

EXAMENSARBETE I ELEKTRISK EFFEKTOMVANDLING

Studium av övertonsförluster hos en asynkronmaskin
seriekopplad med en serieinduktor

Utfört av Staffan Canbäck

Handledare Tom Porteous

Inlämnat 1979-11-27

Godkänt

Examensarbetet har utförts vid Högeffektlaboratoriet
vid Centrala utvecklingsavdelningen, ASEA, Västerås.
Handledare var Tom Porteous.

Avsikten med arbetet var att studera en serieinduk-
tors inverkan på en omriktarmatad asynkronmaskins
driftförhållanden, med avseende på nedstämpling och
momentpulsationer och om möjligt finna en optimal
kombination av motor och induktor.

Beräkningarna har utförts med hjälp av datorprogram
som har tillämpats på en ASEA standardmotor, MBK
280 S-6, 75kW. Till ur detta erhållna data har lagts
ur laboratorieförsök framräknade uppgifter om järn-
förluster. Beräkningarna har sedan legat till grund
för en bedömning av hur stora förlustreduktioner som
erhålls för en viss induktorstorlek. Vid denna be-
dömning har även induktorns fysiska dimensioner be-
aktats.

Examensarbetet ger som resultat att i de fall då ut-
rymmet för motorn ej är begränsat, så finns det inte
ur förlustsynpunkt någon anledning att införa en se-
rieinduktor i systemet, eftersom summan av motor-
och induktorsvikt är i stort sett konstant. Om motor-
utrymmet är begränsat faller viktargumentet bort.
Det visar sig då att en serieinduktor med fördel kan
användas upp till en för varje induktans specifik
gränsfrekvens, för att reducera nedstämplingen av
momentet. Däremot bör induktorn kopplas ur när denna
frekvens överskrids. Detta minimerar nedstämplingen
vid höga frekvenser, men ökar momentpulsationerna.

Godkänt 3/12-79
Erik G. Törn

INNEHÅLLSFÖRTECKNING

1. INLEDNING

- 1.1 Allmänt
- 1.2. Matning
- 1.3 Nackdelar med PWM-matning
- 1.4 Åtgärder
- 1.5 Metoder

2. JÄRNFÖRLUSTER

- 2.1 Allmänt
- 2.2 Svårigheter vid analytisk bestämning av järnförluster
- 2.3 Metod
- 2.4 Tomgång utan serieinduktor
- 2.5 Tomgång med serieinduktor
- 2.6 Analys

3. MOTORN UNDER BELASTNING

- 3.1 Allmänt
- 3.2 Belastning utan serieinduktor
- 3.3 Förlusternas induktansberoende
- 3.4 Förlusternas frekvensberoende
- 3.5 Momentpulsationer
- 3.6 Viktberäkning

4. DISKUSSION

- 4.1. Procedurens möjligheter och begränsningar
- 4.2. Induktorns storlek vid fritt motorutrymme
- 4.3. Induktorns storlek vid begränsat motorutrymme
- 4.4 Litteraturförteckning

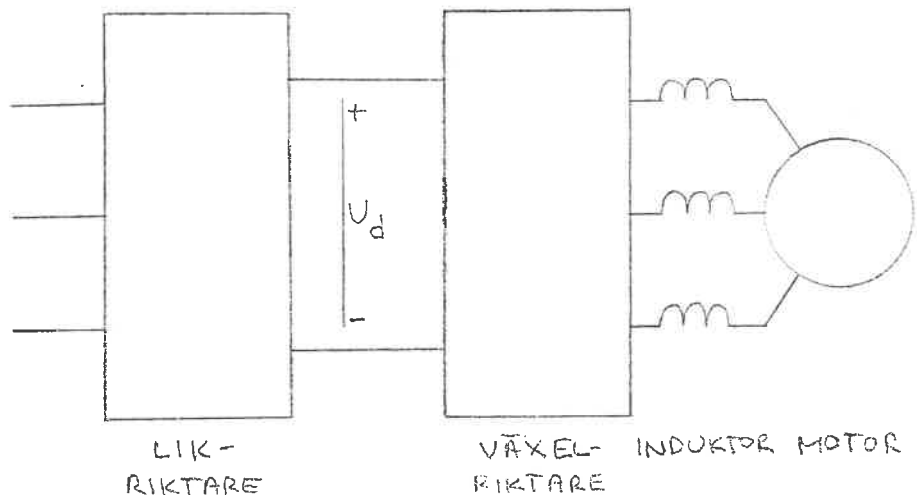
Bilagor

- 1. Diagram
- 2. Matningsspänningens utseende och fourieranalys
- 3. Beräkningsmodell
- 4. Programbeskrivning PWMIND
- 5. Beräkning av induktorstorlek
- 6. Typdata
- 7. Variabelförteckning

1. INLEDNING

1.1 Allmänt

Under senare år har en ny typ av motordrift vuxit fram och vållat stort intresse bland motortillverkare. Vid bland annat traktionsdrift har det visat sig att asynkronmaskiner med omriktarmatning på allvar har börjat konkurrera med den tyristorlikriktarmatade likströmsmotorn. Fördelarna är många; så är till exempel asynkronmotorn betydligt mer robust än likströmsmotorn, den kräver avsevärt mindre underhåll och klarar även svåra miljöer bättre. Dessutom kan ofta standardmotorer användas, vilket pressar priser och underlättar service. I takt med att priserna på tyristorer med hjälpelektronik har sjunkit har därför alternativet med omriktare och asynkronmotor blivit allt mer konkurrenskraftigt.



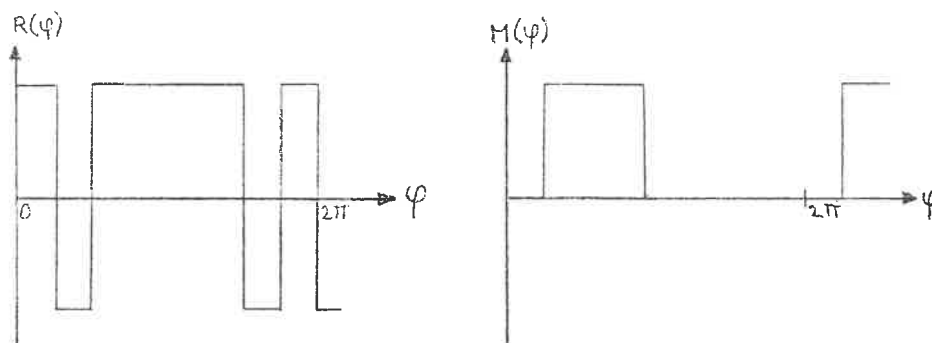
Figur 1

1.2 Matning

För att kunna mata en asynkronmotor med variabel frekvens kan omriktare av spännings- och strömtyp användas. I det här fallet har en omriktare av spänningstyp (voltage source inverter) utnyttjats.

Denna likriktar växelspänningen från nätet till en konstant mellanledningsspänning U_d (figur 1). En växelspanning erhålls sedan genom att mellanledningsspänningen hackas upp i tyristorbryggan och multipliceras med en modulations-spänning för att få variabel frekvens och amplitud (se bilaga 2).

Vid låga frekvenser görs upphackningen på ett sådant sätt att övertonsfördelningen ändras och femte och sjunde övertonen undertrycks, vilket har vissa fördelar ur driftsynpunkt (se punkt 3). Referens- och modulations-spänningen kan därför få ett utseende enligt figur 2.



Figur 2

Detta ger således en växelspänning av godtycklig frekvens och amplitud. Maximal grundtonsamplitud erhålls då modulationsspänningen är konstant, dvs hela referenssignalen släpps igenom, och begränsas av mellanledningsspänningen.

Denna typ av matning kallas PWM-matning (pulse width modulation), eftersom det är bredden på modulationspulserna, inte amplituden hos referenssignalen som avgör grundtonsspänningens storlek.

När omriktarens frekvens varieras från 0 till 50 Hz genomlöper den ett antal växlar (se bilaga 6). Vid förutbestämda frekvenser ändras matningsspänningens utseende så att en optimal matning hela tiden kan erhållas. I referensspänningen läggs hack in för att undertrycka de låga övertonen vid låga frekvenser och modulations-spänningens frekvens ändras så att den blir en multipel av sex gånger referenssignalens frekvens.

1.3

Nackdelar med PWM-matning

Omriktarsteget levererar en i stort sett fyrkantig spänning till motorn. Detta ger upphov till övertoner som i sin tur skapar extraförluster i rotor och stator (järn och koppar) utan att bidra med ett ökat moment. Följden härav blir att motorn får en nedstämpling i förhållande till drift med vanlig sinusmatning.

Ett annat problem är att den rika övertonshalten ger upphov till oönskade momentpulsationer kring belastningsmomentet, vilka särskilt vid låga frekvenser kan vara betydande. Momentpulsationerna kan vid t ex traktionsdrift ge upphov till slirning vid start.

De kan även skapa negativa moment som via motorn överförs till mekaniska kopplingar i systemet. De mekaniska påfrestningarna blir då stora, vilket betraktas som mycket allvarligt.

Av denna anledning hackas matningsspänningen så att femte och sjunde tonen undertrycks och de största pulsationerna försvinner. Man bör dock observera att endast en omfördelning har gjorts så att högre övertoners amplituder ökar när femte- och sjundetonsspänningen minskar. Ytterligare ett problem är att matningsspänningens utseende gör att motorn låter mycket illa.

1.4

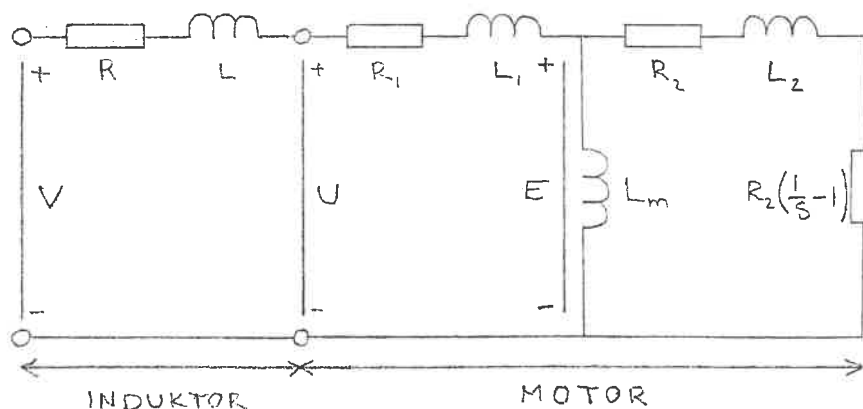
Åtgärder

Förutom den ovan nämnda omfördelningen av övertoner är en metod att minska övertonshalten i motorn att filtrera matningsspänningen. Här för läggs en serieinduktor in i de tre faserna mellan omriktaren och motorn, vilket kommer att minska övertonsamplituderna relativt grundtonen. Det är detta som studeras i föreliggande rapport.

1.5

Metoder

För att undersöka hur stora förlusterna och pulsationerna är, har fourieranlys av matningsspänningen tillämpats (se bilaga 2). Detta ger sedan, tillämpat på den vanliga maskinmodellen (figur 3) och med hänsyn tagen till strömförträngningsfenomen i rotorn, varje tons tillsats av kopparförluster, samt den totala momentpulsationen kring belastningsmomentet.



Figur 3

Dessa teorier är sammanställda i datorprogrammet PWMIND (pulsviddsmodulation med induktor, se bilaga 4). Till ur detta erhållna resultat har lagts de uppskattade järnförlusterna.

Allt detta sammantaget och tillämpat på en ASEA standardmotor (MBK 280 S-6, nr 7125 824) med forcerad kylning, tillsammans med en serieinduktor, har sedan legat till grund för en värdering och bedömning av vilken induktor som av elektriska, mekaniska och fysiska skäl, kan anses vara den, om än ej optimala, så ändå bästa lösningen på problemet. Dessa slutsatser dras för ifrågasvarande standardmotor, men kan även tillämpas på andra kombinationer av motor och induktor.

2. JÄRNFÖRLUSTER

2.1

Allmänt

Nedstämplingen hos motorn erhålls genom att de totala förlusterna i motorn bestäms. Med totalförluster kommer i fortsättningen summan av koppar- och järnförluster att avses, däremot tas ingen hänsyn till friktions- och tillsatsförluster. Till att börja med bestäms därför järnförlusterna ur tomgångsprov. Dessa läggs sedan till de vid belastning erhållna kopparförlusterna och nedstämplingen räknas fram (se Motorn under belastning).

2.2

Svårigheter vid analytisk bestämning av järnförluster

Att beräkna järnförlusterna analytiskt kan vara svårt. Förlusterna delas upp i två delar, hysteresförluster och virvelströmsförluster. Det gäller alltså att:

$$P_{fe} = P_v + P_h$$

$$P_h = k_h \cdot f \cdot B_{\max}^\lambda ; 1 < \lambda < 3$$

$$P_v = k_v \cdot \sigma \cdot d^2 \cdot f^2 \cdot B^2$$

(variabelförteckning i bilaga 7).

På grund av att de inbördes relationerna mellan P_v och P_h ej är kända, de ingående variablernas frekvens- och spänningsberoende är obekant och att superposition inte går att tillämpa, inses det att järnförlustberäkningar kan erbjuda vissa problem.

2.3

Metod

En alternativ metod är att mäta upp de tomgångsförluster som uppstår för olika frekvenser, och från dessa subtrahera de ur maskinmodellen beräknade värdena på kopparförlusterna då maskinen går i tomgång vad beträffar grundton (övertoner går samtidigt med eftersläpningen ett). De resterande förlusterna postuleras därefter som järnförluster. Denna metod ger åtminstone ett absolut maximum för järnförlusternas storlek.

2.4

Tomgång utan serieinduktor

De totala förlusterna (järn + koppar) har mätts upp på en ASEA standardmotor MBK 280 S-6 med forcerad kylning vid både PWM- och sinusmatning. Från totalförlusterna har sedan de ur datorprogrammet PWMIND beräknade kopparförlusterna dragits, vilket ger de resulterande järnförlusterna. I bilaga 1.1 har dels de totala förlusterna vid PWM-matning i tomgång, dels de framräknade järnförlusterna vid PWM- och sinusmatning, förts in som funktion av frekvensen. Den streckade linjen för PWM-järnförlusterna får ses som en trend. Vid dessa mätningar och beräkningar har grundtonens flöde varit detsamma vid PWM- och sinusdrift.

Total- och PWM-järnförlusternas våldsamma språng beror på de växlar som lagts in vid tio frekvenser (se inledning och bilaga 6) för att minska förlusterna. Att kopparförlusterna vid tomgång är så stora som nästan femtio procent av totalförlusten vid PWM-matning beror på extraförluster från övertonerna. Detta gör att man inte kan betrakta tomgångsförluster som järnförluster.

Övertonerna förklarar också varför förlusterna vid låga frekvenser inom en växel kan vara större än vid en hög frekvens; den relativa andelen övertoner (kvoten övertonsamplitud/grundtonsamplitud) är större.

För att kunna relatera dessa järnförluster till någonting har sinusjärnförlusterna tagits fram på motsvarande sätt (totalförlust - kopparförlust). Man finner vid en jämförelse att PWM-järnförlusterna är betydligt större än sinusförlusterna, återigen inverkar övertonerna. Slutatsen blir i det här fallet att PWM-förlusterna blir en ungefär konstant term, omkring 1 kW, större än vid sinusmatning, och att man därför framförallt vid lägre frekvenser får en mycket stor uppräknings av järnförlusterna (relativt sett).

2.5

Tomgång med induktor

Efter att ha studerat sambanden mellan tomgångsförlusterna vid PWM- och sinusmatning införs en serieinduktor i kretsen (enligt figur 3). Eftersom motorimpedansen domineras av reaktansen kommer induktorn inte att fungera som ett första ordningens lågpassfilter utan snarare som en länk i en spänningsdelning. Induktorn kommer att dämpa övertonsamplituden och förbättrar därigenom spänningens utseende vid motorklämmorna avsevärt (U). Denna förbättrade kurvform ger minskade övertonsförluster (både koppar och järn) vilket återspeglas i bilaga 1.1-1.3 som alla tre visar total- och järnförlusterna i tomgång som funktion av frekvensen för olika induktans.

Det visar sig att kopparförlusternas andel i de totala tomgångsförlusterna minskar avsevärt vid ökande induktorstorlek, men är fortfarande så stora som halva totalförlusten vid 0,21 pu (1 mH) och 10 Hz, (per unit-värdena relateras till motorns märkspänning och märkström, basimpedansen blir då $Z_B = 1,47$ och basinduktansen blir $L_B = 4,67$ mH enligt bilaga 6, kortslutningsreaktansen är ungefär 0,25 pu). Här har grundtonens spänningsfall över induktorn beaktats och en korrektionsterm införts mellan de olika kurvorna, så att de tre kurvorna är helt jämförbara (gäller även sinusmatningskurvan).

2.6

Analys

Att analytiskt ta fram järnförlusterna är alltså svårt, men man kan inskränka sig till att ur kurvan utan serieinduktor (bilaga 1.1) försöka ta fram kurvorna med induktor (bilaga 1.2-1.3). Om man studerar det ekvivalenta schemat för de olika tonerna, så finner man att i tomgång är eftersläpningen ungefär noll för grundtonen.

Detta medför att rotorresistansen blir mycket stor och den enda grundtonsström som flyter är magnetiseringsströmmen. Om statorresistansen försummas blir grundtonsströmmen på statorsidan:

$$I_{11} = (V_1 - E_1) / (X_1 + X)$$

$$E_1 = X_m \cdot I_{11}$$

$$I_{11} = V_1 / (X_1 + X_m + X)$$

Däremot är eftersläpningen betydligt större för övertonerna ($s \approx 1$). Rotorresistansen blir då låg och magnetiseringsreaktansen shuntas i stort sett bort av rotorimpedansen. Övertonsströmmarna på statorsidan blir lika med de på rotorsidan och om resistanserna försummas gäller:

$$I_{1\bar{o}} = I_{2\bar{o}} = V_{\bar{o}} / (X_1 + X_2 + X)$$

En jämförelse mellan fallen med och utan serieinduktor ger alltså att grundtonsströmmen reduceras en faktor

$$(X_1 + X_m) / (X_1 + X_m + X)$$

medan övertonsströmmen reduceras en faktor

$$(X_1 + X_2) / (X_1 + X_2 + X)$$

Eftersom X_m är betydligt större än X , X_1 och X_2 blir grundtonsreduktionen måttlig vilket medför att omriktarklämspänningens och motorklämspänningens grundton är ungefär lika, $V_1 \approx U_1$. För övertonerna är X , X_1 och X_2 jämförbara. Detta gör (spänningsdelning) att

$$U_{\bar{o}} \approx V_{\bar{o}} \cdot (X_1 + X_2) / (X_1 + X_2 + X)$$

Om övertonernas järnförluster kan anses vara proportionella mot övertonsspänningarnas kvadrat bör alltså nedanstående gälla:

$$P_{fe\bar{o}}(X) = P_{fe\bar{o}}(X=0) \cdot (X_1 + X_2)^2 / (X_1 + X_2 + X)^2$$

Tas skillnaden mellan totala järnförlusten och grundtonsjärnförlusten (sinusförlusten) och reduceras med denna faktor och prickas in ovanpå grundtonsjärnförlusten erhålls de prickade värdena i bilaga 1.2-1.3. Dessa överensstämmer som synes väl med de ur totalförlusten (i tomgång) framräknade värdena (kryss). (Dessa ideer påverkas ej av strömförträngningen eftersom denna är lika stor för respektive överton i de tre fallen.)

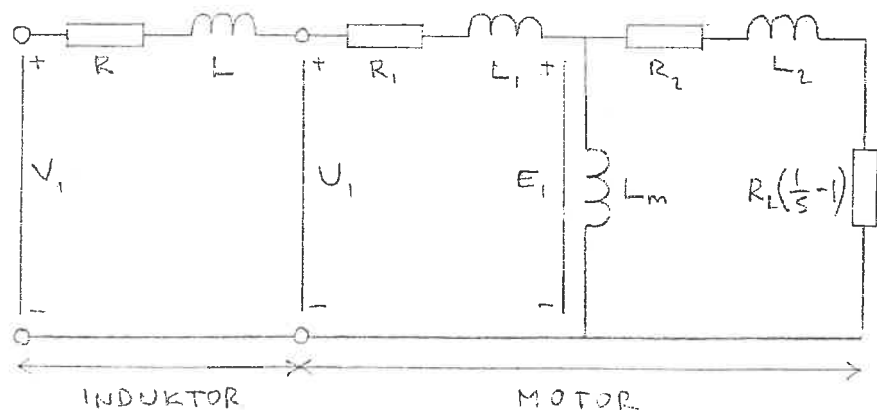
3. MOTORN UNDER BELASTNING

3.1 Allmänt

Hittills har förlusterna endast studerats under tomgång. För att komma fram till det praktiskt intressanta fallet belastas nu motorn. Eftersläpningen kommer då att öka och en ökad ström och effekt tas ut. Kopparförlusterna ökar och totalförlusterna (koppar och järn) kan, vid PWM-matning, uppgå till ca 10 kW för en motor vars märkeffekt är 75 kW.

De förluster som uppstår utöver förlusterna vid märklast och sinusmatning resulterar i en nedstämpling av motorn. Nedstämplingen medför att man måste ta ut mindre moment ur motorn för att hålla förlusteffekten nere, och större motorer krävs alltså för ett givet belastningsmoment. Om en serieinduktor läggs in i kretsen kan extraförlusterna minskas och nedstämplingsfaktorn förbättras.

Vid belastning blir inte spänningsfallet över induktorn försumbart (eftersom den ökade eftersläpningen ger en shuntning av magnetiseringsreaktansen även för grundtonen). Detta medför att det nu måste göras en avvägning mellan induktorns negativa spänningssänkande egenskaper och dess positiva dämpning av övertonsförlusterna i motorn. Väger man dessa mot varandra skulle man kunna finna en minimal förlust, om det inte vore så att medan förlusterna avtar med kvadraten på spänningen, så sjunker motorspänningen linjärt. En så stor induktans som möjligt blir därför lämplig vid obegränsad tillgång på spänning och utrymme, för att minska nedstämplingen i en given motor.



Figur 4

3.2

Belastning utan serieinduktor

Till att börja med studeras de allmänna förhållandena när motorn inte matas via en serieinduktor. Med hjälp av datorprogrammet har kopparförlusterna räknats fram för två olika fall. Dels då matningsspänningens V (här lika med U) grundton V_1 har låtits vara direkt proportionell mot frekvensen. Dels då flödet har hållits konstant. Det senare innebär att spänningen E_1 (se figur 4) måste variera linjärt med frekvensen eftersom

$$E_1 \sim j\omega \Psi_1 \sim j\omega \phi_1.$$

Att det första fallet inte ger konstant flöde beror på att vid låga frekvenser blir resistanserna jämförbara med reaktanserna och E_1 blir då inte en enkel ickefasvriden linjär funktion av V_1 längre.

I bilaga 1.4, figur 1 syns effekten av detta. Figuren visar de totala förlusterna i motorn vid konstant moment (700 Nm) som funktion av frekvensen. Kurva A representerar det första fallet med omriktarklämspänningens grundton $V_1 = k f$. På motsvarande sätt har sinusfallet beräknats och a-kurvan erhållits. I fallet A blir nedstämplingen (bilaga 1.4, figur 2) $\xi = 1 - M/M_n$ mycket stor. Eftersom $M \sim I$ och $P_{cu} \sim I^2$ blir $\xi = \sqrt{1 - P_{cu0}/P_{cu}}$. Nedstämplingen blir, med utgångspunkt från detta, som störst vid låga frekvenser, vid PWM-matning ($\xi = 18\%$ vid 11 Hz). Här har beräkningarna grundats på antagandet att den forcerade kylningen gjort att alla förluster effektivt kunnat ledas bort, oberoende av varvtalet. I verkligheten har detta visat sig svårt att utföra, varför en ytterligare korrektionsterm måste införas för att ta hänsyn till denna effekt.

Hålls flödet konstant blir förhållandena annorlunda. Då minskar sinusförlusterna vid låga frekvenser eftersom kopparförlusterna är konstanta ($\emptyset = \text{konstant} \Rightarrow I = \text{konstant}$) och järnförlusterna avtar med frekvensen (kurva b). I PWM-fallet fås ett förlustmaximum kring 30 Hz (kurva B) och nedstämplingen blir ca 14 %.

Man kan alltså notera att nedstämplingen kan variera mellan ca 8 och 14 % vid PWM-drift och konstant flöde, och att förlusterna är som störst vid 30 Hz.

3.3

Förlusternas induktansberoende

För att studera hur induktorn påverkar förlusterna vid en given frekvens har bilaga 1.5 framtagits. Här har belastningsmomentet varit 700 Nm och frekvensen 30 Hz. I figuren finns dels kopparförlusterna vid belastning, uppdelade i grundtonsförlust (P_{cu1}) och övertonsförluster (P_{cu0}), dels matningsspänningen V_1 som funktion av frekvensen.

På samma sätt som för järnförlusterna kan man uttrycka

$$P_{cu\delta}(X) = P_{cu\delta}(X=0) \cdot (X_1 + X_2)^2 / (X_1 + X_2 + X)^2$$

Storleksordningen på induktorn blir därför i trakten av kortslutningsreaktansen $X_k = X_1 + X_2$, dvs omkring 0,25 pu (se bilaga 6). I diagrammet på bilaga 1.5 finns inritat de med programmet beräknade värdena (kryss) och de ur ovanstående erhållna värdena sammanslagna med grundtons-förlusten (prickar). Återigen är överensstämmelsen god. Det kvadratiska avtagandet gör att övertons-förlusterna har reducerats en faktor fyra då

$X = X_1 + X_2 = X_k$ vilket kan ses som en grov tumregel för hur stor induktorn bör vara. Att notera är också hur snabbt erforderlig matningsspänning stiger med induktansen. Om induktansen blir något större än 4 mH (0,86 pu) krävs en matningsspänning V på 220 V_{eff} vilket motsvarar ett maximalt utnyttjande av mellanledningsspänningen på 488 V. För ännu större induktanser kan konstant flöde inte upprätthållas.

3.4

Förlusternas frekvensberoende

Induktorns inverkan på förlusterna kan även beräknas som funktion av frekvensen. För en given induktans och ett givet belastningsmoment erhålls de minsta kopparförlusterna om motorflödet hålls konstant, oberoende av frekvensen.

Detta medför i sin tur att matningsspänningen måste höjas för att kompensera för spänningsfallet över induktorn och statorn. Vid låga frekvenser är det möjligt att genomföra eftersom man då ändå inte unyttjar hela den tillgängliga spänningen (här $V_1 = 220$ V), men när frekvensen stiger så når man en för varje induktor specifik frekvens då det inte går att ta ut mer spänning ur mellanledet. När denna gräns passeras måste istället kravet på konstant flöde släppas till förmån för kravet på konstant moment, vilket erhålls genom att eftersläpningen ökas.

Effekten av detta kan studeras i bilaga 1.6 och 1.7. Om ingen induktor finns i kretsen, uppstår inte problemet och kurvan ser ut som för $L = 0$. Samma konvexa utseende skulle också de andra kurvorna få om det inte vore för det ovan nämnda spänningstaket. För till exempel 1 mH (0,22 pu) kurvan ger sig detta tillkänna vid ungefär 44 Hz. Över denna frekvens stiger förlusterna starkt på grund av den ökade strömmen (upp till denna frekvens har konstant flöde medfört i stort sett konstant ström, $s = 1/f$). Ännu mer markant är detta i 2 mH 0,43 pu-fallet. Spänningsfallet blir då så stort över induktorn att det inte går att ta ut 700 Nm vid höga frekvenser. På grund av detta ter det sig lämpligt att vid en gränsfrekvens, som bestäms av att totalförlusterna med och utan induktor blir lika stora, koppla förbi induktorn. För frekvenser större än den specifika gränsfrekvensen följer förlusterna sedan kurvan för $L = 0$.

Om man gör på det sättet och beräknar den erforderliga nedstämplingen ur förlusterna, så erhålls bilaga 1.7. Den visar att en stor induktans minskar nedstämplingen vid låga frekvenser, men att svinget i nedstämpling blir stort. En liten induktor ger i stället en jämnare nedstämplingskurva.

3.5

Momentpulsationer

Överttonshalten i matningsspänningen ger upphov till momentpulsationer kring medelmomentet, vilka måste beaktas. Framförallt vid låga frekvenser blir dessa betydande varför metoden med femte- och sjundetonsundertryckning (se bilaga 2) används för att omfördela tonerna. Bilaga 1.8, figur 1 och 1.9 visar det totala momentets maxi- och minimivärden vid 700 Nm och 0 Nm ($\approx M_n$ och 0) som funktion av frekvensen. Momenten har erhållits ur datorprogrammet som även tar hänsyn till elimineringen av låga övertoner. Kurvorna ger endast en överblick över pulsationerna kring medelmomentet och deras frekvensberoende. Om de ritas med fler punkter skulle sprången vid växlarorna framgå tydligare.

En urkoppling av till exempel en 1 mH (0,22 pu) induktans vid 47 Hz skulle öka pulsationerna från ca ± 150 Nm till ± 300 Nm vilket inte betyder särskilt mycket om momentet är 700 Nm. Däremot innebär det en fördubbling vid låglast.

Kurvorna i bilaga 1.8, figur 1 och 1.9 visar också att pulsationerna är ungefär konstanta och oberoende av belastningsmomentet.

Minskningen i pulsationen som funktion av induktansen syns i bilaga 1.8, figur 2. Pulsationsmomentet är proportionellt mot strömmen vilket borde, i enlighet med tidigare beräkningar, ge

$$M_p(x) = M_p(x=0) \cdot (x_1 + x_2) / (x_1 + x_2 + x)$$

Detta svarar mot prickarna vilka väl överensstämmer med de ur programmet erhållna kryssen.

3.6

Viktberäkning

En viktberäkning kan vara av intresse för att utröna om man kan finna en minimal vikt hos motor + induktor vid märkmoment. Vikten beräknas enligt följande:

För varje specifik induktans beräknas en motorvikt och en induktorvikt. Motorvikten fås ur MBK 280 S-6s data. Vikten som funktion av längden hos de aktiva rotor- och statordelarna bestäms ur data i bilaga 6. Därefter antas att längden hos de aktiva delarna är direkt proportionell mot förlusteffekten. Induktorvikten som funktion av induktansen fås ur bilaga 5 i vilken en luftkyld induktor har optimerats.

Vikterna har införts i bilaga 1.10. Ur den kan man utläsa att det viktminimum som finns är mycket flackt, den besparing man gör i motorstorlek förloras i induktorvikt. Detta tar dock ej hänsyn till vinsterna i momentpulsationer eller hur mycket utrymme som finns tillgängligt.

4. DISKUSSION

4.1

Procedures möjligheter och begränsningar

Den beräkningsprocedur som här har arbetats fram ger en möjlighet att för en godtycklig motor-induktorkombination bestämma förlusternas fördelning och storlek, spänningsfall och nedstämpling, för olika frekvenser och spänningar. Detta ger, tillsammans med uppgifter om motorerna och induktornas fysiska dimensioner och tillgängligt utrymme, ett underlag för valet av motor-induktorkombination.

Procedures noggrannhet begränsas i viss mån av att en fyrkantspänning med raka flanker förutsatts. I verkligheten blir därför övertonshalten mindre och förlusterna minskar något. Minskningen uppvägs i viss mån av att friktionsförluster inte har medräknats.

Beräkningsrutinen har en begränsning i att det inte går att ur en given järnförlust vid sinusmatning räkna fram motsvarande järnförluster vid PWM-matning. Med utgångspunkt från bilaga 1.1 kan man dock dra den allmänna slutsatsen att järnförlusterna vid PWM-matning är ungefär en konstant term större än i sinusfallet för olika frekvenser, och att PWM-järnförlusterna vid 50 Hz är ungefär dubbelt så stora som sinusjärnförlusterna vid samma frekvens.

Hela detta arbete grundar sig på antagandet att den forcerade kylningen möjliggör effektiv kylning vid alla frekvenser. Detta gäller dock inte i verkligheten, utan nedstämplingen kommer att öka ytterligare med en faktor beroende av kylförhållandena vid varje specifikt fall.

4.2

Induktorns storlek vid fritt motorutrymme

Skall motorn användas i en sådan miljö att utrymmet för motor och induktor är i stort sett obegränsat visar det sig (bilaga 1.10) att användandet av en serieinduktor inte medför någon nämnvärd besparing. Ur denna synpunkt finns det därför inte någon anledning att använda serieinduktor, utom för att begränsa momentpulsationerna.

4.3

Induktorns storlek vid begränsat motorutrymme

Om dimensionerna för motorutrymmet är givna, som till exempel boggien i ett lok, faller viktargumentet bort. Det gäller då att få ut maximalt moment ur en given motor. I sådana fall bör induktorn väljas så stor att reduktionen i övertoner blir rimlig. Övertonsförlusterna som funktion av induktansen kan approximativt uttryckas:

$$P_{cu\sigma}(x) = P_{cu\sigma}(x=0) \cdot (x_1 + x_2)^2 / (x_1 + x_2 + x)^2$$

$$P_{fe\sigma}(x) = P_{fe\sigma}(x=0) \cdot (x_1 + x_2)^2 / (x_1 + x_2 + x)^2$$

$$x_1 + x_2 = x_k$$

En reduktion av övertonsförlusterna jämfört med förlusterna utan induktor till en fjärdedel kräver alltså en induktor $L = L_k$. Denna ger också en halvering av momentpulsationerna

$$M_p(x) = M_p(x=0) \cdot (x_1 + x_2) / (x_1 + x_2 + x)$$

Induktorn bör väljas i denna storleksordning, en mindre induktor medför ingen nämnvärd förbättring jämfört med matning utan induktor medan en stor induktor, t ex $L = 2 \times L_k$, ger mycket små marginalförbättringar.

En stor induktor får även en låg gränshfrekvens vid vilken flödet ej kan hållas konstant i motorn och motorförlusterna ökar (bilaga 1.6, 1.7). Oberoende av induktorstorleken bör induktorn kopplas ur vid den frekvens då förlusterna med och utan induktor i kretsen är lika stora.

4.4

Litteraturförteckning

- | | |
|-------------|--|
| P Krause | Metod of multiple reference frames applied to the analysis of symmetrical induction machinery.
(IEEE Trans. on Power Apparatus and Systems, vol. PAS-87, No. 1, pp 218-226) |
| FGG de Buck | Design adaption of inverter supplied induction motors
(Electric Power Applications, May 1978, Vol. 1, No. 2, pp 54-60) |
| E Alm | Elektroteknik Band III, Elektromaskinlära Del 2A, 1927, pp 356-362 |
| F Gustavson | Kompendium i elektromekanisk energiomvandling, del 1, 1978, pp 4.1-4.20 |
| T Porteous | Programbeskrivningar till PWMOT och RESIST |

ASEA

MBK 280 S-6

TOMGÅNG UTAN SKRIVINDUKTOR TR KYEC 4166-925

$P_{tot}, P_{re} = g(f)$ $\phi = konst$

BILAGA I.1

P
[kW]

TOTALA FÖRLUSTER

JÄRNFÖRLUSTER

0 SINUSJÄRNFÖRLUSTER

4

3

2

1

0

P_{tot}

P_{Fe}

P_{re}

f
[Hz]

ASEA

MBK 280 S-6

TOMGÅNG MED SERIEINDUKTOR

$R = 6 \text{ m}\Omega$ $L = 0.22 \text{ mH}$ $\phi = \text{konst}$
 $P_{\text{tot}}, P_{\text{Fe}} = g(f)$

TR KYEC 4166-925

BILAGA 1.2

P
[kW]

TOTALA FÖRLUSTER

JÄRNEFÖRLUSTER

$X = (P_{\text{tot}} - P_{\text{Fe}})$ VÄRDEN

• = OMRÄKNADE VÄRDEN UR BIL. 1.

o = SINUSJÄRNFÖRLUSTER

4

3

2

1

10

20

30

40

50

60

f
[Hz]

ASEA

MBK 280S-6

TOMGÅNG MED SERIEINDUKTOR

$R=20\text{m}\Omega$ $L=1\text{mH}$

$P_{\text{tot}}, P_{\text{Fe}} = g(f)$

$\phi = \text{konst}$

TR LK 4165-9256

BILAGA 1.3

P
[kW]

TOTALA FÖRLUSTER

JÄRNFÖRLUSTER

$x = (P_{\text{tot}} - P_{\text{cu}})$ VÄRDEN

$\bullet$ = ÖMRÄKNADE VÄRDEN UR BIL. 1.

$\circ$ = SINUSJÄRNFÖRLUSTER



FIG. 1: TOTAL BELASTNINGSFÖRLUST SOM FUNKTION AV FREKVENSEN VID KONSTANT MOMENT. $L=0$

FIG. 2: NEDSTÄMPLINGEN SOM FUNKTION AV FREKVENSEN VID KONSTANT TOTALFÖRLUST. $L=0$

TR. KYEC 4165-925

BILAGA 1.4

$P_{cu} + P_{ca}$
[kW]



A

B

a

b

A = PWM, $V_i = k \cdot f$

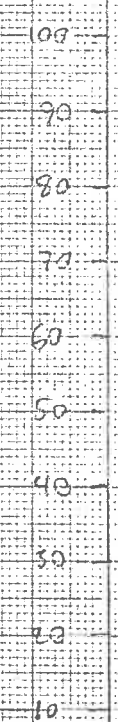
a = SINUS, $V_i = k \cdot f$

B = PWM, $E_i = k \cdot f$

b = SINUS, $E_i = k \cdot f$

FIG. 1

$\frac{M}{M_n}$
[%]



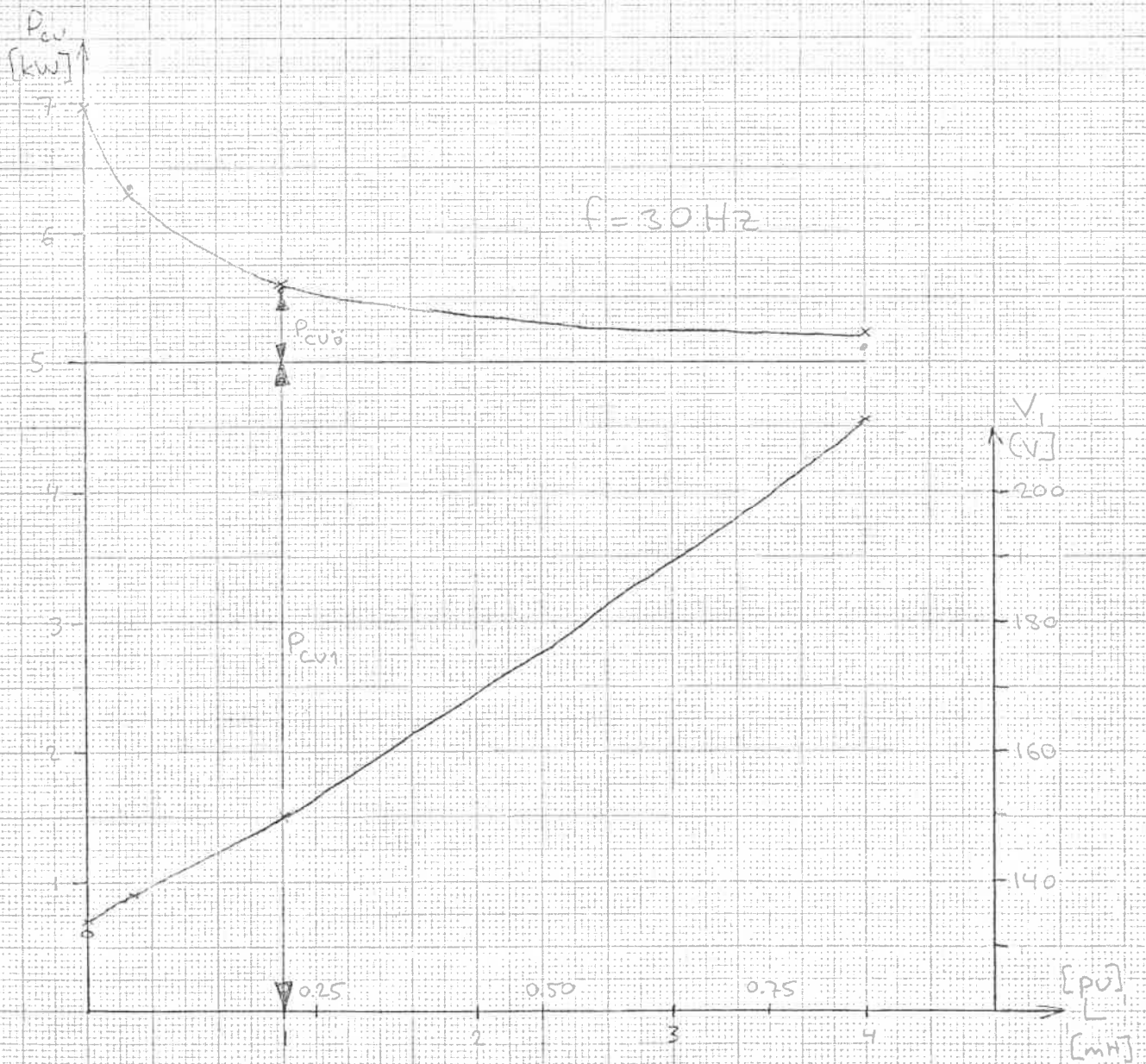
b

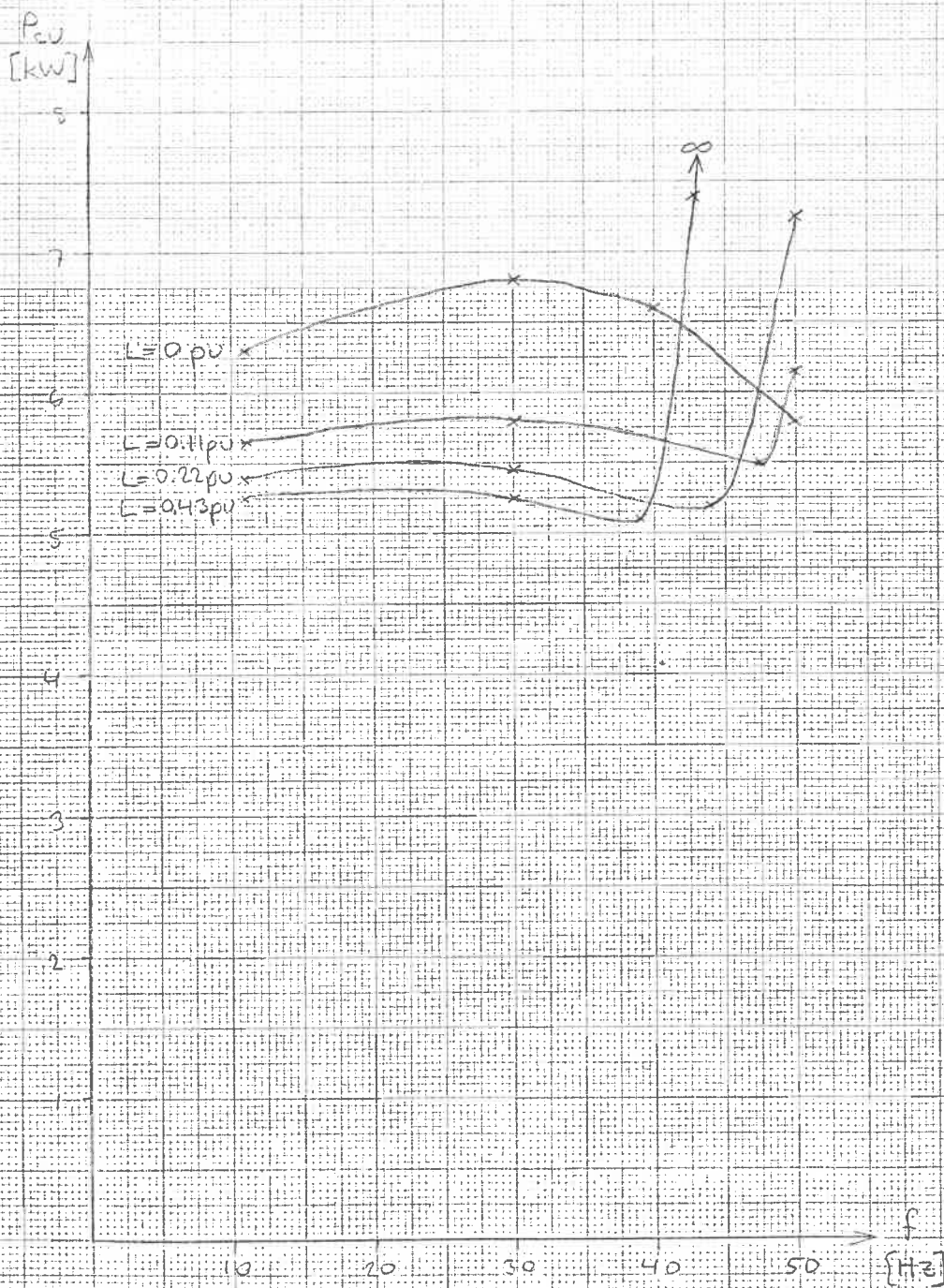
a

B

A

FIG. 2

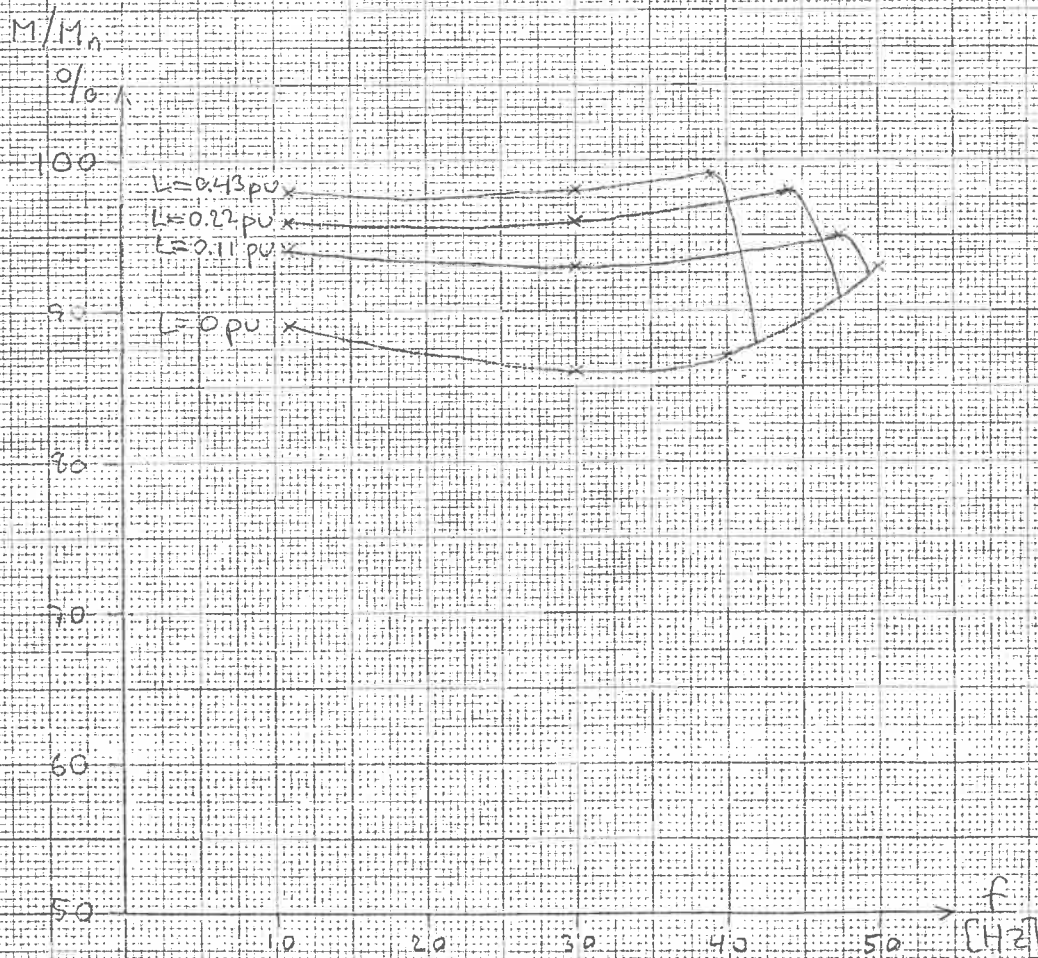


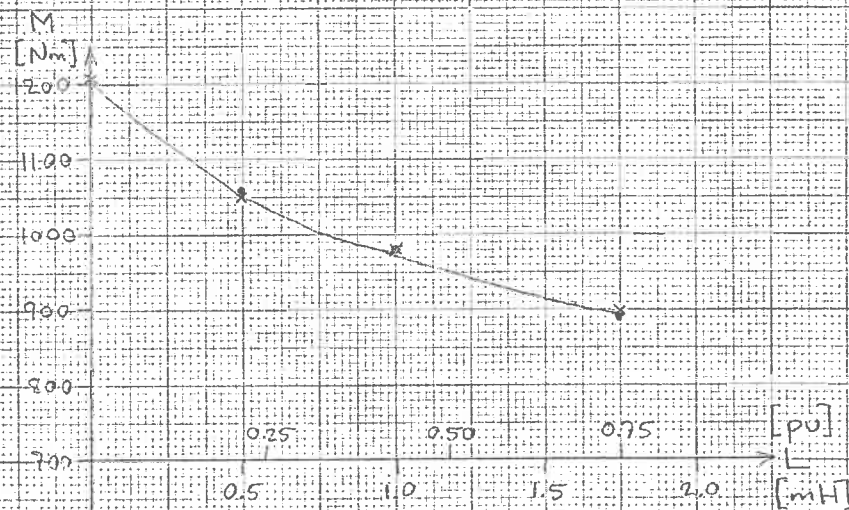
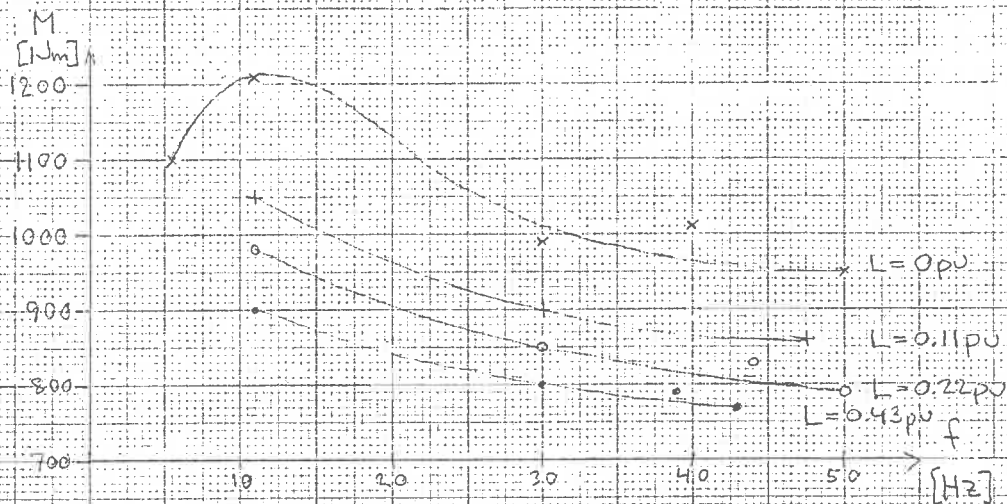


NEDSTÄMPLING SOM FUNKTION AV
FREKVENSEN FÖR VARIERANDE
INDUKTANS OCH KONSTANT KOPPAR-
FÖRLUST
 $I_{pu} = 4.7 \text{ mA}$ $L_k = 0.25 \text{ pu}$

TE. 1. 4. 5. 4166-735

BILAGA 1.7

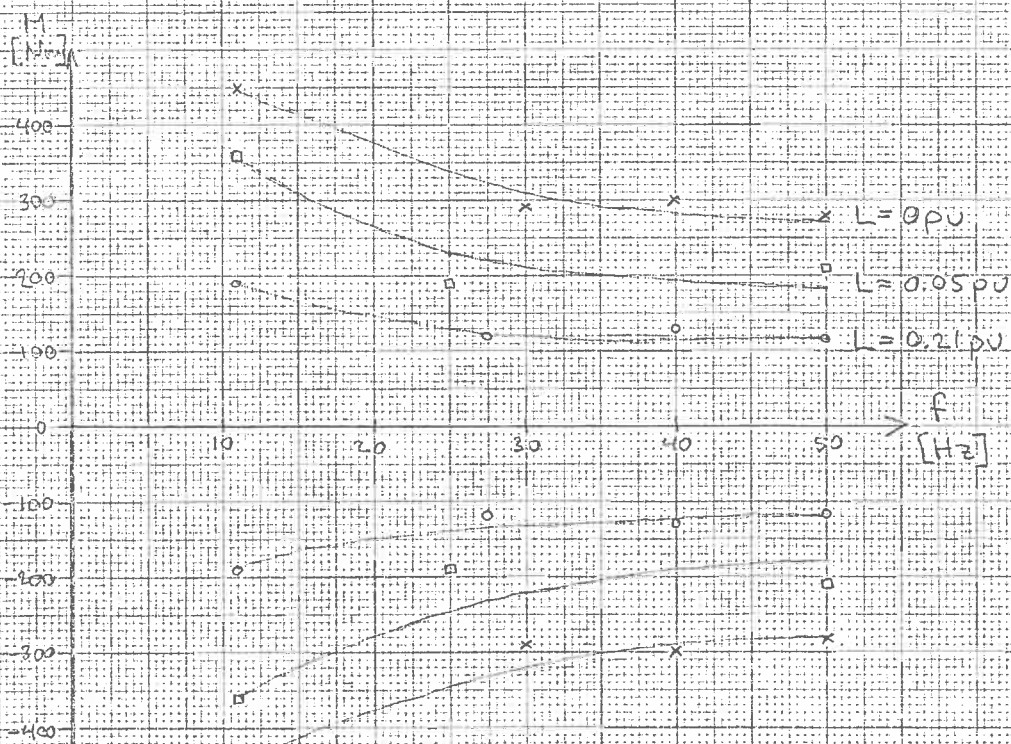


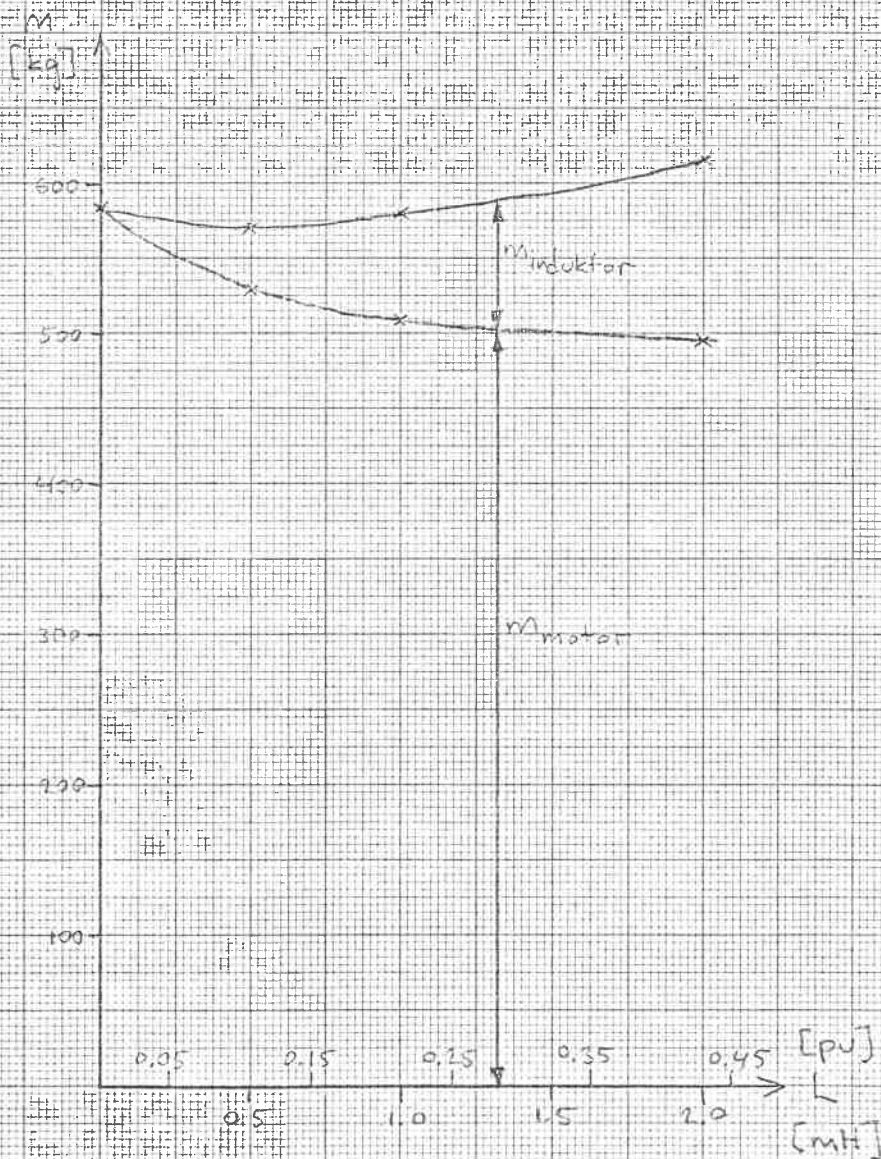


$x = \text{UR PWMIND ERHÅLLNA VÄRDEN}$

$\bullet = \text{UR } M_p(x) = (x_1 + x_2) / (x_1 + x_2 + x) \cdot M_p(x=0) \text{ ERHÅLLNA VÄRDEN}$

$1 \mu V = 4.7 \text{ mH}$ $L_k = 0.25 \mu V$



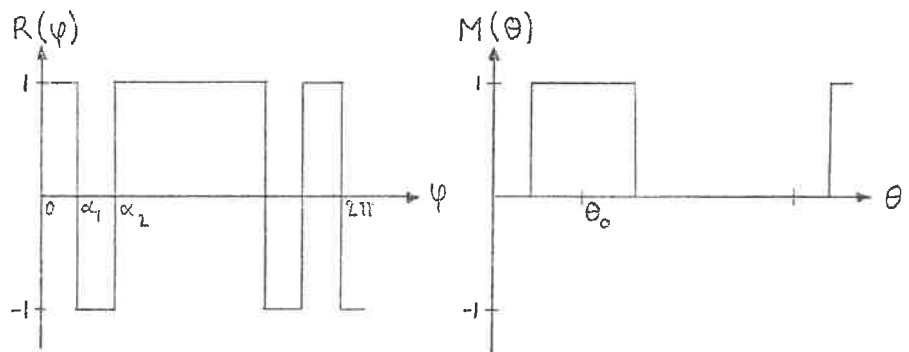


MATNINGSSPÄNNINGENS UTSEENDE OCH FOURIERANALYS

1.

Kurvform

Matningen från omriktaren kan i det enklaste fallet göras som en fyrkantspänning (referensspänningen) som multipliceras med en modulationsspänning, bestående av pulser vars bredd moduleras. En sådan matning ger dock upphov till svåra femte- och sjundetonspulsationer vid framförallt låga frekvenser. För att eliminera dessa, hackas referensspänningen upp på ett sånt sätt att dessa låga övertoner förläggs i högre frekvenser.



Dessa båda signaler fourierutvecklas och multipliceras med varandra.

2.

Fourierutveckling

$R(\psi): R(\psi) = \{\text{udda funktion}\} \Rightarrow$ fourierutvecklingen innehåller endast sinustermer.

Antalet hack kan anses vara jämnt ty ett udda antal hack kan överföras till ett jämnt antal utan att förhållandena ändras (placera ett hack i $\pi/2$).

$$\begin{aligned} R_n &= \frac{1}{\pi} \int_0^{2\pi} R(\psi) \sin(n\psi) d\psi = \frac{4}{\pi} \int_0^{\frac{\pi}{2}} R(\psi) \sin(n\psi) d\psi = \\ &= \frac{4}{\pi} \left[\int_0^{\frac{\pi}{2}} 1 \cdot \sin(n\psi) d\psi - 2 \sum_{k=1}^3 \int_{\alpha_{2k-1}}^{\alpha_{2k}} \sin(n\psi) d\psi \right] = \\ &= \{\text{den ohackade signalen minus hacken}\} = \\ &= \frac{4}{\pi} \left\{ -\frac{1}{n} [\cos(n\psi)]_0^{\frac{\pi}{2}} + \frac{2}{n} \sum_{k=1}^3 [\cos(n\psi)]_{\alpha_{2k-1}}^{\alpha_{2k}} \right\} = \\ &= \frac{4}{n\pi} \left[1 + 2 \sum_{k=1}^3 (\cos(n\alpha_{2k}) - \cos(n\alpha_{2k-1})) \right] \end{aligned}$$

det vill säga

$$R_n = \frac{4}{n\pi} \left[1 + 2 \sum_{k=1}^{\infty} (-1)^k \cos(n\alpha_k) \right]$$

$M(\theta) : M(\theta) = \{\text{jämn funktion}\} \Rightarrow$ fourierutvecklingen innehåller endast cosinustermer.

$$\begin{aligned} M_i &= \frac{1}{\pi} \int_{-\pi}^{\pi} M(\theta) \cos(i\theta) d\theta = \\ &= \frac{2}{\pi} \int_0^{\pi} M(\theta) \cos(i\theta) d\theta = \\ &= \frac{2}{\pi} \int_0^{m\pi} \cos(i\theta) d\theta = \frac{2}{i\pi} \sin(i \cdot m \cdot \theta) \end{aligned}$$

$M_0 =$ modulationssignalens medelvärde $= m$

Detta ger M 's fouriersserie (inklusive fasförskjutningen

$$M(\theta - \theta_0) = m + \sum_{i=1,2,\dots}^{\infty} M_i \cos[i(\theta - \theta_0)].$$

Referenssignalens vinkel $\varphi = \omega t$.

Modulationssignalens vinkel $\theta = \int_0^t N \omega dt$, där $N =$ antalet modulationspulser i referenssignalens koordinatsystem, $N = 6p$, $p = 1, 2, 3, \dots$

Om referenssignalen verkar i ett trefasssystem utan nollföljd elimineras de frekvenser som är multiplar till tre, vilket lämnar toner av ordningstalet $6q \pm 1$, $q = 1, 2, 3, \dots$

Multiplikation av de båda signalerna ger:

$$\begin{aligned} R(\varphi) \cdot M(\theta - \theta_0) &= \left[\sum_{n=1,5,7,\dots}^{\infty} R_n \sin(n\omega t) \right] \left[m + \sum_{i=1,2,3}^{\infty} M_i \cos[i(N\omega t - \theta_0)] \right] = \\ &= m \sum_{n=1,5,7,\dots}^{\infty} R_n \sin(n\omega t) + \sum_{n=1,5,7,\dots}^{\infty} \sum_{i=1,2,3}^{\infty} \frac{R_n M_i}{2} \{ \sin[(n+iN)\omega t - i\theta_0] + \\ &\quad + \sin[(n-iN)\omega t + i\theta_0] \}. \end{aligned}$$

BERÄKNINGSMODELLEN

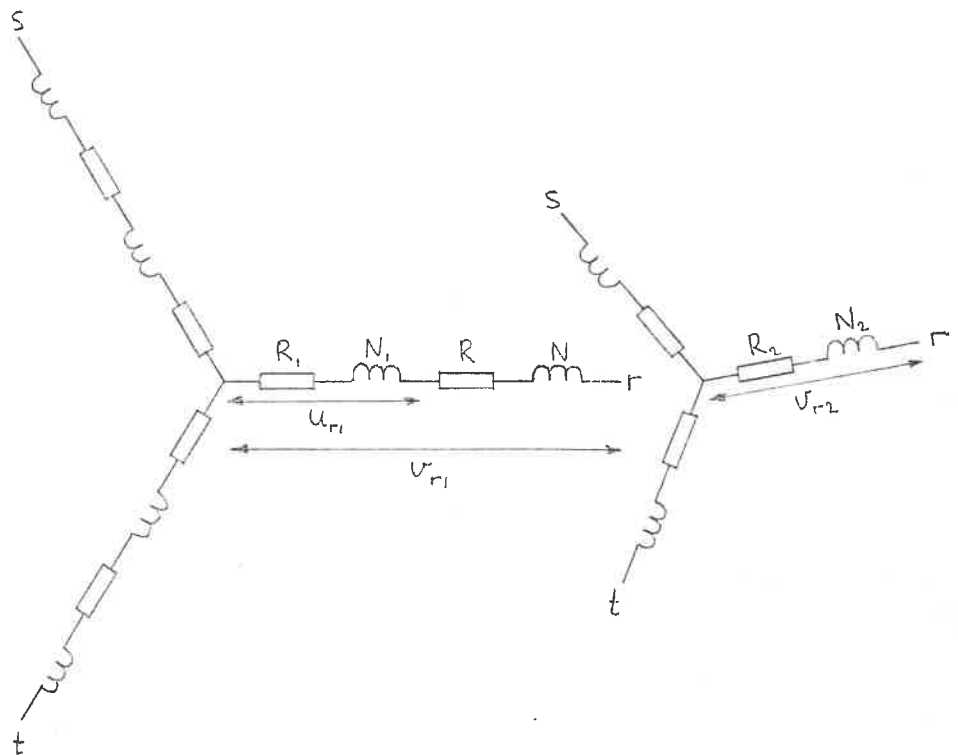
1.

Förutsättningar

För att kunna studera hur asynkronmaskinen arbetar vid PWM-matning krävs en matematisk modell. Denna grundar sig på:

1. dq-transformation
2. fourieranalys och superposition
3. nollföljden existerar inte

En tvåpolig trefasmaskin kan ritas (med induktor i serie på statorsidan):



Figur 1

2.

dq-transformation

Ur figur 1 erhålls uttryck för spänningarna, som efter dq-transformationen

$$\begin{bmatrix} \gamma_{d1} \\ \gamma_{q1} \end{bmatrix} = \frac{2}{3} \begin{bmatrix} \sin \theta & \sin(\theta - \frac{2\pi}{3}) & \sin(\theta + \frac{2\pi}{3}) \\ \cos \theta & \cos(\theta - \frac{2\pi}{3}) & \cos(\theta + \frac{2\pi}{3}) \end{bmatrix} \times \begin{bmatrix} \gamma_{r1} \\ \gamma_{s1} \\ \gamma_{t1} \end{bmatrix}$$

ger följande uttryck på statorsidan:

$$v_{d1} = p \Psi_{d1} - \Psi_{q1} p\theta + (R + R_1) i_{d1}$$

$$v_{q1} = p \Psi_{q1} + \Psi_{d1} p\theta + (R + R_1) i_{q1}$$

där θ = vinkeln mellan q-axeln och statorns r-axel.

För rotorn erhålls på motsvarande sätt (β = vinkeln mellan q-axeln och rotorns r-axel):

$$\begin{bmatrix} \gamma_{d2} \\ \gamma_{q2} \end{bmatrix} = \frac{2}{3} \begin{bmatrix} \sin\beta & \sin(\beta - \frac{2\pi}{3}) & \sin(\beta + \frac{2\pi}{3}) \\ \cos\beta & \cos(\beta - \frac{2\pi}{3}) & \cos(\beta + \frac{2\pi}{3}) \end{bmatrix} \times \begin{bmatrix} \gamma_{r2} \\ \gamma_{s2} \\ \gamma_{t2} \end{bmatrix}$$

och

$$v_{d2} = p \Psi_{d2} - \Psi_{q2} p\beta + R_2 i_{d2}$$

$$v_{q2} = p \Psi_{q2} + \Psi_{d2} p\beta + R_2 i_{q2}$$

Uttrycken för de sammanlänkade flödena blir:

$$\Psi_{d1} = (L + L_1 + M) i_{d1} + \frac{N_2}{N_1} M i_{d2}$$

$$\Psi_{q1} = (L + L_1 + M) i_{q1} + \frac{N_2}{N_1} M i_{q2}$$

$$\Psi_{d2} = (L_2 + \frac{N_1}{N_2} M) i_{d2} + M i_{d1}$$

$$\Psi_{q2} = (L_2 + \frac{N_1}{N_2} M) i_{q2} + M i_{q1}$$

om man använder samma dq-transformation.

För att förenkla räknearbetet kan det vara lämpligt att överföra rotorstorheterna till statorns referensram. Man får då:

$$V_{d2}' = p \Psi_{d2}' - \Psi_{q2}' p \beta + R_2 i_{d1}'$$

$$V_{q2}' = p \Psi_{q2}' + \Psi_{d2}' p \beta + R_2 i_{q2}'$$

där

$$\Psi_{d1} = (L + L_1) i_{d1} + M(i_{d1} + i_{d2}') \\ \Psi_{q1} = (L + L_1) i_{q1} + M(i_{q1} + i_{q2}') \\ \Psi_{d2}' = L_2' i_{d2}' + M(i_{d1} + i_{d2}') \\ \Psi_{q2}' = L_2' i_{q2}' + M(i_{q1} + i_{q2}')$$

Här har

$$i_{d2}' = \frac{N_2}{N_1} i_{d2}$$

$$L_2' = \frac{N_1}{N_2} L_2 \text{ använts}$$

Sammanställs detta i en matris erhålls:

$$\begin{bmatrix} V_{d1} \\ V_{q1} \\ V_{d2}' \\ V_{q2}' \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} -\omega(L+L_1+M)R+R_1+(L+L_1+M)p & -\omega M & M p & \\ R+R_1+(L+L_1+M)p & \omega(L+L_1+M) & M p & \omega M \\ -(w-w_r)M & M p & -(w-w_r)L_2' & R_2'+L_2'p \\ M p & (w-w_r)M & R_2'+L_2'p & (w-w_r)L_2' \end{bmatrix} \times \begin{bmatrix} i_{d1} \\ i_{q1} \\ i_{d2}' \\ i_{q2}' \end{bmatrix}$$

där ω_r = rotorns vinkelhastighet.

Slutligen fås ett uttryck för momentet:

$$M_u = M \left(\frac{a}{2} \right) \left(\frac{p}{2} \right) (i_{q1} i_{d2}' - i_{d1} i_{q2}')$$

där a = antalet faser, P = antaler poler.

3. Fourieranalys

För att föra resonemanget vidare införs nu den kurvform som omriktaren ger. Beteckningen s (v_{q1}^s) införs som anger variabler i statorns referenssystem, e betecknar ett synkront roterande referenssystem.

Ur γ -ekvationerna erhålls:

$$v_{d1}^s = \frac{1}{\sqrt{3}} (-v_{s1} + v_{t1}) = \{ \text{fourierutveckling} \} =$$

$$= \sum_{k=1}^{\infty} (V_{kd\alpha} \cos k\omega_e t + V_{kd\gamma} \sin k\omega_e t)$$

$$v_{q1}^s = v_{t1} = \sum_{k=1}^{\infty} (V_{kq\alpha} \cos k\omega_e t + V_{kq\gamma} \sin k\omega_e t)$$

Om man uttrycker detta i e -systemet fås:

$$v_{d1}^e = v_{q1}^s \sin \omega_e t + v_{d1}^s \cos \omega_e t$$

$$v_{q1}^e = v_{q1}^s \cos \omega_e t - v_{d1}^s \sin \omega_e t$$

Insättning av uttrycken för v_{d1}^s och v_{q1}^s ger framåt och bakåtroterande vågor som betecknas $+e$ och $-e$.

$$v_{kd1}^{+e} = \frac{1}{2} \sum_{k=1}^{\infty} [-(V_{kq\alpha} - V_{kd\gamma}) \sin(k-1)\omega_e t + (V_{kq\gamma} + V_{kd\alpha}) \cos(k-1)\omega_e t]$$

$$v_{kq1}^{+e} = \frac{1}{2} \sum_{k=1}^{\infty} [(V_{kq\alpha} - V_{kd\gamma}) \cos(k-1)\omega_e t + (V_{kq\gamma} + V_{kd\alpha}) \sin(k-1)\omega_e t]$$

$$v_{kd1}^{-e} = \frac{1}{2} \sum_{k=1}^{\infty} [(V_{kq\alpha} + V_{kd\gamma}) \sin(k+1)\omega_e t - (V_{kq\gamma} - V_{kd\alpha}) \cos(k+1)\omega_e t]$$

$$v_{kq1}^{-e} = \frac{1}{2} \sum_{k=1}^{\infty} [(V_{kq\alpha} + V_{kd\gamma}) \cos(k+1)\omega_e t + (V_{kq\gamma} - V_{kd\alpha}) \sin(k+1)\omega_e t]$$

För att kunna lösa ekvationerna för de olika övertonerna är det lämpligt att för var och en av dessa lägga fast ett referenssystem för att få konstanta parametrar. Därför transformeras de olika tonerna var för sig:

$$\gamma_{d1}^{+ke} = \gamma_{kq1}^{+e} \sin[(k-1)\omega_e t] + \gamma_{kd1}^{+e} \cos[(k-1)\omega_e t]$$

$$\gamma_{q1}^{+e} = \gamma_{kq1}^{+e} \cos[(k-1)\omega_e t] - \gamma_{kd1}^{+e} \sin[(k-1)\omega_e t]$$

$$\gamma_{d2}^{+ke} = \gamma_{kq2}^{+e} \sin[(k-1)\omega_e t] + \gamma_{kd2}^{+e} \cos[(k-1)\omega_e t]$$

$$\gamma_{q2}^{+ke} = \gamma_{kq2}^{+e} \cos[(k-1)\omega_e t] - \gamma_{kd2}^{+e} \sin[(k-1)\omega_e t]$$

och

$$\gamma_{d1}^{-ke} = -\gamma_{kq1}^{-e} \sin[(k+1)\omega_e t] + \gamma_{kd1}^{-e} \cos[(k+1)\omega_e t]$$

$$\gamma_{q1}^{-ke} = \gamma_{kq1}^{-e} \cos[(k+1)\omega_e t] + \gamma_{kd1}^{-e} \sin[(k+1)\omega_e t]$$

$$\gamma_{d2}^{-ke} = -\gamma_{kq2}^{-e} \sin[(k+1)\omega_e t] + \gamma_{kd2}^{-e} \cos[(k+1)\omega_e t]$$

$$\gamma_{q2}^{-ke} = \gamma_{kq2}^{-e} \cos[(k+1)\omega_e t] + \gamma_{kd2}^{-e} \sin[(k+1)\omega_e t]$$

Med rotorspänningarna lika med noll och en hopplockning av ovanstående ekvationer erhålls:

$$V_{d1}^{+ke} = \frac{1}{2} (V_{kq\alpha} + V_{kd\gamma})$$

$$V_{q1}^{+ke} = \frac{1}{2} (V_{kq\gamma} - V_{kd\alpha})$$

$$V_{d1}^{-ke} = \frac{1}{2} (V_{kq\alpha} - V_{kd\gamma})$$

$$V_{q1}^{-ke} = \frac{1}{2} (V_{kq\gamma} + V_{kd\alpha})$$

Strömmarna kan nu lösas genom att inversen till

$$\begin{bmatrix} V_{d1} \\ V_{q1} \\ 0 \\ 0 \end{bmatrix} \begin{bmatrix} -n\omega_e(L+L_1+M)R+R_1+(L+L_1+M)p & -n\omega_e M & M p \\ R+R_1+(L+L_1+M)p & n\omega_e(L+L_1+M) & M p & n\omega_e M \\ -(n\omega_e-\omega_r)M & M p & -(n\omega_e-\omega_r)L_2' & R_2'+L_2'p \\ M p & (n\omega_e-\omega_r)M & R_2'+L_2'p & (n\omega_e-\omega_r)L_2' \end{bmatrix} \begin{bmatrix} i_{d1} \\ i_{q1} \\ i_{d2} \\ i_{q2} \end{bmatrix}^{+ke}$$

löses. Dessa ger sedan på sedvanligt sätt förluster och moment ur det vanliga ekvivalenta schemat för de framåt- och bakåtroterande vågorna.

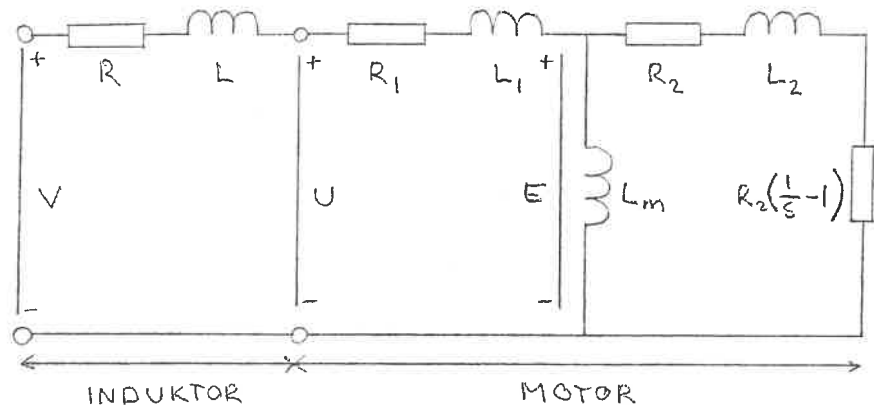
PROGRAMBESKRIVNING PWMIND

Innehållsförteckning

1. Allmänt
2. Tillämpningsområde
3. Beräkningsordning
4. Indata
5. Utmatning
6. "Konstant flöde"
7. "s-iteration"
8. Körinstruktioner
9. Programlista
10. Körexempel

1.
Allmänt

Programmet PWMIND är en modifiering av programmet PWMOT, och utför beräkningar av förluster, spänning, ström och moment för en godtycklig kombination av serieinduktor och asynkronmaskin.



2.
Tillämpningsområde

Korrekta resultat erhålls för alla linjära ekvivalenta scheman, där matningsspänningen har godtycklig form och frekvens. Programmet tar även hänsyn till strömförträngningsfenomen som vid framförallt höga frekvenser blir betydande.

3.
Beräkningsgång

Först gör programmet en fourieranalys av spänningen. Därefter beräknas strömmarna för varje delton ur maskindata och spänningens amplitud. Ur detta erhålls till sist spänningsfall över induktorn samt förluster, moment och spänningsfall i motorn.

4.
Indata

Till att börja med begärs indata för spänningen:

$N = J'$ i bilaga 2

$AIN(I) = \alpha_i$ i bilaga 2

$NMAX$ = den högsta termen i fourierutvecklingen

$APK = m$ i bilaga 2

$MK = p$ i bilaga 2

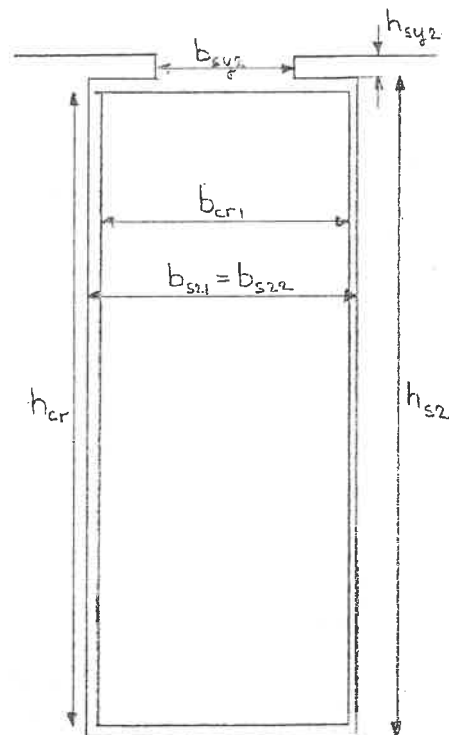
$FFI = \theta_0$ i bilaga 2

Alternativt för en kontinuerlig fourierutveckling kan koefficienterna för vissa deltoner erhållas (IS , $NRWANT(I)$).

Om konstant flöde önskas, se under denna rubrik.

Sedan följer inmatning av maskinparametrar, vilket endast behöver göras före första beräkningen eller när nya maskindata önskas.

RS	=	statorresistans	(Ω /fas, ekviv, Y)
XLS	=	statorreaktans	"
XM	=	magnetiseringsreaktans	"
XLR	=	rotorreaktans	"
RRO	=	rotorresistans	"
P	=	poltal	
FB	=	basfrekvens	(Hz)



SPTR = spårtyp enligt
RESIST

r_{ho2} = ledarresistivitet

R_{rat} = kvoten mellan
spårets medeldia-
meter och rotorns
medeldiameter

Ovanstående visar måtten för rotorspårerna, vilka krävs vid beräkningen av strömförträngningen.

Om s-iteration önskas, se under denna rubrik.

För att starta beräkningen behövs dessutom:

FM0	=	aktuell frekvens	(Hz)
SM	=	eftersläpning	
UD/2	=	halva mellanledningsspänningen	(V)

och för serieinduktorn:

R	=	induktorresistans	(Ω /fas)
L	=	induktorinduktans	(H/fas)

5.
Utmatning

De utmatade värdena förklarar sig själva, men observera att spänningarna är toppvärden.

6.
"Konstant flöde"

När man använder asynkronmaskinen vid olika frekvenser så eftersträvar man alltid konstant flöde $\emptyset$, för att minimera förlusterna vid konstant belastningsmoment. Detta flöde $\emptyset$ är proportionellt mot E/f varför man för konstant flöde skall hålla ett E linjärt mot frekvensen (för grundton). Eftersom det uppstår spänningsfall över induktorn och statorimpedanserna måste klämspänningen V hela tiden ökas för att bibehålla konstant flöde. Detta är främst märkbart vid låga frekvenser.

V höjs genom att pulskvoten ökas utöver det normala värdet på $APK = FMO/FB$. På så sätt blir modulationssignalen bredare och grundtonens toppvärde höjs. Detta går dock endast att upprätthålla vid låga frekvenser och små induktanser eftersom pulskvoten annars blir större än ett, vilket är omöjligt.

Om flödet skall hållas konstant svarar man alltså med en etta på frågan. Detta innebär att programmet går in i en iterativ slinga mellan 0800 och 3060. Slingan börjar med att beräkna fouriertermerna. Därefter beräknas toppvärdet av flödesspänningen EQ (= programmets flödesspänning) för grundton. Skiljer sig denna från den önskade flödesspänningens toppvärde $E1$ så görs ett återhopp till 103 och pulskvoten APK ändras. På detta sätt fortsätter iterationen tills EQ och $E1$ skiljer sig högst 0,4 %. Då görs uthopp och programmet fortsätter som vanligt med den senast använda pulskvoten. OBS! E är toppvärde.

7.
"s-iteration"

Vid tillräckligt stora frekvenser eller induktanser går flödet inte att hålla konstant. I stället måste man öka eftersläpningen för att erhålla konstant moment. För att med ett givet moment kunna ta fram tillräcklig eftersläpning har en iterativ slinga lagts in mellan 1520 och 3140. Om man svarar ja på s-iterationsfrågan så kommer denna slinga att genomlöpas för grundton. Vid 3140 matas sedan grundtonsmomentet ($\approx$ totala momentet) ut. Om detta skiljer sig från det önskade momentet går manslingan igen med ett annat s-värde.

Varning: Eftersom slingorna griper in i varandra bör man se upp. Görs t ex en konstant flödesiteration så är det olämpligt att gå in i s-iterations-slingan samtidigt.

8.

Körinstruktioner

Programmet är gjort i TIME SHARING och körs därför på terminal. Efter inloggning skrivs:

FORT

RUN CPWMIND;CSUBROUT

på vilket terminalen svarar:

LOADER DIAGNOSTICS

Sedan begär programmet parametrar beskrivna som indata i punkt 4.

Ytterligare information kan fås ur programbeskrivningen till PWMOT.

```

01000  PROGRAM FÖR MASKINBERÄKNING MED PWM REFERENS-
01100  OCH MODULATIONSPULSER SOM INDATA
01200  PROGRAMMET BERÄKNAR MOMENTANVÄRDEN PÅ SPÄNNING,
01300  STRÖMMAR OCH MOMENT. FÖRLUSTER BERÄKNAS
01400  *****
0150   DIMENSION RES(50,5),AIN(10),NRWANT(50),KIND(50),IIND(50)
0160   DIMENSION ABN(50,5),U(50,2,2),UGA(50),UGG(50),UGA(50),UGG(50)
0170   DIMENSION DELTAU(50,2)
0180   DIMENSION VOD(50,4),HM(20),EE(4),SI(4),BS(20)
0190   DIMENSION AINTID(10)
0200   DIMENSION H(20),BC(20),RHO(20)
0210   DIMENSION AI(50,2,4),AROT(50,2),EFF(50,2)
0220   COMMON/LABEL2/RS,LS,M,LR,RR,WE,WR,A(4,4),RI,LI,B(4,4)
0230   COMMON/LABEL1/IND(199)
0240   REAL PI/3.14159/
0250   REAL MDM1
0260   REAL KW,LS,LR,M,LI
0270   REAL PCU1,PCU2,IQST,IDST,IQRT,IDRT,MOMT
0280   CHARACTER TEXT*42
0290 1  CONTINUE
0300   DO 3 I=1,50
0310   NRWANT(I)=0;KIND(I)=0;IIND(I)=0
0320   IF(I.LT.11)AIN(I)=0.
0330 3  CONTINUE
0340   DO 5 I=2,198,2
0350   IND(I)=3*I-1
0360 5  IND(I+1)=3*I+1
0370   IND(I)=1
0380   PRINT,"GE ANTAL ARGUMENT (ALFA) SOM INTE=0"
0390   READ,N
0400   NTID=N
0410   PRINT,"GE ARGUMENTEN I GRADER"
0420   READ,(AIN(I),I=1,N)
0430   DO 10 I=1,N
0440 10  AIN(I)=AIN(I)*PI/180
0450   DO 7 I=1,N
0460   AINTID(I)=AIN(I)
0470 7  CONTINUE
0480   PRINT,"ÖNSKAS SÄRSKILDA FREKVENSER? 1=JA"
0490   READ,IS
0500   IF(IS.NE.1)GO TO 15
0510   PRINT,"GE ANTALET ÖNSKADE FREKVENSER"
0520   READ,NT
0530   PRINT,"GE FREKVENSERNA SOM F/F0, F0=GRUNDTON"
0540   READ,(NRWANT(I),I=1,NT)
0550   GO TO 40
0560 15  PRINT,"GE HÖGSTA ÖNSKADE FREKVENNS F/F0, F0=GRUNDTON"
0570   READ,NMAX
0580   DO 20 I=1,199
0590   IF(IND(I).GT.NMAX)GO TO 30
0600 20  NRWANT(I)=IND(I)
0610 30  NT=I-1
0620 40  CONTINUE
0630   PRINT,"GE PULSKVOT"
0640   READ,APK
0650   PRINT,"GE (ANTALET PULSER PER PERIOD)/6"
0660   READ,MK
0670   MKN=6*MK
0680   PRINT,"GE FASFÖRSKJUTNING I GRADER"
0690   READ,FFI

```

ASEA

TR 1 150 411-0000

PROGRAMLISTNING

BILAGA 4.7

```

0700      PRINT,"GE MINSTA AMPLITUD SOM SKALL ADDERAS"
0710      READ,RMMIN
0720      FFI=FFI*PI/180
0730      IE=2
0740      PRINT,"ÖNSKAS KONSTANT FLÖDE? 1=JA"
0750      READ,IE
0760      IF(IE.NE.1) GOTO 107
0770      PRINT,"GE ÖNSKAT E-VÄRDE"
0780      READ,E1
0790 107  CONTINUE
0900 103  CONTINUE
0810C
0820      WRITE(6,104)APK
0830 104  FORMAT(1X,"PULSKVOT=",F10.4)
0840      K1=0
0850      N=NTID
0860      DO 109 I=1,N
0870 109  AIN(I)=AINTID(I)
0880      DO 200 J=1,NT
0890      R1=APK*REFK(N,AIN,NRWANT(J))
0900      R2=NRWANT(J)
0910      R3=0
0920      CALL FIND1(NRWANT(J),MKN,KIND,IIND,M1)
0930      IF(M1.LT.1)GO TO 120
0940      DO 110 J1=1,M1
0950      RM=AMI(APK,IIND(J1))*REFK(N,AIN,KIND(J1))/2.
0960      FI=-IIND(J1)*FFI
0970      IF(ABS(RM).LT.RMMIN)GO TO 110
0980      CALL ADD(R1,RM,R3,FI,RR1,RR3)
0990      R1=RR1
1000      R3=RR3
1010 110  CONTINUE
1020 120  CONTINUE
1030      CALL FIND2(NRWANT(J),MKN,KIND,IIND,M2)
1040      IF(M2.EQ.0)GO TO 150
1050      DO 140 J2=1,M2
1060      K2=IABS(KIND(J2))
1070      I2=IABS(IIND(J2))
1080      RM=AMI(APK,I2)*REFK(N,AIN,K2)/2
1090      RM=RM*SIGN(1.,KIND(J2))
1100      IF(ABS(RM).LT.RMMIN)GO TO 140
1110      FI=FFI*IIND(J2)
1120      CALL ADD(R1,RM,R3,FI,RR1,RR3)
1130      R1=RR1
1140      R3=RR3
1150 140  CONTINUE
1160 150  K1=K1+1
1170      RES(K1,1)=R1
1180      RES(K1,2)=R2
1190      RES(K1,3)=R3
1200 200  CONTINUE
1210C
1220      IF(IE.EQ.1) GOTO 411
1230      WRITE(6,420)
1240 420  FORMAT(1X,5(1H*),/T10,"RESULTAT AV FOURIERANALYS:",/5(1H*),
1250      &///T10,"F/F0",5X,"AMPLITUD",3X,"FASVINKEL",/70(1H-))
1260      WRITE(6,430) (RES(I,2),RES(I,1),RES(I,3),I=1,K1)
1270 430  FORMAT(1X,T10,F4.0,5X,F7.5,2X,F9.5)
1280 440  CONTINUE
1290 411  CONTINUE

```

Denna handling får ej utan vårt medgivande kopieras. Den får ej heller delgivas annan eller eljest obehörigen användas. Överträdelse härav beivras med stöd av gällande lag. ASEA

```

1300 PRINT,"ÖNSKAS NY FOURIER-ANALYS ? 1=JA"
1310 READ,IIYS
1320 IF(IIYS.EQ.1)GO TO 1
1330 PRINT,"NYA MASKINKONSTANTER ? 1=JA"
1340 READ,MASK
1350
1360 K3=K1
1370 IF(MASK.NE.1) GOTO 405
1380 PRINT,"ÖNSKAS MBK 280 S-6:S MASKINKONSTANTER? 1=JA"
1390 READ,IMBK
1400 IF(IMBK.NE.1) GOTO 404
1410 RS=.048;XLS=.2;XM=3.886;XLR=.16;RR0=.051;P=6;FB=50
1420 SPTR=2;BS21=3.95;BS22=3.95;HS2=29.2;BSY2=2;HSY2=1
1430 BSMR=0;HSMR=0;BCR1=3.75;BCMR=0;HCR=28;RHO2=.0425;RRAT=.65
1440 404 CONTINUE
1450 IF(IMBK.EQ.1) GOTO 405
1460 PRINT,"GE INDATA: RS,XLS,XM,XLR,RR0,P,FB"
1470 READ,RS,XLS,XM,XLR,RR0,P,FB
1480 PRINT,"ROTOR-SPTR,BS21,BS22,HS2,BSY2,HSY2,BSMR,HSMR
1490 &,BCR1,BCMR,HCR,RHO2,RRAT"
1500 READ,SPTR,BS21,BS22,HS2,BSY2,HSY2,BSMR,HSMR
1510 &,BCR1,BCMR,HCR,RHO2,RRAT
1520 405 CONTINUE
1530 PRINT,"ÖNSKAS S-ITERATION? 1=JA"
1540 READ,INYS
1550 390 PRINT,"GE FM0, SM, UD/2"
1560 READ,FM0,SM,UM1
1570 RI=0;LI=0
1580 PRINT,"SKALL SERIEREAKTOR INGÅ I BERÄKNINGARNA? 1=JA"
1590 READ,K8
1600 IF(K8.NE.1) GOTO 392
1610 PRINT,"GE SERIEREAKTOR DATA:R,L"
1620 READ,RI,LI
1630 XI=2*PI*FB*LI
1640 392 CONTINUE
1650 397 CONTINUE
1660 394 CONTINUE
1670 CALL SARE(SPTR,BS21,BS22,HS2,BSY2,HSY2,BSMR,HSMR
1680 &,BCR1,BCMR,HCR,RHO2,N,BS,H,BC,RHO)
1690 WRITE(6,530)
1700 530 FORMAT(1X,5(1H*))
1710C UPPLAGGNING AV RESULTAT FRÅN FOURIER-ANALYS
1720C 3-FAS TILL Q OCH D-AXEL
1730 WRITE(6,545)
1740C
1750 K1=K3
1760 IF(INYS.EQ.1) K1=1
1770 IF(IE.EQ.1) K1=1
1780 DO 540 I=1,K1
1790 A2=RES(I,1)*SIN(RES(I,3))*UM1
1800 B3=RES(I,1)*COS(RES(I,3))*UM1
1810 ABN(I,1)=RES(I,2)
1820 ABN(I,2)=A2
1830 ABN(I,3)=B3
1840 IN=ABN(I,1)
1850 540 WRITE(6,550)A2,IN,B3,IN
1860C
1870 PRINT,"COPY";READ,SRTUNT
1880 545 FORMAT(1X,6(1H*),/T10,"SPÄNNING Q-AXEL")
1890 550 FORMAT(1X,T10,F10,3,"*COS("

```

```

1900      &, I2, "+WT) + ", F10.3, "+SIN(", I2, "+WT) +"
1910 559  CONTINUE
1920      WRITE(6,530)
1930C     VO & VD
1940      S23=2/SQRT(3)
1950C
1960      K1=K3
1970      IF(INYS.EQ.1) K1=1
1980      IF(IE.EQ.1) K1=1
1990      DO 560 I=1,K1
2000      ABN(I,4)=S23*ABN(I,3)*SIN(ABN(I,1)+2*PI/3)
2010      ABN(I,5)=-S23*ABN(I,2)*SIN(ABN(I,1)+2*PI/3)
2020      IN=ABN(I,1)
2030 560  CONTINUE
2040C
2050      XS=XLS+XM
2060      XR=XLR+XM
2070      WB=2*PI*FB
2080      WE=2*PI*FM0
2090      LS=XS/WB
2100      M =XM/WB
2110C
2120      EE(3)=0
2130      EE(4)=EE(3)
2140C
2150      IF(K8.NE.1) GOTO 699
2160      DO 698 K=1,50
2170      DO 698 J=1,2
2180      DO 698 I=1,2
2190      U(K,J,I)=0.0
2200 698  CONTINUE
2210 699  CONTINUE
2220      K1=K3
2230      IF(IE.EQ.1) K1=1
2240      DO 700 K=1,K1
2250      KW=ABN(K,1)
2260      WR=WE*(1-SM)
2270C
2280      VQD(K,1)=0.5*(ABN(K,2)-ABN(K,5))
2290      VQD(K,2)=0.5*(ABN(K,3)+ABN(K,4))
2300      VQD(K,3)=0.5*(ABN(K,2)+ABN(K,5))
2310      VQD(K,4)=0.5*(ABN(K,3)-ABN(K,4))
2320C
2330      DO 700 J=1,3,2
2340      MP=1
2350      IF(J.EQ.3) MP=2
2360      EE(1)=VQD(K,J)
2370      EE(2)=VQD(K,J+1)
2380      KW= ABN(K,1)
2390      IF(J.EQ.3) KW=-ABN(K,1)
2400      F2=ABS(KW*WE-WR)/(2*PI)
2410      CALL RSPIMP(1,F2,N,0,BS,H,BC,RHQ,Z1,Z2,Z3,Z4,Z5,Z6,Z7,Z8)
2420      CALL RSPIMP(1,.1,N,0,BS,H,BC,RHQ,Z3,Z4,Z5,Z6,Z7,Z8,Z9,Z10)
2430      RFACT=RRAT*(Z1/Z3-1.0)+1.0
2440      XFACT=RRAT*(Z2+0.1/(Z4+F2)-1.0)+1.0
2450      LR=(XLR*XFACT+XM)/WB
2460      RR=RR0+RFACT
2470      RROT(K,MP)=RR
2480      CALL SETA(KW)
2490      CALL MINF(F,4,4,0.0001,HM,IER2)
    
```

```

2500      DO 620 I=1,4
2510      SUM=0.0
2520C
2530      DO 630 J2=1,4
2540      SUM=SUM+A(I,J2)*EE(J2)
2550 630  CONTINUE
2560C
2570      SI(I)=SUM
2580      IF(K8.NE.1) GOTO 632
2590      DO 631 J3=1,2
2600      U(K,MP,J3)=B(J3,I)*SI(I)+U(K,MP,J3)
2610 631  CONTINUE
2620 632  CONTINUE
2630 620  CONTINUE
2640C    STRÖMMAR I Q&D-PLANET
2650C
2660      DO 700 I=1,4
2670      AI(K,MP,I)=SI(I)
2680 700  CONTINUE
2690C
2700      IF(K8.NE.1) GOTO 702
2710      K1=K3
2720      IF(INYS.EQ.1) K1=1
2730      IF(IE.EQ.1) K1=1
2740      DO 701 K=1,K1
2750      UQA(K)=U(K,1,1)+U(K,2,1)
2760      UQG(K)=U(K,1,2)+U(K,2,2)
2770      UDA(K)=U(K,1,2)-U(K,2,2)
2780      UDG(K)=U(K,2,1)-U(K,1,1)
2790      DELTAU(K,1)=ABN(K,2)-UQA(K)
2800      DELTAU(K,2)=ABN(K,3)-UQG(K)
2810 701  CONTINUE
2820 702  CONTINUE
2830C
2840C
2850C    EFFEKTFÖRLUSTER I STATOR OCH ROTOR:
2860      PCU1=0
2870      PCU2=0
2880C
2890      K1=K3
2900      IF(INYS.EQ.1) K1=1
2910      IF(IE.EQ.1) K1=1
2920      DO 710 K=1,K1
2930      APCU1=RS*1.5*(AI(K,1,1)**2+AI(K,1,2)**2)
2940      BPCU1=RS*1.5*(AI(K,2,1)**2+AI(K,2,2)**2)
2950      EFF(K,1)=APCU1+BPCU1
2960      IF(IE.NE.1) GOTO 705
2970 742  CONTINUE
2980      DENOM=(RR0/SM)**2+(XLR+XM)*FM0/FB)**2
2990      RH=RR0/SM*(XM*FM0/FB)**2/DENOM
3000      XH=((RR0/SM)**2+XM*FM0/FB+XLR+XM*(XLR+XM)*(FM0/FB)**3)/DENOM
3010      EQ=RES(1,1)*UM1*SQRT((RH**2+XH**2)/((RI+RS+RH)**2
3020      &+(X1*FM0/FB+XLS*FM0/FB+XH)**2))
3030      IF(INYS.EQ.1) GOTO 748
3040      APK1=APK
3050      APK=APK+E1/EQ
3060      IF(ABS((EQ-E1)/E1).GT.0.004) GOTO 103
3070 748  CONTINUE
3080      WRITE(6,713)EQ
3090 713  FORMAT(1X,"EQ=",F13.3)
    
```

PROGRAMLISTA

BILAGA 4.11

```

3100      CPCU2=1.5*RRDT(1,1)*(AI(1,1,3)**2+AI(1,1,4)**2)
3110      DPCU2=1.5*RRDT(1,2)*(AI(1,2,3)**2+AI(1,2,4)**2)
3120      MOM1=P*(CPCU2+DPCU2)/SM/4/PI/FM0
3130      WRITE(6,712)MOM1
3140 712  FORMAT(1X,"MOMENTET=",F13.3,"      ÖNSKAS NY ITERATION? 1=JA")
3150      IF(INYS.EQ.1) GOTO 405
3160      READ,INY
3170      IF(INY.NE.1) GOTO 704
3180      GOTO 390
3190 704  1E=2;APK=APK1
3200      GOTO 103
3210 705  CONTINUE
3220      IF(INYS.EQ.1) GOTO 742
3230      INYS=2
3240      BPCU2=1.5*RRDT(K,2)*(AI(K,2,3)**2+AI(K,2,4)**2)
3250      APCU2=1.5*RRDT(K,1)*(AI(K,1,3)**2+AI(K,1,4)**2)
3260      EFF(K,2)=APCU2+BPCU2
3270
3280      IT=ABN(K,1)
3290      WRITE(6,720)K,IT,EFF(K,1),EFF(K,2),RRDT(K,1),RRDT(K,2)
3300      PCU1=PCU1+EFF(K,1)
3310      PCU2=PCU2+EFF(K,2)
3320 710  CONTINUE
3330      AIP1=SQRT(PCU1/(3+RS))
3340      PRINT,"COPY";READ,STRUNT
3350      WRITE(6,730)PCU1,PCU2,AIP1
3360 720  FORMAT(1X,"K=",I2," F/F0=",I2," PCU1=",F7.1,
3370      & " PCU2=",F7.1," R2+=",E10.3," R2-=",E10.3,/)
3380 730  FORMAT(1X,70(1H-),//,T10,"SUMMA PCU1=",E11.4," W",
3390      & "/T10,"SUMMA PCU2=",E11.4," W",
3400      & "/T10,"I1      =",E11.4," A",/70(1H-))
3410      IF(K8.NE.1) GOTO 737
3420      PRINT,"SPÄNNINGSFALL ÖVER REAKTORN"
3430      PRINT,"      Q-AXELN"
3440      PRINT,"      *COS(NWT)      *SIN(NWT)"
3450      DO 736 K=1,K1
3460      WRITE(6,734)DELTAU(K,1),DELTAU(K,2)
3470 734  FORMAT(1X,2F12.4)
3480 736  CONTINUE
3490 737  CONTINUE
3500C    MOMENTBERÄKNINGAR
3510      AMVM=0;AMDMA=-1E8;AMDMI=1E8
3520      T=1/(FM0*MK)
3530      TD=T/50
3540      TI=0 ; NTM=0
3550C
3560 735  CONTINUE
3570      IF(TI.GT.T)GO TO 750
3580      IQST=0;IDST=0;IQRT=0;IDRT=0
3590      DO 740 K=1,K1
3600      FI=ABN(K,1)*(WE*TI-PI/6.)
3610C    STATORSTRÖM:
3620      IQST=IQST+(AI(K,1,1)+AI(K,2,1))*COS(FI)
3630      &      +(AI(K,1,2)-AI(K,2,2))*SIN(FI)
3640      IDST=IDST+(AI(K,1,2)+AI(K,2,2))*COS(FI)
3650      &      -(AI(K,1,1)-AI(K,2,1))*SIN(FI)
3660C    ROTORSTRÖM:
3670      IQRT=IQRT+(AI(K,1,3)+AI(K,2,3))*COS(FI)
3680      &      +(AI(K,1,4)-AI(K,2,4))*SIN(FI)
3690      IDRT=IDRT+(AI(K,1,4)+AI(K,2,4))*COS(FI)

```

Denna handling får ej utan vårt medgivande kopieras. Den får ej heller delgivas annan eller eljest obehörigen användas. Överträdelse härav beivras med stöd av gällande lag. ASEA


```

3700      &          - (AI(K,1,3)-AI(K,2,3))*SIN(FI)
3710 740 CONTINUE
3720C
3730      MOMT=M*0.75*P*(IQST>IDRT-IDST>IDRT)
3740      AMVM=AMVM+MOMT
3750      IF (MOMT.GT.AMOMA) AMOMA=MOMT
3760      IF (MOMT.LT.AMOMI) AMOMI=MOMT
3770      TI=TI+TD
3780      NTM=NTM+1
3790      GO TO 735
3800 750 CONTINUE
3810      AMVM=AMVM/NTM
3820      AMVAR1=AMOMA-AMVM
3830      AMVAR2=AMOMI-AMVM
3840      WRITE (6,760) T,AMVM,AMVAR1,AMVAR2
3850 760  FORMAT(1X, /70(1H-), /T10, "MOMENTET UNDER", E11.4, " SEK. :",
3860      &          //T10, "MEDELVARDE:", E11.4, " NM",
3870      &          //T10, "AMPLITUD  :", E11.4, " NM",
3880      &          //T10, "AMPLITUD  :", E11.4, " NM", /70(1H-))
3890C      ÖGONBLICKSVÄRDEN: STRÖM, SPÄNNING OCH MOMENT
3900 805 CONTINUE
3910      PRINT, "ÖNSKAS PLOT ELLER TABELL? 1=PLOT 2=TABELL"
3920      READ, LP
3930      PRINT, "GE TEXT TILL TABELL ELLER PLOT"
3940      READ, TEXT
3950      PRINT, "GE TIDSINTERVALL FÖR PLOT ELLER UTSKRIFT"
3960      PRINT, "T1<T<T2 MILLISEC. ; T1>=0"
3970      READ, T1, T2
3980      TI=TI/1000
3990      T=T/1000
4000      PRINT, "GE ANTALET STEG I INTERVALLET"
4010      READ, STEG
4020      TD=(T-TI)/STEG
4030      IF (LP.EQ.2) GO TO 808
4040      PRINT, "GE AMPLITUDER FÖR SKALNING !"
4050      PRINT, "SPÄNNING (V), STATORSTRÖM (A), MOMENT (NM)"
4060      READ, UMAX, AIQSMAX, AMOMAX
4070      CALL PLOTS
4080      CALL ERASE
4090      WRITE (6,940) TEXT
4100      CALL FRAME(0.,0.,16.,14.,2)
4110      DX=(T-TI)/10.
4120      CALL AXIS(4.,1., "TID (SEKUNDER) ", -15,10.,0.,T1,DX)
4130      DY1=2*UMAX/10.
4140      CALL AXIS(1.,1., "SPÄNNING      (V)", 15,10.,90.,-UMAX,DY1)
4150      DY2=2*AIQSMAX/10.
4160      CALL AXIS(2.,1., "STATORSTRÖM (A)", 15,10.,90.,-AIQSMAX,DY2)
4170      DY3=2*AMOMAX/10.
4180      CALL AXIS(3.,1., "MOMENT      (NM)", 15,10.,90.,-AMOMAX,DY3)
4190      CALL PLOT(4.,6.,23)
4200      GO TO 810
4210 808 CONTINUE
4220      WRITE (6,930) TEXT
4230      WRITE (6,910)
4240C
4250 810 CONTINUE
4260      IF (TI.GT.T) GO TO 905
4270      IQST=0; IDST=0; IQRT=0; IDRT=0; UDST=0
4280C
4290      DO 900 K=1,K1

```

Denna handling får ej utan vårt medgivande kopieras. Den får ej heller delgivas annan eller eljest obehörigen användas. Överträdelse härav beivras med stöd av gällande lag. ASEA

PROGRAMLISTNING

```

4300      FI=ABN(K,1)*(WE*TI-PI/6.)
4310      FI1=ABN(K,1)*WE*TI
4320C     STATORSTRÖM:
4330      IQST=IQST+(AI(K,1,1)+AI(K,2,1))*COS(FI)
4340      &      +(AI(K,1,2)-AI(K,2,2))*SIN(FI)
4350      IDST=IDST+(AI(K,1,2)+AI(K,2,2))*COS(FI)
4360      &      -(AI(K,1,1)-AI(K,2,1))*SIN(FI)
4370C     ROTORSTRÖM:
4380      IQRT=IQRT+(AI(K,1,3)+AI(K,2,3))*COS(FI)
4390      &      +(AI(K,1,4)-AI(K,2,4))*SIN(FI)
4400      IDRT=IDRT+(AI(K,1,4)+AI(K,2,4))*COS(FI)
4410      &      -(AI(K,1,3)-AI(K,2,3))*SIN(FI)
4420      UGST=UGST+ABN(K,4)*COS(FI1)+ABN(K,5)*SIN(FI1)
4430 900  CONTINUE
4440C
4450      UGST=UGST*SQRT(3)
4460      MOMT=M+0.75*P*(IQST*IDRT-IDST*IQRT)
4470C     UTSKRIFT I TABELL
4480      IF(LP.EQ.2)GO TO 902
4490      CALL PLOT(TI/DX,UGST/DY1,3)
4500      CALL PLOT(TI/DX,UGST/DY1,2)
4510      CALL PLOT(TI/DX,IDST/DY2,3)
4520      CALL PLOT(TI/DX,IDST/DY2,2)
4530      CALL PLOT(TI/DX,MOMT/DY3,3)
4540      CALL PLOT(TI/DX,MOMT/DY3,2)
4550      GO TO 904
4560 902  FI0=WE*TI
4570      WRITE(6,920)TI*1000,FI0,MOMT,UGST,IDST,IDRT
4580 904  TI=TI+TD
4590      GO TO 810
4600 905  CONTINUE
4610      IF(LP.EQ.2)GO TO 908
4620      CALL HDCOPY
4630      DO 906 NNM=1,5
4640 906  CALL BELL
4650      READ,STRUNT
4660      CALL PLOT(0.,0.,23)
4670      CALL ERASE
4680      CALL ENDP
4690 908  CONTINUE
4700      WRITE(6,530)
4710      PRINT,"ÖNSKAS NY UTSKRIFT (PLOT) ? 1=JA"
4720      READ,ISVAR
4730      IF(ISVAR.EQ.1)GO TO 805
4740 910  FORMAT(1X,70(1H-),/"T",T15,"W0+T",T25,"M",T35,"U",
4750      &      T45,"I1",T55,"I2",/"(MS)",T11,"(RAD)",T25,"(NM)",
4760      &      T35,"(V)",T45,"(A)",T55,"(A)",/70(1H-))
4770 920  FORMAT(1X,F8.3,T15,F6.4,T25,F7.2,T35,F7.1,T45,F7.1,T55,F7.1)
4780 930  FORMAT(1X,70(1H-),/T10,A30)
4790 940  FORMAT(1X,T20,A30)
4800 1000 CONTINUE
4810      PRINT,"ÖNSKAS NY MASKINBERÄKNING? 1=JA"
4820      READ,MASKIN
4830      IF(MASKIN.EQ.1)GO TO 440
4840      PRINT,"ÖNSKAS NY KÖRNING? 1=JA"
4850      READ,ISLUT
4860      IF(ISLUT.EQ.1)GO TO 1
4870      STOP;END

```

ASEA

TR KYEC 4166-9256

PROGRAMLISTNING

BILAGA 4.14

```

5650 SUBROUTINE SETA(N)
5660 COMMON/LABEL2/RS,LS,M,LR,RR,WE,WR,A(4,4),RI,LI,B(4,4)
5670 REAL N,M,LS,LR,LI
5680C
5690 A(1,1)=RS+RI
5700 A(1,2)=N*WE*(LS+LI)
5710 A(1,3)=0.0
5720 A(1,4)=N*WE*M
5730 A(2,1)=-N*WE*(LS+LI)
5740 A(2,2)=RS+RI
5750 A(2,3)=-N*WE*M
5760 A(2,4)=0.0
5770 A(3,1)=0.0
5780 A(3,2)=(N*WE-WR)*M
5790 A(3,3)=RR
5800 A(3,4)=(N*WE-WR)*LR
5810 A(4,1)=-N*WE*(LS+LI)
5820 A(4,2)=0.0
5830 A(4,3)=-N*WE*(LS+LI)
5840 A(4,4)=RR
5841 B(1,1)=RS
5842 B(1,2)=N*WE*LS
5843 B(2,1)=-N*WE*LS
5844 B(2,2)=RS
5845 DO 2 J=3,4
5846 DO 2 I=3,4
5847 B(I,J)=A(I,J)
5848 2 CONTINUE
5849 B(1,3)=A(1,3)
5850 B(1,4)=A(1,4)
5851 B(2,3)=A(2,3)
5852 B(2,4)=A(2,4)
5853 B(3,1)=A(3,1)
5854 B(3,2)=A(3,2)
5855 B(4,1)=A(4,1)
5856 B(4,2)=A(4,2)
5857 RETURN
5860 END

```

Denna handling får ej utan vårt medgivande kopieras. Den får ej heller delgivas annan eller eljest obehörigen användas. Överträdelse härav beivras med stöd av gällande lag. ASEA

ASEA

TR KYEC 4166-9256

KOREXEMPEL

BILAGA 4.15

```

GE ANTAL ARGUMENT (ALFA) SOM INTE=0
=0
GE ARGUMENTEN I GRADER
=0
ÖNSKAS SÄRSKILDA FREKVENSER? 1=JA
=2
GE HÖGSTA ÖNSKADE FREKVENF F/F0, F0=GRUNDTON
=53
GE PULSKVOT
=.67
GE (ANTALET PULSER PER PERIOD)/6
=2
GE FASFÖRSKJUTNING I GRADER
=0
GE MINSTA AMPLITUD SOM SKALL ADDERAS
=1E-10
ÖNSKAS KONSTANT FLÖDE? 1=JA
=1
GE ÖNSKAT E-VÄRDE
=170
PULSKVOT= 0.6700
ÖNSKAS NY FOURIER-ANALYS ? 1=JA
=2
NYA MASKINKONSTANTER ? 1=JA
=1
ÖNSKAS MBK 280 S-6:S MASKINKONSTANTER? 1=JA
=1
ÖNSKAS S-ITERATION? 1=JA
=2
GE FM0, SM, UD/2
=30 .0525 244
SKALL SERIEREAKTOR INGA I BERÄKNINGARNA? 1=JA
=1
GE SERIEREAKTOR DATA:R,L
=.006 .001
*****
*****
      SPÄNNING Q-AXEL
      0.013*COS( 1*WT) +   -207.098*SIN( 1*WT) +
COPY
=
*****
PULSKVOT= 0.6883
ÖNSKAS NY FOURIER-ANALYS ? 1=JA
=2
NYA MASKINKONSTANTER ? 1=JA
=2
ÖNSKAS S-ITERATION? 1=JA
=2
GE FM0, SM, UD/2
=30 .0525 244
SKALL SERIEREAKTOR INGA I BERÄKNINGARNA? 1=JA
=1
GE SERIEREAKTOR DATA:R,L
=.006 .001
*****
*****
      SPÄNNING Q-AXEL
      0.014*COS( 1*WT) +   -212.834*SIN( 1*WT) +
COPY

```

Denna handling får ej utan vårt medgivande kopieras. Den får ej heller delgivas annan eller eljest obehörigen användas. Överträdelse härav beivras med stöd av gällande lag. ASEA

ASEA

TR KYEC 4166-9256

BILAGA 4.1b

=

EQ= 170.059

MOMENTET= 703.524 ÖNSKAS NY ITERATION? 1=JA

=2

PULSKVOT= 0.6883

RESULTAT AV FOURIERANALYS:

F/F0	AMPLITUD	FASVINKEL
1.	0.87227	3.14153
5.	0.15005	3.14153
7.	0.07989	3.14153
11.	0.23409	0.
13.	0.42800	3.14153
17.	0.15094	3.14153
19.	0.13659	3.14153
23.	0.25953	3.14153
25.	0.12437	0.
29.	0.01231	3.14153
31.	0.01661	3.14153
35.	0.00326	0.00002
37.	0.05062	3.14153
41.	0.02451	3.14153
43.	0.01841	3.14153
47.	0.04002	0.00000
49.	0.10166	3.14153
53.	0.04685	3.14153

ÖNSKAS NY FOURIER-ANALYS ? 1=JA

=2

NYA MASKINKONSTANTER ? 1=JA

=2

ÖNSKAS S-ITERATION? 1=JA

=2

GE FM0, SM, UD/2

=30 .0525 244

SKALL SERIEREAKTOR INGA I BERÄKNINGARNA? 1=JA

=1

GE SERIEREAKTOR DATA: R, L

=.006 .001

SPÄNNING O-AXEL

```

0.014*COB( 1*WT) + -212.834*SIN( 1*WT) +
0.002*COB( 5*WT) + -36.611*SIN( 5*WT) +
0.001*COB( 7*WT) + -19.492*SIN( 7*WT) +
0. *COB(11*WT) + 57.119*SIN(11*WT) +
0.007*COB(13*WT) + -104.432*SIN(13*WT) +
0.002*COB(17*WT) + -36.828*SIN(17*WT) +
0.002*COB(19*WT) + -33.329*SIN(19*WT) +
0.004*COB(23*WT) + -63.326*SIN(23*WT) +
0. *COB(25*WT) + 30.346*SIN(25*WT) +
0.000*COB(29*WT) + -3.004*SIN(29*WT) +
0.000*COB(31*WT) + -4.053*SIN(31*WT) +
0.000*COB(35*WT) + 0.796*SIN(35*WT) +
0.001*COB(37*WT) + -12.351*SIN(37*WT) +
0.000*COB(41*WT) + -5.980*SIN(41*WT) +
0.000*COB(43*WT) + -4.491*SIN(43*WT) +
0.000*COB(47*WT) + 9.764*SIN(47*WT) +

```

Denna handling får ej utan vårt medgivande kopieras. Den får ej heller delgivas annan eller eljest obehörigen användas. Överträdelse härav beivras med stöd av gällande lag. ASEA

KÖREXEMPEL

BILAGA 4.7

0.002*cos(49*WT) + -24.804*sin(49*WT) +
0.001*cos(53*WT) + -11.432*sin(53*WT) +

COPY

=

K= 1	F/F0= 1	PCU1= 2745.5	PCU2= 2320.7	R2+= 0.510E-01	R2-= 0.811E-01
K= 2	F/F0= 5	PCU1= 27.5	PCU2= 72.8	R2+= 0.114E 00	R2-= 0.135E 00
K= 3	F/F0= 7	PCU1= 4.0	PCU2= 10.6	R2+= 0.136E 00	R2-= 0.153E 00
K= 4	F/F0=11	PCU1= 14.4	PCU2= 52.0	R2+= 0.169E 00	R2-= 0.183E 00
K= 5	F/F0=13	PCU1= 34.4	PCU2= 125.1	R2+= 0.184E 00	R2-= 0.196E 00
K= 6	F/F0=17	PCU1= 2.5	PCU2= 11.1	R2+= 0.209E 00	R2-= 0.220E 00
K= 7	F/F0=19	PCU1= 1.7	PCU2= 7.3	R2+= 0.221E 00	R2-= 0.232E 00
K= 8	F/F0=23	PCU1= 4.1	PCU2= 20.7	R2+= 0.243E 00	R2-= 0.252E 00
K= 9	F/F0=25	PCU1= 0.8	PCU2= 4.0	R2+= 0.253E 00	R2-= 0.262E 00
K=10	F/F0=29	PCU1= 0.0	PCU2= 0.0	R2+= 0.271E 00	R2-= 0.280E 00
K=11	F/F0=31	PCU1= 0.0	PCU2= 0.1	R2+= 0.280E 00	R2-= 0.289E 00
K=12	F/F0=35	PCU1= 0.0	PCU2= 0.0	R2+= 0.297E 00	R2-= 0.305E 00
K=13	F/F0=37	PCU1= 0.1	PCU2= 0.4	R2+= 0.306E 00	R2-= 0.313E 00
K=14	F/F0=41	PCU1= 0.0	PCU2= 0.1	R2+= 0.321E 00	R2-= 0.329E 00
K=15	F/F0=43	PCU1= 0.0	PCU2= 0.0	R2+= 0.329E 00	R2-= 0.336E 00
K=16	F/F0=47	PCU1= 0.0	PCU2= 0.2	R2+= 0.343E 00	R2-= 0.350E 00
K=17	F/F0=49	PCU1= 0.1	PCU2= 1.0	R2+= 0.351E 00	R2-= 0.357E 00
K=18	F/F0=53	PCU1= 0.0	PCU2= 0.2	R2+= 0.364E 00	R2-= 0.371E 00

COPY

=

SUMMA PCU1= 0.2835E 04 W

SUMMA PCU2= 0.2626E 04 W

I1 = 0.1403E 03 A

SPÄNNINGSFALL ÖVER REAKTORN

Q-AXELN

*COS(NMT)	*SIN(NMT)
-27.1578	-24.8731
1.4653	-18.3514
-0.7123	-9.7876
-1.4651	29.2392
-2.5807	-53.4793
0.7417	-19.0144
-0.6551	-17.2107
1.0783	-32.8578
0.5085	15.7472
0.0450	-1.5637
-0.0598	-2.1099
-0.0107	0.4157
-0.1648	-6.4462
0.0742	-3.1267
-0.0550	-2.3483
-0.1121	5.1130
-0.2825	-12.9892
0.1234	-5.9942

MOMENTET UNDER 0.1667E-01 SEK. :

MEDELVARDE: 0.7034E 03 NM

AMPLITUD : 0.1465E 03 NM

AMPLITUD : -0.1188E 03 NM

BNSKAS PLOT ELLER TABELL? 1=PLOT 2=TABLELL

ASEA

TR KYEC 4166-9256

KÖRE XEMPEL

BILAGA 4.18

=2

GE TEXT TILL TABELL ELLER PLOT

=

GE TIDSINTERVALL FÖR PLOT ELLER UTSKRIFT

T1<T<T2 MILLISEC. ; T1>=0

=0 17

GE ANTALET STEG I INTERVALLET

=6

T	W0+T	M	U	I1	I2
(MS)	(RAD)	(NM)	(V)	(A)	(A)
0.	0.	741.03	-512.6	-41.9	92.2
2.833	0.5341	761.89	-533.3	-160.1	176.1
5.667	1.0681	726.10	-84.8	-208.3	185.2
8.500	1.6022	807.88	0.4	-204.5	149.4
11.333	2.1363	709.90	498.2	-157.2	84.5
14.167	2.6704	836.44	435.1	-19.2	-49.5
17.000	3.2044	694.67	459.9	50.8	-97.8

ÖNSKAS NY UTSKRIFT (PLOT) ? 1=JA

=2

ÖNSKAS NY MASKINBERÄKNING? 1=JA

=2

ÖNSKAS NY KÖRNING? 1=JA

=2

Denna handling får ej utan vårt medgivande
kopieras. Den får ej heller delgivas annan eller
ejest obehörigen användas. Överträdelse härav
beivras med stöd av gällande lag. ASEA

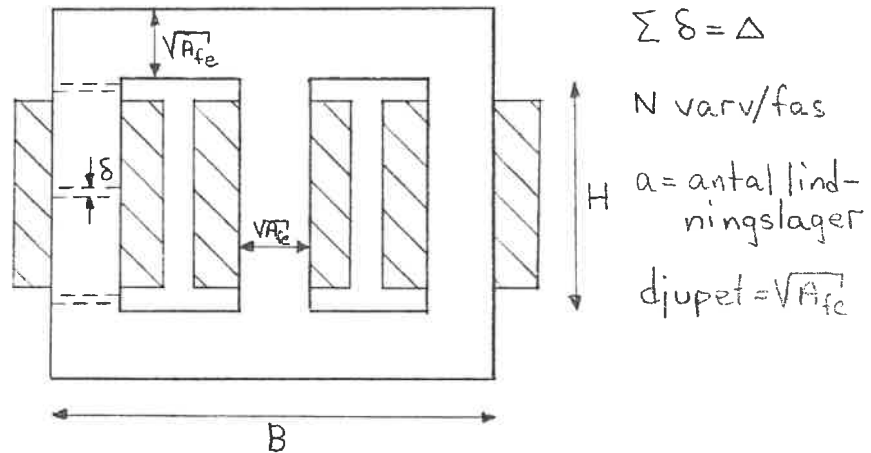
BERÄKNING AV INDUKTORSTORLEK

1.

Allmänt

För att närmare studera de fysiska dimensionerna hos en induktor har vikt och volym beräknats för en luftkyld induktor med varierande induktans.

En trefasinduktor har följande utseende:



Luftgapen delas upp i flera delgap för att begränsa läckflöden.

2.

Beräkningsgång

Den i lindningen inducerade spänningen blir:

$$e = \frac{d\psi}{dt} \Rightarrow E = j\omega\psi, E = \omega\psi$$

$$\Psi = N \cdot \Phi = N B A_{fe} \Rightarrow E = 2\pi B A_{fe} N f$$

$$E = \sqrt{2} \pi \cdot 10^{-8} \hat{B} A_{Fe} N f \text{ (cgs)}$$

Dessutom gäller att:

$$\oint H ds = N \cdot I \Rightarrow H_{\Delta} \cdot \Delta + H_j \cdot \ell = N \cdot I$$

$$\Rightarrow \frac{B}{\mu_0} \cdot \Delta + \frac{B}{\mu \mu_0} \cdot l = N \cdot I$$

Luftgapsreluktansen dominerar $\Rightarrow I = \frac{1}{\mu_0} \cdot \frac{B \Delta}{N}$

$$I = \frac{1}{\mu_0} \frac{\hat{B} \cdot \Delta}{N\sqrt{2}} \cdot 10^{-6} \text{ (cgs)}$$

$$\Delta = \mu_0 \sqrt{2} 10^6 \text{ IN}/\hat{B} = 0.4\pi \sqrt{2} \text{ IN}/\hat{B} \quad (\text{eq. 5})$$

Reaktansen blir

$$X = \frac{\sqrt{2} \pi \cdot 10^{-8} \hat{B} \cdot f}{I} \cdot N \cdot A_{fe} \text{ (cgs)}$$

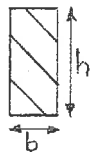
Om induktorn beräknas för maskinen MBK 280 S-6 så krävs
 $I = 160 \text{ A}$. Sätts detta in tillsammans med värden på
 maximal ström- och flödestäthet så fås:

$$\hat{B} = 12000 \text{ gauss}; s_{\max} = 1.9 \text{ A/mm}^2$$

$$X = 1.66 \cdot 10^{-4} N \cdot A_{fe} \text{ (cgs)}; \Delta = 2.37 \cdot 10^{-2} \text{ N}$$

3.
Kopparvikter

$$s = 1.9 \text{ A/mm}^2 \Rightarrow A_{cu} = 160 / 1.9 = 84 \text{ mm}^2 = 6 \times 14 \text{ mm}^2$$



$$b = 6 \text{ mm} \quad h = 14 \text{ mm} \quad \delta_{cu} = 7900 \text{ kg/m}^3$$

$$m_{cu} = 3 \cdot N \cdot A_{cu} \cdot l \cdot \delta_{cu} = \{ l = 4(\sqrt{A_{fe}} + 0.3a) \} =$$

$$= 3 \cdot A_{cu} \cdot \delta_{cu} \cdot 4(\sqrt{A_{fe}} + 0.3a) \text{ N} =$$

$$= 3 \cdot 84 \cdot 10^{-6} \cdot 7900 \cdot 4(\sqrt{A_{fe}} + 0.3a) \text{ N} =$$

$$= 0.0897(\sqrt{A_{fe}} + 0.3a) \text{ N} \quad [A_{fe}] = \text{cm}^2$$

4.
Järnvikter

$$\text{benen: } m_{feb} = 3 \cdot A_{fe} \cdot H \cdot \delta_{fe} = \{ H = \frac{Nh}{a} + 0.04 \} =$$

$$= 3 \delta_{fe} \left(\frac{Nh}{a} + 0.04 \right) A_{fe} = 3 \cdot 7900 \cdot 10^{-6} \left(\frac{Nh}{a} + 4 \right) A_{fe} =$$

$$= 0.0237 \left(1.4 \frac{N}{a} + 4 \right) A_{fe} \quad [A_{fe}] = \text{cm}^2$$

$$\text{oken: } m_{feo} = 2 \cdot A_{fe} \cdot B \cdot \delta_{fe} = \{ B = 3\sqrt{A_{fe}} + 4 \cdot 1.2 \cdot a \cdot b + 2 \cdot 0.03 \} =$$

$$= 2 \cdot \delta_{fe} (3\sqrt{A_{fe}} + 4.8ab + 0.06) A_{fe} = 2 \cdot 7900 \cdot 10^{-6} (3\sqrt{A_{fe}} + 2.88a + 6) A_{fe} =$$

$$= 0.0158 (3\sqrt{A_{fe}} + 2.88a + 6) A_{fe} \quad [A_{fe}] = \text{cm}^2$$

5.
Sammanfattning

$$X = \frac{\sqrt{2} \cdot \pi \cdot 10^{-2} \cdot \hat{B} \cdot f \cdot N \cdot A_{fe}}{I} = 1.66 \cdot 10^{-4} \cdot N \cdot A_{fe} [\Omega]$$

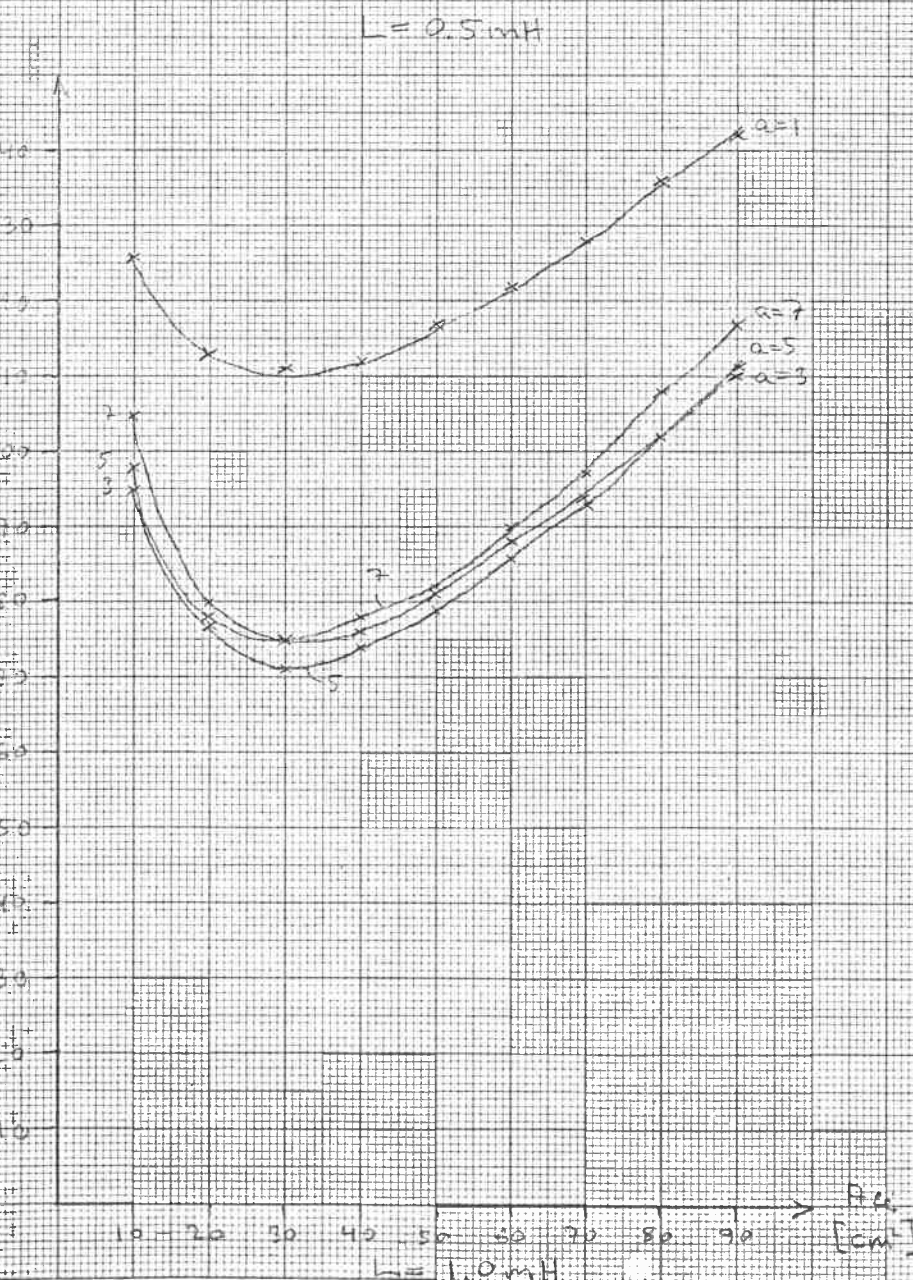
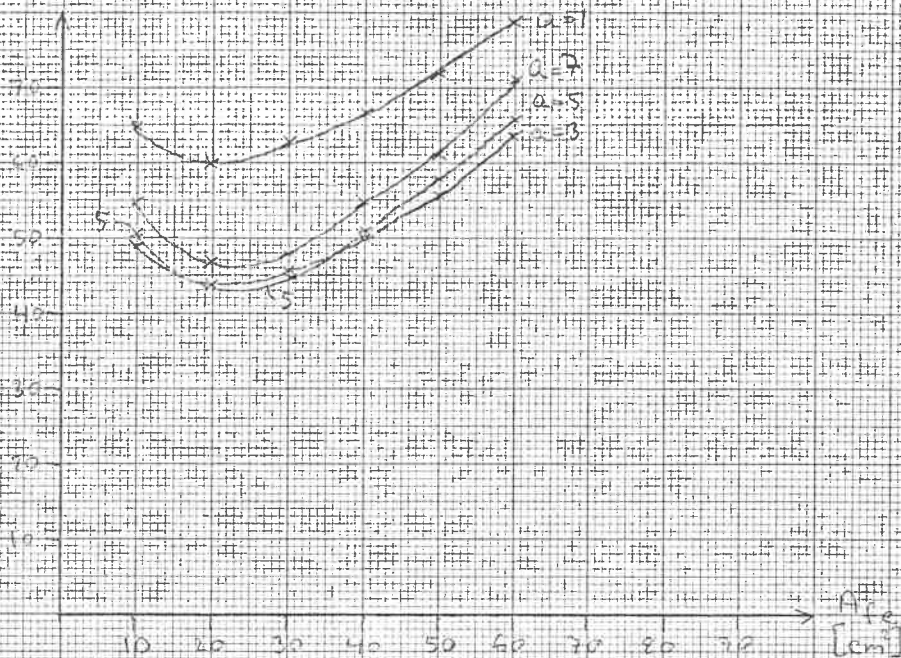
$$\Delta = \frac{\mu_0 \sqrt{2} \cdot 10^6 I}{\hat{B}} N = 2.37 \cdot 10^{-2} N [\text{cm}]$$

$$m_{cu} = 0.0897 (\sqrt{A_{fe}} + 0.3 a) N$$

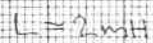
$$m_{feb} = 0.237 (1.4 \frac{N}{a} + 4) A_{fe}$$

$$m_{feo} = 0.0158 (3\sqrt{A_{fe}} + 2.88a + 6) A_{fe}$$

Görs beräkningar för tre olika induktorer (0,5, 1,0, 2,0 mH) erhålls de tre diagrammen i figur 1-3, i vilka induktorns vikt har beräknats med benarean och antalet lager lindningar har varit frita variabler.



BILAGA 5.5



TYPDATA

1.

Omriktare

$$U_d = 488 \text{ V}$$

<u>Växel</u>	<u>Grundfrekvens</u>	<u>p</u>	<u>J'</u>	<u>α</u>
A	0.00- 4.51	17	0	3
B	3.93- 5.89	13	0	2
C	5.47-10.95	7	0	1
D	9.60-12.77	6	0	1
E	11.52-15.32	5	0	1
F	14.02-17.88	5	0	
G	17.53-22.35	4	0	
H	21.28-25.92	3	0	
I	25.54-41.44	2	0	
K	39.06-50.00	1	0	
L	50.00-	-	0	

2.

Motor

MBK 280 S-6 med forcerad kylning

Elektriska data:

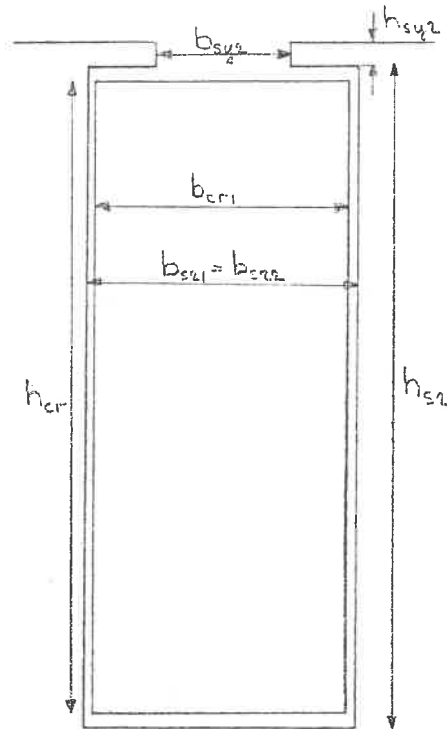
U_n	=	380 V
I_n	=	150 A
M_n	=	740 Nm
n_n	=	970 rpm
P_{2n}	=	75 kW
R_1	=	0,048 Ω /fas
X_1	=	0,20 Ω /fas
X_m	=	3,886 Ω /fas
X_2	=	0,16 Ω /fas
R_2	=	0,051 Ω /fas

Mekaniska data:

Stator:	statordiameter	=	470 mm
	luftgapsdiameter	=	315 mm
	plåtlängd	=	205 mm
	tandhöjd	=	43,5 mm
	spårbredd	=	10,1 mm
	tandbredd	=	10,3 mm
	lindningsvikt	=	14,3 kg
	spårtal	=	54
Rotor:	tandhöjd	=	29,5 mm
	spårbredd	=	4,25 mm
	tandbredd	=	7,8-10,5 mm
	lindningsvikt	=	11,5 kg
	spårtal	=	66

Totalvikt = 480 kg

Spårdata:



SPTR = spårtyp enligt
RESIST

R_{ho2} = ledarresistivitet

R_{rat} = kvoten mellan
spårets medeldia-
meter och rotorns
medeldiameter

SPTR	= 2
b_{s21}	= 3,95 mm
b_{s22}	= 3,95 mm
h_{s2}	= 29,2 mm
b_{sy2}	= 2,0 mm
h_{sy2}	= 1,0 mm
b_{cr1}	= 3,75 mm
h_{cr}	= 28 mm
r_{ho2}	= 0,0425 Ω/m
R_{rat}	= 0,65

VARIABELFÖRTECKNING

a	=	antal faser
B	=	flödestäthet
$B_{\max}$	=	maximal flödestäthet
d	=	inträngningsdjup
E	=	flödesspänning
e	=	flödesspänningens momentanvärde
f	=	frekvens
I_1	=	statorström
I_2	=	rotorström
I_{11}	=	grundtonsstatorström
$I_{1\phi}$	=	övertonsstatorström
$I_{2\phi}$	=	övertonsrotorström
k_h	=	proportionalitetsfaktor
k_v	=	proportionalitetsfaktor
L	=	induktorns induktans
L_1	=	statorinduktans
L_2	=	rotorinduktans
L_m	=	magnetiseringsinduktans
M	=	moment
m	=	pulskvot
M_n	=	märkmoment
M_p	=	pulsationsmoment
$M(\theta)$	=	modulationssignal
M_i	=	fourierkoefficient för $M(\theta)$
N	=	antal modulationspulser
N_1	=	primärt lindningsvarv
N_2	=	sekundärt lindningsvarv
P_{cu}	=	kopparförluster
$P_{cu\phi}$	=	övertonskopparförluster
P_{fe}	=	järnförluster
$P_{fe\phi}$	=	övertonsjärnförluster
P_h	=	hysteresförluster
P_v	=	virvelströmsförluster
R	=	induktorns resistans
R_1	=	statorresistans
R_2	=	rotorresistans
$R(\varphi)$	=	referenssignal
R_n	=	fourierkoefficient för $R(\varphi)$
S	=	eftersläpning
U	=	motorklämspänning
V_1	=	grundton av U

$U_{\text{ö}}$	=	övertoner av U
V	=	omriktarklämspänning
V_1	=	grundton av V
$V_{\text{ö}}$	=	övertoner av V
Z_2	=	$jX_m // (R_2/s + X_2)$
α_i	=	hackvinklar
β	=	vinkel mellan q-axeln och rotorns r-axel
γ	=	U , I eller Ψ
θ	=	vinkel mellan q-axel och statorns r-axel
θ_o	=	fasförskjutning
θ_r	=	$\theta - \beta$
λ	=	exponentkonstant vid hysteresförluster
ξ	=	nedstämpling
σ	=	konduktivitet
ϕ	=	flöde
φ	=	vinkel = ωt
Ψ	=	sammanlänkat flöde
ω	=	synkron vinkelhastighet
ω_e	=	elektrisk vinkelhastighet
ω_r	=	vinkelhastighet hos rotor