

# SENKRON RELÜKTANS MAKİNASININ ANALİZİ

Ersoy BEŞER<sup>1</sup>

H.Tarık DURU<sup>2</sup>

Sabri ÇAMUR<sup>3</sup>

Birol ARİFOĞLU<sup>4</sup>

Esra KANDEMİR<sup>5</sup>

Elektrik Mühendisliği Bölümü  
Mühendislik Fakültesi

Kocaeli Üniversitesi, Veziroğlu Kampüsü, 41100, Kocaeli

<sup>1</sup>e-posta: [ebeser@kou.edu.tr](mailto:ebeser@kou.edu.tr) <sup>2</sup>e-posta: [htduru@kou.edu.tr](mailto:htduru@kou.edu.tr) <sup>3</sup>e-posta: [scamur@kou.edu.tr](mailto:scamur@kou.edu.tr)  
<sup>4</sup>e-posta: [barif@kou.edu.tr](mailto:barif@kou.edu.tr) <sup>5</sup>e-posta: [esrakandemir@kou.edu.tr](mailto:esrakandemir@kou.edu.tr)

*Anahtar sözcükler: Senkron Relüktans Makinalar, İndüktans Ölçümü, Modelleme ve Simulasyon.*

## ABSTRACT

*In this paper, studies about Synchronous Reluctance Machines (SyncRel) are reviewed. Inductance parameters of SyncRel are determined by using Finite Element Analysis (F.E.A) and according to the results, two different rotor types are manufactured (R1, R2). Inductance parameters are measured. Measured inductance parameters are converted into the periodical functions by using Fourier Transform. They are used for building the mathematical model of the machine in the a,b,c phase frame and the model is simulated. In addition phase-neutral voltage ( $V_{an}$ ) and phase current ( $i_a$ ) are measured for R1 and R2 and they are compared with simulation results.*

## 1. GİRİŞ

Senkron relüktans makinalar (SRM) sürekli mıknatıslı doğru akım, sürekli mıknatıslı senkron ve asenkron makinaları da içine alan fırçasız alternatif akım makina ailesi içinde yer almaktadır. 1960 ve 1970' li yıllara bakıldığında, SRM, kendinden yol almalı tek hızlı uygulamalarda kullanılmıştır. Ucuz, sağlam ve imalatının kolay olması nedeniyle tercih edilmesine rağmen, veriminin ve güç faktörünün düşük olması gibi sebeplerden dolayı bu makina üzerine olan çalışmalar azalmış ve 1980' lere kadar ertelenmiştir[1]. 1980' lerden sonra, güç elektroniği teknolojisi ve vektör kontrol yöntemlerinin gelişmesi ile birlikte SRM üzerine olan ilgi tekrar artmıştır. Ayrıca geliştirilen yeni tasarımlar sayesinde  $L_d/L_q$  oranı yükseltilmiştir. Bu sayede, güç katsayısı ve verim parametrelerinin de iyileşmesi sağlanmıştır. Bu nedenlerden ötürü SRM, servo uygulamalarda diğer makinalara alternatif bir makina olmaya başlamıştır. Senkron relüktans makinalar ucuz, yapıları basit ve imalatları kolaydır. Yapılarının sağlam olması nedeniyle yüksek hızlı uygulamalarda kullanılmaya elverişlidir. Soğuk rotorlu makinadır. Bu yüzden ısınma problemi yoktur. Asenkron makinanın aksine,

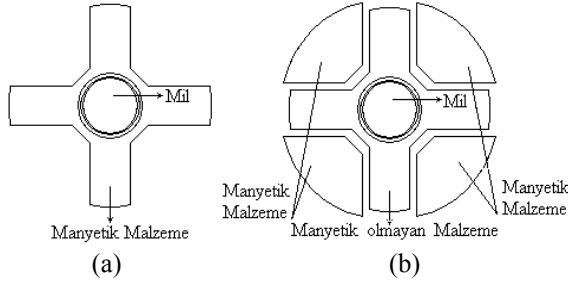
üretilen elektriksel momenti rotor sıcaklığından bağımsızdır. Rotorunda mıknatıs olmadığından dolayı demagnetizasyon problemi yoktur. Bu yüzden yüksek ısılı uygulamalar için sürekli mıknatıslı motorlara göre daha avantajlıdır. Mıknatıslı makinalara göre de daha ucuzdur. Yapılan literatür incelemesinde yer alan araştırmalara bakıldığında, modellemeye yönelik çalışmalar göze çarpmaktadır. Bakılan çoğu literatürde yapılan modellerin, genelleştirilmiş klasik makina modeli ile modellendiği görülmüştür. Bilindiği üzere genelleştirilmiş klasik makina kuramı bazı temel varsayımlar üzerine dayanmaktadır. Bu varsayımlarla elde edilen modelin doğruluğu, bu varsayımların gerçek fiziksel sistemde ne kadar varolduğuna bağlıdır. Bu amaçla bu tezde sistemin a,b,c doğal faz sistemi ile modellenmesi tercih edilmiştir. Makina modellerinde kullanılan parametreler gerçeğe ne kadar yakın olursa modelin sonuçları da gerçeğe o kadar yakın olacaktır. Bu yüzden, bu çalışmada oluşturulan modellerde makinanın gerçek parametreleri kullanılmıştır.

Bu tezde, pratik olarak birbirinden farklı iki rotor geometrisi imal edilmiş, rotor ve stator geometrilerinin ölçüleri baz alınarak, tasarlanan motora sonlu elemanlar analizi uygulanmıştır. Sonlu elemanlar analizi sonucu elde edilen değerler kullanılarak bu iki rotor geometrisinin indüktans parametreleri hesaplanmıştır. Daha sonra varolan iki tip rotor için indüktans parametreleri ölçülmüştür. Ölçüm sonuçlarından yararlanarak her iki rotor için matematiksel model oluşturulmuştur. Son olarak model sonuçları ile deneysel sonuçlar karşılaştırılmıştır.

## 2. TASARIMA GENEL BAKIŞ

Senkron relüktans makinası yapısal olarak, stator ve rotor olmak üzere iki kısımdan oluşmaktadır. Tasarlanan SRM' de stator, bilinen 24 oluklu, 4 kutuplu 550W' lık standart asenkron motorun statorudur. Bu çalışmada yapısal olarak birbirinin zıttı

olan iki rotor tasarımı incelenmiştir. Rotorlardan biri en basit anlamda, çelikten yapılmış istavroz şeklindedir(R1). Diğer rotor(R2), R1 rotorunun yapısal olarak tam tersidir. Her iki rotorda da manyetik malzeme olarak A1010 çeliği kullanılmış, R2 rotorunda manyetik olmayan malzeme olarak ise krom kullanılmıştır. Şekil 1.' de rotor tasarımlarının prensip şemaları verilmiştir.



Şekil 1. Rotor tasarımlarının prensip şeması. a)R1 b)R2

Şekil 2.' de SRM için kullanılan stator ve tasarlanan rotorların fotoğrafları verilmiştir.



(a)



(b)

(c)

Şekil 2. SRM' ye ait stator ve rotorların fotoğrafları. a)Stator b)R1 Rotoru c)R2 Rotoru

### 3. SRM' NİN MATEMATİKSEL MODELİ

SRM' nin a,b,c, faz sistemindeki gerilim eşitliklerinin matris formundaki hali aşağıdaki gibi olacaktır.

$$\begin{bmatrix} V_a \\ V_b \\ V_c \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} R_a & 0 & 0 \\ 0 & R_b & 0 \\ 0 & 0 & R_c \end{bmatrix} \begin{bmatrix} I_a \\ I_b \\ I_c \end{bmatrix} + \begin{bmatrix} L_{aa} & L_{ab} & L_{ac} \\ L_{ba} & L_{bb} & L_{bc} \\ L_{ca} & L_{cb} & L_{cc} \end{bmatrix} \frac{d}{dt} \begin{bmatrix} I_a \\ I_b \\ I_c \end{bmatrix} + \begin{bmatrix} I_a \\ I_b \\ I_c \end{bmatrix} \begin{bmatrix} \frac{\partial L_{aa}}{\partial \theta_r} & \frac{\partial L_{ab}}{\partial \theta_r} & \frac{\partial L_{ac}}{\partial \theta_r} \\ \frac{\partial L_{ba}}{\partial \theta_r} & \frac{\partial L_{bb}}{\partial \theta_r} & \frac{\partial L_{bc}}{\partial \theta_r} \\ \frac{\partial L_{ca}}{\partial \theta_r} & \frac{\partial L_{cb}}{\partial \theta_r} & \frac{\partial L_{cc}}{\partial \theta_r} \end{bmatrix} \omega_r \quad (1)$$

Ayrıca elektromekanik moment açık olarak,

$$T_c = p \left\{ \frac{1}{2} \begin{bmatrix} I_a \\ I_b \\ I_c \end{bmatrix}^T \begin{bmatrix} \frac{\partial L_{aa}}{\partial \theta_r} & \frac{\partial L_{ab}}{\partial \theta_r} & \frac{\partial L_{ac}}{\partial \theta_r} \\ \frac{\partial L_{ba}}{\partial \theta_r} & \frac{\partial L_{bb}}{\partial \theta_r} & \frac{\partial L_{bc}}{\partial \theta_r} \\ \frac{\partial L_{ca}}{\partial \theta_r} & \frac{\partial L_{cb}}{\partial \theta_r} & \frac{\partial L_{cc}}{\partial \theta_r} \end{bmatrix} \begin{bmatrix} I_a \\ I_b \\ I_c \end{bmatrix} \right\}$$

(2)

şeklinde yazılabilir.

Burada;

$V_a, V_b, V_c$  : Faz gerilimleri,

$I_a, I_b, I_c$  : Sargı akımları,

$\lambda_a, \lambda_b, \lambda_c$  : Faz sargılarının toplam akıları,

$R_a, R_b, R_c$  : Stator sargı direnci,

$L_{ii}$  : i faz sargısının öz indüktansı,

$L_{ij}$  : i ve j sargıları arasındaki karşılıklı indüktans,

$\omega_r$  : Rotor açısal hızı,

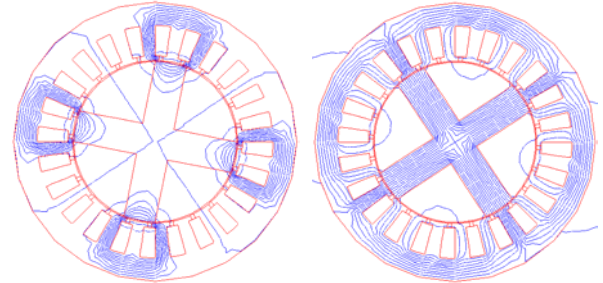
p : Kutup çifti sayısı,

J : Makinanın miline indirgenmiş eylemsizlik momentidir.

### 3. SONLU ELEMANLAR ANALİZİ

Sonlu elemanlar analizinde her iki rotor tasarımı için öz ve karşılıklı indüktanslar hesaplanmıştır. Doyma etkisinin gözlemlenmesi amacıyla her iki rotor tasarımı için 5 farklı akım değerindeki [1A, 2A, 3A, 4A, 5A] öz ve karşılıklı indüktanslar ayrı ayrı hesaplanmış ve bunların rotor konumuna bağlı değişimleri 2 boyutlu grafikler halinde verilmiştir.

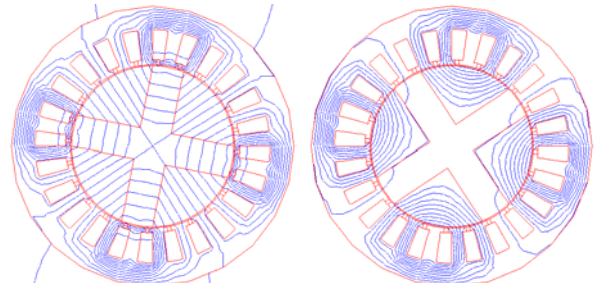
Şekil 3.' de R1 rotor tasarımı için sadece a faz sargısının uyarılması durumunda S.E.A. sonucunda elde edilen manyetik akı dağılımları, Şekil 4.' te ise R2 rotor tasarımı için sadece a fazının uyarılması sonucunda elde edilen manyetik akı dağılımları verilmiştir. Hesaplamalarda adım açısı olarak  $10^\circ$  'lik elektriksel açı seçilmiştir. Bu sayede indüktansların periyodik değişimlerini tanımlamak için rotorun  $90^\circ$  'lik dönüşü yeterli olacaktır.



a) Rotor konumu  $\theta_r=0^\circ$

b) Rotor konumu  $\theta_r=90^\circ$

Şekil 3. R1 Rotor tasarımı için rotor konumuna bağlı S.E. analizi.



a) Rotor konumu  $\theta_r=0^\circ$

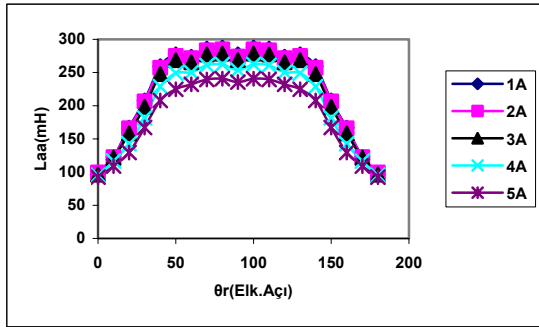
b) Rotor konumu  $\theta_r=90^\circ$

Şekil 4. R2 Rotor tasarımı için rotor konumuna bağlı S.E. analizi.

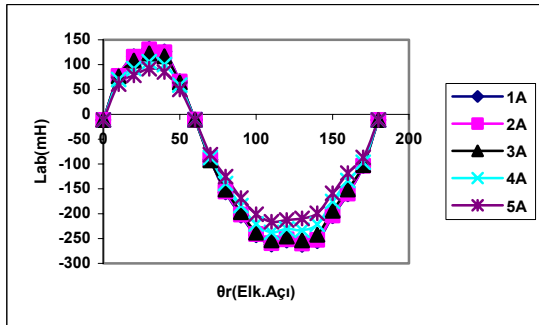
Sonuçlar nümerik olarak hesaplandıktan sonra diziler haline getirilmiştir. Daha sonra bu diziler kullanılarak

indüktans parametrelerinin periyodik fonksiyonlar halinde düzenlenmesi gerekmektedir. İncelenen diziler rotor pozisyonunun periyodik fonksiyonu olduklarından, bu amaca en uygun dönüşüm olan Fourier Dönüşümü ile periyodik fonksiyonlar haline getirilmiştir.

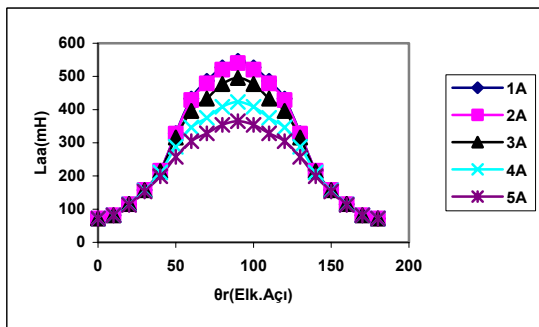
Bu çalışmada, akımın indüktans değişimlerini nasıl etkilediğini görmek amacıyla, her iki rotor tasarımına (R1,R2) 5 farklı akım değeri için [1A, 2A, 3A, 4A, 5A] sonlu elemanlar analizi yapılmıştır. Sonuçta elde edilen indüktansların rotor konumuna bağlı değişimleri aşağıdaki şekillerde verilmiştir.



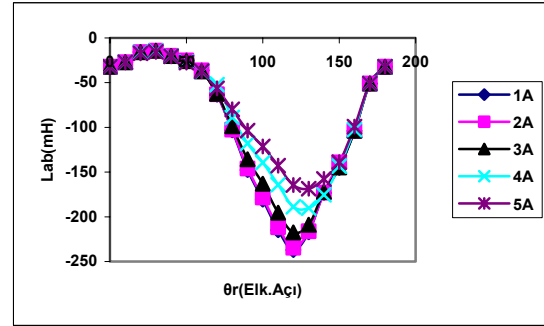
Şekil 5. a fazı öz indüktansının akıma ve rotor konumuna bağlı değişimi (R1).



Şekil 6. a-b fazı arasındaki karşılıklı indüktansın akıma ve rotor konumuna bağlı değişimi (R1).



Şekil 7. a fazı öz indüktansının akıma ve rotor konumuna bağlı değişimi (R2).

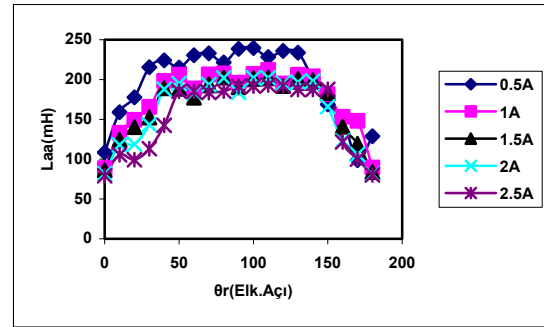


Şekil 8. a-b fazı arasındaki karşılıklı indüktansın akıma ve rotor konumuna bağlı değişimi (R2).

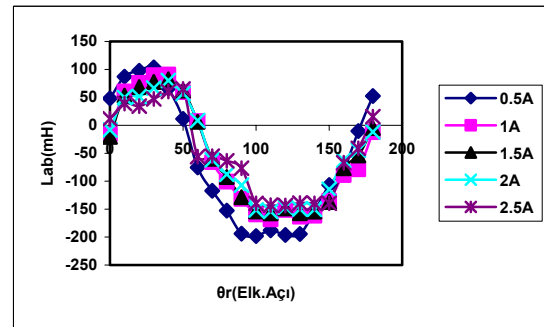
#### 4. İNDÜKTANS PARAMETRELERİNİN ÖLÇÜMÜ

SRM' nin moment denkleminde de bilindiği üzere indüktans parametreleri SRM için kilit parametrelerdir. Bu parametreler gerçeğe ne kadar yakın olursa oluşturulan modelin sonuçları da gerçeğe o kadar yakın olacaktır. Bu amaçla bu bölümde R1 ve R2 rotor tasarımlarının indüktans parametrelerinin deneysel olarak ölçümü anlatılmıştır.

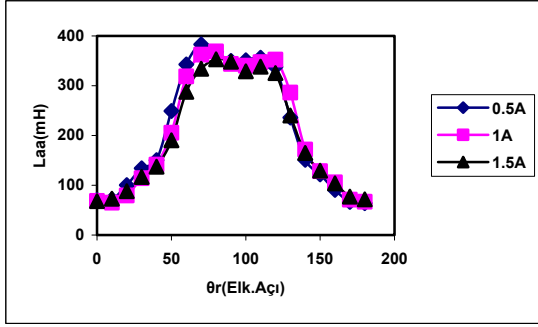
İndüktans parametreleri 3 değişik yöntemle ölçülerek karşılaştırılmıştır. Burada 50 Hz alternatif akımla parametrelerin ölçümüne ait sonuçlara yer verilmiştir. Ayrıca bu deney değişik akım değerleri için yapılarak doyuma etkilerini ihmal etmeden indüktans parametrelerinin hem akım hem de rotor konumuna göre değişimi elde edilmiştir.



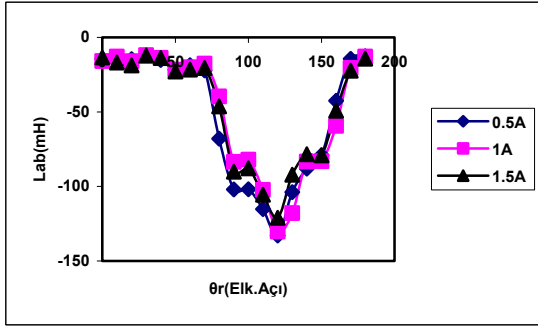
Şekil 9. a fazı öz indüktansının akıma ve rotor konumuna bağlı değişimi (R1).



Şekil 10. a-b fazı arasındaki karşılıklı indüktansın akıma ve rotor konumuna bağlı değişimi (R2).

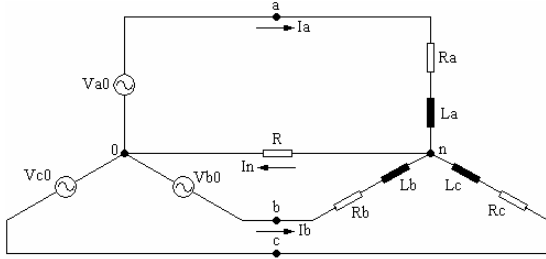


Şekil 11. a fazı öz indüktansının akıma ve rotor konumuna bağlı değişimi (R2).



Şekil 12. a-b fazı arasındaki karşılıklı indüktansın akıma ve rotor konumuna bağlı değişimi (R2).

## 5. SRM' NİN SİMULASYONU VE DENEY SONUÇLARI



Şekil 13. İncelenen üç fazlı sistem.

Yapılan deneysel çalışmada SRM yıldız bağlı olarak  $V_{a0\text{eff}}=200\text{V}$  sinüsoidal şebeke gerilimi ile beslenmiştir. Çalışma sırasında yıldız noktası şebeke ile yalıtılmış durumdadır. Şekil 13.' de incelenen sistemin eşdeğer devresi görülmektedir. Eşdeğer devrede yıldız noktası ile nötr hattının yalıtılmış olması için sargı akımlarının toplamının sıfır olması gerekmektedir. Böyle bir sistem için motor sargılarına uygulanan faz nötr gerilimleri,

$$V_{a0} = V_{an} + V_{n0} \quad (3)$$

$$V_{b0} = V_{bn} + V_{n0} \quad (4)$$

$$V_{c0} = V_{cn} + V_{n0} \quad (5)$$

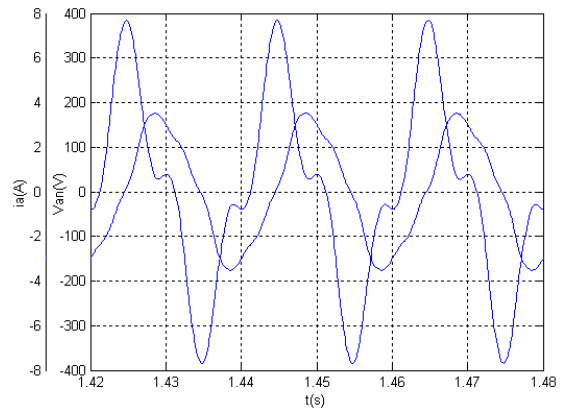
şeklinde yazılabilir. Makinanın indüktans matrisindeki ideal olmayan terimlerinden dolayı sistem dengesizlik göstermekte ve sargı akımlarının

toplamı sıfıra eşit olmamaktadır. İdeal durumda nötr hattı akımının sıfır olması gerektiğinden dolayı  $V_{n0}$  gerilimi bu koşulu sağlayacak şekilde düzeltilmiştir. Buna göre  $V_{n0}$  gerilimi,

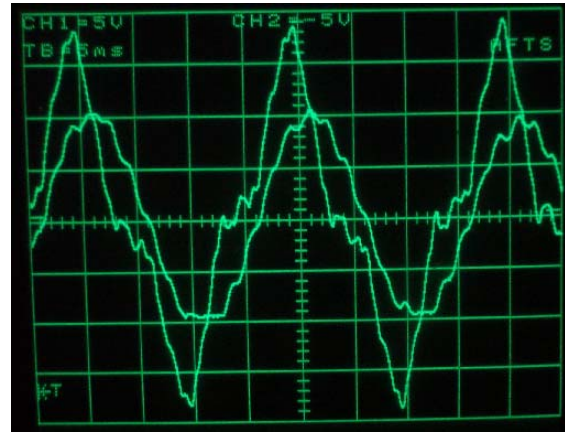
$$V_{n0} = \frac{1}{3}(V_{a0} + V_{b0} + V_{c0}) + R(I_a + I_b + I_c) \quad (6)$$

olarak tanımlanabilir. Buna göre R değeri,  $(I_a+I_b+I_c)$  toplamını minimize eden değer olacak şekilde belirlenir. Bu şekilde nötr hattı akımı sıfıra çok yakın bir değere getirilmiştir[2].

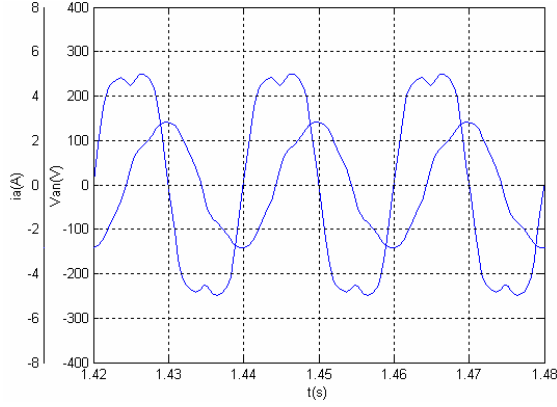
Aşağıdaki şekillerde deneysel çalışma ve simülasyon çalışmasına ait sonuçlara yer verilmiştir.



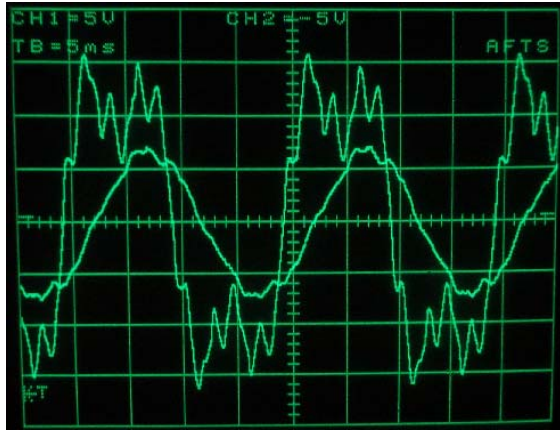
Şekil 14. R1 rotor tasarımı için 2Nm yükte iken  $V_{an}$  gerilimi ve  $I_a$  akımının zamana bağlı değişimi.



Şekil 15. R1 rotor tasarımı için 2Nm yükte iken  $V_{an}$  gerilimi ve  $I_a$  akımının zamana bağlı değişiminin osiloskop görüntüsü(100V/kare, 2A/kare).



Şekil 16. R2 rotor tasarımı için 2Nm yükte iken  $V_{an}$ , gerilimi ve  $I_a$  akımının zamana bağlı değişimi.



Şekil 17. R2 rotor tasarımı için 2Nm yükte iken  $V_{an}$ , gerilimi ve  $I_a$  akımının zamana bağlı değişiminin osiloskop görüntüsü (100V/kare, 2A/kare).

## 6. SONUÇLAR

Elektromekanik enerji dönüşümünün temelleri ve geliştirilmiş makina kuramının temelleri 1920' li yıllara dayanmaktadır. Geliştirilmiş klasik kuramda yapılan modellerin doğruluğu, fiziksel sistemin, klasik kuramın temel varsayımlarına ne kadar uyduğu ile orantılıdır. Bilindiği üzere geliştirilmiş klasik makina kuramı bazı temel varsayımlar üzerine dayanmaktadır.

Bu varsayımlarla elde edilen modelin doğruluğu, bu varsayımların gerçek fiziksel sistemde ne kadar varolduğuna bağlıdır. Örneğin stator dişlerindeki hava aralığından dolayı indüktans değişimlerinin düzgün cosinüs fonksiyonu şeklinde değişmemesi doğaldır. Bu amaçla, yapılan çalışmada indüktans değişimleri Sonlu Elemanlar Analizi ile numerik olarak hesaplanmıştır. Hesaplamanın dışında üç farklı yöntemle indüktans değişimleri ölçülmüştür. Parametrelerin konuma bağlı değişiminin yanında, akıma bağlı değişimleri de belirlenmiştir. Daha sonra hesaplanan ve ölçülen değerler periyodik fonksiyonlar haline dönüştürülmüştür.

Yapılan çalışmalar birbirine zıt yapıda iki farklı rotor ile denenmiştir. Gerek Sonlu Elemanlar Analizi kullanılarak hesaplanan indüktans parametrelerinin değişimi ile ölçülen indüktans parametrelerinin

değişiminin birbirine benzerliği, gerekse simülasyon sonuçları ile gerçek fiziksel sistemin sonuçlarının benzerliği yapılan analizin doğruluğunu göstermektedir.

Ayrıca fiziksel sistemin indüktans parametrelerinin dengesiz olmasından dolayı üç faz akımlarının ani değerlerinin toplamının sıfır olmadığı görülmüştür. Bu sonuçtan hareketle nötr hattı yalıtılmış bir sistemde  $I_n$  akımının sıfır olması gerektiğinden stator gerilimlerine  $I_a$ ,  $I_b$ ,  $I_c$  akımlarının toplamıyla orantılı bir düzeltme gerilimi uygulanmıştır. Bu şekilde hem nötr hattının yalıtılmış olduğu bir sistem gerçekçi olarak modellenmiş, hem de motor nötr noktası ile şebeke nötr noktası arasındaki gerilim numerik olarak belirlenmiştir.

## KAYNAKLAR

- [1] MILLER, T. J. E., Brushless Permanent Magnet and Reluctance Motor Drives. Oxford University Press, 1989.
- [2] DURU,H.T., Mıknatıslı senkron makinanın magnetik analizi ve modellenmesi, Kocaeli Üniversitesi Fen Bilimleri Enstitüsü, Doktora Tezi, 1997.
- [3] DURU,H.T., ÇAMUR,S., ARİFOĞLU,B., BEŞER,E., Design and analysis of PM assisted synchronous reluctance machines, International Electrical Machines and Drives Conference IEEE, IEMDC, 2003.
- [4] DURU,H.T., ÇAMUR,S., ARİFOĞLU,B., BEŞER,E., KANDEMİR,E., Mıknatıslı destekli senkron relüktans motor tasarımı ve analizi, Elektrik-Elektronik-Bilgisayar Mühendisliği 10.Ulusal kongresi ve Fuarı, 2003.
- [5] DURU,H.T., ÇAMUR,S., ARİFOĞLU,B., BEŞER,E., KANDEMİR,E., A method for performance prediction of a synchronous reluctance motor based on natural a,b,c model, ACEMP'04 International Aegean Conference on Electrical Machines and Power Electronics, 2004.