

TSFS04, Elektriska drivsystem, 6 hp

Föreläsning 1 - Introduktion, magnetiska kretsar och material

Mattias Krysander

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

2012-01-17

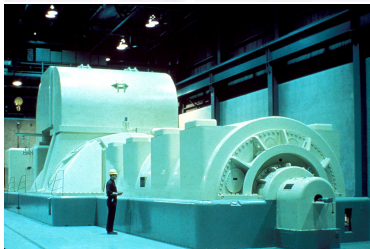
Dagens föreläsning - disposition

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

—— Kursformalia ——

—— 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 införa 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 tänder, pumpar.
- ▶ Flygteknik, rymdteknik, navigeringssystem.

Attraktiva egenskaper för elmaskiner

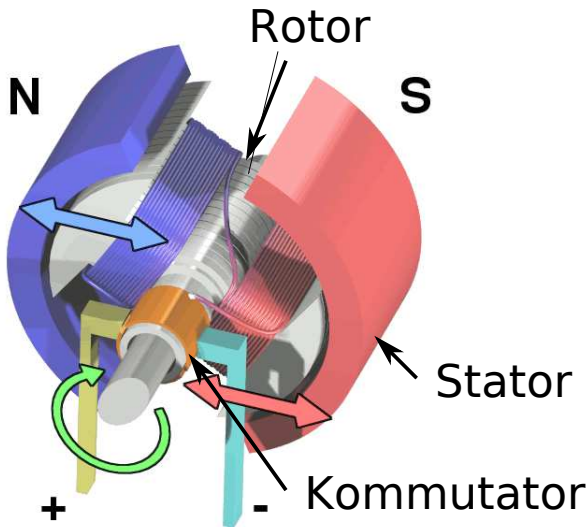
- ▶ Stor storleksspridning upp till ca 1.5 GVA.
- ▶ Vridmoment mellan 10^{-8} – 10^6 Nm (klockor/valsverk).
- ▶ Klarar olika miljöer; påtvingad ventilation/inkapslad, nedsänkt i vätska, utsatta för explosiva eller radioaktiva ämnen.
- ▶ Liten negativ påverkan på omgivningen. Kräver inte farliga bränslen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

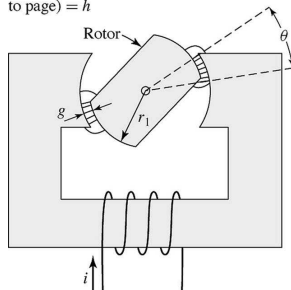
Nu ska vi analysera dessa mer i detalj. (Kap 1 i Fitzgerald)

—— Magnetiska kretsar ——

Elektromekanisk energiomvandling

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

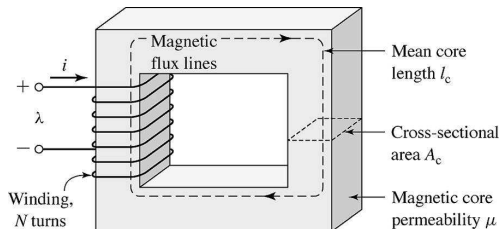
Axial length (perpendicular
to page) = h



- ▶ 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**.

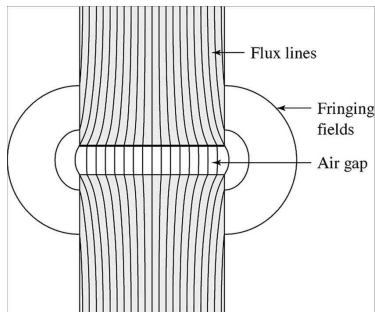
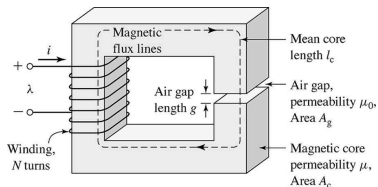
För material där $\mathbf{M} \sim \mathbf{H}$ skrivs

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

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.

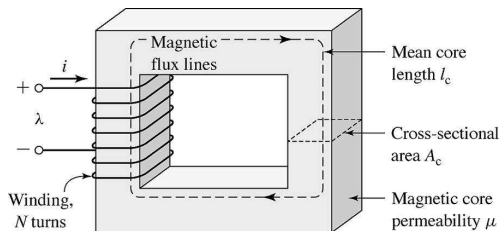
Antaganden - Magnetiska kretsar



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



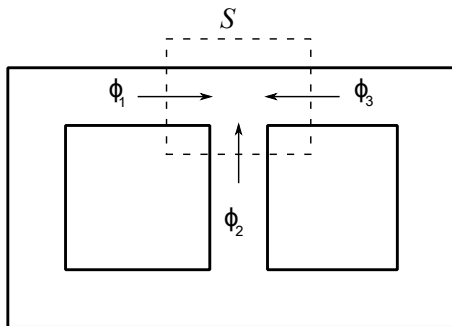
Det finns inga källor i magnetiska fält utan summan av inflödena till och utflödena från en godtycklig sluten volym S är 0:

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

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

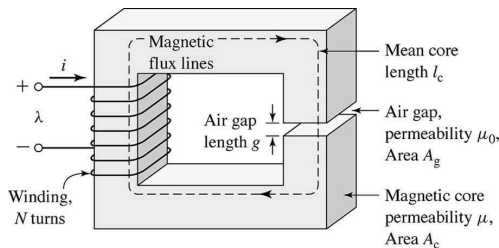
$$B_c = \mu H_c \quad B_g = \mu_0 H_g$$

Flödet ges av:

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

Sammantaget får vi:

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

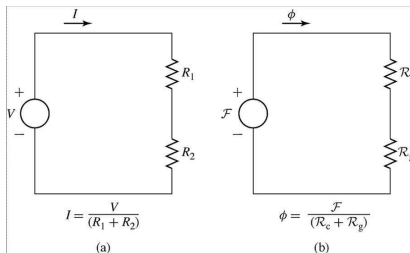


Analogi mellan elektriska och magnetiska kretsar

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

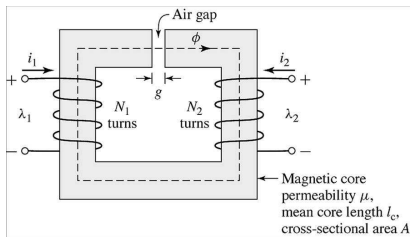
Inducerad spänning och sammanlänkat flöde

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

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

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.

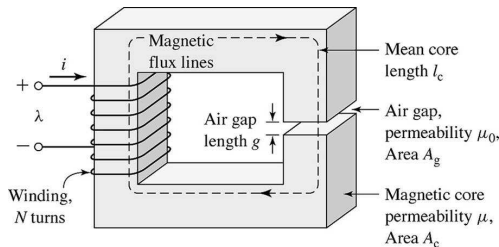
Teckna flödetstätheten B mha

Amperes kretslag:

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

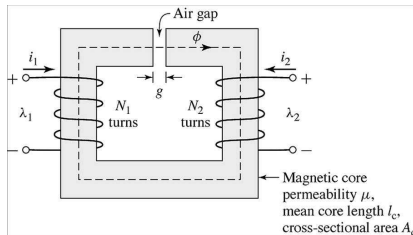
Induktansen blir:

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



Induktanser för sammanbundna spolar

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



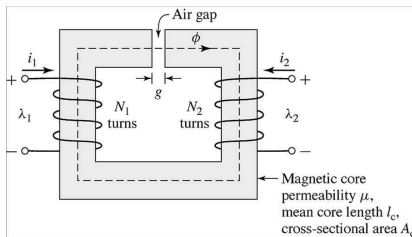
I detta fall kan det sammanlänkade flödet tecknas:

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

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 energiöverföringen 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 .

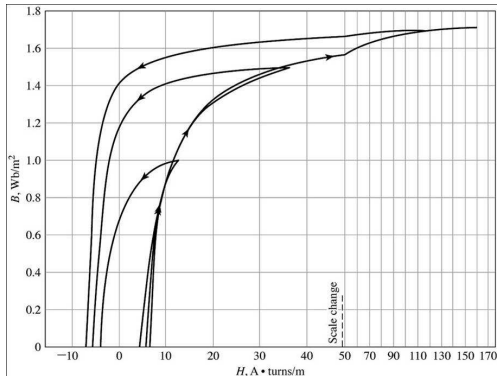
$$W = \int_0^{t_0} p \cdot dt = \int_0^{\lambda_0} i \cdot d\lambda = \int_0^{\lambda_0} \frac{\lambda}{L} d\lambda = \frac{1}{2L} \lambda_0^2$$

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

—— Magnetiska material ——

Ferromagnetiska material

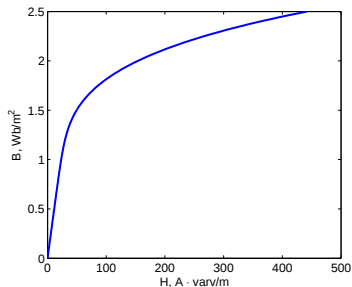
Magnetiseringskurva, B - H -kurvor för M-5 elektostål:



- ▶ B inte linjär i fältstyrkan H
- ▶ Planar ut för stora H , mättas
- ▶ Olika värden på B beroende på ökande eller minskande H så kallad **magnetisk hysteres**

Normalmagnetiseringskurvan

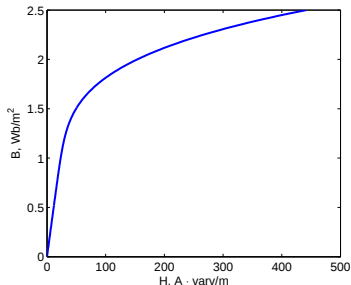
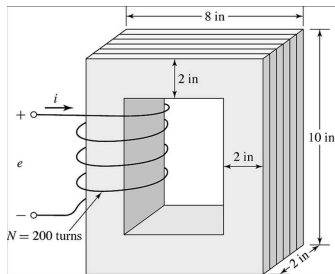
Normalkurvan skär maxpunkterna i magnetiseringskurvorna.



Normalmagnetiseringskurvan $B(H)$

Konstruktionsmaterial i elektriska maskiner mättas runt 1.5-2T vilket också är den normala flödestätheten under drift.

Permeabilitet och induktans för olinjära magnetiska material



Spole på järnkärna med dim. A, l_c Normalmagnetiseringskurvan $B(H)$

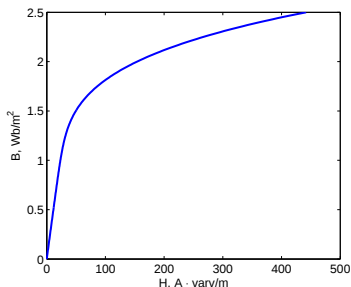
Permeabiliteten: $\mu = B/H$.

Spolens induktansen: $L = \frac{\lambda}{i} = \frac{NAB}{Hl_c/N} \propto \frac{B}{H}$

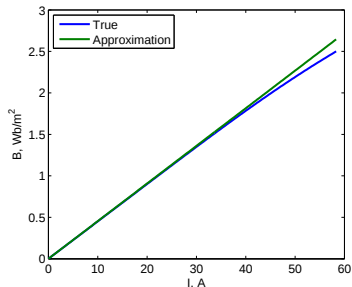
Permeabilitet och induktans approximativt konstant upp till mättningsfenomen börjar uppträda. För högre fältstyrkor varierar både μ och L .

Linjär approximation

Magnetisk krets med luftgap.



Normalmagnetiseringskurvan
 $B(H)$



Med och utan att försumma
reluktansen i järnet.

Upp till 1.5-2 T approximeras sambandet mellan i och det sammanlänkade flödet λ ganska väl av en konstant induktans L .

Detta kommer vi utnyttja för beräkningar!

Järnförluster

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

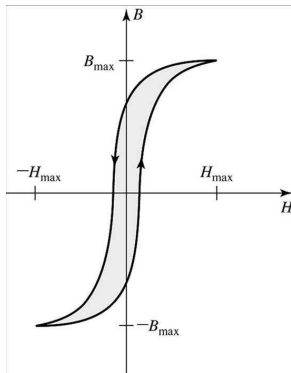
- ▶ Virvelströmsförluster
- ▶ Hysteresförluster

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.



$$W = \underbrace{A_c l_c}_{=\text{volym}} \underbrace{\oint H_c dB_c}_{=\text{slingans area}}$$

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

För ledare välj stål med hög permeabilitet och låg koercivitet (smal slinga).

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.