

Elektriska drivsystem, 6-8 hp

Föreläsning 1 - Introduktion, magnetiska kretsar och material

Mattias Krysander

Institutionen för systemteknik
Linköpings universitet
matkr@isy.liu.se

2010-09-16

Mål med kursen

Kursens mål är att ge grundläggande kunskaper om elmaskiner och hur de används i elektriska drivsystem.

Efter genomförd kurs skall studenten kunna:

- ▶ förklara konstruktions- och funktionsprinciperna för likströmsmaskinen, synkron/asynkron-maskinen.
- ▶ redogöra för prestandaegenskaper för olika typer av maskiner.
- ▶ förklara och utföra beräkningar på centrala komponenter i elektriskt drivsystem som t ex elmotor, växellåda och last.
- ▶ på sakliga grunder kunna välja en passande motortyp för en specificerad applikation.
- ▶ modellera, parametrisera och simulera elektriska drivsystem.
- ▶ beskriva hur olika parametrar i motormodellerna påverkar motorprestandan.
- ▶ designa experiment för att identifiera motorparametrar.
- ▶ beräkna effektflöden för elektriska drivsystem.
- ▶ designa och implementera styrstrategier för elmaskiner.

Denna föreläsning - disposition

1. Kursformalia
2. Introduktion av elmaskiner
3. Grundläggande funktions- och konstruktionsprinciper
4. Magnetiska kretsar
5. Sammanlänkade flöde, induktans, magnetisk energi
6. Magnetiska material

— Kursformalia —

Föreläsningsplan

- ▶ Fö1: Kursformalia, introduktion till elektriska drivsystem, magnetiska kretsar, magnetiska material.
- ▶ Fö2: Transformatorer.
- ▶ Fö3: Elektromekaniska energiöverföringsprinciper.
- ▶ Fö4: Grundläggande principer för elmaskiner.
- ▶ Fö5: Likströmsmotorn.
- ▶ Fö6: Krafterlektronik, styrning av likströmsmotorn.
- ▶ Fö7: Synkronmaskinen.
- ▶ Fö8: dq0-transformen, styrning av synkronmaskinen.
- ▶ Fö9: Asynkronmaskinen.
- ▶ Fö10: Styrning av asynkronmaskinen, repetition.

Kursformalia

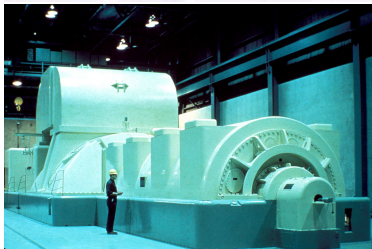
- ▶ **Kursmaterial:**
 - ▶ Electric Machinery 6th Edition, A. E. Fitzgerald, Charles Kingsley Jr., Stephen D. Umans. Mc GrawHill, Boston, 2003.
- ▶ **Föreläsningar.**
- ▶ **Uppgiftseminarier:** studentfacit, handledninginstruktioner: svårighetsgrad (3,4,5), lämplig som datorövning (D), syftet med uppgiften, detaljerad lösning, olika lösningsvarianter, vanliga fel.

<https://svn.isy.liu.se/fs/Edu/ElektriskaDrivsystem/Lektioner/Lektionsmaterial>

- ▶ **Laborationer:** 3 laborationer, görs i par eller enskilt.
 1. Lab 1 - Bygga en egen DC-motor.
 2. Lab 2 - Likströmsmotorn.
 3. Lab 3 - Växelströmsmotorn.
- ▶ **Projekt:** Kommer ut med lista senare.

— Introduktion av elmaskiner —

Elmotorer av olika storlekar



- ▶ generator max
700MW, 6000ton,
 $d=21.4\text{m}$, $h=3.1\text{m}$,
94%
- ▶ 3-fas,
induktionsmotor,
750W 1hp
- ▶ 25 W
- ▶ CD spelare,
DC-motor
- ▶ CD-pickup, stegmotor

Tillämpningar - i hemmet

- ▶ Hushållsmaskiner
- ▶ Handverktyg
- ▶ Tvättmaskin och torktumlare
- ▶ Fläktar, ventilation, hårtorkar
- ▶ Klockor med urtavlor
- ▶ CD, DVD-spelare, datorer, skrivare
- ▶ Kameror, fokusering, zoomning
- ▶ Pellets pannor, matning av pellets
- ▶ Pumpar, vatten, värme
- ▶ Leksaker

Tillämpningar - i industrin

- ▶ Valsverk, pappermaskiner, tryckpressar. Stor momentvariation, synkronisering.
- ▶ Robotar, servon, verktygsmaskiner. Hög dynamisk prestanda.
- ▶ Pumpar, fläktar. Energibesparing att inför bra varvtalsreglering istället för strypning.
- ▶ Höghastighetståg, tunnelbanor, spårvagnar. Individuella drivning på hjulen, synkronisering.
- ▶ Fordon, framdrivning men också till rutor, backspeglar, lås, fläktar, vindrutetorkare, mm.
- ▶ Hissar, kranar, liftar, rulltrappor. Kraftiga momentväxlingar.
- ▶ Medicinska tillämpningar. Snabborrar för tändar, pumpar.
- ▶ Flygteknik, rymdteknik, navigeringssystem.

Attraktiva egenskaper för elmaskiner

- ▶ Stor storleksspridning upp till ca 1.5 GVA.
- ▶ Vridmoment mellan 10^{-8} – 10^6 Nm (klockor/valsverk).
- ▶ Klarar olika miljöer; påtvingad ventilation/inkapslad, nedsänkt i vätska, utsatta för explosiva eller radioaktiva ämnen.
- ▶ Liten negativ påverkan på omgivningen. Kräver inte farliga bränslen eller utvecklar inte farliga gaser. Bullernivån relativt låg jämfört med många andra motortyper.
- ▶ Ingen varmkörning, fullast direkt.
- ▶ Låga underhållskrav, ingen bränslepåfyllning.
- ▶ Hög verkningsgrad även vid låglast. Kan ha en avsevärd överlast under en kort tid.
- ▶ Precisionstyrning möjlig.
- ▶ Kan användas för att återmata effekt genom generatordrift (jmf förbränningsmotorer eller turbiner).

Nackdelar med elmaskiner

- ▶ Kontinuerlig tillförsel av el (fordon).
- ▶ Pga av magnetisk mättning i järn samt kylproblem är inte elmaskiner lika effekttäta som t ex högtryckshydrauliska drivsystem (servon i t ex flygplan).

—

Grundläggande funktions- och konstruktionsprinciper

—

Funktionsprincip

Moment genereras genom vinkelskillnad mellan två magnetfält.

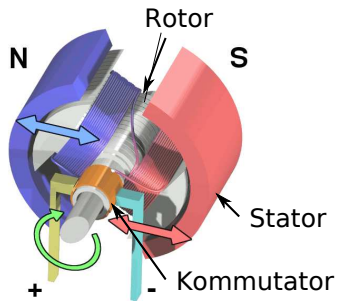
Huvudtyper av roterande maskiner

- ▶ likströmsmaskiner/DC-maskiner
- ▶ synkronmaskiner
- ▶ induktansmaskiner eller asynkronmaskiner

Likströmsmaskiner - konstruktion

Karaktäriserande drag:

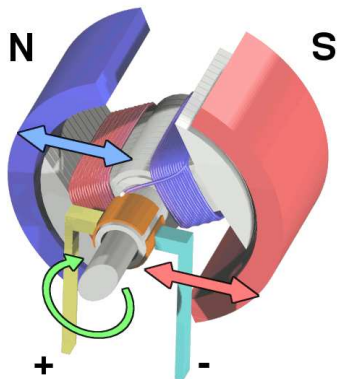
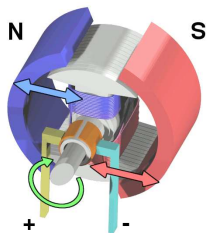
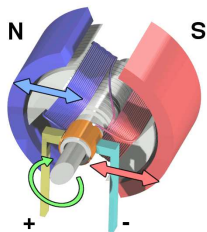
- ▶ Mekanisk switch, *kommutator*
- ▶ Statorn fix polaritet
- ▶ Rotorns polaritet switchas.
- ▶ Lättreglerad
- ▶ Kommutatorn begränsar effekt och hastighet.



Borstlösa likströmsmaskiner (saknar kommutator)

- ▶ Rotorn fix polaritet, permanentmagnet.
- ▶ Statorns polaritet switchas mha elektronisk switchning.
- ▶ Påminner om växelströmsmotorer.

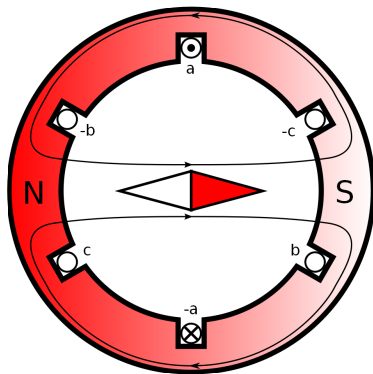
Likströmsmaskiner - funktionsprincip



Synkronmotorn - konstruktion

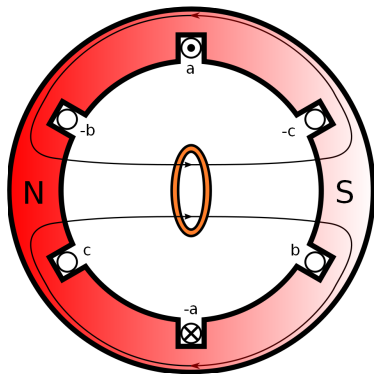
Karaktäriserande drag:

- ▶ Rotorn fix polaritet, permanentmagnet.
- ▶ Statorn genererar roterande magnetfält.
- ▶ Trefasmaskinen i sitt enklaste utförande har 3 lindningar: a, b och c.
- ▶ Flödets huvudriktning superponeras av flödena genererade av de tre lindningarna.
- ▶ Matas med vanlig trefasspänning \Rightarrow konstant vinkelhastighet given av frekvensen på matningsspänningen.
- ▶ Rotorn roterar synkront med flödet, därav namnet.



Asynkronmotorn - funktionsprincip

- ▶ Som synkronmaskinen fast rotorn består av en kortsluten guldring isf en magnet.
- ▶ Den kortslutna kretsen försöker förhindra flödesändring.
- ▶ Ringen följer därför med det roterande fältet.
- ▶ Om ringens resistans vore 0, skulle rotationshastigheten bli lika med fältets rotationshastighet.
- ▶ Eftersom resistansen är nollskilld kommer ringens vinkelhastigheten var något lägre, därav namnet asynkronmotor.



Elmaskiners beståndsdelar

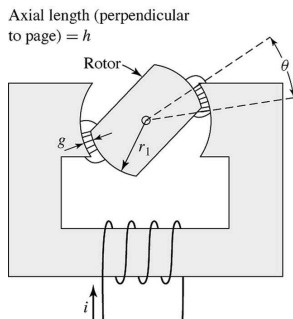
- ▶ Magnetiska ledare och kretsar med luftgap.
- ▶ Spolar för att växelverka mellan elektriska och magnetiska fält.
- ▶ Permanentmagneter

Nu ska vi analysera dessa mer i detalj. (Kap 1 i Fitzgerald)

— Magnetiska kretsar —

Introduktion till magnetiska kretsar

Motorn blir effektiv om det går att generera stora magnetflöden i luftgapet där energiomvandlingen sker utan att behöva lagra mycket magnetisk energi i kretsen.



För detta krävs:

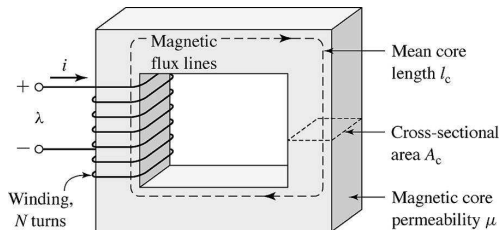
- ▶ magnetfältet som genereras i spolen måste ledas genom rotorn
- ▶ liten ström ska generera starkt fält i luftgapet

Ferromagnetiska material har god magnetisk ledningsförmåga (hög permeabilitet).

Genom att använda sådana material kan man se ovanstående konstruktion som en krets där fältlinjerna följer det magnetiska materialet.

Magnetfält

Rörliga elektriska laddningar \Leftrightarrow magnetfält



- ▶ Begreppet magnetfält används för två vektorfält
 - ▶ magnetisk flödestäthet \mathbf{B} T och
 - ▶ magnetisk fältstyrka \mathbf{H} A/m
- ▶ Φ magnetiskt flöde Wb (jmf med ström)
- ▶ \mathcal{F} magnetomotorisk kraft (mmk) A (jmf med spänning emk)
- ▶ \mathcal{R} magnetiskt motstånd, reluktans A/Vs (jmf resistans)

Nu ska vi härleda Ohms lag, KCL och KVL för magnetiska kretsar.

Magnetisk flödestäthet

Def: Flödestätheten \mathbf{B} definieras, till den riktning och storlek, genom den kraft

$$\mathbf{F} = q\mathbf{v} \times \mathbf{B} \quad (N)$$

som en elektriskt laddad partikel utsätts för då den passerar genom flödet. Enheten är Tesla:

$$[\mathbf{B}] = T = \frac{Wb}{m^2} = \frac{N}{C \cdot m/s} = \frac{Vs}{m^2}$$

Jordmagnetism: $10^{-4} T$

Liten stavmagnet: $10^{-2} T$

Synkronmaskin och bra elektromagnet: $1.5 T$

Magnetisk flödestäthet kan jämföras med elektrisk strömtäthet $\mathbf{J}[A/m^2]$

Magnetisk fältstyrka

Magnetisk fältstyrka \mathbf{H} [A/m] kan liknas med elektrisk fältstyrka \mathbf{E} [V/m]. \mathbf{H} definieras som en modifikation av \mathbf{B} med avseende magnetfälts påverkan av material enligt:

Def: I ett material där flödestätheten är \mathbf{B} och magnetiseringen \mathbf{M} definieras den **magnetiska fältstyrka** som

$$\mathbf{B} = \mu_0(\mathbf{H} + \mathbf{M})$$

där $\mu_0 = 4\pi \cdot 10^{-7} [H/m]$ är **permeabiliteten i vakuum**.

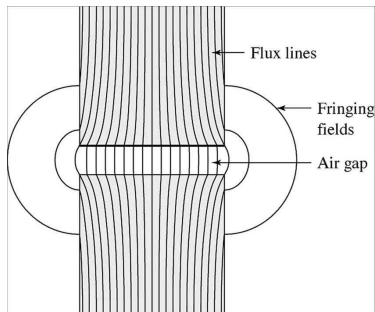
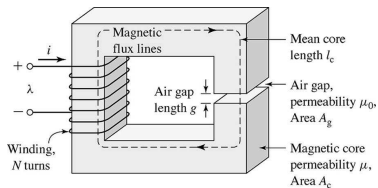
För material där $\mathbf{M} \sim \mathbf{H}$ skrivs

$$\mathbf{B} = \mu_r \mu_0 \mathbf{H} = \mu \mathbf{H}$$

där μ_r kallas för den **relativa permeabiliteten** och μ den **magnetiska permeabiliteten** för materialet i fråga.

I elmaskiner är μ_r : $2 \cdot 10^3 - 8 \cdot 10^5$, mer om det senare.

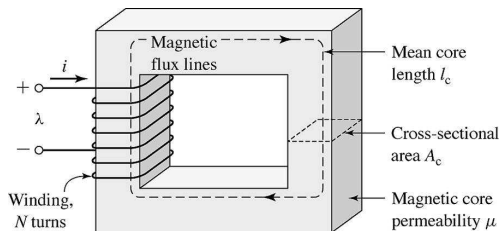
Antaganden - Magnetiska kretsar



FEM metoder krävs för att räkna ut magnetfält i komplexa geometriska objekt. Här kommer vi använda ingenjörsmässiga approximationer.

- ▶ Allt flöde följer det magnetiska materialet ($\mu \gg \mu_0$)
- ▶ Flödet genom tvärsnitt är uniformt.
- ▶ Fringing försummas oftast.

Magnetfält - källfria



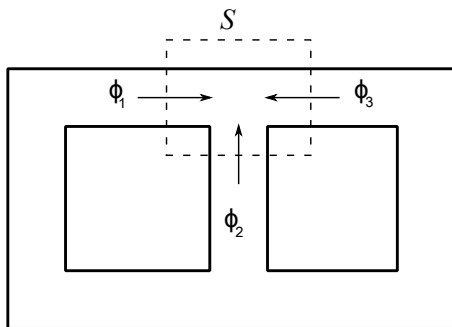
Det finns inga källor i magnetiska fält utan summan av inflödena till och utflödena från en godtycklig sluten volym S är 0:

$$\nabla \cdot \mathbf{B} = 0 \quad \oint_S \mathbf{B} \cdot d\mathbf{a} = 0$$

Det magnetiska flödet genom en yta S definieras som:

$$\phi = \int_S \mathbf{B} \cdot d\mathbf{a} \quad (\text{Wb})$$

Motsvarigheten till KCL



$$0 = \oint_S \mathbf{B} \cdot d\mathbf{a} = \phi_1 + \phi_2 + \phi_3$$

Generellt gäller för en nod med magnetiska inflöden ϕ_i att:

$$\sum_i \phi_i = 0$$

Amperes kretslag

Rotationen av magnetisk fältstyrka runt en godtyckligt sluten slinga C är lika med den ström som strömmar genom en ytan S som begränsas av slingan:

$$\nabla \times \mathbf{H} = \mathbf{J} \quad \oint_C \mathbf{H} \cdot d\mathbf{l} = \int_S \mathbf{J} \cdot d\mathbf{a}$$

Här har vi bortsett från högfrekvent tidsvarierande elektriska fält kopplade till elektromagnetisk strålning. (Elektrokvasistatisk approximation)

Flödet i en spole med järnkärna och luftgap

Givet: Se fig.

Sökt: Uttryck för ϕ .

Amperes lag ger:

$$Ni = H_c l_c + H_g g$$

Flödestätheterna ges av

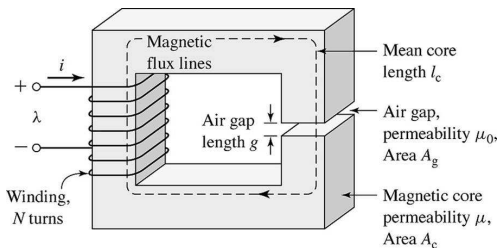
$$B_c = \mu H_c \quad B_g = \mu_0 H_g$$

Flödet ges av:

$$\phi = A_c B_c \quad \phi = A_g B_g$$

Sammantaget får vi:

$$Ni = \phi \left(\frac{l_c}{A_c \mu} + \frac{g}{A_g \mu_0} \right)$$

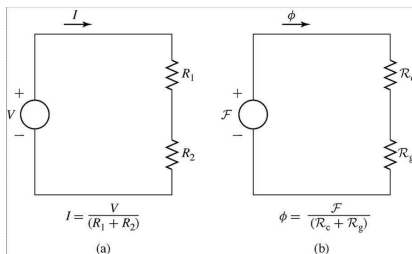


Analogi mellan elektriska och magnetiska kretsar

Ex: Ohms lag:

$$\underbrace{Ni}_{\mathcal{F}} = \phi \left(\underbrace{\frac{l_c}{A_c \mu}}_{\mathcal{R}_c} + \underbrace{\frac{g}{A_g \mu_0}}_{\mathcal{R}_g} \right)$$

$$\mathcal{F} = \phi(\mathcal{R}_c + \mathcal{R}_g)$$



KVL följer också om \mathcal{F}_i betecknar det magnetiska spänningsfallet över komponenter i en sluten krets så följer att

$$\sum_i \mathcal{F}_i = 0$$

_____ Sammanlänkat flöde, induktans _____
och energi

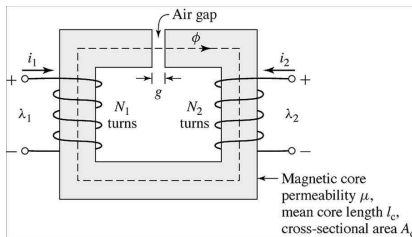
Inducerad spänning och sammanlänkat flöde

När ett magnetfält varierar induceras ett elektriskt fält och det beskrivs av Faradays lag

$$\oint_C \mathbf{E} \cdot d\mathbf{s} = -\frac{d}{dt} \int_S \mathbf{B} \cdot d\mathbf{a}$$

- ▶ Låt C följa spolens ledare.
- ▶ $E \approx 0$ i ledaren.
- ▶ inget magnetiskt läckflöde

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



Lenz lag: En inducerad ström i sluten ledare kommer att uppträda i sådan riktning att den motverkar orsaken av sin uppkomst.

Def: För en spole med N varv definieras det **sammanlänkade flödet** som

$$\lambda = N\phi \quad (\text{Webervarv})$$

Induktans

För en magnetisk krets med konstant permeabilitet μ eller där reluktansen domineras av ett luftgap kommer $\lambda \sim i$.

Def: Proportionalitetskonstanten L i

$$\lambda = Li \quad (\text{Henry} = \text{Wb}/\text{A})$$

kallas för **induktans**.

Induktansberäkning

Ex: Teckna induktansen då reluktansen i oket kan försummas.

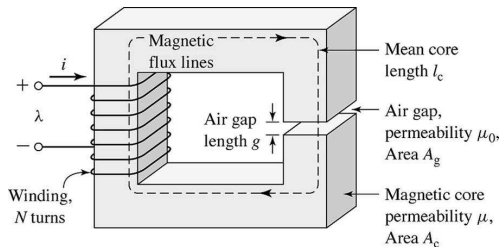
Teckna flödetstätheten B mha

Amperes kretslag:

$$Ni = \frac{B}{\mu_0} g \Rightarrow B = \frac{Ni\mu_0}{g}$$

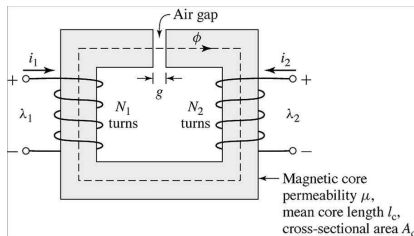
Induktansen blir:

$$L = \frac{\lambda}{i} = \frac{NBA_g}{i} = \frac{N^2\mu_0 A_g}{g}$$



Induktanser för sammanbundna spolar

Antag följande system med dominerande luftgap ($\mu \rightarrow \infty$):



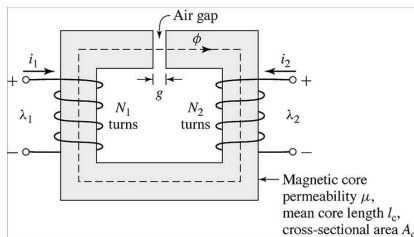
I detta fall kan det sammanlänkade flödet tecknas:

$$\lambda_1 = L_{11}i_1 + L_{12}i_2$$

där L_{11} kallas för **självinduktansen** för lindning 1 och L_{12} **ömseinduktansen** (från lindning 2 till 1).

Nu ska vi beräkna L_{11} och L_{12} .

Induktanser för sammanbundna spolar - exempel



$$\lambda_1 = N_1 \phi$$

Ett uttryck för ϕ fås genom att följa kretsen:

$$N_1 i_1 + N_2 i_2 = \phi \left(\frac{g}{A_c \mu_0} \right) \Leftrightarrow \phi = \frac{A_c \mu_0}{g} (N_1 i_1 + N_2 i_2)$$

Dessa ger att

$$\lambda_1 = \underbrace{\frac{A_c \mu_0}{g} N_1^2}_{=L_1} i_1 + \underbrace{\frac{A_c \mu_0}{g} N_1 N_2}_{=L_{12}} i_2$$

Energi i kretsen

Effekten över en lindning är ett mått på energioverföringen till den magnetiska kretsen:

$$p = ie = i \frac{d\lambda}{dt}$$

Ex: Teckna energin W lagrad i en spole med induktans L dels då det sammanlänkat flöde är λ_0 och dels då strömmen är i_0 .

$$W = \int_0^{t_0} p \cdot dt = \int_0^{\lambda_0} i \cdot d\lambda = \int_0^{\lambda_0} \frac{\lambda}{L} d\lambda = \frac{1}{2L} \lambda_0^2$$

$$W = \frac{Li_0^2}{2}$$

— Magnetiska material —

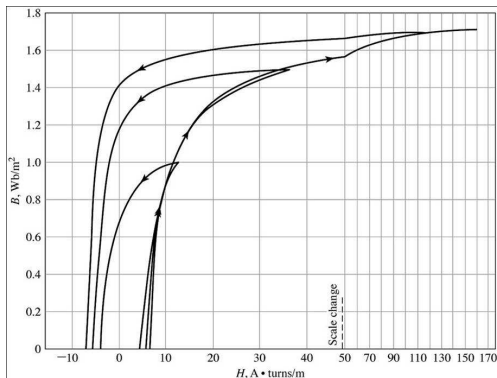
Ferromagnetiska material

För ferromagnetisk material är flödestätheten B inte linjär i fältstyrkan H utan permeabiliteten μ beror av H :

$$B = \mu(H)H$$

Förstärkning av flödestätheten uppstår då magnetiska dipoler associerade till elektroner i materialet samverkar i fältriiktningen.

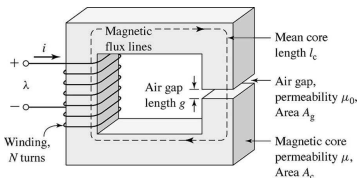
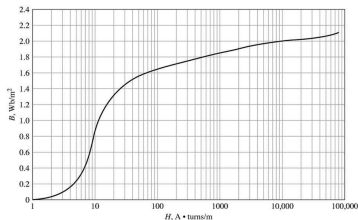
Magnetiseringskurva, B - H -kurvor för M-5 elektostål.



- ▶ Cyklisk magnetiseringskraft, låg frekvens
- ▶ Planar ut för stora H , mättas
- ▶ Olika värden beroende på ökande eller minskande H så kallad magnetisk hysteres
- ▶ Då H minskas till 0, så är $B > 0$. Remanent magnetism
- ▶ För att B ska bli noll, krävs en fältstyrka $H < 0$ som kallas den koerciva kraften.

Normalmagnetiseringskurvan

Normalkurvan skär maxpunkterna i magnetiseringskurvorna.



Givet: $l_c = 0.3 \text{ m}$, $g = 0.5 \text{ mm}$, $A_g = A_c$, $N = 500$.

Sökt: Beräkna strömmen som krävs för att få $B_c = 1 \text{ T}$.

Den magnetiska fältstyrkan ur graf: $H_c = 11 \text{ A} \cdot \text{varv}/\text{m}$.

mmk-fallet i järnet: $\mathcal{F}_c = H_c l_c = 3.3 \text{ A} \cdot \text{varv}$

mmk-fallet i luftgapet:

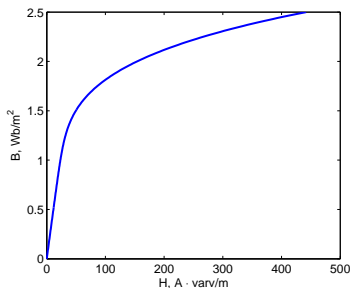
$$\mathcal{F}_g = H_g g = \frac{B_g}{\mu_0} g, B_g = B_c / = \frac{B_c g}{\mu_0} = 396 \text{ A} \cdot \text{varv}$$

$$\text{Strömen: } i = \frac{\mathcal{F}_c + \mathcal{F}_g}{N} = 0.80 \text{ A}.$$

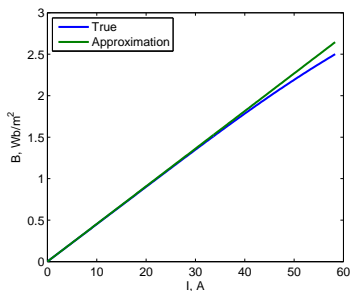
Mindre än 1% fel att försumma reluktansen i järnet.

Linjär approximation

Magnetisk krets med luftgap.



Normalmagnetiseringskurvan
 $B(H)$



Med och utan att försumma
reluktansen i järnet.

Konstruktionsmaterial i elektriska maskiner mättas runt 1.5-2T.

Upp till dessa flödestätheter approximeras sambandet mellan i och det sammanlänkade flödet $\lambda = N\phi = NAB$ ganska väl av en konstant induktans.

Järnförluster

När flödet i magnetiska material varierar blir det två typer av järnförluster:

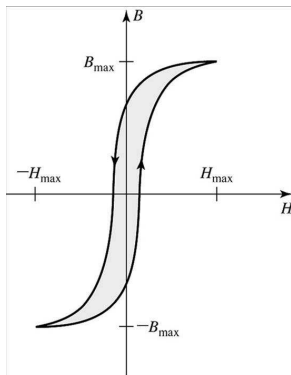
- ▶ Virvelströmsförluster
- ▶ Hysteresförluster

Virvelströmsförluster är resistiva förluster som uppstår till följd av virvelströmmar inducerade av det varierande magnetfältet.

Genom laminering av järnkärnorna reduceras denna typ av förlust.

Hystereseförluster

Magnetisk krets utan luftgap.



$$\begin{aligned} W &= \oint i \cdot d\lambda = \int \frac{Ni}{\lambda} = \frac{H_c l_c}{NA_c B_c} \int = \\ &= \oint \left(\frac{H_c l_c}{N} \right) NA_c dB_c = \\ &= \underbrace{A_c l_c}_{=\text{volym}} \underbrace{\oint H_c dB_c}_{=\text{slingans area}} \end{aligned}$$

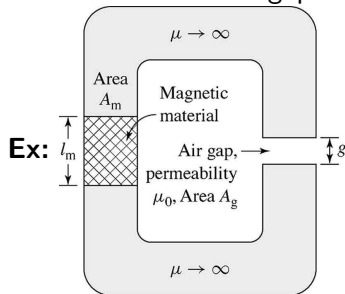
Hystereseförlusten eller ommagnetiseringsförlusterna är proportionella mot järnets volym samt ytan av hysteres slingan.

Högre frekvenser ger upphov till fetare hysteres slinga.

För ledare välj stål med hög permeabilitet och låg koercivitet.

Permanentmagneter

Kraftfulla permanentmagneter kan generera hög magnetisk flödestäthet trots luftgap i kretsen.



$$0 = H_g g + H_m l_m$$

$$A_g B_g = A_m B_m \quad \Rightarrow \quad B_m = -\mu_0 \left(\frac{A_g}{A_m} \right) \left(\frac{l_m}{g} \right) H_m$$

$$B_g = \mu_0 H_g$$

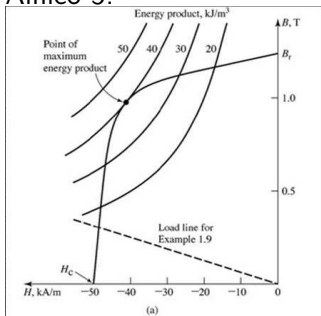
Uttrycket kan ses som en linje i (H, B) -planet och kallas för belastningslinjen.

Permanentmagneter

Bra permanentmagneter karakteriseras av hög koerciv kraft.

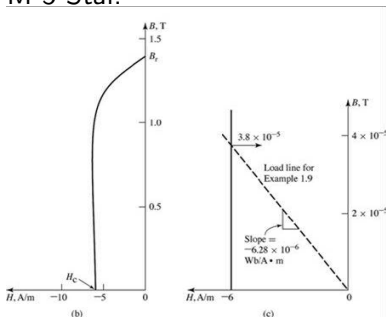
$$B_m = -\mu_0 \left(\frac{A_g}{A_m} \right) \left(\frac{l_m}{g} \right) H_m$$

Alnico 5:



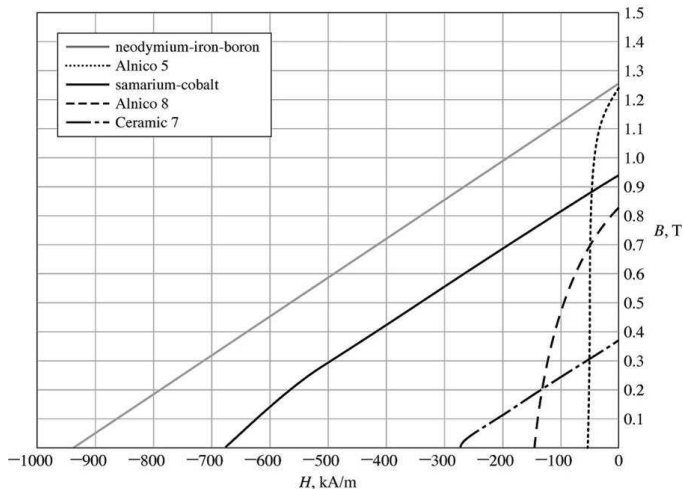
Remanent magn.: 1.22T
 Koerciv kraft: -49 kA/m
 $B_g = B_m = 0.3 \text{ T}$

M-5 Stål:



Remanent magn.: 1.4T
 Koerciv kraft: -6 A/m
 $B_g = B_m = 38 \mu \text{ T}$

Material för permanentmagneter



För de nästan linjära materialen kan

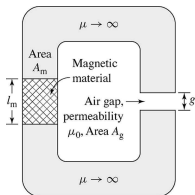
$$B = B_r + \mu_R H$$

används som approximation där μ_R är recoilpermeabiliteten.

Maximal energiprodukt

Den punkt på hystereskurvan där $-B_m H_m$ [J/m^3] är störst.

Genom att välja arbetspunkten för en PM i denna punkten uppnås maximal flödestäthet i luftgapet för given volym magnet.



$$A_g = A_m = A$$

$$B_g = B_m$$

$$B_g = \mu_0 H_g$$

$$H_g g + H_m l_m = 0$$

\Rightarrow

$$\begin{aligned} B_g^2 &= \mu_0 H_g B_m = \\ &= -\mu_0 \frac{l_m}{g} (H_m B_m) = \\ &= -\mu_0 \frac{l_m A}{g A} (H_m B_m) = \\ &= -\mu_0 \frac{V_m}{V_g} (H_m B_m) \end{aligned}$$

Maximering av B_g givet fixa volymer ger maximering av $-H_m B_m$.

Sammanfattning

- ▶ Grundläggande funktions- och konstruktionsprinciper för likströms-, synkron- och asynkronmotorerna.
- ▶ Magnetiska material leder och förstärker magnetfältet i magnetiska kretsar.
- ▶ Magnetiska kretsar analogt med elektriska kretsar.
- ▶ Sammanlänkade flöde, induktans, magnetisk energi.
- ▶ Magnetiska material, mjuka för ledare, hårda för permanentmagneter.

Nästa föreläsning applicerar vi teorin på transformatorer, dvs tittar lite mer på växelströmsfenomen.