

Asenkron Motorların Eşdeğer Devre Parametrelerinin Yük Deneyinden Hesaplanması

Dr. Mehmet AKBABA *)

1 — GİRİŞ

Asenkron motorların çalışma büyüklüklerinin (akım, moment, güç, v.s.) eşdeğer devre üzerinden yeteri kadar doğrulukla hesaplanabilmesi, eşdeğer devre parametrelerinin ölçümündeki doğruluk derecesine bağlıdır. Literatürde parametrelerin ölçülmesi için tek yöntem mevcuttur. Klasik yöntem adını verebileceğimiz bu yönteme göre, parametreler nominal gerilimde yapılan boşta çalışma deneyi ile nominal akımda yapılan kısa devre deneyinden hesaplanmaktadır. Bu yöntem eşdeğer devre parametreleri için sabit bir değer seti vermektedir. Ancak, özellikle rotorunda kapalı veya kapalıya yakın yarı açık oluklar bulunan asenkron motorlarda (pratikte motorların çoğu bu yapıya sahiptirler) magnetik devrenin doymasından dolayı kaçak reaktans [1, 2, 3, 4] ve yük kayıpları ile rotor baraları arasındaki direncin akıma bağlı olarak değişmesinden [5, 6] dolayında rotor devresi eşdeğer direnci, çalışma noktasına bağlı olarak değişecektir. Sonuç olarak kaymanın değeri değiştikçe bu parametrelerin değeride değişecektir. Öte yandan asenkron motorların çalışma büyüklükleri üzerinde en çok etkin olan parametreler kaçak (dağılma) reaktans ve rotor direncidir. O halde bu parametrelerin her çalışma noktası için mümkün olduğu kadar doğru olarak hesaplanması gerekir. Bu çalışmada yük deneyinden yararlanarak makina performansı için temel olan iki parametrenin, kaçak reaktans ve rotor direncinin, kaymaya bağlı olarak, ölçülebilmesi ve ifade edilebilmesi için bir yöntem önerilecektir. Ayrıca her iki yönteme göre hesaplanan eşdeğer, devre parametreleri kullanılarak hesaplanan akım, moment ve güç faktörü ölçülen değerler ile karşılaştırılarak bu çalışmada önerilen yöntemin geçerliliği tartışılacaktır.

*) K.T.Ü. Makina - Elektrik Fakültesi, Trabzon.

2 — KULLANILAN NOTASYON :

Semboller :

- R_1 : Stator sargı direnci
 R_2 : Rotor sargı direnci (statora indirgenmiş değer)
 X_1 : Stator sargısı kaçak reaktansı
 X_2 : Rotor sargısı kaçak reaktansı (Statora indirgenmiş değer)
 R_m : Demir kayıpları eşdeğer direnci
 X_m : Mıknatıslanma reaktansı
 P : Güç
 V : Statora uygulanan gerilim (faz - nötr)
 I_1 : Stator sargı akımı
 I_2 : Rotor sargı akımı (statora indirgenmiş değer)
 I_m : Mıknatıslanma akımı
 E_1 : Stator sargısında endüklenen gerilim
 ψ : V ile I_1 arasındaki faz açısı
 S : Kayma
 R_{in} : Motorun faz başına giriş empedansının omik bileşeni
 X_{in} : Motorun faz başına giriş empedansının endüktif bileşeni
 T : Moment
 GF : Güç faktörü

İndisler :

- k : Kısa devre (rotor bloke edilmiş) hali
 o : Boşta çalışma hali

3 — PARAMETRELERİN YÜK DENEYİNDEN HESAPLANMASI İÇİN GEREKLİ BAĞINTILARIN ELDE EDİLMESİ

Stator sargı direnci bilinen direnç ölçme yöntemlerinden biri ile ölçüldükten sonra, nominal akımın en az 4 katı kadar bir akımda kısa devre deneyi yapılır. Kısa devre deneyinin bu kadar yüksek akımda yapılması gerektiğinin sebebi, makinanın nominal gerilimde çalışma şartlarını düşünmemiz gerekmektedir ve bu durumda kısa devre akımı nominal akımın en az 4 katına ulaşmaktadır.

Akım bu değerlere ulaşıncaya kaçak akımın geçtiği magnetik devre doymuş olduğundan kaçak reaktans en küçük değerine ulaşmış olacaktır. Böylece kaçak reaktansın nominal gerilimde $S=1$ için doğru değeri bulunmuş olacaktır. Ancak yüksek kısa devre akımının sargıları yak-

maması için ölçmeler özel tekniklere göre yapılmalıdır. Bu çalışmada kısa devre deneyi ile ilgili ölçmeler için magnetik galvanometreli ışıklı yazıcı (ultra violet light recorder) kullanıldı. Gerilim nominal değerine ayarlandıktan sonra çok kısa süreli olarak (takriben 2 saniye kadar) rotoru bloke edilmiş motora uygulandı ve motor gerilimden ayrıldı. Akım ve gerilimin ani değerleri yazıcıda eşzamanlı olarak kaydedildi ve bu kayıtların sürekli hale ilişkin kısmından kısa devre akım ve gerilimin etkin değerleri (I_{1k} , V_k), akım ile gerilim arasındaki faz farkı (Ψ_k) ölçüldü. Bu değerlerden P_k kısa devre gücü

$$P_k = 3V_k I_{1k} \cos \Psi_k \quad (1)$$

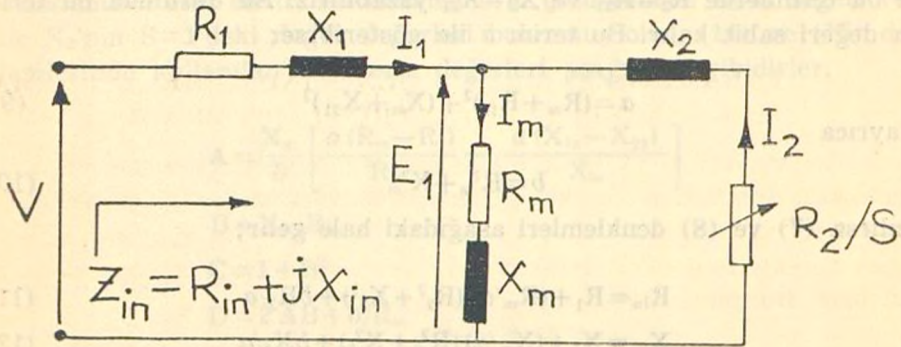
ifadesine göre hesaplandı. V_k , I_{1k} ve P_k (herhangi bir yöntemle) ölçüldükten sonra, şekil 1'deki eşdeğer devreden, mıknatıslanma akımını ihmal ederek (mıknatıslanma reaktansının bulunduğu kol açık devre) ve rotor direncinin bu durumdaki değerini $R_2 = R_{21}$ ile göstererek :

$$R_{21} = P_k / (3I_{1k}^2) - R_1 \quad (2)$$

bağıntısı uyarınca R_{21} ve rotor kaçak reaktansının bu durumdaki değerinde $X_2 = X_{21}$ ile göstererek;

$$X_T = X_1 + X_{21} = \sqrt{(V_k / I_{1k})^2 - (R_1 + R_{21})^2} \quad (3)$$

Bağıntısı uyarınca $X_T = X_1 + X_{21}$ bulunur.



Şekil. 1 — 3 fazlı asenkron motorun faz başına eşdeğer devresi.

Stator ve rotor kaçak reaktanslarının yaklaşık olarak eşit kabul edilerek,

$$X_1 = X_{21} = X_T/2 \quad (4)$$

den X_1 ve X_{21} bulunur.

Nominal gerilimde boшта çalışma deneyi yapılarak P_o , I_{10} , V_o ölçülür ve boшта çalışmada $S=0$ ve $I_2=0$ olduğu göz önüne alınarak, şekil 1 deki eşdeğer devreden

$$R_m = P_o / (3 I_{10}^2) - R_1 \quad (5)$$

$$X_m = \sqrt{(V_o / I_{10}^2)^2 - (R_1 + R_m)^2} - X_1 \quad (6)$$

bağıntılarından R_m ve X_m hesaplanır.

R_2 , X_1 ve X_2 nin (2) ve (4) bağıntıları uyarınca hesaplanan değerleri yaklaşık değerlerdir. Daha doğru değerleri hesaplamak için şekil 1 e dönmek gerekecektir. $S=1$ (kısa devre hali) için şekil 1 den motorun giriş empedansının omik ve endüktif bileşenleri aşağıdaki gibi yazılır :

$$R_{in} = R_1 + \frac{R_m(R_2^2 + X_2^2) + R_2(R_m^2 + X_m^2)}{(R_m + R_2)^2 + (X_m + X_2)^2} \quad (7)$$

$$X_{in} = X_1 + \frac{X_m(R_2^2 + X_2^2) + X_2(R_m^2 + X_m^2)}{(R_m + R_2)^2 + (X_m + X_2)^2} \quad (8)$$

X_m 'nin değeri R_2 ve X_2 'nin değerlerine göre çok büyük olduğundan, R_2 ve X_2 deki değişme miktarları (7) ve (8) denklemlerinin ikinci terimlerinin paydalarında kayda değer bir değişme meydana getirmeyeceğinden bu terimlerde $R_2=R_{21}$ ve $X_2=X_{21}$ yazabiliriz. Bu durumda bu terimin değeri sabit kalır. Bu terim a ile gösterilirse;

$$a = (R_m + R_{21})^2 + (X_m + X_{21})^2 \quad (9)$$

ve ayrıca

$$b = R_m^2 + X_m^2 \quad (10)$$

yazılırsa (7) ve (8) denklemleri aşağıdaki hale gelir;

$$R_{in} = R_1 + (R_m/a)(R_2^2 + X_2^2) + bR_2/a \quad (11)$$

$$X_{in} = X_1 + (X_m/a)(R_2^2 + X_2^2) + bX_2/a \quad (12)$$

Yukarıdaki iki denklemden üç bilinmeyeni (X_1 , X_2 ve R_2) çözemeyeceğimizden, burada $X_1=X_2$ olduğunu kabul ederek üç bilinmeyeni iki bilinmeyene indirerek X_2 ve R_2 (11) ve (12) denklemlerinden bulunacaktır. Bu değerler R_2 ve $X=X_1+X_2$ toplam kaçak reaktansın $S=1$

değerindeki doğru değerleri olacaktır. Buradan $X_1=X_2$ değeri bulunduktan sonra X_1 bu değerinde sabit tutulacak ve toplam kaçak reaktanstaki değişme X_2 deki değişmeye eşit alınacaktır. Burada yapılan kabul, aşağıdaki sebeplerden dolayı makinanın performansına etki etmeyecek ve önerilen yöntemle bir eksiklik getirmeyecektir :

a) Kesin olarak ispatlamak mümkündür ki toplam kaçak reaktansın stator ile rotor arasında bölünme oranının, yani $X=X_1+X_2$ sabit kaldığı sürece, X_1/X_2 oranının veya X_2/X_1 oranının makinanın gerek geçici hal büyüklükleri ve gerekse sürekli hal büyüklükleri üzerine etkisi ihmal edilecek kadar küçüktür [4]. Önemli olan $X_T=X_1+X_2$ toplam kaçak reaktansın doğru olarak elde edilmesidir.

b) Kaçak akı yolu üzerinde en çok doymaya giden magnetik devre parçası rotor diş başları olduğundan toplam kaçak reaktanstaki değişme rotor kaçak reaktansındaki doymadan ileri gelmektedir. [4]

Yukarıdaki kabulden sonra (11) ve (12) denklemlerinin ortak çözümünden;

$$R_2^2 + X_2^2 = (R_{in} - R_1 - (b/a)R_2) (a/R_m) \quad (13)$$

elde edilir. Sonra (12), (13) ve (11) denklemlerinin ortak çözümünden;

$$X_2 = A + BR_2 \quad (14)$$

$$CR_2^2 + DR_2 + E = 0 \quad (15)$$

denklemleri elde edilir. Bu denklemlerin çözümünden X_1 'in değeri ve R_2 ile X_2 'nin $S=1$ deki doğru değerleri bulunmuş olur. (14) ve (15) denklemlerinde kullanılan sabitlerin değerleri aşağıdaki gibidirler.

$$A = \frac{X_m}{b} \left[\frac{a(R_m - R_1)}{R_m} - \frac{a(X_{in} - X_{21})}{X_{in}} \right] \quad (16)$$

$$B = X_m/R_m \quad (17)$$

$$C = 1 + B^2 \quad (18)$$

$$D = 2AB + b/R_m \quad (19)$$

$$E = A^2 - a(R_{in} - R_1)/R_m \quad (20)$$

$$R_{in} = (V_k / I_{1k}) \cos \Psi_k \quad (21)$$

$$X_{in} = (V_k / I_{1k}) \sin \Psi_k \quad (22)$$

Parametrelerin $S=1$ için değerleri bulunduktan sonra değişik yük

durumları için yük deneyleri yapılarak her yük değeri için akım (I_1), gerilim (V), güç (P) ve hız (n) ölçülür ve kayma (S) hesaplanır. Herhangi bir S değeri için;

$$\Psi = \arccos (P / (3V I_1)) \quad (23)$$

$$R_{in} = (V/I_1) \cos \Psi \quad (24)$$

$$X_{in} = (V/I_1) \sin \Psi \quad (25)$$

hesaplanır. Yük deneylerinde kaymanın değeri 1 den farklı olacağından (11) ve (12) denklemlerinde R_{21} ve R_2 yerine R_2/S yazılması gerekir. Bu durumda bu denklemler aşağıdaki şekle dönüşür;

$$R_{in} - R_1 = ((R_m ((R_2/S)^2 + X_2^2) + b R_2 S) / a) \quad (26)$$

$$X_{in} - X_1 = (X_m ((R_2/S)^2 + X_2^2) + b X_2) / a \quad (27)$$

(27) ve (25) denklemleri taraf tarafa bölünür ve

$$F = (X_{in} - X_1) / (R_{in} - R_1) \quad (28)$$

yazılır ve düzenlemeler yapılırsa,

$$(R_2/S)^2 + X_2^2 = (b (FR_2 - SX_2)) / (S (X_m - FR_m)) \quad (29)$$

elde edilir. (26) ve (29) denklemlerinin ortak çözümünden;

$$X_2 = GR_2 - aH \quad (30)$$

bulunur. Burada;

$$a = (R_m + (R_2/S)^2 + X_m + X_{21})^2 \quad (31)$$

dır.

Şekil 2'de verilen ve şekil 1'deki eşdeğer devreyi ifade eden fazör diyagramını göz önüne alırsak, diyagram üzerindeki ABC üçgeninden

$$\theta = \alpha - \Psi$$

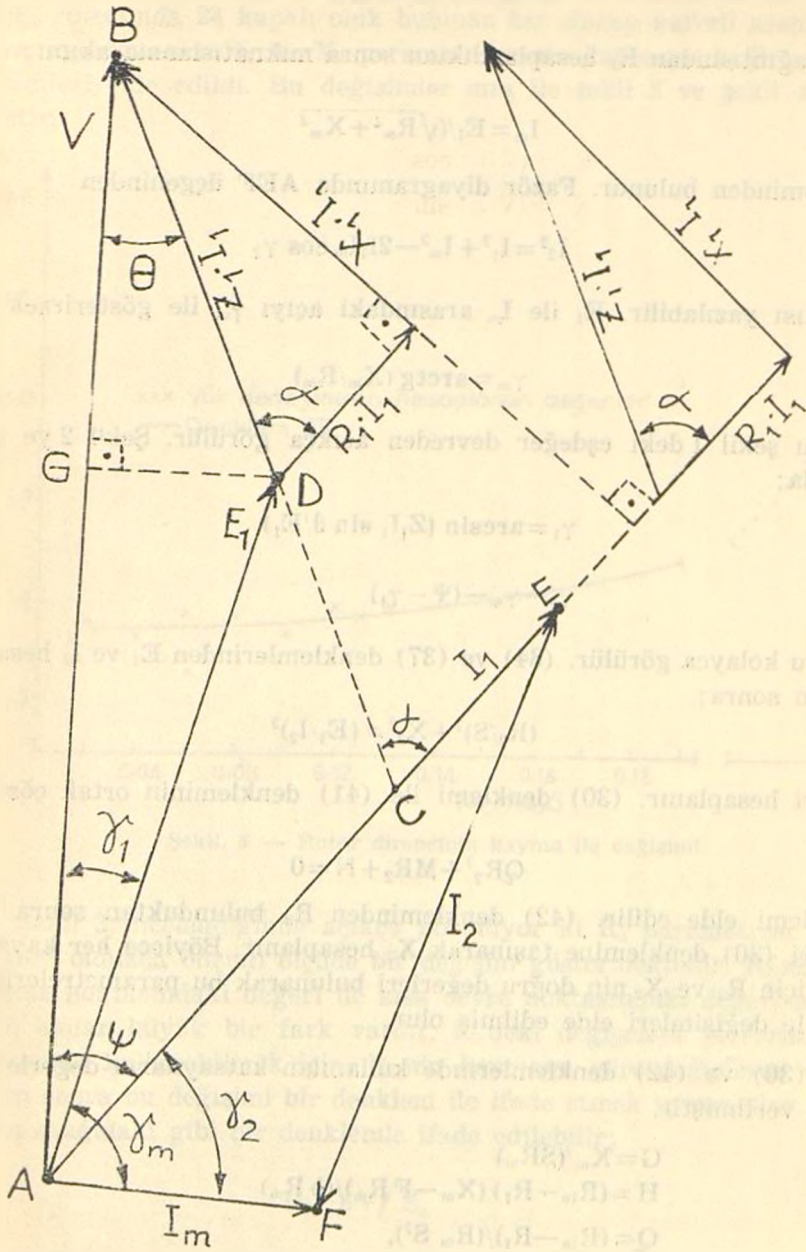
yazabiliriz. Burada

$$\alpha = \arctg (X_1/R_1)$$

Şekil 2 deki fazör diyagramında ABD üçgeninde θ açısı için kosinüs teoreminden;

$$E_1^2 = V^2 + (Z_1 I_1)^2 - 2Z_1 I_1 V \cos \theta \quad (34)$$

yazılabilir. Burada



Şekil. 2 — Asenkron motorun fazör diyagramı.

$$Z_1 = \sqrt{R_1^2 + X_1^2} \quad (35)$$

(34) bağıntısından E_1 hesaplandıktan sonra mıknatıslanma akımı;

$$I_m = E_1 / (\sqrt{R_m^2 + X_m^2}) \quad (36)$$

denkleminde bulunur. Fazör diyagramında AEF üçgeninden

$$I_2^2 = I_1^2 + I_m^2 - 2I_1I_m \cos \gamma_2 \quad (37)$$

bağıntısı yazılabilir. E_1 ile I_m arasındaki açıyı γ_m ile gösterirsek;

$$\gamma_m = \arctg (X_m/R_m) \quad (38)$$

olduğu şekil 1'deki eşdeğer devreden açıkça görülür. Şekil 2'ye bakıldığında;

$$\gamma_1 = \arcsin (Z_1 I_1 \sin \theta / E_1) \quad (39)$$

ve

$$\gamma_2 = \gamma_m - (\Psi - \gamma_1) \quad (40)$$

olduğu kolayca görülür. (34) ve (37) denklemlerinden E_1 ve I_2 hesaplandıktan sonra;

$$(R_2/S)^2 + X_2^2 = (E_1/I_2)^2 \quad (41)$$

değeri hesaplanır. (30) denklemi ile (41) denkleminin ortak çözümünden;

$$QR_2^2 + MR_2 + N = 0 \quad (42)$$

denklemi elde edilir. (42) denkleminde R_2 bulunduğundan sonra R_2 'nin değeri (30) denkleminde taşınarak X_2 hesaplanır. Böylece her kayma değeri için R_2 ve X_2 'nin doğru değerleri bulunarak bu parametrelerin kayma ile değişimleri elde edilmiş olur.

(30) ve (42) denklemlerinde kullanılan katsayıların değerleri aşağıda verilmiştir.

$$G = X_m / (SR_m) \quad (43)$$

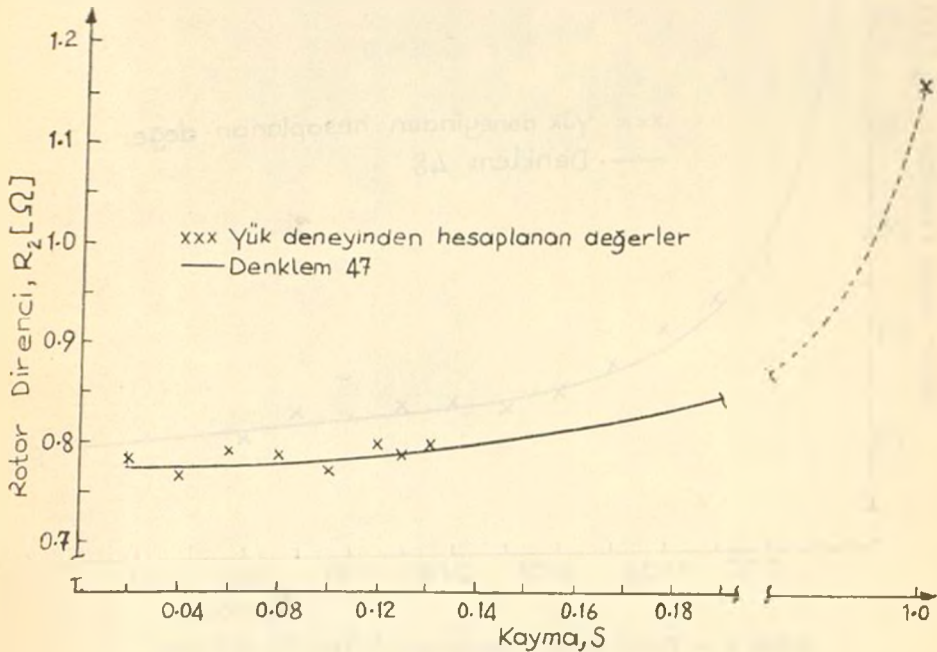
$$H = (R_{in} - R_1) (X_m - F R_m) / (b R_m) \quad (44)$$

$$Q = (R_{in} - R_1) / (R_m S^2),$$

$$M = (2(R_{in} - R_1) - (b/R_m)) / S \quad (45)$$

$$N = \frac{(R_{in} - R_1)}{R_m} (R_m^2 + (X_m + X_{21})^2) - (E_1/I_2)^2 \quad (46)$$

Burada verilen yöntem 5 kw, 4 kutuplu, startorunda 36 yarı açık oluk, rotorunda 24 kapalı oluk bulunan bir sincap kafesli asenkron motora uygulanarak R_2 ile X_2 parametrelerinin kaymaya bağlı olarak değişimleri elde edildi. Bu değişimler sıra ile şekil 3 ve şekil 4 te verilmiştir.



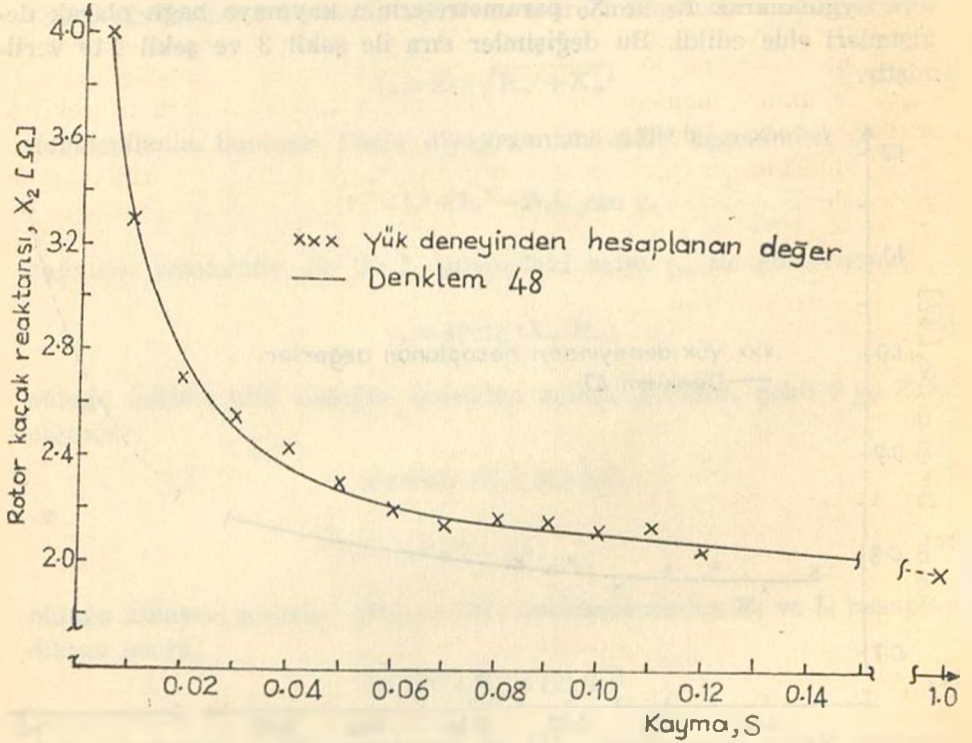
Şekil. 3 — Rotor direncinin kayma ile değişimi.

Şekil 3 incelendiğinde açıkça görülüyor ki R_2 parametresi kaymaya göre oldukça önemli ölçüde bir değişim göstermektedir. R_2 nin boşa çalışma noktasındaki değeri ile kısa devre noktasındaki değeri arasında % 36 kadar büyük bir fark vardır. R_2 deki değişmeyi performans hesaplarında kullanabilmek için, R_2 nin kaymaya göre değişimini elde ettikten sonra bu değişimi bir denklem ile ifade etmek uygun olur. Bu değişim aşağıdaki gibi bir denklemle ifade edilebilir;

$$R_2 = e + f \cdot S^h$$

Burada e , f ve h birer sabit katsayıdırlar ve bu katsayılar deneme yoluyla kolayca bulunur. Bu çalışmada ele alınan makina için bu kat-

sayılar $e=0.78$, $f=0.46$ ve $h=1.65$ olarak bulundu. Bu denklemin ölçülen değerlere oldukça iyi uyduğu şekil 3 te açıkça görülmektedir.



Şekil. 4 — Rotor kaçak reaktansının kayma ile değişimi.

Şekil 4 ten X_2 parametresinin kayma ile oldukça önemli ölçüde değişme gösterdiği görülmektedir. Bu parametrenin boşa çalışma noktasına yakın noktadaki değerleri ile kısa devre noktasındaki değeri arasında % 100 kadar oldukça büyük fark vardır. X_2 deki değişmeyi de yine, R_2 de olduğu gibi, performans hesaplarında kullanabilmek için, kaymaya bağlı olarak bir denklem ile ifade etmek uygun olur. Bu değişim,

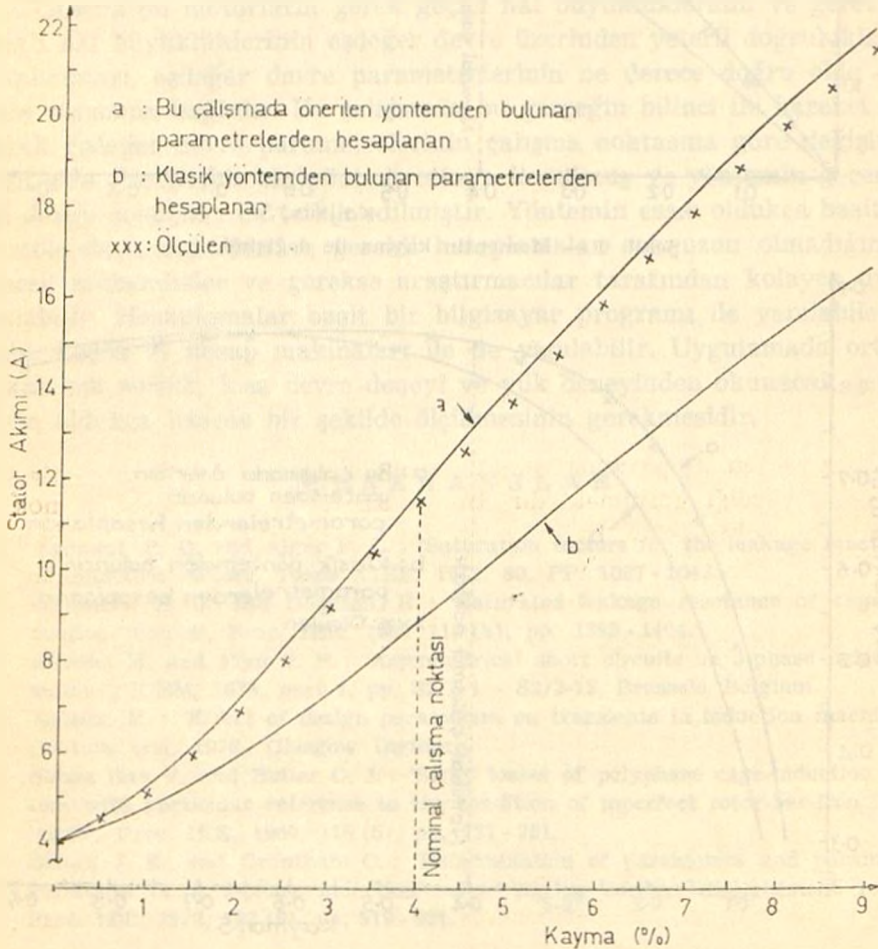
$$X_2 = p + (q / (r \cdot S + t))$$

şeklinde bir denklem ile ifade edilebilir. Ele alınan makina için p , q , r ve t katsayıları deneme yolu ile $p=1,92$, $q=0,062$, $r=3,1$ ve $t=0.015$ olarak bulundu. (48) denkleminin ölçülen değerler ile oldukça iyi bir uygunluk gösterdiği şekil 4 ten görülmektedir.

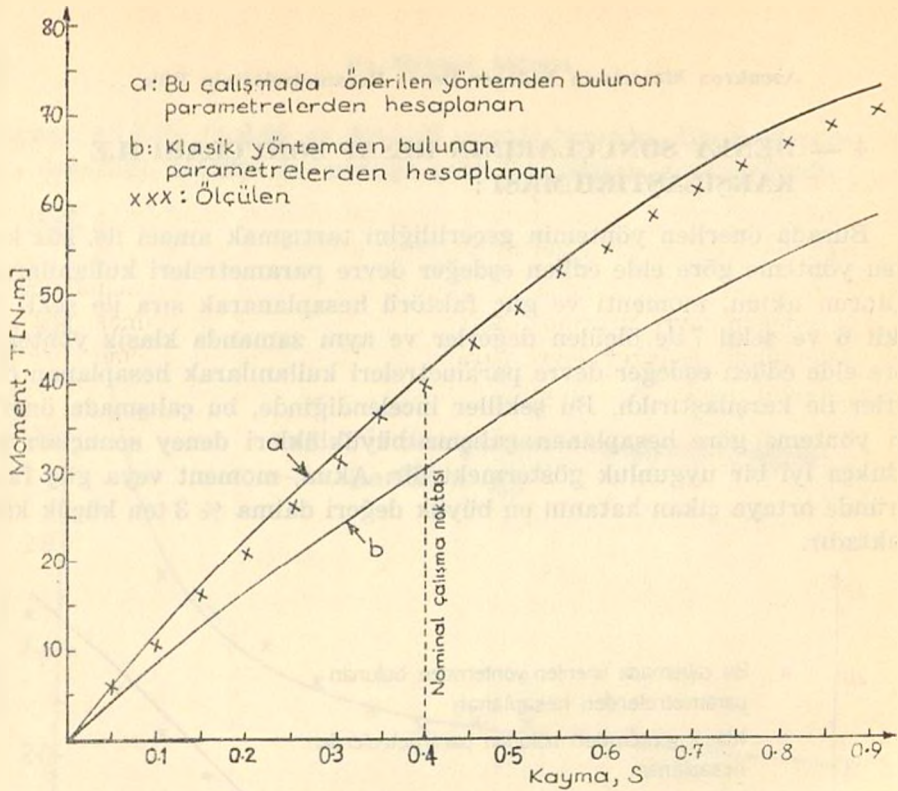
Şekil 3 ve Şekil 4, R_2 ve X_2 parametrelerinin kaymaya göre sabit kabul edilmesi halinde, performans hesaplarında önemli ölçüde hata yapılacağını açıkça ortaya koymaktadır.

4 — DENEY SONUÇLARININ HESAP SONUÇLARI İLE KARŞILAŞTIRILMASI :

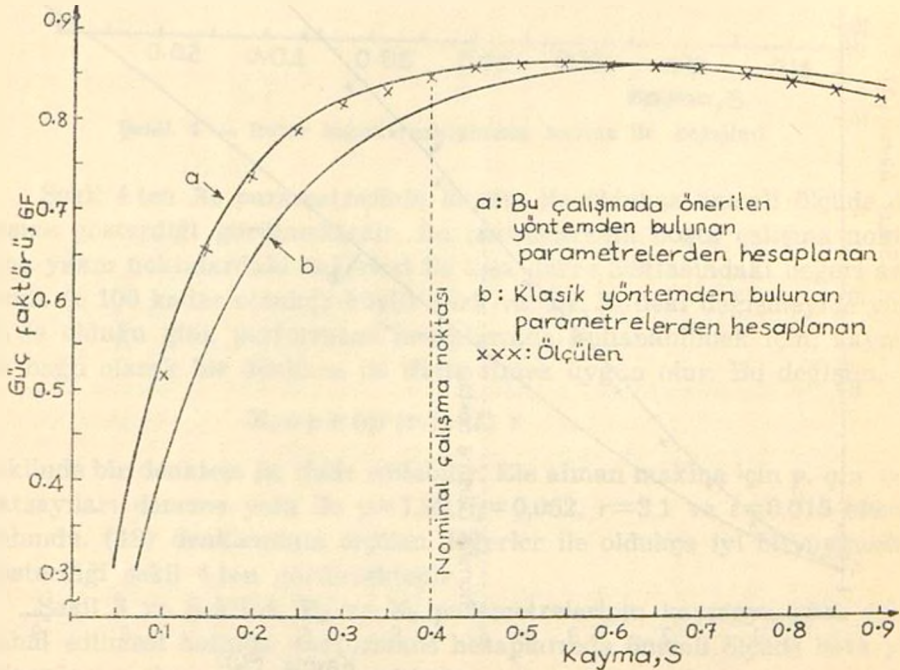
Burada önerilen yöntemin geçerliliğini tartışmak amacı ile, söz konusu yöntemle elde edilen eşdeğer devre parametreleri kullanılarak motorun akımı, momenti ve güç faktörü hesaplanarak sıra ile şekil 5, şekil 6 ve şekil 7 de ölçülen değerler ve aynı zamanda klasik yöntemle elde edilen eşdeğer devre parametreleri kullanılarak hesaplanan değerler ile karşılaştırıldı. Bu şekiller incelendiğinde, bu çalışmada önerilen yöntemle hesaplanan çalışma büyüklükleri deney sonuçları ile oldukça iyi bir uygunluk göstermektedir. Akım, moment veya güç faktöründe ortaya çıkan hatanın en büyük değeri daima % 3 ten küçük kalmaktadır.



Şekil. 5 — Akımın kayma ile değişimi.



Şekil. 3 — Momentin kayma ile değişimi.



Şekil. 7 — Güç faktörünün kayma ile değişimi.

Klasik yöntemle göre elde edilen parametreler kullanılarak yapılan hesaplamalardan elde edilen sonuçlar deney sonuçları ile büyük farklılıklar göstermektedir. Akım veya momentte ortaya çıkan hata nominal çalışma civarında % 22 değerine varmaktadır.

Yukarıda verilen sonuçlar, asenkron motorların performans hesaplarının eşdeğer devre üzerinden hassas bir şekilde hesaplanması söz konusu olduğunda, eşdeğer devre parametrelerinin klasik yöntemle göre hesaplanmasının yetersiz olduğunu açıkça ortaya koymaktadır. Bu çalışmada önerilen yöntem bu güçlüğü önemli ölçüde ortadan kaldırmaktadır.

5 — SONUÇ :

Asenkron motorların gerek geçici hal büyüklüklerinin ve gerek sürekli hal büyüklüklerinin eşdeğer devre üzerinden yeterli doğrulukla hesaplanması, eşdeğer devre parametrelerinin ne derece doğru elde edilmiş olmasına bağlıdır. Bu çalışmada bu gerçeğin bilinci ile hareket edilerek eşdeğer devre parametrelerinin çalışma noktasına göre değişimlerini elde edebilecek bir yöntem ortaya konulmuş ve yöntemin geçerliliği deney sonuçları ile tetkik edilmiştir. Yöntemin esası oldukça basit bir temele dayandığından ve gerekli hesaplamalar çok uzun olmadığından gerek mühendisler ve gerekse araştırmacılar tarafından kolayca uygulanabilir. Hesaplamalar basit bir bilgisayar programı ile yapılabileceği gibi, küçük el hesap makinaları ile de yapılabilir. Uygulamada ortaya çıkan tek zorluk, kısa devre deneyi ve yük deneyinden okunacak değerlerin oldukça hassas bir şekilde ölçülmesinin gerekmesidir.

R E F E R A N S L A R

- 1) Agarwal, P. D. and Alger P. L. : 'Saturation factors for the leakage reactance of induction motors, Trans AIEE, 1961, 80, PP. 1037 - 1042.
- 2) Chalmers, B. J. and Dodgson, R. : 'Saturated leakage reactance of cage induction motors', Proc. IEE, 1969 116 (8), pp. 1395 - 1401.
- 3) Aktaba M. and Flynn F. P. : 'Asymmetrical short circuits on 3-phase induction motors', ICEM, 1978, part 1, pp. S2/2-1 - S2/2-12, Brussels, Belgium.
- 4) Akbaba M. : 'Effect of design parameters on transients in induction machines', Doktora tezi, 1978., Glasgow İngiltere.
- 5) Subba Rao V. and Butler O. I. : 'Stray losses of polyphase cage-induction motors with particular reference to the condition of imperfect rotor-bar-iron insulation', Proc. IEE, 1969, 116 (5), pp. 737 - 751.
- 6) Brown J. E., and Grantham C. : 'Determination of parameters and parameter variations of a 3-phase induction motor having current displacement rotor', Proc. IEE, 1975, 122 (9), pp. 919 - 921.