

Elektriska drivsystem

Föreläsning 5 - Likströmsmaskinen

Mattias Krysander

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

2010-10-21

Dagens föreläsning

1. Introduktion till likströmsmaskinen
2. Analytiska grunder
3. Ankarlindningens magnetisering av statorn
4. Olika typer av likströmsmaskiner
5. Modellering och karakterisering
6. Magnetisering
7. Permanentmagnetiserade DC-maskiner
8. Universalmotorn
9. Fältjusteringar
10. Ingenjörsmässig diskussion om prestanda

— Introduktion till likströmsmaskinen —

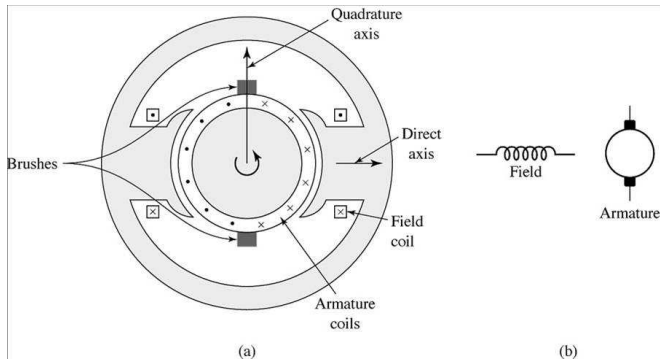
Likströmsmaskinen

Likströmsmaskinen är en mångsidig maskin.

- ▶ Genom att koppla lindningarna i serie, parallellt (shunt), eller separat uppnås olika volt-ampere hastighet-moment karaktärsticker både dynamiskt och statiskt.
- ▶ Traditionellt
 - ▶ lättreglerade
 - ▶ mer komplicerade och tillverka och underhålla, pga kommutatorer och lindningar
- ▶ Idag har kommutatorteknologi utvecklats och reglering av PM-synkronmaskiner vilket delvis har suddat ut den traditionella fördelen.

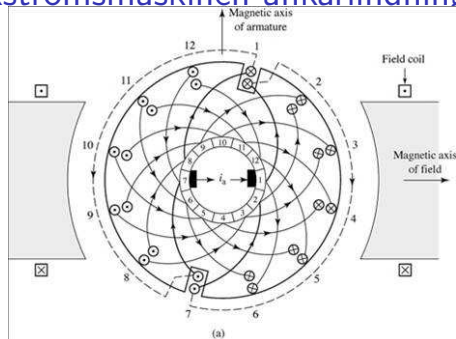
Likströmsmaskinens magnetfält

Ankarlindningens mmf-våg fix i rummet, mitt emellan två polerna i den så kallade kvadraturaxelns riktning.

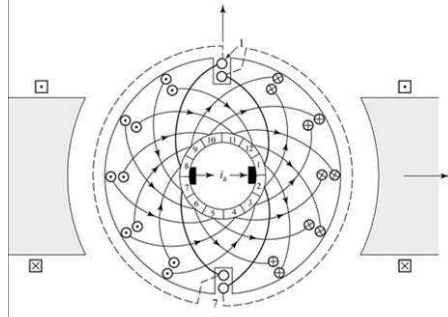


Vi fortsätter att anta sinusformad mmf-våg.

Likströmsmaskinen ankarlindningen och kommutering



(a) Strömmen tar följande vägar (i = inner, y = ytter):
 1-1i-7y-2i-8y-3i-9y-4i-10y-5i-11y-6i-12y-7
 1-6y-12i-5y-11i-4y-10i-3y-9i-2y-8i-1y-7i-7



(b) Strömmen tar följande vägar (i = inner, y = ytter):
 (1-1i-7y-2) 2-2i-8y-3i-9y-4i-10y-5i-11y-6i-12y-7
 1-6y-12i-5y-11i-4y-10i-3y-9i-2y-8i-8 (8-1y-7i-7)

Antalet ledningar $C_a = 24$,
 parallella kopplingar $m = 2$,
 $N_a = \frac{C_a}{2m} = 6$, strömmen gör
 6 varv genom rotorn.

— Analytiska grunder —

Grundläggande storheter i likströmsmaskinen

- ▶ Moment
- ▶ Inducerad spänning
- ▶ Effekten
- ▶ Magnetiska flödet

Likströmsmaskinen - moment

Sedan tidigare vet vi att:

$$\mathbf{T}_r = -\frac{\rho}{2} \overbrace{\frac{D\pi l}{2}}{=A_{cyl}} \mathbf{B}_{sr} \times \mathbf{F}_r$$

Eftersom \mathbf{B}_{sr} är ortogonal mot \mathbf{F}_r fås

$$T_{\text{mech}} = \frac{\rho}{2} \frac{A_{cyl}}{2} B_{\text{peak}} (F_{\text{ag1}})_{\text{peak}}$$

Ett kompakt uttryck kan härledas om B_{peak} uttrycks som det magnetiska flödet Φ_d i direktaxeln/pol samt att $(F_{\text{ag1}})_{\text{peak}}$ uttrycks med strömmen i_a .

Likströmsmaskinen - moment

$$T_{\text{mech}} = \frac{\rho}{2} \frac{A_{\text{cyl}}}{2} B_{\text{peak}} (F_{\text{ag1}})_{\text{peak}}$$

Flödet kan beräknas enligt (sinusformad):

$$\Phi_d = \int_{\text{polyta}} \mathbf{B} \cdot d\mathbf{a} = \text{medeltäthet} \cdot \text{area} = \frac{2}{\pi} B_{\text{peak}} \frac{A_{\text{cyl}}}{\rho}$$

Mmk:n uttryckt i i_a (sågtand)

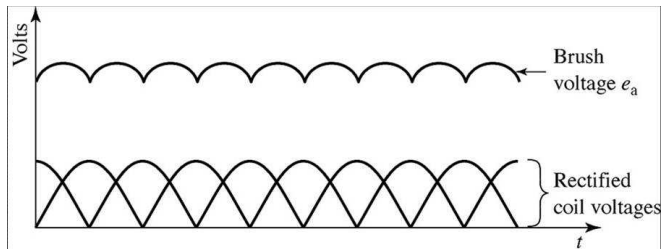
$$(F_{\text{ag1}})_{\text{peak}} = \frac{8}{\pi^2} \left(\frac{N_a}{\rho} \right) i_a$$

Substitution ger:

$$T_{\text{mech}} = \underbrace{\frac{\rho C_a}{2\pi m}}_{=: K_a} \Phi_d i_a$$

där C_a är antalet ledare i ankarlindningen, m antalet parallellkopplade ledare.

Likströmsmaskinen - inducerad spänning



Ju fler kommutatorsegment desto mindre rippel. Sedan tidigare vet vi att spänningen e_a kan approximeras som

$$\begin{aligned} e_a &= \frac{2}{\pi} N_a \omega_m e \Phi_d = \frac{2}{\pi} \omega_m e \Phi_d = \frac{p}{2} \omega_m, N_a = \frac{C_a}{2m} / = \\ &= \frac{p C_a}{\pi 2m} \omega_m \Phi_d = K_a \Phi_d \omega_m \end{aligned}$$

Likströmsmaskinen - effekt

Från huvudsambanden

$$T_{mech} = K_a \Phi_d i_a \qquad e_a = K_a \Phi_d \omega_m$$

fås

$$P_{elec} = e_a i_a = T_{mech} \omega_m = P_{mech}$$

dvs sambanden modellerar en förlustfri ideal maskin.

Likströmsmaskinen - magnetiska huvudflödet

För att kunna använda sambanden

$$T_{mech} = K_a \Phi_d i_a \qquad e_a = K_a \Phi_d \omega_m$$

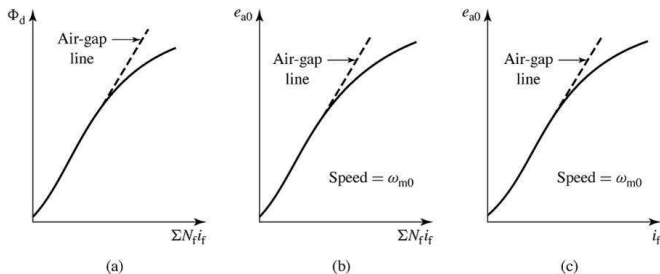
behöver vi beräkna magnetiska flödet Φ_d längs direktaxeln.

Vi kommer tillsvidare anta att bara fältlindningen bidrar till Φ_d .

I detta fall och om stålets reluktans är försumbar gäller

$$\Phi_d = \mathcal{R}_d^{-1} \sum N_f i_f$$

Likströmsmaskinen - magnetiska huvudflödet



Att kurvorna inte börjar i origo beror på remanent magnetisering. Skillnaden mellan kurvorna utgörs bland annat av mättning.

Fig (b). Eftersom $e_a = K_a \Phi_d \omega_m$ och e_a är lätt att mäta anges magnetiseringskurvan ofta som i (b) eller (c) för en fix rotationshastighet ω_{m0} .

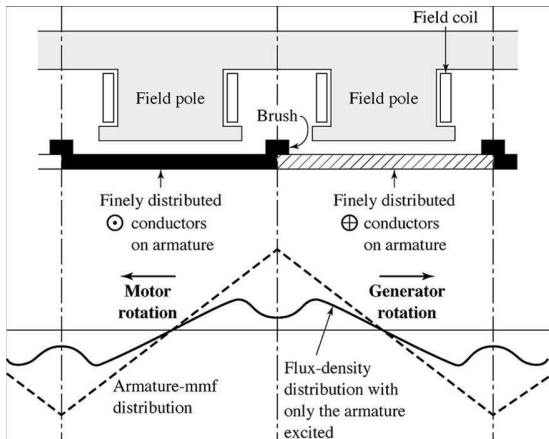
Spänningen för hastigheten ω_m ges av:

$$\frac{e_a}{\omega_m} = K_a \Phi_d = \frac{e_{a0}}{\omega_{m0}} \quad \Rightarrow \quad e_a = \frac{\omega_m}{\omega_{m0}} e_{a0}$$

_____ Ankarlindningens magnetisering av _____
statorn

Ankarlindningens magnetflöde

Ankarlindningens mmk och flödestäthet i luftgapet.



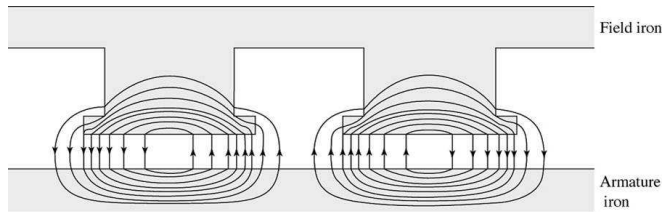
Eftersom

$$B = \frac{\mathcal{F} \mu_0}{g}$$

så minskar flödestätheten mellan polerna.

Ankarlindningens fältlinjer

Fältlinjerna då endast ankarlindningen exciteras.

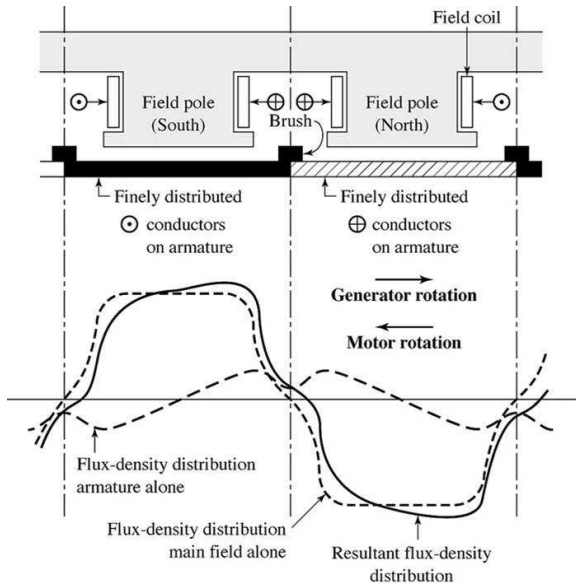


Ökar flödesintensiteten på ena sidan och minskar den på motsatta sidan av polskon.

Ökningen ger upphov till att magnetisk mättning uppstår tidigare och detta reducerar alltså huvudflödet möjligheter att passera.

Magnetfältets rumsfördelning

Ankar- och huvud-fält och den resulterande flödestätheten.



Undvika avmagnetisering

Maskiner går alltid nära mättning. Detta fenomen påverkar prestanda signifikant.

Optimum då endast huvudflödet passerar luftgapet.

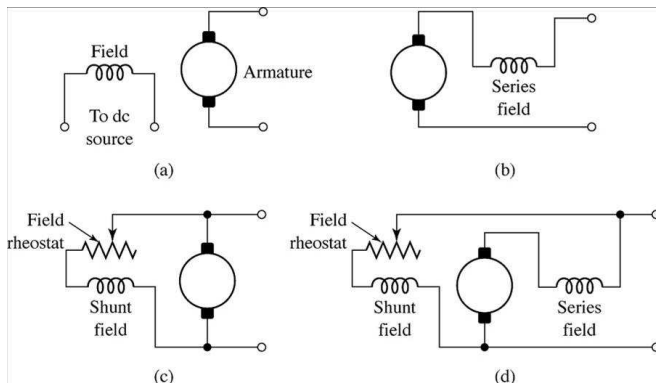
Det betyder att huvudfältet ska vara starkare än ankarfältet. Reluktansen för ankarfältet kan göras stor genom att runda av polskorna.

Bäst är att införa kompensationslindningar, men också dyrast. Vi återkommer till detta senare.

— Olika typer av likströmsmaskiner —

Likströmsmaskinen - typer

Olika kopplingar för att mata likströmsmaskinen.

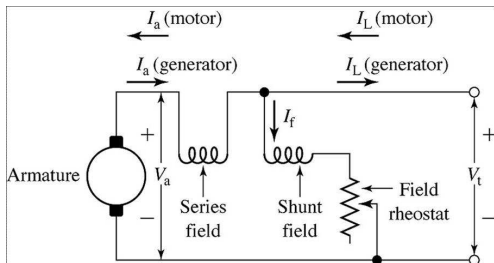


- (a) separatmagnetiserad (b) seriemagnetiserad
(c) shuntmagnetiserad (d) komppoundmagnetiserad

— Modellering och karaktärisering —

Likströmsmaskinen - statisk modell

Modellen inkluderar alla nämnda typer av maskiner.



Ekvationerna för motordrift:

$$\begin{aligned} T_{mech} &= K_a \Phi_d I_a & E_a &= K_a \Phi_d \omega_m & K_a &= \frac{p C_a}{2\pi m} \\ V_a &= E_a + I_a R_a & V_t &= E_a + I_a (R_a + R_s) & V_t &= I_f R_f \\ I_L &= I_a + I_f \end{aligned}$$

R_a ska tolkas som lindningsresistans plus borst och R_f som lindningsresistansen plus potentiometers resistans.

Likströmgeneratorn - magnetisering

Separatmagnetiserad generator:

- ▶ I_f ca 3% av $I_a \Rightarrow$ effektförstärkare
- ▶ används ofta för reglering

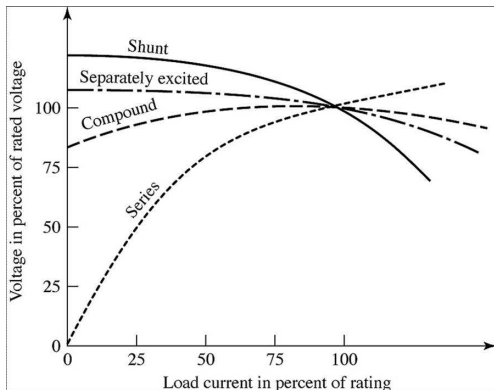
Självmagnetiserade generatorer (shunt, kompond, serie):

- ▶ remanent magnetisering krävs vid start

$$E_a = K_a \Phi_d \omega_m, \quad \Phi_d \neq 0$$

Volt-amperekaraktäristik för dc-generatorer

Volt-amperekaraktäristik vid konstant varvtal.



Separatmagnetiserad. Antag fix fältström I_f :

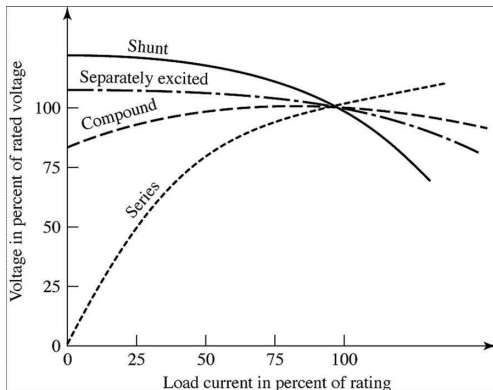
$$V_t = E_a - I_a R_a$$

Seriemagnetiserad (ej vanlig). Låt $E_a = K_a \Phi_d \omega_m = K_f I_a \omega_m$:

$$V_t = K_a \Phi_d \omega_m - I_a (R_a + R_s) = I_a (K_f \omega_m - R_a - R_s)$$

Volt-amperekaraktäristik för dc-generatorer

Volt-amperekaraktäristik vid konstant varvtal.



Shuntmagnetiserad. Tappar lite spänning med ökad lastström.

Kompound: Genom att införa en seriekopplade lindningen fås mer konstant utspänning.

Hastighet-momentkaraktäristik för dc-motorer

Separatmagnetiserad motor.

Beräkna $\omega_m(T_{\text{mech}})$ då fältström I_f är och spänning över motorn V_t är fixa:

$$V_t = E_a + I_a R_a \quad E_a = K_a \Phi_d \omega_m \quad T_{\text{mech}} = K_a \Phi_d I_a$$

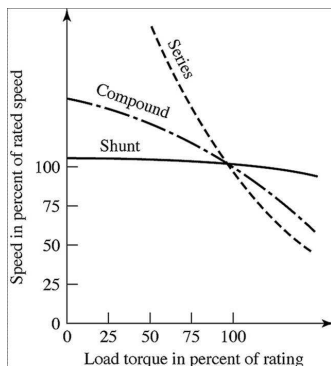
Elimination av E_a och I_a ger:

$$V_t = K_a \Phi_d \omega_m + \frac{R_a}{K_a \Phi_d} T_{\text{mech}} \Rightarrow \omega_m = \frac{1}{K_a \Phi_d} \left(V_t - \frac{R_a}{K_a \Phi_d} T_{\text{mech}} \right)$$

Hastigheten avtar linjärt med ökat moment.

Hastighet-momentkaraktäristik för dc-motorer

Antag konstant spänning över motorn, dvs V_t är fixt som förut.

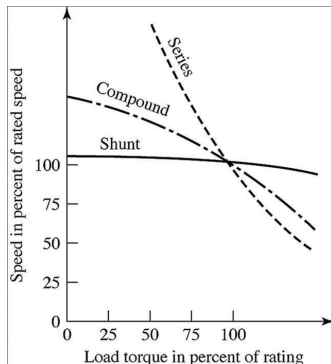


Shuntmotorn:

- ▶ Konstant varvtal oberoende av belastning.
- ▶ Enkel varvtalsstyrning mha potentiometer i shuntkretsen.

Hastighet-momentkaraktäristik för dc-motorer

Antag konstant spänning över motorn, dvs V_t är fixt som förut.

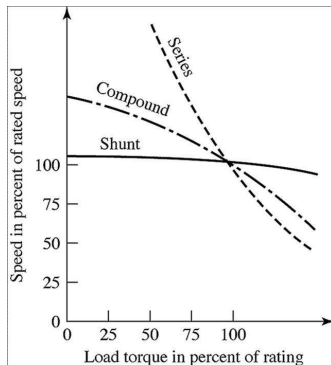


Seriemotorn:

- ▶ Stort startmoment.
- ▶ Överbelastning av moment ger begränsad effektöverbelastning.
- ▶ Övervarvar vid låg belastning.

Hastighet-momentkaraktäristik för dc-motorer

Antag konstant spänning över motorn, dvs V_t är fixt som förut.



Kompoundmotorn:

- ▶ Mellanting mellan shunt och seriemotor
- ▶ Stort startmoment.
- ▶ Övervarvar ej vid låg belastning.

Likströmsmaskinen - exempel

Givet: En 25 W 125 V separatmagnetiserad dc maskin körs i 3000 varv/min med konstant fältström I_f så att $E_a = 125$ V. Ankarlindningens resistans är $R_a = 0.02\Omega$.

Sökt: Ankarlindningens ström I_a , den tillförd effekten, den elektromagnetiska effekten och momentet när terminalspänningen är $V_t = 128$ V.

Lösning: Maskinen körs som motor ty $V_t > E_a$. Strömmen och den tillförda effekten är:

$$I_a = \frac{V_t - E_a}{R_a} = 150 \text{ A} \qquad V_t I_a = 19.2 \text{ kW}$$

Den elektromagnetiska effekten och momentet är

$$E_a I_a = 18.75 \text{ kW} \qquad T_{mech} = \frac{E_a I_a}{\omega_m} = 59.7 \text{ Nm}$$

Likströmsmaskinen - exempel

Givet: Samma 25 W 125 V separatmagnetiserade dc maskin exciteras med en fältström som vid generatordrift i $n_0 = 3000$ varv/min ger en terminalspänning $E_{t0} = 125$ V. $R_a = 0.02\Omega$. Anta motordrift med $V_t = 123$ V och $P_{\text{input}} = 21.9$ kW.

Sökt: Vilken hastighet n får motorn.

Lösning: Ankarströmmen ges av:

$$I_a = \frac{P_{\text{input}}}{V_t} = 178 \text{ A}$$

Inducerade spänningen i ankarlindningen blir

$$E_a = V_t - I_a R_a = 119.4 \text{ V}$$

Hastigheten ges av

$$n = n_0 \left(\frac{E_a}{E_{a0}} \right) = 2866 \text{ varv/min}$$

— Magnetisering —

Magnetisering

Flödet ingår i

$$T_{mech} = K_a \Phi_d I_a$$

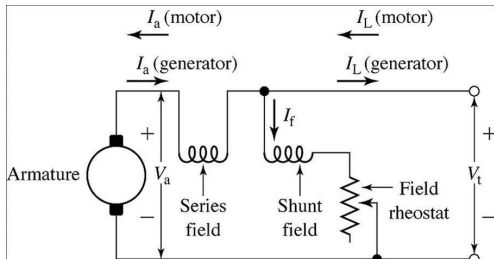
$$E_a = K_a \Phi_d \omega_m$$

Flödet Φ_d genereras av serie och shunt spolen. Eftersom dessa påverkar fältet på samma sätt kan vi skapa en shunt-ekvivalent ström:

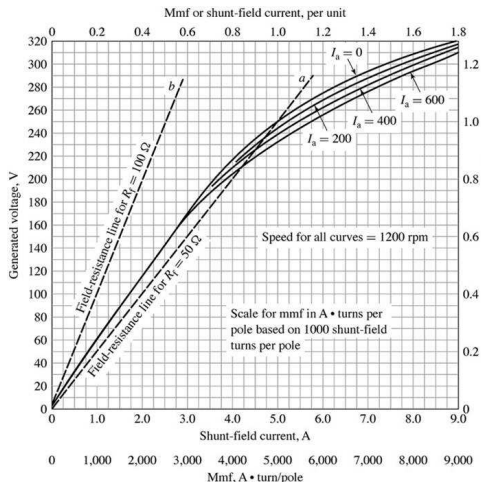
$$I_{net} = I_f + \frac{N_s}{N_f} I_s$$

På så vis kan vi beskriva geometri och magnetiska olinjäriteter med magnetiseringskurvan/mappen E_{a0} :

$$E_a = K_a \Phi_d(I_{net}, I_a) \omega_m = E_{a0}(I_{net}, I_a) \frac{\omega_m}{\omega_{m0}}$$



Magnetiseringskurvan/mappen



De fyra heldragna kurvorna är magnetiseringskurvorna för respektive ankarström.

I figuren inverkar ankarströmmen relativt mycket mot vad den gör i en välidesignad motor.

Då alla strömmar är 0 är spänningen $\neq 0$ V. Detta är en förutsättning för att självexciterande maskiner ska starta.

Linjär karaktäristik upp till mättningsfenomen börjar synas.

Ankarströmmens fält ökar effekten av mättning (avmagnetisering).

Exempel

Givet: En 100 kW, 250 V, 400 A, medkompouderad kompondgenerator har följande parametrar: $R_a = 0.025\Omega$, $R_s = 0.005\Omega$, $N_f = 1000/\text{pol}$, $N_s = 3/\text{pol}$, samt magnetiseringskurvan på föregående oh. $I_f = 4.7$ A och hastigheten är $n = 1150$ varv/min.

Sökt: Terminalspänning vid märkström.

Lösning: Ankarströmmen är

$$I_a = I_f + I_L = 4.7 + 400 = 405 \text{ A}$$

Shunt ekvivalent är: $I_{\text{net}} = I_f + \frac{N_s}{N_f} I_a = 5.9 \text{ A}$

Den inducerade spänningen blir

$$E_a = E_{a0}(I_{\text{net}}, I_a) \frac{n}{n_0} = 261 \left(\frac{1150}{1200} \right) = 250 \text{ V}$$

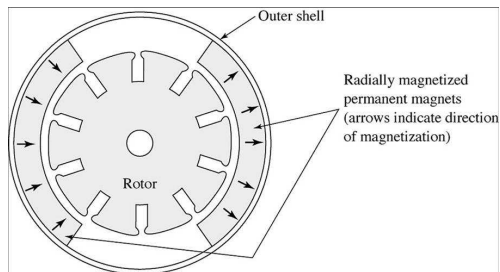
Terminalspänningen blir slutligen

$$V_t = E_a - I_a(R_a + R_s) = 238 \text{ V}$$

— Permanentmagnetiserade DC-maskiner —

Permanentmagnetiserade DC-maskiner

Ett tvärsnitt av en typisk PM DC-motor.



Fältlindningen utbytt mot PM.

Höljet fungerar som magnetisk ledare.

Tillskillnad från andra DC-maskiner har PM DC-maskiner typiskt en cylindrisk insida på statorn.

Se även fig 7.19 för en annan konstruktion.

Permanentmagnetiserade DC-maskiner

Fördelar

- ▶ behöver ingen exciteringsström.
- ▶ liten volym
- ▶ i vissa fall billigare

Nackdelar

- ▶ risk för avmagnetisering orsakade av
 - ▶ för starka rotorfält.
 - ▶ för hög värme.
- ▶ begränsat luftgapsflöde.

Den sista nackdelen är är mindre restriktiv i och med utvecklingen av samarium-kobolt och neodymium-järn-bormagneterna.

Modellering av permanentmagnetiserade DC-maskiner

Eftersom Φ_d är konstant bakas den ihop med K_a enligt

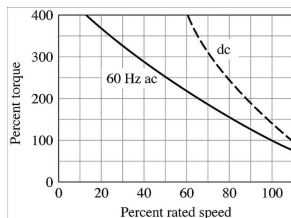
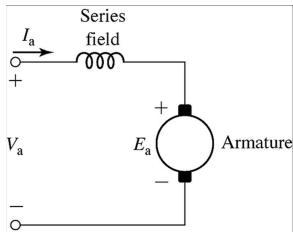
$$K_m = K_a \Phi_d$$

som kallas för momentkonstanten. Modellen kan då sammanfattas:

$$E_a = K_m \omega_m \quad T_{\text{mech}} = K_m I_a \quad V_t = E_a + I_a R_a$$

— Universalmotorn —

Universalmotorn



För den seriekopplade motorn gäller:

$$\Phi_d \sim I_a \quad E_a \sim I_a \omega_m \quad \Rightarrow \quad T \sim I_a^2 \omega_m$$

dvs den går åt samma håll oavsett strömriktning.

Lamineras statorn och rotorn fås en universalmotor som kan körs både med DC och AC, dock i AC-fallet med pulserande moment.

AC mindre effektiv än DC pga mättning och spolarnas induktans. Används t ex i hushållsmaskiner, dammsugare och verktyg.

Låg kostnad och vikt, hög hastighet 1500-15000v/min, styrning genom att variera spänningen.

— Fältjusteringar —

Kommutering och kommuteringspoler

Hur mycket ström som kan ledas genom rotorn begränsas av kommutatorn.

Värme och gnistbildning kan skada kommutatorn vid starka strömmar.

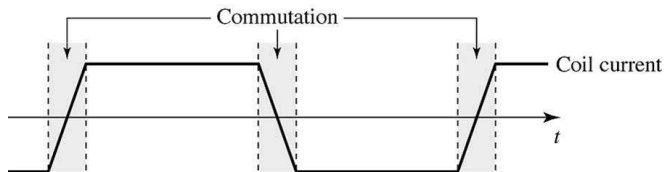
Gnistbildning kan ske dels pga mekaniska fel som att borsten inte har bra kontakt med kollektorn eller elektriska omständigheter.

Under kommutering kortsluts två grupper av spolar och under den tiden ska strömmen omriktats.

För att minimera risken för gnistbildning ska strömtätheten vara konstant över kontaktytan över hela kommuteringen.

Kommutering

Idealström under kommutering.



Kontaktarean minskar/ökar linjärt under kommuteringen vilket om spolen skulle vara impedansfri skulle leda till önskad strömprofil.

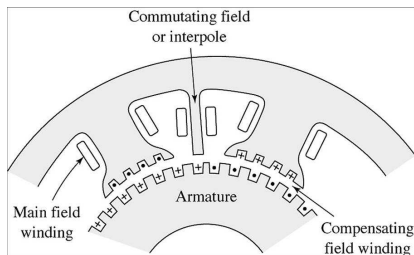
Spolen har impedans, resistansen är ofta försumbar jmf med kommutatorns resistans, dock utgör induktansen ett bekymmer, L/R_{peak} bör minimeras.

$$L \approx \frac{N^2}{2g} A_{\text{pol}} \mu_0$$

För att uppnå detta ska spolen ha få varv, polernas area små, stor luftgap, hög resistans i kommutatorn.

Då kommutatorns resistans är dominerande kallas det för resistanskommutering.

Kommutering

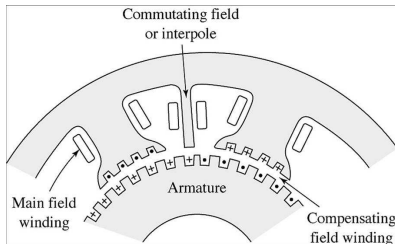
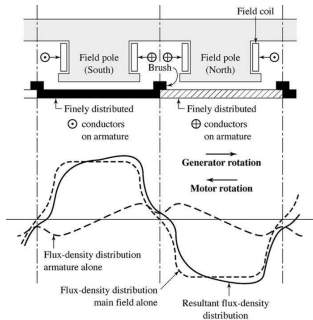


Ett annan mer sofistikerad teknik är att bruka så kallad spänningskommutering.

Princip: reaktansen motverkas genom spänningsinduktion. Används nästan alltid i maskiner $> 1\text{hp}$.

- ▶ smala poler mellan huvudpolorna, kommuteringspoler.
- ▶ polaritet: vid motordrift samma polaritet som huvudpolen efter
- ▶ storlek: motverka reluktansspänning ($j\omega L i_a$)
- ▶ kommutatorpolens lindning seriekopplad med ankarlindningen.

Kompensationslindning



- ▶ Kompensationslindning för att reducera avmagnetiseringen, dvs minimera ankarlindningens bidrag till flödet i luftgapet.
- ▶ Ankarfältets flödestäthet är $\sim i_a$.
- ▶ Kompensationslindningen kopplas därför i serie med ankarlindningen.
- ▶ Leder till minskad tidskonstant samt att huvudfält + ankarfält + kommutatorfält + kompensationsfält = huvudfält (förutom vid kommuteringszonen)

_____ Ingenjörsmässig diskussion om _____
prestanda

Ingenjörsmässig diskussion om prestanda

- ▶ Förluster
- ▶ Märkning och uppvärmning
- ▶ Kylning
- ▶ Effektfaktor
- ▶ Verkningsgrad

Förluster

Att känna till maskinens förluster är viktigt för att:

- ▶ förlusterna bestämmer verkningsgraden

$$\nu = \frac{P_{\text{output}}}{P_{\text{input}}} = \frac{P_{\text{output}}}{P_{\text{output}} + P_{\text{loss}}}$$

vilken påverkar kostnaderna.

- ▶ förlusternas storlek bestämmer uppvärmningen vilken begränsar strömmarnas storlekar och maximal effekt.

Förlusttyper

- ▶ Kopparförluster ($i^2 R$ i lindningarna, kommutator, borstar)
- ▶ Friktionsförluster (lager, borstar, luftdrag, kylfläktar)
- ▶ Järnförluster
 - ▶ virvelströmsförluster ($\sim (\delta f B_{\max})^2$)
 - ▶ hystresförluster ($\sim f B_{\max}^n$ där $n \in [1.5 \text{ } 2.5]$)
- ▶ Tillsatsförluster (stray load losses) ca 1% av uteffekten.

Friktionsförluster och järnförluster kallas gemensamt för rotationsförluster.

Värmeutveckling och isolering

- ▶ Värmeutvecklingen begränsar strömstyrkan, momentet och effekten
- ▶ Utvecklad värme är nära kopplat till isoleringens livslängd

$$\text{Life} = Ae^{\frac{B}{T}}$$

där A och B konstanter, T absolut temperatur.

- ▶ Noggranna simuleringar för att avgöra livslängden.

Tillåten maxtemperatur i Celsius för olika isolering och konstruktioner enligt National Electrical Manufacturers Association (NEMA) standard.

Motortyp	Isolationsklass B	Isolationsklass F
Inkapslade lindningar	125	150
Helt insluten fläktskyld	120	145

Kylning

Kylningsproblem ökar med storlek ty värme \sim volym, kylning \sim area.

Stora maskiner använder ofta vätgas som kylmedium eftersom

- ▶ låg densitet leder till små ventilationsförluster.
- ▶ kylning genom forcerad konvektion betydligt effektivare än med luft, märkningen kan ökas ca 30-50% jmf med luftkylning.
- ▶ underhållsbehovet minskar med tät inslutning, ty smuts, fukt och syre stoppas.
- ▶ övertryck i maskinen gör att explosionsrisken minimeras.

Genom direkt kylning av ledarna i vätgaskyllda turbingeneratorer har uteffekten kunnat dubblas. Sker med gas eller vätska. Se Fig D.1.

Effektfaktorn

Låg effektfaktor negativ för

- ▶ generatorer, transformatorer, transmissionsutrustning märkt i VA. Storlek och pris sätts av kVA snarare än kW.
- ▶ Högre resistiva förluster ger lägre verkningsgrad.

Aspekter som påverkar effektfaktorn:

- ▶ Lindningar som styrs med växelström drabbas av en reaktiv komponent.
 - ▶ Induktionsmaskiner har alltid effektfaktor på max ca 85%-90% högst vid full-last.
 - ▶ Synkronmaskinens effektfaktor styrs till 1 genom att välja strömförhållandet mellan fält och ankarlindningen. Om fältströmmen är för låg är maskinen underexciterad och motsatsen kallas överexciterad.

Verkningsgrad

- ▶ Resistiva förluster kan minskas genom att använda mer koppar.
- ▶ Hystresförluster kan minskas genom att minska flödestätheten, tex genom att utnyttja med järn.
- ▶ Virvelströmsförluster kan minskas genom att använda tunnare laminering.

Kompromiss: högre verkningsgrad mot mer material och dyrare maskin.

Välj inte större maskin än vad som behövs och se till att den reaktiva effekten minimeras.

—— Att ta med sig från föreläsningen ——

Att ta med sig från föreläsningen

- ▶ Likströmsmaskinen är komplicerad i sin konstruktion men enkel att reglera.
- ▶ Maskintyper: serie, shunt, kompond, separat, permanentmagnet
- ▶ Olika typer har olika karaktäristik som kan utnyttjas vid val av motor.
- ▶ Enkla analytiska samband:

$$T_{\text{mech}} = K_a \Phi_d I_a \quad E_a = K_a \Phi_d \omega_m \quad \text{Magnetiseringskurva}$$

Nästa föreläsning: kraftelektronik samt reglering av likströmsmotorer.