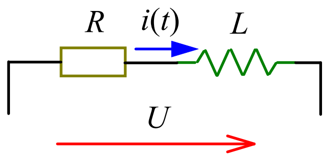
A mágneses tér energiája, állandó mágnesek, erőhatások, veszteségek

A mágneses tér energiája

Egy koncentrált paraméterű, ellenállással és induktivitással jellemzett tekercs U=áll. feszültségre kapcsolásakor az $U = u_R(t) + u_L(t) = i(t)R + \frac{d\psi(t)}{dt}$ feszültség egyenlet érvényes.



Koncentrált paraméterű tekercs

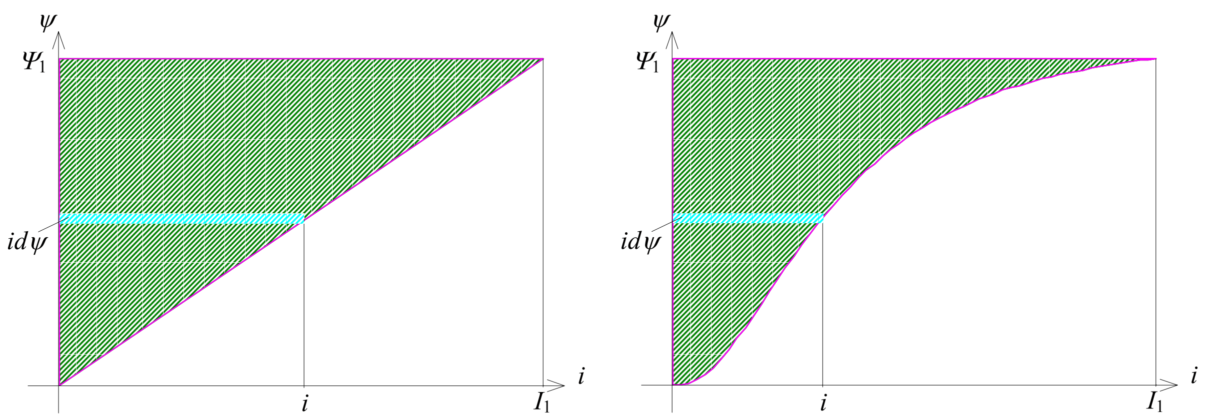
A tekercs által dt idő alatt felvett energia: $dw=dw_R+dw_m=Ui(t)dt=i^2(t)Rdt+i(t)d\psi(t)$.
Az energia egyik része $[i^2(t)Rdt]$ a tekercs ellenállásán hővé alakul, a másik része $[i(t)d\psi(t)]$ pedig felhalmozódik a mágneses térben. Ez utóbbi rész az áram csökkenésekor – a tér leépülésekor – visszanyerhető.
Ha egy bekapcsolási folyamat alatt a $\psi(t)$ fluxus 0-ról Ψ_1 értékre nő (az $i(t)$ áram 0-ról I_1-re), akkor a mágneses térben felhalmozódó teljes W_{m1} energia:

$$W_{m1} = \int_0^{\Psi_1} i(t)d\psi \, .$$

Lineáris $\psi(i)$ kapcsolat (pl. vasmentes tekercs) esetén L=áll., $d\psi=Ldi$ és $\Psi_1=LI_1$, amivel

$$W_{m1} = L\int_0^{I_1} i(t)di = \frac{1}{2}LI_1^2 = \frac{1}{2}\Psi_1 I_1 = \frac{1}{2}\frac{\Psi_1^2}{L} \, .$$

A tekercsben felhalmozott energia a <u>tekercsfluxusból</u> és az áramból számítható, <u>ugyanakkora áramnál</u> az induktivitással arányos.
Ferromágneses anyagot tartalmazó körben (pl. vasmagos tekercsnél) a $\psi(i)$ kapcsolat nemlineáris, $L\neq$áll., ezért az integrálás nem egyszerűsíthető.



Egy tekercsben felhalmozott energia, ha a közeg
nem ferromágneses *ferromágneses*

A fenti tekercset a tápforrásról lekapcsolva a mágneses térben tárolt energiát visszakapjuk, a fluxuscsökkenés hatására keletkező önindukciós feszültség ugyanis az áram fenntartására,

csökkenésének késleltetésére törekszik (l. Lenz törvénye). Ez az induktív áramkörök megszakításakor is igaz, ezért az ilyen művelet különös figyelmet és körültekintést igényel.
Homogén, lineáris esetben (μ=áll. esetén) a mágneses energia egyszerűen kifejezhető a térjellemzőkkel is.
A $\Psi=N\Phi=NBA$ és a $\Theta=NI=H\ell$ összefüggések felhasználásával

$$W=\frac{1}{2}\Psi I=\frac{1}{2}NBA\frac{H\ell}{N}=\frac{1}{2}VHB,$$

ahol $V=A\ell$ – a vizsgált térfogat.
A térfogategységben tárolt energia (energiasűrűség):

$$w=\frac{W}{V}=\frac{1}{2}HB=\frac{1}{2}\mu H^2=\frac{1}{2}\frac{B^2}{\mu}.$$

Homogén, nemlineáris térben ($\mu\neq$áll. esetén, pl. vasmagos szolenoid, toroid)

$$W=\int_0^{\psi_1} i(t)d\psi=\int_0^{\psi_1}\frac{H\ell}{N}d\psi=\int_0^{\Phi_1}\frac{H\ell}{N}Nd\Phi=\int_0^{B_1}A\ell HdB=V\int_0^{B_1}HdB,$$

a térfogategységben tárolt energia pedig:

$$w=\int_0^{B_1}HdB.$$

Az utóbbi összefüggés az inhomogén tér egyes pontjaira is igaz, így általános esetben, adott V térfogat mágneses energiája:

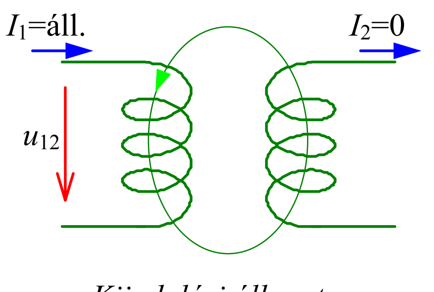
$$W=\int_V\int_B HdBdV.$$

Csatolt körök mágneses energiája
Vasmentes közegben legyen az első tekercs árama I_1=állandó, a második tekercs pedig árammentes. Ebben az esetben az első tekercsben felhalmozott mágneses energia:

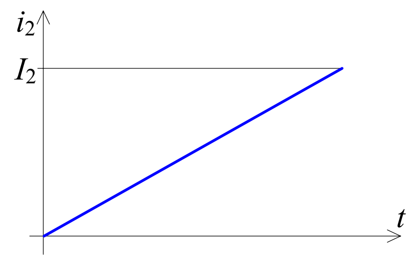
$$W_1=\frac{1}{2}L_1I_1^2.$$

A második tekercs $i_2(t)$ áramát nulláról I_2-re növelve – a ψ_{12} fluxus változása miatt – az első tekercsben is feszültség indukálódik, amelynek nagysága a $\frac{di_2}{dt}$ áramváltozás hatására:

$$u_{i12}=\frac{d\psi_{12}}{dt}=M_{12}\frac{di_2}{dt}.$$



Kiindulási állapot



A második tekercs áramának növelése

Amennyiben a tekercsek azonos irányban mágneseznek ($\psi_1=\psi_{11}+d\psi_{12}$), akkor az u_{i12} feszültség – Lenz törvénye értelmében – I_1-et csökkenteni akarja (hogy az 1. tekerccsel kapcsolódó eredő fluxus változatlan maradjon). I_1 állandó értéken tartásához $i_2(t)$ változásától függő $dw=u_{i12}I_1dt=M_{12}I_1di_2$ energia-bevitelre van szükség.

Az $i_2(t)$ teljes változási ideje alatt a csatolás miatt szükséges energiafelvétel:

$$W_{cs} = \int_0^{I_2} M_{12} I_1 di_2 = M_{12} I_1 I_2 .$$

A második tekercs terének felépítése során a 2. tekercsben felhalmozott energia: $W_2 = \frac{1}{2} L_2 I_2^2$.

A két tekercs együttes energiája tehát:

$$W = \frac{1}{2} L_1 I_1^2 + M_{12} I_1 I_2 + \frac{1}{2} L_2 I_2^2 .$$

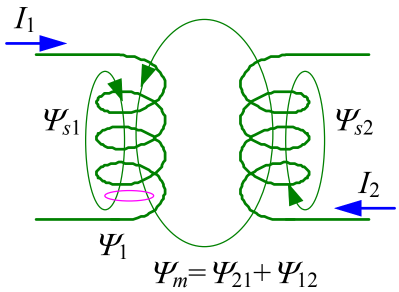
A bekapcsolás sorrendjétől a teljes felhalmozott energia általában nem függ, fordított sorrend esetén, a második tekercs után az első feszültségre kapcsolásakor

$$W = \frac{1}{2} L_2 I_2^2 + M_{21} I_2 I_1 + \frac{1}{2} L_1 I_1^2 .$$

A csatolás miatti tag előjele attól függ, hogy a két áram egymás mágneses hatását erősíti vagy rontja, így $M I_1 I_2 \lessgtr 0$.

Csatolt körök szórásának számítása a mágneses energia alapján

Ha egy tekercs csak részben kapcsolódik a közelében elhelyezkedő másik tekercs fluxusával, akkor a mágneses energia egy része a közös, másik része a szórt térben halmozódik fel. Ezért valamilyen adott tekercsfluxus létrehozása többletenergiát igényel, a szórt térbe kerülő energiát.



Tételezzük fel, hogy az 1. tekercsben akkora Ψ_1 fluxust kell létrehozni, ami nagyobb az I_1 által létrehozottnál ($\Psi_1 > \Psi_{11} = I_1 L_1$), tehát a 2. tekercs közreműködése, az I_2 által előállított $\Psi_{12} = I_2 M_{12}$ is szükséges: $\Psi_1 = I_1 L_1 + I_2 M_{12}$.

Ψ_1 létrehozása során így kialakul a 2. tekercs Ψ_{s2} szórása is, a 2. tekercs szórt terében is felhalmozódik energia.

A két tekercs együttes mágneses energiája az előzőek szerint:

$$W = \frac{1}{2} L_1 I_1^2 + M_{12} I_1 I_2 + \frac{1}{2} L_2 I_2^2 .$$

Vizsgáljuk meg azt, hogy mekkora W^* energiával (és I_1^* árammal) lehetne az előírt Ψ_1 fluxust létrehozni egyedül csak az 1. tekercs árama által. Ebben az esetben ugyanis – mivel I_2=0 maradhat – nem alakul ki Ψ_{s2} szórt fluxus és nem is tárol energiát a 2. tekercs szórt tere.

$$I_1^* = \frac{\Psi_1}{L_1} = I_1 + \frac{M_{12}}{L_1} I_2 .$$

Ebben az esetben a Ψ_1 fluxus kialakítása során tárolt energia:

$$W^* = \frac{1}{2} L_1 I_1^{*2} = \frac{1}{2} L_1 \left(I_1^2 + 2 I_1 \frac{M_{12}}{L_1} I_2 + \frac{M_{12}^2}{L_1^2} I_2^2 \right) = \frac{1}{2} L_1 I_1^2 + M_{12} I_1 I_2 + \frac{1}{2} \frac{M_{12}^2}{L_1} I_2^2 .$$

A 2. tekercs szórt fluxusának létrehozására az előző esetben fordított W_{s2} energia megegyezik a W-W^* különbséggel:

$$W_{s2} = W - W^* = \frac{1}{2} L_2 I_2^2 \left(1 - \frac{M_{12}^2}{L_1 L_2} \right).$$

A zárójelben lévő kifejezés a 2. tekercs szórási tényezője: $\sigma_2 = 1 - \frac{M_{12}^2}{L_1 L_2}$, amivel

$$W_{s2} = \frac{1}{2} \sigma_2 L_2 I_2^2 .$$

Mivel $M_{12}^2 \leq L_1 L_2$, ezért $0<\sigma_2<1$.
A szórási tényező értelmezése: az I_2 áram a $\sigma_2 L_2$ induktivitáson hozza létre a szórt fluxust, az $(1-\sigma_2)L_2$ induktivitáson az 1. tekerccsel is kapcsolódó kölcsönös fluxust:

$$\Psi_{s2}=I_2\sigma_2 L_2 \text{ és } \Psi_{12}=I_2(1-\sigma_2)L_2, \text{ mivel } \Psi_{22}=\Psi_{s2}+\Psi_{12}=I_2 L_2.$$

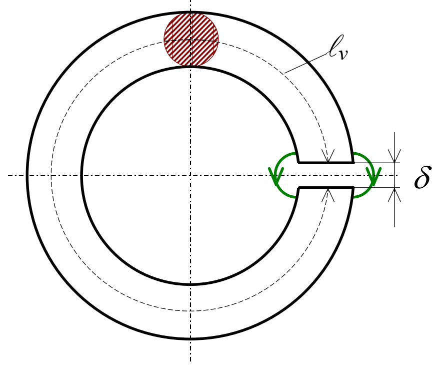
Másképpen, a szórási tényező egy tekercs szórt fluxusának és teljes fluxusának hányadosa:

$$\sigma_2 = \frac{\Psi_{s2}}{\Psi_{22}}.$$

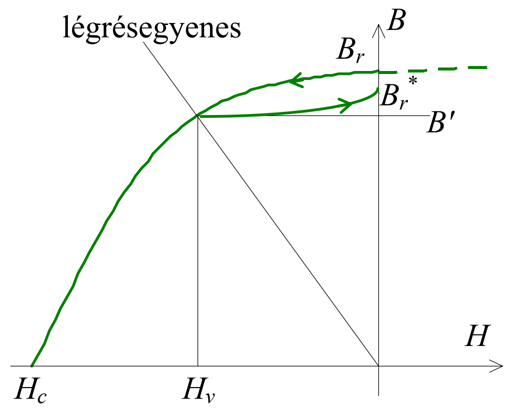
A 2. tekercs szórt terének energiája a tekercs által létrehozott mágneses térben felhalmozott W_2 energia σ_2-szerese.
Fordított esetben, amikor valamilyen Ψ_2 fluxust kell létrehozni az 1. tekercs közreműködésével, akkor az 1. tekercs szórt terének létrehozásához szükséges energia számítható. Az 1. tekercs szórási tényezője: $\sigma_1 = 1 - \frac{M_{21}^2}{L_1 L_2}$.

Állandó mágnesek

Az állandó mágnesek olyan anyagok, amelyek mágneses tere egyszeri felmágnesezés után gerjesztés nélkül is tartósan megmarad, ami csak erős lemágnesező hatással szüntethető meg. Ezeket az anyagokat kemény mágneseknek is nevezik, a könnyen átmágnesezhető lágy mágnesektől eltérő tulajdonságaik kifejezésére.
Egy zárt gyűrűt a telítési indukcióig mágnesezve, a gerjesztés megszűnte után B_r remanens indukció marad fenn. Mivel a Θ gerjesztés zérus, a gerjesztési törvény értelmében a vas H_v térerőssége is zérus, így a W_m tárolt mágneses energia is az.



Gyűrű alakú állandó mágnes



Állandó mágnes B_v-H_v görbéje (munkatartománya)

A gyűrűbe légrést vágva a gerjesztési törvény szerint $H_v\ell_v+H_\delta\delta=0$ (mivel továbbra sincs gerjesztés), amiből a vas megváltozott térerőssége:

$$H_v = -H_\delta \frac{\delta}{\ell_v} = -\frac{B_\delta \delta}{\mu_0 \ell_v},$$

itt ℓ_v – a közepes erővonalhossz a vasban.
Tehát negatív előjelű, lemágnesező térerősség alakul ki a vasban, az indukció pediga remanens értékről B' értékre csökken.
Ha a <u>szórás elhanyagolható</u>, $\Phi_s=0$, akkor a fluxus a vasban és a légrésben megegyezik, $\Phi_v=\Phi_\delta$ vagy $B_v A_v=B_\delta A_\delta$, amiből $B_\delta = B_v \frac{A_v}{A_\delta}$.

A gerjesztési törvény előző összefüggéséből: $H_v = -\frac{1}{\mu_0}\frac{A_v}{A_\delta}\frac{\delta}{\ell_v} B_v = -aB_v$, vagyis lineáris kapcsolatot kapunk az állandó mágnes térerőssége és indukciója között (légrésegyenes).

Ha a légrés <u>szórása nem elhanyagolható</u>, akkor a légrés fluxusa kisebb, mint a vasé. $\sigma = \frac{\Phi_s}{\Phi_v}$ értelmezéssel:

$$\Phi_\delta=\Phi_v-\Phi_s=\Phi_v-\sigma\Phi_v=(1-\sigma)\Phi_v.$$

Ebből $B_\delta = B_v \frac{(1-\sigma)A_v}{A_\delta}$ és $H_v = -\frac{1-\sigma}{\mu_0}\frac{A_v}{A_\delta}\frac{\delta}{\ell_v} B_v = -(1-\sigma)aB_v$.

Az állandó mágnes munkatartománya a $B_v(H_v)$ mágnesezési görbe leszálló ága, amiből a munkapontot a légrésegyenes kimetszi (mágnesezési görbe + gerjesztési törvény). A légrés mérete az alkalmazástól függ.
A mágnes minőségének egyik jellemzője az, hogy a légrés megszüntetése, a H_v térerősség ismételt zérusra csökkentése után kialakuló B_r^* indukció kisebb-e – és mennyivel – a kezdeti B_r-nél.
Az állandó mágnesek <u>munkatartománya</u> rendszerint a B_v-H_v görbe lineáris, <u>telítési szakaszára</u> esik, ezért számításoknál permeabilitását μ_0-nak vagy közel μ_0-nak veszik.

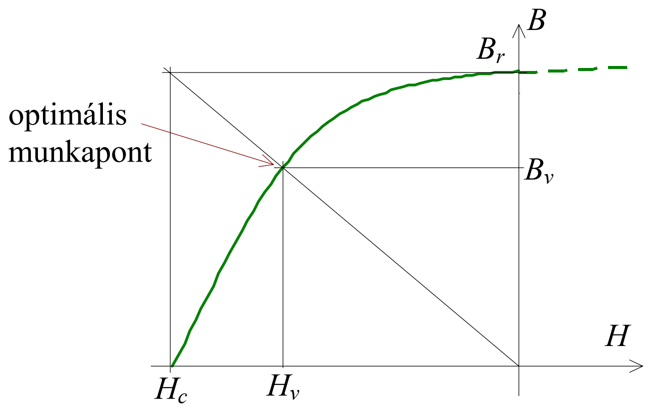
<u>Permanens mágnes ötvözetek</u>
Különböző összetételű Al-Ni-Co acél ötvözetek,
Ag-Mn-Al nem ferromágneses anyagok ötvözete,
W-acél, Fe-Co-V, Fe-Ni-Cu, Fe-Pt, Co-Pt, Sm_2-Co_{17}, Nd-Fe-B

<u>Kemény mágnesek optimális kihasználása</u>
Állandó mágneseket tartalmazó mágneses körökben rendszerint lágy mágnes szakaszok és légrés is van. A kemény mágnes anyagok magas ára indokolja a minél kisebb mennyiség felhasználását.
A szórás és a lágyvas szakaszok mágneses feszültségének (gerjesztésének) elhanyagolásával

$$H_\delta\delta=-H_v\ell_v \text{ és } \Phi_\delta=\Phi_v= B_vA_v,$$

itt a v index a kemény mágnesre vonatkozik.
Az állandó mágnes anyag térfogata $H_\delta = \frac{B_\delta}{\mu_0} = \frac{\Phi_\delta}{\mu_0 A_\delta}$ helyettesítéssel:

$$V_v = \ell_v A_v = \frac{H_\delta \delta}{H_v}\frac{\Phi_\delta}{B_v} = \Phi_\delta^2 \frac{\delta}{\mu_0 A_\delta}\frac{1}{H_v B_v}.$$



Az optimális munkapont grafikus meghatározása

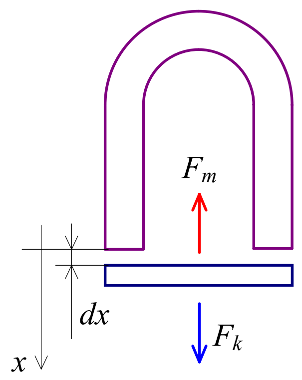
Adott légrés méret és légrés fluxus esetén a szükséges kemény mágnes térfogata akkor a legkisebb, ha a H_vB_v szorzat (jósági szorzat, energia szorzat) a legnagyobb:

$$V_{v\,min} = c\frac{1}{\left(H_vB_v\right)_{max}}.$$

$(H_vB_v)_{max}$ közelítően grafikus úton határozható meg.

Az állandó mágnes erőhatása

Zárt (légrésmentes) mágnes energiája (munkavégző képessége) zérus, mivel H=0.



A mágneses erőhatás számítása

Légrésnyitás után $H\neq 0$, a befektetett mechanikai energia tárolt mágneses energiává és veszteséggé alakul:

$$dW_{mech}=dW_{mágn}+dW_{veszt},$$

ahol dW_{mech} – a bevitt mechanikai energia, $dW_{mágn}$ – a mágneses energia, dW_{veszt} – a veszteségi energia.

Ha a veszteség és a szórás elhanyagolható, akkor $dW_{veszt}=0$, $\phi_\delta=\phi_v=\phi$,

itt ϕ_δ – a légrés, ϕ_v – a vas fluxusa.

A mechanikai energia:

$$dW_{mech}=F_kdx=-F_mdx,$$

itt F_k – a külső erőhatás, F_m – a mágnes által kifejtett húzóerő.

A negatív előjel azt jelenti, hogy x ábra szerint felvett (+) iránya mellett F_m hatására dx csökken.

F_m nagysága a virtuális munkavégzés alapján számítható.

A virtuális munka elve

Anyagi rendszer akkor van egyensúlyban, ha a rá ható erők eredője zérus. Ez az erőegyensúly meghatározható a virtuális munka számításával.

Virtuális munka: a rendszerre ható valóságos erőknek (F_k, F_m) egy virtuális (lehetséges) dx elmozdulás során végzett munkája.

A valóságos erők egyensúlyának az a feltétele, hogy az eredő virtuális munka zérus legyen. Vagyis, egy valóságos, működő erőknek kitett rendszer akkor, és csakis akkor van egyensúlyban, ha a valóságos erők által végzett eredő virtuális munka zérus: $F_k dx + F_m dx = 0$.

Ha egy valóságos erő nem ismert, de a vele egyensúlyt tartó másik erő által végzett munkát – ami megegyezik az ismeretlen erő által végzett munkával – energiaváltozásból számítani tudjuk, akkor az ismeretlen erő – jelen esetben F_m – meghatározható.

A tárolt mágneses energia $dW_{mágn}$ változása a vasban (dW_{vas}) és a légrésben (dW_δ) felhalmozott energia változásából adódik:

$$dW_{mágn} = dW_{vas} + dW_\delta .$$

A vasban felhalmozott teljes energia $W_{vas} = V_{vas} \int_{B_{vas}} H_{vas} dB_{vas}$, így annak változása

$$dW_{vas} = V_{vas} H_{vas} dB_{vas} = \ell_{vas} A_{vas} H_{vas} dB_{vas} = \ell_{vas} H_{vas} d\phi .$$

A légrésben felhalmozott teljes energia $W_\delta = \frac{1}{2} V_\delta H_\delta B_\delta = \frac{1}{2} V_\delta \frac{B_\delta^2}{\mu_0}$. A zárólemez dx mértékű elmozdulása következtében a légrés mérete (térfogata) is és az indukció is változik, ezért

$$dW_\delta = \frac{\partial W_\delta}{\partial V_\delta} dx + \frac{\partial W_\delta}{\partial B_\delta} dx \text{, így}$$

$$dW_\delta = \frac{1}{2} \frac{B_\delta^2}{\mu_0} \frac{dV_\delta}{dx} dx + \frac{1}{2} V_\delta \frac{2B_\delta}{\mu_0} \frac{dB_\delta}{dx} dx = \frac{1}{2} \frac{B_\delta^2}{\mu_0} A_\delta dx + V_\delta H_\delta dB_\delta = \frac{1}{2} \frac{B_\delta^2}{\mu_0} A_\delta dx + \delta H_\delta d\phi \; .$$

Ezekkel az energiaegyenlet:

$$F_k dx = \ell_{vas} H_{vas} d\phi + \frac{1}{2} \frac{B_\delta^2}{\mu_0} A_\delta dx + \delta H_\delta d\phi = \left(\ell_{vas} H_{vas} + \delta H_\delta\right) d\phi + \frac{1}{2} \frac{B_\delta^2}{\mu_0} A_\delta dx .$$

Mivel a gerjesztési törvény szerint $\ell_{vas} H_{vas} + \delta H_\delta = 0$, statikus állapotban a mágnes által kifejtett erő:

$$F_m = -\frac{1}{2} \frac{B_\delta^2}{\mu_0} A_\delta .$$

Az elektromágnes erőhatása

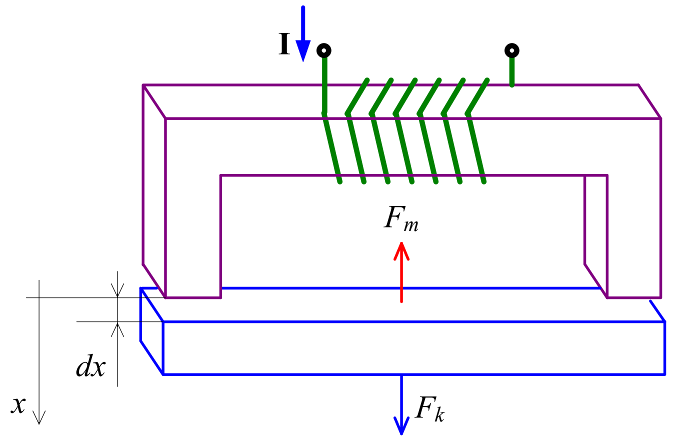
Ebben az esetben a mágneses teret gerjesztett tekercs hozza létre.

Az energia-megmaradás elve értelmében a külső forrásból felvett villamos energia és a külső mechanikai munka összege megegyezik a tárolt mágneses energia és a veszteség összegével, ami változásokra is igaz:

$$dW_{vill} + dW_{mech} = dW_{mágn} + dW_{veszt} .$$

Egyenáramú táplálásnál a gerjesztőáramot a tekercs ellenállása határozza meg, ezért a gerjesztés állandó $\Theta = \sum_i H_i \ell_i = \text{áll.}$, így a légrés növelésekor térerősség és a fluxus csökken, csökkenésekor növekszik. A $d\psi$ fluxusváltozás miatt keletkező u_i indukált feszültség dt idő alatt $u_i i dt$ villamos energiát jelent, ami a változás ellen hat. Tehát, a változás véghezviteléhez ezt az energiát a külső tápforrásból ellensúlyozni kell

$$dW_{vill} = u_i idt = N\frac{d\phi}{dt}idt = Nid\phi\,.$$



A elektromágneses erőhatásának számítása

Az F_k külső erő által végzett mechanikai munka:

$$dW_{mech}= F_k dx.$$

A mágneses körben (a vasban és a légrésben) felhalmozott energia a virtuális elmozdulás miatt változik.

A szórás elhanyagolásával a vas mágneses energiája – $W_{vas} = V_{vas}\int\limits_{B_{vas}} H_{vas} dB_{vas}$ – az indukció változása miatt, a légrésben felhalmozott energia – $W_\delta = \frac{1}{2}V_\delta H_\delta B_\delta = \frac{1}{2}V_\delta \frac{B_\delta^2}{\mu_0}$ – pedig a lég-rés mérete (térfogata) és az indukció változása miatt változik:

$$dW_{vas}=V_{vas}H_{vas}dB_{vas}=\ell_{vas}H_{vas}d\phi,$$

$$dW_\delta = \frac{1}{2}\frac{B_\delta^2}{\mu_0}\frac{dV_\delta}{dx}dx + \frac{1}{2}V_\delta\frac{2B_\delta}{\mu_0}\frac{dB_\delta}{dx}dx = \frac{1}{2}\frac{B_\delta^2}{\mu_0}A_\delta dx + \delta\, H_\delta d\phi\,.$$

A veszteségi energia változásának elhanyagolásával ($I^2_{tekercs}R$=áll.) az egyensúlyi egyenlet:

$$dW_{vill}+dW_{mech}= dW_{vas}+dW_\delta.$$

Behelyettesítve az egyes összetevőket:

$$Nid\phi + F_k dx = \left(H_{vas}\ell_{vas} + H_\delta\delta\right)d\phi + \frac{1}{2}\frac{B_\delta^2}{\mu_0}A_\delta dx\,.$$

Mivel a gerjesztési törvény szerint $Ni=H_{vas}\ell_{vas}+H_\delta\delta$, ezért $F_k dx = \frac{1}{2}\frac{B_\delta^2}{\mu_0}A_\delta dx$ és így statikus állapotban az elektromágnes által kifejtett erő:

$$F_m = -\frac{1}{2}\frac{B_\delta^2}{\mu_0}A_\delta\,,$$

megegyezik az állandó mágnesnél kapott eredménnyel.

A változó fluxus okozta veszteségek

Az állandó mágneses tér (fluxus) fenntartása nem jár veszteséggel, nem kíván energia-bevitelt (l. állandó mágnesek).

Változó fluxus hatására viszont a mágneses kör vasmagjában veszteségek keletkeznek, amelyek annak melegedését okozzák. A P_{Fe} vasveszteségnek jellegét tekintve két összetevője van:

- hiszterézis veszteség,
- örvényáram veszteség.

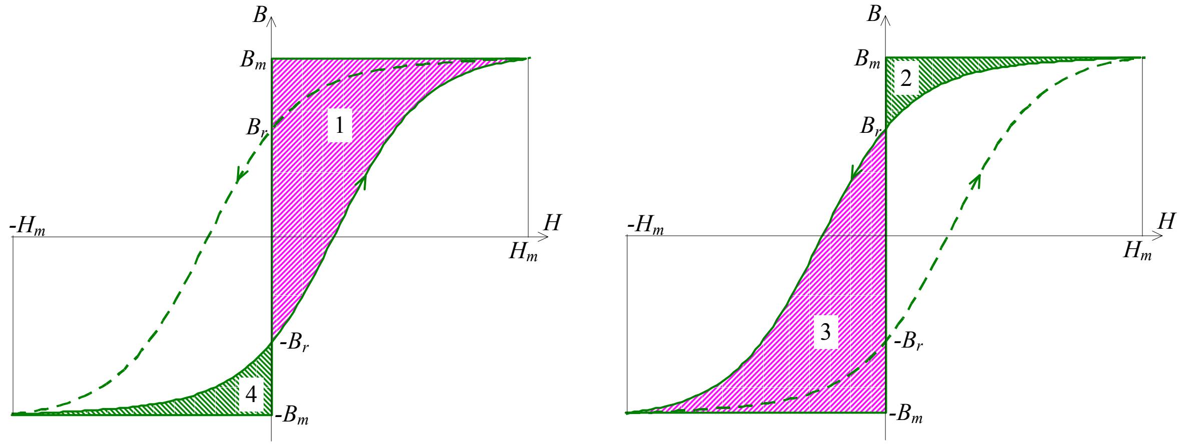
$$P_{Fe}= P_{hisz} + P_{örv}.$$

Nemszinuszos változás esetén a felharmonikusok által okozott vasveszteséget külön kell számítani.

Vasveszteség szinuszos táplálásnál

a) Hiszterézis veszteség

A hiszterézis veszteség egyszerűen úgy értelmezhető, hogy a B indukció és a H térerősség változása következtében a vas elemi mágnesei átrendeződnek, ami belső súrlódással jár. Ez az átmágnesezési veszteség. A térfogategységben felhalmozott mágneses energia $w = \int_B HdB$ értéke a hiszterézis görbe mentén szakaszonként számítható.



A felvett és a leadott mágneses energia a hiszterézis görbe
felszálló ága mentén *leszálló ága mentén*

1. A $-B_r \leq B \leq B_m$ ($0 \leq H \leq H_m$) szakaszon $H \geq 0$ és $dB > 0$, ezért $\Delta w > 0$, tehát energia felvétel történik.
2. A $B_m \geq B \geq B_r$ ($H_m \geq H \geq 0$) szakaszon $H \geq 0$ és $dB < 0$, ezért $\Delta w < 0$, itt energia leadás történik.
3. A $B_r \geq B \geq -B_m$ ($0 \geq H \geq -H_m$) szakaszon $H \leq 0$ és $dB < 0$, ezért $\Delta w > 0$, ezen a szakaszon is energia felvétel történik.
4. A $-B_m \leq B \leq -B_r$ ($-H_m \leq H \leq 0$) szakaszon $H \leq 0$ és $dB > 0$, ezért $\Delta w < 0$, tehát energia leadás történik.

Egy teljes átmágnesezési periódus alatt a felvett és a leadott energia különbsége – az átmágnesezési vesztéség – megegyezik a hiszterézishurok területével.

Steinmetz[1] tapasztalati képlete szerint a hiszterézis hurok területe:

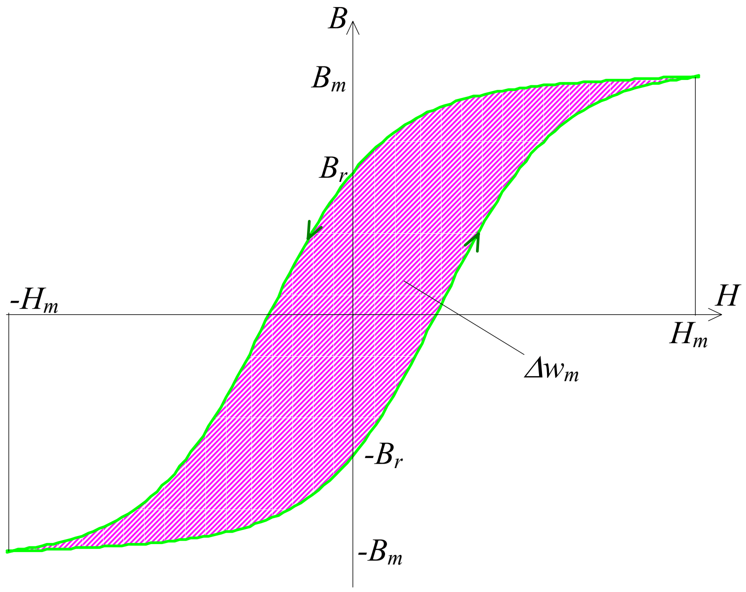
$$\Delta w_m=\gamma B_{max}^{\ x},$$

itt γ – anyagjellemző, x – B_{max}-tól függő anyagjellemző, x=1,7-2.

[1] Charles Proteus Steinmetz (1865-1923) német származású (Karl August Rudolf Steinmetz) amerikai kutató, villamosmérnök.

$$P_{hisz}=\gamma B_{max}^{x} fV \approx k_{hisz} \Psi^2 f.$$

Ez a terület 1 átmágnesezési ciklus veszteségével arányos, a P_{hisz} hiszterézis veszteségi teljesítmény számításához ezt az időegység alatti átmágnesezések számával, az f periódusszámmal és a V térfogattal kell szorozni:

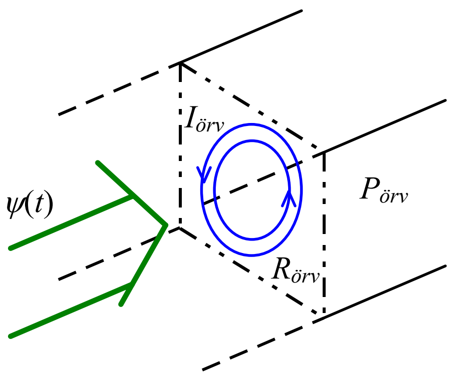


A felvett és a leadott mágneses energia különbsége a hiszterézis görbe alatti terület

Egy adott mágneses körnél k_{hisz} értéke a konkrét geometriára vonatkozik, azt is figyelembe véve, hogy Ψ lehet maximális vagy effektív érték.

b) Örvényáram veszteség

A változó fluxus a vasban feszültséget indukál, ami $I_{örv}$ ún. örvényáramokat hoz létre a viszonylag jó villamos vezető vasban. Ha az örvényáram-pálya ellenállása $R_{örv}$, akkor a keletkező örvényáram veszteség, ami a vas melegedését okozza, $P_{örv}=I_{örv}^2 R_{örv}$.



Az örvényáramok keletkezése

Csökkentése érdekében a vastestet, vasmagot nagy fajlagos ellenállású (pl. szilícium tartalmú) ötvözetből készítik, továbbá egymástól villamosan elszigetelt vékony lemezekből építik össze. A lemezszigetelés valamilyen alkalmas anyagból (pl. lakk) felvitt vékony réteg, vagy a mechanikai és mágneses tulajdonságok beállítását szolgáló hőkezelés során létrehozott szigetelő felület.

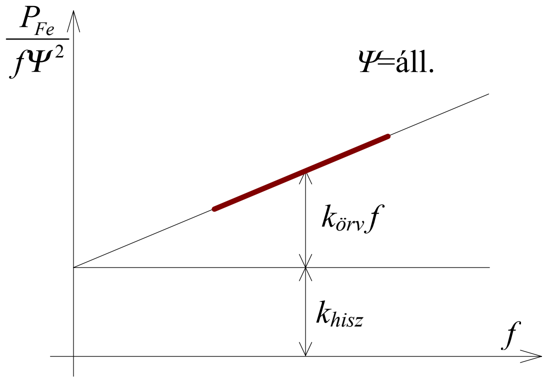
A szinusz alakú változás esetén indukálódó $U_{örv}$ feszültség $U_{\text{örv}} \approx \dfrac{d\Psi}{dt} \approx \Psi\, f$, $I_{örv} \approx U_{örv}$, így

$$P_{örv}=k_{örv}\,\Psi^2 f^2.$$

Egy adott gépnél $k_{örv}$ értéke a konkrét geometriára vonatkozik, figyelembe véve, hogy Ψ lehet maximális vagy effektív érték.

Az örvényáram- és a hiszterézis veszteség szétválasztása
Fejlesztési és diagnosztikai vizsgálatoknál szükség lehet a vasveszteség egyes összetevőinek mérési eredményekből történő számítására.
Ψ=áll. esetben, változó frekvenciájú és feszültségű táplálásnál
$P_{Fe}= P_{örv}+ P_{hisz}=k_{örv}\,\Psi^2 f^2+k_{hisz}\,\Psi^2 f=f\Psi^2(k_{örv}f+k_{hisz})$, amiből

$$\frac{P_{Fe}}{f\Psi^2} = \left(k_{\text{örv}} f + k_{hisz}\right).$$



Az örvényáram és a hiszterézis veszteség szétválasztása mérési adatok alapján

A $\dfrac{P_{Fe}}{f\Psi^2}$ hányados láthatóan szétválik egy állandó és egy frekvenciától lineárisan függő összetevőre. Ezt ábrázolva a $k_{örv}$ és k_{hisz} tényezők meghatározhatók.

Összeállította: Kádár István
2013. április

Ellenőrző kérdések

1. Hogyan határozható meg a vasmentes tekercsben tárolt mágneses energia?
2. Hogyan határozható meg a vasmagos tekercsben tárolt mágneses energia?
3. Hogyan határozható meg térjellemzőkkel egy adott térrészben tárolt mágneses energia?
4. Hogyan határozható meg térjellemzőkkel a mágneses tér energiasűrűsége?
5. Hogyan határozható meg a csatolt tekercsekben tárolt mágneses energia?
6. Hogyan számítható a csatolt körök szórása a mágneses energia alapján?
7. Illusztrálja és értelmezze az állandó mágnes $B(H)$ görbéjét.
8. Mit jelent az állandó mágnes optimális kihasználása?
9. Mi az "energiaszorzat"?
10. Hogyan határozható meg az állandó mágnes erőhatása?
11. Hogyan alkalmazható a virtuális munka elve?
12. Hogyan határozható meg az elektromágnes erőhatása?
13. Milyen összetevői vannak a vasveszteségnek?
14. Értelmezze a hiszterézis veszteséget és annak frekvenciafüggését.
15. Értelmezze az örvényáram veszteséget és annak frekvenciafüggését.
16. Milyen módon választható szét az örvényáram- és a hiszterézis veszteség?