



## A Detailed Study for the Determination of Phase Inductances of a Shaded-Pole Induction Motor with Variable Air Gap

Adem DALCALI<sup>1\*</sup>, Mehmet AKBABA<sup>2</sup>, Emre ÇELİK<sup>3</sup>

<sup>1</sup>Bandırma Onyedü Eylül University, Faculty of Engineering and Natural Sciences, Department of Electronics and Communication Engineering, 10200, Bandırma/BALIKESİR

<sup>2</sup>Karabük University, Faculty of Engineering, Department of Computer Engineering, 78050, KARABÜK

<sup>3</sup>Düzce University, Faculty of Engineering, Department of Electrical-Electronic Engineering, 81620, DÜZCE

### Graphical/Tabular Abstract

Calculation of phase quantities of AC machines is closely related to the proper knowledge of the inductances. In this study, inductances of a shaded-pole induction motor with variable reluctance has been obtained as summarized in Figure A. The generated algorithm has been applied to the established experimental setup and the resulting data have been processed with the help of equations and graphs have been obtained.

### Article Info:

Received: 10/01/2019

Revision 29/03/2019

Accepted: 30/03/2019

### Highlights

- Phase inductances of a shaded-pole induction motor
- Stator-rotor mutual inductance versus rotor position
- Performance calculation in shaded-pole induction motor

### Keywords

Shaded-Pole Induction Motor  
Phase Inductances  
Magnetic Saturation  
Mutual Inductances

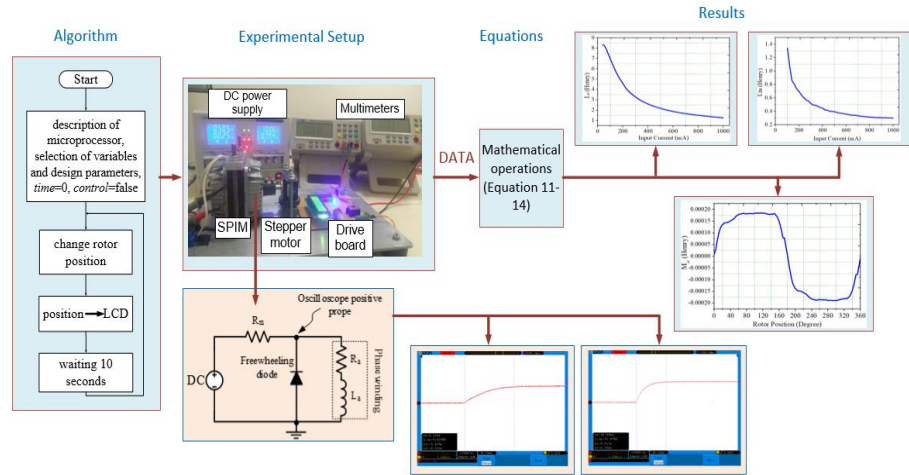


Figure A. Block schema of the system

**Purpose:** In the study, the effect of magnetic saturation on the stator self and leakage inductances, and also the variation of the stator-rotor mutual inductance versus rotor position have been investigated in detail.

**Theory and Methods:** Stator winding self-inductance, stator winding and shading-rings leakage inductance, stator-rotor mutual inductance and the mutual inductance between shading-rings and rotor loops are determined experimentally through comprehensive tests. The mechanism, a 200-step motor driven by PIC 16F877A microcontroller has been coupled properly to the SPIM on a platform, has been established in order to obtain the inductances.

**Results:** Thanks to this study, we believe that a great progress has been made in the accurate identification of the inductances which are problematic in the theoretical analysis of SPIM. It is expected that the analyzes presented in this article will contribute to correct performance prediction of SPIMs at their production stage.

**Conclusion:** Inductances of a practical SPIM are obtained analytically and investigated in detail using experiments. In the experimental test bench, as it is important to maintain the actual value of the air gap length, a special test platform is prepared. Thanks to this study, we believe that a great progress has been made in the accurate identification of the SPIM inductances which are problematic in the theoretical analysis of SPIM.



## Değişken Hava Aralıklı Gölge Kutuplu Asenkron Motorun Faz Endüktanslarının Tespitine Yönelik Detaylı Bir Çalışma

Adem DALCALI<sup>1\*</sup>, Mehmet AKBABA<sup>2</sup>, Emre ÇELİK<sup>3</sup>

<sup>1</sup>Bandırma Onyedü Üniversitesi, Mühendislik ve Doğa Bilimleri Fakültesi, Elektronik ve Haberleşme Mühendisliği Bölümü, 10200, Bandırma/BALIKESİR

<sup>2</sup>Karabük Üniversitesi, Mühendislik Fakültesi, Bilgisayar Mühendisliği Bölümü, 78050, KARABÜK

<sup>3</sup>Düzce Üniversitesi, Mühendislik Fakültesi, Elektrik-Elektronik Mühendisliği Bölümü, 81620, DÜZCE

### Öz

Gölge kutuplu asenkron motorlar (GKAM) yapılarının basit, maliyetlerinin düşük olması ve az bakıma ihtiyaç duymaları nedeniyle endüstriyel uygulamalarda, ev aletlerinde ve havalandırma sistemlerinde yoğun bir şekilde kullanılmaktadır. GKAM'da eliptik döner alanın oluşumu motorun analizini oldukça zorlaştırmaktadır. Bu karmaşıklığın sonucu olarak, bu tip motorların teorisi, tasarımı ve analizi konusunda nispeten sınırlı yayın bulunmaktadır. Çoğunlukla bu motorların tasarımları deneme-yanılma yöntemine dayanmaktadır. Bilindiği üzere elektrik makinalarının performansının doğru bir şekilde hesaplanması, hesaplamalarda kullanılan sargı endüktanslarının doğruluğu ile yakından ilişkilidir. Bu nedenle, çalışmada 4 kutuplu GKAM'ın stator sargısı ve gölge kutup sargısı sargı başı endüktansı, stator sargısı öz endüktansı, stator sargısı toplam kaçak endüktansı ve stator-rotor ortak endüktansı analitik denklemler ve gerçek zamanlı deneyler yardımıyla elde edilmiştir. Aynı zamanda manyetik doyumun stator öz endüktansı ve kaçak endüktansına etkisi ile stator-rotor ortak endüktansının rotor pozisyonuyla değişimi incelenmiştir. Çalışmanın sonunda, hesaplanan stator sargısı öz endüktansının doğruluğu deneysel bir yaklaşımla doğrulanmıştır.

### Makale Bilgisi

Başvuru: 10/01/2019

Düzeltilme: 29/03/2019

Kabul: 30/03/2019

### Anahtar Kelimeler

Gölge Kutuplu Asenkron

Motor

Faz Endüktansı

Manyetik Doyum

Ortak Endüktans

### Keywords

Shaded-Pole Induction  
Motor

Phase Inductances

Magnetic Saturation

Mutual Inductances

## A Detailed Study for the Determination of Phase Inductances of a Shaded-Pole Induction Motor with Variable Air Gap

### Abstract

Shaded-pole induction motors (SPIMs) are extensively used in industrial applications, home appliances and ventilation systems due to their simple structure, low cost and low maintenance requirement. Formation of elliptic rotating field in SPIM makes its analysis rather complex. As the result of this complexity, there are relatively limited publications on the theory, design and analysis for this kind of motor. In many cases, its design is based on trial and error method. As it is appreciated, the accuracy of predicted performance of electric machines is closely related to the accuracy of the winding inductances used in calculations. For this reason, in this study, stator and shading-rings end-winding leakage inductance, stator winding self-inductance, total leakage inductance of the stator winding and the mutual inductance between stator and rotor winding of a 4-pole SPIM are obtained by means of the derived analytical equations and real-time experiments. Also, the effect of magnetic saturation on the stator self and leakage inductances, and the variation of stator-rotor mutual inductance with respect to the rotor position have been investigated. At the end of the study, the accuracy of computed stator winding self-inductance is validated by an experimental exercise.

## 1. GİRİŞ (INTRODUCTION)

Bir fazlı motorlar herhangi bir kontrolöre gerek duymadan bir fazlı kaynaktan beslenebilirler. Bu motorlar üretim kolaylığı, maliyet ve basit yapıları gibi üstünlüklerinden dolayı endüstride sıklıkla kullanılmaktadır [1-4]. Bir fazlı asenkron motorlarda, motor dururken üretilen toplam moment sıfırdır. Bu motorların yol alması için yardımcı sargılı, kapasitör başlangıçlı, devamlı kondansatörlü ve gölge kutuplu yol verme metotları kullanılır [5,6]. Bu motorlar arasında GKAM'lar kalkış momentleri ve verimlerinin düşük

olmasına rağmen bakıma ihtiyaç duymamaları ve düşük maliyetlerinden dolayı küçük güçlü uygulamalarda yaygın olarak kullanılırlar [7,8]. Sadece Avrupa’da kapasiteli bir fazlı motorlar yılda 700-800 bin adet üretilmekte iken GKAM’lar yılda 10 milyon adet kadar üretilmektedir [9].

GKAM’ların kısa devre halkalarının stator kutuplarına açılmış olan yarıklara yerleştirilmesi ve daha önemlisi kutuplar-arası açıklıklar bu motorların hava aralığında değişken bir yapının oluşmasına neden olmaktadır. GKAM’lar tasarım açısından basit yapıya sahiptirler. Ancak bu makinalarda oluşan manyetik alan, eliptik döner manyetik alan olmasından dolayı teorik olarak analizleri en güç olan makinalardandır. Bu tip motorların tasarımında, matematiksel olarak modellenmesinde ve motor performans analizlerinin gerçekleştirilmesinde standart bir prosedür bulunmamaktadır. Bu nedenle bu tip motorlar üzerine çok az sayıda çalışma yapılmıştır [10-12]. Bu çalışmalardan bazılarını özetlersek Ojaghi ve Daliri GKAM’ın dinamik modeli çıkararak farklı çalışma koşullarında performansını incelemişlerdir [13]. Özçelik ve diğerleri, düşük moment ve düşük güç uygulamalarında basit yapısından dolayı gölge kutuplu motorların tercih edildiğini belirtmişlerdir. Çalışmada gölge kutuplu, kapasiteli ve fırçasız sabit mıknatıslı doğru akım (DA) motorun performansları karşılaştırılmıştır. Gölge kutuplu motorun maliyet açısından, fırçasız DA motorunun ise verim açısından üstün olduğu belirtilmiştir [14]. Pessina ve Morra tek ve çift kısa devre halkasının motor üzerindeki etkisini araştırmışlardır. Çift kısa devre halkalı motorda ters yönde dönen manyetik alan bileşeninin daha az olduğu ve bundan dolayı da tork karakteristiğindeki titreşimlerin azaldığını tespit etmişlerdir [15]. Makowski çalışmasında, kayk ve malzemenin doyumunu dikkate alarak elektromanyetik tork değerini ve performans karakteristiğini elde etmiştir [16]. Saraç çalışmalarında, farklı motor modelleri belirleyerek tork ve verim değerlerini genetik algoritma kullanılarak optimize etmiştir [17,18]. Goa, soğutma fan sistemlerinde kullanılan gölge kutuplu motorun hızını d-q eksen modelini kullanarak kontrol etmiştir [19]. Başka bir çalışmada, motorun gölge kutupları sökülerek, rotoruna mıknatıslar yerleştirilerek fırçasız mıknatıslı bir motor elde edilmiştir. Motorun performansı 2D, 3D FEM analizleri ve deneylerle incelenmiştir [20].

Bu çalışmada, 4 kutuplu GKAM’ın stator sargısı ve gölge kutup halkası kutup başı endüktansları analitik olarak hesaplanmıştır. Gölge kutup halkaları kısa devre edilmemiş ve rotoru sincap kafessiz olarak imal ettirilen GKAM kullanılarak kurulan deney düzeneğinde motor, bir adım motoru ile birbirlerine uygun şekilde bağlanmışlardır. PIC 16F877A mikrodenetleyici kullanılarak eşit rotor açılarında gerçekleştirilen deneylerde GKAM’ın stator sargısı öz endüktansı, kaçak endüktansı ve ortak endüktansları tespit edilmiştir. Ayrıca stator sargısı öz endüktansı, stator sargısının DA güç kaynağına karşı göstermiş olduğu basamak tepkisi oluşturularak da elde edilmiştir. Alternatif akım makinalarında performans hesaplarındaki doğruluk derecesi endüktansların doğru olarak bilinmesiyle doğrudan bağlantılı olduğundan bu çalışma ile GKAM’ın endüktanslarının tespiti konusunda literatüre katkı sağlanmıştır.

## 2. GÖLGE KUTUPLU ASENKRON MOTORLAR (SHADED-POLE INDUCTION MOTORS)

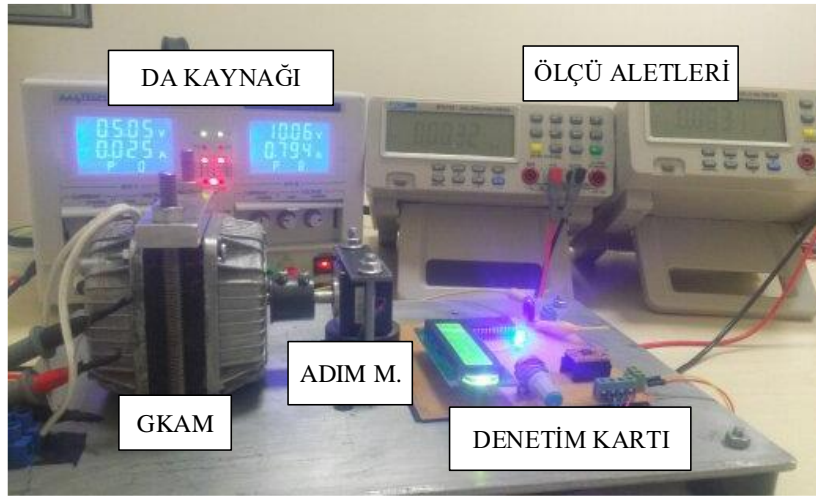
Bir fazlı çok küçük güçlü asenkron motora yol vermenin bir yöntemi de gölge kutup kullanmaktır. Bu tip motorlarda ana sargılar çıkık kutuplar üzerine sarılırken, gölge kutuplar ise bakır halkaların kısa devre edilerek stator kutuplarının belirli bir kısmına yerleştirilir. Ana kutbun gölge kutup dışında kalan bölgesinde manyetik akı maksimum değerine gölge kutup akısından önce ulaşır. Ana kutbun geri kalan kısmı ve gölge kutbun manyetik akıları arasında faz farkının oluşmasıyla motorda yol alma momenti üretilir [21-23]. Çalışmada kullanılan GKAM Faneks Fan şirketi tarafından üretilen ticari bir motordur. Bu motorun özellikleri Tablo 1’de verilmiştir.

**Tablo 1. Motor Parametreleri**

Özellik	Değer	Özellik	Değer
Anma gücü, W	15	Rotor oluk sayısı	26
Anma gerilimi, V	220	Rotor çapı, mm	22
Frekans, Hz	50	Nüve boyutu, mm	82x82x25
Kutup sayısı	4	Stator sargısı sarım sayısı	570
Anma hızı, rpm	1305	Stator sargısı iletken kesiti, mm	0,3

### 3. GKAM ENDÜKTANSLARININ TESPİTİ (DETERMINATION OF INDUCTANCES OF SPIM)

Değişken hava aralıklı gölge kutuplu motorların endüktanslarının hesabı oldukça karmaşıktır. Elektrik makinalarında relüktansın değişmesi ve nüvede kullanılan malzemenin doyma etkisinden dolayı endüktans değeri rotor konumuna ve akıma bağlı olarak değişen lineer olmayan fonksiyonlardır [24,25]. Bu kısımda motora ait stator sargısının sargı başı endüktans değeri analitik olarak elde edilmiştir. Stator sargısı öz endüktansı, stator sargısı ve yarık kutup halkası kaçak endüktansları, stator-rotor ortak endüktansı ve yarık kutup-rotor gözü ortak endüktansları detaylı testler yapılarak deneysel olarak tespit edilmiştir. Şekil 1’de verilen deney düzeneği kurularak endüktansların belirli adımlarla ve hava aralığının değerini bozmadan elde edilmesi sağlanmıştır. Düzenekte mikrodenetleyici ile sürülen 200 adımlı bir adım (step) motorunun gölge kutuplu asenkron motor ile kenetlemeli bağlantısı yapılmıştır. Mekanik açı hassasiyeti  $1,8^\circ$  olduğundan bu değer GKAM’de  $3,6^\circ$ ’lik bir elektriksel açığa karşılık gelmektedir.



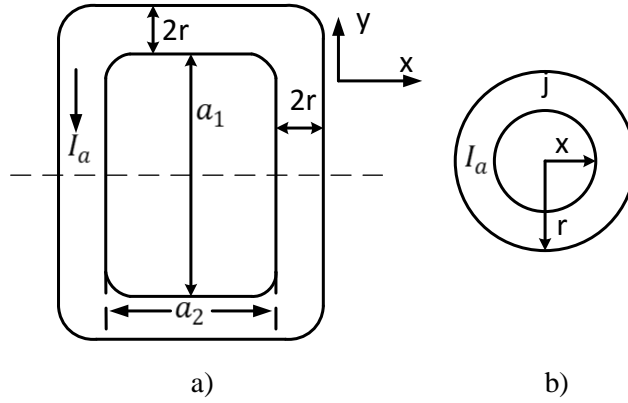
Şekil 1. Endüktansların tespitinde kullanılan deney düzeneği

#### 3.1. Stator Sargısı ve Gölge Kutup Halkası Sargı Başı Endüktansları (Determination of the Stator End-Winding Leakage Inductance)

Elektrik Makinalarında sargı kaçak endüktansları genellikle oluk kaçak endüktansı, zig-zak kaçak endüktansı, sargı başı veya kutup başı gibi bileşenlerden oluşur. Sargı başı kaçak endüktansı toplam kaçak endüktansın oldukça önemli bir yüzdesini oluşturur. Sargı başı endüktansı elektrik makinalarının aksel yönde her iki tarafta demir çekirdeğin dışında manyetik yolunu havadan tamamlayan ve bir bobinin iki yanı arasında kalan kısmın endüktansıdır. Demir çekirdek dışında kaldığı için sargı başının ürettiği manyetik akı üretilen torka katkı yapmaz, sadece sargı endüktansını artırıp akımı ve güç faktörünü azaltır [26]. Çalışmaya konu olan motorun sargı başı endüktansları hesaplanırken aşağıdaki yaklaşımlar dikkate alınmıştır;

- Sargı başlarının birbirinden yeteri kadar uzakta ve birbirlerine olan manyetik etkilerinin olmadığı,
- Akımın sargı başı kesitinde sürekli, düzgün ve sabit bir akım yoğunluğunda dağıldığı,
- Nüvede oluşan fuko akımlarının meydana getirdiği alanın etkisi ile sargı başlarının manyetik alanının gövdeyi etkilemediği kabul edilmiştir.

Yukarıdaki varsayımlara göre, Şekil 2 sırasıyla, uç sargının ve iç endüktansların hesaplanmasında ele alınabilir.



**Şekil 2.** Endüktansların hesabı için oluşturulan geometriler a) Sargı başı endüktansı b) İç endüktans Eşitlik 1 ile sargı başının x eksenindeki bir yanının, sargının dışındaki bir noktada alanı ifade edilebilir [26].

$$H_y = \frac{NI_a}{2\pi y} \quad 1$$

Belirlenen nokta yakınındaki dar bir bölgeye ilişkin akı değeri;

$$d\Phi = H_y ds = H_y a_2 dy \quad 2$$

Sargı başının x eksenindeki 2 tarafının toplam akı değeri Eşitlik 3'den hesaplanabilir.

$$\lambda_{a2} = \frac{2\mu_0 a_2 I_a N^2}{2\pi} \int_{y=r}^{y=a_1+r} \frac{dy}{y} = \frac{\mu_0 a_2 I_a N^2}{\pi} \ln\left(\frac{a_1+r}{r}\right) \quad 3$$

Belirlenen akıya ilişkin endüktans değeri;

$$L_{a2} = \frac{\lambda_{a2}}{I_a} = \frac{\mu_0 a_2 N^2}{\pi} \ln\left(\frac{a_1+r}{r}\right) \quad 4$$

X eksenine benzer olarak y eksenindeki 2 tarafın dış endüktansı;

$$L_{a1} = \frac{\mu_0 a_1 N^2}{\pi} \ln\left(\frac{a_2+r}{r}\right) \quad 5$$

İç endüktans için akım yoğunluğu Eşitlik 6'dan elde edilebilir;

$$J = \frac{NI_a}{\pi r^2} \quad 6$$

Merkezden x kadar uzaklıkta bir noktadaki manyetik alan;

$$H_x = \frac{NI_a x}{2\pi r^2} \quad 7$$

olur. Sargı başının 4 tarafı için toplam iç manyetik akı;

$$\lambda_{iç} = 2I_a \mu_0 N^2 \left( (a_1+r) + (a_2+r) \right) \int_{x=0}^{x=r} \frac{x}{2\pi r^2} dx \quad 8$$

Bu akıya ait endüktans değeri;

$$L_{iç} = \frac{\lambda_{iç}}{I_a} 2N^2 (a_1 + a_2 + 2r) x 10^{-7} \quad 9$$

elde edilir. Toplam sargı başı endüktans değeri iç ve dış endüktansların toplamı olup Eşitlik 10 ile elde edilir [26].

$$L_{sba} = 4N^2 \times 10^{-7} \left[ a_2 \ln\left(\frac{a_1+r}{r}\right) + a_1 \ln\left(\frac{a_2+r}{r}\right) + \left(\frac{a_1+a_2}{r}\right) \right] \quad 10$$

Gölge kutup halkası ve stator sargısı kutup başı endüktanslarının hesabı için sargıların ölçülen parametreleri Tablo 2'de verilmiştir.

**Tablo 2.** Stator Sargısı ve Gölge Kutup Halkasının Boyutları

Özellik	$a_1$ (m)	$A_2$ (m)	$r$ (m)	$N$
Stator sargısı	0,0354	0,0156	0,006	570
Gölge kutup halkası	0,013	0,017	0,0094	1

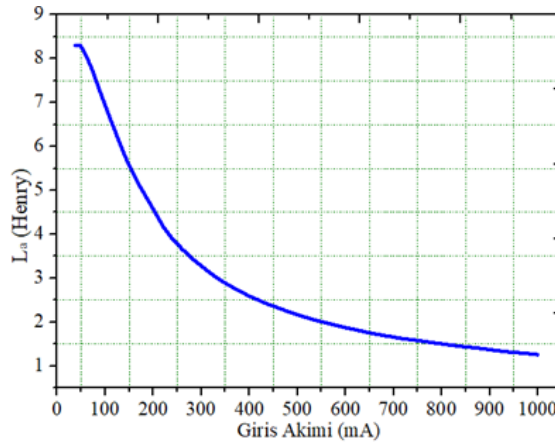
Yapılan ölçümler ve analitik hesaplamalar sonucunda 4 kutup için stator sargısı kutup başı endüktansı  $L_{sba} = 0,0137$  H, gölge kutup halkası kutup başı endüktansı  $L_{sbb} = 3,26 \times 10^{-2}$   $\mu$ H olarak elde edilmiştir.

### 3.2. Stator Sargısı Öz Endüktansı (Stator Winding Self-Inductance)

Yarık kutup halkaları takılmamış ve rotor sincap kafessiz iken motorun giriş empedansı ölçülerek stator sargısının öz endüktansı belirlenir. Bu durumda giriş empedansı stator sargısı direncinin etkin değeri ile stator sargısı öz endüktansından oluşur. Kaçak endüktans ihmal edilerek stator sargısı öz endüktansı Eşitlik 11 ile hesaplanır [27];

$$L_a = \frac{1}{2\pi f} \sqrt{\left(\frac{V}{I_a}\right)^2 - R_a^2} \quad 11$$

Uyartım akımına göre stator sargısı öz endüktansının değişimi Şekil 3'te verilmiştir. Giriş akımı 0 – 1000 mA arasında değiştirilerek sargıya uygulanan  $V$  gerilimi ve  $I_a$  akımı değerleri ölçülerek  $L_a$  öz endüktansı analitik olarak belirlenmiştir.

**Şekil 3.** Sargı akımına karşılık stator sargısı öz endüktansının değişimi

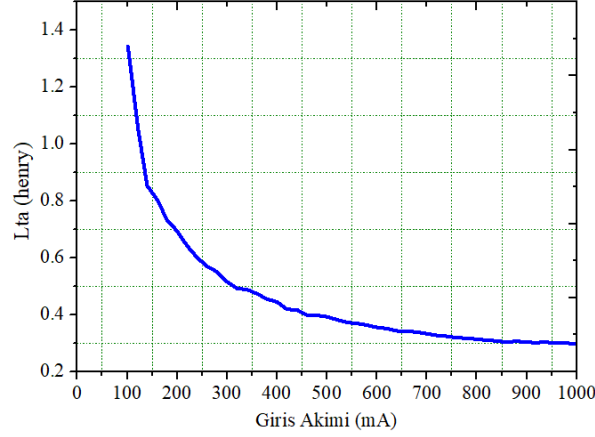
Yukarıda belirtilen test yapılırken rotor devresi açık olduğundan rotor pozisyonu kalmıştır. Şekil 3'ten stator sargısı öz endüktansının stator sargısına uygulanan akım arttıkça düştüğü görülmektedir. Bu durum, nüvenin bazı alanlarında artan stator akımıyla orantılı olarak ortaya çıkan manyetik doyumdan kaynaklanmaktadır. Nominal çalışmada motor akımı 0,396 A iken öz endüktans değeri 2,56 H olarak elde edilmiştir.

### 3.3. Stator Sargısı Kaçak Endüktansı (Stator Winding Leakage Inductance)

Kaçak endüktans değeri, stator toplam akısı ile statordan rotora geçen ve rotor çevrimleri tarafından halkalanan akının farkı yardımıyla belirlenir. Bu ölçmenin yapılabilmesi için rotor sincap kafesi ve yarık kutup halkalarının çıkarılması gerekmektedir. Böylelikle GKAM'ın oluklarına bobin adımı bir kutup adımına eşit olan ve sipir sayısı  $n_2$  olan ölçme bobini sarılmalıdır. Stator sargısına gerilim uygulanarak rotordaki ölçme bobininde endüklenen  $E_2$  gerilimleri, stator sargı akımı  $I_a$  ve uygulanan  $V$  gerilimleri ölçülerek kaçak endüktans değeri Eşitlik 12 kullanılarak elde edilir [27].

$$L_{ta} = \frac{1}{2\pi f} \left( \sqrt{\left(\frac{V}{I_a}\right)^2 - R_a^2} - \frac{4 \times E_2 \times N}{n_2 I_a} \right) \quad 12$$

Stator sargısı akımı 0 ile 1000 mA arasında çok küçük aralıklarla değiştirilerek ölçümler tekrarlanmış ve kaçak endüktans değerleri Eşitlik 12 kullanılarak analitik olarak hesaplanmıştır. Şekil 4 uyarım akımına göre stator sargısı kaçak endüktansının değişimini göstermektedir.



**Şekil 4.** Sargı akımına karşılık stator sargısı kaçak endüktansının değişimi

Şekil 4'den stator sargısı öz endüktansına benzer olarak kaçak endüktansın da nüvenin manyetik doyumundan etkilendiği açıktır. Nominal çalışmada motor akımı 0,396 A iken stator sargısı kaçak endüktansı 0,444 H olarak elde edilmiştir.

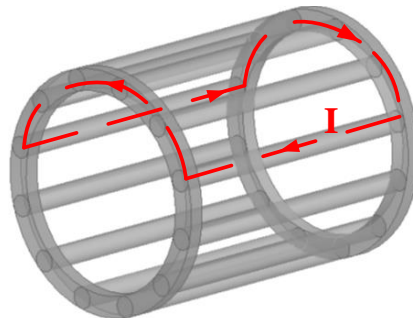
### 3.4. Ortak Endüktansların Ölçülmesi (Measurement of The Mutual Inductances)

#### 3.4.1. Stator sargısı ile bir rotor gözü arasındaki ortak endüktansın tespiti (Measurement of the mutual inductance between the stator winding and a rotor loop)

Stator sargısı ile bir rotor gözü arasındaki ortak endüktansı ölçmek için boş bulunan komşu iki rotor oluşuna sarım sayısı  $n$  olan bir ölçme bobini sarılmalı, stator sargısından bilinen  $I_a$  akımları geçirilmeli rotordaki ölçme bobininde indüklenen  $E$  gerilimi ölçülmelidir. Bu ölçmelerden stator sargısı ile bir rotor gözü arasındaki ortak endüktans belli bir rotor konumu için Eşitlik 13'den elde edilir [26-27].

$$M_{ar} = \frac{E}{2\pi f n I_a} \quad 13$$

Rotor gözü, Şekil 5'de verildiği üzere her iki rotor çubuğu ve bunlar arasında kalan uç halka parçaları tarafından oluşmaktadır.



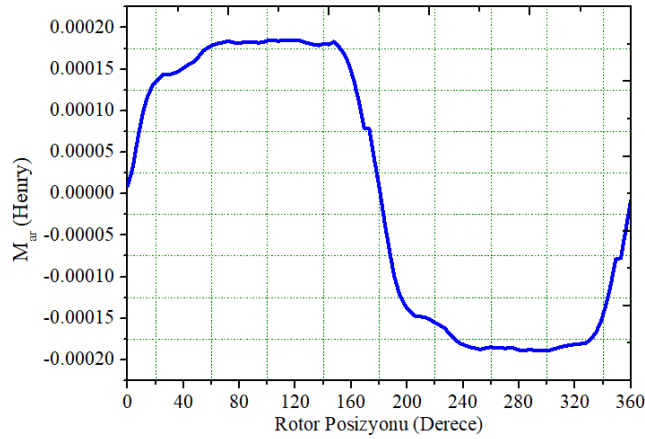
**Şekil 5.** Bir rotor gözünün şematik gösterimi



Rotor belirli açılarla döndürülüp her konumda ölçüm alınarak;

$$M_{ar}(\theta) = f(\theta) \quad 14$$

değişimi elde edilmiştir. Stator sargısı-rotor gözü arasındaki ortak endüktansın değişimi açısal pozisyona bağlı olarak Şekil 6'da verilmiştir.



Şekil 6. Rotor pozisyonuna göre stator-rotor gözü ortak endüktansı

### 3.4.2. Stator sargısı ile gölge kutup halkası arasındaki ortak endüktansın tespiti (Measurement of the mutual inductance between the shading-rings and a rotor loop)

Gölge kutup oluklarına sarım sayısı  $n_1$  olan ölçme bobini sarılarak bu ölçme bobininden değeri bilinen  $I_{yk}$  akımları geçirilmiştir. Ayrıca rotora  $n_2$  sarımlı ölçme bobini sarılarak bu bobinde endüklenen  $E$  gerilimleri ölçülmüştür. Ortak endüktans değeri ölçüm değerleri kullanılarak Eşitlik 15'den analitik olarak hesaplanmıştır [27].

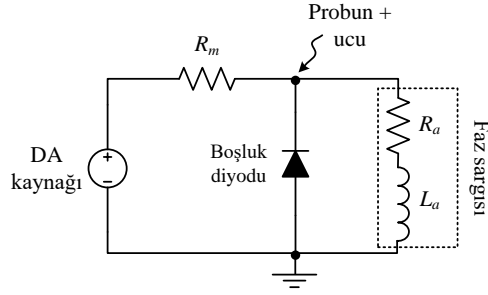
$$M_{br} = \frac{E}{2\pi f n_1 n_2 I_{yk}} \quad 15$$

Yapılan ölçüm sonuçlarına göre gölge kutup halkası ile bir rotor gözü arasındaki ortak endüktans değeri  $M_{br} = 1,47 \times 10^{-7}$  H olarak elde edilmiştir.

### 3.5. Üstel deşarj metodu kullanılarak stator sargısı öz endüktansının tespiti (Measurement of stator winding self-inductance by exponential discharge method)

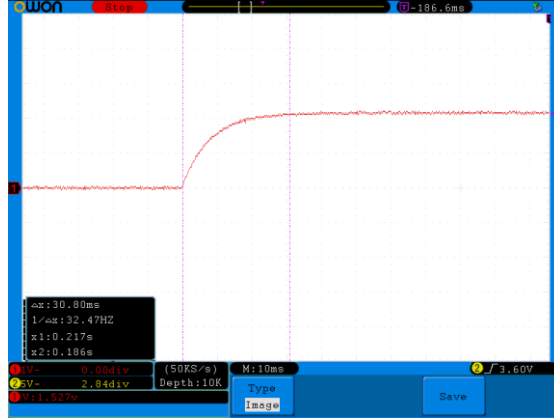
Bu yöntemde stator sargısı öz endüktansı bir DA kaynak yardımıyla ölçülebilmektedir. Endüktansı bilinmeyen bir sargı Şekil 7'de verilen deney düzeneğine değeri bilinen bir  $R_m$  direncine seri olarak bağlanır. Deney R-L devresindeki zaman sabitesinden  $L_a / (R_m + R_a)$  yararlanılarak gerçekleştirilir. Sargı direnci ve bağlanan seri direncin toplam değeri  $84,2 \Omega$  olarak ölçülmüştür.





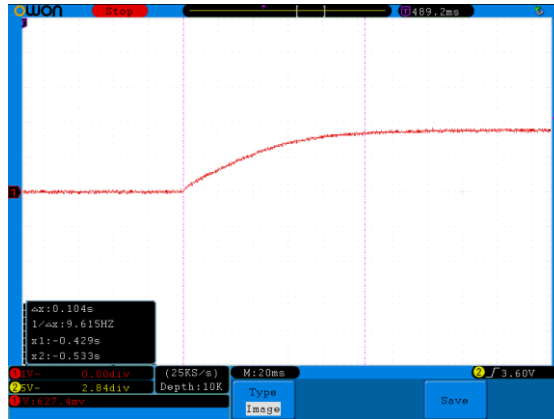
Şekil 7. Üstel deşarj yönteminde kullanılan devre modeli

Rotor yokken LCR metre ile yapılan ölçümlerde endüktans değeri 570 mH olarak ölçülmüştür. Yapılan deneyde elde edilen osiloskop görüntüsü Şekil 8’de verilmiştir.



Şekil 8. Rotor yokken faz sargısının basamak tepkisi

Direnç değerleri bilindiğinden endüktans değeri y ekseninden zaman sabitesi bulunarak tespit edilebilir. Şekil 8’den zaman sabitesi  $\tau = 6,16$  ms olarak tespit edilmiştir. Buradan stator sargısı öz endüktans değeri 519 mH olarak tespit edilmiştir. Oluk köprüleri açılmamış rotora sahip motorda deney tekrarlandığında endüktans değeri 1,751 H olarak elde edilmiştir. Bu duruma ilişkin osiloskop ile elde edilen ekran görüntüsü Şekil 9’da verilmiştir. Bu şartlarda LCR metre ile yapılan ölçümlerde endüktans değeri ise 1,8 H olarak ölçülmüştür. Görüldüğü gibi LCR metre ile deneysel yaklaşımlardan elde edilen değerler oldukça yakındır. Önerilen yaklaşımlardan elde edilen sonuçların gerçek değerlerine daha yakın olduğu düşünülmektedir.



Şekil 9. Oluk köprüleri açılmamış rotor durumunda faz sargısının basamak tepkisi

Yapılan hesaplamalar ve gerçekleştirilen deneyler sonucunda elde edilen endüktans değerleri Tablo 3'te özetlenmiştir.

**Tablo 3. Endüktans Değerleri**

<i>Parametre</i>	<i>Tanımı</i>	<i>Değer</i>	<i>Birim</i>
$L_{sba}$	<i>Stator sargısı sargı başı endüktansı</i>	0,0137	H
$L_{sbb}$	<i>Gölge kutup halkası sargı başı endüktansı</i>	$3,26 \times 10^{-2}$	$\mu H$
$L_a$	<i>Stator sargısı öz endüktansı (sincap kafesiz rotorlu)</i>	2,56	H
$L_a$	<i>Stator sargısı öz endüktansı (oluk köprüleri açılmamış rotorlu)</i>	1,751	H
$L_a$	<i>Stator sargısı öz endüktansı (rotorsuz)</i>	0,519	H
$L_{ta}$	<i>Stator sargısı kaçak endüktansı</i>	0,444	H
$M_{br}$	<i>Gölge kutup halkası- bir rotor gözü ortak endüktansı</i>	0,147	$\mu H$

#### 4. SONUÇLAR (CONCLUSION)

Alternatif akım makinalarının faz büyüklüklerinin hesaplanması endüktansların doğru şekilde bilinmesi ile yakından ilişkilidir. Bu anlamda gölge kutuplu motor dikkate alındığında değişken relüktanslı hava aralığı ve gölge kutuplu yapısından dolayı endüktans parametrelerinin doğru olarak tespiti oldukça zordur. Bu zorlukların üstesinden gelmek amacıyla çalışmada GKAM'ın endüktansları deneylerle elde edilen veriler ile analitik olarak detaylı bir şekilde incelenmiştir. Deneysel çalışmada hava boşluğunun gerçek değerini korumak önemli olduğundan özel bir test ortamı hazırlanmıştır. Bu çalışma sayesinde, GKAM'ın teorik analizinde sorunlu olan endüktansların doğru tanımlanmasında büyük bir ilerleme kaydedilmiştir. Bu makalede sunulan analizlerin, üretim aşamasında GKAM'ın performans tahminlerinin doğru yapılmasına katkı sağlaması beklenmektedir.

#### TEŞEKKÜR (ACKNOWLEDGMENTS)

Yazarlar, çeşitli şekillerde birçok rotor yapısı sağlayan Faneks Fan Motor Şirketine ve Karabük Üniversitesi Bilimsel Araştırma Projesi Birimine (KBÜ-BAP-16/2-BM-110) destekleri için teşekkür ederler.

#### KAYNAKLAR (REFERENCES)

- [1] Nam, H., Kim, Y.K., Jung, S.K. and Hong, J.P., Analysis method using equivalent circuit considering harmonic components of pole change motor. Sixth International Conference on Electrical Machines and Systems, Vol. 2, pp. 740-743, China, 2003.
- [2] Kurt, A., Önbilgin, G., Kurt, Ü. and Ozgonenel, O., "A New Single Phase Induction Motor Design", Elektrik - Elektronik ve Bilgisayar Mühendisliği Sempozyumu, pp. 1-6, Bursa, 2012.
- [3] Kurita, N., Ishikawa, T. and Suzuki, G., "Development of the Two Pole Type Shaded Pole Seld-Bearing Motor, *Materials Science Forum*, Vol. 856, pp. 196-201, 2016.
- [4] Üstkoyunca, N., Eroğul, O., "Anahtarlamalı Relüktans Motor Tabanlı Medikal Santrifüj Sistemi", GU J Sci, Part C, 6(3): 536-543 (2018).

- [5] Collins, E.R., Shirley, J.R. and Fox, J.C., “An Experimental Investigation of Third Harmonic Current Distortion in Single-Phase Induction Motors”, 13th International Conference on Harmonics and Quality of Power, pp. 1-7, Wollongong, 2008.
- [6] El-Shahat, A., “Electric Machines for Smart Grids Applications- Design, Simulation and Control”, IntechOpen, pp. 150-170, 2018.
- [7] Alidousti, A., Sadoughi, A., Behbahanifard, H. and Raeisi, Y., “A New Rotor Prototype for Single Phase Line Start Permanent Magnet Synchronous Motor Based on Amendments to A Small Industrial Shaded Pole Induction Motor”, 9th Annual Power Electronics, Drives Systems and Technologies Conference, Tehran, 2018.
- [8] Shamlou, S. and Mirsalim, M., “Design, Optimisation, Analysis and Experimental Verification of A New Line-Start Permanent Magnet Synchronous Shaded-Pole Motor”, IET Electric Power Applications, Vol 7, Iss 1, pp. 16-26, 2013. DOI: 10.1049/iet-epa.2012.0064.
- [9] Karmakar, A., Saha, P.K. and Panda, G.K., “D-Q Axis Modelling Analysis of a Shaded Pole Induction Motor and Study of the Non-linear Behaviour”, International Conference on Power, Energy and Control, pp. 596-600, 2013.
- [10] Sarac, V., Stefanov, G., “Calculation of Electromagnetic Fields in Electrical Machines Using Finite Elements Method”, International Journal of Engineering and Industries, 26(1),21-29, 2011.
- [11] Dehkordi, A.B., “A Single-Phase Induction Machine Model for Real-Time Digital Simulation”, International Conference on Power Systems Transients, Croatia, June 15-18, 2015.
- [12] Kentli, F., “A Survey on Design Optimization Studies of Induction Motors During the Last Decade”, Journal of Electrical & Electronics Engineering Istanbul University, Vol. 9, No. 2, pp. 969-975, 2009.
- [13] Ojaghi, M. and Daliri, S., “ A Detailed Dynamic Model for Single-phase Shaded Pole Induction Motors”, 18th International Conference on Electrical Machines and Systems, Pattaya, Oct., 2015.
- [14] Özçelik, N.G., Doğru, U.E., ve Ergene, L.T., “Comparison study of drive motors for cooker hood applications”, 16th International Power Electronics and Motion Control Conference and Exposition, pp. 1252-1257, Antalya, 2014.
- [15] Pessina, G. ve Morra, E., “Optimization and design of the shaded pole single phase asynchronous motor”, International Symposium on Power Electronics, Electrical Drives, Automation and Motion, pp. 469-473, 2012, DOI: 10.1109/SPEEDAM.2012.6264407.
- [16] Makowski, K., “Determination of performance characteristics of a single-phase shaded pole induction motor by circuit-field method”, Electrical Engineering- Springer, pp. 281-286, 2002.
- [17] Sarac, V., Petkovska, L., Cundev, M. and Cvetkovski, G., “Comparison between two target functions for optimization of single phase shaded-pole motor using method of genetic algorithms”, Journal of Materials Processing Technology, pp. 89-95, 2005.

- [18] Sarac, V.J., Stefanov, G.G. and Cvetkovski, V., “Influence of number of varied parameters on torque of single phase optimized motor models”, 14th International IGTE Symposium on Numerical Fields Calculation in Electrical Engineering, pp. 196-201, Graz, 2010.
- [19] Gao, Y., Chau, K.T. and Ye, S., “A novel chaotic-speed single-phase induction motor drive for cooling fans”, Industry Application Conference, pp. 1337-1341, Vol. 2, 2005.
- [20] Andriollo, M., Bortoli, M., Martinelli, G., Morini, A. and Tortella, A., “Design Improvement of Single-Phase Brushless Permanent Magnet Motor for Small Fan Appliances”, Transactions on Industrial Electronics, Vol. 57, No. 1, pp. 88-95, 2010.
- [21] Bal, G., “Özel Elektrik Makinaları”, Seçkin, Ankara, 2006, ISBN:9750201574.
- [22] Ojaghi, M. And Daliri, S., “Analytic Model for Performance Study and Computer-Aided Design of Single-Phase Shaded-Pole Induction Motors”, IEEE Transactions on Energy Conversion, Vol 32, No. 2, pp. 649-657, 2017.
- [23] Shamlou, S. and Mirsalim, M., “A New Restructed Shaded Pole Induction Motor- 3D Finite Element Analysis and Experimental Verification”, International Journal of Smart Engineering, Vol 4, No 3, pp. 125-130, 2015.
- [24] Çınar, M.A., Gündoğan, Ç. and Kuyumcu, F.E. “Taşıt Tahriğinde Kullanılacak Bir Anahtarlı Relüktans Motor Tasarımı ve Analizi”, Elektrik-Elektronik-Bilgisayar Mühendisliği 11. Ulusal Kongresi, 304-307, Istanbul, 2005.
- [25] Bal, G. and Öncü, S. “Effects of A Current Transformer's Magnetizing Current on The Driving Voltage in Self-Oscillating Converters”, Turkish Journal of Electrical Engineering & Computer Sciences, Vol 22, 191-201, 2014.
- [26] Akbaba, M. and Fakhro, S.Q., “An Improved Computational Technique of the Inductance Parameters of Reluctance Augmented Shaded-Pole Motors Using Finite Element Method”, IEEE Transactions on Energy Conversion Vol. 7, No. 2, pp. 308- 314, 1992.
- [27] Dalcalı, A., “Gölge kutuplu asenkron motorların yeni bir matematiksel modeli ve uzay harmonikli eşdeğer devresi”, Karabük Üniversitesi, Fen Bilimleri Enstitüsü, Karabük, 2017.