

Lineer Olmayan Elektroteknikte Devre Parametreleri ve Doğru, Alternatif ve Karışık Akımda Endüktanslar

Yazan :
İlhami ÇETİN
Dr. Yük. Müh.

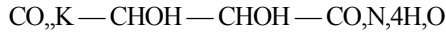
A — Lineer olmayan elektroteknikte devre parametreleri :

1. Çalışmaya genel bakış :

Demir çekirdekli bobinlerin, transformatörlerin ve elektrik makinelerinin analitik incelenmesi evvelâ manyetik karakteristiğinin doğrusal kısmında başlamıştır. Ancak çok sonra, elektrik makinalarında ve diğer doyma arzeden cihazlarda görülen baş döndürücü gelişme, manyetik karakteristiğinin doğrusal olmayan kısmındaki problemleri incelemeye sevk etmiştir. Hakikaten elektrik makinalarının, transformatörlerin ve bobinlennin iktisadi olarak yapılması, manyetik çalışma noktasını manyetik karakteristiğinin doğrusal olmayan kısmında seçmeye gerektirmektedir. Bu sebeple elektromanyetik büyüklükler alternatif ve karışık akımda sinüs biçimli olmayan bir değişmeye tabi olurlar.

Elektrostatikte, manyetik devrelerdeki kıymetli, bol bulunan ve yüksek manyetik geçirgenlikli demirin yerini tutan bir yalıtkan madde yoktur. Hakikaten kullanılmakta olan hava, kâğıt ve yağ gibi yalıtkanlar küçük, fakat elektrik alan şiddetine bağlı olmayan bir dielektrik sabiteye sahiptirler. Yüksek bir dielektrik sabite ancak kutuplu bir yalıtkanın polarizasyonu meydana gelebilir. Meselâ, hareketli jnole-kullere sahip suda izafi dielektrik sabite 81 olduğu halde, dıpollerin donmuş olduğu buzda bu miktar 2 ilâ 3 e düşer.

Karakteristiği doğrusal olmayan dielektriğin klâsik örneği.



formüllü Senyet (Seignette) tuzudur, izafi dielektrik sabitesi 10000 e kadar yükselebilen bu madde, demire benzer özellikler göstermektedir. Filhakika histerizis çevrimu, remanansı, Curie noktası vardır ve Weiss sahalarından meydana gelir. Ferromanyetik maddelerin özellikleri ile olan bu benzerlik dolayısıyla, yüksek dielektrik sabiteli ve lineer olmayan karakteristiki maddele re ferroelektrik sıfatı verilmektedir. Zamanla kalyumfosfat gibi başka ferroelektrik maddeler bulunmuştur. Böyle yalıtkan maddeler artık tek-

nikte büyük ölçüde kullanılmaya başlanmıştır. Bunlar arasında titan dioksit bağlantıları sayılabilir. Titanat karışımı seramiklerden yapılan ve yüksek frekans tekniğinde çok miktarda kullanılan bu kondansatörler, hafif ağırlığa ve küçük hacme sahip olduklarından uygulamalarda çok kıymetli olmaktadır.

Yüksek dielektrik sabitli yalıtkanlardan yapılan kondansatörler lineer olmayan bir karakteristik arzettiklerinden, manyetik karakteristiğinin doğrusal olmayan kısmında görülenlere benzer özelliklere sahiptirler. Bu bakımdan çözümlerinin paralel metotlara dayanması beklenebilir.

Gerilime bağlı dirençler de doğrusal olmayan karakteristikleri ile problemlerde lineer olmayan durumun güçlüklerini arzederler. Bugünkü teknikte fevkalâde önemli yerler işgal eden bu çeşit dirençler arasında, ıvalı ve yarıiletkenli! redressörler, radyo lâmbaları, yarıiletkenli! diyotlar ve triyotlar, parafudrlar ile koruma, ölçme otomasyon ve muhabere tekniğinde kullanılan müh telif dirençler sayılabilir.

Lineer olmayan durumda akım devrelerinin temel devre elemanları endüktans, kapasite ve direnç teker teker veya beraber doğrusal olmayan bir karakteristiğe sahip olabilirler. Fakat lineer olmayan durumdaki problemlerin sistematik incelenmesi, esas devre elemanları için evvelâ teker teker çözüm araştırmayı gerektirir. Eldeki çalışmada bu yol takip edilecektir. Çözümler genellikle kararlı durum için, doğru ve periyodik akımda araştırılacaktır.

Birçok harmonikten meydana gelen elektromanyetik büyüklüklerin incelenmesi sabit devre parametrelerinde (R, L, C) kolaydır, çünkü muhtelif ikaz büyüklüklerine tekabül eden çıkış büyüklükleri birbirlerine bağlı olmadan teker teker hesaplanabilir. Diğer bir ifade ile burada üstüste binme prensibi geçerlidir. Buna mukabil karakteristiklerin doğrusal olmayan kısmında üstüste binme prensibi uygulanamaz. Çıkış büyüklükleri birbirine tesir etmeden ilâve edilemez. Her ikaz büyüklüğü aynı devre parametrelerine sahip değildir. Diğer taraftan bir ikaz büyüklüğüne ait devre parametreleri yalnız bu ikaz

büyüklüğüne değil, diğer ikaz büyüklüklerine de bağlı olurlar. Bugün karakteristiklerin doğrusal kısmındaki temel problemler hemen hemen tamamen nihai şekilde çözüldüğü halde, doğrusal olmayan kısma alt problemlerin çoğu bu -neticeden uzaktır.

Teorik -elektroteknikğin temel kavranılan genelleştirme evvelâ doğru gerilimde ve devre elemanlarının doğrusal karakteristiklerinde tanımlanır. Bundan sonra, güçleştirici şartlar olan değilgerilim ve akım ile doğrusal olmayan karakteristiklere geçilir. Çalışma incelemelerde bu plâna uyacaktır. Buna mukabil bir çok kaynaklarda, doğrusal olmayan karakteristikler için bilhassa periyodik gerilim ve akımda, doğrusal durumdaki temel devre parametrelerinin kullanılmasından vazgeçildiği görülmektedir. Direnç için gerilim " ve akım, endüktans için akı¹ ve akün, kapasite için gerilim ve yük kullanılarak uygulanan böyle metodların doğru neticeler verdiği muhakkaktır. Fakat bu gibi incelemelerde, doğrusal durumun parametrelerinden gitmekte ve bunları genelleştirmekte temel faydalar vardır. R, L ve C kavramlarının genelleştirilerek kullanılması, metodlarda ve düşünce tarzlarında birlik sağladığı gibi, mukayeseyi ve fiziksel anlamayı da kolaylaştırır. Meselâ direnç değerlerinin her durumda verebilmesi, dirençleri niteleme ve boyutlama bakımından da çok önemlidir.

Çalışma ayrıca ortam parametreleri özgül direnç, manyetik geçirgenlik ve dielektrik sabiteyi de devre parametrelerinin metodları ile inceleyerek gayet sistematik, tutarlı ve fiziksel bir bütünü teşkil etmektedir.

Z. lineer olmayan elektroteknikğe genel bakış *

2.1. Bütün elektriksel olayları kapsayan genel denklemler :

• Klâsik teorik elektroteknikğin konusu olan elektriksel olaylar, bilindiği gibi, 4 Maxwell denklemleri

$$\text{rot } H = I + \dot{D} \quad \text{• (1)}$$

$$\text{rot } E = -\dot{B} \quad \text{• (2)}$$

$$\text{div } B = 0 \quad \text{• (3)}$$

$$\text{div } D = \rho_p \quad \text{• (4)}$$

ile kapsanır. Bu diferensiyel denklemlerde bilinmeyen olarak geçen 4 esas elektromagnetik büyüklük ile bilinen olarak geçen 2 büyüklük şunlardır :

Bilinmeyenler :

1. E : elektrik alan şiddeti
2. D : elektrostatik endüksiyon
3. B : magnetik endüksiyon
4. H : magnetik alan şiddeti

Bilinenler :

1. I : akım yoğunluğu p :
2. yük yoğunluğu

Tamamen genel geçerlikte olan yukarıdaki 4 diferensiyel denklemlerle özetlenen Maxwell teorisi elektriksel olayları makroskopik yünden inceler. Bu görüşte maddesel ortamın molekül, atom ve elementer parçacıkları ile teker teker meşgul olunmaz. Elektriksel olayları mikroskopik yünden ele alan Lorenz teorisi ise, - atomların içindeki ve aralarındaki fiziksel olarak mevcut elektromagnetik büyüklükleri inceler. Maxwell teorisindeki elektromagnetik büyüklükler, maddesel bir ortamın herhangi bir noktasında fiziksel olarak mevcut olmayıp, bir çok atom ihtiva eden küçük hacim bölümlerinde tanımlanan ve ölçülebilen ortalama değerli büyüklüklerdir. Bu inceleme tarzına örnek olarak p yük yoğunluğunun Q yükünün V hacmine göre oranı ile yapılan tanımı ele alınacak olursa,

$$AQ \quad \text{• (5)}$$

AV»», AV yerine, e makroskopik hacim bölümü ile

$$p = \lim_{AV \rightarrow e} \frac{AQ}{AV} \quad \text{• (6)}$$

yapılmasının daha doğru olacağı anlaşılır.

Maxwell denklemlerinin elektriksel olaylarda aranan bilinmeyenleri veremeyecekleri iki türlü görülebilir :

a. Fiziksel olarak :

Elektriksel olaylar belli bir ortamda geçtikleri halde, Maxwell denklemleri ortamın özelliklerini kapsamamaktadır. Bu sebeple aranan çözümleri tam olarak vermeleri imkânsızdır.

b. Matematik olarak :

Maxwell diferensiyel denklemlerini kartezyen koordinat sisteminde yazarak görüleceği gibi, bilinmeyen sayısı denklemler sayısından fazladır. Netice olarak, elektriksel olayları kapsayan Maxwell denklemlerinin çözülebilmesi için ortamın

Bu kısım Türkiye Bilimsel ve Teknik Araştırma Kurumu tarafından desteklenen MAG -69 sayılı araştırma projesinden alınmıştır.

özelliklerini ifade eden üç denklemin daha yazılması gerekir.

$$1 = -E \quad (7) \quad (8)$$

Bu denklemlerdeki ortamın özelliklerini (9) kapsayan ϵ : dielektrik sabiti, μ : magnetik geçirgenlik σ : özgül iletim büyüklüklerine «ortam parametreleri» denmektedir.

(1) - (4) ve (7) - (9) da verilen 7 denklem vasıtasıyla, başlangıç ve sınır şartları bilinen herhangi bir elektromagnetizm problemi prensip olarak çözülebilir. Bu yedi denklem elektromagnetik olayları en genel anlamda kapsar.

2.2. Ortamın özelliklerine göre ortam parametrelerinin biçimleri :

Gerek elektriksel olayların geçtiği ortamın fiziksel nitelikleri, gerek çözülecek genel denklemlere uygulanan matematik metotlar, ortam özelliklerini aşağıdaki gibi sınıflandırmaya sevk etmiştir.

a. İzotrop ortamlar :

Ortam parametreleri, ortamın herhangi bir noktasında elektromagnetik büyüklüklerin doğrultularına tabi değildir.

b. İzotrop olmayan ortamlar :

Ortam parametreleri ortamın herhangi bir noktasında elektromagnetik büyüklüklerin doğrultularına göre değişir. Ortamın kristal yapısından doğan bu durumda, meselâ, D 'nin her bileşkesini üç ayrı ϵ ile E 'nin her bileşkesine

$$\epsilon_x \ll \epsilon_y + \epsilon_z \quad \epsilon_y \ll \epsilon_x + \epsilon_z \quad \epsilon_z \ll \epsilon_x + \epsilon_y \quad (10)$$

şeklinde bağlıdır. Dolayısıyla ϵ 9 bileşeni! bir tensör olur.

c. Lineer ortamlar :

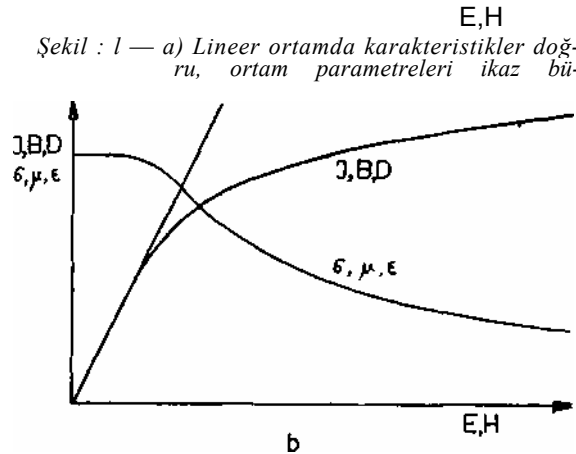
Ortam özelliklerini kapsayan denklemlerin herbirinde bir ikaz büyüklüğü değişirse, ilişkin ortam parametresi sabit kalır. Grafikte göstermede (Şekil la) karakteristik başlangıç noktasından geçen bir doğrudur. Böyle karakteristiklere lineer (doğrusal) karakteristikler denir, izotrop lineer ortamlarda ortam parametreleri, ortamın herhangi bir noktasında doğrultuya bağlı olmaksızın sabittir, izotrop olmayan lineer ortamlarda ise ortam parametreleri doğrultuya göre değişir, fakat belli bir doğrultu için sabit kalır. Her iki durumda da ortam denklemleri lineerdir.

d. Lineer olmayan ortamlar :

Ortam denklemlerinde ikaz büyüklükleri değişince, ortam parametreleri de değişir. Değişen elektromagnetik büyüklüklerin doğru veya küçük frekanslı büyüklükler olduğu farzedilir. Grafikte göstermede (şekil lb) karakteristik başlangıç noktasında doğrusal olan bir eğridir. Böyle karakteristiklere lineer olmayan karakteristikler denir. Histerizis olduğunda başlangıç noktasından geçmezler. İzotrop ortamlarda magnetik karakteristik elektromagnetik büyüklüklerin doğrultusuna tabi değildir. Hem lineer, hem de izotrop olmayan ortamlarda elektromagnetik büyüklüklerin her doğrultusu için ayrı bir karakteristik mevcuttur.

, f

3.B.D



2.3. Lineer olmayan elektroteknikğin tanımı ve kapsamı :

Lineer elektroteknik lineer ortamda geçen, lineer olmayan elektroteknik de lineer olmayan ortamda geçen elektriksel olayları inceler.

Görüldüğü gibi iki elektroteknik, esas olarak, ortam denklemlerindeki ortam, büyüklüklerinin ikaz büyüklüğüne göre değişip değişmemesi ile birbirinden ayrılmaktadır. Diğer bir ifade ile lineer elektroteknikte ikaz büyüklüğüne bağlı olmayan

$$\begin{aligned}
H &= f(H) = \text{sabit} \\
H &= f(E) = \text{sabit} \quad \dots \quad (11)
\end{aligned}$$

bağlantıları, lineer olmayan elektroteknikte ise ortam parametrelerinin değişken ikaz büyüklüğüne göre değişmelerini gösteren

$$\begin{aligned}
H &= f(E) \quad \mu = f(E) \quad \dots \quad (12)
\end{aligned}$$

fonksiyonları geçerlidir.

Şekil la daki gibi, ikaz değişkenlerinin bütün değerleri için ortam parametrelerinin sabit kaldığı ortamlar, esas olarak lineerdir ve lineer elektroteknikğin kapsamına girerler. Şekil Ib deki gibi, ikaz değişkenlerinin yalnız başlangıç kısmındaki değerleri için ortam parametrelerinin sabit kaldığı ortamlar, karakteristiğın doğrusal kısmında lineerdir ve yalnız bu kısımda lineer elektroteknikğin kapsamına girerler. Karakteristiğın eğri kısmına ilişkin problemler lineer olmayan elektroteknikğin kapsamına girerler.

Gerek lineer olan, gerek lineer olmayan durumda ortam parametreleri ayrıca frekansa ve ısı derecesine göre değişebilir. Fakat ortam parametrelerini değiştiren bütün etkenlerin aynı anda tesir etmesi matematik bakımından çözümleri fazla güçleştirdiğl gibi, pratik bakımdan da fazla bir kıymet ifade etmez. Diğer taraftan evvelce belirtildiğ gibi, her iki çeşit teorik elektroteknikte izotrop olan veya olmayan ortamlar bulunabilmektedir. Pratikte en fazla görülen, lineer olmayan izotrop ortamlarıdır. Eldeki çalışma bu gibi ortamlarda görülen bazı ana problemleri incelemektedir.

2.4. Lineer olmayan elektroteknikğin ana problemleri :

Yukarıdaki açıklamalarda belirtildiğ gibi, lineer olmayan elektroteknik ortam parametrelerinin ikaz büyüklüğüne göre değişken olması Ue nitelenmektedir. Parametre değişmelerinin tek başına gözüktükleri ve lineer olmayan elektroteknikğin ana problemlerini teşkil eden elemanlar, sistematik bir inceleme için en basit olarak şu şekilde sınıflandırılabilir :

a. Lineer olmayan endüktanslar :

Magnetik geçirgenliğın değişken olduğu demir çekirdekli bobinler ve sargılar elektroteknikğin gelişmesinde en önemli etkenlerdendir. Böyle bobinlerde ve sargılarda magnetik geçirgenlik magnetik alan şiddetinin fonksiyonu olarak değişir. $\mu - I$ magnetik karakteristiğ lineer değildir. Endüktans sabit kalmaz ve geçen akıma göre değişir.

Magnetik alan için uzayın iletkenin dışı ve içi olmak üzere ikiye bölünmesiyle, endüktanslar de iki sınıfa ayrılır.

a.1. Dış endüktanslar :

iletkenler dışında kalan dış magnetik halkalanma akılarının hasil ettiğ endüktanslardır. Dış, akı devresinde magnetik geçirgenlik sabitse, magnetik karakteristik lineerdir, değişkense magnetik karakteristik lineer değildir. Birinci durumda, dış endüktans sabit, ikinci durumda değişkendir ve lineer olmayan elektroteknikğin kapsamına girer.

a.2. iç endüktanslar :

Akım geçiren iletkenlerin içinde kalan iç magnetik halkalanma akılarının hasil ettiğ endüktanslardır. Akım devresinde magnetik geçirgenlik sabitse, iç endüktans değişmez ve lineer elektroteknikte incelenir. Akım devresinde magnetik yani demirden iletken bulunuyorsa, iç akı devresinde magnetik geçirgenlik değişkendir; dolayısıyla iç endüktans sabit değildir ve lineer olmayan elektroteknikğin kapsamına girer.

iç endüktans kuvvetli akım sargılarında, iletkenler demirden değilse, genellikle dış endüktansa nazaran azdır. Buna rağmen iç endüktans- ta olduğu gibi iletkenlerden geçen magnetik akıların hasil ettiğ endüktanslar, bütün elektrik makinalarında (rotor ve stator iletken boşluklarında) ve transformatörlerde hesaplanır. Fakat pratikte bu endüktanslar, magnetik geçirgenliğın değiştiğ doyma durumunda hesaplama metotları bilinmediğ için, sabit alınır veya değişmeleri ampirik bir şekilde nazarı itibare alınır. Elektrik hatlarında ve kablolarda da iç endüktanslar daima hesaplanır. Eğer iletkenlerde kısmen veya tamamen demir varsa iç endüktansın önemi artar. Bilhassa yüksek gerilim hatlarının iletkenlerinde bugünkü teknik daima çelik teller de kullandığından, bu gibi hatların iç endüktanslarında magnetik geçirgenlik değişebilir. Zayıf akım devrelerinde ise iç endüktans genellikle çok önemli bir büyüklüktür.

b. Lineer olmayan kapasiteler :

Demirin karakteristiğine benzeyen bir lineer olmayan karakteristiğe sahip baryum titanat ve benzer maddelerin dielektrik olarak kullanıldığı kondansatörlerde, dielektrik sabite elektrik alan şiddetinin fonksiyonu olarak değişir. Böyle kondansatörlerin $Q - U$ karakteristikleri lineer değildir. Kapasiteler sabit kalmaz ve tatbik edilen gerilime göre değişir.

c. Lineer olmayan dirençler :

özgül direncin (veya özgül iletgenliğın) değişken olduğu bu dirençler pratikte fevkalade önemlidir. Bu sınıfa yariletken diotlar, transistörler, bütün redressörler, parafudur yapmağa

yarayan silisyum karbit dirençler, elektronik lâmbalar v.s. dahildir. Böyle dirençlerde özgül direnç elektrik alan gıddetine göre değişir. $U - I$ karakteristiği lineer değildir. Direnç sabit kalmaz ve gerilime göre değişir.

Pratikte bu problemler teker teker veya beraber bulunabilir. Eldeki çalışma, lineer olmayan elektroteknğin yukarıda sınıflandırılan ana problemlerinin incelenmesine katkıda bulunmaktadır.

B — Doğru, alternatif ve karışık akımda endüktanslar * :

Genel Bakış :

Elektroteknğin teorisinde ve uygulanmasında doğrusal olmayan magnetik karakteristiklerin kesin önemi kargısında, endüktansların esaslı bir incelenmesi lüzumlu görülmektedir. Çalışma evvelâ bir üskavram olarak alınır esas endüktansların tanımlarını, değişmelerini ve uygulanmalarını incelemektedir. Esas endüktanslar akı endüktansı, diferensiyel endüktans ve enerji endüktansıdır. Sonra, endüktansların periyodik akım için kullanılmasında yerleşmiş üç imkândan bahsedilmektedir. Diferensiyel endüktans ile akımı ve akı değişkenlerinin nispeten küçük değişmelerini tamamen kapsamak mümkündür. Harmonik endüktanslar ise yalnız aynı mertebeden harmonikler için geçerlidir. Eşdeğer endüktanslarda da akı dağılımı hiç kullanılmayıp, kayıpların sakınımi esas alınmaktadır. Magnetik karakteristiğin doğrusal olmayan kısmının endüktansın hangi fiziksel tanımının geçerli olduğu, şimdiye kadar incelenmemiş gibi gözüküyor.

1. Doğru akım endüktanslar :

Akım devrelerinin hat biçimli iletkenler farzederek geometrik idealleştirilmesi, bilindiği gibi mümkün değildir, zira o zaman iletkenlerden sonsuz küçük mesafede magnetik alan yoğunluğu, dolayısıyla akı ve magnetik enerji sonsuz büyük olurdu. Bu sebepten iplik biçimli iletkenler farzedilir.

Bobinlerin ve sargıların magnetik devrelerinde çoğunlukla, yüksek geçirgenliğinden istifade edilen demir çekirdekler mevcuttur. Bundan dolayı magnetik karakteristikleri doğrusal olmaz. Bu genel durum için, aşağıda öz endüktansın aslında bilinen tanımları hatırlatılacaktır. Bu arada yeni isimlendirmeler de kullanılacaktır.

1. Akı özendüktansı: Verilen bir akım devresinde y halkalanma akısının, akıya sebep olan I akım şiddetine oranıdır.

$$\frac{\Phi}{I} = \dots \quad (D)$$

2. Diferensiyel özendüktans : Endüksiyon kanununa göre akım devresinde doğan U elektrik çevrim geriliminin, ilişkin akımın zamanla değişimine eksi oranıdır. Endüksiyon kanununun ifadesi bu tanımda yerine konarak, diferensiyel endüktansın aynı zamanda akımın akıya göre türevi olduğu görülür.

$$U = - \frac{d\Phi}{dt} = \frac{dV}{dt} = \frac{dV}{di}$$

Her iki tanım ifadesi özdeşdir. Birincisi ölçme için, ikincisi magnetik karakteristik verildiğinde kullanışlıdır, inen kısmı bir karakteristikte eğim, dolayısıyla diferensiyel endüktans eksi olacaktır. Teknik yayımlarda bu endüktans için «dinamik, diferensiyel endüktans, bindirme ve alternatif akım endüktansı» isimleri de bulunmaktadır. Diferensiyel endüktans ismi tanımın matematik biçimini nazarı itibara almaktadır. Tanımın fiziksel muhteviyatına göre düşünülrse, «gerilim endüktansı» teklif edilebilir.

3. Enerji özendüktansı: Akı sahasında toplanan W magnetik enerjisinin iki mislinin ilişkin I akımının karesine oranıdır.

$$W = \frac{1}{2} \int \mathbf{H} \cdot d\mathbf{l} = \frac{1}{2} \int \mathbf{J} \cdot d\mathbf{V} \quad \dots \quad (3)$$

Magnetik karakteristiğin L^B sabit endüktansı doğrusal kısmında elde edilir. Her üç endüktans

$$\Phi = L \cdot I$$

$$W = \frac{1}{2} L I^2 \quad \dots \quad (4)$$

tanımının özdeşliği için gerekli ve yeterli şart, akı ve akımın birbirine oranlı olmasıdır.

Yukarıda tanımlanan her endüktans önemli bir büyüklüğün ölçüsüdür: L^F halkalanma akısı için, L^D elektrik çevrim gerilimi için ve L^E magnetik enerji için. Her defasında müstakil değişken akıdır. Teklif edilen isimlendirmelerle yek diğerinden tefrik edilen yukarıdaki endüktans «esas endüktanslar» kavramı altında birleştirilecektir. Eğer akımın müstakil değişken olduğu farzedilirse, ters esas endüktansların kullanılması daha uygundur.

$$\frac{\Phi}{I} = \frac{1}{W} \int \mathbf{H} \cdot d\mathbf{l} = \frac{1}{W} \int \mathbf{J} \cdot d\mathbf{V} \quad \dots \quad (5)$$

Kavram olma bakımından, bu büyüklükler esas endüktanslar] a aynı değerdedir. Pratikte, akımın verilmiş olduğu durumlarda kullanılmaları fayda sağlar.

* Yazan bu çalışması almanca olarak «Archiv für Elektrotechnik» 1965, No, 2, S. 105 - H1 de çıkmıştır.

1.1. Esas endüktansların diğer ifadeleri, mukayesesi ve değişmesi:

Bir bobinin w sarımının hepsinden aynı akım geçerse ve hepsi aynı I akısı ile halkalanmış ise,

(6)

yazılabilir. Sarım akılarının farklı olmasında sarım ortalama akısı olarak

$$= E \quad w \quad (7)$$

kullanılırsa, ilk basit bağlantı geçerliğini muhafaza eder. Sarım ortalama akısı fiziksel bir mevcudiyete sahip olmayıp, tamamen bir hesap büyüklüğüdür. Elektrik makinelerinin hesaplanmasında} © ampersanının fonksiyonu olarak elde edilir.

$$= w \quad (8)$$

bağlantıları tanımlarda yerleştirilmek suretiyle esas endüktanslar için

$$= \frac{r^2 D}{\dots} \cdot \dots \quad (8)$$

ifadeleri bulunur. Kısaltma olsun diye semboller-dekl m bundan böyle bırakılacaktır. Verilen bir magnetik karakteristikte, şekil 2 deki semboller ile esas endüktansların ölçüleri için

$$L_{j..} = w^2 \dots = w^2 \tan \quad (10)$$

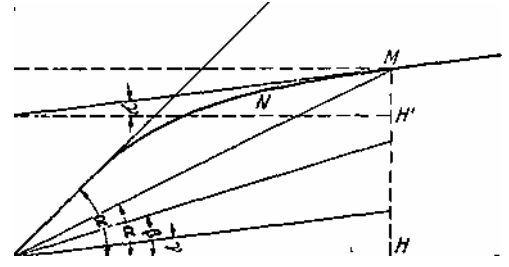
$$L_K = -O M' M N = w^2 \tan /3 ,$$

ifadeleri çıkar. Şekil 2 den alanlar için ayrıca $O'M'M$ alanı $\triangle O'M'MN$ \triangle alan $\triangle O'M'M$ alanı bulunur. Bundan endüktanslar için

$$\wedge < L < L < L_n = \hat{t}^2 \tan ev', \dots \dots (U)$$

eşitsizliği çıkar. Burada L^B doğrusal kısımdaki sabit endüktansdır. Netice olarak doğrusal olmayan kısımda esas endüktanslar daima farklı ve değişkendirler. Meselâ şekil 2 deki M noktası için

$$L_F = 0,5 L_B, L_n = 0,312 L_B, L_D = 0,125 L_B. \dots \dots (12)$$



Şekil: 2 — Esas endüktansların mukayesesi (açık lama metindedir).

hesaplanmıştır. Karakteristik eğiminin monoton bir şekilde küçülmesi, esas endüktanslar arasında nitelendirici bir eşitsizlik vermektedir. En büyük endüktans akı endüktansıdır, sonra enerji endüktansı gelmektedir. Diferensiyel endüktans en küçüktür. Yukarıda verilen ve yukarıdan çok farkedilen endüktans değerleri, kesin bir nitelendirme kullanılmadan «endüktans» in ne kadar aldatıcı olabileceğini göstermektedir. Ayrıca magnetik karakteristiğin doğrusal kısmında elde edilen ve akı, elektrik çevrim gerilimi ve magnetik enerji için bütün esas endüktans tanımlarında geçerli olan basit ifadelerin, doğrusal olmayan kısımda geçerliklerini yalnız belli bir esas endüktans için muhafaza ettiklerine dikkat edilmelidir.

Genel durumda bir i sargısının ortalama akısı muhtelif ampersanlara tabi olsun. Diğer bütün ampersanlar parametre olarak sabit tutulursa, karakteristikler demetinin bir eğrisi elde edilir.

$$y = w O_m \ddot{o} = w I \quad (13)$$

şartıyla esas endüktanslar için

$$\sim \langle \langle \dots \rangle \rangle$$

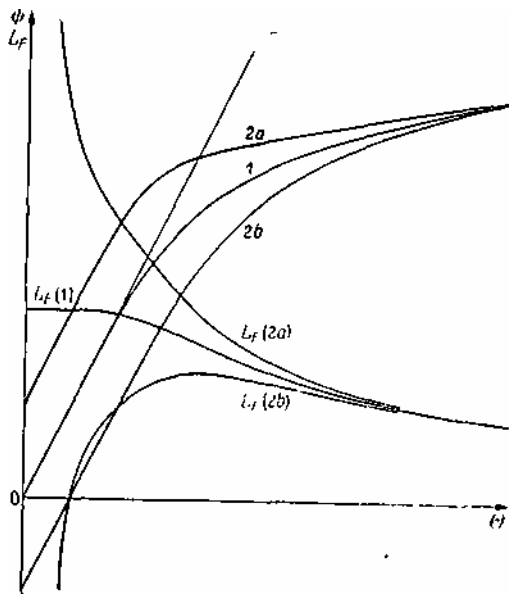
$$\langle \rangle = \langle \dots \rangle$$

d*

yazılabilir. Görüldüğü gibi ifadelerde parsiyel diferensiyasyon gerekmektedir. Buna misâl olarak kolektörlü makinelerde, esas kutup ve endüvül ampersanlarına tâbi olan esas kutup akısı verilebilir. Mamafih bileşke akı sık sık yalnız incelenen sargının akımı ile ilişkin kılınmaktadır. Böylece tanımlanan endüktanslar, mümkün olduğu zaman parametre olarak nazan itibara alman diğer ampersanlara da tabidir.

Endüktansların kesin doğrulukta hesabı sabit magnetik geçerlikte Neumann formülü ile mümkündür. Bu formül, sarımların durumunun tam

bilinmesini • gerektirir ki bu kuvvetli akım tekniğinde mevzu bahis olamaz. Elektrik makinelerinin hesaplamasındaki normal hassasiyet için, endüktansların ortalama magnetik karakteristik yardımı ile hesaplanması yeterlidir. Kolaylaştırıcı bu kabul ile histerizis çevriminin önemli genişlikte olduğu durumlarda, hakiki akı bağıntıları bilhassa başlangıç noktasında dalma memnuniyet verecek şekilde kapsanmaz. Histerizis çevriminin görünürde sürekli değişmesi, bilindiği gibi Weiss sahalarının hareketleri dolayısıyla, küçük basamaklar dizisinden meydana gelir (Barkhausen atlamaları)'. Bu basamak biçimli değişme ile endüktans da değişikliğe uğrar. Remanans akısı ise sıfır olan ampersanı ile, şekil 3de görüldüğü gibi, sonsuz bir akı endüktansı verir. Bu belirsizliğin sebebi remanans akışını doğuran elektron akımlarının hesaba katılmamasıdır. Şekil 3 hissedilir bir histerizis çevriminde akı endüktansının değişmesini göstermektedir. Böylece pratikte endüktansların uygulanmalarının neden güçlükler arzettiği anlaşılır.



Şekil : 3 — Akı endüktansının ortalama magnetik karakteristik (eğri 1) ve histerizis çevrimi (eğri 2 a, 2 b) için değişmesi.

1.2. Esas endüktanslar arasındaki bağıntı. Bu endüktansların seçimi ve uygulanması :

Magnetik geçirgenliğin değişken olduğu genel durumda esas endüktanslar özdeş değildir. Aralarındaki bağıntı için

$$L_{12} = \frac{d\psi}{di} = \frac{A(L_F I)}{i^2}$$

bulunur. Değişken magnetik geçirgenlikte uygun endüktans tanımı, hesaplanan büyüklüğün en kolay kapsanması için temin edecek şekilde seçilir ki durumdan duruma kararlaştırılması gerekir. Bilhassa akı endüktansı akı hesaplamaları için, diferensiyel endüktans elektrik çevrim gerilimi için ve enerji endüktansı meselâ bir sargı devresinin açılmasında serbest kalan magnetik enerjinin tespiti için uygundur. Diferensiyel endüktans uygulanması ile endüksiyon kanununun biçimi magnetik karakteristiğin doğrusal olan ve olmayan kısımlarında aynı kalır. Halbuki akı endüktansı genişletilmiş bir ifadeyi gerektirir. Hakikaten her iki endüktansla endüksiyon kanunu genel olarak

$$U^* = di/dt$$

..... (16)

şeklinde yazılır. Endüksiyon kanununun sağ taraftaki mahzurlu yazılış şekline tanınmış eserlerde bile rastlanır. Sol taraftaki uygun ifadeyi teminden başka diferensiyel endüktans doğrusal olmayan devrelerde Herde bahsedilecek bir yaklaşık metodun uygulanmasını da mümkün kılar.

Yukardaki izahlarla bütün esas endüktansların, ayırım, yapılmadan, eşit önemde mütalâa edilmesi gerektiği çıkar. Bundan dolayı bir tek tarifin tercihi imkânsızdır. Bu sebeple bütün esas endüktansların kullanılması, bilhassa standartlar için çok arzu edilir. Halbuki meselâ amerikan standartlarında (American Standard definitions of electrical terms, S. 32) yalnız diferensiyel endüktans bulunmaktadır.

2. Peryodik akımda endüktanslar:

Tanımlan isin sabit büyüklükte doğru akım farzedilen esas endüktanslar, herhangi bir akımın ani değeri için de uygulanabilirler. O zaman esas endüktansların

$$\frac{d\psi}{dt}$$

(17)

ani değerleri elde edilir.

Magnetik devrelerinde ihmal edilebilecek madeni kısımları bulunan ve sargısı ıplık biçimli kabul edilebilen bobinlerde, yukarıdaki bağlantılar kararlı doğru akımdaki zamana bağlı olmayan aynı endüktansları verir. Bunun için muhtelif kesitlerde kamun pratik olarak değişmezliği farzedilmektedir. Bu farz toplu devre elemanlarında hemen hemen kararlı olarak alınabilen büyüklüklerin incelenmesine iyi netice vermektedir. Takriben dalga boyu uzunluğundaki bobinlerde akım muhtelif kesitlerde aynı olmadığından, endüktansda azalma olur. Bilindiği gibi

bu durumda, devre endüktans ve kapasitesi dağılmış farzedilir ve meselâ uzun hatlarda telgraf denklemi elde edilir. Kuvvetli akım tekniğinde görünen frekanslarda ve sargı uzunluklarında gerilim ve akım, elektromagnetik dalgaların devrede yayılmaları esnasında değişikliğe uğramazlar. Bu sebeple enduktanslar bu olaydan tesir görmezler. Buna mukabil yüksek frekanslarda kendini belli eden kapasite, endüktansı kompanse edebilir. Bobin o zaman kondansatör olarak çalışır. Her iki tesir de zayıf akım tekniğinde ve kuvvetli akımın geçici olaylarında önemli olabilir. Bilhassa dikkat edilecek bir husus da, endüktansların belli bir alan dağılımı için hesaplandıklarıdır. Geçici olaylarda alan dağılımı, kararlı olaylardakinden genellikle farklı olduğundan, lligln enduktanslar da yekdlgerinden değişik olacaktır. Bu durum bilhassa senkron makinelerin kararlı ve geçici olaylarını kapsayan enduktanslar da görülmektedir.

2 W

Pratikte kullanılan bobinlerin akım ve akı devrelerindeki madeni kısımlarında Fuko akımları akar. Eğer histerlisiz kayıplan ve Fuko akımlarının sebep olduğu akım ve akı sıkışması ihmal edilebilirse, peryodik akım için karakteristiğin doğrusal kısmında doğru akımdaki aynı endüktans bulunur. Doğrusal olmayan kısımda ise esas endüktanslar akı ve magnetik enerji gibi zamanla değişen büyüklüklerdir. Değişmeleri, histerizis kayıpları ile akı ve akım sıkışması dolayısıyla daha karışık bir hal alır. Bu bakımdan, diferensiyel endüktansla yapılan mahdut bir yaklaşık usul hariç, teknik yayınlarda esas endüktansların kullanılmasından vazgeçilmekte, bunların yerine zamanla değişmeyen harmonik endüktanslar ve eşdeğer endüktanslar kullanılmaktadır. Ancak bu endüktanslarda esas endüktansların temel niteliği mevcut değildir. Zira esas endüktanslar sebep ve etki arasında genel geçerli bağlantılar olup, akı dağılımından fiziksel bir anlam alırlar. Başka bir çalışmada esas endüktansların uygulanmasını peryodik akım durumuna genişletmenin mümkün olduğu gösterilecektir. Böylece şimdiye kadar mevcut boşluk kapanacak ve magnetik karakteristiğin doğrusal olmayan kısmında peryodik akım için fiziksel bir tarif bulma meselesi aydınlanmış olacaktır. Aşağıda, bahsedilen çözüm haricinde manyetik karakteristiğin doğrusal olmayan kısmı için endüktansları kullanmanın üç imkânından bahsedilecektir.

2.1. Doğrusal olmayan magnetik karakteristiklerin yaklaşık incelenmesinde esas endüktanslar:

Bahsedilecek yaklaşık inceleme genellikle bütün doğrusal olmayan karakteristiklerde değişkenlerin nispeten küçük değişmeleri halinde mümkündür. M çalışma noktasının civarında magnetik karakteristik yerine teğeti (Bak. Şekil 1)

(18)

alınır. $\frac{1}{j} \frac{d}{dt}$ teğetin ordinat eksenini ile kesişme noktasının ordinatıdır. Doyması olan bir bobin böylece, L_{DM} sabit diferensiyel endüktanslı ve $\frac{1}{j} \frac{d}{dt}$ remanans akılı bir doğrusal bobine eşdeğerdir. Bu büyüklükler çalışma noktasının yerine tabidirler. M çalışma noktasına ait büyüklükleri M ile niteleyerek esas enduktanslar için

$$\frac{1}{j} \frac{d}{dt} = \frac{1}{j} \frac{d}{dt} \frac{1}{M}$$

(19)

bulunur. Çalışma noktası civarı doğrusal kılınmış olmasına rağmen, bütün esas endüktanslar birbirinden farklıdır. Akı ve enerji endüktansları ayrıca çalışma noktasımkinden farklıdır. Aradaki fark çalışma noktası diferensiyel endüktansı ve I_M/I oranı tarafından tayin edilmektedir. Yalnız diferensiyel endüktans akıma tâbi olmamakta ve çalışma noktasıninkine eşit kalmaktadır. Böylece teğetin karakteristiği memnuniyet verici bir şekilde kapsayabildiği kısımda, yani akımın ve akımın genellikle ufak değişmeleri için, diferensiyel endüktansı sabit bir büyüklük olarak kullanma imkânı bulunur. Bazı özel durumlarda teğet karakteristikle geniş bir alanda çakışabilir.

ön mknatıslanma durumunun incelenmesi de ilginçtir. Bindirilen akım ve akı büyüklükleri \hat{I} , \hat{A} için esas endüktans tanımlarının uygulanması

$$\begin{aligned} -r A - \frac{A V}{\hat{A} \hat{I}} &= -j \frac{d}{dt} \frac{\hat{A} V}{\hat{A} \hat{I}} < \hat{A} \hat{I} \\ &= -4- \quad \hat{A} \hat{I} \end{aligned} \quad (20)$$

verir. Bindirilen büyüklüklerin akı endüktansına, diferensiyel endüktans da denir. Esas endüktanslar birbirlerine göre evvelce belirtilen büyüklük durumlarını muhafaza ederler. I_M .&yr alanı I_M ve $A I$ akım devreleri arasındaki magnetik enerjiyi göstermektedir. Bununla karşılıklı

endüktansların akım devrelerinin kapanış sırasına bağlı olduğu kolayca gösterilebilir. Bindirilmiş büyüklüklerin diferensiyel büyüklükte olduğu özel durumda, bu büyüklüklere ait bütün eaaş endüktanslar çalışma noktasındaki diferensiyel endüktansa eğit olurlar. Aynı neticeye, karakteristik yerine, çalışma noktası etrafında teğeti alınarak varılır. Diferensiyel endüktansın, büyüklükleri periyodun yalnız küçük bir kısmında kapsamak için kullanıldığı evvelki durumun aksine, küçük dalgalanmada değişken bindirilmiş büyüklüklerin tamamı, bütün periyod boyunca diferensiyel endüktans ile kapsayabilir. Aynı maksat için karakteristik bir giriş ile doğrusal kılınabilir. Bu doğrunun tayin ettiği endüktansa diferensiyel değil, diferensiyel endüktans denir. Dikkat edilecek bir husus da, muhtelif kaynaklarda [1..4] teğet ile yapılan yaklaşık usulün, diferensiyel endüktansı kullanmadan uygulanmasıdır. Bundan başka mevcut literatürde hangi endüktans fiziksel tanımının bütün periyod için daima ve doğru bir şekilde geçerli olduğu araştırılmamışa benziyor.

Doğrusal olmayan bir karakteristiğin yerine belli bir sahada teğetini koyarak mümkün olan kolay analitik inceleme, bir çok uygulamada kullanıldığından önemlidir. Kesin olarak yalnız diferensiyel değişimler için geçerlidir, fakat arzu edilen hassasiyete göre uygun bir sahada kullanılabilme imkânına sahiptir. Senkron makinelerin kararlılık araştırmasında küçük gelirim değişimlerinin denklemi meselâ ([3] te magnetik karakteristiğin yerine teğet alınarak yazılıyor. Karışık akım motorlarında görüldüğü gibi bindirilmiş büyüklüklerin hesaplanmasında, magnetik karakteristik yerine teğet veya giriş alınabilir. Bundan başka doğru akıma küçük genlikli bir alternatif akım bindirerek, bazı şartlar altında diferensiyel endüktansı ölçme imkânı vardır.

2.2. Harmonik endüktanslar :

Demir çekirdekli bobinlerde periyodik akım ve akı, bileşenleri arasında bir faz farkı vardır. Harmonik endüktansları aynı m mertebesinden akı ve akım harmoniklerinin genliklerinin oranı olarak tanımlanır.

$$\frac{u}{i} = \dots \quad (21)$$

Kompleks harmonik endüktansı ayrıca ilişkin akı ve akım harmonikleri arasındaki faz açısını nazarı itibara alır (sembol üzerindeki nokta kompleks bir büyüklüğü gösterir)

$$\frac{1}{L} = I \quad \llcorner = \hat{A} - L, n \cdot L = L e^{-i*} \dots \quad (22)$$

m mertebesinden gerilim harmoniği için ilişkin reaktans

$$: -\ddot{u} = j m \langle a \cdot \cdot = \gg \text{ıı r} \gg L (\sin 71 + j \cos g) .$$

..... (23)

kayıpların bir direnç meydana getirdiğini göstermektedir. Ayrıca harmonik endüktansın reaktansa tesiri azalmaktadır. Kuvvetli akım tekniğinde aynı mertebeden akı ile akımın tepkin bileşeni harmonik endüktansı tanımını için kullanılır. Bu şekilde endüktans kompleks olamaz.

Harmonik endüktanslar sinüs biçimli titreşimler teorisini uygulamayı mümkün kılarlar. Fakat genellikle akımın ve akımın tamamını kapsamazlar. Meselâ doğrusal olmayan bir karakteristikte sinüs biçimli bir akı, esas akım harmoniğinin yanında üst harmonikler de mevcut olmasına rağmen, yalnız esas akım harmoniği ile ilişkin kılınmaktadır. Halbuki akı, akım harmoniklerinin tamamı tarafından meydana getirilmektedir. Sonra bu misâlde olduğu gibi, aynı mertebeden akı ve akım üst harmoniklerinden yalnız biri mevcut ise, ilişkin harmonik endüktansı tarif edilemez.

Akı sıkışmasının harmonik endüktans üzerindeki etkisi bazı basitleştirmelerle incelenmiş bulunuyor [5,6]. Sabit bir magnetik geçirgenlik ve pratik olarak sonsuz uzun bir demir çekirdek farzederek kompleks endüktans için genel şekilde bulunur. Burada d saç kalınlığı, »ve j jbi-

$$\frac{th - jfp}{i} > c \quad \bullet L_B \quad (24)$$

linen madde sabiteleridir. Kompleks endüktans p, kompleks frekansın fonksiyonudur. Kompleks sahada bulunan bu endüktans ifadesini genel şekilde reel sahaya aktarmak mümkün değildir. Esas harmonik endüktans için p = j < 0 alınarak

$$\bullet B > \\ L$$

$$\frac{1}{L} = \frac{\sin x + \cos x}{c \cdot \hat{x} - \cos x} \cdot L_B \quad x = d y n f u \cdot \overline{\cdot} \cdot i \cdot r \dots \quad (25)$$

hesaplanır. L_B nin katsayısı l den dalma küçüktür, çünkü saçlar içindeki akı sıkışması akımın azalmasına sebep olur. Seri şeklinde açarak esas harmonik endüktansı için

$$720^0 < x < 1,5 \quad (26)$$

yaklaşık formülü elde edilir. Paydası yuvarlak sayı haline konan üçüncü terim x g l için ihmal edilebilir. Yaklaşık fonksiyonun hatası

$x \Rightarrow 1,5$ için % 1 den daha azdır. Aynı formül, çalışına sahasında diferansiyel manyetik geçirgenlik sabit alınabildiği takdirde, kangik akımda diferansiyel endüktans için de geçerlidir.

2.8. Eşdeğer Endütanslar:

P kayıplarına sahip ideal olmayan bir bobinin yerine konabilen, aynı kayıplı eşdeğer bobinin ölçü yolu ile kolayca elde edilebilecek empedans bileşenleri için

$$\frac{P_{\text{fz}}}{U_c} = \frac{1}{77}$$

$$\cos \varphi = \frac{1}{77} \quad (27)$$

bulunur. Sembollerdeki «e» işareti efektif manasınadır, zira gerilim ve atam efektif değerlerle ölçülmektedir. Yukarıdaki endüktans genellikle, efektif akının efektif akıma oranı olarak tanımlanabileceği endüktanslardan farklıdır. Eşdeğer endüktanslar esasında vektör diyagramı ile incelemede kullanılamazlar, zira tanımındaki büyüklükler sinüs biçimli değildir. Bununla birlikte eşdeğer devrelerde vektör olarak kullanılmaları, kayıpların ve efektif değerlerin saklanması, sinüs biçimli olmayan büyüklükleri yaklaşık olarak sinüs biçimli olmayan büyüklükleri yaklaşık olarak sinüs biçimli farzetmeyi gerektirmektedir. Bu, periyodik akımda endüktansların kullanılması için üçüncü imkandır.

Harmonik endüktanslar ve eşdeğer endüktanslar zamanla değişmeyi önlerler, fakat akı veya atamın değişim şekline tabidirler. Verilen bir akı değişiminde akım genliğinin veya efektif değerinin fonksiyonu olurlar. Akı dağılımına dayanmadıklarından akım devresi için fiziksel parametre olarak görülmezler. Endüktansların temeli olan esas endüktanslarla bağlantı kurmadıklarına bilhassa dikkat etmelidir. Magnetik karakteristiğin doğrusal olmayan kısmında periyodik akım için bu bağlantıyı kuran hangi fiziksel endüktans tarifinin geçerli olduğu ayrı bir çalışmada incelenecektir.

Ö Z E T :

Bu çalışma evvelâ doğru akımdaki esas endüktanslar incelemektedir. Bu büyüklüklerin

aralarındaki fark, değişimleri, uygulanmaları ve birbirleri ile olan ilgileri görülmektedir. Tercih yapmadan esas endüktansların hepsine yer verilmesi tavsiye edilmektedir.

Magnetik karakteristiğin doğrusal olmayan kısmında endüktansların kullanılması üç şekilde olmaktadır. Karakteristik yerine çalışma noktası civarında teğetini alarak yapılan yaklaşık usulde, diferansiyel endüktans denklemlerde sabit bir büyüklük olarak kullanılır. Sinüs biçimli büyüklüklerin incelenmesinde kullanılan klasik usuldeki harmonik endüktanslar fiziksel nitelikte olmayan büyüklüklerdir, çünkü keyfi olarak aynı mertebeden atam ve ata harmoniklerini ilişkin kılırlar. Doyma gösteren atam devrelerinde ayrı ayrı incelenen harmonikler, bindirilmiş durumda birbirlerinden farklı harmonik endüktanslara sahiptirler. Ayrıca bu endüktanslar mevcut bütün harmoniklere tabidirler. Eşdeğer endüktanslar ise kayıpların ve efektif değerlerin sata-nımına dayanmaktadır. Netice olarak harmonik endüktanslarının ve eşdeğer endüktansların fiziksel nitelikte olmadıkları ve esas endüktanslara dayanmadıkları görülmektedir. Esas endüktansların uygulanmasını doğrusal olmayan bir karakteristikte periyodik akım için mümkün olan çözüm ayrı bir çalışmada açıklanacaktır..

Literatür

- [1] RICHTER, R. : ' Elektrische Maschinen, Bd V. Berlin : Springer 1950.
- [2] LEONHARD, A. : Allgemeines Verfahren für die Klärung der Selbsterregungsbedingungen bei elektrischen Maschinen Arch. f. Elektrotechnik 36 (1942) S. 201-220.
- [3] LEONHARD, A. : Spannungstabilität beim Zusammenarbeiten einer Asynchronmaschine mit ungefähr gleichgrober Synchronmaschine. Arch. f. Elektrotechnik 31 (1937) S. 27.
- [4] LAIBLE, TH. : Die Theorie der Synchronmaschine im Niststationen Betrieb. Berlin : Springer 1952.
- [5] KOVACS, K. P., u. I. RACZ : Transiente Vorgänge in Wechselstrommaschinen. Budapest 1959.
- [6] KÜPEMÜLLER, K. : Einführung in die theoretische Elektrotechnik. Berlin : Springer 1955.