Elektriska drivsystem
Föreläsning 3 - Elektromekaniska omvandlingsprinciper

Mattias Krysander

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

2010-09-30

Repetition

- Kunskap om magnetiska kretsar.
- Modellerat transformatorn som en ideal förlustfri transformator kopplade till impedanser som modellerar transformatorns förlusterna.
- Förlusterna modelleras som läckflöde, lindningsresistans och järnförlust.

Använda kunskapen om magnetiska kretsar och principen att separera en ideal energiomvandlingsprocess med dess förluster på elektromekaniska system.

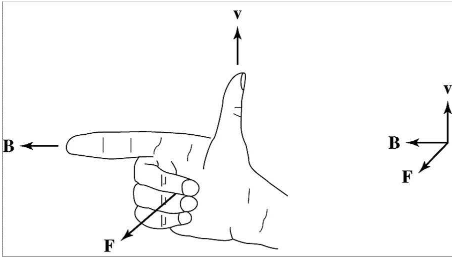
Dagens föreläsning

1. Kraft och moment i magnetiska system
2. Energibalans
3. Energi i enkelexciterade magnetiska system
4. Kraft och moment från energibetraktelse
5. Kraft och moment från komplementenergibetraktelse
6. Multiexciterade magnetiska system
7. Kraft och moment i permanentmagnetiserade system

Kraft och moment i magnetiska system

Lorentz kraftlag

$$\mathbf{F} = q(\mathbf{E} + \mathbf{v} \times \mathbf{B})$$



Om $\mathbf{E} = 0$, strömtätheten $\mathbf{J} = \rho\mathbf{v}$ där ρ är laddningstäthet, $\mathbf{F_v}$ kraft/volymsenhet

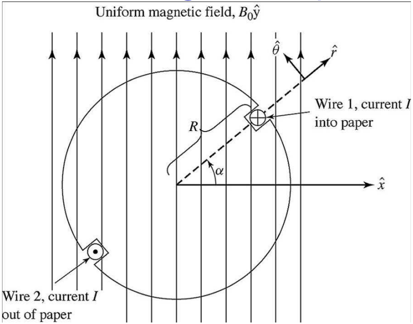
$$\mathbf{F}_v = \mathbf{J} \times \mathbf{B}$$

eller per längdelement ds utefter en ledare L med strömmen I som

$$d\mathbf{F} = I\frac{ds}{v}\mathbf{v} \times \mathbf{B} = Id\mathbf{s} \times \mathbf{B}$$

Lorentz kraftlag fungerar bra när kraften överförs i en elektrisk ledare.

Lorentz kraftlag - exempel



Givet:

- $I = 10\text{A}$
- $B_0 = 0.02\text{T}$
- $R = 0.05\text{m}$
- $L = 0.3\text{m}$

Sökt: $T(\alpha)$.

Lösning:

$$\mathbf{F}_1 = \int_{\text{Wire 1}} I d\mathbf{s} \times \mathbf{B} = ILB_0(-\hat{z} \times \hat{y}) = B_0 IL\hat{x}, \quad \hat{\theta} = -\hat{x} sin\alpha + \hat{y}\cos\alpha$$

$$F_{\theta,1} = -B_0 IL sin\alpha \qquad\qquad F_{\theta,2} = -B_0 IL sin\alpha$$

$$T(\alpha) = R(F_{\theta,1} + F_{\theta,2}) = -2B_0 ILR sin\alpha = -0.006 sin\alpha \ \mathrm{Nm}$$

Moment skapas som vill likrikta magnetfälten.

Elektromekaniskt energiomvandlingssystem

I maskiner verkar kraften i det magnetiska materialet och Lorentz kraftlag är inte enkel att applicera.

Både rotorn och statorn skapar magnetfält där flödesriktningarna verkar för att bli parallella. Vinkelskillnaden genererar ett moment.

Vi ska kvantifiera momentet/kraften genom att använda principen om energins bevarande.

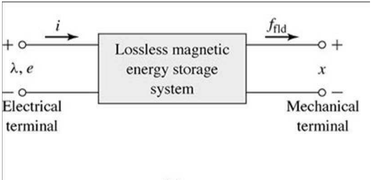
Energibalans

Elektromekaniskt energiomvandlingssystem

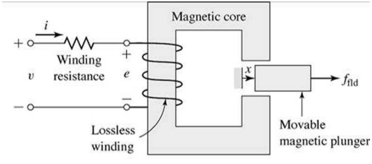
Vi antar att förlusterna inte beror på energilagrets storlek. Då kan ett elektromekaniskt energiomvandlingssystem beskrivas av ett förlustfritt (idealt) system med externa element som modellerar förlusterna (likhet med den ideala transformatorn).

$$W_{\text{elec}} = W_{\text{mech}} + W_{\text{fld}} + W_{\text{loss}}$$

Nu kommer vi betrakta det ideala systemet, dvs $W_{\text{loss}} = 0$.

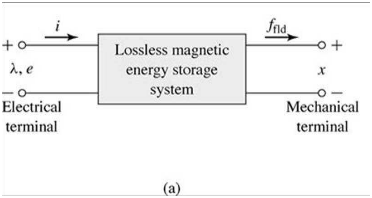


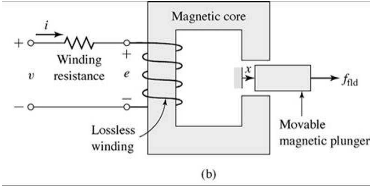
(a)



(b)

Elektromekaniskt energiomvandlingssystem





Låt W_{fld} beteckna den lagrade energin i magnetfältet.

$$\frac{dW_{\text{fld}}}{dt} = ei - f_{\text{fld}}\frac{dx}{dt} \qquad \Leftrightarrow dW_{\text{fld}} = \underbrace{ei\,dt}_{=dW_{\text{elec}}} - \underbrace{f_{\text{fld}}\,dx}_{=dW_{\text{mech}}}$$

Differentialen av det elektriska arbetet kan också tecknas mha $e\,dt = d\lambda$ som:

$$dW_{\text{fld}} = i\,d\lambda - f_{\text{fld}}\,dx$$

Ur detta kan f_{fld} beräknas som funktion av position x, strömmen i och det sammanlänkade flödet λ.

Energi i enkelexciterade magnetiska system

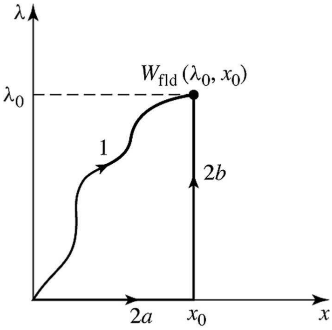
Beräkning av den magnetiska energin

$$dW_{\text{fld}} = i\,d\lambda - f_{\text{fld}}\,dx$$

W_{fld} är en potential av λ och x. Det betyder att

$$W_{\text{fld}}(\lambda_0, x_0) = \int_C dW_{\text{fld}}(\lambda, x)$$

där C är en godtyckligt vald integrationsväg mellan $(\lambda, x) = (0, 0)$ och $(\lambda, x) = (\lambda_0, x_0)$.

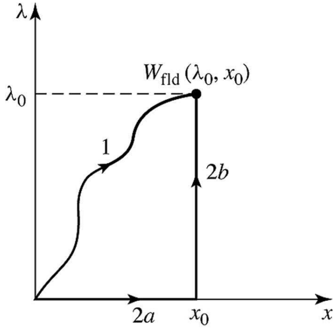


Beräkning av den magnetiska energin

$$dW_{\text{fld}} = i\,d\lambda - f_{\text{fld}}\,dx$$

W_{fld} är en potential av λ och x. Det betyder att

$$W_{\text{fld}}(\lambda_0, x_0) = \int_{2a} dW_{\text{fld}} + \int_{2b} dW_{\text{fld}}$$



På väg 2a blir integranden

$$i \underbrace{d\lambda}_{=0} - \underbrace{f_{\text{fld}}}_{=0,\text{ ty } \lambda=0} dx = 0$$

På väg 2b blir integranden

$$i\,d\lambda - f_{\text{fld}} \underbrace{dx}_{=0} = i\,d\lambda$$

Detta ger

$$W_{\text{fld}}(\lambda_0, x_0) = \int_0^{\lambda_0} i(\lambda, x_0)\,d\lambda$$

Magnetiska energin för linjära system

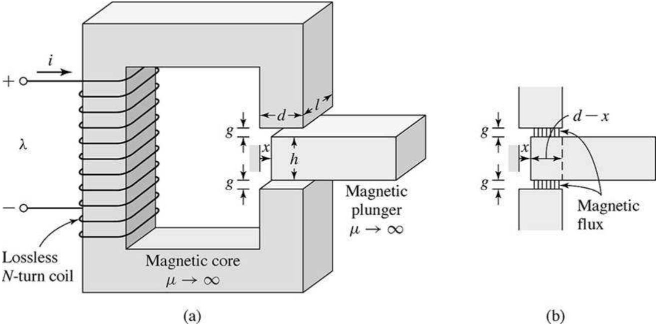
För linjära system gäller

$$\lambda = L(x)i$$

Exempel på linjära system är de där reluktansen domineras av luftgapets bidrag. Detta är ofta en god approximation för elmaskiner.

$$W_{\mathrm{fld}}(\lambda, x) = \int_0^{\lambda} i(\lambda', x)\, d\lambda' = \int_0^{\lambda} \frac{\lambda'}{L(x)} d\lambda' = \frac{\lambda^2}{2L(x)} = \frac{1}{2} L(x) i^2$$

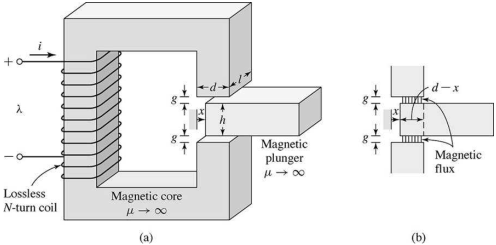
Magnetisk energi - exempel



Givet: $\mu \to \infty$, $h \gg g$, $N = 1000$ varv, $g = 2$ mm, $d = 0.15$ m, $l = 0.1$ m och $i = 10$ A.

Sökt: Energin $W_{\text{fld}}(x)$ där $0 < x < d$.

Magnetisk energi - exempel



Lösning: Systemet linjärt, dvs

$$W_{\text{fld}} = \frac{1}{2} L(x) i^2$$

där

$$L(x) = \frac{N^2}{\mathcal{R}_{\text{tot}}}, \quad \mathcal{R}_{\text{tot}} = \frac{2g}{\mu_0 A_{\text{gap}}}, \quad A_{\text{gap}} = (d - x)l = dl(1 - \frac{x}{d})$$

Detta ger

$$W_{\text{fld}} = \frac{N^2 \mu_0 d l i^2}{4g}(1 - \frac{x}{d}) = 236(1 - \frac{x}{d}) \text{ J}$$

Generellt: Magnetiska energin uttryck i fältstorheter

Det går att visa följande uttryck:

$$W_{\text{fld}} = \int_V \left(\int_0^B \mathbf{H} \cdot \mathbf{dB}' \right) dV$$

Integralen skall integreras över den volym där det finns magnetfält. Magnetfälten kan beräknas med FEM-metoder.

För mjuka magnetiska material gäller

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

och energin kan då tecknas

$$W_{\text{fld}} = \int_V \frac{B^2}{2\mu} dV$$

Kraft och moment från energibetraktelse

Kraft och moment från energibetraktelse

Antag att vi känner W_{fld} och vill beräkna kraften f_{fld}.

Differentialen kan skrivas

$$dW_{\text{fld}} = \left.\frac{\partial W_{\text{fld}}}{\partial \lambda}\right|_x d\lambda + \left.\frac{\partial W_{\text{fld}}}{\partial x}\right|_\lambda dx$$

Ekvationen sann för alla värden på $d\lambda$ och dx och ger efter jämförelse med

$$dW_{\text{fld}} = i\, d\lambda - f_{\text{fld}}\, dx$$

att

$$i = \left.\frac{\partial W_{\text{fld}}}{\partial \lambda}\right|_x \qquad\qquad f_{\text{fld}} = -\left.\frac{\partial W_{\text{fld}}}{\partial x}\right|_\lambda$$

Vid roterande system isf translaterande system, ersätts x med θ och f_{fld} mot momentet T_{fld} i formlerna.

Kraft för linjära system

Sedan tidigare vet vi att

$$W_{\mathrm{fld}} = \frac{1}{2}\frac{\lambda^2}{L(x)}$$

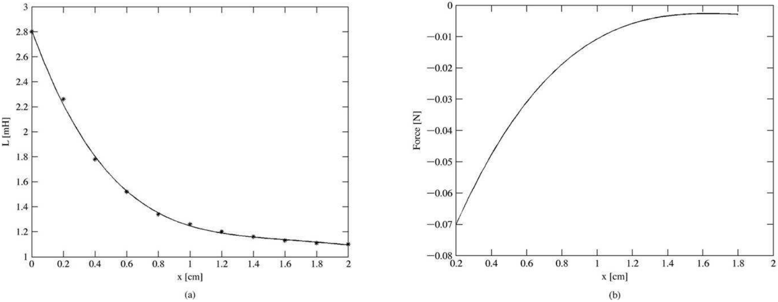
Sätter vi in det i uttrycket för kraft får vi

$$f_{\mathrm{fld}} = -\left.\frac{\partial}{\partial x}\left(\frac{1}{2}\frac{\lambda^2}{L(x)}\right)\right|_{\lambda} = \frac{\lambda^2}{2L^2}\frac{dL}{dx}$$

eller

$$f_{\mathrm{fld}} = \frac{i^2}{2}\frac{dL}{dx}$$

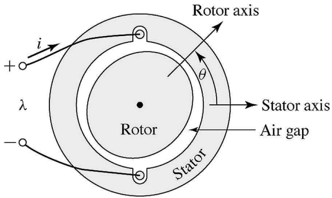
Induktans vs kraft



$$i = 0.75A \qquad\qquad f_{\text{fld}} = \frac{i^2}{2}\frac{dL}{dx}$$

Kraften drar in mot $x = 0$ dvs $L(x)$ maximeras liksom $\lambda = L(x)i$ magnetflödet, medan reluktansen $\mathcal{R}_{\text{tot}} = N^2/L$ minimeras.

Moment som funktion av vinkel



Givet: Induktansen ges av

$$L(\theta) = L_0 + L_2 \cos(2\theta)$$

där $L_0 = 10.6mH$, $L_2 = 2.7mH$.

Notera induktansens period.

Strömmen är $i = 2$A.

Uppgift: Beräkna moment som funktion av θ.

Lösning:

$$T_{\text{fld}} = \frac{i^2}{2}\frac{dL}{d\theta} = -i^2 L_2 \sin(2\theta)$$

Momentet driver θ mot 0 eller π, dvs maximerar induktansen och minimerar reluktansen.

Kraft och moment från komplementenergibetraktelse

Komplementenergi i enkelexciterade system

Det går att definiera en annan potential komplementenergin så att kraft/moment beskrivs direkt som funktion av strömmen.

Komplementenergin definieras som

$$W'_{\mathrm{fld}}(i,x) = i\lambda - W_{\mathrm{fld}}$$

$$\begin{aligned} dW'_{\mathrm{fld}} &= \lambda\, di + i\, d\lambda - (i\, d\lambda - f_{\mathrm{fld}}\, dx) \\ &= \lambda\, di + f_{\mathrm{fld}}\, dx \end{aligned}$$

$$dW'_{\mathrm{fld}} = \left.\frac{\partial W'_{\mathrm{fld}}}{\partial i}\right|_x di + \left.\frac{\partial W'_{\mathrm{fld}}}{\partial x}\right|_i dx$$

Identifiering ger

$$\lambda = \left.\frac{\partial W'_{\mathrm{fld}}}{\partial i}\right|_x \qquad\qquad f_{\mathrm{fld}} = \left.\frac{\partial W'_{\mathrm{fld}}}{\partial x}\right|_i$$

som är de sökta sambanden.

Beräkning av komplementenergin

Komplementenergin beräknas analogt med energin som

$$W'_{\text{fld}}(i,x) = \int_0^i \lambda(i',x)di'$$

För linjära system beskrivna av $\lambda = L(x)i$ gäller att

$$W'_{\text{fld}}(i,x) = \int_0^i \lambda(i',x)di' = \frac{1}{2}L(x)i^2 (= W_{\text{fld}})$$

Kraften blir

$$f_{\text{fld}} = \left.\frac{\partial W'_{\text{fld}}}{\partial x}\right|_i = \frac{1}{2}\frac{dL}{dx}i^2$$

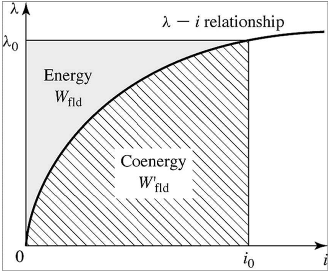
Då kretsmodellering ej tillräcklig, FEM för att beräkna magnetfältet samt använda

$$W'_{\text{fld}} = \int_V \left(\int_{H_c}^{H_0} \mathbf{B}\cdot\mathbf{dH}\right)dV$$

där H_c är den koerciva kraften.

Energi vs komplementenergi i enkelexciterade system

Anta att x är fix.



$$W'_{\text{fld}}(i,x) = \int_0^{i_0} \lambda(i,x)di$$

$$W_{\text{fld}}(i,x) = \int_0^{\lambda_0} i(\lambda,x)d\lambda$$

$$W_{\text{fld}} + W'_{\text{fld}} = \lambda_0 i_0$$

Detta betyder att om det råder ett linjärt samband mellan λ och i (och B och H) så gäller att

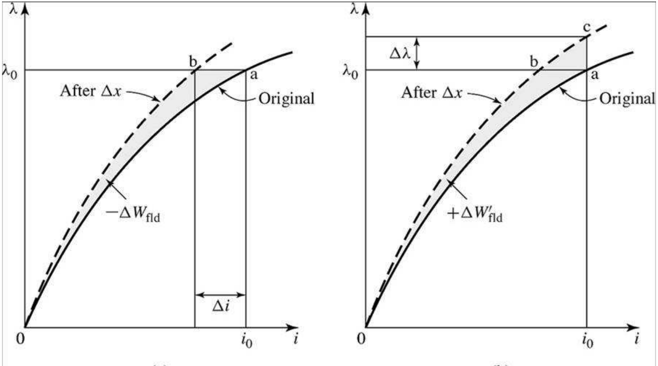
$$W_{\text{fld}} = W'_{\text{fld}}$$

Kraftberäkning mha energi eller komplementenergi

Kraften blir förstås samma oavsett om man baserar den på energin eller komplementenergin

$$f_{\text{fld}} = -\left.\frac{\partial W_{\text{fld}}}{\partial x}\right|_{\lambda} \qquad\qquad f_{\text{fld}} = \left.\frac{\partial W'_{\text{fld}}}{\partial x}\right|_{i}$$

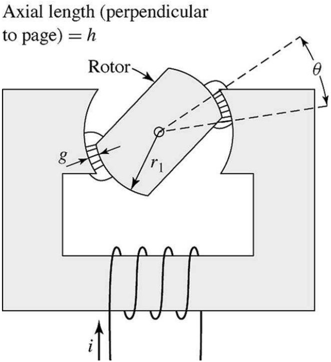
Energins och komplementenergins förändring map Δx.



(a) (b)

De gråmarkerade areorna konvergerar då $\Delta x \to 0$.

Moment genom reluktansvariation



Givet: Geometri, ström, $\mu \to \infty$.

Sökt:

a) Moment T som funktion av geometri och ström.

b) Moment T som funktion av geometri och flödestätheten B i luftgapen.

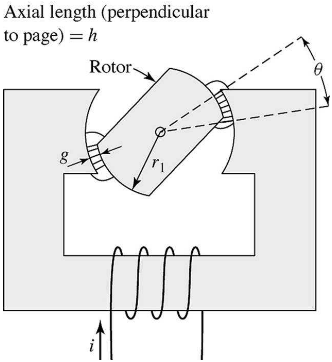
Lösning:

$$T_{\text{fld}} = \frac{i^2}{2}\frac{dL}{d\theta}, \qquad L = \frac{N^2}{\mathcal{R}_{\text{tot}}} = \frac{N^2\mu_0(r_1 + 0.5g)\theta h}{2g}$$

ger att

$$T_{\text{fld}} = \frac{N^2 i^2 \mu_0 (r_1 + 0.5g)h}{4g}$$

Moment genom reluktansvariation



Givet: Geometri, ström, $\mu \to \infty$.

Sökt:

a) Moment T som funktion av geometri och ström.

b) Moment T som funktion av geometri och flödestätheten B i luftgapen.

Lösning:

$$T_{\text{fld}} = \frac{N^2 i^2 \mu_0 (r_1 + 0.5g)h}{4g}, \qquad Ni = \frac{B}{\mu_0} 2g$$

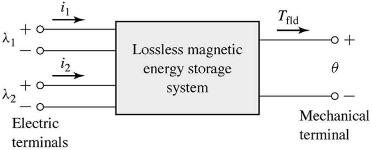
ger att

$$T_{\text{fld}} = \frac{B^2 g (r_1 + 0.5g)h}{\mu_0}$$

—— Multiexciterade magnetiska system ——

Muliexciterat elektromekaniskt system

Nu flera elektriska anslutning. Magnetisk energi, komplementenergi, krafter, moment kan härledas analogt med fallet för enkelexciterade system.



Energidifferentialen är:

$$dW_{\mathrm{fld}}(\lambda_1, \lambda_2, \theta) = i_1\, d\lambda_1 + i_2\, d\lambda_2 - T_{\mathrm{fld}}\, d\theta$$

Komplementenergi definieras av:

$$W'_{\mathrm{fld}}(i_1, i_2, \theta) = \lambda_1 i_1 + \lambda_2 i_2 - W_{\mathrm{fld}}$$

vilket leder till att komplementenergidifferentialen är

$$dW'_{\mathrm{fld}}(i_1, i_2, \theta) = \lambda_1\, di_1 + \lambda_2\, di_2 + T_{\mathrm{fld}}\, d\theta$$

Jag väljer här att härleda ett uttryck för komplementenergin och momentet

Muliexciterat elektromekaniskt system - moment, komplementenergi

$$dW'_{\mathrm{fld}}(i_1, i_2, \theta) = \lambda_1\, di_1 + \lambda_2\, di_2 + T_{\mathrm{fld}}\, d\theta$$

Vi ser att momentet kan skrivas:

$$T_{\mathrm{fld}} = \left. \frac{\partial W'_{\mathrm{fld}}(i_1, i_2, \theta)}{\partial \theta} \right|_{i_1, i_2}$$

Återstår att teckna komplementenergin W'_{fld}. Välj att integrationsväg så att $\theta : 0 \to \theta^0$ först. Då blir komplementenergin:

$$W'_{\mathrm{fld}}(i_1^0, i_2^0, \theta^0) = \int_0^{i_2^0} \lambda_2(0, i_2, \theta^0)\, di_2 + \int_0^{i_1^0} \lambda_1(i_1, i_2^0, \theta^0)\, di_1$$

Muliexciterat elektromekaniskt linjärt system

Linjärt gäller

$$\lambda_1 = L_{11} i_1 + L_{12} i_2$$
$$\lambda_2 = L_{12} i_1 + L_{22} i_2$$

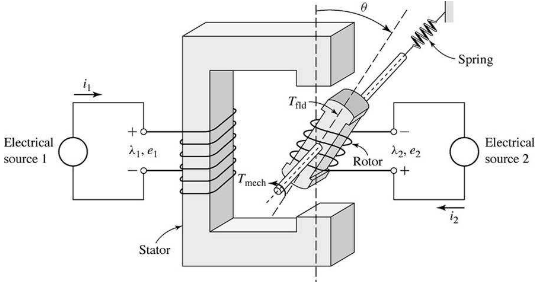
Sätt in i formeln för komplementenergin

$$\begin{aligned} W'_{\text{fld}}(i_1, i_2, \theta) &= \int_0^{i_2} \lambda_2(0, i'_2, \theta)\, di'_2 + \int_0^{i_1} \lambda_1(i'_1, i_2, \theta)\, di'_1 = \\ &= \int_0^{i_2} L_{22}(\theta) i_2 \, di'_2 + \int_0^{i_1} L_{11} i'_1 + L_{12} i_2 \, di'_1 = \\ &= \frac{i_2^2}{2} L_{22} + \frac{i_1^2}{2} L_{11} + i_1 i_2 L_{12} \end{aligned}$$

Sätt in i formeln för moment

$$T_{\text{fld}}(i_1, i_2, \theta) = \left. \frac{\partial W'_{\text{fld}}}{\partial \theta} \right|_{i_1, i_2} = \frac{i_2^2}{2} \frac{dL_{22}}{d\theta} + \frac{i_1^2}{2} \frac{dL_{11}}{d\theta} + i_1 i_2 \frac{dL_{12}}{d\theta}$$

Muliexciterat elektromekaniskt system - exempel



Givet:

$$L_{11} = (3 + \cos 2\theta) \cdot 10^{-3} \text{ H} \qquad L_{12} = 0.3 \cos\theta \text{ H}$$

$$L_{22} = 30 + 10\cos 2\theta \text{ H} \qquad i_1 = 0.8 \text{ A} \qquad i_2 = 0.01 \text{ A}$$

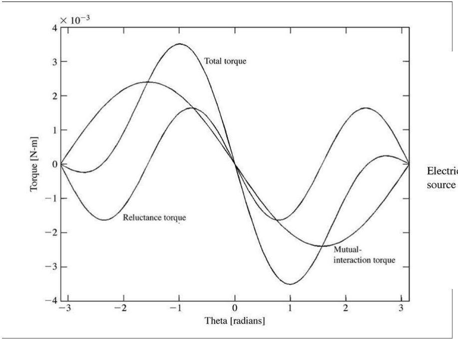
Sökt: Momentet $T_{\text{fld}}(\theta)$.

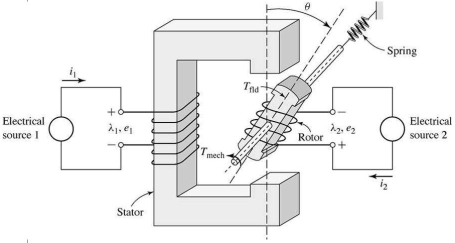
Lösning:

$$T_{\text{fld}}(\theta) = \frac{i_1^2}{2}\frac{dL_{11}}{d\theta} + \frac{i_2^2}{2}\frac{dL_{22}}{d\theta} + i_1 i_2 \frac{dL_{12}}{d\theta} =$$

$$= -1.64 \cdot 10^{-3} \sin 2\theta - 2.4 \cdot 10^{-3} \sin\theta$$

Muliexciterat elektromekaniskt system - exempel

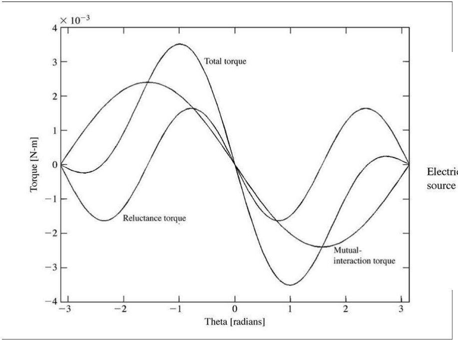


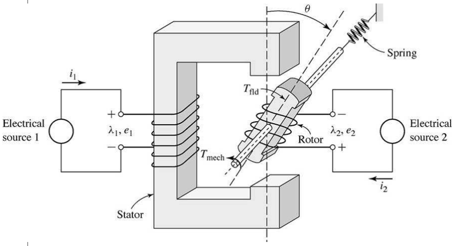


Moment som verkar för att likrikta magnetfälten (mutual interaction) eller maximera ömseinduktansen.

- Samma frekvens som den mekaniska frekvensen.
- Stabilt jämviktsläge då fälten är likriktade, dvs $\theta = 0$.
- Instabilt jämviktsläge då fälten är motriktade, dvs $\theta = \pm\pi$.
- Maximalt moment då fälten ortogonala, dvs $\theta = \pm\pi/2$.

Muliexciterat elektromekaniskt system - reluktansmoment

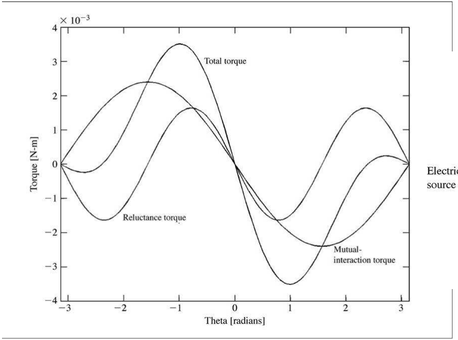


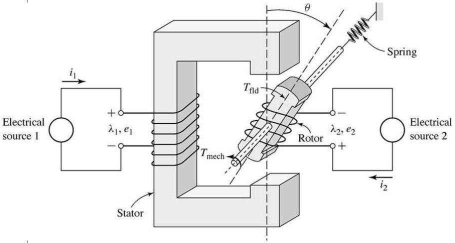


Reluktansmoment

- Verkar för att maximera självinduktanserna. (minimera reluktansen)
- Dubbla mekaniska frekvensen.
- Stabilt jämviktsläge vid reluktansminimum, dvs $\theta = 0, \pm\pi$.
- Instabilt jämviktsläge vid reluktansmaximum, dvs $\theta = \pm\pi/2$.
- Maximalt moment då reluktansändringen är störst/radian $\theta = \pi/4 + n\pi/2$.

Muliexciterat elektromekaniskt system - totala momentet





Totala momentet:

- Stabilt jämviktsläge i $\theta = 0, \pm\pi$. Notera att reluktansmomentet dominerar nära $\theta = \pm\pi$ vilket gör stabiliserar jämviktspunkten trots nästan motriktade fält.
- Vid dominansskiftet mellan reluktansmomentet och momentet som genereras av icke-parallella fält finns en instabil jämviktspunkt.

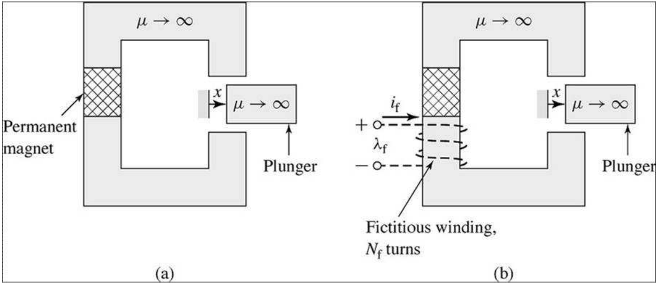
Kraft och moment i permanentmagnetiserade system

Magnetisk krets med permanentmagnet

Tidigare har vi studerat kretsar med mjuka magnetiska material, här kommer vi studera kretsar med permanentmagneter.

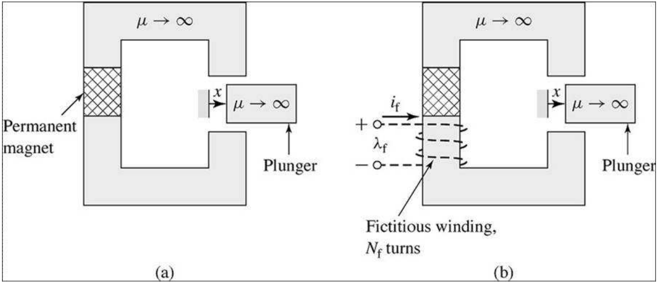
Formlerna för energi/komplementenergi gäller inte i detta fall ty det finns magnetisk energi i kretsen när $i = 0$ och det är storleken på den som vi ska härleda.

En generell ansats och en för linjära magnetiska material. I båda fallen ska vi återanvända till tidigare resultat genom att introducera en fiktiv lindning.



(a) magnetisk krets (b) fiktiv lindning

Beräkning av den magnetiska komplementenergin



Sedan tidigare vet vi att

$$dW'_{\text{fld}} = \lambda_f \, di_f + f_{\text{fld}} \, dx$$

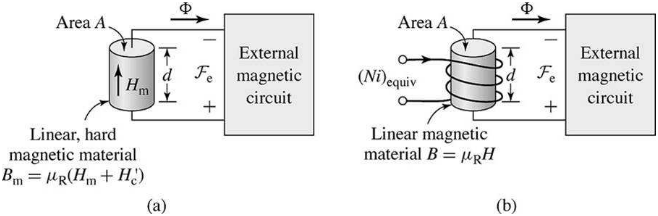
Låt I_{f0} vara den ström som krävs för att den totala mmk ska bli 0. Då gäller

$$W'_{\text{fld}}(I_{f0}, x) = 0$$

Antag att vi vill vet komplementenergin i $(i_f = 0, x)$ så ges den av

$$W'_{\text{fld}}(0, x) = \int^{0} \lambda_f(i_f, x) \, di_f$$

Linjär permanentmagnet modellerad som mmf + reluktans

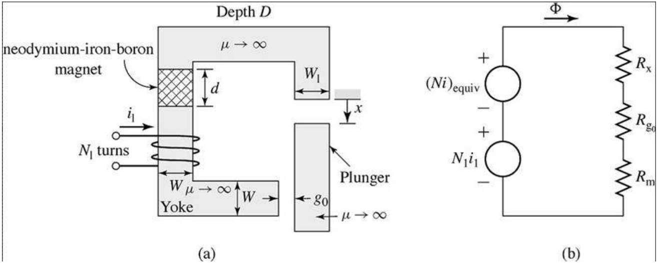


$$\begin{aligned} \mathcal{F}_e + H_m d &= 0 \\ \mathcal{F}_e + Hd + (Ni)_{\text{equiv}} &= 0 \end{aligned} \quad \Rightarrow \quad (Ni)_{\text{equiv}} = H_m d - Hd \qquad (1)$$

$$\begin{aligned} B_m &= \mu_R(H_m + H_c') \\ B &= \mu_R H \\ B &= B_m \end{aligned} \quad \Rightarrow \quad H = H_m + H_c'$$

Sätt in i (1) så fås $(Ni)_{\text{equiv}} = -H_c' d$.

Magnetisk krets med permanentmagnet - exempel



(a) magnetisk krets (b) ekvivalent krets

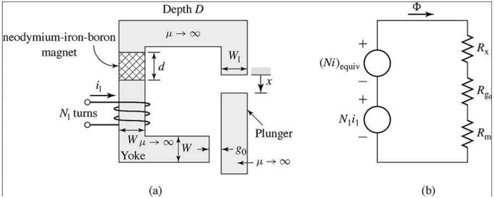
Givet: $N_1 = 1500$, $W = 4$ cm, $W_1 = 4.5$ cm, $D = 3.5$ cm, $d = 8$ mm, $g_0 = 1$ mm, $\mu_R = 1.06\mu_0$, $H'_c = -940$ kA/m.

Sökt:

a) Kraften då $i_1 = 0$ A och $x = 3$ mm.

b) Strömmen i_1 för att släcka ut magnetflödet.

Magnetisk krets med permanentmagnet - exempel



Lösning: Nu kan vi använda de vanliga formlerna för linjära system för att bestämma kraften. Eftersom $i_1 = 0$ så gäller

$$f_{\text{fld}} = \left.\frac{\partial W'_{\text{fld}}}{\partial x}\right|_{i_{\text{equiv}}} \qquad \text{där} \qquad W'_{\text{fld}} = \frac{1}{2} L i^2_{\text{equiv}}$$

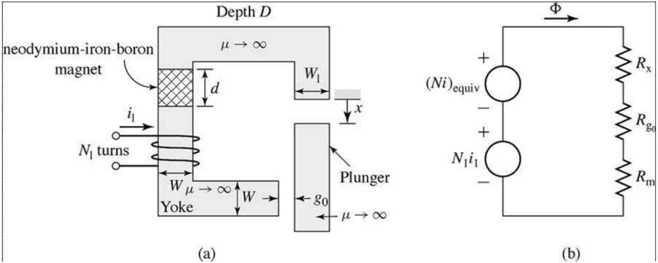
Induktansen kan bestämmas enligt

$$L = \frac{N^2}{\mathcal{R}_{\text{tot}}}$$

vilket ger

$$W'_{\text{fld}} = \frac{1}{2}\frac{(Ni)^2_{equiv}}{\mathcal{R}_{\text{tot}}} \qquad f_{\text{fld}} = -\frac{1}{2}\frac{(Ni)^2_{equiv}}{\mathcal{R}^2_{\text{tot}}}\frac{d\mathcal{R}_{\text{tot}}}{dx}$$

Magnetisk krets med permanentmagnet - exempel



$$f_{\text{fld}} = -\frac{1}{2}\frac{(Ni)^2_{equiv}}{\mathcal{R}^2_{\text{tot}}}\frac{d\mathcal{R}_{\text{tot}}}{dx}$$

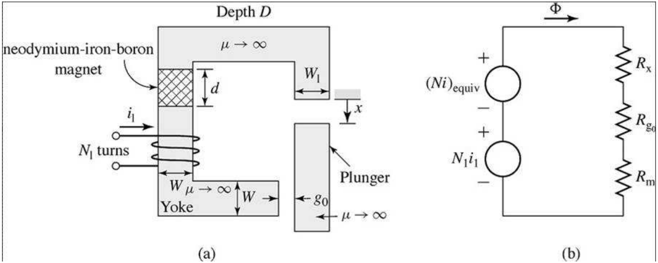
där

$$(Ni)_{equiv} = -H'_c d \qquad \mathcal{R}_{\text{tot}} = \mathcal{R}_x + \mathcal{R}_{g_0} + \mathcal{R}_m$$

$$\mathcal{R}_x = \frac{x}{\mu_0 W_1 D} \qquad \mathcal{R}_{g_0} = \frac{g_0}{\mu_0 WD} \qquad \mathcal{R}_m = \frac{d}{\mu_R WD}$$

Numeriskt blir kraften $f_{\text{fld}} = -703N$

Magnetisk krets med permanentmagnet - exempel



(a) magnetisk krets (b) ekvivalent krets

Givet: $N_1 = 1500$ $d = 8$ mm, $H_c' = -940$ kA/m.

Sökt:

b) Strömmen i_1 för att släcka ut magnetflödet.

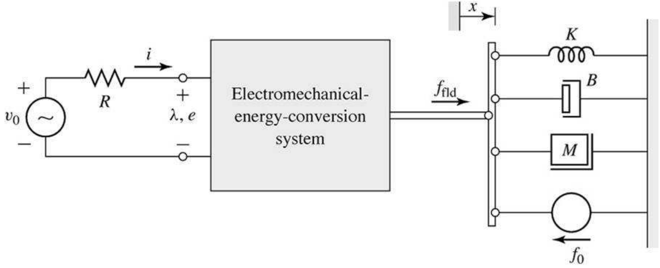
Lösning:

$$i_1 = \frac{(Ni)_{equiv}}{N_1} = \frac{-H_c' d}{N_1} = 5.01 \text{ A}$$

— Sammanfattning —

Modell av ett elektromekaniskt system

Förluster kan nu läggas till externt och differentialekvation härledas för det totala systemet.



Att ta med sig från föreläsningen

Grundprinciper för elektromekanisk omvandling mellan ström och spänning till kraft och sträcka.

Bygger på separering av en ideal förlustfri omvandling plus externa element som modellerar förluster.

Beräkning av kraft/moment:

1. Teckna differentialen av energin/komplementenergin.
2. Identifiera kraft/moment-samband som en partialderivata.
3. Beräkna energi/komplementenergin genom integrering av differentialen.
4. Beräkna kraft/momentet mha energi/komplementenergin.

Samma tillvägagångssätt för enkel/multipel-exciterade system samt system med permanentmagneter.