

Linköpings tekniska högskola, ISY, Fordonssystem

Lektionskompendium Elektriska drivsystem TSFS04



Linköping 2012

Förord

Lektionskompendiet innehåller övningsuppgifter och lösningar eller svar till dessa. Uppgifterna är indelade lektionsvis. Vissa uppgifter har ett nummer inom parentes som indikerar att uppgiften är en översatt och i vissa fall modifierad version av motsvarande uppgift i kursboken.

Del I

Övningsuppgifter

Magnetiska kretsar och material

Övning 1.1 (1.1)

En magnetisk krets med ett luftgap visas i figur 1.1. Kärnans dimensioner är:

Tvärsnittsarea A_c	$1.8 \cdot 10^{-3} \text{ m}^2$
Kärnans medellängd l_c	0.6 m
Luftgapets längd g	$2.3 \cdot 10^{-3} \text{ m}$
Lindningsvarv N	83 varv

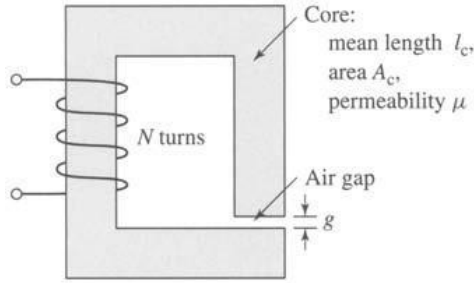
Antag att kärnan har oändlig permeabilitet ($\mu \rightarrow \infty$), att magnetfältet i luftgapet är homogent och riktat vinkelrätt mot tvärsnittsarean och bortse från läckflöden. Beräkna (a) reluktansen för kärnan R_c och för luftgapet R_g . Beräkna (b) det totala flödet ϕ , (c), spolens sammanlänkande flöde λ och (d) spolens induktans L vid en ström på $i = 1.5 \text{ A}$.

Övning 1.2 (1.13)

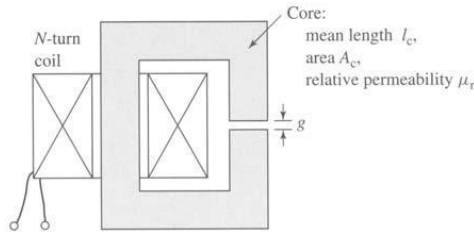
Induktorn i figur 1.2 har följande dimensioner:

Tvärsnittsarea A_c	1 cm^2
Kärnans medellängd l_c	15 cm
Luftgapets längd g	0.8 mm
Lindningsvarv N	480 varv

Antag att $\mu_r = 1000$, att magnetfältet i luftgapet är homogent och vinkelrätt mot tvärsnittsytan och bortse från läckflöden. Beräkna spolens induktans L .



Figur 1.1: Den magnetiska kretsen i övning 1.1



Figur 1.2: Induktorn i övning 1.2

Övning 1.3 (1.14)

Induktorn i övning 1.2 drivs med en 60 Hz spänningskälla. (a) Beräkna spolens rms-spänning motsvarande ett toppvärde för flödestätheten på 1.5 T, antag att vi kan negligera spolens resistans. (b) Beräkna, för samma lastfall, rms-strömmen och toppvärdet för den lagrade energin.

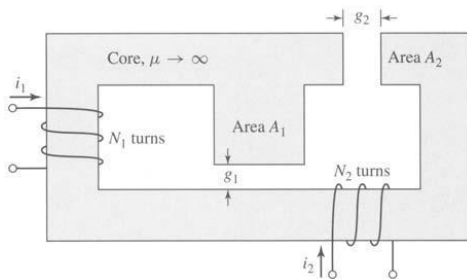
Tips: Sambandet mellan rms-värdet och amplituden för en sinus- eller cosinussignal, $e = E_{max} \cos(\omega t)$, är $E_{rms} = \frac{E_{max}}{\sqrt{2}}$

Övning 1.4 (1.22)

Den magnetiska kretsen i figur 1.3 har två lindningar och två luftgap. Kärnan kan antas ha oändlig permeabilitet. Kärnans dimensioner anges i figuren.

- Antag att strömmen i spole 1 är I_1 och att det inte flyter någon ström i spole 2. Beräkna (i) den magnetiska flödestätheten i de båda luftgapen, B_1 respektive B_2 , (ii) det sammanlänkande flödet i spole 1, λ_1 och (iii) det sammanlänkande flödet i spole 2, λ_2 .
- Upprepa del a. men med strömmen I_2 i spole 2 och ingen ström i spole 1.
- Upprepa del a. men med strömmen I_1 i spole 1 och strömmen I_2 i spole 2.

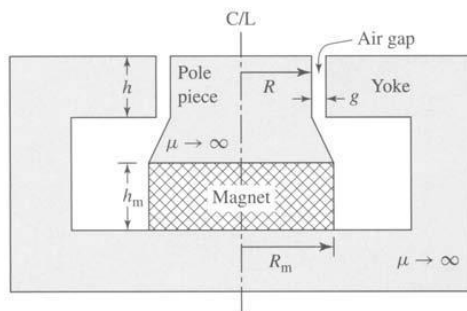
- d) Bestäm de båda spolarnas självinduktanser, $L_{1,1}$ respektive $L_{2,2}$ samt ömseinduktansen mellan dem $L_{1,2}$.



Figur 1.3: Den magnetiska kretsen i övning 1.4

Övning 1.5 (1.34)

Figur 1.4 visar den magnetiska kretsen för en permanentmagnethögtalare. Spolen (visas ej i figuren) har formen av ett cylinderskal, som passar i luftgapet. En samarium-koboltmagnet används för att skapa luftgapsmagnetfältet, som interagerar med strömmen i spolen för styra spolens rörelse. Designern har placerat luftgapet vid radien $R = 1.8$ cm, med längd $g = 0.1$ cm och höjd $h = 0.9$ cm. Antag att kärnans båda delar har oändlig permeabilitet ($\mu \rightarrow \infty$). Bestäm de dimensioner h_m och R_m som minimerar magnetens volym samtidigt som de ger flödestätheten $B_g = 1.2$ T i luftgapet.



Figur 1.4: Den magnetiska kretsen för högtalaren i övning 1.5

Kapitel 2

Transformatorn

Övning 2.1 (2.4)

Ett $100\ \Omega$ -s-motstånd är kopplad till sekundärsidan av en ideal transformator med en omsättningsförhållande på 1:4 (primär till sekundär). En 10 V, 1 kHz spänningskälla är kopplad till transformatorns primärsida. Beräkna primärströmmen och spänningen över $100\ \Omega$ -s-motståndet.

Övning 2.2 (2.9)

En 120/2400-V, 60-Hz, 50-kVA transformator har en magnetiseringsreaktans mätt från lågspänningssidan på $34.6\ \Omega$. 120-V:s lindningen har en läckreaktans på $27.4\ m\Omega$ och 2400-V:s lindningen har en läckreaktans på $11.2\ \Omega$. Alla förluster kan försummas i uppgiften.

- Beräkna primärström och sekundärspänning när sekundärsidan är öppen och primärsidan (120-V-sidan) ansluten till 120 V.
- Beräkna primärspänning och sekundärström vid märkström på primärsidan och kortsluten sekundärsida.

Övning 2.3 (2.11)

Resistanserna och läckreaktanserna för en 30-kVA, 60-Hz, 2400/240-V distributionstransformator är:

$$\begin{aligned} R_1 &= 0.68 \, \Omega & R_2 &= 0.0068 \, \Omega \\ X_{l_1} &= 7.8 \, \Omega & X_{l_2} &= 0.0780 \, \Omega \end{aligned}$$

där index 1 betecknar 2400-V-lindningen och index 2 betecknar 240-V-lindningen. Varje värde refererar till sin sida av transformatorn. Magnetiseringimpedansen kan försummas.

- Rita den ekvivalenta kretsen för (i) hög- och (ii) lågspänningssidan. Bestäm numeriska värden på ingående impedanser.
- Antag att transformatorn levererar sin märk-kVA till en last på lågspänningssidan med 230 V över lasten. (i) Bestäm terminalspänningen på högspänningssidan vid effektfaktor 0.85 induktiv (lagging). (ii) upprepa för effektfaktor 0.85 kapacitiv (leading).
- Antag att transformatorn levererar sin märk-kVA till en last på lågspänningssidan med 240 V över lasten. Beräkna högspänningssidans terminalspänning för effektfaktor 0.6 induktiv, 1 och 0.6 kapacitiv.

Övning 2.4

En trefastransformator är märkt 100-kVA, 3800/230-V. Beräkna märkström samt fasspänning både för transformatorns hög- respektive lågspänningssida.

Övning 2.5

Övningens syfte är att förstå de förluster som uppstår vid användning av en icke-ideal transformator samt hur förlusterna påverkar verkningsgraden för olika lastfall.

En trefastransformator är märkt 150-MVA, 13.5/135-kV. Transformatorns parametrar per ekvivalent Y-fas och refererade till lågspänningssidan är:

$$\begin{aligned} R_1 &= R'_2 = 2.4 \, \text{m}\Omega & X_{l_1} &= X'_{l_2} = 54 \, \text{m}\Omega \\ R_c &= 310.7 \, \Omega & X_m &= 141.6 \, \Omega \end{aligned}$$

För att studera hur transformatorns förluster påverkas av olika laster ska vi först studera två ytterlighetsfall nämligen det så kallade kortslutningsprov och tomgångsprov.

För kortslutningsprovet gäller att högspänningssidan kortsluts och spänningen på lågspänningssidan justeras in för att erhålla märkström in på lågspänningssidan.

- Beräkna märkströmmen samt den spänningen som krävs för att erhålla märkström.
- Beräkna de resistiva förlusterna, järnförlusterna och den totala förlusten för detta fall. Vilken typ av förlust är helt dominerande? Förklara.

Under ett tomgångsprov kopplas transformatorn in så att det är avbrott mellan högspänningssidans poler och märkspänning kopplas in över transformatorns lågspänningssida.

- c) Beräkna linjeströmmen för detta fall.
- d) Beräkna de resistiva förlusterna, järnförlusterna och den totala förlusten för detta fall. Vilken typ av förlust är helt dominerande? Förklara.

Antag nu att transformatorns högspänningssida förser en last med märkspänning.

- e) Beräkna transformatorns verkningsgrad då lasten drar märkström och effektfaktorn är 1.
- f) Antag att järnförlusterna är konstanta, de resistiva förlusterna proportionella mot kvadraten av strömmen genom lasten, teckna ett uttryck för transformatorns verkningsgrad som funktion av strömmen genom lasten och lastens effektfaktor. För vilken ström och effektfaktor är verkningsgraden maximal?

Övning 2.6 (2.15)

På märkplåten till en 50-MVA, 60-Hz enfastransformator står det 8.0/78-kV. Ett tomgångsprov (open circuit test) som utförs från lågspänningssidan ger mätvärdena 8.0 kV, 62.1 A och 206 kW. På samma sätt ger ett kortslutningsprov (short circuit test) från lågspänningssidan mätvärdena 674 V, 6.25 kA och 187 kW.

- a) Beräkna transformatorns ekvivalenta serieimpedans, resistans och reaktans sett från lågspänningssidan.
- b) Beräkna transformatorns ekvivalenta serieimpedans, resistans och reaktans sett från högspänningssidan.
- c) Gör lämpliga approximationer och rita en T-ekvivalent krets för transformatorn.
- d) Beräkna transformatorns effektivitet och spänningsjustering när den arbetar vid märkspänning och -last (effektfaktor 1).
- e) Upprepa deluppgift d) med effektfaktor 0.9 kapacitiv.

Övning 2.7 (2.26)

En trefas Y- Δ transformator har märkdata 225/24-kV, 400-MVA och har en serie-reaktans på $11.7 \, \Omega$ sett från högspänningssidan. Transformatorn driver en last på 324 MVA med effektfaktor 0.93 induktiv, vid en huvudspänningen på 24-kV (fas-fas) på sin lågspänningssida. Högspänningssidan spänningsmatas av ett aggregat som kan modelleras per ekvivalent Y-fas som en ideal spänningskälla i serie med impedansen $0.11 + j2.2 \, \Omega$.

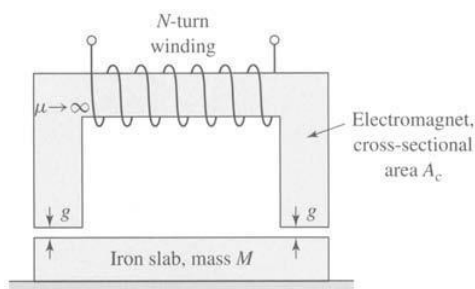
- a) Beräkna huvudspänningen vid transformatorns högspänningsanslutning.
- b) Beräkna den ideala spänningskällans huvudspänning.

Kapitel 3

Elektromekaniska energiomvandlingsprinciper

Övning 3.1 (3.14)

Figur 3.1 visar en elektromagnet med $N = 450$ lindningsvarv, som används för att lyfta en järnblock som har massan M . Kontaktytorna är sådana att när blocket och magneten har kontakt är luftgapet $g_{min} = 0.18$ mm vid kontaktytorna. Elektromagneten har tvärsnittsytan $A_c = 32$ cm² och spolens resistans är 2.8Ω . Beräkna den spänning som krävs över spolen för att lyfta ett block på 95 kg. Bortse från järnets reluktans.



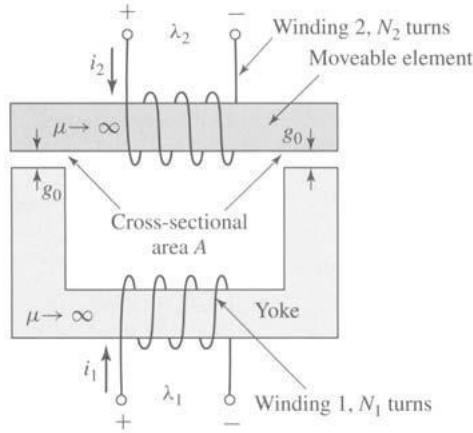
Figur 3.1: Elektromagnet för lyft av järnblock för övning 3.1

Övning 3.2 (3.22)

Figur 3.2 visar en magnetisk krets med två lindningar. En av lindningarna sitter på ett ok och den andra lindningen sitter på en lös stång. Stångens rörelse är

begränsad så att de båda luftgapen hålls lika stora.

- Bestäm självinduktansen för lindning 1 och 2 uttryckt i kärnas dimensioner och antalet lindningsvarv.
- Bestäm ömseinduktansen mellan de två lindningarna.
- Bestäm komplementenergin $W'_{fld}(i_1, i_2)$
- Ställ upp ett uttryck för kraften på den lösa stängen som funktion av lindningsströmmarna.



Figur 3.2: Den magnetiska kretsen, med två lindningar, i övning 3.2

Övning 3.3 (3.23)

Två spolar, den ena monterad på en stator och den andra på en rotor, har själv- och ömseinduktanserna

$$L_{11} = 3.5 \text{ mH} \quad L_{22} = 1.8 \text{ mH} \quad l_{12} = 2.1 \cos \theta \text{ mH}$$

där θ är vinkeln mellan spolarnas axlar. Spolarna är kopplade i serie och leder strömmen

$$i = \sqrt{2}I \sin \omega t$$

- Härled ett uttryck för det momentana momentet T på rotorn som funktion av vinkeln θ
- Ställ upp ett uttryck för momentets tidsmedelvärde T_{avg} som funktion av vinkeln θ
- Beräkna ett numeriskt värde på T_{avg} för $I = 10 \text{ A}$, $\theta = 90^\circ$.

- d) Skissa kurvor för T_{avg} som funktion av θ för $I = 5, 7.07$ och 10 A.
- e) En spiralfjäder som drar rotorn mot $\theta = 90^\circ$ monteras. Fjäders moment beror linjärt av rotorns vinkel θ , och momentet är -0.1 Nm vid $\theta = 0^\circ$. Visa på kurvorna från deluppgift d. hur du kan hitta jämviktsvinkeln för rotor+fjäder för strömmarna $I = 5, 7.07$ och 10 A. Uppskatta rotorns vinkel från kurvorna för de tre strömmarna.

Introduktion av roterande maskiner

Övning 4.1 (4.1)

Rotorn i en sexpolig synkrongenerator roterar med den mekaniska hastigheten $n_m = 1200$ rpm.

- a) Uttryck den mekaniska hastigheten i rad/s.
- b) Vilken frekvens har den genererade spänningen uttryckt i Hz och i rad/s?
- c) Vilken mekanisk hastighet uttryckt i varv per minut krävs för att generera en spänning med frekvensen $f_e = 50$ Hz?

Övning 4.2

I denna kurs studerar vi likströmsmaskiner, synkronmaskiner och asynkronmaskiner. De elektromagnetiska principerna för dessa skiljer sig åt, vilket avspeglas i benämningarna på maskinernas rotor- respektive statorlindningar.

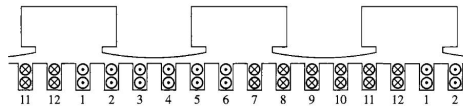
- a) Förklara vad fältlindning respektive ankarlindning innebär.
- b) Förklara, för de ovan nämnda maskintyperna, vilken av rotor- och statorlindningarna som är fältlindning respektive ankarlindning.

Övning 4.3 (4.4)

Målet med denna övning är att illustrera hur ankarlindningarna hos vissa motorer, tex dc-motorer, approximativt kan beskrivas som ett jämnt utbrett strömlager, och

att denna approximations överensstämmelse ökar när lindningen sprides ut över ett större antal spår. I detta syfte betraktar vi en rotor med åtta spår jämnt utspridda över 360 elektriska grader (motsvarande ett polpar). Luftgapet är konstant runt rotorn, spåröppningarna är små och järnets reluktans kan negligeras. Lägga ut 360 elektriska grader av rotorn med sina spår i utvecklad form, så som i figur 4.1, och numrera dessa 1 till 8 från vänster till höger. Lindningen består av åtta spolar med vardera en ensam lindning med strömmen 10 A. Slingor som placeras i spår 1 till 4 för ström in i figuren och i spår 5 till 8 för ström ut ur figuren.

- Börja med att placera alla åtta lindningar med en sida i spår 1 och den andra i spår 5. Övriga spår är tomma. Rita den fyrkants-mmk-våg detta ger.
- Flytta nu fyra lindningar till spår 3 och 7, så att det nu finns fyra lindningar i vardera av spår 1,3,5 och 7. Rita mmk-vågorna för de två lindningsomgångarna (1-5 och 3-7) och superpositionera dessa.
- Placera nu två lindningar i vardera spår 1 och 5, 2 och 6, 3 och 7, 4 och 8. Rita och superpositionera mmk-vågorna. Notera att vågen är symmetrisk vid varje spår och tar steg enligt antalet lindningar i motsvarande spår.
- Öka nu antalet spår till 16 på 360 elektriska grader och placera en lindning i varje spår. Rita den resulterande mmk-vågen.



Figur 4.1: Skiss av en utvecklad DC-motor för övning 4.3

Övning 4.4 (4.6)

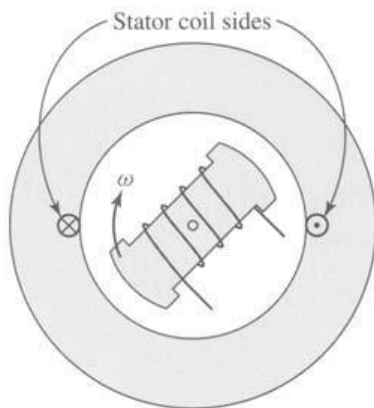
Vad händer med de roterande mmk- och flödes-vågorna i en trefaslindning, som skapas av en balanserad trefasström, om man byter plats mellan två av fasanslutningarna?

Övning 4.5 (4.13)

Figur 4.2 visar en tvåpolig rotor i en slät stator med en 110-varvs lindning. Rotorn ger upphov till en sinusformad flödesfördelning vid statorns yta. Flödestäthetens toppvärde är $B = 0.85$ T när strömmen i rotorn är 15 A. Den magnetiska kretsen är linjär. Statorns inre diameter är $d = 11$ cm och dess längd är $l = 17$ cm. Rotorn körs vid hastigheten $n_m = 50$ varv/s.

- Rotorn exciteras av en ström om 15 A. Sätt tiden noll då rotorns axel är vertikal och teckna ett uttryck för den spänning som genereras för en öppen statorkrets.

- b) Rotorn exciteras nu av en 50 Hz sinusformad växelström vars toppvärde är 15 A. Därmed byter strömmen riktning vid varje halvt varv; den är avpassad så att toppvärdet nås när rotorns axel är vertikal. Sätt tiden noll då rotorns axel är vertikal och teckna ett uttryck för den spänning som genereras för en öppen statorkrets. Den här uppsättningen föreslås ibland som en dc-generator utan kommutatorer, där tanken är att varje halvt varv växla riktning på den spänning som genererades i deluppgift a. genom att byta riktning på polariteten för rotorlindningen. Detta skulle ge en pulserande likspänning. Diskutera ifall detta skulle fungera eller inte, och förklara varför.



Figur 4.2: Enkel generator för övning 4.5

Övning 4.6 (4.18)

En tvåpolig, 60-Hz, trefas, laboratoriestorleks synkrongenerator har en rotorradie på $r = 5.71$ cm, en rotorlängd på $l = 18.0$ cm och ett luftgap på $g = 0.25$ mm. Rotorns fältlindning består av $N_r = 264$ lindningsvarv med en lindningsfaktor på $k_r = 0.95$. Den Y-kopplade ankarlindningen består av $N_{ph} = 45$ lindningsvarv per fas med en lindningsfaktor på $k_w = 0.93$.

- Beräkna det flöde per pol och den amplitud B_{peak} på grundtonen av luftgapsflödet som ger 60 Hz, 120 V/fas (linje till nolla) för en öppen statorkrets.
- Beräkna den fältström som krävs för lösningen i deluppgift a).
- Beräkna toppvärdet på ömseinduktansen L_{af} mellan fältlindning och ankarlindning.

Övning 4.7 (4.21)

Värmeutveckling begränsar fältströmmen i den generator som studerades i övning 4.6 till ett maxvärde på 2.4 A. Beräkna det maximala moment och den maximala

effekt som kan produceras av denna generator om toppvärdet för den fundamentala luftgapsflödestätheten begränsas till 1.3 T.

Övning 4.8 (4.22)

Figur 4.3 visar en genomskärning av en motor med en rotorlindning f och två identiska statorlindningar a och b vars axlar ligger vinkelrät i förhållande till varandra. Självinduktansen är L_{aa} för vardera statorlindningen och L_{ff} för rotorlindningen. Luftgapet är likformigt. Ömseinduktansen mellan vardera statorlindning och rotorlindningen beror av rotorns vinkeläge och kan antas vara på formen

$$M_{af} = M \cos \theta_0 \quad M_{bf} = M \sin \theta_0$$

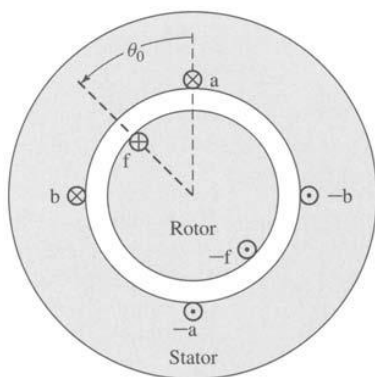
där M är ömseinduktansens toppvärde. Resistansen för vardera statorlindning är R_a .

- Härled ett generellt uttryck för momentet T beroende av vinkeln θ_0 , induktansparametrarna och strömmarna i_a , i_b och i_f . Gäller uttrycket när rotorn står stilla? Gäller det när rotorn roterar?
- Antag att rotorn står stilla och att konstanta likströmmar $I_a = I_0$, $I_b = I_0$ och $I_f = 2I_0$ genom lindningarna, med riktningar enligt figur 4.3. Om rotorn tillåts rotera; kommer den då att rotera kontinuerligt eller kommer den att stanna? Om den stannar - vid vilken vinkel θ_0 ?
- Rotorlindningarna exciteras nu med en konstant likström I_f medans de balanserade tvåfasströmmarna

$$i_a = \sqrt{2}I_a \cos \omega t \quad i_b = \sqrt{2}I_a \sin \omega t$$

flyter i statorlindningarna. Rotorn snurrar med synkron hastighet så att dess vinkeläge ges av $\theta_0 = \omega t - \delta$, där δ är rotorns vinkeläge vid $t = 0$. Maskinen är alltså en elementär tvåfas synkronmaskin. Härled ett uttryck för maskinens axelmoment under dessa förutsättningar.

- Härled uttryck för de momentana terminalspänningarna för lindning a och b under förutsättningarna i del c.



Figur 4.3: Enkel tvåfas synkronmaskin med cylindrisk rotor för övning 4.8

Kapitel 5

Likströmsmaskinen

Övning 5.1 (7.1)

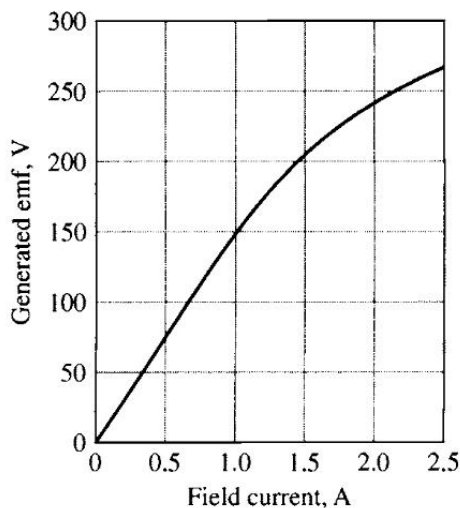
Betrakta en separatmagnetiserad likströmsmotor som körs obelastad. Beskriv hur motorns hastighet förändras i följande fall:

- a) Ankarspänningen varieras samtidigt som fältströmmen hålls konstant.
- b) Fältströmmen varieras medans ankarspänningen hålls konstant.
- c) Fält- och ankarlindningarna parallellkopplas och spänningen över ankarlindningen varieras.

Övning 5.2 (7.6)

En separatmagnetiserad 25-kW, 250-V DC-motor med ankarresistansen $R_a = 0.14 \, \Omega$ ska köras som motor driven av en konstant ankarspänning på 250 V. Om mättnings effekter ignoreras blir kurvan i figur 5.1 en rät linje med den konstanta lutningen 150 V per ampere fältström. I den här uppgiften kan vi bortse från mättnings effekter.

- a) Antag att fältströmmen hålls konstant på 1.67 A och beräkna motorns hastighet vid en axeleffekt på 0, 10 och 25 kW.
- b) Antag nu att fältströmmen kan justeras för att hålla motorns hastighet på 1200 rpm och beräkna den nödvändiga fältströmmen vid en axeleffekt på 0, 10 och 25 kW.



Figur 5.1: 1200 rpm magnetiseringskurva för likströmsgeneratoren i övning 5.2

Övning 5.3 (7.11)

En 250-V parallellkopplad DC-motor används som drivkälla med hastighet som kan variera mellan 0 och 2000 rpm. Hastigheter mellan 0 och 1200 rpm nås genom att styra ankarspänningen mellan 0 och 250 V medans fältströmmen hålls konstant. Hastigheter mellan 1200 och 2000 rpm nås genom att sänka fältströmmen medans ankarspänningen hålls konstant på 250 V. Över hela hastighetsintervallet är lastmomentet konstant.

- Skissa en graf som visar ankarspänningen som funktion av hastigheten över hela intervallet. Bortse från förluster och ankarreaktionen.
- Antag att istället för att lasta motorn med ett hastighetsoberoende moment så justeras lasten (momentet) så att ankarströmmen hålls på sitt märkvärde. Skissa en graf som visar momentet som funktion av hastigheten för detta lastfall.

Övning 5.4 (7.15)

En 150-kW, 600-V, 600-rpm serielindad likströmsmotor avsedd för ett tåg har en kombinerad fält- och ankarresistans (inklusive borstar) på 0.125Ω . Fullastströmmen vid märkspänning och märkhastighet är 250 A. Magnetiseringskurvan vid 400 rpm är som följer:

Genererad emk, V	375	400	425	450	475
Seriefältström, A	227	260	301	350	402

Bestäm det interna startmomentet när startströmmen är begränsad till 460 A. Antag att ankarreaktionen är ekvivalent med en avmagnetiserande mmk som varierar med kvadraten på strömmen. (Tips: Den här uppgiften kan lösas endera grafiskt eller med hjälp av Matlabs 'spline'-kommando).

Övning 5.5 (7.13)

Betrakta en parallellkopplad likströmsmotor kopplad till en konstant spänningskälla och en last som bestående av konstant elektromagnetiskt moment. Visa att om $E_a > 0.5V_t$ (den normala situationen) ger ett ökande luftgapsflöde en minskande hastighet, medans om $E_a < 0.5V_t$ så (som kan vara fallet om vi sätter in ett stort motstånd i serie med ankarlindningen) så ger en ökning av luftgapsflödet en ökande hastighet.

Övning 5.6 (7.25)

Mätningar på en liten permanentmagnetiserad DC-motor visar en ankarresistans på 4.6Ω . Vid en ankarspänning på 5 V och utan last nås en hastighet på 11210 rpm medans ankarströmmen uppmäts till 12.5 mA.

- Beräkna motorns momentkonstant K_m uttryckt i V/(rad/s).
- Beräkna rotationsförlusterna vid noll last i mW.

Antag att motorn drivs med en ankarspänning på 5 V.

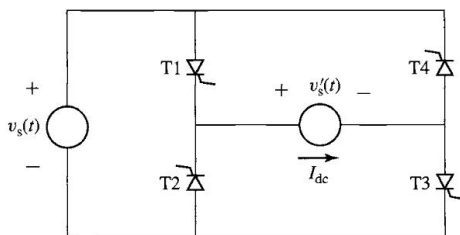
- Bestäm motorns startström och startmoment.
- Vid vilken hastighet uppnår motorn en uteffekt på 1 W? Uppskatta motorns effektivitet vid denna lastpunkt. Antag att rotationsförlusterna varierar med kubens på hastigheten.

Styrning av likströmsmaskinen

Övning 6.1 (10.13)

En 1-kW, 85-V permanentmagnetiserad DC-motor ska drivas med en fasstyrd helvågslikriktare enligt figur 6.1. När den körs obelastad vid märkspänning har den en hastighet på 1725 rpm och ankarresistansen $R_a = 0.82 \, \Omega$. En stor induktor ($L = 580 \, \text{mH}$) med resistansen $R_L = 0.39 \, \Omega$ kopplas in i serie med motorn för att reducera strömsvängningarna till motorn. Källan är en 115 V, 60 Hz sinusvåg. När motorn arbetar vid 1650 rpm uppmäts motor strömmen till 7.6 A.

- Beräkna motorns ineffekt.
- Beräkna aktiveringsfördröjningsvinkeln α_d för tyristorbryggan.



Figur 6.1: DC-motor driven via en fasstyrd helvågslikriktare för övning 6.1

Övning 6.2 (11.1)

En separatmagnetiserad likströmsmotor på 3-kW, 120-V, 1725-rpm uppnår hastigheten 1718 rpm då den körs obelastad med märkspänning och med en fältström på 0.70 A. Motorn har en ankarresistans på $145\text{ m}\Omega$ och en fältresistans på $104\ \Omega$. I detta problem kan vi anta att rotationsförlusterna är försumbara. Motorn driver en last vars moment är konstant 15.2 Nm i intervallet 1500-1800 rpm. Ankarspänningen är konstant 120 V och fältlindningen matas från samma 120-V likspänningskälla via en pulsbreddsmodulator. Hastigheten styrs genom att variera pulsbreddsmodulatorns tillslagstid.

- Beräkna den fältström som krävs för att köra denna motor med last vid 1800 rpm. Beräkna motsvarande tillslagstid för pulsbreddsmoduleringen.
- Beräkna den fältström som krävs för att köra denna motor med last vid 1500 rpm. Beräkna motsvarande tillslagstid för pulsbreddsmoduleringen.
- Plotta pulsbreddsmoduleringens tillslagstid som funktion av motorns hastighet för intervallet 1500-1800 rpm.

Övning 6.3 (11.8)

En 1100-W, 150-V, 3000-rpm permanentmagnetiserad DC-motor ska drivas med en strömkälla så att man får direkt kontroll över motorns moment. Motorns momentkonstant är $K_m = 0.465\text{ V}/(\text{rad/s})$, dess ankarresistans är $1.37\ \Omega$. Motorns rotationsförluster vid 3000 rpm är 87 W. Antag att rotationsförlusterna kan representeras av ett konstant förlustmoment.

- Beräkna märkankarströmmen för denna motor. Bestäm motsvarande mekaniska moment.
- Strömkällan ger en ström på 6.2 A till motorns ankarlindning då motorns hastighet uppmäts till 2670 rpm. Beräkna lastmoment och effekt.
- Antag nu att lastmomentet i del b. beror linjärt av hastigheten och att motorns och lastens sammanlagda tröghet är $2.28 \cdot 10^{-3}\text{ kg} \cdot \text{m}^2$. Beräkna motorns hastighet som funktion av tiden om ankarströmmen plötsligt ökas till 7.0 A.

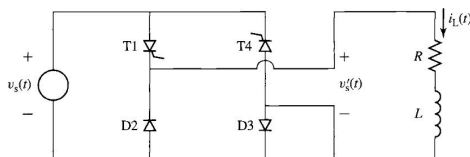
Övning 6.4 (11.9)

Den permanentmagnetiserade likströmsmotorn i övning 11.8 körs vid sin märkhastighet 3000 rpm och utan last. Om märkström plötsligt läggs på ankarlindningen i riktning så att motorn bromsas, hur lång tid tar det innan motorn når hastigheten 0 rpm? Motorns egen tröghet är $1.86 \cdot 10^{-3}\text{ kg} \cdot \text{m}^2$. Antag att vi inte har några rotationsförluster.

Övning 6.5 (10.10)

Betrakta den fasstyrda helvågsl rikriktaren som visas i figur 6.2. Låt $R = 5 \, \Omega$, $v_s(t) = V_0 \sin \omega t$ där $V_0 = 45 \, \text{V}$ och $\omega = 100\pi \, \text{rad/s}$, samt $\omega(L/R) \gg 1$ vilket betyder att induktansen kan ses som en ideal likströmskälla. Tyristorn T1 aktiveras vid tiden t_d , ($0 \leq t_d \leq \pi/\omega$) och tyristor T4 aktiveras exakt en halv cykel senare.

- Skriv ett uttryck för medel(DC)spänningen V_{dc} av spänningen $v'_s(t)$ över serieresistor/induktor kombinationen som funktion av fördröjningstiden t_d .
- Utnyttja att i stationäritet så är medelspänningen över induktansen noll och skriv ett uttryck för strömmen I_{dc} som funktion av fördröjningstiden t_d .
- Plotta I_{dc} som funktion av t_d för $0 \leq t_d \leq \pi/\omega$.
- Plotta drivströmmen (vid drivspänningen v_s) $i_s(t)$ för en cykel med $t_d = 3 \, \text{ms}$



Figur 6.2: Fasstyrd helvågsl rikriktare för övning 6.5

Övning 6.6 (11.4)

En parallellkopplad 15-kW, 240-V, 3000-rpm DC-motor har följande parametrar:

Fältresistans	$R_f = 132 \, \Omega$
Ankarresistans	$R_a = 0.168 \, \Omega$
Geometrisk konstant	$K_f = 0.422 \, \text{V}/(\text{A rad/s})$

Vid märkspänning och utan last drar den ankarströmmen 1.56 A.

- Beräkna hastigheten och rotationsförlusterna i detta fall.
- Antag konstanta rotationsförluster och att motorn körs vid märkspänning. Beräkna motorns hastighet vid uteffekterna 0, 5, 10 och 15 kW.
- Antag att ankarspänningen styrs för att hålla motorhastigheten konstant när en last läggs på motorn. I detta fall hålls fältspänningen konstant på 240 V. Beräkna den ankarspänning som krävs vid uteffekterna 0, 5, 10 och 15 kW, för att hålla en konstant hastighet på 2950 rpm.
- Antag nu att vi vill köra motorn med ankarspänningsstyrning och att fältlindningen är inkopplad parallellt med ankarlindningen. Upprepa del c) för detta fall. Är det möjligt att köra motorn på detta sätt? Varför skiljer sig resultatet från det i del c)?

Kapitel 7

Synkronmaskinen

Övning 7.1 (5.1)

En synkronmotors momentvinkel δ_{RF} vid märkspänning och märkfrekvens är 35 elektriska grader. Bortse från ankarresistans och läckreaktans. Om fältströmmen hålls konstant, hur påverkas momentvinkeln av följande förändringar i driftförhållandena:

- a) Frekvensen sänks med 10%, lastande moment och pålagd spänning hålls konstant.
- b) Frekvensen sänks med 10%, lastande effekt och pålagd spänning hålls konstant.
- c) Både frekvensen och spänningen sänks med 10%, lastande moment hålls konstant.
- d) Både frekvensen och spänningen sänks med 10%, lastande effekt hålls konstant.

Övning 7.2 (5.5)

En 460-V, 50-kW, 60-Hz trefas synkronmotor har en synkronreaktans på $X_s = 4.15 \Omega$ och en ömseinduktans på $L_{af} = 83 \text{ mH}$. Motorn arbetar vid märkspänning och med en ineffekt på 40 kW. Beräkna magnitud och fasvinkel för den genererade fasspänningen $\hat{E}_{af}$ och fältströmmen I_f om motorn arbetar vid (a) effektfaktor 0.85 induktiv, (b) effektfaktor 1, (c) effektfaktor 0.85 kapacitiv.

Övning 7.3 (5.10)

Följande mätningar är resultatet av tomgångs- och kortslutnings-prov på en 5000-kW, 4160-V, trefas, fyrapolsig, 1800 rpm synkronmotor som kördes vid märkvarvtal:

Fältström, A	169	192
Ankarström, kortslutningsprov, A	694	790
Linjespänning, tomgångsprov, V	3920	4160
Linjespänning, luftgapslinje, V	4640	5270

Ankarresistansen är $11\text{ m}\Omega/\text{fas}$. Ankarens läckreaktans är $0.42\text{ }\Omega/\text{fas}$. Bestäm (a) kortslutningskvoten (SCR), (b) den omättade synkronreaktansen uttryckt i ohm per fas och (c) den mättade synkronreaktansen uttryckt i ohm per fas.

Övning 7.4 (5.14)

Motorn i övning 7.3 har förlustdata enligt:

Järnförlusterna vid tomgångsprov med 4160V	37 kW
Friktion och lindningsförluster	46 kW
Fältlindningsresistans vid 75°C	$0.279\text{ }\Omega$

Beräkna uteffekt och effektivitet när motorn körs med märkt ineffekt, effektfaktor 1 och märkspänning. Antag att fältlindningen håller en temperatur på 125°C .

Övning 7.5 (5.17)

En 25-MVA, 11.5-kV synkronmotor används som synkronkondensator, enligt appendix D (del D.4.1). Generatorns kortslutningskvot är 1.68 och fältströmmen vid märkspänning, ingen last, är 420 A. Vid ett kortslutningsprov med samma fältström mättes ankarströmmen till 2108 A. Antag att generatormotorn kopplas direkt till en 11.5 kV källa.

a) Bestäm generatorns mättade synkronreaktans uttryckt i ohm per fas.

Fältströmmen ändras till 150 A

b) Beräkna ankarströmmens amplitud och fasvinkel relativt terminalspänningen.

c) Rita ett visardiagram som visar terminalspänning, inducerad spänning och ankarström.

d) Framstår synkronkondensatorn som induktiv eller kapacitiv för 11.5 kV-systemet i detta driftfall?

e) Upprepa del b. till d. för en fältström på 700 A.

Styrning av synkronmaskinen

Övning 8.1 (5.24)

En 145-MW, 13.8-kV, 60-Hz, trefas, 72-polig vattenkrafts-synkrongenerator arbetar i ett 13.8-kV-system. Under normal drift styrs denna generator av en automatiskt spänningsreglering som håller generatorns terminalspänning på 13.8 kV. I den här övningen ska vi undersöka vad som händer om operatören glömmer att starta spänningsregleringen och istället lämnar fältexciteringen konstant på AFNL, det värde som motsvarar märkspänningen för öppen krets. I denna övning bortser vi från effekten av utpräglade poler och antar att generatorm kan representeras av den mättade synkronreaktansen $X_s = 1.266 \Omega$.

- a) Om kraftsystemet representeras av ett oändligt starkt nät på 13.8 kV (dvs som en ideal spänningskälla) är det då möjligt att köra denna generator på full last? Om ja, - vilken effektvinkel δ motsvarar detta? Om nej, - vilken effekt kan uppnås?
- b) Upprepa nu del a) men representera kraftsystemet av en ideal spänningskälla på 13.8 kV i serie med en reaktiv impedans på $j0.14 \Omega$.

Övning 8.2 (11.10)

En 1100-kVA, 4600-V, 60-Hz, trefas, fyrpolig synkronmotor ska drivas med en trefas växelriktare med konstant V/Hz förhållande och varierbar frekvens klassad för 1250 kVA. Synkronmotorn har en synkronreaktans på 22.7 ohm per fas och når märkspänning (öppen krets) vid fältströmmen 85 A.

- a) Beräkna motorns märkhastighet i rpm.
- b) Beräkna motorns märkström.
- c) Beräkna den fältström som krävs för att köra med effektfaktor 1 när motorn arbetar vid märkspänning och märkhastighet och med en ineffekt på 1000 kW.

Ineffekten beror av hastigheten^{2.5} ($P_{in} \propto N^{2.5}$). Motorns fältström hålls konstant samtidigt som växelriktarens frekvens sänks så att motorn arbetar vid 1300 rpm.

- d) Beräkna växelriktarens frekvens och motorns ineffekt och effektfaktor.
- e) Beräkna den fältström som krävs för att återföra motorn till effektfaktor 1.

Övning 8.3

En elektriskt exciterad 4-polig trefas synkronmotor med märkvärdena 400-V, 50-kW, 50-Hz har synkronreaktansen $X_s = 4 \Omega$ och ömseinduktansen $L_{af} = 0.1$ H. Motorn körs vid märkspänning och märkfrekvens. De ovan nämnda parametrarna är angivna per ekvivalent Y-fas.

- a) Vilket varvtal håller motorn?
- b) Försumma alla resistanser och rita en ekvivalent krets.

Antag att motorn driver en last om 40 kW och att alla förluster kan försummas.

- c) Bestäm den magnetiseringsström som ger effektfaktor 1. Bestäm även fältströmmen för detta fall.
- d) Rita ett visardiagram med ankarkretsens spänningar vid effektfaktor 1.

Antag att motorn körs obelastad vid märkspänning och märkfrekvens samt att magnetiseringsströmmen väljs så att den inducerade spänningen blir 1.5 gånger så stor som märkspänningen.

- e) Rita ett visardiagram med ankarkretsens spänningar för detta driftfall samt beräkna ankarströmmen.
- f) Verkar motorn induktiv eller kapacitiv samt vad blir den ekvivalenta induktansen eller kapacitansen.

Kapitel 9

Asynkronmaskinen

Övning 9.1 (6.1)

Märkplåten på en 460-V, 50-hp, 60-Hz fyrpolig induktionsmotor visar att hastigheten vid märklast är 1755 rpm. Antag att motorn arbetar med märklast.

- a) Med vilken eftersläpning (slip) arbetar motorn?
- b) Vilken frekvens har rotorströmmarna?
- c) Vilken vinkelfrekvens har den av statorn genererade luftgapsflödesvågen, i förhållande till statorn? I förhållande till rotorn?
- d) Vilken vinkelfrekvens har den av rotorn genererade luftgapsflödesvågen, i förhållande till statorn? I förhållande till rotorn?

Övning 9.2 (6.4)

Linjära induktionsmotorer har föreslagits för en mångfald av applikationer inklusive höghastighetsmarktransporter. En linjärmotor baserad på induktionsmotorns principer består av ett fordon på ett spår. Spåret består av en utvecklad burlindning och fordonet, som är 4.5 m långt och 1.25 m brett, består av en utvecklad trefas, 12 polpars ankarlindning. Effekt vid 75 Hz matas till fordonet via armar från ett spår under marken.

- a) Vilken är fordonets synkronhastighet i km/h?
- b) Kommer fordonet nå denna hastighet? Förklara ditt svar.

- c) Vad är eftersläpningen när fordonet åker i 95 km/h? Vilken frekvens har spårströmmarna vid detta driftfall?
- d) Antag att styrsystemet styr magnituden och frekvensen på fordonets strömmar för att hålla konstant eftersläpning. Vilken frekvens håller ankarströmmarna när fordonet åker i 75 km/h? Vilken frekvens får strömmarna i spåret i detta driftfall?

Övning 9.3 (6.22)

Följande data gäller för en 125-kW, 2300-V, 60-Hz, trefas, fyrpolig burlindad induktionsmotor:

Statorresistans mellan fasanslutningar: 2.23Ω

Test utan last vid märkspänning och -frekvens:

Linjeström: 7.7 A
Trefas effekt: 2870 W

Test med låst rotor vid 15 Hz:

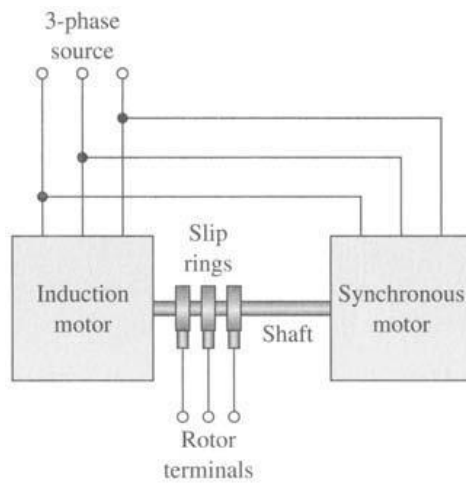
Linjespänning: 268 V
Linjeström: 50.3 A
Trefas effekt: 18.2 kW

- a) Beräkna rotationsförlusterna.
- b) Beräkna kretsparametrarna. Antag att $X_1 = X_2$.
- c) Beräkna statorströmmar, ineffekt, effektfaktor, uteffekt, hastigheten på motorn och effektivitet när motorn arbetar vid märkspänning och märkfrekvens samt en eftersläpning på 2.95%.

Övning 9.4 (6.8)

Ett system som det som visas i figur 9.1 används för att konvertera balanserad 50 Hz spänning till andra frekvenser. Synkronmotorn har fyra poler och driver den sammankopplade axeln medurs. Induktionsmotorn har sex poler och dess statorlindningar är kopplade för att ge ett moturs roterande fält (motsatt riktning mot synkronmaskinens rotation). Maskinen har lindad rotor med släpringsanslutningar.

- a) Vilken hastighet håller motorn?
- b) Vilken frekvens har spänningen från induktionsmotorns släpringar?
- c) Vilken frekvens får spänningen från induktionsmotorns släpringar om man byter plats med två faser i induktionsmotorns stator, och därmed ändrar rotationsriktning på induktionsmotorns statorfält?



Figur 9.1: Sammankopplade induktions- och synkronmaskiner för övning 9.4

Styrning av asynkronmaskinen

Övning 10.1 (11.21)

Betrakta en 460-V, 25-kW, 60-Hz, fyrfasig trefas induktionsmotor med följande ekvivalent-krets-parametrar uttryckt i Ω /fas, i statorreferens:

$$R_1 = 0.103 \quad R_2 = 0.225 \quad X_1 = 1.10 \quad X_2 = 1.13 \quad X_m = 59.4$$

Motorn ska köras med en variabel frekvens - konstant V/Hz-kvot styrning som ger 460-V vid 60-Hz. Bortse från rotationsförluster. Motorstyrningen är från början inställd på frekvensen 60 Hz.

- Beräkna motorns maxmoment och motsvarande eftersläpning samt motorns varvtal.
- Beräkna motorns moment vid en eftersläpning på 2.9% samt motsvarande uteffekt.
- Drivfrekvensen sänks nu till 35 Hz. Antag att lastmomentet hålls konstant och beräkna motorns hastighet. Beräkna motsvarande eftersläpning, hastighet och uteffekt.

Övning 10.2 (11.24 & 11.25)

En 150-kW, 60-Hz, 460-V, sexpolig trefas induktionsmotor med lindad rotor ger fullastmoment vid 1157 rpm när rotorn är kortsluten. Ett externt motstånd på $870 \text{ m}\Omega$ kopplas in i serie med varje fas i rotorn, vilket gör att motorn ger märkmoment vid 1072 rpm.

- a) Beräkna den ursprungliga motorns resistans per fas.
- b) Beräkna det externa rotormotstånd (som ersätter motståndet på $870\text{ m}\Omega$) som krävs för att hålla motorns varvtal på 850 rpm med en last motsvarande motorns märkmoment.

Övning 10.3 (11.27)

En 35-kW, 60-Hz, 440-V, sexpolig trefas induktionsmotor med lindad rotor avger märkeffekt vid 1169 rpm när den körs med märkspänning, märkfrekvens, samt släpringarna kortslutna. Det maxmoment den kan ge vid märkspänning och märkfrekvens är 245% av märkmomentet. Rotorlindningarnas resistans är $0.23\text{ }\Omega/\text{fas}$. Bortse från rotations- och tillsatsförluster (stray load losses).

- a) Beräkna rotorns I^2R -förlust vid märkeffekt.
- b) Beräkna motorns varvtal vid maxmoment.
- c) Hur stort motstånd ska man koppla in i serie med rotorlindningen för att få maximalt startmoment?

Motorn körs nu med en 50 Hz drivkälla med spänningen justerad så att, för varje givet moment, luftgapsflödesvägens amplitud blir detsamma som när motorn drivs med 60 Hz och ger samma moment.

- d) Beräkna 50 Hz-spänningen.
- e) Beräkna vid vilken hastighet motorn kommer att leverera samma moment som märkvärdet för 60 Hz och kortsluten rotor.

Övning 10.4

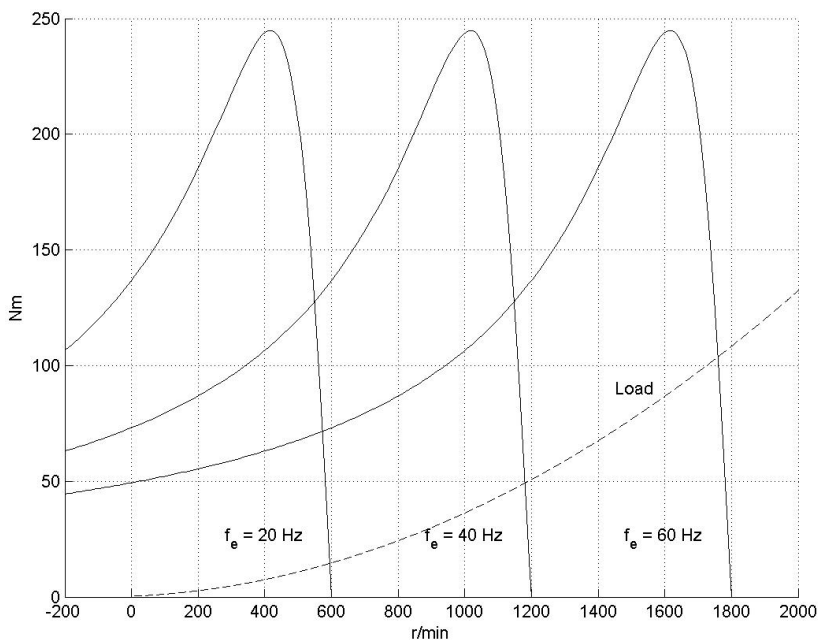
En fyrpolig trefas 460-V, 25-kW, 60-Hz induktionsmotor med följande ekvivalentkrets-parametrar uttryckt i Ω/fas (statorreferens)

$$R_1 = 0.0 \quad R_2 = 0.225 \quad X_1 = 1.10 \quad X_2 = 1.13 \quad X_m = 59.4$$

körs med konstant V/Hz. Den har då varvtals-moment karaktäristik enligt figur 10.1.

- a) Vilket varvtal kommer motorn att hålla om den drivs med 30 respektive 50 Hz utan last?
- b) Vilket varvtal kommer motorn att hålla om den drivs med 30 respektive 50 Hz med den last som visas i figuren?
- c) Vilket är motorns maximala startmoment, och vilken elektrisk frekvens (ungefär) ger detta moment?

- d) Vilket varvtal kommer motorn att hålla om den drivs med 40 Hz, med den last som visas i figuren, om linjespänningen halveras?
- e) Vilket varvtal kommer motorn att hålla om den drivs med 40 Hz, utan last, om antalet poler ökas till 8 stycken?



Figur 10.1: Varvtals-moment kurvor för induktionsmotorn i uppgift 10.4

Del II

Facit

Facit till Kapitel 1

Magnetiska kretsar och material

Övning 1.1 (1.1)

Antag att $A_g = A_c$. Detta ger

a)

$$R_c = 0 \quad [\text{A/Wb}]$$
$$R_g = \frac{g}{\mu_0 A_c} = 1.02 \cdot 10^6 \quad [\text{A/Wb}]$$

b)

$$\phi = \frac{Ni}{R_{tot}} = \frac{Ni\mu_0 A_c}{g} = 1.22 \cdot 10^{-4} \quad [\text{Wb}]$$

c)

$$\lambda = \frac{N^2 i}{R_{tot}} = 1.02 \cdot 10^{-2} \quad [\text{Wb}]$$

d)

$$L = \frac{N^2}{R_{tot}} = \frac{N^2 \mu_0 A_c}{g} = 6.8 \cdot 10^{-3} \quad [\text{H}]$$

Övning 1.2 (1.13)

$$L = \frac{N^2}{R_{tot}} = \frac{N^2}{\frac{l_c}{\mu_r \mu_0 A_c} + \frac{g}{\mu_0 A_g}} = 0.0305 \quad [\text{H}]$$

Övning 1.3 (1.14)

a) Rms-värdet för spänningen blir

$$E_{max} = 2\pi f N A_c B_{c,max}$$

$$E_{rms} = \frac{E_{max}}{\sqrt{2}} = 19.2 \quad [\text{V}]$$

b)

$$I_{rms} = \frac{1}{\sqrt{2}} \frac{A_c (R_c + R_g) B_{c,max}}{N} = 1.67 \quad [\text{A}]$$

$$W_{max} = \frac{1}{2L} \lambda^2 = \frac{L}{2} i_{max}^2 = \frac{N^2}{2R_{tot}} i_{max}^2 = 85 \cdot 10^{-3} \quad [\text{J}]$$

Övning 1.4 (1.22)

Låt flödet förbi första lindningen definieras som ϕ . Låt flödet förbi första och andra luftgapet definieras som ϕ_1 respektive ϕ_2 .

a)

$$\begin{aligned}
\phi_1 &= \frac{N_1 I_1}{R_1} = \frac{A_1 \mu_0 N_1 I_1}{g_1} \\
\phi_2 &= \frac{N_1 I_1}{R_2} = \frac{A_2 \mu_0 N_1 I_1}{g_2} \\
B_1 &= \frac{\mu_0 N_1 I_1}{g_1} \\
B_2 &= \frac{\mu_0 N_1 I_1}{g_2} \\
R &= \frac{R_1 R_2}{R_1 + R_2} \\
\phi &= \frac{N_1 I_1}{R} \\
\lambda_1 &= N_1 \phi = \frac{N_1^2 I_1}{R} = N_1^2 I_1 \mu_0 \left(\frac{A_1}{g_1} + \frac{A_2}{g_2} \right) \\
\lambda_2 &= N_2 \phi_2 = \frac{N_1 N_2 I_1}{R_2} = N_1 N_2 I_1 \frac{\mu_0 A_2}{g_2}
\end{aligned}$$

b)

$$\begin{aligned}
\phi_1 &= 0 \\
\phi_2 &= \frac{N_2 I_2}{R_2} = \frac{A_2 \mu_0 N_2 I_2}{g_2} \\
\phi &= \phi_2 = \frac{N_2 I_2}{R_2} \\
B_1 &= 0 \\
B_2 &= \frac{\mu_0 N_2 I_2}{g_2} \\
\lambda_1 &= N_1 \phi_2 = \frac{N_1 N_2 I_2}{R_2} = N_1 N_2 I_2 \frac{\mu_0 A_2}{g_2} \\
\lambda_2 &= N_2 \phi_2 = \frac{N_2^2 I_2}{R_2} = N_2^2 I_2 \frac{\mu_0 A_2}{g_2}
\end{aligned}$$

c)

$$\begin{aligned}
\phi_1 &= \frac{N_1 I_1}{R_1} = \frac{A_1 \mu_0 N_1 I_1}{g_1} \\
\phi_2 &= \frac{N_1 I_1 + N_2 I_2}{R_2} = A_2 \mu_0 \frac{N_1 I_1 + N_2 I_2}{g_2} \Rightarrow \\
\phi &= \frac{N_1 I_1}{R_1} + \frac{N_1 I_1 + N_2 I_2}{R_2} \\
B_1 &= \frac{\mu_0 N_1 I_1}{g_1} \\
B_2 &= \mu_0 \frac{N_1 I_1 + N_2 I_2}{g_2} \\
\lambda_1 &= N_1 \phi = N_1^2 \left(\frac{1}{R_1} + \frac{1}{R_2} \right) I_1 + \frac{N_1 N_2}{R_2} I_2 = L_{1,1} I_1 + L_{1,2} I_2 \\
\lambda_2 &= N_2 \phi_2 = \frac{N_1 N_2}{R_1} I_1 + \frac{N_2^2}{R_2} I_2 = L_{2,1} I_1 + L_{2,2} I_2
\end{aligned}$$

d) Identifiering från c)-uppgiften ger

$$\begin{aligned}
L_{1,1} &= N_1^2 \left(\frac{1}{R_1} + \frac{1}{R_2} \right) \\
L_{1,2} &= \frac{N_1 N_2}{R_2} \\
L_{2,1} &= \frac{N_1 N_2}{R_2} \\
L_{2,2} &= \frac{N_2^2}{R_2}
\end{aligned}$$

Övning 1.5 (1.34)

$$\begin{aligned}
\phi &= B_m A_m = B_g A_g \Rightarrow \\
A_m &= A_g \frac{B_g}{B_m} = 2R\pi h \frac{B_g}{B_m} \Rightarrow \\
R_m &= \sqrt{2Rh \frac{B_g}{B_m}} = 2.86 \quad [\text{cm}] \\
F &= Ni = H_m l_m + H_g g = 0 \Rightarrow \\
h_m &= -g \frac{H_g}{H_m} = -g \frac{B_g}{\mu_0 H_m} = 2.7 \quad [\text{mm}]
\end{aligned}$$

Facit till Kapitel 2

Transformatorn

Övning 2.1 (2.4)

$I_{1,\text{rms}} = 1.6 \text{ [A]}$ och $V_{2,\text{rms}} = 40 \text{ [V]}$.

Övning 2.2 (2.9)

a)

$$\hat{I}_1 = \frac{V_1}{Z_1 + Z_m} = -j3.47 \text{ [A]}$$
$$\hat{V}_2 = \frac{N_2}{N_1} \hat{V}_2' = \frac{N_2}{N_1} \frac{\hat{V}_1 Z_m}{Z_1 + Z_m} = 2398 \text{ [V]}$$

b)

$$\hat{V}_1 = \hat{I}_{1,r} \left(Z_1 + \frac{Z_m \left(\frac{N_1}{N_2} \right)^2 Z_2}{Z_m + \left(\frac{N_1}{N_2} \right)^2 Z_2} \right) = j23.1 \text{ [V]}$$
$$\hat{I}_2 = \frac{\hat{V}_1 - \hat{I}_{1,r} Z_1}{Z_2'} \frac{N_1}{N_2} = 20.8 \text{ [A]}$$

Övning 2.3 (2.11)

a)

$$R'_2 = \left(\frac{N_1}{N_2}\right)^2 R_2 = \left(\frac{2400}{240}\right)^2 0.0068 = 0.68 \quad [\Omega]$$

$$X'_{l2} = \left(\frac{N_1}{N_2}\right)^2 X_{l2} = \left(\frac{2400}{240}\right)^2 0.078 = 7.8 \quad [\Omega]$$

$$R'_1 = \left(\frac{N_2}{N_1}\right)^2 R_1 = \left(\frac{240}{2400}\right)^2 0.68 = 0.0068 \quad [\Omega]$$

$$X'_{l1} = \left(\frac{N_2}{N_1}\right)^2 X_{l1} = \left(\frac{2400}{240}\right)^2 7.8 = 0.078 \quad [\Omega]$$

b) i)

$$\cos \theta = 0.85|_{\text{lagging}} \Rightarrow \theta = -31.8^\circ$$

$$\hat{V}_1 = 2422 + j164 \quad [\text{V}]$$

ii)

$$\cos \theta = 0.85|_{\text{leading}} \Rightarrow \theta = 31.8^\circ$$

$$\hat{V}_1 = 2208 + j182 \quad [\text{V}]$$

c)

effektfaktor	$\hat{V}_1$ [V]	V_1 [V]
0.6 induktiv	$2566 + 103j$	2568
1	$2417 + 195j$	2425
0.6 kapacitiv	$2254 + 131j$	2258

Övning 2.4

Märkningen anger huvudspänningarna $V_{1,l-l} = 3800$ V och $V_{2,l-l} = 230$ V. Fässpänningarna är alltså

$$V_1 = V_{1,l-l}/\sqrt{3} = 2190 \quad [\text{V}]$$

$$V_2 = V_{2,l-l}/\sqrt{3} = 133 \quad [\text{V}]$$

Märkströmmarna ges av

$$I_1 = \frac{S}{n_{ph} V_1} = 15.2 \quad [\text{A}]$$

$$I_2 = \frac{S}{n_{ph} V_2} = 251 \quad [\text{A}]$$

där $n_{ph} = 3$.

Övning 2.5

a) Märkströmmen är

$$I_{1, rated} = \frac{S}{n_{ph} \frac{V_{1, rated}}{\sqrt{3}}} = 6.415 \text{ [kA]}$$

och fasspänningen $\hat{V}_1$ som ger denna ström är

$$\hat{V}_1 = (Z_1 + Z_\varphi // Z_2) \hat{I}_1 = 694 e^{j \cdot 1.53} \text{ [V]}$$

vilket ger huvudspänningen

$$V_{1, l-l} = \sqrt{3} V_1 = 1201 \text{ [V]}$$

b) Resistiv effektförlust i primärlindningarna:

$$P_1 = n_{ph} R_1 I_1^2 = 296 \text{ [kW]}$$

Resistiv effektförlust i sekundärlindningen kan beräknas genom att använda strömdelningsformeln:

$$P_2 = n_{ph} R_2' I_2'^2 = n_{ph} R_2' \left| I_1 \frac{Z_\varphi}{Z_\varphi + Z_2'} \right|^2 = 297 \text{ [kW]}$$

De resistiva förluster är $P_r = P_1 + P_2 = 593 \text{ kW}$.

Järnförlusten uppgår till

$$P_c = n_{ph} R_c \left| I_1 \frac{j X_m // Z_2'}{j X_m // Z_2' + R_c} \right|^2 = 1.16 \text{ [kW]}$$

Detta ger den totala förlusten på

$$P_{tot} = P_r + P_c = 594 \text{ [kW]}$$

Vid kortslutningsprov är strömmarna stora och spänningarna små i förhållande till märkdata. Detta ger att resistiva förluster dominerar och järnförlusten som är proportionellt mot spänningen i kvadrat små.

c) Om inspänningen $\hat{V}_1$ utgör riktfas så är linjeströmmen

$$\hat{I}_1 = \frac{\hat{V}_1}{|Z_1 + Z_\varphi|} = 60.5 e^{j 1.14} \text{ [A]}$$

d) De resistiva förlusterna är

$$P_r = P_1 = n_{ph} R_1 I_1^2 = 26.4 \text{ [W]}$$

Järnförlusterna blir

$$P_c = n_{ph} \frac{E_1^2}{R_c} = n_{ph} \frac{\left| V_1 \frac{Z_\varphi}{Z_1 + Z_\varphi} \right|^2}{R_c} = 587 \text{ [kW]}$$

Detta ger den totala förlusten på

$$P_{tot} = P_r + P_c = 587 \text{ [kW]}$$

I tomgångsfallet är strömmarna små och spänningarna stora i förhållande till märkdata. De resistiva förlusterna är därför försumbara.

e) Verkningsgraden kan beräknas enligt

$$\eta = \frac{P_{ut}}{P_{in}} = \frac{P_{ut}}{P_{ut} + P_1 + P_2 + P_c} \quad (2.1)$$

Uteffekten ges av märkdata $P_{ut} = S = 150 \text{ [MW]}$.

Förlusten i sekundärlindningarna är

$$P_2 = n_{ph} R_2' I_2'^2 = 296 \text{ [kW]}$$

vilket är exakt samma som förlusterna i primärlindningarna i kortslutningsprovet.

Järnförlusten beräknas enligt

$$P_c = n_{ph} \frac{E_1^2}{R_c}$$

där

$$\hat{E}_1 = \hat{V}_2' + \hat{I}_2' Z_2' \quad (2.2)$$

vilket ger $P_c = 590 \text{ [kW]}$. Notera likheten med järnförlusterna i tomgångsprovet.

Förlusterna i primärlindningarna beräknas enligt

$$P_1 = n_{ph} R_1 I_1^2$$

där

$$\begin{aligned} \hat{I}_1 &= \hat{I}_\varphi + \hat{I}_2' \\ \hat{I}_\varphi &= \frac{\hat{E}_1}{Z_\varphi} \end{aligned}$$

och $\hat{E}_1$ beräknas enligt ekvation (2.2). Detta ger att $P_1 = 298 \text{ [kW]}$. Detta värde överensstämmer väl med P_1 i kortslutningsprovet.

Total förlust är $P = P_1 + P_2 + P_c = 1.185 \text{ [MW]}$. Ofta approximeras denna förlust med summan av de totala förlusterna i tomgångsprovet och kortslutningsprovet som alltså skulle ge

$$P \approx 0.594 + 0.587 = 1.181 \text{ [MW]}$$

Vid insättning av de beräknade effekterna i ekvation (2.1) bestäms verkningsgraden till $\eta = 99.2\%$.

b) Verkningsgraden kan tecknas

$$\begin{aligned}\eta(I_2', p) &= \frac{V_2' I_2' \cos \theta}{V_2' I_2' \cos \theta + P_c + P_r (I_2' / I_{1, \text{rated}})^2} = \\ &= \frac{V_2'}{\underbrace{V_2' + \frac{1}{\cos \theta} \left(\frac{P_c}{I_2'} + P_r \frac{I_2'}{I_{1, \text{rated}}^2} \right)}_{=\alpha}}\end{aligned}$$

Verkningsgraden antar sitt största värde då $\alpha > 0$ antar sitt minsta värde. Detta sker då $\cos \theta = 1$ och

$$\frac{P_c}{I_2'} + P_r \frac{I_2'}{I_{1, \text{rated}}^2}$$

antar sitt minimum för $I_2' \geq 0$. Detta sker för

$$I_{2, \text{opt}}' = \sqrt{\frac{P_c}{P_r}} I_{1, \text{rated}}' = 6.39 \text{ [kA]}$$

vilket kan jämföras med $I_{1, \text{rated}}' = 6.415 \text{ kA}$. Slutsatsen är att för en väl designad transformator så maximeras verkningsgraden då lasten har effektfaktor 1 och drar transformatorns märkeffekt.

Övning 2.6 (2.15)

a)

$$\begin{aligned}P_{sc} &= R_{eq} I_{sc}^2 \Rightarrow \\ R_{eq} &= \frac{P_{sc}}{I_{sc}^2} = 4.79 \text{ [m}\Omega\text{]} \\ |Z_{sc}| &= \frac{V_{sc}}{I_{sc}} = \sqrt{R_{eq}^2 + X_{eq}^2} \Rightarrow \\ X_{eq} &= \sqrt{\left(\frac{V_{sc}}{I_{sc}}\right)^2 - R_{eq}^2} = 0.108 \text{ } [\Omega] \\ Z_{eq} &= R_{eq} + jX_{eq} = 0.0048 + j0.108 \text{ } [\Omega]\end{aligned}$$

b) Transformer till högspänningssidan ger:

$$\begin{aligned}Z_{eq, h} &= \left(\frac{N_h}{N_l}\right)^2 Z_{eq, l} = \left(\frac{78}{8}\right)^2 (0.0048 + j0.108) = 0.46 + j10.2 \text{ } [\Omega] \\ Z_{eq, h} &= R_{eq, h} + jX_{eq, h} = 0.46 + j10.2 \text{ } [\Omega]\end{aligned}$$

c)

$$\begin{aligned}
R_c &= \frac{V_{oc}^2}{P_{oc}} = 310.7 \quad [\Omega] \\
\frac{1}{Z_{oc}} &= \frac{1}{R_c} + \frac{1}{jX_m} \Rightarrow \\
\left| \frac{I_{oc}}{V_{oc}} \right|^2 &= \left| \frac{1}{Z_{oc}} \right|^2 = \left| \frac{1}{R_c} - \frac{j}{X_m} \right|^2 = \frac{1}{R_c^2} + \frac{1}{X_m^2} \Rightarrow \\
X_m &= \sqrt{((V_{oc}/I_{oc})^{-2} - R_c^{-2})^{-1}} = 141.6 \quad [\Omega] \\
R_1 &= R_2' = \frac{R_{eq}}{2} \\
X_{l1} &= X_{l2}' = \frac{X_{eq}}{2}
\end{aligned}$$

d)

$$\begin{aligned}
\hat{V}_{2L} &= 8000 \quad [\text{V}] \\
\hat{I}_L &= \frac{50 \cdot 10^6}{8000} e^{j0} = 6250 \\
\hat{V}_{1L} &= \hat{V}_{2L} + \hat{I}_L Z_{eq} \\
\text{regulation} &= \frac{V_{1L} - V_{2L}}{V_{2L}} = 0.73\% \\
P_{loss} &= P_{wind} + P_{core} = P_{sc} + P_{oc} = 393 \quad [\text{kW}] \\
P_{out} &= 50 \quad [\text{MW}] \Rightarrow \\
\eta &= \frac{P_{out}}{P_{out} + P_{loss}} = 0.9922
\end{aligned}$$

e)

$$\begin{aligned}
\hat{V}_{2L} &= 8000 \quad [\text{V}] \\
\hat{I}_L &= \frac{50 \cdot 10^6}{8000} e^{j \arccos(0.9)} = 5625 + j2724 \\
\hat{V}_{1L} &= \hat{V}_{2L} + \hat{I}_L Z_{eq} \\
\text{regulation} &= \frac{V_{1L} - V_{2L}}{V_{2L}} = -3\% \\
P_{loss} &= P_{wind} + P_{core} = P_{sc} + P_{oc} = 393 \quad [\text{kW}] \\
P_{out} &= 0.9 \cdot 50 \quad [\text{MW}] \Rightarrow \\
\eta &= \frac{P_{out}}{P_{out} + P_{loss}} = 0.9913
\end{aligned}$$

Övning 2.7 (2.26)

Effektivvärdet av primärsidans linjeströmmen är

$$I'_2 = \frac{S}{n_{ph} V'_2} = \frac{324 \text{ MVA}}{3 \cdot (225 \text{ kV} / \sqrt{3})} = 831 \text{ [A]}$$

Den komplexa linjeströmmen är

$$\hat{I}'_2 = I'_2 e^{-j \arccos 0.93}$$

a) Om $X_{eq} = 11.7 \text{ } \Omega$ så är huvudspänningen

$$V_1 = \sqrt{3} |\hat{V}'_2 + j X_{eq} \hat{I}'_2| = 231.7 \text{ [kV]}$$

b) Om $Z = 0.11 + 2.2j \text{ } \Omega$ så är den ideala spänningskällans huvudspänning

$$V_1 = \sqrt{3} |\hat{V}'_2 + (Z + j X_{eq}) \hat{I}'_2| = 233.2 \text{ [kV]}$$

Facit till Kapitel 3

Elektromekaniska energiomvandlingsprinciper

Övning 3.1 (3.14)

$N = 450$ ger $i = 0.385$ [A], och $u = R \cdot i = 1.078$ [V].

Övning 3.2 (3.22)

a-b) $L_{ii,i=1,2} = \frac{N_i^2}{R_{tot}}$ samt $L_{12} = \frac{N_1 N_2}{R_{tot}}$.

c) $W'_{fld} = \frac{L_{11}}{2} i_1^2 + \frac{L_{22}}{2} i_2^2 + L_{12} i_1 i_2 = \frac{\mu_0 A g}{4g_0} (N_1 i_1 + N_2 i_2)^2$

d) $f_{fld} = -\frac{\mu_0 A g}{4g_0^2} (N_1 i_1 + N_2 i_2)^2$

Övning 3.3 (3.23)

a)

$$W'_{fld}(i_1, i_2, \theta) = \frac{1}{2} L_{11}(\theta) i_1^2 + L_{12}(\theta) i_1 i_2 + \frac{1}{2} L_{22}(\theta) i_2^2$$
$$T_{fld} = \left. \frac{\partial W'_{fld}}{\partial \theta} \right|_{i_1, i_2} = -2.1 \cdot 10^{-3} \sin(\theta) i_1 i_2 \quad [\text{Nm}]$$

med $i_{j=1,2} = \sqrt{2} I \sin(\omega t)$ fås

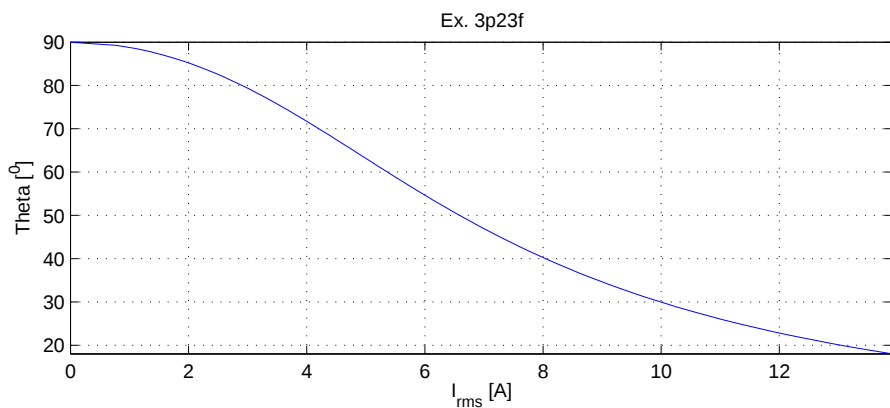
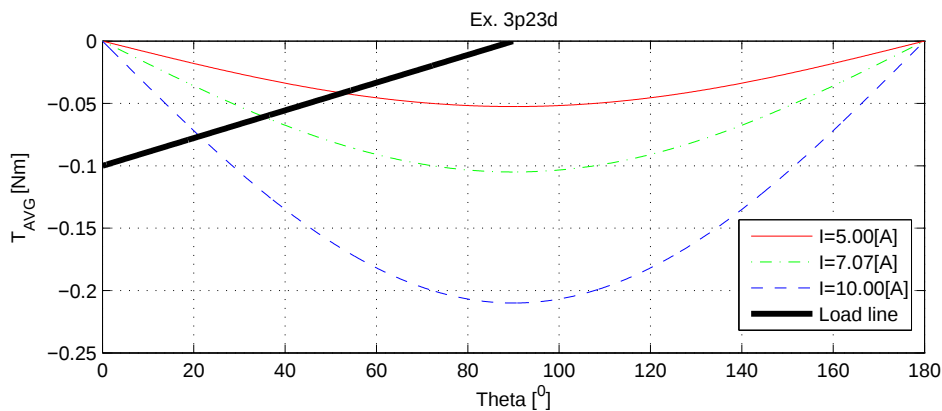
$$T_{fld} = -4.2 \cdot 10^{-3} \sin(\theta) I^2 \sin^2(\omega t) \quad [\text{Nm}]$$

b) Medelmomentet fås genom att integrera över ett jämnt antal perioder.

$$T_{fld,avg} = \frac{1}{T} \int_0^T T_{fld} dt = -2.1 \cdot 10^{-3} \sin(\theta) I^2 \quad [\text{Nm}]$$

c) $T_{fld,avg} = -2.1 \cdot 10^{-3} \cdot 1 \cdot 10^2 = -0.21 \quad [\text{Nm}]$

d) Tips: $7.07 \approx \frac{10}{\sqrt{2}}$



def)

Introduktion av roterande maskiner

Övning 4.1 (4.1)

- a) $w_m = 40\pi$ [rad/s]
- b) $f_e = 60$ [Hz], $w_e = 120\pi$ [rad/s]
- c) $n_m = 1000$ [rpm]

Övning 4.2

- a) **Fältlindningen** genererar med likström det huvudsakliga magnetfältet i motorn.

Ankarlindning är den lindning där den huvudsakliga energiomvandlingen sker. I ankarlindningen flyter växelström. I asynkronmotorfallet brukar endast den inkopplade statorlindningen benämnas ankarlindning.

- b)

	likströmsmaskin	synkronmaskin	asynkronmaskin
stator	fältlindning	ankarlindning	ankarlindning
rotor	ankarlindning	fältlindning	inducerad växelström

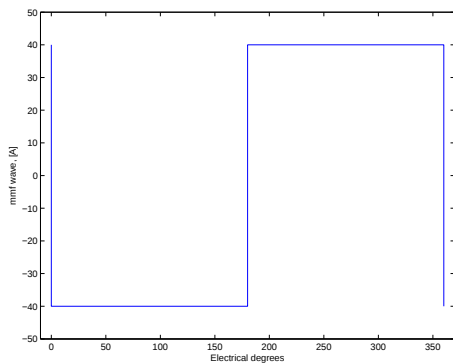
Övning 4.3 (4.4)

- a) Se figur 4.1.

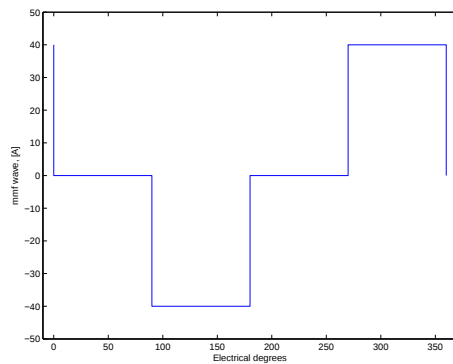
b) Se figur 4.2.

a) Se figur 4.3.

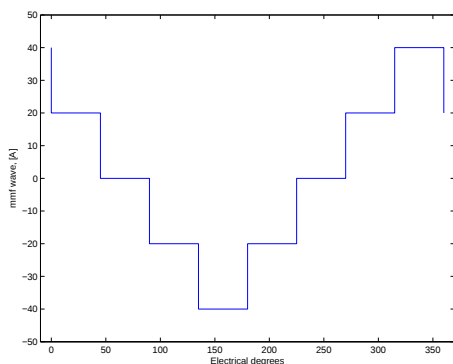
a) Se figur 4.4.



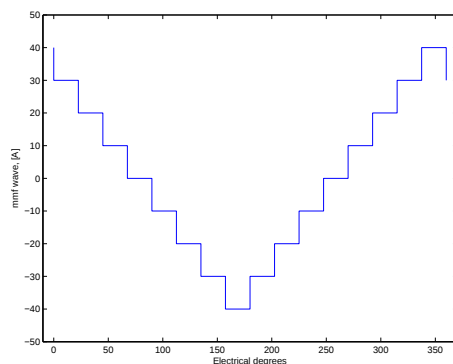
Figur 4.1: MMK-våg för uppgift 4.3a



Figur 4.2: MMK-våg för uppgift 4.3b



Figur 4.3: MMK-våg för uppgift 4.3c



Figur 4.4: MMK-våg för uppgift 4.3d

Övning 4.4 (4.6)

De kommer ändra riktning.

Övning 4.5 (4.13)

a) **Generellt utseende:**

$$e = \frac{d\lambda}{dt} = -\omega k_w N_{ph} B_{\text{peak}} l d \sin(\omega t - \theta_0) \approx -549 \sin(50 \cdot 2\pi t - \theta_0)$$

Tecken och fasning:

Beroende på strömriktning i rotor kan tecknet växla. Spänningen är dock noll då länkat flöde pekar - dvs t.ex. då $t = 0$. Alltså är $\theta_0 = 0$ i uttrycket ovan och vi får

$$e \approx \pm 549 \sin(50 \cdot 2\pi t)$$

Övning 4.6 (4.18)

a)

$$\begin{aligned}\Phi_p &= 10.8 \quad [\text{mWb}] \\ B_{\text{peak}} &= \frac{\Phi_p}{2lr} \approx 0.523 \quad [\text{T}]\end{aligned}$$

b)

$$I_f = 0.652 \quad [\text{A}]$$

c)

$$L_{af} = 0.693 \quad [\text{H}]$$

Övning 4.7 (4.21)

$$\begin{aligned}\mathcal{F}_{r,\text{peak}} &= \frac{4}{\pi} \frac{k_r N_r}{\text{poles}} I_{r,\text{max}} = 383.19 \quad [\text{A}] \\ T_{\text{peak}} &= - \left(\frac{\text{poles}}{2} \right) \left(\frac{\pi D l}{2} \right) B_{\text{peak}} F_{r,\text{peak}} \sin \delta_r = 16.08 \quad [\text{Nm}], \text{ för } \delta_r = -\frac{\pi}{2} \\ P_{\text{peak}} &= T_{\text{peak}} \omega_m = 6.06 \quad [\text{kW}]\end{aligned}$$

Övning 4.8 (4.22)

a)

$$\begin{aligned}W'_{fld}(i_a, i_b, i_f, \theta_0) &= \frac{1}{2} L_{aa} i_a^2 + \frac{1}{2} L_{bb} i_b^2 + \frac{1}{2} L_{ff} i_f^2 + L_{ab} i_a i_b + \dots \\ &\quad + M_{af} i_a i_f + M_{bf} i_b i_f = \\ &= (\text{const. terms w.r.t. } \theta_0) + M_{af} i_a i_f + M_{bf} i_b i_f = \\ &= (\text{const. terms w.r.t. } \theta_0) + M i_a i_f \cos \theta_0 + M i_b i_f \sin \theta_0 \\ T &= \frac{\partial W'_{fld}}{\partial \theta_0} \Big|_{i_a, i_b, i_f} = M i_f (i_b \cos \theta_0 - i_a \sin \theta_0)\end{aligned}$$

b)

$$T = 2MI_0^2(\cos \theta_0 - \sin \theta_0) = -2\sqrt{2}MI_0^2 \sin(\theta_0 - \pi/4)$$

c)

$$T = \sqrt{2}MI_f I_a \sin(\omega t - \theta_0) = \sqrt{2}MI_f I_a \sin \delta$$

d)

$$\begin{aligned}\lambda_a &= L_{aa}i_a + M \cos \theta_0 I_f = \sqrt{2}L_{aa}I_a \cos \omega t + MI_f \cos(\omega t - \delta) \\ \lambda_b &= L_{bb}i_b + M \sin \theta_0 I_f = \sqrt{2}L_{bb}I_b \sin \omega t + MI_f \sin(\omega t - \delta)\end{aligned}$$

$$\begin{aligned}v_a &= R_a i_a + e_a = R_a i_a + \frac{d\lambda_a}{dt} = \\ &= \sqrt{2}R_a I_a \cos \omega t - \sqrt{2}\omega L_{aa}I_a \sin \omega t - \omega MI_f \sin(\omega t - \delta) \\ v_b &= R_a i_b + e_b = R_a i_b + \frac{d\lambda_b}{dt} = \\ &= \sqrt{2}R_a I_a \cos \omega t + \sqrt{2}\omega L_{aa}I_a \cos \omega t + \omega MI_f \cos(\omega t - \delta)\end{aligned}$$

Facit till Kapitel 5

Likströmsmaskinen

Övning 5.1 (7.1)

Olastad: Innebär $I_a = 0$. Det vill säga $V_a = E_a$.

För resonemangen i uppgiften kan $\Phi_d \propto I_f$ antas. Relationerna

$$E_a = V_t - I_a R_a = V_t$$

$$\Phi_d \propto I_f \Rightarrow K_a \Phi_d = K_f I_f$$

$$E_a = K_a \Phi_d \omega_m = K_f I_f \omega_m$$

ger

$$K_f I_f \omega_m = V_t$$

- a) $\omega_m \propto V_t$.
- b) $\Phi_d \propto I_f$ vilket ger $\omega_m \propto \frac{1}{I_f}$.
- c) Om V_t ökar och $\Phi_d(I_f) = K_f I_f$ så är ω_m konstant. Om istället mätning tas med så kommer K_f inte vara konstant utan minska vilket ger att varvtalet ökar något med ökande spänning.

Övning 5.2 (7.6)

a)

$$E_a = \frac{V_a \pm \sqrt{V_a^2 - 4R_a P_{\text{shaft}}}}{2} = \text{Välj stort } E_a \text{ och lågt } I_a \Rightarrow$$
$$E_a = \frac{V_a + \sqrt{V_a^2 - 4R_a P_{\text{shaft}}}}{2}$$

Teckenvalet kan diskuteras och båda lösningarna ter sig rimliga. Dock ger lösningen med negativt tecken orimligt låga varvtal och stora förluster p.g.a. stort I_a .

$$n = \frac{1200}{150I_f} \frac{V_a + \sqrt{V_a^2 - 4R_a P_{\text{shaft}}}}{2}$$

P_{shaft} [kW]	n_m [rpm]
0	1198
10	1170
25	1126

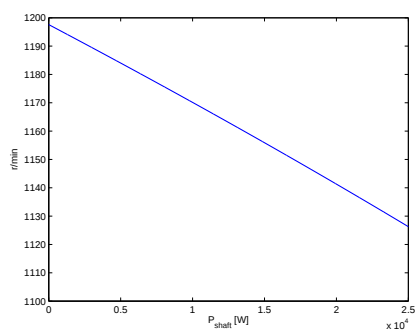
En graf över hur hastigheten ändras som för olika P_{shaft} ses i Figur 5.1(a)

b) Med ovanstående ekvationer fås följande

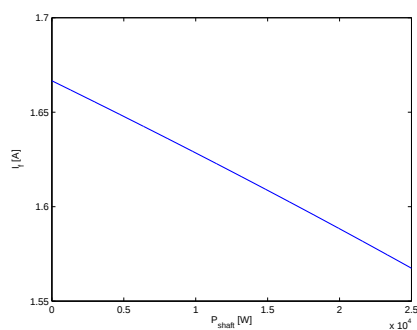
$$I_f = \frac{V_a + \sqrt{V_a^2 - 4R_a P_{\text{shaft}}}}{150 \cdot 2}.$$

P_{shaft} [kW]	I_f [A]
0	1.67
10	1.63
25	1.57

I_f som funktion av effekten ges i Figur 5.1(b).



(a) Hastigheten som funktion av effekten.



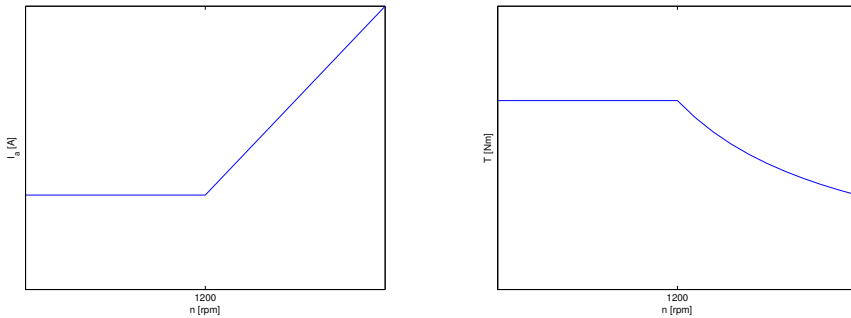
(b) Fältströmmen som funktion av effekten.

Figur 5.1: Lösningar till Övning 5.2.

Övning 5.3 (7.11)

a) Principiellt utseende enligt Figur 5.2(a).

b) Principiellt utseende enligt Figur 5.2(b)



(a) Principiellt utseende av I_a som funktion av n . (b) Principiellt utseende av T som funktion av n .

Figur 5.2: Lösningar till Övning 5.3

Övning 5.4 (7.15)

Använd $\Phi_d(I_{\text{eff}})$ med modellen $I_{\text{eff}} = I_{\text{net}} - f(I_a)$. Tabellen i boken ger $E_{a0}(I_{\text{eff}}) = K_a \Phi_d(I_{\text{eff}}) \omega_{m0}$ med $\omega_{m0} = 400 \frac{2\pi}{60}$

Börja med att beräkna $f(I_a)$ vid märkström, dvs $I_{\text{net}} = I_f = I_a = 250$ [A]. Då behövs E_a som fås enligt

$$E_a = V_a - I_a R_a = 600 - 250 \cdot 0.125 = 568.75 \text{ [V]}$$

Skala om E_a till $E_{a0} = 379$ [V] och använd tabellen i kursboken för att läsa av I_{eff} , dvs hur mycket fältström denna spänning skulle motsvarat utan ankarreaktion. $I_{\text{eff,spline}} = 232$ [A] alt. $I_{\text{eff,linear}} = 232.5$ [A]

$$\begin{aligned} I_{\text{eff}} &= I_{\text{net}} - f(I_a) \implies \\ f(I_a) &= 250 - 232 = 18 \text{ [A]} \text{ och } f(I_a) = k_{\text{AR}} I_a^2 \text{ enligt uppgiften} \implies \\ k_{\text{AR}} &= \frac{18}{250^2} = 288 \cdot 10^{-6} \end{aligned}$$

Använd sedan modellen för att räkna ut I_{eff} för startfallet enligt

$$\begin{aligned} I_a &= 460 \text{ [A]} \implies \\ I_{\text{eff}} &= 460 - k_{\text{AR}} 460^2 = 399 \text{ [A]} \end{aligned}$$

Med $T = K_a \Phi_d(I_{\text{eff}}) I_a$ kan nu startmomentet räknas ut. Vi har att $E_0(I_{\text{eff}}) = K_a \Phi_d(I_{\text{eff}}) \omega_{m0}$ så $T = \frac{E_0(I_{\text{eff}})}{\omega_{m0}} I_a$. $E_0(399) = 474$ [V] vilket ger

$$T = \frac{E_0}{\omega_{m0}} I_a = \frac{474}{400 \frac{2\pi}{60}} 460 = 5.2 \text{ [kNm]}$$

Övning 5.5 (7.13)

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

där T_{mech} har använts för att eliminera beroendet av I_a . Nu beror ω_m bara av Φ_d och V_a så vi kan enkelt derivera m.a.p. Φ_d utan att få in korsberoenden vilket ger

$$\frac{d\omega_m}{d\Phi_d} = \frac{V_a - 2E_a}{K_a \Phi_d^2}$$

Övning 5.6 (7.25)

a)

$$E_a = V_a - I_a R_a = 5 - 4.6 \cdot 12.5 \cdot 10^{-3} = 4.94 \text{ [V]}$$

$$K_m = \frac{E_a}{\omega_m} = 4.2 \cdot 10^{-3} \text{ [Vs/rad]}$$

b) Rotationsförlusterna beräknas enligt

$$P_{\text{rot}} = P_{nl} = E_a I_a = 61.7 \text{ [mW]} \Rightarrow$$

$$P_{\text{rot}} = P_{nl} \left(\frac{\omega_m}{\omega_{m0}} \right)^3 \text{ (enligt d)-uppgiften)}$$

c) $\omega_m = 0$ vilket ger $E_a = 0$. Detta ger

$$I_a = \frac{V_a}{R_a} = 1.09 \text{ [A]}$$

och motsvarande moment kan beräknas till

$$T = K_m I_a = 4.6 \text{ [mNm]}$$

d) Vi söker ω_m så att $P_{\text{out}} = P_{\text{mech}} - P_{\text{rot}} = 1 \text{ [W]}$.

$$E_a = K_m \omega_m \Rightarrow$$

$$I_a = \frac{V_t - K_m \omega_m}{R_a}$$

$$P_{\text{out}} = P_{\text{mech}} - P_{\text{rot}} = E_a I_a - P_{\text{rot}} \Rightarrow$$

$$P_{\text{out}} = K_m \omega_m \frac{V_t - K_m \omega_m}{R_a} - P_{nl} \left(\frac{\omega_m}{\omega_{nl}} \right)^3 \Rightarrow$$

$$\omega = [290, 889] \Rightarrow I_a = [821, 273] \text{ [mA]} \Rightarrow$$

$$P_{\text{in}} = V_a I_a = [4.12, 1.36] \text{ [W]}$$

Effektiviteten kan nu räknas ut enligt

$$\eta = \frac{P_{\text{out}}}{P_{\text{in}}} = [0.243 \text{ } 0.733] \text{ [-]}$$

Styrning av likströmsmaskinen

Övning 6.1 (10.13)

a) $P_{in} = I_a(E_a + I_a R_a) = 665 \text{ [W]}.$

b) $\alpha_d = 29.1^\circ$

Övning 6.2 (11.1)

a) Från tomgångsprovet fås

$$K_f = \frac{E_{a,nl}}{\omega_{m,nl} I_{f,nl}} = \frac{120}{1718 \cdot (2\pi/60) \cdot 0.7} = 0.953$$

Löser ut E_a ur

$$T = \frac{E_a I_a}{\omega_m}$$
$$V_a = E_a + I_a R_a$$

ger

$$E_a = 0.5 \left(V_a + \sqrt{V_a^2 - 4\omega_m T R_a} \right)$$
$$E_a = 0.5 \left(120 + \sqrt{120^2 - 4 \cdot 1800 \cdot (2\pi/60) \cdot 15.2 \cdot 0.145} \right) = 116.4 \text{ [V]}$$

Här väljs den ena lösningen på grund vi antar att spänningsfallet över resistansen R_a vara liten. Fältströmmen kan nu beräknas

$$I_f = \frac{T}{K_f I_a} = \frac{15.2}{0.953 \cdot 24.6} = 0.648 \quad [\text{A}]$$

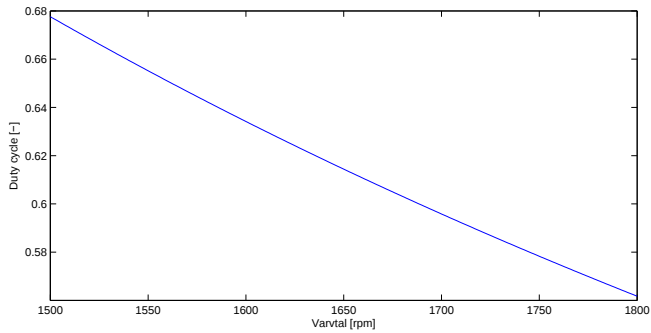
Fältspänningen och tillslagstiden kan nu beräknas enligt följande

$$\begin{aligned} V_f &= I_f R_f \\ V_f &= V_{dc} D \Rightarrow \\ D &= \frac{V_f}{V_{dc}} = \frac{I_f R_f}{V_{dc}} = 0.567 \end{aligned}$$

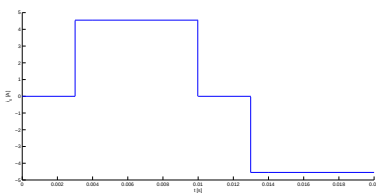
b) På samma sätt som i a) fås

$$\begin{aligned} I_f &= 0.782 \quad [\text{A}] \\ D &= 0.684 \end{aligned}$$

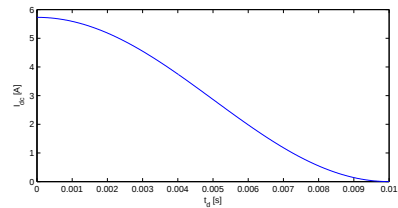
c) se figur 6.1.



Figur 6.1: Tillslagstid som funktion av varvtal i övning 6.2.



(a) Källströmmen i_s då $t_d = 3\text{ms}$



(b) Strömmen I_{dc} som funktion av t_d

Figur 6.2: Lösningar till övning 6.5.

Övning 6.3 (11.8)

a) Märkeffekten är den levererade uteffekten ger att

$$I_{a,rated} = \frac{P_{rated} + P_{rot}}{\omega_{m,rated} K_m} = \frac{1100 + 87}{(3000 \cdot 2\pi/60) \cdot 0.465} = 8.12 \quad [\text{A}]$$

$$T_{rated} = K_m I_{a,rated} = 3.78 \quad [\text{Nm}].$$

b)

$$T_{load} = K_m I_a - T_{rot} = K_m I_a - P_{rot}/\omega_{m0} =$$

$$= 0.465 \cdot 6.2 - 87/(3000 \cdot 2\pi/60) = 2.61 \quad [\text{Nm}]$$

$$P_{load} = T_{load} \omega_m = 2.61 \cdot (2670 \cdot 2\pi/60) = 729 \quad [\text{W}]$$

c)

$$J\dot{\omega}_m = T_{mech} - T_{rot} - T_{load}$$

$$T_{mech} = K_m I_a = 0.465 \cdot 7.0 = 3.26 \quad [\text{Nm}]$$

$$T_{rot} = 0.27 \quad [\text{Nm}]$$

$$T_{load} = 2.61 \frac{n}{2670} \quad [\text{Nm}]$$

Med $\omega = n \cdot 2\pi/60$ fås följande differentialekvation

$$\dot{n} + 4.094n - 12520 = 0$$

vilket ger

$$n = 3051 - 381e^{-4.094 \cdot t} \quad [\text{rpm}]$$

Övning 6.4 (11.9)

Från uppgift 11.8, $I_{a,rated} = 8.12 \quad [\text{A}]$. Motorn körs utan last, $T_{load} = 0$ samt försumma rotationsförlusterna, $T_{rot} = 0$ ger

$$J\dot{\omega}_m = T_{mech} = -K_m I_{a,rated}$$

som ger lösningen

$$\omega_m = \omega_{m,0} - \left(\frac{K_m I_{a,rated}}{J} \right) t$$

Motorn stannar efter

$$t = \frac{J\omega_{m,0}}{K_m I_{a,rated}} = \frac{1.86 \cdot 10^{-3} \cdot 3000 \cdot 2\pi/60}{0.465 \cdot 8.12} = 0.155 \quad [\text{s}]$$

Övning 6.5 (10.10)

a)

$$V_{dc} = \frac{V_0}{\pi}(1 + \cos(\omega t_d))$$

b)

$$I_{dc} = \frac{V_{dc}}{R} = \frac{V_0}{\pi R}(1 + \cos(\omega t_d)).$$

c) Se figur 6.2(b).

d) Se figur 6.2(a).

Övning 6.6 (11.4)

a)

$$\omega_m = \frac{E_{a,nl}R_f}{K_f V_t} = 312.5 \text{ [rad/s]} = 2984 \text{ [rpm]}$$

$$P_{rot} = E_{a,nl}I_{a,nl} = 374 \text{ [W]}$$

b)

$$P_{mech} = P_{out} + P_{rot} = E_a I_a$$

$$E_a = \frac{V_t + \sqrt{V_t^2 + 4R_a(P_{out} + P_{rot})}}{2} \text{ (Välj den lösning med lägst } I_a)$$

$$n_m = \frac{E_a R_f}{K_f V_t} \frac{60}{2\pi}$$

P_{out} [kW]	E_a [V]	n_m [rpm]
0	239.7	2984
5	236	2939
10	232.5	2894
15	228.7	2846

- c) I denna styrstrategi är spänning över fältlindningen konstant $V_f = 240$ V när man ändrar armaturspänningen V_a . Varvtalet på motorn är $n_m = 2950$ rpm. Detta ger

$$E_a = n_m K_f \frac{2\pi}{60} \frac{V_f}{R_f}$$

$$V_a = \frac{P_{out} + P_{rot}}{E_a} R_a + E_a$$

P_{out} [kW]	V_a [V]
0	237.2
5	240.8
10	244.4
15	247.9

- d) Skillnaden i denna deluppgift är att spänningen över fältlindningen varieras. Sambandet mellan spänningar och varvtalet ges nu av

$$E_a = n_m K_f \frac{2\pi}{60} \frac{V_a}{R_f}$$

vilket leder till att polspänningen kan beräknas enligt

$$V_a = \sqrt{\frac{(P_{rot} + P_{ut})R_a}{a - a^2}}, \text{ där}$$

$$a = \frac{n\pi K_f}{30R_f}$$

P_{out} [kW]	V_a [V]
0	71.7
5	271.7
10	377.5
15	459.6

När spänningen höjs ökas i detta fall magnetiseringen och detta leder till att spänningen måste vara högre än för motsvarande fall i c)-uppgiften för att behålla hastigheten. Märkspänningen överskrider kraftigt för de större effekterna varför det inte skulle vara möjligt att köra motorn på detta sätt under någon längre tid.

Facit till Kapitel 7

Synkronmaskinen

Övning 7.1 (5.1)

Uppgiften går alltså ut på att studera hur driftsvariablerna förändras för olika fall.

$$T \propto \frac{V_a \sin(\delta_{RF})}{f}$$

a) $\delta_{RF} = 31.1^\circ$

b) $\delta_{RF} = 35^\circ$

c) $\delta_{RF} = 35^\circ$

d) $\delta_{RF} = 39.6^\circ$

Övning 7.2 (5.5)

Tips: Relationen mellan huvudspänning och fasspänning är $U_H = \sqrt{3}U_F$

Vi har att:

$$P = 3V_a I_a \cos(\theta)$$
$$E_{af} = \left(\frac{\omega_e L_{af} I_f}{\sqrt{2}} \right)$$

a) $\hat{E}_{af} = 249 e^{-j56.8^\circ} \text{ [V]}, I_f = 11.3 \text{ [A]}$

b) $\hat{E}_{af} = 338 e^{-j38.1^\circ} \text{ [V]}, I_f = 15.3 \text{ [A]}$

c) $\hat{E}_{af} = 446 e^{-j27.8^\circ} \text{ [V]}, I_f = 20.2 \text{ [A]}$

Övning 7.3 (5.10)

a)

$$SCR = \frac{AFNL}{AFSC} = \frac{192}{169} = 1.136$$

b)

$$X_{s,u} = \frac{V_{a,ag}}{I_{a,sc}} = 3.9 \text{ } [\Omega \text{ per fas}]$$

c)

$$X_s = \frac{V_{a, rated}}{I'_a} = 3.04 \text{ } [\Omega \text{ per fas}]$$

Övning 7.4 (5.14)

Tips: Använd air-gap line, dvs $\frac{E_{af0}}{I_{f0}} = \frac{E_{af}}{I_f}$ med data från uppg. 5.10. Detta ger I_f till P_{Rf}

$$P_{\text{loss}} = P_{R_a} + P_{R_f} + P_{w, fric} + P_{core} = 120 \text{ [kW]}$$

$$P_{\text{out}} = P_{in} - P_{\text{loss}} = 4880 \text{ [kW]}$$

$$\eta = \frac{P_{\text{out}}}{P_{\text{in}}} = 97.6 \text{ } \%$$

Övning 7.5 (5.17)

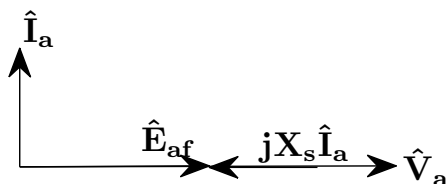
a)

$$X_s = \frac{V_{a, rated}}{I'_a} = 3.15 \text{ } [\Omega \text{ per fas}]$$

b)

$$\hat{I}_a = \frac{E_{af} - V_a}{jX_s} = 1.36 e^{j90^\circ} \text{ [kA]}$$

c) Se Fig. 7.1.



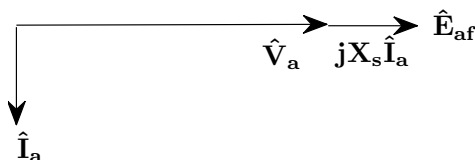
Figur 7.1: Fasdiagram, uppgift 7.5c. Figuren är ritad med strömmen positiv **ut** ur kretsen, dvs generatorfallet. Vi har alltså att $jX_s \hat{I}_a$ som är motriktad $\hat{E}_{af}$ skall dras bort från $\hat{E}_{af}$ för att bilda $\hat{V}_a$.

d) Induktiv, dvs strömmen ligger efter spänningen för en ekvivalent induktiv krets. Notera att för generatorfallet är strömmen definierad åt *fel* håll då den går ut ur kretsen och skenbart alltså ligger efter spänningen.

e)

e-b) $\hat{I}_a = 1.41e^{-j90^\circ}$ [kA]

e-c) Se fig Fig. 7.2



Figur 7.2: Fasdiagram, uppgift 7.5e. Figuren är ritad med strömmen positiv **ut** ur kretsen, dvs generatorfallet. Vi har alltså att $jX_s \hat{I}_a$ som är i samma riktning som $\hat{E}_{af}$ skall dras bort från $\hat{E}_{af}$ för att bilda $\hat{V}_a$.

e-d) Kapacitiv, dvs strömmen ligger före spänningen för en ekvivalent kapacitiv krets. Notera att för generatorfallet är strömmen definierad åt *fel* håll då den går ut ur kretsen och skenbart alltså ligger efter spänningen.

Styrning av synkronmaskinen

Övning 8.1 (5.24)

- a) Effektöverföringen sker enligt Figur 5.11 i kursboken med

$$P = \frac{3 \cdot E_1 E_2}{X_s} \sin(\delta) = \frac{3 \cdot V_{1-1}^2 / 3}{X_s} \sin(\delta) = \frac{V_{1-1}^2}{X_s} \sin(\delta) \implies \\ P_{max} \approx 150 \text{ [MW]} > P_{rated}$$

Där V_{1-1} är line-line spänningen. P_{rated} uppnås vid:

$$\delta = \sin^{-1} \left(\frac{P_{rated} X_s}{V_{1-1}^2} \right) \approx 74.6^\circ$$

- b) Skillnaden mot a) blir en extra impedans i serie, situationen är som i Figur 5.12 i kursboken med $X_{EQ} = 0.14 \text{ } [\Omega \text{ per fas}]$. Maxeffekten ges av:

$$P_{max} = \frac{3 \cdot E_1 E_2}{X_s + X_{EQ}} = \frac{V_{1-1}^2}{X_s + X_{EQ}} \approx 135 \text{ [MW]}$$

Märkeffekten kan alltså inte uppnås.

Övning 8.2 (11.10)

Givet: $S_{rated} = 1100 \text{ [kVa]}$, $V_{a,rated} = 4600/\sqrt{3} \text{ [V]}$, $f_{rated} = 60 \text{ [Hz]}$, poles = 4, AFNL = 85 [A], $X_s = 22.7 \text{ [ohm per fas]}$

a)

$$N = \frac{f \cdot 60}{\text{poles}/2} = 1800 \text{ [rpm]}$$

b)

$$I_{\text{rated}} = \frac{S_{\text{rated}}}{3V_{a,\text{rated}}} = \frac{1100 \cdot 10^3}{3 \cdot 4600/\sqrt{3}} \approx 138.6 \text{ [A]}$$

c) Vi söker I_f som ger $\cos \theta = 1$.

$$I_f = \frac{E_{\text{af}} \cdot \text{AFNL}}{V_{a,\text{rated}}} = 124.7 \text{ [A]}$$

d)

$$f_{\text{inv}} = 60 \frac{1300}{1800} = 43.33 \text{ [Hz]}$$

$$P_{\text{in}} \approx 443 \text{ [kW]}$$

Med $\hat{V}_a$ som vinkelreferens fås följande

$$\hat{I}_a = \frac{\hat{V}_a - \hat{E}_{\text{af}}}{jX_s} = 85e^{j25.4^\circ}$$

vilket betyder att vi har *power factor* $\cos \theta = 0.902$ *leading*.

e)

$$I_f = 101.8 \text{ [A]}$$

Övning 8.3

a) Varvtalet är

$$n = \frac{2}{p} f_e \cdot 60 = \frac{2}{4} \cdot 50 \cdot 60 = 1500 \text{ varv/min}$$

b) Se kursbokens figur 5.3 där resistansen i detta fall har försummats.

c) Eftersom effektfaktorn är 1 så kan I_a beräknas ur $P = 3V_a I_a$ till

$$I_a = \frac{P}{3V_a} = \frac{40000}{3 \cdot 400/\sqrt{3}} = 57.7 \text{ A}$$

Ansätt $\hat{V}_a = V_a$. Eftersom effektfaktorn är 1 så är strömmen $\hat{I}_a = I_a$. Den komplexa inducerade spänningen ges av

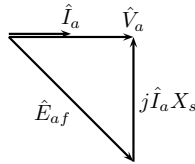
$$\hat{E}_{af} = V_a - jX_s I_a = V_a(1 - j) \text{ V}$$

Detta ger att $E_{af} = \sqrt{2}V_a = \sqrt{2/3} \cdot 400 = 327 \text{ V}$.

Fältströmmen ges av

$$I_f = \frac{\sqrt{2}E_{af}}{L_{af}\omega_e} = \frac{2 \cdot 400}{\sqrt{3} \cdot 4 \cdot 2\pi \cdot 50} = 14.7 \text{ A}$$

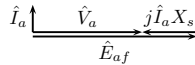
d) Figuren visar visardiagrammet:



e) Den inducerade spänningen är $E_{af} = 1.5V_a$ enligt förutsättning. Ansätt $\hat{V}_a = V_a$. Eftersom motorn är obelastad så innebär det att $\hat{E}_{af} = E_{af}$. Ankarströmmen är

$$\hat{I}_a = \frac{V_a - E_{af}}{jX_s} = -\frac{400}{2\sqrt{3} \cdot 4} = j\frac{400}{8\sqrt{3}} = j28.9 \text{ A}$$

Visardiagrammet är:



f) Eftersom strömmen fasmässigt är före spänningen så är kretsen kapacitiv. Kapacitansen C ges ur Ohms lag

$$\hat{V}_a = \frac{1}{j\omega_e C} \hat{I}_a$$

som

$$C = \frac{\hat{I}_a}{j\hat{V}_a\omega_e} = \frac{j\frac{400}{8\sqrt{3}}}{j\frac{400}{\sqrt{3}}\omega_e} = \frac{1}{8\omega_e} = \frac{1}{800\pi} = 398 \mu\text{F}$$

Facit till Kapitel 9

Asynkronmaskinen

Övning 9.1 (6.1)

- a) $n_s = \frac{f_e \cdot 60}{p/2} = 1800 \text{ [rpm]}$
 $s = \frac{n_s - n_m}{n_s} = 2.5\%$
- b) $f_r = s \cdot f_e = 1.5 \text{ [Hz]}$
- c) $\frac{f_e \cdot 60}{p/2} = 1800 \text{ [rpm]} (\approx 188 \text{ [rad/s]})$ m.a.p. statorn
 $\frac{f_e \cdot 60}{p/2} - n_m = 45 \text{ [rpm]} (\approx 4.71 \text{ [rad/s]})$ m.a.p. rotorn
- d) Rotorn producerar mmk som reaktion på statorns mmk och med vinkelskillnad $90^\circ + \theta$. Därav kommer fälten att rotera med synkron hastighet, d.v.s. samma svar som i c).

Övning 9.2 (6.4)

- a) $f_s = \frac{f_e}{p/2}$
 $v_s = f_s L \cdot 3.6 = 101.25 \text{ [km/h]}$
- b) Nej, vid asynkrondrift uppnås aldrig den synkrona hastigheten eftersom $T = 0$ vid $s = 0$.
- c) $s = \frac{v_s - v_m}{v_s} = 6.17\%$
 $f_r = s f_e = 4.63 \text{ [Hz]}$

d)

$$f_r = \frac{s}{1-s} \frac{v_m \cdot \text{poles}/2}{3.6L} = \frac{s}{1-s} \frac{75 \cdot 12}{3.6 \cdot 4.5} = 3.65 \text{ [Hz]}$$

$$f_e = \frac{f_r}{s} = 59.2 \text{ [Hz]}$$

Övning 9.3 (6.22)

Vi räknar per fas och resistansen är mätt över två fasanslutningar så $R_1 = 2.23/2 = 1.115 \text{ } [\Omega \text{ per fas}]$

Rating: $f = 60 \text{ [Hz]}$, $S_{\text{rated}} = 125 \text{ [kW]}$, $\text{poles} = 4$, $R_1 = 2.23/2 \text{ } [\Omega \text{ per fas}]$,
 $V_{a,\text{rated}} = \frac{2300}{\sqrt{3}} \text{ [V]}$

Tomgångsprov: $I_{nl} = 7.7 \text{ [A]}$, $P_{nl} = 2870 \text{ [W]}$, $V_{a,nl} = \frac{2300}{\sqrt{3}} \text{ [V]}$

Prov med låst rotor: $I_{bl} = 50.3 \text{ [V]}$, $P_{bl} = 18.2 \text{ [kW]}$, $V_{a,bl} = \frac{268}{\sqrt{3}} \text{ [V]}$

a) $P_{rot} = P_{nl} - 3I_{1,nl}^2 R_1 \approx 2671.7 \text{ [W]}$

b) Använd schemat från boken/formelsamlingen

1. Räkna ut $Q_{nl/bl}$ enligt $S = 3U_F I_L$ och $S^2 = P^2 + Q^2$

$$S_{nl} = \sqrt{3} \cdot 2300 \cdot 7.7 = 30.68 \text{ [kVA]}$$

$$S_{bl} = \sqrt{3} \cdot 268 \cdot 50.3 = 23.35 \text{ [kVA]}$$

$$Q_{nl} = \sqrt{S_{nl}^2 - P_{nl}^2} = 30.54 \text{ [kVAr]}$$

$$Q_{bl} = \sqrt{S_{bl}^2 - P_{bl}^2} = 14.63 \text{ [kVAr]}$$

2. Räkna ut motorparametrar enligt

$$X_{nl} = \frac{Q_{nl}}{n_{ph} I_{1,nl}^2} = 171.70, \quad X_{bl} = \frac{Q_{bl}}{n_{ph} I_{1,bl}^2} = 1.927 \frac{60}{15} = 7.71,$$

$$R_{bl} = \frac{P_{bl}}{n_{ph} I_{1,bl}^2} = 2.3978$$

3. Sätt in $k = 1$ och lös ut X_1 och X_2 enligt

$$X_2 = (X_{bl} - X_1) \frac{X_{nl} - X_1}{X_{nl} - X_{bl}}, \quad X_1 = X_2 \implies$$

$$X_1 = X_2 = X_{nl} \pm \sqrt{X_{nl}^2 - X_{nl} X_{bl}} = 3.90 \quad \text{ty den minsta roten ger rätt } X_m$$

4. Använd slutligen lösningen för att räkna ut de sökta storheterna

$$X_m = X_{nl} - X_1 = 167.8, \quad R_2 = (R_{bl} - R_1) \left(\frac{X_2 + X_m}{X_m} \right)^2 = 1.3431$$

c) Räkningar enligt ekvivalent krets och formelblad

$$n_s = \frac{2 \cdot 60f}{\text{poles}} = 1800 \text{ [rpm]}$$

$$n_m = (1 - s)n_s = 1747 \text{ [rpm]}$$

$$Z_{tot} = (R_1 + jX_1 + (R_2/s + jX_2)) // jX_m \approx 41.74 + 18.48j \approx 45.65e^{j23.9^\circ}$$

$$\hat{I}_1 = \frac{V_{a,\text{rated}}}{Z_{tot}} \approx 29.1e^{-j23.9^\circ} \text{ [A]}$$

$$\hat{I}_2 = \hat{I}_1 - \frac{\hat{V}_{a,\text{rated}} - \hat{I}_1 Z_1}{jX_m} \approx 27.5e^{-j9^\circ} \text{ [A]} \text{ (Strömdelning)}$$

$$P_{\text{gap}} = n_{ph} I_2^2 R_2 / s$$

$$P_{\text{mech}} = (1 - s) \cdot P_{\text{gap}}$$

$$P_{\text{shaft}} = P_{\text{mech}} - P_{\text{rot}} =$$

$$= n_{ph} I_2^2 R_2 \frac{1 - s}{s} - 2672 = 97.4 \text{ [kW]} (P_{\text{rot}} \text{ från del a})$$

$$P_{\text{in}} = n_{ph} V_{a,\text{rated}} \cdot I_1 \cos(\theta) = 106 \text{ [kW]}$$

$$\cos \theta = \cos(-23.9^\circ) = 0.914 \text{ lagging}$$

$$\eta = \frac{P_{\text{shaft}}}{P_{\text{in}}} = 91.9\%$$

Övning 9.4 (6.8)

a) Synkronmotor snurrar med den synkrona hastigheten:

$$n_m = \frac{f_e}{p_{sm}/2} \cdot 60 = \frac{50}{4/2} \cdot 60 = 1500 \text{ [rpm]}$$

b) Synkrona varvtalet för induktions/asynkron-maskinen är $n_{s,\text{im}} = \frac{60 \cdot f_e}{p_{\text{im}}/2} = 1000 \text{ [rpm]}$. Rotorn roterar med den synkrona frekvensen för synkronmaskinen $n_{s,\text{sm}} = \frac{60 \cdot f_e}{p_{\text{sm}}/2} = 1500 \text{ [rpm]}$ åt andra hållet.

$$f_r = \frac{n_{s,\text{im}} + n_{s,\text{sm}}}{n_{s,\text{im}}} f_e = 125 \text{ [Hz]}$$

c) På samma sätt fås $\frac{n_{s,\text{im}} - n_{s,\text{sm}}}{n_{s,\text{im}}} f_e = (-)25 \text{ [Hz]}$

Facit till Kapitel 10

Styrning av asynkronmaskinen

Övning 10.1 (11.21)

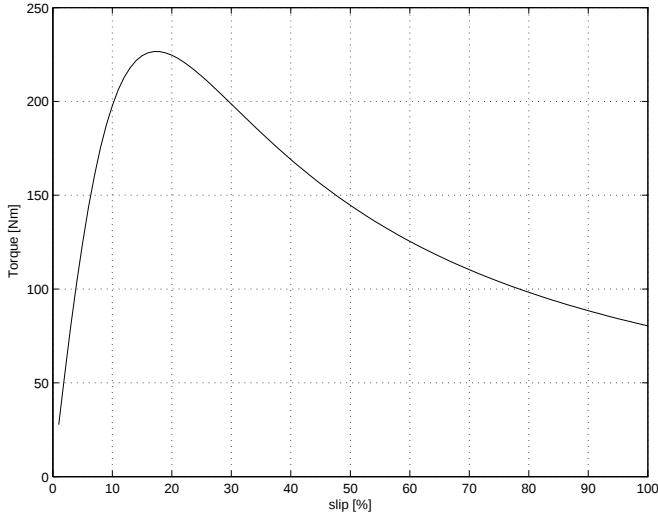
a)

$$\begin{aligned}\hat{V}_{1,eq} &= \hat{V}_1 \left(\frac{jX_m}{R_1 + j(X_1 + X_m)} \right) \Rightarrow V_{1,eq} = 260.75 \text{ [V]} \\ Z_{1,eq} &= R_{1,eq} + jX_{1,eq} = \frac{jX_m(R_1 + jX_1)}{R_1 + j(X_1 + X_m)} = 0.099 + j \cdot 108 \Rightarrow \\ T_{\max} &= 234 \text{ [Nm]}, \quad s_{\max T} = 10.2\%, \quad n_m = (1 - s)n_s = 1617 \text{ [rpm]}\end{aligned}$$

b)

$$\begin{aligned}\omega_m &= (1 - s)\omega_s = 183 \text{ [rad/s]} \\ T_{\text{mech}} &= 126 \text{ [Nm]} \Rightarrow \\ P &= T_{\text{mech}}\omega_m = T_{\text{mech}}(1 - s)\omega_s = 23.1 \text{ [kW]}\end{aligned}$$

- c) För ett exakt svar ska s lösas ut ur ekvation (6.33), med T_{mech} enligt b). Detta blir lite bökiga uttryck, så en bättre lösning är att plotta $T_{\text{mech}}(s)$ enligt ekvation (6.33). Resultatet ses i Figur 10.1, där lösningen med lågt slip är $s = 5.1\% \Rightarrow n_m = (1 - s)n_s = 997 \text{ [rpm]} \Rightarrow P = T_m\omega_m = 13.2 \text{ [kW]}$



Figur 10.1: Moment som funktion av slip, uppgift 10.1c.

Övning 10.2 (11.24 & 11.25)

- a) Det synkrona varvtalet och följaktligen eftersläpningen för de två fallen blir

$$n_s = \frac{f_{\text{rated}} \cdot 60 \cdot 2}{\text{poles}} = 1200 \text{ [rpm]}$$

$$s_{\text{case1}} = 0.0358$$

$$s_{\text{case2}} = 0.107$$

Eftersom $T_{\text{rated}} = T_{\text{mech}}(s_{\text{case1}}) = T_{\text{mech}}(s_{\text{case2}})$ och allt övrigt är konstant måste även faktorn R_2/s vara konstant:

$$\frac{R_2}{s_{\text{case1}}} = \frac{R_2 + R_{\text{ext}}}{s_{\text{case2}}} \Rightarrow R_2 = 0.44 \text{ } [\Omega \text{ per fas}]$$

- b) Eftersom $T_{\text{rated}} = T_{\text{mech}}(s_{\text{case1}}) = T_{\text{mech}}(s_{\text{case2}})$ och allt övrigt är konstant måste även faktorn R_2/s vara konstant:

$$\frac{R_2}{s_{\text{case1}}} = \frac{R_2 + R_{\text{ext}}}{s_{\text{case2}}} \Rightarrow R_{\text{ext}} = 3.14 \text{ } [\Omega \text{ per fas}]$$

Övning 10.3 (11.27)

Frekvens: $f_e = 60 \text{ [Hz]}$.

$$\text{a) } s_{\text{rated}} = s_r = \frac{n_s - n_m}{n_s} = 2.58\%, \quad P_{\text{rotor}} = P_{\text{rated}} \frac{s_r}{1 - s_r} = 928 \text{ [W]}$$

- b) Under antagandet att $R_1 = 0$ och med hjälp av uttryck för T_{mech} , T_{max} och s_{maxT} fås följande

$$\frac{T_{\text{mech}}}{T_{\text{max}}} = \frac{2s_{\text{maxT}}s_r}{s_{\text{maxT}}^2 + s_r^2} \Rightarrow s_{\text{maxT}} = s_r \left(\frac{T_{\text{max}}}{T_{\text{mech}}} + \sqrt{\left(\frac{T_{\text{max}}}{T_{\text{mech}}} \right)^2 - 1} \right) = 12.1\%$$

Vilket motsvarar en hastighet av $n_{\text{maxT}} = 1055$ [rpm].

- c) Eftersom R_2 inte ingår i uttrycket för maxmoment så blir det maximala startmomentet samma som det givna maxmomentet. Vi vill att detta moment erhålles för $s = 1$ och det enda som varierar i uttrycket för T_{mech} är s och $R_2 + R_{\text{ext}}$. Med $s_{\text{maxT,c}} = 1$ och $s_{\text{maxT,b}} = 0.121$ så får vi därför

$$\frac{R_2}{s_{\text{maxT,b}}} = \frac{R_2 + R_{\text{ext}}}{s_{\text{maxT,c}}} \Rightarrow R_{\text{ext}} = R_2 \left(\frac{1}{s_{\text{maxT,b}}} - 1 \right) = 1.67 \text{ } [\Omega \text{ per fas}]$$

- d) Konstant V/Hz justering ger att spänningen V_1 kommer att ändras om frekvensen ändras. $V_1 = V_{1,0} \frac{f}{f_0} = 211.7$ [V] (line-neutral).
- e) När hänsyn har tagits till skalning av storheter som beror på frekvensen och R_1 försummas så ges momentet av

$$T_{\text{mech}} = \frac{n_{ph} [(V_{1,eq})_0]^2 (R_2 / \Delta\omega)}{[(\frac{2\omega_{e0}}{\text{poles}})(R_2 / \Delta\omega)]^2 + [(X_{1,eq} + X_2)_0]^2}$$

Om $T_{\text{rated},60\text{Hz}} = T_{50\text{Hz}}$ ska stämma behöver $\Delta\omega$ vara lika. Detta ger att $n_{m,50\text{Hz}} = 969$ [rpm].

Övning 10.4

- a) $n_m(f_e = 30 \text{ Hz}) = 900 \text{ rpm}$, $n_m(f_e = 50 \text{ Hz}) = 1500 \text{ rpm}$
- b) $n_m(f_e = 30 \text{ Hz}) = 889 \text{ rpm}$, $n_m(f_e = 50 \text{ Hz}) = 1472 \text{ rpm}$
- c) $T_{\text{max}} = 245 \text{ Nm}$ vid $f_e \approx 6 \text{ Hz}$
- d) $n_m(V = 0.5V_0, f_e = 40 \text{ Hz}) = 1120 \text{ rpm}$
- e) $n_m(p = 8, f_e = 40 \text{ Hz}) = 600 \text{ rpm}$