

Kompansasyon Sargısı Olan veya Olmayan Doğru Akım Cer Motörlerinde Endüi Sargısı Akı - Ampersarım Münasebetleri ve Esas Akı Endüktansları *

Yazan :
Ühami ÇETİN
Dr. El. Yük. Müh.'.

Ö Z E T

Doğruakım kolektörlü makinelerinde akı-ampersarım münasebetlerinin ve endüi sargısı esasaki endüktanslarının incelenmesi, şimdiye kadarki teknik yayınlarda bulunmuyordu. Eldeki çalışmada, normal seri bağlantılı doğruakım makinelerinin manyetik karakteristiği için kullanılan bir denklem yardımı ile, akb-ampersarım münasebetleri, esaskutup ikazı olduğunda ve olmadığında sistemli bir şekilde incelenmektedir. Endüi sargısı akısı için genel geçerli bir formül verilmektedir. Aynı sargının çeşitli esasaki endüktansları hesaplanmıştır. Neticeler, hesaplayıcılar için uygun eğri demetleri şeklinde gösterilmiştir. Bu neticeler alternatif ve karışık akımda tutamak olabilirler.

1. GÜŞ :

Doğruakım kolektörlü makinelerinde endüi sargısı için akı-ampersarım münasebetleri ve esasaki endüktansları, şimdiye kadarki teknik yayınlarda manyetik karakteristiğın doğrusal olmayan kısmında, esaslı şekilde incelenmemiştir. Bu inceleme eldeki çalışmada standart bir manyetik karakteristik için kesin şekilde yapılmıştır. Kullanılan standart manyetik karakteristik çeşitli büyüklükten, akım cinsinden ve muhtelif firmaların muhtelif yıllarda imal ettiği cer motörleri için olduğu kadar, diğer doğru akım kolektörlü makineleri için de iyi bir yaklaşıklık sağladığından, neticelerin geçerliği doğruakım cer motörlerine inhisar etmez.

Doğruakım motörleri güç tahrik durumları için hâlâ en iyi çözüm olmaktadır. Doğruakım cer motörlerinden haddehane ve kömür ocakları tahrik motörlerine kadar geniş bir sahada, senelerce değerlerini göstermişlerdir. Uygulanmaları, redressör ve regülasyon tekniğinin devamlı gelişmesi ile daha da yaygınlaşmıştır.

Karışık akım cer motörlerinin incelenmesi eldeki çalışmaya vesile olmuştur. Bu incelemede evvelâ, doğruakım cer motorunun aydınlanması gerekiyordu. Bu maksatla kullanılan çok basit bir standart manyetik karakteristik, endüi sargısı akı-ampersarımın münasebetlerini ve esas akı endüktansların kesin bir şekilde hesaplamayı mümkün kılmıştır. Çalışmada bulunan neticeler doğruakım cer motörleri haricinde, diğer seri bağlantılı doğruakım makineleri için de geçerlidir, zira tecrübe bu makinelerin manyetik karakteristiğının de seçilen standart manyetik karakteristik tarafından çok iyi bir yakla-

şıklıkla kapsadığını göstermiştir. Çalışmadaki incelemenin paralel bağlantılı doğruakım makinelerine de uygulanması kolayca mümkündür.

Genel geçerli analitik inceleme, manyetik karakteristik için kullanılan

$$D = F + F^2,$$

$$D = \frac{0}{\Theta_B^2}, \quad (1)$$

$$F = 0$$

denklemleri ile mümkün olmuştur. Burada D oranlanmış ampersarım ve F oranlanmış akıdır. Oran büyüklükleri Θ_B ve $f_{>B}$ nin verilen bir manyetik karakteristikten elde edilmesi şekli 2 de gösterilmiştir. Çeşitli endüktanslar manyetik karakteristiğın doğrusal kısmındaki L_{AO} endüi sabit endüktansına oranlanmıştır. $s = \text{bütün ampersarım} : \text{hava aralığı ampersarımı}$ olarak tanımlanan doyma derecesi için manyetik karakteristiğın denklemi ile

$$s = \frac{D \Theta_B}{D_L \Theta_B} =$$

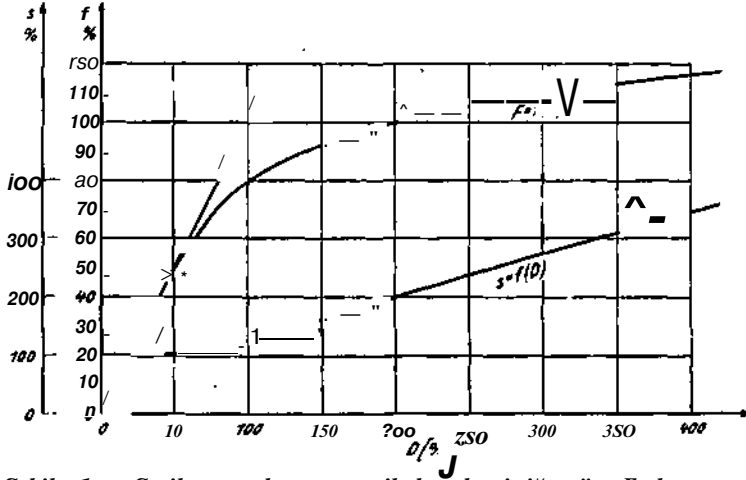
$$= \frac{D}{D_L} = \frac{D}{F} = 1 + F^2 \quad (2)$$

bulunur.

* Bu çalışma almanca olarak, Viyana'da çıkan E und M (Elektrotechnik und Maschinenbau) cilt 82 (1965), S. 391-399 da yayınlanmıştır.

2. Manyetik karakteristiğın doğrusal kısmında esas kutup ikazı olmadığında, reaksiyon akısının meydana getirdiği endüktansın ([1]

$$\frac{z}{4ap\tau} 2x \quad (5)$$



Şekil: 1 — Seçilen standart manyetik karakteristiğe göre F akısının ve s doyma derecesinin D ampersanın fonksiyonu olarak değişmesi, F ve D oranlanmış büyüklükleridir.

Endü ve esas kutup üzerinden kapanan endü akısı reaksiyon akısıdır. Bu akı aşağıda hesaplanacak olan ve bütün endü endüktansın önemli kısmını teşkil eden bir endüktans meydana getirir. Esas kutup yayı boyunca ikaz eğrisi altında merdiven biçimli bir eğridir ve şu noktaları

$$\begin{aligned} * &= \frac{b}{2} \\ O &= -A \frac{b}{2} \\ x &= \frac{b}{2} \\ \theta &= A \frac{b}{2} \end{aligned} \quad (3)$$

birleştirir. Burada A endü çevresi üzerinde akım yoğunluğunu, b esas kutup yayı uzunluğunu gösterir. Demirdeki manyetik gerilim ihmal edilirse ve hava aralığı sabit ise, endü manyetomotor kuvveti aynı biçimli bir alan dağılımı meydana getirir. Şekil 3 te gösterilen dx genişliğindeki endüksiyon tübü,

$$2\theta = 2Ax, \quad (4)$$

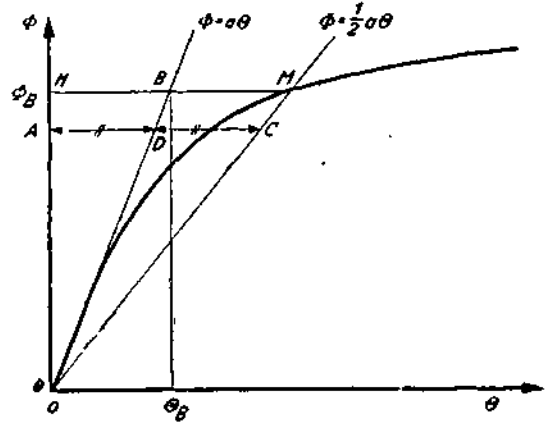
$$A = \frac{I}{2} \frac{z}{2pr}$$

ampersanınâ sahip

endü sarmılları ile halkalamr. Burada 7 bütün endü iletkenlerinin sayısını, a paralel endü kollarının yan sayısını, p kutup çifti sayısını ve τ kutup bölümünü göstermektedir. Ampersarım kanunundan

$$\tilde{n} = \frac{2\theta}{2\delta} = A \frac{x}{\delta}, \quad (6)$$

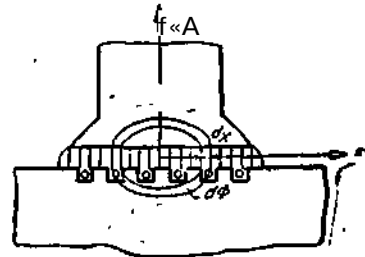
elde edilir. Formüldeki etken hava aralığı hakiki hava aralığının Carter katsayısı ile çarpımıdır.



Şekil: 2 — Vertzen ölçer manyetik karakteristikte oranlama büyüklüklerinin bulunması

1. AD = DC alınır
2. OC çizilir
3. Kesişme noktası M den ordinat eksenine dik indirilir. Başlangıç teğeti ile kesişme noktası olan oranlama noktasının özelliği :

$$\begin{aligned} HB &= BM. \\ s_D &= \text{OL} - \text{OE} \\ &= \frac{H}{2} \end{aligned}$$



Şekil: 3 — Endü reaksiyon akısı.

2.1. Endüktansın hesaplanması :

Etken kutup uzunluğu 1 olursa, bahsedilen endüksiyon tütünün akı halkalanması için

$$d\psi_{V1} = \frac{z}{4ap\tau} 2x\mu_0 A \frac{x}{\delta} l dx = \mu_0 \frac{z}{2ap\tau} \frac{l}{\delta} A x^2 dx \quad (7)$$

hesaplanır. Bir kutup yayı için bütün akı halkalanması

$$\psi_{V1} = \mu_0 \frac{z}{2ap\tau} \frac{l}{\delta} A \int_0^{\frac{b}{2}} x^2 dx = \frac{\mu_0}{3} \frac{z}{l\text{öap}\tau} \cdot \frac{l}{\delta} \frac{b^3}{24} A \quad (8)$$

olur. 2 p kutup yayı için bütün akı halkalanması, kutup yayılma oranı y ile

$$\psi_V = z p \psi_{V1} = \frac{z p \gamma}{8ap} \cdot \frac{b}{3\delta} \cdot \frac{bA}{2} = \frac{z p \gamma b^2 A}{24ap\delta} \quad (9)$$

olur. Bundan manyetik karakteristiğin doğrusal kısmındaki endüktansın sabit endüktansı için

$$L_{A0} = \frac{\psi_V}{I} = 2p \left(\gamma \frac{z}{8ap} \right)^2 / \text{ö} \cdot \frac{b}{3\delta} \cdot \frac{bA}{2} \quad (10)$$

$$\lambda_{A0} = \frac{1}{3} \frac{b}{l}$$

hesaplanır.

2.2. Endüktansın manyetik enerjiden hesaplanması:

Demirde biriken manyetik enerji, hava aralığındaki manyetik enerjiye göre ihmal edilecektir. 2g l.dx hacim parçasında toplanan manyetik enerji için genel formülden

$$dW_{V1} = \frac{1}{2} \mu_0 \left(A \frac{x}{\delta} \right)^2 SU dx \quad (11)$$

çıkar. Bütün kutup yayları altındaki hava aralığında toplanan manyetik enerji için

$$W_V = 2p \mu_0 l \frac{A^2}{\delta} \int_0^{\frac{b}{2}} x^2 dx = 2p \left(\gamma \frac{z}{8ap} \right)^2 \mu_0 l \frac{b^3}{24} \cdot \frac{P}{2} \quad (12)$$

hesaplanır. Bundan reaksiyon akısının meydana getirdiği endüktansın

$$L_{A0} = \frac{2 W_V}{I^2} = 2p \left(\gamma \frac{z}{8ap} \right)^2 \mu_0 l \lambda_{A0} \quad (13)$$

olarak bulunur.

Evvelâ manyetik iletkenlik sayısı hesaplanacak olursa, yine aynı neticeler bulunur. Manyetik karakteristiğin doğrusal kısmında, bütün esas endüktans tanımları aynı büyüklüğü verirler. Fakat doğrusal olmayan kısımda bu tanımlardan, birbirinden farklı üç «esas endüktansın» çıktığı görülecektir. «Esas endüktanslar» altında aşağıda tanımlanan büyüklükler anlaşılacaktır [2, 3] :

1. Akı özendüktansı L_F : Verilen bir akım devresinde akı halkalanmasının akıyı meydana getiren akıya oranıdır.

2. Diferensiyel özendüktans L_0 : Biçimi değişmeyen bir akım devresinde, endüksiyon kanununa göre meydana gelen ve eksi işaretli alınan elektromotor kuvvetin akıya göre ilişkin akım değişmesine oranıdır.

3. Enerji özendüktansı L_E : Endüksiyon sahasında akım tarafından biriktirilen manyetik enerjinin iki mislinin akımın karesine oranıdır.

Reaksiyon akısı endüktansı, formülden görüldüğü gibi, motor akımına İrca edilmiş, bir kutup yayına düşen sarım sayısının karesine oranlıdır. Sargı çeşidinin tesiri, paralel endüktansın sayısı ile değişir:

Tek girişimli bükümlü sargılarda : $a = p$

Çift girişimli bükümlü sargılarda : $a = 2p$

Dalgalı sargılarda : $a = 1$

Reaksiyon akısının meydana getirdiği manyetik iletkenlik, esas kutup sargısında faydalı akımın meydana getirdiği manyetik iletkenliğin üçte biridir. Böylece motor akımına İrca edilmiş bir sargı, endüktans üzerinde esas kutba nazaran üç defa daha az akı halkalanmasına ve üç defa daha az endüktansa sahiptir. Hakikaten İlişkin manyetik iletkenlik sayıları

$$\lambda_{A0} = \frac{1}{3} \cdot \frac{6}{\delta} \quad (14)$$

$$\lambda_{F0} = \frac{1}{2}$$

değerlerine sahiptir.

Şimdi mevcut bir kompensasyon sargısının aynı anda ikaz edildiği durum incelenir. Eğer endüktansın kompensasyon sargısından daha büyük bir çevre akım yoğunluğuna sahipse, ilişkin akım yoğunluklarının farkı $A - A'$, yukarıdaki İncelemeye göre kolayca hesaplanabilir.

bilecek endüi endüktanslarını meydana getirir. Bu durumda bütün reaksiyon akı halkalanması için

$$\psi_V = 2p \gamma \frac{z}{8ap} \mu_0 l \frac{b}{3\delta} \cdot \frac{b}{2} (A_A - A_K) =$$

$$- 2p \gamma \frac{z}{8ap} \mu_0 l \pm \frac{z}{6\delta} A_A \quad (W)$$

$$k' = 1 - \frac{A_K}{A_A} \text{ -- konstant.}$$

yazılabilir. Ayrıca ilişkin manyetik enerji için

$$W_V = 2p \mu_0 l \frac{b}{3\delta} \cdot \frac{1}{2} \left(\frac{b}{2} \right)^2 (A_A - A_K)^2. \quad (16)$$

çıkır. Bulunan bu büyüklüklerle, endüi ve kompensasyon sargılarında reaksiyon akısı ile meydana gelen esas endüktanslar hesaplanabilir. Endüi akı endüktansı :

$$L_{AF} = \frac{\psi_V}{I_A} = 2p \left(\gamma \frac{z}{8ap} \right)^2 \mu_0 l \lambda_{A0} \left(1 - \frac{A_K}{A_A} \right)$$

$$(17)$$

Endüi diferensiyel endüktansı:

$$L_{AD} = \frac{d\psi_V}{dI_A} = 2 \left(\gamma \frac{z}{8ap} \right)^2 \mu_0 l \lambda_{A0} \left(1 - \frac{A_K}{A_A} \right)$$

$$(18)$$

Endüi enerji endüktansı:

$$L_{AE} = \frac{2W_V}{I_A^2} = 2p \left(\gamma \frac{z}{8ap} \right)^2 \mu_0 l \lambda_{A0} \left(1 - \frac{A_K}{A_A} \right)^2$$

$$(19)$$

Görüldüğü gibi bu endüktanslar manyetik karakteristiğın doğrusal kısmında da birbirlerinde farklıdır. Fakat hesaplanan endüktanslar fiziksel anlama sahip değildiler, çünkü tanım ifadelerinde kullanılan akım, halkalanması doğuran akımdan farklıdır. İncelenen durumda akı halkalanması endüi ve kompensasyon sargılarına ait $A_A - A_K$ tarafından meyclana getirildiği halde, tanım, ifadelerinde endüktanslar için yalnız endüi sargısına ait A_A kullanılmaktadır. Eğer tanımlarda akıyı hakikaten meydana getiren $A_A - A_K$ büyüklüğü kullanılacak olursa, eğit esas endüktanslar bulunur. Sonraki bölümde endüi ve kompensasyon sargılarının aynı anda ikazı ile meydana gelen endüktanslar, manyetik karakteristiğın doğrusal olmayan kısmında da araştırılacaktır.

3. Manyetik karakteristiğın doğrusal olmayan, kısmında, esas kutup ikazı! olmadığında, reaksiyon akısının meydana getirdiği endüi endüktansları:

Endüi sargısı yalnız ikaz edildiğinde bir kutup yayı altında meydana gelen ve endüi sargısı ile halkalanan akı için genel olarak

$$\psi_{V1} = \int_0^{\frac{b}{2}} \left(\frac{z}{4upT} 2.e \right) B_A l dx. \quad (20)$$

yazılabilir. Yardımcı değışken olarak esas kutupların düzgün B endüksiyon dağılımında sahip oldukları akı alınacak olursa ve

$$\Phi = l b B_A,$$

$$\frac{b}{2} \quad (21)$$

$$d\psi_V = -4 \dots$$

ifadeleri kullanılırsa, reaksiyon akısı için

$$\psi_{V1} = \frac{1}{4npT} \cdot \frac{1}{A_{Q1}} \int_0^{\Theta_A} \Phi \Theta_V d\Theta_V. \quad (22)$$

ifadesi bulunur. Bundan bir kutup yayı altındaki $zb/8ap$ endüi sargı sayısına irca edilmiş ortalama endüi akısı için

$$\langle P \rangle = \frac{1}{\Theta_A} \int_0^{\Theta_A} \Phi \Theta_V d\Theta_V. \quad (23)$$

denklemi çıkar. Evvelce bahsedilen Θ_B ve $\langle \Phi_B \rangle$ esas kutup sargısı oranlama büyüklükleri ile ortalama endüi akısı için

$$F_V = \frac{\Phi_V}{\Phi_B} = \frac{1}{D_A^2} \int_0^{\Theta_A} F D_V dD_V,$$

$$D_V = \frac{\Theta_V}{\Theta_B},$$

$$F = \frac{\Phi}{\Phi_B},$$

$$D_A = \frac{\Theta_A}{\Theta_B}. \quad (24)$$

genel ifadesi bulunur. Esaskutup ve endüi manyetik devrelerinde yaklaşık olarak aynı manyetik gerilimler vardır. Bu sebeple başlangıçta bahsedilen standart manyetik karakteristiğın denklemini kullanmak mümkündür. O zaman ortalama endüi akısı için, gösterilen işlemlerle

$$D_v = F + F',$$

$$dDy = (I + 7F^a)dF.$$

$$D_A = F_A + F_A^2.$$

$$F_v = -\frac{1}{3} \frac{F_A}{D_A} (F + F') (1 + 7F^8) dF =$$

$$= \frac{1}{3} \cdot \frac{F_A^2}{D_A^2} \left(1 + \frac{8}{3} F_A^6 + \frac{7}{5} F_A^{12} \right).$$

formülü bulunur. Burada endü ampersarımınj yerine ifadesi yazılacak olursa

$$F_v = \frac{1}{3} \cdot \frac{F_A}{(1 + F_i)^2} \left(1 + \frac{8}{3} F_A^6 + \frac{7}{5} F_A^{12} \right).$$

nihai formülü elde edilir. F nın bir yardımcı değişken olduğuna bilhassa dikkat etmelidir. Bu büyüklük kutup uçlarındaki hava aralığı endüksiyonunu göstermektedir. Verilen bir endül ampersanında standart manyetik karakteristikten elde edilir. Reaksiyon akısının formülü kullanılarak artık endüi sargısı esas endüktansları hesaplanabilir. Esas endüktanslar manyetik karakteristiğin doğrusal kısmındaki

$$L_{AO} = \frac{2 \mu_0^2 \Phi_v}{D_A} \cdot \frac{F_v \Phi_B}{D_A \Theta_B} \cdot \frac{\Phi_B}{\Theta_B}$$

sabit endüktansına oranlanacaktır. Endüi sargısı oranlanmış akı endüktansı için, pay ve paydada $2\mu_0^2 \Phi_A$ çarpanını yazarak,

$$L_{AO} = \frac{L_{AF}}{L_{AO}} = \frac{F_v \Phi_B}{D_A \Theta_B} \cdot \frac{1}{3} \frac{\Phi_B}{\Theta_B} \cdot \frac{1}{D_A}$$

$$\left(\frac{F_A}{D_A} \right)^2 \left(1 + \frac{8}{3} F_A^6 + \frac{7}{5} F_A^{12} \right) \cdot \frac{1}{(1 + F_A^6)^2}$$

formülü bulunur. Aynı şekilde endüi dferensiyel endüktansı için

$$L_{AD} = \frac{L_{AD}}{L_{AO}} = \frac{dF_v \Phi_B}{dD_A \Theta_B} \cdot \frac{1}{3} \frac{\Phi_B}{\Theta_B} \cdot \frac{dF_v}{dD_A}$$

$$= 3 \frac{dF_v}{dF_A} \cdot \frac{dF_A}{dD_A} = \frac{1 + \frac{23}{3} F_A^6 + \frac{73}{15} F_A^{12} + \frac{7}{5} F_A^{18}}{(1 + F_A^6)^3 (1 + 7F_A^6)}$$

elde edilir. Enerji endüktansının bulunması için evvelâ endüi sargısının manyetik enerjisini he-

saplamak gerektir. Kolektörün kısa devre olmasında kendini gösteren bu enerji için, endüi değişken büyüklükleri D_v ve P_v ile

$$W_v = \int_0^{F_A} D_v dF_v = \frac{1}{3} \int_0^{F_A} D_v L_{AD} dF_v =$$

$$= \frac{1}{3} \int_0^{F_A} D_v L_{AD} \frac{dD_v}{dF} dF =$$

$$= \frac{1}{3} \int_0^{F_A} \frac{F + \frac{23}{3} F^7 + \frac{73}{15} F^{13} + \frac{7}{5} F^{19}}{(1 + F^6)^2} dF =$$

$$= \frac{1}{3} \int_0^{F_A} \left(\frac{31}{15} F + \frac{7}{5} F^7 + \frac{16}{15} \frac{F^9}{(1 + F^6)} \right) dF.$$

ifadesi bulunur. Sonuncu ifadeyi bulmak için pay paydada bölünmüştür. Entegralin alınabilmesi için tam üslü kesir fonksiyonunda

$$e^* = x,$$

$$2FAF = dx$$

yazılacaktır. Bununla, ara hesapları vermeden,

$$\frac{2F^7 - F^3 - 0,5}{(1 + F^6)^2} = \frac{x^3 - 0,5}{(1 + x^3)^2} dx =$$

$$\int \frac{x^3 - 0,5}{(1 + x^3)^2} dx = \frac{1}{2} \frac{x}{1 + x^3}$$

neticesi çıkar. Türev alınarak bu neticenin doğruluğu kolayca görülebilir. Artık endüi sargısının manyetik enerjisi ve oranlanmış enerji endüktansı hesaplanabilir.

$$W_v = \frac{1}{3} \frac{31}{15} F_A + \frac{7}{40} \frac{F_A^8}{15} \frac{1}{1 + F_A^6} + \frac{16}{15} \frac{F_A^9}{1 + F_A^6}$$

$$= \frac{L_{AE}}{L_{AO}} = \frac{2 \Theta_B \Phi_B / D_v dF_v}{(\Theta_B D_A)^2} \cdot \frac{1}{3} \frac{\Phi_B}{\Theta_B} =$$

$$= 2 \cdot 3 \frac{W_v}{D_A^2} = \frac{1}{(1 + F_A^6)} \cdot \left(\frac{7}{20} F_A^6 + \frac{16}{15} \frac{F_A^9}{1 + F_A^6} \right)$$

Bulunan bu neticelerden manyetik karakteristiğin doğrusal kısmına alt özel durum $F^6 = 0$

yazılarak elde edilir. O zaman gu bağlantılar çıkar:

$$L'_{AF} = L'_{AD} = L'_{AE} = 1,$$

$$F_V = \frac{1}{3} F_A, \quad (34)$$

$$W'_V = \frac{1}{3} \cdot \frac{1}{2} F_A^2.$$

Esas endüktanslar esas kutup sargısının doyma derecesinin fonksiyonu olarak da kolayca ifade edilebilirler. Esas kutup manyetik karakteristiğinden doyma derecesi için

$$s = \frac{D_A}{F_A} = (F_A + F_A^2) : F_A = 1 + F_A.$$

Doyma derecesi kullanılacak olursa endül esas endüktansları için şu formüller elde edilir

$$L'_{AI} < s = \frac{21s^2 - 2s - 4}{15s^3},$$

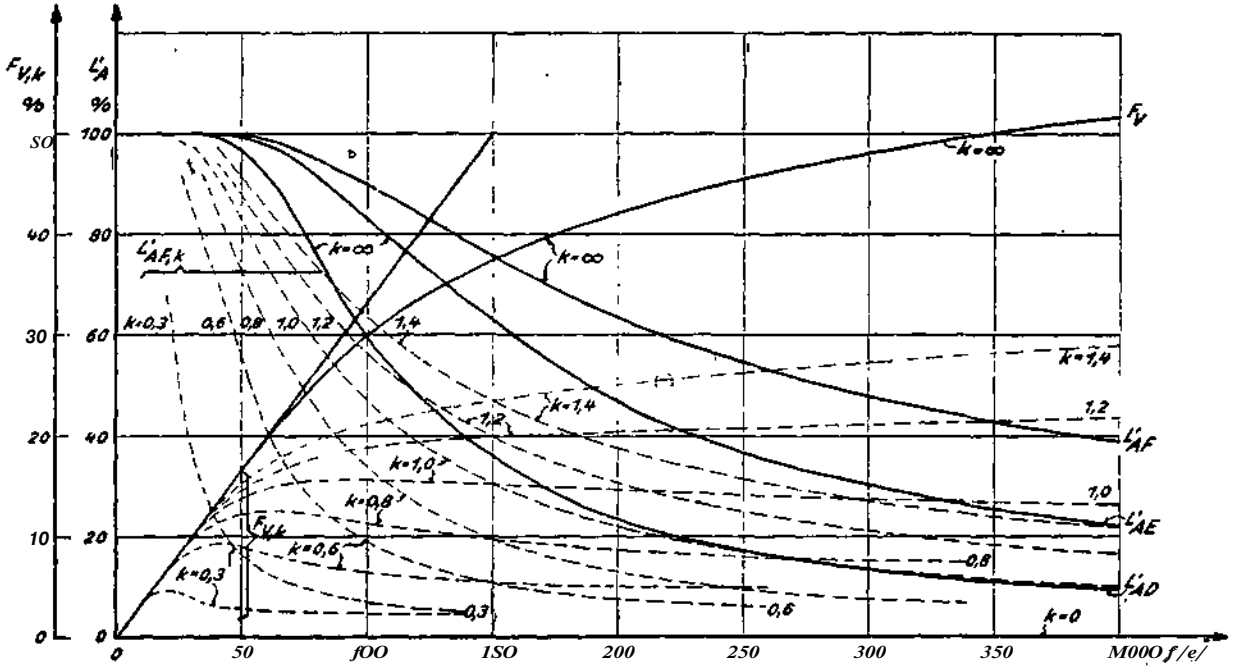
$$L'_{AD} = \frac{-48 + 32s + 10s^2 + 21s^3}{15s^3(7s-6)}, \quad (36)$$

$$L'_{AE} = \frac{1}{iM} \left(\frac{134 - 7s}{20} + HT - T \sim \right).$$

Verilen ampersanma tekabül eden kutup ucu endüksiyonunun verdiği esas kutup akısı oranlama büyüklüğü olarak alınır, reaksiyon akısı aynı şekilde doyma derecesinin fonksiyonu olarak ifade edilebilir. Bu ilginç netice

$$(35) \Phi_V = \frac{F_V}{J-A} \sim \frac{1}{3} \cdot \frac{1 + \frac{8}{3} F_A^2 + \frac{7}{5} F_A^4}{(1 + F_A^2)^2} = \frac{21s^2 - 2s - 4}{45s^2} \quad (37)$$

hesaplanır. Doyma derecesi s, endü ampersanını D_A ve bu ampersanma tekabül eden manyetik akı F_A arasındaki bağlantı şekil 1 deki gibidir.



Şekil : 4 - Endü sargısı aJtu halkaltmması ve esas endükleçleri

Parametre :

$k = \infty$ yani esaskutup ikaz edilmediğinde

$$\Phi_F = 0 \quad F_V, L'_{AF}, L'_{AE}, L'_{AD} \text{ eğrileri için}$$

$k = 0 \dots 1,4$ yani esaskutup ikaz edildiğinde

$$\sqrt{k} \cdot \Delta k \text{ eğrileri için}$$

$$\text{örnek: } k = 1, D_A = 200\% \quad L'_{AFk} = 0,22$$

formülüdür. Bir hesaplama büyüklüğü olan $\langle \epsilon, \dots \rangle$, endüi sargısı ampersarımına eşit esas kutup ampersanmında meydana gelen akıdır. Manyetik karakteristiğin doğrusal kısmında, $s = 1$ olduğundan,

$$\begin{aligned} L'_{AF} &= L'_{AD} = L'_{AE} = 1, \\ \frac{0V}{\Phi_0} &= \frac{1}{3}. \end{aligned} \quad (38)$$

elde edilir.

Esas endüktanslar şekil 4 ve 5 te oranlanmış endüi ampersanmının ve esas¹ kutup doyma derecesinin fonksiyonu olarak gösterilmiştir. Esaskutup endüktansları ile karşılaştırmadan [3], endüi sargısı endüktanslarının artan ampersarım veya artan doyma derecesinde daha yavaş küçüldükleri görülmektedir, örneğin, karışık akımda çok önemli olan diferensiyel endüktans doyma sahasında, oranlanmış büyüklük olarak, esas kutup sargısına göre endüi sargısında iki defa büyüktür. Diğer taraftan reaksiyon akısının eğrisinden, doymanın bu büyüklüğe esas kutup akısına nazaran daha az tesir ettiği görülmektedir. Bu sebeple, şekil 5 te doyma derecesine esas kutup akısına oranı büyümektedir. Bu netice matematik yolla da ispat edilebilir. İfadede yapılan basit değişikliklerle, sözü geçen oranın 1/3 ten büyük olduğu görülür.

$$\begin{aligned} \frac{\Phi_V}{\Phi_0} &= \frac{1}{3} \left(1 + \frac{\frac{2}{3} F_A^2 + \frac{2}{5} F_A'^2}{(1 + F_A')^2} \right) = \\ &= \frac{1}{3} \left(1 + \frac{6s^2 - 2s - 4}{15s^2} \right) \geq \frac{1}{3}. \end{aligned} \quad (39)$$

Eşitlik, manyetik karakteristiğin doğrusal kısmında elde edilen sınır durumudur.

Endüktansların ve akının doyma derecesine göre fonksiyonlarından, herhangi bir noktadaki tanjant kolayca hesaplanabilir. Türev alınarak bulunan

$$\left(\frac{\Phi_V}{\Phi_0} \right) = \frac{2\epsilon + 8}{3s^3} \quad (40)$$

ifadesinden, meselâ başlangıç noktası için teğetin eğimi olarak 10/3 bulunur.

Bu kısımdaki izahlara şekil 4 ve 5 te esas kutup uyarması olmayan $k = \epsilon$ eğrileri tekabül eder. Gelecek bölümde görülecek olan diğer eğriler, esaskutup uyarmasının tesirini nazarı itibare alır.

Eğer kompensasyon sargısı mevcutsa, bu kısımda görülen hesaplar ve formüller endüi ampersarımı yerine

$$D_{AR} = D_A - D_K = k' D_A \quad (41)$$

bileşke ampersarımı yazılmak şartı ile aynen geçerlidir. Bileşke ampersanmındaki endüktanslar w ile işaretlenirse

$$\begin{aligned} 3 F_V &= k' D_A L'_{Fw}, \\ 3 d F_V &= k' d D_A L'_{Dw}, \\ 3 W'_V &= \frac{1}{2} L'_{Ew} (k' D_A)^2. \end{aligned} \quad (42)$$

yazılabilir. Tanımlarda yalnız endüi ampersanmı kullanılarak elde edilen bileşik endüktanslar için

$$\begin{aligned} L'_F &= \frac{3 F_V}{D_A} = k' L'_{Fw}, \\ L'_D &= \frac{3 d F_V}{d D_A} = k' L'_{Dw}, \\ L'_E &= 3 \frac{2 W'_V}{D^2} = k'^2 L'_{Ew}, \end{aligned} \quad (43)$$

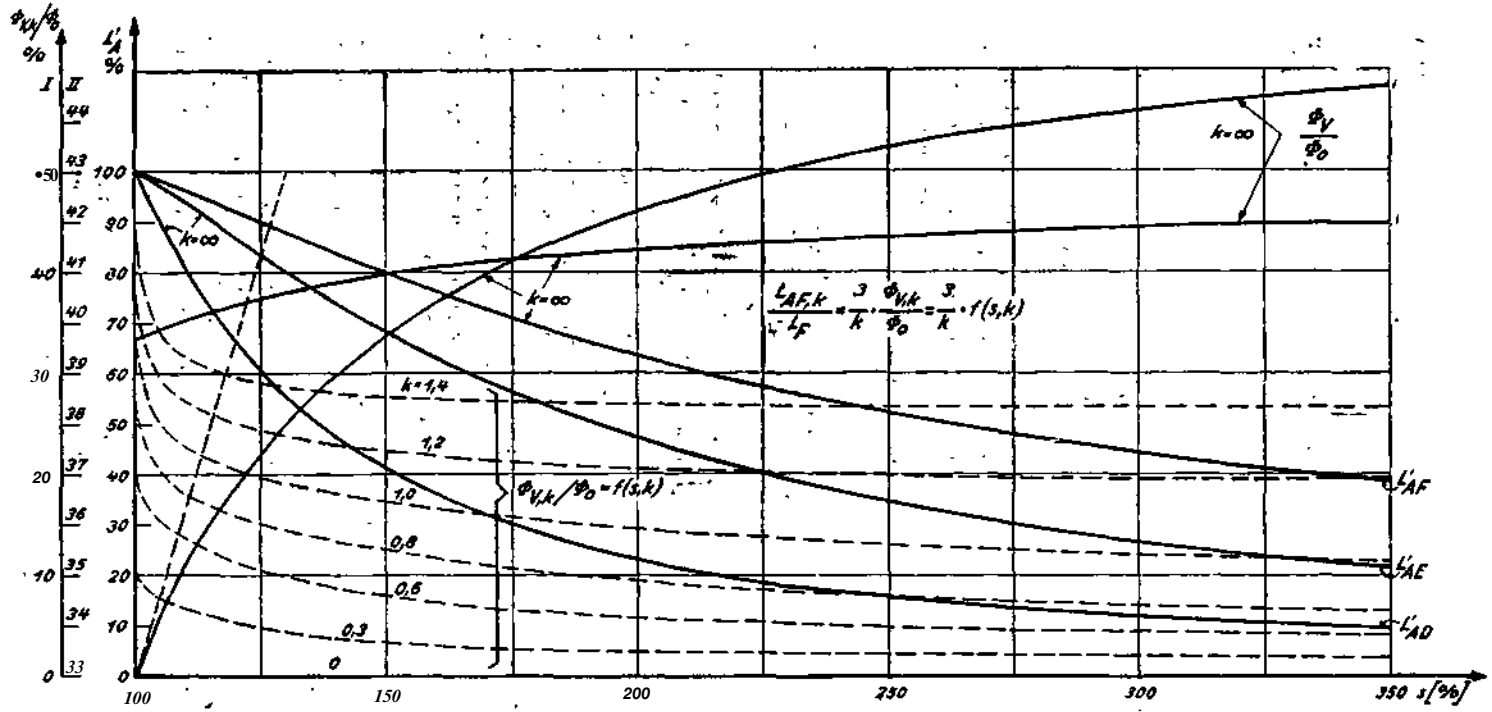
bağlantıları bulunur. W İşaretili endüktanslar şekil 4 ve 5 ten bileşke ampersanm için tespit edilir. Genel geçerli bu bağlantılar, manyetik karakteristiğin doğrusal kısım için evvelce görülen özel durumu da ihtiva eder.

4. Esaskutup İkazı olduğunda endüi sargısı ata. - ampersanm münasebetleri ve esas endüktansları.

Bir elektrik makinesinde yalnız bir sargı İkaz edilirse, her sargının manyetik karakteristiği çeşitli endüktansları tayin eder. O halde bu büyüklüklerin bulunması için, her sargının manyetik karakteristiğini hesap veya deney yolu ile bulmak kâfidir. Eğer birden fazla sargı aynı zamanda İkaz edilecek olursa, bir sargının akı halkalanması, kendi manyetikdevresine tesir eden diğer sargı ampersanmlarının da fonksiyonu olur. Bu durumda bir sargının akı halkalanması[^], ancak diğer sargı ampersanmları parametre olarak sabit tutulduğunda, belirli ve tek değerlidir. Demek ki genellikle bir sargının akı halkalanması bir eğri demeti ile gösterilecektir.

Elektrik makinelerinde ampersanm dağılımı genellikle bilinir. Doymanın nazarı İtibara alınmasında ana güçlük, bu durumda manyetik endüksiyonlar için üstüste bindirme prensibinin uygulanamamasıdır.

Esaskutup ve endüi sargılarının aynı anda İkazını, evvelâ manyetik karakteristiğin doğrusal kısmında İnceleyelim. Bilindiği gibi esaskutup ampersarımı, manyetik karakteristiğin doğrusal kısmında, endüi sargılı akı halkalanmasına ve endüktanslarına tesir etmez. Endüi endüktansının bulunması için yapılan hesap, esaskutup ampersanmının manyetik karakterleri-



Şekil 5 — Doğruakımda esaskutup sargısı ikaz edilmediğinde endüktansın aktırılması ve esas endüktansların oranlanmış endüktansların esas endüktansların ve ilişkin manyetik iletkenlerin doyma katsayıları olarak alınabilir. Endüktansların ifadesindeki 3, esaskutup akısının oranlama büyüklüğü olmaktadır.

Parametre :

$$k = \frac{\theta_A}{\theta_F} = \frac{A \delta / 2}{w_F I_F} A, \quad A = A_A - A_K$$

• k = eo yam esaskutup ikaz edilmediğinde

$$L'_{AF}, L'_{AE}, L'_{AD} \quad k = \frac{D_A}{r_A} \quad \text{eğrileri için}$$

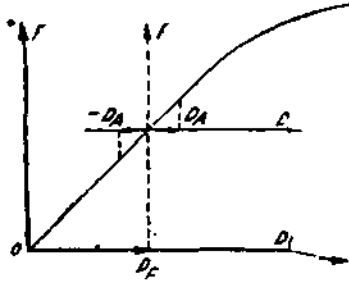
k = 0...1,4 yani esas kutup ikaz edildiğinde

$$*v.k/* \text{ bel } \epsilon = \frac{\sigma_G}{\theta_L} = \frac{\nu_F}{\nu_0} \quad \text{eğrileri için}$$

örnek : k = 1, s = 200 %, L'_F = 0,5

$$L'_{AE} = 0,22$$

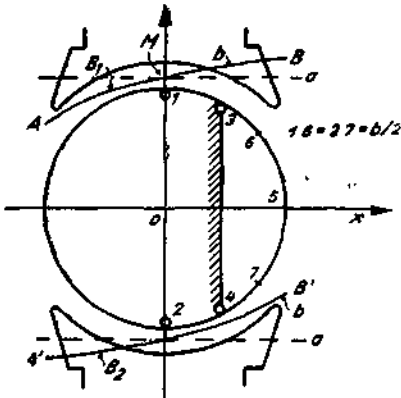
tikte kestiği nokta koordinat eksenleri için yeni başlangıç noktası kabul edilince, aynen geçerlidir (şekil 6). Netice olarak manyetik karakteristiğin doğrusal kısmında, endüktansları esaskutup ampersarımına bağlı değildir.



Şekil . 6 — Manyetik karakteristiğin doğrusal kısmında, esaskutup ikaz edilince endüi akısı.

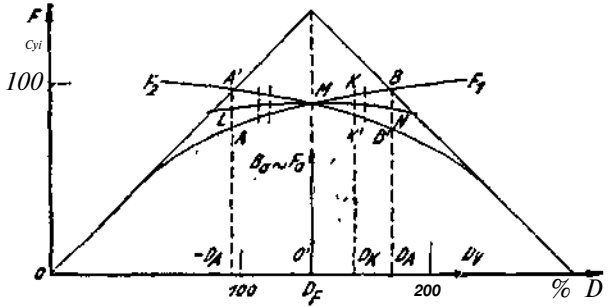
Şimdi endüi sargısı akı halkalanmasını ve endüktanslarını, esaskutup sargısı manyetik karakteristiğin doğrusal olmayan kısmında ikaz edildiğinde inceleyelim.

Esaskutup ve endüi sargılarının aynı anda ikazında, kutup yayı altındaki hava aralığı endüksiyonunun değişimi, şekil 7 de gösterilmiştir. Kollektörlü makinelerde empersanm dağılımının simetrisi dolayısıyla, iki kutup yayı altındaki hava aralığı endüksiyon eğrileri AB ve A'B', rotor eksenine göre simetrik olurlar.



Şekil: 7 — Esaskutup ve endüi sargılan aynı zamanda ikaz edilince hava aralığı endüksiyonunun dağılımı.
a. endüi reaksiyonu yok iken
b. endüi reaksiyonu olduğunda

Daha iyi inceleyebilmek için hava aralığı endüksiyonunun dağılımı şekil 8 de tekrar çizilmiştir. Burada A'B' eğrisi Ox eksenini boyunda döndürülüp üst yarıdüzleme getirilmiştir. Kapalı bir yüzeyden geçen akı daima sıfır olduğundan, herhangi bir 34 endüi sarımından geçen akı (şekil 7), endüi üst yüzeyinin 354 kısmından geçen akıya eşit olacaktır.



Şekil . 8 — Esaskutup sargısı ikaz edildiğinde endüi akısı.

$$0... = \langle p_{VA} = \int_1^6 f(B_{dx} - \int_4^7 B_{jlx}) = \int_3^n f(B_{.} - B_{.}) r.l.r. \quad (44)$$

Bir değişken değişikliği yaparsak

$$F_{31} = \frac{1}{2} \frac{D_A}{D_A D_K} \int (F_2 \sim F_1^n D_V. \quad (45)$$

elde edilir. Manyetik akımın sakinimi teoriminden, her iki kutup yayı bileşke endüi endüksiyonunun, AB ve A'B' eğrilerinin farkı yani bu iki eğri arasındaki ordinatlar tarafından tayin edildiği çıkar. Ortalama eğri JLM çizilecek olursa, LN ve AB eğrileri arasındaki ordinatlar, aranan endüi endüksiyonunu verir. 12 sarımının akısı böylece MBB' alanına oranlı olacaktır. Herhangi bir 34 sarımından geçen akı ise KBB'K alan parçasına oranlıdır. Burada KK' doğrusunu, 34 sarımına tekabül eden D_K ampersanımı tayin eder.

Şimdi O'D_V yi endüi ampersarımı için yeni absis eksenini alalım. Reaksiyon akısı formülü buradaki büyüklüklerle uygulanırsa,

$$F = \frac{1}{2} (F_1' - F_2')$$

$$F_{V.k} = \frac{1}{D \int_0^{\% D_V} \% D_V d D_V = \frac{1}{2} \int_0^{\% D_V} (F_1' - F_2') D_V d D_V \quad (46)$$

ifadesi bulunur. D_F M eksenine göre mevcut simetri dolayısıyla endüiden çıkan akı endüile giren akıya eşittir. Bu simetrimin nazarı itibare alınması, reaksiyon akısı için genel geçerli

$$F_{V.k} = \frac{1}{2 D_A} (\int_0^{\% A} F_1' D_V d D_V + \int_0^0 F_2' D_V d D_V) = \frac{1}{2 D_A} \int_0^{\% A} F_1' D_V d D_V. \quad (47)$$

formülünü verir. Bu İlginc formül evvelce esas-kutup İkazı olmadığında bulunan formülü özel durum olarak İhtiva eder. Bu netice manyetik karakteristik İçin kullanılan herhangi bir denkleme bağılı değildir.

Manyetik karakteristik $-D_A$ ve D_A arasında tg_a eğimli bir doğru ile doğrusal kılınırsa, endül sargısının bütün eass endüktanslar, birbirine eğiit ve sabit olurlar.

$$F_{V,k} = \frac{1}{3} tg_a \cdot D_A \quad (48)$$

$$L'_{AF} = L'_{AD} = I \cdot \Phi = tg_a.$$

Doğrusal kılma İçin çalışma noktasındaki teğet alınacak olursa, manyetik karakteristiğinin eğimi esaskutup sargısı oranlanmış diferansiyel endüktansına eşit olur. Daha iyi yaklaşım için, manyetik karakteristik O' ve $-D_A$ İle O' ve D_A arasında eğimleri tg_a ve tg_β olan İki ayrı doğru parçası İle doğrusal kılınırsa,

$$F_{V,k} = \frac{1}{6} (tg_a + tg_\beta) D_A \quad (49)$$

$$L'_{AF} = L'_{AD} = L'_{AE} = \frac{1}{2} (tg_a + tg_\beta).$$

elde edilir.

Bileşke ampersanın kullanılarak ve senbollerdeki 1 İşareti bırakılarak

$$D_1 = D_F - D_A$$

$$D_2 = D_F + D_A$$

$$D \setminus = D - D_F$$

$$F_{V,k} = \frac{1}{2} \int_{D_A}^{D} F(D - D_F) dD = \quad (80)$$

$$= \frac{1}{2} \int_{D_A}^{D} F D dD - D \int_{D_A}^{D} F dD.$$

formülü bulunur. Bu formül yardımı İle reaksiyon akı halkalanması, verilen bir manyetik karakteristikle dalma bulunabilir. Formüldeki İlk entegralln esaskutup ikazı olmadığında, ikinci entegralln İse endül sargısı ikaz edilmediğinde yalnız mevcut olduğuna dikkat etmelidir. Manyetik karakteristik İçin çalışmada kullanılan denklem İle entegraller alınır, reaksiyon akısı İçin

$$F_{V,k} = \frac{1}{2} \int_{D_A}^{D} \left[\frac{1}{3} F_2^3 \left(1 + \frac{8}{3} \wedge + \wedge^2 F_2^{12} \right) - \frac{1}{3} F_1^3 \left(1 + \frac{8}{3} F_1^4 + \frac{7}{5} F_1^{12} \right) - D_F \left[\frac{1}{2} F_2^2 \left(1 + \frac{7}{4} F_2^2 \right) - \frac{1}{2} F_1^2 \left(1 + \frac{7}{4} F_1^2 \right) \right] \right] dD \quad (51)$$

formülü çıkar. Birinci kısım tek fonksiyon, ikinci kısım çift fonksiyondur.**

Özel durumlar

1. Endül sargısının yalnız ikazı:

$$D_F = 0,$$

$$D_1 = \sim D_A$$

$$D_2 = D_A \quad (52)$$

$$D = D_V,$$

$$F_V = \frac{1}{2} \frac{D_A}{D_A^2 - D_A} \left(\int F D_V dD_V - 0 \right) = \frac{1}{D_A^2} \int F D_V dD_V.$$

Bu formül ikinci kısımda bulunan neticedir.

2. Manyetik karakteristiğinin doğrusal kısmında iki sargının aynı zamanda ikazı:

$$F = D,$$

$$*V_{,k} = \int_{D_A}^{D} \left(\int D dD - D/D dD \right) =$$

$$= \frac{1}{2} \int_{D_A}^{D} \left[\frac{1}{3} D_2^3 - \frac{D_1^3}{3} - D_F \left(\frac{1}{2} D_2^2 - \frac{1}{2} D_1^2 \right) \right] dD =$$

$$= \frac{1}{3} D_A.$$

$$(53)$$

Bu netice de ikinci kısımda bulunmuştu.

Eğrilerin gösterilmesinde yine

$$j_b = \frac{D}{Dr} = \frac{\Phi_A}{Oy} \quad (54)$$

parametre olarak alınmıştır. Ala halkalanması ve akı endüktansı eğrileri şekil 4, 5 ve 9 da çizilmiştir. Eğrilerin doğrusal kısmında

$$F_{V,k} = D_A = \frac{1}{3} k D_F.$$

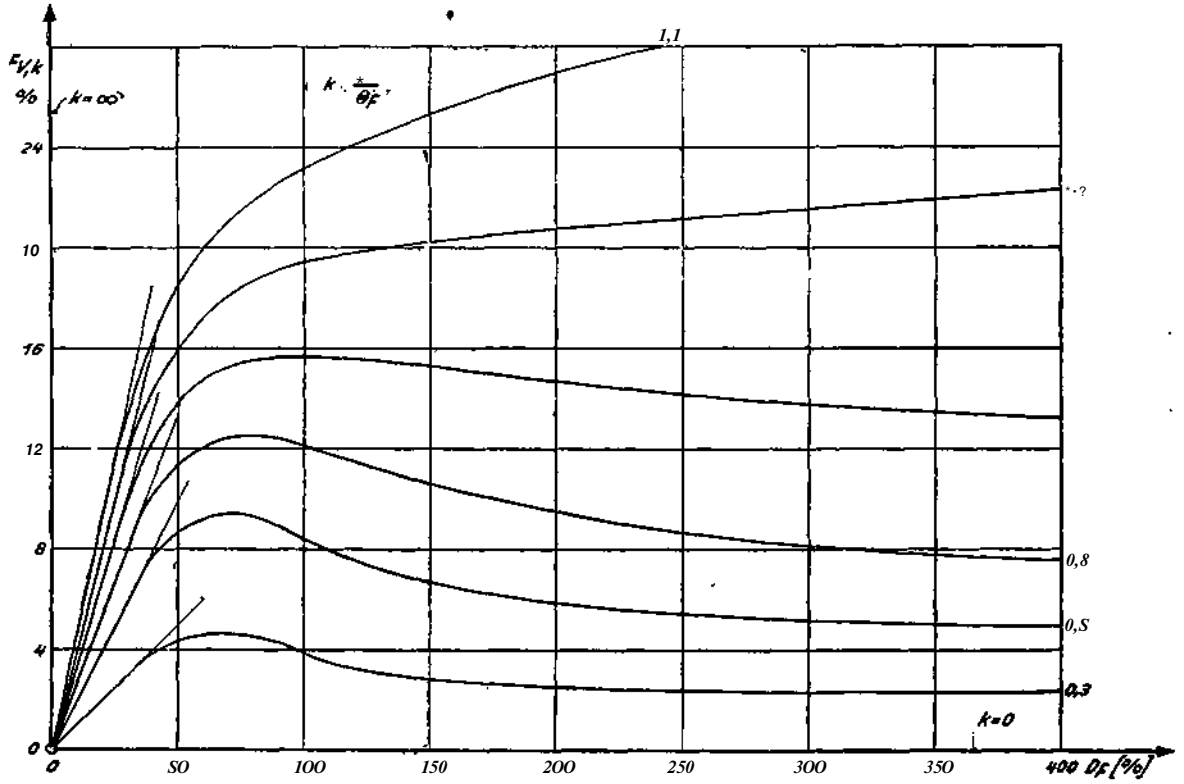
$$\frac{\partial F_{V,k}}{\partial D_A} = 1 \quad (55)$$

$$\frac{\partial F_{V,k}}{\partial D_F} = \frac{1}{3} k.$$

$$\frac{\Phi_{V,k}}{\Phi_0} = \frac{F_{V,k}}{F_0} = \frac{1}{3} k \frac{D_F}{F_0} = \frac{1}{3} k.$$

geçerlidir. Buna göre başlangıç teğetinin eğimi, esaskutup ampersarını absis olduğunda $k/3$ tür (şekil 9). Endü ampersarını absis olduğunda, bu eğim için $1/3$ bulunur (şekil 4). Esaskutup akısına oranlanmış endü akısının, $s = 1$ İçin başlangıç değeri $k/3$ tür (şekil 5).

Şekil 5 endü akısının, reaksiyon olmadığında mevcut esaskutup akısına oranını göster-



şekil : 9 — Esaskutup sargısı aynı zamanda ikaz edildiğinde endüi sargısı atol halkalanmast

$$\text{Reaksiyon akısı: } F_v k - \frac{\Phi}{(D, *)} \quad * = \Theta_A / \Theta_F$$

$$\text{Bir kutup yayında endüi ampersarımı: } \llcorner_A = \Delta \partial R.$$

$$\text{Bir esaskutup ampersarımı: } \Theta_F = D_F \Theta_B = w_F \bar{I}_F$$

mektedir. Endüi endüktansının reaksiyon olmadığında mevcut esaskutup endüktansına oranı için

$$\frac{\Phi_{v,k}}{\Phi_0} = f(s, k), \quad (56)$$

$$\frac{L'_{AF,k}}{L'_F} = \frac{3}{k} \cdot \frac{\Phi_{v,k}}{\Phi_0} = \frac{3}{k} f(s, k).$$

geçerlidir. Bu bağlantı geniş, bir değişken alanı üzerinde hemen hemen doğrusal olup, doyma derecesine jÇok az bağlıdır. Esaskutup büyüklüklerinin oranlama büyüklükleri olarak alınmasının sebebi, doğruakım manyetik karakteristiğinin daima önceden bilinmesidir. Bu hesaplama şeklinde endüi büyüklüklerinin esaskutup büyüklüklerine göre önemi, doğrudan doğruya görülebilir. Fiziksel olarak reaksiyon akısını, esaskutup ikazı olmadığındaki değerine oranlamak, daha doğru olurdu. Endüi akı endüktansı için

$$L_{AF,k} = L_{A0} 3 L'_F \frac{1}{k} f(s, k). \quad (87)$$

yazılabilir. Şekil 4 reaksiyon akısına endüi ampersarımının fonksiyonu olarak göstermektedir. Burada endüi sargısının diferansiyel ve enerji endüktansı grafik yolla bulunabilir. Eğrilerin değerlendirilmesi önemli ve muhtemelen yeni bir netice verir, k parametresi 1 den küçük olduğunda endüi diferansiyel endüktansı evvelâ pozitifdir, belli bir akım değeri için sıfır olur ve sonra negatifdir. Karışık akımda bu endüktans böylece bir kapasitif reaktans olarak tesir eder. Negatif diferansiyel endüktanslar karakteristiklerin düşen kısımlarında görülür ve kendi kendine ikaz olaylarında önemlidir.

Endüi sargısı akı- ampersanım ilişkileri ve endüktansları, her ne kadar yalnız doğru akımda

İncelenmişse de, bulunan neticeler diğer akım çeşitleri için tutamak olabilirler : akı karakteristikleri yaklaşık olarak alternatif akımda esas harmonik veya etkin değerler karakteristiği, karışık akımda ortalama değerler karakteristiği olarak alınabilir. Aynı şekilde akı endüktansı, diğer akımlarda bahsedilen akıların endüktansları yerine alınabilir. Grafik yolla bulunacak diferansiyel endüktans, karışık akımda ilk yaklaşım olabilir. Kompansasyonu olmayan motorlarda endüki akı-ampersanım ilişkileri, alternatif ve karışık akım da [4] te esas kutup sargısı için yapıldığı gibi İncelenebilir.

Literatür,

1. TUSTİN, A. : Direct Current Machines for control systems. London. 1952.
2. ÇETİN t. : Induktivitäten bei Gleich-, Wechsel- und Mischstrom. Archiv für Elektrotechnik, 50. (1965) S. 105-111.
3. ÇETİN t. : Eine Definitionserweiterung und Berechnung der Induktivitäten bei Gleich- und periodischem Strom. Archiv für Elektrotechnik 50 (1965) S. 184-189.
4. ÇETİN t. : Felddurchflutung und Felddauptinduktivität bei Mischstrom-Triebmotoren, ETZ-A Bd. 85 (1964), S. 501...506.

Ord. Profesör Salih Murat Uzdilek'i Kaybettik

İstanbul Teknik Üniversitesi eski öğretim üyelerinden tanınmış fizik bilgini Ord. Prof. Salih Murat Uzdilek, 4/Arahk/1967 günü vefat etmiştir.

1891 yılında İstanbul'da doğan Uzdilek, Bahriye Mektebi, Yüksek Mühendis Mektebi (Teknik Üniversite) ve Kobert Kolej'de öğretim üyeliği/ yapmıştır. 1944'te İstanbul Teknik Üniversitesi Makine Fakültesi Fizik Kürsüsü Ordinaryüs Profesörü olmuş, 1956 da Maden* Fakültesi Dekanlığına getirilmiştir.

12 telif 7 çeviri eseri bulunan Merhum'a Tanrıdan Rahmet kederli ailesine başsağlığı dileriz.