

# Fö 6 - TMEI01 Elkraftteknik

## Asynkronmaskinen

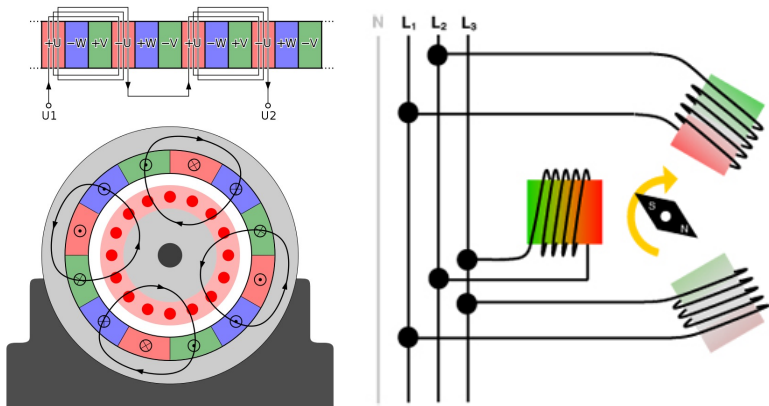
Christofer Sundström

10 februari 2020

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

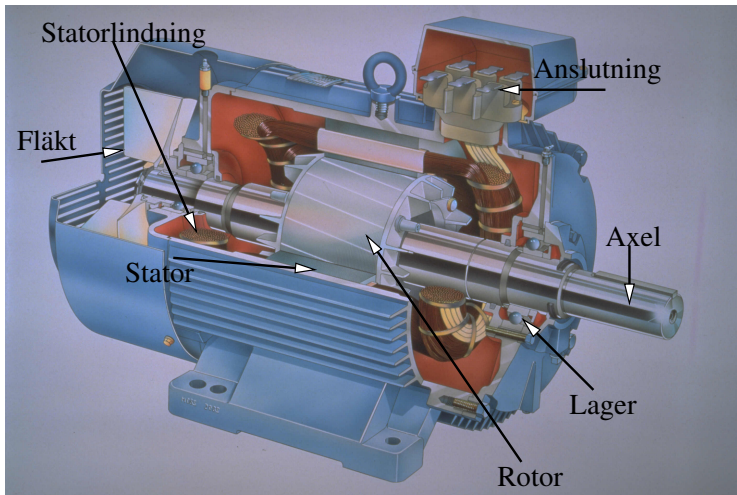
# Introduktion Asynkronmaskin

- 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.

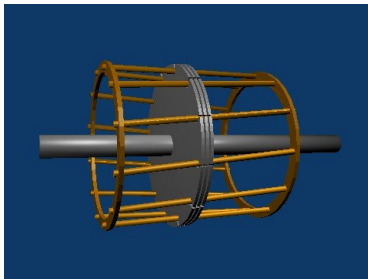


Figur: Illustration av 4-polig trefas-lindad asynkronmaskin, t.v. (Wikimedia Commons) och 2-polig trefas-lindad stator, t.h. (Zeitlauf)

# Uppbyggnad, forts.



Figur: Urskuren induktionsmotor (Electric Motors)



**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 växelspanningarna skapar ett roterande magnetflöde i statorn.
- 3 Rotorn som från början står still i det roterande magnetflödet får en inducerad spänning i sig (som transformatorns sekundärsida).
- 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.

# Flödets rotationshastighet, det synkrona varvtalet

- En asynkronmaskin byggs med ett jämnt 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 på  $T = \frac{1}{f}$  så byter nord- och sydpol plats två ggr.
- För en p-polig maskin så hinner magnetflödet  $\frac{2}{p}$  varv per elektrisk period.
- Det synkrona varvtalet är hastigheten med vilket magnetflödet roterar

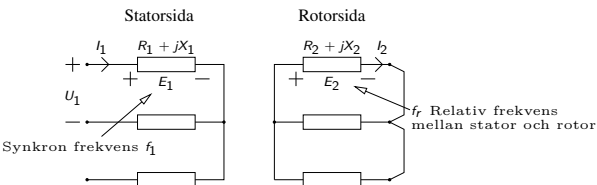
## Det synkrona varvtalet

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



# Rotorns rotationshastighet, det asynkrona varvtalet

## Förenklat 3-fas kretsschema



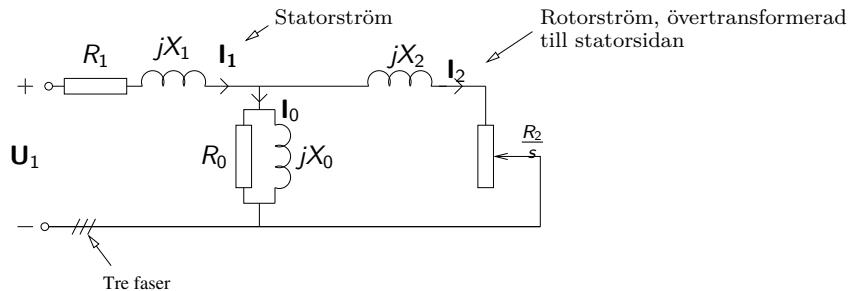
## Nomenklatur

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

- 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  $s$  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

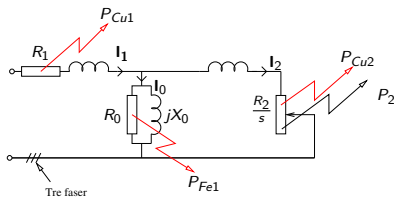
Per fas, ekvivalent krettschema sett från statorn. Jämför med krettschema för transformatorn. Krettschemat används i den här kursen endast för att illustrera hur man kan räkna ut moment, förluster och driftsegenskaper.



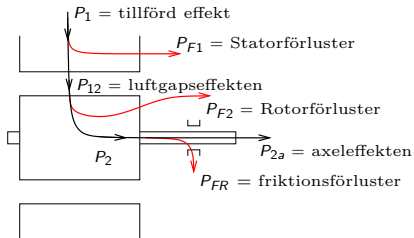
- De elektriska förlusterna består av  $R \cdot I^2$  förluster i lindningsresistanserna

# Förluster och Verkningsgrad

Effektförluster sett från krettschemat



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:

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

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

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

Effekten:

$$P_2 = M \cdot \omega_2$$

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

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

## Beräkningsexempel Asynkronmotor

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 Asynkronmotorn, 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

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

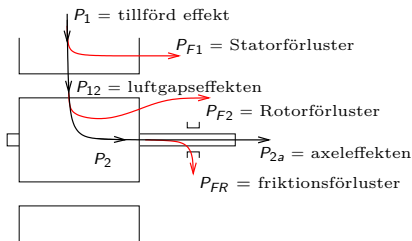
$$\omega_2 = \frac{2\pi}{60} \cdot n_2 \quad (2)$$

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

# Beräkningsexempel Asynkronmotorn, 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 Asynkronmotor, 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 Asynkronmotorn, d)

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

-> Verkningsgraden är som vanligt avgiven effekt delat med instoppad

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

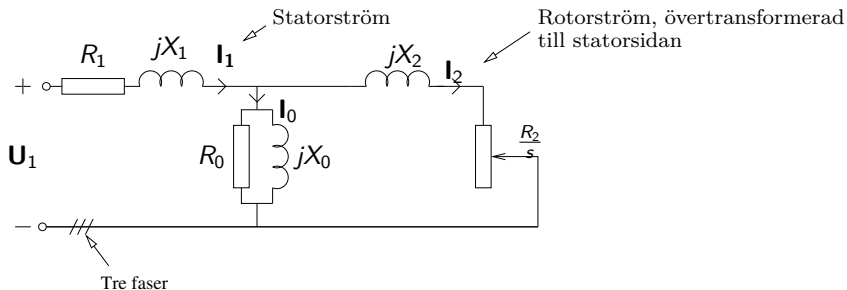
där  $P_{FR} = 0$  och  $P_1 = P_{12} + P_{Cu1} + P_{Fe1}$  har använts. För att räkna ut effektfaktorn används  $P_1$  och  $S$  enligt

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



# Asynkronmaskinens Momentkurva, "härledning" (överkurs)

- Betrakta kretsschemat

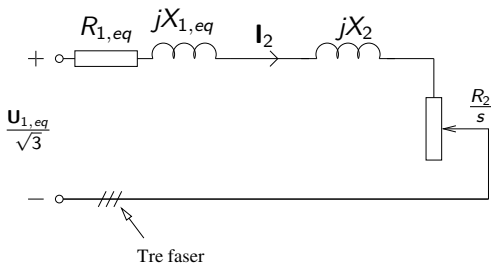


- Momentet kan beräknas genom (jmf DC-maskinen):

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

# 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

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

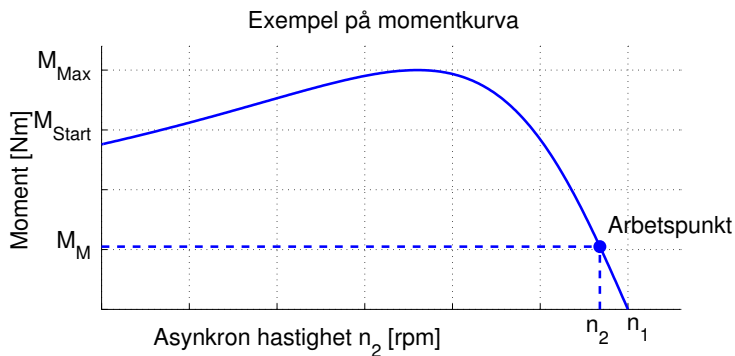
- Ur kretsschemat kan sedan strömmens storlek  $I_2$  räknas ut och vi får

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

# Asynkronmaskinens momentkurva

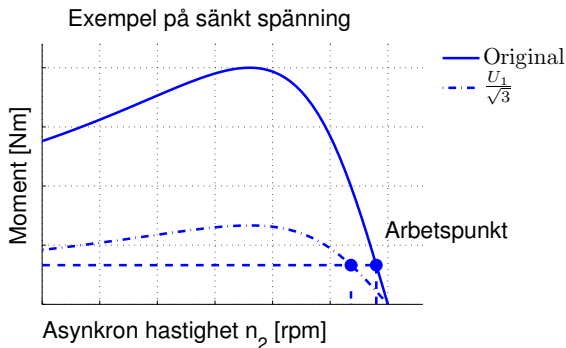
- Efter förenkling och ihopslagning av konstanterna i momentuttrycket fås

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



# Momentkurva vid ändring av spänning

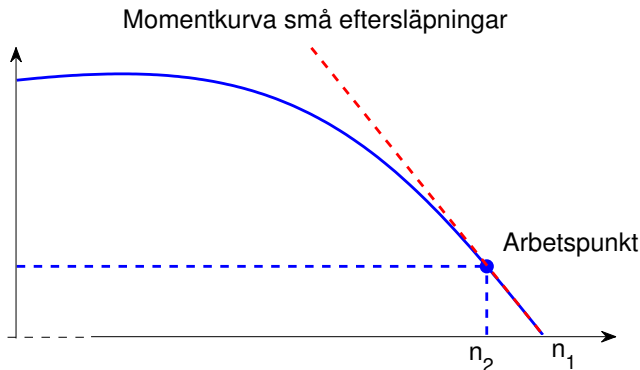
- Momentekvationen:  $M = k \cdot U_1^2 \cdot s \cdot \frac{R_2}{R_2^2 + (s \cdot X_2)^2}$
- Ur momentekvationen så framgår att vid ändring från spänning  $U_1$  till  $U_1'$  så skalas momentkurvan med faktorn  $\left(\frac{U_1'}{U_1}\right)^2$
- Om spänningen sänks med en faktor  $\frac{1}{\sqrt{3}}$  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

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

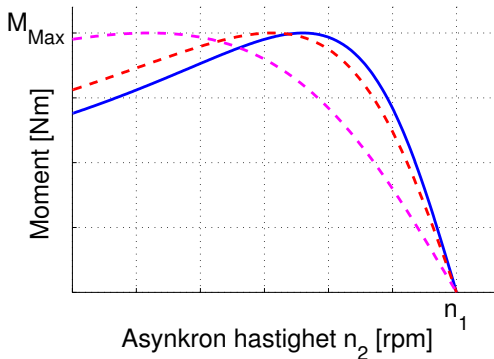


# Momentkurva vid inkoppling av pådragsresistans

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

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

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.

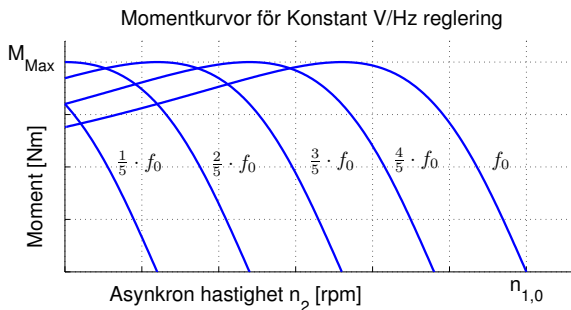
- Momentekvationen kan då skrivas som:

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

- 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

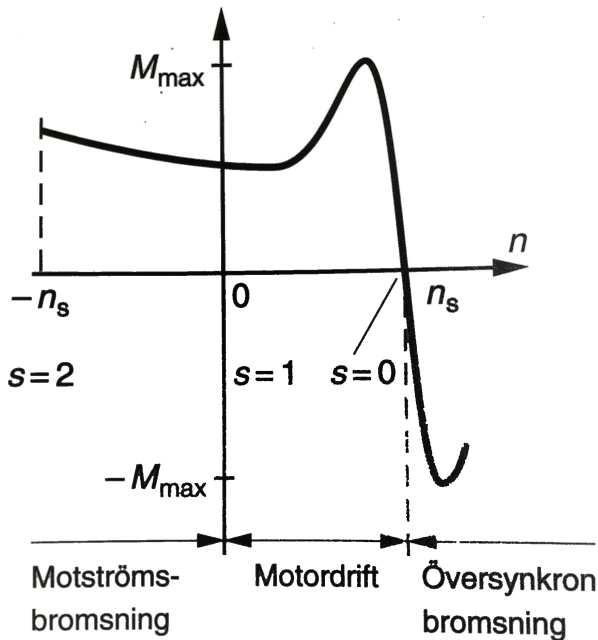


## Ur momentekvationen framgår att

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



# Momentkurva för $s < 0$ och $s > 1$



# 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.
- Även externa kondensatorer kan användas för generering av reaktiv effekt
- Används i huvudsak i storlekar upp till några MW
- Praktiskt vid användning i vindkraftverk där rotorhastigheten kan tillåtas variera för maximal effekt.