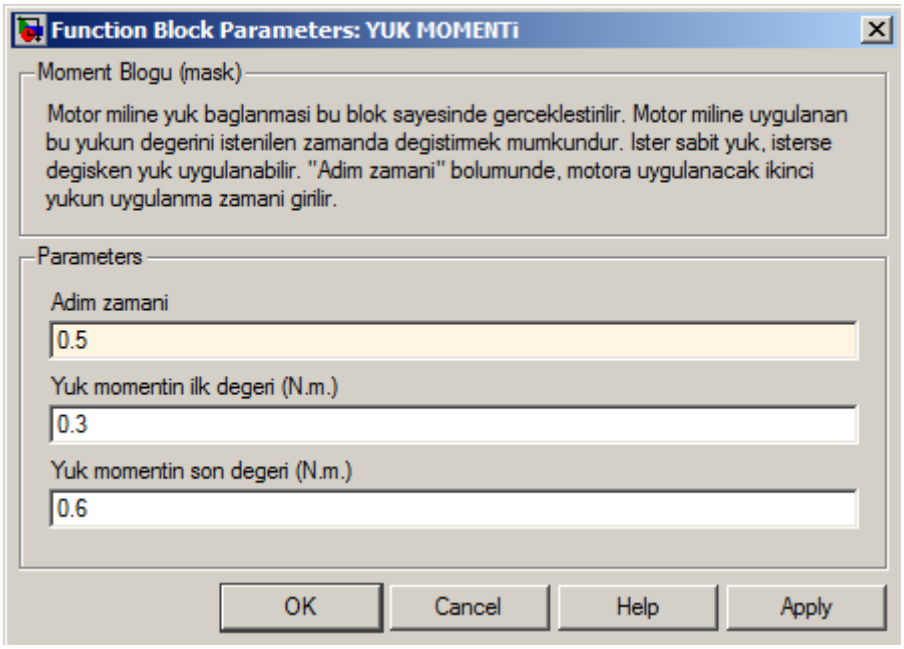

Şekil 6.17 KMSM'ye ait arayüz ve simülasyon parametreleri.

KMSM'nin sürülmesinde kullanılan alan yönlendirmeli PWM sürücüye ait arayüz ise Şekil 6.18'de verilmiştir. Şekil 6.18'de görülmekte olan bu arayüz sayesinde motorun farklı hız, anahtarlama frekansı, PI değerleri ve histerisiz bandı için vereceği yanıtları görmek çok daha kolay hâle getirilmiştir. Sürücünün anahtarlama frekansı 8 kHz olduğundan burada da anahtarlama frekansı olarak 8 kHz alınmıştır. Arayüzdeki $K_p$ ve $K_i$ dışındaki diğer tüm değerler motor ve sürücüye ait gerçek değerlerdir.




Şekil 6.18 Alan yönlendirmeli PWM sürücüye ait ara yüz ve parametreler.

Motorun farklı değerlerde yüklenmesine olanak sağlayan moment bloğuna ait arayüz Şekil 6.19'da görülmektedir. Bu arayüz sayesinde motor miline uygulanan yükün değerini istenilen zamanda değiştirmek veya motora sabit ya da değişken yük uygulayabilmek mümkündür.




Şekil 6.19 Motorun yüklenmesini sağlayan moment bloğuna ait arayüz.

# 7. KMSM'NİN ALAN YÖNLENDİRMELİ VEKTÖR KONTROLÜNE İLİŞKİN DENEYSEL ÇALIŞMA VE SİMÜLASYON SONUÇLARI

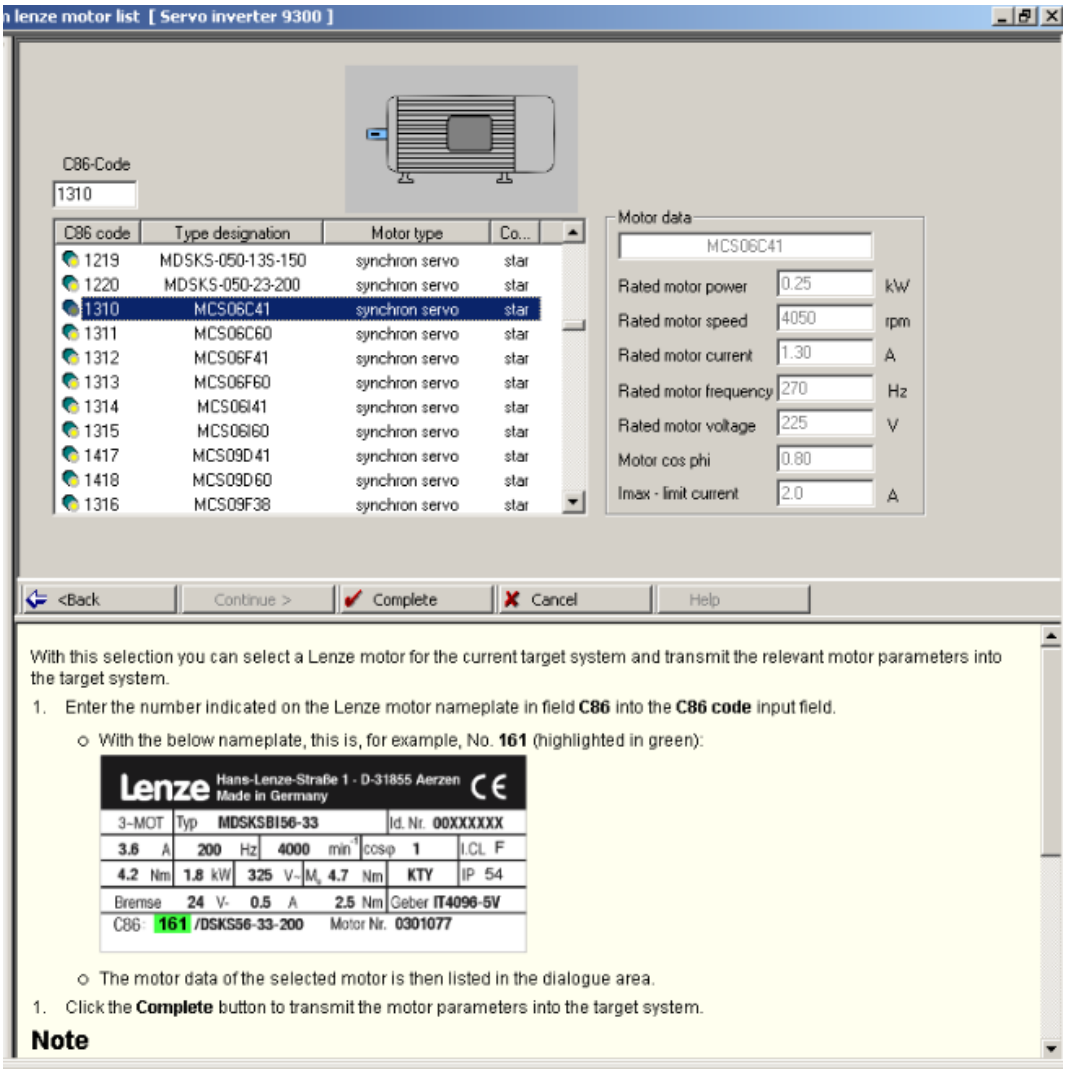
## 7.1 Giriş

Bu bölümde Matlab/Simulink paket programı kullanılarak KMSM'nin alan yönlendirmeli vektör kontrol yöntemine dayalı simülasyonu yapılmıştır. Simülasyon sonuçları Lenze firmasına ait MCS 06C41 ürün koduyla üretilen 0,25 kW'lık KMSM, EVS9322-ESV004 kodlu motor sürücüsü ve Global Drive Control arayüz programı kullanılarak test edilmiştir. Simülasyondan elde edilen değerler, motor miline akuple edilmiş DA generatörünün kademeli olarak yüklenmesiyle yapılan deneysel çalışma sonuçlarıyla karşılaştırılmıştır.

## 7.2 Deneyde kullanılan Ara Yüz Programı Ve Sürücü

Motorun sürülmesinde Lenze firmasına ait EVS9322-ESV004 kodlu motor sürücüsü kullanılmıştır. Motora ait hız, akım, gerilim ve moment değerleri ile motor ve soğutucu sıcaklıkları, Global Drive Control (GDC) isimli ara yüz programı ve farklı ölçü aletleri kullanılarak elde edilmiştir.

Lenze firması tarafından üretilen GDC isimli program, firmaya ait 8200 ve 9300 serisi sürücülerin kullanıcılar tarafından programlanmasına olanak sağlamak için geliştirilmiş bir ara yüz programıdır. Programda, sürülecek olan motora ilişkin temel katalog bilgilerini bulma ve kolayca seçme imkânı sunulmuştur (Şekil 7.1). Motor ve sürücüye ait onlarca parametrenin eş zamanlı olarak izlenmesine imkan veren bu yazılımda istenilen referans hızın birkaç saniyede girilmesi, motorun istenilen devirde dönmesini sağlamak için yeterlidir.



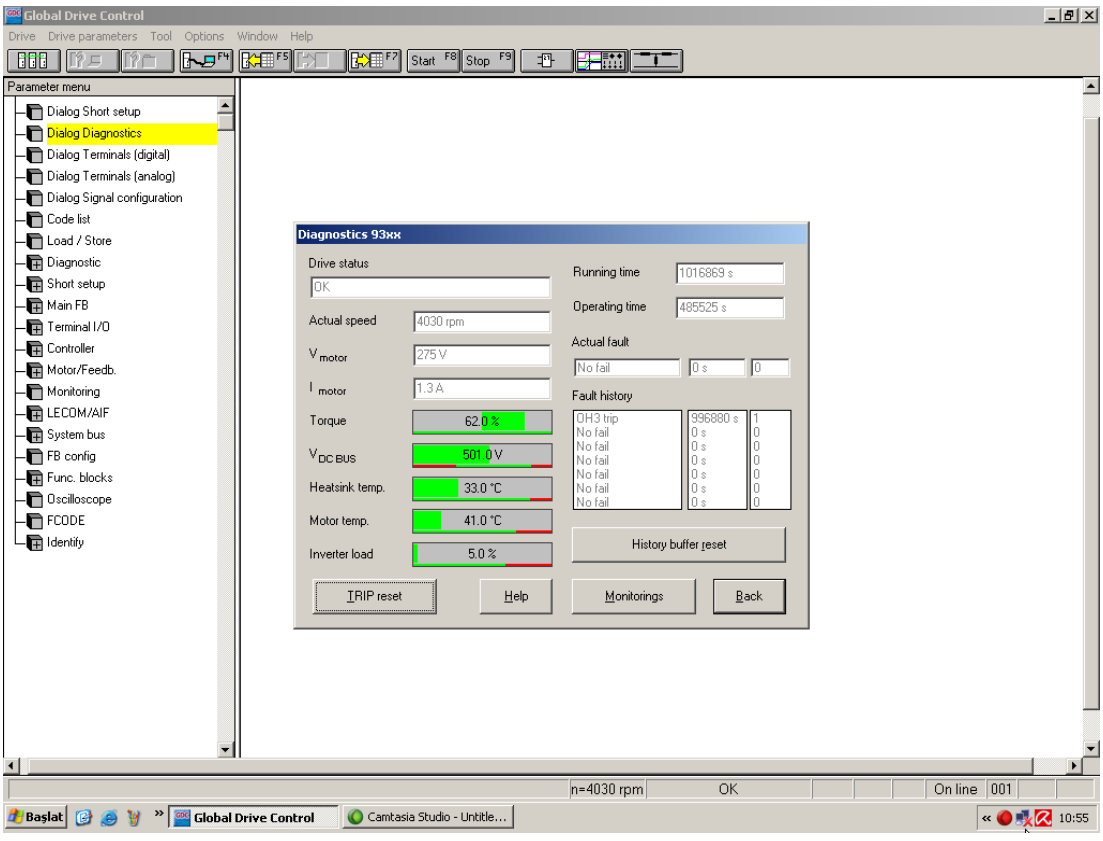

Şekil 7.1 GDC ile programlanabilecek motorlara ilişkin temel bilgilerin sunulduğu Lenze ürünleri.

Kullanıcıya hız ve moment kontrolü imkânı sağlayan GDC, motorlara ve sürücülere ait parametrelerin eş zamanlı takip ve kontrolüne de imkân sağlayarak motor ve sürücüsünün daha verimli ve güvenli kullanılmasını sağlamıştır. Bu bilgiler kullanıcıya iki farklı yolla sunulmuştur. Birincisinde en temel bilgiler verilmekte olup, bu bilgiler Şekil 7.2'de görüldüğü gibi bir sistem kontrol penceresi kanalıyla kullanıcıya sunulmaktadır.

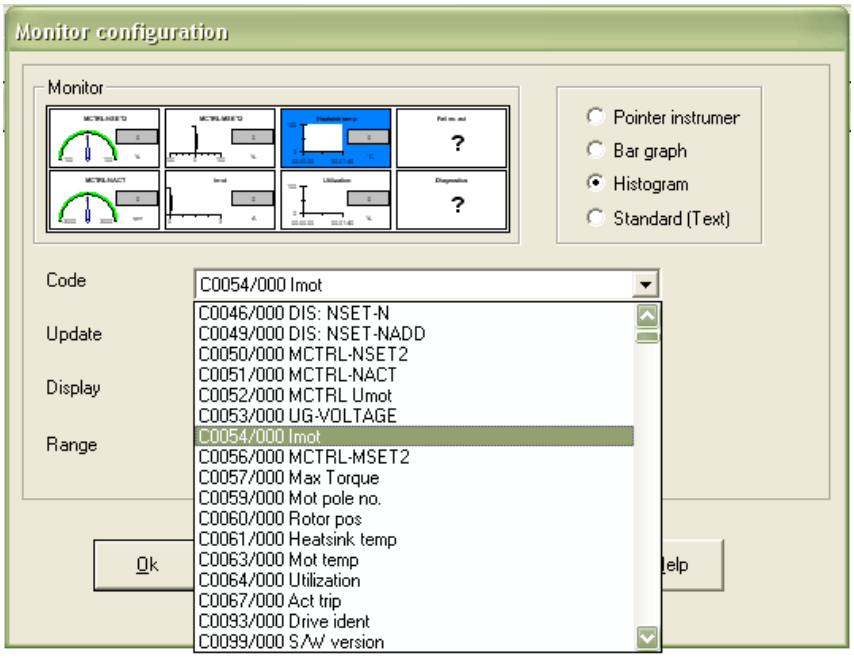
Şekil 7.2'deki pencereden tam yüklü durumdaki motora ait hız, akım, gerilim ve moment değerleri ile motor ve soğutucu sıcaklıklarına ulaşmak mümkündür. Yalnız burada dikkat edilmesi gereken bir nokta vardır ki o da ekrandaki moment

değerinin, programlama sırasında girilen maksimum moment değerinin yüzdesini vermesidir.

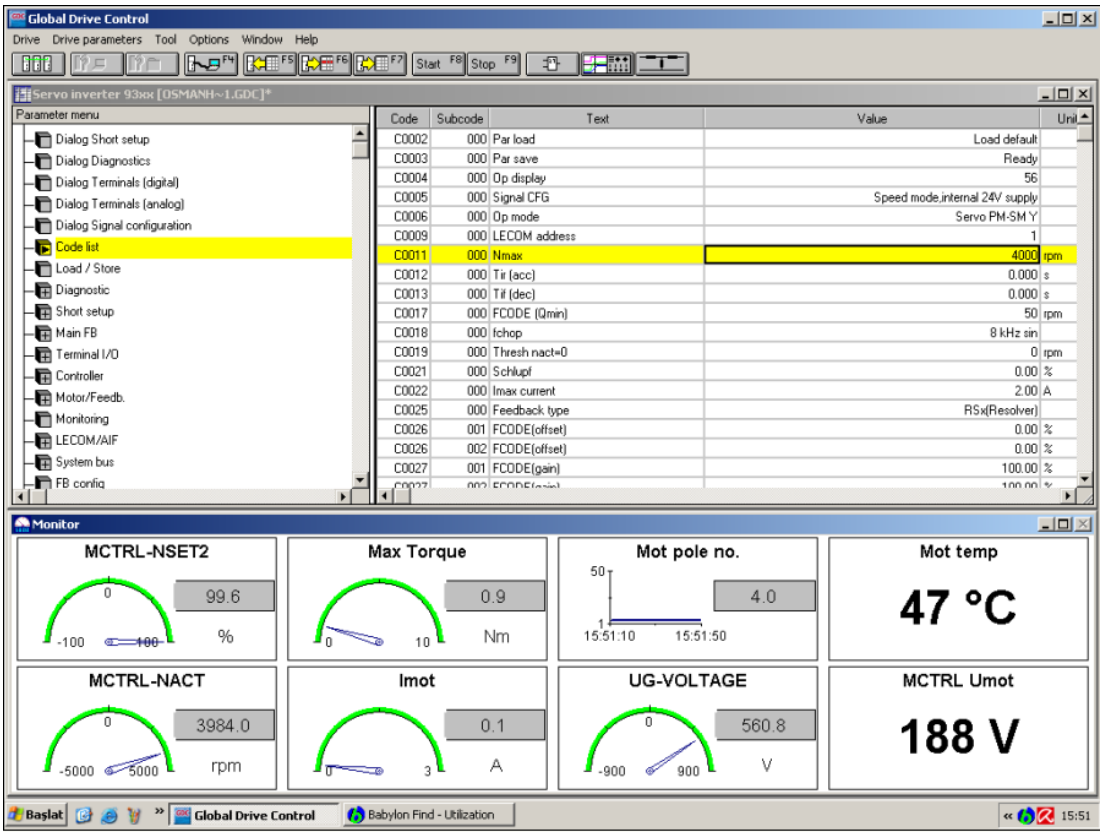
İkinci seçenekte, birinciden farklı olarak kullanıcıya istediği parametreyi seçme imkânı verilmiştir. Bu işlem Şekil 7.3'de görüleceği üzere monitör yapılandırma penceresinden yapılmaktadır. Yüzlerce parametrenin seçime göre 1 ilâ 5 saniye arasında güncellenebilmesi mümkündür. Ayrıca buradan, seçilecek olan parametrenin hangi formatta kullanıcıya sunulacağına yine kullanıcının kendisi karar verebilmektedir. Ekranda görüntülenecek parametre seçimi yapıldıktan sonra, seçilen parametrelerin anlık değişimlerini Şekil 7.4'de görülen monitörden izlemek mümkündür.




Şekil 7.2 Motor ve sürücüye ait temel verilerin sunulduğu sistem kontrol penceresi.



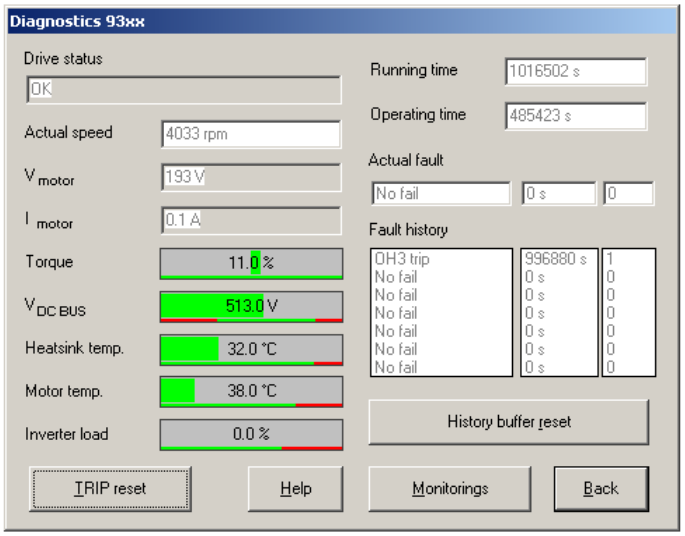

Şekil 7.3 Ekranda görüntülenecek parametre seçiminin yapıldığı pencere.



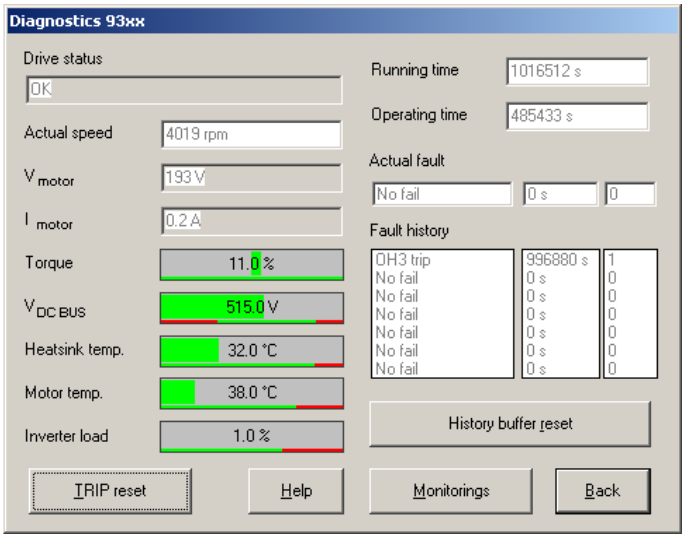

Şekil 7.4 Seçilen parametrelerin eş zamanlı olarak görüntülenmesi.

Tüm bu iyi özelliklerine rağmen GDC programında bir kararsızlık vardır. O da motor milindeki yük sabit olmasına rağmen parametrelerin sabit kalmamasıdır. Şekil 7.5, 7.6, 7.7 ve 7.8'de motor boşta çalışırken ekrandan birbiri ardına alınan dört farklı kayıt görülmektedir. Bu kayıtlar motorun boşta çalışmasına ilişkin kayıtlar olup, çalışma sırasında herhangi bir yükleme söz konusu değildir.

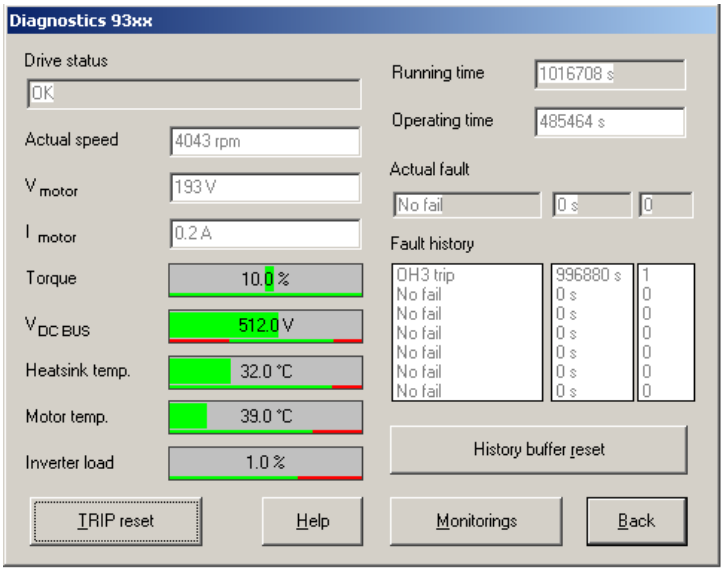
Bu dört farklı kayıt incelendiğinde hızın 4019 d/d ile 4051 d/d arasında, akımın 0,1 A ile 0,2 A arasında, momentin de % 10 ile % 11 arasında salınım yaptığı görülmektedir. Dolayısıyla ciddi bir kararsızlık söz konusudur.



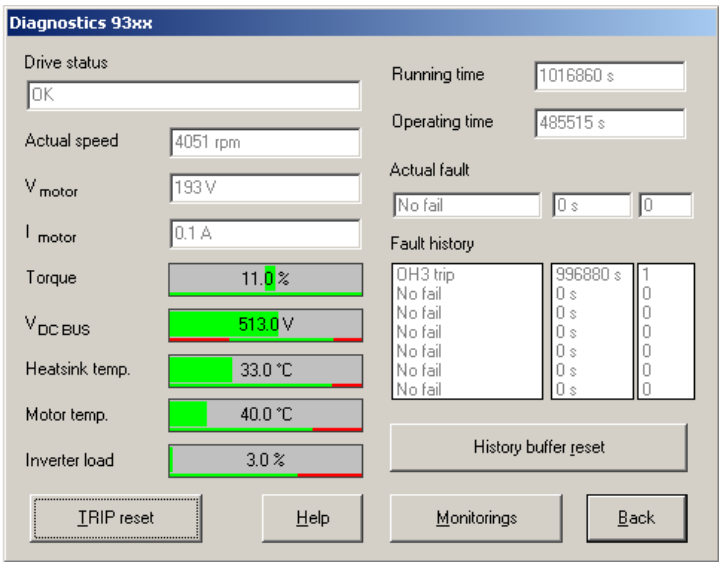

Şekil 7.5 KMSM'ye ait boşta çalışma değerleri.




Şekil 7.6 KMSM'ye ait boşta çalışma değerleri.




Şekil 7.7 KMSM'ye ait boşta çalışma değerleri.

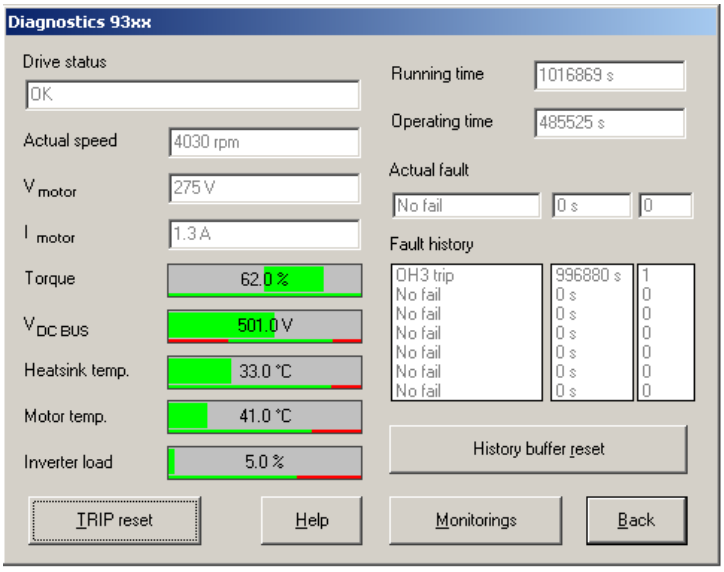



Şekil 7.8 KMSM'ye ait boşta çalışma değerleri.

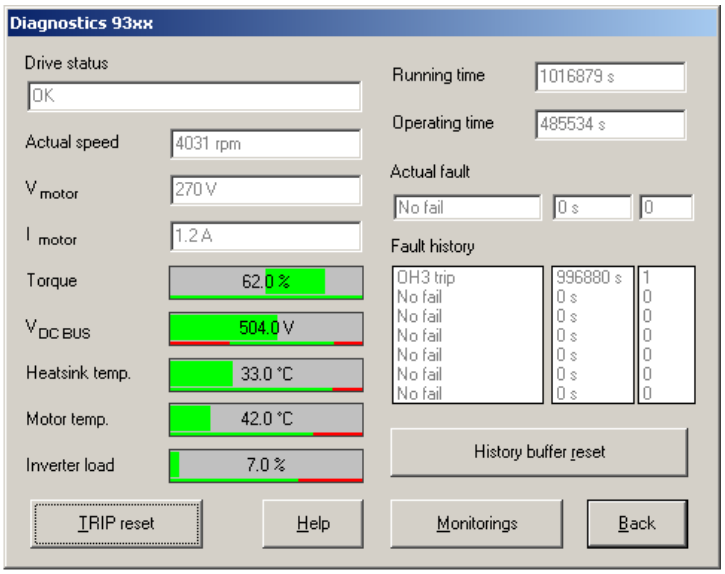
Benzer durum motorun yüklü çalışma durumlarında da geçerlidir. Örneğin Şekil 7.9 ve 7.10'da motorun tam yüklü durumda çalışmasına ilişkin ekran kayıtları görülmektedir. Bu kayıtlar incelendiğinde motorun yükü sabit olmasına karşın çektiği akımlarda bir kararsızlık olduğu görülmektedir.

Bu tür kararsızlık örneklerinin çoğaltmak mümkündür. Motora ilişkin hız değerleri 4020 d/d ile 4050 d/d arasında salınım yaptığından deney sonuçlarında ortalama değer olarak 4035 d/d alınmıştır. Simülasyonlarda kullanılacak olan motor

sıcaklığı değerleri de buradan alınmıştır. Ancak akım ölçümü için bu ara yüz kullanılmamıştır.




Şekil 7.9 KMSM'ye ait tam yük çalışma değerleri.




Şekil 7.10 KMSM'ye ait tam yük çalışma değerleri.

Akım ölçümünde bu ara yüzün kullanılmayışının iki nedeni vardır. Birincisi, akım değerinde bir kararsızlığın olmasıdır. İkincisi ise ölçümün virgülden sonra tek haneyi kapsamasıdır. Dolayısıyla simülasyon sonuçlarının deney sonuçları ile kıyaslanabilmesi ve yapılan benzetimin doğruluğunu görebilmek için biraz daha hassas ölçümlerin yapılması zorunludur. Bu nedenle akım ölçümleri için dijital

ampermetre kullanılmıştır. Ancak tüm yük seçenekleri için alınan bu ekran kayıtları bilgi amaçlı olarak verilecektir.

### 7.3 Deneyde Kullanılan KMSM Ve Özellikleri

Deneysel çalışmada kullanılan yüzey mıknatıslı KMSM'ye ait etiket Şekil 7.11'de görülmektedir. Etikette olmayan diğer özellikler ise Çizelge 7.1'de verilmiştir.




Şekil 7.11 Deneyde kullanılan KMSM'nin etiketi.

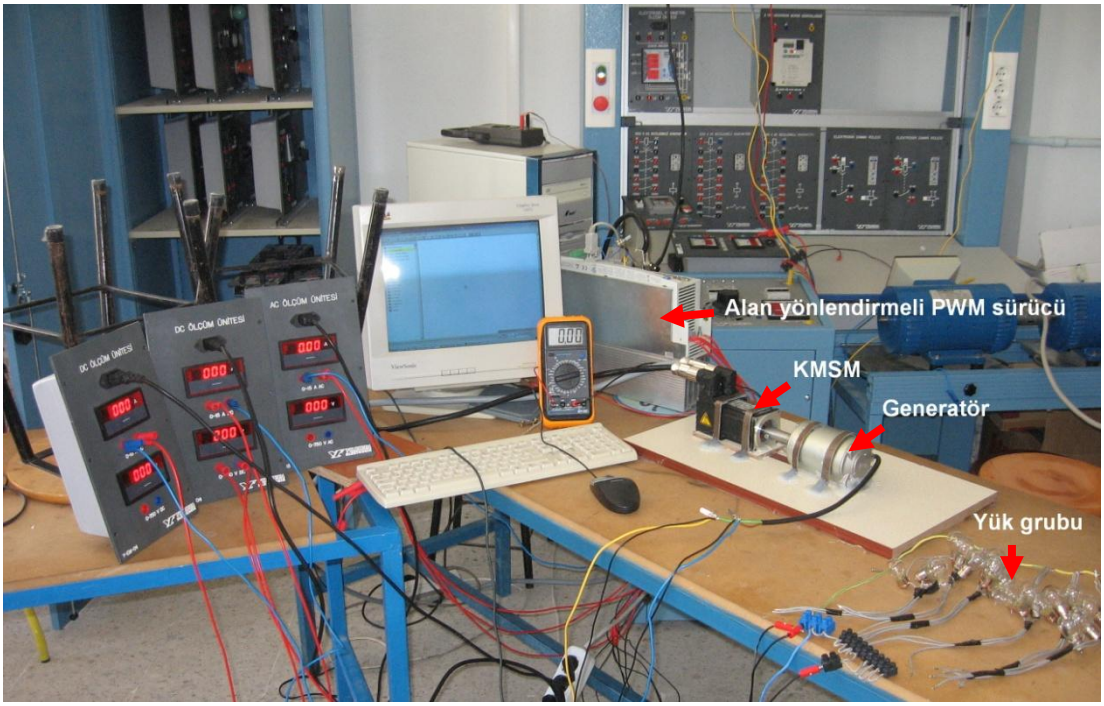
Çizelge 7.1 Deneysel çalışmada kullanılan KMSM'nin özellikleri.

| | |
|---|---|
| Üretici firma | Lenze |
| Kutup sayısı | 8 |
| Sargı bağlantı türü | Yıldız |
| Anma devri (d/d) | 4050 |
| Maksimum hız (d/d) | 8000 |
| Anma momenti (Nm) | 0,6 |
| Maksimum moment (Nm) | 2,4 |
| Anma gücü (kW) | 0,25 |
| Anma akımı (A) | 1,3 |
| Maksimum akım (A) | 5,4 |
| Anma gerilimi (V) | 225 |
| Anma frekansı (Hz) | 270 |
| Verim (%) | 65 |
| Atalet momenti (kg $m^2$. $10^{-4}$) | 0,14 |
| 20 ºC için fazlar arası sargı direnci (Ω) | 27,1 |
| 150 ºC için fazlar arası sargı direnci (Ω) | 36,5 |
| Sargı endüktansı (mH) | 51 |
| Rotor manyetik akısı (Wb) | 0,168 |

KMSM ve sürücüsüne ait simülasyon, motorun hızı, sıcaklığı ve ürettiği moment değerleri girilerek yapılacağından öncelikle deneysel çalışma yapılmıştır.

### 7.4 Deneysel Çalışma Ve Sonuçları

Şekil 7.12'de görüleceği üzere KMSM'yi yükleyebilmek için motor miline DA generatör akuple edilmiştir. Generatör, KORMAS isimli firma tarafından 671 150 01 (12V) ürün koduyla üretilmiş olup 12V, 0.8A-13A, 190W, 2900d/d plaka değerlerine sahiptir. Generatör 12 V'luk 20 W gücündeki lambalar kullanılarak yüklenmiştir.




Şekil 7.12 Deneysel çalışma düzeneği.

Yapılan deneylerde KMSM miline generatör yüksüz olarak bağlıyken generatörün KMSM'nin miline verdiği ilave yükün 16 W olduğu hesaplanmıştır. Hesaplama işlemi şu şekilde yapılmıştır:

Mil gücünün hesaplanmasında GDC arayüz programı kullanılmıştır. Generatör, yüksüz durumda KMSM'ye akuple bağlanarak motor anma hızında çalıştırılmış ve GDC'den moment ve hız bilgileri alınmıştır. Bu bilgiler denklem (7.1)'de yerine konularak motorun mil gücü 38 W olarak hesaplanmıştır. Ardından motor miline akuple olan generatör çıkartılarak motor tekrar çalıştırılmış ve GDC'den moment ve

hız bilgileri alınmıştır. Bu durumda motorun mil gücü 22 W olarak hesaplanmıştır. Daha sonra generatörün KMSM'ye bağlı ve bağlı olmadığı her iki güç değerleri kullanılarak generatörün yüksüz olarak motor miline bağlanması durumunda motora 16 W'lık bir yük bindirdiği hesaplanmıştır.

$$P_{mil} = T_s \cdot \omega_r \tag{7.1}$$

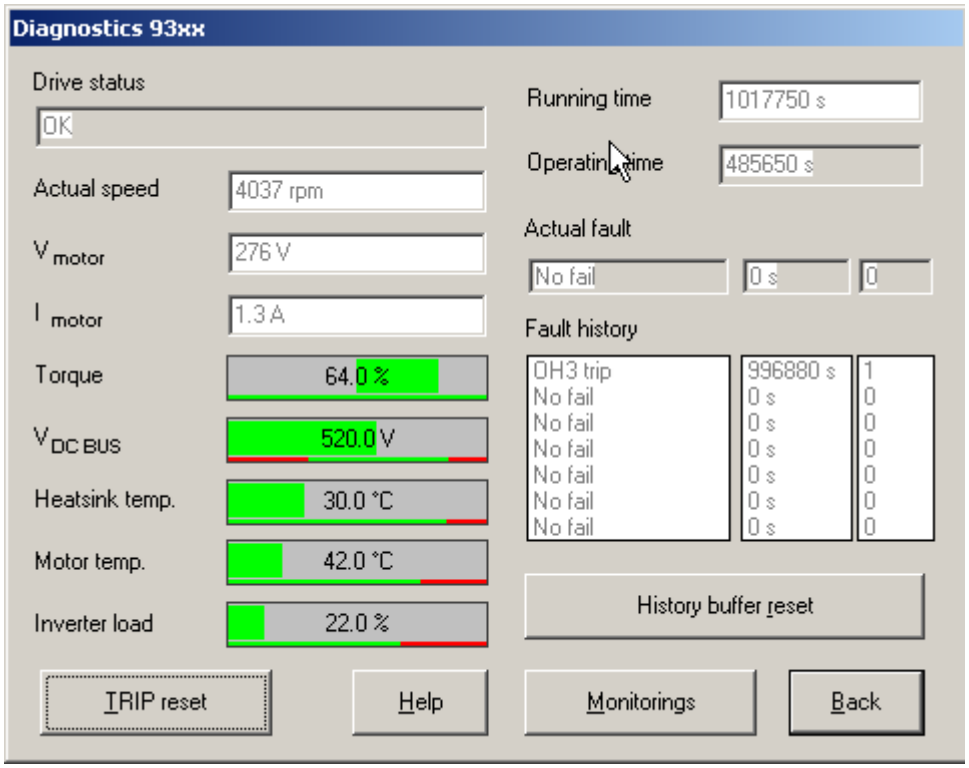
Denklem (7.1)'deki $P_{mil}$ mil gücünü, $T_s$ ifadesi sabit yükte motorun ürettiği sürekli momenti simgelemektedir. $\omega_r$ ise rotorun açısal hızıdır.

Ardından 20 W gücündeki 12 V'luk 20 adet lamba kullanılarak KMSM'nin tam yükle yüklenmesi sağlanmıştır. Aynı deney yük sayısı kademeli olarak azaltılmak suretiyle tekrarlanmıştır. Bu durumda endüvi sargı direnci 0,3 Ω olan generatörün lambalara sağladığı güç ile KMSM'nin vermiş olduğu mil gücü Çizelge 7.2'de detaylı olarak görülmektedir. Yapılan deneylerde motorun devri 4020 ile 4050 d/d arasında salınım yaptığından çizelgede ortalama değer olarak 4035 d/d verilmiştir.

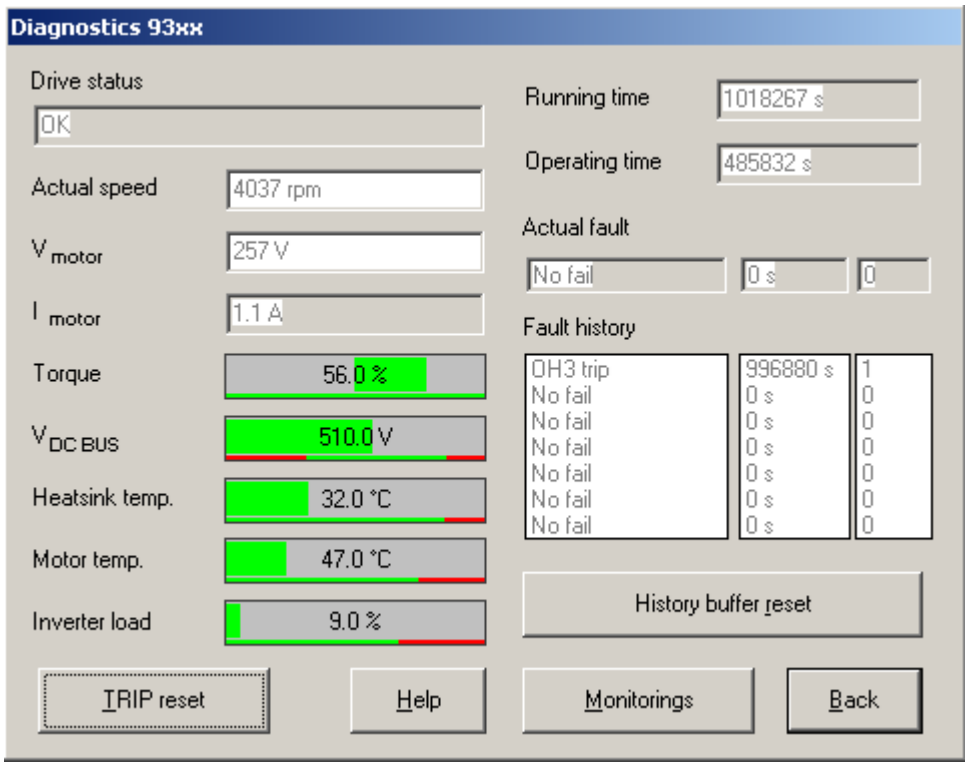
Çizelge 7.2 Deney sonuçları.

| Yük sayısı (Adet) | KMSM'ye Ait Ölçüm Sonuçları | | | DA Generatörüne Ait Sonuçlar | | | | | KMSM'ye Ait Hesaplama Sonuçları | |
|---|---|---|---|---|---|---|---|---|---|---|
| | | | | Ölçüm | | Hesaplama | | | | |
| | T (ºC) | n (d/d) | I (A) | I (A) | U (V) | P (W) | $P_{cu}$ (W) | ΣP (W) | $P_{mil}$ (W) | $T_s$ (Nm) |
| 20 | 41 | 4035 | 1,30 | 20,5 | 5,8 | 118,5 | 126,6 | 245,1 | 261,08 | 0,62 |
| 18 | 45 | 4035 | 1,25 | 19,1 | 6,0 | 114,6 | 109,4 | 224,0 | 240 | 0,57 |
| 16 | 49 | 4035 | 1,16 | 17,8 | 6,5 | 115,2 | 95,5 | 210,7 | 226,7 | 0,54 |
| 14 | 51 | 4035 | 1,12 | 17,1 | 6,6 | 112,9 | 87,8 | 200,8 | 216,8 | 0,51 |
| 12 | 52 | 4035 | 1,01 | 15,0 | 7,5 | 111,6 | 67,1 | 178,7 | 194,7 | 0,46 |
| 10 | 54 | 4035 | 0,97 | 14,1 | 7,8 | 110,0 | 59,4 | 169,4 | 185,4 | 0,44 |
| 8 | 54 | 4035 | 0,83 | 11,4 | 9,1 | 103,5 | 39,1 | 142,5 | 158,5 | 0,38 |
| 6 | 54 | 4035 | 0,74 | 9,2 | 10,1 | 92,8 | 25,5 | 118,3 | 134,3 | 0,32 |
| 4 | 54 | 4035 | 0,61 | 6,6 | 11,3 | 74,9 | 13,1 | 88,1 | 104,1 | 0,25 |
| 0 | 45 | 4035 | 0,36 | - | 15,3 | - | - | - | 38 | 0,04 |

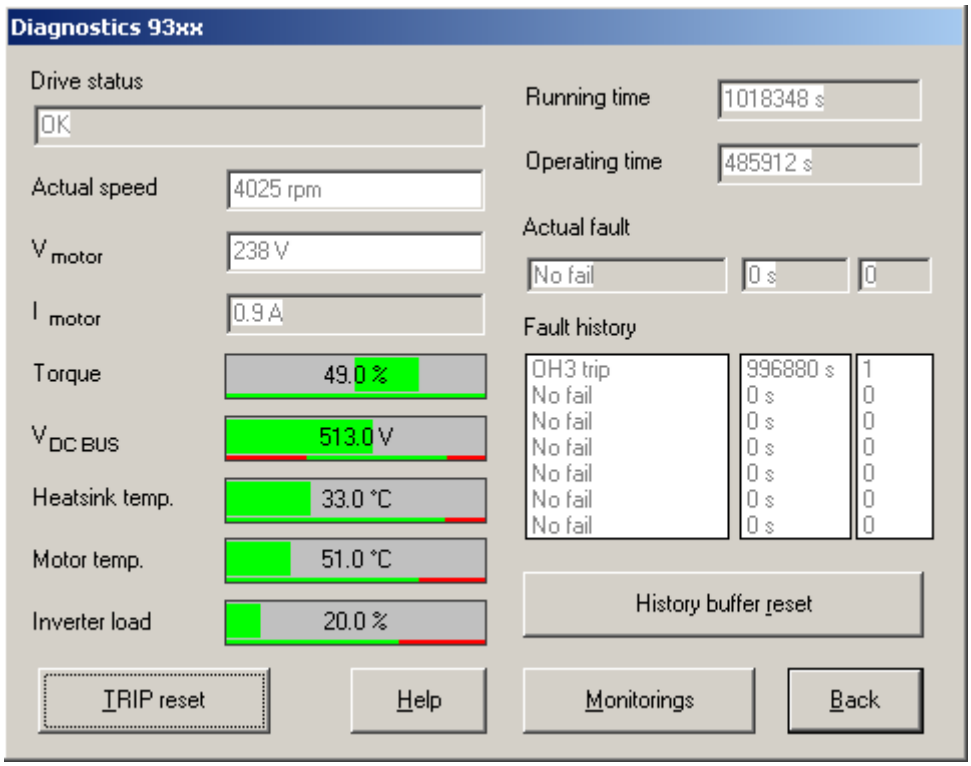
Tüm yük seçenekleri için alınan anlık ekran kayıtlarından bazıları Şekil 7.13-Şekil 7.18'de sunulmuştur.



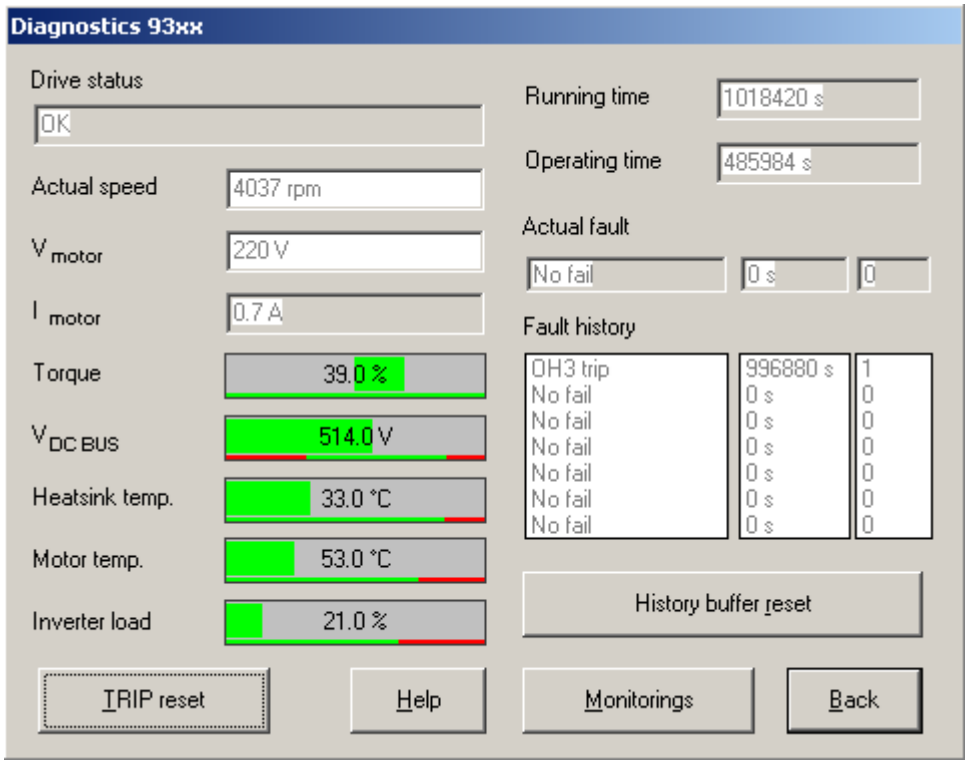

Şekil 7.13 Tam yük (0,62Nm) durumunda GDC'den alınan anlık ekran kaydı.



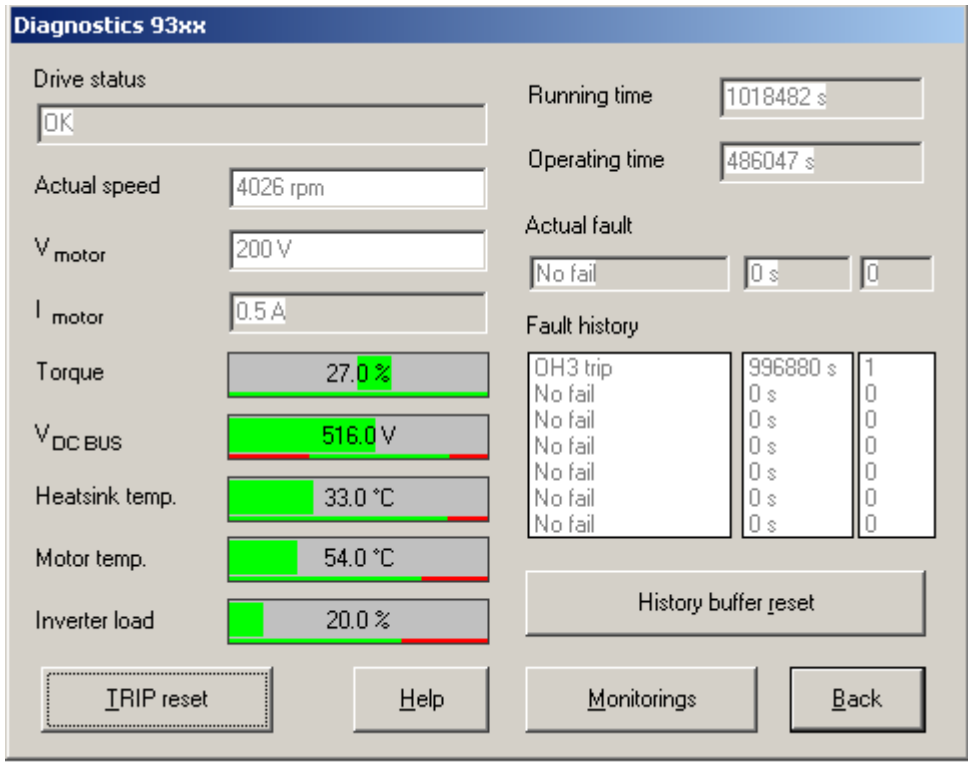

Şekil 7.14 0,54Nm durumunda GDC'den alınan anlık ekran kaydı.



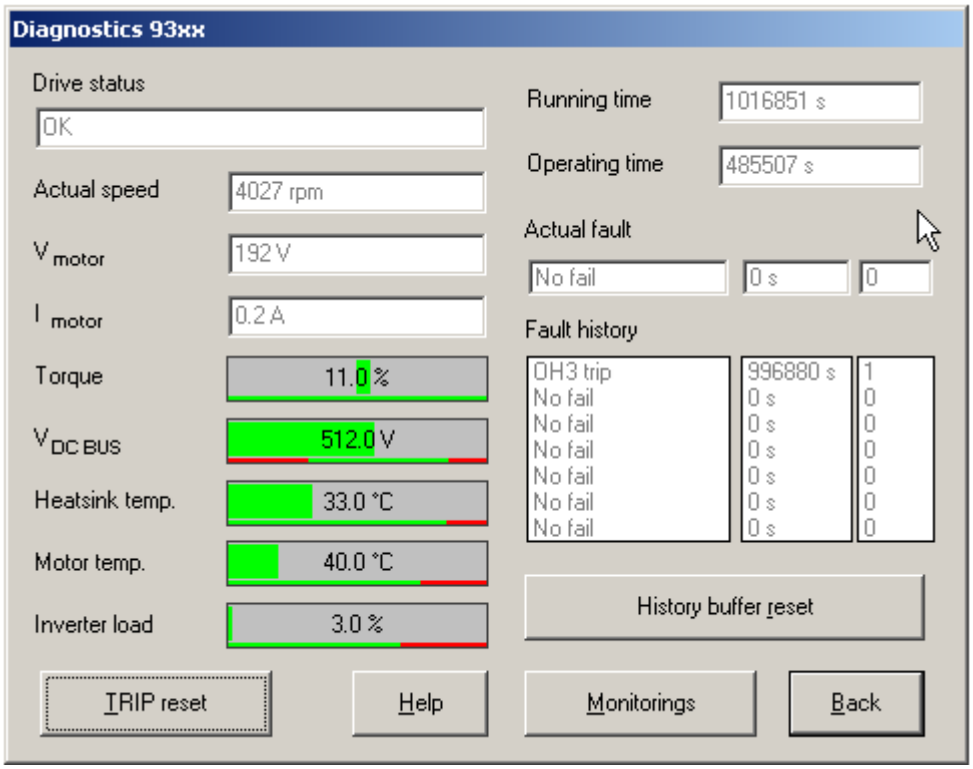

Şekil 7.15 0,46Nm durumunda GDC'den alınan anlık ekran kaydı.




Şekil 7.16 0,38Nm durumunda GDC'den alınan anlık ekran kaydı.




Şekil 7.17 0,25Nm durumunda GDC'den alınan anlık ekran kaydı.

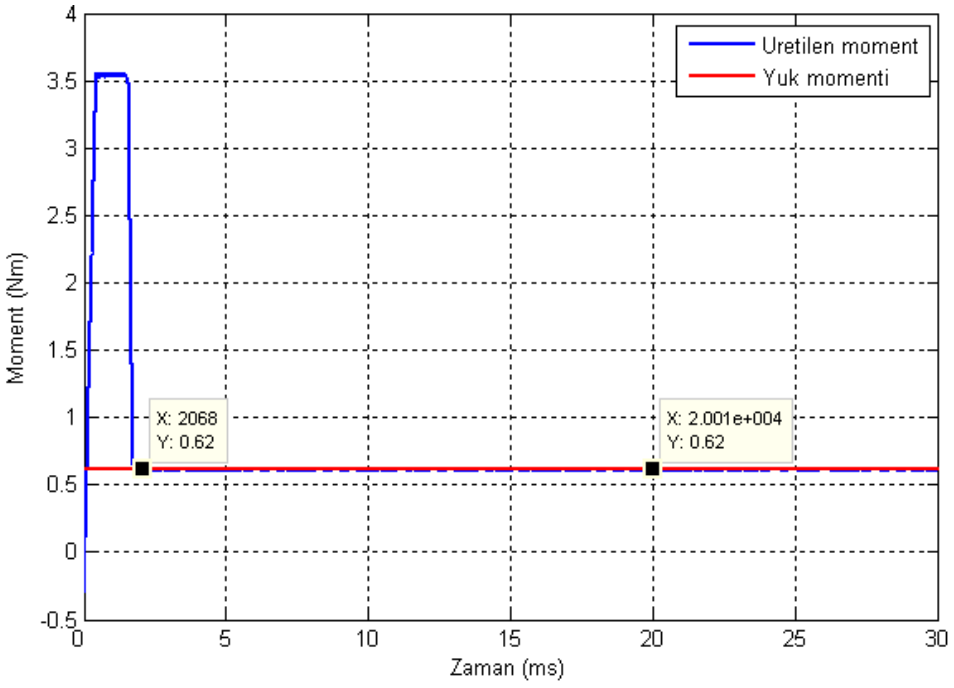



Şekil 7.18 Boşta çalışma (0,04Nm) durumunda GDC'den alınan anlık ekran kaydı.

## 7.5 Simülasyon Sonuçları

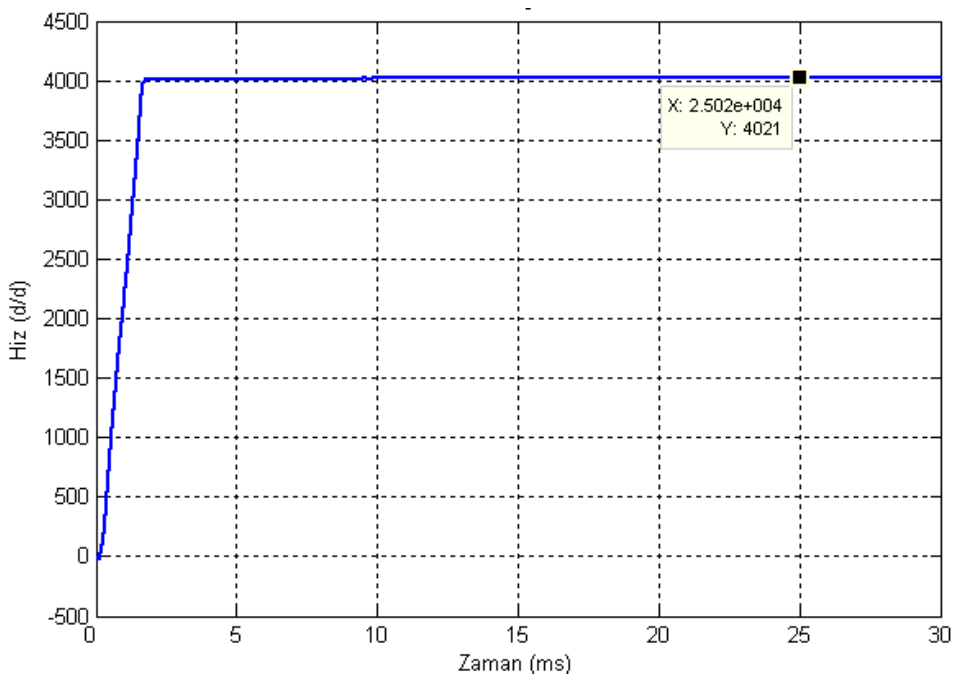
Simulink modelinde oluşturulan ara yüzlere, deney sonucunda hesaplanan moment ile deney sırasında motorun ulaştığı sıcaklık değerleri girilerek simülasyon başlatılmıştır. Boşta çalışma da dâhil olmak üzere toplam 10 adet simülasyon sonucu elde edilmiştir. Deneyler anma devrinde yapıldığı gibi simülasyonlar da anma devrinde yapılmıştır. Her bir yük kademesi için ayrı ayrı yapılan simülasyonlardan hız, moment ve akım eğrileri elde edilmiştir. Ancak burada yalnızca altı farklı yük durumu için elde edilen eğriler verilecektir. KMSM'nin tüm simülasyon sonuçları Çizelge 7.3'de verilmiştir.

0,62 Nm'lik yük momenti için elde edilen simülasyon sonuçları Şekil 7.19-Şekil 7.24'de verilmiştir. Şekil 7.19'daki moment eğrisinde motorun yük altında başarılı bir şekilde kalkınmaya çalıştığı ve bunu başardığı görülmektedir. Motor, yük altında kalkınmayı sağlayabilmek için ilk etapta yüksek moment üretmiştir. Üretilen moment değeri 0,5 ms'de 3,55 Nm'ye ulaşmıştır. 1 ms kadar devam eden bu maksimum moment üretimi, 2 ms'den itibaren 0,62 Nm'lik yük momentini kararlı bir şekilde karşılamaya devam etmiştir.




Şekil 7.19 0,62 Nm için elde edilen moment eğrisi.

Şekil 7.20'deki hız eğrisi incelendiğinde motorun hiç salınım yapmadan 2 ms'de kararlı bir şekilde hızlandığı ve 4021 d/d'ya ulaştığı görülmektedir.

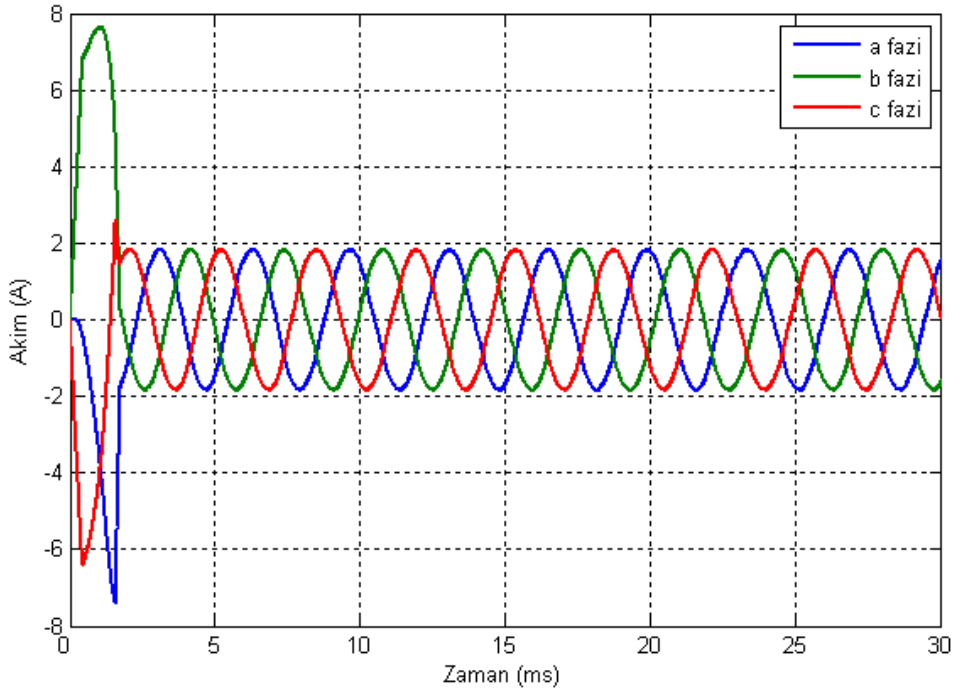



Şekil 7.20 0,62 Nm için elde edilen hız eğrisi.

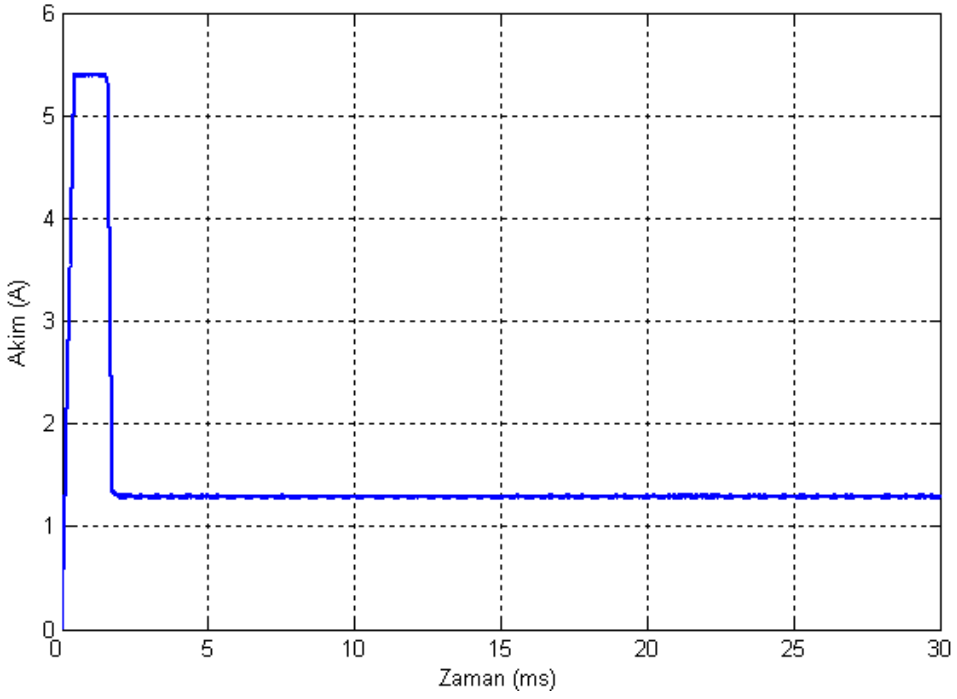
Faz akımları ve faz akımının etkin değerini veren Şekil 7.21 ve 7.22'deki eğriler incelendiğinde, yük altında kalkınabilmek için, motorun etiketinde belirtilen etkin değeri 5,4 A olan 7,65 A'lik maksimum akım değerine ulaştığı, 2. ms'den itibaren de faz akımlarında bir kararlılık olduğu görülmektedir.

2. ms'den itibaren motora ait faz akımının maksimum değeri 1,8 A'dir. Etkin değeri ise Şekil 7.23'de görüldüğü gibi 1,29 A'dir. Şekil 7.23'deki faz akımının etkin değerine ait büyütülmüş eğri incelendiğinde, faz akımının, motorun simülasyonu sırasında izin verilen 0,02 A'lik histerisiz bandın dışına çıkmadığı da görülmektedir.

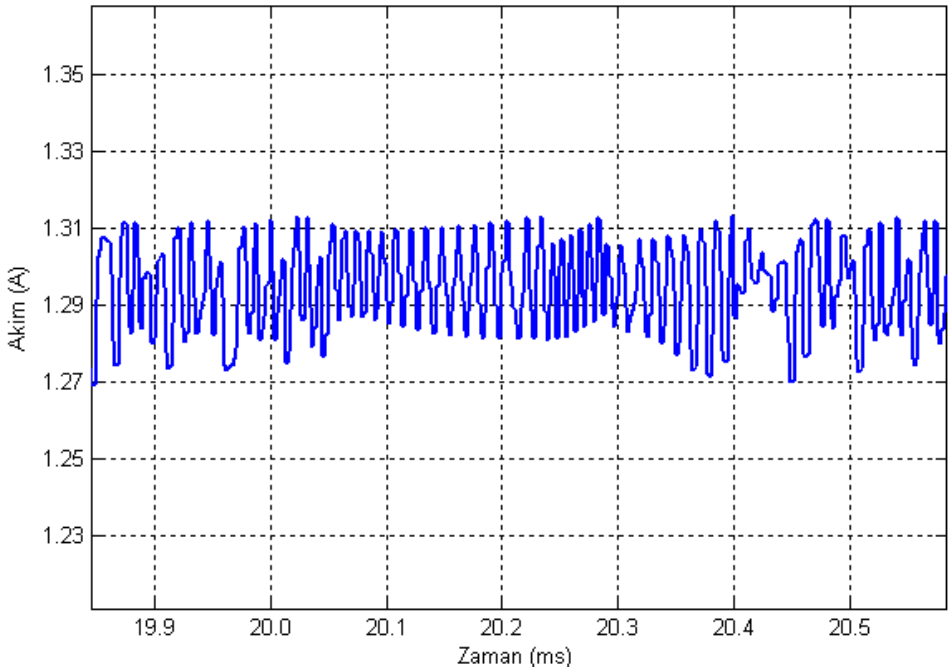
Alan etkili kontrolde motorda moment üretiminin q ekseni akımıyla orantılı olduğu, buna karşın d ekseni akımının sıfırda tutulduğu bilinmektedir. Bu gerçek, 0,62 Nm'lik yük momenti için Şekil 7.24'de sunulan d-q ekseni akımlarına ait eğride açıkça görülmektedir.



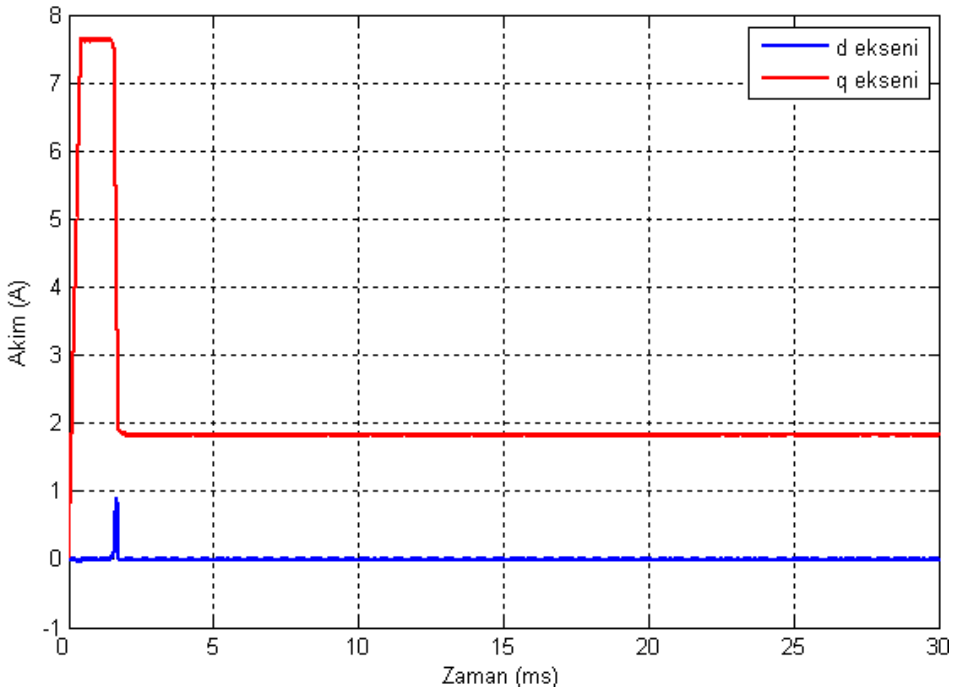

Şekil 7.21 0,62 Nm için elde edilen faz akımları eğrisi.




Şekil 7.22 0,62 Nm için elde edilen faz akımı etkin değer eğrisi.



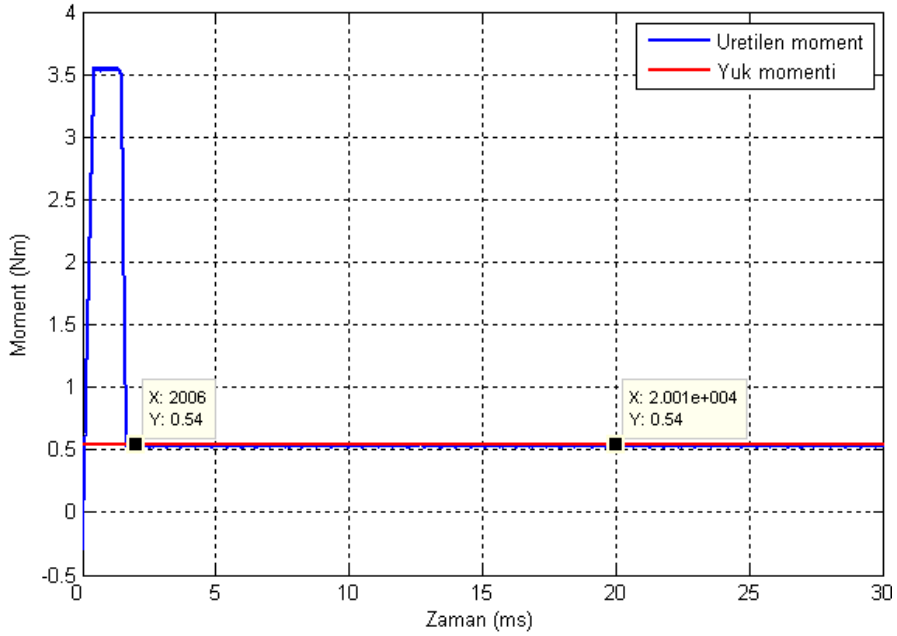

Şekil 7.23 0,62 Nm için faz akımı etkin değer eğrisinin büyütülmüş hâli.



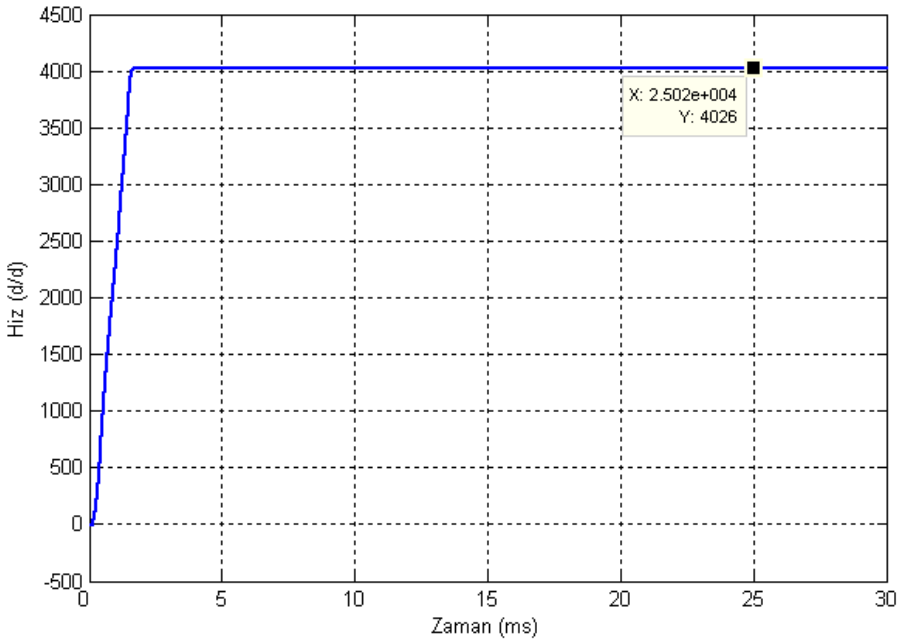

Şekil 7.24 0,62 Nm için elde edilen d-q eksen akımları eğrisi.

0,54 Nm'lik yük momentine ilişkin sonuçlar Şekil 7.25 – Şekil 7.30'da verilmiştir. Şekil 7.25'deki moment eğrisinde motorun 2. ms'den itibaren 0,54 Nm'lik yük momentini kararlı bir şekilde karşıladığı görülmektedir. Şekil 7.26'daki

hız eğrisinde ise motorun 2 ms'de kararlı bir şekilde hızlandığı ve 4026 d/d'ya ulaştığı görülmektedir.



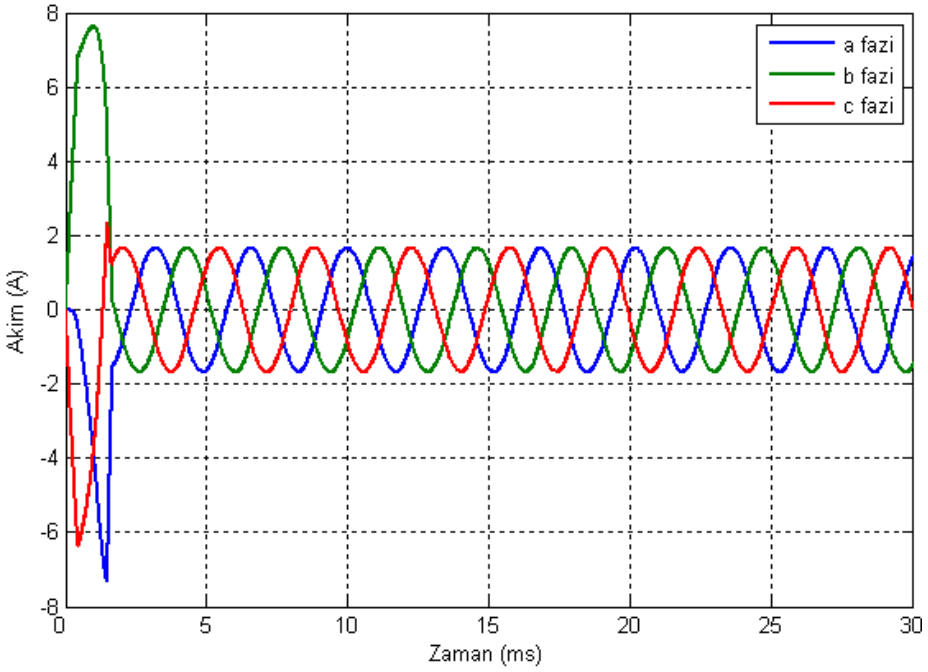

Şekil 7.25 0,54 Nm için elde edilen moment eğrisi.



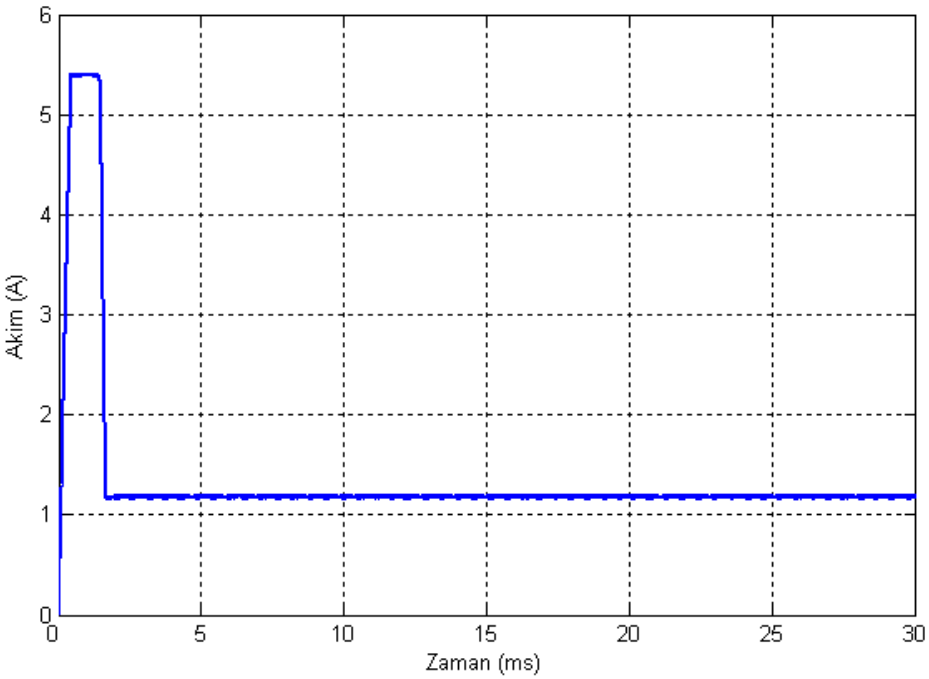

Şekil 7.26 0,54 Nm için elde edilen hız eğrisi.

Şekil 7.27 ve 7.28'deki faz akımlarına ilişkin eğriler incelendiğinde, motorun yük altında kalkınabilmek için etiketindeki maksimum akım değerine ulaştığı,

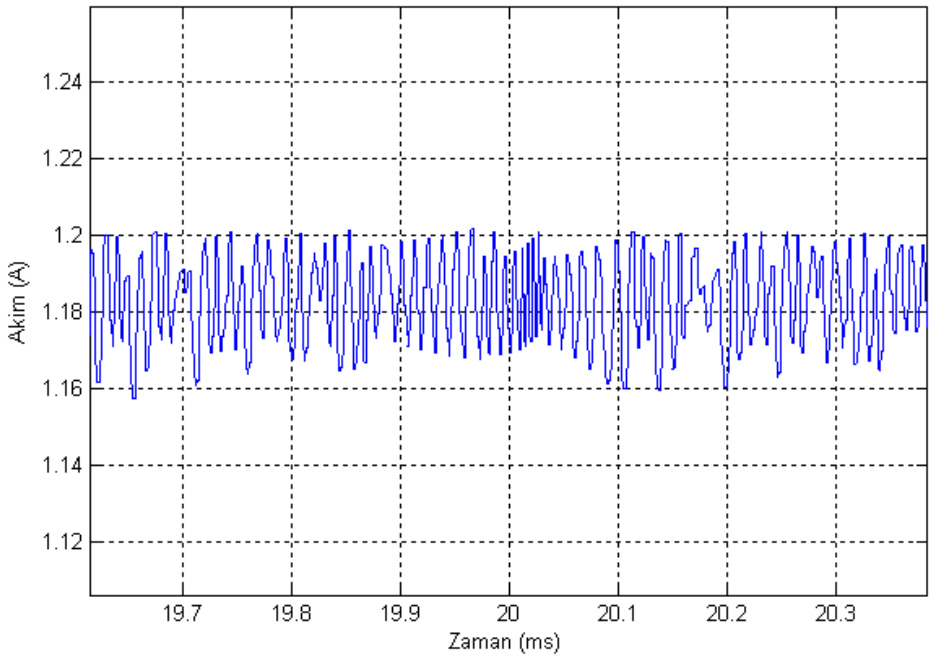
ardından normal değerinde devam ettiği görülmektedir. 2. ms'den itibaren motor faz akımının maksimum değeri 1,67 A olurken etkin değeri 1,18 A'dir (Şekil 7.29).



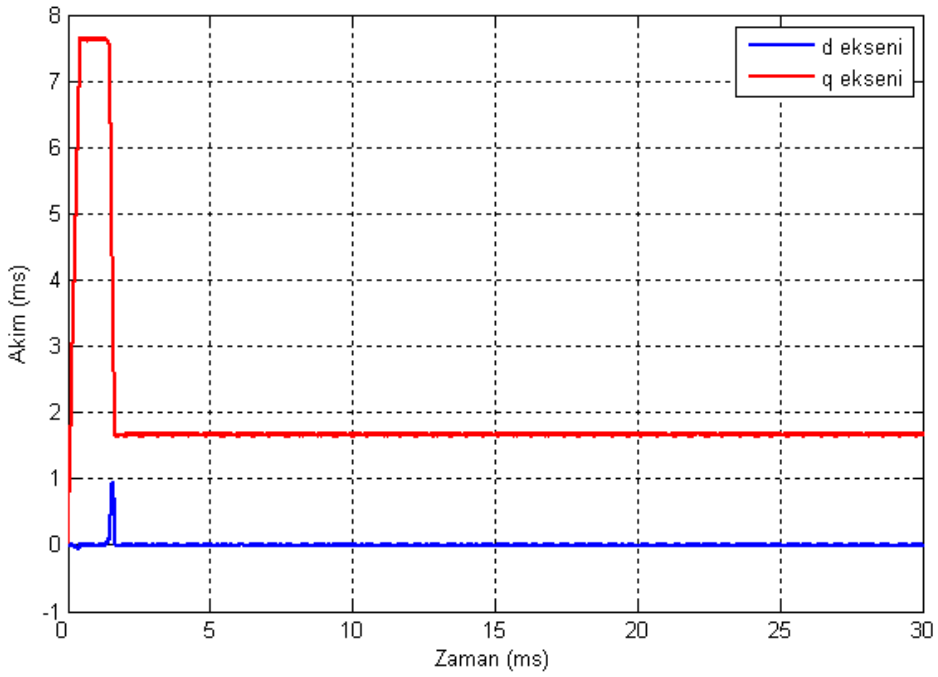

Şekil 7.27 0,54 Nm için elde edilen faz akımları eğrisi.




Şekil 7.28 0,54 Nm için elde edilen faz akımı etkin değer eğrisi.



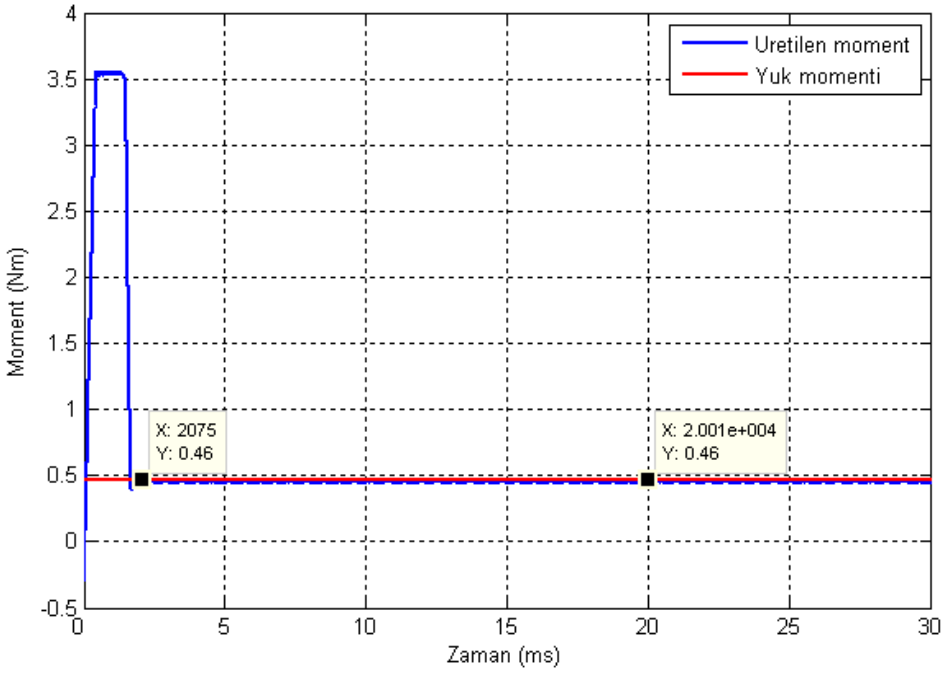

Şekil 7.29 0,54 Nm için faz akımı etkin değer eğrisinin büyütülmüş hâli.



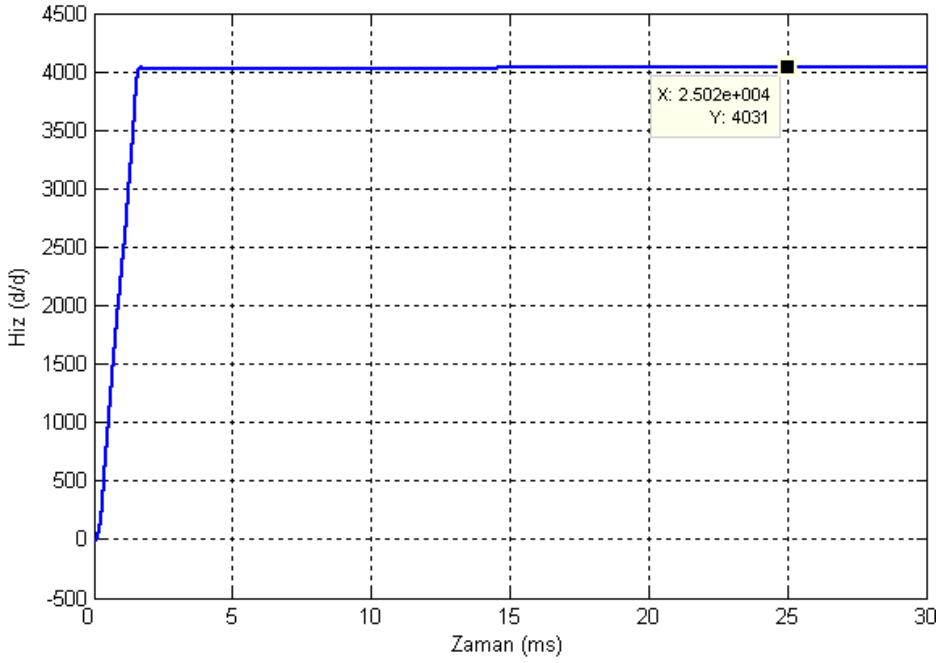

Şekil 7.30 0,54 Nm için elde edilen d-q eksen akımları eğrisi.

0,46 Nm'lik yük momentine ilişkin sonuçlar Şekil 7.31 – Şekil 7.36'da verilmiştir. Şekil 7.31'deki moment eğrisinde motorun 2. ms'den itibaren 0,46 Nm'lik yük momentini kararlı bir şekilde karşıladığı görülmektedir. Şekil 7.32'deki

hız eğrisinde ise motorun 2 ms'de kararlı bir şekilde hızlandığı ve 4031 d/d'ya ulaştığı görülmektedir.

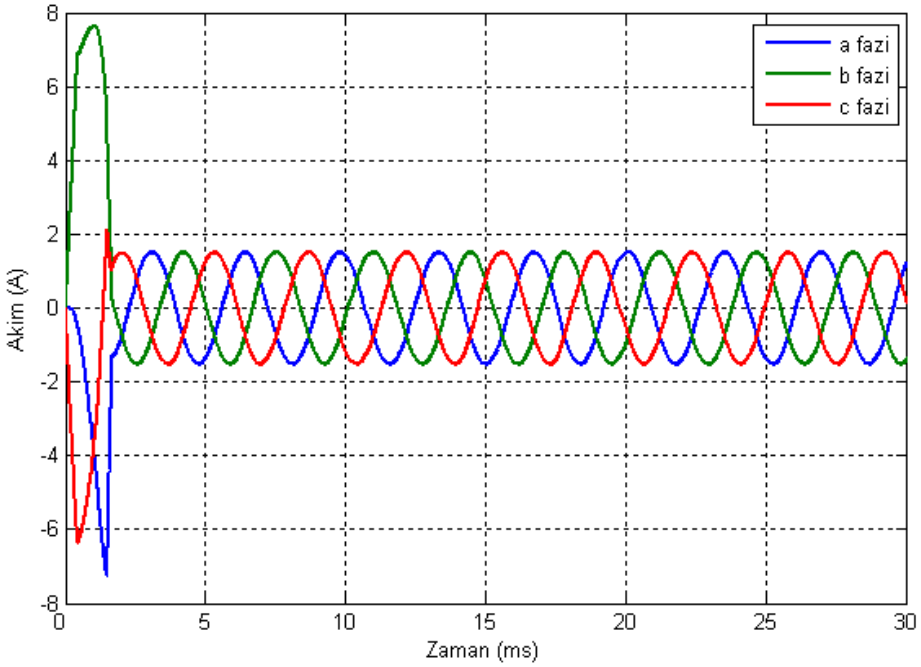



Şekil 7.31 0,46 Nm için elde edilen moment eğrisi.

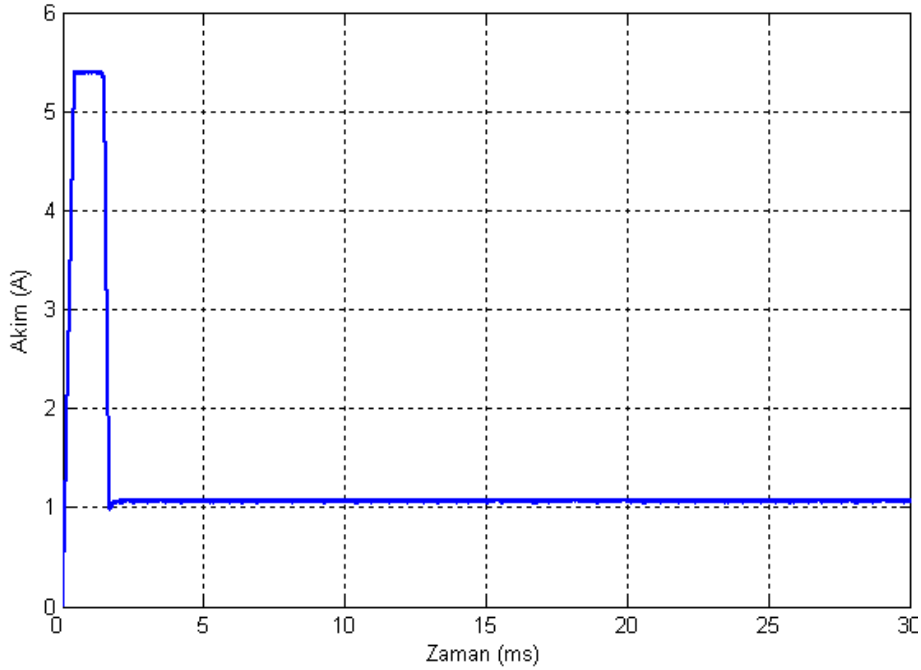



Şekil 7.32 0,46 Nm için elde edilen hız eğrisi.

Şekil 7.33 ve 7.34'deki faz akımlarına ilişkin eğriler incelendiğinde, motorun yük altında kalkınabilmek için yine etiketindeki maksimum akım değerine ulaştığı, ardından normal değerinde devam ettiği görülmektedir. 2. ms'den itibaren motor faz akımının maksimum değeri 1,51 A olurken etkin değeri 1,07 A'dir (Şekil 7.35).

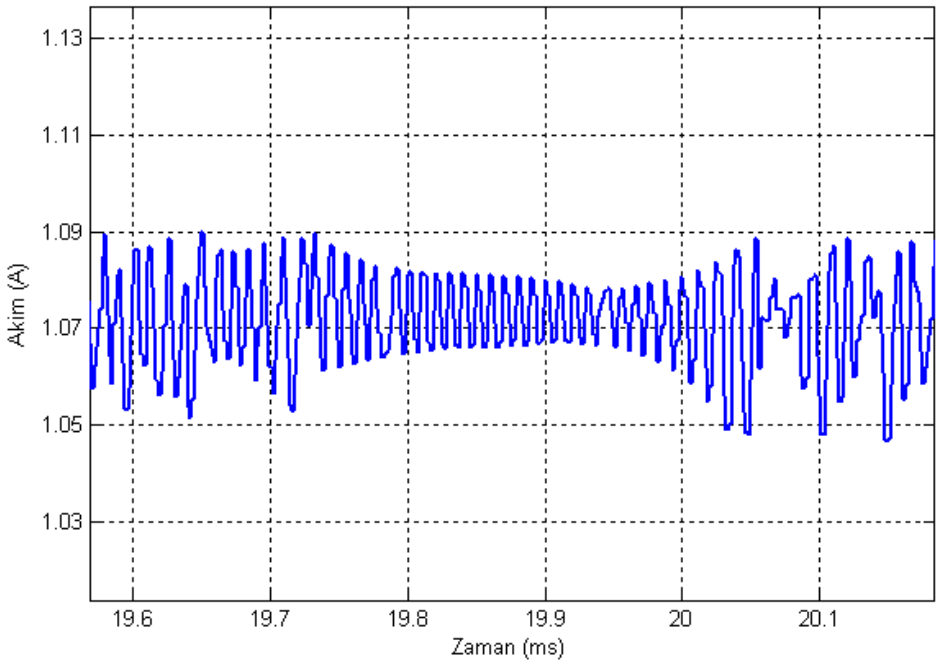



Şekil 7.33 0,46 Nm için elde edilen faz akımları eğrisi.

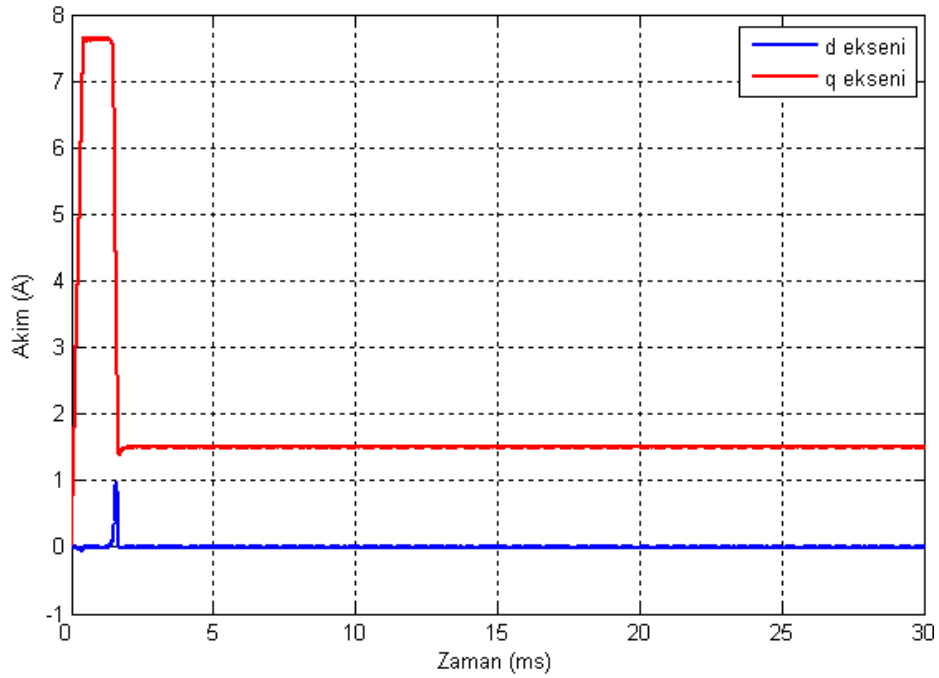



Şekil 7.34 0,46 Nm için elde edilen faz akımı etkin değer eğrisi.

0,46 Nm için elde edilen d-q eksen akımları eğrisi ise Şekil 7.36'da verilmiştir. Önceki yüklerde olduğu gibi bu yükte de motorun kararlı durumdaki d ekseni akımı sıfırda kalırken, q ekseni akımı momentle orantılı olarak değişmektedir.

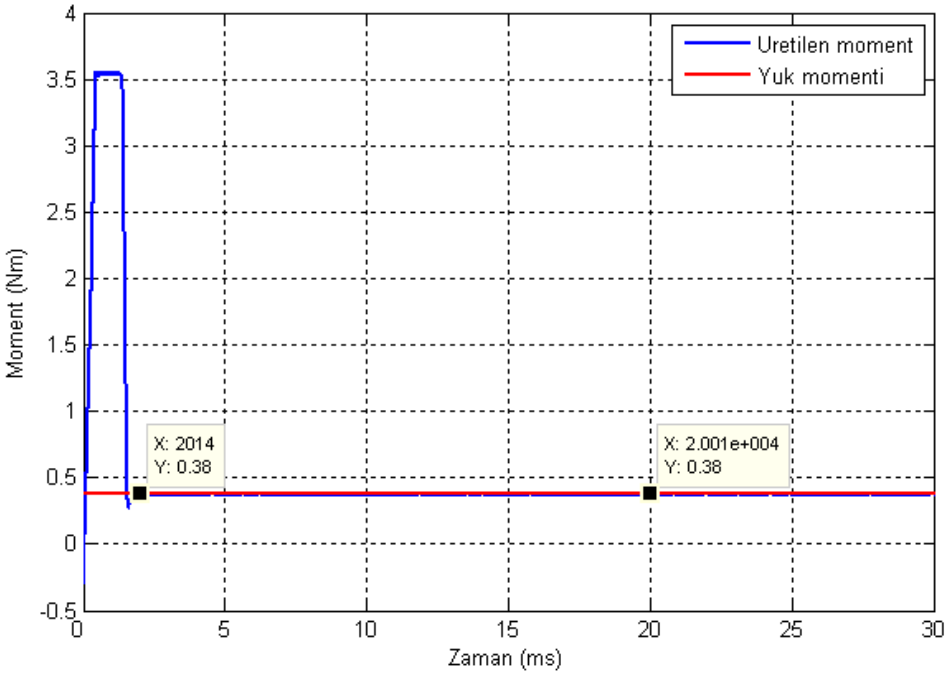



Şekil 7.35 0,46 Nm için faz akımı etkin değer eğrisinin büyütülmüş hâli.

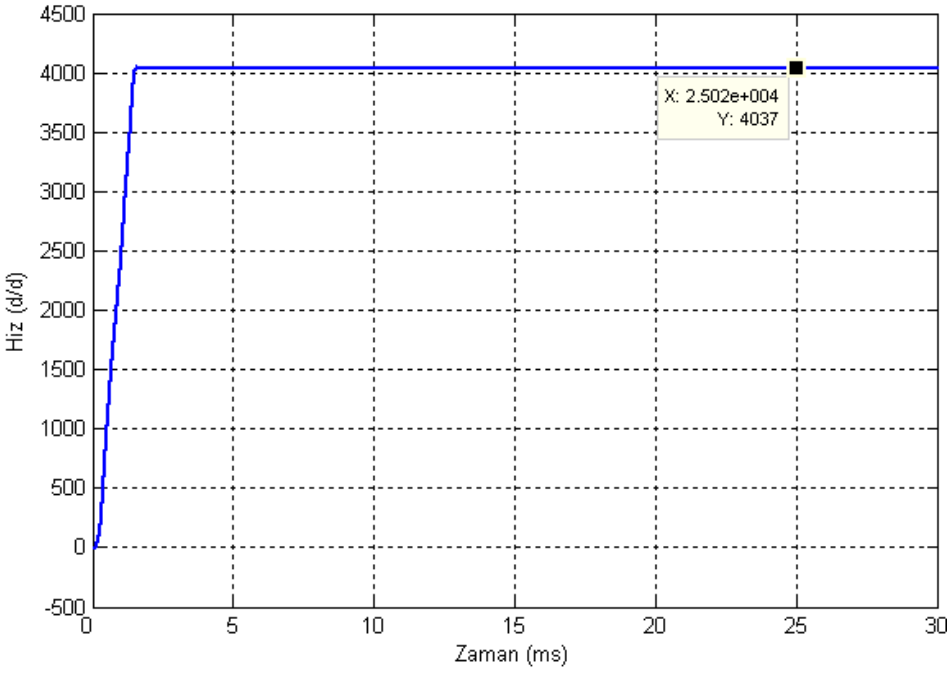



Şekil 7.36 0,46 Nm için elde edilen d-q eksen akımları eğrisi.

0,38 Nm'lik yük momentine ait sonuçlar Şekil 7.37 – Şekil 7.42'de verilmiştir. Şekil 7.37'deki moment eğrisinde 2. ms'den itibaren 0,38 Nm'lik yük momentinin kararlı bir şekilde karşılandığı, Şekil 7.38'deki hız eğrisinde ise motorun 2 ms'de kararlı bir şekilde hızlandığı ve 4037 d/d'ya ulaştığı görülmektedir.

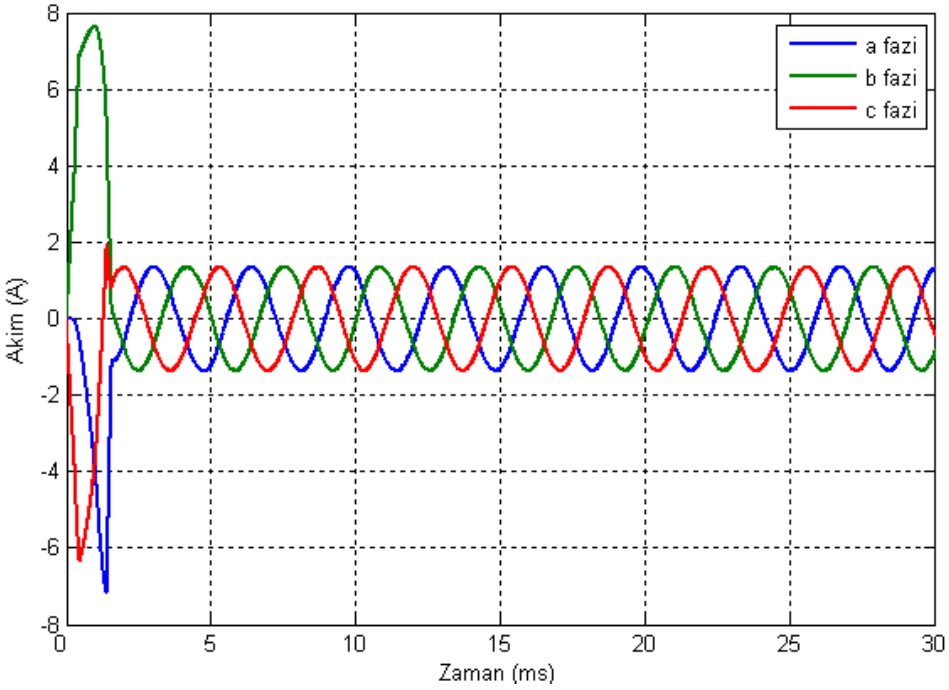



Şekil 7.37 0,38 Nm için elde edilen moment eğrisi.

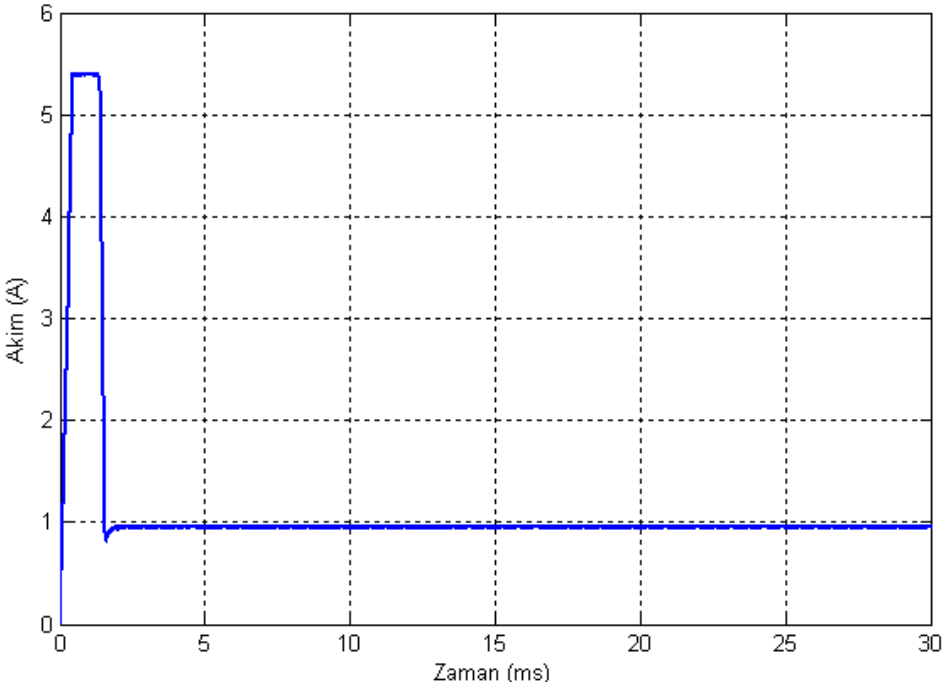



Şekil 7.38 0,38 Nm için elde edilen hız eğrisi.

Şekil 7.39 ve 7.40'daki faz akımlarına ilişkin eğrilerde, motorun yük altında kalkınabilmek için öncelikle etiketindeki maksimum akım değerine ulaştığı, ardından normal değerinde devam ettiği görülmektedir. 2. ms'den itibaren motor faz akımının maksimum değeri 1,36 A olurken etkin değeri 0,96 A'dir (Şekil 7.41).

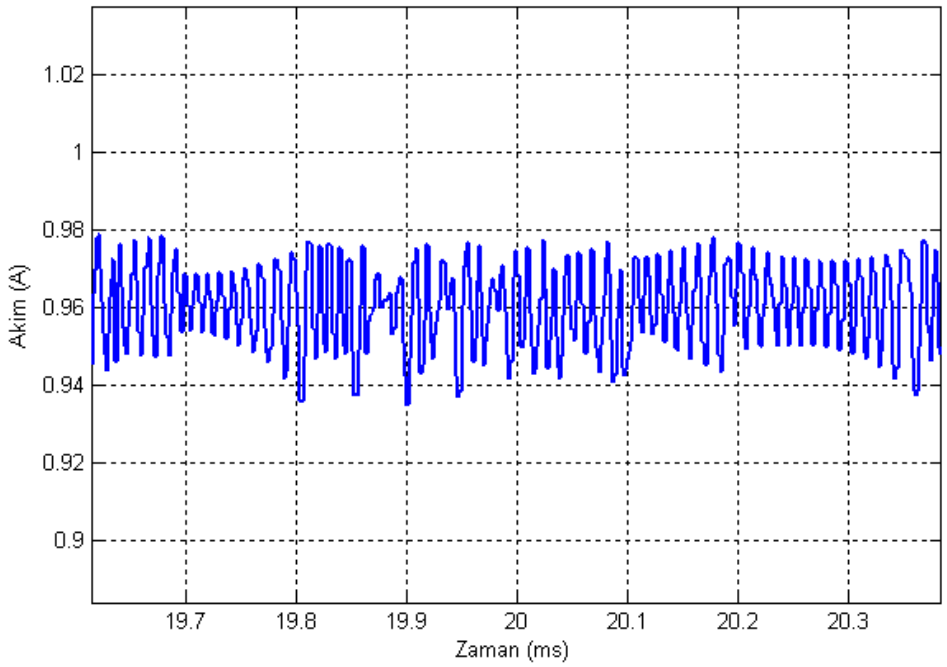



Şekil 7.39 0,38 Nm için elde edilen faz akımları eğrisi.

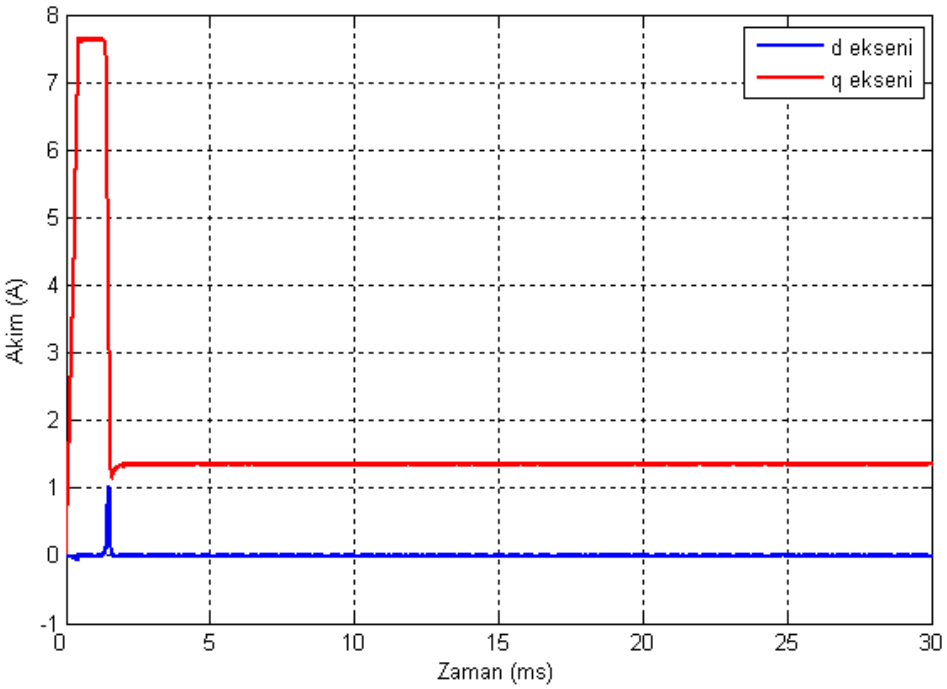



Şekil 7.40 0,38 Nm için elde edilen faz akımı etkin değer eğrisi.

0,38 Nm için elde edilen d-q eksen akımları eğrisi ise Şekil 7.42'de verilmiştir. Önceki yüklerde olduğu gibi bu yükte de motorun kararlı durumdaki d ekseni akımı sıfırda kalırken, q ekseni akımı momentle orantılı olarak değişmektedir.

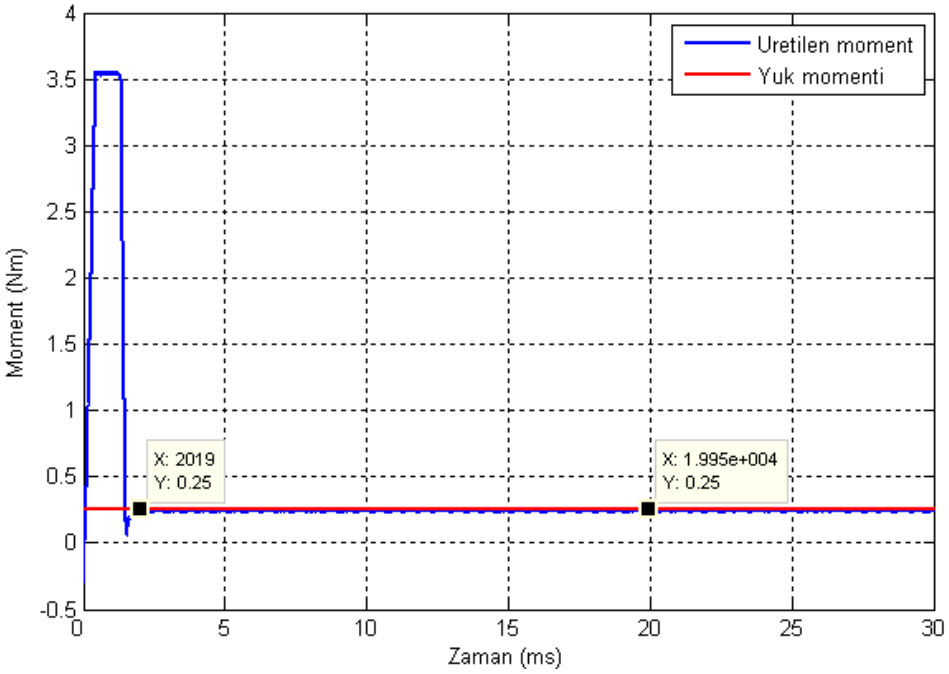



Şekil 7.41 0,38 Nm için faz akımı etkin değer eğrisinin büyütülmüş hâli.

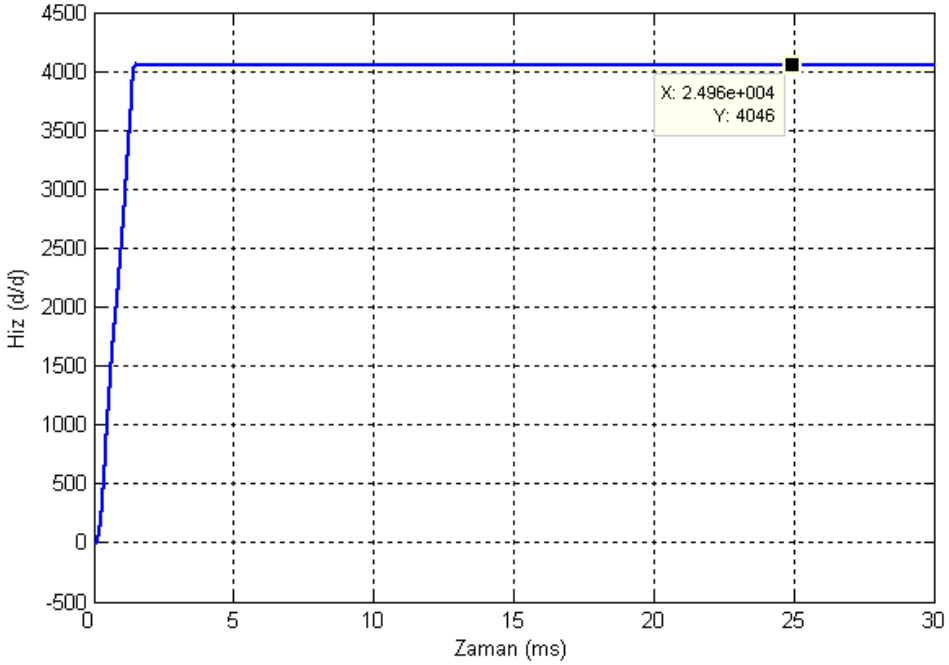



Şekil 7.42 0,38 Nm için elde edilen d-q eksen akımları eğrisi.

0,25 Nm'lik yük momentine ait sonuçlar Şekil 7.43 – Şekil 7.48'de verilmiştir. Şekil 7.43'deki moment eğrisinde 2. ms'den itibaren 0,25 Nm'lik yük momentinin kararlı bir şekilde karşılandığı, Şekil 7.44'deki hız eğrisinde ise motorun yine 2 ms'de kararlı bir şekilde hızlandığı ve 4046 d/d'ya ulaştığı görülmektedir.

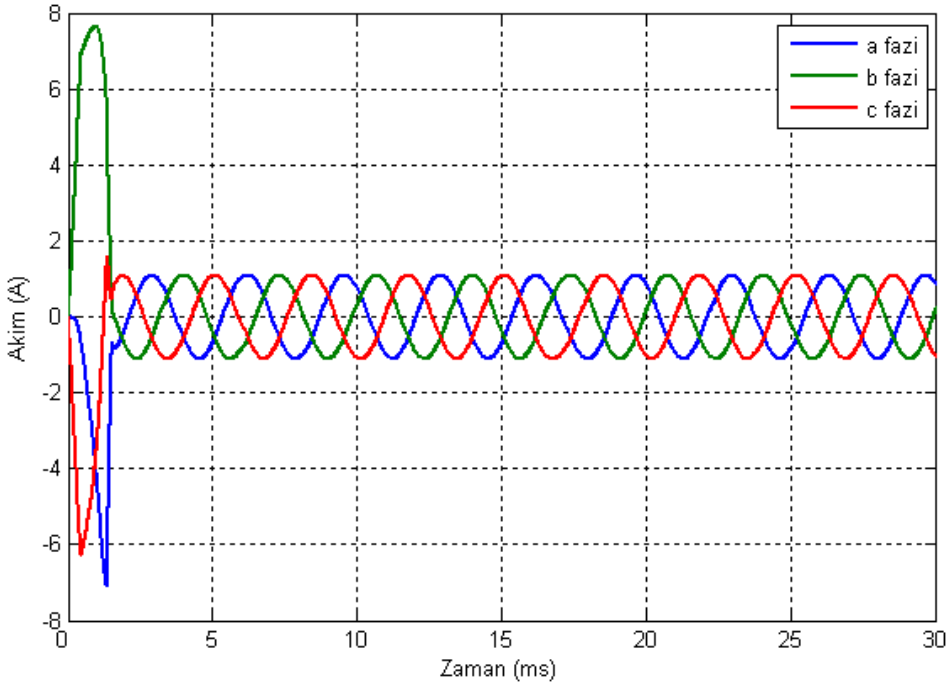



Şekil 7.43 0,25 Nm için elde edilen moment eğrisi.

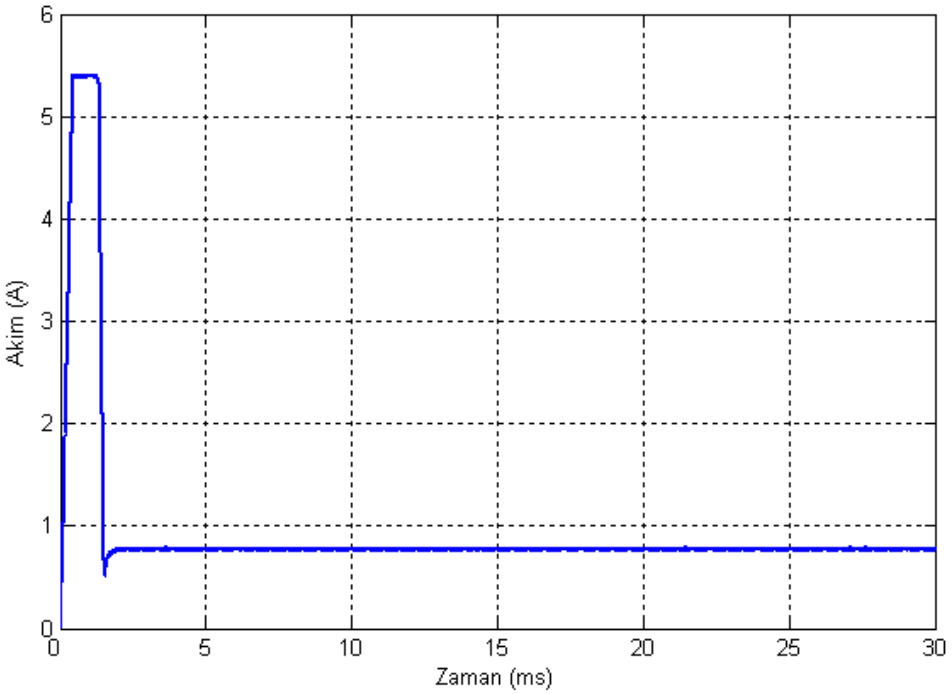



Şekil 7.44 0,25 Nm için elde edilen hız eğrisi.

Şekil 7.45 ve 7.46'daki faz akımlarına ilişkin eğrilerde, motorun yük altında kalkınabilmek için öncelikle etiketindeki maksimum akım değerine ulaştığı, ardından yine normal değerinde devam ettiği görülmektedir. 2. ms'den itibaren motor faz akımının maksimum değeri 1,10 A olurken etkin değeri 0,78 A'dir (Şekil 7.47).

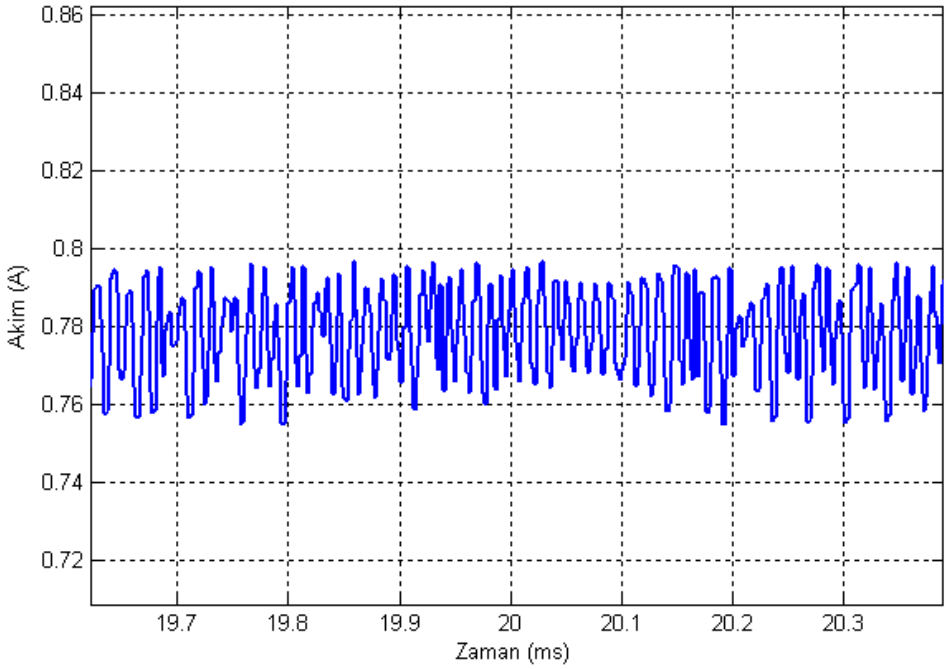



Şekil 7.45 0,25 Nm için elde edilen faz akımları eğrisi.

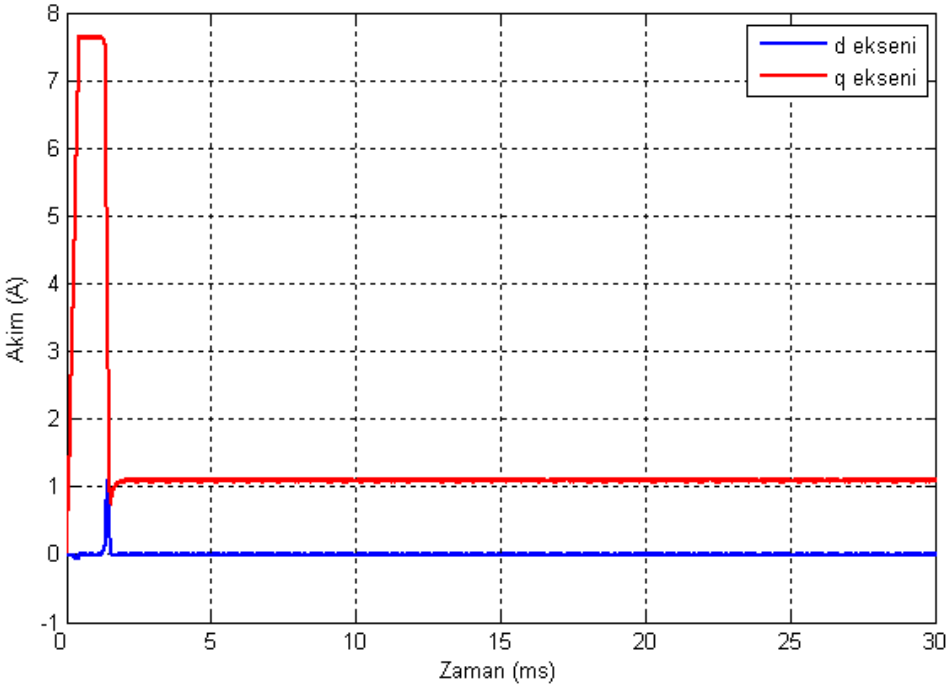



Şekil 7.46 0,25 Nm için elde edilen faz akımı etkin değer eğrisi.

0,25 Nm için elde edilen d-q eksen akımları eğrisi ise Şekil 7.48'de verilmiştir. Önceki yüklerde olduğu gibi bu yükte de motorun kararlı durumdaki d ekseni akımı sıfırda kalırken, q ekseni akımı momentle orantılı olarak değişmektedir.

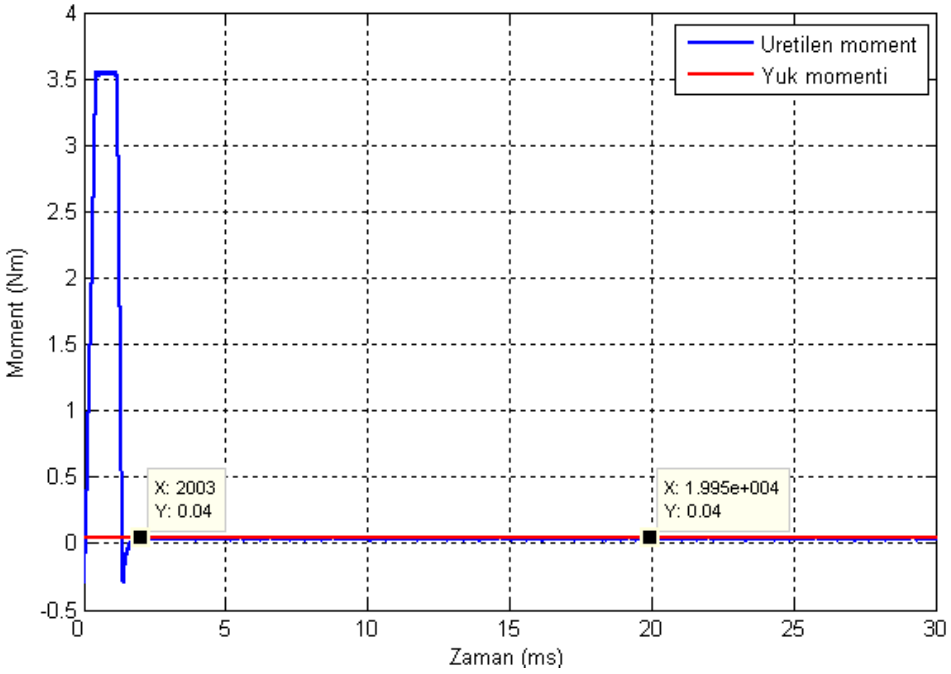



Şekil 7.47 0,25 Nm için faz akımı etkin değer eğrisinin büyütülmüş hâli.

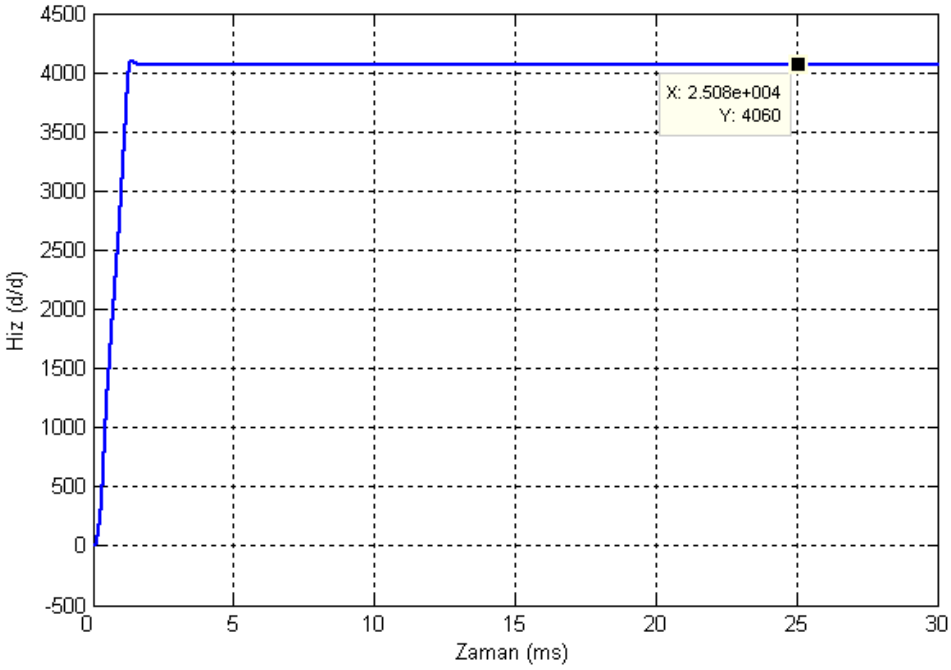



Şekil 7.48 0,25 Nm için elde edilen d-q eksen akımları eğrisi.

Motorun boşta çalışmasına (0,04 Nm) ait sonuçlar Şekil 7.49 – Şekil 7.54'de verilmiştir. Şekil 7.49'daki moment eğrisinde 2. ms'den itibaren 0,04 Nm'lik yük momentinin kararlı bir şekilde karşıladığı, Şekil 7.50'deki hız eğrisinde ise motorun yine 2 ms'de kararlı bir şekilde hızlandığı ve 4060 d/d'ya ulaştığı görülmektedir.

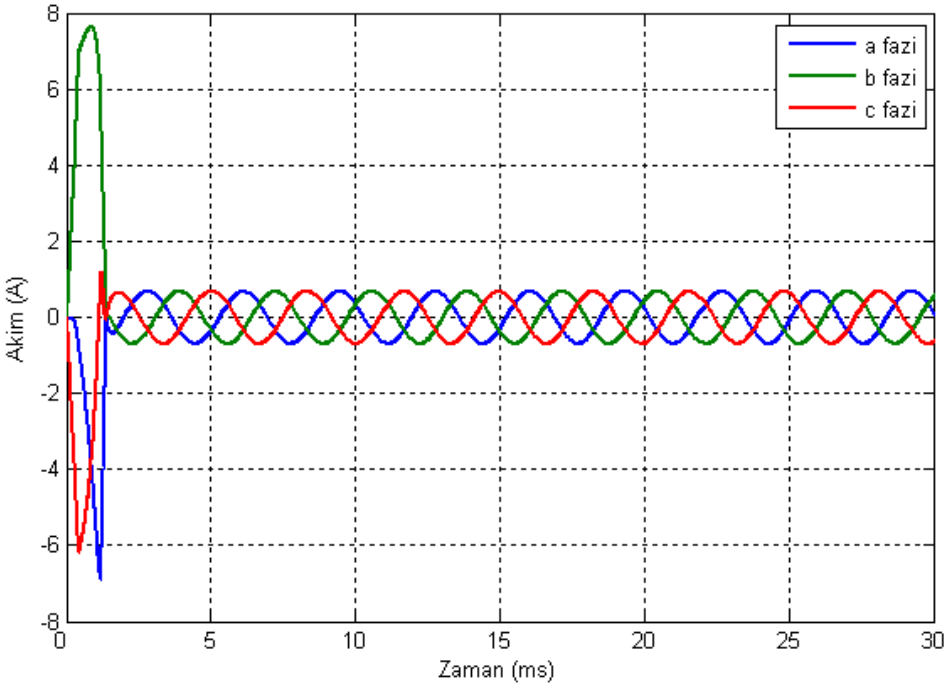



Şekil 7.49 0,04 Nm için elde edilen moment eğrisi.

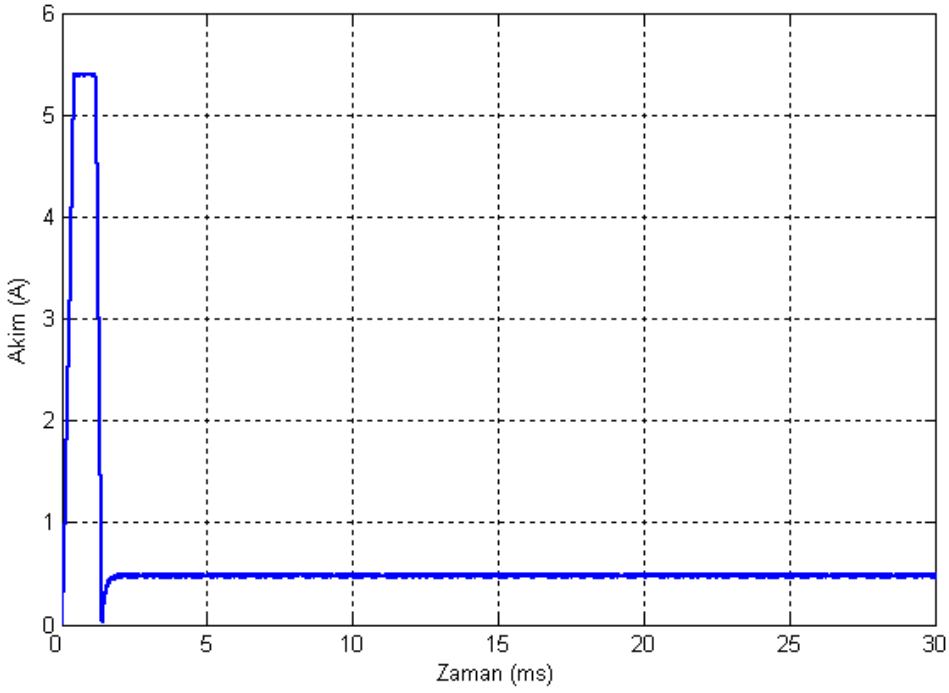



Şekil 7.50 0,04 Nm için elde edilen hız eğrisi.

Şekil 7.51 ve 7.52'deki faz akımlarına ilişkin eğrilerde, motorun kalkınabilmek için boşta çalışmada bile öncelikle etiketindeki maksimum akım değerine ulaştığı, ardından normal değerinde devam ettiği görülmektedir. 2. ms'den itibaren motor faz akımının maksimum değeri 0,68 A olurken etkin değeri 0,48 A'dir (Şekil 7.53).

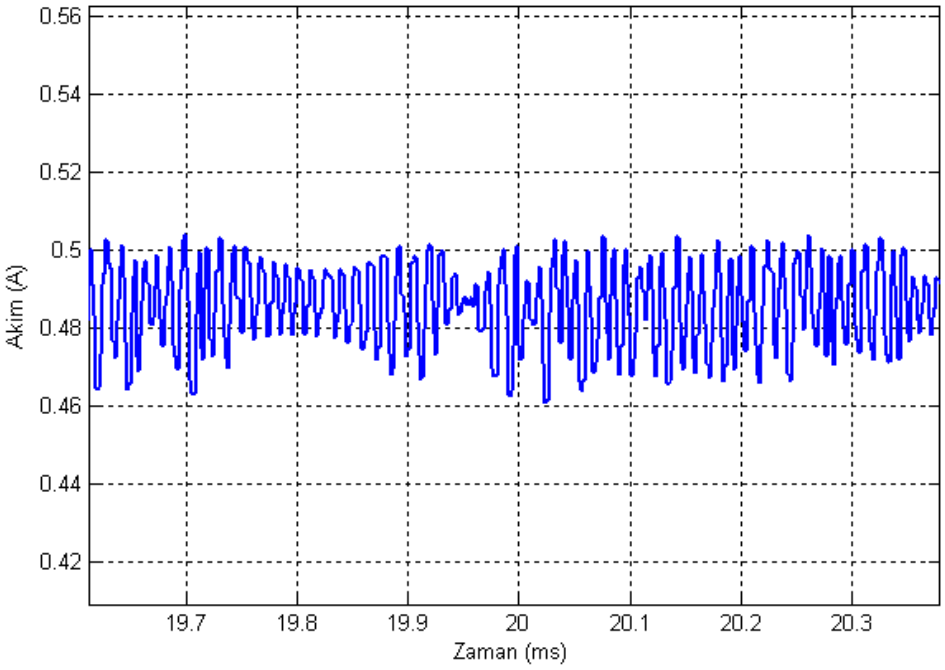



Şekil 7.51 0,04 Nm için elde edilen faz akımları eğrisi.

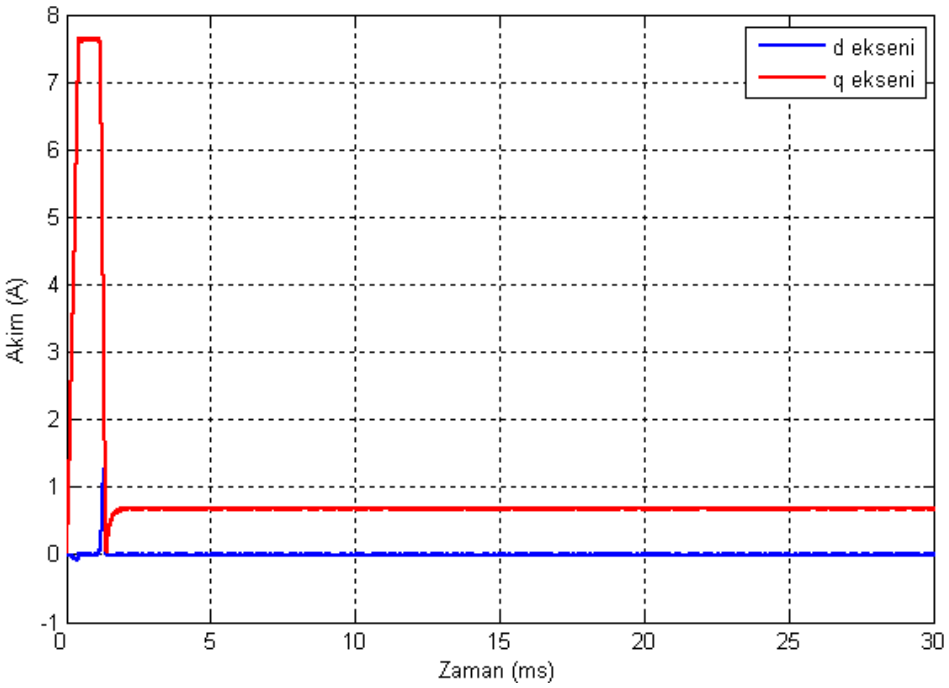



Şekil 7.52 0,04 Nm için elde edilen faz akımı etkin değer eğrisi.

Boşta çalışma için elde edilen d-q eksen akımları eğrisi ise Şekil 7.54'de verilmiştir. Önceki yüklerde olduğu gibi boşta çalışmada da motorun kararlı durumdaki d ekseni akımı sıfırda kalırken, q ekseni akımı momentle orantılı olarak değişmektedir.




Şekil 7.53 0,04 Nm için faz akımı etkin değer eğrisinin büyütülmüş hâli.




Şekil 7.54 0,04 Nm için elde edilen d-q eksen akımları eğrisi.

KMSM'nin tüm deney ve simülasyon sonuçları Çizelge 7.3'de verilmiştir. Çizelgede motor sıcaklığı (T), hızı (n), akımı (I), mil gücü ($P_{mil}$), sürekli durumda ürettiği momenti ($T_s$), maksimum momenti ($T_m$), maksimum momente ulaşma süresi ($t_m$), sabit yükte motorun ürettiği sürekli momente ulaşma süresi ($t_s$), ölçüm sonucundan simülasyon sonucunun çıkartılmasıyla elde edilen akım hatası ($e_i$) ve moment hatası ($e_m$) verilmiştir. Deneyler sırasında aynı yük için motorun hızı 4020 ile 4050 d/d arasında değiştiğinden ortalama değer olarak 4035 d/d alınmıştır. Dolayısıyla çizelgede hız hatası için ayrı bir sütun oluşturulmamıştır.

Çizelge 7.3 Deney ve simülasyon sonuçlarının kıyaslanması.

| Yük sayısı (Adet) | Ölçüm Sonuçları | | | Hesaplama Sonuçları | | Simülasyon sonuçları | | | | | | Hata | |
|---|---|---|---|---|---|---|---|---|---|---|---|---|---|
| | T (ºC) | n (d/d) | I (A) | $P_{mil}$ (W) | $T_s$ (Nm) | $T_s$ (N.m.) | $T_m$ (N.m.) | $t_m$ (ms) | $t_s$ (ms) | I (A) | n (d/d) | $e_i$ (A) | $e_m$ (Nm) |
| 20 | 41 | 4035 | 1,30 | 261,08 | 0,62 | 0,62 | 3,55 | 0,5 | 2 | 1,29 | 4021 | 0,01 | 0 |
| 18 | 45 | 4035 | 1,25 | 240 | 0,57 | 0,57 | 3,55 | 0,5 | 2 | 1,22 | 4024 | 0,03 | 0 |
| 16 | 49 | 4035 | 1,16 | 226,7 | 0,54 | 0,54 | 3,55 | 0,5 | 2 | 1,18 | 4026 | -0,02 | 0 |
| 14 | 51 | 4035 | 1,12 | 216,8 | 0,51 | 0,51 | 3,55 | 0,5 | 2 | 1,14 | 4028 | -0,02 | 0 |
| 12 | 52 | 4035 | 1,01 | 194,7 | 0,46 | 0,46 | 3,55 | 0,5 | 2 | 1,07 | 4031 | -0,06 | 0 |
| 10 | 54 | 4035 | 0,97 | 185,4 | 0,44 | 0,44 | 3,55 | 0,5 | 2 | 1,04 | 4033 | -0,07 | 0 |
| 8 | 54 | 4035 | 0,83 | 158,5 | 0,38 | 0,38 | 3,55 | 0,5 | 2 | 0,96 | 4037 | -0,13 | 0 |
| 6 | 54 | 4035 | 0,74 | 134,3 | 0,32 | 0,32 | 3,55 | 0,5 | 2 | 0,87 | 4041 | -0,13 | 0 |
| 4 | 54 | 4035 | 0,61 | 104,1 | 0,25 | 0,25 | 3,55 | 0,5 | 2 | 0,78 | 4046 | -0,17 | 0 |
| 0 | 45 | 4035 | 0,36 | 38 | 0,04 | 0,04 | 3,55 | 0,5 | 2 | 0,48 | 4060 | -0,12 | 0 |

## 7.6 Oluşturulan Simulink Modelinin Farklı Bir KMSM Üzerinde Denenmesi

Beşinci bölümde oluşturulan Simulink modeli, burada 1,1 kW'lık bir KMSM üzerinde denenerek modelin geçerliliği sınanacaktır. Simülasyonda kullanılacak olan KMSM parametreleri, Bal ve ark. (2007) tarafından yapılan "Vektör Denetimli Kalıcı Mıknatıslı Senkron Motorun Uzay Vektör Darbe Genişliği Modülasyonu ile Performans Analizi" isimli deneysel çalışmada kullanılan KMSM'ye aittir.

### 7.6.1 Modelde Kullanılacak KMSM'nin Parametreleri

Bal ve ark. (2007) tarafından yapılan deneysel çalışmada kullanılan yüzey mıknatıslı KMSM'nin parametreleri Çizelge 7.4'de verilmiştir.

Çizelge 7.4 Modelde kullanılacak KMSM'nin özellikleri.

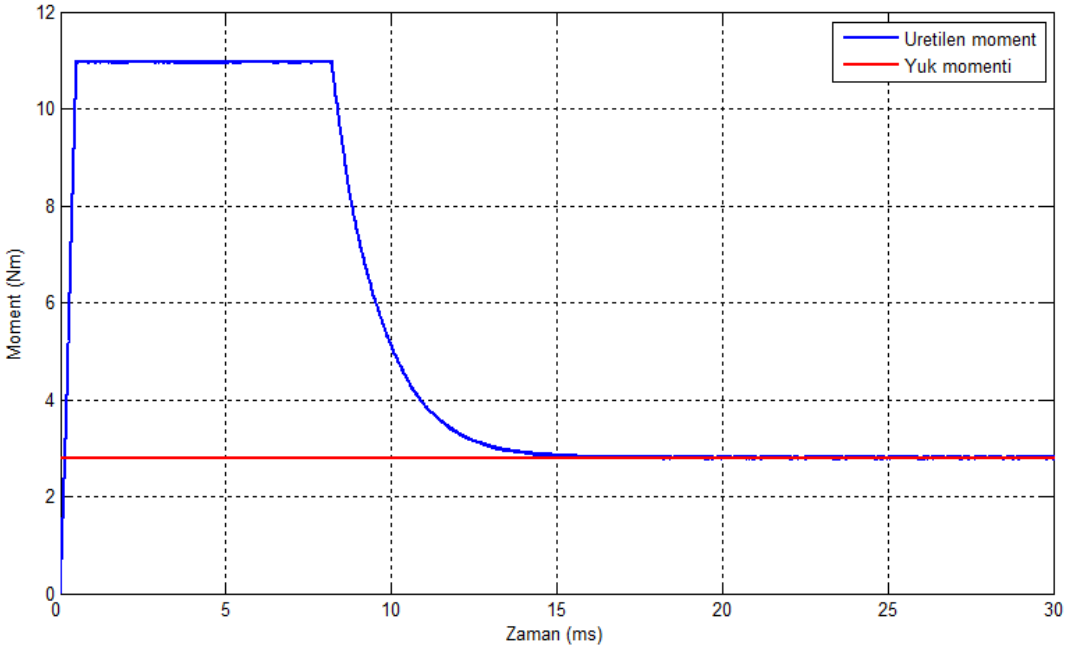
| | |
|---|---|
| Kutup sayısı | 6 |
| Anma devri (d/d) | 3800 |
| Anma momenti (Nm) | 2,8 |
| Anma gücü (kW) | 1,1 |
| Anma akımı (A) | 2,3 |
| Anma gerilimi (V) | 330 |
| Anma frekansı (Hz) | 190 |
| Atalet momenti (kg $m^2$. $10^{-4}$) | 1,2 |
| Stator sargı direnci (Ω) | 5,2 |
| d-q endüktansları (mH) | 16 |
| Rotor manyetik akısı (Wb) | 0,345 |

### 7.6.2 Farklı Parametrelere Sahip KMSM'nin Simülasyon Sonuçları

Çizelge 7.4'de verilen motor parametreleri, modelde oluşturulan ilgili arayüzlere girilerek simülasyon başlatılmıştır.

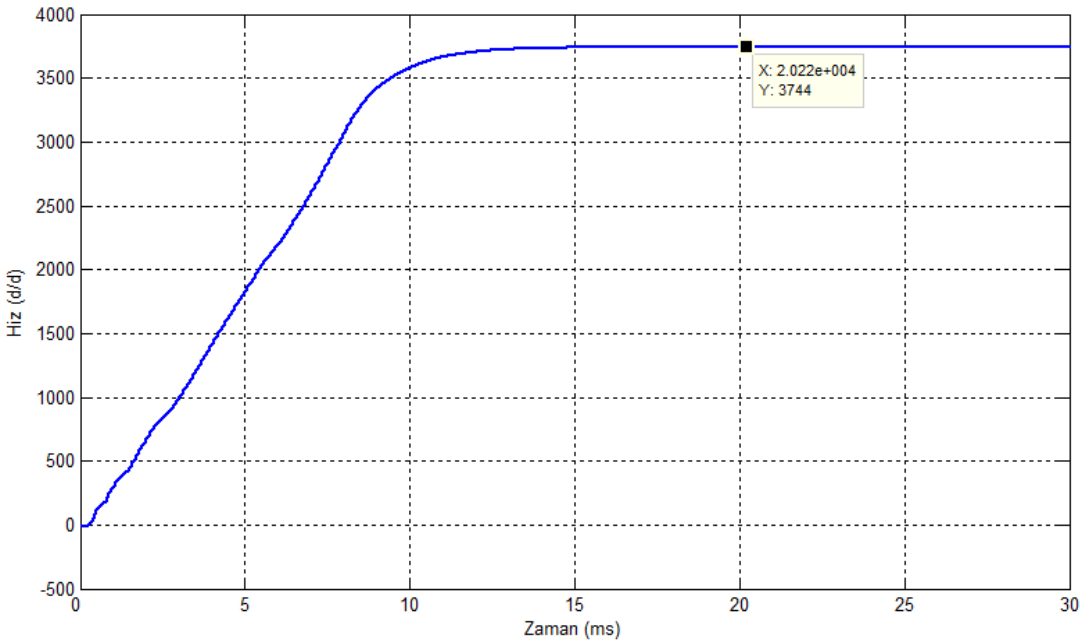
Bal ve ark. (2007) tarafından yapılan boşta çalışma ve 1 Nm'lik yük deneylerinde, motorun hız ve moment tepkileri ile q ekseni akımı değeri verilmiştir. Dolayısıyla deneysel çalışmalar sırasındaki önemli verilerden birisi olan motorun çektiği akım değeri bilinmemektedir. Bu nedenle simülasyon sırasında motor, anma momenti olan 2,8 Nm'lik bir yükle yüklenerek etiket bilgileri olan anma hızı ve anma akımının durumu incelenmiştir. Hız, moment ve akım için elde edilen benzetim sonuçları Şekil 7.55 - Şekil 7.60'da verilmiştir.

Şekil 7.55'deki moment eğrisinde motorun yük altında başarılı bir şekilde kalkınmaya çalıştığı ve bunu başardığı görülmektedir. Motor, yük altında kalkınmayı sağlayabilmek için ilk etapta yüksek moment üretmiştir. Üretilen moment değeri 1 ms'de 11 Nm'ye ulaşmıştır. 7 ms kadar devam eden bu maksimum moment üretimi, 8. ms'den itibaren 2,8 Nm'lik yük momentini kararlı bir şekilde karşılamaya devam etmiştir.




Şekil 7.55 2,8 Nm için elde edilen moment eğrisi.

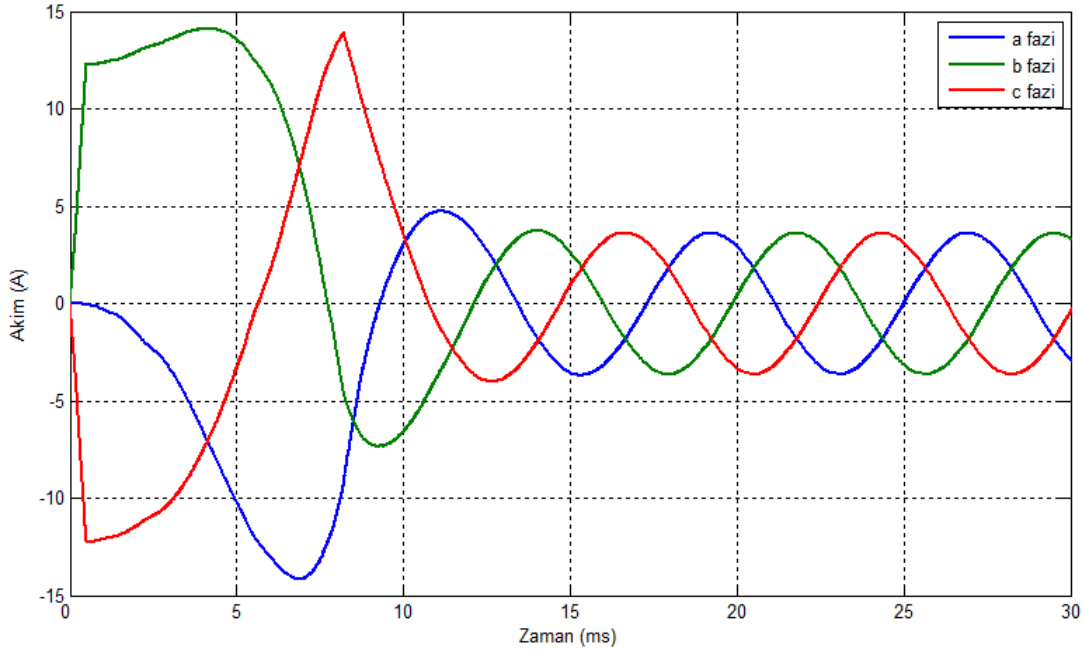
Şekil 7.56'daki hız eğrisi incelendiğinde motorun hiç salınım yapmadan 15 ms'de kararlı bir şekilde hızlandığı ve 3744 d/d'ya ulaştığı görülmektedir.



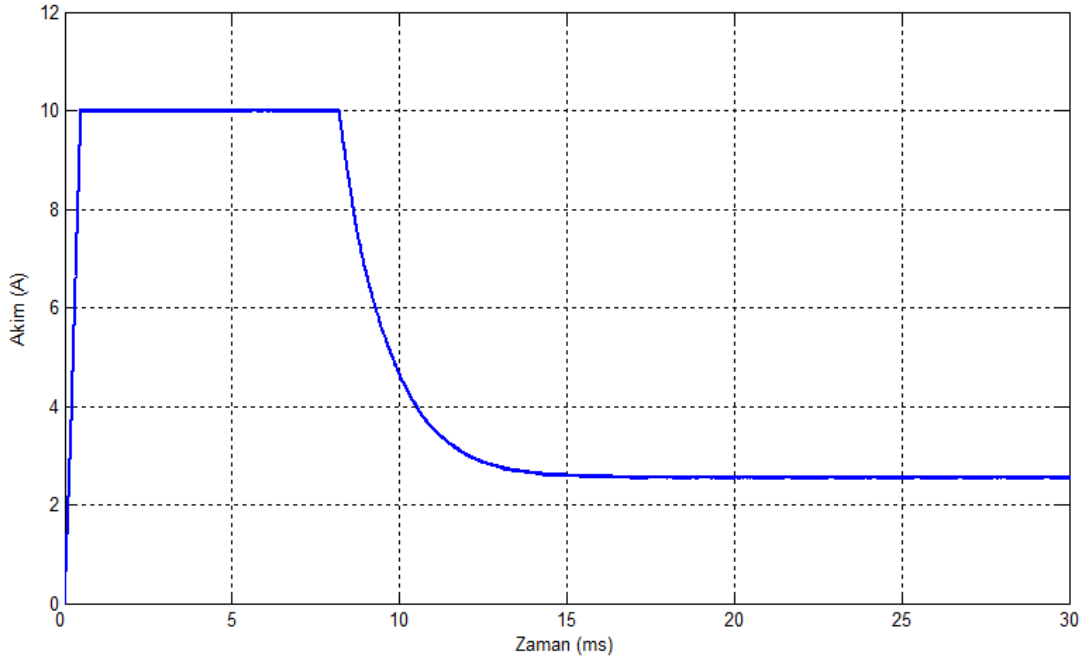

Şekil 7.56 2,8 Nm için elde edilen hız eğrisi.

Faz akımları ve faz akımının etkin değerini veren Şekil 7.57 ve 7.58'deki eğriler incelendiğinde, motorun yük altında kalkınabilmek için ilk etapta yüksek akım çektiği, ancak 15. ms'den itibaren faz akımlarının anma değerlerine yaklaştığı görülmektedir.

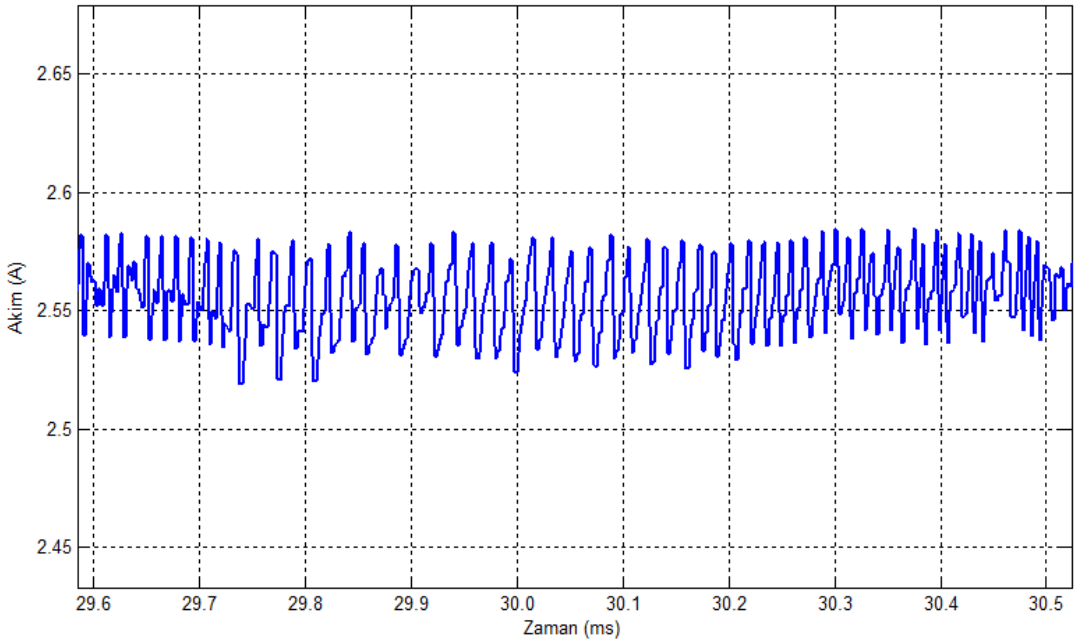
15. ms'den itibaren motora ait faz akımının maksimum değeri 3,62 A'dir. Etkin değeri ise Şekil 7.59'da görüldüğü gibi 2,55 A'dir. Şekil 7.59'daki faz akımının etkin değerine ait büyütülmüş eğri incelendiğinde, faz akımının, motorun simülasyonu sırasında izin verilen 0,03 A'lik histerisiz bandın dışına çıkmadığı görülmektedir.




Şekil 7.57 2,8 Nm için elde edilen faz akımları eğrisi.

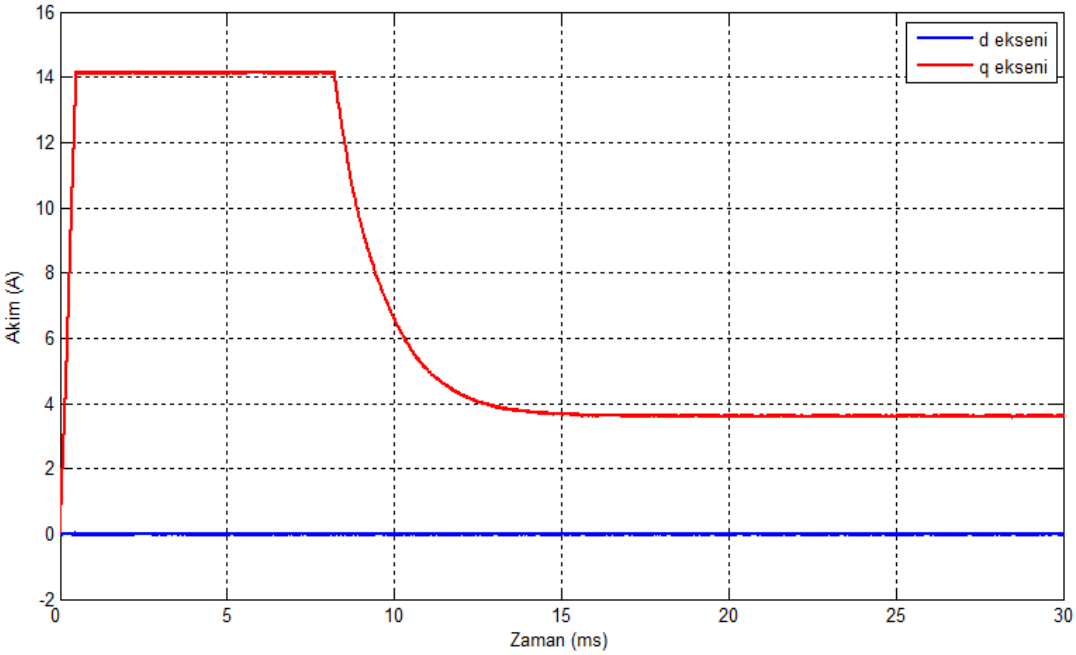



Şekil 7.58 2,8 Nm için elde edilen faz akımı etkin değer eğrisi.




Şekil 7.59 2,8 Nm için faz akımı etkin değer eğrisinin büyütülmüş hâli.

Motorun 2,8 Nm'lik yük momentine ait d-q ekseni akımları eğrisi Şekil 7.60'da sunulmuştur.




Şekil 7.60 2,8 Nm için elde edilen d-q eksen akımları eğrisi.

# 8. SONUÇLARIN TARTIŞILMASI

Yapılan bu çalışma ile farklı güçlerdeki KMSM'lerin, farklı yüklere vereceği akım, hız ve moment tepkilerini deneysel çalışma yapmadan inceleyerek tasarım ve geliştirme çalışmalarına katkıda bulunmak hedeflenmiştir.

Bu tez çalışmasında Matlab/Simulink paket programı kullanılarak KMSM'nin alan yönlendirmeli vektör kontrol yöntemine dayalı simülasyonu yapılmıştır. Simülasyon sonuçları Lenze firmasına ait MCS 06C41 ürün koduyla üretilen 0,25 kW'lık KMSM, EVS9322-ESV004 kodlu motor sürücüsü ve Global Drive Control arayüz programı kullanılarak test edilmiştir. Simülasyondan elde edilen değerler deneysel çalışmalarla karşılaştırılmıştır. Sürücünün alan yönlendirmeli vektör kontrol yöntemine göre tasarlanmış olması nedeniyle simülasyonda da alan yönlendirmeli kontrol yöntemi tercih edilmiştir. Oluşturulan Simulink modeli ilâve olarak 1,1 kW'lık bir KMSM üzerinde denenerek modelin geçerliliği sınanmıştır.

Matlab/Simulink paket programı içerisinde KMSM'ye yönelik yapılan hazır simülasyon demoları mevcuttur. Fakat bu simülasyonlar, program üreticisi firma tarafından belli bir noktadan sonra maskelendiğinden geliştirilmeye açık bırakılmamıştır. Oysa ki bu çalışmada oluşturulan simülasyon blokları geliştirilmeye bütünüyle açık olup, oluşturulan arayüzler sayesinde deneylerin farklı değerlere sahip KMSM'ler için kolayca gerçekleştirilmesi mümkün kılınmıştır.

Bu çalışma, alan yönlendirmeli PWM sürücüdeki PI denetleyici parametrelerinin Simulink Responze Optimization araç kutusundaki Signal Constraint bloğu ile en iyileştirilerek bulunmuş olması bakımından bir ilktir. Elde edilen PI parametrelerinin geçerliliği ve en iyileştirme işleminde elde edilen başarı, tüm yük seçenekleri için elde edilen hız eğrileri incelendiğinde açıkça görülmektedir. Bu durum, tüm yükler için Çizelge 7.3'deki maksimum momente ulaşma süreleri ($t_m$) ile sabit yükte motorun ürettiği sürekli momente ulaşma sürelerine ($t_s$) bakıldığında da ortaya çıkmaktadır. Hız eğrisindeki kararlılık 1,1 kW'lık motor için elde edilen hız eğrisinde de açıkça görülmektedir (Şekil 7.56). Ayrıca bu çalışma

motor sıcaklığının simülasyona dâhil edilmesi ve akımın etkin değerine ilişkin eğrilerin çizdirilmesi bakımından da ayrı bir önem taşımaktadır.

Çizelge 7.3 incelendiğinde deney ve simülasyon sonuçlarının motorun anma gücünde yüklenmeye çalışıldığı bölgelerde birbiriyle çok yakın sonuçlar verdiği görülmektedir. Sonuçlar moment, akım ve hız için ayrı ayrı değerlendirilecek olursa:

- Simülasyon, üretilmesi istenilen moment değerini sürücünün histerisiz bandına uygun olarak hatasız üretmektedir.

- Simülasyondan elde edilen hız sonuçları, deneyde elde edilen 4020 d/d ile 4050 d/d arasındaki hız aralığının içinde yer almaktadır. Tek farklılık motorun boşta çalışması durumundaki 10 d/d'lık farktır. Bu da % 0,2'lik bir hata olup kabul edilebilir düzeydedir.

- Akım sonuçları karşılaştırıldığında motorun anma gücü ve buna yakın olan bölgelerinde sonuçların birbirine çok yakın seyrettiği görülmektedir. Örneğin 0,62 Nm'lik moment değerine ilişkin benzetim sonuçları incelendiğinde motor faz akımının deneyde 1,30 A simülasyonda ise 1,29 A olarak elde edildiği görülmektedir. Aradaki 0,01 A'lik fark % 0,7'lik bir hata olup simülasyonun yapılması sırasında varsayılan ve yukarıda sözü edilen bazı kabullerden kaynaklanmaktadır. Boşta çalışmaya yakın bölgelerde ise sonuçlar arasında 0,13 A'lik farklılıklar oluşmaktadır. Bu farklılıklar ise ölçü aletinden kaynaklanmaktadır. Çünkü ölçülen değerler ölçü aletinin ölçüm kademesindeki maksimum ölçüm değerine çok uzaktır. Ölçüm zorunlu olarak 10 A kademesinde yapılmış olup bir alt ölçüm kademesi 0,2 A'dir. Dolayısıyla düşük değerlerde hassas ölçümlerin sonuçları hataya daha açıktır. Motor etiketinde belirtilen 5,4 A'lik maksimum akım değerinin simülasyonlar sırasında tüm yük seçeneklerinde aşılmamış olması da ayrıca önemlidir.

Oluşturulan Simulink modelinin geçerliliğini test etmek amacıyla, Bal ve ark. (2007) tarafından yapılan "Vektör Denetimli Kalıcı Mıknatıslı Senkron Motorun

Uzay Vektör Darbe Genişliği Modülasyonu ile Performans Analizi" isimli deneysel çalışmada kullanılan 1,1 kW'lık KMSM için elde edilen simülasyon sonuçları incelendiğinde, motorun, sürücüde belirlenen histerisiz bandına uygun olarak hatasız bir şekilde yük momentini karşıladığı görülmektedir. Simülasyondan elde edilen hız eğrisi incelendiğinde motorun hiç salınım yapmadan 15 ms'de kararlı bir şekilde hızlandığı ve 3744 d/d'ya ulaştığı görülmektedir. Her ne kadar etiket bilgisinde verilen anma hızı değeri 3800 d/d olsa da uygulama sırasında motor hızının kaç d/d olduğu bilinmemektedir. Dolayısıyla motor, etiket bilgisine göre 56 d/d'lık bir hata üretmiştir. Bu ise % 1,47'lik bir hız hatasına denk gelmektedir. Akım eğrisi incelendiğinde ise motorun tam yükte 2,55 A'lik bir akım çektiği görülmektedir. Dolayısıyla etiket bilgisine göre 0,25 A'lik bir akım hatası söz konusudur. Fakat ilgili motorun tam yük durumuna ilişkin deneysel çalışma sonucu bulunmadığından tam yük durumunda çekilecek akım ve motor hızı için nihai bir hata kestirimi yapmak sağlıklı olmayacaktır.

# 9. SONUÇLAR VE ÖNERİLER

## 9.1 Sonuçlar

0,25 kW'lık KMSM için yapılan deneysel çalışma ve simülasyonlardan elde edilen akım sonuçlarının, motorun anma gücüne yakın olan bölgelerinde ihmal edilebilir bir hata yüzdesi ile örtüştüğü görülmektedir. İstenilen momenti, sürücünün tasarlandığı histerisiz bandı sınırları içerisinde ürettiği görülen simülasyonda, hız yanıtının da deneyde ölçülen sınırlar içerisinde kaldığı, sadece motorun boşta çalışması durumunda % 0,2'lik kabul edilebilir bir hız hatası olduğu görülmüştür.

Modelin geçerliliğini sınamak amacıyla 1,1 kW'lık bir KMSM için tam yükte elde edilen benzetim sonuçları, ilgili motorun tam yükte yapılmış deney sonuçları olmadığından etiket bilgilerine göre kıyaslanmıştır. Yapılan kıyaslamada motorun yük momentini istenilen histerisiz banda uygun olarak hatasız ürettiği görülmüştür. Referans olarak girilen anma hızına göre % 1,47'lik bir hız hatası söz konusudur. Akım değerinde ise 0,25 A'lik bir aşım görülmüştür.

Elde edilen bu sonuçlar ile KMSM'lerin, farklı yüklere vereceği akım, hız ve moment tepkilerini deneysel çalışma yapmadan inceleyerek tasarım ve geliştirme çalışmalarına katkıda bulunma hedefine ulaşılmıştır.

## 9.2 Öneriler

Bu çalışma motor sıcaklığının simülasyona dâhil edilmesi bakımından önemlidir. Ancak motor sıcaklığının sabit mıknatıs üzerindeki olumsuz etkisinin dikkate alınması, daha hassas sonuçlara ulaşılması bakımından büyük önem taşımaktadır. Dolayısıyla bundan sonraki simülasyonları, motor sıcaklığının sabit mıknatıs üzerindeki etkisini dikkate alarak yapmak, çok daha düşük hata yüzdesine sahip sonuçları almayı sağlayacaktır.

## 10. KAYNAKLAR

Abido, M. A., Udin, M. N. and Rahman, M. A., 2003. A new fuzzy logic controller based IPM synchronous motor drive. Electric Machines And Drives Conference, 2003. IEMDC'03. IEEE International**.** Publication Date: 1–4 June 2003. Volume: 3, On page(s): 1795- 1801

Arroyo, E. L. C., 2006. Modeling and simulation of permanent magnet synchronous motor drive system. Degree Of Master Of Science In Electrical Engineering. University Of Puerto Rico Mayagüez Campus.

Bal, G., 2004. Özel Elektrik Makineleri, Seçkin Yayıncılık, Sayfa 128-145.

Bal, G., Özgenel, M. C. ve Demirbaş, Ş., 2007. Vektör Denetimli Kalıcı Mıknatıslı Senkron Motorun Uzay Vektör Darbe Genişliği Modülasyonu ile Performans Analizi, Politeknik Dergisi, Cilt: 10, Sayı: 1, Sayfa: 7-13

Bianchi, N. and Canova, A., 2002. FEM analysis and optimisation design of an ipm synchronous motor. Power Electronics, Machines And Drives, 2002. International Conference On (Conf. Publ. No. 487) Publication Date: 4–7 June 2002. On page(s): 49- 54

Chaudhari, B. N. and Femandes, B.G., 2001. Steady state performance of polyphase permanent magnet synchronous motor fed from single phase supply system. Power Engineering Society Winter Meeting, 2001. IEEE Volume 3, Issue, 2001 Page(s):1382 – 1387 Vol.3

Cho, D. H., Jung, H.-K. and Sim, D.-S., 1999. Multiobjective optimal design of interior permanent magnet synchronous motors considering improved core loss formula. IEEE Transactions On Energy Conversion, Vol. 14, No. 4, December

Chun, J. S., Jung, H.-K. and Hahn, S.-Y., 1998. A study on comparison of optimization performances between immune algorithm and other euristie algorithms. IEEE Transactions On Magnetics, Vol 34, No. 5, September

Dandil, B. ve Gökbulut, M., 2007. Sabit mıknatıslı senkron motorların bulanık sinir ağı denetleyici ile dayanıklı hız denetimi. F. Ü. Fen Ve Mühendislik Bilimleri Dergisi, 16(4), 725–734

Duru, T., 1997. Mıknatıslı senkron makinanın magnetik analizi ve modellenmesi. Doktora Tezi, Kocaeli Üniversitesi Fen Bilimleri Enstitüsü, Kocaeli.

Freescale Semiconductor Application Note, 2005. AN1931.

Gao, Y. and Parsa, L., 2007. Modified direct torque control of five-phase permanent magnet synchronous motor drives. Applied Power Electronics Conference, Twenty Second Annual IEEE Publication Date: Feb. 2007. On page(s): 1428–1433

Hossain, S., Smith, D., Gebhart, S. and Deshpande, U., 2005. Torque ripple tester for a permanent magnet synchronous motor. Electric machines and drives, 2005 IEEE International Conference On. Publication Date: 15–18 May 2005. On page(s): 1020- 1024

Ichikawa, S., Tomita, M., Doki, S. and Okuma, S., 2006. Sensorless control of permanent-magnet synchronous motors using online parameter identification based on system identification theory. IEEE Transactions On Industrial Electronics, Vol. 53, No. 2, April

Imai, N., Morimoto, S., Sanada, M. and Takeda, Y., 2005. Influence of PM flux variation and magnetic saturation on sensorless control for interior permanent magnet synchronous motors. Industry Applications Conference, Fourtieth IAS Annual Meeting. Conference Record Of The 2005 Publication Date: 2–6 Oct. 2005 Volume: 3, On page(s): 1776- 1783

Itoh, J.-I., Nomura, N. and Ohsawa, H., 2002. A comparison between V/f control and position-sensorless vector control for the permanent magnet synchronous motor. Power Conversion Conference, Volume: 3, On page(s): 1310-1315

Jang, S.M., Ko, K.-J., Cho, H.-W. and Choi, J.-Y., 2007. Electromechanical parameters calculation of permanent magnet synchronous motor using the transfer relations theorem. IEEE Transactions On Magnetics, Vol. 43, No. 6, On page(s): 2495–2497.

Jeffrey Ku, C.-F., Hsu, C.-H., Tsai C.-C., 2007. Control of a permanent magnet synchronous motor with a fuzzy sliding-mode controller. The International Journal Of Advanced Manufacturing Technology Vol. 32, Numbers 7–8 April, On page(s):757–763

Juming, S., Ming, Z. and Yanmin, S., 2003. Study of Optimal Efficient Control of Permanent Synchronous Motor, Electrical Machines and Systems, Vol. 1, On page(s): 41- 44

Kurt, Ü., 2006. Eksenel akılı sürekli mıknatıslı senkron makinalar için yeni tasarım modeli geliştirme. Doktora Tezi, Ondokuzmayıs Üniversitesi Fen Bilimleri Enstitüsü, Samsun.

Liu, T.-H., D.-F. Chen and C.-K. Hung. 2005. Nonlinear controller design and implementation for a matrix-converter-based pmsm drive system. IEE Proc.-Electr. Power Appl., Vol. 152, No. 5

Lu, Z., Sheng, H., Hess, H. L. and Buck, K. M., 2005. The modeling and simulation of a permanent magnet synchronous motor with direct torque control based on matlab/simulink. Electric Machines And Drives, 2005 IEEE International Conference On Publication Date: 15–18 May.

Luukko, J., Niemela, M. and Pyrhonen, J., 2007. Estimation of rotor and load angle of direct-torque-controlled permanent magnet synchronous machine drive. IET Electr. Power Appl., 1, (3), Pp. 299–306

Maiti, S., Chakraborty, C., 2006. Reactive power based speed sensorless controller for permanent magnet synchronous motor drive. Industrial Technology, ICIT 2006. IEEE International Conference On Publication Date: 15–17 Dec. 2006 On page(s): 247–252

Modran, L.N.,2008. Digital simulation of induction and permanent magnet synchronous motor starting. Optimization of Electrical and Electronic Equipment, 2008. (OPTIM 2008) 11th International Conference On Publication Date: 22-24 May 2008, On page(s): 139-146

Mohammed, A., Godbole, K. and Konghirun, M., 2006. Dual field oriented permanent magnet synchronous motor (PMSM) drive using a single DSP controller. Applied Power Electronics Conference And Exposition,. APEC Apos; 06. Twenty-First Annual IEEE. 19–23 March

Monajemy, R., 2000. Control strategies and parameter compensation for permanent magnet synchronous motor drives. The Faculty Of The Virginia Polytechnic Institute And State University. Degree Of Doctor Of Philosophy In Electrical Engineering

Morimoto, S., Shimmei, A., Sanada, M., Takeda, Y., 2007. Position and speed sensorless control system of permanent magnet synchronous motor with parameter identification. Electrical Engineering In Japan, Vol. 160, No. 2.

Muni, B. P., Pillai, S. K. and Saxena, S. N., 1996. Digital Simulation of Internal Power Factor Angle Controlled Surface Mounted Permanent Magnet Synchronous Motors, Power Electronics, Drives and Energy Systems for Industrial Growth**,** Vol. 2, On page(s): 900-906

Nakai, H., Ohtani, H., Satoh, E. and Inaguma, Y., 2005. Development and testing of the torque control for the permanent-magnet synchronous motor. IEEE

Transactions On Industrial Electronics, Volume 52, Issue 3, June 2005 page(s): 800 – 806

Nakashima, S., Inagaki, Y. and Miki, I., 2000. Sensorless initial rotor position estimation of surface permanent-magnet synchronous motor. IEEE Transactions On Industry Applications, Vol. 36, No. 6, November/December

Özçıra, S., Bekiroğlu, N. and Aycicek, E., 2008. Speed control of permanent magnet synchronous motor based on direct torque control method. Power Electronics, Electrical Drives, Automation and Motion, 2008. (SPEEDAM 2008) International Symposium On Publication Date: 11-13 June 2008, On page(s): 268-272

Özgenel, M. C., 2003. Kalıcı mıknatıslı senkron motorun vektör kontrol tekniği ile denetimi. Doktora Tezi, Gazi Üniversitesi Fen Bilimleri Enstitüsü, Ankara.

Pillay, P. and Krishnan, R., 1988. Modeling of Permanent Magnet Motor Drives, IEEE Transaction on Industrial Electronics, Vol. 35, No 4.

Pillay, P. and Krishnan, R., 1989. Modeling, Simulation, and Analysis of Permanent-Magnet Motor Drives, Part I: The Permanent-Magnet Synchronous Motor Drive, IEEE Transaction on Industry Applications, Vol. 25, No 2.

Pillay, P. and Krishnan, R., 1991. Application Characterictics of Permanent Magnet Synchronous Motor and Brushless dc Motors for Servo Drives, IEEE Transaction on Industry Applications, Vol. 27, No 5.

Ren, H. and Liu, D., 2006. Nonlinear feedback control of chaos in permanent magnet synchronous motor. IEEE Transactions On Circuits And Systems. Express Briefs, Vol. 53, No. 1, January

Sakamoto, K., Iwaji, Y., Endo, T., Taniguchi, T., Niki, T., Kawamata, M., Kawamura, A., 2007. Position sensorless vector control of permanent magnet synchronous motors for electrical household appliances. Power Conversion Conference - Nagoya, PCC '07 Publication Date: 2–5 April 2007 On page(s): 1119–1125

Sim, D. J., Cho, D.-H., Chun J.-S., , Junga, H.-K. and Chung, T.-K., 1997**.** Efficiency optimization of interior permanent magnet synchronous motor using genetic algorithms. IEEE Transactions On Magnetics, Vol 33**,** No 2, March

Toliyat, H., A. and Campbell, S., 2004. DSP-Based Electromechanical Motion Control, CRC Press LLC, Boca Raton, Pages:193-194.

Üstün, O., 2004. Kalıcı Mıknatıslı Bir Senkron Motor Hızının Bulanık Sinirsel ve Kayma Kipli Denetleyicilerle Dönüşümlü Denetimi, Doktora Tezi, Gazi Üniversitesi Fen Bilimleri Enstitüsü, Ankara.

Yamada, A., Kawano, H., Miki, I., Nakamura, M,. 2007. A method of reducing torque ripple in interior permanent magnet synchronous motor. Power Conversion Conference - Nagoya,. PCC '07 Publication Date: 2–5 April 2007 On page(s): 322–325

Yaman, K., 1999. Sürekli mıknatıslı senkron motor tasarımı ve analizi, Doktora Tezi, Kocaeli Üniversitesi Fen Bilimleri Enstitüsü, Kocaeli.

Zhang, C., Ma, B., Liu, H. and Chen, S., 2006. A new approach to direct torque control of interior permanent magnet synchronous motor. Systems And Control In Aerospace and Astronautics. ISSCAA 2006. 1st International Symposium On Publication Date: 19–21 Jan. 2006. On page(s): 4 Pp

Zhao, L., Ham, C. H., Han, Q., Wu, T.X., Zheng, L., Sundaram, K.B., Kapat, J. and Chow, L., 2006. Design of optimal digital controller for stable super-high-speed permanent-magnet synchronous motor. IEE Proc.-Electr. Power Appl., Vol. 153, No. 2, March

Zhao, L., Ham, C., Zheng, L., Wu, T., Sundaram, K., Kapat, J. and Chow, L., 2007. A highly efficient 200.000 rpm permanent magnet motor system. IEEE Transactions On Magnetics, Publication Date: June 2007 Volume: 43, Issue: 6 On Page(S): 2528–2530

Zheng, L., Wu, T. X., Acharya, D., Sundaram, K. B., Vaidya, J., Zhao, L., Zhou, L., Ham, C. H., Arakere, N., Kapat, J. and Chow, L., 2005. Design of a superhigh-speed cryogenic permanent magnet synchronous motor. IEEE Transactions On Magnetics, Vol. 41, No. 10

Zheng, P., Zhao, J., Han, J., Wang, J., Yao, Z. and Liu, R., 2007. Optimization of the magnetic pole shape of a permanent-magnet synchronous motor. IEEE Transactions On Magnetics, Vol. 43, No. 6, On page(s): 2531–2533,

Zhu, Dengpan. 2006. Vector control of multiphase permanent magnet synchronous motors. Faculte Des Sciences Et De Genie Universite Laval Quebec (M. Sc.)

www.aksamagnet.com.tr erişim 16.09.2008

www.magnetweb.com, erişim 14.09.2008

www.stanfordmagnets.com, erişim 14.09.2008

# EK-A: DENEYSEL ÇALIŞMADA KULLANILAN KMSM'DEKİ KALICI MIKNATISIN MANYETİK ÖZELLİKLERİ

## NEOMAG S™

Sintered NdFeB

Table of Magnetic Properties

| | (BH) max | | Br | | HcJ | | HcB | | Temperature Coefficient of Br (23-100°C) | Temperature Coefficient of Hcj (23-100°C) |
|---|---|---|---|---|---|---|---|---|---|---|
| GRADE | kJ/m³ | MGOe | mT | G | kA/m | Oe | kA/m | Oe | %/K | %/K |
| NEOMAG S 50M | 398 | 50 | 1430 | 14300 | 950 | 12000 | 925 | 11500 | -0.12 | -0.70 |
| NEOMAG S 48A | 374 | 47 | 1390 | 13900 | 1200 | 15000 | 1050 | 13200 | -0.12 | -0.70 |
| NEOMAG S 41B | 327 | 41 | 1310 | 13100 | 1350 | 17000 | 960 | 12050 | -0.12 | -0.70 |
| NEOMAG S 45A | 358 | 45 | 1370 | 13700 | 1200 | 15000 | 1025 | 12900 | -0.12 | -0.70 |
| NEOMAG S 43A | 343 | 43 | 1340 | 13400 | 1200 | 15000 | 985 | 12400 | -0.12 | -0.70 |
| NEOMAG S 42A | 334 | 42 | 1310 | 13100 | 1200 | 15000 | 1025 | 12900 | -0.12 | -0.70 |
| NEOMAG S 46B | 358 | 45 | 1360 | 13600 | 1000 | 12500 | 1020 | 12800 | -0.12 | -0.70 |
| NEOMAG S 40A | 319 | 40 | 1280 | 12800 | 1200 | 15000 | 1000 | 12600 | -0.12 | -0.70 |
| NEOMAG S 40HC | 319 | 40 | 1290 | 12900 | 1550 | 19500 | 940 | 11800 | -0.11 | -0.70 |
| NEOMAG S 38KC | 303 | 38 | 1260 | 12600 | 1700 | 21500 | 985 | 12400 | -0.11 | -0.60 |
| NEOMAG S 37B | 295 | 37 | 1250 | 12500 | 1350 | 17000 | 920 | 11550 | -0.12 | -0.70 |
| NEOMAG S 36HC | 287 | 36 | 1230 | 12300 | 1550 | 19500 | 960 | 12050 | -0.11 | -0.70 |
| NEOMAG S 35UC | 279 | 35 | 1200 | 12000 | 2150 | 27000 | 900 | 11300 | -0.11 | -0.55 |
| NEOMAG S 34KC | 271 | 34 | 1200 | 12000 | 1700 | 21500 | 915 | 11500 | -0.11 | -0.60 |
| NEOMAG S 31UC | 247 | 31 | 1140 | 11400 | 2150 | 27000 | 850 | 10700 | -0.11 | -0.55 |
| NEOMAG S 31VC | 247 | 31 | 11130 | 11300 | 2650 | 33000 | 865 | 10850 | -0.11 | -0.55 |
| NEOMAG S 28VC | 223 | 28 | 1080 | 10800 | 2650 | 33000 | 810 | 10150 | -0.11 | -0.55 |