

TSFS04, Elektriska drivsystem, 6 hp

Föreläsning 1 - Introduktion, magnetiska kretsar och material

Andreas Thomasson

Institutionen för systemteknik
Linköpings universitet
andreas.thomasson@liu.se

2018-01-15

Dagens föreläsning - disposition

1. Kursformalia
2. Introduktion av elmaskiner
3. Magnetiska kretsar
4. Sammanlänkade flöde, induktans, magnetisk energi

— Kursformalia —

Kursformalia

- ▶ **Kursledning:**
 - ▶ Föreläsningar: Andreas Thomasson, andreas.thomasson@liu.se
 - ▶ Lektioner: Mattias Krylander, mattias.krylander@liu.se
- ▶ **Kurshemsida:**

<http://www.fs.isy.liu.se/Edu/Courses/TSFS04/>
Sidan kommer uppdateras kontinuerligt.
- ▶ **Kursbok:**
 - ▶ Fitzgerald and Kingsley's Electric Machinery, Seventh Edition, Stephen D. Umans, Mc GrawHill.
 - ▶ Finns att köpa på t ex bokakademin.
- ▶ **Kurspaket A1709:**
 - ▶ Lektionskompendium, formelsamling och laborationskompendium.
 - ▶ Finns att köpa hos LiU Servicecenter, hus A. (200kr)
- ▶ **Laborationer:** 3 laborationer, görs i par.
 1. Lab 1 - Elektromekaniska omvandlingsprinciper. (2 x 4h + rapport)
 2. Lab 2 - Likströmsmotorn. (4h + 2h alt. rapport)
 3. Lab 3 - Växelströmsmotorn. (4h + 2h alt. rapport)

Föreläsningar

Fö1: Introduktion till elmaskiner och magnetiska kretsar.

Fö2: Trefasssystem och transformatorn.

Fö3: Elektromekaniska energiöverföringsprinciper.

Fö4: Grundläggande principer för elmaskiner.

Fö5: Likströmsmotorn.

Fö6: Styrning av likströmsmotorn.

Fö7: Synkronmaskinen.

Fö8: Styrning av synkronmaskinen.

Fö9: Asynkronmaskinen.

Fö10: Styrning av asynkronmaskinen.

Studiebesök på ABB Machines i Västerås 21/2

ABB utvecklar och producerar synkronmaskiner i storlekar 3-80MVA.

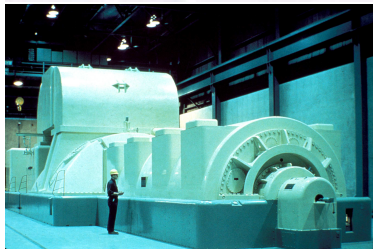
- ▶ ABB i stort, och Machines i synnerhet.
- ▶ Mekaniska perspektiv på elmaskinen.
- ▶ Elektriskt perspektiv på elmaskinen.
- ▶ Verkstadsbesök där vi får se hur produktionen går till.
- ▶ Två exempel på tillämpningar av maskinerna, bl.a. ett föredrag om luftseparering.
- ▶ HR kommer prata om vilka möjligheter som finns för nyexaminerade studenter på ABB.

Avresa från Linköping med buss eller bil blir omkring 7.30 och hemkomst ca 18.30.

Anmälan senast 12/2 till christofer.sundstrom@liu.se.
Antalet platser är begränsat så först till kvarn gäller.

— Introduktion av elmaskiner —

Elmotorer av olika storlekar



- ▶ Generator max 700MW, 6000ton, $d = 21.4m$, $h = 3.1m$, 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

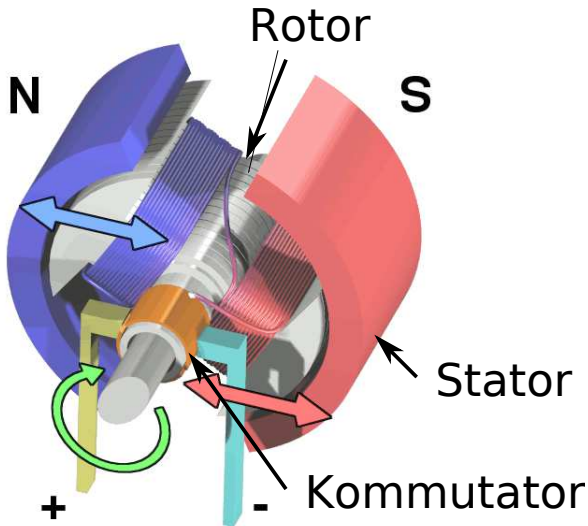
- ▶ Stor storleksspridning upp till ca 1.5 GVA.
- ▶ Vridmoment mellan 10^{-8} – 10^6 Nm (klockor/valsverk).
- ▶ Klarar olika miljöer; påtvingad ventilation/inkapslad, nedsänkt i vätska, utsatta för explosiva eller radioaktiva ämnen.
- ▶ Liten negativ påverkan på omgivningen. Kräver inte farliga bränslen 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 konstruktionsprincip

Moment genereras genom vinkelskillnad mellan två magnetfält.



Elmaskiners beståndsdelar

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

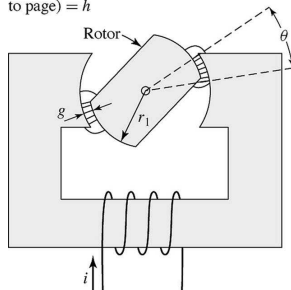
Nu ska vi analysera dessa mer i detalj. (Kap 1 i Fitzgerald)

— Magnetiska kretsar —

Elektromekanisk energiomvandling

Elektrisk energi [VA] \Rightarrow Vridmoment \times rotation [Nm/s]

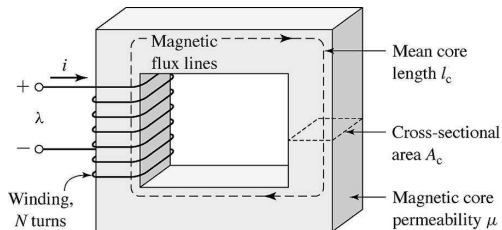
Axial length (perpendicular
to page) = h



- ▶ Energiöverföring över luftgap.
- ▶ El \Leftrightarrow spolar \Leftrightarrow magnetfält \Leftrightarrow mekanisk energi
- ▶ Stor flödestäthet i luftgapet ger stark motor.
- ▶ Effektiv om liten ström ger stort luftgapsflöde. För detta används ferromagnetiska material:
 - ▶ god magnetisk ledningsförmåga (hög permeabilitet).
 - ▶ magnetfältet leds genom rotorn.

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**.

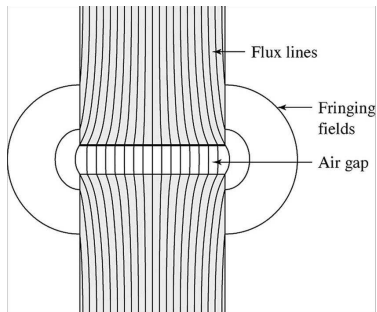
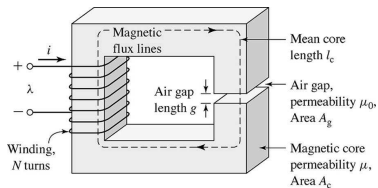
För material där $\mathbf{M} \sim \mathbf{H}$ skrivs

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

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

I elmaskiner är μ_r : $2 \cdot 10^3 - 8 \cdot 10^4$, mer om det senare.

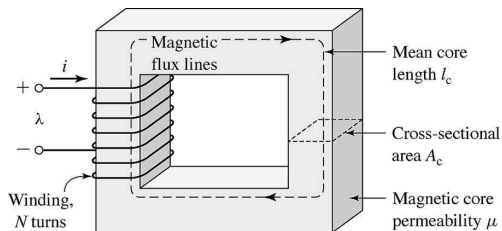
Antaganden - Magnetiska kretsar



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



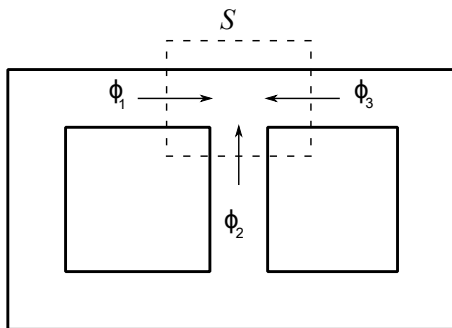
Det finns inga källor i magnetiska fält utan summan av inflödena till och utflödena från en godtycklig sluten volym S är 0:

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

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

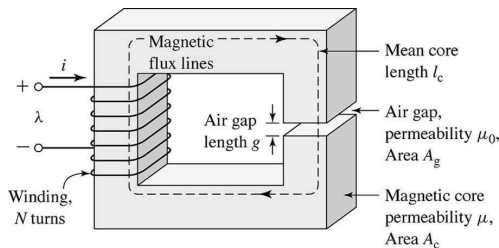
$$B_c = \mu H_c \quad B_g = \mu_0 H_g$$

Flödet ges av:

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

Sammantaget får vi:

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

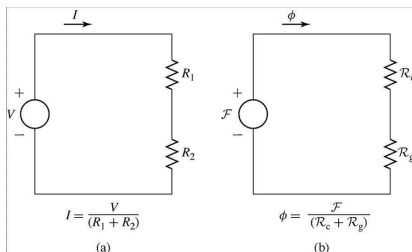


Analogi mellan elektriska och magnetiska kretsar

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

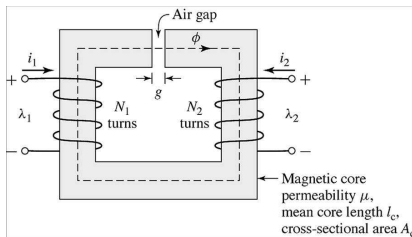
Inducerad spänning och sammanlänkat flöde

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

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

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.

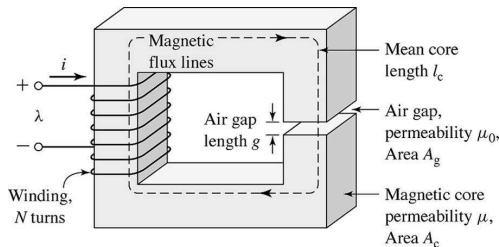
Teckna flödetstheden B mha

Amperes kretslag:

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

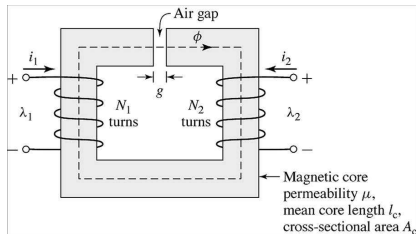
Induktansen blir:

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



Induktanser för sammanbundna spolar

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



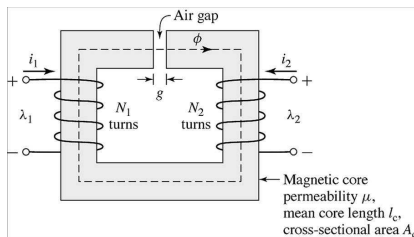
I detta fall kan det sammanlänkade flödet tecknas:

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

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 .

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

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

Sammanfattning

- ▶ $B \sim 1.5 - 2 \text{ T}$, stort i luftgap, ej för mättat järn
- ▶ Fältsamband: λ , ϕ , B , H i samma riktning

$$\lambda = N\phi \quad \phi = BA \quad B = \mu H = \mu_0 \mu_r H$$

- ▶ Kretssamband (Tänk flöde $\phi \leftrightarrow$ ström, mmk $\mathcal{F} \leftrightarrow$ spänning):

$$\mathcal{F} = Ni \quad \mathcal{F} = \phi \mathcal{R} (= HI) \quad \mathcal{R} = \frac{l}{\mu A} \quad \sum_{\text{nod}} \phi_i = 0 \quad \sum_{\text{slinga}} \mathcal{F}_i = 0$$

- ▶ Induktans kan användas vid krets med luftgap:

$$\lambda = Li \quad W = \frac{1}{2} Li^2 \quad \lambda_1 = \overbrace{L_{11}}^{\text{självind.}} i_1 + \overbrace{L_{12}}^{\text{ömseind.}} i_2$$

- ▶ Inducerad spänning: $e = \frac{d\lambda}{dt}$, riktning enl. Lenz lag.

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