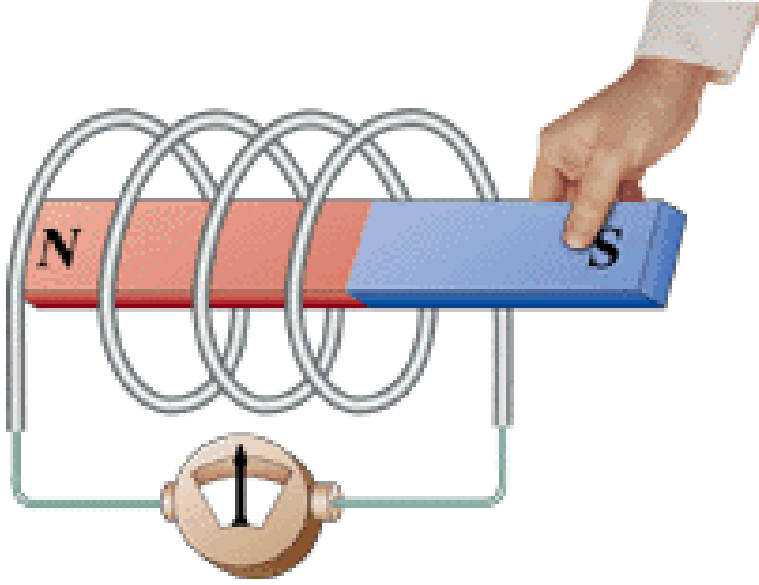


TEMEL YASALAR VE ETKİLERİ



İndükleme nasıl olur?

Elektromotor kuvvetin polaritesi nasıl bulunur?

İndüklenen akım nasıl tepki yapar?

Histerezis nedir?

Endüktansın tanımını yapabilir misiniz?

Demir kayıpları nelerdir? Nasıl azaltılır?

Amaç:

Tüm elektrik makineleri manyetik alanlar sayesinde enerji dönüşümü yapar. Bu kısımda manyetik alanların indükleme etkisini ve sonuçlarını inceleyeceğiz.

Elektromanyetik Endüksiyon

Faraday Yasası:

$$e = N \frac{d\phi}{dt}$$

Bu bağıntı, değişken (türevli) bir manyetik alan içinde bulunan her hangi bir sarımda (N) e elektromotor kuvveti (emk) indükleneceğini ifade etmektedir.

Her hangi bir iletken ortamda $N \neq 0$ dir.

Manyetik kutuplar altında hareket eden bir iletken düşünüldüğünde, bu iletken N ve S kutupları arasında hareket edebilir, bu da bir değişimdir. Böyle bir durumda $\phi(x, t)$ olarak yazılabilir. Faraday Yasası ifadesine matematik zincir kuralı uygulanırsa;

$$e(x, t) = N \frac{d\phi(x, t)}{dt} = N \frac{\partial \phi(x, t)}{\partial x} \frac{\partial x}{\partial t} + N \frac{\partial \phi(x, t)}{\partial t} \frac{\partial t}{\partial t}$$

$$\frac{\partial x}{\partial t} = v$$

$$e(x, t) = N \frac{\partial \phi(x, t)}{\partial x} v + N \frac{\partial \phi(x, t)}{\partial t}$$

Burada soldaki (mavi terim) hız gerilimi, sağdaki ise (kırmızı terim) transformasyon gerilimi olarak adlandırılır.

Hareket gerilimini, aşağıdaki terimleri yerine koyarak (N=1 için) tekrar incelersek;

$$\phi = BA ; B \text{ sabit} - \text{homojen akı yoğunluğu}; A = lx$$

$$e(x, t) = N \frac{\partial \phi(x, t)}{\partial x} v = \frac{\partial BA}{\partial x} v = \frac{\partial B l x}{\partial x} v = B \cdot l \cdot v$$

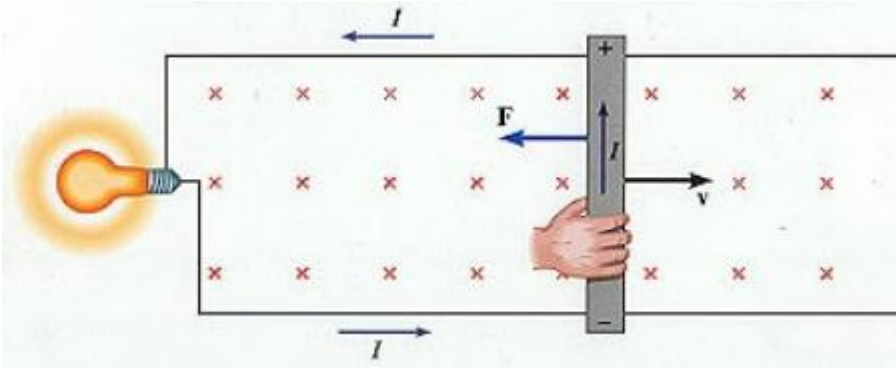
$$e = e(x) = B \cdot l \cdot v$$

Elde edilir. Bu ifade, Sabit B akı yoğunluğu altında v hızı ile hareket eden l uzunluğundaki bir iletkende e elektromotor kuvvetinin indükleneceğini ifade eder. Bu, ifade hareket eden tüm elektrik makinelerinin hesabında kullanılan bir ifadedir.

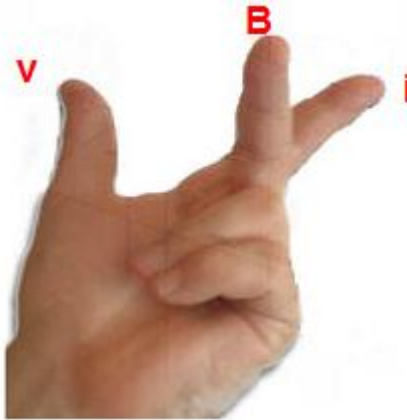
Transformasyon gerilimi;

$$e = e(t) = N \frac{d\phi(t)}{dt}$$

İse duran elektrik makinelerinde (transformatörler de) kullanılır.

Örnek:

X kağıt içine giren manyetik akıyı v ise el ile sağa hareket ettirilen iletken çubuğun hızı ise; $E=Blv$ gereği iletken çubukta emk indüklenir ve bu emk kapalı devrede I akımını dolaştırır. Burada akımın yönü sol el 3 Parmak Kuralı ile belirlenir:



Sol el orta parmak N'den S ye manyetik akı yönünü, v iletkenin hareket yönünü gösterirse; i indüklenen akımın yönünü verir.

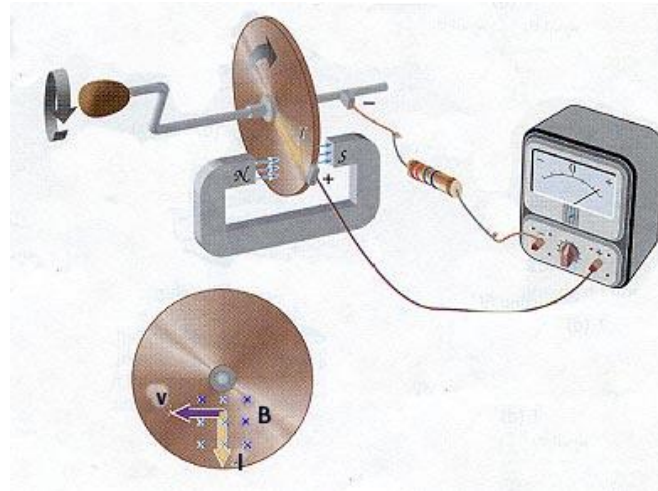
Yukarıdaki iletken çubuk artık bir emk kaynağı gibi davranır. Çubuğu bir batarya ile değiştirmeyi düşünürseniz + ucu yukarı gelecektir, zira akım bataryanın + ucundan çıkar.

Bu sayede sol el 3 parmak kuralını kullanarak iletkende indüklenen emk'in polaritesini belirleriz.

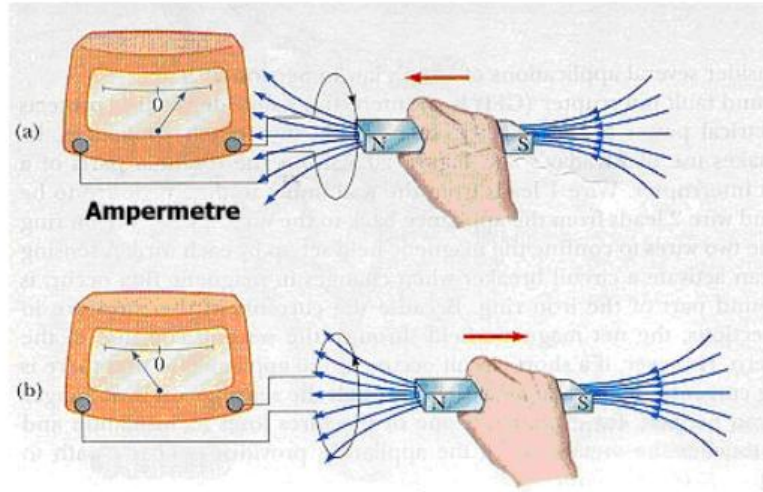
Sol el 3 Parmak Kuralında manyetik akıya dik bileşen ile ilgilenildiğine dikkat ediniz. Üç vektör de birbirine diktir. Şayet manyetik akı ile hareket birbirine dik değilse, e ifadesinde hızın B 'ye dik bileşeni kullanılmalıdır.

İlk Jeneratör

Michael Faraday
(1791-1867)



Faraday Yasasına Örnek 1



Burada, B endüksiyonu değıştirdi için $\Delta\Phi$ de değışir:
 $\Delta\Phi = (\Delta B)A$

Example:

$B_0 = 0.04 \text{ T}$
 $B = 0.07 \text{ T}$
 $\Delta B = 0.03 \text{ T}$
 $A = 0.004 \text{ m}^2$
 $\Delta t = 0.005 \text{ s}$
 $\Delta\Phi = (0.03)(0.004)$
 $= 1.2 \times 10^{-3} \text{ T-m}^2$

$$\text{Endüklenen emk} = \Delta\Phi / \Delta t$$

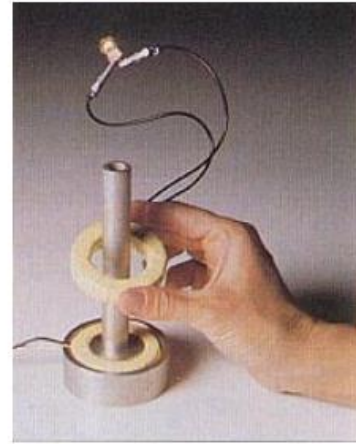
$$\Phi = BA$$

Endüklenen emk
 $= \Delta\Phi / \Delta t$
 $= 1.2 \times 10^{-3} / 0.005$
 $= 0.24 \text{ V}$

Faraday Yasasına Örnek 2

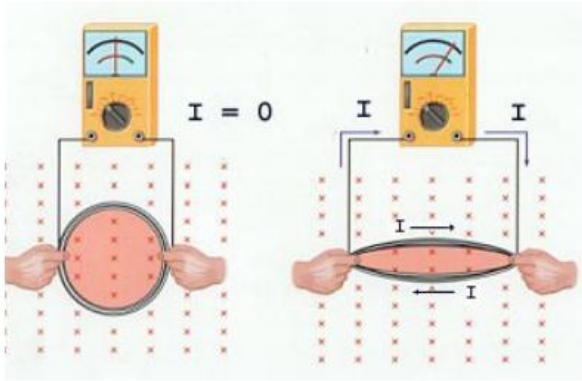


Çubuk mıknatıs aşağı-yukarı hareket ettirildiğinde, bobinden geçen manyetik akı miktarı değışir.



Altındaki bobine uygulanan alternatif manyetik akıya neden olur. Değişken manyetik akı içerisinde bulunan üstteki bobinde de gerilim endüklenir ve bağlanan lambayı yakar.

Alan Değişimi ile Akı Değişimi



$$\text{Endüklenen emk} = N \Delta\Phi/\Delta t$$

$$\Phi = BA \quad (1)$$

$$\Delta\Phi = B (\Delta A) \quad (2)$$

Bu örnekte, manyetik alan değil, bobin kapsadığı alan değişmektedir.

Bobin hızla sıkıştırılıp genişletilirse, açma kapama süresi Δt kısaldıkça, arkan bir emk endüklenir.

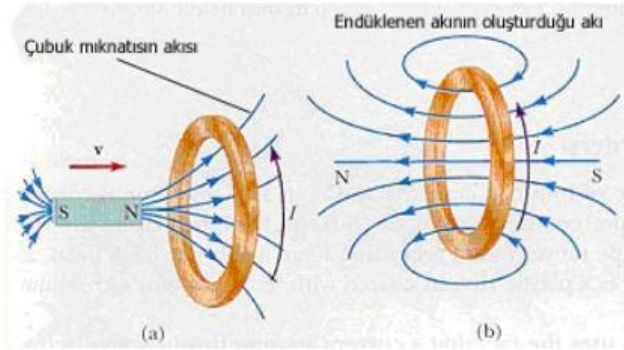
Lenz Yasası:

Faraday Yasasına bağlı olarak bir iletkenin indüklenen akım, kendini doğruan manyetik akıya zıt yönde bir manyetik akı oluşturur. Bu yönü ile Lenz Yasası; Newton'un 3. Yasasındaki etki-tepkinin manyetik ortamdaki karşılığıdır.

Faraday Yasası ile indüklenen gerilimin genliği kolayca bulunsa da, yönünü bulmak zordur (özellikle transformasyon gerilimi için). İndüklenen gerilimin / akımın yönünün bulunmasında Lenz Yasası kullanılır.

Aşağıdaki örneklerde Lenz Yasasını yorumlayarak indüklenen akımın yönünü belirleyiniz.

Değişen Manyetik Alan, Değişen Akı Oluşturur



Mıknatıs bobine yaklaştığı için $\Delta\Phi$ değişir. Bunun sonucunda: bobini kuşatan akı miktarı artar

Akı (Φ) artar.

$$\text{Endüklenen emk} = N \Delta\Phi/\Delta t$$

Bu endüklenen akımın ürettiği manyetik akıdır.

Etki: Mıknatısın sağa doğru hareketi

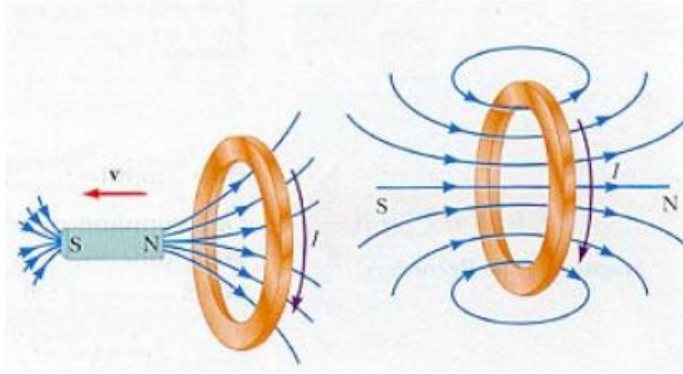
Tepki: Bobin içinde indüklenip geçen akımdan dolayı elektromıknatıslaşır ve elektromıknatıs etkisi ile yaklaşan mıknatısı ters kuvvetle iter.

Diğer açıdan:

Etki: Artan sayıda akı çizgisi bobini keser.

Tepki: Oluşan elektromıknatıs kendini oluşturan akıya zıt yönde olan kendi akı çizgilerini üretir. Bunun sonucunda zıt yönlü akı çizgileri kısmen birbirini yok eder.

Değişen Manyetik Alanlar



Mıknatıs bobinden uzaklaştırıldığında, bobinden geçen akı miktarı azalır.

Akı (Φ) azalır.

$$\text{Endüklenen emk} = N \Delta\Phi/\Delta t$$

Sağdaki halkada indüklenen akım, halka içinden geçen akının değişimi ile indüklenmektedir.

Etki: Mıknatıs sola hareket ettirilir ve bobinden uzaklaşır.

Tepki: Bobin içinde azalma yönünde değişen akı bobinde emk ve akım indükler, bobin elektromıknatıslar ve elektro mıknatıs etkisi ile uzaklaşan mıknatısı ters kuvvetle kendine çeker.

Diğer açıdan:

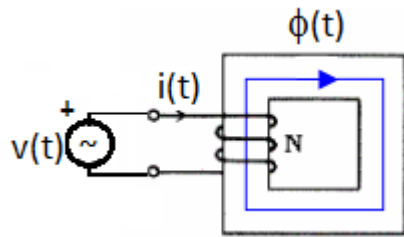
Etki: Azalan sayıda akı çizgisi bobini keser.

Tepki: Oluşan elektromıknatıs kendini oluşturan akı ile aynı yönde olan kendi akı çizgilerini üretir. Bunun sonucunda aynı yönlü akı dışarı saçılan akıları kısmen azaltır.

Faraday ve Lenz Yasaları ile ilgili olarak aşağıdaki videoları izleyiniz:

<http://youtu.be/bkSsgTQOXVI> | <http://youtu.be/WHCwgcs3s>
<http://youtu.be/stUDqGzpev8>

Endüktans



Şekildeki gibi bir demir çekirdeğe (demir olması şart değildir; hava bile olabilir) N sarımlı bir bobin sarılıp içerisinde zamanla değişen akım akıtılırsa;

Faraday Yasası gereği bobin üzerinde

$$e(t) = N \frac{d\phi(t)}{dt}$$

EMK'i indüklenir. Bilindiği üzere elektrik akımı manyetik akı üretir. Lineer şartlarda bobinin ürettiği akı ile bobinden akan akım doğru orantılıdır. Şu şekilde ifade edelim:

$$\phi(t) = k \cdot i(t) ; k = \text{sabit} ; k = \frac{\phi(t)}{i(t)}$$

Burada demir çekirdekte kalıcı akı olmadığını varsaydık (olsa da elde edeceğimiz sonucu etkilemez). Bu ifadeyi Faraday Yasasında yerine koyalım;

$$e(t) = N \frac{d[k \cdot i(t)]}{dt} = N \cdot k \frac{di(t)}{dt} = \left[N \cdot \frac{\phi(t)}{i(t)} \right] \cdot \frac{di(t)}{dt}$$

Burada;

$$L = N \cdot \frac{\phi(t)}{i(t)}$$

olarak tanımlanırsa;

$$e(t) = L \cdot \frac{di(t)}{dt}$$

Olarak elde edilir. Bu Faraday Yasasının değişik bir formudur. Burada L'ye endüktans denir ve birimi Henry olup H ile gösterilir. L'ye öz indükleme katsayısı da denir. Manyetik doyma olmadığı sürece değeri sabittir. L; 1 sarımlı bir bobinde, 1 saniyede 1 Amperlik akım değişimi olması halinde, bobin uçlarında 1 Voltluk bir gerilim indükleneneğini ifade eder. Diğer bir deyişle bobinin EMK üretme kabiliyeti hakkında bilgi veren bir büyüklüktür.

Basit bir yaklaşım ile her değişken akımın (veya değişken manyetik akının) bir endüktans oluşturacağını söyleyebiliriz.

$$L = N \cdot \frac{\phi(t)}{i(t)} = N \cdot \frac{\phi}{i} = \frac{N \cdot \phi}{i} = \frac{\lambda}{i} \quad ; \quad \lambda = N \cdot \phi \text{ dir. } L = \frac{\lambda}{i} \text{ olur.}$$

λ 'ya akı kavraması denir.

Şimdi endüktansı çekirdek büyüklükleri cinsinden hesaplayalım:

$$L = \frac{N \cdot \phi}{i}$$

Ohm Yasasından;

$$\phi = \frac{\mathcal{F}}{\mathcal{R}} = \frac{Ni}{\mathcal{R}}$$

Yukarıda yerine yazılırsa;

$$L = \frac{N \cdot \frac{Ni}{\mathcal{R}}}{i} = \frac{N^2}{\mathcal{R}} \quad ; \quad \mathcal{R} = \frac{l}{\mu A} \text{ idi } ; \quad L = \frac{N^2}{\frac{l}{\mu A}}$$

$$L = \frac{\mu \cdot N^2 \cdot A}{l} \text{ Henry; } H$$

olarak elde edilir. Burada l ortalama akı yolu; A ise manyetik akıya dik kesittir.

Endüktans davranış olarak; indüklediği zıt EMK ile akım (veya akı) değişimini engellemeye çalışır. Bunu manyetik alanda biriktirdiği enerji nispetinde yapar. Lineer bir ortamda manyetik alanda endüktansın biriktirdiği enerji;

$$W = \frac{1}{2} \cdot L \cdot I^2 \text{ dir.}$$

İdeal endüktans pasif fakat korunumlu bir devre elemanıdır; bir alternansta aldığı enerjiyi diğer alternansta devreye iade eder. Bu nedenle üzerindeki aktif güç (ortalama güç) sıfırdır.

Sinüsoidal sürekli hal çalışmalarında endüktans yerine endüktif reaktans kullanılır;

$$X_L = \omega L \text{ Ohm'dur ve burada } \omega = 2\pi f \frac{\text{rad}}{\text{s}} \text{ dir.}$$

Sinüsoidal sürekli halde endüktansın akımı, üzerindeki gerilimden 90 derece geri fazlı olur.

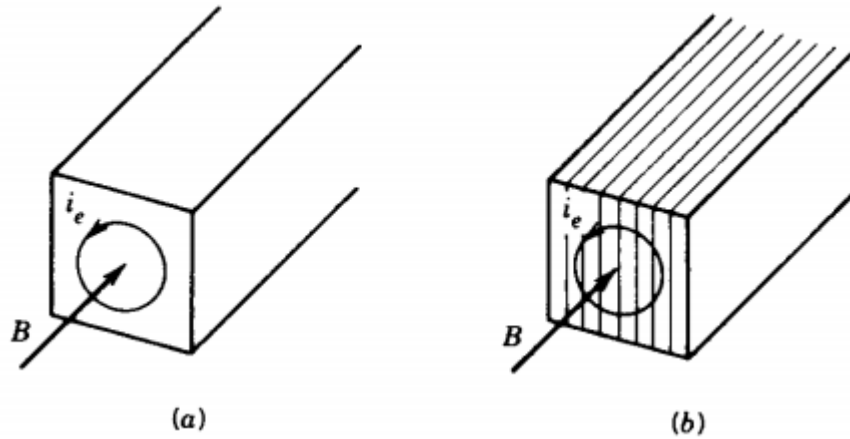
Doğru akımda ise endüktansın akımı sıfırdan başlayarak belirli bir sürekli hal değerine kadar artar. Kısacası doğru akımda endüktans geçici bir rejime neden olur, sürekli halde ise (içinden geçen akım değişmediği sürece) devrede bir etkisi olmaz.

Demir Kayıpları

Girdap Akımları (Eddy / Foucault Currents) ve Foucault Kayıpları

Elektrik makinelerinde manyetik malzemeler manyetik akıyı iyi iletme için kullanılır. Bu demirli (alaşım) malzemeler az yada çok iletkenlerdir. İstenmemekle birlikte, Faraday Yasası gereği değişken manyetik akı içerisinde bulunabilecek bu malzemelerin içerisinde yerel gerilimler indüklenir. Bu gerilimler birbirleri ile seri bağlanarak girdap şeklinde akımların akmasına neden olur. Bu akımlar $i^2 r$ kayıp güçleri ile manyetik malzemeyi ısıtır. Bu kayba Foucault (Fuko okunur) kayıpları denir. Bu akımların yönü Lenz Yasası ile bulunur. Bu akımlar ana manyetik akıyı zayıflatacak yönde manyetik akı oluşturur, azaltılması gerekir.

Foucault Kayıplarını azaltmak için demir malzemeye karbon ve silikon (%1-3) katılarak malzemenin direnci büyütülür, girdap akımları azaltılır. Bundan başka, değişken manyetik alan içinde çalışan demir nüveler (a) daki gibi som yapıda değil, (b) deki gibi yüzeyleri birbirinden lak, emaye, oksitleme veya inorganik kaplamalar ile yalıtılmış silisli çelik saclardan oluşturulurlar. Bunlara laminasyon denir. Laminasyon kalınlığının küçültülmesi bu kayıpları azaltır. Bu sayede nüve içinde indüklenen EMK'lar büyüyemez ve kayıp azalır. Aşağıda i_e 'nin yönünün ana akıyı azaltıcı yönde oluşacağına dikkat ediniz (Lenz Yasası gereği).



Foucault kayıpları

$$P_f = K_f B_m^2 f^2$$

Bağıntısı ile verilir. B_{\max} nüvedeki akı yoğunluğunun maksimum değeri, F akının frekansı, K_f malzemenin türüne ve laminasyon kalınlığı; P_f ise nüvede oluşan ve ısıya dönüşen Foucault Kaybıdır. Günümüz şebekesi için tasarlanmış makinelerde genellikle 0.5 – 5 mm'lik laminasyonlar kullanılır. Frekans arttıkça (özellikle elektronik devrelerde çalışan makinelerde) 0.01 – 0.5 mm'lik laminasyonlar tercih edilir.

http://youtu.be/otu-KV3iH_I videosunu inceleyiniz.

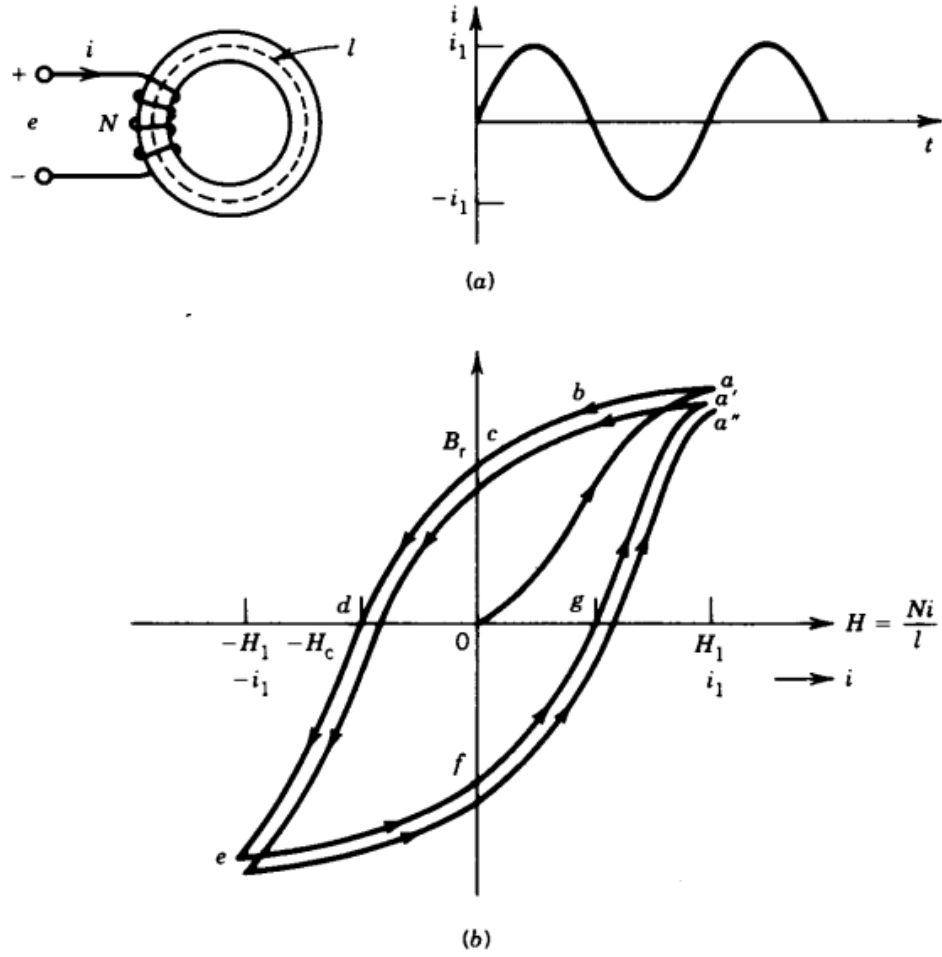
Histeresis Etkisi ve Kayıpları

Aşağıdaki şekildeki gibi toroid yapıdaki bir nüvenin üzerine N sarımlı bir sargı sarılıp bu sargıya 1-5 Hz gibi küçük frekanslı sinüsoidal akım uygulandığı düşünölsün (a). Akım, H manyetik alanını üretecek, H manyetik alanı da nüvede değişken bir B manyetik akı yoğunluğu ve manyetik akı oluşturacaktır. Örneğin alternatif akım değişirken, manyetik nüvenin bir yeri önce N kutbu bu yardından S kutbu oluşacak şekilde mıknatıslanacaktır. Bu yönlenme esnasında moleküler bazda manyetik domen duvarlarında sürtünmeler oluşmakta ve manyetik nüve ısınmaktadır. Buna histeresis kaybı denir.

H artarken B artar. Fakat tüm manyetik domenler yönlendikten sonra yönlenecek yeni domen kalmadığından manyetik malzeme doyacaktır; bundan sonra akı çizgisi sayısında artış olmayacaktır.

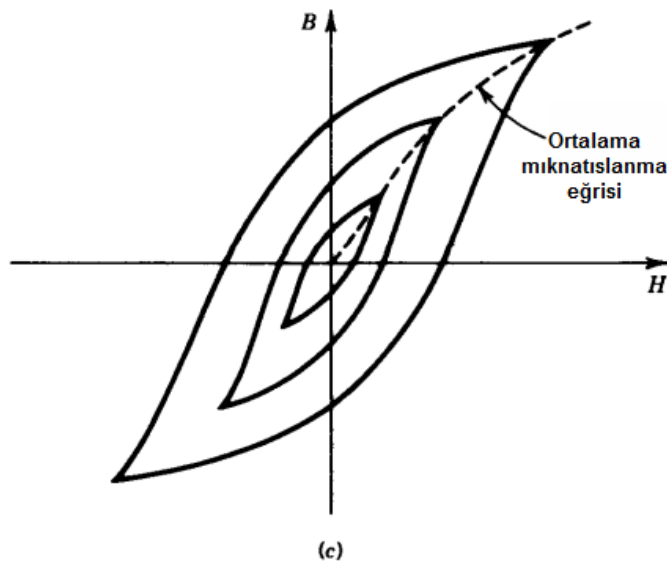
i sıfır olduğunda, akımın oluşturduğu H da sıfır olacaktır. Böyle bir durumda dahi malzemede bazı domenler yönlenmiş kalabilir ve malzeme az da olsa mıknatıs etkisine sahip olacaktır. Bu kalan akı yoğunluğuna B_r remanans (birikmiş/kalan) akı yoğunluğu denir. Bu birikmiş akı yoğunluğunu silmek için ters yönde $-H_c$ kadar manyetik alana ihtiyaç vardır. Bu yaz-boz için ilave enerji gerekir; bu da histerezis kaybına gider.

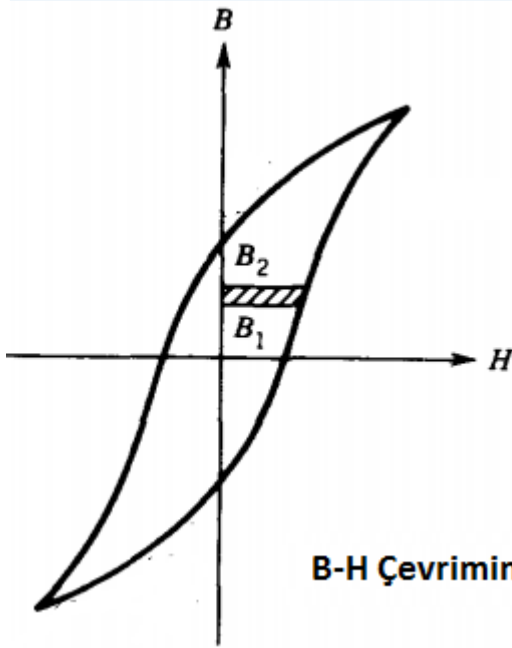
Malzeme sertleştikçe histeresis çevrimi şişer ve kayıp artar. Sabit mıknatıslarda B_r ve H_c büyüktür; sabit mıknatıslar sert demirli malzemeden (Demir, Nikel, Kobalt, Bor, Neodmiyum...) imal edilir ve kırılğandırılar.



Uygulanan akımın minimum ve maksimum değer aralıkları büyürken; B nin minimum ve maksimumları da büyür (Bkz c şekli).

Oluşan histeresis çevriminin büyümesi, histeresis kaybının artması anlamına gelir.





B-H Çevriminin Alanı = KB_{\max}^n

$$\begin{aligned}
 W|_{\text{cycle}} &= V_{\text{core}} \oint H dB \\
 &= V_{\text{core}} \times \text{area of the } B-H \text{ loop} \\
 &= V_{\text{core}} \times W_h
 \end{aligned}$$

$$P_h = V_{\text{core}} W_h f, \quad P_h = K_h B_{\max}^n f$$

n ; 1.5 – 2.5 arasında değişir. K_h manyetik malzemenin niteliğine ve hacmine göre değişen bir katsayıdır.

Aşağıdaki videoları izleyiniz:

<http://youtu.be/5HdIOGG9B3c>

<http://youtu.be/85dIRfKMIwM>

Toplam Demir Kayıpları

Alternatif içinde kalan manyetik nüvelerde demir kayıpları (P_c) oluşur. Bu kayıplar Foucault kayıpları ile Histeresis kayıplarının toplamıdır. Nüvede ısıya dönüşür.

$$P_c = P_f + P_h$$

Günümüz saclarında 50Hz frekansta oluşan toplam demir kaybı 1 W/kg dolayındadır.

Aşağıdaki videoda bu kayıpların faydalı amaçla kullanımını görebilirsiniz:

http://youtu.be/K3vwlQi2_rM

<http://youtu.be/d7DBS2Is0ws>

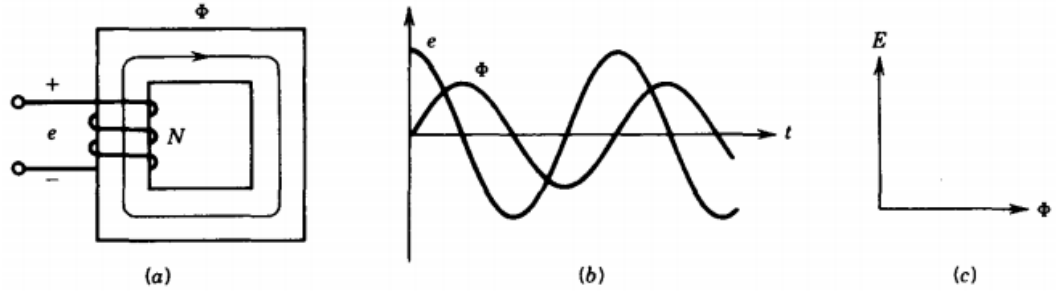
Saclarda Oluşan Kayıpların Yapısal Olarak Azaltılma Yolları

Elektrik makinalarının verimine etkiyen temel etken kayıplardır. Kayıpların azaltılması doğal olarak verimin artması anlamına gelmektedir.

Elektrik makinalarında kullanılan saclarda oluşan demir kayıpları yapısal olarak aşağıdaki şekillerde azaltılır:

- Sac kalınlığının azaltılması (Foucault kayıpları)
- Silikon yüzdesinin artırılmasıyla sac özgül direncinin artırılması (%1-3 Si) (Foucault kayıpları)
- Taneciklerin küçültülmesi (Foucault kayıpları)
- Sac malzemesinin saflığının artırılması (Histerezis kayıpları)
- İç gerilmeler ve yüzey gerilmelerinin azaltılması (tavlama ısı işlemi) (Histerezis ve Foucault kayıpları)

Sinüsoidal Uyarma



Şekil: Çekirdeğin sinüzoidal uyarımı (a) Çekirdek yapısı (b) Dalga şekilleri (c) Fazör diyagramı

Günümüz şebekesinde pek çok uygulamada manyetik devreler sinüzoidal alternatif gerilim ile uyarılır. Faraday yasası gereği bu şekilde uyarılmış bir bobin üzerindeki akı değişimi de sinüzoidal (ya da kosinüs formunda) olur.

Yukarıdaki devreye $\cos \omega t$ ile değişen bir gerilimin uygulandığı, sargı direnci ve kaçak reaktansının ihmal edilecek kadar küçük olduğu varsayılır ise, $v(t) \cong e(t)$ olur. Bu bağlamda

$$e(t) = E_m \cos \omega t$$

şeklinde olacaktır. Faraday yasası hatırlanırsa;

$$e(t) = N \frac{d\phi(t)}{dt}$$

(c) şeklinde görüleceği üzere türevden dolayı E ile ϕ arasında 90 derece faz farkı oluşur. Ve biri sinüs ise diğeri zorunlu olarak (denklem gereği) kosinüs fonksiyonuna sahip olur.

Şimdi çekirdek aksının;

$$\phi(t) = \Phi_m \sin \omega t$$

Şeklinde değiştiğini kabul edelim. Buna göre N sarımlı bir bobinde indüklenen EMK;

$$e(t) = N \frac{d\varphi(t)}{dt} = N \frac{d(\Phi_m \sin \omega t)}{dt} = N \Phi_m \omega \cos \omega t$$

$$E_m = N \Phi_m \omega = N \Phi_m 2\pi f$$

$$e(t) = E_m \cos 2\pi f t$$

Olur. Sinüsoidal değişen fonksiyonların etkin (efektif) değeri kolayca bilindiğinden;

$$E = \frac{E_m}{\sqrt{2}} = \frac{N \Phi_m 2\pi f}{\sqrt{2}} ; E = 4.44 \cdot \Phi_m \cdot f \cdot N$$

elde edilir.