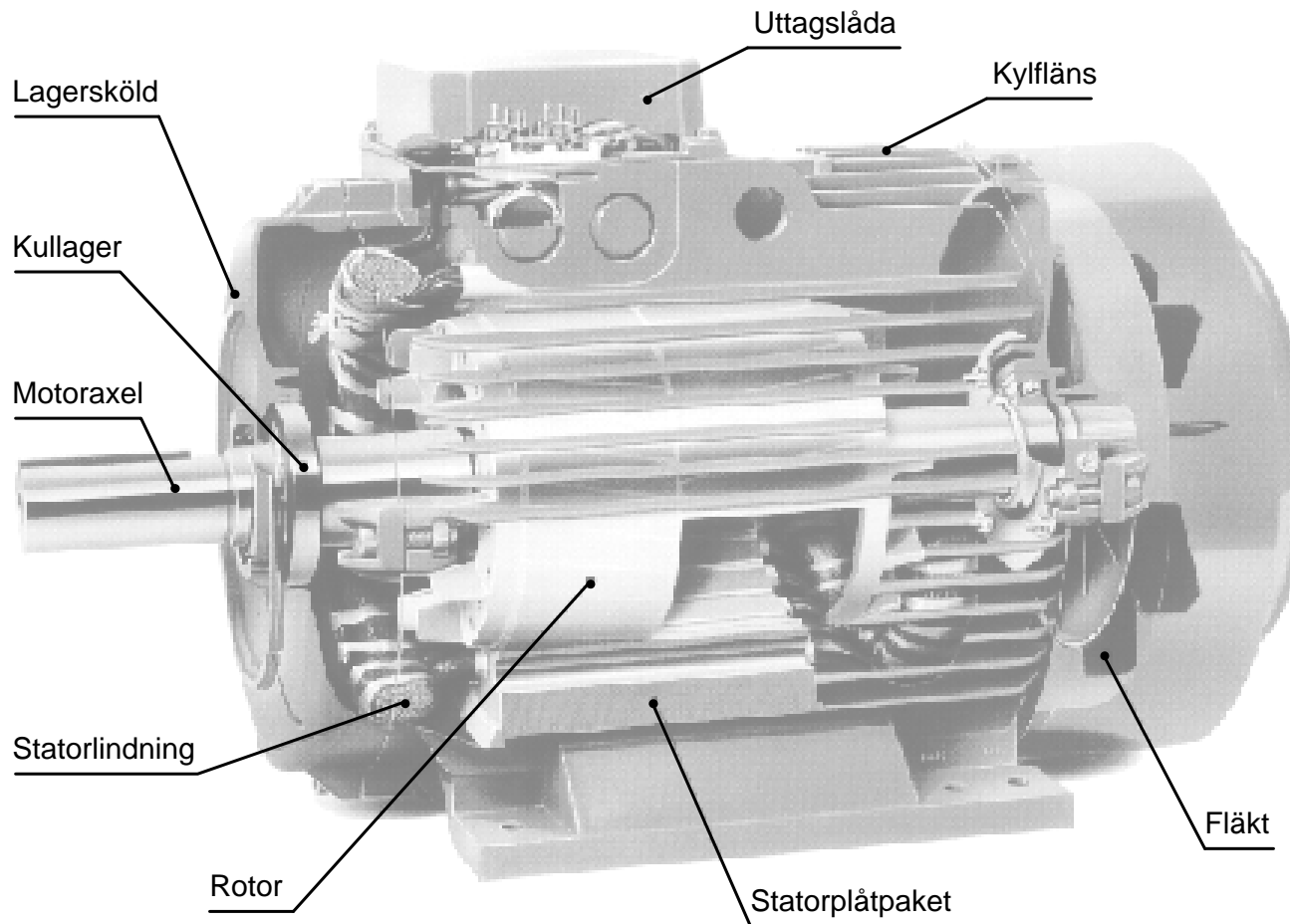




LUNDS
UNIVERSITET

F6: Asynkronmaskinen (Kap 10) och Mjukstartaren (BWW Kap 13)

Allmänt om asynkronmaskinen (I)



Figur 10.1. Asynkronmaskin



Allmänt om asynkronmaskinen (II)

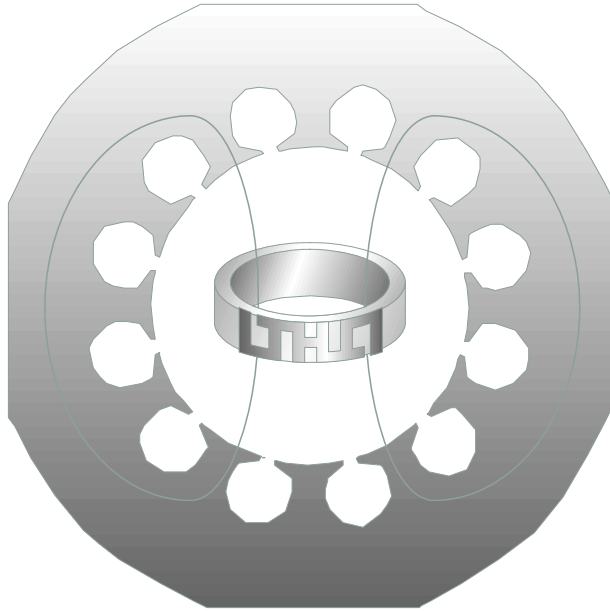
Att asynkronmotorn används i så stor utsträckning beror framför allt på följande:

- Den är självstartande när den ansluts till nätet
- Den är robust och pålitlig
- Den är billig i inköp
- Den är enkel och billig att underhålla
- Den är starkt standardiserad



Varför snurrar motorn? (I)

[Varför roterar rotorn? (I)]



Figur 10.2. Guldring inuti statorn till en asynkronmotor

Induktionslagen (Lenz lag):

$$u = \frac{d\Phi}{dt}$$

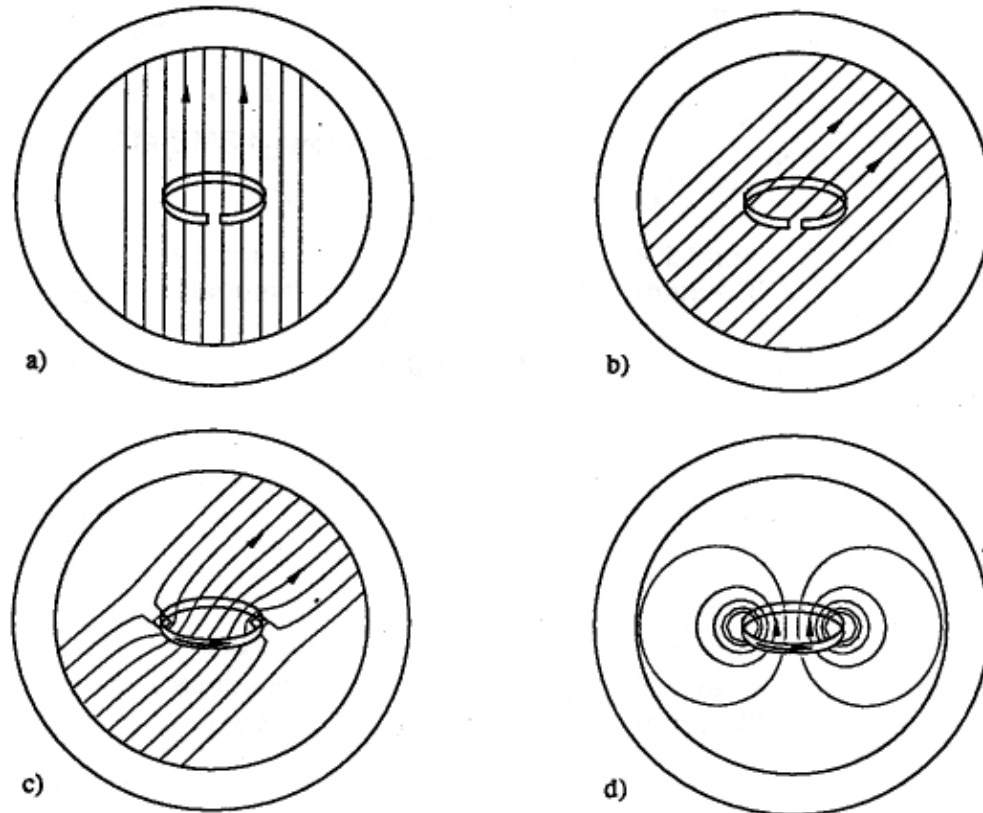
För en kortsluten slinga:

$$u = Ri = \frac{d\Phi}{dt}$$



Varför snurrar motorn? (II)

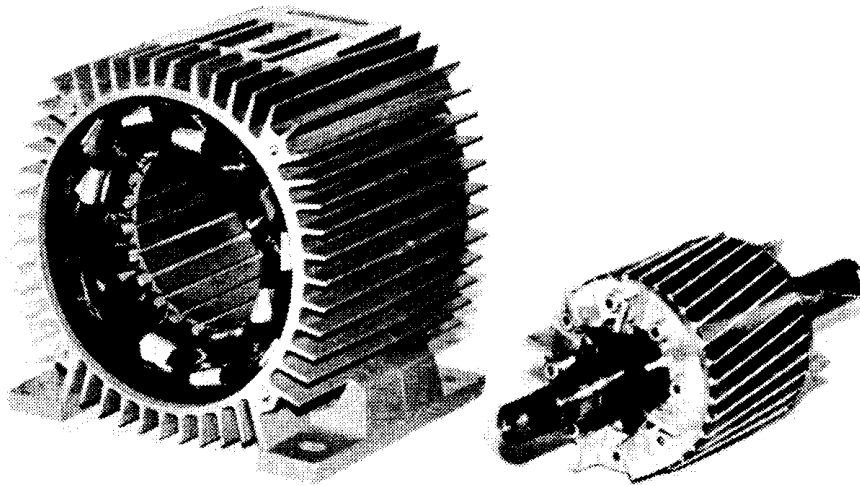
[Varför roterar rotorn? (II)]



Figur 10.3. a) Ett homogent fält genom en ring roterar. b) Om ringen är öppen minskar flödet genom den och en spänning induceras c) Om ringen är sluten ger den upphov till ett eget magnetfält som försöker upprätthålla flödet genom ringen. d) Magnetfältet från ringen



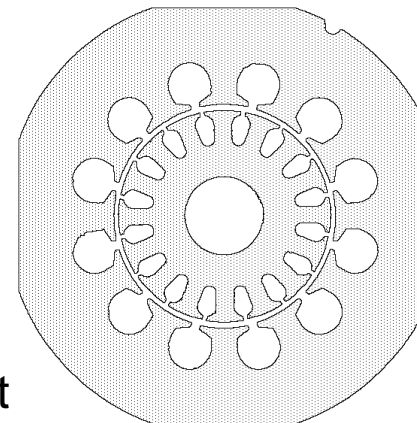
Mekaniskt utförande (I)



Figur 10.4. Statorhus och burlindad rotor



Figur 10.5. Rotor med släppringar

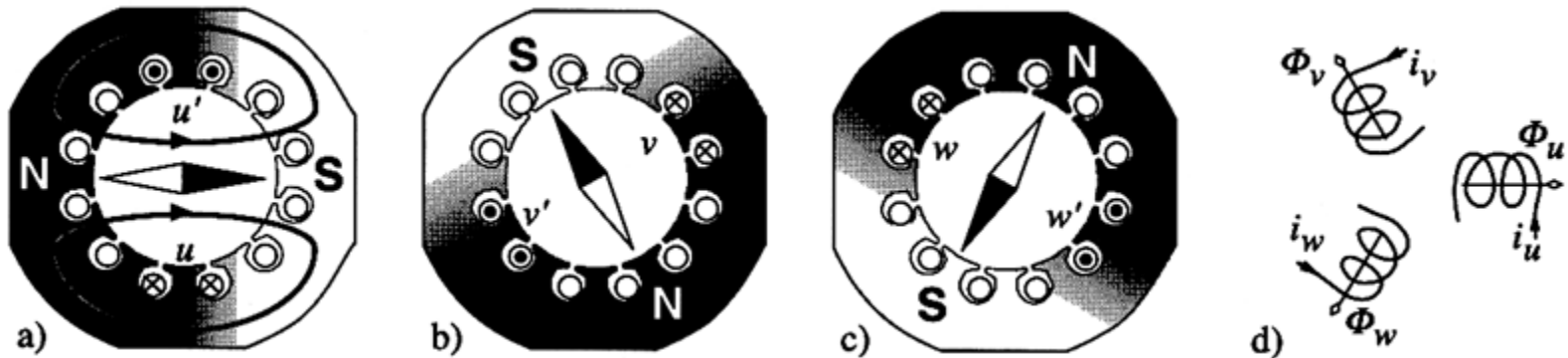


Figur 10.6. Stator- och rotorplåt



Mekaniskt utförande (II)

- Statorn

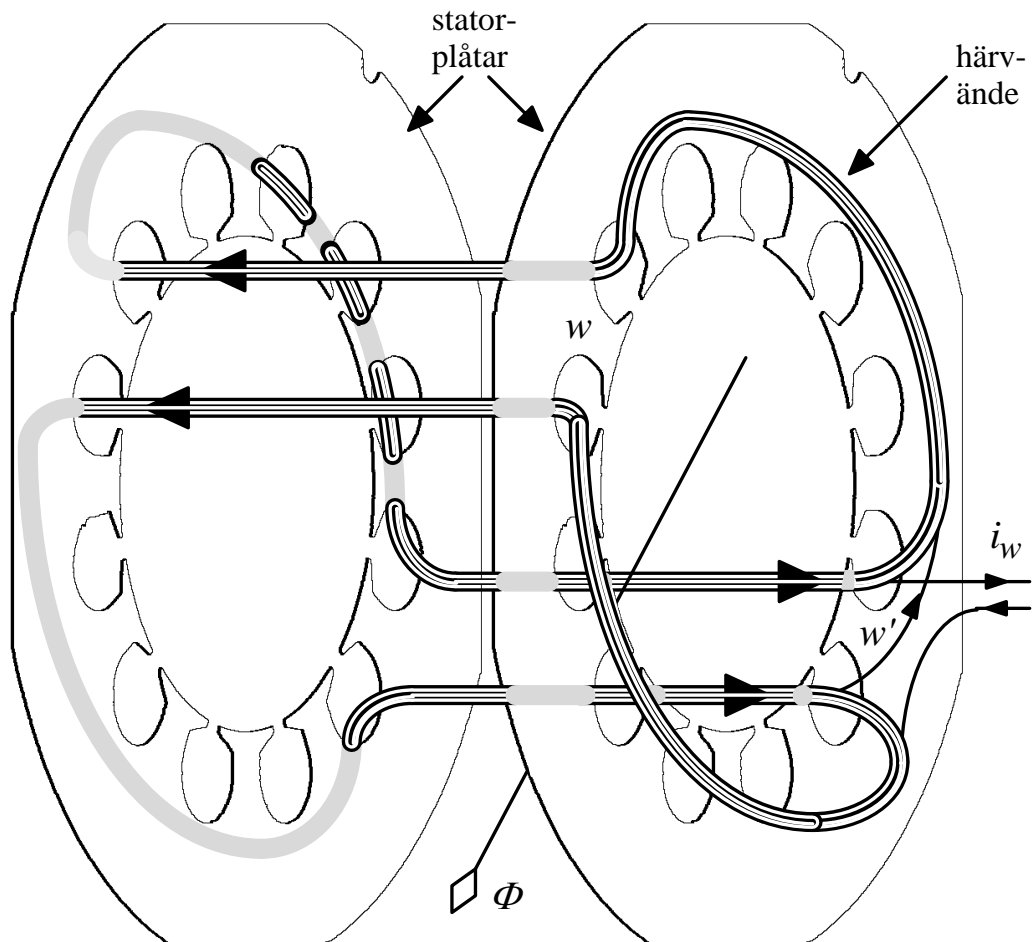


Figur 10.7. a)-c) u, v och w-lindningen i statorn d) schematiska lindningar för att visa flödenas referensriktningar.



Mekaniskt utförande (III)

- Statorn

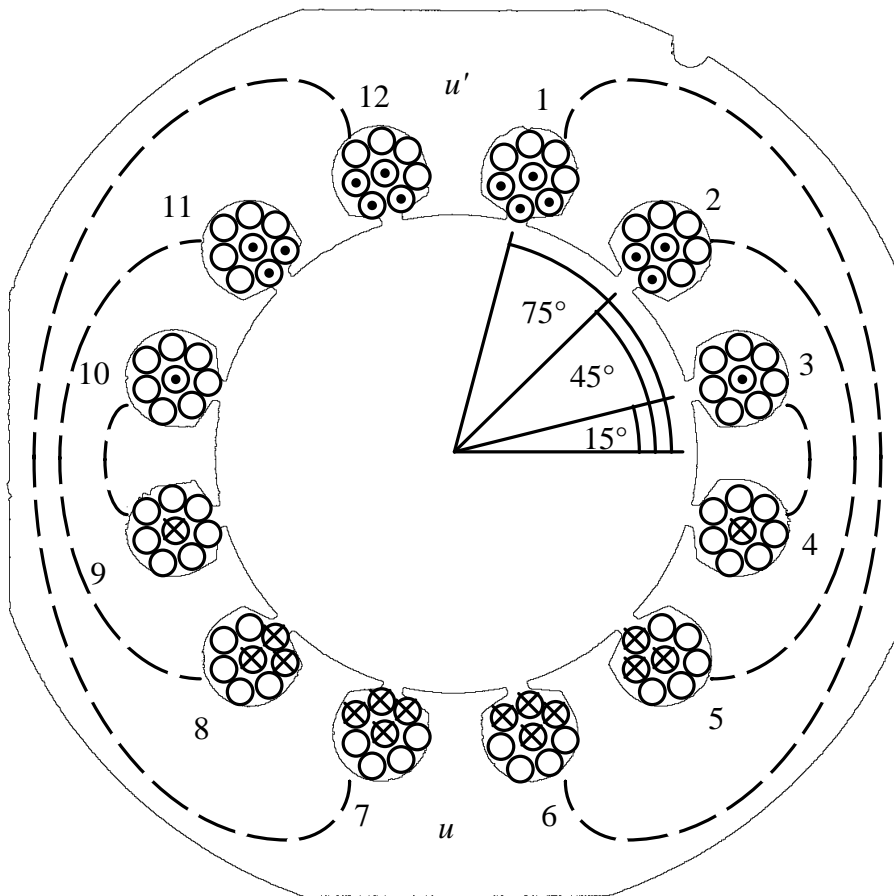


Figur 10.8. Statorplåtar med två lindningshärvor.



Mekaniskt utförande (IV)

- Sinusformigt utbredda lindningar



Antalet lindningsvarv i de olika spåren ska vara proportionellt mot sinus för vinkeln mellan spåret och den magnetiska axeln:

$$n = K \sin \alpha$$

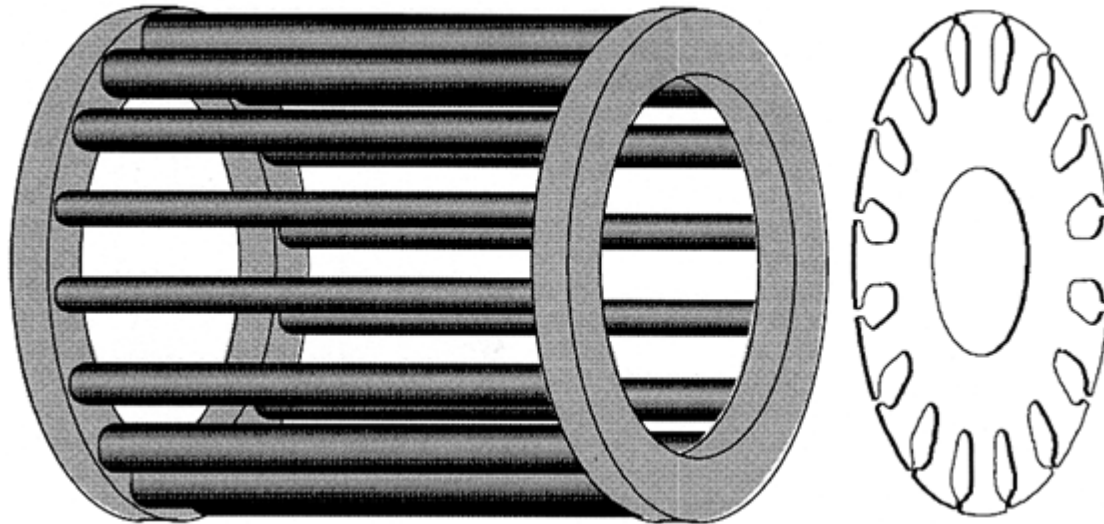
Ett negativt värde innebär att strömmen går i motsatt riktning.

Figur 10.9. Sinusformigt utbredd lindning.



Mekaniskt utförande (V)

- Burlindad rotor

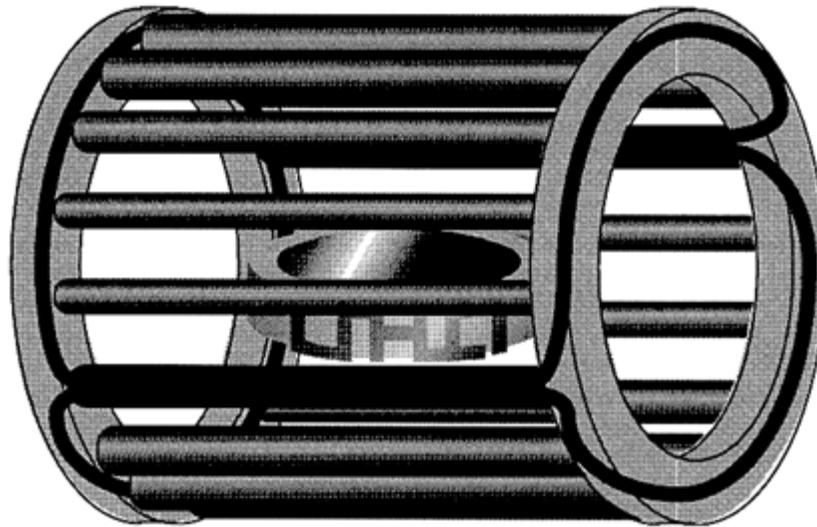


Figur 10.10. Rotorbur och rotorplåt.



Mekaniskt utförande (VI)

- Burlindad rotor



Figur 10.11. Två motstående rotorstavar tillsammans med ändringarna utgör en kortsluten slinga. Alla stavar tillsammans bildar flera kortslutna slingor.



Vektorekvationer (I)

- i_u , i_v och i_w momentanvärden av motorns tre linjeströmmar
- u_u , u_v och u_w momentanvärden av fasspänningarna
- R_s är statorlindningarnas resistanser, lika för varje fas
- Varje lindning ger upphov till ett sammanlänkat flöde

$$\psi_u = \int (u_u - R_s i_u) dt$$

$$\psi_v = \int (u_v - R_s i_v) dt$$

$$\psi_w = \int (u_w - R_s i_w) dt$$



Vektorekvationer (II)

Statorströmvektorn

$$\vec{i}_s = \sqrt{\frac{2}{3}} \left(i_u + i_v e^{j\frac{2\pi}{3}} + i_w e^{j\frac{4\pi}{3}} \right)$$

Statorspänningsvektorn

$$\vec{u}_s = \sqrt{\frac{2}{3}} \left(u_u + u_v e^{j\frac{2\pi}{3}} + u_w e^{j\frac{4\pi}{3}} \right)$$

Statorflödesvektorn

$$\vec{\psi}_s = \sqrt{\frac{2}{3}} \left(\psi_u + \psi_v e^{j\frac{2\pi}{3}} + \psi_w e^{j\frac{4\pi}{3}} \right)$$



Vektorekvationer (III)

Statorekvationen i statorkoordinater

$$\vec{\psi}_s = \int (\vec{u}_s - R_s \vec{i}_s) dt$$

eller

$$\frac{d\vec{\psi}_s}{dt} = \vec{u}_s - R_s \vec{i}_s$$

approximativt

$$\frac{d\vec{\psi}_s}{dt} \approx \vec{u}_s$$

- *Flödesvektorns spets rör sig i spänningsvektorns riktning*
- *Flödesändring ges av spänningstidsyta*



Vektorekvationer (IV)

Asynkronmotorns rotor är kortsluten dvs rotorspänningen $u_r = 0$

Rotorekvationen i rotorkoordinater:

$$\frac{d\vec{\psi}_r^r}{dt} = -R_r \vec{i}_r^r$$

Youtube: Learn Engineering

<https://www.youtube.com/watch?v=LtJoJBUSE28>



Sinusmatning (I)

Många asynkronmaskiner är anslutna till ett trefasnät utan mellanliggande frekvensomriktare. Dessa maskiner kan man betrakta som sinusmatade.

Även asynkronmaskiner anslutna till nätet via en mjukstartare kan betraktas som sinusmatade.

Sinusmatning medger att enklare beräkningsmodeller än vektorekvationerna kan användas.

Sinusmatade asynkronmaskiner i stationär drift (konstant rotorhastighet ω) kan matematiskt behandlas med $j\omega$ -metoden.

Vid användning av $j\omega$ -metoden betraktar man asynkronmaskinen i ett koordinatsystem som roterar med statorflödets vinkelhastighet ω_s (som kallas den synkrona vinkelhastigheten).



Sinusmatning (II)

Det matande nätets (elektriska) frekvens benämns f_1 . Denna frekvens motsvarar en vinkelhastighet $\omega_1 = 2\pi f_1$.

För en tvåpolig asynkronmaskin roterar även flödet med samma frekvens dvs $\omega_s = \omega_1$.

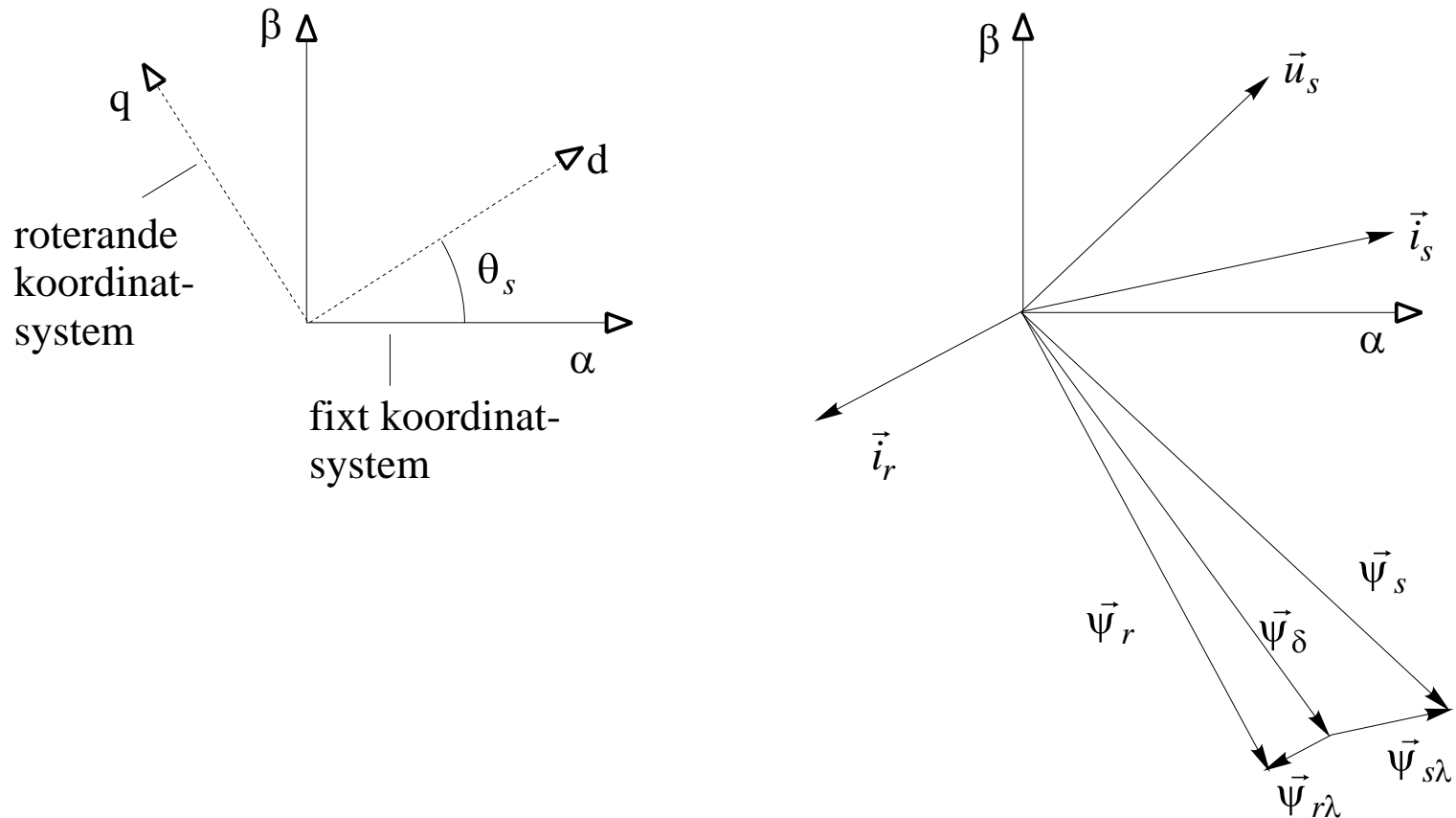
Precis som att rotorekvationen kunde uttryckas i statorns koordinatsystem kan man överföra asynkronmaskinens dynamiska ekvationer till ett koordinatsystem som roterar med den synkrona hastigheten ω_s .

Vinkeln mellan det fixa koordinatsystemet ($\alpha\beta$) och det roterande benämnes θ_s , vilket betyder att $d\theta_s/dt = \omega_s$.

Överföring av ekvationerna från vektorform till cvisarform tas upp i föreläsning F9. Här nöjer vi oss med att titta på den stationära modellen giltig för sinusmatade maskiner.



Sinusmatning (III)



Figur 10.14. Statorkoordinatsystem, heldraget, och koordinatsystem som roterar med statorspänningsvektorn, streckat.



Sinusmatning (VII)

Statorekvationen och rotorekvationen kan ses som Kirchoffs spänningslag i två slingor!

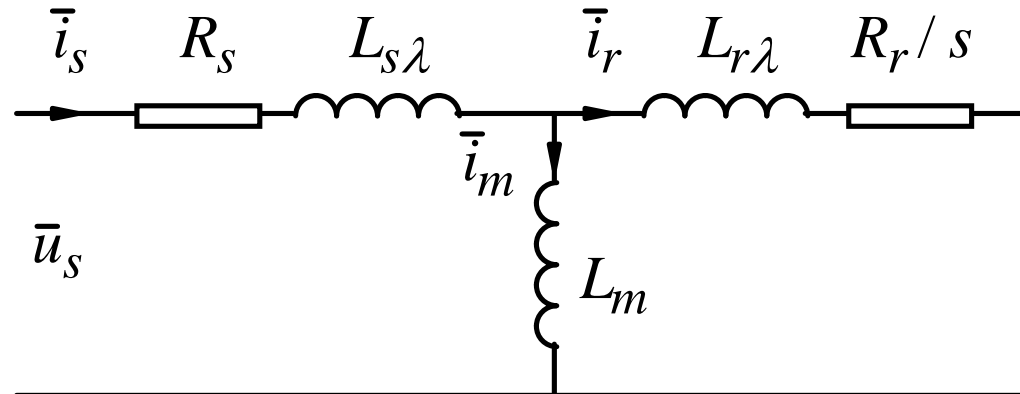
$$\bar{u}_s = R_s \bar{i}_s + j\omega_1(L_s \bar{i}_s - L_m \bar{i}_r) = R_s \bar{i}_s + j\omega_1 L_{s\lambda} \bar{i}_s + j\omega_1 L_m (\bar{i}_s - \bar{i}_r)$$

$$0 = -j\omega_1 L_m (\bar{i}_s - \bar{i}_r) + j\omega_1 L_{r\lambda} \bar{i}_r + \frac{R_r}{s} \bar{i}_r$$

Det går alltså att rita en ekvivalent krets som motsvarar dessa

Eftersläpningen definieras som

$$s = \frac{\omega_s - \omega}{\omega_s}$$



Figur 10.15. Ekvivalent schema för en fas



Sinusmatning (VIII)

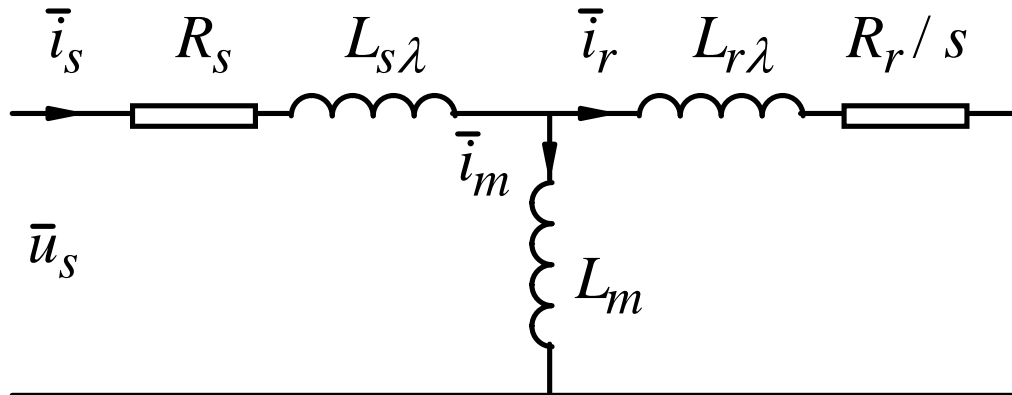
Motorns magnetiseringsström: $\bar{i}_m = \bar{i}_s - \bar{i}_r$

Observera likheten med transformatorns ekvivalenta schema!

Om magnetiseringsinduktansen flyttas ut mot till vänster erhålles det förenklade ekvivalenta schemat (Γ -modellen)!

Vilket ger rotorströmmen:

$$\bar{i}_r \approx \frac{\bar{u}_s}{(R_s + R_r/s) + j\omega_1(L_s\lambda + L_r\lambda)}$$



Figur 10.15. Ekvivalent schema för en fas



Sinusmatning (IX)

- Effekter (I)

För **EN** (ekvivalent Y-) fas ges den inmatade effekten av:

$$P_{in,fas} = \text{Re}(\bar{u}_s^* \bar{i}_s) = R_s i_s^2 + \frac{R_r}{s} i_r^2$$

Förlusterna i **EN** fas ges av:

$$P_{förl,fas} = R_s i_s^2 + R_r i_r^2$$

Vid stationär drift ändras inte den upplagrade magnetiska energin vilket ger:

$$\begin{aligned} P_2 &= P_{in} - P_{förl} = 3 \cdot P_{in,fas} - 3 \cdot P_{förl,fas} = \\ &= 3 \cdot \left(R_s i_s^2 + \frac{R_r}{s} i_r^2 \right) - 3 \cdot \left(R_s i_s^2 + R_r i_r^2 \right) = 3 \cdot R_r \frac{1-s}{s} i_r^2 \end{aligned}$$

Verklig axeleffekt:

$$P_{ut} = P_2 - P_{frikion}$$

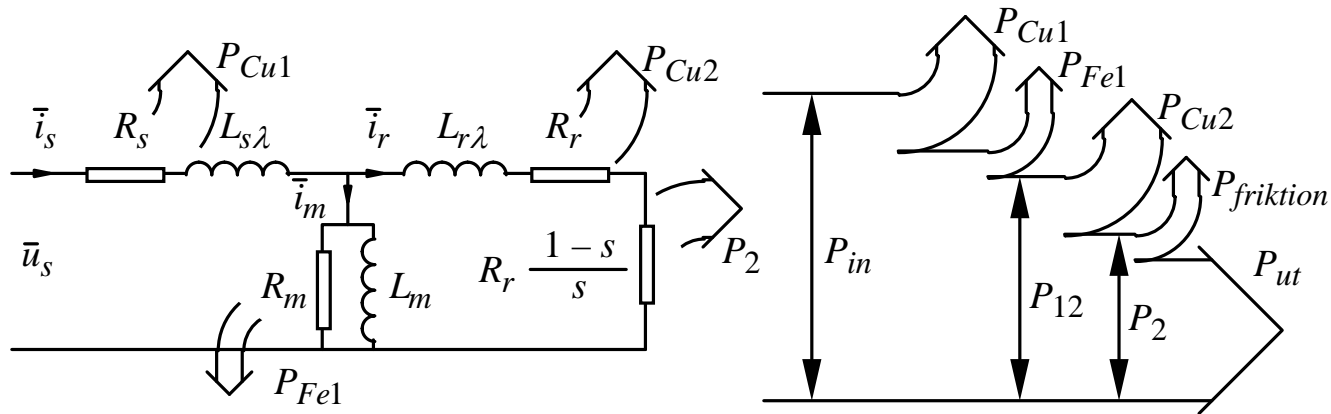


Sinusmatning (X)

- Effekter (II)

Rita om ekvivalenta schemat på grund av effektuttrycket:

$$P_2 = P_{in} - P_{förl} = 3 \cdot R_r \frac{1-s}{s} \bar{i}_r^2$$



Figur 10.16. Ekvivalent schema med olika effekter markerade (vänster). Förlustdiagram kallas ibland skorstensdiagram (höger).

Observera att järnförlusterna i rotor är mycket låga eftersom $f_{sl} = f_1 - f_2 = s \cdot f_1$ är väldigt låg!

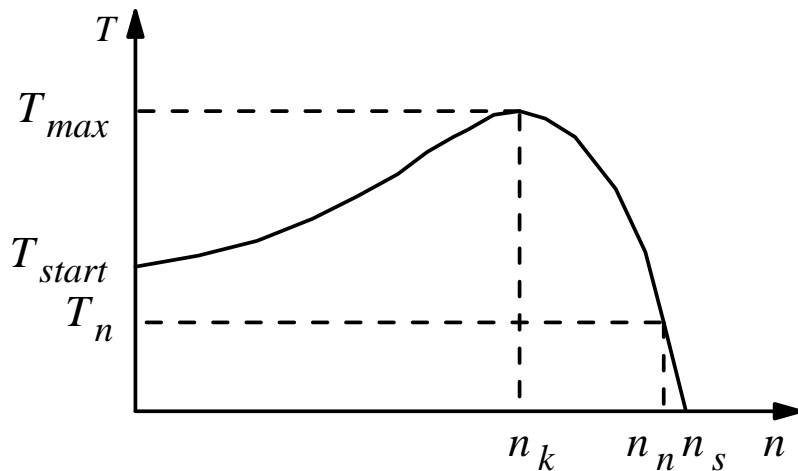


Sinusmatning (XI)

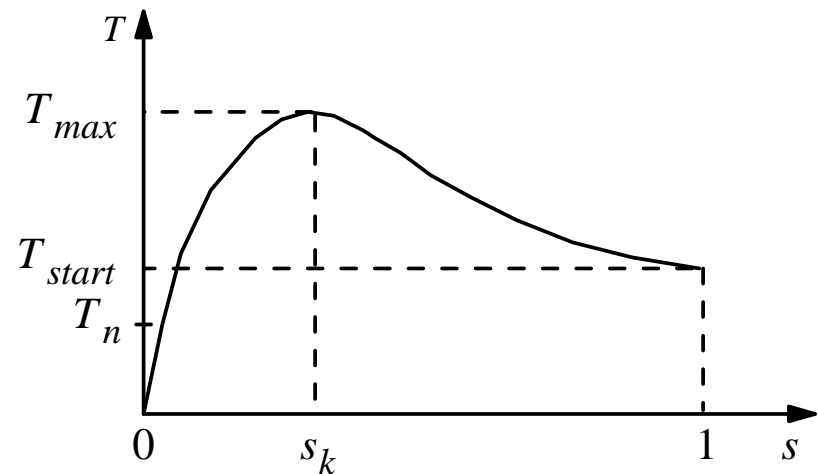
- Vridmoment

Asynkronmaskinens vridmoment ges av (P_{12} kallas luftgapseffekt):

$$T = \frac{P_2}{\omega} = \frac{3}{\omega} \frac{1-s}{s} R_r i_r^2 = \frac{3}{\omega_s} \frac{R_r}{s} i_r^2 = \frac{P_{12}}{\omega_s}$$



Figur 10.17. Asynkronmaskinens momentkaraktäristik.



Figur 10.18. Moment som funktion av eftersläpning.



Praktisk drift (I)

- Mångpoliga motorer

Den synkrona mekaniska vinkelhastigheten ω_s är kopplad till den elektriska vinkelhastigheten ω_1 eller frekvens f_1 enligt:

$$\omega_s = \omega_1 \frac{2}{p} = 2\pi \cdot f_1 \frac{2}{p} = \frac{4\pi \cdot f_1}{p}$$

Där p betecknar antalet poler. Sen tidigare vet vi att:

$$n = \frac{60}{2\pi} \omega; \quad n [\text{varv/min}] \quad \omega [\text{rad/s}]$$

Vilket betyder att det synkrona varvtalet ges av

$$n_s = \frac{60}{2\pi} \omega_s = \frac{60}{2\pi} \frac{4\pi f_1}{p} = \frac{120 f_1}{p}$$



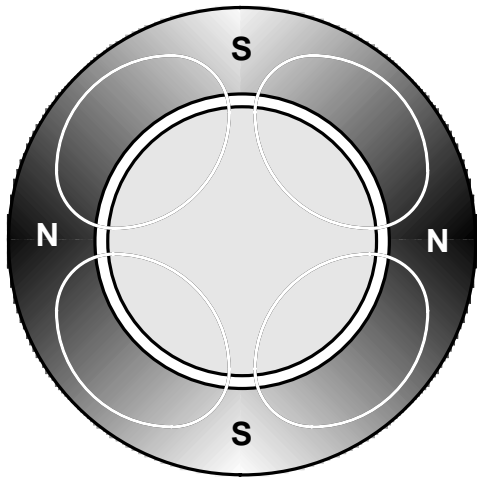
Praktisk drift (II)

- Mångpoliga motorer

$$\omega_s = \omega_1 \frac{2}{p} = 2\pi \cdot f_1 \frac{2}{p} = \frac{4\pi \cdot f_1}{p}$$

$$n_s = \frac{60}{2\pi} \omega_s = \frac{60}{2\pi} \frac{4\pi f_1}{p} = \frac{120 f_1}{p}$$

OBS! Beräkningar för mångpoliga maskiner är exakt samma som för tvåpoliga utom att $\omega_s \neq \omega_1$.



Figur 10.19. Flöde i 4-polig motor.

Tabell 10.1

p	n_s [varv/min]
2	3000
4	1500
6	1000
8	750



Praktisk drift (III)

Exempel:

En asynkronmotor är märkt 380V, 50 Hz, 1430 r/min.
Motorparametrarna har mätts upp till:

$$R_s = 0.70\Omega, R_r = 0.68\Omega, L_{s\lambda} = L_{r\lambda} = 3.9\text{mH}, L_m = 90\text{mH}$$

Beräkna statorström, rotorström, vridmoment, ineffekt, uteffekt och effektfaktor vid nominellt varvtal och stationär drift!



Praktisk drift (IV)

Lösning:

Den angivna spänningen är en *huvudspänning*, men när vi räknar på det stationära fallet räknar vi på *en fas* (en *ekvivalent Y-fas*), och använder *fasspänningar* i fortsättningen.

$$u_h = 380\text{V} \Rightarrow u_s = u_{fas} = 380 / \sqrt{3} = 220\text{V}$$

$$f_1 = 50\text{ Hz} \Rightarrow \omega_1 = 2\pi f_1 = 2\pi 50\text{ rad/s} = 100\pi\text{ rad/s}$$

Motorns nominella varvtal är $n = 1430\text{ r/min}$, något under det synkrona varvtalet, $n_s = 1500\text{ r/min}$. Motorn är alltså 4-polig enligt tabell 10.1.

$$p = 4 \Rightarrow \omega_s = \omega_1 \frac{2}{p} = 100\pi \frac{2}{4}\text{ rad/s} = 50\pi\text{ rad/s}$$

Vid nominellt varvtal är eftersläpningen:

$$s = \frac{n_s - n}{n_s} = \frac{1500 - 1430}{1500} = 0.047$$



Praktisk drift (V)

Strömmarna \bar{i}_s och \bar{i}_r kan nu beräknas med sambanden vid stationär drift, eller genom att titta i ekvivalenta schemat i figur 10.15. Välj \bar{u}_s som riktfas, och dividera med impedansen från statorgrenen i serie med rotor- och magnetiseringsgrenen parallellt:

$$\begin{aligned} \bar{i}_s &= \frac{\bar{u}_s}{R_s + j\omega_1 L_{s\lambda} + \frac{\left(\frac{R_r}{s} + j\omega_1 L_{r\lambda}\right) j\omega_1 L_m}{\frac{R_r}{s} + j\omega_1 L_{r\lambda} + j\omega_1 L_m}} = \\ &= \frac{220}{0.7 + j100\pi \cdot 0.0039 + \frac{\left(\frac{0.68}{0.047} + j100\pi \cdot 0.0039\right) \cdot j100\pi \cdot 0.090}{\frac{0.68}{0.047} + j100\pi \cdot 0.0039 + j100\pi \cdot 0.090}} \text{ A} = \\ &= \underline{\underline{13.2 - j8.9 \text{ A}}} = \underline{\underline{15.9 e^{-j34^\circ} \text{ A}}} \end{aligned}$$



Praktisk drift (VI)

Rotorströmmen kan räknas ut med strömdelning av statorströmmen,

$$\begin{aligned}\bar{i}_r &= \bar{i}_s \frac{j\omega_1 L_m}{\frac{R_r}{s} + j\omega_1 L_{r\lambda} + j\omega_1 L_m} = \\ &= (13.2 - j8.9) \frac{j100\pi \cdot 0.090}{\frac{0.68}{0.047} + j100\pi \cdot 0.0039 + j100\pi \cdot 0.090} \text{ A} = \underline{\underline{13.6 - j1.8 \text{ A}}}\end{aligned}$$

Alternativt kan strömmen beräknas genom att approximera ekvivalenta schemat med det förenklade ekvivalenta schemat, dvs Γ -modellen:

$$\begin{aligned}\bar{i}_r &\approx \frac{\bar{u}_s}{(R_s + R_r/s) + j\omega_1(L_{s\lambda} + L_{r\lambda})} = \\ &= \frac{220}{(0.7 + 0.68/0.047) + j100\pi(0.0039 + 0.0039)} \text{ A} = 14,0 - j2.2 \text{ A}\end{aligned}$$



Praktisk drift (VII)

Observera att det är den *synkrona* vinkelfrekvensen ω_s som ska användas när vridmomentet ska beräknas (ur P_{12}):

$$T = \frac{3 \frac{R_r}{s} i_r^2}{\omega_s} = \frac{3 \frac{0.68}{0.047} 13.7^2}{50\pi} \text{ Nm} = \underline{\underline{52.1 \text{ Nm}}} \quad i_r = |\bar{i}_r| = \sqrt{13.6^2 + 1.8^2} \text{ A} = 13.7 \text{ A}$$

Om det approximativa värdet på \bar{i}_r hade använts hade momentet blivit 56 Nm, ca 8% för högt. Effektfaktorn $\cos \varphi$ är ett mått på fasförskjutningen mellan \bar{u}_s och \bar{i}_s

$$\varphi = \arg(\bar{u}_s) - \arg(\bar{i}_s) = 34^\circ \Rightarrow \cos \varphi = \underline{\underline{0.83}}$$





Ineffekten P_{in} och uteffekten P_2 (före friktionsförluster) blir

$$P_{in} = 3u_s i_s \cos \varphi = \sqrt{3} u_h i_s \cos \varphi = \sqrt{3} \cdot 380 \cdot 15.9 \cdot 0.83 \text{ kW} = \underline{\underline{8.7 \text{ kW}}}$$

$$P_2 = \omega T = \omega_s (1-s) T = 50\pi (1-0.047) \cdot 52.1 \text{ kW} = \underline{\underline{7.8 \text{ kW}}}$$



Inkoppling - Märkskylt

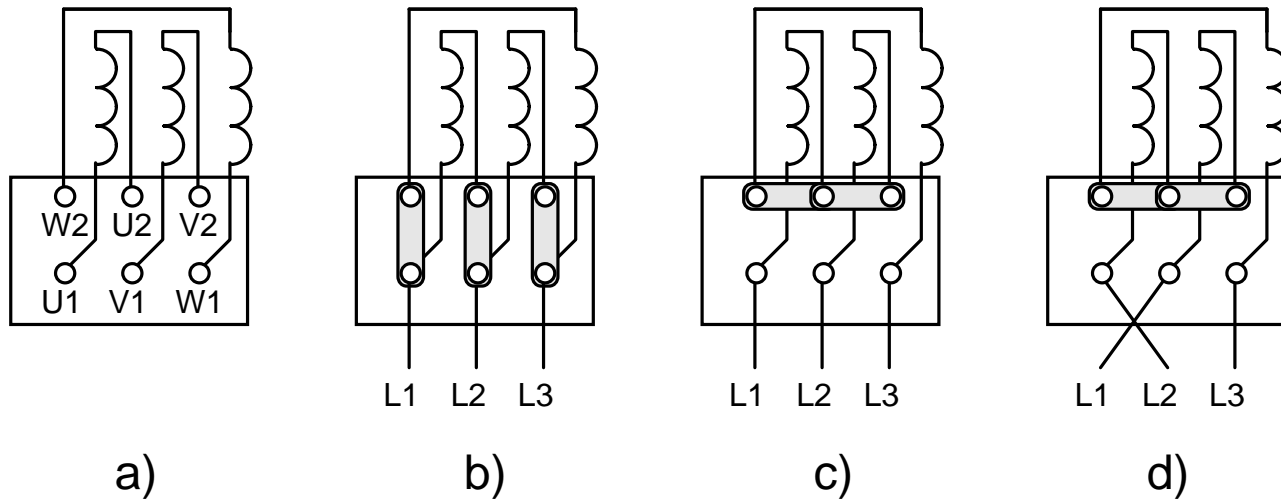
Motor	3~	50 Hz	IEC 34-1	
			No.	
2.2 kW		2820 r/min		
		cos φ 0,89		
	 380 V 4.7 A		 220 V 8.15 A	
19.0 kg		IP 54	Cl. F	

Figur 10.20. Märkskylt till tvåpolig 2.2 kW asynkronmotor.



Inkoppling

- Anslutningar, Y/ Δ -koppling



Figur 10.21. Uttagslåda b) D-kopplad stator c) Y-kopplad stator d) Rotationsriktning ändras genom att två faser kastas om.



Start- och skyddsutrustning (I)

- Startmetoder

- Direktstart
- Y/ Δ -start
- Mjukstart
- Släpringar
- Frekvensomriktare



Start- och skyddsutrustning (II)

- Bromsning

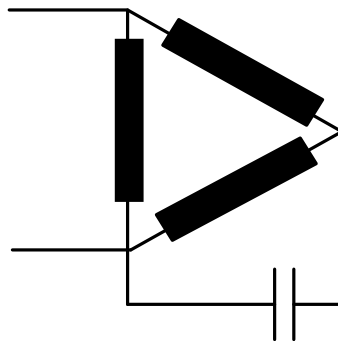
- Utrullning (*eng. Coasting*)
- Mekanisk bromsning
- Motströmsbromsning
- Likströmsbromsning
- Översynkron bromsning (generator drift)



Start- och skyddsutrustning (III)

- Enfasdrift

- Steinmetz-koppling (kondensator mellan två anslutningar)



Figur 10.22. Steinmetz-koppling medför att en trefasmotor kan anslutas enfasigt.



Start- och skyddsutrustning (IV)

- Skyddsapparater (I)

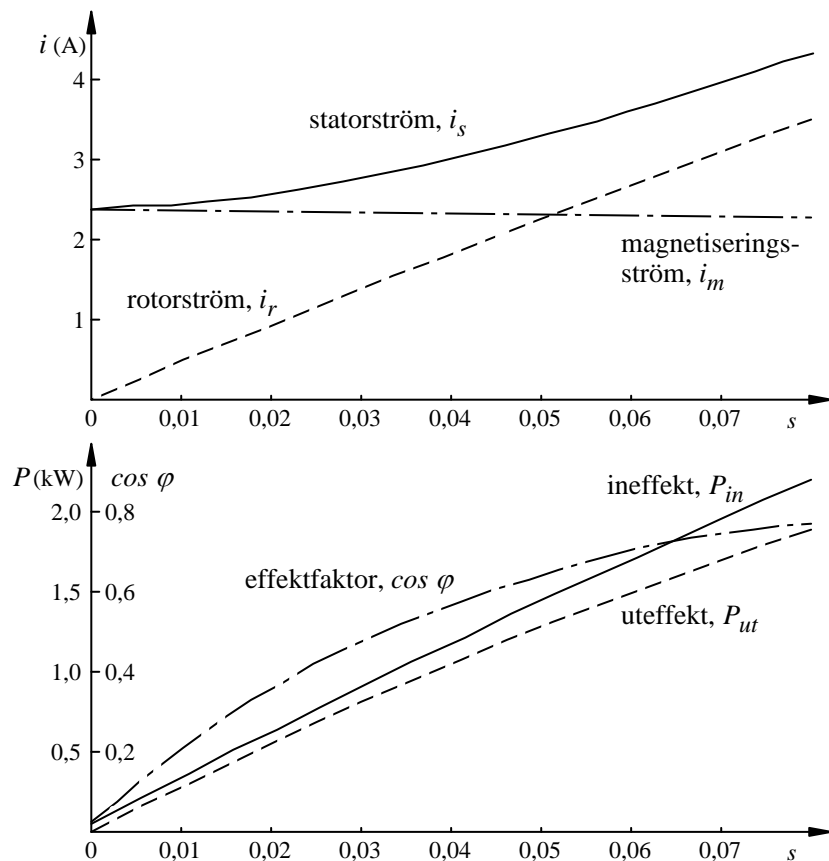
- Jfr. Skydd i Elenergiteknik ETEF05 (överströmsskydd etc)
- Överlastskydd
- Axeleffektvakt (effektmätande skydd)
- Fasavbrottsskydd
- Temperaturvakt (mäter temperaturen i statorlindningen)
Typiskt PTC-termistor eller PT100 givare!
- Observera att denna typ av skydd ofta är inbyggda i ”mera intelligenta” produkter som frekvensomriktare och mjukstartare.



Start- och skyddsutrustning (V)

- Skyddsapparater (II)

- Många skydd är strömmätande



Figur 10.23. Det övre diagrammet visar effektivvärden av statorström (heldragen), rotorström (streckad) och magnetiseringsström (punktstreckad) som funktion av eftersläpning då motorn belastas från noll upp till märklast. Det undre visar ineffekt (heldragen), uteffekt (streckad) och effektfaktor (punktstreckad). Man ser bl a att statorströmmen är i det närmaste konstant vid låg belastning.



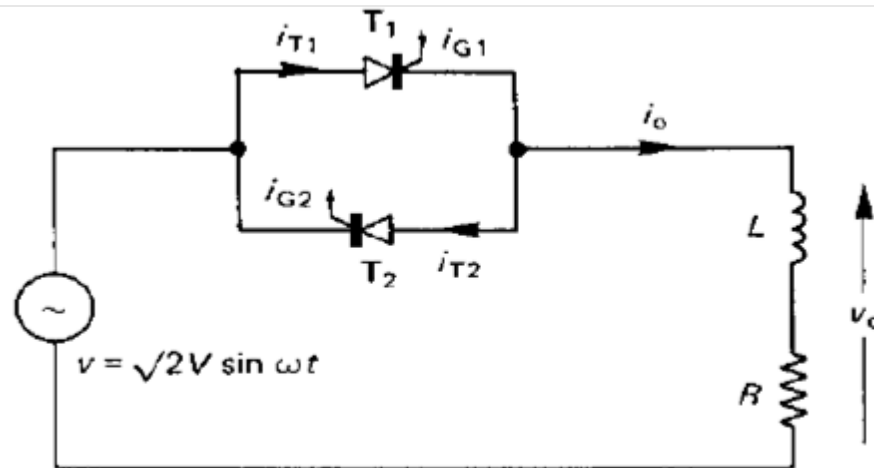
Mjukstartare

Mjukstartare består av antiparallellkopplade tyristorer som styrs på ett sådant sätt att utspänningens RMS-värde begränsas (med hjälp av styrvinkeln α).

Tyristorer kan tändas med en extern styrsignal men släcks genom att anodströmmen sjunker under hållnivån. Därför kategoriseras mjukstartaren som nätkommuterad omvandlare.

Figuren nedan visar ett enfasigt principalschema (jämför med en vanlig dimmerkoppling).

BWW Figure 13.1 (a)



Mjukstartare

- Samma princip som en enfasig dimmer med RL -last

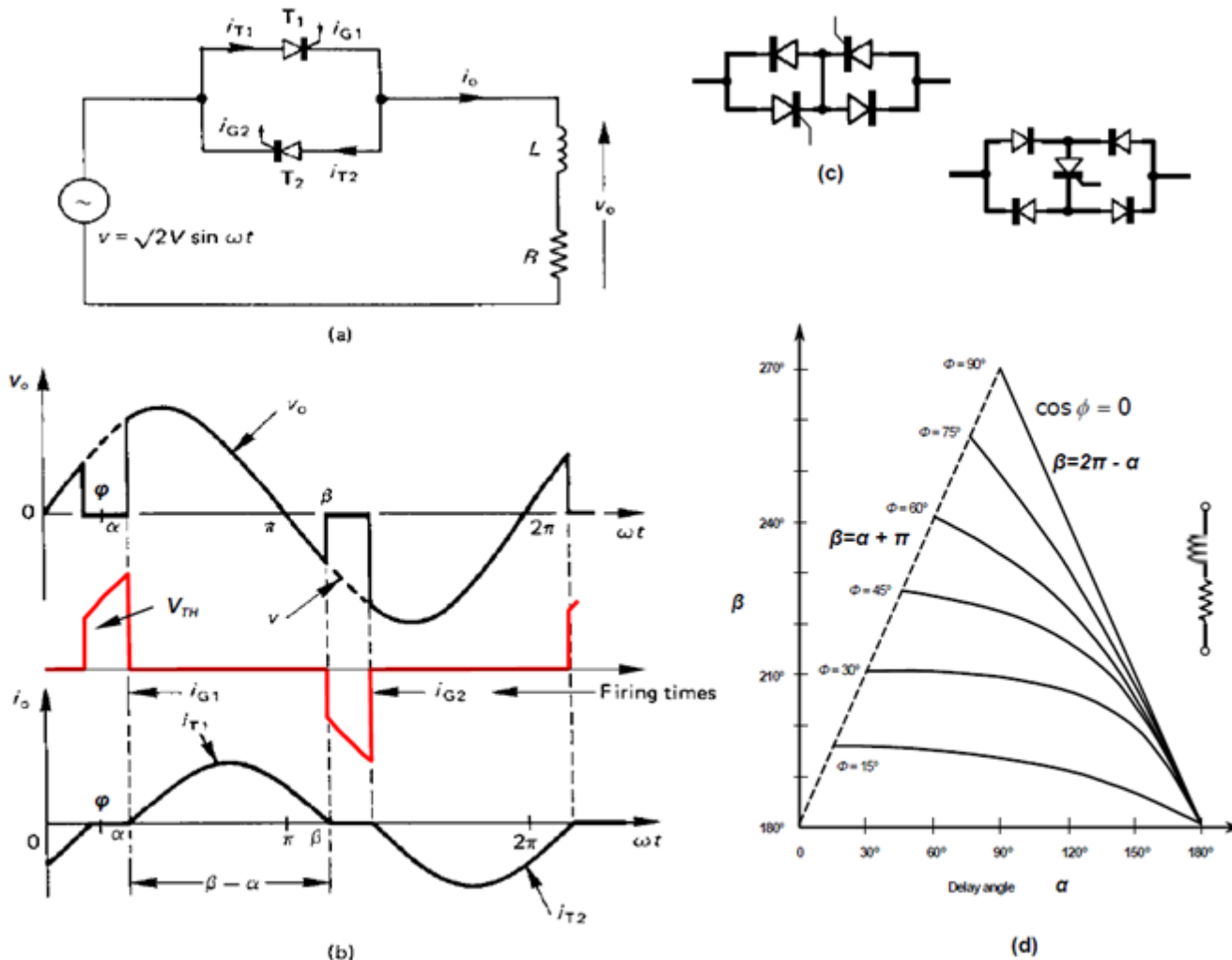


Figure 13.1. Single-phase full-wave symmetrical thyristor ac regulator with an R - L load: (a) circuit connection; (b) load current and voltage waveforms for $\alpha > \phi$; (c) asymmetrical voltage blocking thyristor alternatives; and (d) current extinction angle β versus triggering delay angle α .



Mjukstartare - Trefasig

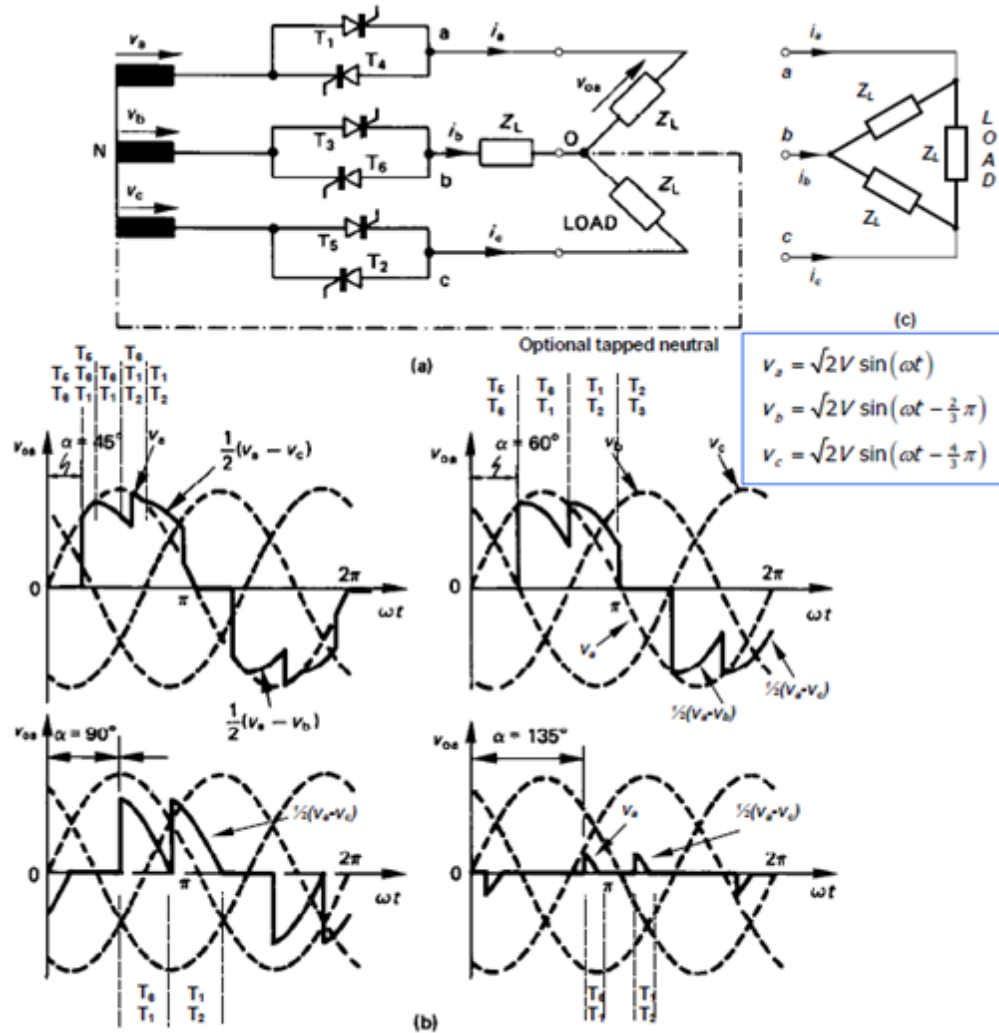
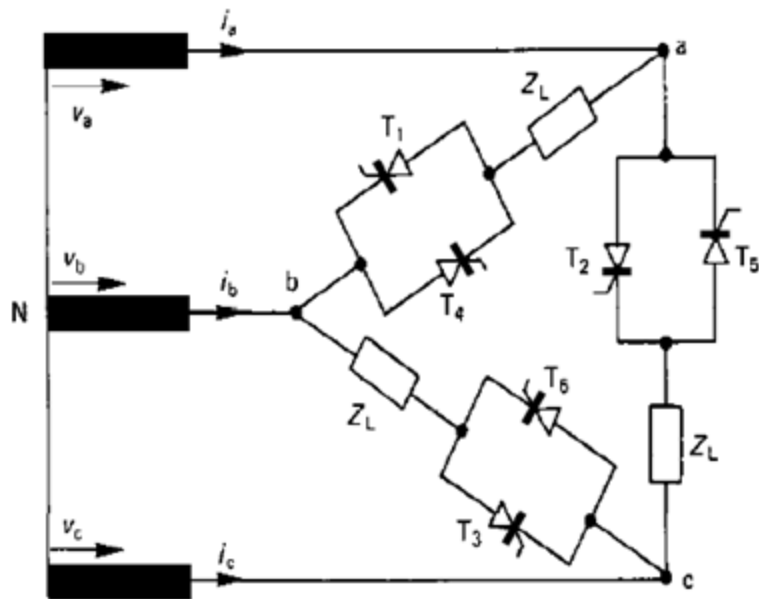


Figure 13.18. Three-phase ac full-wave voltage controller: (a) circuit connection with a star load; (b) phase a, line-to-load neutral voltage waveforms for four firing delay angles; and (c) delta load.

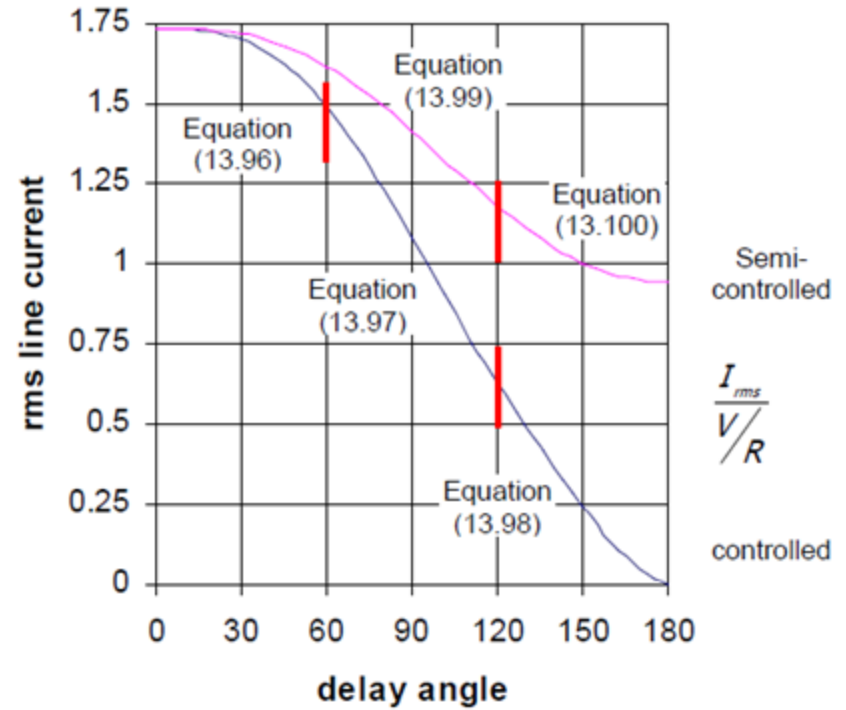


Mjukstartare

- Inside Delta



(a)



(b)

Figure 13.23. An in-delta connected three-phase ac regulator: (a) circuit configuration; (b) normalised line rms current for controlled and semi-controlled resistive loads; and (c) waveforms for an in-circuit resistive load with a 120° delay angle.



Kommersiella mjukstartare

- Asynkronmaskinens momentkaraktäristik

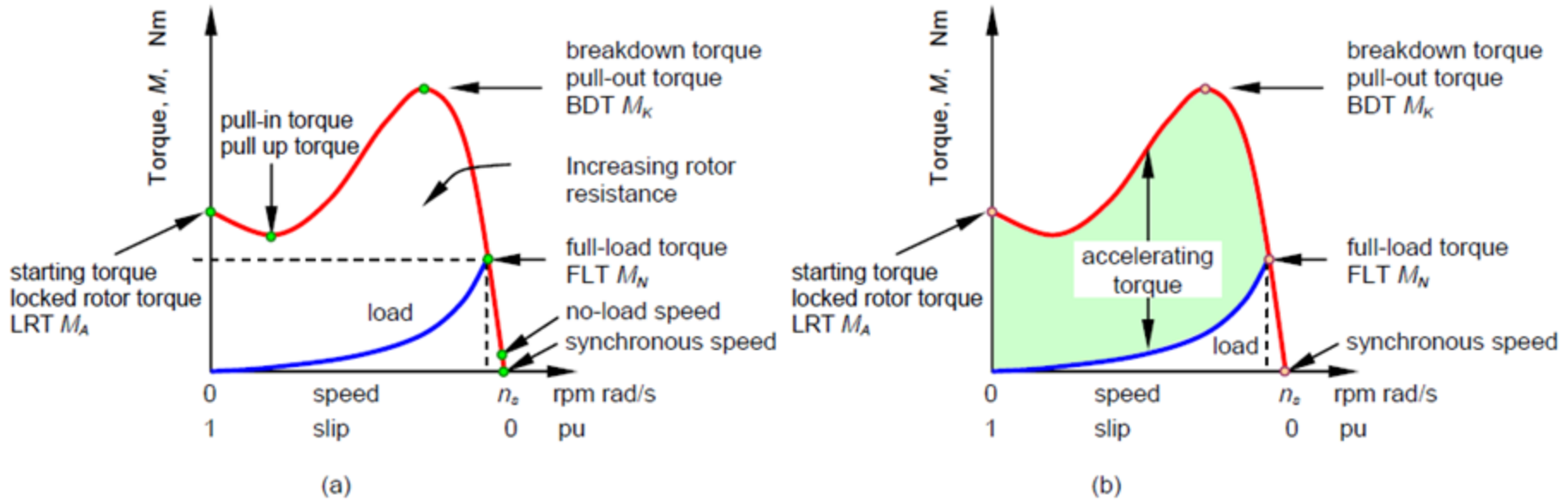


Figure 13.28. Torque-speed curve for the induction motor showing:
(a) the coupled load torque requirement and (b) the available accelerating torque.



Kommersiella mjukstartare

- Andra karaktärstiktor för asynkronmaskinen

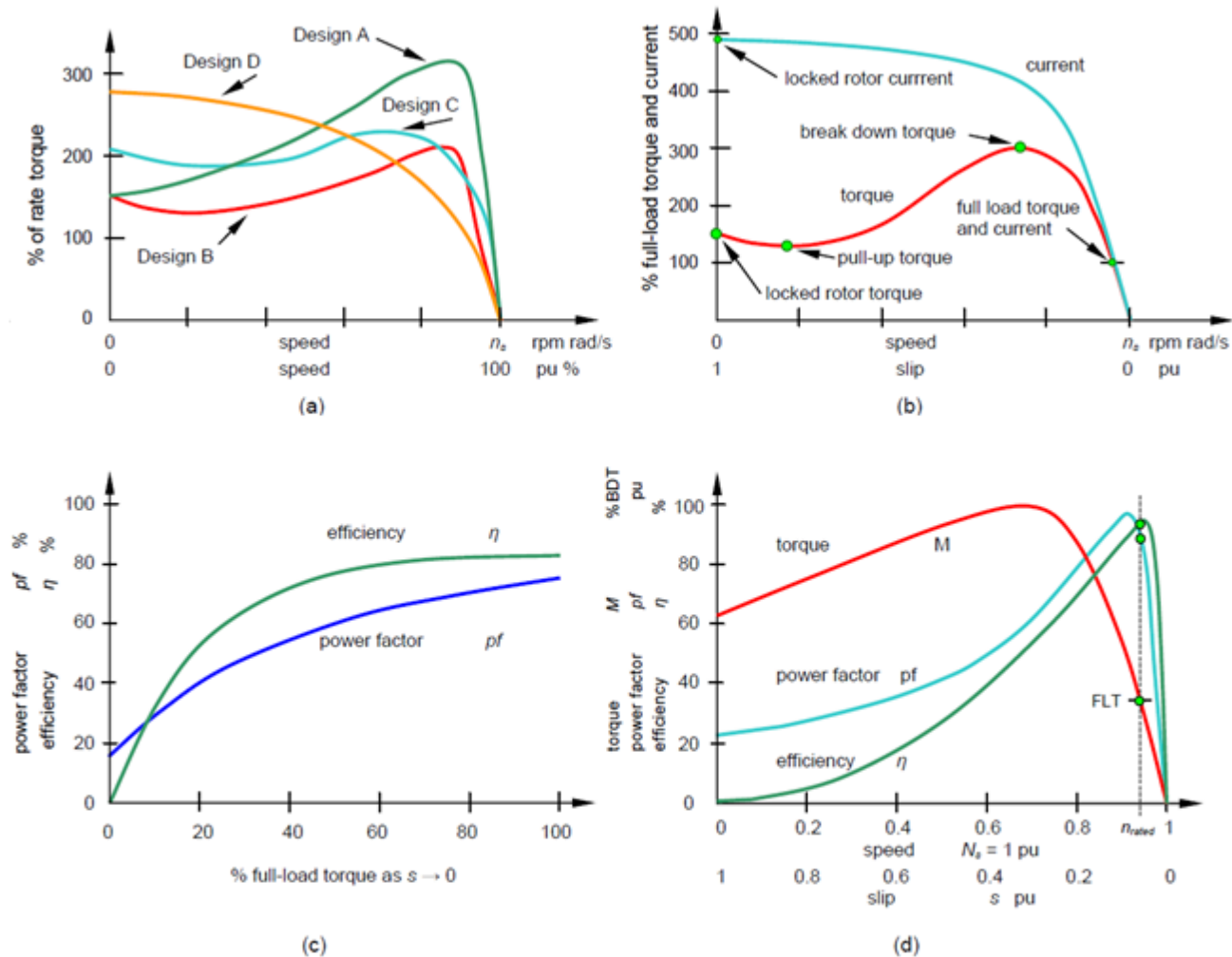


Figure 13.29. Induction motor characteristics: (a) torque-speed curves for various NEMA classes of three-phase ac caged induction motors; (b) speed versus torque and current characteristics; (c) power factor and efficiency versus full-load torque; and (d) torque and efficiency versus rotor speed/slip.



Kommersiella mjukstartare

- Typiska karakteristika för Y/ Δ -start

- Startströmmen ca 30% av startströmmen vid direktstart (Δ)
- Startmomentet ca 25-30% av startmomentet vid direktstart (Δ)

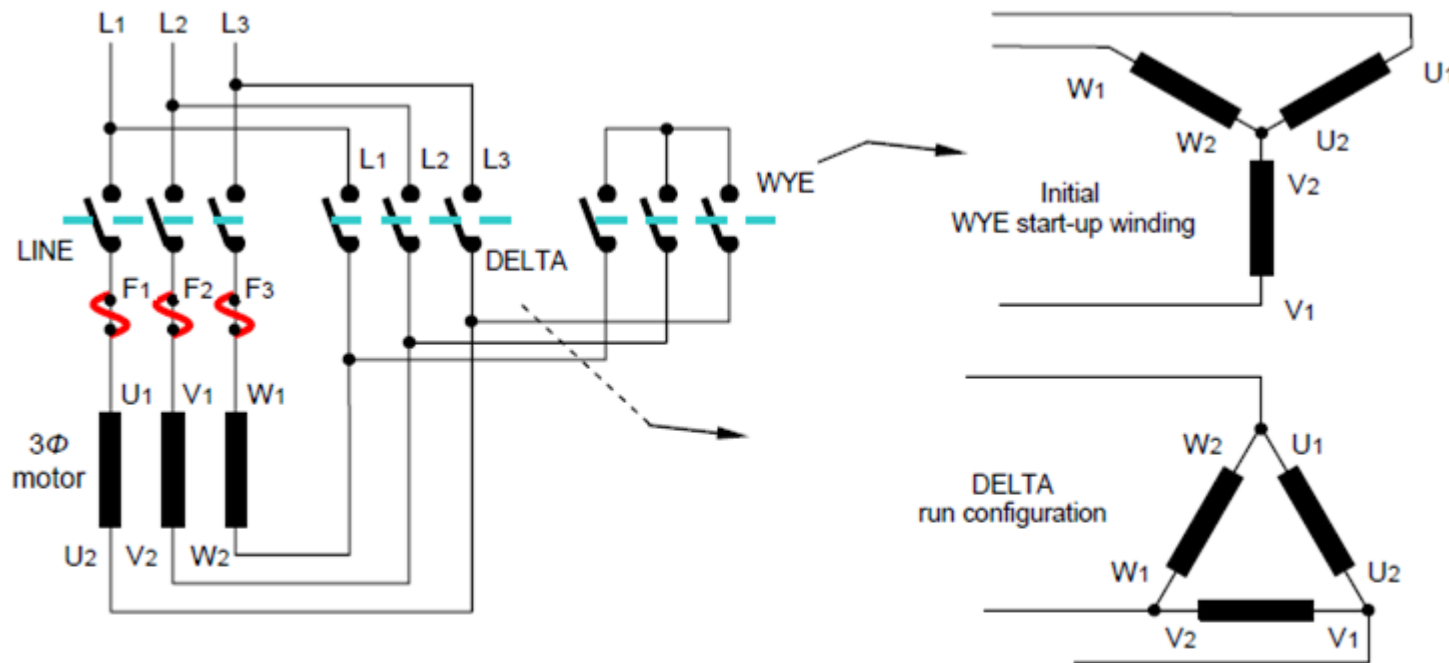


Figure 13.31. Basic wye-start, delta-run connection configuration for induction motor starting.



Kommersiella mjukstartare

- Konfigurationer

- Behöver bara känna till (c)

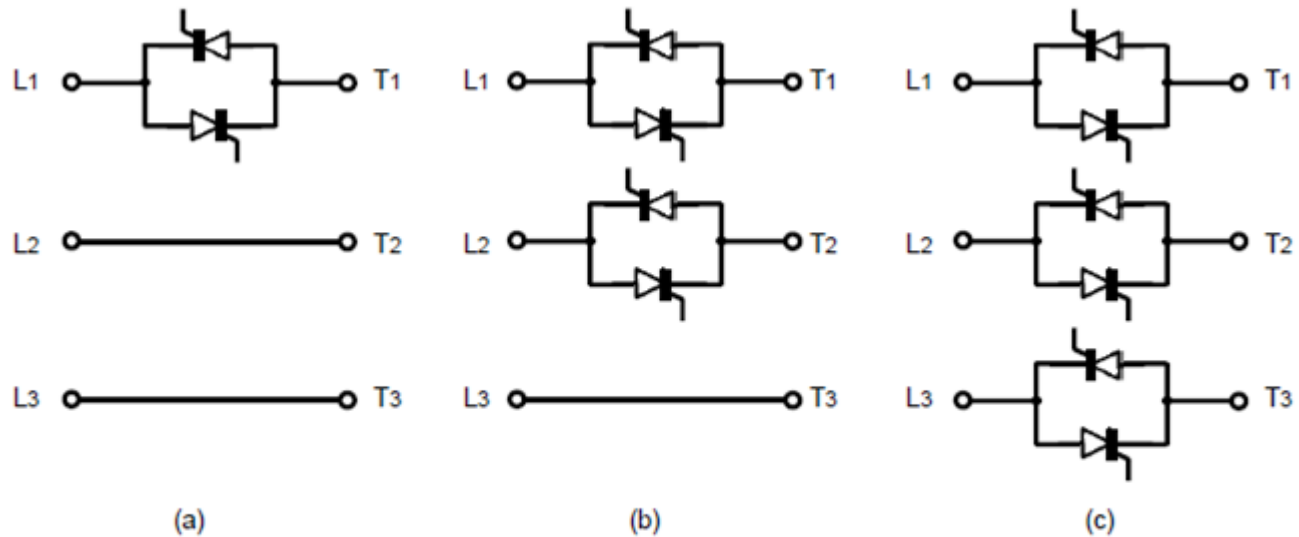


Figure 13.34. Three possible line configurations:
(a) single phase control; (b) control of two phases; and (c) three-phase fully-controlled regulator.



Kommersiella mjukstartare

- Bypass-kontaktor

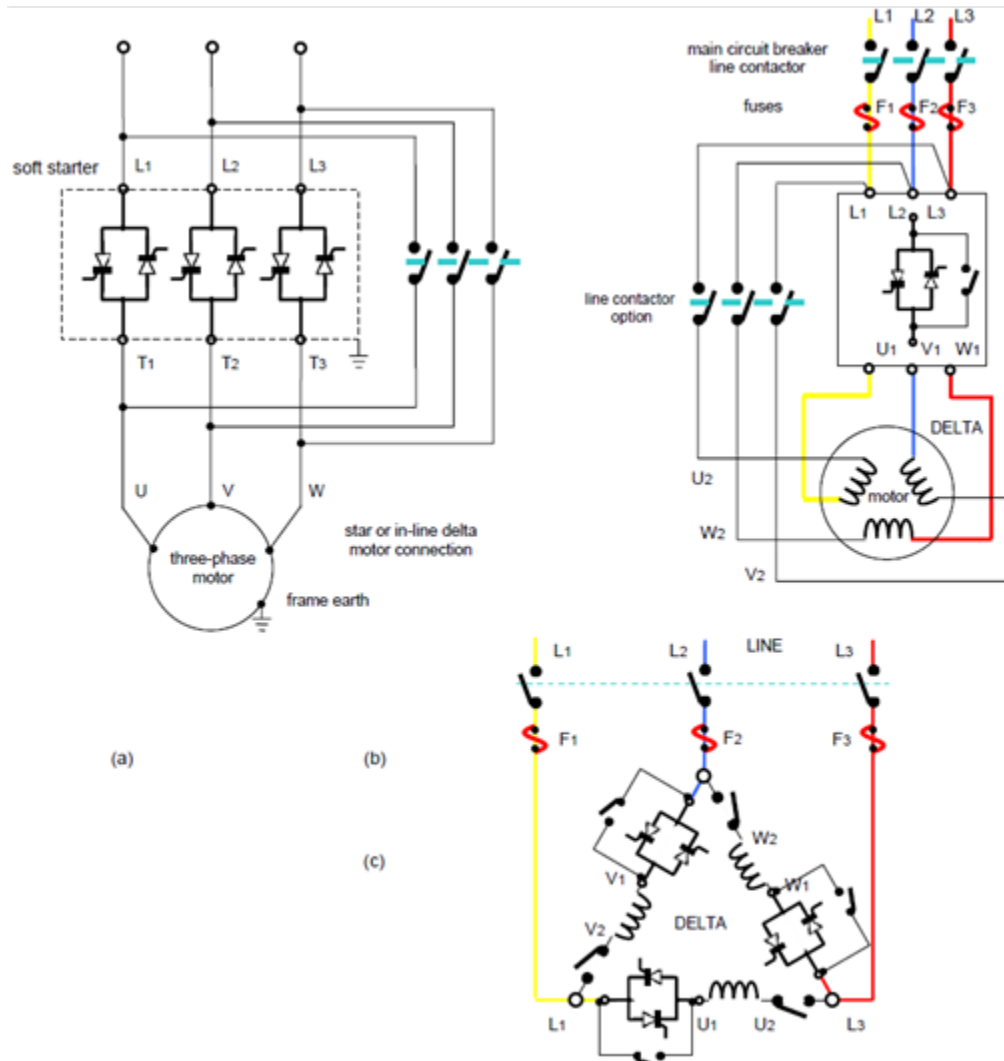


Figure 13.35. Three-phase voltage control of caged three-phase ac induction motor: (a) line delta or star controlled and (b) and (c) control within an in-delta configuration, both with a bypass relay.



Kommersiella mjukstartare

- Jämförelse mellan DoL-, Y/ Δ - och mjukstart

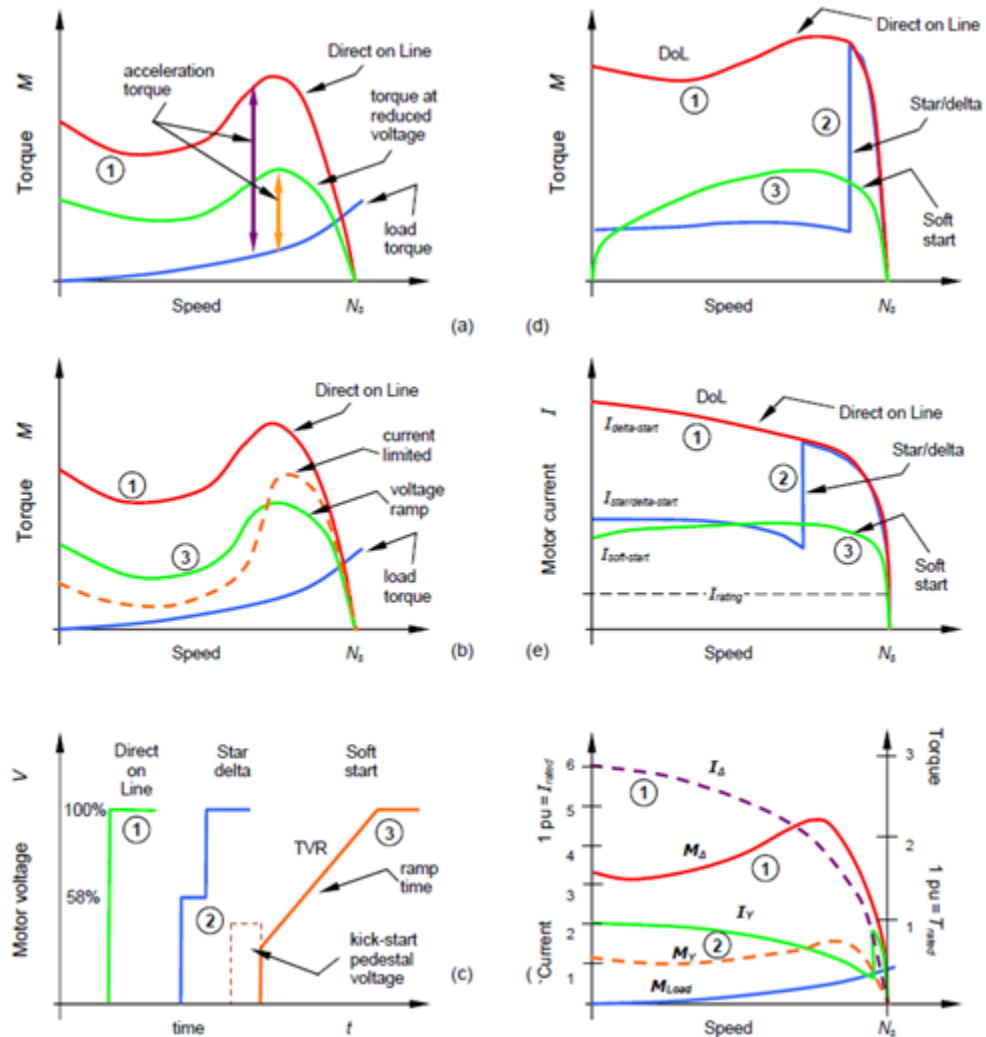


Figure 13.36. Characteristics showing why solid-state soft starters significantly reduce voltage dip and mechanical shock.



Kommersiella mjukstartare

- Praktisk realisering

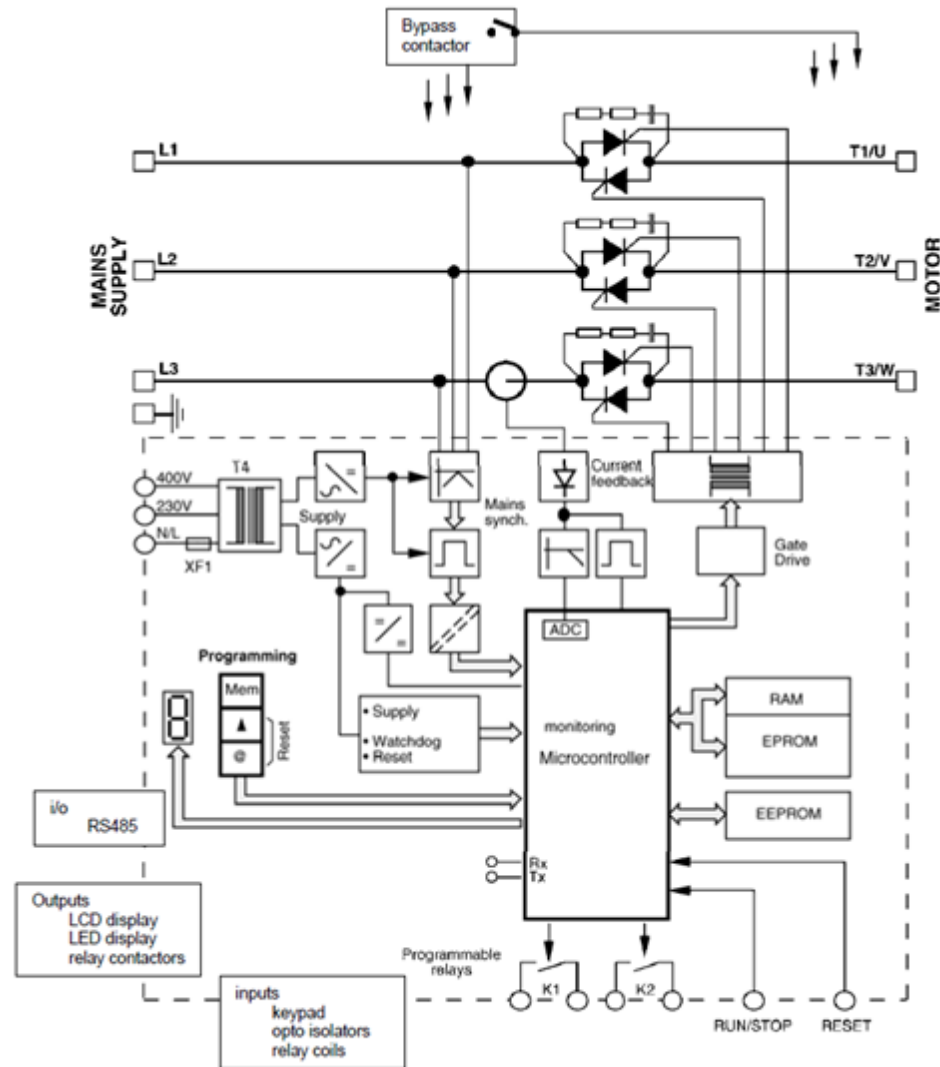


Figure 13.37. Functional block diagram of three-phase controlled SCR based soft starter, with voltage and current feedback control, with optional bypass contactor.

