

Petri Teittinen

Kaksoistaajuus kuormituskokeen epästabiilius saarekeverkossa

Metropolia Ammattikorkeakoulu

Insinööri (AMK)

Koulutusohjelman nimi

Insinöörityö

15.9.2012

Alkulause

Tämä insinööri työ tehtiin ABB Oy Moottorit ja generaattorit-yksikön koestamolle Helsingissä Pitäjänmäellä. Työssä tutkittiin kaksoistaajuuskuormituskokeessa esiintyvien ongelmien syitä. Työ oli erittäin haasteellinen mutta samalla hyvin mielenkiintoinen. Työn aikana koettiin lukuisia vaikeuksia, mutta ongelmista ja vaikeuksista huolimatta työ valmistui.

Haluan kiittää koestamon päällikköä, ins. Tero Väisästä mielenkiintoisesta aiheesta. Erityinen kiitos kuuluu koestamon kehityspäällikkö Jukka Putaansuulle ja Jari Mourulle, joita ilman työssäni tehdyt mittaukset eivät olisi onnistuneet. Kiitän myös työni valvojaa lehtori, tekn. lis. Jarno Vartevaa Metropolia Ammattikorkeakoulusta.

Helsingissä 26.9.2013

Petri Teittinen

Tekijä Otsikko	Petri Teittinen Kaksoistaajuus saarekeverkossa	kuormituskokeen	epästabiilius
Sivumäärä Aika	28 sivua 15.9.2012		
Tutkinto	insinööri (AMK)		
Koulutusohjelma	sähkötekniikka		
Suuntautumisvaihtoehto	sähkövoimatekniikka		
Ohjaajat	koestamon päällikkö ins. Tero Väisänen lehtori, TkL Jarno Varteva		
<p>Insinööriytyössä tutkittiin suurille induktiokoneille tehtävässä kaksoistaajuuskuormituskokeessa ilmenneitä epästabiiliusongelmia. Tarkoituksena oli löytää mahdollisia syitä epästabiiliudelle ja toisaalta myös poissulkea asioita, mistä epästabiilius ei ainakaan johdu, jotta tulevaisuudessa käytettävissä olevat tutkimusvoimavarat voitaisiin kohdistaa oleellisiin oikeisiin ongelmakohtiin mahdollisimman tehokkaasti.</p> <p>Kaksoistaajuuskuormituskokeen tutkiminen aloitettiin perehtymällä menetelmään ja menetelmään oleellisesti liittyvään teoriaan. Tämän lisäksi perehdyttiin kaksoistaajuuskuormituskokeessa käytettävään verkkoon.</p> <p>Tämän jälkeen suurelle induktiokoneelle suoritettiin kaksoistaajuuskuormituskoe. Tuloksia analysoitaessa tarkoitus oli löytää ja havaita muutoksia verkon syötössä juuri ennen kuormituksen trippaamista. Mittausten perusteella ei voitu osoittaa selvää syytä epästabiiliudelle. Tuloksista nähtiin seuraus jollekin ilmiölle eikä ilmiön syntyyn liittyvää syytä.</p> <p>Kaksoistaajuuskuormitus-menetelmän ongelmien selvittäminen on tarpeellista, koska nykyisin koneen kuormalle saamiseen voi epästabiiliuden takia kulua paljon ylimääräistä aikaa. Tämä insinööriytyö toimii tulevien tutkimusten väliraporttina.</p>			
Avainsanat	kaksoistaajuuskuormituskoe, epästabiilius		

Author Title	Petri Teittinen The Instability of the Two-Frequency-Method in Island-Network
Number of Pages Date	28 pages 15 September 2012
Degree	Bachelor of Engineering
Degree Programme	Electrical Engineering
Specialisation option	Electrical Power Engineering
Instructors	Manager of Test Field, Tero Väisänen Senior Lecturer, Jarno Varteva
<p>The purpose of this study was to research the instability of the two-frequency heat-run method, which is used for determining temperature-rise of large asynchronous machines.</p> <p>The goal was to find possible reasons for instability and, on the other hand, to exclude some reasons from which the instability does not result, so that research in the future could be focused on the actual problem areas.</p> <p>The research was started by familiarizing carefully with the method itself and the theory that is closely related to the topic. In addition, the grid which is used in the two-frequency-method was studied.</p> <p>After this, the two-frequency-test was performed for a large asynchronous machine. In analyzing the results, the idea was to observe and find changes in the input of the power system immediately before the tripping of the system. Based on the measurements, it is not possible to show an obvious cause for the instability. It is only possible to see the consequence, not the reason for the phenomenon.</p> <p>The solving of the problems related to the two-frequency-method is necessary because the instability of the system can waste a huge amount of time. This thesis works as a temporary report for the upcoming research.</p>	
Keywords	two-frequency method, instability

Sisällys

Lyhenteet

1	Johdanto	1
2	Lämpenemä	3
2.1	Lämpeneminen sähkökoneissa	3
2.2	Pyörrevirrat	3
2.3	Rautahäviöt	4
3	Kaksoistaajuuslämpenemä	6
3.1	Kaksi taajuutta verkossa	6
3.2	Jänniteaaltojen huojunta	7
3.3	Kahden samanaikaisen taajuuden analysoiminen verkossa	10
3.4	Kaksoistaajuuskuormituskoe	11
4	2f-testissä käytetty verkko	16
4.1	2f-verkon komponentit	16
4.2	Epätahtikone	17
4.3	Epätahtikone kaksoistaajuusverkon komponenttina	19
4.4	Oikosulkumoottori vektorisäädettynä	20
4.5	Testattava epätahtikone, induktiomoottori	22
4.6	Epätahtikone generaattorina	22
4.7	Taajuusmuuttaja 2f-verkon komponenttina	24
5	Kaksoistaajuuskuormituskokeen epästabiiliuden tutkimista varten tehty testi	25
6	Yhteenveto	27
	Lähteet	29

Lyhenteet

A	amplitudi
J	hitausmomentti
2f	kaksi taajuutta/ kaksoistaajuus
ω	kulmanopeus
W_j	liike-energia
n_s	magneettikentän pyörimisnopeus
MMV	magnetomotorinen voima
T	momentti
n_0	moottorin tyhjäkäyntipyörimisnopeus
i_d	moottorin vuovektorin kanssa samansuuntainen virtakomponentti
i_q	moottorin vuovektoria vastaan kohtisuorassa oleva virtakomponentti
M_m	moottorin vääntömomentti
p	napaparien lukumäärä
n	pyörimisnopeus
smv	sähkömotorinen voima
f/Hz	taajuus Hertzeissä
dc	tasavirta/ direct current/
P	teho

rms tehollisarvo (*root mean square*)

R resistanssi

s suhteellinen jättämä

I virta

ϕ vuo

1 Johdanto

ABB Oy on johtava sähkövoima- ja automaatioteknologiayhtymä, jonka tuotteet järjestelmät ja palvelut parantavat teollisuus- ja energiayhtiöasiakkaiden kilpailukykyä ympäristömyönteisesti. ABB:n palveluksessa on noin 145 000 työntekijää noin sadassa maassa. Suomessa ABB:ssä on sähkövoima- ja automaatioteknologioiden erikoisosaamista 120 vuoden kokemuksella. Suomessa ABB:n palveluksessa on noin 6 800 henkilöä.

Pitäjänmäen konetehtaassa sijaitsevassa koestamossa työskentelee nykyään 14 toimihenkilöä ja noin 50 koestajaa osa-aikaiset mukaanluettuna, joiden tehtäviin kuuluu valmiiden koneiden testaaminen ja loppukoestusten suorittaminen. Koestamon päätehtävä on olla osa laadun valvontaa ja siten laadun takaaminen valmiille koneille. Mahdollisia tapoja testata ja koestaa koneita on monia. Kaikille tehtaalla valmistuville koneille tehdään vähintään kappalekoestus, jota kutsutaan myös rutiinikokeeksi. Kappalekokeiden lisäksi asiakas voi toivoa lajikokeita, ja välillä myös suunnittelu haluaa erikoiskoestuksia. Koestuksista laaditaan aina pöytäkirjat asiakkaita ja suunnittelua varten. Tehtäviin kuuluu myös kaikkien pöytäkirjojen arkistointi ja jakelu. Edellä mainittujen tehtävien lisäksi koestamo vastaa niin omien mittareiden kalibroinneista ja huollosta kuin koestuksessa käytettävien sähkönsyöttöjärjestelmien ylläpidosta ja huollosta.

Tässä insinööriyössä tutkitaan suuren epätahtikoneen kuormituskokeen epästabiiliutta, kun se suoritetaan kaksoistaajuus-sähkönsyötöllä kahdella eri taajuudella käyttämällä kahta generaattoria sarjaan kytkettynä. Testeissä moottori ajettiin eri tavoilla kuormalle kahta taajuutta käyttäen ja huomiota kiinnitettiin erityisesti käynnistysvaiheeseen, mikä nimenomaan on aiheuttanut ongelmia mutta vain tietyille moottorityypeille ja vain suuremmilla tehoilla. Aikaisemmin kaksoistaajuuskuormituksia on suoritettu lähinnä pienemmille epätahtikoneille, mutta nyt koneiden koot ja tehot ovat kasvaneet ja tulevaisuudessa todennäköisesti kasvavat entisestään.

Suurille epätahtikoneille ei voida tehdä perinteistä lämpenemäkoetta, joten tarve toimivalle kaksoistaajuuskuormituskokeelle on olemassa. Työn tarkoituksena on saada tutkimustuloksia tavasta käynnistää nimelliskuormitusta simuloiva kaksoistaajuuskuormitus suurelle epätahtikoneelle. Halutaan myös tutkia, mikä

aiheuttaa saarekeverkon kaatumisen ja mikä aiheuttaa verkon suoja-releiden laukeamisen. Koska tämä verkko koostuu hyvin monesta osasta ja komponentista, voidaan olla melko tyytyväisiä jo tulokseen, millä mahdollisten verkon kaatumiseen johtavien syiden joukkoa saadaan kavennettua. Tämä mahdollistaa tulevien tutkimusvoimavarojen keskittämisen verkon oikeaan ongelma kohtaan. Erittäin suuria ongelmia on aiheuttanut myös testissä käytettävä taajuusero, jolle ei näytä löytyvän mitään järjellistä syytä. Vielä ei löydy selkeää syytä taajuuseron vaikutukseen koko testiin, lämpenemään sekä erityisesti stabiiliuteen.

Työ koskee yhtä suuritehoista moottorityyppiä, mutta jotta voitaisiin tarkastella eroa ongelmattomaan kaksoistaajuuskuormituskokeeseen, mittaukset on tarkoitus suorittaa myös hieman pienemmälle ja samalla ongelmattomaksi tiedetylle induktiomoottorille. Molemmissa mittauksissa keskitytään tarkastelemaan koneiden käynnistymisvaihetta ja verkon tapahtumia käynnistyksen aikana, kunnes induktiomoottori on asettunut kuormalle stabiiliin tilaan. Erityistä huomiota kiinnitetään käynnistyksen aikaisiin energian virtauksiin ja virran käyttäytymiseen. Tarkasteltavaksi tulee myös mahdolliset virtapiikit.

Tämä työ tukee koestamon tavoitetta tehdä kaksoistaajuuskoe sellaisille suurille induktiokoneille, joille perinteistä lämpenemää ei voida tehdä. Samalla voidaan pohjustaa hyvin suurien tahtikoneiden kaksoistaajuuskokeita tekemällä havaintoja suuriin koneisiin ja suuriin tehoihin liittyvistä ilmiöistä sekä haasteista kaksoistaajuuskokeen aikana.

Lopulta voidaan myös tarkastella, onko kaksoistaajuuskuormituskoe sopivin vaihtoehto suurien induktiokoneiden testaamiseen vai olisiko pohdittava muita vaihtoehtoisia tapoja testin suorittamiseksi. Kaksoistaajuuskuormituskokeen nykyinen suoritustapa ei välttämättä myöskään ole paras mahdollinen ja toinen asia, mitä voidaan tutkia, on nykyisen suoritustavan soveltuvuus ja käytännöllisyys kaksoistaajuuskuormituskokeeseen.

2 Lämpenemä

2.1 Lämpeneminen sähkökoneissa

Moottorin kuormitusvirta I aiheuttaa käämityksen resistanssissa R häviötehon, joka muuttuu lämmöksi seuraavan yhtälön mukaisesti:

$$P_h = I^2 * R, \quad (1)$$

Tämän lisäksi syntyy rautahäviöitä, jotka myös muuttuvat lämmöksi. Osa häviöiden aiheuttamasta lämmöstä varastoituu moottorin massaan, ja osa siirtyy jäähdytyksen kautta ympäristöön. Tasapainotilassa eli moottorin saavutettua vakiona pysyvän lämpötilan häviöiden aiheuttama lämpöteho virtaa kokonaan ympäristöön ja näin moottorin lämpötila ei enää muutu. Lämpenemän määrää jäähdytysolosuhteet eli lämmönsiirtymisvastus. Vastusta ja samalla lämpenemää voidaan pienentää samoilla tavoilla kuin tietokoneissa eli pienentämällä lämpötehoa, kasvattamalla jäähdytyspinta-alaa tai jäähdytysaineen nopeutta säätämällä.

Koneiden lämpenemisen syntyminen tunteminen on tärkeää, koska lämpö vanhentaa johtimien eristeainetta ja siten lyhentää niiden elinikää. Moottorin käämityksen eristysrakenteet määräävät moottorin suurimman sallitun lämpötilan. Mikäli tämä ylitetään, moottorin käämityksen eristykset tuhoutuvat. Eristeiden lämpövanheneminen on kemiallinen prosessi, ja tämän prosessin nopeus kaksinkertaistuu aina, kun lämpötila nousee kymmenen astetta. Eristeissä vastaava puoliintumisaika voi olla jopa tätä lyhyempi. Eristeiden terminen vanheneminen aiheuttaa jännitekestoisuuden alenemista mikä lisää läpilyönnin riskiä. [1, s. 45 – 47.]

2.2 Pyörrevirrat

Silmukan läpi kulkeva vaihteleva vuo synnyttää sähkömotorisenvoiman. Sähkömoottorin roottorin rautasydämessä näitä silmukoita on periaatteessa ääretön määrä. Indusoitunut smv synnyttää silmukkaan vuon muutosta vastustavan virran, jota kutsutaan pyörrevirraksi. Sähkömoottorin tapauksessa induktion vaihtelu tapahtuu,

koska silmukat pyörivät staattorin synnyttämässä magneettikentässä. Pyörrevirrat aiheuttavat tehohäviöitä taajuuden kasvaessa, eli pyörrevirtojen aiheuttama sähköteho muuttuu lämmöksi ja aiheuttaa sähkömoottorin lämpenemistä. Pyörrevirtahäviöitä ei voida mitenkään poistaa, koska se on suoraan sähkömagneettisesta induktiosta johtuva ilmiö. Pyörrevirtahäviöitä voidaan kuitenkin pienentää tekemällä roottori ohuista, toisistaan eristetyistä sähkölevyistä. Sähkölevyn rautaan on seostettu epäpuhtautena pieni määrä piitä, koska niin saadaan suurennettua levyn ominaisvastusta. Pyörrevirtojen aiheuttaman tehohäviön yhteys taajuuteen käy ilmi seuraavasta yhtälöstä:

$$p_p = k_p * f^2 * b_a^2 \quad (2)$$

b_a on sinimuotoisesti vaihtelevan vuontiheyden huippuarvo.

f on vaihtelun taajuus.

k_p on levyn laadusta ja vahvuudesta riippuva kerroin.

Yhtälöstä nähdään, että pyörrevirtahäviön suuruus on suoraan verrannollinen sekä taajuuden että vuontiheyden neliöön. [2, s. 186 – 188; 3, s. 104 – 106.]

2.3 Rautahäviöt

Rautahäviöt muodostuvat hystereesi- ja edellämainituista pyörrevirtahäviöistä. Nämä yhdessä aiheuttavat magneetti-piirin raudan lämpenemisen. Hystereesihäviön suuruuden näkee hystereesisilmukasta ja sen pinta-alasta. Kun magneetti-piiriä magnetoidaan vaihtovirralla taajuudella f , hystereesihäviöt ovat

$$P_h = fW_h \quad (3)$$

Hystereesihäviötä kuvaavassa yhtälössä 3, W_h kuvaa sitä työtä, joka tarvitaan vaihtomagnetoinnin yhteen jaksoon.

Hystereesihäviöt saadaan esim. kokemusperäisellä kaavalla

$$p_h \approx k_h * f * b_a^2 \quad (4)$$

b_a on sinimuotoisesti vaihtelevan vuontiheyden huippuarvo.

f on vaihtelun taajuus.

k_h on levyn laadusta riippuva kerroin.

Edellisestä kaavasta nähdään, että hystereesihäviöt ovat suoraan verrannolliset taajuuteen ja suunnilleen verrannolliset vuontiheyden neliöön. Kaavassa k_h on rautalajin laadulle ominainen vakio.

Näistä saadaan rautahäviöille lauseke

$$P_{Fe} = p_p + p_h = k_p * f^2 * b_a^2 + k_h * f * b_a^2 \quad (5)$$

Staattorin rautahäviöt muodostuvat hystereesi- ja pyörrevirtahäviöistä. Ylimääräisiä rautahäviöitä syntyy myös ilmvälivuon epätasaisesta jakautumisesta, jonka aiheuttaa uritus. Staattorin kuparihäviöt muuttuvat lämmöksi yhtälön 6 mukaisesti.

$$P = 3I^2 * R \quad (6)$$

Vastaavasti roottorihäviöt jakautuvat virtalämpö-, laakeri- ja ilmahankaushäviöihin. Liukurengasmootoreissa laakeri- ja ilmahankaushäviöihin kuuluvat myös hiiliharjojen ja liukurenkaiden väliset hankaushäviöt. Roottorin kuparihäviöt syntyvät roottorikäimityksessä, ja ne lasketaan ilmapölytehon ja jättämän avulla. Roottorin rautahäviöt ovat pienet, koska taajuus roottorissa on nimellisa nopeudella pieni.

Lisähäviöt syntyvät hajavuon rautahäviöinä koneen kilvissä ja muissa varsinaiseen magneettipiiriin kuulumattomissa osissa. Lisähäviöitä aiheuttaa myös virran ahto ja yliaallot. [1, s. 72 – 74; 2, s. 188 – 189; s. 352 – 353.]

3 Kaksoistaajuuslämpenemä

3.1 Kaksi taajuutta verkossa

Elektroniikassa on enemmän sääntö kuin poikkeus se, että verkossa (piirissä) on useita taajuuksia samanaikaisesti. Sähkövoimajärjestelmissä tällainen tilanne olisi yleensä ei toivottu vikatilanne, ja normaalisti verkolla on vain yksi taajuus. Suomessa verkon perustaajuus on 50 Hz.

Aina kun verkossa on useita taajuuksia, verkon analysoiminen muuttuu paljon hankalammaksi. Jos tehdään oletus ja samalla yksinkertaistus, että piiri toimii lineaarisesti (sähkömoottori on epälineaarinen komponentti), voidaan laskelmat tehdä jokaisella erillisellä taajuudella erikseen. Menetelmää kutsutaan superpositioperiaatteeksi eli kerrostamismenetelmäksi. Tässä tapauksessa kyseessä on kerrostamismenetelmän erikoistapaus, josta käytetään myös nimitystä harmoninen analyysi. Se viittaa erilaisten ja eri taajuuksisten aaltomuotojen käsittelyyn Fourier-analyysin avulla. Harmoninen (Fourier-) analyysi mahdollistaa eri taajuuksien erottamisen toisistaan, ts. saadaan tutkitun aaltomuodon spektri ja harmonisten yliaaltojen suhteelliset intensiteetit näkyviin. Tämä mahdollistaa verkkoon vaikuttavien taajuuksien vaikutuksen tarkastelun erikseen. [1, s. 148 – 149; 3, s. 225 – 227.]

3.2 Jänniteaaltojen huojunta

Oletetaan, että kaksi sinimuotoista jänniteaaltoa, joilla on sama amplitudi A mutta hieman eri taajuudet f_1 ja f_2 , vaikuttavat keskenään. Kun nämä kaksi jänniteaaltoa (joiden taajuudet ovat lähekkäin) interferoivat keskenään syntyy huojunnaksi kutsuttu amplitudin vaihtelu. Jännitteiden aallot voidaan ilmaista seuraavilla yhtälöillä:

$$x_1 = A_1 \sin(2\pi f_Q t) \quad (7)$$

$$x_2 = A_1 \sin(2\pi f_B t) = A_1 \sin[2\pi(f_Q + \Delta f)t] \quad (8)$$

$$y_1 = A \cos(2\pi f_1 t) \quad (9)$$

$$y_2 = A \cos(2\pi f_2 t) \quad (10)$$

Yhtälöissä 7 – 10

A on amplitudi

f on taajuus

t on aika

Kun edellä esitetyt aallot vaikuttavat yhdessä, ne muodostavat kokonaisuallon, jota kuvaa seuraava lauseke:

$$x = x_1 + x_2 = 2A_1 \cos(2\pi\Delta f t) * \sin\left(2\pi\frac{2f_Q + \Delta f}{2}t\right) \quad (11)$$

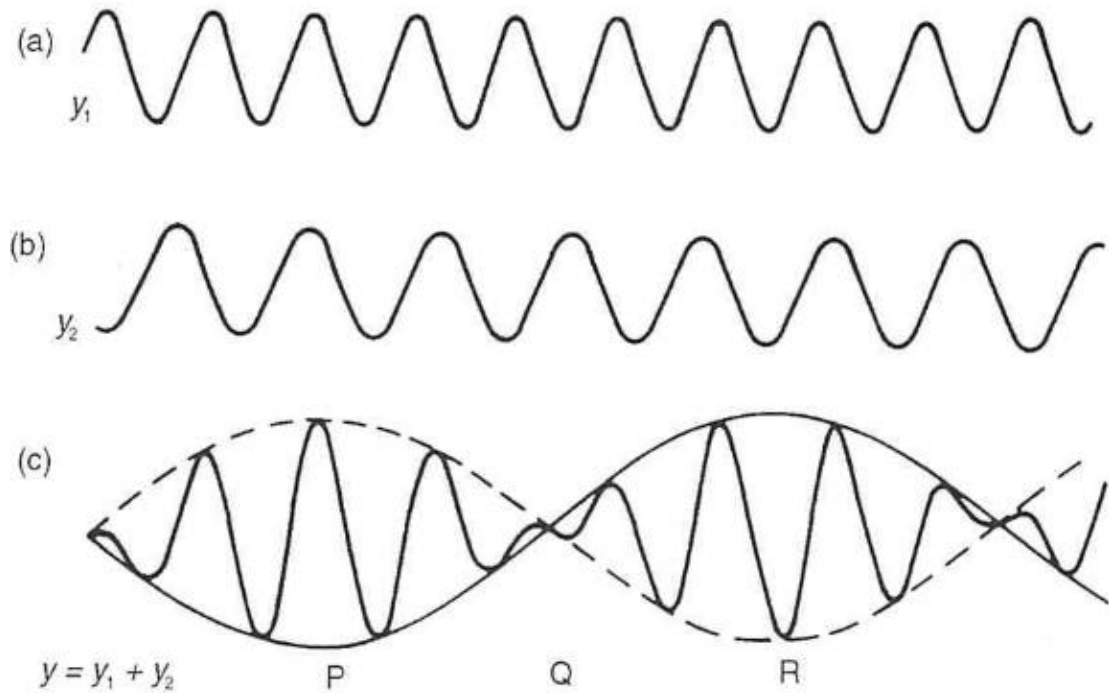
Oletetaan, kuten oikeassa kaksoistaajuuskuormituskokeessa, että taajuudet f_1 ja f_2 ovat melko lähellä toisiaan eli

$$f_1 - f_2 \ll f_1 + f_2. \quad (12)$$

Tällöin voidaan tarkastella edellä esitetyssä yhtälössä esiintyvää sinitermiä, joka kuvaa värähtelyä, jonka taajuus eroaa vain lievästi f_q :sta.

$$A = 2A_1 \cos(2\pi\Delta f t) \quad (13)$$

Hitaammin muuttuva kosinitermi vaikuttaa värähtelyn amplitudiin A, joka vaihtelee taajuudella Δf arvojen 0 ja 2A välillä.



Kuva 1. Kaksi aaltoa y_1 ja y_2 ja näiden summa y [5, s. 63]

Tästä ideaalitalanteen esittävästä kuvasta voitiin havaita helposti, miten hetkellä P kaksi aaltoa on samassa vaiheessa, ja silloin niiden summa on suuri. Koska aaltojen taajuuksut ovat hieman erisuuria, syntyy niille vaihe-eroa ja pisteessä Q vaihe-ero on kasvanut maksimiin eli 180-asteeseen, jolloin aaltojen summa on nolla. Huomioitavaa on, että aaltojen täydellinen kumoutuminen voi tapahtua vain, jos molempien aaltojen amplitudit ovat yhtä suuret ja näin $2f$ -testissä ei oikeasti ole. Pisteessä R aallot ovat jälleen samassa vaiheessa. Tätä ilmiötä, jossa summa-aalto vuoronperään laajentuu ja vaimentuu, kutsutaan huojumiseksi ja taajuutta, millä amplitudin minimi ja maksimi vaihtelevat tunnetaan nimellä huojumistaajuus. Kuvassa 1 summa-aallolla c näkyvän katkoviivan taajuus on

$$f_c = \frac{f_1 - f_2}{2} \quad (14)$$

mutta amplitudin maksimi esiintyy 2 kertaa yksi jakso. Huojunnan taajuus saadaan siis yhtälöllä

$$f_h = f_1 - f_2. \quad (15)$$

Tämä on erittäin tärkeä yhtälö, kun tutkitaan useaa aaltoa samaan aikaan.

Jos päällekkäisillä aalloilla on eri amplitudit A_{10} ja A_{20} , kokonaisamplitudi saa arvoja väliltä $|A_{10} - A_{11}|$ ja $|A_{10} + A_{11}|$. Tästä nähdään, että summa-aalto voi saada arvon 0 vain, jos ehto $A_{10} = A_{11}$ täyttyy. Kuvassa 1 (ks. ed. s.) nähdyllä käyrillä on sama amplitudi. Syntyneen ”huojuvan” interferenssivärähtelyn jaksonaika T on tällöin

$$T = \frac{1}{\Delta f} \quad (16)$$

Tämän yhtälön merkitys tulee selkeämmin esille kuvassa 3, joka havainnollistaa taajuuseron ja jakson ajan välistä yhteyttä. [4, s. 502 – 510; 5, s. 62 – 64; 6, s. 173 – 180.]

3.3 Kahden samanaikaisen taajuuden analysoiminen verkossa

Ei-sinimuotoisen toistuvan aaltomuodon periaate on, että sitä voidaan kuvata sarjana eritaajuuksisia siniaaltoja. Ts. aina kun verkossa on ei-sinimuotoinen aalto, kyseessä oleva verkko reagoi, kuin siihen vaikuttaisi samanaikaisesti joukko eri taajuuksisia jännitteitä. Koska verkon komponenttien yli vaikuttavilla jännitteillä on eri taajuudet, niitä ei voida suoraan summata yhteen. Jännitteet voisi summata yhteen, jos ainoastaan amplitudit ja mahdolliset vaihe-erot olisivat eri suuria. [3, s. 225 – 227.]

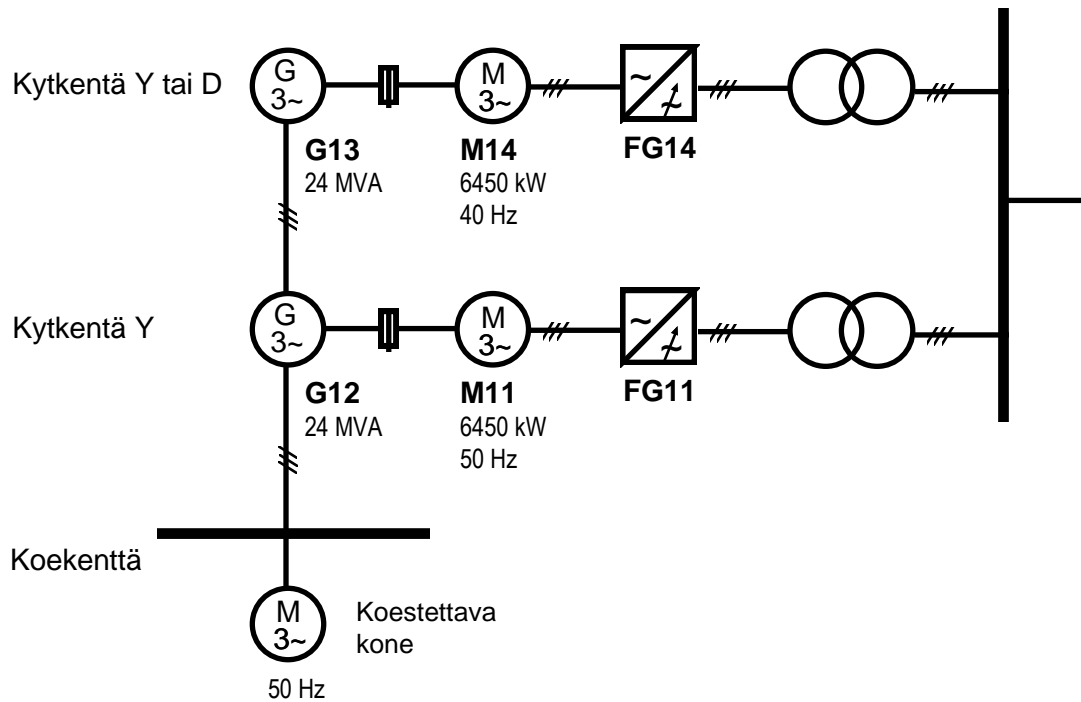
Osoitinlaskenta mahdollistaa aallon amplitudin ja vaihekulman esittämisen mutta ei taajuuden esittämistä, eli koko piirin jatkuva tila voidaan ratkaista yhdellä taajuudella. Kahden eritaajuuden siniaallon hetkellisarvojen summa näyttää kompleksiselta aallolta impedanssien yli. Kun halutaan määrittää aaltomuoto jokaisen yksittäisen impedanssin yli pitää yksinkertaistaa ja olettaa, että vain yksi generaattori (lähde) kerrallaan on kytketty. Menetelmän analogia on periaatteessa sama kuin kerrostamismenetelmässä. Sitten jännitteen hetkellisarvot, aika-alueen signaalit, yhdistetään, jotta saadaan yksittäisen impedanssin yli vaikuttava aaltomuoto esiin. [3, s. 64 – 65; 7, s. 158 – 162.]

Tässä työssä ovat kiinnostavia erityisesti ajan funktiona olevat lausekkeet, jotka voidaan summata hetkellisarvon laskemiseksi. Esimerkiksi liian suuri hetkellinen virta voi laukaista ylivirtasuojareleen riippuen sen asetteluista. Impedanssin luonne, eli onko se resistiivinen vai reaktiivinen, määrittelee kompleksisen aaltomuodon muodon. Tämä syntynyt kompleksinen aaltomuoto on kahden yksittäisen siniaallon yhdiste, ja siten se sisältää vain alkuperäisten aaltojen taajuudet.

On tärkeää pitää mielessä, että verkossa on epälineaarinen komponentti, epätahtimoottori, joka tämän testin aikana toimii hyvin erityisellä tavalla. Kun kahta sinimuotoista jännitettä sovelletaan verkkoon, epälineaarinen komponentti muokkaa molempia siniaaltoja ja niiden harmonisia yliaaltoja, missä lopputuloksena on erittäin kompleksinen aaltomuoto.

3.4 Kaksoistaajuuskuormituskoee

Kaksoistaajuuskokeella voidaan mitata ainoastaan lämpenemä. Häviöiden tai hyötysuhteen mittaamiseen menetelmä ei sovi. Koestettaessa kahdella taajuudella, testattava moottori käynnistetään ilman akseliin kytkettyä kuormitusta, mikä on koko testin idea.



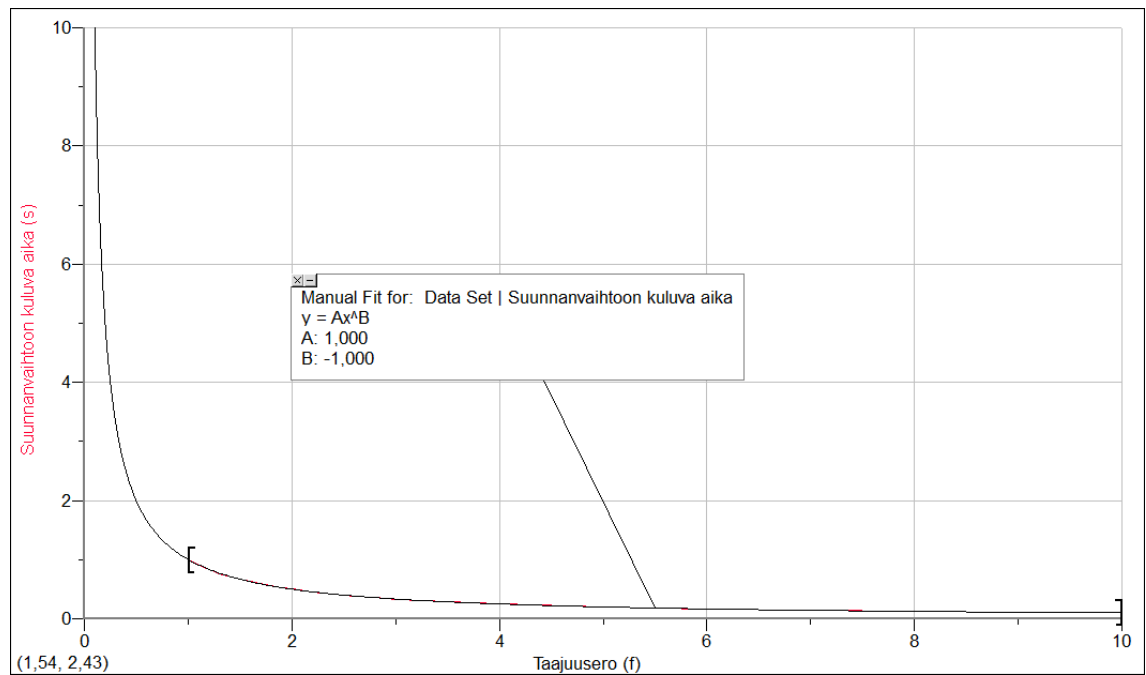
Kuva 2. Lämpenemismittaus kaksoistaajuuskokeena (generaattorikytkentä)

Tällöin moottorin pyörimisnopeutta kasvattaa moottorin vääntömomentti M_m , ja moottoria hidastaa ainoastaan laakerien ja ilman aiheuttama kitka. Tällöin moottorin pyörimisnopeus asettuu arvoon n_0 , joka on moottorin tyhjäkäyntipyörimisnopeus (taajuudella f). Pyörivän käyttöjärjestelmän massa on varastoitunut liike-energia

$$W_j = \frac{1}{2}J\omega^2. \quad (17)$$

Käyttöjärjestelmän pyörimisnopeuden kasvaessa liike-energia kasvaa ja nopeuden pienentyessä se pienenee. Liike-energia on käynnistyksen ja jokaisen kiihdytyksen aikana otettava sähköverkosta moottorin avulla. Jarrutettaessa (tässä tapauksessa) liike-energia ns. hävitetään lämmöksi. Kun jarrutuksessa energiaa muutetaan lämmöksi, puhutaan häviöjarrutuksesta.

Taajuus, minkä moottori näkee, muuttuu koko ajan taajuuseron määrämällä nopeudella. Esimerkiksi 10 Hz:n taajuuserolla moottorin näkemä taajuus muuttuu kokonaan kymmenen kertaa sekunnissa. Tämä jatkuva taajuuden muuttuminen aiheuttaa moottorin pyörivän magneettikentän tahtinopeuden muuttumisen taajuuksien f_1 ja f_2 välillä. [8, s. 2.] Taajuuden muutokseen kuluvaa aikaa ja taajuuseroa havainnollistaa seuraava kuva:



Kuva 3. Pyörivän magneettikentän tahtinopeuden muutokseen kuluva aika taajuuseron funktiona

Tarkempi menetelmä sähkömoottorin suorituskyvyn tarkkailuun kahdella taajuudella on sähkömoottorin ilmavälissä pyörivien magneettikenttien tarkastelu, jotka syntyvät kahden taajuuden käyttämisestä. Tämä kenttä syntyy resultanttina kahdesta eri kentästä, jotka syntyisivät toisistaan riippumatta omilla taajuuksillaan. Syntynyt kenttä vaihtelee sekä nopeudeltaan, että voimakkuudeltaan, kun se pyörii sähkömoottorin ilmavälissä. Kron (lähde!) on esittänyt, että pyörivän magneettikentän nopeus vaihtelee seuraavan yhtälön määräämän intervallin välissä

$$\frac{\omega_a(1 + x\lambda)}{1 + \lambda} < \omega < \frac{\omega_b(1 - x\lambda)}{1 - \lambda} \quad (18)$$

ω = resultoivan pyörivän kentän kulmanopeus

ω_a = nimellisen taajuuden pyörivän kentän kulmanopeus

ω_b = lisätaajuuden pyörivän kentän kulmanopeus

Nyt testattava moottori pyrkii seuraamaan tätä pyörivän magneettikentän nopeuden vaihtelua. Sitä rajoittaa ainoastaan sen oma kitka ja huimamassan hitausmomentti, koska sitä ei ole kytketty mekaanisesti mihinkään. Vaikka keskinopeus on hyvin lähellä tahtinopeutta, roottori on vuoronperään kiihdyttävässä ja jarruttavassa tilassa, eli moottori vuoronperään ottaa ja luovuttaa energiaa (verkkoon). [9, s. 1101 – 1102.]

Lisäjännitelähteen jännitettä säädetään, kunnes virran rms-arvo on sama kuin moottorin nimellinen virta. Siten koneen $I^2 * R$ on (lähes) sama kuin tavanomaisessa kuormituskokeessa. Testattavan moottorin pääjännite asetetaan nimelliseksi, ja siten vuo- ja rautahäviöiden voidaan olettaa olevan suunnilleen saman kuin kuormituskokeessa. Pientä eroa ilmenee nimenomaan kahden taajuuden käyttämisestä verrattuna siihen, että moottorin jännite muodostettaisiin yhdellä taajuudella kuten kuormituskokeessa normaalisti tehdään.

Kaksoistaajuustesti taajuuksilla 60/27 Hz tuotti suuremman lämpenemän kuin taajuuksilla 60/50 Hz ja siten 60/27 Hz ei korreloinut toivotulla tavalla perinteisen kuormituskokeen kanssa. Tämä viittaa suoraan siihen, että pienempi taajuusero, kuten 60/50 Hz:n tapauksessa, tuottaisi lämpenemän, mikä vastaisi paremmin todellisuutta. Aivan viimeisin tutkimustieto ABB:lta viittaa vielä pienemmän taajuuseron käyttämisen puolesta. Tällä hetkellä tietyillä koneilla on käytössä taajuuserona 5 Hz. Toisaalta jos taajuudet ovat liian lähellä toisiaan, roottorin taajuus lähenee normaaleja arvoja, mutta ns. energian piikki-tarve generaattorissa kestää pidempään eli pidemmän jakson ajan. Tämä lisää lähde generaattorin tehon tarvetta. Pieni taajuusero asettaa myös mittareille lisävaatimuksia, koska pienellä taajuuserolla huojuntataajuus tulee myös niin pieneksi, että mittareiden on vaikea mitata sitä tarkasti. Suositus taajuuserolle on suunnilleen 10 % nimellisestä taajuudesta, eli esimerkiksi 50 Hz tapauksessa taajuuseron olisi oltava noin 5 Hz. [8, s.1102.]

Kun taajuus on esimerkiksi 60 Hz, moottori kiihtyy kohti 60 Hz:n tahtinopeutta, jolloin se toimii moottorina, jolla on iso jättämä. Koska roottorilla on hitausmomentti, moottori ei voi välittömästi saavuttaa tavoiteltua nopeutta, ja roottori seuraa siis viiveellä pyörivän magneettikentän nopeuden muutosta. 10 Hz:n taajuuserolla 1/10 s myöhemmin moottori näkee 50 Hz:n taajuuden ja alkaa jarruttamaan kohti 50 Hz:n tahtinopeutta. Jättämän ollessa negatiivinen, moottori toimii generaattorina ja tuottaa virtaa ja syöttää sen takaisin verkkoon. Näin moottorin teho siis heiluu huojuntataajuudella verkon ja moottorin välillä.

Asianmukaisilla ja oikeilla parametreilla voidaan saavuttaa vakaa toimintatila, missä koestettava induktiomoottori toimii lähes nimellisellä jännitteellä ja virralla. Aaltomuoto ei ole sinimuotoinen, mutta aiemmin tehdyt tutkimukset ovat osoittaneet, että ei-sinimuotoinen aaltomuoto tuottaa samanlaisen lämpövaikutuksen ja lämpenemän.

Koneen pyörimisnopeuden kiihtyessä kasvaa myös pyörivien massojen liike-energia yhtälön (16) mukaan. Pyörimisnopeuden kiihtyessä muutokseen vaaditaan myös enemmän momenttia, eli kiihdytysväntömomentti M_j , joka syntyy moottorin ja kuormituksen väntömomenttien erotuksena $M_m - M_\omega$. Vakionopeudella, eli kun kulmakiihtyvyys ω on nolla, kiihdytysväntömomentti on nolla. Jotta koneen pyörimisnopeus muuttuisi halutun määrän halutussa ajassa, se vaatii liiketilan muutokseen väntömomentin, joka voidaan laskea seuraavasta yhtälöstä (jos hitausmomentti J on vakio). [9, s. 171.]

$$M_j = J_\gamma = J \frac{d\omega}{dt} \quad (19)$$

Tietyn hitausmomentin liiketilan muutokseen tarvittava momentti kasvaa koneen ottaessa enemmän virtaa. Kun pyörimisnopeus pienenee, luovuttaa kone vastaavan määrän liike-energiaa verkkoon, eli se toimii generaattorina, jolloin myös momentin suunta vaihtuu, josta seuraa virran suunnan vaihtuminen. Kone toimii siis vuoroin generaattorina ja vuoroin moottorina. [9, s. 178.]

Kaksoistaajuuskuormituskoe on kustannustehokas tapa tehdä lämpenemäkoete sekä vaaka että pystykoneelle. Pystykoneelle se on käytännössä ainoa järkevä tapa tehdä lämpenemäkoete.

Kaksoistaajuuskuormituskokeen (2f-koete) testiasetus on hyvin yksinkertainen, koska testattavaa induktiokonetta ei tarvitse kytkeä DC-koneeseen, ja siten linjausta ei tarvita. Tämä säästää huomattavan paljon aikaa. Kaksoistaajuusmenetelmän avulla voidaan säästää aikaa jopa 50 – 60 % perinteiseen kuormituskokeeseen verrattuna. Suorat testimenetelmät (perinteinen kuormituskoe) ovat kalliita monimutkaisen ja ennenkaikkea hitaan asennuksen takia.

Vaihtoehtoisille tavoille suorittaa taloudellisesti lämpenemä täydellä kuormalla on ilmeisen kova kysyntä. Lukuisia ehdotuksia vaihtoehtoiksi toteuttaa tarkka lämpenemä ilman koneeseen kytkettyä ulkoista kuormaa on olemassa ja kaksoistaajuusmenetelmä on yksi niistä. Syy, miksi kaikista vaihtoehtoista ABB on ottanut käyttöön juuri kaksoistaajuusmenetelmän on se, että kyseisellä menetelmällä on suuria etuja muihin testaus tapoihin verrattuna. Kaksoistaajuusmenetelmällä voidaan testata sekä oikosulkumootorin että liukurengaskoneen.

4 2f-testissä käytetty verkko

4.1 2f-verkon komponentit

Jotta olisi mitenkään mahdollista analysoida 2f-koestukseen liittyviä ongelmia, pitää koestuksessa käytetty verkko ja kaikki verkossa vaikuttavat komponentit tuntea hyvin. 2f-koestuksessa myös säätöjärjestelmällä on erittäin iso rooli ja vaikutus. Pitää ymmärtää käytettyjen säätötekniikoiden ja säätäjien toiminta, ja siten niiden vaikutus verkkoon. Erityisesti hämärän peitossa on generaattorien sarjaan kytkemisestä mahdollisesti aiheutuvat ongelmat. Käytännössä missään kirjallisuuslähteissä ei myöskään käsitellä generaattorien sarjaan kytkentää, koska ne kytketään aina rinnankytkentään.

4.2 Epätahtikone

Epätahtikone on teollisuuden yleisimmin käytetty sähkömoottorityyppi yksinkertaisen rakenteen ja varmatoimisuuden takia. Epätahtikoneessa on hyvin vähän kuluvia osia ja oikein käytettynä se on hyvin pitkäikäinen ja vähän huoltoa vaativa kone. Oikosulkukoneen tärkeimmät osat ja samalla ainoat energian muokkaamiseen aktiivisesti vaikuttavat osat ovat staattori ja roottori.

Vaihtosähköllä syötetty staattorikäänitys luo koneen ilmaväliin pyörivän magneettivuon, joka leikkaa roottorin oikosuljetun häkkikäänityksen sauvoja. Tämän seurauksena roottorisauvoihin indusoituu virtaa, joka magnetoi roottorin. Magnetoitunut roottori pyrkii seuraamaan staattorin pyörivää magneettivuota, ja tämä saa aikaan roottorin vääntömomentin. Pyörivän magneettikentän pyörimisnopeus eli tahtinopeus on suoraan verrannollinen syöttävän verkon taajuuteen f ja kääntäen verrannollinen koneen napaparien lukumäärään p seuraavan yhtälön mukaisesti:

$$n_s = \frac{f}{p}. \quad (20)$$

Yhtälö antaa pyörimisnopeuden minuuttia kohti, kun se kerrotaan luvulla 60. Sama yhtälö on laaduttuna

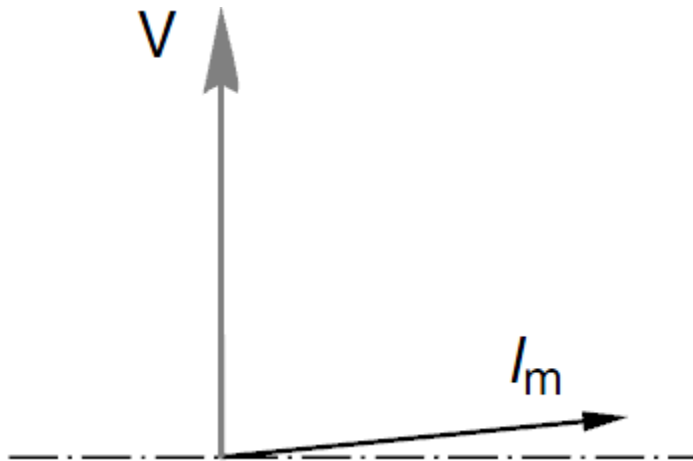
$$n_s = \frac{60 * f/Hz}{p} r/min. \quad (21)$$

Sähkömoottorin tarvitsema sähköteho siirretään staattoriin, josta se magneettikentän välityksellä siirtyy roottoriin ja muuttuu häviöt poislukien mekaaniseksi tehoksi. Koska roottorin magnetointivirta otetaan pyörimisliikkeestä, niin tämä pieni energia häviö aiheuttaa jättämää suhteessa vaihtovirran synnyttämään magneettikentän pyörimisnopeuteen. Sähkömoottorin roottori alkaa pyörimään, kun sähköinen

vääntömomentti on suurempi kuin roottoria jarruttavan kuorman mekaaninen vääntömomentti.

Jos sähkömoottorin käynnistysvääntömomentti olisi pienempi kuin kuorman vääntömomentti, se ei alkaisi pyöriä. Kaksoistaajuustestissä sähkömoottorin akselilla ei ole kuormaa, joten sähköisen vääntömomentin tarvitsee voittaa ainoastaan kitkan aiheuttama liikettä vastustava voima. On hyvä huomioida, että kitkan voimavektori osoittaa aina liikesuuntaa vastaan.

Käynnistyksen yhteydessä epätahtikone ottaa verkosta myös koneen magnetointiin tarvittun magnetointivirran. Energiaa varastoituu koneen koosta riippuen vaihteleva määrä magneettikenttään. Magneettikentän synnyttyä sen ylläpitämiseen ei tarvita enempää energiaa. Magnetointivirta voi kuitenkin olla melko suuri, ja sen suuruus riippuu pitkälti ilmavälillä. Tästä johtuen kuormittamaton induktiomootori ottaa verkosta myös melko suuren virran mutta varsin vähän pätötehoa. Näennäisteho on siis suuri verrattuna pätötehoon, ja siten myös tehokerroin on hyvin pieni. Magnetointivirta on verkkojännitettä melkein 90°-astetta kuvan osoittamalla tavalla jäljessä.



Kuva 4. Kuormittamattoman induktiomootorin osoitindiagrammi [10, s. 182]

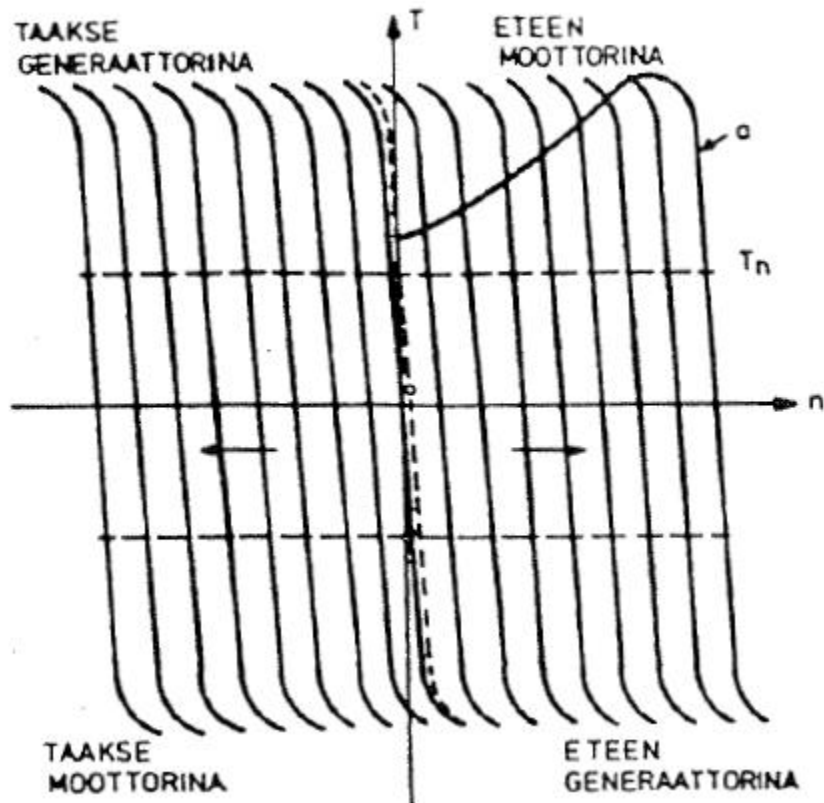
Verkosta katsottuna kuormittamattoman induktiomootorin staattori näyttää melkein puhtaalta induktanssilta. Kuormittamattoman induktiomootorin käsittelyssä roottori piirit voidaan jättää käytännössä huomiotta, jolloin verkosta otettu pätöteho on pieni, mutta magnetointivirta puolestaan melko iso, mikä johtaa verkosta otettuun suhteellisen suureen reaktiiviseen tehoon.

Kun moottoria kuormitetaan, syntyy nopeuteen kuormituksen suuruudesta verrannollinen jättämä, josta aiheutuu virran kasvu. Kuormitetun moottorin virta on pääosin pätövirtaa.

4.3 Epätahtikone kaksoistaajuusverkon komponenttina

Kaksoistaajuustestissä epätahtikoneet ovat taajuusmuuttajilla ohjattuja, koska oikosulkumoottorin pyörimisnopeutta on järkevintä ohjata muuttamalla moottorin syöttötaajuutta. Oikosulkumoottoria käytettäessä halutaan jättämä pitää pienenä ja siten on toimittava momenttikäyrän lähes suoralla, jyrkällä osalla.

Niiden tehtävänä on pyörittää tahtigeneraattoreita määrätyllä ohjearvoa vastaavalla pyörimisnopeudella. Ohjaamalla taajuusmuuttajan toimintaa voidaan sähkömoottorille tuottaa haluttu vakiovääntömomentti kierrosnopeudesta riippumatta. Kun halutaan taajuusohjatun moottorin ominaisuuksien pysyvän samanlaisina kuin kiinteällä taajuudella ja jännitteellä syötetyn moottorin ominaisuudet, tulee moottorin momenttikäyrän säilyä muodoltaan samanlaisena ja muuttumattomana. Tätä tilannetta esittää kuva 5:



Kuva 5. Taajuusohjatun oikosulkumoottorin vääntömomenttikäyrä taajuuden funktiona

Momenttikäyrän muoto ei muutu, vain momenttikäyrän paikka siirtyy, kun moottorin jännitettä ja syöttötaajuutta ohjataan samanaikaisesti siten, että moottorin magneettivuo pysyy vakiona eli toimitaan vakiovoalueella. Kun taajuutta pienennetään on samalla pienennettävä jännitettä, eli jännitettä on ohjattava likimain taajuuteen verrannollisesti. Tämä pätee hyvin aivan pieniä taajuusalueita lukuunottamatta.

4.4 Oikosulkumoottori vektorisäädettynä

Vektorisäätö tarkoittaa sitä, että oikosulkumoottorin napajännitettä ja syöttötaajuutta säädetään toisistaan riippumatta. Pyrkimyksenä on pitää moottorin magneettivuo haluttuna.

Oikosulkumoottorin staattorivirta voidaan jakaa kahteen komponenttiin i_d (vrt. dc-moottorin magnetointivirta) ja i_q (vrt. dc-moottorin ankkurivirta). i_d on

samansuuntainen moottorin vuovektorin kanssa ja i_q on sitä vastaan kohtisuorassa. Moottorin momentti T on verrannollinen vuohon ϕ ja virtaan i_q . Vuo on verrannollinen virtaan i_d .

Moottorin momenttia T kuvaa yhtälö

$$T = K * \Phi * i_q \quad (22)$$

Edellämainitun perusteella vektorisäädön idea voidaan määritellä sen perustuvan siihen, että moottorin magnetointia ja momenttia voidaan ohjata toisistaan riippumatta virtakomponenteilla i_d ja i_q .

Jotta vektorisäätö voitaisiin toteuttaa on tiedettävä staattorin virtavektorin ja vuovektorin suunta ja suuruus. Staattorivirran vektori voidaan laskea mitatuista staattorin vaihevirroista (kussakin vaihevirrassa virtamuunnin). Vuovektori voidaan laskea vaihevirroista ja pyörimisnopeudesta (tarvitaan takometri ja takaisinkytkentä), jos roottoriaikavakio (moottorin magnetointi-induktanssin ja roottorin hajainduktanssin summa jaettuna roottoriresistanssilla) tunnetaan.

Induktiomoottorin virtojen säätäminen ei ole niin yksinkertaista kuten esimerkiksi DC-moottorin, koska roottorivirtoihin ei ole suoraa yhteyttä, vaan ne indusoituvat staattorista. Koska staattori ja roottori ovat keskenään tiukasti magneettisesti kytkettyjä, voidaan myös roottorin virtoihin vaikuttaa (enemmän tai vähemmän välittömästi) tekemällä hetkellisiä muutoksia staattorin virtoihin. Jokainen äkillinen muutos staattorin ns. MMF-laadussa mikä johtuu staattorin virtojen muutoksesta, kohtaa välittömästi roottorissa vasta-MMF:n.

Kaikki magneettisesti kytketyt piirit, mukaanlukien esimerkiksi muuntajat, toimivat näin. Muuntajassa mikä tahansa äkillinen muutos toisiossa aiheuttaa välittömästi muutosta vastustavan reaktion ensiöissä. Näiden äkillisten askelmuutosten järjestely kuvaa vektorisäädön perusperiaatetta. Vektorisäätö kuvaa sitä tapaa, miten yhdestä jatkuvasta tilasta voidaan nopealla askelmaisella muutoksella siirtyä toiseen jatkuvaan tilaan. Vektorisäätö vaikuttaa siis vain muutostilanteissa.

Vektorisäädön uniikki ominaisuus, mikä erottaa sen esimerkiksi skalaarisäädöstä, on sen kyky oikealla äkkinäisellä staattorin MMF-aallon hetkellisen aseman muutoksella saada aikaan välitön muutos yhdestä jatkuvasta tilasta toiseen jatkuvaan tilaan käytännössä ilman asettumisaikaa. Ts. tämä tarkoittaa, että säätö tapahtuu hyvin nopeasti. Nopea säätö mahdollistaa ohjearvon nopean ja tarkan seuraamisen. Roottorin pyörimisnopeus ei pysy vakiona vääntömomentin muuttuessa, joten tarvitaan roottorin asentotieto takaisinkytkentänä.

4.5 Testattava epätahtikone, induktiomoottori

Kun moottori käynnistetään tyhjäkäyntiin, eli ilman akselille kytkettyä kuormaa, roottorin pyörimisnopeus kiihtyy hyvin lähelle tahtinopeutta. Tyhjäkäynnin pyörimisnopeus on vähän tahtinopeutta pienempi, koska moottorin laakeri- ja ilmahankaushäviöt aiheuttavat aina mekaanista vastamomenttia. Moottori pyrkii seuraamaan jatkuvasti edestakaisin keinuvaa taajuutta.

4.6 Epätahtikone generaattorina

Kolmivaiheinen epätahtikone toimii moottorina (tyhjäkäyntipisteen ja oikosulkupisteen) alueella, jolla jättämä pysyy alueella $s = 0 - 1$ ja pyörimisnopeus alueella $n = n_s - 0$. Jos koneelle (ts. koneen roottorille) voimakoneen avulla annetaan magneettikentän pyörimissuuntaan tahtinopeutta n_s suurempi nopeus eli negatiivinen jättämäarvo, niin smv:n ja virran suunta roottorissa muuttuu päinvastaiseksi kuin moottorikäytössä, ja kone rupeaa syöttämään tehoa verkkoon. Kone siis rupeaa käymään generaattorina. Nyt koneen antama mekaaninen teho ja vääntömomentti ovat negatiiviset, mikä tarkoittaa, että nyt kone ottaa mekaanista tehoa ja vastustaa pyörimistä.

Myös generaattorialueella teho ja vääntömomentti saavuttavat määrätyillä jättämän arvoilla maksiminsa, aivan kuten moottorialueella, jonka jälkeen ne rupeavat

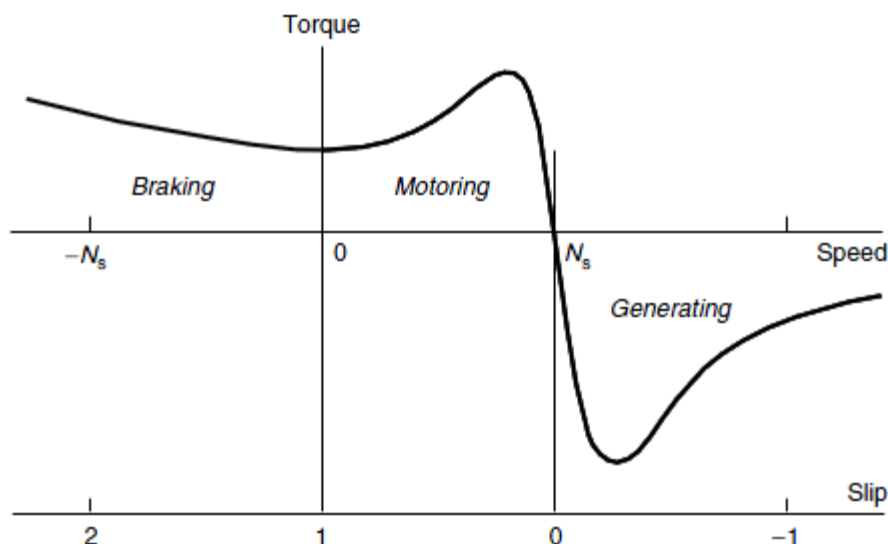
pienenemään jättämän vielä kasvaessa. Vielä suuremmalla jättämän arvolla kone muuttuu epästabiiliksi, mutta tässä yhteydessä sillä ei ole merkitystä, koska kone jarruttaa nopeasti kohti tahtinopeutta. Epätahtikone toimii siis ylisynkronisella nopeudella ja negatiivisella jättämällä pyöriessään generaattorina.

Se ei voi kuitenkaan tällöin toimia täysin itsenäisesti, koska sen tulee saada verkosta induktiivista loisvirtaa (magnetointivirta). Tästä syystä epätahtikone voi toimia generaattorina vain sellaiseen verkkoon kytkettynä, jota samanaikaisesti syöttää yksi tai useampia tahtigeneraattoreita kuten kaksoistaajuuskoestuksessa. Niiden tulee kehittää kaikki sekä kuormituksen että epätahtigeneraattorin tarvitsema loisvirta.

Generaattorialueella roottorin nopeus on kentän nopeutta suurempi, eli päinvastoin kuin normaalissa moottorikäytössä mutta edelleen induktiomootorille ominaisesti epätahdissa. Verkkomagnetoidut epätahtigeneraattorit ottavat magnetoimisvirran sähköverkosta, joten ne eivät pysty syöttämään sähkötehoa muihin kuin jännitteisiin verkkoihin. Kuten jo edellä mainittiin verkkomagnetoidun epätahtigeneraattorin haittana oikeassa generaattorikäytössä on, että se pystyy toimimaan vain, jos sähköverkkoa syöttää yksi tai useampi tahtigeneraattori, joka pitää verkon jännitteisenä.

Jos epätahtikone toimii tahtinopeutta suuremmalla nopeudella $n > n_s$, se ottaa pyörittävästä voimakoneesta mekaanista tehoa muuttaen sitä sähkötehoksi, eli (2f) tässä tapauksessa epätahtikone muuttaa omaa mekaanista energiaansa sähkötehoksi ja siten sen pyörimisnopeus pienenee energian säilymislakien mukaan. Sähkötehon se syöttää takaisin verkkoon ottaen samalla magnetoimisvirtansa verkosta eli syöttäen verkkoon kapasitiivista loistehoa.

Oikeassa generaattorikäytössä epätahtigeneraattorit usein jaetaan kahteen ryhmään niiden magnetointitavan perusteella.



Kuva 6. Induktiomoottorin vääntömomentti suhteessa jättämään [10, s. 218]

Jotta olisi mahdollista ymmärtää 2f-testin toimintaa, pitää myös ymmärtää, miten induktiomoottori käyttäytyy nopeuden ylittäessä kentän tahtinopeuden. Kuvasta 6 nähdään, että vääntömomentin suuntaa pohdittaessa ratkaiseva tekijä on ensisijaisesti jättämä eikä pyörimisnopeus. Kun jättämä on positiivinen myös vääntömomentti on positiivinen ja päinvastoin.

Epätahtikoneen vääntömomentti vaikuttaa aina siten, että se pakottaisi roottorin pyörimään jättämällä nolla eli tahtinopeudella. Jos roottori on saatu tavalla tai toisella pyörimään pyörivää magneettikenttää suuremmalla nopeudella, vääntömomentti alkaa välittömästi jarruttaa sitä kohti tahtinopeutta ja vastaavasti pienemmällä nopeudella vääntömomentti pakottaa roottorin kiihtymään kohti tahtinopeutta. Normaalissa käytössä epätahtikone asettuu pyörimään nopeudella, missä kiihdyttävien ja jarruttavien momenttien itseisarvot ovat yhtä suuret.

Kaikilla sähkömoottoreilla on luontainen ominaisuus, että ne voivat toimia sekä moottoreina että generaattoreina mutta sähkökäytöstä tehoelektroniikan komponentteineen riippuu voiko energiaa syöttää takaisin verkkoon.

4.7 Taajuusmuuttaja 2f-verkon komponenttina

2f-verkon komponenttina toimivan taajuusmuuttajan tehtävä on tuottaa pyydetty taajuus induktiomoottorille. Induktiomoottorin pyörimisnopeus tulee takaisin kytkentänä

taajuusmuuttajalle taajuuden säätämistä varten. Tahtigeneraattori on kytketty samalle akselille, joten sillä on sama pyörimisnopeus.

Moottorin säädössä sovelletaan oikosulkumoottorin vektorisäätöteoriaa koska se on tarkempi ja nopeampi säätömenetelmä kuin skalaarisäätö. 2f-testissä moottoreita ohjataan nopeusohjeella, josta taajuusmuuttajan lähtötaajuus riippuu. Vektorisäädön ansiosta taajuusmuuttaja reagoi välittömästi 2f-testissä esiintyviin kuormitusmuutoksiin eli säädön määräämät ohjearvot muuttuvat jatkuva-aikaisesti.

5 Kaksoistaajuuskuormituskokeen epästabiiliuden tutkimista varten tehty testi

Entuudestaan on tiedossa, että kaksoistaajuuskuormituskoe pystytään suorittamaan myös hankalammille koneille ongelmista huolimatta. Kyse on vain siitä, miten nopeasti oikeat taajuudet satutaan löytämään. Menetelmää on käytetty jo hyvin pitkään, mutta ongelmia on ilmennyt vasta suuri virtaisilla koneilla tehojen saavutettua useiden megawattien teho-alueen. Testimittausten avulla on tarkoitus tutkia ja saada tutkimustuloksia verkon tapahtumista kaksoistaajuuskuormituskokeen käynnistyksen aikana.

Testi tehtiin ABB:n valmistamalle AMI 630 L6L-induktiokoneelle. Koneen nimelliset kilpiarvot ovat

Taulukko 1. Testattavan induktio-koneen nimelliset arvot

U_n	660V
I_n	4165A
$\cos(\varphi)$	0,86
f	36,3Hz
n_n	720 1/min

Kyseessä on pystykone, joten se on tyypillinen kone, jolle kaksoistaajuuskuormituskoetta tehdään. Koestettava kone testattiin nimellisellä virralla siten, että kahden generaattorin tuottaman virran rms on induktiokoneen nimellisen virran suuruinen. Myös jännite oli suunnilleen nimellisellä tasolla. Myös testattavan induktiomootorin taajuuden pitää olla mahdollisimman tarkasti nimellinen, jotta koneen sisällä oleva ilma kiertäisi aitoa käyttötilannetta vastaavasti. Liki pitäen samoja virran, jännitteen ja pyörimisnopeuden arvoja käytettiin kaikissa yrityksissä saada testattava kone kuormalle, joten saadut tulokset ovat siltä osin keskenään vertailukelpoisia

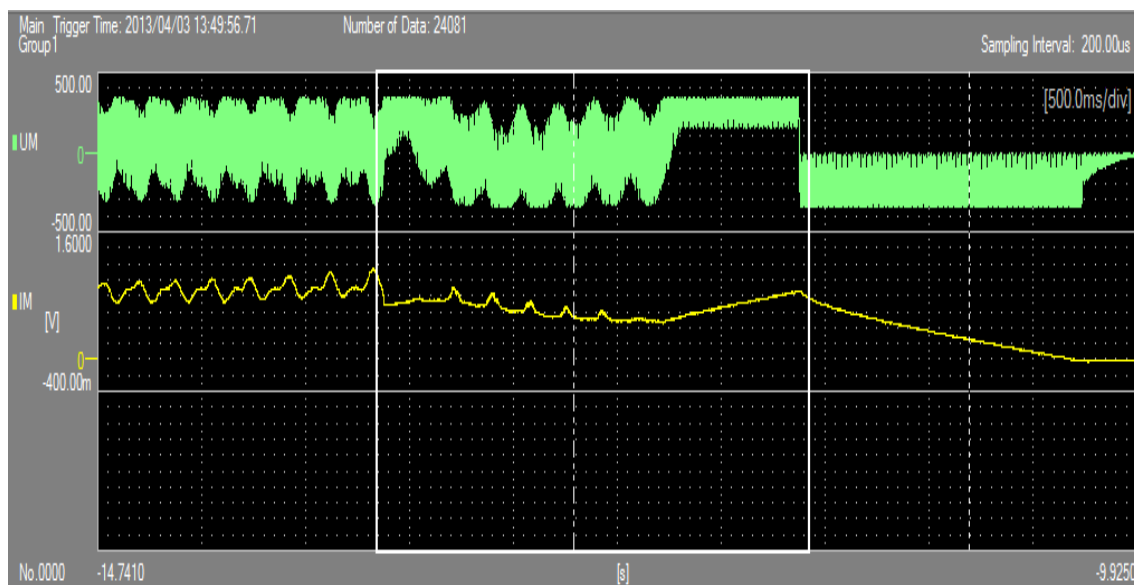
Mittauksessa käytössä olleet mittauskanavat ovat seuraavat:

Taulukko 2. Mittauksen mittauskanavat

Kanava	Kuvaajassa kanavan väri
1. Staattorin jännite, U1	harmaa
2. Staattorin jännite, U2	turkoosi
3. Staattorin jännite, U3	sininen
4. Staattorin virta, I1	violetti
5. Staattorin virta, I2	punainen
6. Staattorin virta, I3	vaalea punainen
7. Generaattorin magn.,Um	vihreä
8. Generaattorin magn.,Im	keltainen

Edellä mainitut mittauskanavat ovat molemmissa haaroissa samat kuvan 2 (ks. s.) mukaisesti.

Molemmista 2f-verkon haaroista mitattiin induktiomootoreille menevät virrat ja jännitteet ja vastaavien haarojen generaattorien magnetoinnit.



Kuva 7. magnetointijännite U_m ja magnetointivirta I_m

Mittaukset suoritettiin induktiokoneen normaalin koestuksen yhteydessä. Tätä lopputyötä varten ei tehty erikseen erillisiä mittauksia, mikä johtuu osaltaan varmasti koneiden erittäin tiukoista läpivientiajoista. Mittauksiin valittiin induktiokone, jonka suurella varmuudella tiedettiin aiheuttavan ongelmia. Testissä käytettävän verkon haluttiin olevan täsmälleen samanlainen, kuin millä eniten ongelmia on esiintynyt.

Mittaustuloksista voidaan havaita, että syötön jännitteet ovat koko ajan varsin tasaisia. Jännitteissä ei näy ennen eikä jälkeen kuormalle nostamista mitään piikkejä tai poikkeavuuksia. Virrassa on nähtävissä aluksi kohinaa, mutta kun jännitettä lähdetään nostamaan, kohina loppuu lähes kokonaan. Kohinaa ei ole siten havaittavissa pitkään aikaan ennen kuormalta putoamista. Erityisesti on mainittava, että jännitteissä ja virroissa ei näytä tapahtuvan mitään outoa kuormalta putoamisen hetkellä.

Näihin tehtyihin havaintoihin perustuen voidaan melko varmasti todeta, että epästabilius ja kuormalta putoaminen eivät johdu saarekeverkon syötöstä. Näin ollen yksi mahdollinen epästabiliutta aiheuttava syy voidaan näin poissulkea.

6 Yhteenveto

Nyt tehtyjen testien perusteella ei voida edelleenkään varmasti nimetä selvää yksittäistä syytä epästabiliudelle. Epästabiliutta aiheuttavien mahdollisten syiden

joukkoa saatiin kuitenkin hieman kavennettua. Nyt voidaan olla melko varmoja siitä, että epästabiilius ei liity suoraan saarekeverkon syöttöön, sillä syötöstä ei tule mitään virtapiikkejä läpi. Syötön jännite ja virta ovat kuormalta putoamisen ajankohtana hyvin tasaisia ja ainoat selvästi muuttuvat suureet ovat magnetointivirta ja -jännite.

Samalla saatiin vihiä siitä, että epästabiilius voi johtua generaattorien yrityksestä tahdistua keskenään. Vaikka mittauksista ei vastauksia kaikkiin kysymyksiin saada, voidaan niitä kuitenkin pitää olosuhteisiin ja resursseihin nähden melko onnistuneina. Siten tästä työstä saatiin hyvä väliraportti kaksoistaajuuskuormituskokeen epästabiiliusongelmien selvittelyssä.

Testaustapa, pitkästä historiastaan huolimatta, vaatii vielä lisää tutkimista. Sarjaan kytkettyjen generaattoreiden tahdistavaa vääntömomenttia voitaisiin hyvin tutkia simuloimalla ja tekemällä generaattoreista tarkat mallit sekä simuloimalla niiden käyttäytymistä sarjaankytkettyinä. Samalla päästäisiin testaamaan myös säädön vaikutusta kokonaisuuteen. Tämä on käytännössä ainoa järkevä tapa tutkia sopivia taajuuksia, koska kokonaisuus koostuu hyvin monesta epälineaarisesti muuttuvasta tekijästä. Simulointi on myös siten järkevä vaihtoehto, että se ei vaikuta tuotantoon mitenkään. Samalla on mahdollista testata helposti useita erilaisia konfiguraatioita.

Lähteet

- 1 Paavola, Martti. 1968. Sähkötekniikan oppikirja, 9.painos, WSOY.
- 2 Saari, Rauno. 1968. Sähkötekniikan käsikirja 1, Tammi.
- 3 Silvonen, Kimmo. 2009. Sähkötekniikka ja piiriteoria, Otatieto.
- 4 Tipler & Mosca. 2007. Physik Für Wissenschaftlern und Ingenieure, 2. Auflage, Spektrum.
- 5 Squires, G.L. 2001. Practical Physics, 4th Edition. Cambridge.
- 6 Rießinger, Thomas. 2007. Mathematik für Ingenieure, 6. Auflage, Springer.
- 7 Kuphaldt, Tony R. Lessons In Electric Circuits Vol 2, 6. Edition,
- 8 Finley, Hodowanec, Hussain, Larabee. 2004. Understanding Complete Tests Performed On Induction Motors. Siemens Energy & Automation, Inc.
- 9 Aura, Lauri & Tonteri, Antti J. 1986. Sähkömiehen käsikirja 3, WSOY.
- 10 Hughes, A. 2006. Electric Motors and Drives. 3th edition. Newnes.

Liitteen otsikko

Tähän kirjoitetaan liitteen sisältö. Alla on ohje liitteiden poistamiseksi ja lisäämiseksi siten, että ylätunnisteet säilyvät oikeanlaisina

Ohje tarpeettoman liitteen poistamiseksi:

1. Valitse ensin kokonaisuudessaan liitteenä oleva sivu ja poista sen sisältö Delete-näppäimellä.
2. Kun olet tyhjentämäsi liitesivun alussa, paina kerran askelpalautinta (Backspace), jolloin liitettä edeltävä osan vaihto poistuu.

Ohje uuden liitteen lisäämiseksi:

1. Siirrä kohdistin viimeisen olemassa olevan liitesivun loppuun.
2. Valitse Sivun asettelu ja valintanauhasta Vaihdot / Osanvaihdot - Seuraava sivu. Näin loppuun tulostuu uusi liite, mutta sen ylätunnisteessa oleva numero ei ole oikea.
3. Kaksoisnapauta uuden liitesivun ylätunnistetta, jossa on väärä liitteen numero. Jos valintanauhassa näkyy nyt valittuna vaihtoehto ”Linkitä edelliseen”, paina kyseistä painiketta siten, että vaihtoehto ei enää ole valittuna.
4. Korjaa liitteen numero oikeaksi.

Huomaa, että liitteet on päivitettävä sisällysluetteloon manuaalisesti.

Liitteen otsikko

Tähän kirjoitetaan liitteen sisältö.