

LAPPEENRANNAN-LAHDEN TEKNILLINEN YLIOPISTO LUT
LUT School of Energy Systems
Sähkötekniikan koulutusohjelma

Diplomityö

Janne J. Kinnunen

KAKSIKÄÄMIKONEEN ERILLISSÄÄTÖ

Työn tarkastajat: Professori Juha Pyrhönen, DI Mikko Kostainen

Työn ohjaaja: DI Mikko Kostainen

TIIVISTELMÄ

Lappeenrannan-Lahden teknillinen yliopisto LUT

LUT School of Energy Systems

Sähkötekniikan koulutusohjelma

Janne J. Kinnunen

Kaksikäämikoneen erillissäätö

Diplomityö

2020

84 sivua, 31 kuvaa, 5 taulukkoa

Tarkastajat: Professori Juha Pyrhönen, DI Mikko Kostiainen

Hakusanat: erillissäätö, kaksikäämikone, redundanttius, taajuusmuuttaja

Turvallisen toiminnan takaamiseksi sähköisten propulsiojärjestelmien tulee olla redundantteja. Kustannustehokas ja tilaa säästävä vaihtoehto on toteuttaa redundanttius monivaiheisen kaksikäämikoneen avulla. Siinä kahta galvaanisesti toisistaan erillään olevaa kolmivaiheista staattorikäämiryhmää ohjataan itsenäisillä taajuusmuuttajilla.

Työn tavoitteena oli tutkia virtaestimoidun erillissäädön soveltuvuutta kaksikäämikoneiden ohjaukseen. Erillissäädössä käytetään virtaestimaattia mitatun virran asemesta, eikä virtatietoja jaeta säätöjen kesken. Virtaestimaatilla saadaan poistettua säätöjen välinen haitallinen kytketyminen, joka on tyypillinen ongelma kaksikäämikonekäytöissä. Erillissäätö on edullinen ja helposti käyttöönotettava menetelmä, mutta sen käytöstä kaksikäämikoneiden ohjaukseen löytyy vain vähän tutkimustietoa.

Työn teoriaosuudessa tarkastellaan vaihtosähkö- ja kaksikäämikoneiden teoriaa, mallintamista ja säätömenetelmiä. Lisäksi esitellään erillissäädön käytöstä kaksikäämikoneiden ohjaukseen tähän mennessä saatua tutkimustietoa.

Työssä osoitettiin mittauksin virtaestimoidun erillissäädön toimivuus kaksikäämi-induktiokoneen ohjaukseen, koneen eri toiminta-alueilla. Toimivuus osoitettiin myös erillisillä syöttömoduuleilla ja erisuuruisilla DC-jännitteillä. Lisäksi osoitettiin, että erillissäädön ongelmana pidetty dynaamisen suorituskyvyn heikkeneminen saadaan poistettua virtaestimaatilla ja identifiointiajon jälkeen tehtävillä moottorimallia parantavilla parametrikorjauksilla.

ABSTRACT

Lappeenranta University of Technology
LUT School of Energy Systems
Electrical Engineering

Janne J. Kinnunen

A dual three-phase machine with separate control

Master's Thesis

2020

84 pages, 31 figures, 5 tables

Examiners: Professor Juha Pyrhönen, M.Sc. Mikko Kostainen

Keywords: separate control, dual three-phase machine, redundancy, frequency inverter

To ensure safe operation in ships and marine technology, redundancy in electric propulsion is needed. An effective way to achieve redundancy is to use a dual three-phase machine, in which two three-phase winding sets are galvanically isolated and supplied with two independent frequency converters.

The aim of this thesis was to study the usability of separate current control with dual three-phase machines. Instead of measured current, a current estimate is used in the separate control and there is no data sharing between the two separate converters. Cross-coupling between the converters is a common problem in dual three-phase machine drives and is mitigated by using the separate control with current estimation. The separate control is a cost-effective and easy method to build up, but there are few scientifically documented data available on this topic.

The theoretical part in this thesis consist of the theory, modelling and control methods of the alternating current- and dual three-phase machines. Available research data on the separate control are also shown.

The measurements showed that the separate control is a suitable method for controlling dual three-phase machines. Current estimation and manipulation of parameters after identification run is necessary to guarantee reliable operation in different operation points of the machine. This method also eliminates issues associated with a decrease of the dynamic performance in dual three-phase machines. It was also shown, that it is possible to use independent supply-converters to supply the motor inverters with different voltage levels without problems.

ALKUSANAT

Tämä diplomityö tehtiin ABB:n Drives-yksikölle. Suuri kiitos DI Mikko Kostiaiselle mielenkiintoisesta ja opettavaisesta aiheesta sekä asiantuntevasta ohjauksesta. Kiitos myös isolle joukolle ABB:n henkilökuntaa kaikesta avusta työn eri vaiheissa. Lisäksi kiitän professori Juha Pyrhöstä työn tarkastamisesta ja mielenkiinnosta työtäni kohtaan.

Erityiskiitos perheelleni ja muulle lähipiirille tuesta ja kärsivällisyydestä.

Helsingissä, 31.12.2019

Janne J. Kinnunen

SISÄLLYSLUETTELO

TIIVISTELMÄ	2
ABSTRACT	3
ALKUSANAT	4
SISÄLLYSLUETTELO	5
SYMBOLI- JA LYHENNELUETTELO	7
1 JOHDANTO	10
1.1 Työn tavoite ja rajaus.....	16
1.2 Työn sisältö.....	16
2 VAIHTOSÄHKÖKONEET	17
2.1 Tahtikoneet	17
2.2 Epätahtikoneet	18
2.3 Käämivuo ja induktanssit	19
2.4 Sähkökoneen toiminta-alueet	21
2.4.1 Vakiovuoalue ja kentän heikennys.....	22
2.5 Vaihtosähkökoneiden ohjaus- ja säätötavat.....	23
3 KAKSIKÄÄMIKONE	26
3.1.1 Kaksikäämikoneen kaksiakselimalli	27
3.1.2 Käämivuo- ja jänniteyhtälöt	27
3.1.3 Kaksikäämikoneiden sijaiskytkennät	31
4 KAKSIKÄÄMIKONEEN ERILLISSÄÄTÖ	34
4.1.1 Virtaestimaatti	36
4.1.2 Kaksikäämi-induktiokoneella suoritettut testit.....	38
5 TESTIJÄRJESTELYT JA MITTAUKSET	41

5.1	Kaksikäämi-induktiokone YY30-kytkennällä yhdellä syöttömoduulilla	41
5.1.1	Parametrikorjaukset.....	42
5.1.2	Suoritettut mittaukset ja niiden tulokset	49
5.2	Kaksikäämi-induktiokone YY30-kytkennällä kahdella syöttömoduulilla	50
5.2.1	Testien kuvaus	52
5.2.2	Suoritettut mittaukset ja niiden tulokset	54
5.2.3	Johtopäätökset testituloksista	78
6	YHTEENVETO	80
	LÄHTEET	82

SYMBOLI- JA LYHENNELUETTELO

Lihavoidut symbolit ovat vektoreita.

f	taajuus
i	virta
i_{est}	virtaestimaatti
\mathbf{i}_M	käänteis- Γ -sijaiskytkennän magnetointivirta
i_{2est}	kuormavirran estimaatti
k_w	käämityskerroin
L	induktanssi
L_d	hampaanpään hajainduktanssi
$L_{D\sigma}$	vaimennuskäämin hajainduktanssi
$L_{f\sigma}$	magnetointikäämin hajainduktanssi
L_{kd}	vaimennuskäämin ja magnetointikäämin välinen hajainduktanssi
L_m	magnetointi-induktanssi
L_M	käänteis- Γ -sijaiskytkennän magnetointi-induktanssi
L_{Mc}	magnetointi-induktanssi korjauskertoimella
L_{mid}	identifiointiajolla yhdelle kolmivaihekäämille saatu magnetointi-induktanssi
L_{sq}	vinoinduktanssi
L_{s1_2}	staattorikäämien keskinäisinduktanssi
$L_{s\sigma 1_2}$	staattorikäämien keskinäishajainduktanssi
L_{soid}	identifiointiajolla yhdelle kolmivaihekäämille saatu kokonaishajainduktanssi
L_u	uran hajainduktanssi
L_w	vyyhdenpään hajainduktanssi
L_δ	ilmavälin hajainduktanssi

L_{σ}	käänteis- Γ -sijaiskytkennän kokonaishajainduktanssi
$L_{\sigma c}$	kokonaishajainduktanssi korjauskertoimella korjattuna
$L_{r\sigma}$	roottorin hajainduktanssi
N	kierroslukumäärä
R_D	vaimennuskäämin resistanssi
R_f	magnetointikäämin resistanssi
R_R	käänteis- Γ -sijaiskytkennän roottoriresistanssi
R_{Rc}	roottoriresistanssi korjauskertoimella korjattuna
R_s	staattoriresistanssi
R_{Rid}	identifiointiajolla yhdelle kolmivaihekäämille saatu roottori-resistanssi
u_s	staattorijännite
θ	virtasumma
Λ	permeanssi
Φ	magneettivuo
Φ_m	päävuo
Φ_{σ}	hajavuo
Ψ	käämivuo
Ψ_R	käänteis- Γ -sijaiskytkennän roottorikäämivuo
Ψ_s	staattorikäämivuo
$\Psi_{s\sigma}$	staattorihajakäämivuo
$\Psi_{r\sigma}$	roottorihajakäämivuo
ω	määrittelemätön kulmanopeus
ω_s	sähköinen kulmataajuus
ω_r	roottorin sähköinen kulmanopeus
Ω_r	mekaaninen kulmataajuus

DFLC	Direct Flux Linkage Control	suora käämivuonsäätö
DOL	Direct Online	suoraan verkkoon kytkettävä
FOC	Field Oriented Control	kenttäorientoitunut vektoriohjaus
DTC	Direct Torque Control	suora vääntömomentin säätö
DTP	Dual Three-Phase modeling approach	kaksiakselimalli
FE	Finite Element	äärellisten elementtien menetelmä
PLC	Programmable Logic Controller	ohjelmoitava logiikka
PM	Permanent Magnet	kestomagneetti
PWM	Pulse Width Modulation	pulssinleveysmodulaatio
VSD	Vector Space Decomposition	vektoriavaruushajotelma

1 JOHDANTO

Sähkömoottorit kuluttavat noin puolet maapallolla tuotetusta sähköenergiasta ja osuuden enustetaan kasvavan. Kasvihuonepäästöjen vähentäminen on välttämätöntä ilmastonmuutoksen ehkäisemiseksi. Laivaliikenteen osuus maailman kokonaiskasvihuonepäästöistä on noin 2-3 prosenttia. Kansainvälinen merenkulkujärjestö on asettanut maailmanlaajuisiksi tavoitteeksi vuosittaisten kasvihuonepäästöjen vähentämisen vähintään 50 prosentilla vuoden 2008 tasosta vuoteen 2050 mennessä. Polttomoottoreiden korvaaminen osin sähkömoottoreilla ja sähkömoottorien tehokkuuden parantaminen on yksi keino vähentää kasvihuonepäästöjä. Samalla voidaan tavoitella muita terveys- ja ympäristöhyötyjä vähentämällä rikin ja typen oksidien sekä pienhiukkasten määrää.

Meriteollisuudessa erityyppiset alukset varustetaan yhä useammin sähköisellä propulsiojärjestelmällä. Turvallisen toiminnan takaamiseksi propulsiojärjestelmien tulee olla redundantteja. Propulsiojärjestelmien redundanttius voidaan toteuttaa monella tavalla. Kustannustehokas ja tilaa säästävä vaihtoehto on toteuttaa redundanttius monivaiheisella kaksikäämikoneella, jossa kahta galvaanisesti toisistaan erillään olevaa kolmivaiheista staattorikäämiryhmää ohjataan itsenäisillä taajuusmuuttajilla. Tällöin yhden tai useammankin vaiheen vikaantuessa turvallinen toiminta voi vielä jatkua, jos itse koneessa ei ole sellaista vikaa, joka johtaisi esimerkiksi ylikuumentumiseen ja sitä kautta eristysvikaan.

Monivaiheisia sähkökoneita on tutkittu ja kehitetty pitkään ja niiden ohjaukseen on kehitetty monia menetelmiä. Tarkat ohjaus- ja säätömenetelmät ovat olleet monimutkaisia ja ne ovat vaatineet paljon laskentatehoa. Monivaiheisella kaksikäämisähkötöineella tarkoitetaan sähkökoneetta, jossa on enemmän kuin kolme vaihetta. Monivaiheisella kaksikäämikoneella voidaan saavuttaa huomattavia etuja tavalliseen kolmivaihejärjestelmään verrattuna. Etuja ovat muun muassa (Karttunen et al., 2012):

- pienemmät vaihevirrät,
- pienempi vääntömomentin väre,
- parempi tehokkuus,
- pienemmät harmoniset komponentit DC-välipiirin virroissa,
- parempi staattorin virtasumman aaltomuoto,
- parempi järjestelmän toimintavarmuus.

Monivaihekoneita ehdotettiin ratkaisuksi katkaisijoiden rajallisen virrankestoisuuden takia jo 1920-luvulla (Kallio, 2014). Epäsymmetrinen kaksikäämikone (englanniksi asymmetrical tai split-phase machine) 30 sähköasteen vaihesiirrolla on yleisin vaihtoehto korkeaa tehoa vaativiin sovelluksiin (Levi et al., 2007), koska sillä saavutetaan parhaat vääntömomenttiominaisuudet. Epäsymmetrisiä kaksikäämikoneita, joissa käämiryhmällä on 30 sähköasteen vaihesiirto on tutkittu Kallion (2014) mukaan jo 1970-luvulta alkaen (Nelson ja Krause, 1974; Fuchs ja Rosenberg, 1974; Lipo, 1980; Schiferl ja Ong, 1983a; Zhao ja Lipo, 1995; Singh et al., 2005; Bojoi et al., 2006; Burzanowska et al., 2007; Andriallo et al., 2009; Barcaro et al., 2010; Tossaloro, 2010; Karttunen et al., 2012; Kallio, 2014). Niitä käytetään nykyään meriteollisuuden lisäksi ainakin tuulivoimajärjestelmissä ja muissa korkeaa tehoa vaativissa teollisuuden sovelluksissa.

Monivaiheisia kaksikäämikoneita on suhteellisen helppo valmistaa, mutta niiden ohjaus ja säätö on hankalampi toteuttaa verrattuna perinteiseen kolmivaihekoneeseen. Käämiryhmien välillä on vahva magneettinen kytkeytyminen varsinkin sellaisilla kaksikäämikoneilla, joiden käämiryhmiä voidaan käyttää erikseen. Niissä konetyypeissä molemmat käämitykset on jaettu tasaisesti koko staattorin yli. Käämiryhmien välistä magneettista kytkeytymistä tulee huomioida säädössä. Lisäksi taajuusmuuttajat aiheuttavat kytkentätransientteja kaksikäämikoneen eri järjestelmien välillä, ja niiden vaikutuksia on tyypillisesti pyritty ottamaan huomioon monimutkaisilla säädöillä.

Staattorikäämityksen käämitystavalla ja vaihesiirrolla on suuri vaikutus koneen ominaisuuksiin. Staattorikäämitys voidaan toteuttaa monella tavalla. Kaksikäämikoneita voidaan valmistaa joko symmetrisinä, jolloin staattorikäämeillä ei ole vaihesiirtoa tai epäsymmetrisinä, jolloin staattorikäämien välillä on vaihesiirto. Lisäksi staattorikäämitys voidaan toteuttaa jänteistettynä tai ilman. Jänteistys voidaan tehdä monella tapaa. Vaihesiirrolla ja jänteistyksellä on merkittävä vaikutus hajainduktansseihin ja magneettiseen kytkeytymiseen.

Symmetrisessä, jänteistämättömässä kaksikäämikoneessa molempien käämiryhmien vaiheet asettuvat samoihin uriin, jolloin magneettinen kytkeytyminen tapahtuu samassa ja vierekkäisessä urassa olevien käämien keskinäishajainduktanssien kautta ja on suurimmillaan. Symmetrisessä, jänteistetyssä kaksikäämikoneessa vain osa vaiheista asettuu samoihin uriin, jolloin magneettinen kytkeytyminen pienenee (Westerlund, 2015; Heinonen, 2018).

Epäsymmetrisessä, jäniteistämättömässä 30 sähköasteen vaihesiirrolla olevassa kaksikämmikoneessa saman kämmiryhmän vaiheet asettuvat omiin uriinsa, jolloin magneettinen kytketyminen on pienimmillään. 5/6-jäniteistyksellä kaikissa urissa on kummankin kämmiryhmän vaiheita, jolloin keskinäishajainduktanssin suhde staattorin hajainduktanssiin kasvaa merkittävästi eli magneettinen kytketyminen on suurimmillaan (Westerlund, 2015; Heinonen, 2018).

Olellaisimpia asioita kaksikämmikoneen mallintamisessa verrattuna perinteiseen kolmivaihekoneen malliin on keskinäisinduktanssien määrittäminen. Pienilläkin eroilla kämmiryhmien välillä on paljon vaikutusta kämmien väliseen kytketymiseen ja siten säädön toimintaan. Kirjallisuuden mukaan kaksikämmikoneelle on ainakin kolme mallintamistapaa:

- kaksikämmikoneen kaksiakselimalli (englanniksi dual three -phase modeling approach, DTP),
- vektoriavaruushajotelma (englanniksi vector space decomposition, VSD),
- kytkemätön D-Q malli (englanniksi decoupled D-Q model).

Kaksikämmikoneen ohjaukseen käytetään usein kaksikämmikoneen kaksiakselimalliin perustuvaa säätöä, jossa kämmiryhmiä syötetään erillisillä kolmivaiheisilla taajuusmuuttajilla ja virtatiedot jaetaan ohjaukskorttien kesken. Kaksikämmikoneen malli on laajennos perinteisen kolmivaihekoneen mallista. Nelson ja Krause (1974) käyttivät Park muunnosta monivaiheisen induktiokoneen mallintamiseen erikseen jokaiselle kämmiryhmälle. Fuchs ja Rosenberg (1974) käyttivät kahdesta Park-muunnosmatriisista koottua matriisia kahdella kolmivaihekämmiryhmällä varustetun kaksikämmikoneen mallintamiseen, ja tästä käytetään yleisesti nimitystä kaksiakselimalli. Kaksiakselimallia käytetään kuvaamaan koneen dynaamisia ilmiöitä. Siinä koneelle esitetään kaksi dynaamisen tilan sijaiskytkentää roottorikämmivuokoordinaatistossa, joka jaetaan pitkittäiskomponenttiin (d-akseli) ja poikittaiskomponenttiin (q-akseli). Pitkittäiskomponentti tuottaa koneen magneettivuon ja poikittaiskomponentti, joka on kohtisuorassa magneettivuota tuottavaa komponenttia vastaan vääntömomentin.

Toinen yleinen tapa on käyttää Zaon ja Lipon (1995) kehittämää vektoriavaruushajotelmaa mutta se vaatii yhteisen ohjauksen koko koneelle, jolloin järjestelmän redundanssi meneetetään. Vektoriavaruushajotelma muuntaa sopivalla 6×6 muunnosmatriisilla koneen alkuperäisen 6-ulotteisen vektoriavaruuden kolmeen 2-ulotteiseen aliavaruuteen, joista vain yksi

osallistuu sähkömekaaniseen energianmuuntoon. Vektoriavaruushajotelmalla saadaan laskennallisesti poistettua staattorikäämien välinen kytkeytyminen säädössä.

Kytkemätön D-Q malli käsittää kaksi erillistä d-q koordinaatistoa. Malli on johdettu etsimällä matriisi, joka diagonalisoi staattorin induktanssimatriisin. Tällöin induktanssit eivät ole riippuvaisia roottorin asennosta. Diagonalisointi vähentää parametrien määrää, ja sillä saadaan mahdollisimman yksinkertainen muoto sähkökoneen mallille. Mallissa on samoja elementtejä, kuin vektoriavaruushajotelmassa, kun staattorikäämeillä on 30 asteen vaihe siirto. Tällöin peruskomponentit ja harmoniset komponentit järjestysluvuilla 11, 13, 23, 25, jne. sijoitetaan yhteen koordinaatistoon ja harmoniset komponentit järjestysluvuilla 5, 7, 17, 19, jne. sijoitetaan toiseen koordinaatistoon. Konemallin parametrit määritetään äärellisten elementtien menetelmällä (englanniksi finite-element, FE) (Kallio, 2014).

Neljäs ja tässä tutkimuksessa käytetty vaihtoehto kaksikäämikoneen ohjaukseen on virtaestimoitu erillissäätö, jossa säätötapana käytetään vääntömomentin säätöön perustuvaa menetelmää. Erillissäädössä kaksikäämikone mallinnetaan perinteisen kolmivaihekoneen yhtälöillä, eikä käämiryhmien välistä kytkeytymistä oteta huomioon. Säädössä käytetään virtaestimaattia mitatun virran asemesta, eikä virtatietoja jaeta säätöjen kesken. Virtaestimaatin avulla saadaan poistettua säätöjen välinen kytkeytyminen. Vääntömomentti- ja vuoestimaattien laskemisessa käytetystä staattorivirran arvosta osa on mitattua, koska sillä saadaan poistettua estimaatin ryömiminen. Virtaestimaatin laskennan periaate on esitetty luvussa 4.1.1. Kaksikäämikoneen molempia kolmivaihekäämiryhmiä ohjataan omilla taajuusmuuttajilla perinteisen kolmivaihekoneen tavoin, jolloin taajuusmuuttajien säädöt eivät näe toisen käämiryhmän aiheuttamia kytkentätransienteja. Molemmat käämiryhmät näkevät yhteisen vuon ja tuottavat puolet koneen kokonaisvääntömomentista, jolloin kokonaisvääntömomenttiohje asetetaan puoliksi käämiryhmien kesken. Molemmat säädöt luovat itsenäisesti yhteistä vuota. Käämiryhmien välille jäävää kytkeytymistä voidaan lisäksi minimoida moottorimalliin identifiointiajon jälkeen tehtävillä parametrikorjauksilla, jolloin ohjauksen tarkkuus ja vakaus paranevat.

Kaksikäämikoneen ohjausta erillissäädöllä, jossa molempia käämiryhmiä ohjataan omilla taajuusmuuttajilla, on tutkittu vektorisäädöllä induktiomoottorilla (Singh et al., 2005) ja kes-

tomagneettimoottorilla (Karttunen et al., 2012). Eniten etuja saadaan, kun kaksikämmikoneen kaksi kolmivaihekäämiryhmää on kytketty siten, että niillä on 30 sähköasteen vaihesiirto. Tämä kytkentä poistaa ilmavälin harmoniset komponentit järjestysluvuilla $k = 6n \pm 1, n = 1, 3, 5 \dots$ ja siten poistuvat myös edellä mainittujen harmonisten komponenttien aiheuttamat kuparihäviöt ja niiden vaikutukset vääntömomenttiin.

Karttusen et al. (2012) tutkimusten mukaan kaksikämmikestomagneetikoneen ohjaus perinteisellä vektorisäädöllä itsenäisillä taajuusmuuttajilla ei aiheuta lisää harmonisia komponentteja verrattuna kolmivaiheisen kestomagneetikoneen ohjaukseen. Perinteinen vektorisäätö ei kuitenkaan mallinna käämiryhmien välistä magneettista kytkeytymistä, jolloin koneen dynaaminen suorituskyky kärsii. Tutkimuksessa selvisi, että huonompi dynaaminen suorituskyky johtuu vain käämiryhmien välisestä magneettisesta kytkeytymisestä. Sähkömagneettista vääntömomenttia ei myöskään voida arvioida tarkasti, koska tarkka tieto käämiryhmien välisen magneettisen kytkeytymisen induktansseista ja virroista puuttuu. Virtatasapaino käämiryhmien välillä kuitenkin säilyi, myös kentänheikennystilanteissa. Erillissäätöä käytettäessä magneettinen kytkeytyminen vaikuttaa vain koneen dynaamiseen käyttäytymiseen. Lisäksi molemmissa tutkimuksissa havaittiin, että virtatasapaino käämiryhmien välillä säilyi, jolloin järjestelmällä saavutetaan paras suorituskyky.

Kropsun (2019) tutkimuksessa havaittiin, että kaksikämmimoottorista mitatut 5. ja 7. yliaalto olivat suurempia verrattuna yhdellä taajuusmuuttajalla syötettyyn kolmivaihemoottoriin. Ne kuitenkin johtuivat moottorin rakenteesta, eikä kahden taajuusmuuttajan ohjaus itsessään lisää käämivirran matalataajuisia yliaaltoja.

Kaksikäämikoneiden ohjausta virtaestimoidulla erillissäädöllä itsenäisillä taajuusmuuttajilla on tutkittu kaksikäämi-induktiokoneella (Kropsu, 2019) ja kaksikäämi-kestomagneettitahtikoneella (Heinonen, 2018), joissa se osoittautui toimivaksi ratkaisuksi koneiden perustointi-alueilla.

Kaksikäämikoneen erillissäätö voidaan toteuttaa käyttämällä mitattua virtaa säädössä, jolloin mitattu staattorivirta sisältää käämiin syötetyn jännitteen tuottaman virran sekä toisesta käämiryhmästä indusoituneen värevirran. Tämän seurauksena taajuusmuuttajissa syntyy korkeataajuisia kytkentätransientteja, joista aiheutuu lisähäviöitä. Kun säädössä käytetään virtaestimaattia mitatun virran asemesta, niin taajuusmuuttajien säädöt näkevät vain itse syöttämänsä virran, eivätkä toisen käämiryhmän aiheuttamia kytkentätransientteja. Tällöin säätöjen välillä ei esiinny kytkeytymistä, eikä ylimääräisiä kytkentätransientteja pääse muodostumaan (Heinonen, 2018). Virtaestimoidun erillissäädön heikkoutena on pidetty dynamiikan heikkenemistä matalilla nopeuksilla, mikä johtuu käämiryhmien ristikkäistä kytkeytymistä kuvaavien termien puutteesta virtamallin vuoestimaatissa. Tätä voidaan minimoida huolellisella parametrien määrittelyllä. Virran estimoinnin virhe aiheuttaa virhettä myös vuoestimaattiin, mikä on haitallista erityisesti staattorin kautta magnetoitavissa induktiokoneissa ja synkronireluktanssikoneissa. Vuon estimoinnin virheellä ei ole yhtä suurta merkitystä tahtikoneissa ja kestromagneettitahtikoneissa, joissa magnetointi tapahtuu pääosin roottorin kautta. Koneen itsensä aiheuttamat matalataajuiset yliaallot lämmittävät konetta, minkä seurauksena myös resistanssit kasvavat ja syntyy lisää häviöitä. Käämiryhmien välisellä 30 sähköasteen vaihesiirrolla minimoidaan järjestysluvun kuusi vääntömomenttiväri ja saadaan paras ratkaisu jänteistämättömänä. Tällöin käämiryhmien välinen magneettinen kytkeytyminen on pienimmillään ja kytkentätaajuisia kytkentätransientteja rajoittava staattorin hajainduktanssi suurimmillaan (Heinonen, 2018).

1.1 Työn tavoite ja rajaus

Tämän tutkimuksen tavoitteena on osoittaa virtaestimoidun erillissäädön toimivuus ja käytettävyys, sekä sen käyttöön liittyvät rajoitteet kaksikäämikonekäyttöjen ohjaamiseen. Tavoitteena on mittauksin selvittää virtaestimoidun erillissäädön toimintaa erityisesti vika- ja muutostilanteissa, kuten käynnistysten ja pysäytysten yhteydessä, kvadrantin vaihdoissa, kentänheikennyksessä ja käämiryhmien sisäisten virta- ym. rajojen aktivoituessa. Kyseisissä tilanteissa moottoria syöttävät laitteet voivat siirtyä asetettuun tilaan eriaikaisesti. Tutkimuksessa testataan myös ratkaisua, jossa taajuusmuuttajia syötetään erillisillä syöttömoduuleilla ja erisuuruilla DC-jännitteillä. Lisäksi pyritään mittauksin osoittamaan, että Karttusen et al. (2012) havaitsema dynaamisen suorituskyvyn heikkeneminen kahden käämin ajossa kuormaiskuilla verrattuna yhden käämin ajoon kuormaiskuilla saadaan poistettua virtaestimaatilla ja magneettiseen kytkeytymiseen liittyvien parametrien huolellisella määrittelyllä. Tutkimus toteutetaan kirjallisuustutkimuksena ja käytännön mittauksin testipenkissä, jossa kahdella taajuusmuuttajalla syötettyä kaksikäämi-induktiokonetta ajetaan erityistilanteisiin käyttämällä apuna kuormakonetta. Virtaestimoitua erillissäätöä on jatkossa tarkoitus käyttää kaikilla relevanteilla sähkökonetyypeillä, minkä vuoksi teoreettinen tarkastelu on tässä työssä aloitettu tahtikoneen mallinnuksesta. Työn laajuuden takia käytännön mittauksissa keskitytään tässä tutkimuksessa vain kaksikäämi-induktiokoneeseen, joka on säädön kannalta haastavin sähkökonetyyppi. Käytännön laboratoriomittauksia on tarkoitus laajentaa tämän tutkimuksen jälkeen myös muihin kaksikäämikonetyyppeihin.

1.2 Työn sisältö

Luvussa 2 tarkastellaan vaihtosähkökoneiden teoriaa, toimintaa ja säätömenetelmiä. Luku 3 käsittelee kaksikäämikoneiden mallintamista. Luvussa 4 kuvataan kaksikäämikoneen erillissäätöä ja esitetään erillissäädetyllä kaksikäämi-induktiokoneella suoritettujen testien tulokset. Luku 5 käsittää kaksikäämikoneilla tässä tutkimuksessa tehtävät mittaukset tuloksineen ja luvussa 6 esitetään yhteenveto tutkimuksesta.

2 VAIHTOSÄHKÖKONEET

Vaihtosähkökoneiden toiminta perustuu staattorikäämityksen kehittämään pyörivään magneettikenttään. Vaihtosähkökoneet voidaan jakaa tahti- ja epätahtikoneisiin. Tahtikoneissa koneen pyörivä osa eli roottori pyörii samalla nopeudella kuin koneen staattorikäämityksen kehittämä pyörivä magneettikenttä. Epätahtikoneissa roottori pyörii hieman eri nopeudella, kuin koneen pyörivä perusaaltomagneettikenttä. Epätahtikoneet jaetaan oikosulku- ja liukurengaskoneisiin. Liukurengaskoneissa roottorin nopeutta voidaan muuttaa paljonkin aktiivisella ohjauksella. Tyypilliset maksimijättämäärät esim. tuulivoimaliukurengaskoneissa ovat suhdearvona ± 0.3 .

Vaihtosähkökone koostuu aktiivi- ja passiiviosista. Tärkeimmät aktiiviosat ovat staattorin ja roottorin käämitykset levypaketteineen. Muut koneen osat ovat passiivisia osia, joiden tehtävä on pitää aktiiviosat paikoillaan ja johtaa sähkömagneettinen energia koneeseen tai pois koneesta sekä välittää pyörivä liike moottorista työkoneeseen tai voimakoneesta generaattoriin.

Yleisimmät vaihtosähkökonetyypit ovat epätahtikoneisiin kuuluva kolmivaiheinen oikosulkumoottori ja tahtikone, joista molemmista löytyy lukuisia versioita. Kolmivaiheisten vaihtosähkökoneiden pyörivä magneettikenttä kehittyy koneissa sopivan magneettiipiirin, symmetrisen kolmivaihekäämityksen ja siinä kulkevan vaihtovirran avulla.

Tahtikoneissa staattori ja roottori rakennetaan samalle napapariluvulle. Epätahtikoneista vain liukurengaskone rakennetaan samalle napapariluvulle kuin staattori. Oikosulkumoottorissa häkkikäämi sen sijaan reagoi staattorin magnetointiin, jolloin roottorin navat muodostuvat automaattisesti.

2.1 Tahtikoneet

Tahtikone eroaa oikosulkumoottorista siten, että se tarvitsee erillisen tasavirralla synnytetävän magneettikentän eli vuon, joka roottorin mukana pyöriessään indusoi ankkurikäämiin tarvittavan päälähdejännitteen. Tahtikone voi olla joko vieras- tai kestmagnetoitu. Myös roottorin eri magneettiakselien reluktanssiero perustuva synkronireluktanssikone edustaa tahtikoneita. Tahtikoneissa roottori pyörii samassa tahdissa koneen sisäisen magneettikentän

kanssa. Sisäisen magneettikentän nopeuden määräävät syöttävän verkon taajuus ja koneen napapariluku. Tahtikoneet jaetaan roottorin rakenteen perusteella avonapaisiin ja umpinapaisiin tahtikoneisiin ja magnetoimismenetelmän perusteella harjallisiin ja harjattomiin tahtikoneisiin. Staattori ja roottori on rakennettava samalle napapariluvulle (Aura ja Tonteri, 1996).

Korkealaatuisten magneettisten materiaalien aiempaa paremman saatavuuden myötä kesto-
magneettitahtikoneet ovat yleistyneet. Kestomagneettitahtikoneiden roottoreissa on kesto-
magneetit, jotka magnetoivat koneen. Kestomagneettikone voidaan toteuttaa joko pintamagneeteilla, jolloin magneetit on liimattu roottorin pintaan tai uppomagneeteilla, jolloin ne ovat upotettuna roottoriin. Kestomagneettikoneita on käytetty tyypillisesti servomootoreissa mutta nykyään niitä käytetään myös megawattiluokan sovelluksissa, kuten suoravetoisissa tuuliturbiinigeneraattoreissa, koska ne toimivat hyvin myös pienillä nopeuksilla. Niiden käyttö lisääntyy myös sähköautoteollisuudessa. Kestomagneettimootoreilla ja -generaattoreilla päästään parempiin hyötysuhteisiin verrattuna muihin sähkökonetyyppeihin (Pyrhönen et al., 2016).

2.2 Epätahtikoneet

Epätahtikoneisiin kuuluvat oikosulkumoottorit ja liukurengasmoottorit. Kolmivaiheinen oikosulkumoottori on induktiomoottori. Se on yleisin moottorityyppi teollisuudessa sen rakenteen yksinkertaisuuden, toimintavarmuuden, vähäisen huollon tarpeen ja taloudellisuuden takia. Huonona puolena on suuri käynnistysvirta suorassa verkkokäynnistyksessä ja pääasiassa jättämästä aiheutuva alhainen hyötysuhde erityisesti pienillä nopeuksilla toimittaessa. Oikosulkumoottorin roottorin käämitys on yleensä toteutettu ns. häkkikäämityksenä, joka on sijoitettu roottorin uriin ja suljettu molemmista päistä oikosulkurenkaalla. Kun staattorikäämitykseen kytketään ulkoinen jännite, syntyy koneen ilmapäliin pyörivä magneettivuon. Pyörivän magneettivuon kenttäviivat leikkaavat roottorin häkkikäämityksen sauvoja, jolloin roottorin oikosuljettuihin virtapiireihin syntyy induktiovirtoja, ja ilmapäliivuo syntyy staattori- ja roottorivirtojen yhteisvaikutuksesta. Epätahtikoneiden roottorin ja magneettikentän välillä on nopeusero, jota kutsutaan jättämäksi. Induktio-
moottorissa jättämä on edellytys vääntömomentin aikaansaamiseksi. Koneen virrallisiin sauvoihin vaikuttaa vääntömomentti

Lorentzin voiman perusteella. Moottori alkaa pyöriä, kun sähköinen vääntömomentti on suurempi, kuin roottoria kuormittava vääntömomentti. Jättämä kasvaa kuorman vääntömomentin kasvaessa. Moottorin roottori pyörii hieman hitaammin kuin magneettikenttä ja sen nopeus poikkeaa siten hieman tahtinopeudesta (Pyrhönen et al., 2016).

2.3 Käämivuo ja induktanssit

Käämivuo ja induktanssit ovat tärkeitä suureita sähkötekniikassa. Tyypillisesti sähkökoneen toiminta perustuu käämien väliseen vuorovaikutukseen.

Amperen lain mukaan johtimessa kulkeva virta luo ympärilleen magneettivuon Φ . Käämivuo Ψ on tehollisten käämikierrosten $k_w N$ ja magneettivuon Φ tulo (Pyrhönen et al., 2013).

$$\Psi = k_w N \Phi = Li \quad (1)$$

Synnytettävä sähkömagneettiseen vääntömomentti on verrannollinen käämityskerroimeen k_w , joten sen tulisi olla mahdollisimman suuri. Käämityskerroin koostuu vyyhtikerroimesta, ryhmäkerroimesta ja urakerroimesta. Jos koneessa on pieni käämityskerroin, joudutaan käyttämään suurempaa virtaa tai lisäämään käämikierrosten määrää. Tällöin koneen hyötysuhde laskee (Salmi, 2004).

Permeanssi Λ kuvaa magneettista johtavuutta ja on magneettivuon ja virran synnyttämän virtasumman Θ osamäärä (Pyrhönen et al., 2013).

$$\Lambda = \frac{\Phi}{\Theta} = \frac{\Phi}{Ni} \quad (2)$$

Itseinduktanssi L ilmaisee, kuinka suuren käämivuon käämi synnyttää tietyllä virralla (Pyrhönen et al., 2013).

$$L = N \frac{\Phi}{i} = \frac{\Psi}{i} = N^2 \Lambda \quad (3)$$

Käämien välinen keskinäisinduktanssi L_{12} on käämin 1 käämivuon Ψ_{12} , jonka käämin 2 tuottama virta i_2 tuottaa ja käämin 2 tuottaman virran osamäärä (Pyrhönen et al., 2013).

$$L_{12} = \frac{\Psi_{12}}{i_2} \quad (4)$$

Pyörivissä sähkökoneissa syntyvä magneettivuo ei osallistu kokonaisuudessaan sähkömagneettiseen energianmuuntoon, vaan jakaantuu energianmuuntoon osallistuvaan päävuohon Φ_m ja hajavuohon Φ_σ , joka ei osallistu sähkömekaaniseen energianmuuntoon. Päävuo eli ilmavälivuo kytkee staattorin ja roottorin magneettisesti toisiinsa ja luo ilmaväliin käämivuon Ψ_m . Hajakäämivuot, jotka eivät pääosin läpäise ilmaväliä jakaantuvat staattorihajakäämivuohon $\Psi_{s\sigma}$ ja roottorihajakäämivuohon $\Psi_{r\sigma}$.

Ilmavälin magnetointi-induktanssista käytetään lyhennettä L_m ja hajakäämivuon induktanssista L_σ . Hajainduktanssi ei osallistu energian muuntoon, mutta sen synnyttämät induktanssit suodattavat virran yliaaltoja taajuusmuuttajakäytöissä (Pyrhönen et al., 2013).

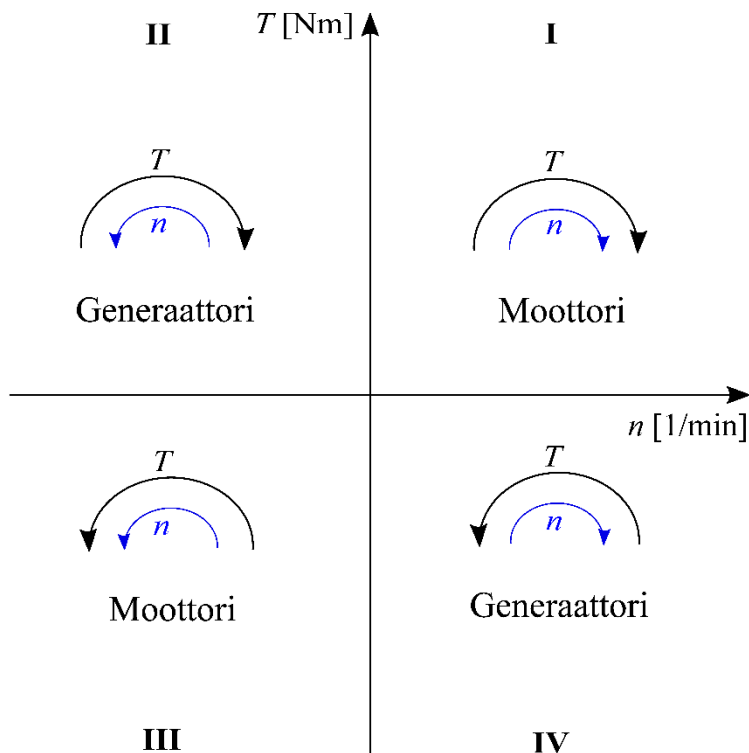
Sähkökoneen kokonaishajainduktanssi L_σ saadaan laskemalla yhteen kaikki hajainduktanssit, jotka jaetaan perinteisesti seuraavasti (Pyrhönen et al., 2013):

- ilmavälin hajainduktanssi L_δ (ylittää ilmavälin, mutta ei osallistu energianmuuntoon),
- uran hajainduktanssi L_u ,
- hampaanpään hajainduktanssi L_d ,
- vyyhdenpään hajainduktanssi L_w ,
- vinoinduktanssi L_{sq} .

$$L_\sigma = L_\delta + L_u + L_d + L_w + L_{sq} \quad (5)$$

2.4 Sähkökoneen toiminta-alueet

Sähkökoneiden käyttösovellukset voidaan jakaa kolmeen pääluokkaan nopeuden ja vääntömomentin mukaan. Yleisimpiä ovat yhden kvadrantin sovellukset. Tyypillisiä yhden kvadrantin sovelluksia ovat esimerkiksi pumput ja puhaltimet, joissa kuormitusvääntömomentti käyttäytyy neliöllisesti nopeuden funktiona tai generaattorikäytöt. Toisen pääluokan sovelluksissa vääntömomentin suunta vaihtelee, mutta pyörimissuunta pysyy vakiona. Tällöin sähköteho voi kulkea joko muuttajasta tai verkosta moottoriin tai moottorista muuttajaan tai verkkoon, jolloin moottori toimii generaattorina. Kolmas luokka koostuu neljän kvadrantin sovelluksista, joissa vääntömomentin ja nopeuden suunta voi vaihdella vapaasti. Näitä ovat esimerkiksi hissit ja nosturit. Kuva 1 havainnollistaa sähkökoneen toimintaa neljässä kvadrantissa, missä T kuvaa vääntömomenttia ja n pyörimisnopeutta.

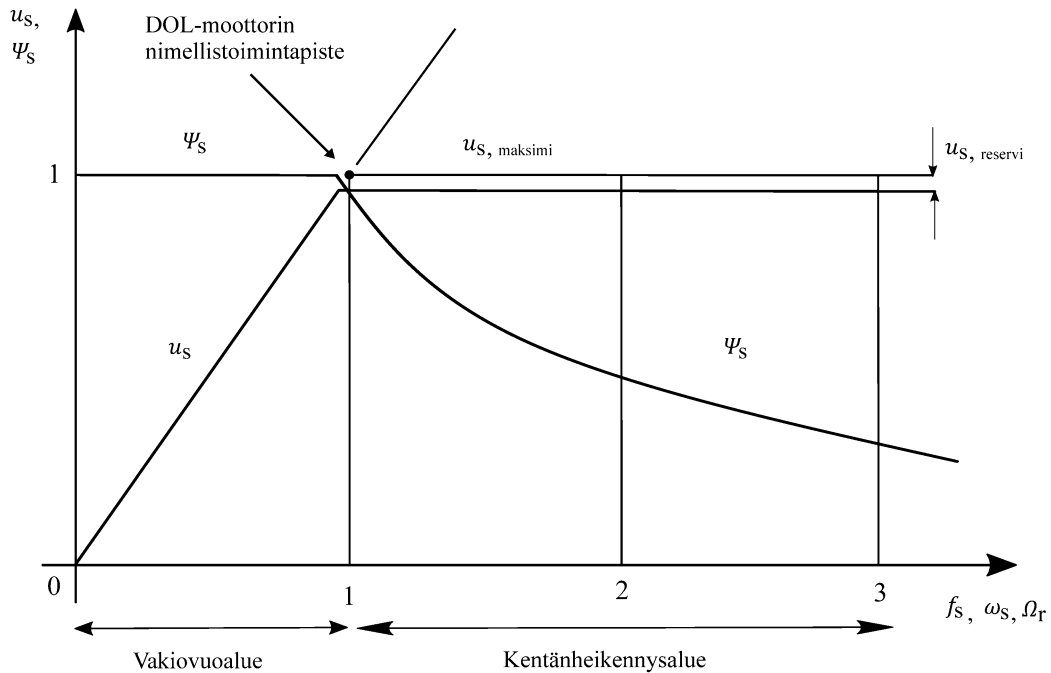


Kuva 1: Neljän kvadrantin toiminta. Nopeus ja vääntömomentti voivat muuttua maksimirajojen sisällä toisistaan riippumattomasti.

2.4.1 Vakiovoalue ja kentän heikennys

Teollisuuden sähkökäytöissä, esimerkiksi kaivoksilla ja tuulivoimalaitoksilla tarvitaan sähkökäyttöjä, joilla voidaan tuottaa korkeaa vääntömomenttia myös alhaisilla pyörimisnopeuksilla. Tämän johdosta kyseisillä koneilla voi olla melko alhainen nimellistoimintapiste, mutta niitä ajetaan myös huomattavasti nimellistoimintapistettä korkeammilla pyörimisnopeuksilla. Maksimipyörimisnopeus voi olla vaativissa käytöissä jopa yli kolminkertainen verrattuna nimellispöörinnopeuteen. Nimellinopeuden alapuolella vuo pysyy vakiona, mutta sen yläpuolella siirrytään kentänheikennykseen. Kentänheikennystä voidaan käyttää kaikissa sähkömoottoreissa, mutta kaikkien koneiden tapauksessa se ei ole helppoa (Pyrhönen et al., 2016).

Kuva 2 havainnollistaa suoraan sähköverkkoon kytkettävän moottorin (englanniksi direct on line, DOL) toimintaa staattorikämmivuon ja jännitteen taajuuden funktiona. u_s , reservi kuvaa jännitereserviä, joka tarvitaan vastaamaan äkillisiä muutoksia vääntömomentissa. Jännitereservi on tyypillisesti noin 5% - 10%. Faradayn lain mukaan sähkömoottorin indusoima jännite eli vastasähkömotorinen voima riippuu sähköisestä kulmataajuudesta ω_s ja staattorikämmivuosta Ψ_s . Staattorijännite on hieman suurempi, kuin indusoitunut jännite, johtuen staattoriresistanssin aiheuttamasta jännitehäviöstä. Kämmivuota joudutaan yleensä pienentämään, jottei käyttöjännitettä jouduta kasvattamaan liikaa. Vaaka-akselilla ovat taajuus f_s , sähköinen kulmataajuus ω_s tai mekaaninen kulmataajuus Ω_r . Pystyakselilla ovat staattorijännite u_s ja staattorikämmivuo Ψ_s . Vakiovoalueella annetaan jännitteen ja taajuuden kasvua samassa suhteessa, ja pidetään staattorikämmivuon itseisarvo vakiona. Nimellispisteen yläpuolella pienennetään kämmivuota kääntäen verrannollisena nopeuteen ja taajuuteen, jolloin saadaan jännite pysymään vakiona (Pyrhönen, 2006).



Kuva 2: Sähkökoneen toiminta-alueet (Muokattu lähteestä Pyrhönen et al., 2016)

2.5 Vaihtosähkökoneiden ohjaus- ja säätötavat

Sähkökoneiden ohjauksen ja säädön tavoitteena on roottoriasennon, nopeuden tai vääntömomentin kontrollointi sekä vuon pitäminen halutussa arvossa eri toimintatilanteissa. Jotkin vaihtosähkömoottorit, kuten induktio moottori ja vaimennuskäämillä varustettu tahtimoottori voidaan kytkeä suoraan sähköverkkoon (englanniksi direct on line, DOL). Tällöin ne toimivat kuorman mukaan ja kytketään tarvittaessa päälle tai pois päältä. DOL-induktiomoottorin nopeus riippuu syöttöjännitteen taajuudesta, moottorin napapariluvusta ja induktiokoneen tapauksessa hieman myös kuormasta.

Ensimmäiset ja yksinkertaisimmat vaihtosähkökoneiden säätömenetelmät perustuivat syöttöjännitteen ja taajuuden säätöön eli skalaarisäätöön, joka perustuu moottorin staattisen tilan tuntemiseen. Skalaarisäädössä ohjesuureina ovat moottorin taajuus, jännite ja niiden korjaukset virtamittauksilla. Taajuusmuuttajan lähtöjännitettä ohjataan U/f ominaiskäyrää pitkin. Syöttöjännitteen taajuutta säädetään taajuusmuuttajilla, joissa käytetään pulssinleveysmodulaatiota (englanniksi pulse width modulation, PWM). Skalaarisäädössä voidaan

käyttää PI-säädintä pyörimisnopeuden säätöön, mutta vääntömomenttia ei voida säätää tarkasti skalaarisäädöllä varsinkaan muutostilanteissa, joissa koneen magnetointitila muuttuu. Skalaarisäätö ei siten sovi säätötavaksi sähkökäyttöihin, joissa tapahtuu nopeita vääntömomentin muutoksia, ja säädöltä vaaditaan siten hyvää dynaamista suorituskykyä. Skalaarisäätöä käytetään nykyisin lähinnä pumppujen ja puhaltimien ohjauksessa (Pyrhönen et al., 2016).

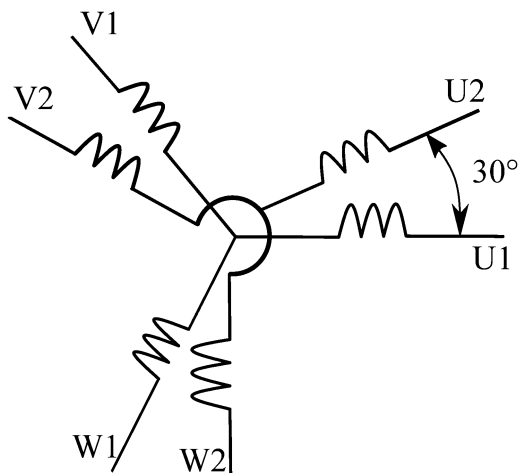
Kovács ja Rácz kehittivät 1950-luvulla DOL-moottoreiden muutostilanteiden mallintamiseen avaruusvektoriteorian, jossa moottorin virrat, vuot ja jännitteet esitetään avaruusvektoreina. Saksalainen insinööri Felix Blaschke kehitti avaruusvektoriteorian pohjalta vektorisäädön (saksaksi transvektorcontrol) työskennellessään Siemensillä 1970-luvun alkupuolella. Vektorisäädössä sähkökoneen magneettista tilaa ja vääntömomenttia kontrolloidaan erikseen. Sen käyttö yleistyi 1980-luvulla sulautettujen tietokoneiden laskentatehon kasvaessa. Vektorisäädössä koneen magnetointia ja vääntömomenttia voidaan säätää erikseen. Vektorisäätö sisältää moottorimallin, joka perustuu moottorin kaksiakselimallin sijaiskytkentään. Oikosulkukoneen tapauksessa sijaiskytkentä on usein kiinnitetty roottorikämmivuokoordinaatistoon. Mitattu virta jaetaan pitkittäiseen, roottorikämmivuon suuntaiseen (d-akseli) ja poikittaiseen (q-akseli) komponenttiin. Pitkittäiskomponentti tuottaa koneen magneettivuon ja poikittaiskomponentti, joka on kohtisuorassa magneettivuota tuottavaa komponenttia vastaan vääntömomentin. Jos koneessa on reluktanssieroja tai sen roottorilla yksi vaiheinen magnetointikämmi tai kestopagneetit, on kone kätevimmin mallinnettava roottoriin sidotussa koordinaatistossa, jolloin myös anisotrooppisen koneen induktansseja voidaan käsitellä vakioina.

Saksassa (Depenbrock, 1985) ja Japanissa (Takahashi ja Noguchi, 1986) kehittivät lähes samaan aikaan uuden avaruusvektoriteoriaan perustuvan säätömenetelmän. Säätömenetelmän periaatteena on kontrolloida staattorin kämmivuota suoraan staattorin jännitevektorin avulla. Siitä käytetään nimitystä suora kämmivuonsäätö (englanniksi direct flux linkage control, DFLC). Ensimmäinen teolliseen käyttöön tarkoitettu sovellus kehitettiin professori Harmoisen johdolla ABB:lla ja se julkaistiin vuonna 1995. Sovellus perustui uuteen säätömenetelmään ja digitaaliseen signaalin käsittelyyn. Säätömenetelmästä käytetään nimitystä suora vääntömomentin säätö (englanniksi direct torque control, DTC) (Kaukonen, 1999).

Suoraa käämivuon säätöä ja suoraa vääntömomentin säätöä tai kenttäorientoitunutta vektori-ohjausta (englanniksi field oriented control, FOC) käytetään vaativimmissa sovelluksissa, joissa tarvitaan tarkkaa vääntömomentin säätöä. Nykyiset vaihtosähkökoneiden perusvektorisäätömenetelmät ovat joko FOC tai DTC. Klassisen DTC-säädön tärkeimmät osat ovat suora käämivuon ja vääntömomentin hystereesisäätö, optimaalinen kytkentälogiikka ja adaptiivinen moottorimalli (Pyrhönen, 2006; Pyrhönen et al., 2016).

3 KAKSIKÄÄMIKONE

Kaksikäämikoneella (englanniksi dual-stator winding, double-star tai dual three-phase machine) tarkoitetaan tässä työssä kuusivaiheista tai kaksi kertaa kolmivaiheista konetta, jossa on kaksi rinnakkaista kolmivaiheista staattorikämiryhmää, jotka ovat galvaanisesti erillään toisistaan, mutta joiden magneettiakselit ovat yhtenevät. Nämä käyttäytyvät lähes samalla tavalla, kuin kaksi moottoria, joilla on yhteinen akseli. Samalle staattorille asennetut käämit alkavat muodostaa ja käyttää yhteistä vuota. Kuva 3 esittää epäsymmetristä kaksikäämikonetta, jossa kämiryhmien välillä on 30 sähköasteen vaihesiirto.



Kuva 3: Epäsymmetrisen kaksikäämikoneen staattorikämiä aseteltä 30 sähköasteen vaihesiirrolla

3.1.1 Kaksikämmikoneen kaksiakselimalli

Kaksikämmikoneen matemaattinen malli voidaan johtaa lähes samalla tavalla kuin perinteinen kolmivaihekoneen malli. Perinteiseen kolmivaihekoneen malliin verrattuna kaksikämmikoneen malli sisältää lisäksi käämien välisen keskinäishajainduktanssin.

Tähtikytkentäinen kaksikämmikone voidaan mallintaa kahdella d-q -koordinaatistolla (Kuva 4), jolloin molemmille käämiryhmille esitetään omat käämivuo- ja jänniteyhtälöt roottori-koordinaatistossa. Käämiryhmät oletetaan identtisiksi.

3.1.2 Käämivuo- ja jänniteyhtälöt

Käämivuo- ja jänniteyhtälöt voidaan esittää roottorikoordinaatistossa. Alkuoletuksena on tasainen ilmaväli ja sinimuotoinen virtakate. Magneettinen kyllästyminen, resistanssien muutokset ja rautahäviöt jätetään periaatteessa huomiotta, mutta koneen sijaiskytkennän parametreja päivitetään käytön aikana.

Käämivuon pitkittäis- ja poikittaismatriisit kaksikämmiähtikoneelle voidaan esittää esimerkiksi Burzanowska et al. (2007) mukaan seuraavasti:

$$\begin{bmatrix} \Psi_{sd1} \\ \Psi_{sd2} \\ \Psi_D \\ \Psi_f \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} L_{sd1} & L_{sd1_2} & L_{md} & L_{md} \\ L_{sd1_2} & L_{sd2} & L_{md} & L_{md} \\ L_{md} & L_{md} & L_D & L_{fD} \\ L_{md} & L_{md} & L_{fD} & L_f \end{bmatrix} \begin{bmatrix} i_{d1} \\ i_{d2} \\ i_D \\ i_f \end{bmatrix} \quad (6)$$

$$\begin{bmatrix} \Psi_{sq1} \\ \Psi_{sq2} \\ \Psi_Q \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} L_{sq1} & L_{sq1_2} & L_{mq} \\ L_{sq1_2} & L_{sq2} & L_{mq} \\ L_{mq} & L_{mq} & L_Q \end{bmatrix} \begin{bmatrix} i_{q1} \\ i_{q2} \\ i_Q \end{bmatrix} \quad (7)$$

$$L_{sd1} = L_{md} + L_{s\sigma 1} + L_{s\sigma 1_2} \quad (8)$$

$$L_{sd2} = L_{md} + L_{s\sigma 2} + L_{s\sigma 1_2} \quad (9)$$

$$L_{sq1} = L_{mq} + L_{s\sigma 1} + L_{s\sigma 1_2} \quad (10)$$

$$L_{sq2} = L_{mq} + L_{s\sigma 2} + L_{s\sigma 1_2} \quad (11)$$

$$(L_{sd1} = L_{sd2}, L_{sq1} = L_{sq2})$$

$$L_{sd1_2} = L_{md} + L_{s\sigma1_2} \quad (12)$$

$$L_{sq1_2} = L_{mq} + L_{s\sigma1_2} \quad (13)$$

$$L_Q = L_{mq} + L_{Q\sigma} \quad (14)$$

$$L_D = L_{md} + L_{D\sigma} + L_{kd} \quad (15)$$

$$L_f = L_{md} + L_{f\sigma} + L_{kd} \quad (16)$$

$$L_{fD} = L_{md} + L_{kd} \quad (17)$$

Pitkittäissuunta (d-akseli):

L_{md} : magnetointi-induktanssi

L_{sd1_2} : keskinäisinduktanssi

$L_{D\sigma}$: vaimennuskäämin hajainduktanssi

$L_{f\sigma}$: magnetointikäämin hajainduktanssi

L_{kd} : vaimennuskäämin ja magnetointikäämin välinen keskinäishajainduktanssi (Canay-induktanssi)

Canay-induktanssi jätetään usein pois yhtälöistä sen vähäisen vaikutuksen takia.

Poikittaissuunta (q-akseli):

L_{mq} : magnetointi-induktanssi

L_{sq1_2} : keskinäisinduktanssi

$L_{Q\sigma}$: vaimennuskäämin hajainduktanssi

Molemmat akselit:

$L_{s\sigma1}$: ensimmäisen staattorikäämin hajainduktanssi

$L_{s\sigma2}$: toisen staattorikäämin hajainduktanssi

$L_{s\sigma 1,2}$: ensimmäisen ja toisen staattorikäänin keskinäishajainduktanssi

R_s : staattori-resistanssi

R_f : magnetointikäänin resistanssi

R_D : pitkittäissuunnan vaimennuskäänin resistanssi

R_Q : poikittaissuunnan vaimennuskäänin resistanssi

ω : määrittelemätön kulmanopeus

ω_r : roottorin sähköinen kulmanopeus

Virtojen pitkittäis- ja poikittaiskomponentit voidaan laskea pitkittäis- ja poikittaissuuntien induktanssien käänteismatriisien ja vuokomponenttien avulla:

$$\begin{bmatrix} i_{d1} \\ i_{d2} \\ i_D \\ i_f \end{bmatrix} = [L_d]^{-1} \begin{bmatrix} \Psi_{sd1} \\ \Psi_{sd2} \\ \Psi_D \\ \Psi_f \end{bmatrix} \quad (18)$$

$$\begin{bmatrix} i_{q1} \\ i_{q2} \\ i_Q \end{bmatrix} = [L_q]^{-1} \begin{bmatrix} \Psi_{sq1} \\ \Psi_{sq2} \\ \Psi_Q \end{bmatrix} \quad (19)$$

Jänniteyhtälöt pitkittäis- ja poikittaissuunnassa roottorikoordinaatistossa esitettynä:

$$u_{d1} = R_s i_{d1} + \frac{d\Psi_{sd1}}{dt} - \omega_r \Psi_{sq1} \quad (20)$$

$$u_{d2} = R_s i_{d2} + \frac{d\Psi_{sd2}}{dt} - \omega_r \Psi_{sq2} \quad (21)$$

$$u_{q1} = R_s i_{q1} + \frac{d\psi_{sq1}}{dt} + \omega_r \Psi_{sd1} \quad (22)$$

$$u_{q2} = R_s i_{q2} + \frac{d\psi_{sq2}}{dt} + \omega_r \Psi_{sd2} \quad (23)$$

Vaimennuskäämin jänniteyhtälöt:

$$u_D = 0 = R_D i_D + \frac{d\psi_D}{dt} \quad (24)$$

$$u_Q = 0 = R_Q i_Q + \frac{d\psi_Q}{dt} \quad (25)$$

Magnetointijännite:

$$u_f = R_f i_f + \frac{d\psi_f}{dt} \quad (26)$$

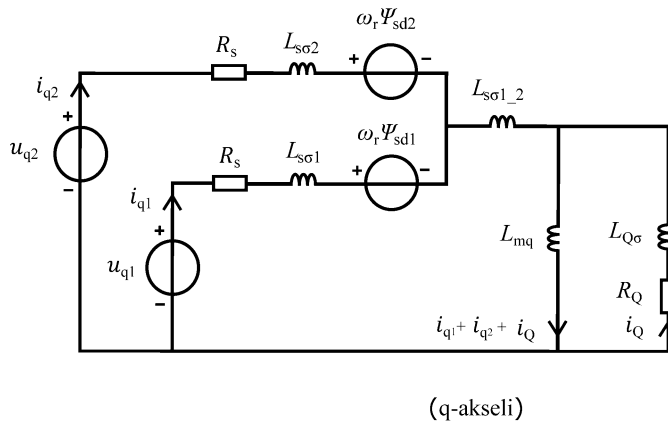
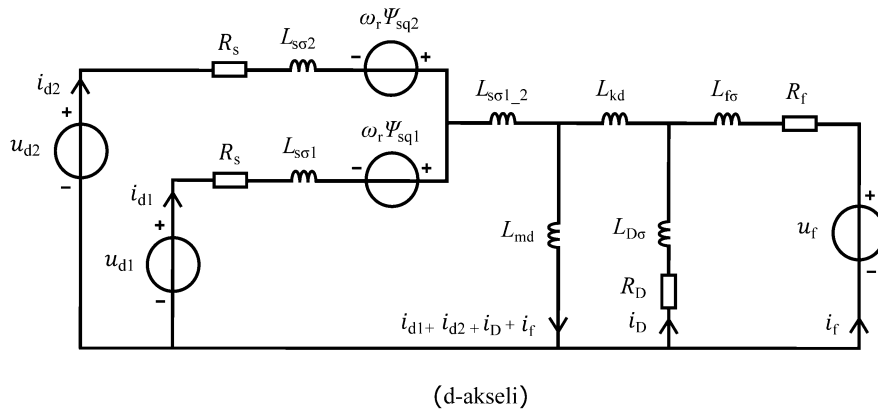
Sähköinen vääntömomentti:

$$T_e = \frac{3}{2} p (\Psi_{sd1} i_{q1} - \Psi_{sq1} i_{d1} + \Psi_{sd2} i_{q2} - \Psi_{sq2} i_{d2}) \quad (27)$$

Vuomatriiseista saadaan yksinkertaistamalla muiden konetyyppien yhtälöt. Induktiokoneen yhtälöt saadaan poistamalla rivi Ψ_f , korvaamalla vaimennuskäämin induktanssit häkkipäämi-induktansseilla ja asettamalla d- ja q- suunnan suureet samansuuruisiksi.

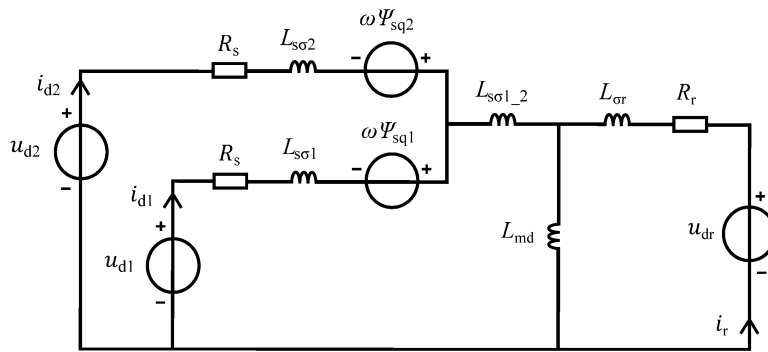
3.1.3 Kaksikäämikoneiden sijaiskytkennät

Kuvassa 4 on esitetty kaksikäämitahtikoneen käänvivo- ja jänniteyhtälöiden mukainen sijaiskytkentä. Malli pätee myös käänjärjestelmille, joissa on sekä fyysinen että sähköinen vaihesiirto.

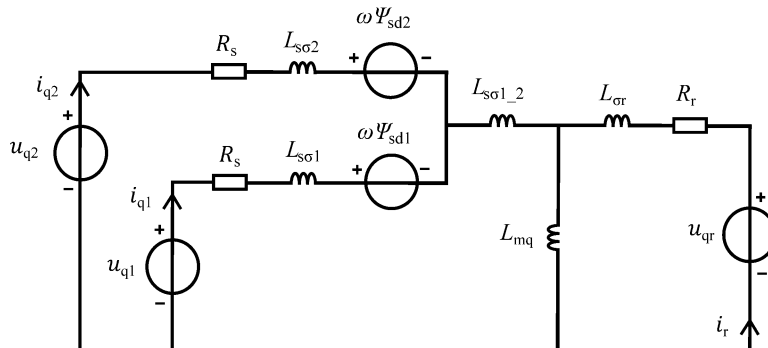


Kuva 4: Kaksikäämitahtikoneen dynaamisen tilan avaruusvektorisijaiskytkennän komponentit d- ja q-akselille roottorikoordinaatistossa, missä ω_r on roottorin sähköinen kulmanopeus

Muiden vaihtosähkökonetyyppien yhtälöt ja sijaiskytkennät voidaan johtaa vierasmagne-
toidun kaksikäämitahtikoneen yhtälöistä. Kaksikäämi-induktiokoneen sijaiskytkentä (Kuva
5) saadaan korvaamalla vaimennuskäämin induktanssit L_D ja L_Q häkkikäämin induktans-
seilla ja poistamalla puuttuvaan napakäämiin liittyvät hajainduktanssit L_{kd} ja $L_{f\sigma}$.



(d-akseli)



(q-akseli)

Kuva 5: Kaksikäämi-induktiokoneen dynaamisen tilan avaruusvektorisijaiskytkennän kom-
ponentit d- ja q-akselille yleisessä, kulmanopeudella ω pyörivässä koordinaatistossa

Kaksikäämikestomagneettikoneen yhtälöissä kestopagneetit voidaan Kallio et al., (2013) mukaan esittää virtalähteenä (Kuva 6), jolloin roottorin kestopagneettien luoma käämivuo,

$$\Psi_{PM} = L_{md} i_{PM}. \quad (28)$$

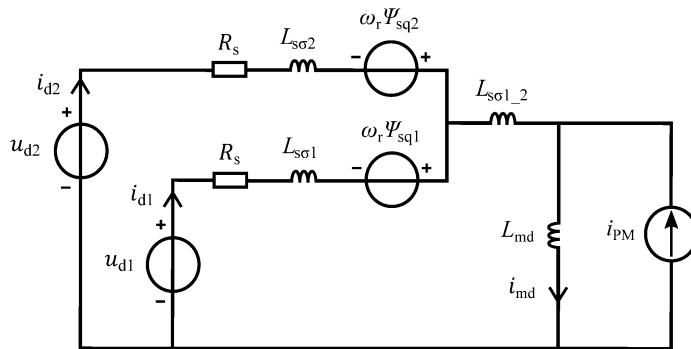
Ilman vaimennuskäämiä vuoyhtälöt saadaan muotoon:

$$\Psi_{sd1} = L_{sd1} i_{d1} + L_{sd1,2} i_{d2} + \Psi_{PM} \quad (29)$$

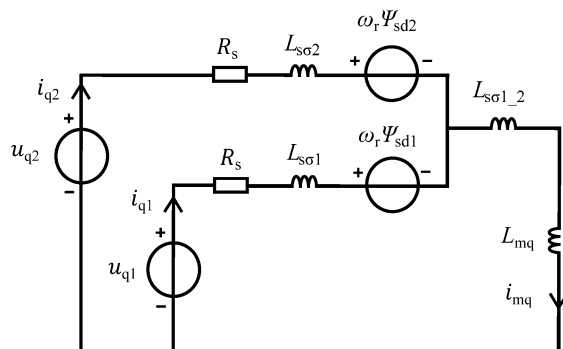
$$\Psi_{sq1} = L_{sq1} i_{q1} + L_{sq1,2} i_{q2} \quad (30)$$

$$\Psi_{sd2} = L_{sd2} i_{d2} + L_{sd1,2} i_{d1} + \Psi_{PM} \quad (31)$$

$$\Psi_{sq2} = L_{sq2} i_{q2} + L_{sq1,2} i_{q1} \quad (32)$$



(d-akseli)



(q-akseli)

Kuva 6: Kaksikäämikestomagneettikoneen dynaamisen tilan avaruusvektorisijaiskytkennän komponentit d- ja q-akselille roottorikoordinaatistossa, missä ω_r on roottorin sähköinen kulmanopeus

4 KAKSIKÄÄMIKONEEN ERILLISSÄÄTÖ

Kaksikäämikoneen erillissäädössä molemmat käämiryhmät mallinnetaan perinteisillä kolmivaihekoneen yhtälöillä ja molempia käämiryhmiä ohjataan itsenäisesti omilla taajuusmuuttajilla. Tässä tutkimuksessa käytetään kaksikäämikonetta, jonka staattorikäämin kahden eri järjestelmän välissä joko ei ole vaihesiirtoa tai on 30 sähköasteen paikallinen vaihesiirto. Kaksikäämikoneen ohjaus tapahtuu vääntömomenttiohjeella, joka jaetaan puoliksi säätöjen kesken. Molemmat käämiryhmät tuottavat puolet koneen kokonaisvääntömomentista ja näkevät yhteisen vuon. Kuvassa 7 on esitetty kaksikäämikoneen erillissäädön periaate tahtikoneelle ja kuvassa 8 moottorimalli. Alaindeksillä 1 viitataan käyttöön 1 ja alaindeksillä 2 käyttöön 2.

Ψ_{ohje} : yhteinen vuo-ohje

T_{ohje} : kokonaisvääntömomenttiohje

d, q : roottorikoordinaatiston pitkittäis- ja poikittaishkomponentti

α, β : staattorikoordinaatiston pitkittäis- ja poikittaishkomponentti

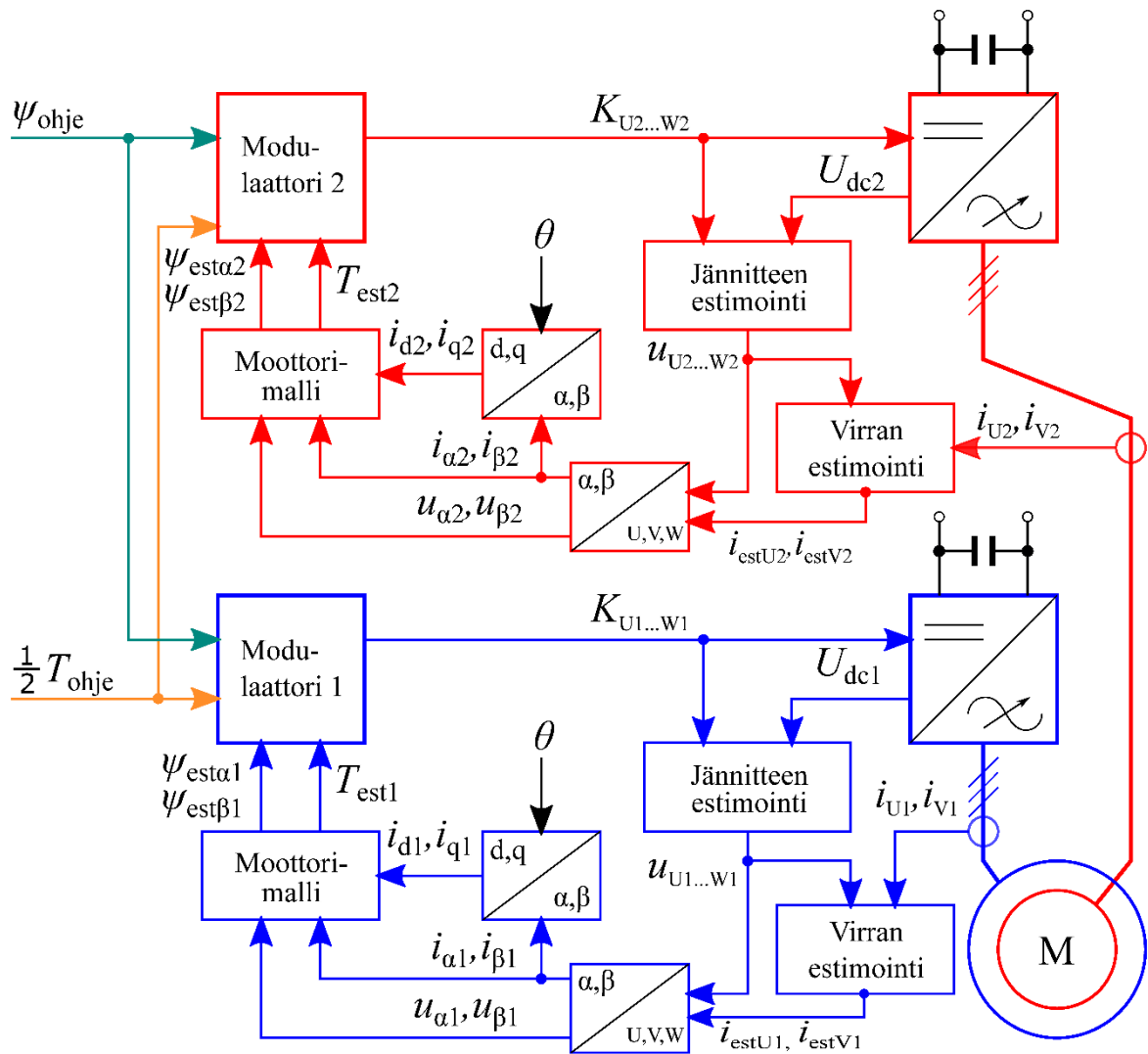
i_{U1}, i_{V1} : mitatut staattorivaihevirit

$i_{\text{est}U1}, i_{\text{est}V1}$: estimoidut staattorivaihevirit

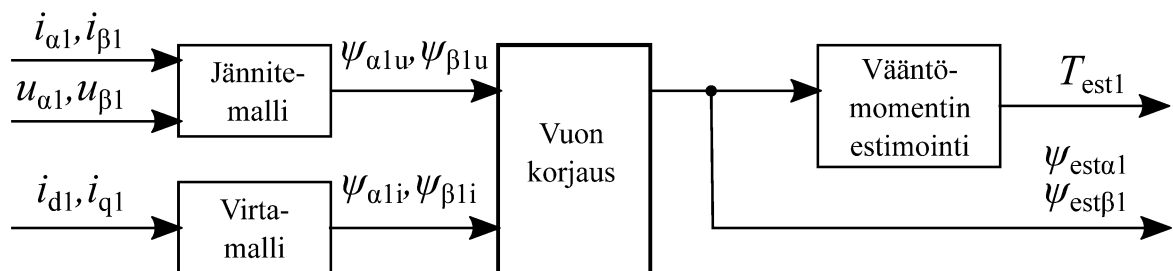
u_{U1}, u_{W1} : estimoidut vaihejännitteet

$K_{U1...W1}$: kytkinohjeet

θ : roottorin kulma, joka voidaan mitata kulma-anturilla tai laskea (tässä työssä käytetyssä laitteessa kulma lasketaan nopeusanturin tiedosta)



Kuva 7: Kaksikäämikoneen erillissäädön lohkokkaavio (Muokattu lähteestä Heinonen, 2018)



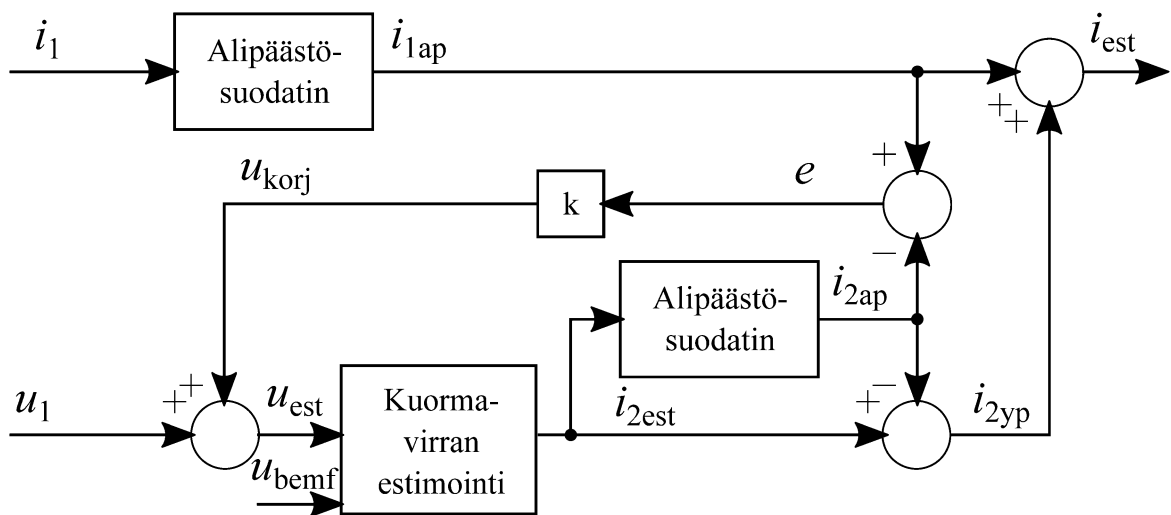
Kuva 8: Erillissäädön moottorimalli (Muokattu lähteestä Heinonen 2018)

Klassisessa suorassa vääntömomentin säädössä käytetään pääosin jännitemallia, joka toimii hyvin nimellinopeuden ympäristössä, mutta pienillä nopeuksilla käämivuoestimaatti vääristyy staattoriresistanssin jännitehäviön vuoksi ja sen korjaamiseen voidaan käyttää virtamallia.

4.1.1 Virtaestimaatti

Virtasäädetyssä erillissäädössä ei jaeta virtatietoja taajuusmuuttajien säätöjen kesken, vaan kummankin muuttajan säädössä käytetään omaa virtaestimaattia suoraan mitatun virran asemesta. Siten voidaan poistaa säätöjen välinen kytkeytyminen ilman tietojen jakoa taajuusmuuttajien kesken. Virran estimointi voidaan toteuttaa eri tavoin, ja tässä esitetään yksi menetelmä. Tässä työssä käytetty menetelmä poikkeaa jonkin verran tässä esitetystä, mutta perusidea on sama.

Shroderus ja Heikkilä (2001) patentoivat menetelmän moottorin virran hetkellisarvon estimointiin, ja sen periaate on esitetty kuvassa 9.



Kuva 9: Virran estimoinnin periaate (Muokattu lähteestä Heinonen 2018)

Kuvassa 9 moottorivirrasta mitataan virta-arvo i_1 , joka alipäästösuodatetaan. Näin poistetaan sekä muuttajan itsensä että naapuritaajuusmuuttajan aiheuttamat häiritsevät kytkentäilmiöt

virtatiedosta. Tämä virta ei kuitenkaan kelpaa säädön perustaksi, vaan virtaan luodaan matemaattisesti muuttajan kytkennöistä aiheutuva osuus i_{2yp} .

Kuvassa virtaa i_{2est} kutsutaan kuormavirraksi. Se on estimoitu muuttajan syöttämä kuorma-
virta, joka voidaan laskea staattori- ja roottorivuon avulla tai koneen syöttöjännitteen ja tie-
dossa olevan kuorman impedanssin L avulla. Impedanssin arvoa voidaan päivittää tai se voi-
daan määrittää kerran. Induktiokoneella virta voidaan laskea esimerkiksi

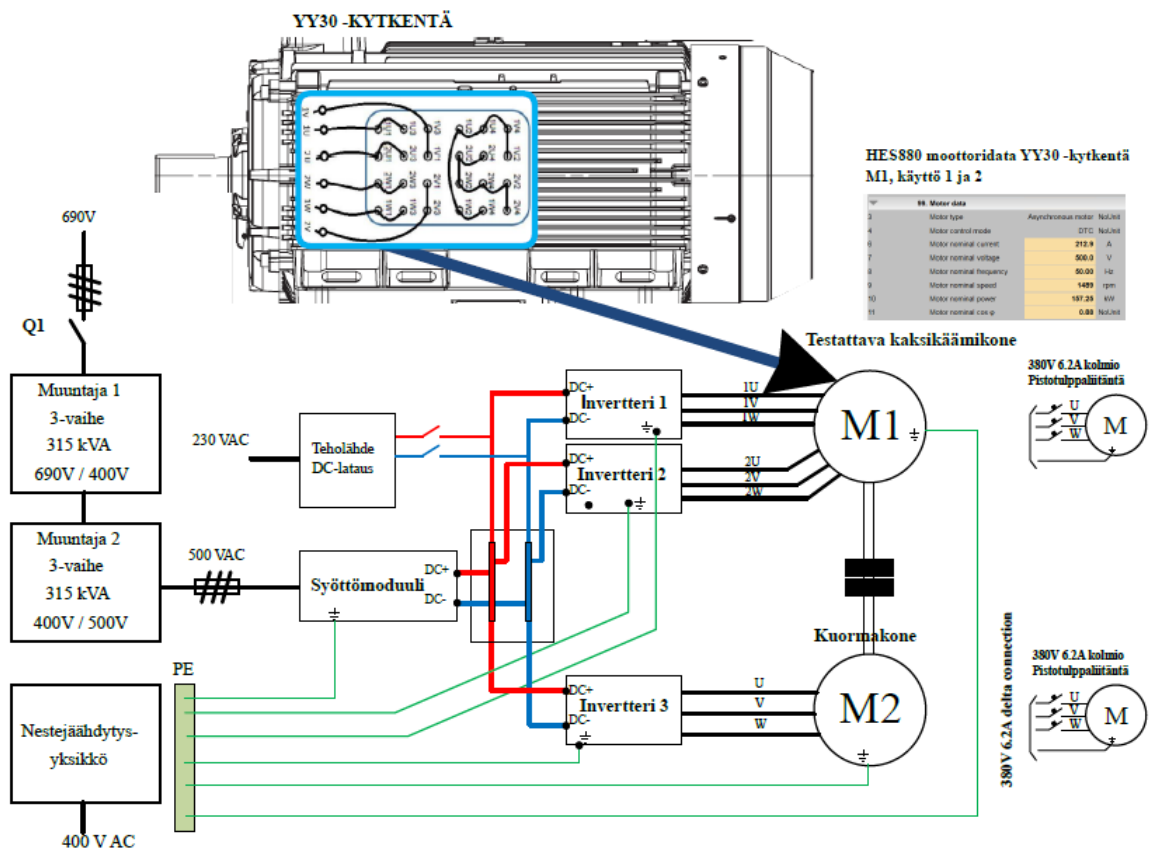
$$i_{2est}(t) = i_{2est}(t_0) + \frac{1}{L} \int_{t_0}^t (u_{est}(t) - u_{bemf}(t)) dt, \quad (33)$$

missä $i_{2est}(t_0)$ on kuormavirran estimaatin edellinen arvo ja $u_{est}(t)$ on muuttajan antamasta
syöttöjännitteestä sekä korjaustermistä u_{korj} lasketun jännite-estimaatin hetkellisarvo. u_{bemf}
on vastasähkömotorinen voima, joka on induktiokoneella roottorikäänivuo kertaa perusaal-
lon kulmanopeus. L on induktiokoneen tapauksessa transientti-induktanssi. Tahtikoneella
esitetty yhtälö ei suoraan päde, koska tarvitaan omat yhtälöt ja induktanssit pitkittäis- ja poi-
kittaissuunnalle.

Myös i_{2est} alipäästösuodatetaan ja saatua arvoa i_{2ap} verrataan mitattuun ja alipäästösuodatet-
tuun moottorin virta-arvoon i_{1ap} . Lasketaan virhetermi $e = i_{1ap} - i_{2ap}$. Virhe e vahvistetaan
kertoimella k ja saadaan korjausjännite u_{korj} , jonka avulla syöttävää taajuusmuuttajan anto-
jännitettä korjataan niin, että virhe e menee nolnaan. Kun estimointi on tältä osin onnistunut,
voidaan alkuperäiseen alipäästösuodatettuun moottorista mitattuun virtaan lisätä taajuus-
muuttajan itsensä aiheuttamat värevirrat lisäämällä virtaan i_{1ap} laskennallinen komponentti
 i_{2yp} . Nyt periaatteessa säätöön toimitetaan todellista muuttajan moottorille syöttämää virtaa
vastaava tieto. Näin on saatu toisen taajuusmuuttajan aiheuttamat häiriöt laskennallisesti
eristetyksi ensimmäisen muuttajan säädöstä. Vääntö- ja vuoestimaattien laskemisessa käy-
tetyistä staattorivirran arvosta osa on mitattua. Sillä saadaan paitsi moottorin virran perusaal-
toon verrannollinen tieto myös poistettua estimaatin ryömiminen. Molempien taajuusmuut-
tajien säädöt luovat itsenäisesti yhteistä vuota.

4.1.2 Kaksikäämi-induktiokoneella suoritettut testit

Syyskuussa 2018 aloitettiin testit kaksikäämi-induktiokoneella, jonka käämiryhmiä ohjattiin itsenäisillä virtasäädetyillä taajuusmuuttajilla. Taajuusmuuttajia syötettiin yhdellä syöttömoduulilla. Kuvassa 10 on esitetty testeissä käytetty järjestelmä. Kaksikäämikoneessa on periaatteessa sulautettuna kaksi moottorikäyttöä, joita voidaan käyttää erikseen tai yhdessä. Yksi käyttö koostuu yhdestä käämiryhmästä ja sitä syöttävästä taajuusmuuttajasta. Testeissä onnistuttiin ajamaan koneita $1000 \frac{1}{\text{min}}$ nopeudella nimellisvääntömomentilla, mutta lähellä kentänheikennyspistettä ja hitaalla nopeudella säätö ei toiminut oikein. YY30-kytkennällä onnistuttiin ajamaan koneen normaalitoiminta-alueella suoralla vääntömomentin säädöllä virtaestimaattia käyttämällä, mutta nollanopeuden ylitykset olivat hankalia eikä säätö vielä toiminut oikein kentänheikennyksessä.



Kuva 10: Kaksikäämi-induktiokoneen testijärjestelyt (Muokattu lähteestä ABB 2019)

Testejä päätettiin jatkaa. Moottorin pyörimissuunnan vaihtoa testattiin kuorman kanssa skaalarisäädöllä simuloiden laivan hätäpysäytystä (englanniksi crash-stop), joka osoittautui vaikeaksi jo yhdellä käämiryhmällä. Sääto karkasi pyörimissuunnan vaihtuessa generaattori-puolelta moottoripuolelle.

Seuraavana testattiin virtaestimoitua vääntömomentin säätöä YY00-kytkennällä, jossa roottorivuon kenttäorientaatiokulmaa päivitetään käytöltä toiselle perusaaltomagneettikentän ja roottorin pyörimisnopeuserosta johtuvan jättämäkulman ja ohjelmoitavan logiikan (englanniksi Programmable Logic Controller, PLC) avulla. Kenttäorientaatiokulmaa ei voi reaaliaikaisesti päivittää tässä järjestelmässä, sillä se vaatisi huomattavasti nopeamman tietoliikenneyhteyden käyttöjen välille. Tahdistuksen tavoitteena on päivittää molempien käyttöjen moottorimallien kenttäorientaatiokulmat joko yhtä suuriksi tai haluttuun vaihe-eroon, esimerkiksi YY30. Roottorin kulmatieto kalibroidaan enkooderin nollapulssista kahden erillisen taajuusmuuttajan moottorisäätöön. Kumpikin taajuusmuuttaja laskee itsenäisesti jättämäkulmaa. Jättämäkulmaa päivitetään muuttajien välillä PLC:n avulla 10-20 millisekunnin välein.

Alkuun moottorin käynnistystä testattiin nollanopeudella vääntömomenttisäädöllä sekä ilman virtaestimaattia että virtaestimaatin kanssa. Huomattiin, että ilman virtaestimaattia yhteiskäynnistys ei onnistu, koska moottorikämmien keskinäisinduktanssien kautta toinen taajuusmuuttaja häiritsee toisen taajuusmuuttajan virranmittausta ja jompikumpi käämiryhmä päättyy aina ylivirtakatkaisuun.

Skalaarisäädössä ja ABB:n nykyisin käyttämässä vääntömomentin säädössä todettiin seuraavat edut ja haitat:

Skalaarisäädön edut ja haitat:

- + Skalaarisäätö tarvitsee vain vähän viritystä
- + Viritys onnistuu helposti PLC:n avulla
- Skalaarisäätö ei toimi nollanopeuden ylityksissä, joten se ei toimi esimerkiksi pyörimissuunnan vaihdoissa
- PLC tarvitsee rajasäätimen, jotta virrat eivät ylitä sisäisiä rajoja
- Moottorisäädön dynaaminen suorituskyky on huono

- Parametriarvot joudutaan muuttamaan, kun vaihdetaan kahden käämin toiminnasta yhden käämin toimintaan, koska yhdellä käämillä tarvitaan suurempi *IR*-kompensointi

Skalaarisäätö on haitoista huolimatta käyttökelpoinen menetelmä moniin sovelluksiin.

ABB:n vääntömomentin säädön edut ja haitat:

- + Moottorisäädöllä on hyvä dynaaminen suorituskyky
- Kentänheikennys ei onnistu helposti. PLC:n pitää ohjata molempien käyttöjen vuota samaan aikaan tai muuten voi syntyä epävakaa tilanne
- Säätö on parametriherkkä ja piiloparametrejä pitää säätää
- PLC vaatii rajasäätimen, jotta ei mennä sisäisiin virtarajoihin
- Parametrit joudutaan vaihtamaan siirryttäessä kahden käämin toiminnasta yhden käämin toimintaan

5 TESTIJÄRJESTELYT JA MITTAUKSET

5.1 Kaksikäämi-induktiokone YY30-kytkennällä yhdellä syöttömoduulilla

Luvussa 4.1.2 kuvattuja testejä kaksikäämi-induktiokoneella jatketaan laajentamalla testejä erikoistilanteisiin. Mittausten tavoitteena on selvittää virtaestimoidun erillissäädön toimintaa erityisesti vika- ja muutostilanteissa, kuten käynnistysten ja pysäytysten yhteydessä, kvadrantin vaihdoissa, kentänheikennyksessä ja käämiryhmien sisäisten virta- ym. rajojen aktivoituessa.

Kuvassa 11 nähdään testijärjestelmässä käytetyt moottorit ABB:n tiloissa Helsingissä. Näissä testeissä käytetään virtaestimoitua vääntömomentin säätöä. Testattava kaksikäämi-kone on kuvan vasemmalla ja kuormakone oikealla puolella.



Kuva 11: Kaksikäämi-induktiokoneen testijärjestelyt

Taulukko 1: Kaksikäämi-induktiokoneen kilpitiedot YY30 kytkennällä.

Nimellisteho [kW]	314.5
Nimellisjännite [V]	500.0
Nimellisvirta [A]	2×212.9
Nimellisvääntömomentti [Nm]	2017.0
Nimellisnopeus [rpm]	1489.1
$\cos\varphi$	0.879

Taulukko 2: Kuormakoneen kilpitiedot kolmiokytkennällä.

Nimellisteho [kW]	315
Nimellisjännite [V]	380.0
Nimellisvirta [A]	570
Nimellisnopeus [rpm]	1487
$\cos\varphi$	0.88

5.1.1 Parametrikorjaukset

Moottorimallin tarkkuutta verrattuna kilpitietojen perusteella laskettuihin arvoihin voidaan parantaa käyttöönoton yhteydessä suoritettavan identifiointiajon tulosten perusteella. Se on yleinen toimenpide vektorisäätöön perustuvissa järjestelmissä. ABB:n nykyisin käyttämässä vääntömomentin säätömenetelmässä moottorimallin tarkkuus vaikuttaa oleellisesti sähkökoneen suorituskykyyn. Moottorimallia voidaan edelleen tarkentaa ottamalla huomioon käämiryhmien välinen kytketyminen tekemällä parametrikorjauksia. Moottorimallia parantavat korjaukset voidaan tehdä kaksikäämi-induktiokoneelle, kun koneen molempia käyttäjiä kuormitetaan tasaisesti. Säädon tulee kuitenkin toimia siten, että toisen käämiryhmän ollessa pois käytöstä, tulee parametrit muuttua automaattisesti identifiointiajon tuloksia vastaaviksi. Parametrikorjausten tavoitteena on päästä eroon taajuusmuuttajien tuntemattomasta vuorovaikutuksesta. Lähtökohtana on pidetty taajuusmuuttajien kuormittumista yhdenmukaisesti sekä dynaamisesti että staattisesti.

Kaksikäämi-induktiokone rakennetaan tyypillisesti jänteistämättömänä tai 5/6 jänteistyk- sellä joko 30 sähköasteen vaihesiirrolla tai ilman vaihesiirtoa. Käämiryhmien välistä kytkey- tymistä voidaan arvioida muuntosuhteella, jossa staattorikäämin näkemä keskinäishajain- duktanssi $L_{\sigma 1_2}$ normalisoidaan staattorikäämin kokonaishajainduktanssiin. Staattorikäämit oletetaan identtisiksi ($L_{s\sigma 1} = L_{s\sigma 2} \Rightarrow L_{s\sigma 1_2} = L_{s\sigma 2_1}$). Muuntosuhde lasketaan yhtälöllä

$$\frac{L_{s\sigma 1_2}}{L_{s\sigma 1} + L_{s\sigma 1_2}} \quad (34)$$

Westerlund (2015) on laskenut muuntosuhteet elementtimenetelmällä tyypillisimmissä ta- pauksissa ja Heinonen (2018) selvitti muuntosuhteet mittauksin. Mittaukset tehtiin yhdellä staattorihaaralla.

Valmistaja ilmoittaa kaksikäämikoneen moottoriparametrit tyypillisesti siten, että käämiryh- mät ovat sarjaan kytketyt. Parametrit ilmoitetaan tyypillisesti T-sijaiskytkennälle. Tässä työssä aiemmin esitetyt kaksikäämikoneiden sijaiskytkennät on esitetty T-sijaiskytkentöinä, koska se on kattavampi ja yleisin esitystapa.

Tässä työssä käytetty taajuusmuuttaja käyttää induktiokoneen moottorimallissa käänteis- Γ - sijaiskytkentää. Käyttämällä käänteis- Γ -sijaiskytkentää voidaan laskentaa yksinkertaistaa. Käänteis- Γ -sijaiskytkennässä hajainduktansseihin liittyvät ilmiöt kerätään staattoripuolelle, ja mallissa on siten yksi hajainduktanssi vähemmän verrattuna T-sijaiskytkentään. Seuraa- vassa esitetään, miten parametrit muuttuvat, kun siirrytään T-sijaiskytkennästä käänteis- Γ - sijaiskytkentään.

T-sijaiskytkennän muuttujien alaindeksijä merkitään tässä työssä pienellä ja käänteis- Γ -si- jaiskytkennän muuttujia isolla alaindeksillä. Sijaiskytkentöjen välille saadaan seuraavat yh- tälöt käyttäen seuraavia muuttujia: (Harnefors et al., 2015; Kostiainen, 2019).

Ψ_R : roottorikäämivuo

R_R : roottoriresistanssi

i_M : magnetointivirta

L_M : magnetointi-induktanssi

L_σ : kokonaishajainduktanssi

$$\boldsymbol{\Psi}_R = L_M \mathbf{i}_M \quad (35)$$

$$R_R = \left(\frac{L_m}{L_r}\right)^2 R_r \quad (36)$$

$$L_M = \frac{L_m^2}{L_r} \quad (37)$$

$$L_\sigma = L_s - \frac{L_m^2}{L_r} \approx L_{s\sigma} + L_{\sigma r} \quad (38)$$

$$\mathbf{i}_M = \mathbf{i}_s + \mathbf{i}_R \quad (39)$$

Induktiokoneen parametrit ilmoitetaan moottorin datalehdessä yleensä SI-yksiköissä.

Mikko Kostiainen (2019) on johtanut absoluuttiarvoina laskettavat moottorimallia parantavat yhteydet kaksikämi-induktiokoneen parametreille, kun käämiryhmät on kytketty rinnan ja konetta syötetään kahdella taajuusmuuttajalla. Kostiaisen johtamilla yhtälöillä saadaan taajuusmuuttajan yhdelle käämiryhmälle laskemaa id-ajon tulosta muutettua kahdelle käämiryhmälle sopivaksi niin, että samalla taajuusmuuttajien välinen tuntematon vuorovai-
kus pienenee. Kaksikämi-induktiokoneen yhtälöt ja sijaiskytkentöjen muutokset voidaan esittää seuraavasti:

Kun molempia staattorikämejä kuormitetaan tasaisesti, seuraa

$$\mathbf{i}_{s1} = \mathbf{i}_{s2} \quad (40)$$

$$\mathbf{i}_r = 2\mathbf{i}_{r1} = 2\mathbf{i}_{r2} \quad (41)$$

$$\mathbf{i}_m = 2\mathbf{i}_{m1} = 2\mathbf{i}_{m2} \quad (42)$$

Yhtälöiden alaindekseissä numero 1 viittaa staattorikäämiin 1 ja numero 2 staattorikäämiin 2.

Staattorikäämivuo käämille 1 saadaan

$$\boldsymbol{\Psi}_{s1} = L_{s\sigma 1} \mathbf{i}_{s1} + 2L_{s\sigma 1,2} \mathbf{i}_{s1} + 2L_m (\mathbf{i}_{s1} + \mathbf{i}_{r1}) \quad (43)$$

Käämin 1 staattori-induktanssille on voimassa

$$L_{s1} = L_{s\sigma 1} + 2L_{s\sigma 1_2} + 2L_m \quad (44)$$

Kaksikämi-induktiokoneen roottorikämmivuo voidaan laskea

$$\Psi_r = 2L_{\sigma r} i_{r1} + 2L_m (i_{s1} + i_{r1}) \quad (45)$$

$$i_R = 2i_{R1} = 2i_{R2} \quad (46)$$

$$i_M = 2i_{M1} = 2i_{M2} \quad (47)$$

Käänteis- Γ -sijaiskykentä voidaan johtaa Harnefors et al. (2015) esittämällä tavalla:

$$\Psi_R = b\Psi_r \quad (48)$$

$$i_R = \frac{i_r}{b}, \quad (49)$$

missä b kuvaa vakiota, jolla sijaiskykentään saadaan yksi hajainduktanssi kahden asemesta.

Sijoittamalla yhtälöt (48) ja (49) yhtälöön (45) seuraa

$$\Psi_R = b[2L_{\sigma r} b i_{R1} + 2L_m (i_{s1} + b i_{R1})] \quad (50)$$

$$\Psi_R = 2b^2 L_{\sigma r} i_{R1} + 2b L_m (i_{s1} + b i_{R1}) \quad (51)$$

$$\Psi_{s1} = L_{s\sigma 1} i_{s1} + 2L_{s\sigma 1_2} i_{s1} + 2L_m (i_{s1} + b i_{r1}) \quad (52)$$

$$\Psi_R = 2b^2 L_r i_{R1} + 2b L_m i_{s1} \quad (53)$$

Vakio b voidaan ratkaista yhtälöstä (53) asettamalla roottori- ja staattorivirrat yhtä suuriksi ($2bL_r = 2L_m$). Tästä seuraa

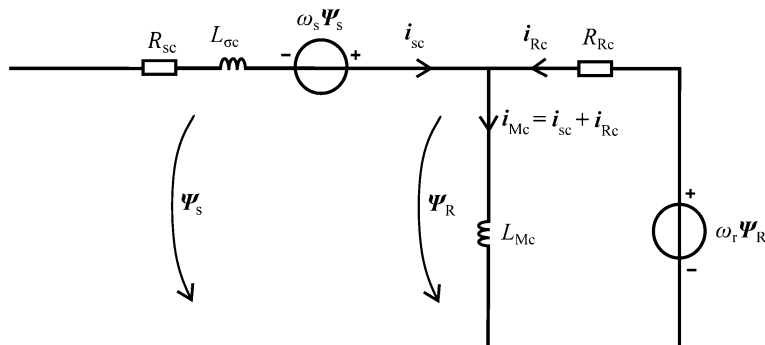
$$b = \frac{L_m}{L_r} = \frac{L_m}{L_m + L_{\sigma r}} \quad (54)$$

Sijoittamalla yhtälö (54) yhtälöihin (46) ja (53) saadaan roottori- ja staattorikämmivuot kaksikämi-induktiokoneen käänteis- Γ -sijaiskykentälle.

$$\begin{aligned}\Psi_R &= 2\frac{L_m^2}{L_r} i_{r1} + 2\frac{L_m^2}{L_r} i_{s1} \\ &= 2\frac{L_m^2}{L_r} (i_{s1} + i_{r1}) = 2L_M i_M\end{aligned}\quad (55)$$

$$\begin{aligned}\Psi_{s1} &= L_{s\sigma 1} i_{s1} + 2L_{s\sigma 1-2} i_{s1} + 2L_m i_{s1} + \frac{L_m^2}{L_r} i_{R1} \\ &= L_{\sigma 1} i_{s1} + 2L_{\sigma 1-2} i_{s1} + 2L_M i_M\end{aligned}\quad (56)$$

Kuvassa 12 on esitetty taajuusmuuttajan käyttämän oikosulkukoneen moottorimallin käänteis- Γ -sijaiskytkentä. Seuraavissa muuttujissa alaindeksi id viittaa identifiointiajon antamaan muuttujan arvoon ja alaindeksi c moottorisäädölle annettuun toisen taajuusmuuttajan virran vaikutuksen kompensoivaan korjattuun arvoon.



Kuva 12 Taajuusmuuttajan käyttämä oikolukumoottorin käänteis- Γ -sijaiskytkennän moottorimalli

$L_{s\sigma}$: staattorikäämien kokonaishajainduktanssi

$L_{r\sigma}$: roottorin hajainduktanssi

$L_{\sigma c}$: kokonaishajainduktanssi korjauskertoimella korjattuna

L_{Mc} : magnetointi-induktanssi korjauskertoimella korjattuna

L_{mid} : identifiointiajolla yhdelle kolmivaihekäämille saatu magnetointi-induktanssi

R_{Rc} : roottoriresistanssi korjauskertoimella korjattuna

R_{Rid} : identifiointiajolla yhdelle kolmivaihekäämille saatu roottoriresistanssi

$L_{s\sigma id}$: identifiointiajolla yhdelle kolmivaihekäämille saatu kokonaishajainduktanssi

Staattori-induktanssi on

$$L_{sc} = L_{\sigma c} + L_{Mc} \quad (57)$$

Staattori-induktanssimallin tulee vastata oikean moottorin induktanssia. Yhtälöistä (37), (44) ja (57) saadaan muodostettua seuraava yhtälö

$$L_{\sigma c} = L_{s1} - L_M = L_{s\sigma 1} + 2L_{s\sigma 1,2} + 2L_m - 2 \frac{L_m^2}{L_{\sigma r} + L_m} \quad (58)$$

Koska hajainduktanssit ovat huomattavasti keskinäisinduktanssia pienemmät, voidaan kokonaishajainduktanssi korjauskertoimella korjattuna arvioida yksittäisistä komponenteista yhtälöllä

$$L_{\sigma c} \approx L_{s\sigma 1} + 2L_{s\sigma 1,2} + 2L_{\sigma r} \quad (59)$$

Merkitsemällä $L_{\sigma 1,2} = L_{\sigma 1,2} + L_{\sigma r}$ ja ottamalla huomioon, että $L_{\sigma 1} = L_{s\sigma 1}$ voidaan kirjoittaa

$$L_{\sigma c} \approx L_{\sigma 1} + 2L_{\sigma 1,2} \quad (60)$$

Lisäksi voidaan kirjoittaa

$$\Psi_R = i_{Mc} L_{Mc} = 2i_{M1} L_M \quad (61)$$

Yhtälöistä (45) ja (61) saadaan nyt johdettua yhtälö

$$L_{Mc} = 2L_M \quad (62)$$

Magnetointi-induktanssi korjauskertoimella korjattuna L_{Mc} on kaksinkertainen, koska molemmat käämiryhmät magnetoivat konetta ja magnetointivirta jakautuu siten puoliksi käämiryhmien kesken.

Moottorimallin jänniteyhtälö on

$$0 = R_R i_{Rc} + \frac{d\Psi_R}{dt} + j(\omega_s - \omega_r) \Psi_R \quad (63)$$

Ja roottoriresistanssi

$$R_{Rc} = 2R_R \quad (64)$$

Roottoriresistanssi korjauskertoimella korjattuna on kaksinkertainen, koska yksi taajuusmuuttaja syöttää vain puolet roottorivirrasta.

Staattorikämmien kokonaishajainduktanssi $L_{s\sigma}$ saadaan arvioitua yhtälöllä

$$L_{s\sigma} \approx 2 \times (L_{s\sigma 1} + L_{s\sigma 1,2}) \quad (65)$$

Roottorin hajainduktanssi $L_{r\sigma}$ saadaan arvioitua yhtälöllä

$$L_{r\sigma} \approx 0,5 \dots 2 \times 2 \times (L_{s\sigma 1} + L_{s\sigma 1,2}) \quad (66)$$

Tämän työn testeissä käytetty kokonaishajainduktanssi korjauskertoimella korjattuna $L_{\sigma c}$ on määritetty käyttämällä neljän edellä mainitun tapauksen (jäteistämättömänä 30 sähköasteen vaihesiirrolla ja ilman vaihesiirtoa sekä 5/6 jänteistyksellä 30 sähköasteen vaihesiirrolla ja ilman vaihesiirtoa) hajainduktansseja ja laskemalla $L_{s\sigma id}$:lle kerroin, jolla moottorisäädölle annettavan, toisen taajuusmuuttajan virran vaikutuksen kompensoivan korjatun kokonaishajainduktanssin virhe on mahdollisimman pieni verrattuna yksittäisistä komponenteista laskettuun arvoon. Laskuissa käytettiin roottori- ja staattorihajainduktanssien suurinta ja pienintä suhdetta.

$$L_{\sigma c} \approx 1,8 \times L_{s\sigma id} \quad (67)$$

$$L_{Mc} = 2 \times L_{mid} \quad (68)$$

$$R_{Rc} = 2 \times R_{Rid} \quad (69)$$

$$L_{s\sigma id} \approx L_{s\sigma 1} + L_{s\sigma 1,2} + L_{r\sigma} \quad (70)$$

Taulukko 3: Kaksikäämi-induktiokoneen korjatut parametrit YY30-kytkennällä absoluuttisarvoina.

Napapariluku	2
Staattoriresistanssi [Ω]	0.00849
Roottoriresistanssi [Ω]	0.00482
Magnetointi-induktanssi [H]	3.11440
Hajainduktanssi [H]	0.24158
Pitkittäisinduktanssi [H]	0.00000
Poikittäisinduktanssi [H]	0.00000

5.1.2 Suoritetut mittaukset ja niiden tulokset

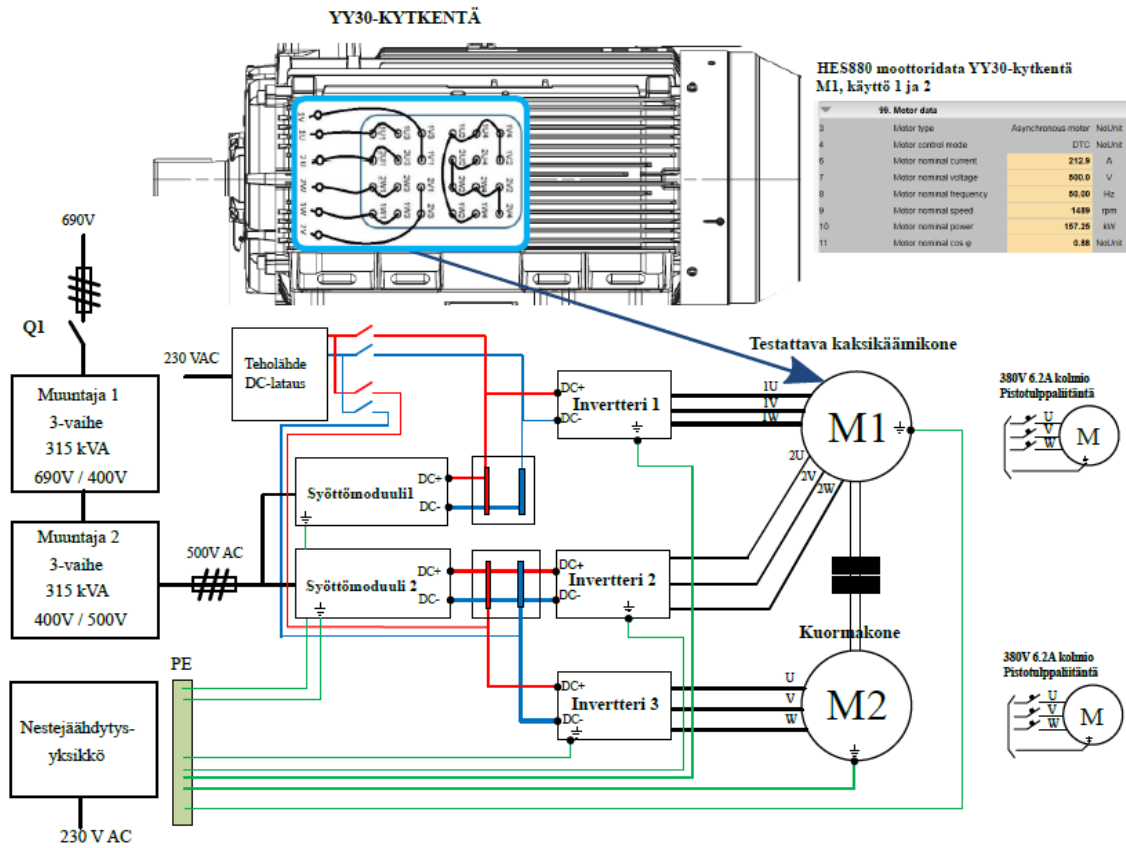
Moottorisäädön toimintaa testattiin ajamalla kaksikäämikonetta erikoistilanteisiin. Virran estimointia käytettiin kaikissa testeissä. Toimintaa testattiin mm:

- antamalla koneelle kuormaiskuja eri pyörimisnopeuksilla,
- toteuttamalla pyörimissuunnan vaihtoja eri vääntömomenteilla ja nopeuksilla,
- testaamalla vääntömomentin etumerkin vaihtoa eri vääntömomenteilla,
- asettamalla toiselle käämille alhaisempi virtaraja,
- asettamalla toiselle käämille alhaisempi vääntömomenttiraja,
- käynnistämällä kone uudestaan kaksikäämitoiminnossa toisen käämin pysähtymisen jälkeen,
- ajamalla konetta nimellinopeuden yläpuolella.

Suoritetuissa testeissä moottorisäätö toimi kaikissa tilanteissa, mutta kentänheikennykseen ei päästy, sillä moottorisäätö alkoi rajoittaa toimintaa.

5.2 Kaksikäämi-induktiokone YY30-kytkennällä kahdella syöttömoduulilla

Kohdassa 5.1 suoritettut testit osoittivat, että moottorisäätö toimii hyvin myös erikoistilanteissa. Testijärjestelmää päätettiin muuttaa siten, että molempia taajuusmuuttajia syötetään omilla syöttömoduuleilla. Lisäksi järjestelmän jäähtytykseen tehtiin muutoksia. Muutoin järjestelmä on identtinen kohdan 5.1 kanssa. Päätettiin myös testata, mitä vaikutuksia ilmenee, kun syöttömoduuleille asetetaan erisuuruiset DC-jännitteet. Näillä testijärjestelyillä pyritään osoittamaan, että järjestelmä toimii hyvin myös erillisillä syöttömoduuleilla. Tällöin yhden syöttömoduulin vikaantuessa toinen muuttaja ja puolet moottorista voivat edelleen jatkaa toimintaa, jolloin järjestelmän redundanttius paranee. Kun toimivuus osoitetaan käytännön mittauksin, niin voidaan ajatella, että erillissäätö herättää kiinnostusta myös tutkimus- ja kehityspuolella, ja voidaan jatkossa valita säätömenetelmäksi esimerkiksi kaksikäämikoneella varustettuihin propulsiojärjestelmiin. Kuvassa 13 seuraavalla sivulla on esitetty päivitetty järjestelmä.



Kuva 13: Kaksikäimi-induktiokoneen testijärjestelyt kahdella syöttömoduulilla

5.2.1 Testien kuvaus

Testien tarkoitus on tutkia moottorisäädön ja käytön toimintaa erikoistilanteissa, kuten testeissä 5.1.2 mutta näissä testeissä käytetään kahta erillistä syöttömoduulia.

Kuormakone on kaikissa testeissä mekaanisesti kytkettynä, joten sen hitausmomentti on mukana tuloksissa, vaikka sitä ei aktiivisesti käytettäisi.

Mittausdata kerätään molempien käyttöjen taajuusmuuttajilla, joiden loggeritietoja analysoidaan ABB:n taajuusmuuttajien käyttöön ja kunnossapitoon kehitetyllä Drive Composer -ohjelmistolla.

Taulukko 4: Kaksikäämi-induktiokoneen testeissä käytetyt mittalaitteet.

Invertteri	ABB HES880-104-0602A-05
Maksimivirta	600 A
Taajuus	0-250 Hz

Testissä 1 tarkastellaan moottorisäädön ja käytön toimintaa kiihdytyksessä ilman kuormaa.

Testissä 2 tarkastellaan toimintaa pyörimissuunnan vaihdoissa ilman kuormaa ja kuorman kanssa. Tarkoitus on tutkia säädön toimintaa suunnanvaihdoissa ja nollassa nopeuden ylityksissä moottoripuolelta generaattoripuolelle siirryttäessä ja päinvastoin.

Testeissä 3-6 tarkastellaan toimintaa erisuuruuksilla vääntömomenteilla ja pyörimisnopeuksilla. Tehdään vaihtoja siten, että välillä kaksikäämikone ohjataan vääntömomenttiohjella ja kuormakone on silloin nopeussäädöllä. Toisessa tapauksessa kaksikäämikone toimii nopeussäädöllä ja kuormakone vääntömomenttisäädöllä.

Testissä 7 tarkastellaan toimintaa nimellisa nopeudella moottoripuolelta generaattoripuolelle siirryttäessä ja päinvastoin muuttamalla vääntömomentin etumerkkiä vaihtelevilla kuormilla. Lisäksi kokeillaan syöttömoduulien DC-jännitteen nostoa ja havainnoidaan sen vaikutuksia.

Testeissä 8 ja 9 tarkastellaan toimintaa, kun toiselle käytölle asetetaan alhaisempia virta- ja vääntömomenttirajoja ja ajamalla konetta rajojen yli.

Testeissä 10.0, 10.1, 10.2, 13 ja 14 tarkastellaan toimintaa, kun syöttömoduuleille asetetaan erisuuruiset DC-jännitteet.

Testeissä 11 ja 12 tarkastellaan toimintaa käynnistys- ja pysäytystilanteiden yhteydessä.

Testissä 15 tarkastellaan koneen dynaamista suorituskykyä kahden käämiryhmän toiminnassa verrattuna yhden käämiryhmän toimintaan.










Testissä 16 tarkastellaan pyörimissuunnan vaihtoja nopealla rampilla.

Testissä 17 tutkitaan, miten järjestelmä käyttäytyy, kun se käynnistetään sähkökatkon jälkeen.

5.2.2 Suoritetut mittaukset ja niiden tulokset

Testituloksissa esitetyissä kuvissa muuttujilla on y-akselin suuntaan eri skaalaus, jotta ne saadaan selkeästi näkyville samaan kuvaan. Taulukossa 5 on esitetty yleisimmät kuvissa esiintyvät muuttujat yksiköineen sekä niitä kuvaavat värit ja käytetty skaalaus. Joissakin testien kuvissa on eri skaalaus ja enemmän muuttujia, mutta siitä on mainittu kyseisen testin kohdalla erikseen. Vaaka-akselilla kulkee aika sekunteina.

Taulukko 5: Testeissä käytetyt yleisimmät muuttujat värimerkintöineen

Muuttuja	Skaalaus	Yksikkö	Värimerkintä
Pyörimisnopeus	-1600...1600	$\left[\frac{1}{\text{min}}\right]$	
Käytön 1 vääntömomentti	-100...100	[Nm] %	
Käytön 2 vääntömomentti	-100...100	[Nm] %	
Käytön 1 DC-jännite	0...1000	[V]	
Käytön 2 DC-jännite	0...1000	[V]	
Käytön 1 moottorivirta	0...250	[A]	
Käytön 2 moottorivirta	0...250	[A]	
Käytön 1 mallivirhe	-0,03...0,03	Ei yksikköä	
Käytön 2 mallivirhe	-0,03...0,03	Ei yksikköä	

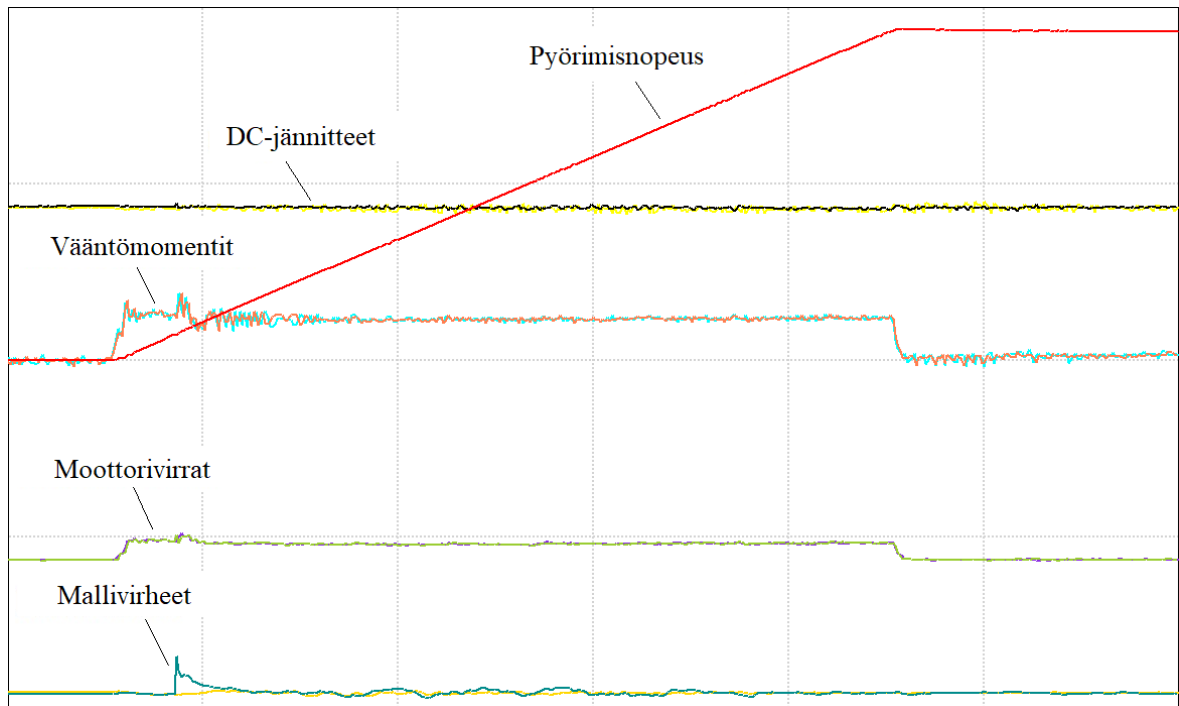
Mallivirheellä arvioidaan roottorikäännevuon kulmavirhettä. Mallivirhe lasketaan siten, että alkuun estimoidaan kenttäorientaatio jännite- ja virtamallien perusteella, jolloin saadaan kulmaestimaatit. Tämän jälkeen lasketaan niiden välinen kulmavirhe ja mallivirhe on kyseisen kulmavirheen sini. Sen maksimiarvo on yksi, eikä sille ole yksikköä.

Modulointi-indeksi on määritelty tässä työssä seuraavasti:

$$\text{Modulointi – indeksi} = \frac{\sqrt{2} \times 1.13 \times \text{muuttajan lähtöjännite}}{1.11 \times \text{muuttajan DC-jännite}} \quad (42)$$

Testi 1: Kaksikäämi-induktiokoneen kiihdytys nollanopeudesta nimellisnopeuteen ilman kuormaa 10 % vääntömomentilla. Kaksikäämikone asetetaan nopeussäädölle PLC:ssä. Kuormakonetta ei käytetä, mutta se on kuitenkin kytkettynä, joten sen hitausmomentti on mukana testissä.

Testin tuloksena (kuva 14) nähdään, että säätö toimii hyvin. Vääntömomenteissa on alkuun pientä värähtelyä huippuarvojen käydessä n. 20 prosentissa, minkä jälkeen ne tasaantuvat ja pysyvät kiihdytyksen ajan n. 10 prosentissa keskinäisen vaihtelun ollessa alle yksi prosenttiyksikköä. Käämiryhmien virtatasapaino säilyy ja vääntömomentit seuraavat hyvin toisiaan. DC-jännitteet asettuvat syöttömoduuleissa sähköverkon jännitteen perusteella automaattisesti ja niissä on pientä, n. $\pm 2,5$ voltin vaihtelua. Magnetointivirtaa kone ottaa yhteensä noin 114 ampeeria, joka jakaantuu tasan käyttöjen kesken kahden käytön ajossa (2×57 A). Moottorivirrat pysyvät kiihdytyksessä keskimäärin $60 \pm 0,5$ ampeerissa, korkeimman arvon ollessa 63 ampeeria. Mallivirhe käy huipussaan lukemassa 0,05.



Kuva 14: Kaksikäämi-induktiokoneen kiihdytys nollanopeudesta nimellisnopeuteen 1489

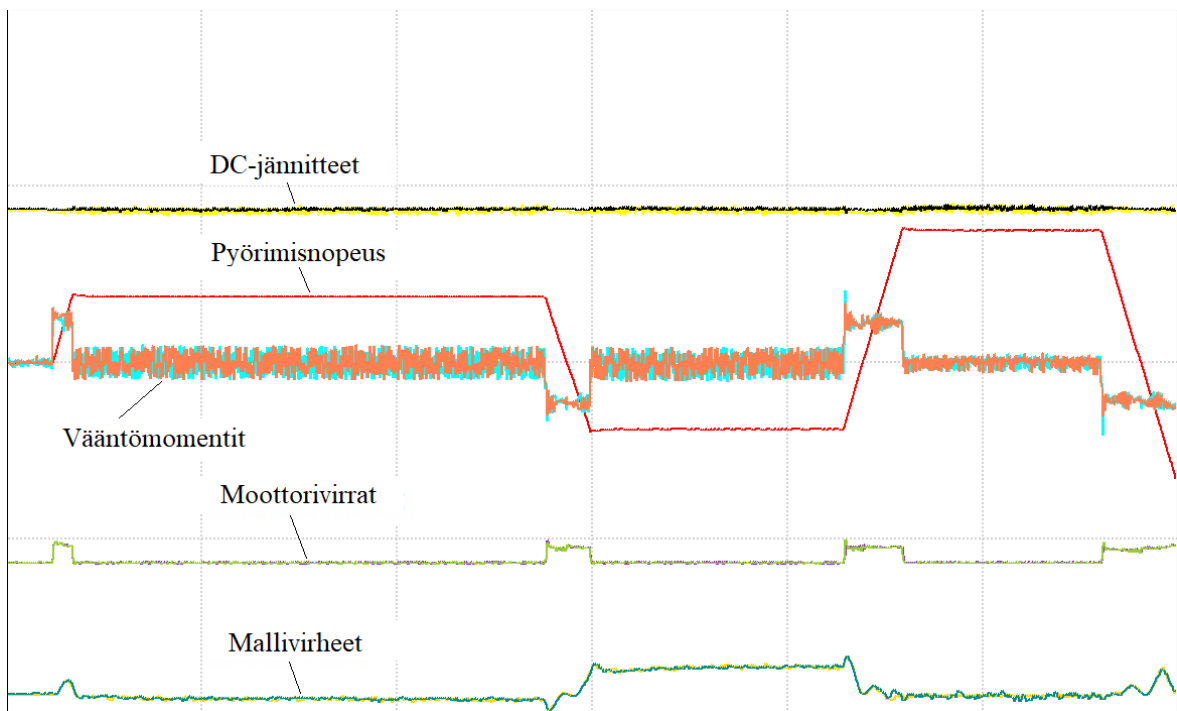
$\frac{1}{\text{min}}$ ilman kuormaa, x-akseli 15 sekuntia

Testi 2: Pyörimissuunnan vaihtoja eri nopeuksilla ja kuormilla. Kaksikäämikone asetetaan nopeussäädölle PLC:ssä ja kuormakone vääntömomenttisäädölle.

$$n = 300/-300; 600/-600; 900/-900; 1200/-1200; 1489/-1489 \frac{1}{\text{min}}$$

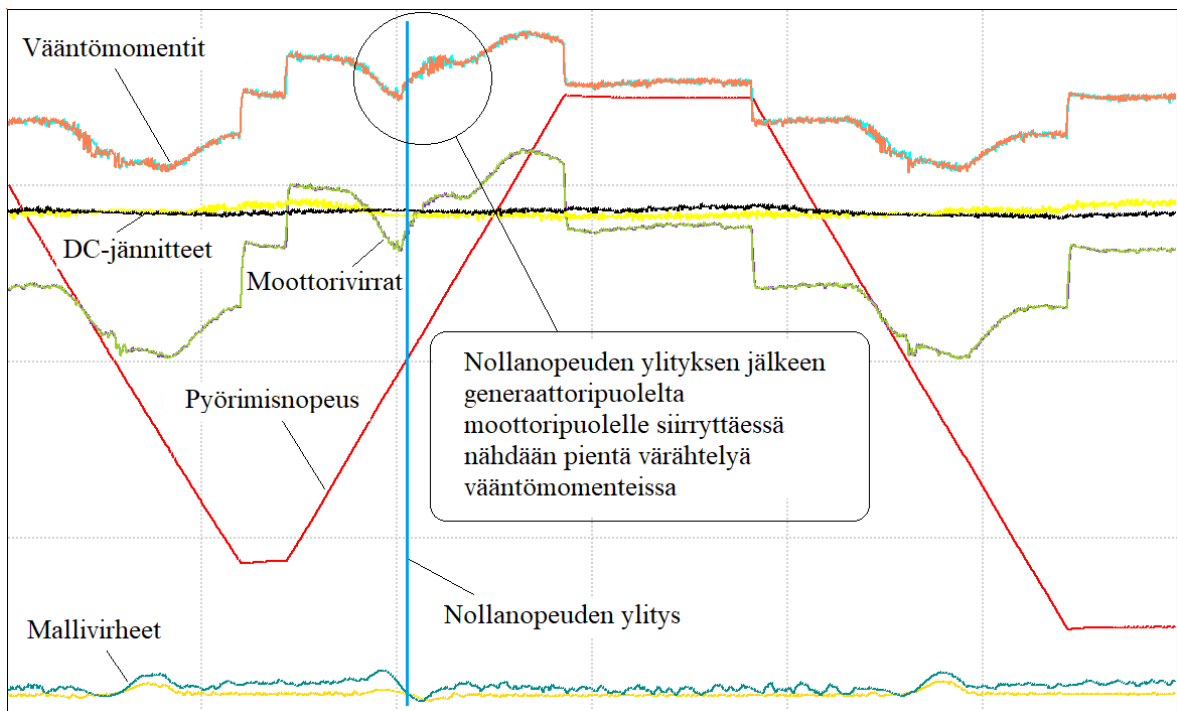
1. $T = 0 \%$
2. $T = 20 \%$
3. $T = 40 \%$
4. $T = 60 \%$
5. $T = 80 \%$

Tulokset: Kuvasta 15 nähdään koneen käyttäytyminen ilman kuormaa. Vääntömomentti vaihtelee välillä n. ± 5 prosenttia, mikä näkyy erityisesti nopeuden $300 \frac{1}{\text{min}}$ ympäristössä. DC-jännitteet vaihtelevat välillä 710-720 voltia niiden keskinäisen eron ollessa enimmillään n. 5 voltia. Vääntömomentin mallivirhe käy huipussaan lukemassa 0,06 ja keskenään ne ovat hyvin tasapainossa. Moottorivirrat pysyvät n. 54 ampeerissa paitsi suunnanvaihtojen yhteydessä, jolloin ne ovat n. 60 ampeeria keskinäisen vaihtelun ollessa alle 0,5 ampeeria.



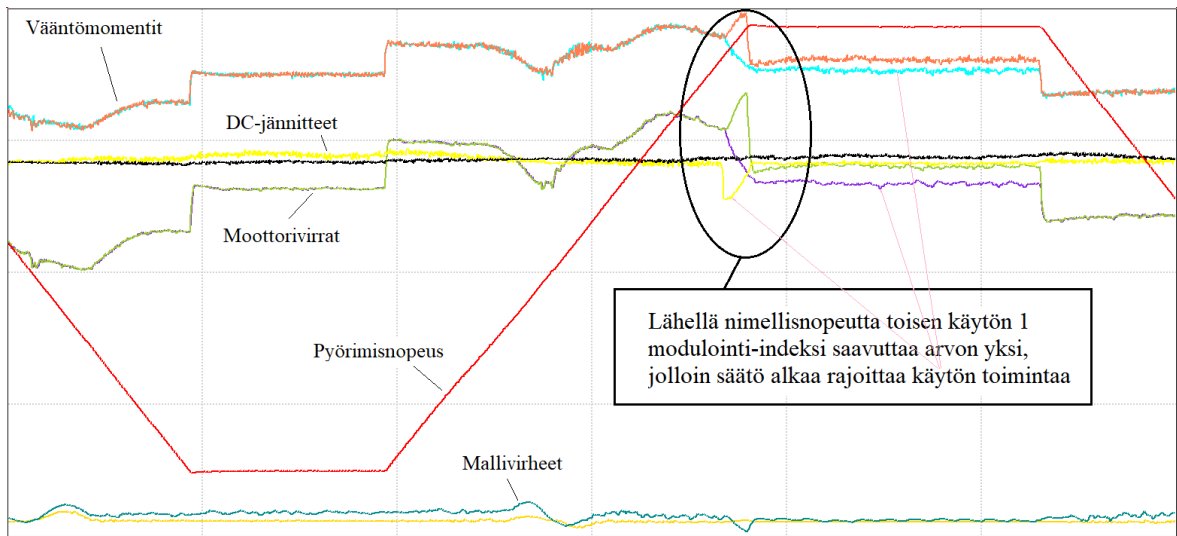
Kuva 15: Pyörimissuunnan vaihtoja nopeuksilla $0/300/-300/600 \frac{1}{\text{min}}$ ilman kuormaa, x-akseli 120 sekuntia

Kuorman kanssa säätö toimii hyvin, ja molemmat käytöt toimivat hyvin tasapainossa. Tämä nähdään esimerkiksi kuvasta 16, jossa pyörimisnopeutta muutetaan $-900/1200/-1200 \frac{1}{\text{min}}$ kuormitusmomentin ollessa 80 prosenttia. Nollakohtan ylityksessä generaattoripuolelta moottoripuolelle siirryttäessä vääntömomentissa näkyy pientä, alle $\pm 2,5$ prosenttiyksikön värähtelyä. Mallivirhe käy korkeimmillaan lukemassa 0,03. Generaattoripuolella käytön 1 DC-jännite on suurempi, kuin käytöllä 2 ja moottoripuolella päinvastoin. DC-jännitteet ovat n. 720 ja 710 voltia. Moottorivirrat vaihtelevat välillä 125-200 ampeeria ja käyttöjen virtatasapaino säilyy hyvin, keskinäisen eron pysyessä alle yhdessä ampeerissa.



Kuva 16: Pyörimissuunnan vaihtoja kuormitusmomentin ollessa 80 prosenttia, x-akseli 60 sekuntia

Kuvasta 17 nähdään, että kentänheikennyspiste saavutetaan käytöillä eriaikaisesti. Käytön 1 modulointi-indeksi saavuttaa arvon yksi, DC-jännite putoaa hetkellisesti arvoon 639 voltia, jolloin ollaan kentänheikennyksen rajalla. Tällöin säätö alkaa rajoittaa käytön 1 toimintaa, jolloin käytön 2 virta ja vääntömomentti suurenevat. Käytön 2 virta käy arvossa 210,4 ampeeria ja vääntömomentti arvossa 98,6 prosenttia. Kun nopeutta pienennetään, niin käyttöjen vääntömomentit ja virrat asettuvat takaisin tasapainoon keskenään.



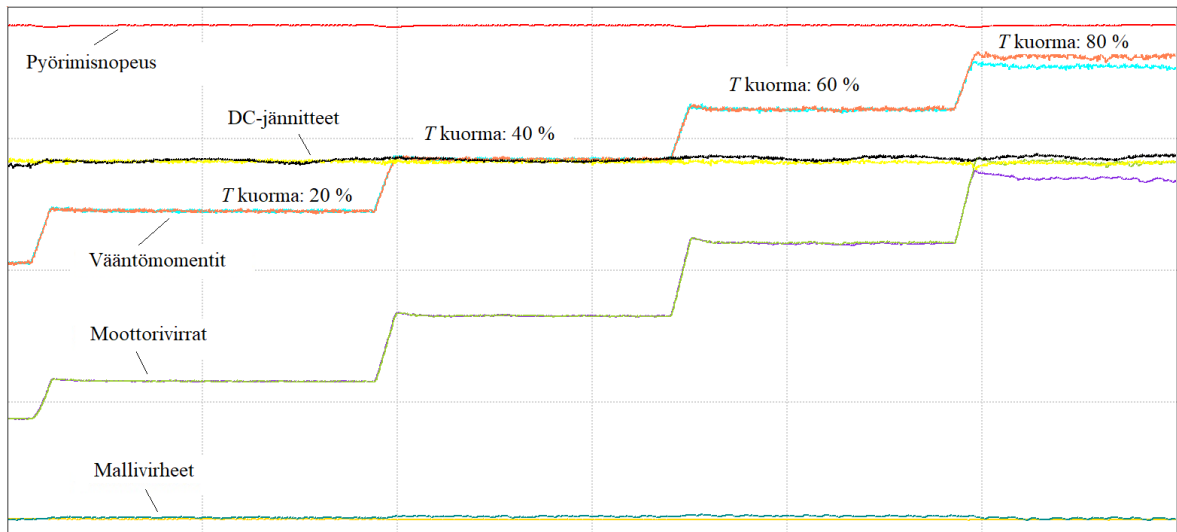
Kuva 17: Pyörimisnopeuden nosto nimelliseen nopeuteen arvosta $-1200 \frac{1}{\text{min}}$, 80 prosentin kuormitusvääntömomentilla, x-akseli 60 sekuntia

Testi 3: Kuorma-askeltesti nimelliseen nopeuteen/puolella nopeuteen/neljänneseen nopeuteen. Kaksikäähäkone asetetaan nopeussäädölle PLC:ssä ja kuormakone vääntömomenttisäädölle.

$$n = 372; 745; 1489 \frac{1}{\text{min}}$$

1. $T = 20 \%$
2. $T = 40 \%$
3. $T = 60 \%$
4. $T = 80 \%$

Testin tuloksista havaittiin, että nimellinopeuden alapuolella käytöt toimivat hyvin kaikilla kuorma-askeleilla. Nimellinopeudella (kuva 18) nähdään sama ilmiö kuin testissä kaksi, eli säätö alkaa rajoittaa käytön 1 toimintaa ja vääntömomentti on n. 2-3 prosenttiyksikköä pienempi, moottorivirta n. 10 ampeeria pienempi ja DC-jännite n. 15 voltia pienempi verrattuna käyttöön 2.



Kuva 18: Kuorma-askeltesti nimellinopeudella, x-akseli 60 sekuntia

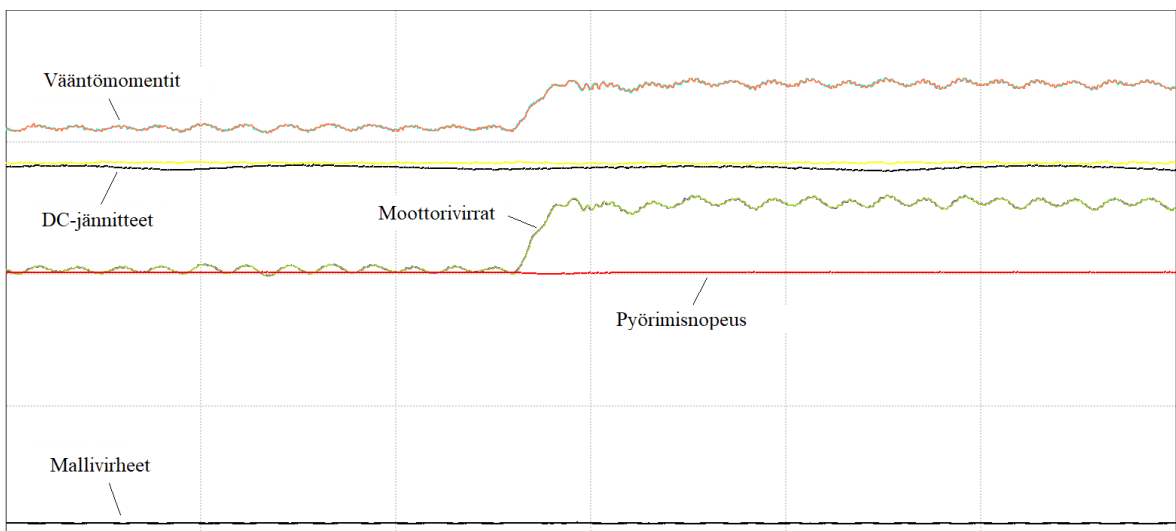
Testi 4: Kuorma-askeltesti pienillä nopeuksilla. Kaksikäähäkone asetetaan nopeussäädölle PLC:ssä ja kuormakone vääntömomenttisäädölle.

$$n = 50 \frac{1}{\text{min}}$$

$$n = 10 \frac{1}{\text{min}}$$

1. $T = 20 \%$
2. $T = 40 \%$
3. $T = 60 \%$
4. $T = 80 \%$

Testeissä säätö toimi hyvin myös pienemmillä nopeuksilla. Vääntömomenteissa ja virroissa esiintyy pientä värähtelyä, jota nähdään esimerkiksi kuvassa 19. Kuvassa näkyy kuorma-askel 60 prosentista 80 prosenttiin. Moottorivirrat ovat 60 prosentin kuormitusmomentilla n . 125 ampeeria ja 80 prosentin kuormitusmomentilla n . 160 ampeeria. Nopeudella $10 \frac{1}{\text{min}}$ kuormalla 80 prosenttia vääntömomentti vaihtelee $n. \pm 2$ prosenttiyksikköä ja moottorivirta ± 2 ampeeria. Keskenään ne pysyvät kuitenkin lähes samoissa lukuarvoissa, eikä mallivirhettä juuri havaita.



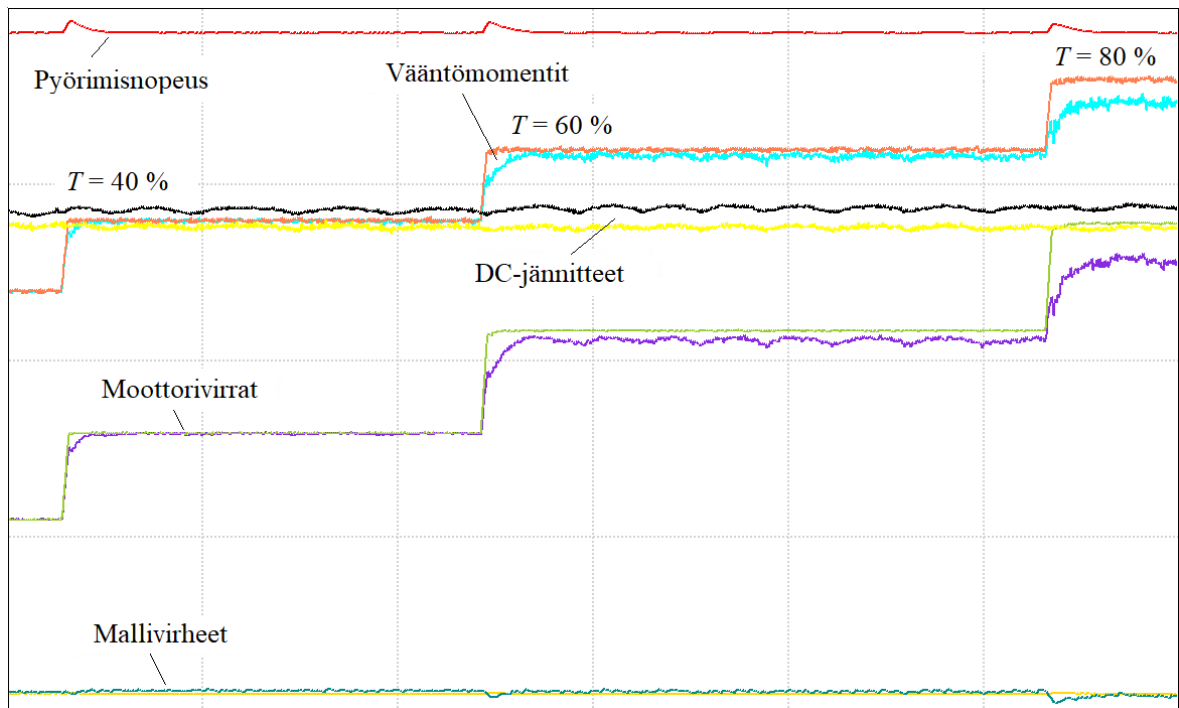
Kuva 19: Kuorma-askel nopeudella $10 \frac{1}{\text{min}}$, x-akseli 30 sekuntia

Testi 5: Ajo nimellisnopeudella tyhjäkäynnissä, tehdään askelmainen kuormitustesti. Kaksikäähäkone asetetaan vääntömomenttisäädölle PLC:ssä ja kuormakone nopeussäädölle.

$$n = 1489 \frac{1}{\text{min}}$$

1. $T = 20 \%$
2. $T = 40 \%$
3. $T = 60 \%$
4. $T = 80 \%$

Tuloksena nähdään sama ilmiö, kuin testissä kolme. Kuvasta 20 nähdään nimellisnopeudella suoritettua vääntömomenttiaskeleita. Vääntömomentin lähestyessä 60:tta prosenttia, toisen käytön modulaatioindeksi saavuttaa arvon yksi ja säätö alkaa rajoittaa toimintaa. Käytön 1 DC-jännite on noin 30 voltia pienempi verrattuna käyttöön 2 ja vääntömomentti jää viisi prosenttiyksikköä pienemmäksi viimeisellä 80 prosentin vääntömomenttiaskeleella.



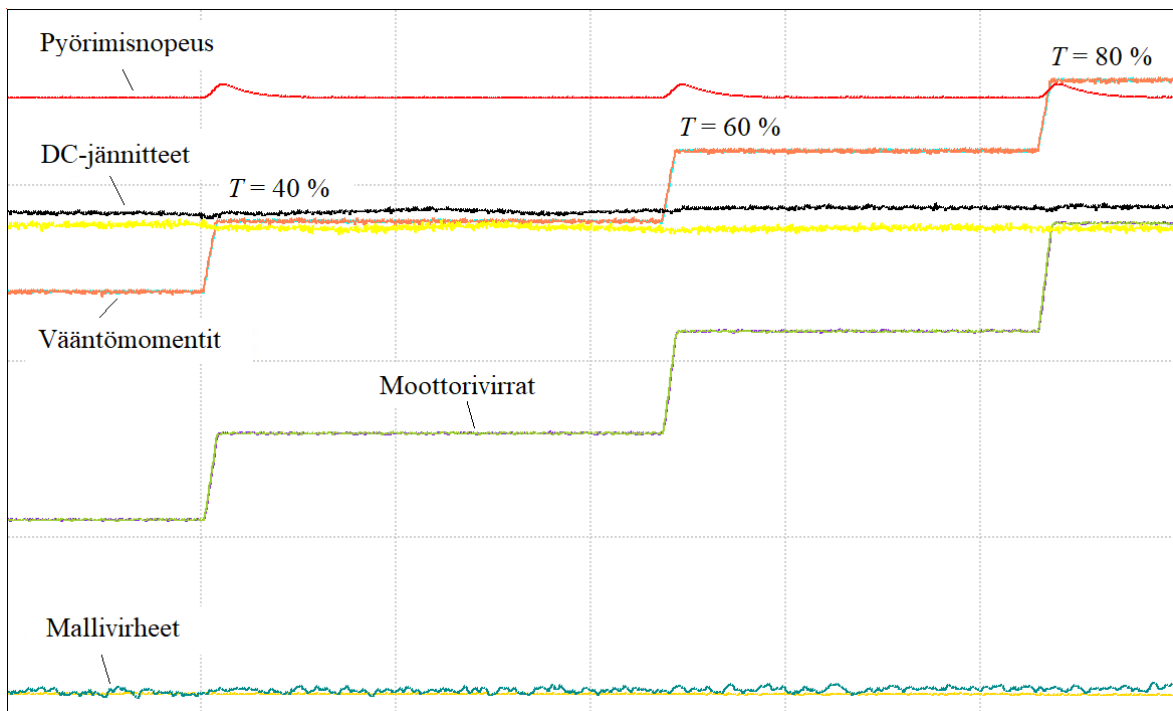
Kuva 20: Vääntömomenttiaskeleet nimellisnopeudella, x-akseli 120 sekuntia

Testi 6: Ajo eri nopeuksilla, tehdään askelmainen kuormitustesti. Kaksikäähäkone asetetaan vääntömomenttisäädölle PLC:ssä ja kuormakone nopeussäädölle.

$$n = 300; 600; 900; 1200; 1489 \frac{1}{\text{min}}$$

1. $T = 20 \%$
2. $T = 40 \%$
3. $T = 60 \%$
4. $T = 80 \%$

Testeissä havaitaan nimellisa nopeudella sama ilmiö, kuin testissä 5. DC-jännitteiden eroista huolimatta käytöt toimivat hyvin ja virtatasapaino käämiryhmien välillä säilyy nimellisa nopeuden alapuolella. Kuvasta 20 nähdään käyttöjen käyttäytyminen eri vääntömomenttiaskeleilla pyörimisa nopeudella $1200 \frac{1}{\text{min}}$. DC-jännitteiden ero kuvassa 21 on suurimmillaan n. 35 voltia (685...720).



Kuva 21: Vääntömomenttiaskeleet pyörimisa nopeudella $1200 \frac{1}{\text{min}}$, x-akseli 60 sekuntia

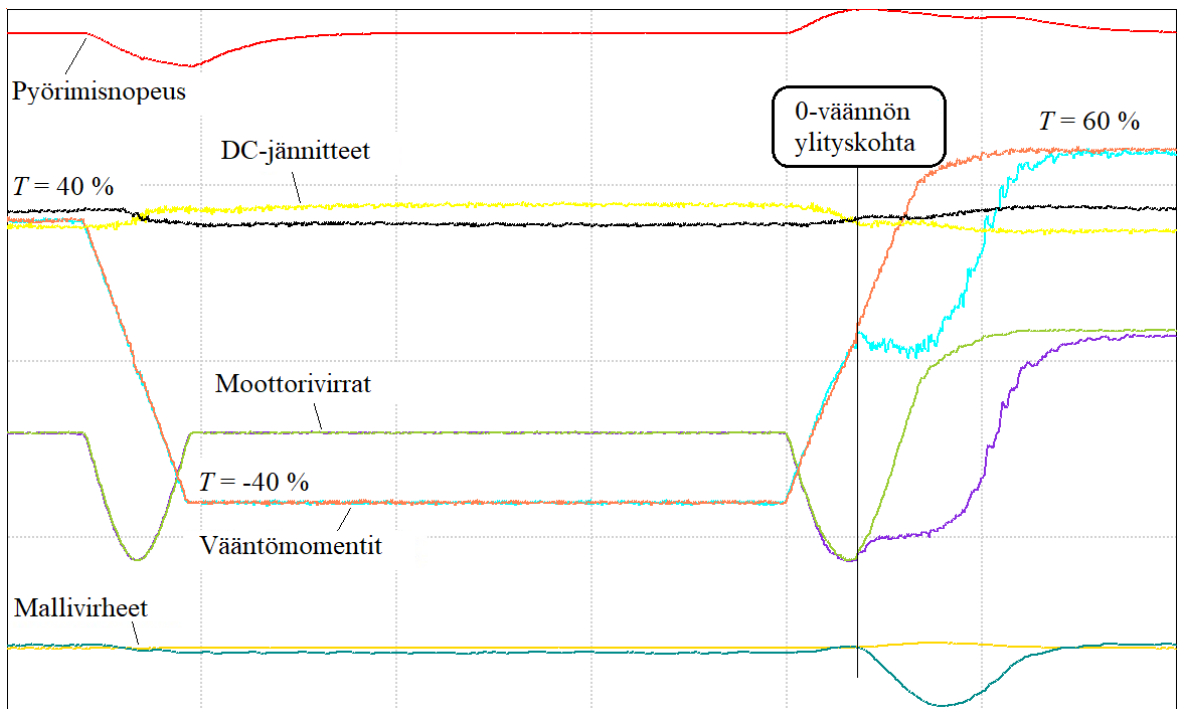
Testi 7: Vääntömomentin etumerkin vaihto eri vääntömomenteilla nimellisa nopeudella. Kaksikämmikone asetetaan vääntömomenttisäädölle PLC:ssä ja kuormakone nopeussäädölle.

$$n = 1489 \frac{1}{\text{min}}$$

1. $T = 20 / -20 \%$
2. $T = 40 / -40 \%$
3. $T = 60 / -60 \%$

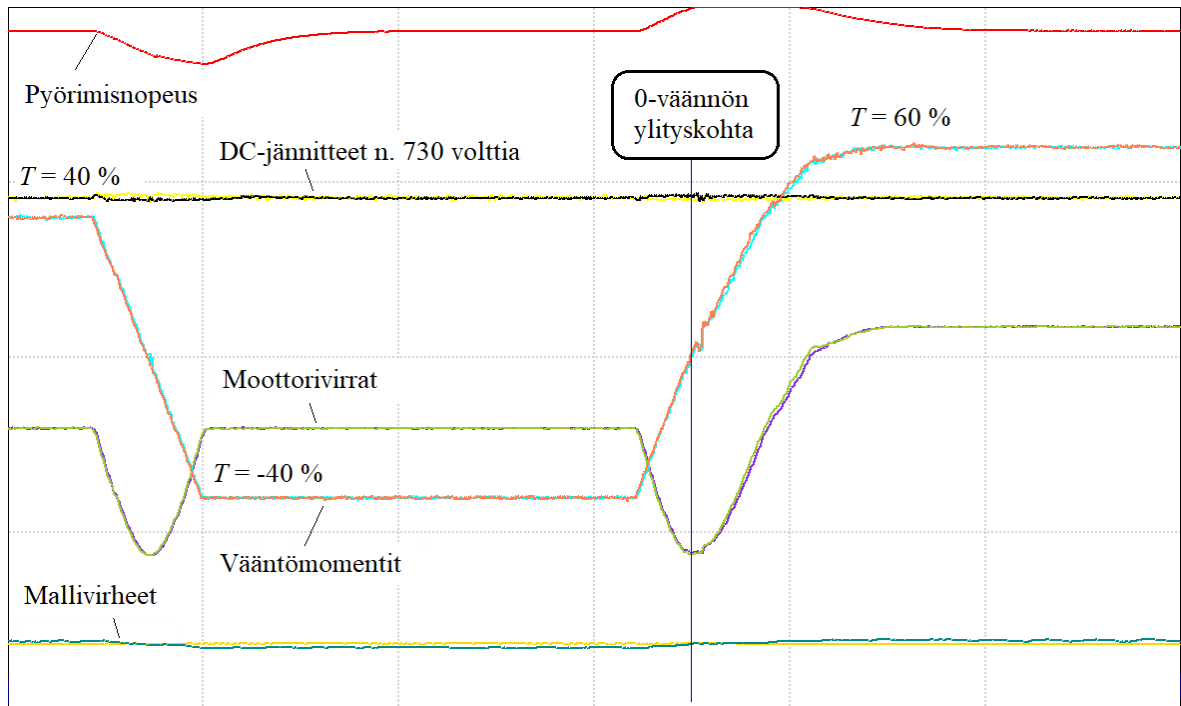
Toteutetaan sama testi mutta molempien syöttömoduulien DC-jännite asetetaan arvoon 730 volttia.

Testituloksista nähdään, että 0-väännön ylitys on herkin kohta käyttäjien tasapainon kannalta. Kuvasta 22 havaitaan, että moottoripuolella pienemmän DC-jännitteen omaava käyttö saa generaattoripuolella toimittaessa korkeamman DC-jännitteen. Mallivirhe on skaalattu kuvassa alueelle $-0,1 \dots 0,03$ ja se käy lukemassa $-0,09$. 0-väännön ylitys generaattoripuolelta moottoripuolelle tultaessa aiheuttaa n. kahden sekunnin viiveen moottoripuolella matalamman DC-jännitteen omaavan käytön 1 vääntömomenttiin ja moottorivirtaan. Moottorivirrat ovat -40 prosentin vääntömomentilla n. 100 ampeeria ja 60 prosentilla n. 135 ampeeria.



Kuva 22: Vääntömomentin etumerkin vaihtoja nimellisa nopeudella, x-akseli 30 sekuntia

Kuvasta 23 alla nähdään DC-jännitteen noston vaikutus. 0-väännön ylityksen jälkeinen käynnön 1 viive sekä mallivirhe poistuvat lähes kokonaan. Moottorivirrat ovat -40 prosentin vääntömomentilla n. 100 ampeeria ja 60 prosentilla n. 135 ampeeria.



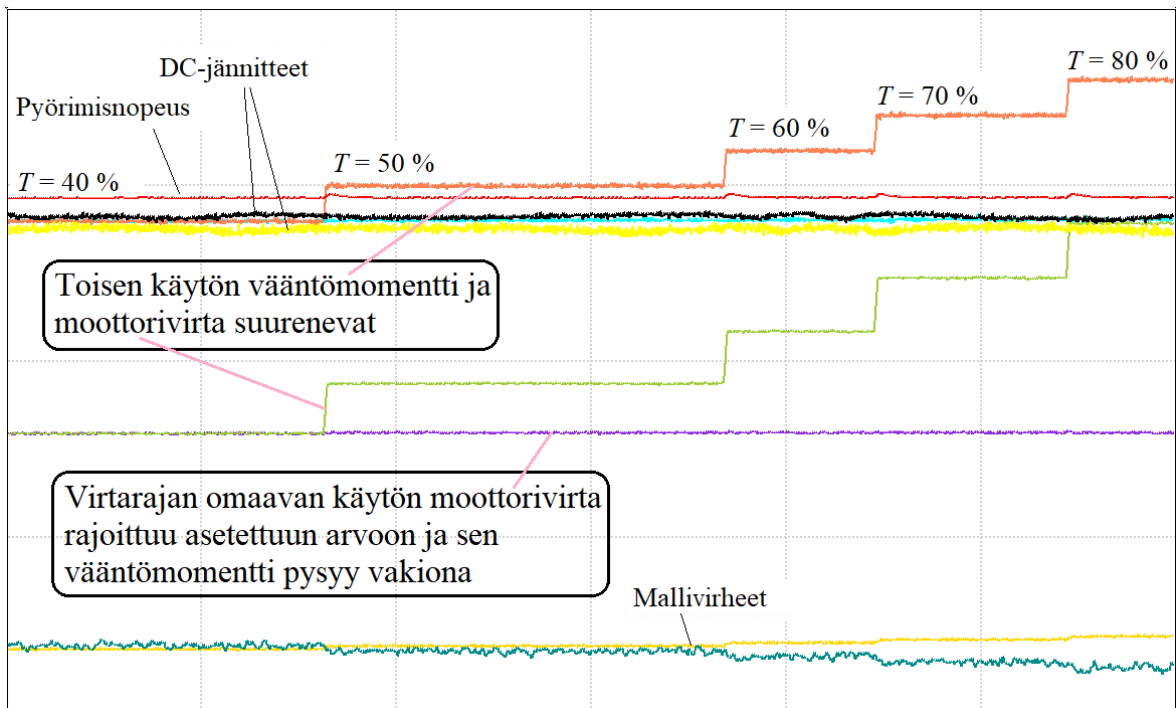
Kuva 23: DC 730 V, vääntömomentin etumerkin vaihtoja nimellinopeudella, x-akseli 30 sekuntia

Testi 8: Asetetaan käytön1 virtarajaksi 100 ampeeria. Ajo puolella nopeudella ja tehdään askelmainen kuormitustesti. Kaksikäämikone asetetaan vääntömomenttisäädölle PLC:ssä ja kuormakone nopeussäädölle.

$$n = 745 \frac{1}{\text{min}}$$

1. $T = 20 \%$
2. $T = 30 \%$
3. $T = 40 \%$
4. $T = 50 \%$
5. $T = 60 \%$
6. $T = 70 \%$
7. $T = 80 \%$

Kuvasta 24 nähdään koneen käyttäytyminen, kun käytöllä 1 on 100 ampeerin virtaraja. Säätö toimii hyvin ja molemmat käytöt jatkavat toimintaa, kun toisen käytön virtaraja tulee vastaan. Mallivirhe suurenee virtarajan saavuttamisen jälkeen vääntömomentin lisääntyessä, kun virtatasapaino menetetään.



Kuva 24: Käytöllä 1 on 100 ampeerin virtaraja

Testi 9: Asetetaan käytön 1 vääntömomentin rajaksi 60 %. Ajo puolella nopeudella, tehdään askelmainen kuormitustesti. Kaksikäähäkone asetetaan vääntömomenttisäädölle PLC:ssä ja kuormakone nopeussäädölle.

$$n = 745 \frac{1}{\text{min}}$$

1. $T = 20 \%$
2. $T = 30 \%$
3. $T = 40 \%$
4. $T = 50 \%$
5. $T = 60 \%$
6. $T = 70 \%$
7. $T = 80 \%$

Toistetaan sama mutta käytön 1 sijaan asetetaan käytön 2 vääntömomentin rajaksi 30 %.

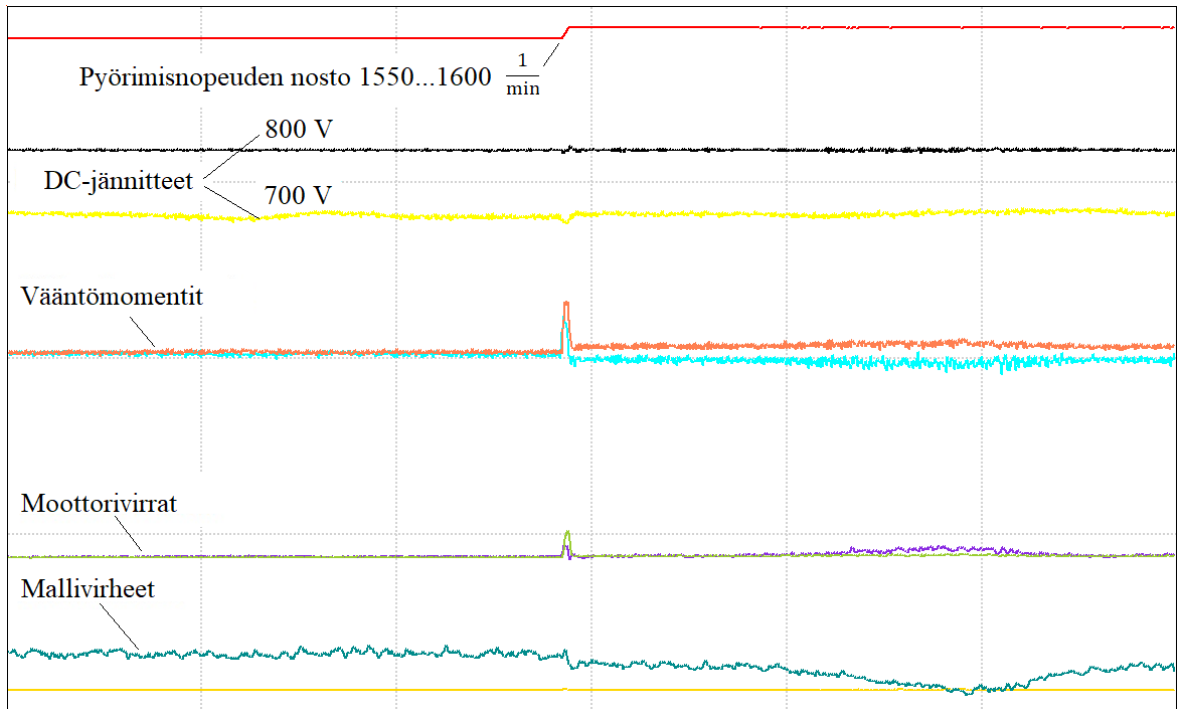
Testeissä havaittiin säädön toimivan hyvin, kuten edellisessä testissä. Molemmat käytöt jatkavat toimintaa, kun toisen käytön asetettu raja tulee vastaan.

Testi 10.0: Eri DC- jännitteet. Testataan, miten järjestelmä käyttäytyy, kun syöttömoduuleille asetetaan alkuun hieman toisistaan poikkeavat DC-jännitteet. Mikäli toimii, niin kokeillaan suuremmilla DC-jännitteiden eroilla.

Kiihdytys nollanopeudesta nimellisnopeuteen ilman kuormaa. Kaksikäänne kone asetetaan nopeussäädölle PLC:ssä. Kuormakonetta ei käytetä, mutta se on kuitenkin kytkettynä, joten sen hitausmomentti on mukana testissä.

1. Käytön 2 syöttömoduulin jännite asetetaan 730 volttiin. Käytön 1 syöttömoduulin 1 jännitteen annetaan määräytyä verkon jännitteen mukaan.
2. Käytön 2 syöttömoduulin jännite asetetaan 800 volttiin. Käytön 1 syöttömoduulin jännitteen annetaan määräytyä verkon jännitteen mukaan.
3. Kuten edellinen kohta, mutta kiihdytys nollanopeudesta nopeuteen 1489 $\frac{1}{\text{min}}$ ja sen jälkeen nopeuden nosto 1550 \rightarrow 1600 $\frac{1}{\text{min}}$.

Testeissä säätö toimi hyvin. Kuvasta 25 nähdään, että ilman kuormaa käämiryhmien tasapaino säilyy melko hyvin vielä nopeudella $1550 \frac{1}{\text{min}}$ mutta sen jälkeen nopeuden kasvaessa käytön 1 modulaatioindeksi ylittää arvon yksi, ja säätö alkaa rajoittaa toimintaa.



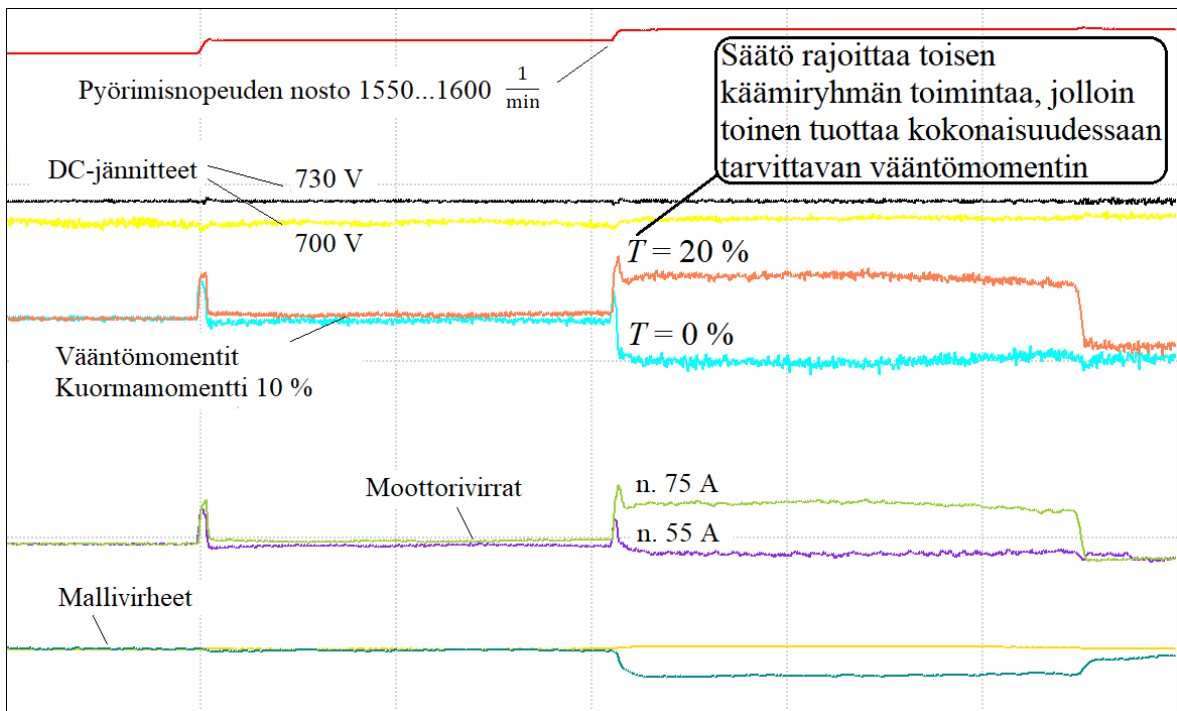
Kuva 25: Pyörimisnopeuden nosto $1550 \dots 1600 \frac{1}{\text{min}}$, eri DC-jännitteet, x-akseli 60 sekuntia

Testi 10.1: Kuten testin 10 kolmas kohta mutta käytön 2 syöttömoduulin 2 jännite asetetaan 730 volttiin.

Testin tuloksena samat havainnot, kuin kohdassa 10.3.

Testi 10.2: Samat testit, kuin 10.0-kohdissa mutta lisäksi käytetään kuormakonetta vääntömomentilla $T = 10 \%$.

Tässäkin testissä säätö toimii mutta pyörimisnopeuden nosto $1550 \dots 1600 \frac{1}{\text{min}}$ aiheuttaa modulointi-indeksin nousun yli yhden ja säätö rajoittaa toimintaa siten, että toinen käämiryhmä tuottaa kokonaisuudessaan vääntömomentin ja kuormaan tarvittavan virran. Toiseen käämiryhmään jää tuotettavaksi vain magnetointiin tarvittava virta, joka nähdään kuvassa 26.



Kuva 26: Pyörimisnopeuden nosto $1550 \dots 1600 \frac{1}{\text{min}}$, Kuormamomentti 10 prosenttia, x-akseli 60 sekuntia

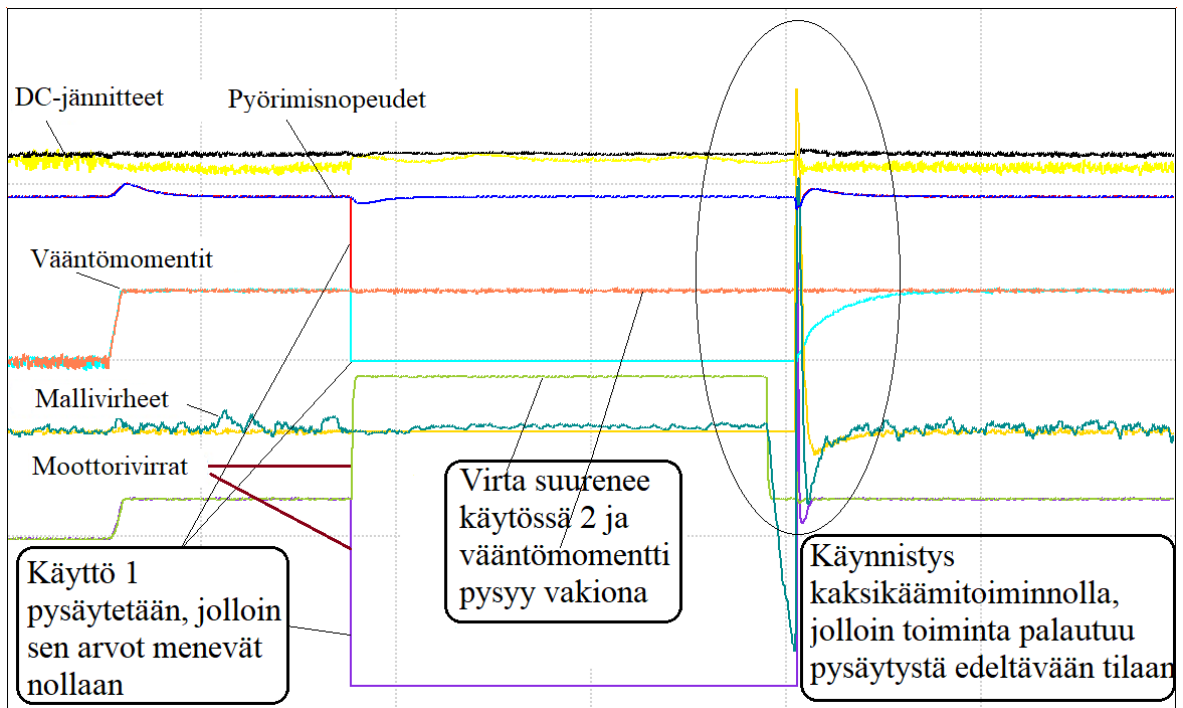
Testi 11: Käynnistys- ja pysäytystilanteet:

Ajo puolella nopeudella 20 prosentin vääntömomentilla. Kaksikäämikone asetetaan vääntömomenttisäädölle PLC:ssä ja kuormakone nopeussäädölle.

$$n = 745 \frac{1}{\text{min}}, T = 20\%$$

Pysäytetään käyttö 1 ja käynnistetään kaksikäämitoiminnolla n. 20 sekunnin kuluttua uudestaan, jonka jälkeen pysäytetään käyttö 2 ja käynnistetään kaksikäämitoiminnolla n. 20 sekunnin kuluttua uudestaan.

Kuvasta 27 nähdään, että säätö toimii oikein. Kun käyttö 1 pysäytetään, sen arvot menevät nolleen. Kuvassa moottorivirta on skaalattu alueelle -10...250 ampeeria, DC-jännite alueelle 0...900 voltia ja mallivirhe alueelle -0,2...0,3. Käyttö 2 tuottaa oman käämiryhmän 20 prosentin vääntömomentin ja koko magnetoinnin, jolloin sen moottorivirta lähes kaksinkertaistuu (69...114 ampeeria). Uudelleenkäynnistyksen jälkeen käytöt asettuvat takaisin tasapainoon.



Kuva 27: Pysäytys ja käynnistys puolella nopeudella 20 prosentin vääntömomentilla, x-akseli 60 sekuntia

Testi 12: Ajo hitaalla nopeudella. Kuormakonetta ei käytetä, mutta se on kuitenkin kytketty, joten sen hitausmomentti on mukana testissä. Kaksikäämikone asetetaan nopeussäädölle PLC:ssä.

$$n = 10 \frac{1}{\text{min}}$$

Pysäytetään käyttö 1 ja käynnistetään kaksikäämitoiminnolla 5 sekunnin kuluessa uudelleen.

Pysäytetään käyttö 2 ja käynnistetään kaksikäämitoiminnolla 5 sekunnin kulluttua uudestaan.

Testin tuloksena nähtiin, että säätö toimii myös pienillä nopeuksilla.

Testi 13: DC-jännitteiden vaihtelutesti. Testataan vaihdella DC-jännitteitä kaksikääkoneen ollessa nopeussäädöllä.

Ajo puolella nopeudella ilman kuormaa.

$$n = 745 \frac{1}{\text{min}}$$

Käytön 2 DC-jännitteet:

730; 800; 700; 850; 750 V

Sama toistetaan käytöllä 1.

Samat testit toistetaan vielä siten, että kuormakoneelle asetetaan 10 % vääntömomenttia.

Testin tuloksena nähtiin, että säätö toimii hyvin.

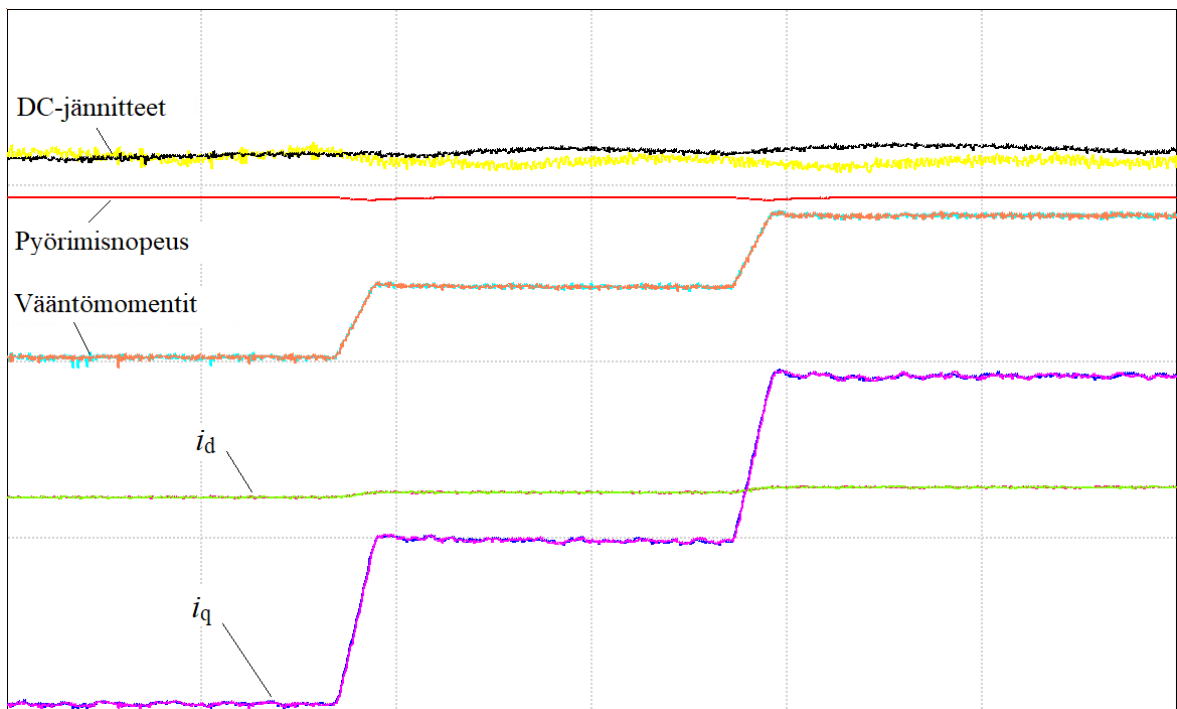
Testi 15: i_d ja i_q -virtojen käyttäytyminen kahdella käämillä vs. yhdellä käämillä, kun tehdään kuormaisku. Kaksikäämikone nopeussäädöllä ja kuormakone momenttisäädöllä.

Ajo puolella nopeudella.

$$n = 745 \frac{1}{\text{min}}$$

1. $T = 20 \%$
2. $T = 40 \%$

Testin tuloksena (kuva 28) nähdään, että Karttusen et al. (2012) havaitsemaa dynaamisen suorituskyvyn heikkenemistä ei ilmene kahden käämiryhmän yhteiskäytössä.



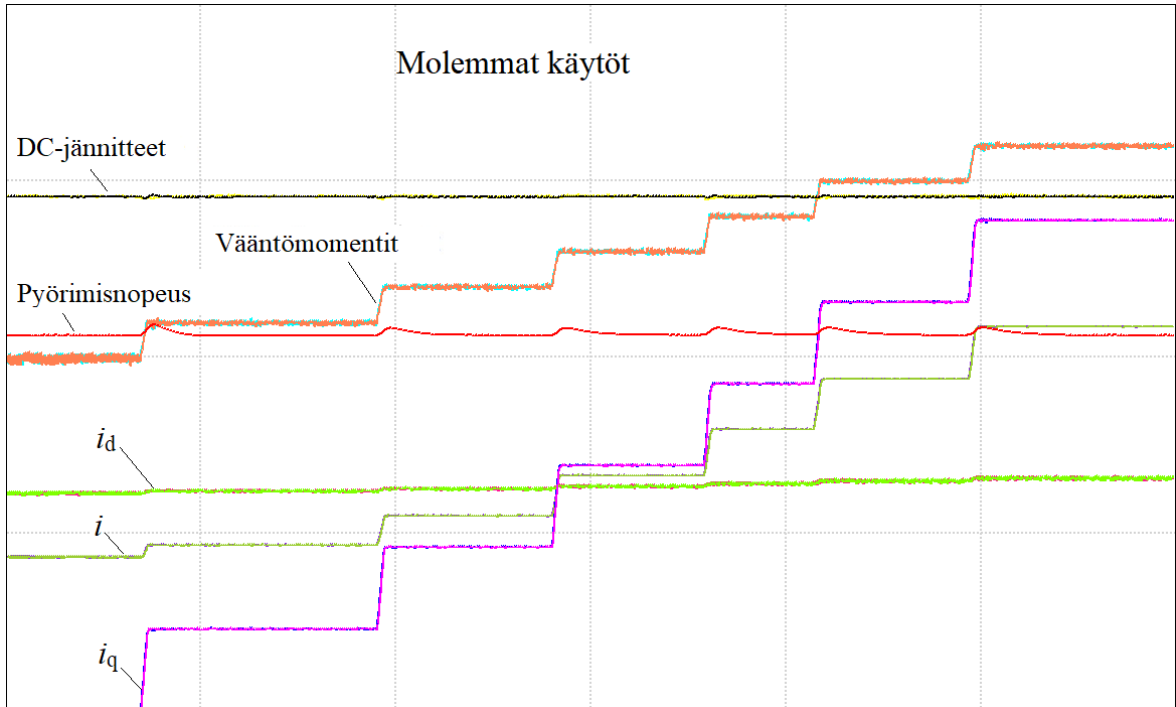
Kuva 28: i_d ja i_q -virtojen käyttäytyminen kahdella käämiryhmällä, x-akseli 30 sekuntia

Kokeillaan vielä i_d ja i_q -virtojen käyttäytyminen kahdella käämillä vs. yhdellä käämillä, siten että kaksikäämikone asetetaan vääntömomenttisäädölle ja kuormakone nopeussäädölle. Tehdään alla olevat vääntömomenttiaskeleet ensin kahdella käämiryhmällä ja sitten samat niin, että käyttö 1 pysäytetään. Sen jälkeen suoritetaan samat testit vielä nimellisnopeudella. Tämän jälkeen testataan pysäytyksen jälkeen kaksikäämitoiminnolla 0-vääntömomentistä suoraan 60 prosenttiin ja viimeisenä pysäytetään käyttö 1 ja toistetaan edellinen käytöllä 2.

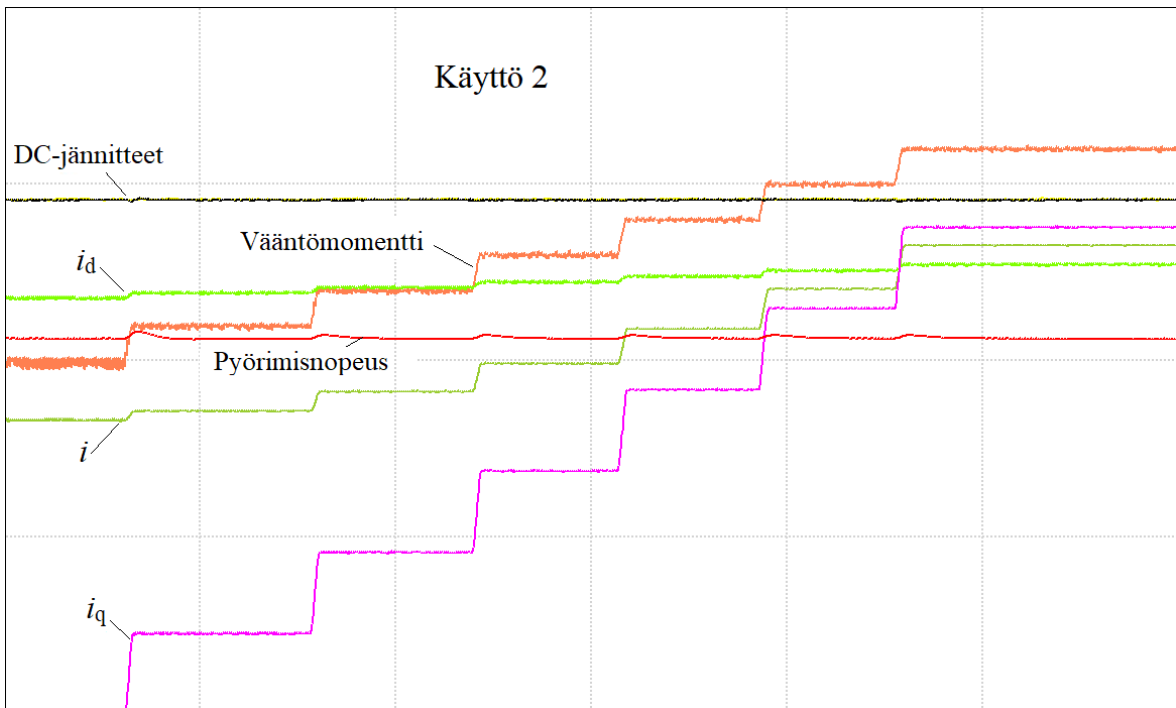
$$n = 100 \frac{1}{\text{min}}$$

1. $T = 0 \%$
2. $T = 10 \%$
3. $T = 20 \%$
4. $T = 30 \%$
5. $T = 40 \%$
6. $T = 50 \%$
7. $T = 60 \%$

Testin tuloksena (kuvat 29 ja 30) nähdään, että Karttusen et al. (2012) havaitsemaa dynaamisen suorituskyvyn heikkenemistä ei ilmene kahden käämiryhmän yhteisajossa.



Kuva 29: i_d ja i_q -virtojen käyttäytyminen kahdella käämiryhmällä, x-akseli 30 sekuntia



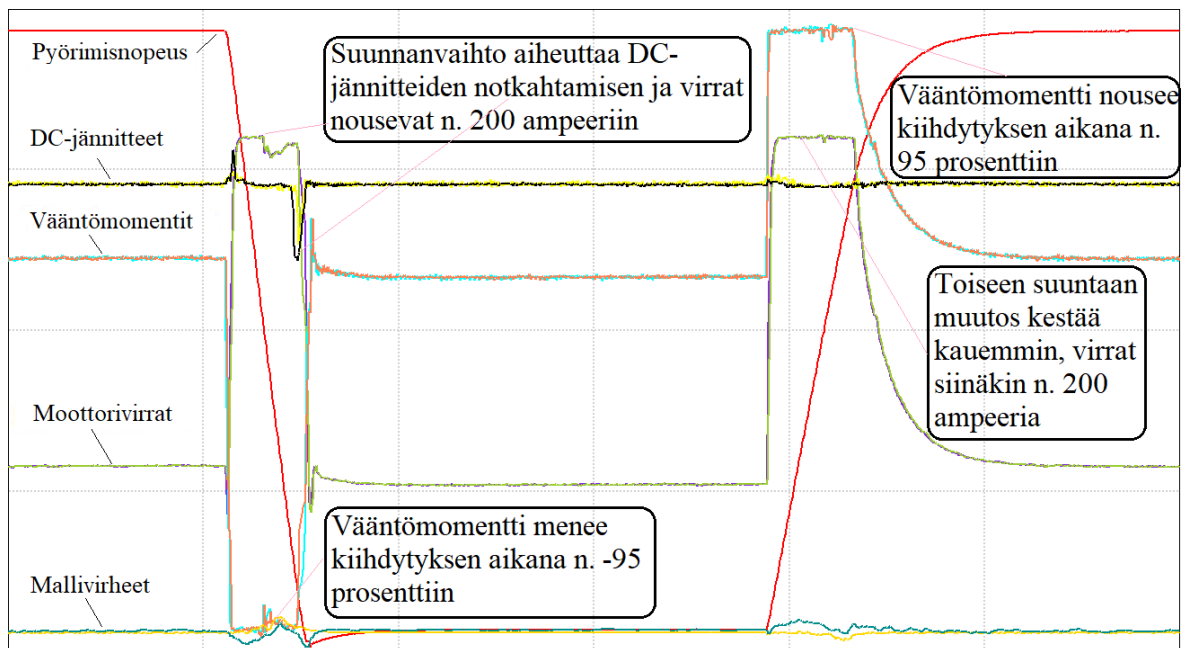
Kuva 30: i_d ja i_q -virtojen käyttäytyminen yhdellä käämiryhmällä, x-akseli 30 sekuntia

Testi 16: Pyörimissuunnan vaihtoja nimellisnopeudella nopealla rampilla. Kaksikäimikone asetetaan nopeussäädölle PLC:ssä ja kuormakone vääntömomenttisäädölle. Pyörimisnopeuden ramppi yksi sekunti.

$$n = 1489/-1489/1489 \frac{1}{\text{min}}$$

1. $T = 0 \%$
2. $T = 20 \%$

Testin tuloksena nähdään, että nopeat suunnanmuutokset onnistuvat myös hyvin. Kuvassa 31 nähdään pyörimisnopeuden muutos 20 prosentin kuormitusmomentilla pyörimisnopeuksilla $1489/-1489/1489 \frac{1}{\text{min}}$. Generaattoripuolelta moottoripuolelle tapahtuva viive pyörimisnopeudessa johtuu todennäköisesti nopeussäätäjästä.



Kuva 31: Nopeat pyörimissuunnan vaihdot 20 prosentin kuormitusmomentilla, x-akseli 30 sekuntia

Testi 17: Testataan käynnistystä sähkökatkon jälkeen. Kaksikäämikone asetetaan nopeussäädölle PLC:ssä. Kuormakonetta ei käytetä, mutta se on kuitenkin kytketty. Pysäytetään molemmat muuttajat vuorotellen ja tehdään uudelleen käynnistys kaksikäämimoodissa.

$$n = 50 \frac{1}{\text{min}}$$

Sähkökatkon jälkeen järjestelmä käynnistyi hyvin ilman mitään erityishuomioita.

5.2.3 Johtopäätökset testituloksista

Suoritetut testit osoittivat, että virtaestimoitu erillissäätö toimii hyvin kaksikäämi-induktiokoneella myös erikoistilanteissa. Suoritetuissa testeissä havaittiin ilmiöitä, joista osa johtui järjestelmän komponenteista, mikä voidaan ottaa huomioon jatkossa järjestelmän mitoituksessa. Moottorimallia parannettiin indentifointiajon jälkeen kohdassa 5.1.1 esitetyllä tavalla tehdyillä parametrikorjauksilla ja oletetun mukaisesti Karttusen et al. (2012) havaitsemaa dynaamisen suorituskyvyn heikkenemistä kahdella käämiryhmällä verrattuna yhden käämiryhmän ajoon ei enää ilmennyt. Karttusen et al. (2012) tutkimuksessa ei tehty moottorimalliin parametrimuutoksia, joilla taajuusmuuttajien tuntematon vuorovaikutus pyritään poistamaan.

Testijärjestelmä asetti rajoitteita suoritettaville testeille, eikä moottorikäyttöä voitu ajaa äärrajoilla. Lisäksi taajuusmuuttajien syöttömoduulit olivat eritehoiset, mikä näkyi testituloksissa erityisesti suurilla tehoilla nimellisnopeuden ympäristössä, koska kentänheikennyspiste saavutettiin käytöillä eriaikaisesti.

Testeillä osoitettiin, että järjestelmä toimii hyvin ja virtatasapaino käyttöjen välillä säilyy, vaikka niitä syötetään erillisillä syöttömoduuleilla, joiden DC-jännitteet poikkeavat toisistaan. Testijärjestelmän käytön 1 syöttömoduuli ei kuitenkaan ollut tarpeeksi tehokas, minkä vuoksi käyttö 1 ei pystynyt tuottamaan tarpeeksi korkeaa DC-jännitettä, jonka seurauksena se saavutti kentänheikennyspisteen ennen käyttöä 2. Tällöin säätö alkoi rajoittaa käytön 1 toimintaa ja virtatasapaino heikkeni, minkä seurauksena mallivirhe suureni. Generaattoripuolella käytön 1 DC-jännite pysyi yllä korkeillakin vääntömomenteilla, mutta moottoripuolelle siirryttäessä sen teho ei enää riittänyt ylläpitämään tarpeeksi korkeaa jännitettä. Kun syöttömoduulien DC-jännitteitä kasvatettiin asettamalla niille manuaalisesti korkeampia arvoja, niin kentänheikennyspiste siirtyi korkeammalle ja virtatasapaino käyttöjen välillä säilyi myös suuremmilla vääntömomenteilla ja pyörimisnopeuksilla. Testien perusteella voidaan todeta, että järjestelmää voidaan hyvin syöttää kahdella eri syöttömoduulilla, kunhan ne ovat riittävän tehokkaita.

Käynnistys ja pysäytystilanteet onnistuivat myös hyvin, eikä ongelmia sähkökatkon jälkeen ilmennyt. Siirryttäessä kahden käytön toiminnasta yhden käytön toimintaan, toinen käyttö joutuu tuottamaan koneen magnetointivirran kokonaisuudessaan, jolloin se kaksinkertaistuu. Kun kaksikäähäkone on nopeussäädöllä ja toinen käyttö pysäytetään, niin toimimaan jäävän käytön vääntömomentti kaksinkertaistuu. Moottorimallin parametrien vaihto yhden käämiryhmän toimintaa vastaavaksi tapahtuu automaattisesti.

Nopeat suunnanvaihdot onnistuivat myös hyvin. Generaattoripuolelta moottoripuolelle siirryttäessä asetetun pyörimisnopeuden saavuttamiseen tuli pientä viivettä, mutta tämä johtui todennäköisesti nopeussäätäjän virityksestä, jolloin sisäinen vääntömomenttiohje jäi hetkellisesti liian alhaiseksi.

6 YHTEENVETO

Turvallisen toiminnan takaamiseksi sähköisten propulsiojärjestelmien tulee olla redundantteja. Kustannustehokas ja tilaa säästävä vaihtoehto on toteuttaa redundanttius monivaiheisella kaksikäämikoneella, jossa kahta galvaanisesti toisistaan erillään olevaa kolmivaiheista staattorikäämiryhmää ohjataan itsenäisillä taajuusmuuttajilla. Monivaiheisella kaksikäämikoneella voidaan saavuttaa huomattavia etuja tavalliseen kolmivaihejärjestelmään verrattuna.

Virtaestimoitu erillissäätö on edullinen ja helposti käyttöön otettava menetelmä kaksikäämikonekäyttöjen ohjaukseen. Erillissäädössä kaksikäämikone mallinnetaan perinteisen kolmivaihekoneen yhtälöillä, eikä käämiryhmien välistä kytkeytymistä oteta huomioon. Sädössä käytetään virtaestimaattia mitatun virran asemesta, eikä virtatietoja jaeta säätöjen kesken. Virtaestimaatin avulla saadaan poistettua säätöjen välinen kytkeytyminen.

Kaksikäämi-induktiokoneissa magnetointi tapahtuu staattorin kautta ja se on virtaestimoidun erillissäädön kannalta haastavaa, koska virran estimoinnin virhe aiheuttaa virhettä myös vuoestimaatiin. Vuon estimoinnin virheellä ei ole yhtä suurta merkitystä tahtikoneissa ja kestopagneettitahtikoneissa, joissa magnetointi tapahtuu roottorin kautta.

Tässä tutkimuksessa osoitettiin mittauksin virtaestimoidun erillissäädön toimivuus kaksikäämi-induktiokoneella, koneen eri toiminta-alueilla. Sädön toimivuus osoitettiin myös erillisillä syöttömoduuleilla ja erisuuruisilla DC-jännitteillä. Lisäksi osoitettiin, että erillissäädön ongelmana pidetty dynaamisen suorituskyvyn heikkeneminen saadaan poistettua käyttämällä virtaestimaattia ja tekemällä moottorimallia parantavia parametrikorjauksia identifiointiajon jälkeen.

Tulosten perusteella virtaestimoitu erillissäätö soveltuu hyvin kaksikäämi-induktiokoneiden ohjaukseen, eikä koneen dynamiikka kärsi matalillakaan pyörimisnopeuksilla. Luotettavan toiminnan takaamiseksi erillissäädön käyttö kaksikäämi-induktiokoneen ohjaukseen vaatii virran estimointia, moottorimallia parantavia parametrikorjauksia ja roottorivuon kenttäorientaatiokulman päivittämistä käytöltä toiselle. Toiminta kentänheikennysalueella on vielä ongelmallinen, koska se alkaa käytöillä eriaikaisesti ja tällöin virtatasapaino menetetään.

Työ oli kokonaisuudessaan varsin opettavainen ja asetetut tavoitteet saavutettiin onnistuneesti. Virtaestimoitu erillissäätö reunaehdot huomioon ottaen sopii todennäköisesti hyvin myös muiden konetyyppien ohjaukseen, koska induktiokone on erillissäädön kannalta haastavin konetyyppi. Jatkotutkimusta kuitenkin tarvitaan ja virtaestimoitua erillissäätöä yhdessä moottorimallia parantavien parametrikorjausten kanssa on tarpeen testata laajemmin eri konetyypeillä. Myös erillisten syöttömoduulien käyttöä ja niiden vaikutuksia olisi hyvä tutkia tarkemmin. Lisäksi olisi hyvä tutkia, miten taajuusmuuttajat saataisiin synkronoitua keskenään siten, että kentänheikennys saataisiin alkamaan molemmilla käytöillä samanaikaisesti.

LÄHTEET

Andriollo, M., Bettanini, G., Morini, A., ja Tortella, A. 2009. Analysis of Double-Star Permanent-Magnet Synchronous Generators by a General Decoupled d-q Model. *IEEE Transactions on Industry Applications*, 45:4, 1416-1424.

Bojoi, R., Levi, E., Farina, F., Tenconi, A., ja Promufo, F. 2006. Dual three-phase induction motor drive with digital current control in the stationary reference frame. *IET Electric Power Applications*. 153:1, 129-139.

Burzanowska, H., Sario, P., Stulz, Ch. & Joerg, P. 2007. Redundant Drive with Direct Torque Control (DTC) and Dual-Star Synchronous Machine, *Simulations and Verification European Conf. Power Electronics and Applications (EPE)*.

Fuchs, E., Rosenberg, L. 1974. Analysis of an Alternator with Two Displaced Stator Windings. *IEEE Transactions on Power Apparatus and Systems*. PAS-93:6, 1776-1786.

Harnefors, L., Hinkkanen, M., Wallmark, O., Yepes, A.G. *Control of Voltage-Source Converters and Variable-Speed Drives*. 2015. 270 s.

Heinonen, M. 2018. Kaksikäähäkone redundantisessa taajuusmuuttajakäytössä. Aalto-yliopisto. Automation and Electrical Engineering. Diplomityö. 60 s.

Kallio, S. 2014 Modeling and Parameter Estimation of Double-Star Permanent Magnet Synchronous Machines. Lappeenrannan teknillinen yliopisto. 68 s. Väitöskirja.

Kallio, S., Andriollo, M., Tortella, A., Karttunen, J. 2013. Decoupled d-q Model of Double-Star Interior-Permanent-Magnet Synchronous Machines. *IEEE Transactions on Industrial Electronics*. 60:6

Kaukonen, J. 1999. Salient Pole Synchronous Machine Modelling in an Industrial Direct Torque Controlled Drive Application. Lappeenrannan teknillinen yliopisto. 138 s. Väitöskirja.

Kostiainen, M., S. 2019. Independently controlled double winding motor. Parameter transformation for induction motor. ABB Corporate Research Oy, Helsinki. Tutkimusraportti. 18 s.

Kropsu, J. 2019 Kaksikääinen oikosulkumoottori redundantisessa taajuusmuuttajaohjauksessa. Vaasan yliopisto. Tekniikan ja innovaatiojohtamisen yksikkö. Sähkötekniikka. Diplomityö. 63 s.

Lauri Aura, Antti J. Tonteri 1996. Sähkökoneet ja tehoelektronikan perusteet. Helsinki, Porvoo, Juva: Werner Söderström Osakeyhtiö.

Levi, E., R. Bojoi, F. Profumo, H. A. Toliyat & S. Williamson. 2007. Multiphase induction motor drives - a technology status review. *IET Electric Power Applications*.1: 3, 489–516.

Lipo, T.A. 1980. A d-g Model for Six Phase Induction Machines. in *Proc. Int. Electrical Machines Conf. ICEM*.

Nelson, R.H., Krause, P.C. 1974. Induction Machine Analysis for Arbitrary Displacement Between Multiple Winding Sets. *IEEE Transactions on Power Apparatus and Systems*, PAS-93:3, 841-848.

Niiranen, J. 2001. Equivalent circuit and per unit system for a 2 x 3 phase 30° synchronous machine. ABB Corporate Research Oy, Helsinki. Tutkimusraportti. 10 s.

Pasuri, O., Heikkilä, S. 2019. Double winding asynchronous motor testing at Vaasa and Helsinki Q4/2018. Test arrangements, tests and results. ABB Corporate Research Oy, Helsinki. Tutkimusraportti. 31 s.

Pyrhönen, J. 2006. Sähkökäyttökoneiden perusteet. Luentomoniste. Lappeenranta teknillinen yliopisto.

Pyrhönen, J., Hrabovcova, V & Semken. *Electrical Machine Drives Control an Introduction*. 1. painos. John Wiley & Sons, 2016. 524 s.

Pyrhönen, J., Jokinen, T. & Hrabovcova, V. *Design of rotating electrical machines*. 2. painos. John Wiley & Sons, 2013. 612 s.

Salminen, P. 2004. Fractional Slot Permanent Magnet Synchronous Motors for low Speed Applications. Lappeenrannan teknillinen yliopisto. 150 s. Väitöskirja.

Schiferl, R.F., Ong, C.M. 1983a. Six Phase Synchronous Machine With AC and DC Stator Connections, Part 1: Equivalent Circuit Representation and Steady-State Analysis. *IEEE Transaction on Power Apparatus and Systems*, PAS-102:8, 2685-2693.

Schroderus, P., & Heikkilä, S. 2001. U.S. Patent No. 6,195,274. Washington, DC: U.S. Patent and Trademark Office.

Singh, G. K., K. Nam & S. K. Lim 2005. A simple Indirect Field-Oriented Control Scheme for Multiphase Induction Machine. *IEEE transactions on industrial electronics* 52:4, 1177-1184.

Tessaloro, A. Modeling and analysis of multiphase electric machines for high power applications. 2011. Ph.D. Thesis, The University of Trieste, Trieste, Italy.

Westerlund, J. 2015. YY0 mutual inductance of induction generator. ABB Oy, Helsinki. Sisäinen raportti. 9 s

Westerlund, J. 2015. YY30 mutual inductance of induction generator. ABB Oy, Helsinki. Sisäinen raportti. 7 s.

Zhao, Y., Lipo, T. 1995. Space Vector PWM Control of Dual Three-Phase Induction Machine Using Vector Space Decomposition. *IEEE Transaction on Industry Applications* 31:5, 1100-1109.