



### Bilezikli Asenkron Motorda Kaymanın Rotor Gerilimi ve Rotor Frekansına Etkisinin İncelenmesi

#### Investigation on the Rotor Voltage and the Rotor Frequency in Wound Rotor Induction Motor by the Slip Change

Mehmet Ali ÖZÇELİK<sup>1</sup>, Ahmet AYCAN<sup>2\*</sup>

<sup>1,2</sup> Gaziantep Üniversitesi, Teknik Bilimler Meslek Yüksekokulu, Elektrik ve Enerji Bölümü, Gaziantep, Türkiye

\*Sorumlu Yazar / Corresponding Author: Ahmet AYCAN, [aycan@gantep.edu.tr](mailto:aycan@gantep.edu.tr)

#### ÖZET

Asenkron motorlarda kayma, senkron devirle rotor devri farkının senkron devre oranıdır. Üç fazlı asenkron motorlarda rotor gerilimi ve frekansının kaymaya bağlı olarak değiştiği bilinmektedir. Yapılan çalışmada rotoru sargılı asenkron motorun statoru yıldız bağlanarak şebeke gerilimi uygulanmıştır. Rotor sargı uçları kendi içerisinde yıldız bağlıdır. Bilezikler vasıtası ile dışarı çıkarılan uçlara rotor gerilimi ve frekansını ölçmek için voltmeter ve frekans-metre bağlanmıştır. Üniversal motor yardımıyla asenkron motor döner alan yönünde ve döner alanın tersi yönde döndürülmüş kaymaya bağlı olarak rotor gerilimi ve frekansının değişimi ile ilgili yorum yapılmıştır. Rotor, stator döner alan yönünde döndürüldüğünde rotor gerilimi ve frekans rotor devri arttıkça azalmakta ve rotor hızı stator döner alan hızına ulaştığında ise kayma, rotor gerilimi ve frekans sıfır olmaktadır. Rotor, stator döner alanının tersi yönünde döndürüldüğünde ve rotor devir sayısı artırıldığında kayma değeri 1' in üzerine çıkmaktadır. Rotor gerilimi frekansı 200 Hz değerine ulaşıncaya kadar rotor devir sayısı yükseltilmiş, rotor gerilimi ve frekans değerlerinde artış görülmüştür.

**Anahtar kelimeler:** Asenkron Motor, Kayma, Frekans.

#### ABSTRACT

The slip in asynchronous motors is the synchronous cycle ratio of the rotor speed difference with the synchronous speed. It is known that in three-phase asynchronous motors, rotor voltage and frequency change with slip. In this study, the induction motor with rotor winding is connected to stator star and grid voltage is applied. The rotor windings are star connected in themselves. The voltmeter and the frequency-meter are connected to the ends extracted by means of the bracelets to measure the rotor voltage and frequency. With the help of the universal motor, the induction motor is rotated in the direction of the rotating field and in the opposite direction of the rotating field and the interpretation of the change in rotor voltage and frequency depending on the slip has been made. When the rotor rotates in the direction of the stator rotating field, the rotor voltage and frequency decrease as the rotor revolution increases, and when the rotor speed reaches the stator rotating field speed, the slip, rotor voltage and frequency become zero. When the rotor rotates in the opposite direction of the stator rotating field and the rotor speed is increased, the slip value exceeds 1. The rotor speed is increased until the rotor voltage reaches 200 Hz and the increasing in rotor voltage and frequency have been observed.

**Keywords:** Induction Motor, Slip of Induction Motor, Frequency.

## 1. GİRİŞ

Asenkron motorlar diğer adıyla indüksiyon motorları yapılarının basit, devir sayılarının yükte az değişmesi ve düşük maliyetli olmaları sebebiyle endüstride en yaygın kullanıma sahip motorlardır (Bektaş ve ark., 2007, Boqiang ve ark., 2013, Mori ve ark., 2005, Oteafy ve ark., 2010). Genel olarak stator ve rotor olmak üzere iki kısımdan meydana gelmekte olup stator sargılarında oluşan döner manyetik alanın devri ile rotor devresi devir sayılarının farklı olması asenkron kavramını getirmektedir. Asenkron motorların çalışması sırasında elektrik arkının oluşmaması ve devirlerinin frekansla değiştirilebilmesi sonucu geniş bir hız aralığına sahip olması avantaj teşkil etmektedir. 3 fazlı asenkron motor stator sargılarına 3 faz uygulandığında döner manyetik alan meydana gelmektedir ve bu alan senkron hızda dönmektedir, döner manyetik alanın rotor iletkenlerini kesmesi rotor devresinde bir gerilim indüklemekte ve rotoru hareket ettirmektedir. Rotor devrinin döner alan senkron devrinden düşük olması bu motorlarda kaymayı oluşturmaktadır.

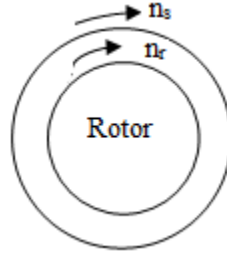
## 2. MATERYAL VE YÖNTEM

### 2.1. Asenkron Motorlarda Kayma

Asenkron motorlarda stator döner alanı senkron devir ( $n_s$ );  $p$  çift kutup sayısı ve  $f$  frekans olmak üzere denklem 1 ile ifade edilir (Sousa ve ark., 2017). Statorda meydana gelen döner alan, rotor devresinde bir gerilim indükleyerek manyetik alan oluşturur, stator ve rotordaki manyetik alanların etkileşimi sonucu Şekil 1.'de görüldüğü gibi rotor  $n_r$  devrinde döner.

$$n_s = \frac{60.f}{p}$$

(1)



Şekil 1. 3 fazlı asenkron motor devirleri

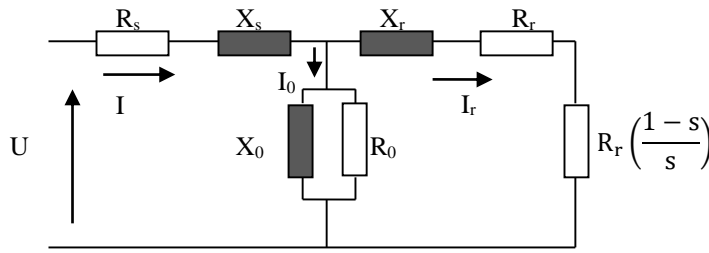
Döner alanın devir sayısı ile rotor devir sayısı arasındaki farka rotorun kayması denir, kayma rotor devrinin senkron devirden geri kalma durumu olup “s” ile gösterilir. Kayma ifadesi denklem 2’de görülmektedir. Rotor, senkron devirden daha az bir devirle dönmektedir.

$$s = \frac{n_s - n_r}{n_s} \quad (2)$$

### 2.1. Asenkron Motorun Eşdeğer Devresi

Asenkron motorların elektriksel eşdeğer devreleri transformatör eşdeğer devrelerine benzemekte olup, stator devresi transformatörlerdeki primer sargıyı, rotor devresi ise sekonder sargıyı temsil etmektedir.

Üç fazlı bir statorda bir fazın etkin direnci  $R_s$ , kaçak reaktansı  $X_s$ , rotorda ise bir fazın etkin direnci  $R_r$ , kaçak reaktansı  $X_r$ , uyarım devresi reaktans ve etkin direnci,  $X_0$  ve  $R_0$ ’dır. s kaymayı belirtmek üzere  $R_r((1-s)/s)$  rotor devresindeki kaymaya bağlı olarak değişen omik direnci belirtmektedir, Şekil 2.’de asenkron motor eşdeğer devresi görülmektedir.



Şekil 2. Asenkron motor eşdeğer devresi

Üç fazlı asenkron motora uygulanan fazlar-arası gerilim (U), motorun şebekeden çektiği hat akımı I ve güç katsayısı  $\cos\phi$  olmak üzere motor giriş gücü eşitlik 3 ile ifade edilir.

$$P = \sqrt{3} \cdot U \cdot I \cdot \cos\phi \quad (\text{Watt}) \quad \dots \quad (3)$$

Rotoru kilitli (dönmeyen) ve rotoru sargılı bir asenkron motor rotorunun bir oluğundaki bir iletkende döner manyetik alanın indüklediği elektro motor kuvveti (emk) değeri, bu döner manyetik alanın stator oluğundaki bir iletkende indüklediği emk’ya eşit olmaktadır. Rotoru kilitli ve sargılı bir asenkron motor rotorunun bir fazında indüklenen emk değeri denklem 4’te verilmektedir. Burada  $\Phi_k$  döner alanın bir kutbunun manyetik akısını (makswell),  $N_r$  rotordaki bir faza ait sarım sayısını,  $K_r$  rotor sarım katsayısını ifade etmektedir.

$$E_r = 4,44 \cdot \Phi_k \cdot f \cdot N_r \cdot K_r \cdot 10^{-8} \quad (\text{Volt}) \quad \dots \quad (4)$$

Rotor yıldız bağlı iken rotor bilezikleri arası hat gerilimi ( $U_{hat}$ ), faz geriliminin ( $U_f$ )  $\sqrt{3}$  katı alınarak bulunur. Kilitli rotor durumunda (rotor sargıları açık) asenkron motor trafoya benzer. Bu durumda duran rotorun sargılarında indüklenen emk’nın frekansı stator sargılarından geçen şebeke akımlarının frekansına eşittir. Denklem 5’te statorda indüklenen faz emk ifadesini rotorun faz emk ifadesine oranladığımızda eşitlik 6’da görülen a dönüştürme oranı elde edilir. Burada;  $K_r$  rotor sarım katsayısını,  $K_s$  stator sarım katsayısını,  $N_s$  statordaki bir fazın sarım sayısını,  $N_r$  ise rotordaki bir fazın sarım sayısını belirtir.

$$\frac{E_s}{E_r} = \frac{4,44 \cdot f \cdot \Phi_k \cdot N_s \cdot K_s \cdot 10^{-8}}{4,44 \cdot f \cdot \Phi_k \cdot N_r \cdot K_r \cdot 10^{-8}} = \frac{N_s \cdot K_s}{N_r \cdot K_r} \quad (5)$$

$$\frac{E_s}{E_r} = \frac{N_s \cdot K_s}{N_r \cdot K_r} = a \quad (6)$$

## 2.2. Asenkron Motorda İndüklenen Emk ve Frekans

Rotoru sargılı asenkron motor rotorunu döner alanın yönünde ve tersi yönde döndürdüğümüzde, döner alanın rotoru kesme hızı azalır, buna bağlı olarak rotorda indüklenen emk, rotor gerilimi ve rotor frekansında azalır. Rotor emk'nin ve rotor frekansının azalması, döner alanın kesme hızındaki azalma ile doğru orantılı olmaktadır. Rotor döner alanı yönünde senkron devirde (döner alanın hızında) döndürülürse, döner alanın rotor sargılarını kesme hızı sıfır değerinde olur. Bu durumda rotor sargılarında bir emk indüklenmemektedir. Rotor  $n_r$  devri ile döner alanın yönünde döndürüldüğünde rotorda indüklenen emk denklem 7 ve 8'den bulunabilir. Bu denklemlerde  $E_{kr}$  kilitli rotor (rotorun durması) durumunda indüklenen faz emk (volt) değerini,  $E_r$  ise döner rotorda indüklenen faz emk değerini ifade eder.

$$E_r = \frac{n_s - n_r}{n_r} E_{kr} \quad \dots\dots\dots (7)$$

$$E_r = s \cdot E_{kr} \quad \dots\dots\dots (8)$$

Rotor sargılarında indüklenen emk'ların ve geçen akımların frekans (Hz) değeri eşitlik 9'a göre hesaplanabilir.

$$f_r = \frac{n_s - n_r}{60} \cdot p \quad \dots\dots\dots (9)$$

Rotor frekansı ( $f_r$ ) ve şebeke frekansı denklem 10' a göre oranlandığında,

$$\frac{f_r}{f} = \frac{\frac{(n_s - n_r)}{60} p}{\frac{p \cdot n_s}{60}} = \frac{(n_s - n_r)}{60} p \frac{60}{p n_s} = \frac{n_s - n_r}{n_s} = s \quad \dots\dots\dots (10)$$

Kaymaya ( $s$ ) bağlı rotor frekansı ( $f_r$ ) denklem 11'de elde edilir.

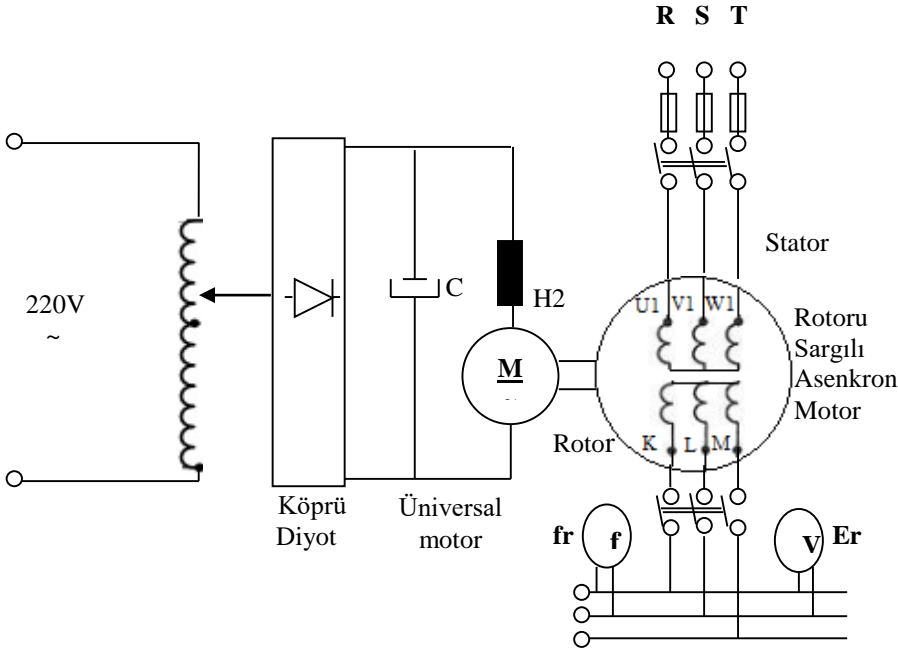
$$f_r = s \cdot f \quad \dots\dots\dots (11)$$

Rotor döner alanın tersi yönde döndürüldüğünde denklem 12 elde edilir. Burada kayma  $1 < s$  olmaktadır, dolayısıyla rotor gerilimi  $E_{kr}$  nin ve  $f_r$  rotor frekansı değeri şebeke frekansı  $f$ 'in üzerine çıkmaktadır.

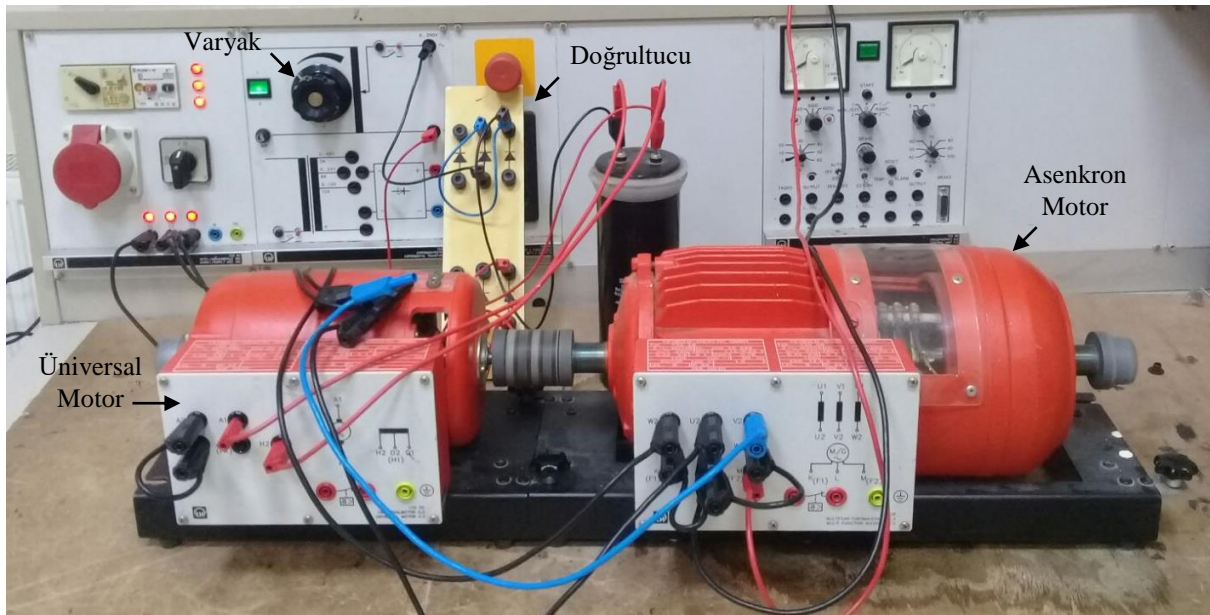
$$s = \frac{n_s - (-n_r)}{n_s} = \frac{n_s + n_r}{n_s} \quad \dots\dots\dots (12)$$

## 3. UYGULAMA DEVRESİ

Uygulama devresinde birer adet 1 fazlı 0,25 kW üniversal motor ve 3 fazlı 0,22 kW bilezikli ve 4 kutuplu asenkron motor kullanılmaktadır. Her iki rotor milleri birbirleriyle akuple durumdadır. Varyak (oto transformatörü) vasıtası ile üniversal motora uygulanan gerilim ayarlanarak devir sayısı değiştirilebilmektedir, üniversal motora uygulanan alternatif akım (AA) köprü diyot ile doğru akıma (DA) dönüştürülmekte ve kondasatör ile filtre edilmektedir. Asenkron motor stator sargıları yıldız ( $\Delta$ ) bağlanarak stator sargılarına şebeke gerilimi uygulanmıştır. Bilezikler vasıtası ile dışarı çıkarılan uçlara rotor gerilimi ve frekansını ölçmek için voltmetre ve frekans-metre bağlanmıştır, rotor devri dijital takometre ile ölçülmüştür. Deneysel düzeneğin kullanım amacı üniversal motor yardımıyla asenkron motoru döner alan yönünde ve döner alanın tersi yönde döndürerek kaymaya bağlı olarak asenkron motorun rotor gerilimi ve frekansının değişimini incelemek olup, uygulama devresinin blok yapısı ve resmi Şekil 3. ve Şekil 4.'de görülmektedir.



Şekil 3. Uygulama Devresi Blok Yapısı



Şekil 4. Uygulama Devresi

### 3.1. Bilezikli asenkron motor rotorunu döner alan yönünde döndürülmesi

Bu bölümde bilezikli asenkron miline bağlı üniversal motor asenkron motorun döner alanı yönünde döndürülerek rotor gerilimi ve frekansı ölçülmüştür. Asenkron motor döner alan devri ( $n_s$ ) 1500 d/dk değerindedir. Motor dururken  $s=(n_s-n_r)/n_s$  ifadesinden kayma değeri 1 olmaktadır,  $E_r=s.E_{kr}=1.E_{kr}=E_{kr}$  iken voltmetreden ölçülen  $E_{kr}$  değeri 103,5 Volt 'dur. Bu değere göre birkaç hesaplama yapıp, ölçüm değeri aldığımızda aşağıdaki durumlar meydana gelir.

#### Durum 1.

Asenkron motor rotoru döner alan yönünde 404 d/dk ile döndürüldüğünde kayma ( $s$ ),  $E_r$  ve  $f_r$  değerleri aşağıda hesaplanmıştır.

$$s = \frac{n_s - n_r}{n_s} = \frac{1500 - 404}{1500} = 0,73 \quad (13)$$

$$E_r = s \cdot E_{kr} = 0,73 \cdot 103,5 = 75,5 \text{ V} \quad (14)$$

$$f_r = s \cdot f = 0,73 \cdot 50 = 36,5 \text{ Hz} \quad (15)$$

Ölçülen  $E_r$  ve  $f_r$  değerleri ise 75,5 V ve 36,4 Hz'dir.

## Durum 2.

Asenkron motor rotoru döner alan yönünde 608 d/dk ile döndürüldüğünde kayma (s),  $E_r$  ve  $f_r$  değerleri aşağıda hesaplanmıştır.

$$s = \frac{n_s - n_r}{n_s} = \frac{1500 - 608}{1500} = 0,594 \quad (16)$$

$$E_r = s \cdot E_{kr} = 0,594 \cdot 103,5 = 61,479 \text{ V} \quad (17)$$

$$f_r = s \cdot f = 0,594 \cdot 50 = 29,7 \text{ Hz} \quad (18)$$

Ölçülen  $E_r$  ve  $f_r$  değerleri ise 61,3 V ve 29,7 Hz'dir.

Durum 1 ve durum 2'den anlaşıldığı üzere ölçülen ve hesaplanan sonuçların hemen hemen aynı değerlerde olduğu görülmektedir.

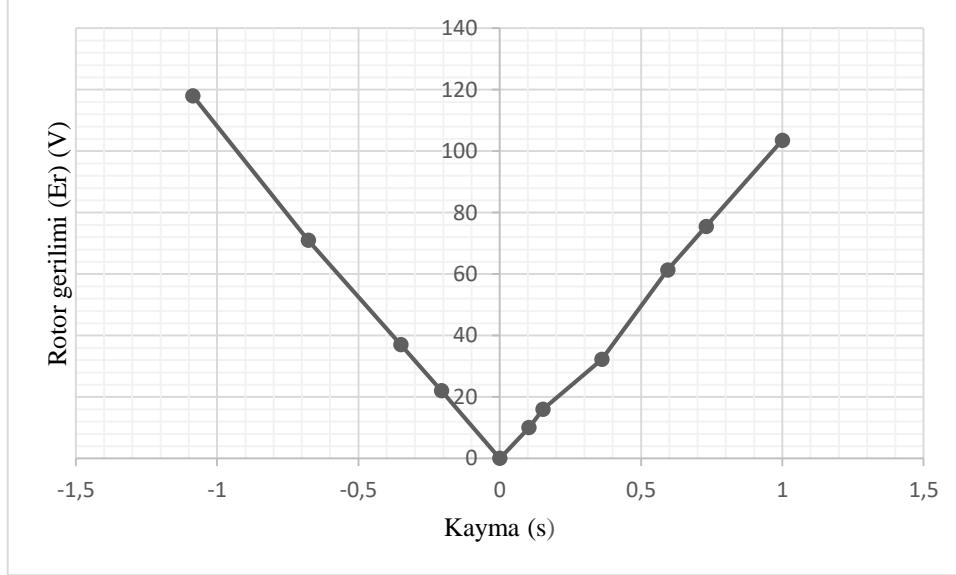
Asenkron motorun statoru şebekeye bağlanıp 1500 d/dk senkron devrinde, rotor devri universal motor yardımı ile 0'dan 3129 d/dk değerlerine kadar çıkarıldığında ölçülen rotor gerilim ( $E_r$ ) ve rotor frekans ( $f_r$ ) değerleri Tablo 1'de görülmektedir. (s kayma değerleri hesaplanarak bulunmuştur.)

**Tablo 1.** Döner alan yönü  $E_r$ ,  $f_r$  değerleri

Senkron devir	Rotor devir	Rotor gerilim	Frekans	Kayma
$n_s$ (d/dk)	$n_r$ (d/dk)	$E_r$ (V)	$f_r$ (Hz)	s
1500	0	103.5	50	1
1500	404	75.5	36.4	0.73
1500	608	61.3	29.6	0.594
1500	958	32.2	17.9	0.361
1500	1270	16	7.2	0.153
1500	1345	10	4.75	0.103
1500	1500	0	0	0
1500	1809	22	10,6	-0,206
1500	2026	37	17,5	-0,35
1500	2518	71	34,5	-0,678
1500	3129	118	56	-1.086

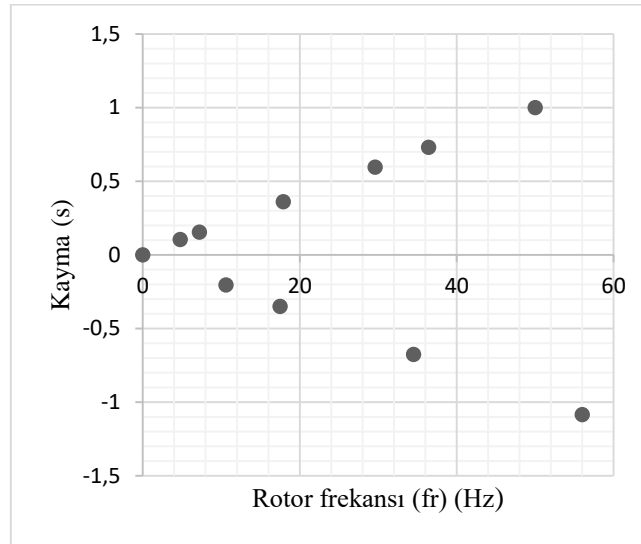
Tablo 1'e göre kaymaya bağlı rotor gerilimi hakkında yorum yapıldığında Şekil 5.'te de görüldüğü üzere rotor, stator döner alan yönünde döndürüldüğünde rotor devri arttıkça kayma azalmakta ve rotor devresinde indüklenen rotor gerilimi, rotor devri ( $n_r$ ) senkron devre ( $n_s$ ) ulaşana kadar azalmaktadır.

Rotor devri, senkron devri geçtiğinde ise kayma ters yönde artmakta ve rotor gerilimi artmaktadır değişimlerin doğrusal olduğu görülmektedir.



Şekil 5. Kaymaya bağlı rotor gerilimi ( $E_r$ ) değişimi

Şekil 6. incelendiğinde rotor frekansı ( $f_r$ ), kayma arttıkça artmaktadır. Tablo 1'e göre rotor devri senkron hıza ulaşana kadar  $f_r$  azalmakta, rotor devri senkron hızı geçtiğinde ise  $f_r$  artmaktadır. Değişimin doğrusal olduğu görülmektedir.



Şekil 6. Kaymaya bağlı, rotor frekansı ( $f_r$ ) değişimi

### 3.2. Bilezikli asenkron motor rotorunun döner alan tersi yönde döndürülmesi

Bu bölümde bilezikli asenkron miline bağlı universal motor asenkron motorun döner alanı tersi yönünde döndürülerek rotor gerilimi ve frekansı ölçülmüştür. Asenkron motor döner alan devri ( $n_s$ ) 1500 d/dk değerindedir. Motor dururken  $s=(n_s-n_r)/n_s$  ifadesinden kayma değeri 1 olmaktadır,  $E_r=s.E_{kr}=1.E_{kr}=E_{kr}$  iken voltmetreden ölçülen  $E_{kr}$  değeri 103.5 Volt 'dur. Bu değere göre birkaç s,  $E_r$  ve  $f_r$  hesaplaması yapıp, ölçüm değeri aldığımızda aşağıdaki durumlar meydana gelir.

**Durum 3.**

Asenkron motor rotoru döner alan tersi yönünde 283 d/dk ile döndürüldüğünde kayma (s),  $E_r$  ve  $f_r$  değerleri aşağıda hesaplanmıştır.

$$s = \frac{n_s - n_r}{n_s} = \frac{1500 - (-283)}{1500} = 1,188 \quad (19)$$

$$E_r = s \cdot E_{kr} = 1,188 \cdot 103,5 = 122,958 \text{ V} \quad (20)$$

$$f_r = s \cdot f = 1,188 \cdot 50 = 59,4 \text{ Hz} \quad (21)$$

Ölçülen  $E_r$  ve  $f_r$  değerleri ise 123,6 V ve 59,74 Hz'dir.

**Durum 4.**

Asenkron motor rotoru döner alan tersi yönünde 683 d/dk ile döndürüldüğünde kayma (s),  $E_r$  ve  $f_r$  değerleri aşağıda hesaplanmıştır.

$$s = \frac{n_s - n_r}{n_s} = \frac{1500 - (-683)}{1500} = 1,455 \quad (22)$$

$$E_r = s \cdot E_{kr} = 1,455 \cdot 103,5 = 150,592 \text{ V} \quad (23)$$

$$f_r = s \cdot f = 1,455 \cdot 50 = 72,75 \text{ Hz} \quad (24)$$

Ölçülen  $E_r$  ve  $f_r$  değerleri ise 152,6 V ve 73,4 Hz'dir.

Durum 3 ve durum 4'den anlaşıldığı üzere ölçülen ve hesaplanan sonuçların birbirlerine çok yakın değerler olduğu görülmektedir.

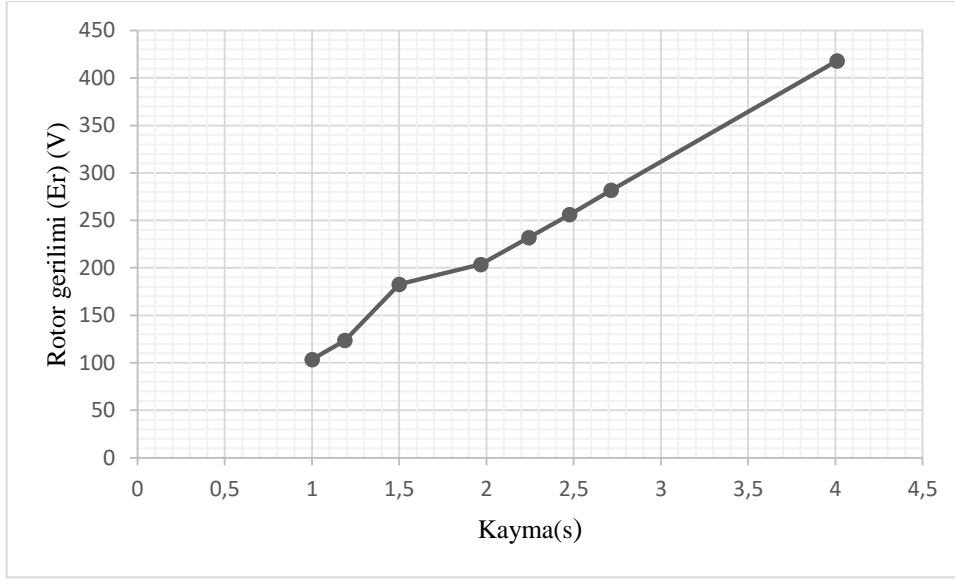
Asenkron motorun statoru şebekeye bağlanıp 1500 d/dk senkron devirde iken rotor devri universal motor yardımı ile 0'dan 4516 d/dk değerlerine kadar döner alan tersi yönde çıkarıldığında ölçülen rotor gerilim ( $E_r$ ) ve rotor frekans ( $f_r$ ) değerleri Tablo 2'de görülmektedir.

**Tablo 2.** Döner alan tersi yönü  $E_r$ ,  $f_r$  değerleri

Senkron devir	Rotor devir	Rotor gerilim	Frekans	Kayma
$n_s$ (d/dk)	$n_r$ (d/dk)	$E_r$ (Volt)	$f_r$ (Hz)	s
1500	0	103,5	50	1
1500	283	123,6	59,74	1,188
1500	683	152,6	73,4	1,455
1500	1153	182,7	88,5	1,5
1500	1451	203,584	98,45	1,967
1500	1865	232	112,3	2,243
1500	2214	256	123,8	2,476
1500	2570	281,7	135,8	2,713
1500	4516	418	200	4,01

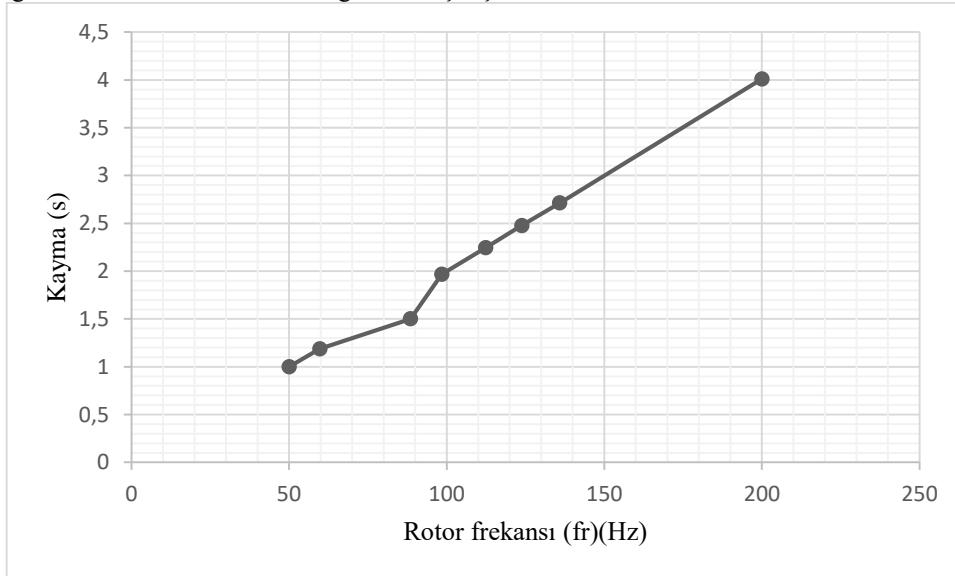


Tablo 2’de kaymaya bağlı olarak rotorda indüklenen gerilim hakkında yorum yapıldığında Şekil 7.’de görüldüğü üzere, rotor stator döner alan tersi yönünde döndürüldüğünde, rotor devri arttıkça kayma ve rotor devresinde indüklenen rotor gerilimi artmaktadır.



Şekil 7. Kaymaya bağlı rotor gerilimi ( $E_r$ ) değişimi (Döner alan tersi yönde)

Şekil 8 incelendiğinde stator sabit 1500 d/dk senkron devirde iken kayma arttıkça rotor frekansı ( $f_r$ ) artmaktadır. Rotor devri 4516 d/dk’ya ulaştığında rotor frekansı 200 Hz değerine ulaşmıştır.



Şekil 8. Kaymaya bağlı, rotor frekansı ( $f_r$ ) değişimi

#### 4. SONUÇLAR VE TARTIŞMA

Yapılan çalışmada senkron devri 1500 d/dk olan bilezikli asenkron motorun rotoru döner alan yönünde ve döner alan tersi yönde döndürülerek rotor devir sayısı, rotor gerilimi, rotor frekans değerleri ölçülerek ve hesaplamalar yapılarak kaymaya bağlı olarak rotor gerilimi ve rotor frekansı değişimleri incelenmiştir, yapılan hesaplamaların ve alınan ölçüm değerlerinin birbirleriyle örtüştüğü görülmüştür. Rotor döner alan yönünde döndürüldüğünde rotor devri arttıkça kayma azalmakta ve rotor gerilimi, rotor devir sayısı senkron devir sayısına ulaşana kadar azalmaktadır. Rotor devir sayısı senkron hıza ulaştığında rotor gerilim değeri ve rotor frekansı sıfır olmaktadır. Rotor devir sayısı, senkron devir sayısını geçtiğinde rotor gerilim değeri artmaktadır, rotor frekansı ise kayma bağlı olarak artış veya azalış göstermektedir.

Rotor döner alan tersi yönde döndürüldüğünde ise rotor devir sayısının artması kayma ve indüklenen rotor gerilim değerlerini arttırmaktadır. Bu durumda kaymanın yükselmesi rotor frekans değerini arttırmaktadır.



## 5. KAYNAKLAR

Bektaş A., Bayındır R., Çolak İ. (2007). Asenkron motorların korunmasına yönelik plc tabanlı bir uygulama, *Journal of Polytechnic*, 10, 117-121.

Boqiang, X., Liling, S., Lie, X., Guoyi X. (2013). Improvement of the hilbert method via ESPRIT for detecting rotor fault in induction, *IEEE Transactions on Energy Conversion*, 28, 225-233.

Mori, D., Ishikawa, T. (2005). Force and vibration analysis of induction motors, *IEEE Transactions on Magnetics*, 41, 1948-1951.

Oteafy, A., Chiasson, J. (2010). A study of the lyapunov stability of an open-loop induction machine, *IEEE Transactions on Control Systems Technology*, 18, 1469-1476.

Sousa, K.M., Costa, I.B.V., Maciel E.S., Rocha, J.E., Martelli C., Silva J.C.C. (2017). Broken Bar Fault Detection in Induction Motor by Using Optical Fiber Strain Sensors, *IEEE Sensors Journal*, 17(12), 3669-3676.