

Fö 4 - TMEI01 Elkraftteknik

Trefastransformatorn

Introduktion till Likströmsmaskinen

Christofer Sundström

21 januari 2020

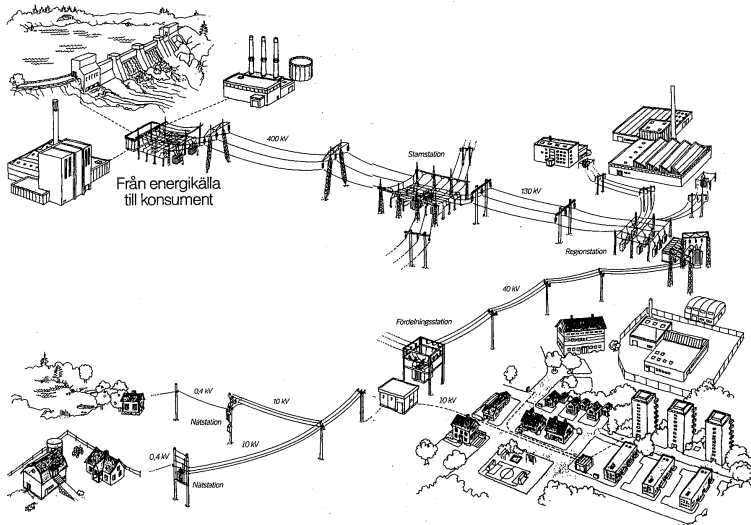
1 Trefastransformatorn

- Distributionsnätet
- Uppbyggnad
- Kopplingsarter
- Ekvivalent Kretsschema
- Beräkningsexempel

2 Likströmsmaskinen

- Introduktion
- Ekvivalent Kretsschema
- Separat, Shunt, Serie och Kompound kopplingar
- Startström och Startpådrag
- Beräkningsexempel

Distributionsnätet



Trefastransformatorn: Uppbyggnad

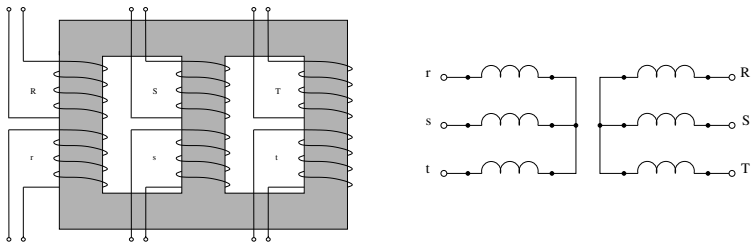
Alt 1: Använd tre st. likadana enfastransformatorer

- > Mindre vanligt
- > Lägre effektivitet än alternativet

Alt 2: Gemensam järnkärna för hela transformatorn, en s.k. **trefastransformator**

- > Summan av magnetflödena är alltid noll vid symmetrisk trefas. Därför behövs ingen magnetisk återledare.
- > Det räcker alltså med en trebent transformator, dvs ett ben för varje fas.

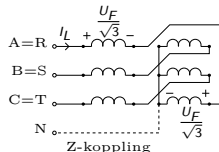
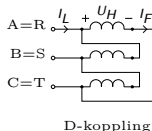
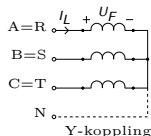
Uppbyggnad, forts.



Figur: Uppbyggnad av trefas krafttransformator och dess schemasymbol vid Y-koppling. De tre faserna R, S och T har en uppspanningslindning och en nedspänningslindning på varje ben.

Kopplingsarter

- Lindningarna på en trefastransformator brukar Y-kopplas, D-kopplas eller Z-kopplas.



Fasuttagen märks A, B, och C.

- Magnetfältet från en D-kopplad lindning blir $\sqrt{3}$ ggr. större än vid Y-kopplad lindning för samma U_H .
- > Spänningen på nedsidan blir $\sqrt{3}$ ggr. större för D-kopplad lindning än för Y-kopplad lindning på uppsidan.
- De två lindningsdelarna i Z-kopplingen är två hälfter av en lindningsfläta kopplade så att spänningarna blir motkopplade och fasförskjutna 60° .
- > Mindre vanligt

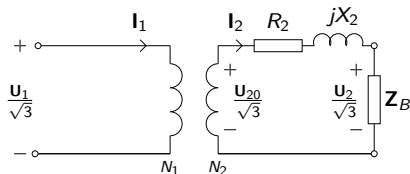
- Transformatorkopplingar betecknas enligt

	Uppspänningslindning	Nedspänningslindning
Y-koppling	Y	y
D-koppling	D	d
Z-koppling	Z	z

Ex: YNd betyder att uppspänningssidan är Y-kopplad med nolluttag och nedspänningssidan D-kopplad.

Ekvivalent Krettschema

- Ofta försummas tomgångsförlusterna vid utritning av trefastransformatorns krettschema.
 - Räkningarna görs enklast under antagandet att transformatorn består av tre st Y-kopplade enfastransformatorer.
- > Förutsätter balanserad last.



Figur: Ekvivalent per Y-fas schema för trefastransformator. U_1 representerar U_h på primärsidan, inte fasspänning nr 1.

- $R_1, X_1, Z_1, R_2, X_2, Z_2$: Parametrar för respektive lindning.
- $R_{1k}, X_{1k}, Z_{1k}, R_{2k}, X_{2k}, Z_{2k}$: Totala kortslutningsimpedansen på primärsidan respektive sekundärsidan. (ex: $R_{1k} = R_1 + R'_2$ och $R_{2k} = R'_1 + R_2$)

Beräkningsexempel 2.14

2.14 Beräkna nedanstående storheter med hjälp av ABB:s datablad för trefas krafttransformatorer, BD 140 022-BA, om transformatorn märkbelastas och effektfaktorn är 0,8 ind.

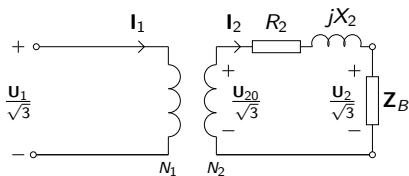
- I_{1M} och I_{2M} (primär och sekundär märkström).
- R_{1K} och R_{2K} (primär och sekundär kortslutningsresistans).
- X_{1K} och X_{2K} (primär och sekundär kortslutningsreaktans).
- U_2 (sekundära spänningen över lasten).
- η (vid märkström).
- Belastningsgraden x för max verkningsgrad.
- Hur stor är kortslutningsströmmen på primärsidan I_{K1} om transformatorn utsätts för trefasig kortslutning på sekundärsidan vid märkspänning?

Transformatorer typ TOL
Öppet system, ej omlastningsbara

Effekt	Garantier		Vikter i kg		Beställningsnummer			
kVA	P ₀ W	P _b W	U ₂ %	I ₀ %	Olja	Totalt	Mållade	Värmförsänkade
Serie A, 10 ± 2 × 2,5 %/0,4 kV, Dyn 11								
50	135	870	3,4	1,4	90	390	BD 140 022-BA	BD 140 023-BA
100	215	1370	3,6	1,2	130	605	-CA	-CA
200	330	2530	3,4	0,9	180	890	-DA	-DA
315	460	3260	3,8	0,7	240	1310	-EA	-EA
400	580	3640	3,9	0,8	280	1510	-FA	
500	730	4410	4,5	0,7	390	1750	-GA	
630	900	5210	4,3	0,7	465	2085	-HA	
800	1100	6160	5,0	0,7	550	2550	-KA	
1000	1200	8250	5,8	0,6	680	2980	-LA	
1250	1520	9190	5,7	0,6	800	3550	-MA	
1600	1780	12360	6,0	0,6	970	4140	-NA	
2000	2100	15180	6,4	0,5	1160	5050	-PA	
2500	2600	17670	6,3	0,5	1350	6230	-RA	

Källa: ABB.

Rita ekvivalent per fas schema



Beräkningsexempel 2.14

a)

Sökt: I_{1M} och I_{2M}

Givet: $S_M = 50 \text{ kVA}$, $U_{1M} = 10 \text{ kV}$, $U_{2M} = 0,4 \text{ kV}$

Lösning: Använd definitionen av trefaseffekt för upp-sidan och ned-sidan

$$S_M = \sqrt{3} \cdot U_{1M} \cdot I_{1M} = \sqrt{3} \cdot U_{2M} \cdot I_{2M} \implies$$

$$\implies \begin{cases} I_{1M} = \frac{50 \cdot 10^3}{\sqrt{3} \cdot 10^4} = 2,9 \text{ A} \\ I_{2M} = \frac{50 \cdot 10^3}{\sqrt{3} \cdot 4 \cdot 10^2} = 72,2 \text{ A} \end{cases}$$

b)

Sökt: R_{1K} och R_{2K} , dvs kortslutningsresistansen sett från primär och sekundärsidan.

Givet: $P_{FBM} = 870 \text{ W}$

Lösning: Effekten i varje gren är en tredjedel så vi har att

$$P_{FBM} = 3 \cdot R_{1K} \cdot I_{1M}^2 = 3 \cdot R_{2K} \cdot I_{2M}^2 \implies$$

$$\implies \begin{cases} R_{1K} = \frac{870}{3 \cdot 2,9^2} = 34,8 \text{ } \Omega \\ R_{2K} = \frac{870}{3 \cdot 72,2^2} = 55,2 \text{ m}\Omega = R_{1K} \cdot \left(\frac{U_{2M}}{U_{1M}} \right)^2 \end{cases}$$

Beräkningsexempel 2.14

c)

Sökt: X_{1K} och X_{2K} , dvs kortslutningsreaktans sett från primär och sekundärsidan.

Givet: $P_{FBM} = 870 \text{ W}$, $u_Z = 3,4\%$. Här är u_Z det procentuella impedansspänningsfallet vid märkström.

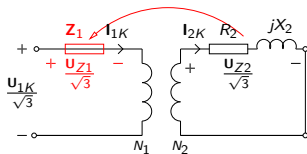
Lösning: Procentuella spänningsfallet är spänningsfallet över Z_{1K} eller Z_{2K} vid märkström på resp. sida.

$$\frac{U_{1K}}{\sqrt{3}} = |Z_{1K}| \cdot I_{1K} \quad (1)$$

$$U_{1K} = \frac{u_Z}{100} \cdot U_{1M} = \frac{3,4}{100} \cdot 10^4 = 340 \text{ V} \quad (2)$$

$$Z_{1K} = \sqrt{R_{1K}^2 + X_{1K}^2} \quad (3)$$

$$X_{2K} = X_{1K} \cdot \left(\frac{U_{2M}}{U_{1M}} \right)^2 \quad (4)$$



$$(1) \& (2) \Rightarrow Z_{1K} = \frac{U_{1K}}{\sqrt{3} \cdot I_{1K}} = \frac{340}{\sqrt{3} \cdot 2,9} = 68 \Omega$$

$$(3) \Rightarrow X_{1K} = 58,4 \Omega$$

$$(4) \Rightarrow X_{2K} = 58,4 \cdot \left(\frac{400}{10^4} \right)^2 = 93,5 \text{ m}\Omega$$

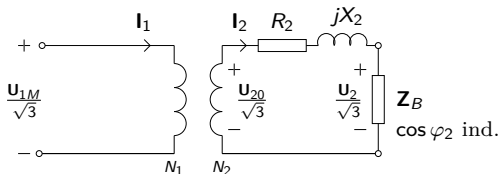
Beräkningsexempel 2.14

d)

Sökt: U_2 , spänningen över lasten

Givet: $U_1 = U_{1M} \Rightarrow U_{20} = U_{2M}$, Märkbelastning $\Rightarrow I_2 = I_{2M}$, $\cos \varphi_2$

Lösning: Rita figur och sätt ut kända och okända storheter. Använd spänningsfallsformeln



$$\frac{U_{20}}{\sqrt{3}} \approx \frac{U_2}{\sqrt{3}} + I_2 (R_{2K} \cos \varphi_2 + X_{2K} \sin \varphi_2) \Rightarrow$$

$$\frac{400}{\sqrt{3}} \approx \frac{U_2}{\sqrt{3}} + 72,2 (55,2 \cdot 10^{-3} \cdot 0,8 + 93,5 \cdot 10^{-3} \cdot 0,6) \Rightarrow$$

$$U_2 \approx 387,4 \text{ V}$$

Beräkningsexempel 2.14

e)

Sökt: η , för märkbelastningsfallet

Givet: $U_2, I_{2M}, \cos \varphi_2, P_{F0}, P_{FBM}$

Lösning: Räkna ut P_{2M} för driftsfallet och använd formeln för effektivitet

$$P_{2M} = \sqrt{3} \cdot U_2 \cdot I_{2M} \cdot \cos \varphi_2 = \sqrt{3} \cdot 387,4 \cdot 72,2 \cdot 0,8 = 38742 \text{ W}$$

$$\eta = \frac{P_{2M}}{P_{2M} + P_{F0} + P_{FBM}} = \frac{38742}{38742 + 135 + 870} = 97,5 \%$$

Notera: P_{2M} beror både på belastningsgrad x och effektfaktor $\cos \varphi_2$. Detta syns inte explicit i formeln i boken

$$\eta = \frac{x \cdot P_{2M}}{x \cdot P_{2M} + P_{F0} + x^2 \cdot P_{FKM}}$$

Formeln borde alltså egentligen förtydligas med $P_{2M}(x, \cos \varphi_2)$.

Beräkningsexempel 2.14

f)

Sökt: Belastningsgraden för max verkningsgrad

Givet: P_{F0} , P_{FBM}

Lösning: Ställ upp verkningsgraden som funktion av belastningsgrad.

$$\begin{aligned}\eta(x) &= \frac{x \cdot P_{2M}}{x \cdot P_{2M} + P_{F0} + x^2 \cdot P_{FKM}} = \frac{f(x)}{g(x)} \\ \eta'(x) &= \frac{f'(x) \cdot g(x) - f(x) \cdot g'(x)}{g(x)^2} = \\ &= \frac{P_{2M} \cdot (x \cdot P_{2M} + P_{F0} + x^2 \cdot P_{FBM}) - x \cdot P_{FBM} \cdot (P_{2M} + 2 \cdot x \cdot P_{FBM})}{g(x)^2} = \\ &= \frac{x \cdot P_{2M}^2 + P_{2M} \cdot P_{F0} + x^2 \cdot P_{2M} \cdot P_{FBM} - x \cdot P_{2M}^2 - 2 \cdot x^2 \cdot P_{2M} \cdot P_{FBM}}{g(x)^2} = \\ &= \frac{P_{2M} \cdot P_{F0} - x^2 \cdot P_{2M} \cdot P_{FBM}}{g(x)^2} = \frac{P_{2M} \cdot (P_{F0} - x^2 \cdot P_{FBM})}{g(x)^2} \\ \eta'(x) = 0 &\implies (P_{F0} - x^2 \cdot P_{FBM}) = 0 \implies \\ x_{\eta_{\max}} &= \sqrt{\frac{P_{F0}}{P_{FBM}}} = \sqrt{\frac{135}{870}} = 0.39\end{aligned}$$

Beräkningsexempel 2.14

g)

Sökt: I_{K1} om transformatorn kortsluts trefasigt på sekundärsidan
(obs skillnad $I_{1K} \neq I_{K1}$)

Givet: $U_1 = U_{1M}$, $Z_{1\text{Tot}} = Z_{1K}$

Lösning: Använd ohms lag på den kortslutna kretsen

$$I_{K1} = \frac{U_{1M}}{\sqrt{3} \cdot Z_{1K}} = \frac{10^4}{\sqrt{3} \cdot 68} = 85 \text{ A}$$

Likströmsmaskinen: Introduktion

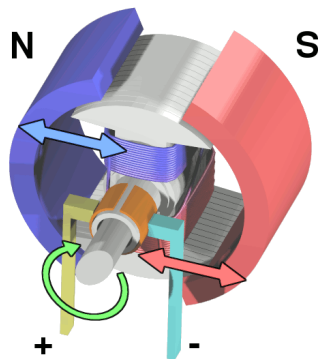
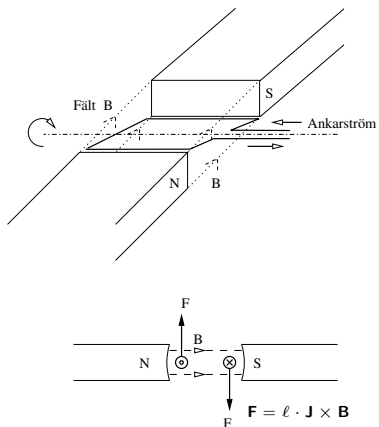
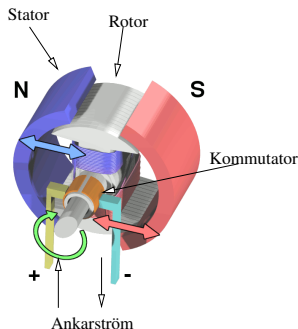


Illustration av DC-motor,
Wikimedia Commons

Introduktion, forts.

- En **likströmsmaskin** kan arbeta **både** som motor och generator.
- Högt startmoment, snabb acceleration, enkel att styra
- För en likströmsmaskin är ankare och rotor samma sak. (Ankarlindningen är alltid den som är AC ström i)

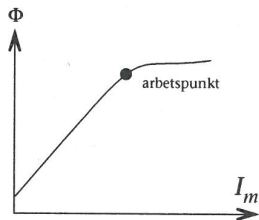


Figur: Benämningar för de olika delarna i en DC-motor

Huvudflöde

- Flödet från statorlindningen, eller fältlindningen, kallas **huvudflöde**

-> Huvudflödet bestäms i princip av magnetiseringsströmmen I_m



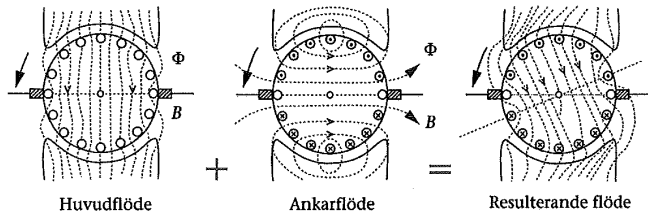
Figur 3.5 a) Magnetiseringskurva.

- Flödet genom maskinen kallas Φ och vi har alltså i princip

$$\Phi(I_m) = f(I_m) = / \text{ för det linjära området } / \approx k \cdot I_m$$

Huvudflöde och Ankarflöde

- Ankarströmmen ger upphov till ett tvärs-riktat ankarflöde som påverkar storleken på huvudflödet för stora ankarströmmar.



Figur 3.6 Magnetiska flöden hos en 2-polig likströmsmaskin.

Figur: Skiss av distorsion av huvudflöde p.g.a. ankarflöde. När ankarflödet ökar p.g.a. ökad belastning så distorderas fältet allt mer. Detta leder till magnetisk mättning i de delar som utsätts för störst flöden och därmed fältförsvagning.

Elektromotorisk kraft

Vid rotation skär ankarledarna luftgapets magnetiska flödeslinjer. I varje ledare induceras en emk:

$$e = B_{med}lv$$

där $v = 2\pi r \frac{n}{60}$ och $B_{med} = \frac{\phi_{med}}{A}$, med n som rotationsvarvtalet och $A = \frac{2\pi rl}{p}$ är rotorytan per pol. Om N ledare serikopplas fås

$$E = NB_{med}lv$$

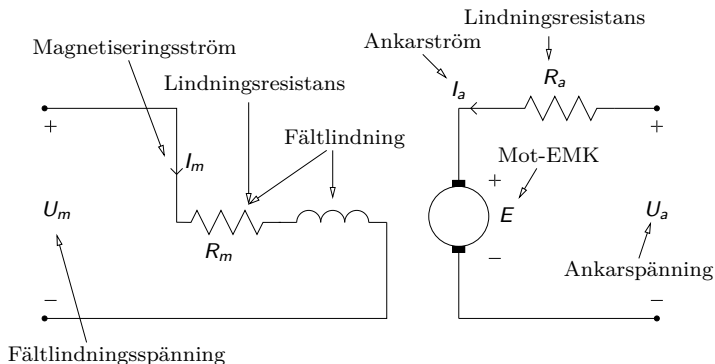
Emk:n kan då skrivas som

$$E = \frac{pN}{60} \phi_{med} n$$

där p är antalet magnetiska poler och N antalet ankarledare på rotorn.

För en viss maskin blir då $E = k_1 \phi n$, med $k_1 = \frac{pN}{60}$
(konstruktionskonstant)

Ekvivalent Krettschema



Figur: Ekvivalent krettschema för DC-maskin samt benämningar på de olika komponenterna. Magnetiseringsstorheterna kallas ibland för fältstorheter, dvs I_f , U_f , R_f o.s.v.

- Kirchoffs spänningslag ger oss

$$U_a - R_a \cdot I_a - E = 0$$

- Den varvtalsberoende elektromotoriska kraften är

$$E = k_1 \cdot \Phi \cdot n = k_2 \cdot \Phi \cdot \omega$$

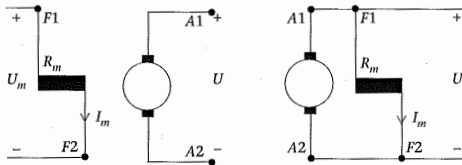
- Strömmen i magnetiseringslidningen blir

$$I_m = \frac{U_m}{R_m}$$

- Magnetfältet för det linjära området är

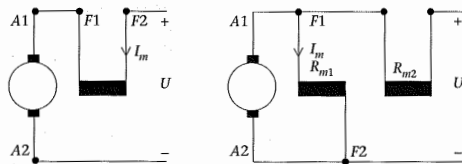
$$\Phi = k \cdot I_m$$

Separat, Shunt, Serie och Kompond kopplingar



Figur 3.3 a) Separatmagnetisering.

b) Shuntmagnetisering.



Figur 3.4 a) Seriemagnetisering.

b) Kompondmagnetisering med shuntlindning parallellt med ankaret.

Figur: Olika kopplingsvarianter för lindningarna hos en DC-maskin. Den separatmagnetiserade har samma driftsegenskaper som en permanentmagnetiserad eftersom strömmen som genererar huvudflödet är helt frikopplad från ankarkretsen.

Startström och Startpådrag

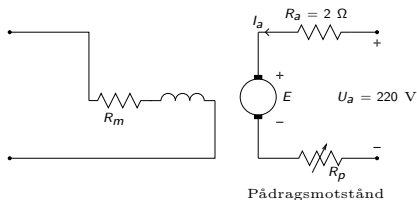
- Eftersom $E = k_1 \cdot \Phi \cdot n = 0$ vid start så blir startströmmen hög för alla likströmsmaskiner.
- Startströmmen blir speciellt hög för den seriekopplade varianten eftersom de är designade med lägre lindningsresistanser.
- Lösningen är att koppla på ett s.k. startpådrag som begränsar strömmen i startögonblicket.
- Startpådraget kopplas ur så snart motorn fått upp farten.

Beräkningsexempel 3.1, startpådrag

En separatmagnetiserad likströmsmotor är ansluten till 220V. Ankarkretsresistansen är 2Ω . Vid normaldrift drar motorn 10A. Hur stor måste resistansen vara hos pådraget vid start för att inte startströmmen skall överstiga dubbla normalströmmen?

Beräkningsexempel 3.1, startpådreg

Lösning: Rita figur och ställ upp strömsambandet för ankarkretsen.



$$U_a - R_a \cdot I_a - E - R_p \cdot I_a = 0$$

$$I_{a,\text{start}} \leq 2 \cdot I_{a,\text{drift}} = 20$$

Vid start är $E = k_1 \cdot \Phi \cdot n = 0$ och därmed så gäller

$$I_{a,\text{start}} = \frac{U_a}{R_a + R_p} \leq 20 \Rightarrow$$

$$R_a + R_p \geq \frac{220}{20} \Rightarrow R_p \geq 9 \Omega$$

Jmf: Utan R_p blir $I_{a,\text{start}} = 110A$