



ISSN:1306-3111

e-Journal of New World Sciences Academy
2011, Volume: 6, Number: 1, Article Number: 1A0123

ENGINEERING SCIENCES

Received: October 2010

Accepted: January 2011

Series : 1A

ISSN : 1308-7231

© 2010 www.newwsa.com

Mehmet Polat¹

Eyyüp Öksüztepe²

Hasan Kürüm³

Firat University¹⁻³

Tunceli University²

mpolat@firat.edu.tr

Elazığ-Turkey

**SONLU ELEMANLAR YÖNTEMİNDEN ELDE EDİLEN ENDÜKTANS EĞRİLERİ KULLANILARAK 8/6
DALGIÇ POMPA TİPİ ANAHTARLAMALI RELÜKTANS MOTORUN MODELLENMESİ VE KAPALI
ÇEVİRİM HIZ VE AKIM KONTROLÜ**

ÖZET

Bu çalışmada öncelikle ARM'nin doğrusal ve doğrusal olmayan durumdaki modelleri ortaya konmuştur. Motorun doğrusal olmayan yapısını ortaya koymak için sonlu elemanlar yönteminden elde edilen endüktans eğrileri modele dâhil edilmiştir. Endüktans eğrisinin verileri ANSYS 10 programı kullanılarak elde edilmiştir. Daha sonra model genişletilerek kapalı çevrim hız ve akım kontrolü eklenmiştir. Sayısal denetim teknik yöntemlerini gerçekleştirmek için DSpace firmasının üretmiş olduğu DS1103 Ace Kit kullanılmıştır. Son olarak hız ve akım kontrolünün teorik ve deneysel sonuçları irdelenmiştir.

Anahtar Kelimeler: Dalgıç Pompa Tipi ARM, Modelleme, Kapalı Çevrim Hız ve Akım Kontrolü, Sonlu Elemanlar Yöntemi, MATLAB

**MODELING AND CLOSED-LOOP SPEED AND CURRENT CONTROL OF SUBMERSIBLE PUMP-TYPE
SWITCHED RELUCTANCE MOTOR WITH 8/6 POLES USING INDUCTANCE CURVES OBTAINED
FROM THE FINITE ELEMENT METHOD**

ABSTRACT

In this study, firstly, that are linear and nonlinear models of ARM have been revealed. Inductance curves obtained from the finite element method has been included in the model to investigate a non-linear structure of the motor. Inductance curve data were obtained by using program ANSYS 10. Then, the closed-loop speed and current control were added at the extended model. DS1103 Ace Kit produced by the DSpace company are used to perform the numerical control technical methods. Finally, the speed and current control, theoretical and experimental results are discussed.

Keywords: Submersible Pump-Type Switched Reluctance Motor, Modeling, Closed-Loop Speed and Current Control, Finite Element Method, MATLAB

1. GİRİŞ (INTRODUCTION)

Anahtarlamalı Relüktans Motor (ARM), stator ve rotoru çıkık kutuptan oluşmuş ve rotorunda sargı olmayan basit yapılı bir elektrik makinasıdır. ARM'ler *relüktans kuvveti* ile elektriksel enerjiyi mekanik enerjiye çevirirler. Bu kuvvet dönme hareketini gerçekleştiren döndürme momentini oluşturmaktadır. Sürekli bir momentin üretilebilmesi, rotor kutbunun stator kutbuna göre konumu izlenip uygun faz sargılarının sırasıyla beslenmesine bağlıdır. Bunu sağlamak için de bir güç elektroniği devresi ve denetim mekanizmasına gereksinim duyulur. Son yıllarda ARM'ye yönelmenin sebebi, yazılım, tasarım ve teknolojiadaki gelişmelere paralel olarak, bu motorların yapısının basit, güvenilir ve kararlı olması, çalışma ortamından hemen hemen bağımsız olması, düşük ve yüksek hızlarda çalıştırılabilmesi, üretim maliyetinin düşük ve bakım-onarım masrafının az olması sıralanabilir.

2. ÇALIŞMANIN ÖNEMİ (RESEARC SIGNIFICANCE)

Pratik çalışmaya geçmeden önce teorik olarak modelin çok iyi bir şekilde ortaya konulması gerekmektedir. Bu durumda ARM'lerde üretilen moment endüktansa bağlı olduğu için ARM endüktansının konuma göre değişimi iyi bilinmelidir. Bunun içinde çalışmada endüktans eğrisini ortaya çıkarmak için SEY kullanılmıştır. Ayrıca iyi ve hassas bir kontrol gerçekleştirmek için, elde edilen eğrilerle birlikte aşağıda ayrıntılı bir şekilde anlatılan kontrol teknikleri kullanılarak ARM'nin hem teorik hemde deneysel olarak hız ve akım kontrolü gerçekleştirilip karşılaştırılmaları yapılmıştır.

3. ARM'İN DOYMASIZ MODELİ (LINEAR MODEL OF THE SRM)

Doymasız çalışmadaki kabuller; endüktansın akımla değişmediği, manyetik doyumun olmadığı ve ayrıca fazlar arasındaki ortak endüktans çok küçük olduğu için ihmal edildiğidir.[1, 2, 3]

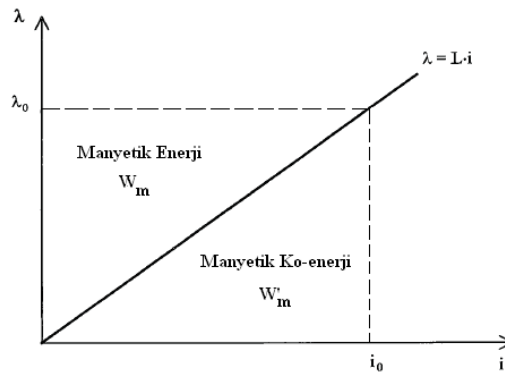
Şekil 1'de ARM'de doymanın göz önüne alınmadığı durumdaki akı ile akım arasındaki ilişki yer almıştır. Bu şekil temel alınarak faz sargısından geçen akım ile faz kutbunda oluşan akı arasındaki ilişki aşağıdaki gibi yazılabilir;

$$\lambda = L(\theta)i \quad (1)$$

λ : Motor akısı

$L(\theta)$: Rotor konumunun fonksiyonu olan sargı endüktansı

i : Faz akımı



Şekil 1. ARM'nin doğrusal durumdaki akı-akım değişimi
(Figure 1. Plot of flux-flow changes of SRM in linear saturation)

Şekil 1'in eğimi endüktans değerini verir. Doğrusal çalışma bölgesinde L sargı endüktansı, θ rotor konumunun veya zamanın bir fonksiyonudur ancak akımın fonksiyonu değildir. Şekil 1'deki doğrusal değişimden dolayı, manyetik alanda depo edilen enerji ile mekanik güce dönüşen manyetik Ko-enerji birbirine eşittir. Sisteme verilen enerji ise bu

enerjilerin toplamıdır. Enerjilerin denklemi aşağıdaki gibi yazılabilir [4,5];

$$W_m = W_m' = \frac{1}{2} L(\theta) i^2 \quad (2)$$

Denklem 2'den hareket ederek ARM'nin moment ifadesi;

$$T = \frac{1}{2} \frac{\partial L(\theta)}{\partial \theta} i^2$$

(3)

olarak elde edilir. ARM doğrusal bölgede iken $dL/d\theta$ sabittir. Bu bölgede akımın değeri de sabit tutulursa üretilen momentte sabit olur. Eğer bu şartlar oluşturulursa motorun akustik gürültüsü de azaltılmış olunur.

Fazlar için ayrı ayrı moment ifadeleri yazılırsa,

$$T_a(\theta, i_a) = \frac{1}{2} i_a^2 \frac{\partial L_a(\theta)}{\partial \theta}$$

$$(4) \quad T_b(\theta, i_b) = \frac{1}{2} i_b^2 \frac{\partial L_b(\theta)}{\partial \theta} \quad (5)$$

$$T_c(\theta, i_c) = \frac{1}{2} i_c^2 \frac{\partial L_c(\theta)}{\partial \theta} \quad (6)$$

$$T_d(\theta, i_d) = \frac{1}{2} i_d^2 \frac{\partial L_d(\theta)}{\partial \theta} \quad (7)$$

bağıntıları elde edilir. Toplam üretilen moment ise fazların bağımsız ürettiği momentlerin toplamına eşittir:

$$T_e(\theta, i_a, i_b, i_c, i_d) = T_a(\theta, i_a) + T_b(\theta, i_b) + T_c(\theta, i_c) + T_d(\theta, i_d) \quad (8)$$

ARM'nin mekanik hareket denklemi,

$$T_e = J \frac{\partial^2 \theta}{\partial t^2} + B \frac{\partial \theta}{\partial t} + T_L \quad (9)$$

şeklindedir. Burada;

T_e : ARM'nin üretilen moment,

T_L : Yük momenti,

B : Sürtünme katsayısı

J : Eylemsizlik momentidir.

Açısal hız ω ile konum θ arasındaki ilişki,

$$\omega = \frac{\partial \theta}{\partial t} \quad (10)$$

Denklem 10, Denklem 9'da yerine yazılırsa,

$$T_e = J \frac{\partial \omega}{\partial t} + B\omega + T_L \quad (11)$$

elde edilir. ARM sisteminin durum değişkenlerini i faz akımı ve ω rotor hızı oluşturur. Gerilim ve moment denklemleri düzenlendiğinde durum değişkenleri denklemleri elde edilir.

ARM'nin elektriksel bağıntılarını elde etmek için Şekil 2'deki eşdeğer devre kullanılır. Buradan gerilim ifadesi;

$$V = Ri + \frac{\partial \lambda(\theta, i)}{\partial t} \quad (12)$$

yazılabilir. Burada;

V : Faz gerilimi,

i : Faz akımı,

R : Faz direnci

λ : Faz akısı

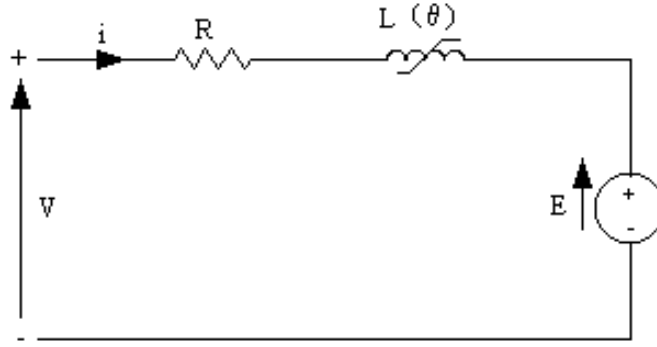
θ : Rotor konumudur

ARM'nin faz akısı, θ rotor konumu ve faz akımının bir fonksiyonudur. Akım ve konuma göre kısmi türevi alınır;

$$V = Ri + \frac{\partial \lambda}{\partial i} \frac{\partial i}{\partial t} + \frac{\partial \lambda}{\partial \theta} \frac{\partial \theta}{\partial t} \quad (13)$$

denklemler elde edilir.
endüktans bağıntısı için

$$L = \frac{\partial \lambda}{\partial i} \quad (14)$$



Şekil 2. ARM'nin bir fazının eşdeğer devresi.
(Figure 2. Single-phase equivalent circuit of SRM)

yazılabilir. Akı ile endüktans arasında doğrusal ilişki kullanılırsa

$$\lambda = iL \quad (15)$$

yazılabilir. Buradan Denklem 10-14 ve 15 ifadeleri Denklem 13'te yerine yazılırsa

$$V = Ri + L \frac{\partial i}{\partial t} + i \frac{\partial L}{\partial \theta} \omega \quad (16)$$

elde edilir. Denklem 16 eşitliğinde eşitliğin sağ tarafındaki üçüncü terim sargıda endüklenen zıt elektromotor kuvveti (emk) verir.

$$e = i \frac{\partial L}{\partial \theta} \omega \quad (17)$$

e bir faz sargısında endüklenen zıt emk'yi verir. Dört fazlı ARM'nin her bir fazı için gerilim bağıntıları Denklem 18-21 ile ifade edilir.

$$V_a = R_a i_a + L_a \frac{di_a}{dt} + i_a \frac{\partial L_a}{\partial \theta} \omega \quad (18)$$

$$V_b = R_b i_b + L_b \frac{di_b}{dt} + i_b \frac{\partial L_b}{\partial \theta} \omega \quad (19)$$

$$V_c = R_c i_c + L_c \frac{di_c}{dt} + i_c \frac{\partial L_c}{\partial \theta} \omega \quad (20)$$

$$V_d = R_d i_d + L_d \frac{di_d}{dt} + i_d \frac{\partial L_d}{\partial \theta} \omega \quad (21)$$

olur. Buradaki indisler fazları göstermektedir.

ARM'nin durum denklemleri,

$$\frac{\partial i_a}{\partial t} = \frac{1}{L_a} \left[V_a - \left(R_a i_a + i_a \frac{\partial L_a}{\partial \theta} \omega \right) \right] \quad (22)$$

$$\frac{\partial i_b}{\partial t} = \frac{1}{L_b} \left[V_b - \left(R_b i_b + i_b \frac{\partial L_b}{\partial \theta} \omega \right) \right] \quad (23)$$

$$\frac{\partial i_c}{\partial t} = \frac{1}{L_c} \left[V_c - \left(R_c i_c + i_c \frac{\partial L_c}{\partial \theta} \omega \right) \right] \quad (24)$$

$$\frac{\partial i_d}{\partial t} = \frac{1}{L_d} \left[V_d - \left(R_d i_d + i_d \frac{\partial L_d}{\partial \theta} \omega \right) \right] \quad (25)$$

$$\frac{\partial w}{\partial t} = \frac{1}{J} [T_e - (B\omega + T_L)] \quad (26)$$

$$\frac{\partial \theta}{\partial t} = \omega \quad (27)$$

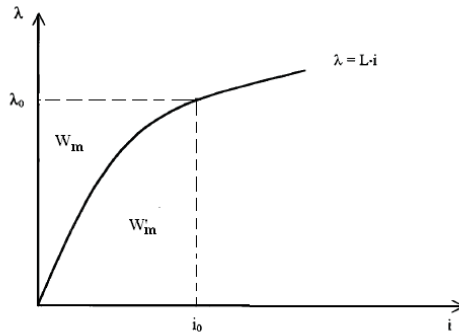
olur.

4. ARM'İN DOYMALI MODELİ (SATURATION (NON-LINEAR) MODEL OF THE SRM)

Şekil 3'te görüldüğü gibi, doyma bölgesinde çalışan ARM'nin manyetik devrede depolanan enerji (W_m), Ko- enerjiden daha küçüktür. Buda gösteriyor ki doyma bölgesinde çalışan bir ARM'nin kaynaktan aldığı enerjinin çoğunu mekanik enerji olarak milinden verebilir [1,3,6]. Bunun aksine doymasız bölgede çalışan ARM ise kaynaktan aldığı enerjinin sadece yarısını mekanik enerjiye dönüştürebiliyordu.

Şekil 2'deki eşdeğer devreyi baz alarak ARM'nin doymada çalışması durumundaki motor denklemlerini aşağıdaki eşitliklerle ifade edebiliriz.

$$V = Ri + \frac{\partial \lambda}{\partial t} \quad (28)$$



Şekil 3. ARM'nin doyma bölgesindeki akı-akım değişimi
(Figure 3. Plot of flux-flow changes of SRM in saturation area)

$$V = Ri + \frac{\partial}{\partial t} [L(\theta, i) i] \quad (29)$$

$$V = Ri + \frac{\partial L(\theta, i)}{\partial t} i + L(\theta, i) \frac{\partial i}{\partial t} \quad (30)$$

$$V = Ri + \frac{\partial L(\theta, i)}{\partial \theta} \frac{\partial \theta}{\partial t} i + \frac{\partial L(\theta, i)}{\partial i} \frac{\partial i}{\partial t} i + L(\theta, i) \frac{\partial i}{\partial t} \quad (31)$$

$$V = Ri + \left[L(\theta, i) + \frac{\partial L(\theta, i)}{\partial i} i \right] \frac{\partial i}{\partial t} + \frac{\partial L(\theta, i)}{\partial \theta} \frac{\partial \theta}{\partial t} i \quad (32)$$

$$V = R.i + l_{art}(\theta, i) \frac{\partial i}{\partial t} + emk(\theta, i) \quad (33)$$

Denklem 33'deki $l_{art}(\theta, i)$ artımsal endüktansı ve $emk(\theta, i)$ zıt elektromotor kuvvettir. Denklem 33'ün birinci terimi sargı direncindeki gerilim düşümünü, ikinci terim akım değişimlerine karşı oluşan gerilimi, son terim ise hızla orantılı olarak endüklenen gerilimi ifade eder.

Doymalı durumda depolanan manyetik enerji ve manyetik Ko-enerji denklem 34 ve 35 ile ifade edilir.

$$W_m = \int_0^{\lambda} i(\lambda, \theta) \cdot d\lambda \quad (34)$$

$$W_m' = \int_0^i (\lambda, \theta) \cdot di \quad (35)$$

Denklem 35'ten doyma çalışma bölgesindeki ARM'nin moment ifadesi aşağıdaki gibi yazılır;

$$T = \frac{\partial W_m'}{\partial \theta} \quad (36)$$

Denklem 36 ARM'nin en temel moment ifadesidir. Burada eğer sargı akımı sabit tutulur ve rotor $\Delta\theta$ kadar yer değiştirirse ΔW_m miktarda enerji değişimi ortaya çıkar. Bu noktadan hareketle moment aşağıdaki gibi ifade edilebilir;

$$T = \frac{\Delta W_m}{\Delta \theta} \quad (37)$$

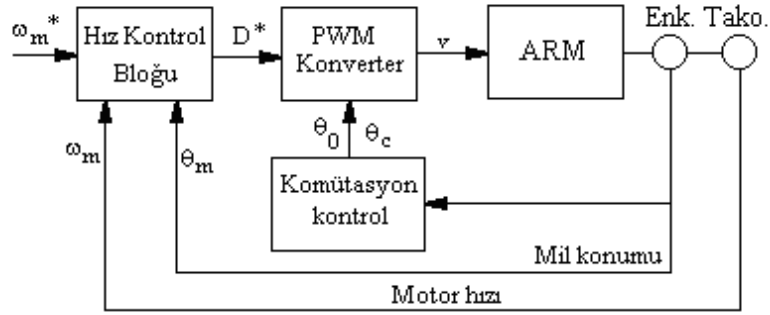
5. ARM'İN KAPALI ÇEVİRİM HIZ KONTROLÜ (CLOSED-LOOP SPEED CONTROL OF SRM)

Pompa türü bir ARM'nin hız kontrol stratejisi iki eş zamanlı eylemden meydana gelir [7]. Birinci eylem, darbe genişlik modülasyonuna göre görev periyodunu ayarlayarak motor hızını dengelemek için sayısal denetleyici tarafından yerine getirilir. Bunun için PI ve faz-lead düzenleyici seri bir şekilde kullanılır. Burada PI düzenleyicisine sürekli durum hız hatasını elimine etmek için ihtiyaç duyulur. Faz-lead düzenleyicisi ise hem taşmayı hemde yükselme zamanını azaltmak için seçilir. İkinci eylem ise motor performansını ve verimini arttırmak için tetikleme açısını motor hızının bir fonksiyonu olarak ayarlamaktır. Bu durumu gerçekleştirmek için deneysel sonuçlara ihtiyaç duyulur [7,8].

ARM'nin kapalı çevrim hız kontrolü, ARM sürücüsünün bir fazında yer alan anahtarların hız kontrol bloğundan elde edilen D görev periyodu içinde açma-kapama yaptırılması suretiyle gerçekleştirilir. D görev periyodu denklem 38'deki gibi tanımlanır.

$$D = t_{on} \cdot f_{kıyııcı} = \frac{t_{on}}{T_{kıyııcı}} \quad (38)$$

Denklem 38'de verilen $f_{kıyııcı}$ ve $T_{kıyııcı}$ sırasıyla kıyııcının frekansı ve periyodudur. Kaynak gerilimi $D \times U_{da}$ kadar kıyılır [2]. Şekil 4'te ARM'nin kapalı çevrim hız kontrol şeması verilmiştir.



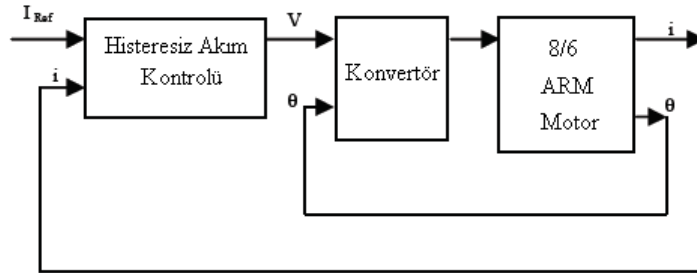
Şekil 4. ARM'nin kapalı çevrim hız kontrol şeması.
(Figure 4. Closed-loop speed control scheme of SRM)

6. ARM'İN KAPALI ÇEVİRİM AKIM KONTROLÜ (CLOSED-LOOP CURRENT CONTROL OF SRM)

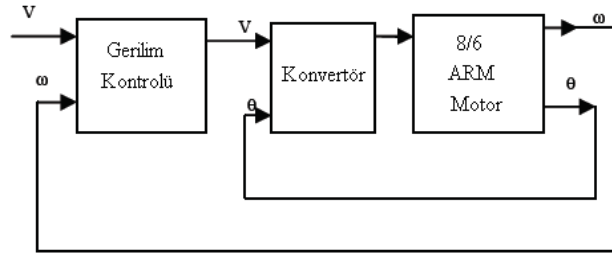
ARM, bilindiği gibi doğrusal olmayan bir yapıya sahiptir. Bu durum denetleyici tasarımını zorlaştırır. Eğer sistem doğrusallaştırılırsa doğrusal kontrol sistem teorisi denetleyici tasarımına uygulanabilir. Değişken hızlı bir ARM sürücünde çalışma noktası sürekli değişir. Belli bir çalışma noktası için tasarlanmış doğrusal olmayan bir denetleyici, akım çevriminde doğrusal çalışma koşulları ile beraber ortak endüktansın etkilerini de karşılar ve bunun sonucu olarak da daha iyi bir performans sağlar. Akım denetleyici tasarımında üç farklı yaklaşım vardır [2]:

- Doğrusallaştırılmış akım denetleyici tasarımı,
- Doğrusallaştırılmış geri beslemeli doğrusal olmayan akım denetleyici tasarımı,
- Ortak endüktansın etkilerini içeren doğrusal olmayan akım denetleyici tasarımı.

Bütün bu yöntemler istenilen akımı üretmek için gerilim ve histeresiz akım denetleyici kullanılır. Histeresiz denetleyicinin gerçekleştirilmesi PI akım denetleyicilere gerek duymadığından daha pratik görülebilir ancak yüksek hızlarda istenilen sonuçlar elde edilemez. Gerilim denetleyicide, gerilim endüktansın eğiminin yükseldiği sürece PWM şeklinde uygulanıp endüktans eğiminin azaldığı noktadan önce negatif moment oluşturmasını diye sonlandırılır. Bu yöntem yüksek hız uygulamalarında uygulanabilir çünkü burada faz akımını sınırlayan önemli derecede zıt emk mevcuttur. Histeresiz akım denetleyicide, akımın tanımlanan bir bandın içerisinde hareket etmesi yöntemine dayanır. Akım hatasına bağlı olarak, gerilim konvertöre uygulanır. Düşük hız uygulamalarında, zıt emk kaynak geriliminden oldukça küçüktür ve stator sargısından geçen akım, akım kısıyıcısı tarafından düzenlenebilir. Bu yüzden akım kontrol metodu düşük ve orta hızda uygulanır [9]. Şekil 5'de histeresiz akım kontrolünün Şekil 6'da ise gerilim denetleyicinin blok diyagramları verilmiştir.

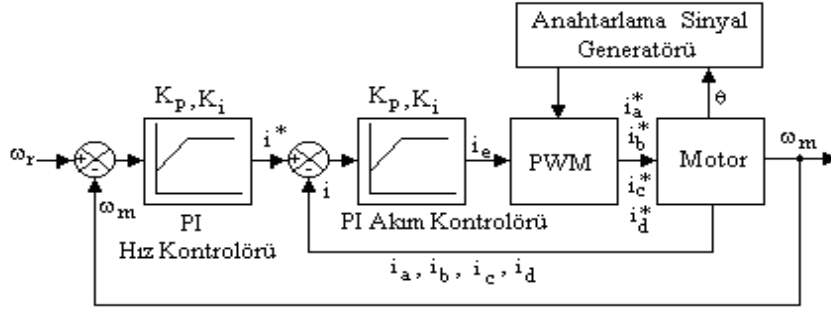


Şekil 5. ARM'de kullanılan histeresiz akım kontrolünün blok diyagramı.
(Figure 5. The block diagram of hysteresis current control using the SRM.)



Şekil 6. ARM'de kullanılan gerilim kontrolünün blok diyagramı.
(Figure 6. The block diagram of voltage control using the SRM.)

Şekil 7'de Darbe genişlik modülasyonu ile yapılan kapalı çevrim akım kontrolünün açık blok diyagramı verilmiştir.



Şekil 7. ARM sürücünün kapalı çevrim akım kontrol blok diyagramı.
(Figure 7. The block diagram of closed-loop current control of SRM driver.)

Şekil 7'de görüldüğü gibi, motor hızının referans hızdan çıkarılmasıyla bir hız hatası üretilir. Çıkan hız hatası bir PI denetleyiciden geçirilir. PI denetleyici çıkışı da denklem 39'dan elde edilen akım işaretini verir:

$$i^* = K_p(w_r - w_m) + K_i \int (w_r - w_m) dt \quad (39)$$

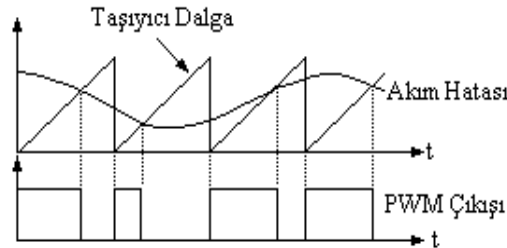
Burada w_r ve w_m sırasıyla referans hız ve rotor hızıdır. Dört fazlı bir ARM için dört bağımsız akım çevrimi mevcuttur. i_a^* , i_b^* , i_c^* , i_d^* faz akımlarını komutu üretmek için dört akım çevrimine yani PI denetleyiciye ihtiyaç duyar.

PI Akım denetleyici ile,

$$i_e = K_p(i^* - i) + K_i \int (i^* - i) dt \quad (40)$$

i_e çıkışı elde edilir. Burada, i^* kumanda akımı ve i faz akımıdır.

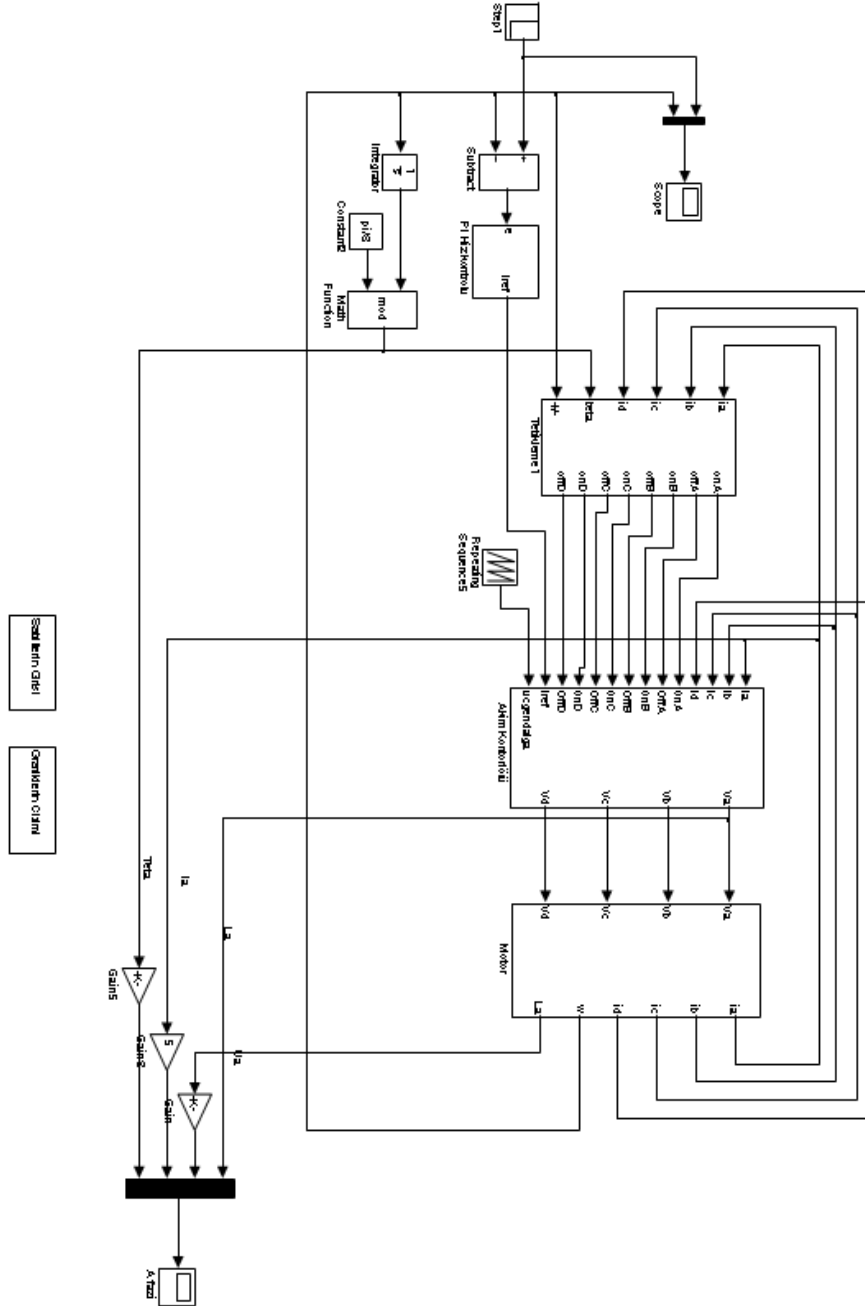
İstenilen PWM kontrol işaretini üretmek için Şekil 8'de de gösterildiği gibi akım hatası genliği, anahtarlama frekanslı taşıyıcı üçgen dalga işaret ile karşılaştırılır. Eğer taşıyıcı genlik akım hatasından daha büyükse çıkış sıfır olur ve anahtar açılır. Eğer akım hatası taşıyıcı işaretten küçük ise çıkış bir yapılar ve anahtar kapatılır.



Şekil 8. PWM işaretin elde edilişi.
(Figure 8. Evaluation of the PWM signal.)

7. ARM'İN MATLAB/SİMULİNK ORTAMINDA BENZETİMİ (SIMULATED MATLAB/SIMULINK ENVIRONMENT OF SRM)

ARM'nin benzetim çalışmaları MATLAB 7.04 kullanılarak yapılmıştır. Şekil 9'da ARM'nin kapalı çevrim hız ve akım kontrolünün genel blok şekilleri görülmektedir.

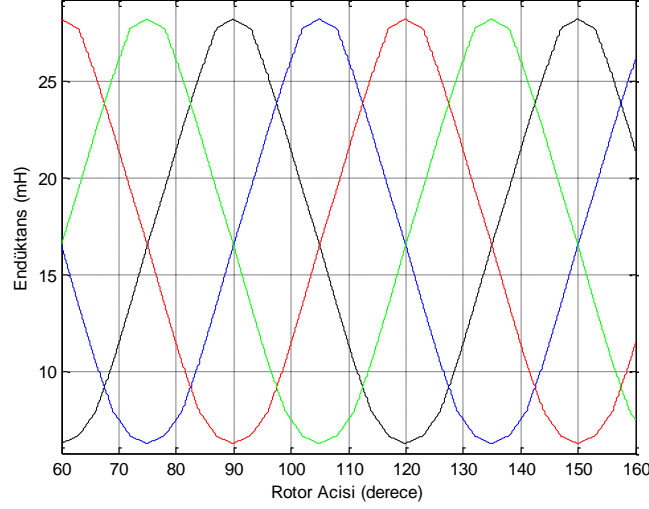


Şekil 9. MATLAB/Simulink ortamında hazırlanan 8/6 ARM'nin kapalı çevrim hız ve akım kontrolünün benzetim şeması
(Figure 9. Closed-loop speed and current control simulation diagram of the SRM with 8/6 poles prepared in MATLAB/Simulink)

8. BENZETİM VE DENEYSEL SONUÇLAR (SIMULATION AND EXPERIMENTAL RESULTS)

Tasarımı gerçekleştirilen 8/6 ARM'nin benzetim ve deneysel sonuçları yüklü- yüksüz ve kapalı çevrim hız ve akım kontrolü yapılarak elde

edilmiştir. Kapalı çevrim akım kontrolünde hem gerilim kontrolü modeli kullanılmıştır. Bu benzetimlerde ARM'nin doğrusal olmayan yapısını ortaya koymak için değişik akımlarda, ANSYS 10.0'da SEY çözümü yapılarak elde edilen endüktansların konuma karşı değişimleri kullanılmıştır. Şekil 10'da 1° aralıklarla ANSYS 10'dan elde edilen endüktans-rotor açısı eğrisi verilmiştir. Bu eğriden $L_{min}=6.333\text{mH}$ ve $L_{max} =28.17 \text{ mH}$ olarak hesaplanmıştır. Deney setinin fotoğrafı Şekil 11'de verilmiştir.



Şekil 10. Endüktans-Rotor açısı eğrisi
(Figure 10. Plot of Inductance vs Rotor angle)



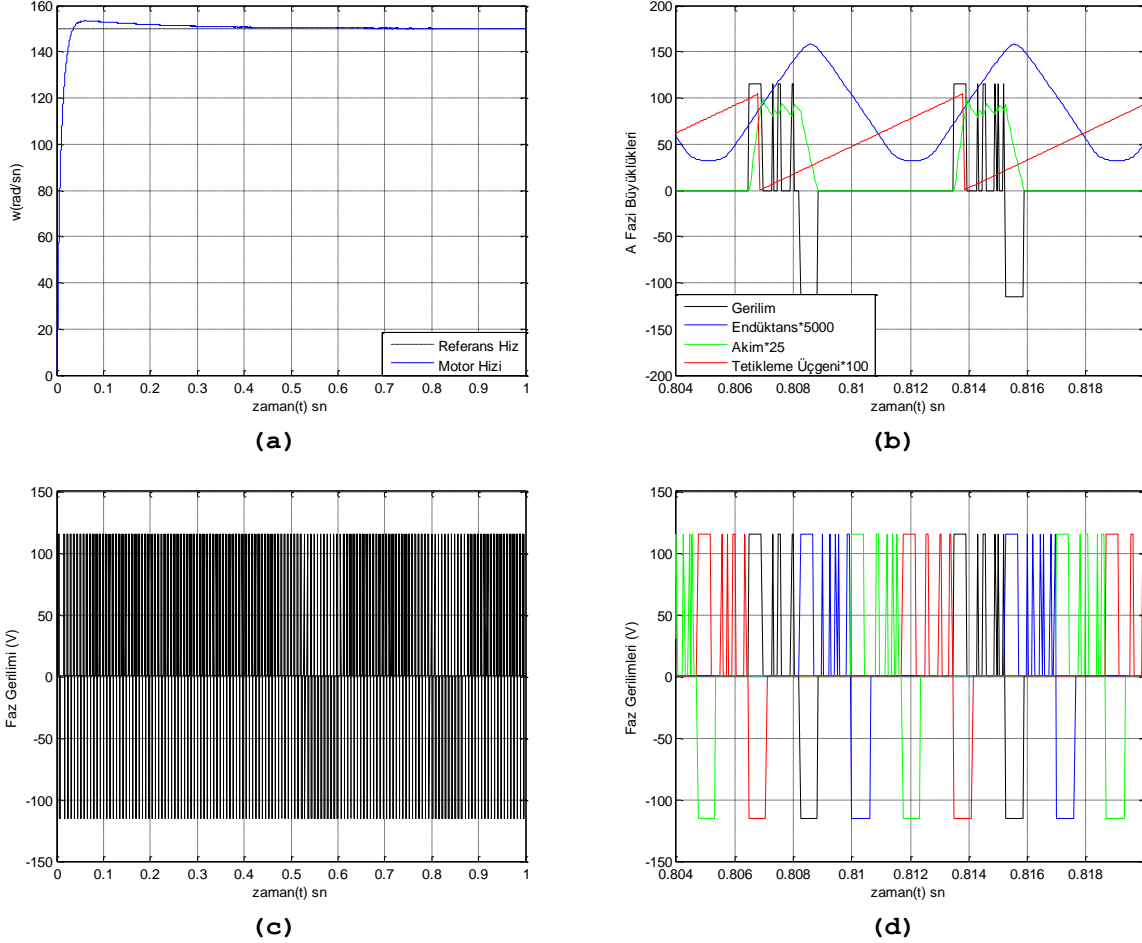
Şekil 11. Deney setinin fotoğrafı
(Figure 11. Photo of the experimental set)

8.1. Yüksüz Durum için Kapalı Çevrim Gerilim Akım Kontrolü ile Hız Kontrolü Sonuçları (Speed Control Results with Closed Loop Voltage Current Control for No-Load)

• Kapalı Çevrim Gerilim ve Hız Kontrolü (Closed-Loop Voltage And Speed Control)

İlk olarak 115 V'luk gerilimde ARM'ye 150 rad/sn'lik referans hız verilip hız ve akım kontrolünün tepkisine bakılmıştır. Buna ait benzetim sonuçları Şekil 12 ve 13'de deneysel sonuçlar ise Şekil 14'de verilmiştir.

Şekil 12'deki grafikleri irdeleyecek olursak; verilen referans hıza karşın hız kontrolünün tepkisinin iyi olduğu gözlenmiştir. Motor ataletine bağlı olarak çok kısa sürede referans hızı yakalayıp takip etmiştir. Şekil 12-b'de A fazının akım, gerilim ve endüktansı ile tetikleme üçgeninin grafikleri verilmiştir. A fazı, tetikleme üçgeninin $\pi/15$ 'i ile $27\pi/180$ arasında tetiklenmektedir. Son olarak Şekil 12-c'de A faz geriliminin genel görünümü ve Şekil 12-d'de dört faz gerilimlerinin PWM dalga şekilleri yer almaktadır.

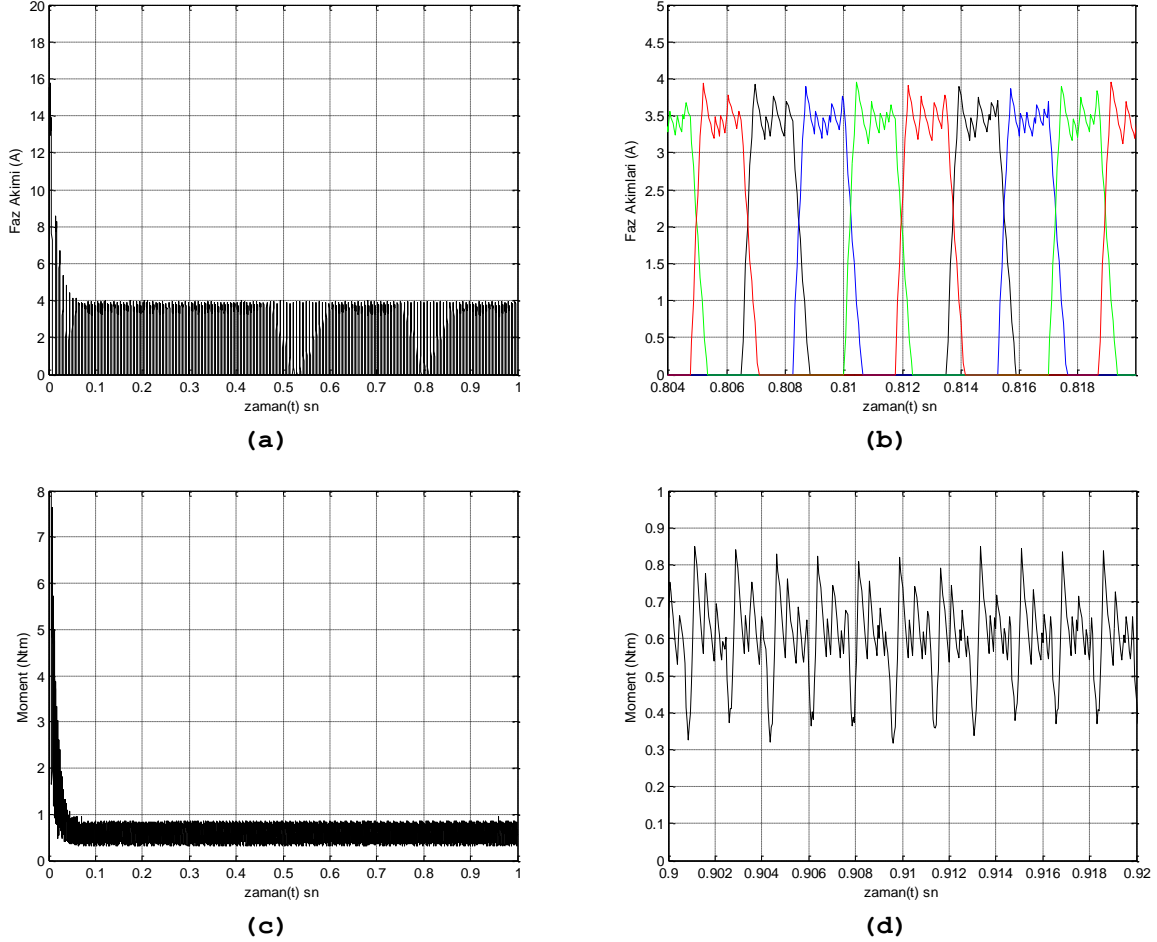


Şekil 12. 115 V'luk besleme geriliminde 150 rad/sn'lik referans hız için ARM'nin benzetim sonuçları,
(Figure 12. Simulation results of SRM for 150 rad / sec reference speed. at 115 V supply voltage)

- a) Hız-Zaman grafiği (Plot of speed vs time)
- b) A fazının akım, gerilim ve endüktans dalga şekilleri ile tetikleme üçgeni (Current, voltage and inductance waveforms of A phase and trigger triangle)
- c) A faz geriliminin genel görünümü (Overview of A phase voltage)
- d) Dört faz PWM gerilimi (Four phases PWM voltage)

Şekil 13-a'da A faz akımının kapalı çevrim kontrollü genel görünümü verilirken Şekil 13-b'de ise dört faz akımının dalga şekilleri yer almaktadır. Motor boşta çalıştığı için sadece kendi kayıplarını ve ataletini yenebilecek momentini oluşturacak kadar akım çekmektedir. Şekil 13-c ve d'ye bakılırsa akım için söylediklerimiz daha iyi anlaşılmaktadır. Şekil 13-c'de üretilen toplam momentin genel görünümü verilirken d'de ise toplam momentlerin açık dalga şekilleri yer almaktadır. Şekil 13-c'de

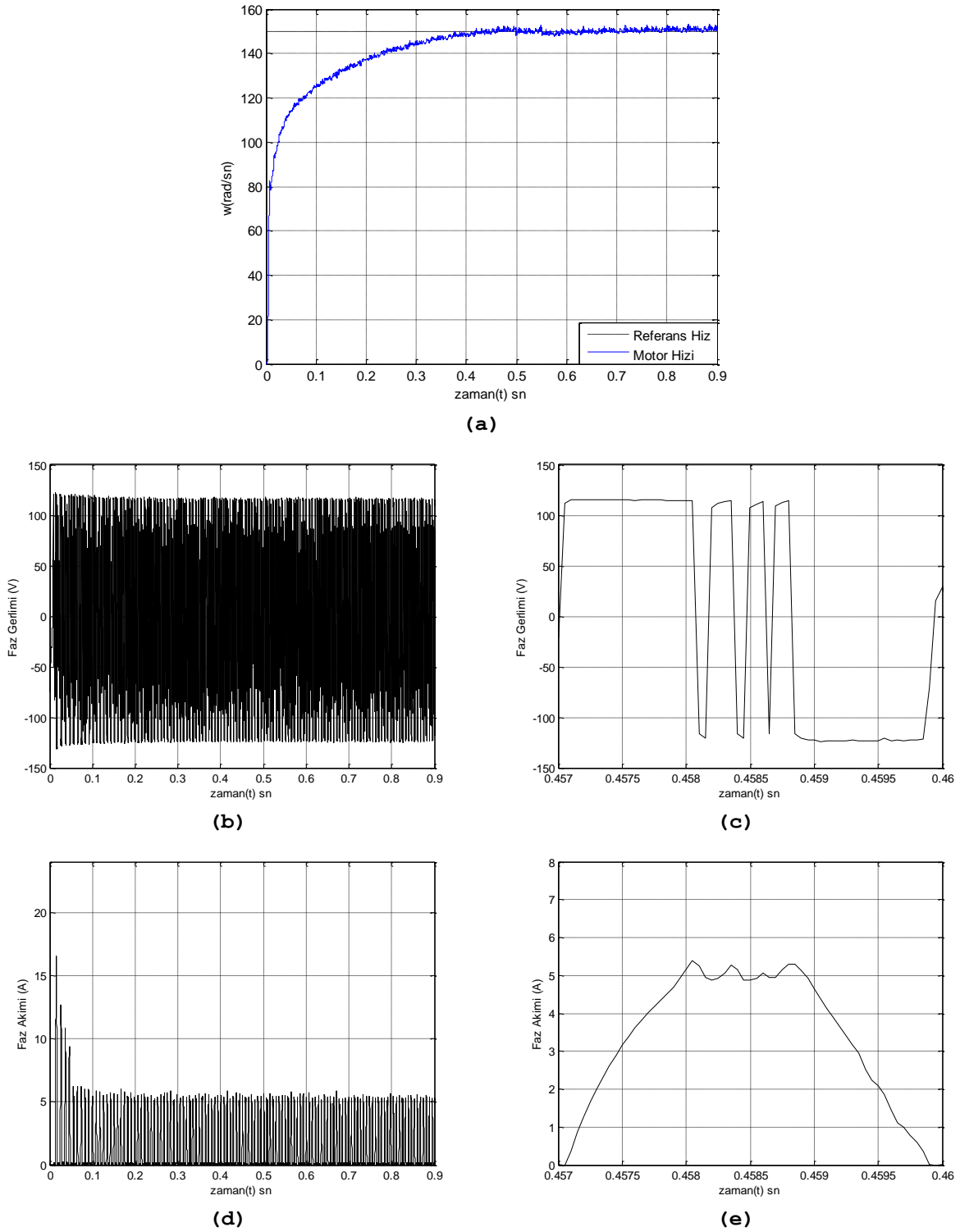
motorun boşta çalışmada çektiği akım 3.5 A civarında iken bu durumda geliştirdiği moment ise yaklaşık olarak 0.6 Ntm'dir.



Şekil 13. 115 V'luk besleme geriliminde 150 rad/sn'lik referans hız için ARM'nin benzetim sonuçları.
(Figure 13. Simulation results of SRM for 150 rad / sec reference speed. at 115 V supply voltage)

- a) A Fazı akımının genel görünümü (Overview of A phase current)
- b) Dört faz akımı (Four phases current)
- c) Üretilen toplam momentlerin genel görünümü (Overview of the generated total torques.)
- d) Dört faz momentinin toplamı (The sum of the four-phase torque)

Şekil 14 a'daki grafiği irdeleyecek olursak; verilen referans hıza karşın hız kontrolünün tepkisinin iyi olduğu gözlenmiştir. Benzetimle aynı PI katsayıları kullanılmıştır. Benzetimde aynı çalışmada referans hızı aşım daha sonra hızı yakalamakla birlikte deneysel düzenden alınan sonuçta benzer zamanlarda toparlanmalarına karşın referans hızda taşma olmamıştır. Ancak bir sonraki deneysel sonuçta ta görüleceği üzere ilk tepki hariç deneysel ve benzetim sonuçlarının tepkisi hemen hemen aynıdır.



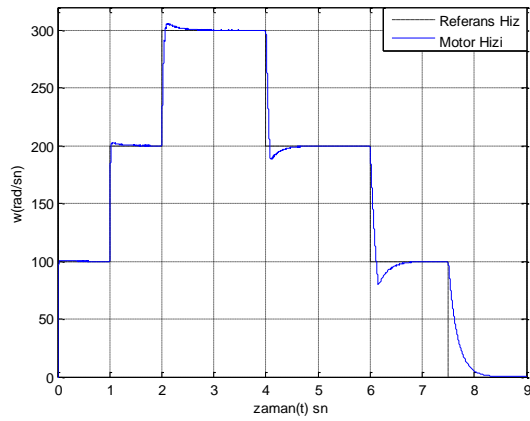
Şekil 14. 115 V'luk besleme geriliminde 150 rad/sn'lik referans hız için ARM'nin deneysel sonuçları
(Figure 14. Eexperimental results of the ARM for 150 rad / sec reference speed at 115 V supply voltage)

- a) Hız-Zaman grafiği (Speed-Time graph)
- b) Faz geriliminin genel görünümü (Overview of phase voltage)
- c) Faz geriliminin açık şekli (Open shape of phase voltage)

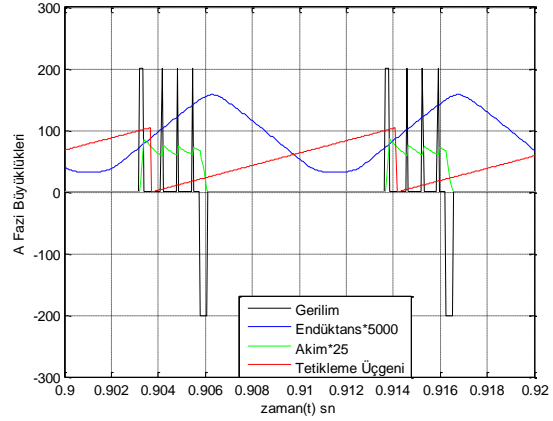
- d) Faz akımının genel görünümü (Overview of phase current)
e) Faz akımının açık şekli (Open shape of phase current)

Şekil 14-b'de faz geriliminin genel görünümü ve c'de tetikleme anındaki açık şekli verilmiştir. Gerilimde, motor boşta çalışıyor ve bu olmasına rağmen çok hafif bir dalgalanma mevcuttur. Şekil 14-d ve e'de faz akımının genel görünümü ve tetikleme anındaki açık şekli mevcuttur. Benzetim sonuçlarında da değinildiği gibi ilk anda hız farkı büyük olduğu hız farkını en kısa sürede sıfıra çekmek için motor belirlenen referans akım sınırlarında akım çeker. Bu durum Şekil 14-d'nin ilk anlarında görülmektedir. Referans hızı yakaladıktan sonra, sadece kendi iç dinamiklerini yenecek moment üretecek kadar akım çeker. Benzetim sonuçlarına göre 1A kadar fazla akım çekmektedir.

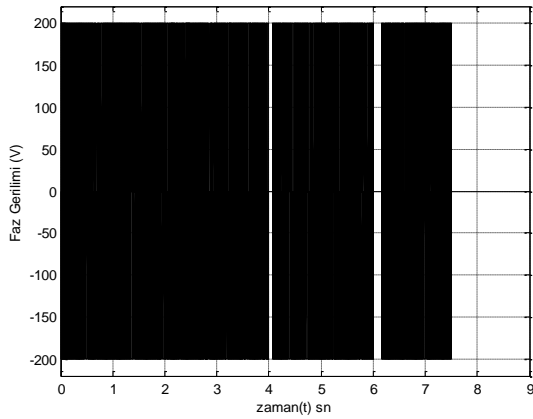
Boşta çalışmadaki ikinci çalışma ise nominal gerilimde (200 V) değişik hızlarda kapalı çevrim hız ve akım denetleyicilerinin tepkilerine bakılmıştır. Buna ait benzetim sonuçları Şekil 15 ve 16'da deneysel sonuçları da Şekil 17'de verilmiştir. Şekil 15-a'da; verilen referans hızlara karşın kapalı çevrim hız kontrolünün iyi tepki verip her hızı istenilen seviyelerde yakaladığı görülmektedir. Şekil 15-b'de A fazının



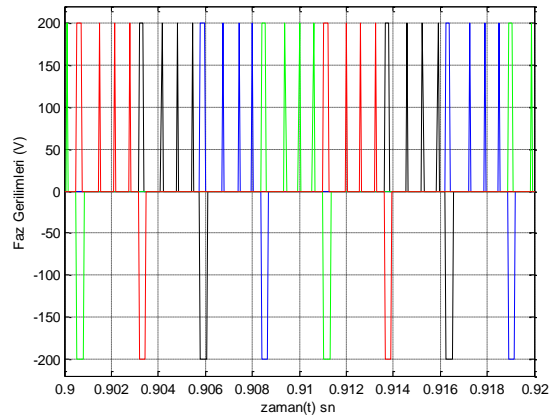
(a)



(b)



(c)



(d)

Şekil 15. 200 V' luk besleme geriliminde değişik referans hızlar için ARM'nin benzetim sonuçları,
(Figure 15. Simulation results of SRM for different reference speeds. at 200 V supply voltage)

- a) Hız-Zaman grafiği (Plot of speed vs time)

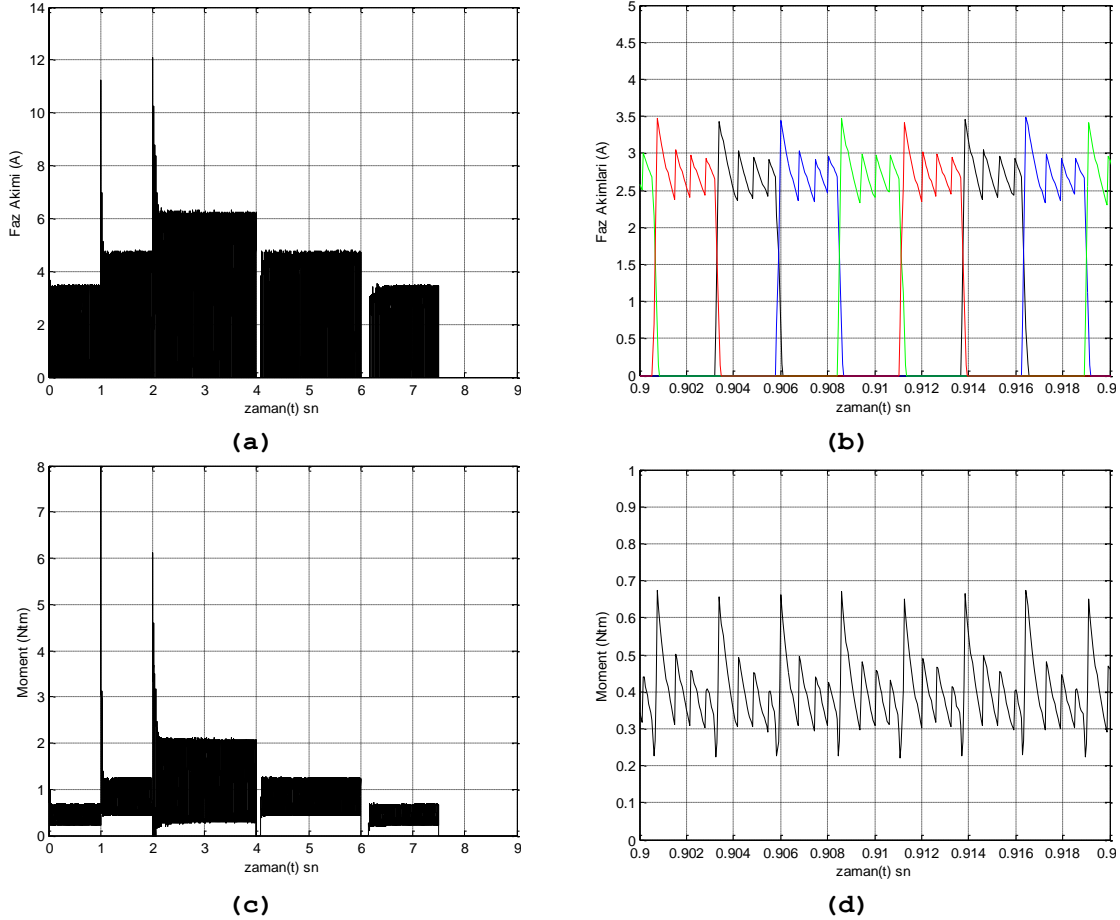
b) A fazının akım, gerilim ve endüktans dalga şekilleri ile tetikleme üçgeni (Current, voltage and inductance waveforms of A phase and trigger triangle)

c) A faz geriliminin genel görünümü (Overview of A phase voltage)

d) Dört faz PWM gerilimi (Four phases PWM voltage)

akım, gerilim ve endüktansı ile tetikleme üçgeninin grafikleri verilmiştir. Bir önceki çalışmada olduğu gibi A fazı tetikleme üçgeninin $\pi/15$ 'i ile $27\pi/180$ arasında tetiklenmektedir. Şekil 15-c'de A faz geriliminin genel görünümü ve Şekil 15-d'de dört faz gerilimlerinin PWM dalga şekilleri yer almaktadır. Şekil 15-c dikkatli incelenirse yavaşlama bölgelerinde motor referans hızı yakalayana kadar tetikleme yapılmamaktadır. Referans hıza geldiği noktadan itibaren bu tetikleme tekrar başlamaktadır.

Şekil 16-a'da A faz akımının genel görünümü verilirken Şekil 16-b'de ise nominal gerilim ve 100 rad/sn'lik hızdaki dört faz akımının dalga şekilleri yer almaktadır. Şekil 16-a'ya dikkat edecek olursak, değişik hızlardaki kayıplar hıza bağlı olarak ($B \cdot \omega$) farklı olduğundan motor sargısından geçen akımlar da buna bağlı olarak değişmektedir. Şekil 16-c'de akıma bağlı olarak momentte de aynı tepkileri görmek mümkündür. Şekil 16-d'de motorun geliştirmiş olduğu toplam moment gösterilmiştir. Dalgalandırma düşük hızda bile yüksektir.



Şekil 16. 200 V' luk besleme geriliminde değişik referans hızlar için ARM'nin benzetim sonuçları.

(Figure 16. Simulation results of SRM for different reference speeds. at 200 V supply voltage)

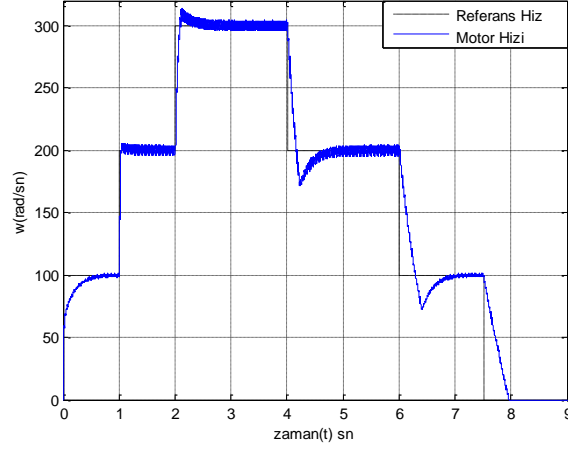
a) A Fazı akımının genel görünümü (Overview of A phase current)

b) Dört faz akımı (Four phases current)

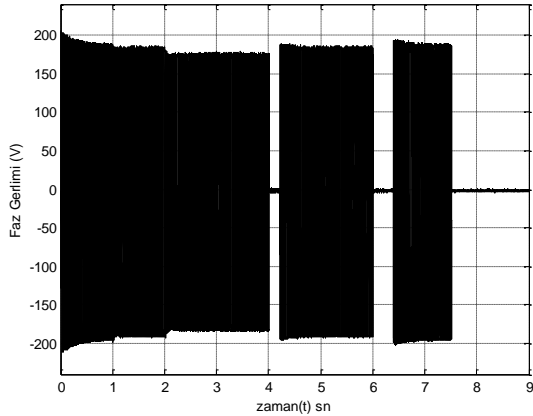
c) Üretilen toplam momentlerin genel görünümü (Overview of the generated total torques.)

d) Dört faz momentinin toplamı (The sum of the four-phase torque)

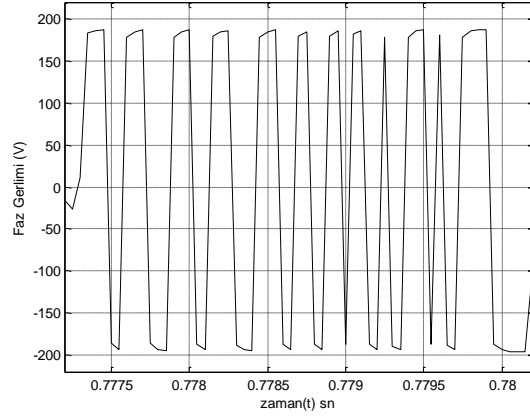
Şekil 17-a'da; verilen referans hızlara karşın kapalı çevrim hız kontrolünün aynı benzetimde olduğu gibi kararlı ve iyi tepki verdiği görülmektedir. İlk referans hız hariç diğer referans hızların hemen hemen hepsinde aynı tepkiyi vermiştir. Şekil 17-b'de faz geriliminin genel



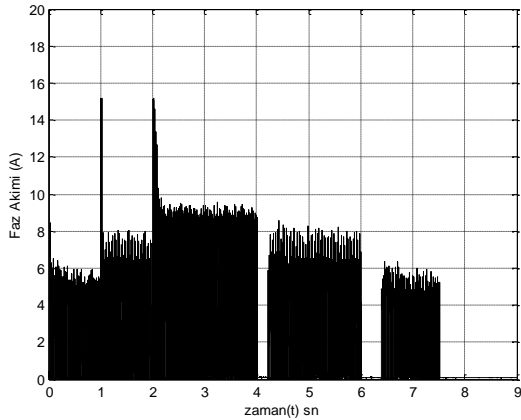
(a)



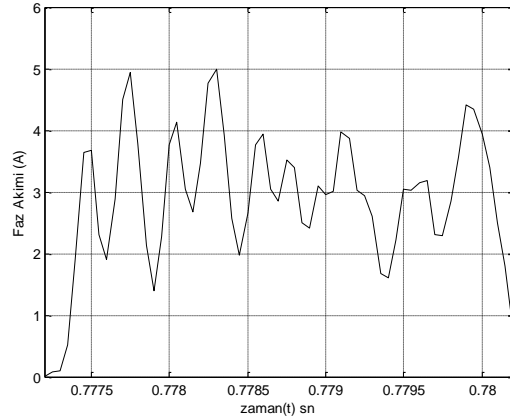
(b)



(c)



(d)



(e)

Şekil 17. 200 V' luk besleme geriliminde değişik referans hızlar için ARM'nin deneysel sonuçları
(Figure 17. Experimental results of the ARM for 150 rad / sec reference speed at 115 V supply voltage)

- a) Hız-Zaman grafiği (Speed-Time graph)
- b) Faz geriliminin genel görünümü (Overview of phase voltage)
- c) Faz geriliminin açık şekli (Open shape of phase voltage)
- d) Faz akımının genel görünümü (Overview of phase current)
- e) Faz akımının açık şekli (Open shape of phase current)

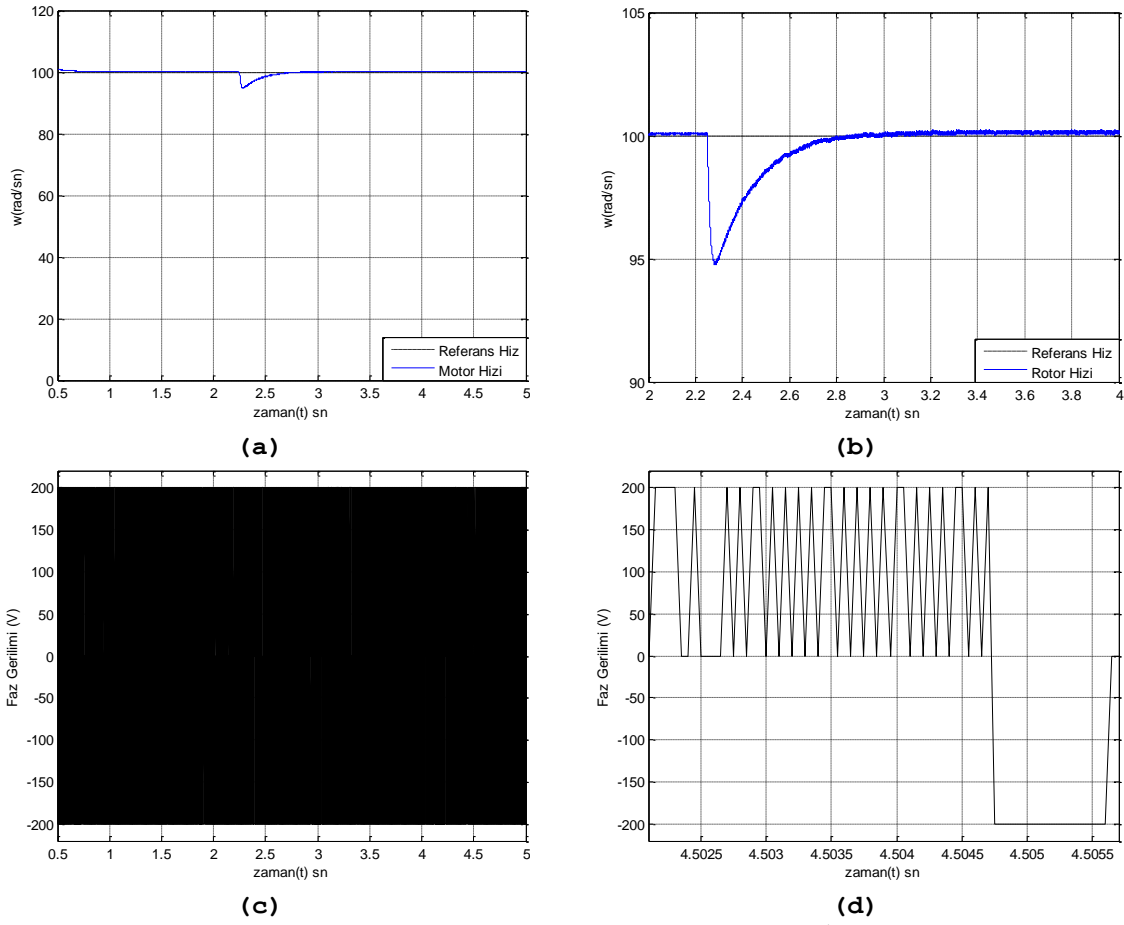
görünümü ve c'de tetikleme anındaki açık şekli verilmiştir. Gerilimde, motor boşta çalışıyor olmasına rağmen çok hafif bir dalgalanma mevcuttur. Şekil 17-d ve e'de faz akımının genel görünümü ve tetikleme anındaki açık şekli mevcuttur. Benzetim sonuçlarında da değinildiği gibi ilk anda hız farkı büyük olduğu ve bu hız farkını en kısa sürede sıfıra çekmek için motor belirlenen referans akım sınırlarında akım çeker. Bu durum Şekil 17-d'nin ilk anlarında görülmektedir. Referans hızı yakaladıktan sonra, sadece kendi iç dinamiklerini yenecek moment üretecek kadar akım çeker. Benzetim sonuçlarına göre 1A kadar fazla akım çekmektedir.

Şekil 17-b incelenirse motor referans hızları yakalarken gerilimde ki dalgalanmalar dikkat çekmektedir. Bu durum motor hızlanırken ihtiyaç duyduğu akım DA hattının ön tarafında bulunan transformatöre yüklemeye yaptığından dolayı transformatör gerilimi düşmekte buda DA hat gerilimine yansımaktadır. Şekil 17-c ve e sırasıyla motor gerilim ve akımının açık şekillerini göstermektedir.

8.2. Yüklü Durum için Kapalı Çevrim Akım ve Hız Kontrolü Sonuçları (Closed Loop Current and Speed Control Results for Load Station)

Yüklü durum çalışmada nominal gerilimde, 1 Ntm'lik yük altında ve 100 rad/sn'de dönen ARM'ye 2.25 sn sonra aniden 2.5 Ntm'lik bir yük daha ilave edilip toplam yük 3.5 Ntm'ye çıkartılıyor. Bu şartlardaki akım ve hız denetleyicilerinin tepkisine bakılmıştır. Tetikleme açıları boşta çalışmadaki tetikleme açıları ile aynı tutulmuştur. Buna ait benzetim sonuçları Şekil 18 ve 19'da deneysel sonuçlar ise Şekil 20'de verilmiştir.

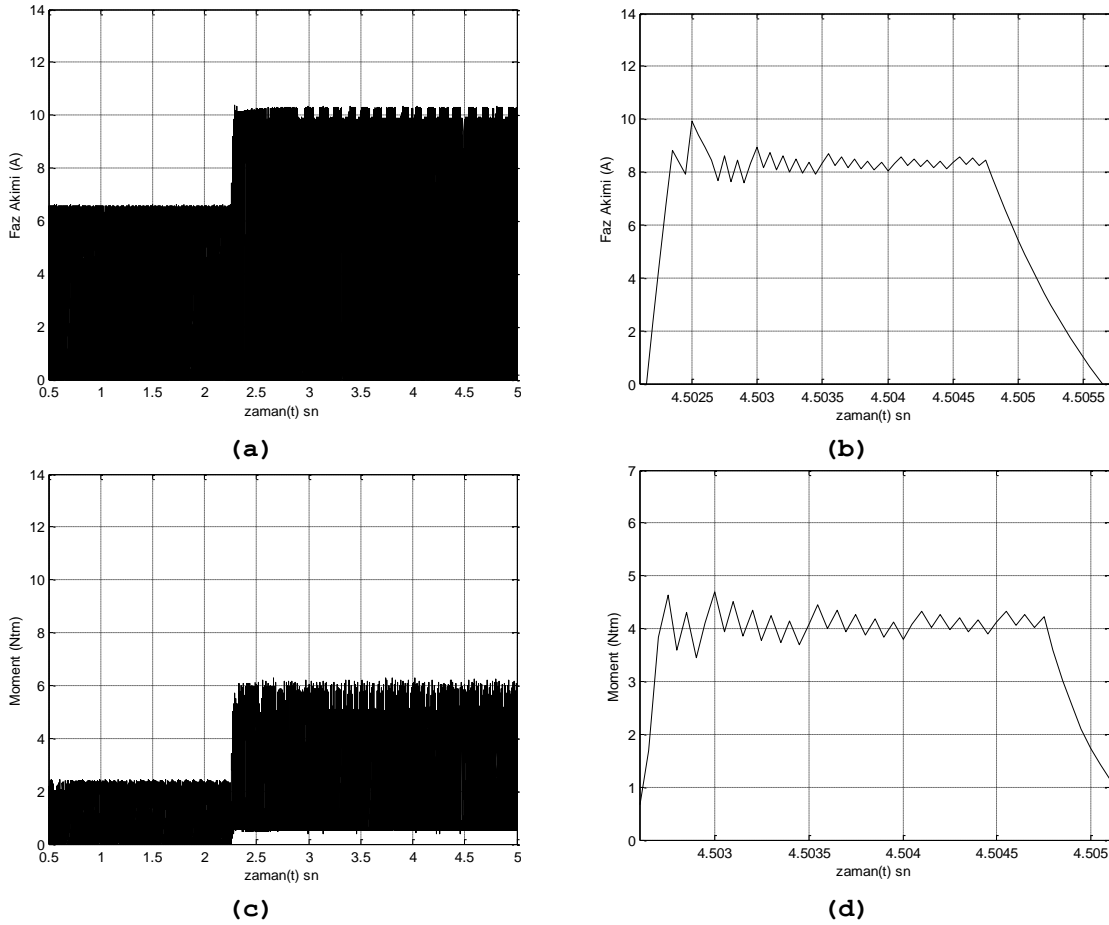
Şekil 18-a ve b'de referans hızı karşı motor hızı görülmektedir. Motor referans hızı takip ederken 2.5 Ntm'lik ek bir yük ile yüklenmesi sonucunda motor hızı referans hızdan kısa bir süreliğine aşağı yönde kaymış ancak sistem hemen kendini toparlamıştır. Şekil 18-b'de ek yüklenme durumunun olduğu zaman bölgesi açılarak hız değişimleri daha net gösterilmiştir. Şekil 18-c ve d'de sırasıyla faz gerilimi ve faz geriliminin açık haline yer verilmiştir.



Şekil 18. 200 V' luk besleme geriliminde ve 100 rad/sn'de dönen ARM'nin, yükünün 1Ntm'den 3.5 Ntm'ye çıkartılması durumundaki benzetim sonuçları; (Figure 18.Simulation results of SRM for removal of the load from 1 Ntm to 3.5 Ntm. at 100 rad/sec reference speed and 200 V supply voltage)

- Hız-Zaman grafiği (speed - time graph)
- Hız-Zaman grafiğinin büyütülmesi (Zooming speed-time graph)
- Faz geriliminin genel görünümü (Overview of phase voltage)
- Faz geriliminin açık şekli (Open shape of phase voltage)

1 Ntm'lik yükte çalışırken kendi iç dinamikleri ve yükü karşılamak için moment üreten ARM, 2.25 sn sonra ek yüke bindiğinde buna ilaveten ek yük momentini karşılayacak momenti de üretmeye başlamıştır. Şekil 19-a ve c grafikleri yüklenme durumundaki sırasıyla akım ve moment değişimleri gösterilmiştir. Şekillerden de görüldüğü gibi istenilen ek momenti sağlamak için akım, momenti oluşturacak seviyeye yükseltilmiştir. Şekil 19-b ve d'de sırasıyla bir fazın çekmiş olduğu akımla o fazın üretmiş olduğu momentin açık şekli verilmiştir.

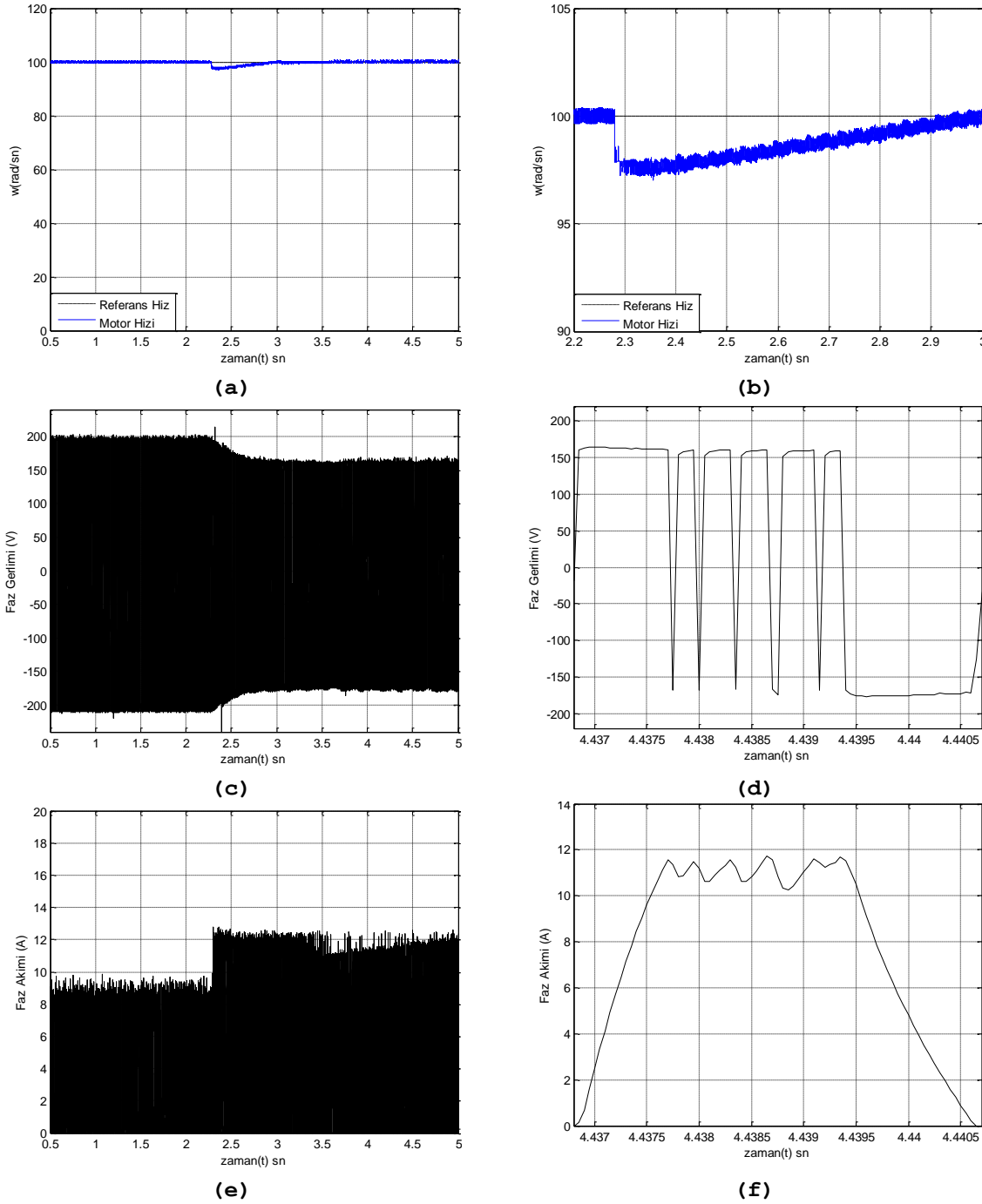


Şekil 19. 200 V'luk besleme geriliminde ve 100 rad/sn'de dönen ARM'nin, yükünün 1Ntm'den 3.5 Ntm'ye çıkartılması durumundaki benzetim sonuçları; (Figure 19. Simulation results of SRM for removal of the load from 1 Ntm to 3.5 Ntm. at 100 rad/sec reference speed and 200 V supply voltage)

- Faz akımının genel görünümü (Overview of phase current)
- Faz akımının açık şekli (Open shape of phase current)
- Üretilen toplam momentlerin genel görünümü (Overview of the generated total torques)
- Faz momentinin açık şekli (Open shape of phase torque)

Şekil 20-a ve b'de referans hıza karşın motor hızı görülmektedir. Motor referans hızı takip ederken 2.5 Ntm'lik ek bir yükü yüklenmesi sonucunda motor hızı referans hızdan kısa bir süreliğine aşağı yönde kaymış ancak sistem hemen kendini toparlamıştır. Şekil 20-b'de ek yüklenme durumunun olduğu zaman bölgesi açılarak hız değişimleri daha net gösterilmiştir. Benzetim sonuçlarıyla karşılaştırıldığında göze çarpan fark deneysel sonuçta motor hızı yaklaşık 2.5 rad/sn daha az düşüyor fakat toparlanma yaklaşık 0.2 sn daha geç oluyor. Bu durum için birkaç neden söylenebilir. Örneğin Şekil 20-c'deki gerilim dalgalanması gibi. Yüklenme sırasında gerilim 200 V'tan daha önceden bahsedilen nedenlerden dolayı 165 V'lara düşmektedir. Şekil 20-d'de faz geriliminin açık şekli gösterilmektedir.

Bu çalışma koşulundaki faz akımı Şekil 20-e ve f verilmiştir. Motorun yükü 1 Ntm'den 3.5 Ntm'ye çıkartıldığında akım bu yükü karşılayacak momenti de üretmek için artmıştır. Benzetim sonuçlarıyla karşılaştırıldığında önceki sonuçlarda da olduğu gibi akımın yaklaşık 2.5 A kadar yüksek olduğu gözlenmiştir. Bunun dışındaki genel tepkiler aynıdır.



Şekil 20. 200 V' luk besleme geriliminde ve 100 rad/sn'de dönen ARM'nin, yükünün 1Ntm'den 3.5 Ntm'ye çıkartılması durumundaki deneysel sonuçlar; (Figure 20. Extremental results of SRM for removal of the load from 1 Ntm to 3.5 Ntm. at 100 rad/sec reference speed and 200 V supply voltage)

- Hız-Zaman grafiği (speed - time graph)
- Hız-Zaman grafiğinin büyütülmesi (Zooming speed-time graph)
- Faz geriliminin genel görünümü (Overview of phase voltage)
- Faz geriliminin açık şekli (Open shape of phase voltage)
- Faz akımının genel görünümü (Overview of phase current)
- Faz akımının açık şekli (Open shape of phase current)

9. SONUÇLAR (CONCLUSIONS)

DeneySEL sonuçlarla teorik sonuçlar incelendiği zaman genelde büyük benzerlikler gösterdiği gözlenebilir. Aradaki farkların oluşması da son derece doğaldır. Bunların sebeplerinden bazılarını maddeler halinde sıralayacak olursak;

- Benzetimde tetikleme sırasındaki negatif gerilimin sisteme dâhil edilememesi;
- Her ne kadar SEY yönteminden elde edilen endüktans değerleri kullanılmış da olsa benzetimde ortak endüktans etkisinin hesaba katılmamıştır.
- Motor kendi üretimimizdir, imalat sırasında maliyetten dolayı motorun stator ve rotor sacları, tel erozyon yada kalıp kesim ile kesilmediğinden dolayı bazı parametrelerde farklılıklar oluşmuştur.
- Deney sırasındaki gerilimdeki dalgalanmalar,
- Deney sırasında motor sıcaklığından dolayı motor parametrelerinin değişmesi. Bilindiği gibi PI katsayıları motor parametrelerine bağımlılık gösterir.

Sayılan bu tür olumsuzluklara rağmen deneySEL sonuçlarla teorik sonuçlar arasındaki fark kabul edilebilir ölçüdedir.

KAYNAKLAR (REFERENCES)

1. Krishnan, R., (2001). Switched Reluctance Motor Drives Modeling, Simulation, Analysis, Design, and Applications, CRC Press.
2. Omaç, Z., (2006). Yeni Bir Anahtarlı Relüktans Motorun Tasarımı ve Akım Kontrolü, Doktora Tezi, Fırat Üniversitesi Fen Bilimleri Enstitüsü, Elazığ.
3. İnanç, N., (1996), Anahtarlmalı Relüktans Motorun Modellenmesi ve yeni Kontrol Teknikleri ile Denetimi, Doktora Tezi, Kocaeli Üniversitesi Fen Bilimleri Enstitüsü, Kocaeli.
4. Vladan, V. and Slobodan, N.V., (2000). A Simple Nonlinear Model of the Switched Reluctance Motor, Energy Conversion, IEEE Transactions on Vol.15, No.4, p. 395-400.
5. Horacio, V. and Joey, K.P., (2004). A new simplified mathematical model for a switched reluctance motor in a variable speed pumping application, Mechatronics 14, Science Direct, p.1055-1068.
6. Miller, T.J.E., (1989). Brushless Permanent-Magnet and Reluctance Motor drives, Oxford University Science Publications, New York.
7. Vasquez, H., Parker, J., and Hakew, T., (2005). Control of A 6/4 Switched Reluctance Motor in A Variable Speed Pumping Application, Science Direct, Mechatronics 15, p. 1061-1071.
8. Hamid, E.A., Virendra, K.S., Chandra, A., and Kamal, A., (2002). Performance Simulation of Switched Reluctance Motor Drive System Operating With Fixed Angle Control Scheme.
9. Moallem, M. and Ong, C.M., (1990). Predicting the torque of a switched reluctance machine from its finite element field solution, Energy Conversion, IEEE Transactions on Vol. 5, p. 733-739.