

# Fö 9 - TSFS11 Energitekniska System

## Asynkronmaskinen

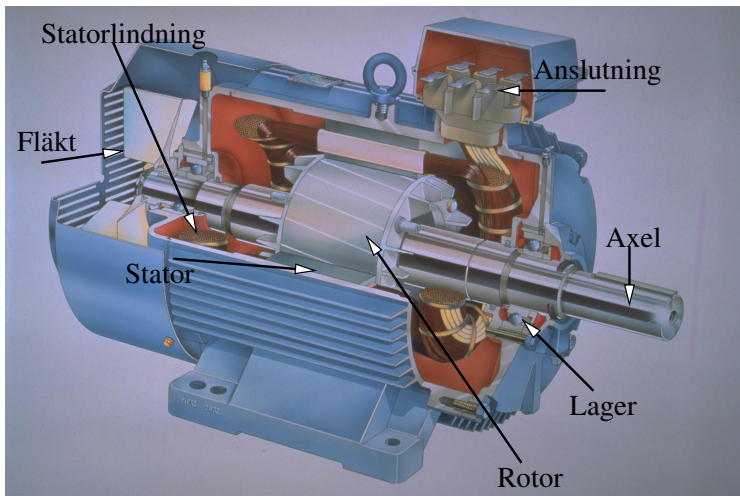
Christofer Sundström

1 maj 2018

- 1 Introduktion Asynkronmaskin
- 2 Uppbyggnad och Arbetssätt
  - Synkrona och Asynkrona Varvtalet
- 3 Förluster och Verkningsgrad
- 4 Asynkronmaskinens Momentkurva
  - Härledning
  - Momentkurva vid ändring av spänning
  - Momentkurva för små eftersläpningar
  - Momentkurva vid inkoppling av yttre pådragsresistans
  - Momentkurva vid ändring av frekvens
- 5 Tekniker för start av Asynkronmotorn
  - Beräkning av starttid
- 6 Varvtalsstyrning
- 7 Asynkronmaskinen som generator
- 8 Beräkningsexempel

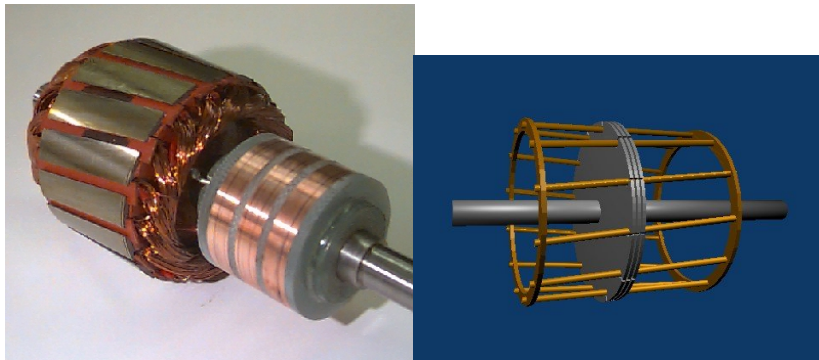
# Introduktion Asynkronmaskin

- Asynkronmaskinen eller asynkronmotorn kallas även
  - Växelströmsmotorn
  - Induktionsmotorn
- Fördelar
  - Enkel och robust konstruktion
  - Goda driftsegenskaper
  - Stor överbelastningsförmåga
  - Lätt att sköta
- Fungerar både som motor och generator, kräver då reaktiv effekt för att kunna generera aktiv effekt.
- Ett roterande magnetfält skapas i statorn som sedan drar med sig rotorn.



Figur: Urskuren induktionsmotor (Electric Motors)

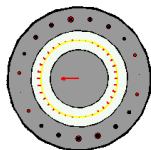
# Rotorkonstruktioner



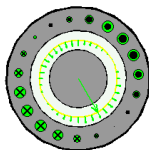
**Figur:** Exempel på släpringad lindad rotor (Polytechnic University of Japan), t.v. och burlindad rotor, t.h. (Wikimedia Commons)

- 1 Statorn till en trefas asynkronmaskin ansluts till ett symmetriskt trefasnät
- 2 De tre växelspänningarna skapar då ett roterande magnetflöde i statorn.
- 3 Rotorn som från början står still i det roterande magnetflödet får en inducerad spänning i sig, precis som sekundärsidan på en transformator.
- 4 Den inducerade spänningen skapar en ström och därmed ett magnetfält i den kortslutna rotorn
- 5 Magnetfältet från rotorn och statorn skapar tillsammans ett vridmoment på motorns axel.

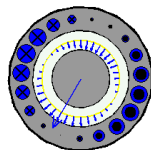
# Roterande flöde



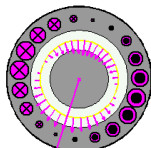
Phase A



Phase B

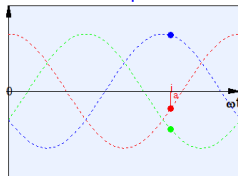


Phase C

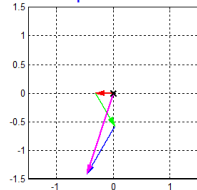


Resultant

Balanced three-phase currents



Blue vectors



Ögonblicksbild av

<http://www.ece.umn.edu/users/riaz/animations/abcvec.gif>

# Flödets rotationshastighet, det synkrona varvtalet

- En asynkronmaskin byggs med ett visst antal poler, t.ex. 2, 4, 6 o.s.v.
- Om statorlindningen är **tvåpolig** motsvarar den i varje ögonblick **två magnetpoler**, en nord och en syd, en fyrpolig två nord och två syd o.s.v.
- För en elektrisk period  $T = \frac{1}{f}$  hinner nord- och sydpol byta plats två ggr.
- I en p-polig maskin hinner magnetflödet  $\frac{2}{p}$  varv per elektrisk period.
- Det synkrona varvtalet är hastigheten med vilket magnetflödet roterar

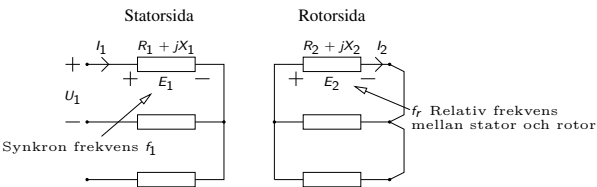
Det synkrona varvtalet

$$n_s = \frac{2 \cdot 60 \cdot f}{p} \text{ rpm}$$



# Rotorns rotationshastighet, det asynkrona varvtalet

## Förenklat 3-fas kretsschema



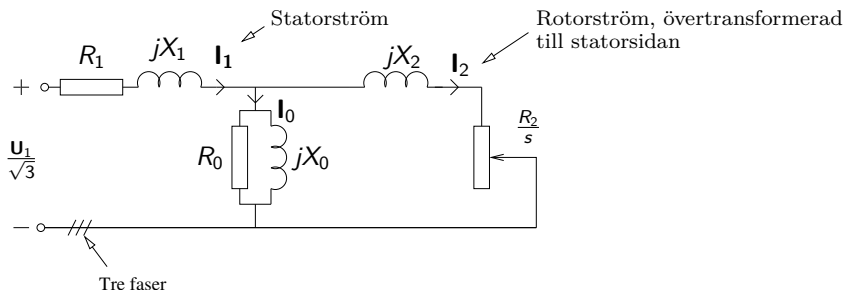
## Nomenklatur

- Synkront varvtal  
 $n_s = n_1 =$  magnetfältets varvtal
- Asynkront varvtal  
 $n_2 =$  rotorns varvtal
- Eftersläpning (relativ-skillnad)  
$$s = \frac{n_1 - n_2}{n_1}$$

- Lindningarna hos statorn och rotorn samverkar som en transformator och spänningen  $E_1$  från statorlindningen inducerar en spänning  $E_2 = s \cdot E_{2,\max}$  med frekvensen  $f_r = s \cdot f_1$
- Vid olastad motor är eftersläpningen mycket liten så  $E_2 \rightarrow 0$  och  $f_r \rightarrow 0$
- I startögonblicket är  $s = 1$  så både frekvens och spänning i rotorn har sina maxvärden.

# Krettschema, förklarande illustration

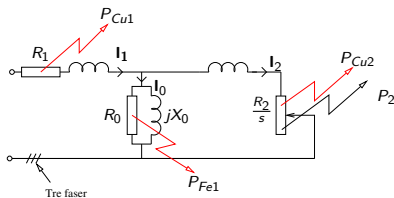
Per fas, ekvivalent krettschema sett från statorn. Jämför med krettschema för transformatorn. Krettschemat används för att illustrera hur man kan räkna ut moment, förluster och driftsegenskaper.



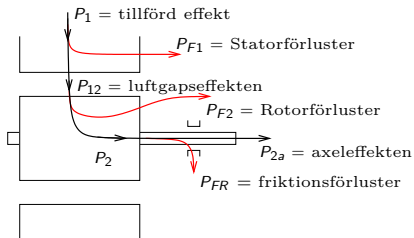
- De elektriska förlusterna består av  $R \cdot I^2$  förluster i lindningsresistanserna

# Förluster och Verkningsgrad

Effektörluster sett från kretsschemat



Effektbetraktelse



Tillförd effekt:

$$P_1 = \sqrt{3} U_H I_L \cos \varphi$$

Statorörluster:

$$P_{F1} = P_{Fe1} + P_{Cu1}$$

→ Järnförl.:

$$P_{Fe1}$$

→ Resistansförl.:

$$P_{Cu1} = 3 \cdot R_{1,Y} \cdot I_1^2$$

Luftgapseffekt:

$$P_{12} = P_1 - P_{F1}$$

$$P_{12} = M \cdot \omega_1$$

Rotorörluster:

$$P_{F2} = P_{Cu2} + \underbrace{P_{Fe2}}_{\text{försumbara}}$$

$$= s \cdot P_{12} =$$

$$= s \cdot \frac{P_2}{1-s}$$

$$= s \cdot \frac{P_2}{1-s}$$

Effekten:

$$P_2 = M \cdot \omega_2$$

$$P_2 = P_{12} - P_{F2} =$$

$$= (1-s) \cdot P_{12}$$

**Samband mellan  $P_{12}$ ,  $P_{Cu2}$  och  $P_2$**

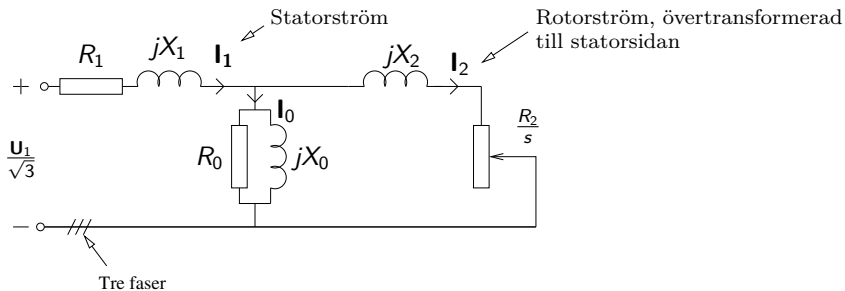
$P_{12}$  delas upp i två delar enligt

Effektivt arbete:  $P_2 = (1-s) \cdot P_{12}$

Förluster:  $P_{Cu2} = s \cdot P_{12}$

# Asynkronmaskinens Momentkurva, "härledning" (överkurs)

- Betrakta kretschemat

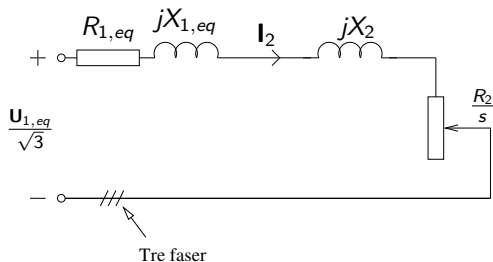


- Momentet kan beräknas genom (jmf DC-maskinen):

$$M = k_2 I_2 \Phi \cos \varphi$$

# Asynkronmaskinens momentkurva, "härledning" (överkurs)

- Kretsschemat kan ritas om med hjälp av thevenins theorem enligt



Här är  $\mathbf{U}_{1,eq} = k_{eq} \cdot \mathbf{U}_1$  medan

$$\mathbf{Z}_{1,eq} = R_{1,eq} + j \cdot X_{1,eq} = \frac{j \cdot X_0 \cdot (R_1 + j \cdot X_1)}{R_1 + j \cdot (X_1 + X_0)}$$

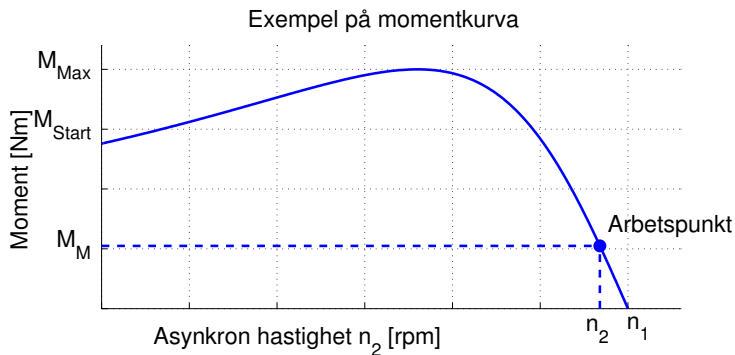
- Ur kretsschemat kan sedan strömmens storlek  $I_2$  räknas ut och vi får

$$M = \frac{3}{k_{eq}^2 \cdot \omega_1} \cdot \left( \frac{U_1}{\sqrt{3}} \right)^2 \cdot s \cdot \frac{R_2}{\underbrace{(R_{1,eq} \cdot s + R_2)^2}_{\approx R_2^2} + s^2 \underbrace{(X_{1,eq} + X_2)^2}_{\text{kallas ofta } X_2}}$$

# Asynkronmaskinens momentkurva

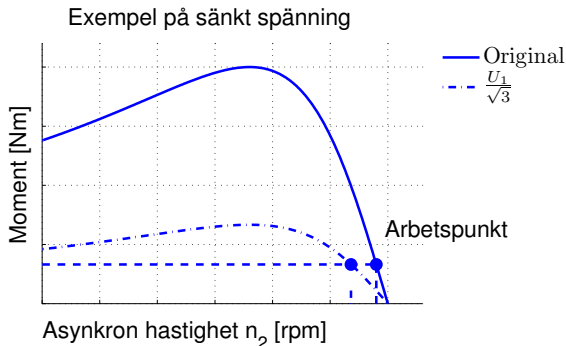
- Efter förenkling och ihopslagning av konstanterna i momentuttrycket fås

$$T = k \cdot U_1^2 \cdot s \cdot \frac{R_2}{R_2^2 + (s \cdot X_2)^2}$$



# Momentkurva vid ändring av spänning

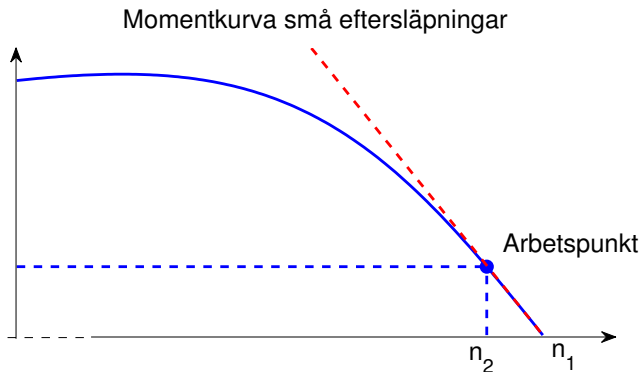
- Momentekvationen:  $T = k \cdot U_1^2 \cdot s \cdot \frac{R_2}{R_2^2 + (s \cdot X_2)^2}$
- Ur momentekvationen så framgår att vid ändring från spänning  $U_1$  till  $U_1'$  så skalas momentkurvan med faktorn  $\left(\frac{U_1'}{U_1}\right)^2$
- Om spänningen sänks med en faktor  $\frac{1}{\sqrt{3}}$  så skalas kurvan till en tredjedels höjd enligt nedan. Om lasten antas ha ett konstant moment så flyttas då arbetspunkten enligt figuren



# Asynkronmaskinens momentkurva för små eftersläpningar

- Vid normal drift är  $s$  litet, typiskt några procent, så  $(s \cdot X_2)^2 \ll R_2^2$
- Momentkurvan kan då approximeras med en enklare funktion

$$T \approx k \cdot U_1^2 \cdot s \cdot \frac{1}{R_2} = k_0 \cdot U_1^2 \cdot s$$



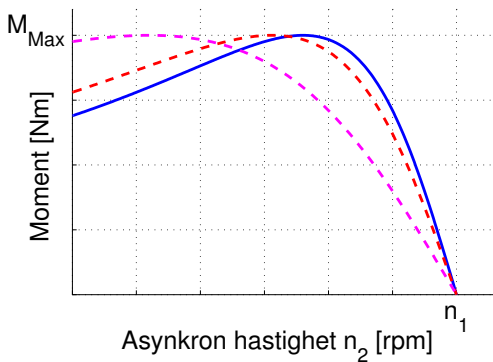


# Momentkurva vid inkoppling av pådragsresistans

- För en släppringad asynkronmaskin kan momentkurvan ändras genom att koppla in en yttre pådragsresistans.
- I momentekvationen ser vi detta som

$$T = k \cdot U_1^2 \cdot s \cdot \frac{R_2 + R_Y}{(R_2 + R_Y)^2 + (s \cdot X_2)^2}$$

Momentkurva extra pådragsresistans



- Original
- - -  $R_2 \cdot 1.2$
- - -  $R_2 \cdot 2$

- Maxmomentet hos kurvan påverkas inte av pådraget.
- För ett visst  $R_Y$  så är  $M_{ST} = M_{Max}$

# Konstant V/Hz styrning - "härledning"

- I momentekvationen så har frekvensberoendet hos  $X_2$  och  $k$  inte skrivits ut explicit. Egentligen så är

$$X_2 = \omega_1 \cdot L_2 = X_{2,M} \cdot \frac{\omega_1}{\omega_{1,M}} = X_{2,M} \cdot \frac{f_1}{f_{1,M}}$$

$$k = \frac{k_\omega}{\omega_1}$$

där  $X_{2,M}$  är  $X_2$  vid märkfrekvens.

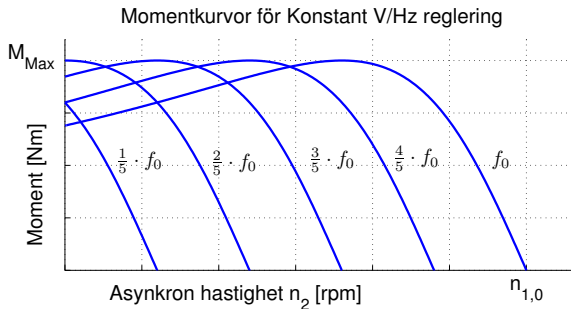
- Momentekvationen kan då skrivas som:

$$M = k_{f0} \cdot \left(\frac{U_1}{f_1}\right)^2 \cdot \frac{R_2/\Delta\omega}{(\omega_{1,M} \cdot (R_2/\Delta\omega))^2 + (X_{2,M})^2} \quad (\text{överkurs}).$$

- Om  $U_1$  justeras så att  $\frac{U_1}{f_1} = \text{konstant}$ , så blir momentet endast en funktion av varvtalsskillnaden  $\Delta\omega = \frac{\omega_1 - \omega_2}{\omega_1}$ .
- Detta kallas konstant V/Hz reglering

# Konstant V/Hz styrning

- Antag en asynkronmaskin med märkfrekvensen  $f_{1,M}$ .
- Vi har att  $n_1 = \frac{2 \cdot 60 \cdot f_1}{p}$  så synkront varvtal skalar direkt mot frekvens.
- Vi vill nu förskjuta momentkurvan  $\Delta n$  rpm så att vi får  $n_1 = n_{1,M} - \Delta n$
- Den nya frekvensen ska då vara  $f_1 = \frac{f_{1,M}}{n_{1,M}} \cdot n_1 = \frac{f_{1,M}}{n_{1,M}} \cdot (n_{1,M} - \Delta n)$
- Spänningen  $U_1$  justeras så att  $\frac{U_1}{f_1}$  är oförändrad, vilket ger konstant maxmoment



## Ur momentekvationen framgår att

- Maxmomentet hos kurvorna påverkas inte av frekvensen.
- Momentkurvorna är förskjutna kopior av varandra.

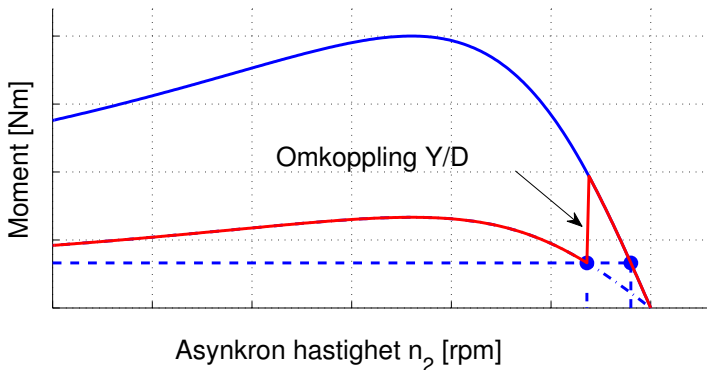
# Tekniker för start av Asynkronmotorn

- Direktstart
  - + Stor startström och fullt startmoment
  - + Kort starttid och liten uppvärmning av rotorn
    - Kräver mycket ström och starkt nät
- Y/D-Start
  - En normalt D-kopplad maskin kan Y-kopplas vid start, när motorn kommit upp i varv kopplas motorn om till D-koppling.
  - + Sänkt spänning med  $\frac{1}{\sqrt{3}}$  ger minskad ström och minskad belastning på nätet
    - Startmomentet blir endast  $\frac{1}{3}$  och kan vara för litet för att maskinen ska kunna starta
    - Förlänger starttiden vilket kan värma upp motorn.
    - Fungerar endast om maskinen är avsedd för D-koppling på det aktuella nätet.

# Exempel på startsekvens vid Y/D-Start

- Vid Y-D Start så följs först den lägre momentkurvan.
- När motorn når arbetsvarvtalet för den lägre kurvan kopplas motorn om varpå momentet som fås följer den övre kurvan.
- I exemplet nedan så antas momentet hos lasten vara konstant oberoende av varvtal.

Exempel på startsekvens vid Y/D-Start



# Tekniker för start av Asynkronmotorn (forts.)

- Start med pådrag
  - Inkoppling av externt rotorresistans, s.k. pådrag, kan används för att förskjuta momentkurvan. När motorn kommit upp i varv kan lindningarna kortslutas manuellt eller med en vipparm för att spara kolen.
  - + Startmomentet kan ökas samtidigt som startströmmen minskar
    - Kräver släpringad motor med lindad rotor
- Start med frekvensriktare
  - En frekvensriktare kan användas för att smyga igång motorn med genom att sakta skruva upp frekvensen.
  - + Hög verkningsgrad och litet slitage på motorn.
    - Kräver förhållandevis dyr utrustning i form av frekvensriktare.
    - Frekvensriktaren kan introducera störande frekvenser i motorns lindningar.

# Varvtalsstyrning av Asynkronmaskinen

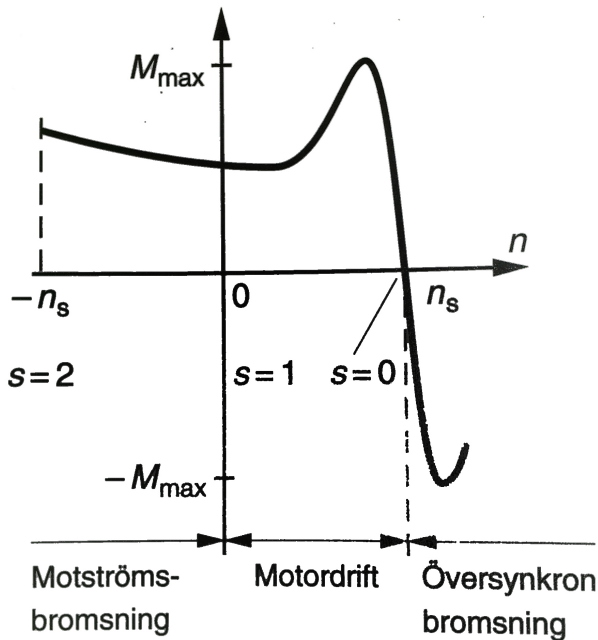
- Ändring av poltal
  - + Ändrar inte driftsegenskaperna
  - Kräver komplicerade statorlindningar.
- Ändring av eftersläpning  $s$ 
  - Momentkurvan ändras genom att ändra statorspänningen  $U_1$  eller rotorresistansen.
  - + Förhållandevis enkelt att sänka spänningen med en vridtransformator så att momentkurvan skalas ned.
  - Stor eftersläpning ger stor  $P_{Cu2} = \frac{s}{1-s} \cdot P_2$
- Ändring av nätfrekvensen
  - + Ger noggran och effektiv styrning som inte påverkar effektiviteten.
  - Kräver förhållandevis dyr utrustning i form av frekvensriktare.
  - Frekvensriktaren kan introducera störande frekvenser i motorns lindningar.

# Bromsning av asynkronmaskin

- Motorströmsbromsning
  - Omkoppling av lindningarna till motsatt rotationsriktning.
  - + Enkelt, pålitligt och stort bromsmoment
  - Stor rotorström och potentiellt mycket värmeutveckling.
- Översynkron bromsning
  - Används vid bromsning av översynkrona hastigheter
  - + Överskottsenergin matas ut på nätet
  - Kräver växelriktare för att bromsa vid lägre hastigheter.
- Likströmsbromsning
  - Motorn ansluts till likspänning (variant av översynkron bromsning med  $f = 0$ )
  - + Lägre värmeförluster än Motströmsbromsning
  - Begränsat bromsmoment samt kräver likströmskälla
- Mekanisk bromsning
  - + Snabbt och säkert
  - Slitdetaljer som måste underhållas



# Momentkurva för $s < 0$ och $s > 2$



# Asynkronmaskinen som nätansluten generator

- Som framgår av momentkurvan för översynkrona varvtal så kan asynkronmaskinen fungera som generator.
- Vid generatordrift så behövs reaktiv effekt för att generera delar av statorflödet.
- På samma sätt som vid motordrift så skapar (det nu negativa) slippet  $s$  förluster i rotorn så högre generatormoment ger större förluster.
- Externa kondensatorer kan användas för generering av reaktiv effekt
- Används i huvudsak i storlekar upp till några MW

# Beräkningsexempel I

En tvåpolig asynkronmotor belastas med ett moment så att den avgivna effekten blir 4,0 kW. Statorn är D-kopplad och matas med 400V 50Hz varvid den skenbara effekten blir 5,0kVA.

Lindningsresistansen är 0,5  $\Omega$  vardera och statorns järnförluster<sup>1</sup> uppskattas till 75 W. Motorns eftersläpning vid ovannämnda belastning är 3,0%. Friktion försummas.

- a): Beräkna belastningsmomentet och motorns varvtal.
- b): Beräkna rotorns förluster och den effekt som tillförs rotorn.
- c): Beräkna strömförbrukningen och statorns kopparförluster.
- d): Bestäm verkningsgraden och effektfaktorn.

---

<sup>1</sup>Kan uppskattas med ett tomgångsprov, precis som för transformatorn.

## Beräkningsexempel I, a)

**a):** Beräkna belastningsmomentet och motorns varvtal.

**Varvtal, n:** Motorn har två poler och frekvensen är 50 Hz

$$n_1 = \frac{120 \cdot f}{p} = 3000 \text{ rpm} \quad (\text{Synkrona varvtalet})$$

$$s = \frac{n_1 - n_2}{n_1} \implies$$

$$n_2 = (1 - s) \cdot n_1 = 0,97 \cdot 3000 = 2910 \text{ rpm} \quad (\text{Asynkrona varvtalet})$$

**Moment** Momentet kan räknas ut från effekten och varvtalet enligt

$$M = \frac{P_2}{\omega_2} \quad (1)$$

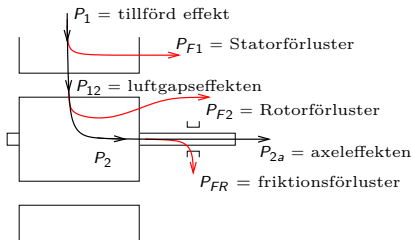
$$\omega_2 = \frac{2\pi}{60} \cdot n_2 \quad (2)$$

$$(1)\&(2) \implies M = \frac{60 \cdot P_2}{2\pi \cdot n_2} = \frac{60}{2\pi} \cdot \frac{4 \cdot 10^3}{2910} = 13,1 \text{ Nm}$$

# Beräkningsexempel I, b)

b): Beräkna rotorns förluster och den effekt som tillförs rotorn.

Effektbetraktelse



Tillförd effekt:

$$P_1 = \sqrt{3} U_H I_L \cos \varphi$$

Statorförluster:

$$P_{F1} = P_{Fe1} + P_{Cu1}$$

→ Järnförl.:

$$P_{Fe1}$$

→ Resistansförl.:

$$P_{Cu1} = 3 \cdot R_{1,Y} \cdot I_1^2$$

Luftgapseffekt:

$$P_{12} = P_1 - P_{F1}$$

$$P_{12} = M \cdot \omega_1$$

Rotorförluster:

$$P_{F2} = P_{Cu2} + \underbrace{P_{Fe2}}_{\text{försumbara}} =$$

$$= s \cdot P_{12} =$$

$$= \frac{s}{1-s} \cdot P_2$$

Effekten:

$$P_2 = M \cdot \omega_2$$

$$P_2 = P_{12} - P_{F2}$$

- De sökta effekterna är  $P_{12}$  och  $P_{Cu2}$

$$P_{12} = M \cdot \omega_1 = \frac{P_2}{\omega_2} \cdot \omega_1 = P_2 \frac{n_1}{n_2} = 4124 \text{ W}$$

$$P_{Cu2} = s \cdot P_{12} = 0,03 \cdot 4124 = 124 \text{ W}$$

$$= \frac{s}{1-s} P_2 = 0,031 \cdot 4000 = 124 \text{ W}$$

## Beräkningsexempel I, c)

**c):** Beräkna strömförbrukningen och statorns kopparförluster.

-> Använd den givna skenbara effekten för att räkna ut linjeströmmen. Statorn är D-kopplad så strömmen  $I_1$  genom lindningarna är  $\frac{I_L}{\sqrt{3}}$ .

$$S = \sqrt{3} \cdot U_H \cdot I_L = \underbrace{5000}_{\text{givet}} \implies I_L = 7,22 \text{ A}$$

$$\begin{aligned} P_{Cu1} &= 3 \cdot R_1 I_1^2 = 3 \cdot R_1 \cdot \left(\frac{I_L}{\sqrt{3}}\right)^2 = R_1 \cdot I_L^2 = \\ &= 0,50 \cdot 7,22^2 = 26 \text{ W} \end{aligned}$$

## Beräkningsexempel I, d)

**d):** Bestäm verkningsgraden och effektfaktorn.

-> Verkningsgraden är som vanligt avgiven effekt delat med instoppad

$$\eta = \frac{P_{2a}}{P_1} = \frac{P_2}{P_{12} + P_{Cu1} + P_{Fe1}} = \frac{4000}{4124 + 26 + 75} = 95\%$$

där  $P_{FR} = 0$  och  $P_1 = P_{12} + P_{Cu1} + P_{Fe1}$  har använts. För att räkna ut effektfaktorn används  $P_1$  och  $S$  enligt

$$\cos \varphi = \frac{P_1}{S} = \frac{P_{12} + P_{Cu1} + P_{Fe1}}{S} = \frac{4225}{5000} = 0,85$$

## Beräkningsexempel II

En kortsluten trefas asynkronmotor på 6 kW driver en fläkt. Vid 1425 rpm, som är motorns märkvarvtal, är fläktens vridmoment lika med motorns märkmoment. Man vill sänka motorns varvtal till 1350 rpm genom spänningsstyrning. Fläktens moment är proportionellt mot varvtalet i kvadrat. ( $M_{\text{fläkt}} = k_{\text{Fläkt}} \cdot n^2$ ).

Beräkna

- a) Till vilket värde spänningen ska sänkas för att få  $n_2 = 1350$  rpm. Normal nätspänning är 380 V.
- b) Hur stora blir förlusterna i rotorn vid 1425 rpm respektive 1350 rpm?



## Beräkningsexempel II, lösning

Lösning:

- a)  $P_{2a} = 6 \text{ kW}$ ,  $n_2 = 1425 \text{ rpm}$ ,  $M_{\text{fläkt}} = M_{\text{Motor}}$  vid  $n_2 = 1425 \text{ rpm}$ , vilket ger

$$M_{\text{Motor}} = \frac{P_{2a}}{\omega_2} = \frac{6000 \cdot 60}{2 \cdot \pi \cdot 1425} = 40,2 \text{ Nm}$$

Vi har att  $M_{\text{Motor}} = k \cdot U^2 \cdot s$  vilket ger två fall med olika  $U$ :

Fall I:  $M_I = k \cdot U_M^2 \cdot s_I$ , där  $s_I = \frac{1500-1425}{1500} = 5\%$

Fall II:  $M_{II} = k \cdot U_{II}^2 \cdot s_{II}$ , där  $s_{II} = \frac{1500-1350}{1500} = 10\%$

$M_{II}$  fås ur  $M_{\text{fläkt}} = k_{\text{Fläkt}} \cdot n_{II}^2$  och  $k_{\text{Fläkt}}$  fås från märklastfallet, d.v.s. Fall I

$$k_{\text{Fläkt}} = \frac{40,2}{1425^2} = 19,8 \cdot 10^{-6} \implies$$

$$M_{II} = k_{\text{Fläkt}} \cdot 1350^2 = 36 \text{ Nm}$$

Vi får därför  $U_{II} = U_M \cdot \sqrt{\frac{M_{II}}{M_I} \cdot \frac{s_I}{s_{II}}} = 254 \text{ V}$

## Beräkningsexempel II, lösning

Lösning:

**b)** Rotorförluster  $P_{F2} = P_{Cu2} = s \cdot \frac{P_{2a}}{1-s}$

Fall I: Vid märkspänning är  $P_{2F,I} = s_I \cdot \frac{P_{2a,I}}{1-s_I} = \frac{0,05 \cdot 6000}{0,95} = 316 \text{ W}$

Fall II: Vid sänkt spänning är

$$P_{F2,II} = s_{II} \cdot \frac{P_{2a,II}}{1-s_{II}} = \left/ P_{2a,II} = M_{II} \cdot \omega_{II} \right/ = \frac{0,1}{0,9} \cdot 36 \frac{2 \cdot \pi \cdot 1350}{60} = 565 \text{ W}$$

Förlusteffekten blir alltså nästan dubbelt så stor om man sänker spänningen till 254 V och det kan därför finnas risk för att motorn överhettas vid den här typen av varvtalsstyrning.