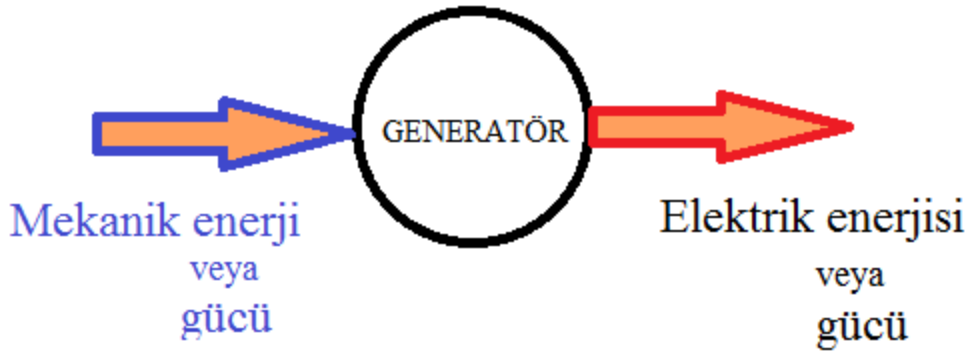
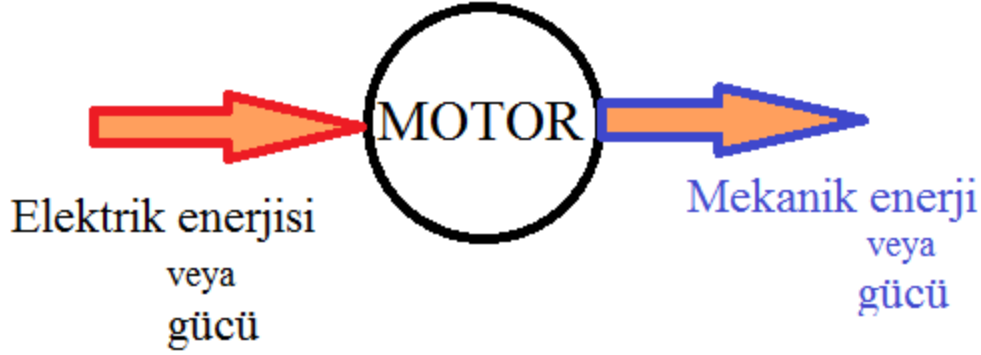


BÖLÜM-I

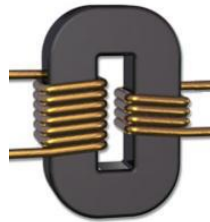
ELEKTRİK
MAKİNELERİNİN
TEMELLERİ
DERS NOTLARI

Makine İlkeleri

Elektrik Makinaları elektrik enerjisini mekanik enerjiye veya mekanik enerjiyi elektrik enerjisine dönüştüren cihazlardır.



Transformatörler, alternatif akımda gerilim veya akım seviyesini yükseltmek veya düşürmek için kullanılırlar.



Transformatörler, manyetik devre yapısı bakımından motor ve generatörlere benzediklerinden bu makineler ile birlikte değerlendirilmektedirler.

1.2 Manyetik Alan

Manyetik alanlar, elektrik makinelerinde enerji dönüşümünü sağlayan temel mekanizmadır.

Manyetik alanların elektrik makinelerinde kullanılması dört ana prensip ile açıklanır:

1. Akım taşıyan bir tel etrafında bir manyetik alan üretilir.
2. Zamanla değişen bir manyetik alan eğer bir sargıyı keserse, sargıda bir gerilim endüklenir. Bu olay *transformatör* prensibini açıklar.
3. Akım taşıyan bir iletken manyetik alan içinde bulunursa, iletkende bir kuvvet üretilir. Bu olay *motor* prensibini açıklar.
4. Manyetik alan içindeki bir iletken hareket ederse, üzerinde bir gerilim endüklenir. Bu olay *generatör* prensibini açıklar.

Manyetik alan kavramını daha iyi anlayabilmek için bir mıknatısı ele alalım.

Bir mıknatıs demir gibi manyetik bir malzemeye yaklaştırıldığında, belirli bir mesafeden sonra demir parçasını kendisine doğru çektiği görülür.

Bu durumda, demir parçasına bir kuvvet etki etmektedir. Bu kuvvet **manyetik alan** olarak tanımlanır. Manyetik alanı göstermek için kullanılan çizgiler **kuvvet çizgisi** veya **akı** olarak tanımlanır.

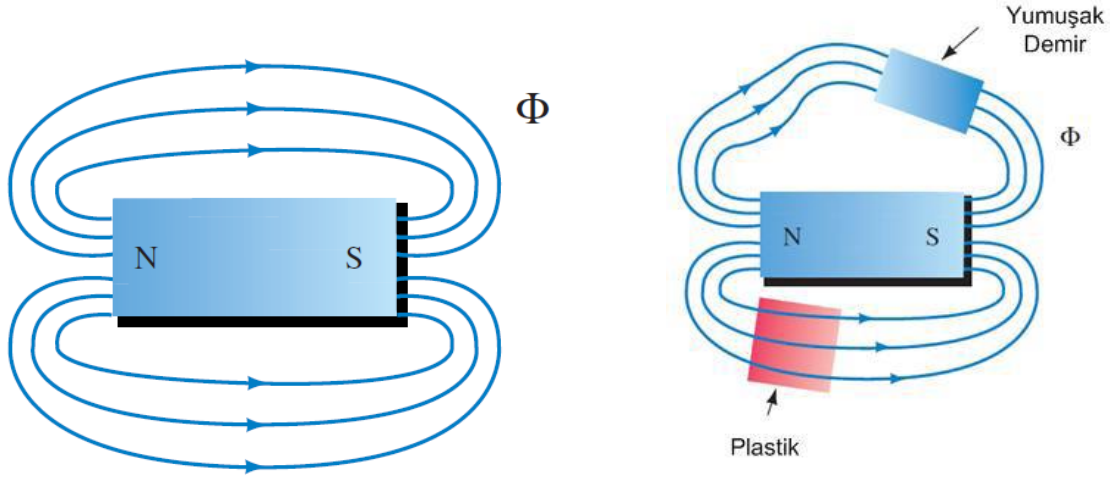
1.2.1 Manyetik Akı

Bir mıknatısta manyetik alan yönünü gösteren kuvvet çizgileri manyetik akı olarak tanımlanır ve F sembolü ile gösterilir, birimi weber dir.

Manyetik akı yönü N kutbundan S kutbuna doğru olup kapalı bir devre oluşturur.

Manyetik alandaki kuvvet çizgilerinin sayısı manyetik akının değerini verir.

Manyetik akı yolunda demir gibi bir manyetik malzeme varsa, manyetik akı yolunu değiştirir. Plastik gibi manyetik olmayan bir malzeme varsa, yolunu değiştirmez.

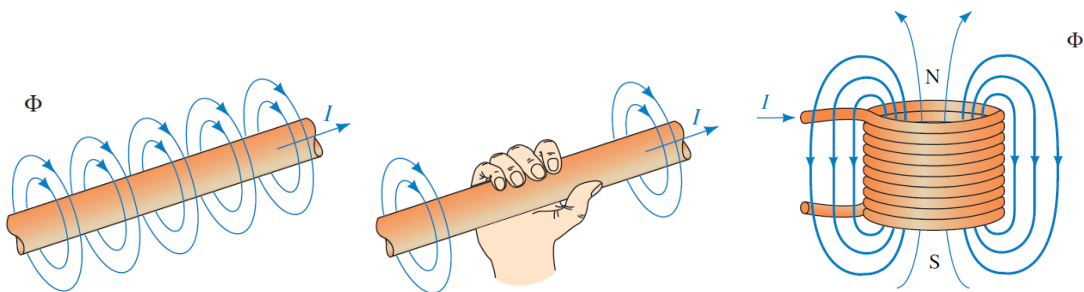


1.2.2 Elektromanyetik Alanın Üretilmesi

İçinden akım geçen bir iletkenin etrafında bir manyetik alan meydana gelir.

Oluşan manyetik alanın büyüklüğü geçen akım miktarına bağlıdır ve yönü sağ el kuralı ile bulunur.

Eğer iletken bir bobin şeklinde sarılırsa, toplam manyetik alan her bir iletkenden geçen manyetik alanların toplamına eşit olur.

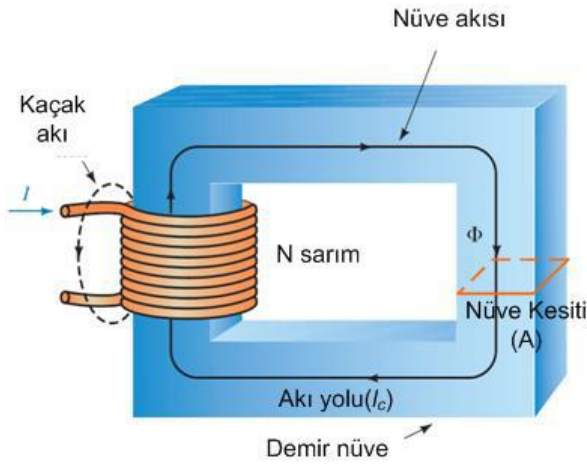


İletken bir manyetik nüve (çekirdek) üzerine sarılır ise, manyetik akı nüve üzerinden devresini tamamlar.

Bir nüve etrafına sarılı sargıdan geçen akım tarafından manyetik alanın üretilmesini açıklayan temel kanun *Ampere Kanunu* 'dur.

$$\oint H \times dl = I_{net}$$

Burada **H** manyetik alan şiddeti olup **I_{net}** akımı tarafından üretilir. SI sisteminde **I** amper (A) ve **H** amper-tur/metre (At/m) olarak ölçülür. **l** manyetik akı yolunun uzunluğudur ve birimi metredir.



Bu denklemin neyi ifade ettiğini daha iyi anlamak için bu denklemi örnek olarak yukarıdaki şekilde verilen manyetik yapıya uygulamak daha yararlı olacaktır.

Şekilde, dikdörtgen nüvenin bir kolu üzerine sarılı N sarımlı bir sargı bulunan manyetik yapı gösterilmektedir.

Çekirdek (nüve); demir veya ferromanyetik malzemeler olarak bilinen belirli diğer metallerin alaşımından yapılmış ise, akım tarafından üretilen bütün manyetik alanın nüve içerisinde kaldığı varsayılacaktır.

Böylelikle, Ampere Kanunu'ndaki integralin yolu, nüvenin ortalama yol uzunluğu l_c olacaktır. Akım taşıyan sargı telleri integralin yolunu N defa keserler.

Böylece integral alanı içinden geçen akım I_{net} , manyetik alan şiddeti ile manyetik alan yolu uzunluğunun çarpımına eşit olur.

Bu tanımlamalardan sonra ampere kanunu:

$$H l_c = N i$$

Burada H , manyetik alan şiddeti vektörünün genliği, l_c nüvenin ortalama yol uzunluğudur. Uygulanan akım yüzünden nüve içinde üretilen manyetik alan şiddetinin genliği:

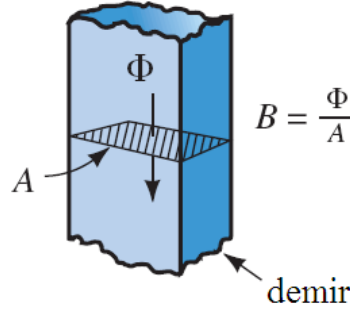
$$H = \frac{N i}{l_c}$$

1.2.3 Manyetik Akı Yoğunluğu

Elektrik makinalarında kullanılan önemli bir manyetik büyüklük de manyetik akı yoğunluğudur.

Manyetik akı yoğunluğu manyetik alana dik bir birim alandan geçen akı miktarıdır.

Manyetik akı B harfi ile gösterilir ve birimi Wb/m² veya Tesla'dır (T).



1.2.4 Manyetik alan şiddeti ile manyetik akı yoğunluğu arasındaki ilişki

Manyetik alan şiddeti H , bir anlamda akımın manyetik alanı meydana getirmek için gösterdiği çabanın bir ölçüsüdür.

Manyetik alan şiddeti H ve bir malzemede üretilen manyetik akı yoğunluğu B arasındaki ilişki:

$$B = \mu H$$

Burada;

μ malzemenin manyetik geçirgenliği (H/m)

B manyetik akı yoğunluğu (Wb/m²)

Manyetik geçirgenlik

Manyetik geçirgenlik (μ), malzeme içerisinden manyetik alanın geçişini tanımlayan bir parametredir. Her malzeme bir manyetik geçirgenliğe sahiptir.

Manyetik geçirgenliği yüksek olan malzemelerde daha kolay manyetik alan oluşur.

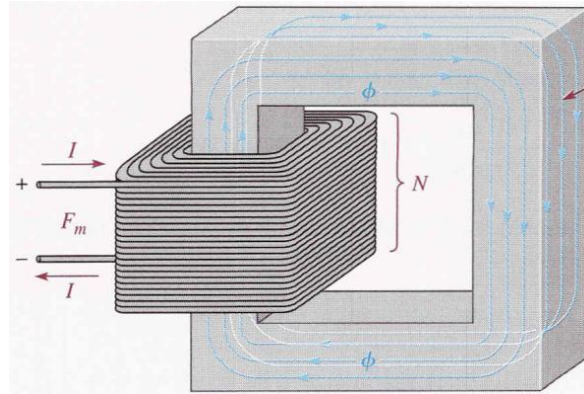
Boşluğın manyetik geçirgenliği μ_0 ile temsil edilir ve değeri sabittir, $\mu_0 = 4\pi \cdot 10^{-7} \text{ H/m}$.

Herhangi bir malzemenin geçirgenliği ile havanın geçirgenliğinin oranlanması bağıl geçirgenliği μ_r verir.

$$\mu_r = \frac{\mu}{\mu_0}$$

Bağıl geçirgenliğin yüksek olması malzemenin manyetik özelliğinin yüksek olduğu anlamına gelir.

Örneğin elektrik makinalarında kullanılan çeliğin bağıl manyetik geçirgenlikleri 2000-6000 arasındadır. Bu nedenle elektrik makinalarında manyetik akı, hava yerine 2000-6000 kat daha geçirgen olan elik üzerinden geçmektedir.



Şekilde verilen manyetik devreden görüldüğü gibi manyetik akı hava (boşluk) yerine daha geçirgen olan nüve üzerinden akmaktadır.

Bu devrede kaçak akılar bulunmakla birlikte toplam akıya oranla çok küçüktür.

Manyetik akı yoğunluğu ve manyetik akı

Bir nüvedeki akı yoğunluğunun genliği:

$$B = \mu H = \frac{\mu N i}{l_c}$$

Toplam manyetik akının değeri:

$$\phi = B A = \frac{\mu N i A}{l_c}$$

1.3 Manyetik Devreler

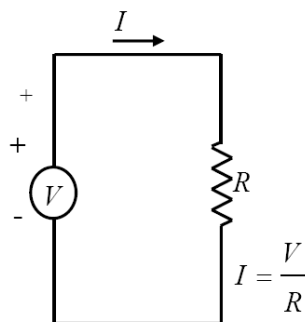
Bir elektromanyetik devrede manyetik akı, nüveye sarılı sargıdan geçen akım tarafından üretilir. Bu olay elektrik devresinde gerilimin devreden akım geçirmesine benzerdir.

Basit bir elektrik devresinde gerilim $V = I R$ ifadesi ile tanımlanır. Elektrik devresinde gerilim veya elektromotor kuvvet (emk) akımın akmasını sağlar. Direnç ise devre akımını sınırlar.

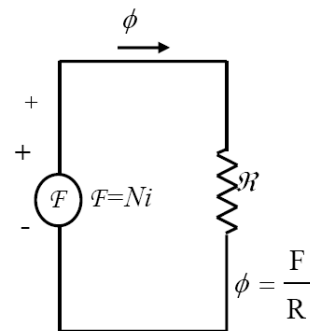
Manyetik devrede ise gerilimin yerini manyetomotor kuvvet (mmk) alır. Bir sargıdan geçen akım, mmk (F) değerini belirler.

$$F = N i (At)$$

Manyetik devrede, uygulanan mmk devrede bir akı (ϕ) üretilmesini sağlar.



(a) Elektrik devresi



(b) Manyetik devresi

MMK ile akı arasındaki ilişki:

$$\Phi = \mathcal{F}/\mathcal{R} \quad (\text{Wb})$$

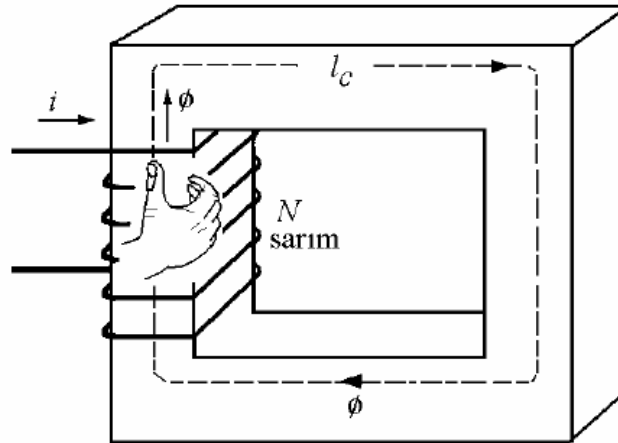
Burada R relüktansı temsil eder ve birimi At/Wb dir.

Relüktans akıyı sınırlar.

Elektrik devresindeki gerilim kaynağına benzer olarak manyetik devrede mmk 'in de bir polaritesi vardır. mmk kaynağının pozitif ucu manyetik akının çıktığı uçtur, negatif ucu ise manyetik akının tekrar kaynağa girdiği uçtur.

Relüktans

mmk'in yönü sağ el kuralının bir sargıya uyarlanmış şeklinden elde edilebilir. Şekildeki manyetik yapıda sağ el parmakları sargıdan geçen akım yönünde sargıyı kavrar ise, parmaklara dik tutulan başparmak akının ve dolayısıyla mmk'in yönünü gösterir.



Relüktans (manyetik direnç) bir elektrik devresindeki dirence karşılık gelirken, elektrik devresindeki iletkenliğin manyetik devredeki karşılığı da permeans olarak ifade edilir.

$$\mathcal{P}=1/\mathcal{R} \text{ ve } \mathcal{F} = \mathcal{P}\mathcal{F}$$

Bir manyetik devrede relüktansı bulmak için önce nüve içindeki akı denkleminde yararlanılır.

$$\phi = N i \frac{\mu A}{l_c} \quad \phi = \mathfrak{F} \frac{\mu A}{l_c}$$

Manyetik devrenin relüktansı:

$$\mathfrak{R} = \frac{l_c}{\mu A}$$

Manyetik devredeki relüktanslar için de elektrik devresindeki dirençlere uygulanan kurallar geçerlidir.

Seri manyetik devrenin eşdeğer relüktansı:

$$\mathcal{R}_{eq} = \mathcal{R}_1 + \mathcal{R}_2 + \mathcal{R}_3 + \dots$$

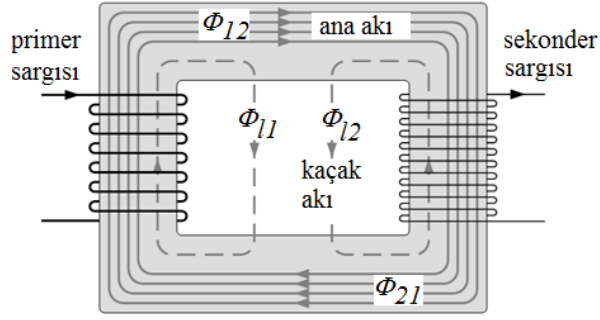
Paralel manyetik devrenin eşdeğer relüktansı:

$$1/\mathcal{R}_{eq} = 1/\mathcal{R}_1 + 1/\mathcal{R}_2 + 1/\mathcal{R}_3 + \dots$$

Gerçek manyetik devre-Varsayımlar

Bir nüvede manyetik akının hesaplanması için kabuller yapılır ve bulunan değerler yaklaşık değerler olup yaklaşık %5 hata ile sonuçlar elde edilir. Hesap sonucunun hassasiyetini etkileyen tabi nedenler vardır. Bunlar:

- ☐ kaçak akı
- ☐ akının dengesiz dağılımı
- ☐ geçirgenliğin değişmesi
- ☐ saçak etkisi

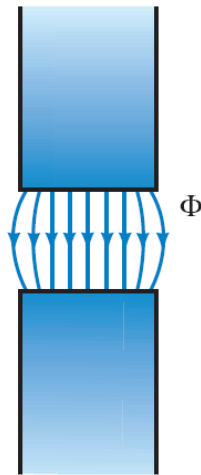


1. Manyetik devrede bütün akının bir manyetik nüve içinde tutulduğu varsayılır. Bu kabul çok gerçekçi değildir. Akının bir kısmı havadan devresini tamamlar. Bu akıya *kaçak akı* denir.

2. Relüktansın hesaplanmasında akının nüvenin her yerine dengeli dağıldığı kabul edilir. Nüve köşelerinde bu varsayım çok doğru değildir.

3. Ferromanyetik malzemelerde geçirgenlik malzeme içindeki akının artması ile değişir. Sabit kabul edilen relüktans değeri hesaplamanın sonucuna etki eder.

4. Nüve içinde hava aralıkları var ise hava aralığının etkin kesit alan değeri, nüve kesit alanının her iki tarafından taşarak nüvenin kesit alanından daha geniş olacaktır. Hava aralığı kesit alanındaki bu fazlalık, hava aralığındaki manyetik alanın saçak etkisi tarafından meydana getirilir.

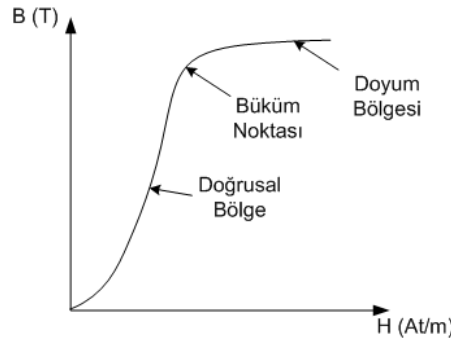


1.4 Ferromanyetik Malzemelerin Manyetik Davranışları

•Bir malzemenin manyetik akı yoğunluğu $B = \mu H$ bağıntısı ile ifade edilmektedir. Manyetik geçirgenliği düşük olan malzemelerde μ değerinin sabit olduğu kabul edilir ve B değeri H değeri ile doğru orantılıdır.

•Ferromanyetik malzemelerde ise bu yaklaşım doğru değildir. Çünkü ferromanyetik malzemelerin manyetik geçirgenliği μ , H değeri ile değişim göstermektedir. Bu değişimi ölçmek son derece zordur. Fakat önemli olan manyetik geçirgenliğin değişimi değil, manyetik alan şiddetine göre manyetik akı yoğunluğunun değişimidir.

BH Grafiği-Mıknatıslama (doyum) Eğrisi



•Manyetik alan şiddetine göre manyetik akı yoğunluğunun değişimini gösteren grafik BH grafiği olarak adlandırılır.

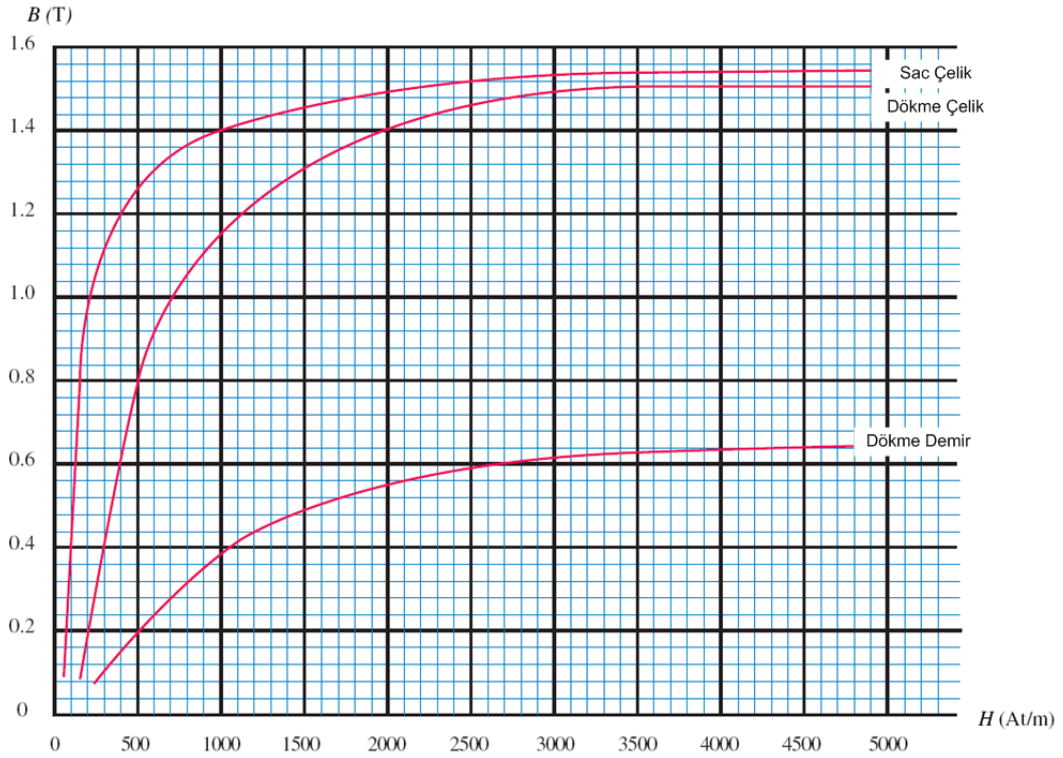
• BH grafiği 3 bölge olarak incelenebilir.

1. Doğrusal bölge: H ile B doğrusal değişir. Bu bölge mıknatıslanmanın sağlandığı bölgedir.

2. Büküm bölgesi: H ile B daha az bir oranla değişim göstermektedir.

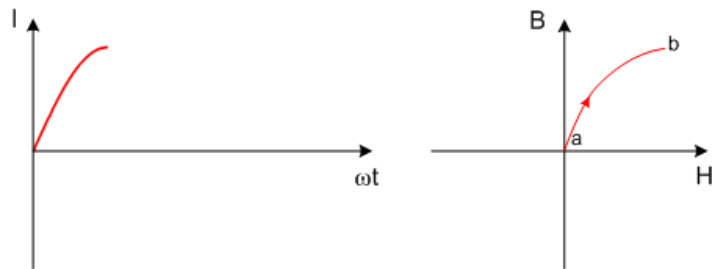
3. Doyum bölgesi: Ferromanyetik malzeme manyetik doyuma ulaşmıştır. Bu noktadan sonra H değeri ne kadar artırılırsa artırılınsın B değerinde bir değişim olmaz.

Bazı metallerin mıknatıslanma eğrileri:

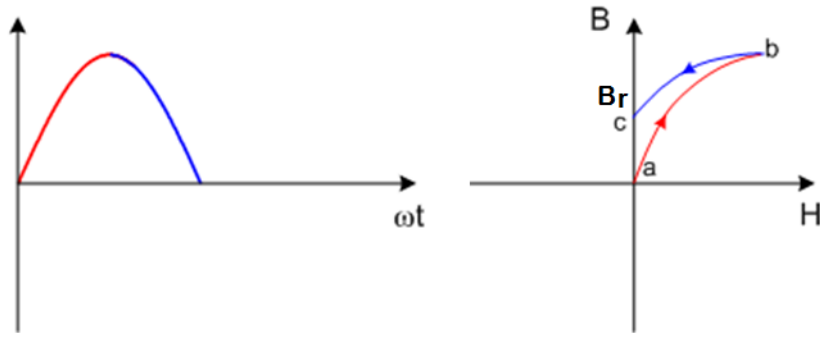


1.4.1 Histerisis Çevrimi

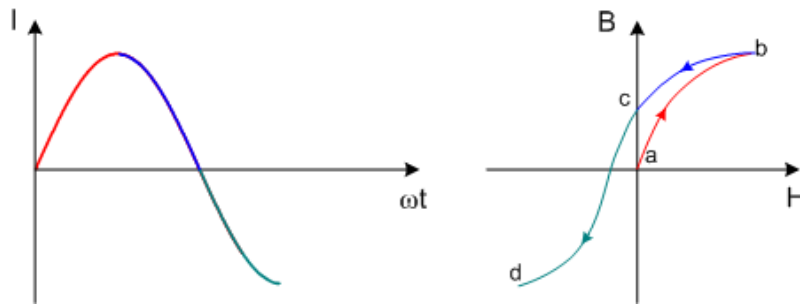
Daha önceden mıknatıslanmamış bir ferromanyetik nüveye sarılı sargılara AA uygulandığında, AA'ın yükselen kenarında nüvede a-b yönünde mıknatıslanma meydana gelir.



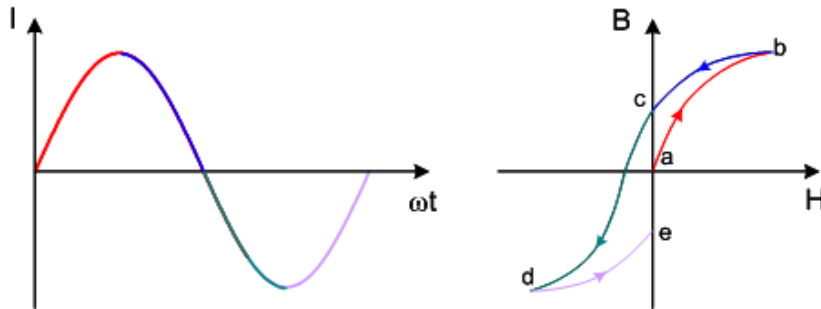
AA azalmaya başladığında H değeri buna bağlı olarak da B değeri azalacaktır. Fakat AA değeri sıfır olduğunda B değeri sıfır olmayacaktır (b-c eğrisi). Ferromanyetik malzeme üzerinde artık mıknatısiyet dediğimiz bir B_r değeri olacaktır.



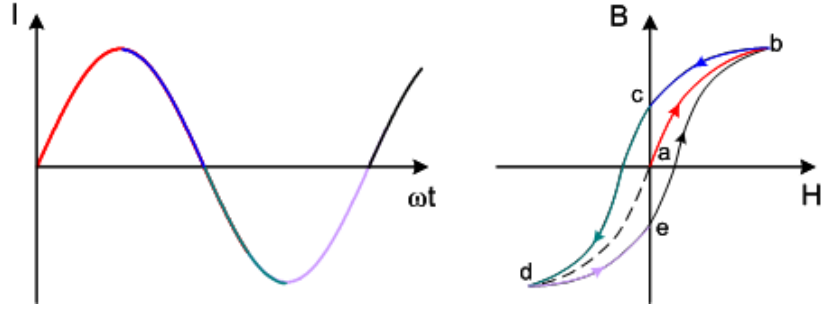
AA yön değiştirdiğinde mıknatıslanma eğrisi de yön değiştirecektir. Önce artık mıknatısiyet gidecek daha sonra c-d yönünde bir değişim meydana gelecektir.



AA –maksimum değerden sıfıra doğru yaklaşırken ferromanyetik malzemenin BH eğrisi d-e yönünde olacaktır.

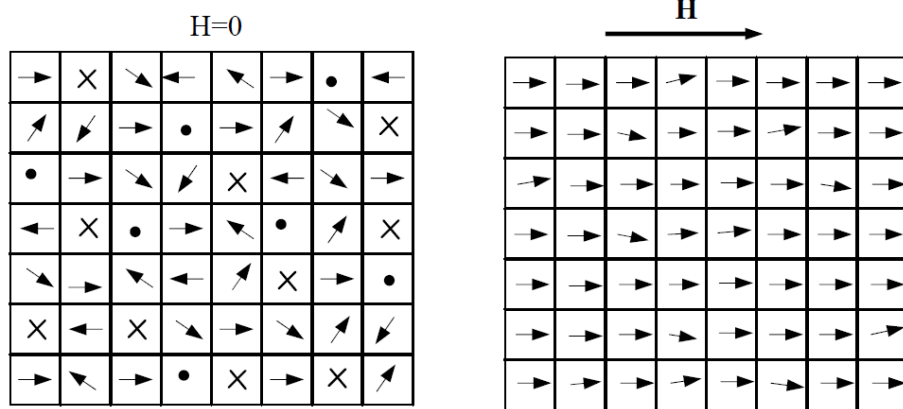


AA'ın tekrar pozitif olması durumunda eğri e-b yönünde değişecektir. Bundan sonra BH eğrisi b-c-d-e yönünde değişim gösterecektir. b-c-d-e kapalı çevrimi histerisiz çevrimi olarak adlandırılmaktadır.



Histerisiz çevrimin oluşumunu anlamak için ferromanyetik malzeme yapısını incelemek gerekir. Ferromanyetik malzemelerin atom yapıları aynı yönde manyetik alana meyillidir. Bu malzemeler domain olarak adlandırılan çok küçük bölgelerden meydana gelir. Her domain içinde atomlar manyetik alanları ile aynı yönde sıralanırlar. Böylece her domain bir mıknatıs parçası olarak görev yapar.

Mıknatıslanma Özelliği

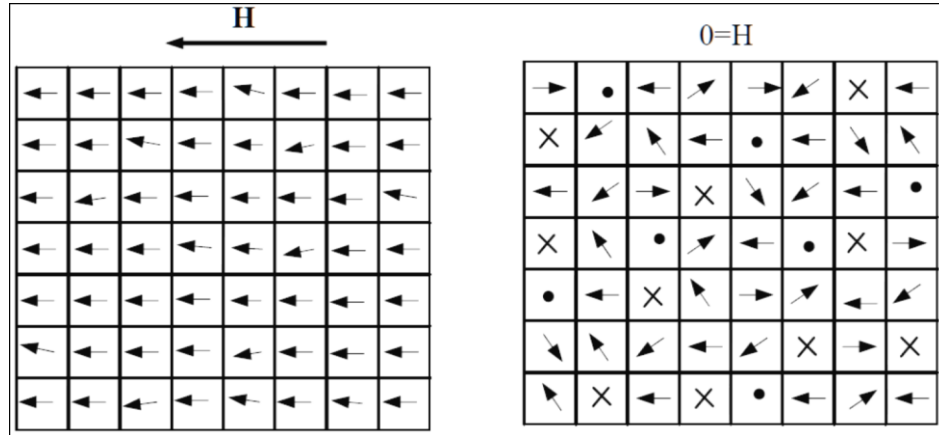


Bir demir malzemenin mıknatıslık özelliği göstermemesinin nedeni başlangıçta atomların gelişigüzel dağılmış olmasıdır. Bu durumda toplam akı değeri sıfır olmaktadır.

Demir malzeme harici bir manyetik alan etkisinde kaldığında domainlerdeki atomlar harici manyetik alanı destekleyecek yönde akı oluştururlar. Harici manyetik alanın değeri artırılırsa, bütün domainler aynı yönü gösterirler.

Domainlerin tamamı manyetik alanı destekleyecek yöne döndüklerinde manyetik alan şiddeti ne kadar artırılırsa artırılсын akı değeri bir değışme olmayacaktır. Bu durumda nüve doymuştur.

Demir malzeme üzerindeki harici manyetik alan kaldırıldığında domainler tamamen başlangıç konumuna dönemezler. Bir bölümü manyetik alan etkisinde kaldığı konumunu devam ettirir. Bu da nüvede artık mıknatıslıyeti oluşturur.



Benzer durum ters yön için de geçerlidir. Eğer harici manyetik alanın yönü değışirse, domainlerin yönü de değışecektir.

Mıknatıslıyetin Giderilmesi

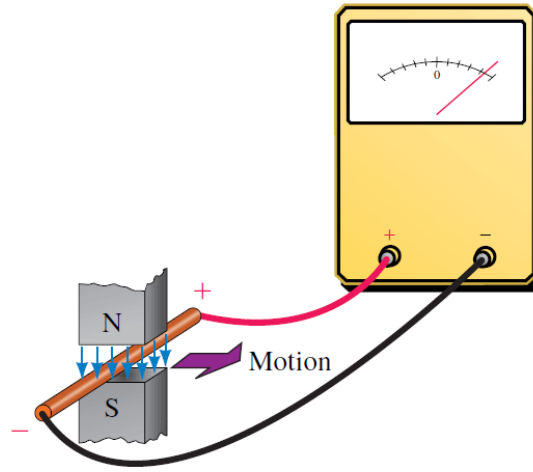
Ferromanyetik malzemeler ancak dış etkiler ile mıknatıslık özelliklerini tamamen kaybederler.

Bu dış etkenler:

1. Ters yönde bir manyetomotor kuvveti uygulanması
2. Büyük bir mekanik darbe uygulanması
3. Aşırı ısınma

1.5 Zamanla değışen manyetik alanın endüklediği gerilim, Faraday kanunu

Faraday, değışken bir manyetik akı tarafından kesilen sargı uçlarında bir gerilim endüklendiğini ve bu gerilim değeri manyetik akının zamanla değışimine bağılı olduğunu ifade etmiştir.



Değişken manyetik akı N sarımlı sargıyı keserse, sargı uçlarındaki toplam gerilim her bir sargıda endüklenen gerilimler toplamına eşittir.

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

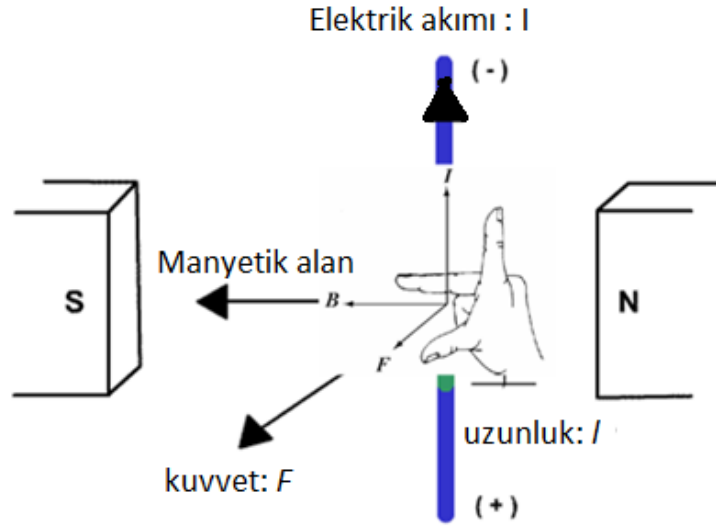
Faraday'ın
endükleme kanunu



Denklemdaki (-) negatif işaret Lenz kanununun bir ifadesidir. Lenz kanununa göre; bir sargıda endüklenen gerilim, eğer sargı uçları kısa devre edilirse, sargıdan bir akım dolaştıracak ve bu akımın üreteceği akı orijinal akının değişimine karşı koyacaktır. Endüklenen gerilim kendisini meydana getiren değişikliğe karşı koyduğu için denklemden negatif işareti kullanılır.

1.6 Bir İletkende Endükleme Kuvvetinin Üretilmesi

Manyetik alanın ikinci önemli etkisi ise çevrelediği iletkenler üzerinedir. Manyetik alan, manyetik alan içersinde olan ve akım taşıyan bir iletken üzerinde bir kuvvet endükler. Bu kuvvete *elektromanyetik kuvvet* veya *Lorentz kuvveti* denir.



Elektromanyetik kuvvet :

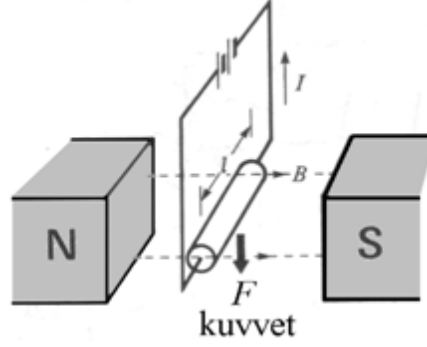
$$\mathbf{F} = i(\mathbf{l} \times \mathbf{B})$$

i : iletken içindeki akım (amper)

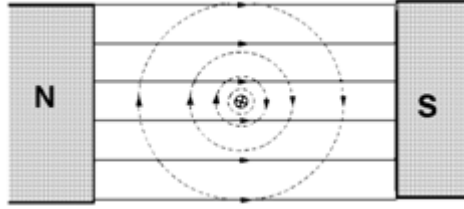
l : İletkenin uzunluğudur. İletkenin yönü akımın yönündedir.

B : Manyetik akı yoğunluğu vektörü

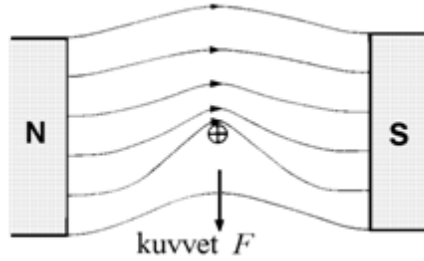
Manyetik alan içindeki akım taşıyan iletken üzerindeki kuvvet:



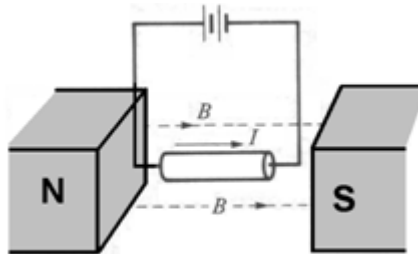
İletken manyetik alana dik iken kuvvet maksimumdur.



Kutup ve iletken manyetik akılarının yönleri



Meydana gelen manyetik akı iletkeni aşağı doğru iter.



İletken manyetik alana paralel iken kuvvet sıfırdır.

Manyetik alan içinde hareket eden bir iletkende endükleme geriliminin üretilmesi:

Manyetik alanın çevresi ile etkileşiminin üçüncü bir yolu daha vardır. Eğer uygun konumdaki bir iletken manyetik alan içinde hareket ederse, üzerinde bir gerilim endüklenir.

$$e = (\mathbf{v} \times \mathbf{B}) \cdot \mathbf{I}$$

$\mathbf{v}$: iletkenin hızı,

$\mathbf{B}$: manyetik akı yoğunluğu vektörü

$\mathbf{I}$: manyetik alan içindeki iletkenin uzunluk vektörü

Ferromanyetik Nüvedeki Enerji Kayıpları

1.Histerisis Kayıpları:

Demir içinde domainlerin yönünü değiştirmek için gerçekte bir enerjiye gerek duyulması, bütün makinalarda ve transformatorlarda ortak olan bir enerji kaybına neden olur.

Bir demir nüveye uygulanan alternatif akımın her bir saykılı boyunca domainlerin yön değiştirmesi için harcanan enerjiye *histerisis kayıpları* denir.

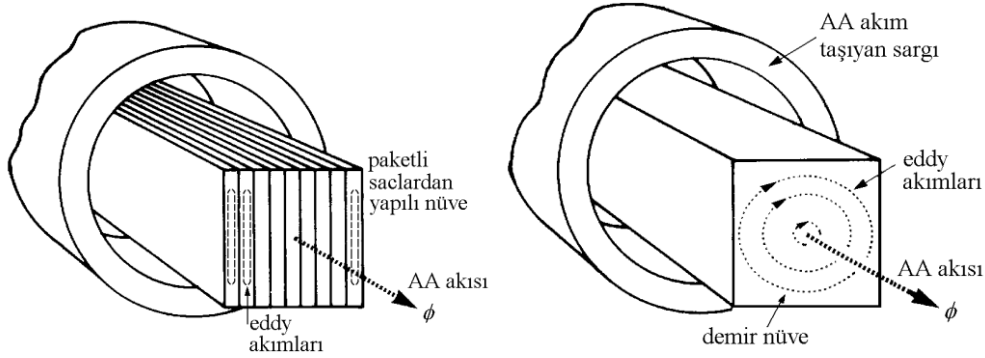
Histerisis çevrimini, nüveye uygulanan alternatif akım şekillendirir ve histerisis çevriminin alanı her bir saykıldaki enerji kayıpları ile oranlıdır.

$$P_h = K_h f B_m^n V$$

P_h histerisis kayıplar (W), K_h bir sabit olup manyetik malzemeye bağlıdır, n değeri deneysel olarak bulunur ve 1.5-2.5 arasında alınır, V nüvenin hacmidir (m³).

2.Eddy (girdap) Akımı Kayıpları:

Nüve içinde değişen manyetik alanlar tarafından üretilir. Faraday kanununa göre; zamanla değişen akı, nüve etrafına sarılı sargılarda bir gerilim endüklediği gibi manyetik bir nüve içersinde de bir gerilim endükler. Bu gerilimler nüve içersinde akımın bir halka şeklinde dolaşmasına neden olurlar. Bu olay su akıntısındaki girdaplara da benzetilir ve ismini de oradan almıştır.



Eddy akımları demir nüve gibi rezistif (omik) özelliği olan malzemeler içinden akarlar ve enerji nüve içinde ısı şeklinde harcanır.

Eddy akımları yüzünden kaybolan enerji miktarı eddy akımlarının nüve içersinde izledikleri yolların boyutları ile orantılıdır.

Bu sebepten dolayı değişen akıya maruz kalan ferromanyetik nüvenin bir çok ince levhalardan yapılması ve levhaların bir yüzünün silikon ile yalıtılması artık klasik bir tekniktir.

Silisli saclardan yapılan nüvede eddy akımları için akım yolları çok kısaltılarak yol direnci artırılır ve böylece eddy akımı ile beraber eddy kayıpları da azaltılır.

Birim hacim başına eddy akımı güç kayıpları:

$$P_e = K_e (f B_m t_1)^2 \quad W/m^3$$

Nüvenin toplam eddy akımı güç kayıpları:

$$P_e = K_e (f B_m t_1)^2 V \quad W/m^3$$

t_1 sac levha kalınlığı, K_e manyetik malzemenin iletkenliğine bağlı sabit. V manyetik nüvenin hacmidir (m³).

Hem histerisis hem de eddy akımı kayıpları nüvenin ısınmasına neden olduklarından makina ve transformator tasarımında özellikle dikkate alınmalıdır.

KAYNAKLAR

1. Prof. Dr. Güngör BAL, “**Doğru Akım Makinaları ve Sürücüleri**”, Seçkin Yayınevi, Ankara 2008
2. Prof. Dr. Güngör Bal, “**Transformatörler**”, Seçkin Yayıncılık, 2012
3. Stephen J. Chapman, “**Elektrik Makinalarının Temelleri**”, Çağlayan Kitabevi, 2007, Çeviren: Prof. Dr. Erhan AKIN, Yrd. Doç. Dr. Ahmet ORHAN

