

Lappeenrannan teknillinen yliopisto
Sähkötekniikan osasto

Jenni Peri

VERKKOKÄYTTÖISTEN TAHTIMOOTTORIEN
KÄYNNISTYSHÄIRIÖN TUTKIMINEN

Diplomityön aihe on hyväksytty Sähkötekniikan osaston osastoneuvostossa
20.10.2003.

Työn valvoja ja tarkastaja Professori Juha Pyrhönen

Työn ohjaaja ja tarkastaja DI Tapio Rauhala, ABB Oy Sähkökoneet

Helsinki 14.01.2004 _____

TIIVISTELMÄ

Lappeenrannan teknillinen yliopisto
Sähkötekniikan osasto
Jenni Peri

Verkkokäyttöisten tahtimoottorien käynnistyshäiriön tutkiminen

Diplomityö
2004
73 sivua, 42 kuvaa, 2 taulukkoa ja 1 liite

Tarkastajat: Professori Juha Pyrhönen
DI Tapio Rauhala, ABB Oy Sähkökoneet

Avainsanat: tahtimoottori, verkkokäyttöinen, käynnistys, harjaton magnetointi, tyristorien liipaisu
Keywords: synchronous motor, direct-on-line, starting, brushless excitation, thyristor triggering

Diplomityössä tutkitaan verkkokäyttöisten harjattomasti magnetoitujen tahtimoottorien käynnistyshäiriötä, jossa moottori magnetoituu vasta useiden sekuntien kuluttua magnetoinnin kytkemisestä magnetointilaitteiston normaalista toiminnasta huolimatta. Syy magnetoitumisen viivästymiseen on magnetointikoneen oikosulkeutuminen roottorin ylijännitesuojana toimivan tyristorihaaran kautta siitä huolimatta, että tyristorihaaran tyristorien on tarkoitus olla johtamattomassa tilassa magnetointikoneen alkaessa syöttää magnetointivirtaa.

Syitä tyristorien johtavana pysymiseen magnetoinnin kytkennän jälkeen etsitään tahtimoottorin käynnistyskokeista saatujen mittaustulosten sekä SMT- ja FCSMEK-laskentaohjelmilla tehtyjen käynnistysmallien avulla. Samalla arvioidaan ohjelmien käyttökelpoisuutta käynnistyshäiriön ennakoimisessa.

Diplomityössä esitetään syyt kahden esimerkkikoneen magnetoitumisen viivästymiseen sekä muutoksia roottoriin ja käynnistysproseduuriin, joiden avulla tutkittu käynnistyshäiriö voitaisiin tulevaisuudessa todennäköisesti välttää.

ABSTRACT

Lappeenranta University of Technology
Department of Electrical Engineering
Jenni Peri

Study on a Starting Failure of Direct-On-Line Synchronous Motors

Master's thesis

2004

73 pages, 42 figures, 2 tables and 1 appendix

Supervisors: Professor Juha Pyrhönen, Dr.Sc.(Tech.)

Tapio Rauhala, M.Sc.(Tech.), ABB Oy Electrical Machines

Keywords: synchronous motor, direct-on-line, starting, brushless excitation, thyristor triggering

In this master's thesis a starting failure of brushless direct-on-line synchronous motors is studied. During the starts of two exemplary motors there has been a several seconds long delay between the exciter energization and the motor synchronization which may be observed as an excitation feedback from the network. As the exciter has functioned normally, this delay is due to the exciter being short-circuited by the counter-parallel connected thyristor branch which is used in direct-on-line motors as a rotor overvoltage protection even though the thyristors should not fire after the exciter energization.

Starting tests and motor start simulations with SMT and FCSMEK calculation programs have been performed. The test data and the simulation results are studied to find out why thyristors have stayed in ON state for far longer than was expected.

Probable causes of the synchronization delay in the starts of the exemplary motors are evaluated. Changes in rotor circuit and starting procedure are recommended in order to avoid this starting failure in the future.

ALKUSANAT

Tämä diplomityö on tehty ABB Oy Sähkökoneiden Tahtikoneet-tulosityksikössä. Työn aihe on lähtöisin ohjaajaltani DI Tapio Rauhalalta, jota haluan kiittää kannustavasta asenteesta ja tarmosta vastata jokaiseen kysymykseeni. Kiitoksen ansaitsee myös DI Jan Westerlund, joka on ollut suurena apuna opastaessaan minulle laskentaohjelmien käyttöä. Työn valvojaa professori Juha Pyrhöstä tahdon kiittää kommentteista sekä innostuneesta opetuksesta erityisesti viimeisen opiskeluvuoteni aikana.

Saadessani opintoni päätökseen tämän diplomityön valmistumisen myötä haluan lausua kiitoksen perheelleni, joka on kannustanut ja tukenut minua kaikin tavoin koko koulutaipaleeni ajan. Och ett extra tack går till min pojkvän Niklas, vars förståelse och stöd har varit ovärderliga under de senaste månaderna.

Helsinki 14.01.2004 _____

SISÄLLYSLUETTELO

TIIVISTELMÄ	1
ABSTRACT	3
ALKUSANAT	4
SISÄLLYSLUETTELO.....	5
KÄYTETYT SYMBOLIT JA LYHENTEET	7
1 JOHDANTO	8
1.1 DOL-moottori.....	8
1.2 DOL-moottorin rakenne	8
1.3 DOL-moottorin käynnistäminen.....	12
1.3.1 Käynnistystavat	12
1.3.1.1 Suora verkkokäynnistys.....	12
1.3.1.2 Käynnistysmuuntajakäynnistys.....	13
1.3.1.3 Kuristinkäynnistys	14
1.3.1.4 Apumoottorikäynnistys.....	15
1.3.1.5 Vetotahdistus.....	16
1.3.1.6 Taajuusohjattu käynnistys.....	17
1.3.2 Tahdistuminen verkkokäynnistyksessä.....	17
1.4 Työn tavoite.....	19
1.5 Käynnistysongelman kuvaus	20
1.5.1 Loistehokompensaattorin käyttöönotto	20
1.5.2 Hiomakonemoottorin käyttöönotto	24
2 MITTAUKSET	27
2.1 Mittausjärjestelyt	27
2.2 Mittaustulokset	28
3 KÄYNNISTYKSEN SIMULOINTI.....	50
3.1 Simulointiohjelmat.....	50
3.2 Simulointitulokset	51
3.2.1 SMT-laskelmat	51
3.2.2 FCSMEK-laskelmat	59

4 JOHTOPÄÄTÖKSET JA SUOSITUKSET68

LÄHTEET.....73

LIITE 1: Tahtimoottorin kokoonpanopiirustus

KÄYTETYT SYMBOLIT JA LYHENTEET

C	kapasitanssi
f	taajuus
f_N	nimellistaajuus
I_{Fr}	roottorivirta
I_m	herätinkoneen magnetointivirta
I_n	nimellisvirta
I_r	roottorivirta
I_s	staattorivirta
I_{start}	käynnistysvirta
I_1	staattorivirta
n	pyörimisnopeus
n_s	tahtinopeus
p	napapariluku
R	resistanssi
S	näennäisteho
s	jättämä
T_n	nimellisvääntömomentti
$T_{pull-in}$	tahdistusvääntömomentti
T_{start}	käynnistysvääntömomentti
t_{start}	käynnistysaika
U_{Fr}	roottorijännite
U_m	herätinkoneen magnetointijännite
U_s	staattorijännite
DOL	direct-on-line
PMG	permanent magnet generator

1 JOHDANTO

1.1 DOL-moottori

Verkkokäyttöiset tahtimoottorit ovat tahtikoneita, joita käytetään suoraan verkossa ilman taajuusmuuttajaohjausta. Niistä käytetään myös nimitystä DOL- eli Direct On Line -moottori. DOL-moottorit ovat kiinteänopeuksisia ja niiden pyörimisnopeus eli tahtinopeus n_s määräytyy suoraan syöttävän verkon taajuudesta f ja napapariluvusta p yhtälön

$$n_s [\text{min}^{-1}] = \frac{f}{p} \cdot 60 \quad (1)$$

mukaisesti. Sähkökäyttöjen jatkuvasta yleistymisestä huolimatta DOL-moottoreita käytetään yhä prosesseissa, joissa itse prosessi ei vaadi muuttuvanopeuksista moottoria. Niiden käyttösovelluksia ovat suuret mäntäkompressorit, hiomakoneet, malmimyllyt, hakut, jauhimet, vesipumput, keskipakokompressorit, muuttajat ja kompensattorit. Kaupallisesti saatavien DOL-moottoreiden tehoalue on noin 1 MW:sta 25 MW:iin, nimellisjännitteiden vaihdellessa välillä 4...13,8 kV. Lähes poikkeuksetta DOL-moottorit ovat avonapaisia ja harjattomasti magnetoituja.

1.2 DOL-moottorin rakenne

Harjattomasti magnetoitu DOL-moottori koostuu samalle akselille asennetuista pääkoneesta ja herätin- eli magnetointikoneesta sekä pyörivästä dioditasasuuntaussillasta.

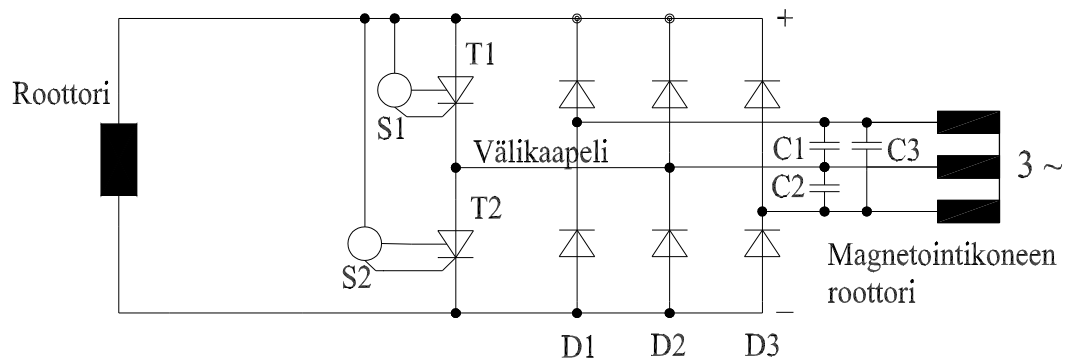
Pääkoneen staattori koostuu dynamolevyistä tehdystä levypaketista, joka on kiinnitetty teräsrunkoon. Levypaketissa on valmiina urat monivaiheista staattorikäimitystä varten. Tahtikoneen roottori voidaan toteuttaa magnetointikäymillä varustettuna umpi- tai avonapaisena roottorina, reluktanssiroottorina, jolla ei ole magnetointikäimitystä lainkaan tai

kestomagneettiroottorina. Verkkokäyttöisissä synkronimoottoreissa roottori on yleensä avonapainen ja magnetointikäimityksellä sekä vaimennuskäämityksellä varustettu. Avonapakoneen tasavirralla syötettävät napakäämit on käämitty magneettinapojen rautasydämien ympärille. Käämitys on joko lakkaeristeistä lankakuparia tai lattakuparia. Navat kootaan napalevyistä erikseen ja kiinnitetään akseliin joko pulteilla tai lohenpyrstökiinnityksillä. Suoraan verkosta syötettävissä koneissa on aina magneettinapojen ulkopinnalla häkkikäminä toteutettu vaimennuskäämitys. Se koostuu kuparisista tai messinkisistä sauvoista, jotka on molemmista päistään yhdistetty oikosulkurenkailla toisiinsa. DOL-moottoreissa vaimennuskäämityksen olennaisena tehtävänä on käynnistyksessä tarvittavan vääntömomentin kehittäminen. Lisäksi se tahtikäynnissä vaimentaa kuormitus- ja syöttömuutosten aiheuttamaa nopeusvärähtelyä.

Tahtikoneen magnetointi voidaan valmistaa joko harjallisena, jolloin tyristorisillan tai pyörivän tasavirtageneraattorin syöttämä magnetoimisvirta johdetaan liukurenkaiden kautta magnetointikäimille tai harjattomana, jolloin moottori magnetoidaan koneen akselille asennetun erillisen magnetointigeneraattorin tuottamalla virralla. Magnetointigeneraattori on niin sanottu ulkonapakone, jonka staattoria magnetoidaan tasavirralla ja jonka kolmivaiheiseen roottorikäimitykseen indusoituva virta syötetään tasasuunnattuna pääkoneen roottorille. Harjaton magnetointi on nykyään kiinteänopeuksisissa moottoreissa yleisempi kuin harjallinen magnetointi. Magnetointikoneen staattoriin virta johdetaan jännitteensyöttöyksiköltä, jonka tarvitsema teho otetaan joko pääkoneen syöttömuuntajalta, koneen akselille asennetusta kestomagneettigeneraattorista (PMG-kone) tai erillisestä pienjänniteverkosta.

Koska tahtimoottori vaatii magnetointivirraksi tasavirtaa, on magnetointikoneen tuottama monivaiheinen vaihtovirta tasasuunnattava ennen roottorikäimitykseen syöttämistä. Tasasuuntaajana toimii pääkoneen akselin mukana pyörivä kuusipulssidiodisilta. Diodisilta koostuu roottorivirran suuruudesta riippuen joko yksittäisistä piidiodeista, joiden nimellisvirta ABB:n koneissa on tyypillisesti 600 A tai kahden diodin diodimoduuleista, joiden nimellisvirta on 260 A.

Yksittäisdiodien estojännitekestoisuus on 2,2 kV ja diodimoduulien 2 kV. Diodisilta suojataan käynnistysenaikaisilta suurilta negatiivisilta jännitteiltä ja transienteilta oikosulkemalla se joko suojavastuksen tai vastarinnankytketyn tyristorihaaran avulla. Samalla oikosuljetaan myös moottorin magnetointikone käynnistyksen ajaksi. Tyristorihaaran tyristoreina ABB käyttää nykyisin tablettityrstoreita, joiden nimellisvirta on 760 A ja estojännitekestoisuus 1800 V. Tyristoreita ohjaavat sytytinskytköt, jotka antavat tyristoreille ohjauspulssin, kun niiden yli vaikuttava jännite ylittää tietyn kynnsarvon. Sytyttimen kynnsjännite määräytyy roottorin nimellisjännitteen mukaan. Sen ollessa pienempi kuin 100 voltia käytetään sytyttimiä, joiden kynnsjännite on 354 V. Edellämainittua suuremmilla roottorijännitteillä kynnsjännite on 610 V. Tyristorihaarella varustetun roottoripiirin pääpiirikaavio on esitetty kuvassa 1.1.

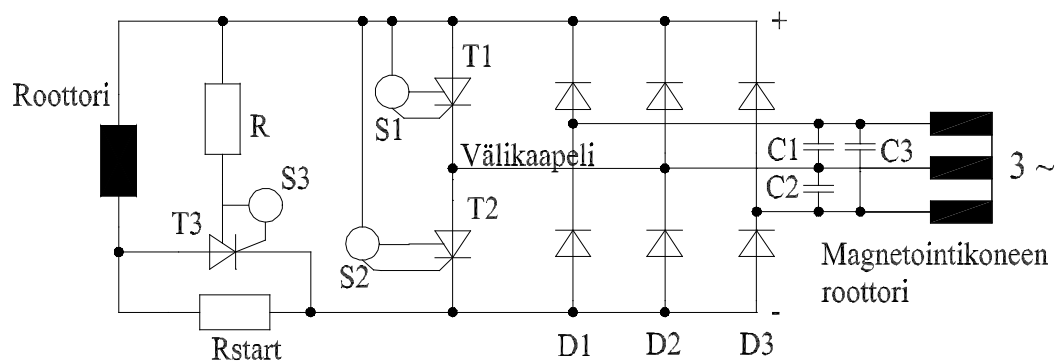


Kuva 1.1. Harjattomasti magnetoidun tahtikoneen roottorin pääpiirikaavio. D1, D2 ja D3 ovat pyörivän diodisillan diodimoduulit. Tyristorit T1 ja T2 suojaavat tasasuuntaajaa ylijännitteeltä. S1 ja S2 ovat tyristorien sytyttimet. Kondensaattoreiden C1, C2 ja C3 tehtävä on suojata magnetointikonetta diodisillan aiheuttamalta säröltä.

Tyristoreita käytettäessä tyristorihaaran keskipiste ja magnetointikoneen yksi vaihe yhdistetään välikaapelilla, minkä ansiosta tyristorit sammuvat, jos ne ovat yhä johtavassa tilassa magnetoinnin kytkemishetkellä. Sattuminen tapahtuu tyristorien välisen pisteen ja + tai - kiskon välille muodostuvan vastajännitteen avulla. Tyristorit syttyvät niin kauan kuin pääkoneen roottorista indusoituu tasavirtapiiriin suurempi jännite kuin välikaapelin kautta tuleva vastajännite.

Jättämän pienentyessä napakäämiin indusoituva jännite pienenee ja lopulta magnetointikoneen tarjoama vastajännite riittää sammuttamaan tyristorit. Välikaapelina käytetään kytkentäkaapelia, jonka nimelliskäyttöjännite on 1,1 kV.

Kun kuorman vastavääntömomentti on suuri ja moottorin käynnistymiseksi vaaditaan suuri käynnistysvääntömomentti, kytketään roottorikäämin kanssa sarjaan käynnistysvastus. Se on nikkeli-kromi-seoksesta valmistettua vastusliuskaa, jota kelataan roottorin kokoonpanon yhteydessä moottorin akselille asennetulle keskukselle. Liuska kelataan yleensä neljälle rinnakkaiselle nipulle. Vastuselementin kokonaispituus määräytyy halutun resistanssin mukaan. Vastuksen suuruus määritetään tapauskohtaisesti, mutta se on noin kymmenkertainen napakäämin resistanssiin nähden. Vastus pienentää roottoriin indusoituvia virtoja ja nopeuttaa käynnistystä. Käynnistykseen päätteeksi vastus oikosuljetaan tyristorilla. Käynnistysvastuksen käyttö ei ole välttämätöntä, jos moottori kokee käynnistettäessä vain pienen vastavääntömomentin, kuten esimerkiksi hiomakoneissa. Liitteessä 1 on kokoonpanopiirustus tahtimoottorista, johon on asennettu käynnistysvastus ja kuvassa 1.2 on esitetty vastaavan moottorin roottorin pääpiirikaavio.



Kuva 1.2. Harjattomasti magnetoidun tahtikoneen roottoripiiri, jossa on mukana käynnistysvastus. D1, D2 ja D3 ovat pyörivän diodisillan diodimoduulit. Tyristorit T1 ja T2 suojaavat tasasuuntaajaa ylijännitteeltä. Rstart on käynnistysvastus ja T3 sen käynnistykseen päätteeksi oikosulkeva tyristori. S1, S2 ja S3 ovat tyristorien sytyttimet. Kondensaattoreiden C1, C2 ja C3 tehtävä on suojata magnetointikonetta diodisillan aiheuttamalta säröltä.

1.3 DOL-moottorin käynnistäminen

1.3.1 Käynnistystavat

1.3.1.1 Suora verkkokäynnistys

Yleisimmin DOL-moottorit käynnistetään asynkronisesti suoraan verkkoon, kuten oikosulkumoottorit. Käynnistyksessä tarvittavana häkkikäimityksenä toimii tahtimoottorin vaimennuskäämitys. Suora verkkokäynnistys tapahtuu sulkemalla staattoriin kytkein. Tällöin staattorin kolmivaihekäimityksessä alkaa kulkea kolmivaiheinen verkkovirta, joka synnyttää moottorin ilmäväliin pyörivän magneettikentän. Pyöriessään kentän magneettivuo leikkaa seisovan roottorin vaimennuskäämin sauvoja ja indusoi niihin jännitteen

$$E_{20} = \frac{2\pi}{\sqrt{2}} f N_2 \xi_2 \Phi, \quad (2)$$

missä f on syöttävän verkon taajuus, N_2 roottorikäimityksen käämikierrosmäärä, ξ_2 roottorikäimityksen käämityskerroin ja Φ magneettivuo. Indusoitunut jännite synnyttää sauvoihin virran, joka indusoi ilmäväliin oman magneettikenttensä. Yhteisvaikutus staattorikentän kanssa synnyttää ilmävälivuon, joka staattorissa ja roottorissa Lorentzin voiman vaikutuksesta synnyttää vääntömomentin ja saa roottorin pyörimään. Nopeudella n pyörivän roottorin jännite on

$$E_2 = sE_{20} = \frac{n_s - n}{n_s} E_{20}, \quad (3)$$

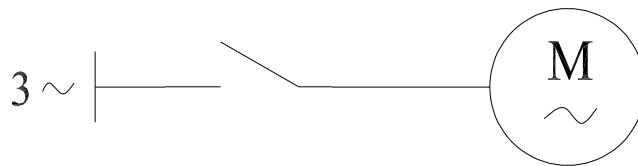
missä s on jättämä ja n_s verkkotaajuuden määräämä tahtinopeus.

Käynnistyksessä myös moottorin napakäämiin indusoituu jännite yhtälöiden (2) ja (3) mukaisesti. Indusoitunut jännite oikosulkeutuu myötäsuuntaan diodisillan ja estosuuntaan suojavastuksen tai tyristorihaaran kautta. Roottorin

pyörimisnopeuden kasvaessa jättämä sekä roottoriin indusoituva jännite ja virta pienenevät. Tietyllä nopeudella jännitetaso ei enää riitä sytyttämään tyristoreja ja roottoriin kulkee diodisillan puoliaaltotasasuuntaama virta. Tämän virran tasavirtakomponentti huolehtii siitä, että moottori tahdistuu oikein eli roottorin ja staattorin vastakkaiset navat kohdakkain.

Suora verkkokäynnistyks on käynnistystavoista yksinkertaisin ja vääntömomentin saannin kannalta edullisin, mutta sen huonona puolena on moottorin ottama suuri käynnistysvirta, joka on noin kolmin...kuusinkertainen jatkuvuustilan virtaan nähden. Suora käynnistys sopiikin käytettäväksi silloin, kun syöttävä verkko on oikosulkuteholtaan riittävän suuri moottorin oikosulkutehoon verrattuna.

Kuvassa 1.3 on esitetty periaatekuva suorasta verkkokäynnistyksestä.

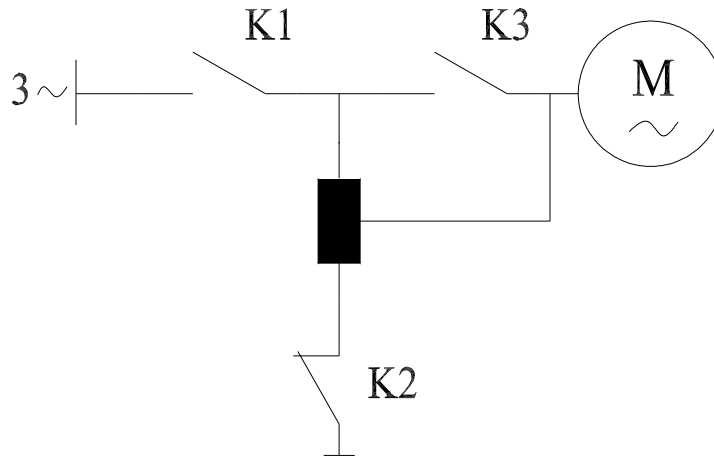


Kuva 1.3. Suoran verkkokäynnistyksen periaatekuva. Tahtimoottori käynnistetään oikosulkumoottorina sulkemalla staattoriin katkaisija. Käynnistystapaa käytetään syöttävän verkon oikosulkutehon ollessa riittävän suuri moottorin oikosulkutehoon nähden.

1.3.1.2 Käynnistysmuuntajakäynnistys

Moottorin ottamaa käynnistysvirtaa ja sitä kautta käynnistyksen aiheuttamaa verkon jännitteenalenemaa voidaan pienentää staattoriin kytkettävällä säästökytkentäisellä käynnistysmuuntajalla kuvan 1.4 mukaisesti. Käynnistysmuuntajakäynnistyksessä moottoriin syötetään aluksi muuntajan väliulosotosta saatu alennettu jännite, jolloin käynnistysvirta pysyy tavanomaista matalampana. Kun moottorin pyörimisnopeus on noussut lähelle tahtinopeutta ja käynnistysvirta on pienentynyt, avataan muuntajan nollapistekytin ja moottoriin

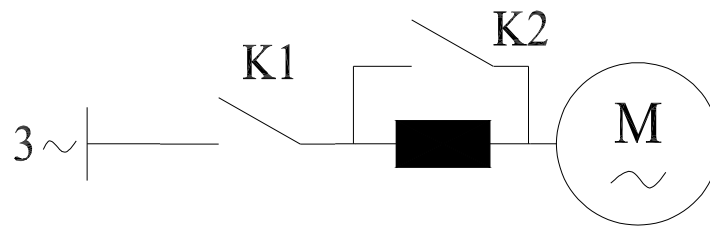
syötetään lähes täysi kiskojännite. Muuntajan käämitys toimii kuitenkin edelleen kuristimena ja rajoittaa moottorille menevää virtaa. Käynnistyksen lopuksi käynnistysmuuntaja oikosuljetaan kytkimellä ja moottorille saadaan täysi kiskojännite.



Kuva 1.4. Käynnistysmuuntajakäynnistyksen periaatekuva. Käynnistys aloitetaan sulkemalla kytkin K1, jolloin moottorille syötetään alennettu jännite ja verkon jännitteenalenema pienenee. Lähellä tahtinopeutta avataan kytkin K2 ja käynnistyksen lopuksi käynnistysmuuntaja oikosuljetaan kytkimellä K3.

1.3.1.3 Kuristinkäynnistys

Käynnistysmuuntajakytkentää yksinkertaisempi järjestely saadaan rajoittamalla moottorin liitinjännitettä staattoriin kanssa sarjaan kytkettävillä kuristimilla, jotka ohitetaan käynnistyksen päätteeksi. Sekä kuristimilla että käynnistysmuuntajalla voidaan pienentää käynnistysvirtaa ja syöttävälle verkolle aiheutuvaa jännitteenalenemaa, mutta samalla pienenee myös moottorista saatava vääntömomentti, koska se on verrannollinen moottorin liitinjännitteen neliöön. Periaatekuva kuristinkäynnistyksestä on esitetty kuvassa 1.5.



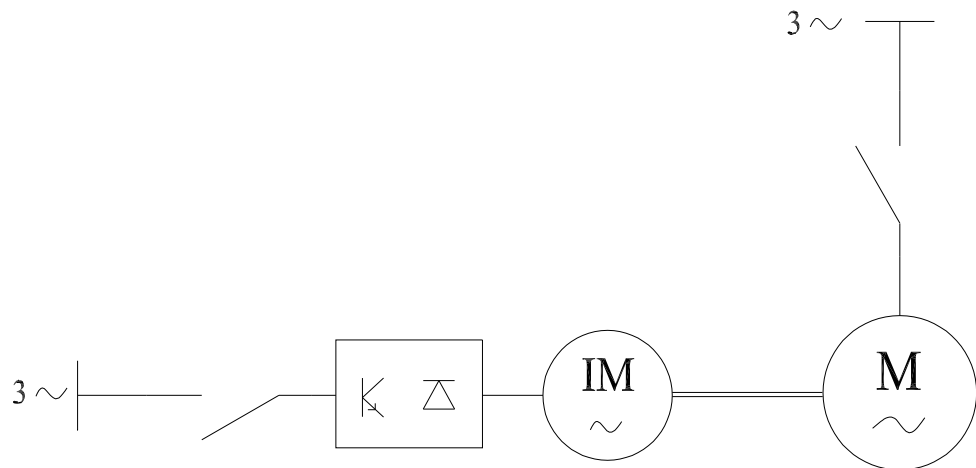
Kuva 1.5. Tahtimoottorin kuristinkäynnistyksen periaatekuva. Käynnistys aloitetaan sulkemalla kytkin K1. Moottorin käynnistysvirtaa ja napajännitettä pienennetään kuristimella, joka oikosuljetaan käynnistyksen päätteeksi kytkimellä K2.

1.3.1.4 Apumoottorikäynnistys

Tahtimoottori voidaan käynnistää myös vapaaseen akselipäähän kytketyn apumoottorin avulla, kuva 1.6. Apumoottorina toimii pieni taajuusmuuttajaohjattu epätahtimoottori, joka kiihdyttää magnetoidun pääkoneen roottorin tahtinopeuteen, minkä jälkeen päämoottori tahdistetaan generaattorina verkkoon.

Suurten virtasysäysten välttämiseksi tahtigeneraattori on kytkettävä verkkoon hetkellä, jolloin jännite kytkimen yli on nolla eikä generaattorin ja syöttävän verkon välillä siis kulje virtaa. Ehto toteutuu, kun toisiaan vastaavat jännitteet verkossa ja generaattorissa ovat yhtä suuret ja samanvaiheiset. Tahdistuksesta huolehtii yleensä automaattinen tahdistin, joka mittaa sekä verkon että generaattorin jännitteen, taajuuden ja vaihekulman. Todettuaan toisiaan vastaavien arvojen olevan samansuuruiset, tahdistin sulkee staattoriin katkaisijan. Generaattorin jännite säädetään kohdalleen sen magnetoimisvirtaa säätämällä. Taajuuden säätö tapahtuu apumoottorin pyörimisnopeutta muuttamalla.

Apumoottorikäynnistystä voidaan käyttää tapauksissa, joissa syöttävä verkko ei anna riittävää käynnistysvirtaa edes kuristin- tai käynnistysmuuntajakäynnistykseen.



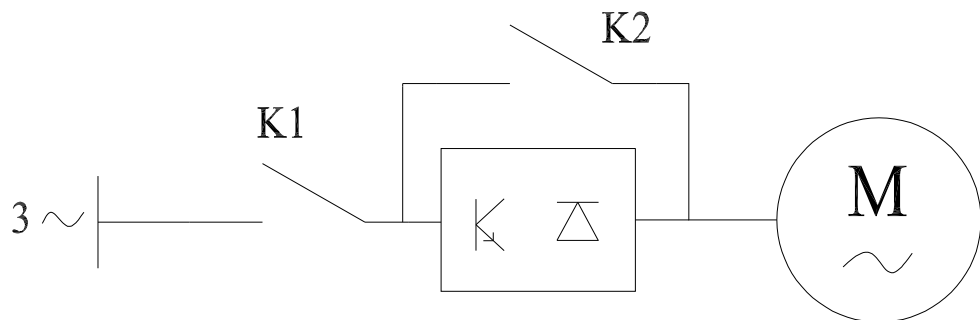
Kuva 1.6. Verkkokäyttöisen tahtimoottorin apumoottorikäynnistyksen periaatekuva. Magnetoitun pääkoneen roottori kiihdytetään tahtinopeuteen taajuusmuuttajaohjatulla epätahtimoottorilla, minkä jälkeen pääkone tahdistetaan verkkoon tyhjäkäyvänä generaattorina. Käynnistystapa on kallis, mutta sitä käyttämällä saavutetaan pieni syöttöverkon jännitteenalenema.

1.3.1.5 Vetotahdistus

Joissakin vesivoimaloissa generaattorien käynnistyksissä käytetään tavallisen apumoottorikäynnistyksen sijaan niin sanottua vetotahdistusta (pull-in synchronization). Vetotahdistuksessa jännitteettömän ja magnetoimattoman generaattorin roottori kiihdytetään apumoottorilla tahtinopeuteen. Tahtinopeuden saavuttamisen jälkeen suljetaan pääkatkaisija ja kytketään magnetointi samanaikaisesti. Magnetointilaitteiston automaattinen jännitteensäätäjä pakottaa roottorikäämiin maksimimagnetoinnin saaden aikaan roottorin tahdistumisen staattorikentän pyörimisnopeuteen. Käynnistystapaan liittyy kuitenkin riskejä, sillä tahdistettaessa tahtikone magnetoimattomana syntyy suuri kytkentätransientti, joka indusoi erittäin suuren jännitteen magnetointikäämiin pakottaessaan koneen vuon kasvamaan nopeasti. Suurimmassa vaarassa on roottoripiirin diodisilta, joka on suojattava ylijännitteiltä suojapiirillä, joka on mitoitettu nimelliseen roottorivirtaan nähden kaksinkertaiselle virralle. Normaalisissa generaattorin tahdistuksissa suojapiiriltä vaadittu kesto on noin puolet nimellisvirrasta.

1.3.1.6 Taajuusohjattu käynnistys

Uusin tapa DOL-moottorin käynnistämiseen on taajuusohjattu käynnistys, jonka periaatekuva on esitetty kuvassa 1.7. Tässä käynnistystavassa taajuusmuuttajan syöttämä tahtimoottori kiihdytetään tahtinopeuteen magnetoituna synkronikoneena. Jokaisena hetkenä taajuusmuuttajan syöttötaajuus määrää tahtinopeuden yhtälön (1) mukaisesti. Kun tahtikone saavuttaa verkon tahtinopeuden, taajuusmuuttaja ohitetaan kytkimellä. Taajuusmuuttajakäynnistyksessä tahtimoottoria on magnetoitava myös nollanopeudella, joten herätinkoneena käytetään konetta, jossa on sekä staattorissa että roottorissa kolmivaihekäämitys.



Kuva 1.7. Periaatekuva tahtimoottorin taajuusohjatusta käynnistyksestä. Moottori on magnetoitu käynnistyksen ajan ja se pyörii taajuusmuuttajan määräämällä tahtinopeudella. Käynnistys aloitetaan sulkemalla kytkin K1. Taajuusmuuttaja ohitetaan kytkimellä K2 moottorin pyöriessä verkkotaajuuden määräämällä tahtinopeudella.

1.3.2 Tahdistuminen verkkokäynnistyksessä

Pienellä kuormalla verkkokäynnistyksellä käynnistetty avonapainen moottori voi tahdistua ilman magnetointia avonapaisuudesta seuraavan reluktanssivääntömomentin ansiosta. Suurella vastamomentilla tahdistumiseen vaaditaan roottorinapoja magnetoiva tasavirta, joka voi olla napakäämiin indusoituneesta vaihtovirrasta puolialtotasasuunnattu tai ulkoisen

magnetointilähteen kehittämä. Tahtikoneen magnetointikäymissä kulkevan tasavirran aiheuttama vuo indusoi staattorikäämiin $(1-s)f_N$ -taajuisen sähkömotorisen voiman, missä s on roottorin jättämä ja f_N tahtikoneen nimellistaajuus. Koska verkossa ei ole $(1-s)f_N$ -taajuisia vastajännitettä, syntyy staattorikäämiin samantaajuinen stationäärinen oikosulkuvirta. Tästä aiheutuu koneen ilmaväliin jättämätaajuudella vaihteleva vääntömomentti eli tahdistava vääntömomentti. Lähellä tahtinopeutta pyöriessään moottori tahdistuu, kun tahdistava vääntömomentti kykenee kiihdyttämään moottorin ja sen kuorman tahtinopeuteen.

Tahtimoottori on käynnistyksen aikana magnetoitu vain apumoottori- ja taajuusohjatussa käynnistyksessä. Muita käynnistystapoja käytettäessä magnetointikone on oikosuljettu roottoripiirin suojavastuksella tai tyristorihaaralla niin kauan kuin roottorikäämitykseen indusoitua negatiivinen vaihtojännite ylittää tyristorien sytytynsikköjen kynnysjännitteen. Vetotahdistuksessa tyristorit syttyvät pääkatkaisijan sulkemisesta seuraavasta jännitetransientista napakäämissä. Transientin vaimenemisen jälkeen napakäämiin indusoituu vain pieniä jännitteitä roottorin pyörimisnopeuden ollessa lähes tahtinopeus n_s .

Magnetointikoneeseen kytketään jännite yleensä silloin, kun pääkoneen pyörimisnopeus n on noin 95...98% tahtinopeudesta n_s . Magnetointia ei saa kytkeä ennen kuin moottori on saavuttanut riittävän suuren pyörimisnopeuden, koska virran kytkeminen napakäämiin käynnistettäessä aiheuttaisi jarruttavan vääntömomentin, joka saattaisi estää moottorin käynnistymisen. Riittävän moottorin nopeuden lisäksi magnetoimisvirran kytkemisen edellytyksenä on, että käynnistysvirta on pienentynyt sallittuun arvoon ja koneen napapyörä on oikeassa asennossa staattoriin nähden siten, että magnetoimisvirran ja staattorivirran luomat magneettivuot ovat samansuuntaiset. Jos tahtimoottorin roottoriin aletaan syöttää magnetoimisvirtaa voiden ollessa vastakkaissuuntaiset, joutuu napapyörä muljahtamaan kohti voiden oikeaa asentoa. Tämä tasoitusilmiö on sekä mekaanisesti että sähköisesti koneistoa rasittava. Magnetoinnin säätö on nykyisin

täysin automaattista perustuen moottorin syöttöjännitteen ja loisvirran mittaukseen.

1.4 Työn tavoite

Käynnistys on yksi kriittisimmistä hetkistä verkkokäyttöisen tahtimoottorin käytön kannalta. Käynnistyksessä on huomioitava niin sähköisiä, mekaanisia kuin termisiäkin seikkoja. Käynnistyksen aikana moottori ottaa syöttävästä verkosta jatkuvan tilan virtaan nähden kolmin...kuusinkertaisen käynnistysvirran ja aiheuttaa verkkoon jännitealeneman, joka on pidettävä mahdollisimman pienenä ja lyhytkestoisena. Tahtimoottori on myös saatava tahdistumaan kohtuullisessa ajassa, koska epätahtikäytössä roottorin häkkikäämiin, magnetointikäämiin ja käynnistysvastukseen kohdistuu paljon suurempi lämpökuorma kuin normaaliajassa. Häkkikäämityksen pieni massa lämpenee nopeasti suuren tehon kohdistuessa siihen ja lämpölaajenemat voivat saada aikaan mekaanisia vaurioita.

Tässä työssä keskitytään magnetointiin liittyvään käynnistyshäiriöön, joka on ilmennyt kahden ABB Oy Sähkökoneitten Tahtikoneet-yksikön suunnitteleman DOL-moottorin, 15 MVAR:n 6,6 kV:n kahdeksannapaisen loistehokompensaattorin ja 12 MW:n 10,5 kV:n 20-napaisen hiomakonemoottorin, käyttöönotossa. Molemmissa koneissa on harjaton magnetointi ja niiden roottoripiirit ovat kuvan 1.1 mukaiset. Koneitten magnetointikoneisiin saadaan syöttö erillisestä verkosta ja magnetointia säädetään automaattisella jännitteensäätäjällä. Käyttöönotossa moottorit ovat magnetoituneet viiveellä magnetoimislaitteiston normaalista toiminnasta huolimatta. Tämä on havaittu mittauksissa viivästyneenä staattorin loistehon vaiheisuuden muutoksena. Loistehokompensaattorin käynnistyksissä on myös syntynyt komponenttivaurioita.

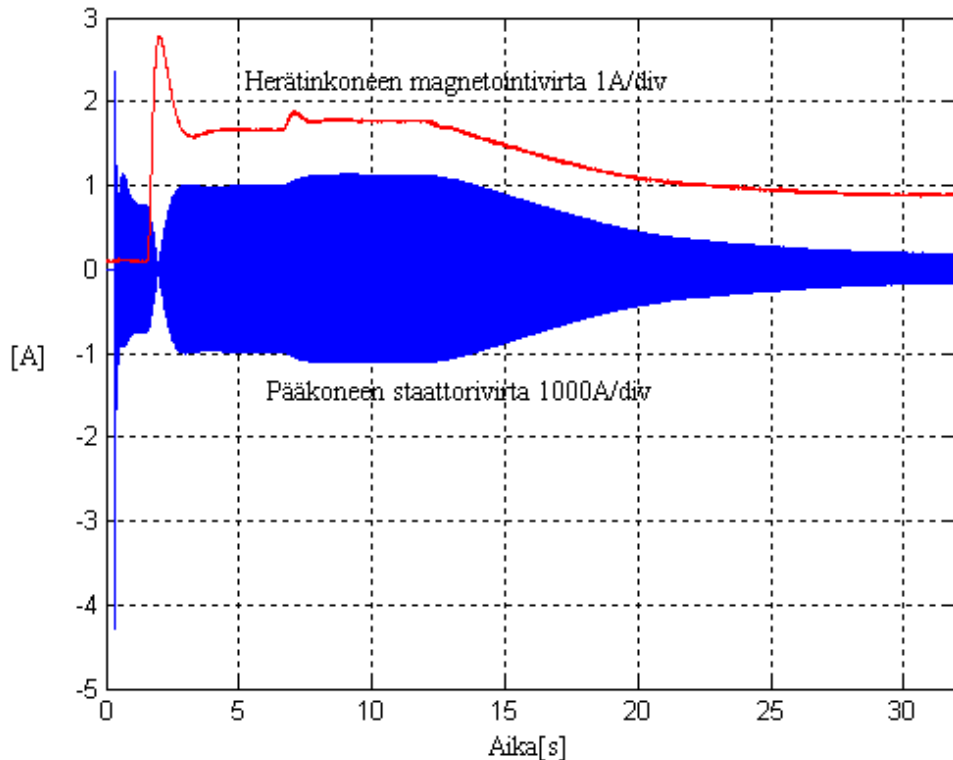
Ilmeinen syy tahtimoottorin magnetoitumisen viivästyymiseen on se, että tehonsyötön kytkeytyessä herätinkoneeseen pääkoneen roottorin tyristorit ovat

edelleen johtavassa tilassa ja herätinkone on oikosuljettuna niiden kautta. Tähän mennessä ongelma on ratkaistu viivästäällä magneetoinnin kytkentää, kunnes magneetointikone ei ole enää oikosuljettuna tai jätetty se ratkaisematta ja annettu koneen magneetointia ajallaan. Pienellä kuormalla tämä on mahdollista, sillä avonapainen moottori voi tahdistua myös ilman magneetointia avonapaisen roottorin magneettisesta ja sähköisestä epäsymmetriasta seuraavan reluktanssivääntömomentin avulla. Suurilla kuormilla magneetointivirtaa kuitenkin tarvitaan moottorin tahdistamiseksi tahtinopeuteen eikä viivettä saisi silloin esiintyä. Diplomityön tarkoituksena on käynnistyskoemittauksilla ja moottorien käynnistyskäytännöillä selvittää ongelman mahdollisia syitä sekä sitä, kuinka vastaava ongelma voitaisiin tulevaisuudessa välttää.

1.5 Käynnistysongelman kuvaus

1.5.1 Loistehokompensaattorin käyttöönotto

Loistehokompensaattori oli suunniteltu kytkettäväksi 23 kV:n 60 Hz:n verkkoon 23kV/6,16kV muuntajan kautta. Syöttävän verkon alhaisesta oikosulkutehosta johtuen kompensaattori oli käynnistettävä apumoottorikäynnistyksellä. Apumoottorikäynnistyksessä tarvittava automaattinen tahdistin on kuitenkin erittäin kallis, joten taloudellisista syistä päädyttiin käynnistämään kone vetotahdistuksella. Alunperin tahdistuksesta seuraaviin roottorin suuriin jännitetransientteihin oli varauduttu kytkemällä RC-suoja rinnan diodisillan kanssa. Tehtaalla alennetulla jännitteellä suoritetuissa käynnistyskokeissa kompensaattori käynnistyi ja magneetointi ongelmitta. Kuvassa 1.8 on esitetty kuvaajat käynnistyskokeessa mitatuista herätinkoneen magneetointivirrasta ja pääkoneen staattorivirrasta.



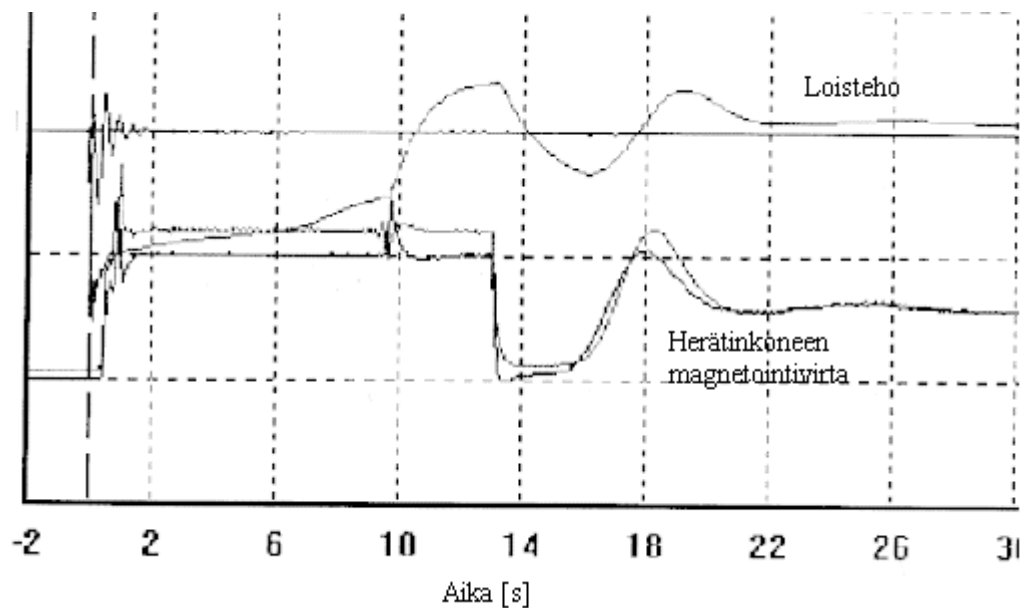
Kuva 1.8. Loistehokompensaattorin käynnistyskokeessa mitatut herätinkoneen magnetoitinvirta ja pääkoneen staattorivirta. Magnetointi on kytkeytynyt automaattisesti magnetointilaitteiston saatua tiedon pääkatkaisijan sulkeutumisesta. Pääkone on magnetoitunut välittömästi. Käynnistyskoe on suoritettu alennetulla jännitteellä, joka on noin puolet kompensaattorin nimellisjännitteestä.

Käyttöön otossa täydellä jännitteellä roottorin jännitetaso osoittautui niin korkeaksi, että tasasuuntaaja tuhoutui suojauksesta huolimatta. Tästä johtuen *RC*-suoja korvattiin tyristorihaaralla, jota on ABB Oy:ssä käytetty DOL-moottorien dioditasasuuntaussiltojen suojaukseen jo yli 15 vuoden ajan. Tyristorien syyttimien rajajännitteeksi valittiin 610 volttia.

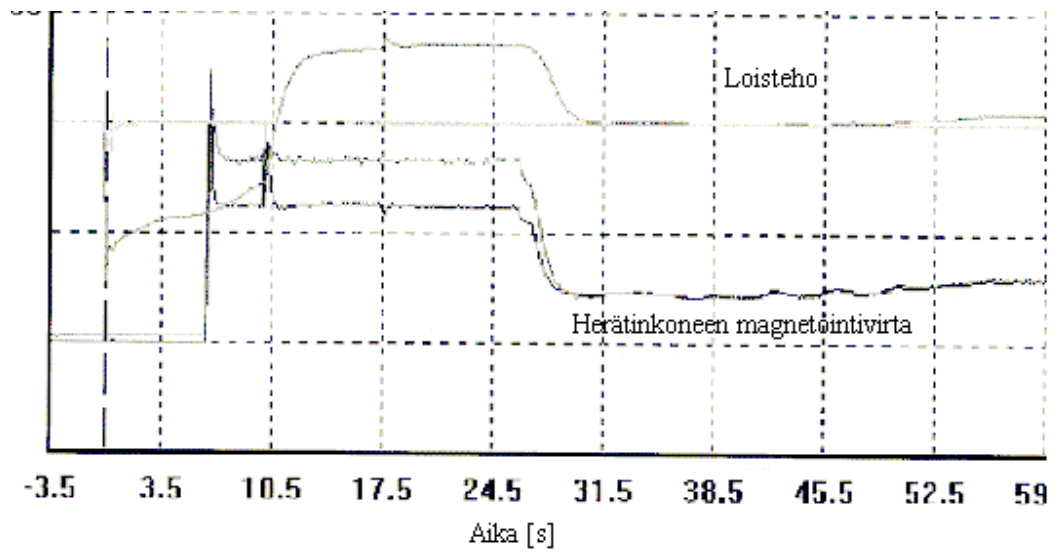
Tyristorien asentamisen jälkeen ilmeni ongelma koneen magnetoinnissa. Vaikka magnetointilaitteisto toimi normaalisti magnetoinnin kytkennän jälkeen ja herätinkoneen magnetoitinvirta kasvoi, magnetoitui pääkone vasta noin kymmenen sekunnin kuluttua pääkatkaisijan sulkemisesta. Tämä saatettiin havaita viivästyneenä moottorin loistehon suunnanmuutoksena. Pääkytkimen sulkemisen

ja magnetoinnin kytkemisen välisellä ajalla ei ollut merkitystä edellä mainittuun loistehon muutoksen viiveen pituuteen. Käynnistysyrityksiä oli useita ja muutaman käynnistuksen välein tyristorien ja välikaapelin havaittiin tuhoutuneen. Ongelma ratkaistiin pidentämällä viivettä pääkatkaisijan sulkemisen ja magnetoinnin kytkennän välillä 20 sekuntiin, jolloin tyristorit olivat varmasti ehtineet sammua ennen magnetoinnin kytkentää.

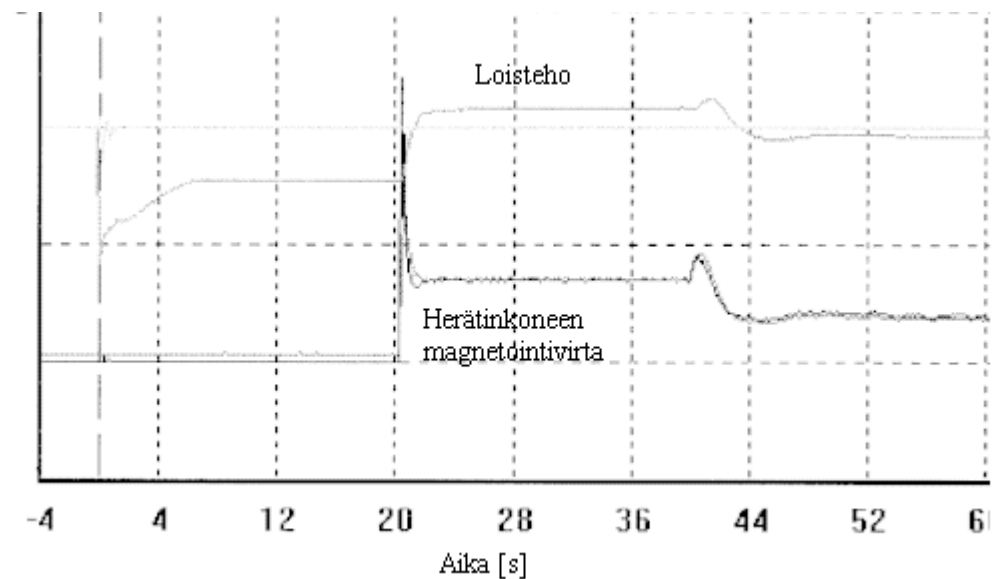
Kuvissa 1.9, 1.10 ja 1.11 on mittausdatat kompensattorin käyttöönotosta eri magnetoinnin kytkentäviiveillä. Kuvassa 1.9 magneointi on kytketty 0,4 sekunnin kuluttua katkaisijan sulkemisesta, kuvassa 1.10 viive on 6 sekuntia ja kuvassa 1.11 20 sekuntia.



Kuva 1.9. Loistehokompensaattorin käyttöönotossa mitattujen loistehon ja herätinkoneen magnetointivirran käyrämuodot. Magneointi kytkettiin päälle 0,4 sekunnin kuluttua pääkoneen katkaisijan sulkemisesta. Loistehon suunnanvaihdoksesta nähdään pääkoneen magnetoituneen noin 10,5 sekunnin kuluttua käynnistyksen alkamisesta.



Kuva 1.10. Loistehokompensaattorin käyttöönotossa mitattujen loistehon ja herätinkoneen magnetointivirran käyrämuodot. Magnetointi kytkettiin 6 sekunnin kuluttua koneen tahdistamisesta verkkoon. Pääkone magnetoitui noin 10,5 sekunnin kuluttua käynnistyksen alusta.



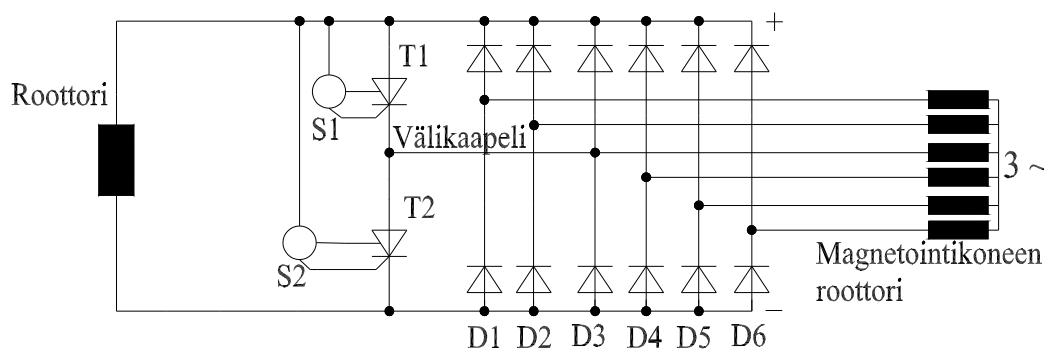
Kuva 1.11. Loistehokompensaattorin käyttöönotossa mitattujen loistehon ja herätinkoneen magnetointivirran käyrämuodot. Magnetoinnin syöttö kytkettiin 20 sekunnin kuluttua pääkatkaisijan sulkemisesta ja pääkone magnetoitui välittömästi.

Mittausdatojen mukaan kone on magnetoitunut noin 10 sekunnin kuluttua käynnistyksen alusta, kun magnetointi on kytketty 0,4 tai 6 sekunnin viiveellä.

Magnetointiviiveen ollessa 20 sekuntia kone on magnetoitunut heti magnetoinnin kytkemisen jälkeen.

1.5.2 Hiomakonemoottorin käyttöönotto

Hiomakonemoottorin roottorin vaihdon yhteydessä roottorissa muutettiin sekä häkkikäimin sauvojen poikkipintaa ja lukumäärää että magnetointikäimityksen langoitusta ja kytkentää. Lisäksi tehtiin muutoksia roottoriin diodisiltatasasuuntaajaan ja magnetointikoneen roottoriin. Tyristoreita ei vaihdettu ja niiden sytyttimien kynnyksjännite oli sekä ennen roottorinvaihtoa että sen jälkeen 610 voltia. Diodisilta oli aiemmin ollut niin kutsuttu kaksinkertainen silta, mutta uudessa roottorissa käytettiin yksinkertaista diodisiltaa ja eri diodeja kuin ennen. Kaksinkertaista siltaa syöttävässä magnetointikoneen roottorikäilyssä jokaista vaihetta vastaa kaksi haaraa, joista jokainen syöttää omaa diodihaaraansa. Vanha roottori on kuvassa 1.12. Uusi roottori on kuvan 1.1 mukainen. Vanhan ja uuden roottorin tiedot ovat taulukossa 1.



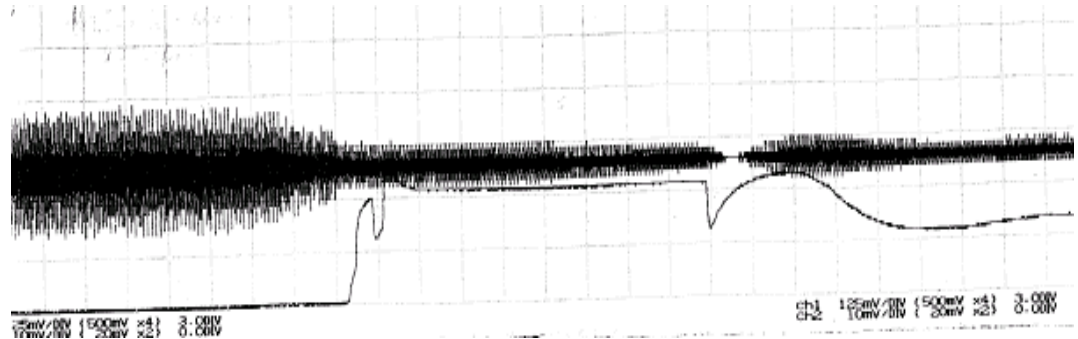
Kuva 1.12. Hiomakonemoottorin alkuperäisen roottorin pääpiirikaavio. D1, D2, D3, D4, D5 ja D6 ovat pyörivän diodisillan diodimoduulit. Tyristorit T1 ja T2 suojaavat tasasuuntaajaa ylijännitteeltä. S1 ja S2 ovat tyristorien sytyttimet. Magnetointikoneen roottorissa kussakin vaihekäimissä on kaksi rinnakkaista haaraa. Kummallakin on oma diodihaaransa.

Taulukko 1. Hiomakonemoottorissa roottorinvaihdon yhteydessä muuttuneet arvot ja kytkennät. I_{start} on moottorin käynnistysvirta, T_{start} käynnistysvääntömomentti, $T_{\text{pull-in}}$ tahdistusvääntömomentti, U_s staattorijännite, t_{start} käynnistysaika, I_n nimellisvirta, T_n nimellsvääntömomentti, U_{Fr} nimellinen roottorijännite, I_{Fr} nimellinen roottorivirta, U_m herätinkoneen nimellinen magnetointijännite ja I_m herätinkoneen nimellinen magnetointivirta.

	Vanha roottori	Uusi roottori
Roottorikupari, mm×mm	7,1 × 3,55	4 × 8
Roottorikytkentä	5 haaraa, 2 rinnanlankaa	5 haaraa, 1 rinnanlanka
Häkkikäämin messinkisauvojen lkm	9	8
Häkkikäämin messinkisauvojen halkaisija, mm	14	17
Diodisilta	12 kpl diodeja	6 kpl diodeja
$I_{\text{start}} (U_s = 85\%)$	$2,98 \times I_n$	$2,93 \times I_n$
$T_{\text{start}} (U_s = 85\%)$	$0,43 \times T_n$	$0,32 \times T_n$
$T_{\text{pull-in}} (U_s = 85\%)$	$0,41 \times T_n$	$0,5 \times T_n$
$t_{\text{start}} (U_s = 85\%)$	6,0 s	7,6 s
$U_{\text{Fr}} / I_{\text{Fr}}$	90V / 640A	142V / 397A
U_m / I_m	182V / 8,28A	183V / 8,35A

Hiomakonemoottori käynnistetään kuristinkäynnistyksellä staattorijännitteen U_s ollessa käynnistyksen alkuhetkellä 85% nimellisestä. Kuristimien ohitus tapahtuu noin sekunnin kuluttua siitä, kun roottori on saavuttanut pyörimisnopeuden $n = 0,95n_s$. Magnetoinnin kytkentä tapahtuu lähes välittömästi kuristimien ohituksen jälkeen. Vanhalla roottorilla moottori käynnistyi ja tahdistui moitteettomasti. Käyttöön otossa roottorin vaihtamisen jälkeen magnetointilaitteisto toimi normaalisti ja magnetointikoneen magnetointivirta lähti mittausten mukaan nousemaan, mutta pääkone magnetoitui vasta noin kahdeksan sekunnin kuluttua magnetoinnin kytkemisestä. Koska hiomakonemoottorilla ei ole kuormaa käynnistyksen aikana, ongelma saatettiin ratkaista viivästä mällä magnetointilaitteiston epätahtisuojauksen kytkentää ja antamalla moottorin magnetoitua ajallaan. Tässä tapauksessa komponenttivaurioilta vältyttiin.

Käyttöönnotossa mitattujen pääkoneen staattorivirran ja herätinkoneen magnetointivirran käyrämuodot ovat kuvassa 1.13.



Kuva 1.13. Mittausdataa hiomakonemoottorin käyttöönotosta. Ylempi käyrä on pääkoneen staattorivirta ja alempi magnetointikoneen magnetointivirta. Pätötehon ollessa pieni staattorivirta on lähes pelkästään loisvirtaa, jonka vaiheisuuden muutos pääkoneen magnetoituessa voidaan havaita virran verhokäyrän solmukohdasta. Vaaka-akselilla yksi ruutu vastaa yhtä sekuntia, joten kuvasta voidaan nähdä, että magnetoituminen on tapahtunut vasta 8,5 sekunnin kuluttua magnetoinnin kytkennästä.

2 MITTAUKSET

2.1 Mittausjärjestelyt

Diplomityöhön liittyen suoritettiin käynnistyskokeita 4,1 MW:n 6,6 kV:n 18-napaiselle mäntäkompressorimoottorille. Moottorin roottori on kuvan 1.2 mukainen. Koetuksissa moottori käynnistettiin sekä verkkokäynnistyksellä että vetotahdistuksella. Mittausten tarkoituksena oli selvittää roottorin käynnistysenaikaiset jännite- ja virtatasot eri käynnistystavoilla sekä se, toimivatko roottoriin tyristorit ja välikaapeli oletetulla tavalla. Haluttiin myös tietää, kuinka paljon pieni jättämä vetotahdistuksen tapahtuessa kasvattaa roottoriin indusoituvia jännitteitä, koska luvussa 1.5 esitellyn loistehokompensaattorin käyttöönotossa verkkoon tahdistaminen tapahtui jättämän ollessa $s = 0,012$. Tämän vuoksi mittauksissa tehtiin tahdistuksia sekä jättämällä $s = 0$ että jättämällä $s = 0,012$.

Koska luvussa 1.5 esitellyissä tahtikoneissa ei ole käynnistysvastusta eikä siten sen oikosulkevan tyristorin sytyinhaaraa, suoritettiin mittauksia myös haaran ollessa irrotettu roottorin +-kiskosta (kuva 1.2). Samalla toivottiin saatavan vihjeitä siitä, voisiko napakäämin rinnalle kytkettävä RC-suoja olla mahdollinen ratkaisu tyristorien epätoivottavan syttymisen estämiseksi.

Normaalisti moottorikoestukset tehdään alennetulla jännitteellä, joka on noin puolet koneen nimellisjännitteestä, mutta nämä mittaukset tehtiin moottorin nimellisjännitteellä sen ollessa kohtuullisen pieni. Koneen magnetoinninkytkeä ja -säätö tapahtui automaattisesti Unitrol F -jänniteensäätäjän ympärille rakennetulla magnetointikaapilla. Testeissä mitattiin pääkoneen roottorivirta I_{Fr} , staattorivirta I_1 , roottorijännite U_{Fr} , roottoriin välikaapelin virta, tyristorin T2 virta, sytyttimen S1 yli vaikuttava jännite, herätinkoneen magnetointivirta I_m sekä pyörimisnopeus n . Mittaustulokset talletettiin Yokogawa Orm 1200 -muistipiirturilla. Kaikki mittaukset toistettiin kolme kertaa ja lisäksi suoritettiin joitakin yksittäisiä mittauksia. Kaikkiaan käynnistyskokeita tehtiin 30.

Verkkokäynnistyskokeissa jännitteetön moottori kiihdytetään aluksi vetokoneella 6...10%:n pyörimisnopeuteen vastakkaiseen suuntaan normaaliin pyörimissuuntaan nähden. Tässä tapauksessa alkunopeus oli $n = 20 \text{ min}^{-1}$. Kyseisen pyörimisnopeuden saavuttamisen jälkeen vetokoneen syöttö poistettiin ja tahtimoottorin ja verkon välinen katkaisija suljettiin. Kuudessa käynnistyksessä magnetointi kytkeytyi automaattisesti puolen sekunnin kuluttua pyörimisnopeuden $n = 0,95n_s$ saavuttamisesta ja kuudessa magnetointia ei kytketty ollenkaan. Näiden lisäksi suoritettiin yksittäiset käynnistykset, joista toisessa magnetoinnin kytkennän viive oli 0,3 sekuntia ja toisessa moottoria magnetoitiin vierasmagnetoinnilla ja kytkentä tapahtui manuaalisesti.

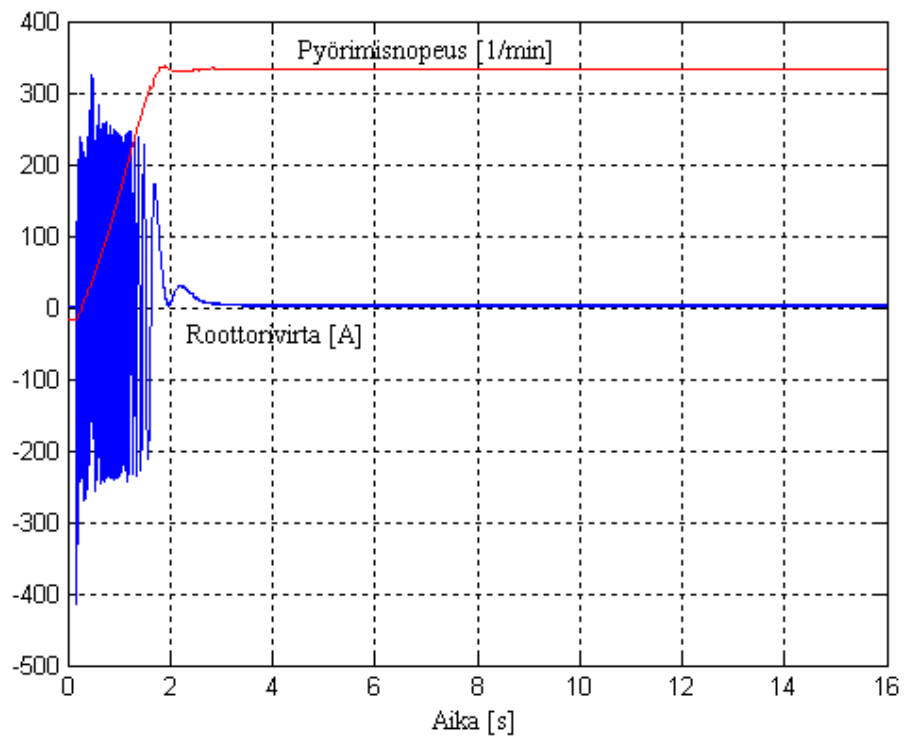
Vetotahdistuksissa moottori kiihdytettiin vetokoneella joko tahtinopeuteen n_s tai pyörimisnopeuteen $n = 329 \text{ min}^{-1}$, jolloin jättämä s oli 0,012. Tämän jälkeen vetokoneen syöttö katkaistiin ja moottorin ja verkon välinen katkaisija suljettiin. Kolmessa käynnistyksessä magnetoinnin kytkentä tapahtui automaattisesti kolmen sekunnin kuluttua pääkatkaisijan sulkemisesta, kuudessa käynnistyksessä viive oli puoli sekuntia ja seitsemässä magnetointia ei kytketty ollenkaan.

2.2 Mittaustulokset

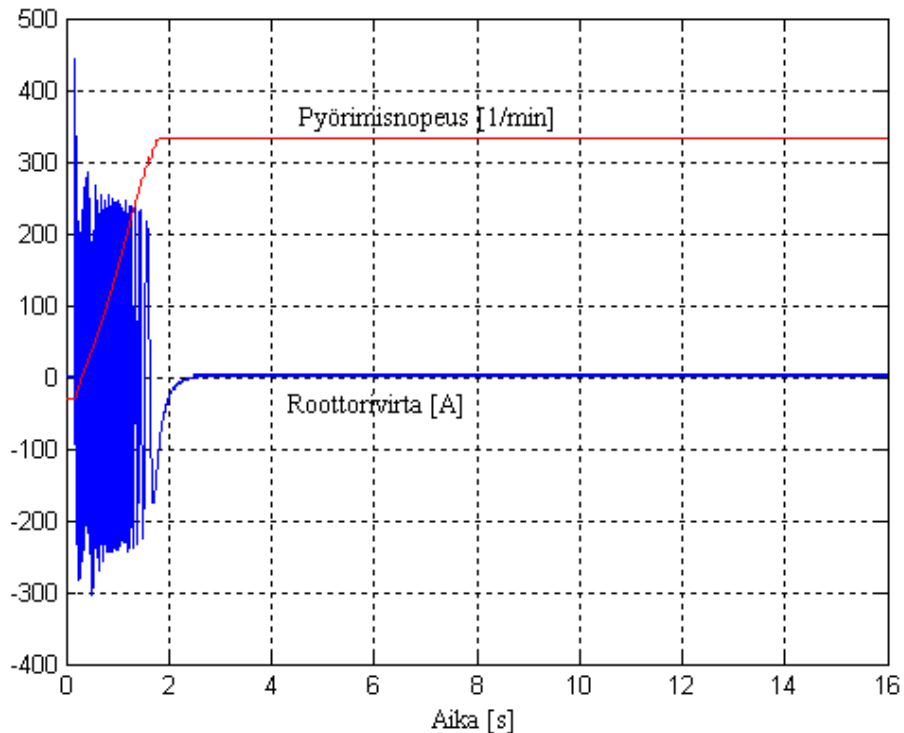
Mittaustulosten perusteella DOL-moottorin käynnistykseen liittyy paljon sattumanvaraisuutta. Tämä on nähtävissä erityisesti roottorisuureissa ja moottorin pyörimisnopeuskäyrässä. Käynnistuksen alun staattori- ja roottorivirtatransientit olivat verkkokäynnistyksissä ja vetotahdistuksissa samansuuruisia. Työssä tutkittava ilmiö eli magnetointikoneen oikosulkeutuminen tyristorien kautta tapahtui viidessä käynnistyksessä.

Tyristorit toimivat käynnistyksissä odotetusti. Verkkokäynnistyksissä ne syttyivät katkaisijan sulkeutuessa ja pysyivät johtavassa tilassa niin kauan kuin staattorissa oli muutostila ja roottoriin indusoituva negatiivinen jännite ylitti tyristorien sytyttimien kynnysjännitteen 610 voltia. Johtoaika oli keskimäärin 1,7 sekuntia, missä ajassa moottori myös saavutti nimellisnopeutensa. Moottorin saavuttaessa

tahtinopeuden jättämä ja roottorivirran taajuus pienentyivät nopeasti, jolloin roottorivirtaan syntyi “häntä”, kuten on nähtävissä kuvissa 2.1 ja 2.2. Häntä osui mittauksissa sattumanvaraisesti roottorivirran positiiviselle ja negatiiviselle puolijaksolle. Positiivisella puolijaksolla tarkoitetaan tässä diodisillan kautta kulkevaa ja negatiivisella tyristorien kautta kulkevaa virtaa.

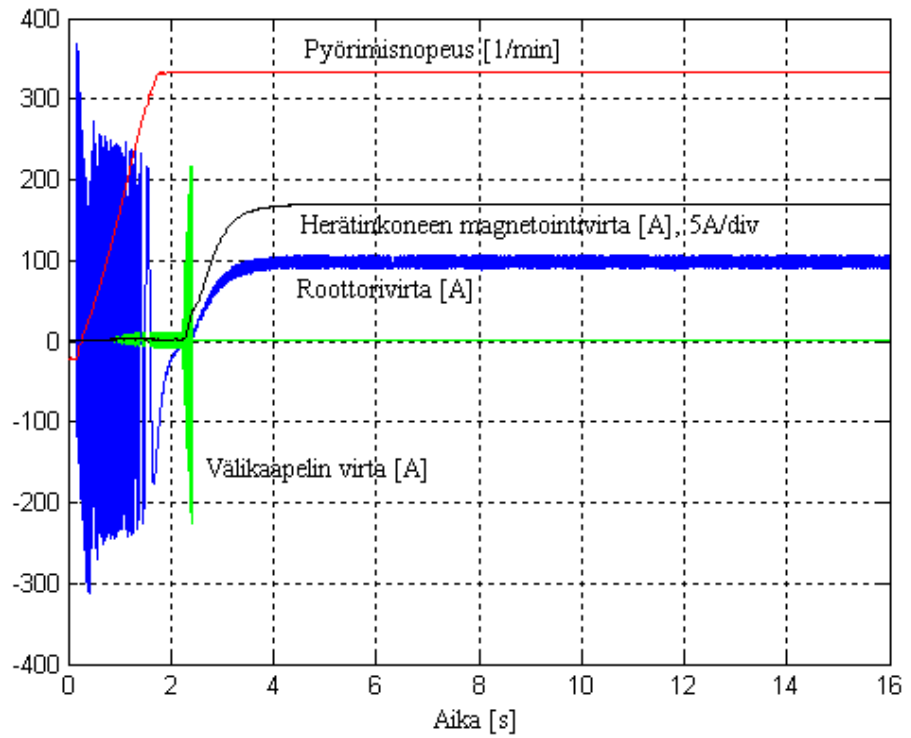


Kuva 2.1. Mäntäkompressorimoottorin käynnistys verkkokäynnistyksellä lähtien nopeudesta 20 min^{-1} vastakkaiseen suuntaan normaaliin pyörimissuuntaan nähden. Moottorin saavuttaessa tahtinopeuden roottorivirran taajuus pienenee nopeasti ja virtaan syntyy “häntä”. Tässä roottorivirta vaimenee nollaan positiivisella puolijaksolla.

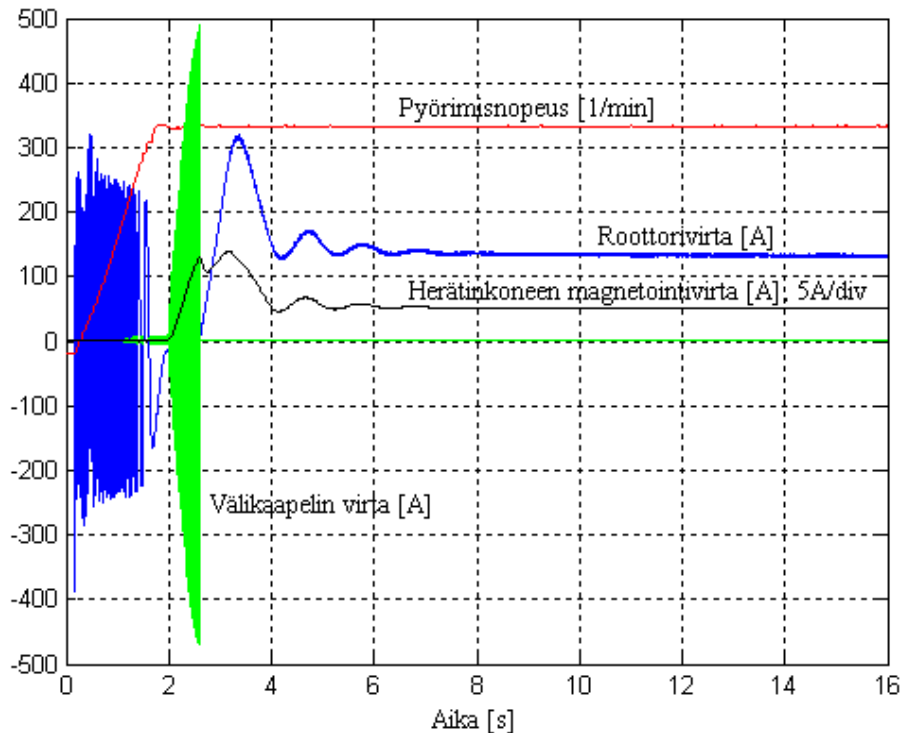


Kuva 2.2. Mäntäkompressorimoottorin käynnistys verkkokäynnistyksellä lähtien nopeudesta 20 min^{-1} vastakkaiseen suuntaan normaaliin pyörimissuuntaan nähden. Moottorin saavuttaessa tahtinopeuden roottorivirran taajuus pienenee nopeasti ja virtaan syntyy “häntä”. Tässä roottorivirta vaimenee nolnaan negatiivisella puolijaksolla. Jos magneointi kytkettäisiin ennen hännän vaimentumista nolnaan, tyristorit oikosulkisivat herätinkoneen eikä tahtimoottori magneitoituisi.

“Hännän” osuessa positiiviselle puolijaksolle moottori magneitoitui ongelmitta, mutta sen syntyessä tyristorivirtaan oli lyhyillä magneoinnin kytkennän viiveillä olemassa vaara magneointikoneen oikosulkeutumisesta tyristorien kautta. Näin myös tapahtui kahdessa käynnistyksessä, joiden mittaustulosten kuvaajat ovat kuvissa 2.3 ja 2.4. Toisessa käynnistyksessä magneointi kytketyi 0,5 sekunnin kuluttua 95%:n pyörimisnopeuden saavuttamisesta. Toisessa viive oli 0,3 sekuntia. Kolmannessa tapauksessa, jossa konetta ei magneitoitu ollenkaan, ilmiö olisi tapahtunut, jos magneointi olisi kytketty 0,5 sekunnin viiveellä.

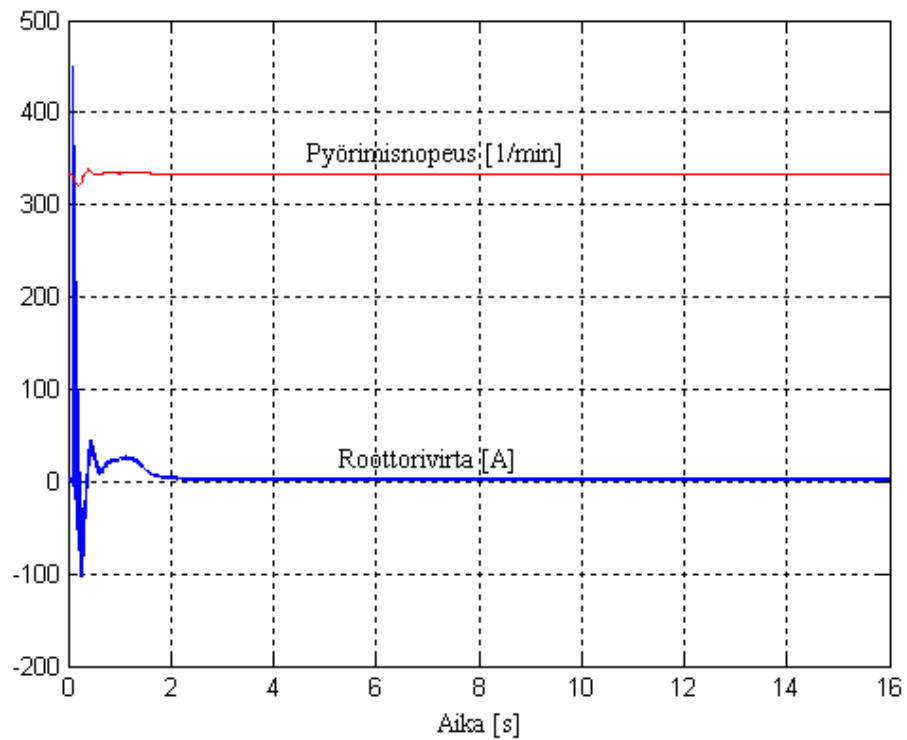


Kuva 2.3. Mäntäkompressorimoottorin käynnistys verkkokäynnistyksellä. Magnetointi kytkeytyi 0,5 sekunnin kuluttua 95%:n pyörimisnopeuden saavuttamisesta. Tyristorivirta ei ollut ehtinyt vaimentua nollaan ennen magnetoinnin kytkentää, jolloin tyristorit oikosulkivat magnetointikoneen. Välikaapelissa kulki magnetointikoneen oikosulkuvirta, kunnes tyristorit sammuihin. Tällöin pääkone magneitoitui.

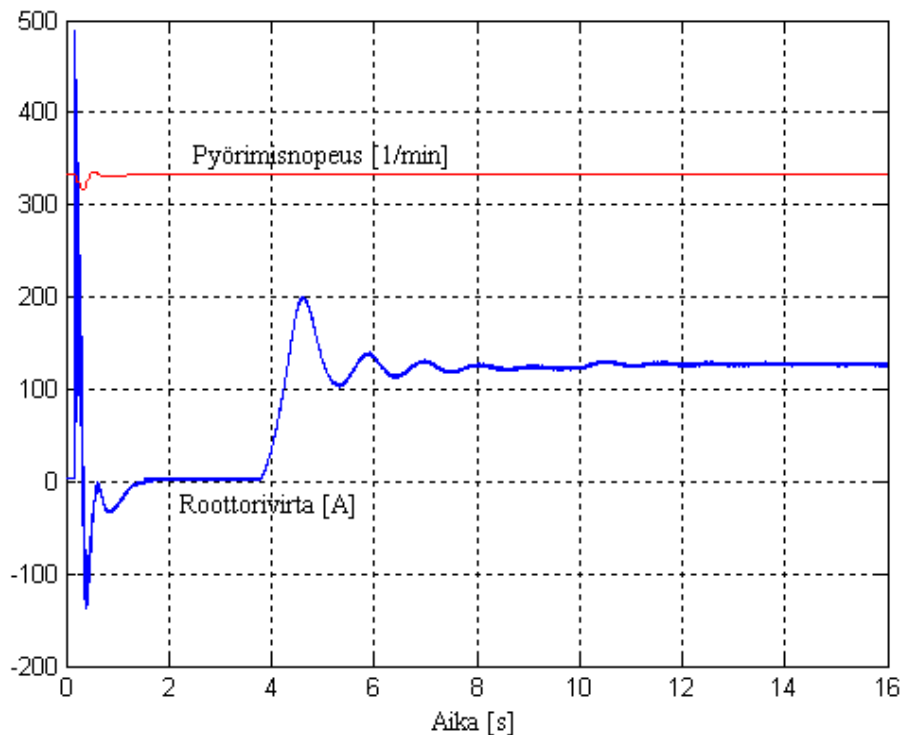


Kuva 2.4. Mäntäkompressorimoottorin verkkokäynnistys. Magnetointi kytkeytyi 0,3 sekunnin kuluttua 95%:n pyörimisnopeuden saavuttamisesta. Tyristorivirta ei ollut ehtinyt vaimentua nolnaan ennen magnetoinnin kytkentää, jolloin tyristorit oikosulkivat magnetointikoneen. Välikaapelissa kulki magnetointikoneen oikosulkuvirta, kunnes tyristorit sammuiivat. Tällöin pääkone magnetoitui.

Vetotahdistuksissa tyristorit syttyivät yhtä käynnistystä lukuunottamatta kaikissa mittauksissa käynnistysen alussa rottoriin indusoituvasta jännitetransientista. Ne pysyivät johtavina noin 0,3 sekuntia. Myös vetotahdistuksissa rottorivirtaan saattoi muodostua "häntä", jonka suuruus riippui voimakkaasti pyörimisnopeuden vaihtelusta eli rottorin heilahtelusta tahtinopeuden saavuttamisen jälkeen. Kuvissa 2.5 ja 2.6 on rottorivirran kuvaajat kahdesta vetotahdistuksesta.

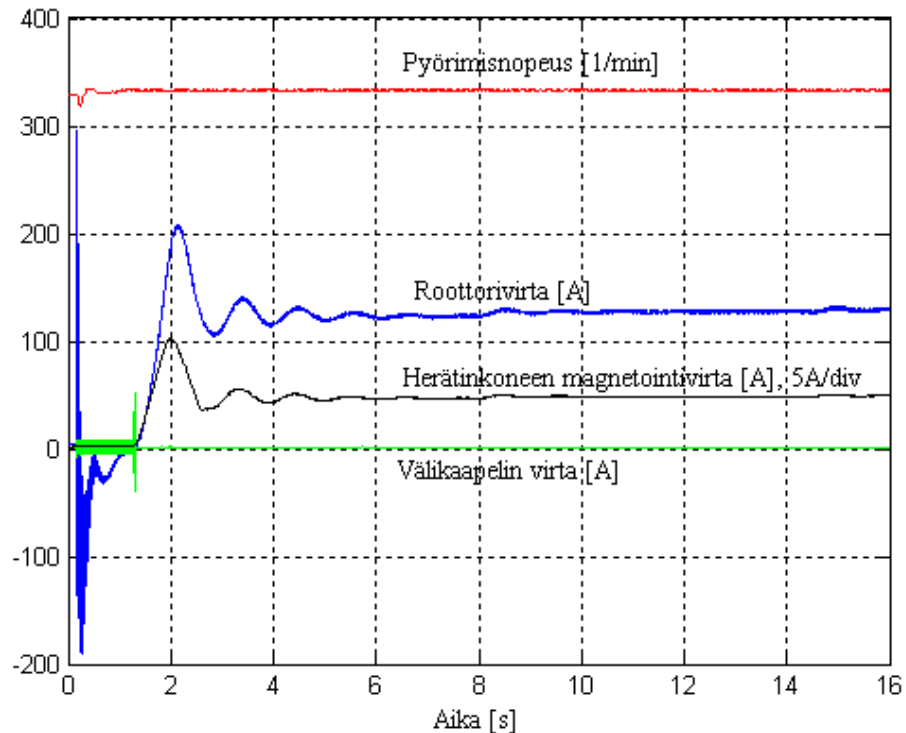


Kuva 2.5. Mäntäkompressorimoottorin vetotahdistus tahtinopeudessa, ei magnetointia. Moottorin saavuttaessa tahtinopeuden roottorivirran taajuus pieneni nopeasti ja siihen syntyi häntä. Tässä käynnistyksessä roottorivirta vaimeni nolleen positiivisella puolijaksolla. Pyörimisnopeuden vaihtelu näkyy roottorivirran vaihteluna.



Kuva 2.6. Mäntäkompressorimoottorin vetotahdistus tahtinopeudessa. Magnetoinnin kytkentähetki oli kolme sekuntia pääkatkaisijan sulkemisesta. Roottorin heilahtelu ja pyörimisnopeuden vaihtelu näkyvät roottorivirran vaihteluna. Roottorivirta vaimeni nolleen negatiivisella puolijaksolla.

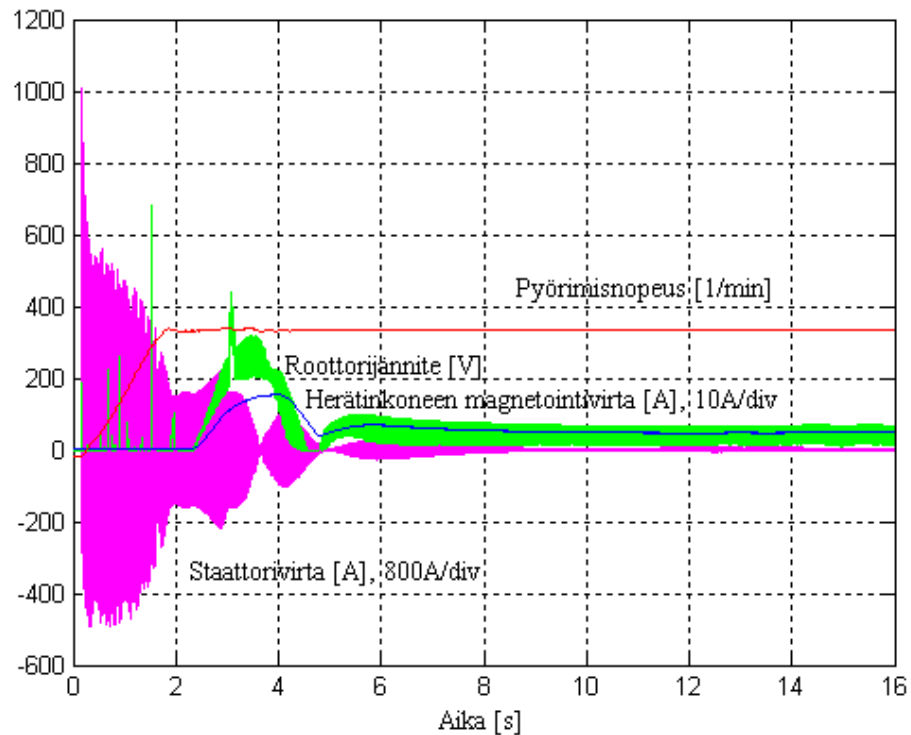
Samoin kuin verkkokäynnistyksessä seuraa vetotahdistuksessaakin tyristorivirran hännästä vaara magnetointikoneen oikosulkeutumisesta tyristorien kautta. Näin tapahtui yhdessä käynnistyksessä, jonka mittaustulosten kuvaajat ovat kuvassa 2.7. Herätinkone olisi joutunut oikosulkuun kolmessa muussakin tahdistuksessa, mutta niissä magnetointia ei joko kytketty ollenkaan tai se kytkettiin tavanomaista pidemmällä viiveellä, jolloin tyristorit olivat jo ehtineet sammua.



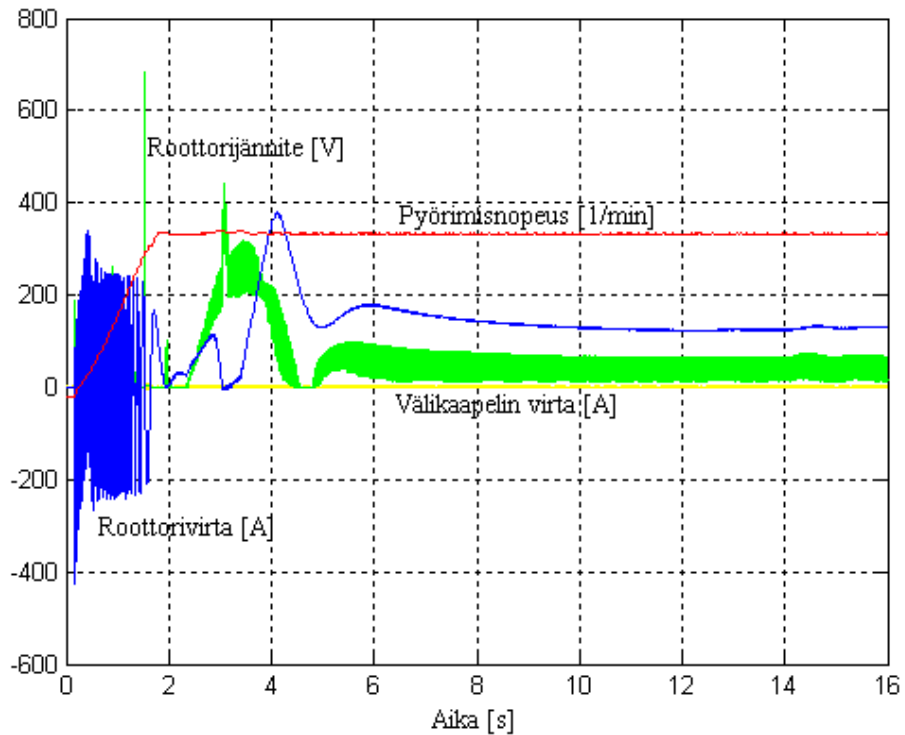
Kuva 2.7. Mäntäkompressorimoottorin vetotahdistus jättämän ollessa tahdistushetkellä $s = 0,012$. Magnetoinnin kytkentä tapahtui puolen sekunnin kuluttua pääkatkaisijan sulkemisesta. Tyristorit eivät olleet sammuneet magnetoinnin kytkeytyessä ja ne oikosulkivat magnetointikoneen lyhyeksi hetkeksi. Tyristorien sammuttua pääkone magnetoitui.

Avonapaisen tahtikoneen käynnistyksessä vaarana on, että kone tahdistuu magnetoimattomana reluctanceväntömomentin ansiosta niin, että kytkettäessä magnetoinnin syöttö staattorivirran ja magnetointivirran luomat magneettivuot ovat erisuuntaiset ja napapyörä joutuu muljahtamaan oikeaan asentoonsa. Tahtikone putoaa tällöin tahdistusta ja joutuu ottamaan loisvirtaa verkosta kiihtyäksään taas tahtinopeuteen. Edellä kuvattu negatiivinen reluctancestahdistuminen tapahtui mittauksissa kolmessa käynnistyksessä. Niistä kahdessa moottori käynnistettiin verkkokäynnistyksellä ja magnetointi kytkettiin puolen sekunnin päästä 95%:n nopeuden saavuttamisen jälkeen (kuva 2.8). Kolmannessa moottori tahdistettiin verkkoon vetotahdistuksella tahtinopeudessa ja magnetoinnin kytkentä tapahtui 0,5 sekunnin kuluttua pääkatkaisijan sulkemisesta (kuva 2.9). Moottorin pudotessa tahdistusta roottoriin indusoitui vaihtojännite, joka vetotahdistuksessa ylitti sytyttimien kynnysjännitteen, jolloin

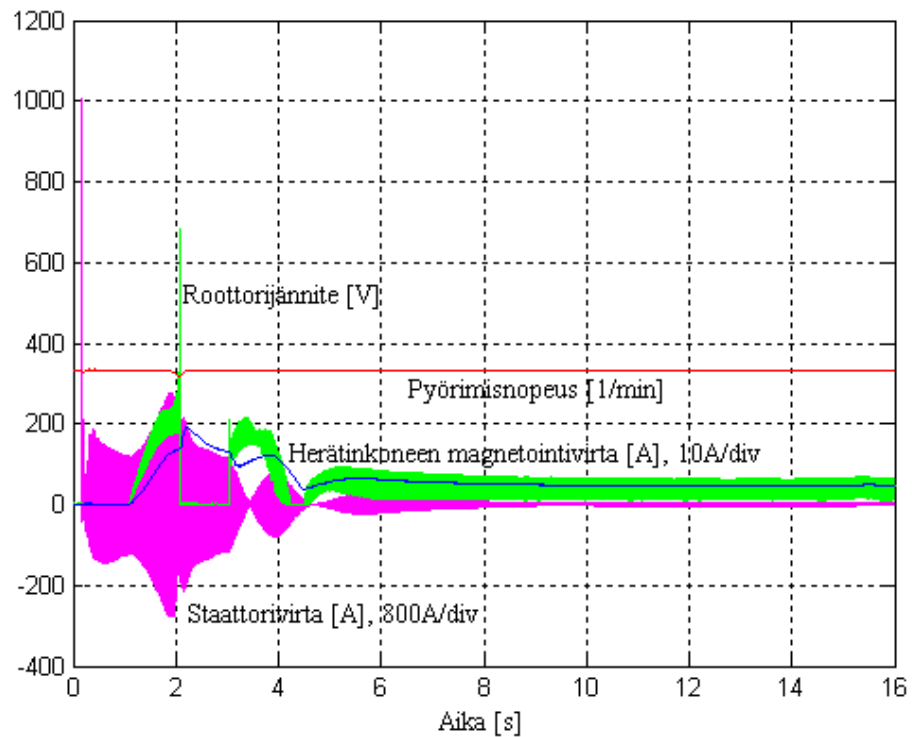
tyristorit oikosulkivat magnetointikoneen noin sekunnin ajaksi. Tyristorien alkaessa johtaa magnetointikone joutui oikosulkuun ja moottori alkoi ottaa loisvirtaa verkosta, jolloin automaattinen magnetoinninsäätö lisäsi magnetointia. Verkkokäynnistyksissä jännite ei ollut tarpeeksi korkea sytyttääkseen tyristoreja.



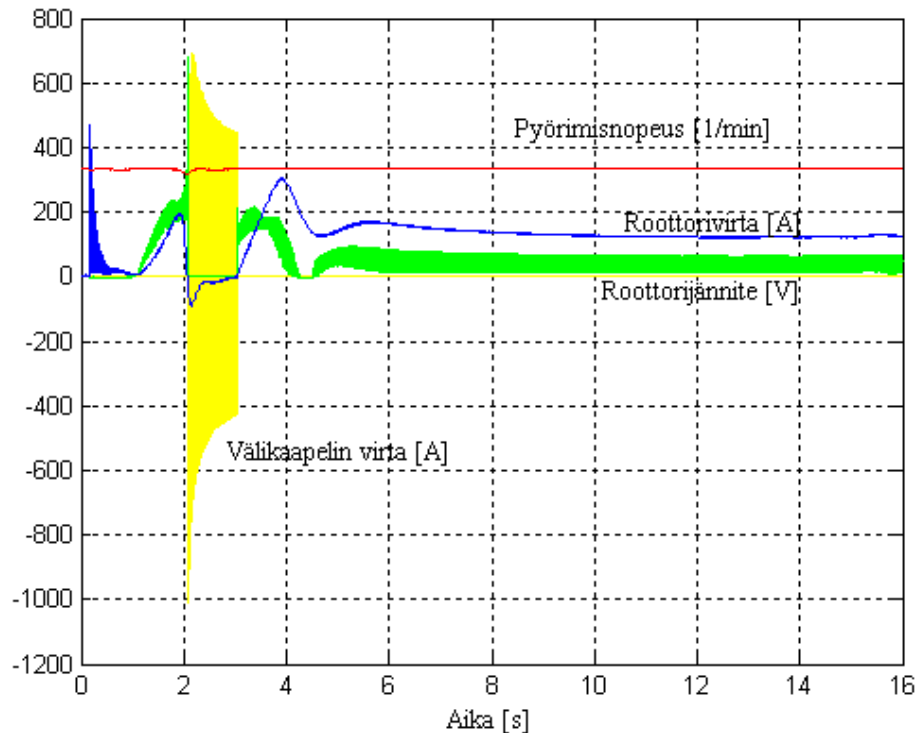
Kuva 2.8. (a) Pääkoneen pyörimisnopeus, roottorijännite ja staattorijännite sekä herätinkoneen magnetointivirta mäntäkompressorimoottorin verkkokäynnistyksessä, jossa moottori oli tahdistunut reluktanssikoneena napaisuudeltaan väärinpäin ilman magnetointia. Magnetoinnin kytkeä tapahtui 0,5 sekuntia 95%:n pyörimisnopeuden saavuttamisen jälkeen. Staattorivirran kuvaajassa näkyy moottorin verkosta ottaman loisvirran kasvu sen pudotessa tahdistamagnetoinnin kytkeytyessä.



Kuva 2.8. (b) Pääkoneen pyörimisnopeus, röottorijännite, röottorivirta ja välikaapelin virta verkkokäynnistyksessä, jossa moottori oli tahdistunut väärin ilman magnetointia. Magnetoinnin kytkeä tapahtui 0,5 sekuntia 95%:n pyörimisnopeuden saavuttamisen jälkeen. Moottorin putoaminen tahdistusta synnytti röottoriin vaihtojännitteen, mutta se ei ollut tarpeeksi suuri syyttääkseen tyristereita ja kone magnetoitui suhteellisen nopeasti.



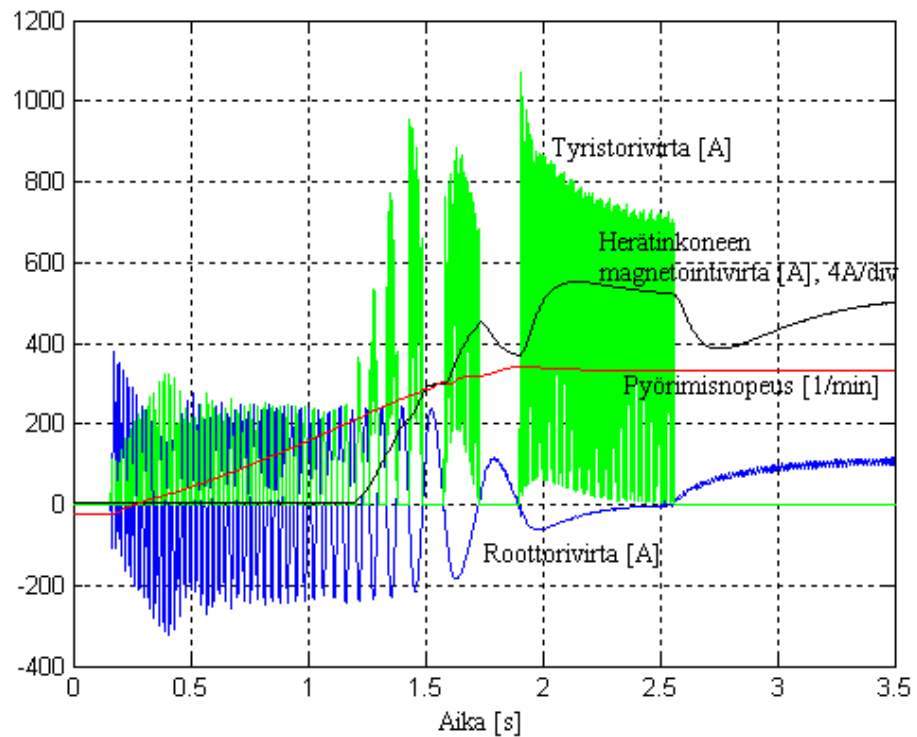
Kuva 2.9. (a) Pääkoneen pyörimisnopeus, staattorivirta ja roottorijännite sekä herätinkoneen magnetointivirta mäntäkompressorimoottorin tahtinopeudella tapahtuneessa vetotahdistuksessa, jossa moottori oli tahdistunut reluktanssikoneena napaisuudeltaan väärinpäin ilman magnetointia. Magnetoinnin kytkennän jälkeen moottori putosi tahdistasta, mikä näkyy staattorivirran kuvaajassa loisivirran kasvuna.



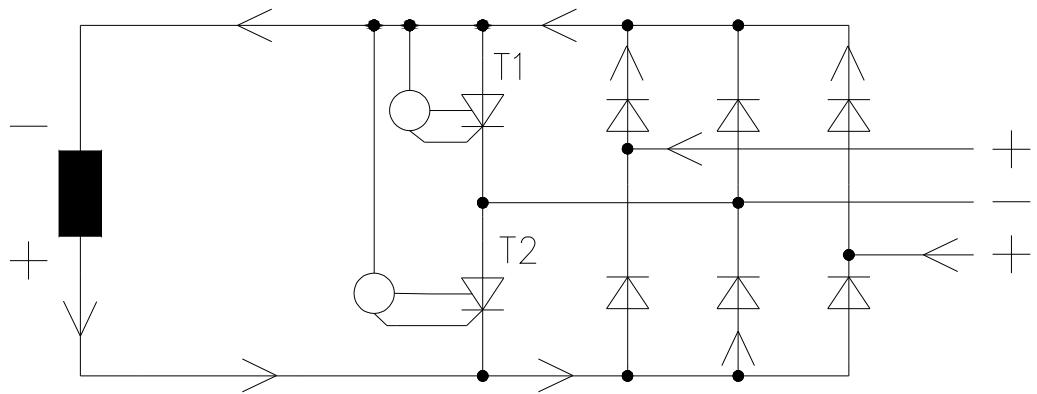
Kuva 2.9. (b) Pääkoneen pyörimisnopeus, roottorivirta, roottorijännite ja välikaapelin virta tahtinopeudella tapahtuneessa vetotahdistuksessa, jossa moottori oli tahdistunut reluktanssikoneena napaisuudeltaan väärinpäin ilman magnetointia ja putosi tahdistusta. Tahdistusta putoaminen aiheutti verkosta otetun loisivirran kasvun ja vaihtojännitteen indusoitumisen roottoriin. Napakäämiin indusoitunut vaihtojännite ja magnetointikoneen syöttämä tasajännite ylittivät syyttimien kynnysjännitteen. Tyristorien syttyessä magnetointikone oikosulkeutui niiden kautta. Välikaapelin läpi kulki magnetointikoneen oikosulkuvirta noin sekunnin ajan, kunnes tyristorit sammui. Tällöin pääkone magnetoitui.

Suoritettujen mittausten perusteella tyristorit voivat siis oikosulkea herätinkoneen magnetoinnin kytkennän jälkeen kahdesta eri syystä. Napakäämiin indusoitunut jännite voi magnetoinnin kytkeytyessä yhä olla suurempi kuin tyristorien syyttimien kynnysjännite ja tyristorit johtavat puolen napakäämivirran jakson ajan, kunnes napakäämivirta vaimenee nolnaan. Tällöin tyristorit sammuvat ja pääkone magnetoituu. Tyristorit voivat myös syttyä jännitteen indusoituessa napakäämiin moottorin pudottua tahdistusta esimerkiksi negatiivisesta reluktanssitahdistumisesta johtuen. Pääkone magnetoituu tässäkin tapauksessa tyristorien sammuttua napakäämivirran mennessä nolnaan.

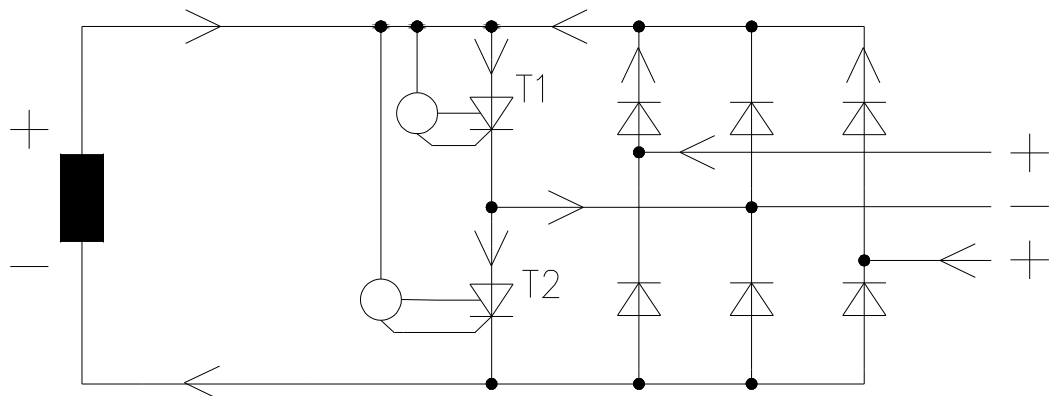
Käynnistyskokeista saatiin myös lisätietoa tyristorihaaran keskipisteen ja yhden magnetointikoneen vaiheen välisen välikaapelin toimintaperiaatteesta. Mittaustulosten perusteella tyristorien syttyminen ja sammuminen riippuvat pääasiassa staattorista roottoriin indusoituvasta vaihtojännitteestä, kuten nähdään kuvasta 2.10. Kuvan käyrät on saatu käynnistyksestä, jossa verkkokäynnistyksellä käynnistettyä mäntäkompressorimoottoria magnetoitiin vierasmagnetoinnilla. Magnetointi kytkettiin manuaalisesti ja ajoitusvirheen takia kytkentä tapahtui noin 1,3 sekuntia liian aikaisin pyörimisnopeuden ollessa vain 210 min^{-1} . Kuva 2.11 kuvaa välikaapelin toimintaa kyseisessä käynnistyksessä. Tyristorit syttyvät niin kauan kuin napajännite negatiivisella puolijaksollaan ylittää sytyttimien kynnysjännitteen. Tyristorien alkaessa johtaa magnetointikone joutuu oikosulkuun ja automaattinen magnetoinninsäätö kasvattaa herätinkoneen magnetointivirtaa. Positiivisen puolijakson ajan tyristorit ovat johtamattomassa tilassa ja virta kulkee diodisillan kautta. Välikaapelissa tai tyristorihaarassa ei kulje tällöin myöskään magnetointikoneen tasasuuntaama virta. Näin on, koska välikaapeli tarjoaa magnetointivirralla kulkutien tyristorien ohi ja jos roottoriin ei vaikuta muuta jännitettä kuin magnetointijännite, tyristorit sammuvat vuorotellen niiden läpi kulkevan virran mennessä noltaan. Ilman tätä kytkentää diodisillan tasasuuntaama magnetointivirta pitäisi tyristorit johtavassa tilassa jatkuvasti. Tyristorien sammussa magnetoinninsäätö pienentää herätinkoneen magnetointivirtaa.



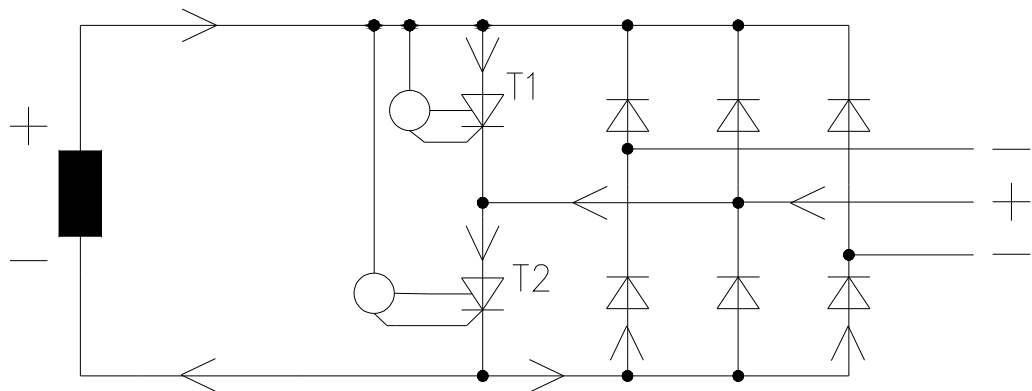
Kuva 2.10. Mittaustulokset mäntäkompressorimoottorin verkkokäynnistyksestä, jossa tahtimoottoria magnetoitiin vierasmagnetoinnilla ja magnetointi kytkettiin manuaalisesti pyörimisnopeuden ollessa $n = 210 \text{ min}^{-1}$. Roottoriin indusoitui edelleen staattorista vaihtojännite, joka negatiivisella puolijaksolla syytti tyristorit. Tällöin magnetoitinkone oikosulkeutui ja sen oikosulkuvirta kulki tyristorihaaran ja välikaapelin kautta. Moottorin saavutettua tahtinopeuden napakäämivirran taajuus pieneni ja se vaimeni hitaasti nolnaan, jonka jälkeen tyristorit eivät enää syttyneet ja pääkone magnetoitui.



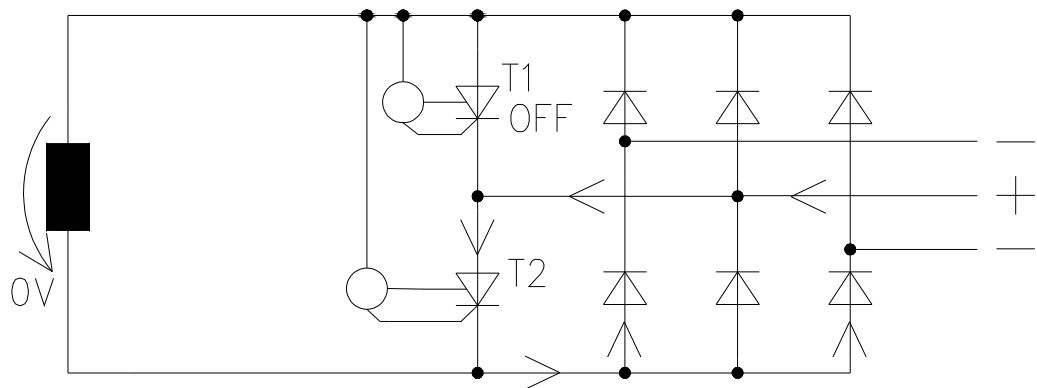
Kuva 2.11. (a) Napakäämin yli vaikuttaa staattorista indusoituneen vaihtojännitteen positiivinen puolijakso. Tyristorit ovat OFF-tilassa. Napakäämivirta kulkee diodisillan kautta ja diodisilta tasasuuntaa magnetointikoneen syöttämän magnetointivirran.



Kuva 2.11. (b) Napakäämin yli vaikuttaa staattorista indusoituneen vaihtojännitteen negatiivinen puolijakso. Tyristorit johtavat ja napakäämivirta kulkee niiden läpi. Välikaapeli tarjoaa magnetointivirralle kulkutien tyristorin T2 ohi.



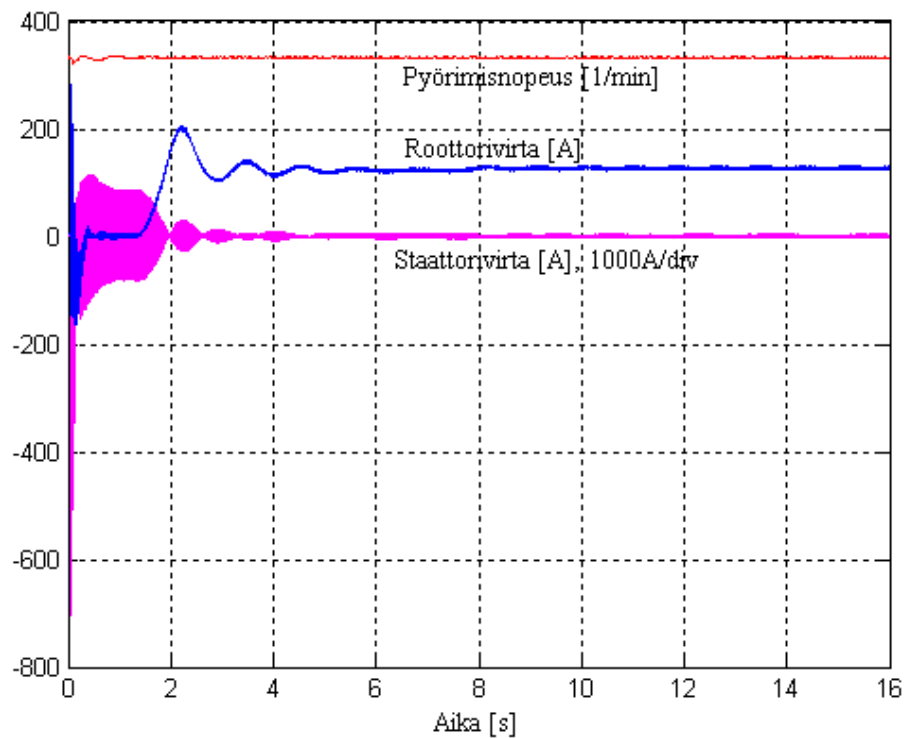
Kuva 2.11. (c) Napakäämin yli vaikuttaa staattorista indusoituneen vaihtojännitteen negatiivinen puolijakso. Tyristorit johtavat ja napakäämivirta kulkee niiden läpi. Välikaapeli tarjoaa magnetointivirrälle kulkutien tyristorin T1 ohi.



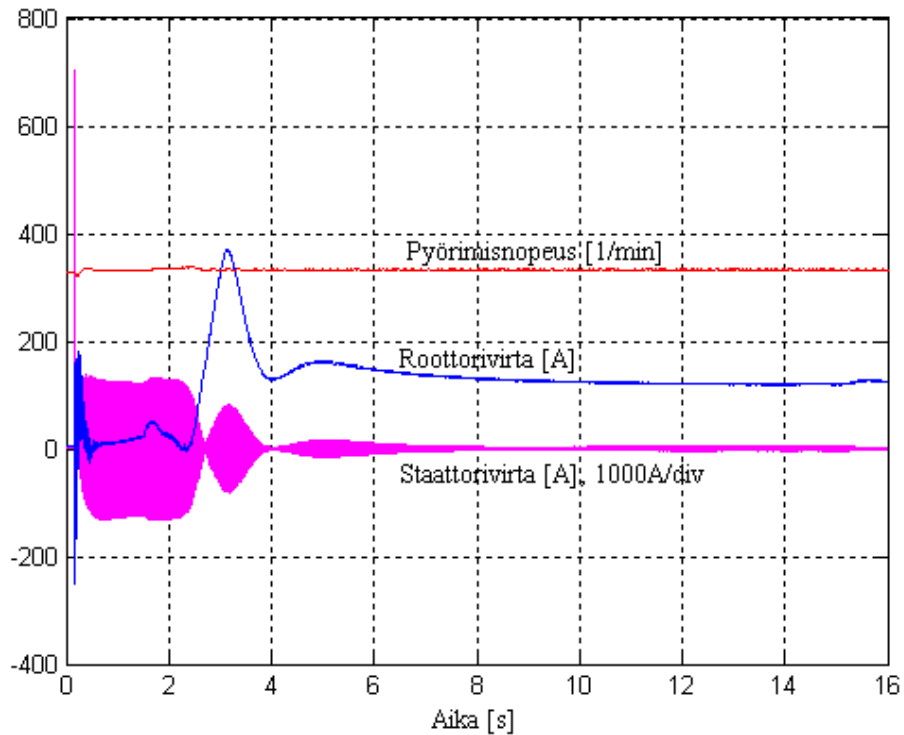
Kuva 2.11. (d) Moottori pyörii tahtinopeudella ja napakäämin yli vaikuttava vaihtojännite on vaimentunut nolnaan. Välikaapeli tarjoaa magnetointivirrälle kulkutien ohi tyristorin T1, jolloin se sammuu. Magnetointivirran vaiheen muuttuessa molemmat tyristorit ovat OFF-tilassa ja diodisillan tasasuuntaama magnetointivirta kulkee napakäämin kautta.

Pienen jättämän vaikutusta vetotahdistuksessa esiintyviin jännite- ja virtatasoihin tutkittiin tahdistamalla moottori verkkoon sekä jättämän ollessa $s = 0$ (kuva 2.12) että jättämällä $s = 0,012$ (kuva 2.13). Mittaustulosten perusteella eroa käynnistyksissä ei juuri ollut, sillä käynnistyksen alun transientit ovat samaa suuruusluokkaa. Pyörimisnopeuden värähtely ennen tahtinopeuteen tasaantumista

kestää hiukan kauemmin suljettaessa katkaisija jättämällä $s = 0,012$, mutta roottorin heilunta on myös sattumanvaraista käynnistyksittäin. Pienestä jättämästä tahdistushetkellä on myös hyötyä, sillä silloin roottoriin indusoituu pieni virta, joka diodisillan tasasuuntaamana voi ehkäistä negatiivisen reluktanssitahdistumisen ja siitä seuraavan tahdistaputoamisen.

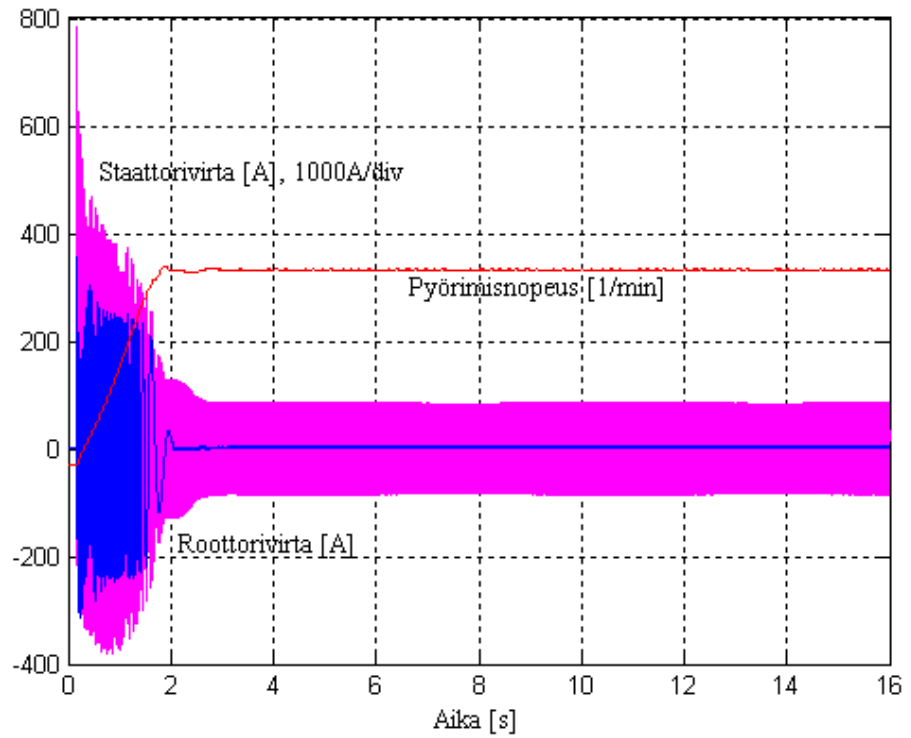


Kuva 2.12. Mäntäkompressorimoottorin staattorivirta, roottorivirta ja pyörimisnopeus tahdistettaessa moottori verkkoon tahtinopeudessa. Magnetoinnin kytkennän viive oli puoli sekuntia.

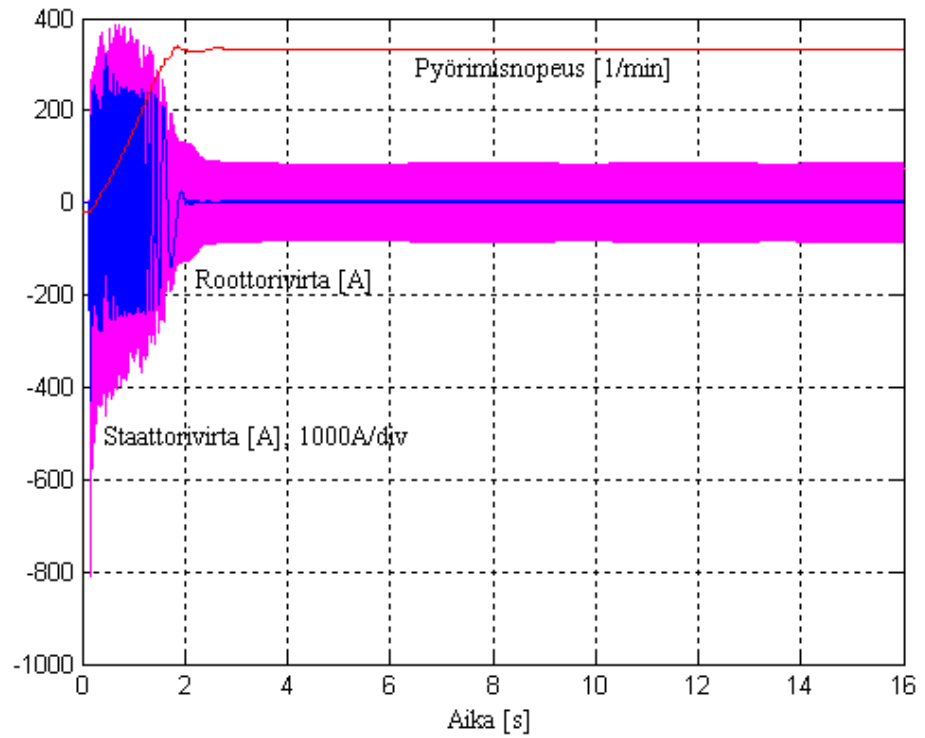


Kuva 2.13. Mäntäkompressorimoottorin staattorivirta, roottorivirta ja pyörimisnopeus tahdistettaessa moottori verkkoon jättämän ollessa $s = 0,012$ eli pyörimisnopeudella $n = 329 \text{ min}^{-1}$. Staattori- ja roottorivirran alkutransientit ovat samansuuruisia kuin tahtinopeudella suoritetuissa vetotahdistuksissa.

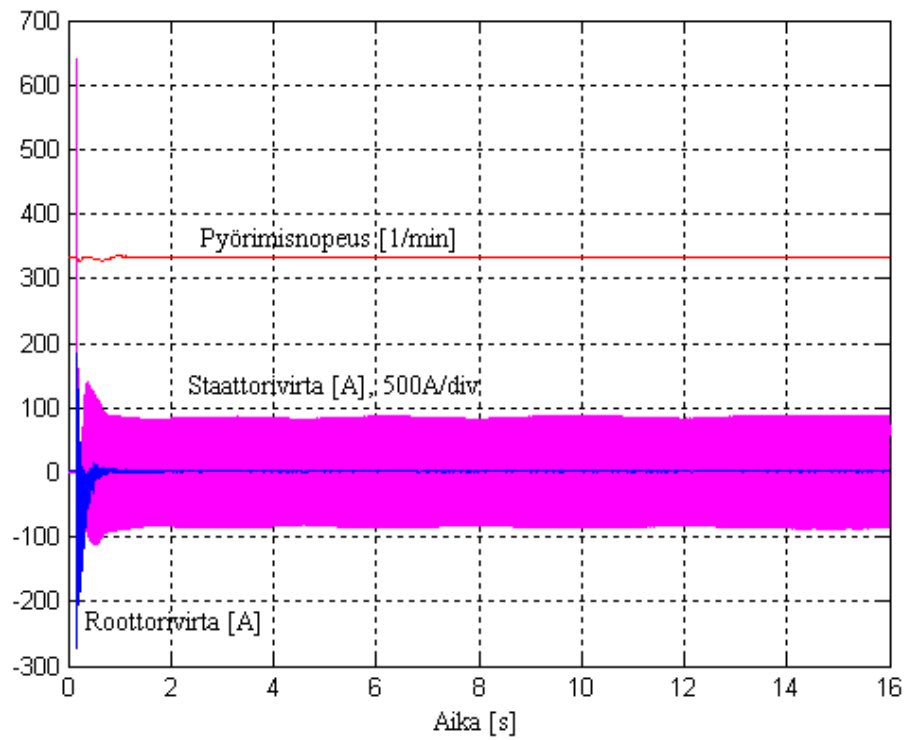
Mittaustuloksista ei ole nähtävissä eroja käynnistyksissä, joissa käynnistysvastuksen oikosulkevan tyristorin sytytinhaara on kiinni roottorin + - kiskossa (kuvat 2.14 ja 2.16) ja niissä, joissa se on irrotettu (kuvat 2.15 ja 2.17). Tämän perusteella mittaustuloksia voidaan käyttää luvussa 1.5 esiteltyjen tahtikoneiden käynnistyksiä arvioitaessa, vaikka niiden roottoripiirit eroavatkin mittauksissa käytetyn moottorin roottorista. Tuloksista ei voida kuitenkaan vetää johtopäätöstä siitä, estäisikö napakäämin rinnalle kytketty RC -suoja tyristorien tahattoman syttymisen.



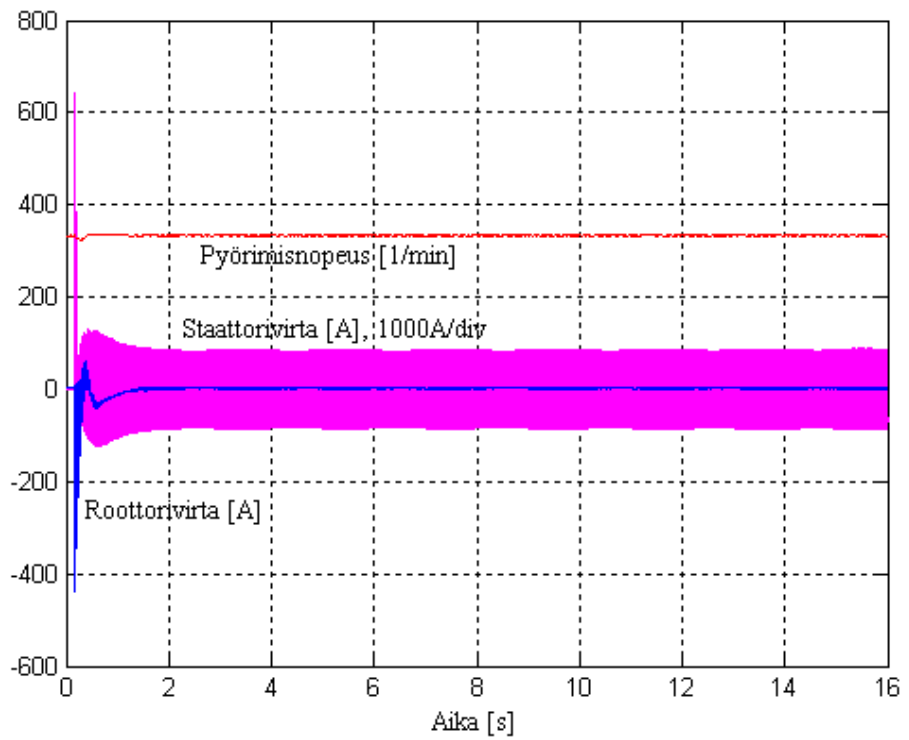
Kuva 2.14. Mäntäkompressorimoottorin verkkokäynnistys alkunopeudesta 20 min^{-1} vastakkaiseen suuntaan normaaliin pyörimissuuntaan nähden. Käynnistysvastuksen oikosulkevan tyristorin sytytinhaara oli kytkettynä roottorin + -kiskoon.



Kuva 2.15. Mäntäkompressorimoottorin verkkokäynnistys alkunopeudesta 20 min^{-1} vastakkaiseen suuntaan normaaliin pyörimissuuntaan nähden. Käynnistysvastuksen oikosulkevan tyristorin sytytinhaara oli irrotettu roottoripiirin +-kiskosta.



Kuva 2.16. Mäntäkompressorimoottorin vetotahdistus tahtinopeudella käynnistysvastuksen oikosulkevan tyristorin sytyinhaaran ollessa kytkettynä roottoriin + -kiskoon.



Kuva 2.17. Mäntäkompressorimoottorin vetotahdistus tahtinopeudella käynnistysvastuksen oikosulkevan tyristorin sytyinhaaran ollessa irrotettuna roottoripiirin + -kiskosta.

3 KÄYNNISTYKSEN SIMULOINTI

3.1 Simulointiohjelmat

ABB Oy Sähkökoneitten Tahtikoneet-yksikössä tahtikoneitten sähköinen suunnittelu tapahtuu analyyttisellä mitoitusohjelmistolla THW32, jota käytetään koneiden läpilaskentaan. THW on käyttöliittymä aliohjelmille, joille annetaan lähtötiedoiksi koneen geometria ja tuloksena saadaan sekä pääkoneen että magnetointikoneen sähkötekniset arvot, kuten vääntömomentit, lämpenemät ja vuontiheydet. Koneitten suunnittelun yhteydessä niiden käynnistysominaisuudet suorassa verkkokäynnistyksessä lasketaan A111-aliohjelmalla. Ohjelma antaa tuloksena listauksen vääntömomenteista, staattori- ja roottorivirroista sekä reaktansseista ja resistansseista eri jättämän arvoilla. Laskenta suoritetaan jättämään $s = 0,001$ asti.

Tuotekehitystä ja erikoistilanteita varten koneille voidaan tehdä laskelmia transienttitilanteista simulointiohjelmilla, joista tätä työtä varten on käytetty kahta: ABB Corporate Research:n kehittämää SMT (Simulation and Analysis of Machine Transients) -laskentaohjelmaa sekä Teknillisen korkeakoulun Sähkömekaniikan laboratoriossa kehitettyä elementtimenetelmään perustuvaa FCSMEK-simulointiohjelmaa. Molemmille annetaan lähtötiedoiksi THW-läpilaskennan tulokset.

Diplomityöhön liittyvissä mittauksissa käytetyn tahtimoottorin sekä luvussa 1.5 esiteltyjen tahtikoneitten käynnistyksiä simuloimalla haluttiin selvittää, onko diplomityössä tutkittavaan DOL-moottorien käynnistyshäiriöön vaikuttavia seikkoja nähtävissä laskentaohjelmien tuloksissa ja voitaisiinko ongelma siten ennakoida käynnistyksiä simuloimalla. Mäntäkompressorimoottorin verkkokäynnistys ja hiomakonemoottorin kuristinkäynnistys sekä vanhalla että uudella roottorilla simuloitiin SMT-ohjelmalla. Ohjelman käyttöliittymässä käyttäjä voi määrittää suurimman staattorivirran ja pienimmän roottorin pyörimisnopeuden, jolla konetta voidaan alkaa magnetoida sekä viiveen ehtojen

täyttymisen ja magnetoinnin kytkennän välillä. Mäntäkompressorimoottorin alhaisimmaksi magnetoinnin kytkentänopeudeksi määrättiin $n = 0,95n_s$. Sitä seuraavaa viivettä muutettiin eri laskelmiin. Käytetyt ajat olivat 0,5 ja 0,3 sekuntia. Kuristinkäynnistyslaskelmissa käyttäjä voi antaa parametreina kuristimen vaihereaktanssin sekä pyörimisnopeudet, joilla kuristin ohitetaan ja moottoria aletaan magnetoida. Hiomakonemoottorin kuristinkäynnistyksiä simuloitaessa kyseiseksi nopeudeksi määrättiin tahtinopeus $n_s = 300 \text{ min}^{-1}$ ja magnetoinnin viiveeksi yksi sekunti. Arvot valittiin vastaamaan mahdollisimman hyvin hiomakonemoottorin käyttöönottomittauksista saatuja käyriä.

Loistehokompensaattorin ja mäntäkompressorimoottorin vetotahdistusten simulointiin käytettiin FCSMEK-ohjelmaa. Käyttöliittymässä käyttäjä voi valita jättämän, jolla käynnistys tapahtuu. Käynnistykset simuloitiin alkavaksi sekä jättämän arvolla nolla että jättämällä $s = 0,012$.

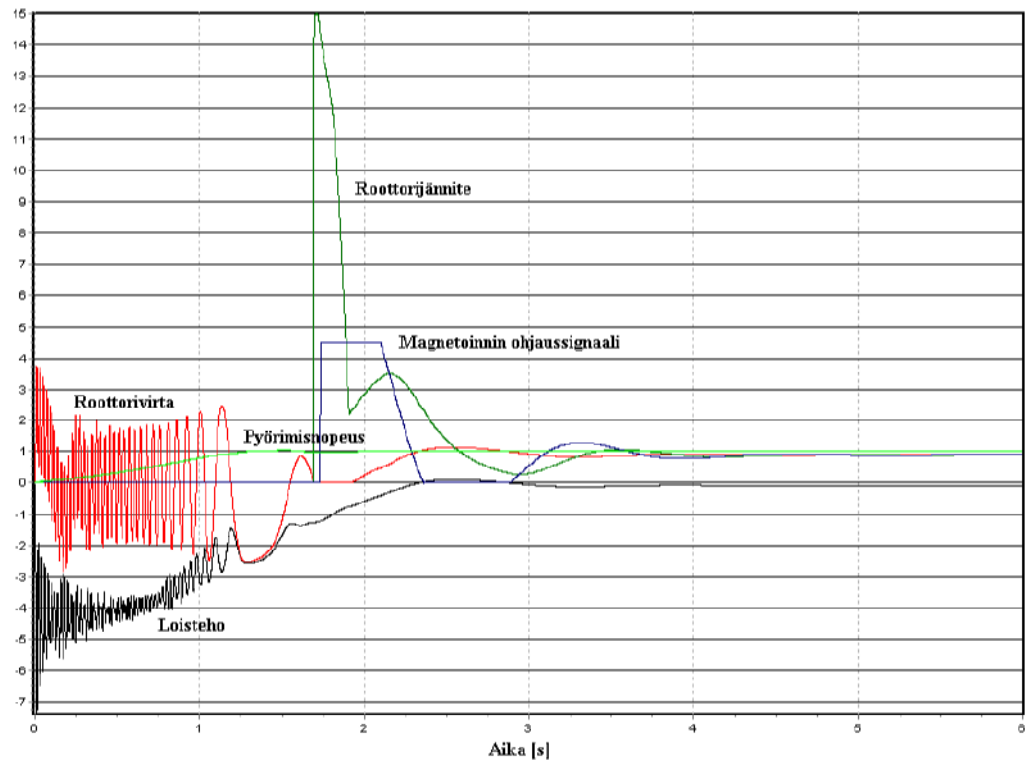
3.2 Simulointitulokset

3.2.1 SMT-laskelmat

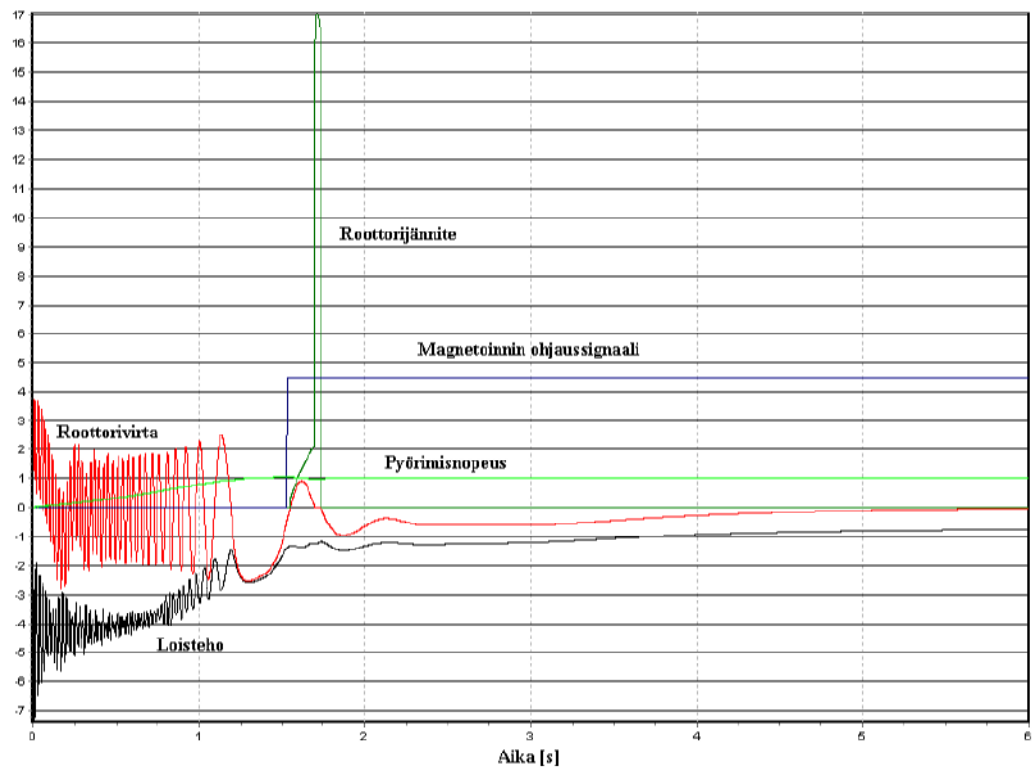
Mäntäkompressorimoottorin verkkokäynnistykset simuloitiin SMT-ohjelmalla. Pienimmäksi pyörimisnopeudeksi, jolla konetta voidaan magnetoida, määrättiin 95% tahtinopeudesta. Viiveenä nopeusrajan saavuttamisen ja magnetoinnin kytkennän välillä käytettiin sekä 0,5 että 0,3 sekuntia. Simulointitulokset ovat kuvissa 3.1 ja 3.2. Moottorisuureet ovat SMT-ohjelmasta saaduissa kuvissa suhteellisina arvoina. Niiden perusarvot eri moottoreille on lueteltu taulukossa 2.

Taulukko 2. SMT-ohjelman käyttämät moottorisuureiden perusarvot eri moottoreille

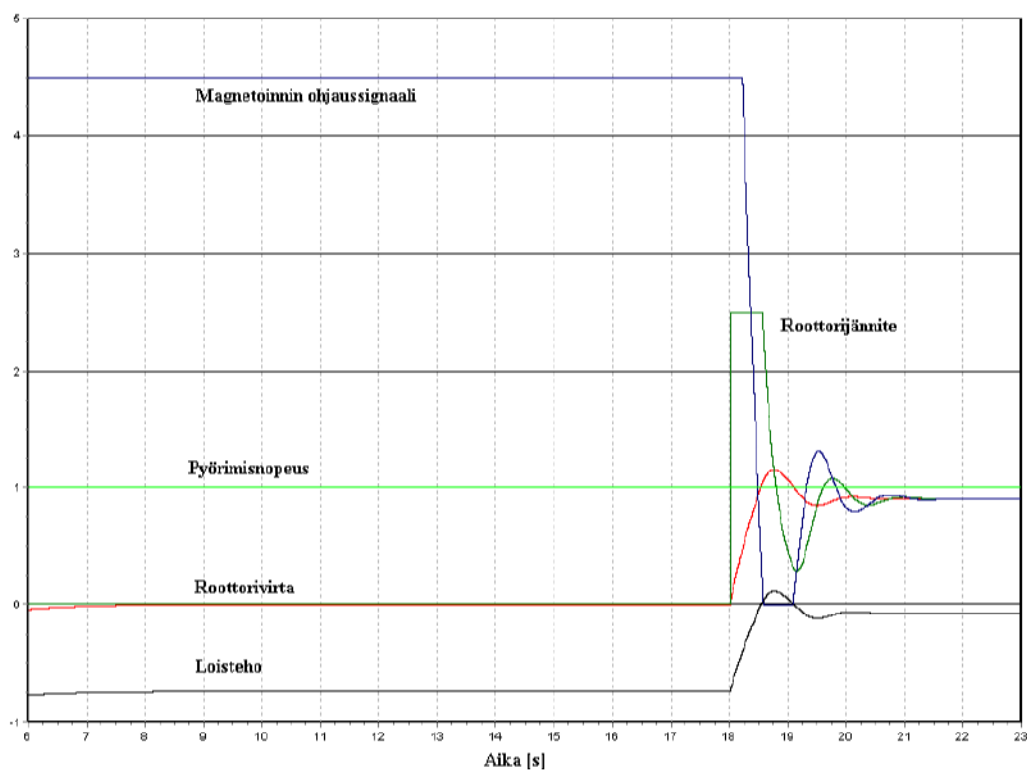
	Mäntäkompressorimoottori	Hiomakonemoottori, alkuperäinen	Hiomakonemoottori, uusi roottori
I_1 [A]	518,95	1061,72	1061,32
I_{Fr} [A]	133,5	239	133,9
U_{Fr} [V]	26,46	18,67	25,38
S [kVA]	4194,85	13653,5	13648,4
n [min^{-1}]	333	300	300



Kuva 3.1. Mäntäkompressorimoottorin datoilla SMT-ohjelmalla simuloitu suora verkkokäynnistys. Ohjelman käyttöliittymässä magnetoinnin kytkentähetkeksi määritettiin 0,5 sekuntia 95%:n pyörimisnopeuden saavuttamisen jälkeen. Laskelmassa kone magnetoituu normaalisti.



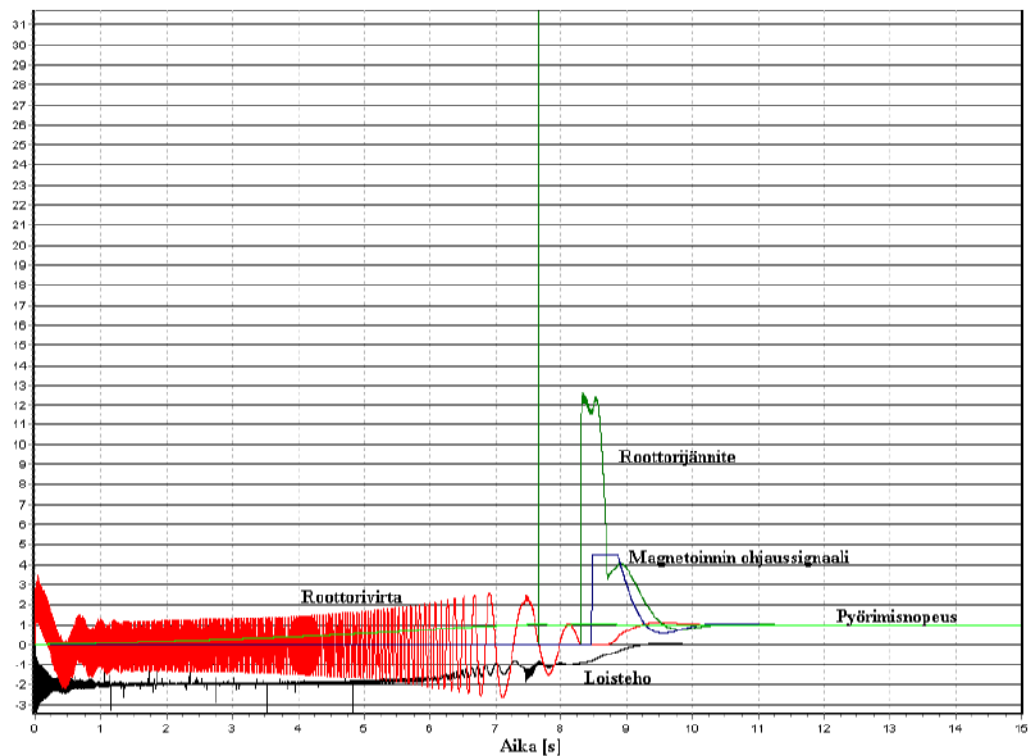
Kuva 3.2. (a) Mäntäkompressorimoottorin datoilla tehty SMT-laskelma suorasta verkkokäynnistyksestä. Ohjelman käyttöliittymässä magnetoinnin kytkentähetkeksi määritettiin 0,3 sekuntia 95%:n pyörimisnopeuden saavuttamisen jälkeen. Magnetoinnin ollessa kytkettynä päälle roottorijännitteeseen syntyy piikki, joka sytyttää tyristorit. Tällöin magnetointikone oikosulkeutuu tyristorien kautta ja magnetoituminen viivästyy tyristorivirran vaimetessa hiljalleen nollaan.



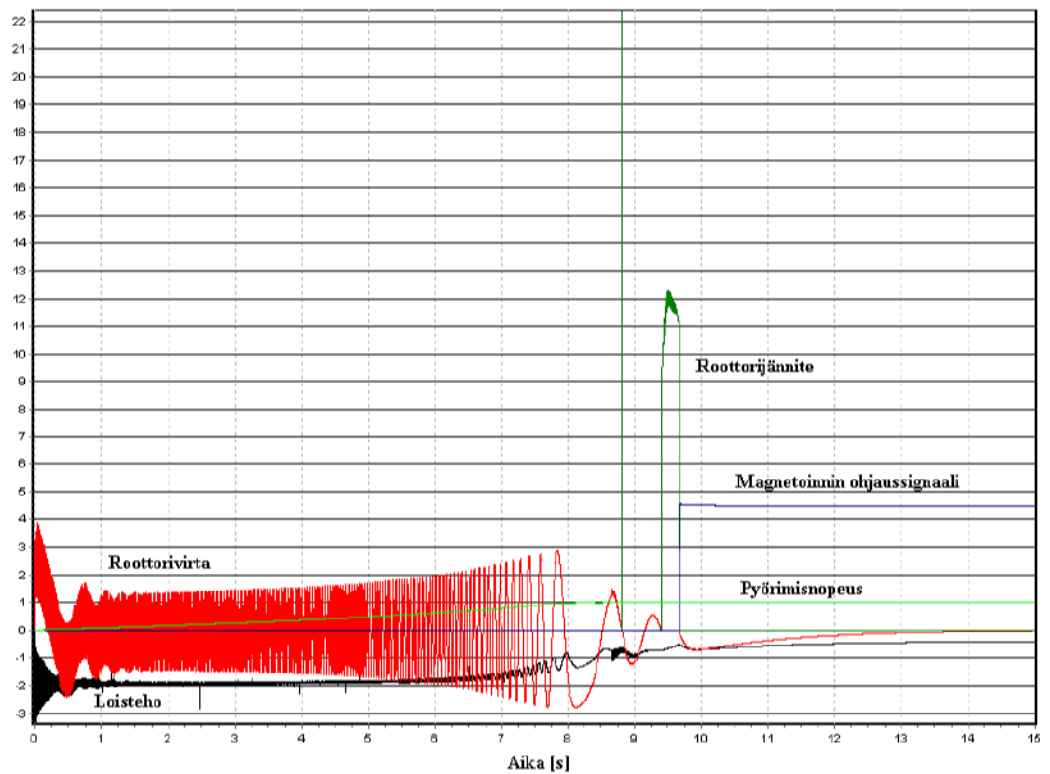
Kuva 3.2 (b) Mäntäkompressorimoottorin datolla tehty SMT-laskelma suorasta verkkokäynnistyksestä. Loisteho-, roottorivirta-, roottorijännite-, ohjaussignaali- ja pyörimisnopeuskäyrät aikavälillä 6...23 sekuntia. Negatiivisen roottorivirran saavutettua arvon nolla tyristorit sammuvat ja pääkone magnetoituu.

Kuvasta 3.2(a) nähdään, että diplomityössä tutkittu käynnistyshäiriö ilmenee simuloitaessa mäntäkompressorimoottorin suoraa verkkokäynnistystä 0,3 sekunnin magnetointiviiveellä. Tyristorit syttyvät magnetoinnin kytkennän jälkeen magnetointijännitteen ja negatiivisen roottorijännitteen yhdessä synnyttämästä jännitepiikistä. Tällöin magnetointikone oikosulkeutuu tyristorien kautta. Negatiivinen roottorivirta vaimenee hiljalleen nolnaan, jolloin tyristorit sammuvat ja kone magnetoituu (Kuva 3.2b). Kytkettäessä magnetointi 0,5 sekuntia 95%:n pyörimisnopeuden saavuttamisen jälkeen napakäämin jännite on ehtinyt pienentyä niin paljon, ettei sen ja magnetointijännitteen muodostama kokonaisjännite ylitä tyristorien sytyttimien kynnsjännitettä vaan kone magnetoituu normaalisti (kuva 3.1).

Moottorin magnetoitumisongelma ilmenee myös simuloitaessa hiomakonemoottorin kuristinkäynnistä roottorinvaihdon jälkeisillä datoilla (kuva 3.4). Napakäämin jännite on magnetoinnin kytkeytyessä yhä niin korkea, että roottorin kokonaisjännite ylittää tyristorien syyttimien kynnyksjännitteen ja magnetointikone oikosulkeutuu tyristorien kautta. Tällöin pääkoneen magnetoituminen viivästyy, kunnes tyristorivirta saavuttaa arvon nolla. Simuloitaessa käynnistys alkuperäisillä hiomakonemoottorin datoilla roottorijännite ei magnetoinnin kytkennän jälkeen ylitä syyttimien kynnyksjännitettä ja moottori magnetoituu normaalisti (kuva 3.3).

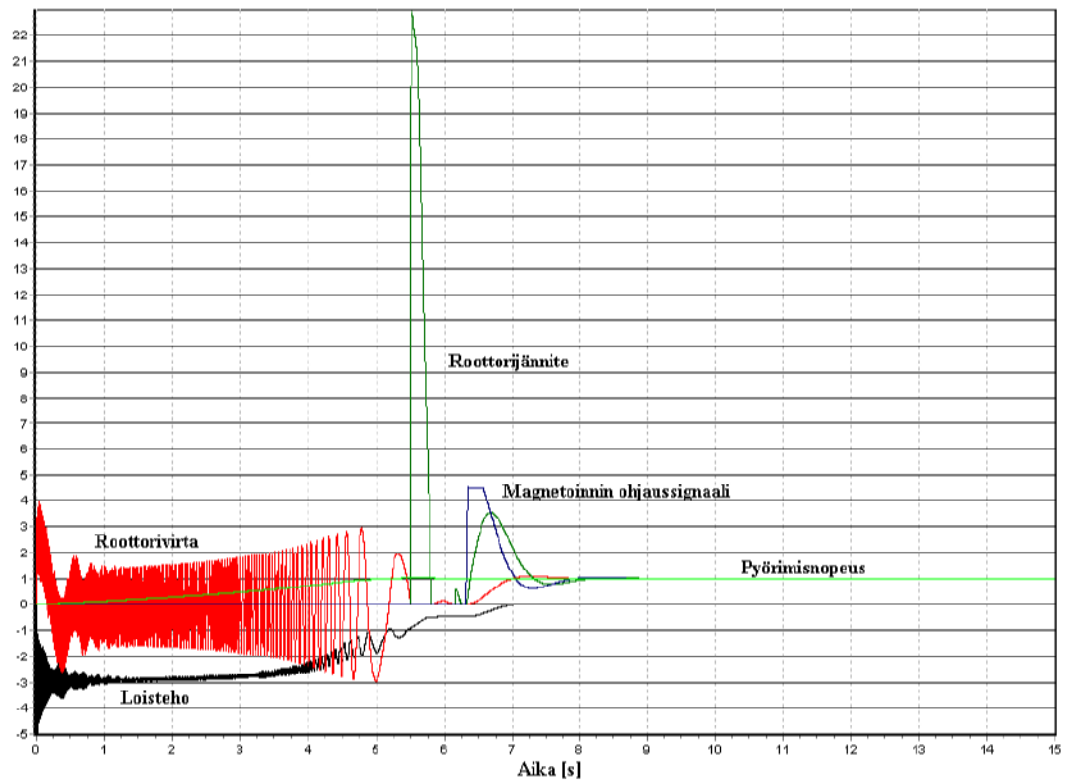


Kuva 3.3. Alkuperäisen luvussa 1.5 esitellyn hiomakonemoottorin datoilla tehty SMT-laskelma kuristinkäynnistä. Ohjelman käyttöliittymässä kuristimien ohitus on määrätty tapahtuvaksi pyörimisnopeudella $n = n_s$ ja magnetointi kytkeytyy sekunnin kuluttua nimellisopeuden saavuttamisesta. Kone magnetoituu laskelmassa normaalisti.

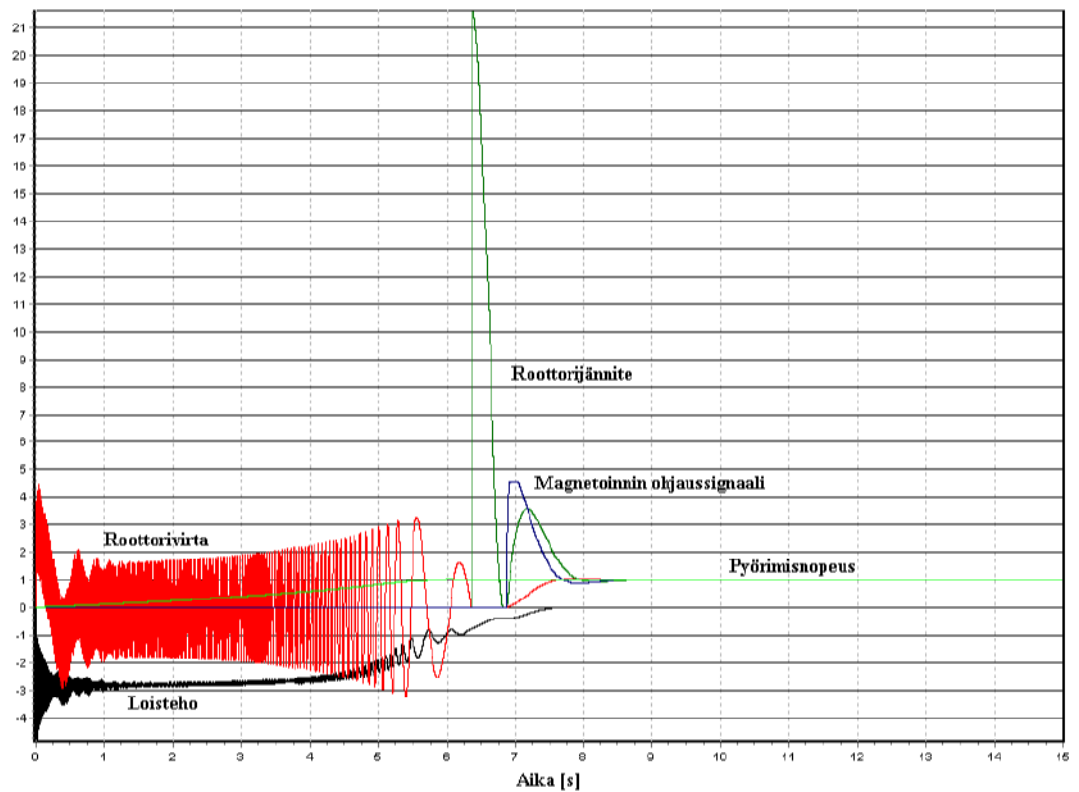


Kuva 3.4. Roottorivaihdon jälkeisillä hiomakonmoottorin datoilla tehty SMT-laskelma kuristinkäynnistyksestä. Kuristimien ohitus tapahtuu, kun moottori saavuttaa tahtinopeuden ja magnetointi kytkeytyy sekunnin kuluttua tästä. Magnetoinnin kytkeytyessä roottorissa vaikuttaa iso negatiivinen jännite. Syntyvä jännitepiikki sytyttää tyristorit ja magnetointikone oikosulkeutuu niiden kautta. Tällöin pääkoneen magnetoituminen viivästyy roottorivirran vaimentuessa hiljalleen nolnaan.

Sekä kuvasta 3.3 että kuvasta 3.4 nähdään loistehon ja roottorivirran kasvavan ja värähtelevän kuristimen ohittamisen jälkeen staattorijännitteen kasvusta johtuen. Tämän jännitteennousun vaikutusta magnetoitumisongelman syntyyn tutkittiin simuloimalla hiomakonmoottorin suora verkkokäynnistyksellä sekä alkuperäisillä että roottorinvaihdon jälkeisillä datoilla. Magnetoinnin kytkentähetkeksi määritettiin yksi sekunti tahtinopeuden saavuttamisen jälkeen. Simulointitulokset ovat kuvissa 3.5 ja 3.6.



Kuva 3.5. Alkuperäisen luvussa 1.5 esitellyn hiomakonemoottorin datoilla tehty SMT-laskelma suorasta verkkokäynnistyksestä. Simuloinnissa magneointi kytkeytyi sekunnin kuluttua nimellinopeuden saavuttamisesta. Kone magneitoiti laskelmassa normaalisti.



Kuva 3.6. Roottorivaihdon jälkeisillä hiomakonemoottorin datoilla tehty SMT-laskelma suorasta verkkokäynnistyksestä. Simuloinnissa magnetointi kytkeytyi sekunnin kuluttua nimellisenopeuden saavuttamisesta. Kone magnetoitui laskelmassa normaalisti.

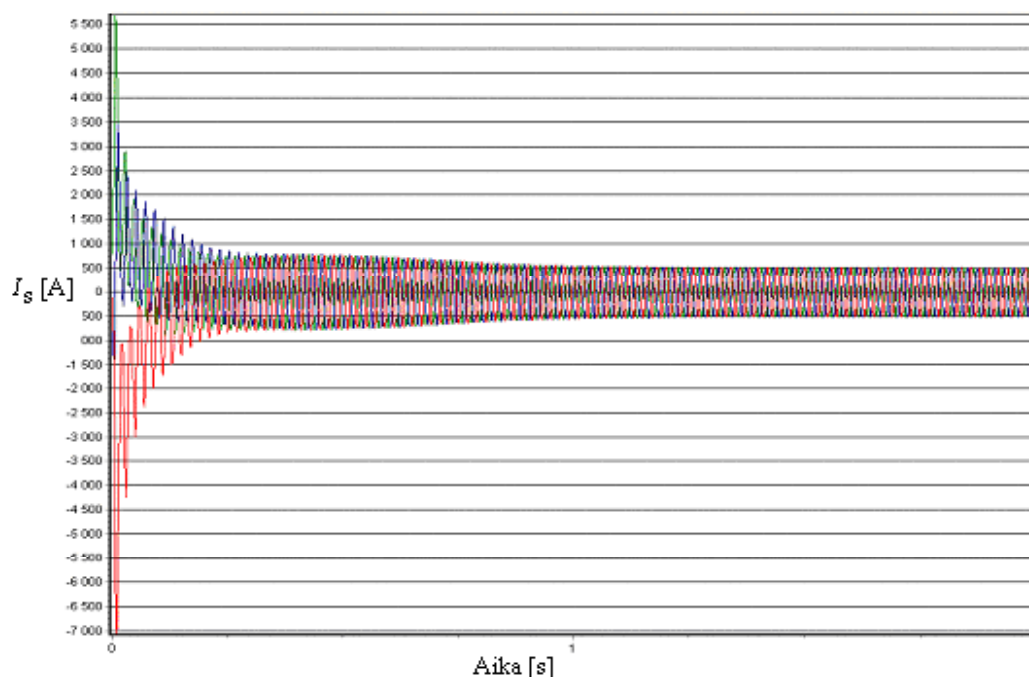
Vertaamalla kuvia 3.3 ja 3.4 kuviin 3.5 ja 3.6 nähdään, että kuristinkäynnistys on noin kaksi sekuntia suoraa verkkokäynnistystä hitaampi. Kuristimen ohittaminen tahtinopeudella aiheuttaa staattori- ja roottorivirran kasvun ja hidastaa niiden vaimentumista. Verkkokäynnistys­simuloinneissa sekä alkuperäisillä että uusilla moottoridatoilla napakäämin jännite on magnetoinnin kytkentähetkeen mennessä vaimentunut nol­laan tai niin pieneksi, ettei roottorijännite riitä enää sytyttämään tyristö­reja, vaan moottorit magnetoituvat välittömästi. Simulointitulosten mukaan kuristinkäynnistys voi siis olla tahtimoottorin magnetoitumisen kannalta riskialttiimpi käynnistystapa kuin suora verkkokäynnistys.

Diplomityössä tutkittava käynnistyshäiriö esiintyi SMT-ohjelmalla tehdyissä käynnistys­simuloinneissa, joten SMT-laskelmia voitaisiin käyttää hyväksi yritettäessä ennako­ida kyseistä häiriötä. SMT-ohjelmalla on luonnollisesti myös

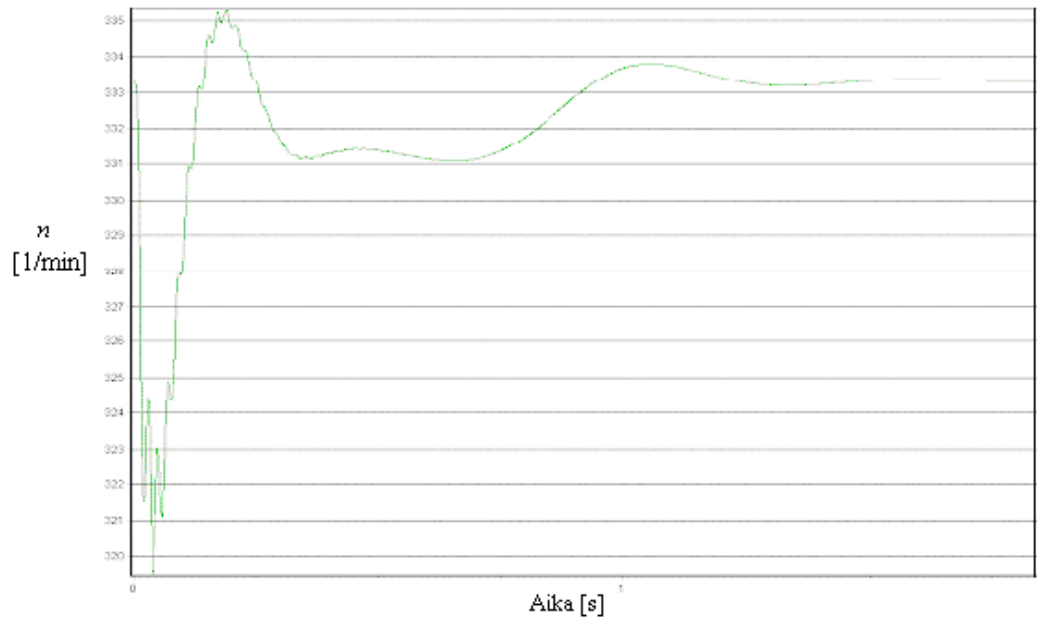
rajoituksensa. Mäntäkompressorimoottorin käynnistystä simuloitaessa ei muun muassa voitu ottaa huomioon käynnistysvastusta. Ohjelman roottorimalli ei myöskään sisällä välikaapelia. Kaiken kaikkiaan ohjelma on kuitenkin hyvin havainnollinen ja käyttökelpoinen transienttitilanteiden simulointiin.

3.2.2 FCSMEK-laskelmat

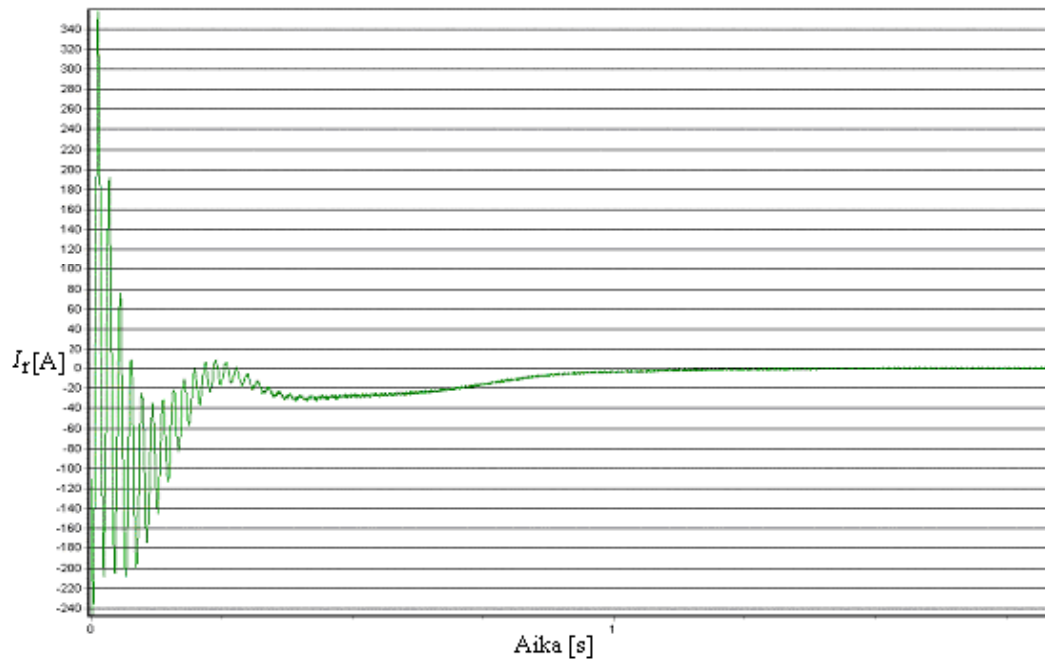
Mäntäkompressorimoottorin ja loistehokompensaattorin vetotahdistukset simuloitiin FCSMEK-ohjelmalla. Mäntäkompressorimoottorin datoilla tehdyissä laskelmissa käynnistyneen alkuhetken jättämiseksi määritettiin sekä $s = 0$ että $s = 0,012$. Moottorin käynnistysvastus, jonka resistanssi on 8,6-kertainen roottorikäännyksen resistanssiin nähden, on laskelmissa otettu huomioon lisäämällä vastaava arvo napakäämin resistanssiin. Simulointitulokset ovat kuvissa 3.7 ja 3.8.



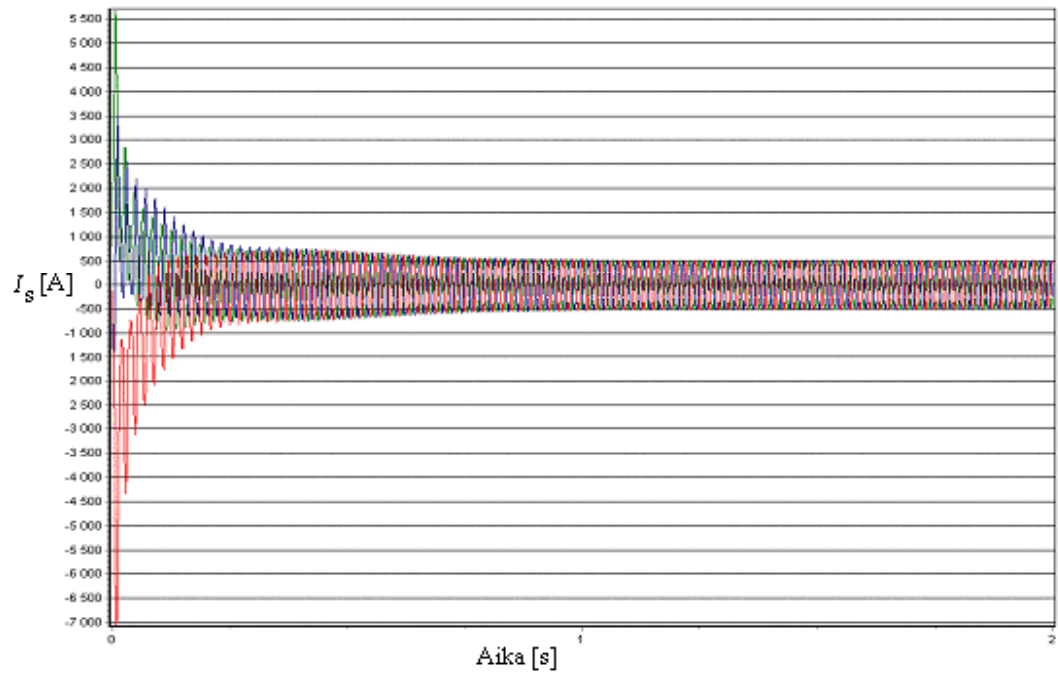
Kuva 3.7 (a). Staattorivirta mäntäkompressorimoottorin datoilla tehdyssä FCSMEK-laskelmassa. Ohjelman käyttöliittymässä jättämiseksi käynnistyshetkellä annettiin $s = 0$. Käynnistyneen alun virtatransientti kestää alle 0,2 sekuntia.



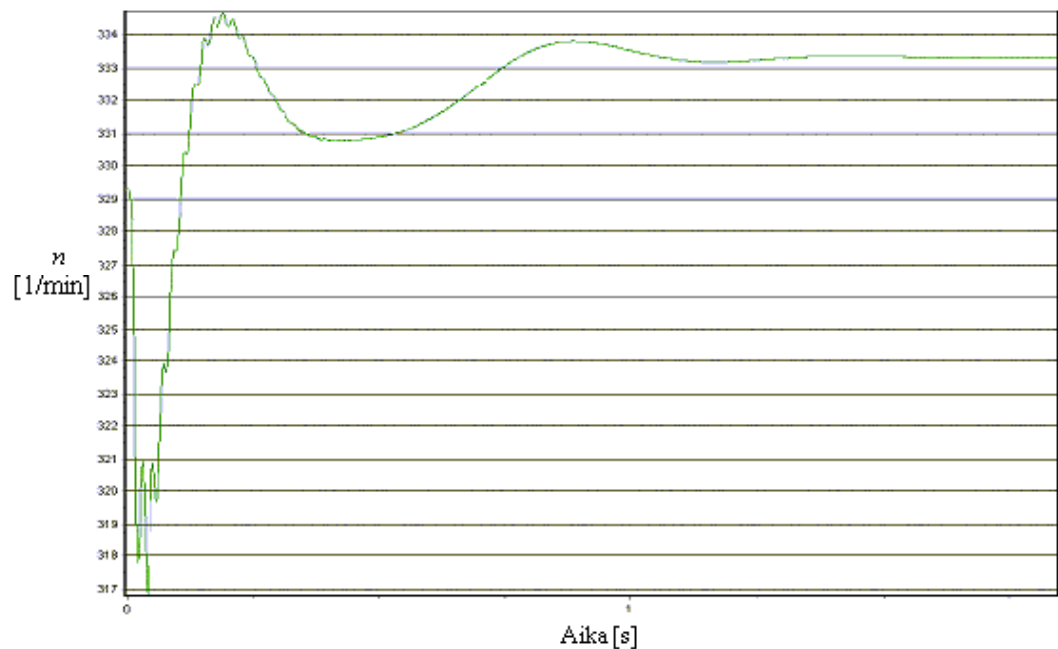
Kuva 3.7 (b). Pyörimisnopeus mäntäkompressorimoottorin datoilla tehdyssä FCSMEK-laskelmassa. Ohjelman käyttöliittymässä jättämäksi käynnistyshetkellä annettiin $s = 0$.



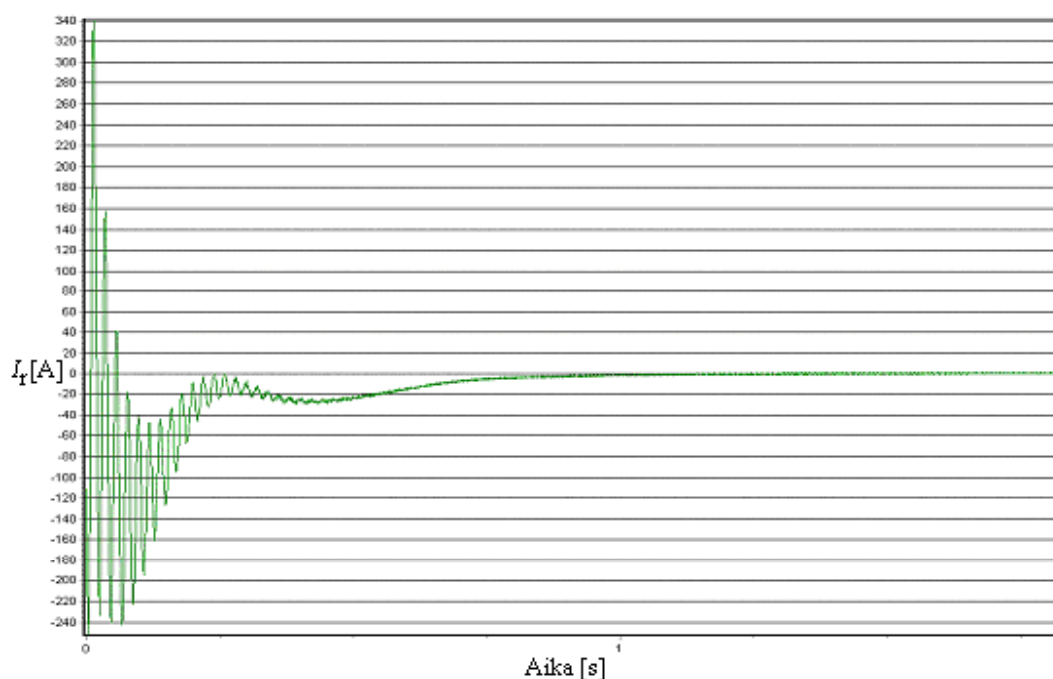
Kuva 3.7 (c). Roottorivirta mäntäkompressorimoottorin datoilla tehdyssä FCSMEK-laskelmassa. Ohjelman käyttöliittymässä jättämäksi käynnistyshetkellä annettiin $s = 0$. Käynnistyksessä roottoriin indusoituva vaihtovirta vaimenee nollaan noin sekunnissa.



Kuva 3.8. (a) Staattorivirta mäntäkompressorimoottorin datoilla tehdyssä FCSMEK-laskelmassa. Käyttöliittymässä jättämäksi käynnistyshetkellä annettiin $s = 0,012$. Käynnistyksen alun virtatransientti kestää alle 0,2 sekuntia.



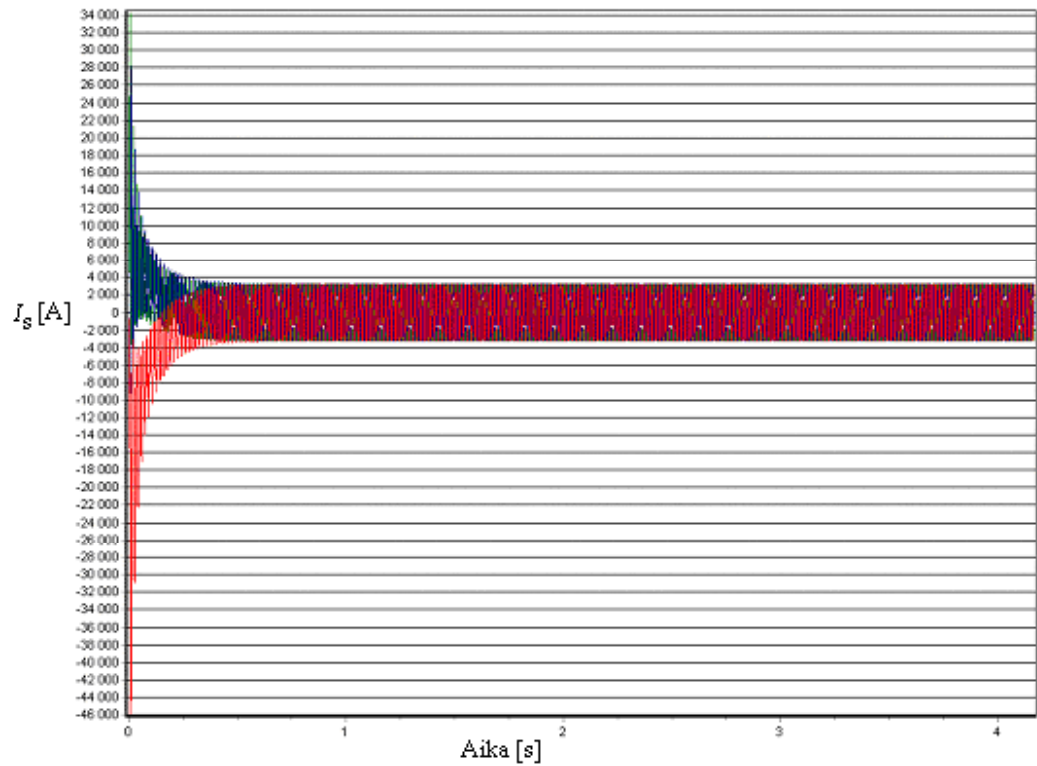
Kuva 3.8. (b) Pyörimisnopeus mäntäkompressorimoottorin datoilla tehdyssä FCSMEK-laskelmassa. Käyttöliittymässä jättämäksi käynnistyshetkellä annettiin $s = 0,012$.



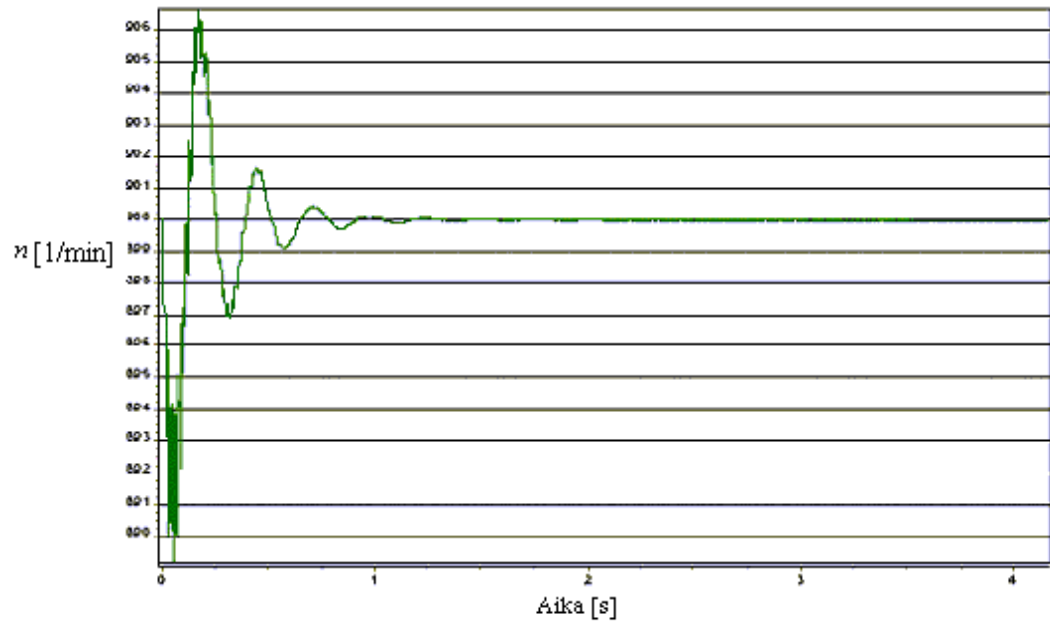
Kuva 3.8. (c) Roottorivirta mäntäkompressorimoottorin datoilla tehdyssä FCSMEK-laskelmassa. Käyttöliittymässä jättämäksi käynnistyshetkellä annettiin $s = 0,012$. Käynnistyksessä roottoriin indusoitua vaihtovirta vaimenee nolnaan noin sekunnissa.

Simulointitulosten mukaan staattorivirtatransientti mäntäkompressorimoottorin käynnistyksen alussa kestää alle 0,2 sekuntia. Roottoriin indusoituvan vaihtovirran vaimeneminen nolnaan kestää kauemmin eli noin sekunnin. Moottori saavuttaa tahtinopeuden alle kahdessa sekunnissa. Mittaustuloksista poiketen FCSMEK-laskelmissa roottorivirta ja pyörimisnopeus värähtelevät kauemmin simuloinneissa, joissa tahdistushetken jättämäksi oli määritetty $s = 0$ kuin niissä, joissa jättämä tahdistushetkellä oli $s = 0,012$. Simulointien perusteella mäntäkompressorimoottorin käynnistyksessä voisi esiintyä vaara magnetointikoneen oikosulkeutumisesta tyristorien kautta, jos magnetointi kytkettäisiin noin puolen sekunnin kuluttua käynnistyksen alusta.

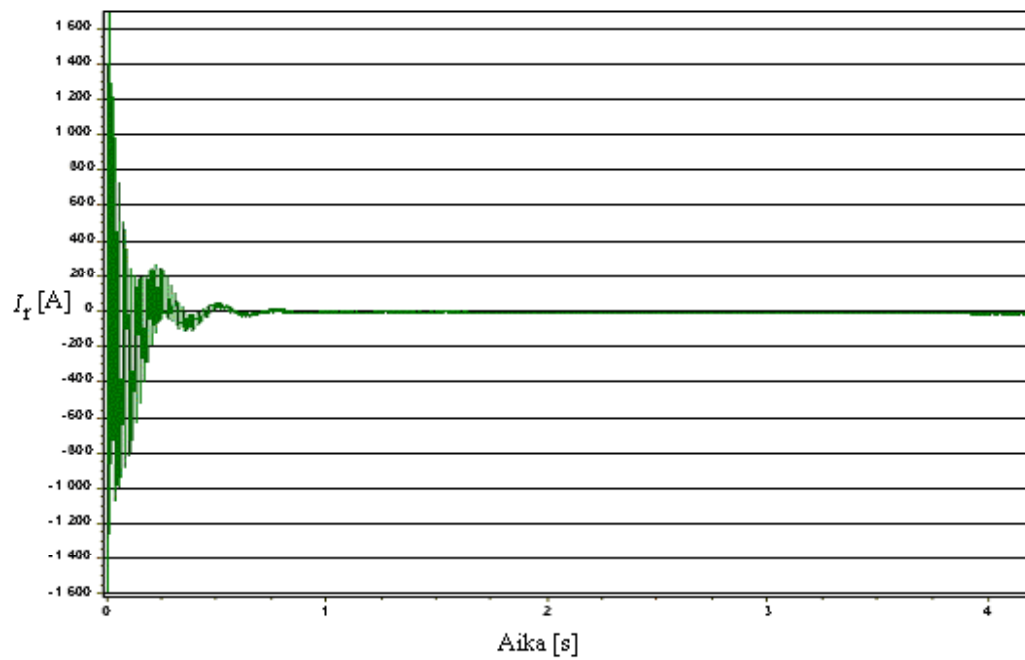
Loistehokompensaattorin datoilla saadut simulointitulokset ovat kuvissa 3.9 ja 3.10. Kuvan 3.9 kuvaajat on saatu määrittämällä simuloinnin alkuhetken jättämäksi $s = 0$ ja kuvan 3.10 kuvaajat alkuhetken jättämällä $s = 0,012$.



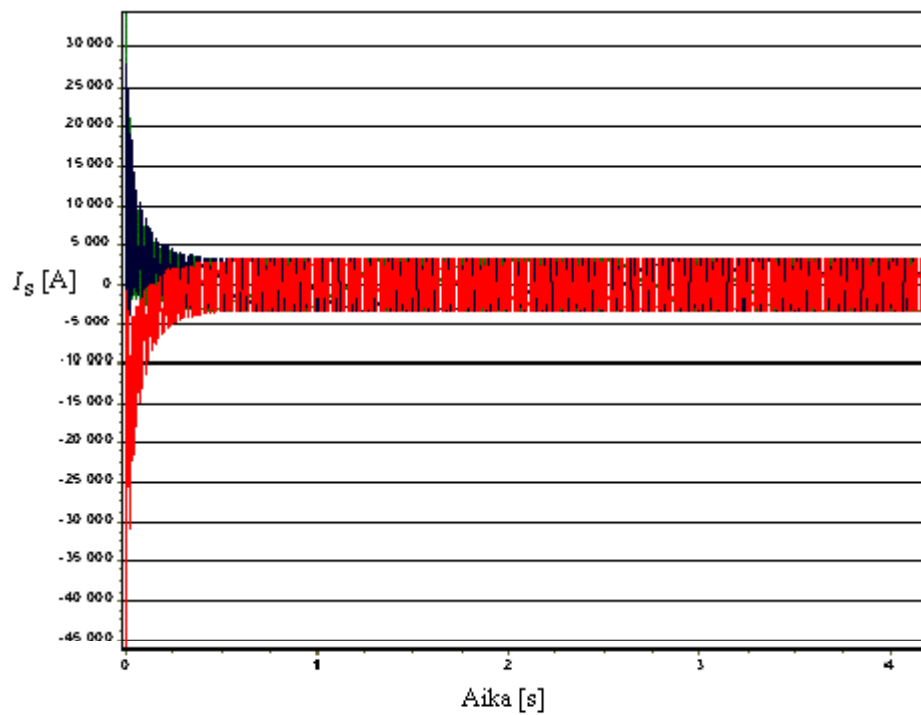
Kuva 3.9. (a) Staattorivirta loistehokompensaattorin datoilla tehdyssä FCSMEK-laskelmassa. Simuloinnissa käynnistyksen alkuhetken jättämä oli nolla. Staattorivirran kytkentätransientti vaimenee alle 0,5 sekunnissa.



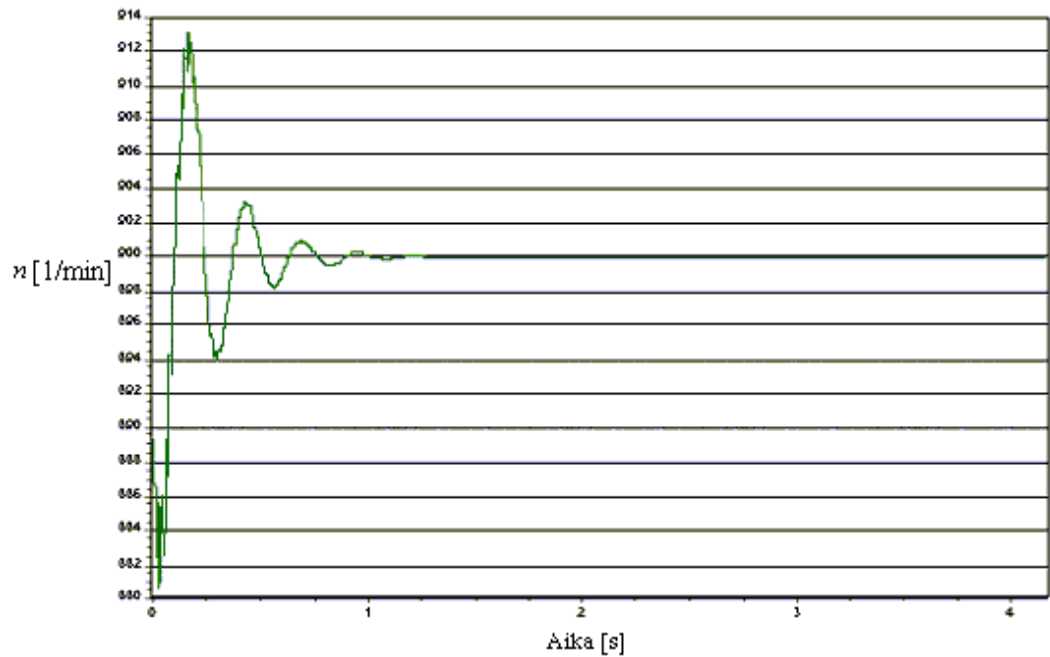
Kuva 3.9. (b) Pyörimisnopeus loistehokompensaattorin datoilla tehdyssä FCSMEK-laskelmassa. Simuloinnissa käynnistyksen alkuhetken jättämä oli nolla.



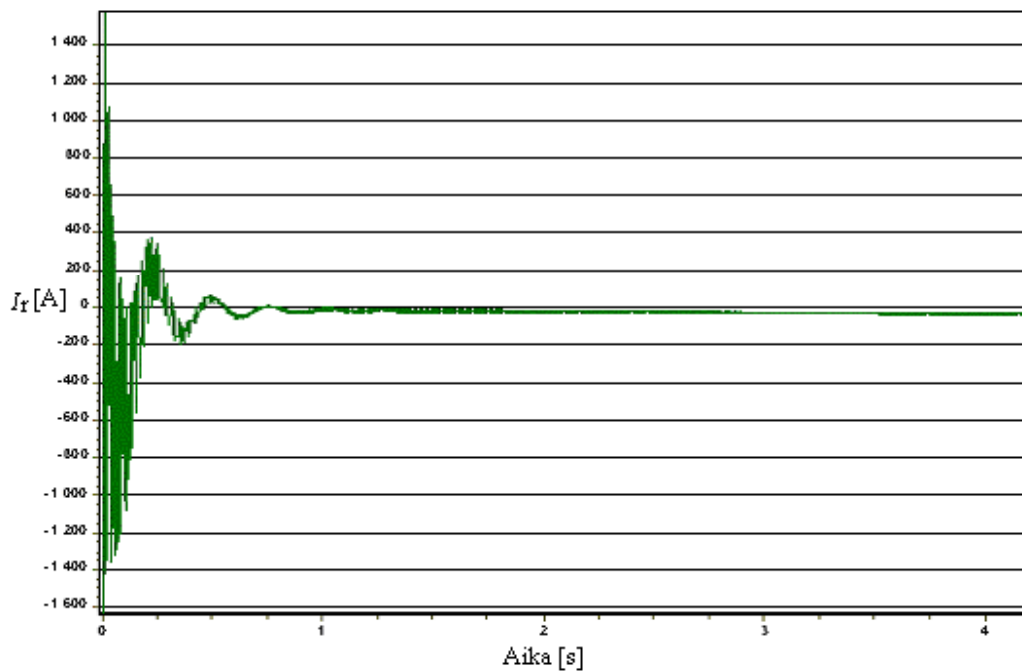
Kuva 3.9. (c) Roottorivirta loistehokompensaattorin datoilla tehdyssä FCSMEK-laskelmassa. Simuloinnissa käynnistyksen alkuhetken jättämä oli nolla. Simuloinnin mukaan roottorivirran kytKentätransientti vaimenee vetotahdistuksessa noin 0,75 sekunnissa.



Kuva 3.10. (a) Staattorivirta loistehokompensaattorin datoilla tehdyssä FCSMEK-laskelmassa. Simuloinnissa käynnistyksen alkuhetken jättämä oli 0,012. Simuloinnin mukaan staattorivirran kytkentätransientti vaimenee pienellä jättämällä tehdyssä vetotahdistuksessa alle 0,5 sekunnissa.



Kuva 3.10. (b) Pyörimisnopeus loistehokompensaattorin datoilla tehdyssä FCSMEK-laskelmassa. Simuloinnissa käynnistyksen alkuhetken jättämä oli 0,012.



Kuva 3.10. (c) Roottorivirta loistehokompensaattorin datoilla tehdyssä FCSMEK-laskelmassa. Simuloinnissa käynnistyksen alkuhetken jättämä oli 0,012. Simuloinnin mukaan roottorivirran kytkentätransientti vaimenee pienellä jättämällä tehdyssä vetotahdistuksessa noin sekunnissa.

Loistehokompensaattorin datoilla tehtyjen FCSMEK-laskelmien mukaan staattorivirran kytkentätransientti kompensaattorin vetotahdistuksen alussa vaimenee alle puolessa sekunnissa. Roottoriin indusoitua vaihtovirta vaimenee nolnaan noin 0,75 sekunnissa tahdistuksen tapahtuessa tahtinopeudella ja noin sekunnissa jättämän ollessa tahdistushetkellä $s = 0,012$. Simulointien perusteella loistehokompensaattorin käynnistyksessä voi olla vaara magnetointikoneen oikosulkeutumisesta tyristorien kautta, jos magnetointi kytkettäisiin noin puolen sekunnin kuluttua käynnistyksen alusta.

Vertaamalla mäntäkompressorimoottorin datoilla tehtyjen FCSMEK-simulointien tuloksia luvussa 2 esiteltyihin koestustuloksiin voidaan todeta ohjelman antavan todellisuutta suuremmat staattorivirrat, mutta jokseenkin oikeat roottorivirtatasot. Käynnistysajat ovat simuloinneissa pitempiä kuin todellisuudessa. FCSMEK-ohjelma ei ole yhtä havainnollinen kuin SMT ja se soveltuukin lähinnä käynnistyksen alun jännite- ja virtatasojen tarkasteluun. Laskelmien tuloksista voidaan kuitenkin nähdä, kuinka kauan tyristorit suurin piirtein käynnistyksen

alussa johtavat, joten niiden avulla on mahdollista arvioida diplomityössä tutkitun käynnistyshäiriön esiintymisen todennäköisyyttä moottoria käynnistettäessä.

4 JOHTOPÄÄTÖKSET JA SUOSITUKSET

Diplomityön tarkoituksena oli selvittää, miksi kahden verkkokäyttöisen tahtimoottorin käyttöönotossa roottorikäymistä ja diodisilatasasuuntaajaa suojaavat tyristorit oikosulkivat magnetointikoneen odotettua kauemmin viivästyen pääkoneiden magnetoitumista lähes kymmenen sekuntia. Samalla etsittiin tapoja välttää tämä käynnistyshäiriö tulevaisuudessa. Ongelman ratkaisemiseksi suoritettiin käynnistyskokeita 4,1 MW:n mäntäkompressorimoottorille sekä simuloitiin moottorikäynnistyksiä SMT- ja FCSMEK-laskentaohjelmilla.

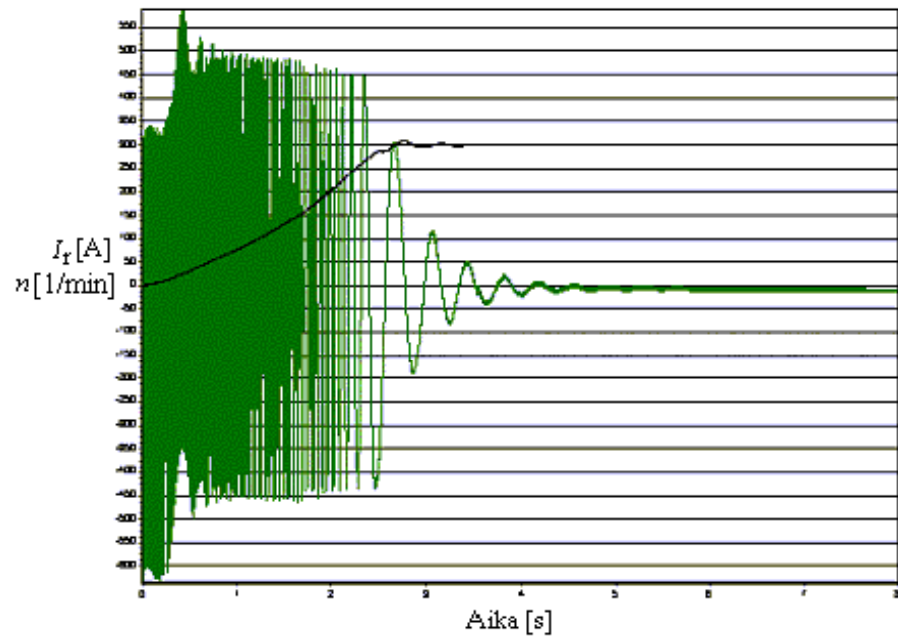
Käynnistyskokeiden perusteella tyristorit voivat oikosulkea herätinkoneen magnetoinnin kytkennän jälkeen kahdesta eri syystä. Tyristorit voivat olla johtavassa tilassa magnetoinnin kytkeytyessä, jos roottorivirran taajuuden pienentyessä virtaan syntyvä ”häntä” osuu ilmapäivästä indusoituvan magnetointivirran negatiiviselle puolijaksolle eli tyristorivirtaan. Tyristorit voivat myös syttyä transienttitilanteessa napakäymiin indusoituvan jännitteen ylittäessä sytyttimien kynnysjännitteen. Edellä kuvattujen tilanteiden estämiseksi olisi pidennettävä magnetoinnin kytkentää edeltävää viivettä sekä käytettävä sytyttimiä, joiden kynnysjännite on nykyistä 610 volttia korkeampi. Nykyisin viive 95%:n pyörimisnopeuden saavuttamisen ja magnetoinnin kytkennän välillä on yleisesti 0,5 sekuntia. Mittaustulosten perusteella viiveen kasvattaminen noin sekuntiin voisi varmistaa tyristorivirran vaimenemisen nolnaan ennen kuin herätinkone alkaa syöttää magnetointivirtaa. Korkeamman kynnysjännitteen käyttäminen puolestaan lyhentäisi aikaa, jonka tyristorit käynnistyksen aikana johtavat ja siten estäisi tyristorivirran ”hännän” muodostumisen. Samalla se vähentäisi mahdollisuutta, että tyristorit syttyvät magnetoinnin kytkennän jälkeisissä transienttitilanteissa.

Kynnysjännitteen nostamista rajoittavat roottorikäymisen, tyristorien ja diodisillan jännitekestoisuus. Tahtimoottorien roottorit koestetaan jännitteellä, joka on vähintään kymmenkertainen nimelliseen magnetointijännitteeseen

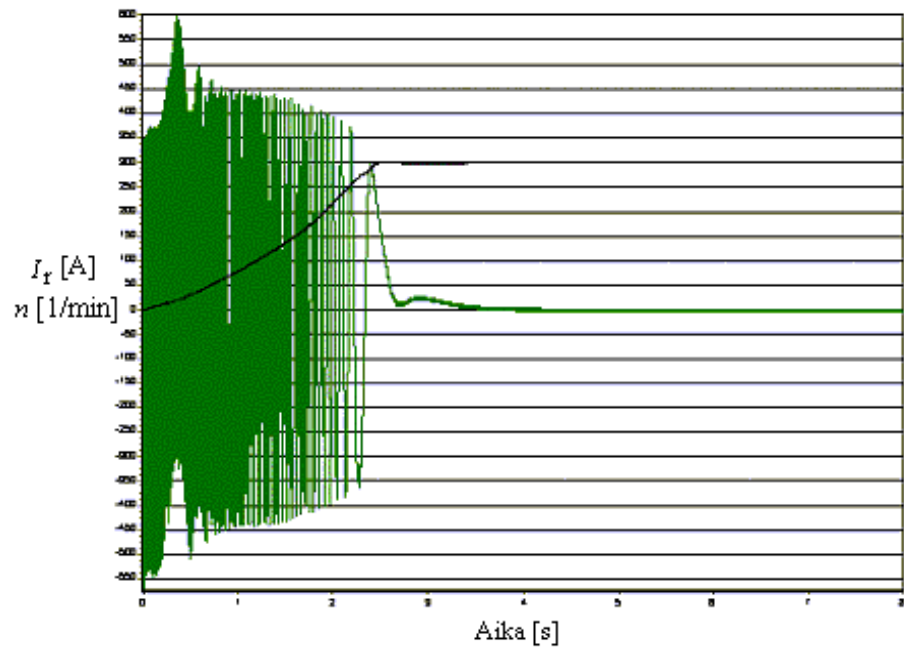
nähdessä, kuitenkin vähintään 2 kV ja enintään 3,5 kV. Diodisilloissa käytettyjen yksittäisdiodien estojännitekestoisuus on 2,2 kV, diodimoduulien 2 kV ja tyristorihaaran tyristorien 1,8 kV. Korkeimman mahdollisen sytytinjännitteen määrää siis tyristorien estojännitekestoisuus. Kynnysjännitettä voitaisiin kuitenkin nostaa merkittävästi nykyisin käytettyjen sytyttimien arvoista 354 V ja 610 V.

Jos tyristorit kuitenkin oikosulkevat magnetointikoneen, on staattorista roottoriin indusoituva energia purettava mahdollisimman nopeasti tyristorien johtoajan minimoimiseksi. Induktiivinen energia purkautuu sitä nopeammin, mitä suurempi on roottoriin resistanssi, joten tyristorien sammumista voidaan nopeuttaa lisäämällä roottoriin sarjavastus. Käynnistysvastuksella varustetuissa koneissa käynnistysvastus hoitaa tämän tehtävän eikä diplomityössä käsiteltä käynnistyshäiriötä ole esiintynyt DOL-moottoreissa, joissa käynnistysvastusta on käytetty. Pitkien magnetoitumisviiveiden välttämiseksi käynnistysvastuksellisesta roottoriin resistanssista voitaisiin tehdä standardirakenne. Näin ei ole tähän mennessä tehty taloudellisista syistä, sillä käynnistysvastus on kallis eikä sitä kaikissa koneissa käynnistysväntömomentin kasvattamiseksi tarvita.

Roottoriin resistanssin kasvattamisen vaikutus moottorin käynnistykseen on nähtävissä FCSMEK-laskelmien tuloksista kuvissa 4.1 ja 4.2. Laskelmissa on simuloitu luvussa 1.5 esitellyn hiomakonemoottorin suoraa verkkokäynnistystä napakäämin resistanssin ollessa $R_{Fr} = 0,337\Omega$ (kuva 4.1) ja $R_{Fr} = 3,37\Omega$ (kuva 4.2). Kuvia vertaamalla nähdään, että roottoriin resistanssin kasvattaminen nopeuttaa käynnistystä ja roottorivirran vaimenemista nollaan sekä tekee käynnistyksestä tasaisemman.



Kuva 4.1. Roottorivirta- ja pyörimisnopeuskäyrät FCSMEK-simuloinnista, jossa hiomakonemoottorin napakäämin resistanssi oli $R_{Fr} = 0,337\Omega$. Simuloinnissa roottorivirta värähtelee noin kahden sekunnin ajan tahtinopeuden saavuttamisen jälkeen.



Kuva 4.2. Roottorivirta- ja pyörimisnopeuskäyrät FCSMEK-simuloinnista, jossa hiomakonemoottorin napakäämin resistanssi oli $R_{Fr} = 3,37\Omega$. Simuloinnissa roottorivirta vaimenee nolnaan noin sekunnin kuluttua tahtinopeuden saavuttamisen jälkeen.

Loistehokompensaattorin käyttöönotossa pääkone magnetoitui noin 10,5 sekunnin kuluttua käynnistyksen alusta riippumatta siitä, kuinka pitkä viive pääkatkaisijan sulkemisen ja magnetoinnin kytkemisen välillä oli. Tämä viittaa siihen, että syy tyristorien johtamiseen odotettua kauemmin olisi lähtöisin staattoripuolelta. Käyttöönottomittausten loistehokäyristä kuvissa 1.9, 1.10 ja 1.11 onkin nähtävissä, että käynnistyksissä pääkoneen staattoripuolella on vaikuttanut muutosilmiö noin 10 sekunnin ajan käynnistyksen alkamisen jälkeen. Muuttuva staattorivirta on indusoinut kompensaattorin roottoriin vaihtojännitteen, joka negatiivisella puolijaksolla on sytyttänyt tyristorit ylittäessään sytyttimien kynnysjännitteen 610 voltia. Magnetoinnin kytkeytymisen jälkeen sekä roottoriin indusoitunut vaihtovirta että magnetointikoneen oikosulkuvirta ovat kulkeneet tyristorien kautta ja aiheuttaneet komponenttien tuhoutumisen. Muutosilmiön tasaannuttua napakäämiin indusoitunut vaihtovirta on vaimentunut nolnaan ja tyristorit ovat sammuneet roottoriin välikaapelin tarjotessa magnetointivirralla kulkureitin tyristorien ohi. Tällöin pääkone on magnetoitunut, mikä on nähtävissä kuvissa 1.9, 1.10 ja 1.11 loistehon vaiheisuuden muutoksena. Perimmäistä syytä staattoripuolen pitkään muutosilmiöön ei saatavilla olevien tietojen pohjalta voitu selvittää.

Syytä hiomakonemoottorin magnetoitumisen viivästymiseen voidaan arvioida vertaamalla kuvan 1.13 käyttöönottoajaksi luvussa 2 esitettyihin mittaustuloksiin. Käyttöönotossa mitatussa herätinkoneen magnetointivirrassa on nähtävissä samanlaista vaihtelua kuin mäntäkompressorimoottorin verkkokäynnistyskokeessa mitatussa magnetointivirrassa kuvassa 2.10. Voidaan siis olettaa, ettei hiomakonemoottorin napakäämivirta ollut vaimentunut nolnaan ennen magnetoinnin kytkentää. Magnetointivirran piikit johtuvat siitä, että automaattinen magnetoinninsäätö on lisännyt magnetointia magnetointikoneen joutuessa oikosulkuun tyristorien sytyttyä. Toisen virtapiikin jälkeen magnetointivirta on pysynyt suurena kahdeksan sekunnin ajan. Tänä aikana tyristorivirta on todennäköisesti vaimennut hiljalleen nolnaan kuten mäntäkompressorimoottorin (kuva 3.2) ja hiomakonemoottorin (kuva 3.4) datoilla tehdyissä SMT-simuloinneissa. Noin 17 sekunnin kuluttua käynnistyksen alusta

napakäämivirta on saavuttanut arvon nolla ja tyristorit ovat sammuneet välikaapelin tarjotessa magnetointivirralla vaihtoehtoisen kulkureitin tyristorien ohi. Tämä näkyy käyttöönottomittauksissa magnetointivirran laskuna.

Käynnistyshäiriön esiintyminen hiomakonemoottorissa roottorivaihdon jälkeen on seurausta tehdyistä käämitysmuutoksista. Uuden roottorin napakäämityksen käämikierrosmäärä on suurempi kuin vanhan, joten yhtälön (2) mukaisesti uuteen roottoriin indusoituu käynnistyksessä suurempia jännitteitä kuin vanhaan roottoriin indusoitui. Tyristorien sytyttimien kynnsjännitteen pysyessä ennallaan tyristorit syttyvät siten aiempaa kauemmin. Myös magnetointikonetta muutettiin roottorin vaihtamisen yhteydessä ja nimellismagnetointijännite kasvoi, jolloin roottorin kokonaisjännite magnetoinnin kytkennän jälkeen on entistä suurempi. Roottorijännite ei siis vanhassa roottorissa ollut tarpeeksi korkea sytyttämään tyristoreita magnetoinnin kytkennän jälkeen, mutta uudessa roottorissa näin oli.

Diplomityötä varten tehtyjen käynnistyssimulointien laskentaan käytetyistä ohjelmista SMT osoittautui käyttökelpoiseksi haluttaessa ennakoida tutkittua käynnistyshäiriötä. Se on havainnollisempi kuin FCSMEK, joka soveltuu lähinnä käynnistysenaikaisten jännite- ja virtatasojen sekä vääntömomenttikäyrän tarkasteluun.

LÄHTEET

ABB Oy. 2001. Käyttöönottopöytäkirjat. Ei yleisesti saatavilla.

ABB Oy. Motor Excitation Panel Functional Report. Ei yleisesti saatavilla.

ABB Oy. 2000. Teknisiä tietoja ja taulukoita. Vaasa. 626 s. ISBN 951-99366-0-2

Laurila, Ville. 1996. Tahtimoottorin käynnistys ja käynnistysarvojen vertailu. Helsinki, Helsingin teknillinen oppilaitos, Sähköosasto. Insinöörityö.

Mantere, Juhani. 2003. Sähköpostiviesti. Helsinki, ABB Oy Sähkökoneet.

Paavola, Martti & Lehtinen, Pekka. 1989. Sähkötekniikan oppikirja. Porvoo: WSOY:n graafiset laitokset. 427 s. ISBN 951-0-15903-4

Pyrhönen, Juha. 2001. Sähkökäytöt. Lappeenranta, Lappeenrannan teknillinen korkeakoulu, Sähkökäyttötekniikan laboratorio. Opetusmoniste.

Oy Strömberg Ab. 1979. Tahtimoottorin vääntömomentit ja niiden aiheuttamat akselimomentit. Ei yleisesti saatavilla.

Tekniikan käsikirja 3. 1968. 8. Uusittu ja lisätty painos. Jyväskylä: K.J. Gummerus osakeyhtiö. 792 s.

LIITE 1. Tahtimoottorin kokoonpanopiirustus

