

BÖLÜM 1. ENERJİ DÖNÜŞÜMÜ

1.1 Tanımlar

Enerji dönüşümünü dönme hareketi ile yaparak, girişindeki elektrik enerjisini mekanik enerjiye çeviren makinelere **Elektrik Motorları**, girişindeki mekanik enerjiyi elektrik enerjisine çeviren makinelere de **Elektrik Generatörleri** denir.

Bir makinenin motor ya da generatör olarak çalışması için, başka bir deyimle elektromekanik enerji dönüşümü yapabilmesi için hareket eden bir parçası olması gereklidir.

Motor ve generatörlerden başka, hareket eden hiçbir parçası olmayan, girişindeki elektrik enerjisinin türünü değiştirmeyen, buna karşılık gerilim, akım gibi bileşenlerini değiştiren makineler vardır. Bu makinelere de **Transformatör** adı verilir.

Bu prensibe göre; sisteme verilen enerjinin bir kısmı kayıp enerji olarak sistemin elektrik ve mekanik kısımlarında ısı enerjisine dönüşecek, diğer bir kısmı mekanik ve elektriksel kısımlarda depo edilecek ve geri kalan kısım da şekil değiştirerek sistem çıkışından faydalı enerji olarak alınacaktır.

1.2 Elektrik ve Manyetizma

Amper Kanunu: Üzerinden akım geçen bir iletkenin çevresinde bir manyetik alan oluşur. Bu durumda manyetik dolanım iletkenin geçen akımla doğru orantılıdır. Buna **Amper Kanunu** denir ve $\oint \mathbf{B} \cdot d\mathbf{l} = \mu_0 \cdot \mathbf{i}$ formülüyle gösterilir.

B Manyetik alan, **dl** sonsuz küçük yol vektörü, μ_0 manyetik geçirgenlik sabiti, **i** ise akımdır. Boşluk için $\mu_0 = 4 \cdot \pi \cdot 10^{-7}$ Weber / Amper.metredir.

Biot Savart Kanunu: Manyetik alan içine yerleştirilen bir iletkenin akım geçirildiğinde, bu iletkene dik bir kuvvet etkir. Bu kuvveti, iletkeni manyetik alan içinde hareket ettirmeye çalışır.

B manyetik alanının homojen olduğu varsayılp ve iletken sayısı bir alınarak **I** uzunluğunda iletkene etkiyen vektörlerden **F** kuvvetinin değeri, aşağıda verilen denklemdeki gibi ifade edilir.

Burada “ \otimes ” sembolü, vektörel çarpımı simgelemektedir.

$$F = (\mathbf{B} \otimes \mathbf{I}) \cdot l = \frac{\Phi \cdot \mathbf{I} \cdot l}{A} \quad 1.1$$

Elektrik makinelerinde hareketi sağlayan bu kuvvettir. O halde bunun bir sarım topluluğu olan bobin tarafından üretilmesi durumunda kuvvet büyüyecektir. Ancak, bobinin bu kuvveti üretebilmesi için, sürekli mevcut olması gereken bir manyetik alana ihtiyaç vardır. Dolayısıyla sürekli manyetik alanı üretecek bobin ile, kuvveti üretecek bobin bu nedenlerle farklı olmak zorundadırlar. Çünkü amaçları farklı olduğu gibi, sarım sayıları ve hatta iletkenlerinin kesitleri bile farklı olmak durumundadır. Bu nedenle bu sargılardan birine “**primer**” veya “**birincil**” diğerine ise “**sekonder**” veya “**ikincil**” isimleri verilir. Primer bobinin esas görevi makine içinde oluşması gereken manyetik akıyı üretmektir. Bu akı sayesinde, primer bobinle elektriksel bağlantısı olmayan ikincil bobin, manyetik alan içinde

kaldığından dolayı kuvvet üretmektedir. Böylece iki bobin arasında elektrik akımının farklı bobinler üzerinde meydana getirdiği manyetik akılardan dolayı manyetik bağlaç meydana gelmektedir. Diğer bir deyişle iki bobin birbirine manyetik olarak bağlanmış olur. Elektromekanik enerji dönüşümünü sağlamak, ancak, bu koşul altında mümkündür. Daha önce belirtildiği gibi, eğer makine hareketli ise elektro-mekanik enerji dönüşümü motor veya generatör çalışma durumları için gerçekleşir.

Gauss Yasası: Elektromanyetizmanın temel denklemlerinden biri Gauss'un manyetizma kanunudur. Bu kanun yalıtılmış manyetik kutupların mevcut olmadığını belirtir. Bu durumda herhangi bir kapalı Gauss yüzeyi için toplam manyetik akı sıfıra eşittir.

$$\oint B \cdot ds = 0 \quad 1.2$$

1.3 Endüksiyon Yasası

Endüksiyon yasasına göre, manyetik alan içerisinde bulunan bir iletkenin yarattığı düzlemden, bu düzleme dik açı yaparak geçen akı miktarının zamana göre değişmesi ile, bu iletkenin uçlarında bir gerilim endüklenir.

$$e = - \frac{d\phi}{dt} \quad 1.3$$

Bu değişimi iki türlü elde etmek mümkündür:

- 1) Zamana göre değişen manyetik alan kullanıp, manyetik alanın değerini her periyotta pozitif ve negatif değerler arasında zamana göre periyodik veya aperiodyk olarak değiştirmek,
- 2) Manyetik alanın genliği ve yönünü sabit tutup, iletken düzlemini hareket ettirerek, düzlemden geçen akı miktarını zamana göre değiştirmek,

Yukarıda belirtilen iki ayrı yöntem, değişik elektrik makinelerinde kullanılmaktadır.

Endüksiyon yasasına göre, iki ucu açık olan bir iletkenin kendine has bir düzlem meydana getirebilmesi için, uçlarından kıvrılarak, iki serbest ucunun yan yana getirilmesi gerekir. Çünkü düzlem, ancak bu şekilde özel bir düzlem olarak tarif edilebilir. Aksi halde, bir kıvrım meydana getirmeyen, her iki ucu birbirine zıt yönlerde olan iletkenin tarif ettiği düzlem sayısı sonsuzdur. İşte bu kıvrılma işleminden sonra elde edilen şekle “**sarım**” adı verilir. Sarım sayısı N ile temsil edilir. N tane sarımın seri bağlandığı sarımlar grubuna da “**bobin**” denir.

Burada akan akımın yarattığı akı çizgileri, mıknatısın akı çizgilerine karşıdır ve mıknatısın bobine girmesine mani olacak yöndedir. Burada eksi işareti, endüklenen emk'nin (elektro motor kuvvetin) kendini doğuran nedene karşı, zıt olarak hareket etmekte olduğunu açıklar. Ayrıca, matematik olarak akı ile emk arasında 90^0 lik faz farkı olduğunu ve gerilimin akıdan 90^0 geride olduğunu gösterir.

Lenz tarafından ortaya konan bu yasa şu şekilde açıklanabilir:

Manyetik endüksiyonun var olduğu her durumda, endüklenen emk'leri üreten akımlar kendilerini meydana getiren nedene karşıdır.

Faraday, mevcut bir manyetik alan içinde l boyunda iletkeni v hızı ile hareket ettirerek, iletkenin iki ucu arasında gerilim endüklemiş ve bunu elektrik makinelerine uygulamıştır.

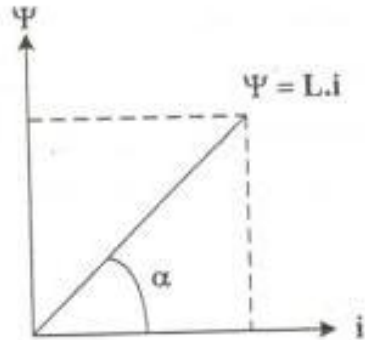
1.4 Doğrusal Sistemlerde Enerjinin Depo Edilmesi

Bir elektrik sisteminde akı ile alım arasındaki bağıntı (mıknatıslanma eğrisi) $\Psi=L \cdot i$ şeklinde birinci dereceden ise (doğru denklemi) bu sistemlere **Doğrusal Sistemler** denir. Sistemde doğrunun eğimi "L" öz endüktanstır.

$$\Psi = N \cdot \Phi = N \cdot B \cdot S \quad 1.4$$

Burada;

- Φ : Bir sarımı halkalayan akı
- N : Sarım sayısı
- B : Manyetik akı yoğunluğu
- S : Manyetik devre kesiti

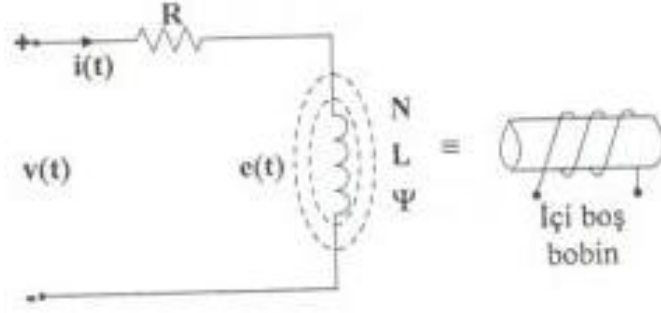


Şekil 1.1 Doğrusal Sistemlerde Akı-Akım Eğrisi

Şekil 1.1 'den eğim;

$$\operatorname{tg} \alpha = L = \frac{\Psi}{i} \quad 1.5$$

olarak yazılır. Öz endüktansı L , direnci R olan N sarımlı içi boş bir bobine $v(t)$ gerilimini uygulayalım. Bu bobinin Şekil 1.2 'deki elektriksel eşdeğer devresine Kirchhoff kanunlarını uygularsak; devreye $v(t)$ gerilimi uygulandığında $i(t)$ akımı geçer ve sargılarda $e(t)$ gerilimi endüklenir.



Şekil 1.2 R-L devresi

- $i(t)$: Akımın ani değeri (A)
 $v(t)$: Gerilimin ani değeri (V)
 R : N sarımlı bobinin direnci (Ω)
 L : N sarımlı bobinin öz endüktansı (H)
 $e(t)$: Bobinde endüklenen gerilim (V)
 Ψ : Toplam akı (Wb)

Eşdeğer devreye ait gerilim ifadesi yazılırsa;

$$v(t) = R \cdot i(t) + e(t) \quad 1.6$$

olur. Güç ifadesi;

$P(t) = v(t) \cdot i(t)$ olduğundan denklem (1.6) 'nın iki tarafı $i(t)$ akımı ile çarpılırsa ani güç;

$$P(t) = v(t) \cdot i(t) = R \cdot i^2(t) + e(t) \cdot i(t) \quad 1.7$$

şekilinde elde edilir.

$\Delta t = t_2 - t_1$ zaman aralığında denklem (1.6) 'nın integrali alınır, ($W = \int P \cdot dt$) bu zaman aralığında bobine verilen enerji miktarı;

$$\Delta W_e = \int_{i_1}^{i_2} R \cdot i(t)^2 \cdot dt + \int_{i_1}^{i_2} e(t) \cdot i(t) \cdot dt \quad 1.8$$

Şeklindedir. Denklem (1.7)'nin sağ tarafındaki integrallerden ilki, N sarımlı bobinin direncinde harcanan ve ısıya dönüşen enerjiyi, ikincisi ise bobine iletilen enerjiyi gösterir. İlk terim ihmal edilirse Δt zaman aralığında bobine iletilen enerji;

$$\Delta W_e = \int_{i_1}^{i_2} e(t) \cdot i(t) \cdot dt \quad 1.9$$

olur. Bir bobinde endüklenen gerilim Faraday'ın manyetik endüksiyon kanununa göre;

$$e(t) = \frac{d\phi}{dt} \quad 1.10$$

Şeklindedir. Denklem (1.10), denklem (1.9) 'da yerine yazılırsa;

$$\Delta W_e = \int_{t_1}^{t_2} \frac{d\Psi}{dt} \cdot i(t) \cdot dt = \int_{\Psi_1}^{\Psi_2} i(t) \cdot d\Psi \quad 1.11$$

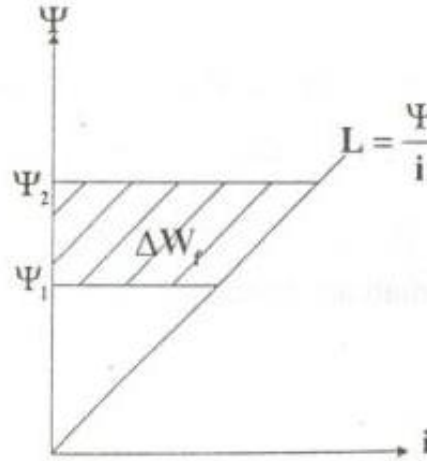
bulunur. Bu denklemde $i = \Psi/L$ yerine yazılırsa;

$$\Delta W_e = \int_{\Psi_1}^{\Psi_2} \frac{\Psi}{L} \cdot d\Psi \quad 1.12$$

olur. Sistem lineer olduğundan bobine verilen enerji miktarı ΔW_e , manyetik alanda depo edilen enerjiye (ΔW_f), eşittir. Yani $\Delta W_e = \Delta W_f$ 'dir. Denklem (1.12) 'nin integrali alınırsa;

$$\Delta W_e = \frac{1}{2 \cdot L} (\Psi_2^2 - \Psi_1^2) \quad 1.13$$

olur. Bu denkleme yani manyetik alanda depo edilen enerjiye ilişkin eğri şekil 1.3 'de verilmiştir.



Şekil 1.3 Manyetik Alanda Depo Edilen Enerji

Şekil 1.3 'de $\Psi_1 = 0$ ve $\Psi_2 = \Psi$ alınırsa denklem (1.13);

$$W_f = \frac{1}{2 \cdot L} \cdot \Psi^2 \quad 1.14$$

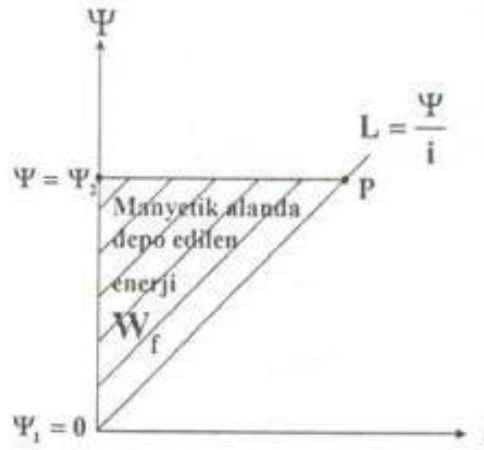
şekilini alır. Grafiğe ise şekil 1.4 'de gösterildiği gibidir.

Şekil 1.4 'den;

$$W_f = \int_0^{\Psi} i \cdot d\Psi = \int_0^{\Psi} \frac{\Psi}{L} \cdot d\Psi = \frac{1}{2 \cdot L} \Psi^2 \quad 1.15$$

olarak denklem (1.3) 'ün aynısı elde edilir. Ayrıca denklem (1.15) 'de $L = \Psi/i$ kullanılırsa;

$$W_f = \frac{1}{2} \cdot i \cdot \Psi \quad 1.16$$



Şekil 1.4 Manyetik Alanda Depo Edilen Enerji

Co-enerji:

Şekil 1.4 'de P noktasının altında kalan alana (Şekil 1.5), co-enerji denir. Co-enerji, W_f' indisi ile gösterilir.

Co-enerjinin genel ifadesi:

$$\Delta W_f' = \int_{i_1}^{i_2} \Psi \cdot di = \int_{i_1}^{i_2} L \cdot i \cdot di = L \cdot \int_{i_1}^{i_2} i \cdot di = \frac{1}{2} \cdot L \cdot (i_2^2 - i_1^2) \quad 1.17$$

Şeklindedir. Şekil 1.5 'de gösterildiği gibi

$i_1 = 0$ ve $i_2 = i$ ise;

$$W_f' = \frac{1}{2} \cdot L \cdot i^2$$

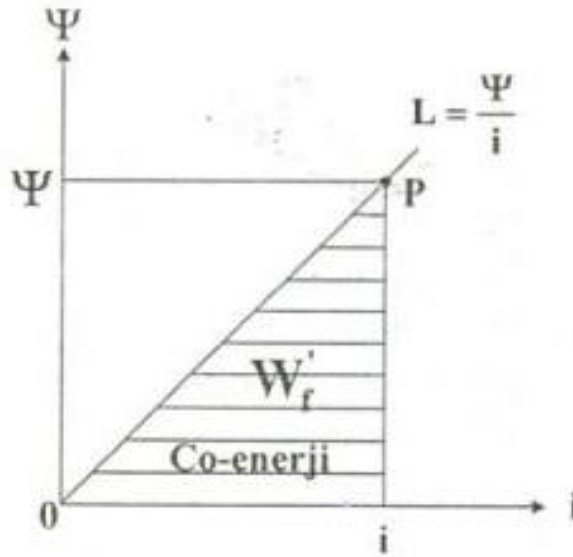
1.18

olur. Ayrıca bu denklemde $L = \Psi / i$ kullanılırsa;

$$W_f' = \frac{1}{2} \cdot \Psi \cdot i$$

1.19

olarak da elde edilir.



Şekil 1.5 Co-enerjinin Gösterilmesi

Doğrusal sistemlerde manyetik alanda depo edilen enerji, co-enerjiye eşittir.

$$W_f = W_f'$$

1.20

Energileri toplamı da;

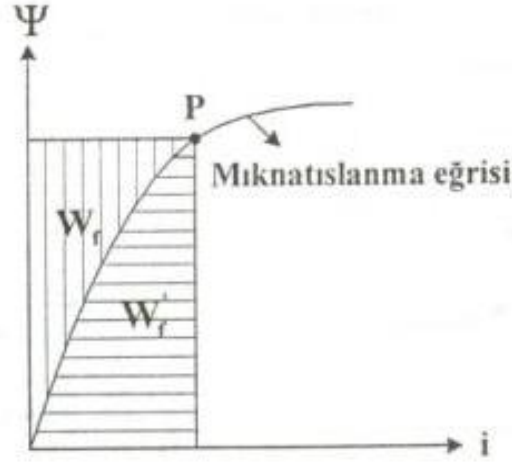
$$W_f + W_f' = \Psi \cdot i$$

1.21

şeklinde yazılır.

Doğrusal Olmayan Sistemlerde Enerjinin Depo Edilmesi ve Doymanın Etkisi

N sarımdan oluşan bir bobin ele alalım. Bu kez bobinin içinin saçlardan meydana gelen bir nüve (ferromanyetik malzeme) ile dolu olduğunu kabul edelim. Bu durumda sargıdan geçen akım şiddeti arttıkça, akının orantılı olarak artmadığı görülür. Yani sistemin endüktansı değişecek ve lineerlik bozulacaktır. Bu nedenle bu sistemlere Doğrusal Olmayan Sistemler denir. Devreden geçen akımın artmasıyla çekirdek doyacağından akı, akıma nazaran daha az artacaktır ve mıknatıslanma eğrisi Şekil 1.6 'daki gibi olacaktır.



Şekil 1.6 Doğrusal Olmayan Sistemlerde Mıknatıslanma Eğrisi

Şekil 1.6 'da gösterildiği gibi doğrusal olmayan sistemlerde manyetik alanda depo edilen enerji co-enerjiye eşit değildir. Ancak iki enerjinin toplamı yine $\Psi \cdot i$ 'dir. Doğrusal olmayan sistemlerde de enerji ve co-enerji integralleri, doğrusal sistemlerdeki gibidir. Yani;

$$W_f = \int_0^{\Psi} i \cdot d\Psi \quad 1.22$$

$$W_f' = \int_0^i \Psi \cdot di \quad 1.23$$

şekilindedir.

1.6 Elektromanyetik Sistemde Enerji Dengesi Denklemi

Elektromanyetik sistemlerde sisteme verilen elektrik enerjisindeki değişme, sistemin manyetik alanında depo edilen enerjideki değişme ile mekanik enerjideki değişimin toplamına eşit olur. Denklem (1.24) enerji dengesi denklemidir.

$$\Delta W_e = \Delta W_f + W_m \quad 1.24$$

ΔW_e : Sisteme verilen elektrik enerjisindeki değişme

ΔW_f : Sistemin manyetik enerjisindeki değişme

ΔW_m : Sistemin mekanik enerjisindeki değişmedir.

Denklem (1.24)'te verilen enerji dengesi denklemine göre sisteme verilen elektrik enerjisi değişiminin, manyetik alanda biriken enerji değişimini karşıladığı gibi, mekanik sistemin mekanik enerji değişimini de sağladığı görülür. Ayrıca manyetik alanın elektrik enerjisinin mekanik enerjiye dönüşümünde ara depo görevi gördüğü söylenebilir.

Güç dengesi denklemi ise;

$$\frac{dW_e}{dt} = \frac{dW_f}{dt} + \frac{dW_m}{dt} \quad 1.25$$

şeklinde ifade edilir.

1.7 Enerji Dönüşümü İle İlgili Temel Büyüklükler

Açısal Pozisyon θ : Bir büyüklüğün açısal pozisyonu θ bu büyüklüğün keyfi bir referans noktadan ölçülen açısıdır. Açısal pozisyon genellikle radyan veya derece cinsinden ölçülür. Açısal pozisyon doğrusal hareketteki yol veya mesafe kavramına karşılık gelir.

Açısal Hız ω : Açısal hız (veya hız) zamana göre açısal pozisyondaki değişim miktarıdır. Dönme yönü saat ibrelerinin dönüş yönüne ters ise açısal hız pozitif kabul edilir. Düzgün doğrusal hareketteki hızın dairesel hareketteki karşılığı açısal hızdır. Düzgün doğrusal harekette tek boyutlu doğrusal hız, birim zamanda alınan yol (x) olarak tanımlanır.

$$v = \frac{dx}{dt} \quad 1.26$$

Benzer şekilde, açısal hız birim zamanda açısal yer değiştirme miktarı (θ) olarak tanımlanır.

$$\omega = \frac{d\theta}{dt} \quad 1.27$$

Eğer açısal pozisyonun birimi radyan olursa, bu durumda açısal hız; radyan / saniye olarak verilir.

Açısal İvmelendirme (Hızlanma) α : Açısal ivmelendirme (hızlanma) α , açısal hızın zamana göre değişim hızıdır. Açısal ivmelendirme, açısal hız artıyorsa pozitif olarak tanımlanır. Matematiksel olarak dönme hareketinde açısal ivmelendirme;

$$\alpha = \frac{d\omega}{dt} \quad 1.28$$

olup, [rad/san²] simgesi ile gösterilen radyan/saniye ile ölçülür. Öteleme hareketinde ise,

$$a = \frac{dv}{dt} \quad 1.29$$

olarak tanımlanır ve m/sn² simgesi ile gösterilir.

Newton Yasası: Öteleme hareketi yapan bir cisme bir kuvvet etki ettiğinde, m cismin kütleini ve 'a' da uygulanan kuvvet sonucunda oluşan ivmeyi gösterirse kuvvet;

$$F = m \cdot a \quad 1.30$$

olarak tanımlanır. Dönme hareketi yapan bir sistem için de benzer tanım geçerlidir. Sistem ya da cisme uygulanan moment M ise, bunun sonucunda oluşan açısal ivmelendirme de α ise sistemin ya da cismin eylemsizlik momenti;

$$M = J \cdot \alpha \quad 1.31$$

denklemleri ile tanımlanır. Burada J , sistemin ya da cismin eylemsizliği olup, birimi $\text{kg} \cdot \text{m}^2$ 'dir.

Moment (M): Moment bir cisim üzerindeki “ **bükme kuvveti**” olarak tarif edilir. Cisme etki eden moment; cisme uygulanan kuvvet ve cismin dönme eksenine, kuvvetin uygulandığı nokta arasındaki mesafenin çarpımı olarak tarif edilir. \mathbf{r} kuvvetin uygulandığı noktanın dönme eksenine olan uzaklığını gösteren bir vektör olursa moment aşağıdaki gibi olur.

$$M = F \cdot r \cdot \sin\theta \quad 1.32$$

Burada; θ , r ve F vektörleri arasındaki açıdır. Momentin yönü, saat ibresi yönünde bir dönme hareketi oluşturacak şekilde olursa saat ibresi yönünde; saat ibreleri tersi yönünde bir dönme hareketi oluşturacak şekilde ise saat ibresine ters yöndedir denir.

Moment birimleri SI birim sistemi için Newton-metre; İngiliz birim sistemi için pound-foot'dir.

Güç P: Güç; birim zamanda yapılan iş veya işteki artış miktarıdır. Güç denklemi;

$$P = \frac{dW}{dt} \quad 1.33$$

şekilindedir. Güç kavramının birimi, saniyedeki joule cinsinden (Watt) olarak verilmektedir.

1.8 Ferromanyetik Malzemelerin Manyetik Davranışı

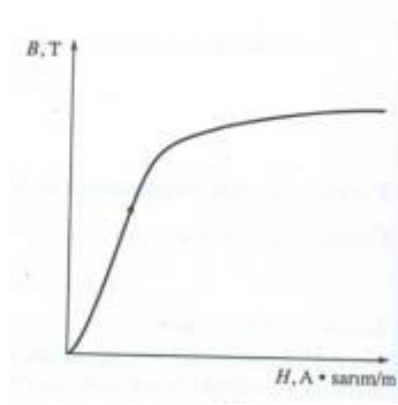
Manyetik geçirgenlik,

$$B = \mu H \quad 1.34$$

Denklemleriyle ifade edilmektedir. Ferromanyetik malzemelerin manyetik geçirgenliği boşluğunkinden 6000 kat kadar yüksektir. Boşluğun geçirgenliği sabit olmasına rağmen; demir ve diğer ferromanyetik malzemelerin geçirgenlikleri sabit değildir.

Şekil 1.9 'a benzeyen bir değişim elde edilir. Elde edilen bu grafiğe doyma eğrisi veya mıknatıslanma eğrisi denir. İlk olarak manyetik alan şiddetindeki küçük bir artış, manyetik akı yoğunluğunda büyük bir artışa neden olmaktadır. Belli bir noktadan sonra manyetik alan şiddetindeki büyük artış akı yoğunluğunda göreceli olarak çok küçük bir artışa neden olmakta ve hemen hemen akı yoğunluğunu değiştirmemektedir. Eğrinin yassılaştığı şeklin bu bölgesi *doyma bölgesi* olarak isimlendirilir ve bu bölgede çekirdeğin doyduğu söylenir.

Akı yoğunluğu değişiminin çok hızlı olduğu bölgeye de eğrinin *doymamış bölgesi* denir ve bu bölgede çekirdeğin doyumda olmadığı söylenir. Doyum bölgesiyle, doymamış bölge arasındaki geçiş bölgesi bazen *eğrinin dirseği* olarak isimlendirilir. Doymamış bölgede çekirdekte üretilen akı uygulanan e.m.k değeri ile doğrusal değişmekte ve doyma bölgesinde ise e.m.k değerinden bağımsız olarak sabit bir değere ulaşmaktadır.



Şekil 1.9 Manyetik Alan Şiddeti ve Akı Yoğunluğu İlişkisi

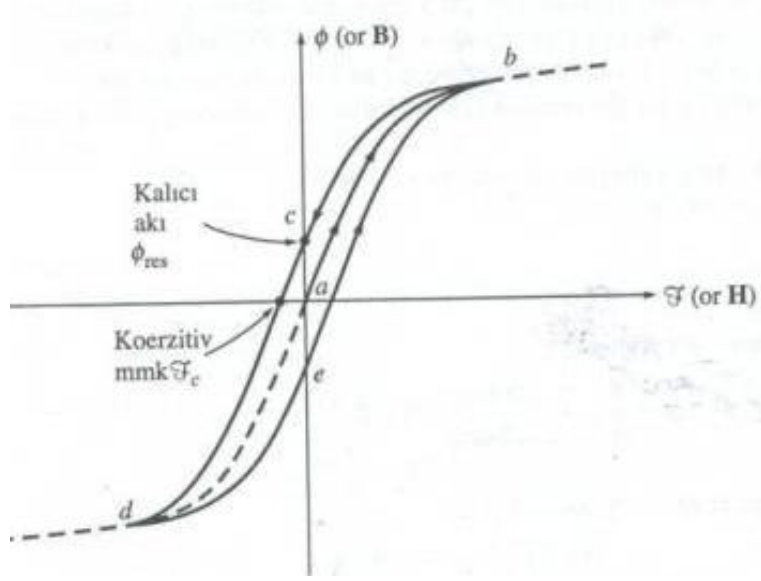
Şekil 1.9 ‘daki akı yoğunluğunun mıknatıslanma şiddetine göre değişim grafiğinin manyetik alan şiddetinin herhangi bir değerindeki eğimi, bu mıknatıslanma şiddetinde çekirdeğin geçirgenliğini vermektedir.

Elektrik makineleri ve transformatörlerde çekirdek olarak ferromanyetik bir malzemeyi kullanmanın avantajı; belirli bir e.m.k değerinde demirde, havaya göre çok daha büyük akı değerlerinin elde edilmesidir. Bununla birlikte, nihai akının, uygulanan e.m.k ile yaklaşık olarak orantılı olması gerekirse, bu durumda çekirdek, mıknatıslanma eğrisinin doymamış bölgesinde çalıştırılmalıdır.

Generatör ve motorların gerilim ve moment üretimi manyetik akıya bağlı olduğundan dolayı, elektrik makineleri mümkün olduğunca çok akı üretecek şekilde tasarlanmaktadır. Bu nedenle elektrik makinelerinin çoğu, mıknatıslanma eğrisinin dirseğe yakın bölgesinde çalışırlar ve çekirdeklerindeki akı ile akıyı üreten manyetik alan şiddeti arasındaki ilişki tam doğrusal olmasada doğrusal olmaya yakındır. Doyma bölgesinde çalışma durumu, makinelerin olağan dışı davranışlarının çoğunun nedenini oluşturmaktadır.

1.9 Ferromanyetik Bir Çekirdekteki Enerji Kayıpları

Çekirdek üzerindeki sargılara bir doğru akım yerine bir alternatif akım uygulayalım ve ne olduğunu izleyelim. Çekirdekteki akının başlangıçta sıfır olduğunu kabul edelim. Başlangıçta akım artarken, çekirdekteki akı Şekil 1.10 ‘daki *ab* yolunu izleyecektir. Bununla birlikte akım azalmaya başladığında; akının akım artışındaki aynı yolu izlemediği, farklı bir yol izlediği görülmektedir. Akım azalırken çekirdekteki akı, *bcd* yolunu izler ve sonra akım tekrar artarken *deb* yolundan dönüşünü tamamlar.



Şekil 1.10 Ferromanyetik Malzemede Histerisiz Eğrisi

Burada çekirdekdeki akının sadece çekirdek sargısından geçen akım miktarına bağlı olmayıp aynı zamanda çekirdekte önceden bulunan akı miktarına da bağlı olduğuna da dikkat edilmelidir. Çekirdek akısı bu çekirdeğin önceki akı geçmişine bağlıdır ve akı yollarının aynı yolları takip etmemesi *histeresis* olarak isimlendirilir. Sargıdan geçen akım değişirken Şekil 1.10 'da izlenen *bcdeb* yolu bir *histeresis çevrimi* olarak isimlendirilir.

Çekirdeği büyük bir manyetik alana maruz bırakıp sonra bu alan kaldırıldığında, çekirdekdeki akı yolunun *abc* olacağına dikkat ediniz. E.m.k kaldırıldığında, çekirdekdeki akı sıfıra gitmez. Çekirdekte artık bir manyetik alan kalır. Bu manyetik alan çekirdekdeki kalıcı akı, artık mıknatısiyet olarak isimlendirilir. Akıyı sıfıra götürmek için zıt e.m.k denilen ters bir e.m.k'in çekirdeğe uygulanması gerekir.

Ferromanyetik malzemelerin davranışını anlamak için bunların yapısı hakkında bazı şeylerin bilinmesi gerekir. Demir ve benzer metallerin (kobalt, nikel ve onların bazı alaşımları) atomları birbirleriyle çok yakın bir şekilde sıralanmaya çalışırlar. Metal içerisinde dipol (parçacık) olarak isimlendirilen küçük bölgeler vardır.

Dışarıdan bir manyetik alan bu demir malzemeye uygulandığında; demirde alan uygulanmadan önce alana ters yönde olan parçacıkların da alan yönünde kutuplanması sağlanır. Parçacıkların manyetik alan yönünde kutuplanma nedeni; fiziksel olarak yapılarında bulunan atomların manyetik alan yönündeki dizilişleridir. Alanla aynı hizada dizilen ekstra atomlar demirdeki manyetik akıyı artırır, bu da daha fazla atomun manyetik akı yönünde dizilmesini sağlamakta ve manyetik alan şiddetini arttırmaktadır.

Bir demir çekirdekdeki histeresis kaybı çekirdeğe uygulanan alternatif akımın her bir periyodunda dipollerin tekrar dizilişini oluşturmak için gereken enerjidir. Bu enerjinin çekirdeğe bir alternatif akımın uygulanmasıyla ortaya çıkan bir histeresis çevrimindeki kapalı alana eşit ve verilen bir AA periyodundaki enerji kaybıyla doğrudan orantılı olduğu gösterilebilir.

Önceden de bahsedildiği Faraday Kanunu, girdap akım kayıplarını da açıklar. Zamanla değişen akı, çekirdek üzerine sarılan bir sargıdaki gibi ferromanyetik bir çekirdek üzerinde de bir gerilim indükler. Bu gerilimler çekirdek üzerinde girdap şeklinde akımların akmasına neden olmaktadır.

Girdap akımlarının neden olduğu kayıp enerji miktarı, çekirdek içerisindeki enerjinin dolaştığı yolların hacmiyle orantılıdır. Bu nedenle ferromanyetik çekirdeğin hacmini azaltmak için çekirdek ince şerit veya laminasyon şeklinde birbirlerine göre izoleli bir çok parçadan oluşturulur. İzolasyon için ince plakalar arasında oksit veya reçine kullanılır. Böylece girdap akımları için akım yolları çok küçük alanlara sınırlanır. Girdap akım kayıpları laminasyon kalınlığının karesiyle orantılıdır. Dolayısıyla laminasyon kalınlığının ekonomik olarak mümkün olduğunca ince yapılmasının büyük önemi vardır.