

Pienjännitemoottoreiden sähköisen kunnonvalvonnan
kehittäminen Tornio Works kylmävalssaamalla

Jani Ellala

Sähkötekniikan koulutusohjelma
Sähkövoimatekniikka
Insinööri (AMK)

KEMI 2013

ALKUSANAT

Aluksi tahdon kiittää Outokumpu Stainless Oy:stä Ins. Juha Iisakkaa opinnäytetyön aiheen etsimisestä ja neuvoista työn edetessä, sekä DI Einari Fyhriä, jolta sain paljon ammattimaista neuvontaa työn edetessä. Lisäksi kiitokset ohjaaja DI Jaakko Etolle ammattimaisista neuvoista.

Kiitokset myös muille henkilöille, jotka ovat auttaneet tämän työn valmistumisessa.

Torniossa 10.5.2013

Jani Ellala

TIIVISTELMÄ

KEMI-TORNION AMMATTIKORKEAKOULU, Tekniikka

Koulutusohjelma:	Sähkötekniikan koulutusohjelma
Opinnäytetyön tekijä:	Jani Ellala
Opinnäytetyön nimi:	Pienjännitemoottoreiden sähköisen kunnonvalvonnan kehittäminen Tornio Works kylmävalssaamalla
Sivuja (joista liitesivuja):	86 (6)
Päiväys:	10.5.2013
Opinnäytetyön ohjaajat:	DI Jaakko Etto, Kemi-Tornion AMK DI Einari Fyhr, Outokumpu Stainless Oy ins. Juha Iisakka, Outokumpu Stainless Oy
<p>Opinnäytetyö tehtiin Outokumpu Stainless Oy:n Tornion tehtaille kylmävalssaamo 1:n jäähdytysvesilaitoksille sekä kylmävalssaamo 2:n TCM-valssaimelle. Työssä tutkittiin syytä moottoreiden tiheälle rikkoutumiselle JVL-laitoksilla ja TCM-valssaimen värähtelylle. Samalla kartoitettiin kunnossapitotoimet ja niiden riittävyys moottoreille.</p> <p>Työssä tutustuttiin aluksi erilaisiin sähkömoottorityyppeihin ja niiden toimintaan lyhyesti, keskittyen oikosulku- ja tahtimoottoreihin. Moottoreiden lisäksi kerrottiin taajuusmuuttajista, taajuusmuuttajakäytöistä sekä niiden aiheuttamista haitoista. Kunnossapidon perusteet käsiteltiin lyhyesti keskittyen värähtelymittauksiin perustuvaan kunnossapitoon. Tutkittaessa syytä moottoreiden rikkoutumiselle käytiin läpi nykyiset kunnossapitotoimet ja niiden riittävyys, sekä tilattiin laakerivirtamittaus. Lopuksi kerrottiin mittauksen tuloksista, sekä havaituista puutteista ja jatkotoimenpiteistä. TCM-valssaimen värähtelyn syyn selvittämiseksi tilattiin MACHsense- kunnonvalvontatutkimus.</p> <p>Työn pääasiallisena materiaalina käytettiin ammatillista kirjallisuutta, laitetoimittajien ohjeita ja muita valmistajien teknisiä materiaaleja. Kunnossapitokäytännöt ja historiatiedot on pääosin etsitty KUTI- järjestelmästä. Osa tiedoista on hankittu haastatteleamalla työtekijöitä.</p> <p>Työssä tarkasteltiin kunnossapidon riittävyttä moottoreille, sekä toteutettiin ulkopuolisen toimijan tekemä laakerivirtamittaus JVL:lle ja MACHsense- kunnonvalvontamittaus RAP-5:lle. Muussa kunnossapidossa ei ollut havaittavissa selkeitä puutteita. Laakerivirtamittauksella saatiin näyttöä laakerivirrasta, joka onkin todennäköisin syy laakereiden rikkoutumiseen. Mittauksen yhteydessä saatiin myös korjausehdotus, jolla laakerivirtoja voidaan ehkäistä. Korjausehdotuksen mukaan selkeimmät puutteet olivat moottoreiden maadoituksissa sekä taajuusmuuttajan suodattimissa. Kunnonvalvontamittauksen virallisia tuloksia ei ehditty saada tähän opinnäytetyöhön aikataulullisista syistä.</p>	
Asiasanat: kunnonvalvonta, kunnossapito, sähkökäytöt, sähkömoottorit, taajuusmuuttajat, värähtelyt.	

ABSTRACT

KEMI-TORNIO UNIVERSITY OF APPLIED SCIENCES, Technology

Degree programme:	Electrical Engineering
Author:	Jani Ellala
Thesis title:	Development of Electrical Condition Monitoring for Low-voltage Motors at Tornio Works Cold Rolling Mill
Pages (of which appendixes):	86 (6)
Date:	May 10, 2013
Thesis instructor:	Jaakko Etto, MSc (el.eng) Einari Fyhr, MSc, (el.eng) Outokumpu Stainless Oy Juha Iisakka, BEng, Outokumpu Stainless Oy
<p>This study was made for Outokumpu Stainless Oy Tornio cold rolling mill 1 cooling water facilities and the cold rolling mill 2 TCM-rolling. The purpose was to examine the reasons of frequent breakage of motors in cooling water facilities and vibration in TCM-rolling.</p> <p>Various types of electric motors and their functions were examined first in brief, focusing on the cage induction and synchronous motors. In addition, frequency converters, variable speed drives as well as damages caused by drives were reported. The basics of maintenance are discussed in brief, focusing on vibration based maintenance. In the quest for reasons of breakage of motors, the current maintenance activities were gone through, checked for their adequacy and bearing current measurement were ordered. Finally, results of the measurement were told, as well as the deficiencies found and about further actions. To determine the cause of the vibration on the TCM-rolling, MACHsense-condition monitoring research was ordered.</p> <p>Professional literature, other technical materials and instruction manuals from manufactures and equipment suppliers were the main information resources of this study. Maintenance practices and history were mainly looked at from KUTI system. Some information was acquired by interviewing the workers.</p> <p>The study examined the adequacy of maintenance of motors, and bearing-current measurement was submitted by an external operator to cooling water facility as well as MACHsense condition monitoring measurement to RAP-5. In other maintenance, clear deficiencies were not detected. The evidences of bearing currents were got from the bearing current measurements, which is most likely causing the bearing failures. During the measuring, a proposed correction was given about how bearing currents can be prevented. According to the correction proposal, the most apparent deficiencies were in the grounding of the motors and filters of frequency converters. The official results from the condition monitoring measurements came too late in this study to be reported, due to schedule limitations.</p>	
<p>Keywords: condition monitoring, maintenance, electric drives, electric motor, frequency converter, vibration.</p>	

SISÄLLYS

ALKUSANAT	2
TIIVISTELMÄ	3
ABSTRACT	4
SISÄLLYS	5
KÄYTETYT MERKIT JA LYHENTEET	8
1 JOHDANTO	9
1.1 RAP-5/ TCM-valssain	10
1.2 JVL 1 ja 2	11
2 SÄHKÖMOOTTORIT	13
2.1 Vaihtosähkömoottorit	13
2.1.1 Staattorikenttä	13
2.1.2 Roottorikenttä	15
2.2 Epätahtimoottorit	15
2.2.1 Oikosulkumoottori	16
2.2.2 Liukurengasmoottori	17
2.3 Tahtimoottorit	17
2.3.1 Perinteinen tahtimoottori	17
2.3.2 Kestomagneettimoottori	19
2.3.3 Synkronireluktanssimoottori	20
2.3.4 Avonapainen reluktanssikone	21
2.4 Tasavirtamoottorit	22
2.4.1 Rakenne	22
2.4.2 Toiminta	23
2.4.3 Moottorityypit	24
2.5 Moottoreiden tiedot ja käyttö	26
2.5.1 Kilpiarvot	26
2.5.2 Hyötysuhdeluokat	26
2.5.3 Lämpötilankesto	27
2.5.4 Asennustavat	27
2.5.5 Käyttötavat	28
3 TAAJUUSMUUTTAJAT	30
3.1 Taajuusmuuttajat	30
3.2 Välipiirillinen taajuusmuuttaja	30
3.2.1 Tasasuuntaus	30
3.2.2 Vaihtosuuntaus	32

3.3	Välipiiritön taajuusmuuttaja	33
3.3.1	Syklokonvertteri	34
3.3.2	Matriisikonvertteri.....	36
3.4	Taajuusmuuttajan käyttöönotto	37
4	MOOTTORI- JA TAAJUUSMUUTTAJAKÄYTÖT.....	39
4.1	Taajuusmuuttajakäytöt	39
4.2	Oikosulkumoottorin vääntömomentti.....	39
4.2.1	Suorakäytöllä (DOL).....	39
4.2.2	Taajuusmuuttajakäytöllä	40
4.3	Oikosulkumoottorin valinta taajuusmuuttajakäyttöön	42
4.4	Moottorinsuojaus taajuusmuuttajakäytössä.....	42
4.5	Taajuusmuuttajakäyttöjen verkkovaikutukset	43
4.6	Laakerivirrat	44
4.6.1	Yhteismuotoinen virtapiiri	45
4.6.2	Kipinätyöstö	46
4.6.3	Laakerivirtojen mittaaminen	46
4.6.4	Laakerivirtojen ehkäiseminen	47
5	KUNNONVALVONTA	49
5.1	Mitä kunnossapito on?.....	49
5.2	MACHsense-P.....	50
5.3	Värähtelymittaukset.....	51
5.3.1	Värähtelymittausten toteutus.....	52
5.3.2	Anturit	52
5.4	Moottoreiden ennakkohoito	53
5.4.1	Laakerityypit	53
5.4.2	Laakeriviat.....	54
5.4.3	Laakereiden voitelu	54
5.4.4	Lämpökuvaus	55
5.4.5	Moottoreiden puhdistus.....	56
5.4.6	Sähkönlaatumittaukset	57
6	KUNNOSSAPITO JÄÄHDYTYSVESILAITOKSELLA JA RAP-5:LLÄ.....	59
6.1	Ennakkohoito.....	59
6.2	JVL:n moottoreiden voiteluhuollon määrittäminen.....	59
6.3	Toteutuva ennakkohoito	61
6.3.1	JVL-laitokset.....	61
6.3.2	RAP-5/ TCM-valssain.....	62

6.4	Moottoreiden vikaantumistiheys jäähdytysvesilaitoksilla.....	62
6.5	Sähköisen ylikuormasuojauksen käyttö	63
7	MITTAUKSET	64
7.1	Värähtelymittaus käytännössä	64
7.2	Laakerivirtojen mittaus.....	66
7.3	MACHsense-P mittaus	72
8	YHTEENVETO TULOKSISTA	74
9	POHDINTA	76
	LÄHTEET.....	77
	LIITTEET	80

KÄYTETYT MERKIT JA LYHENTEET

AI/DI	Analog / Digital input (Analoginen/ digitaalinen tulo)
AO/DO	Analog / Digital output (Analoginen/ digitaalinen lähtö)
Cos φ	Tehokerroin
CSI	Current Source Inverter (Virtavälipiirillinen taajuusmuuttaja)
DC	Direct current (Tasavirta)
DOL	Direct On Line (Suorakäyttö)
dU/d_t	Jännitesuodin
EDM	Electrical Discharge Machining (Kipinätyöstö)
EHU	Ennakkohuolto (Outokummulla)
EMC	Electromagnetic compatibility (Elektromagneettinen yhteensopivuus)
f_c	Taajuusmuuttajan lähtötaajuus
f_v	Verkon taajuus
I_m	Magnetoimisvirta
JVL	Jäähdytysvesilaitos
KUTI	Outokummun kunnossapidon tietojärjestelmä
MCSA	Motor Current Signal Analysis (Moottorin virta-analyysi)
mmv	Magnetomotorinen voima
n_n	Nimellispyörintänopeus
PAM	Pulse-amplitude Modulation (Pulssin amplitudimodulaatio)
PWM	Pulse-width Modulation (Pulssin leveysmodulaatio)
RAP-5	Kylmävalssaamo 2:n tuotantolinja (Rolling, Annealing, Pickling eli valssaus, hehkutus, peittäus)
REGE	Regenerointi, happojenkäsittely
STFT	Short-Time Fourier Transform
TCM	Tandem-valssain (RAP-5)
U_n	Nimellisjännite
VSI	Voltage Source Inverter (Jännitevälipiirillinen taajuusmuuttaja)

1 JOHDANTO

Outokumpu Stainless Oy valmistaa erilaisia ruostumattomia teräslaatuja Tornion tehtailla. Outokummun Tornion toiminnot koostuvat pääasiassa kuudesta erillisestä lohkokosta: ferrokromin tuotanto, terässulatto, kuumavalssaamo, kylmävalssaamo, tutkimuskeskus sekä satama.

Kylmävalssaamoja tehdasalueella toimii kaksi, kylmävalssaamo 1 ja kylmävalssaamo 2 (tutummin RAP-5), joissa kuumavalssaamolta tulevat mustat teräsnauhat jatkokäsittelyä siten, että lopputuotteena on tuttua hopeanväristä terästä. Tuotantolinjat vaativat tiettyjä tukitoimintoja toimiakseen. Tukitoiminnoista työssä käsitellään kylmävalssaamo 1:een kuuluvia jäähdytysvesilaitoksia 1 ja 2 (JVL), joissa prosessien tarvitsema jäähdytysvesi jäähdytetään kylmävalssaamoille ja regenerointilaitoksille.

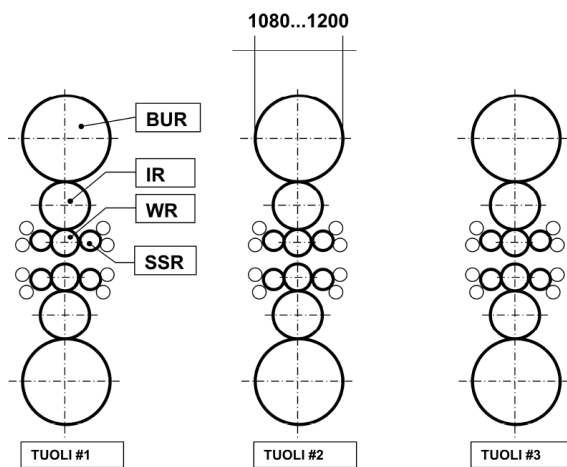
Työn lähtökohtana on jäähdytysvesilaitosten moottoreiden kestävyysongelmien sekä RAP-5:n TCM-valssaimen 2.standilla havaitun 300Hz:n värähtelyn syyn selvittely. Jäähdytysvesilaitoksien osalta työssä keskitytään jäähdytysveden kierrätyspumppujen moottoreiden kestävyysongelmien selvittelyyn, vaikka laitoksella on paljon muitakin moottoreita, joissa on ollut kestävyysongelmia. Osa moottoreista on taajuusmuuttajaohjattuja, osa suorakäyttöisiä. TCM-valssaimella olevat moottorit ovat syklokonverteriohjattuja tahtimoottoreita.

Työssä käydään aluksi läpi erilaisia olemassa olevia sähkömoottorityyppejä, niiden tekniikkaa sekä erilaisia moottoreiden asennus- ja käyttötapoja. Moottoreiden tekniikassa keskitytään pääasiassa oikosulku- ja tahtimoottoreihin, koska työssä käsiteltävissä kohteissa on käytössä ko. moottorityypit, lisäksi ne ovat muutenkin yleisimmin käytössä olevat moottorityypit. Toisessa osassa kerrotaan taajuusmuuttajista, niiden aiheuttamista ongelmista ja taajuusmuuttajaohjatuista moottorikäytöistä. Kolmanneksi kerrotaan kunnonvalvonnasta ja ennakkohuollosta, keskittyen värähtelymittauksiin perustuvaan kunnonvalvontaan ja sen avulla havaittaviin vikoihin ja ongelmiin. Lopuksi kerrotaan syvemmin syyt, miksi työ tehtiin ja mitä ongelmia tai vikoja löydettiin työn tuloksena.

1.1 RAP-5/ TCM-valssain

RAP-5 on jatkuvatoiminen kylmävalssauslinja, jossa samaan linjaan on integroitu kylmävalssaus, hehkutus ja peittäus, viimeistelyvalssaus ja venytysoikaisu. Linjalla ensimmäisessä vaiheessa kuumavalssaukselta tuleva nauha valssataan TCM-valssaimella. Valssauksen jälkeen toisessa vaiheessa tulee hehkutus ja peittäus, jossa nauha ensin hehkutetaan uunissa punahekkuseksi ja jäähdytetään, jonka jälkeen peitataan erilaisissa happoseoksissa. Kolmannessa vaiheessa suoritetaan viimeistelyvalssaus ja venytysoikaisu, joilla teräsnauhan pinnanlaatua parannetaan mm. poistamalla mahdollisia vääntymiä. (Onet, hakupäivä 6.3.2013)

TCM-valssain on kolmesta valssituolista koostuva valssain (kuva 1), jolla on mahdollista ohentaa nauhaa n. 50 % alkuperäisestä vahvuudesta. Valssituoli rakentuu neljästä erillisestä valssista: tuki (BUR)-, väli (IR)-, sivutuki (SSR)- ja työvalssista (WR). Valssaimella nauha kulkee työvalssien välissä. Valssausvoimaa säädellään painamalla valssirullia yhteen hydraulikkasyntereiden avulla, samalla valssaimen teloja pyöritetään sopivalla nopeudella. Valssauksen lopputulos (ohentuma) riippuu pääasiassa nauhan nopeuserosta valssien tulo- ja jättöpuolilla, nopeuseroa säädellään syöttönopeutta, valssaimen nopeutta ja telojen painetta säätämällä. Nopeuserot aiheuttavat nauhassa ja teiloissa suuren kitkan, josta seuraa voimakas lämpötilan nousu. TCM-valssaimen suurin ajonopeus on n. 250m/min ja suurin vetovoima 650N/mm². Valssaimen teloja pyöritetään suurella, 6MW:n sähkömoottorilla vaihdelaatikon välityksellä (kuva 2). (Halttu 2011, 14; Matinlassi)



Kuva 1. TCM-valssaimen rakenne (Halttu 2011, 14)



Kuva 2. TCM-valssaimen käyttömoottori

1.2 JVL 1 ja 2

Jäähdytysvesilaitoksilla (JVL) hoidetaan tuotantoprosessien tarvitseman jäähdytysveden jäähdyttäminen. Jäähdytysvesilaitoksia on kaksi, JVL-1 ja JVL-2. JVL-1 on rakennettu kylmävalssaamo 1 rakentamisen yhteydessä 1976, mutta sitä on kunnostettu tarpeen vaatiessa. JVL-2 on rakennettu 2001 (kuva 3), kylmävalssaamo 2:n(RAP-5) ja Rege-3:n rakentamisen yhteydessä hoitamaan niiden tarvitsema jäähdytysveden tarve. Kylmävalssaamoilla jäähdytystä tarvitaan uuneilla oleville toimilaitteille, peittauksen hapoille sekä hehkutuksen jälkeiseen nauhanjäähdytykseen HP-linjoilla ja RAP-5:llä. Lisäksi valssaimilla tarvitaan jäähdytystä valssausöljyjen jäähdyttämiseen. Regessä jäähdytystä tarvitaan happojen jäähdytykseen ja tasaamaan kemiallisten prosessien lämpötiloja.



Kuva 3. JVL-2 sisältä, kuvassa kierrätyspumppujen moottorit.

Tuotantolinjojen jäähdytystarve hoidetaan suljetulla, vesikiertoisella jäähdytyksellä lämmönvaihtimien avulla. JVL-laitoksien kierrätysaltaille vesi tulee palovesialtaiden ylivuotona. Palovesialtaille vesi tulee jokivesipumppaamolta. Kierrätysaltailta vesi pumpataan kierrätyspumpuilla eri linjoille, joissa jäähdytys tapahtuu lämmönvaihtimilla. Linjoilta vesi palaa takaisin JVL-laitoksien jäähdytystorneille, jotka on sijoitettu altaiden päälle (kuva 4). Jäähdytystorneilla vesi suihkutetaan torniin, josta se ”sataa” takaisin altaaseen. Jäähdytystä voidaan tehostaa tornien päällä olevilla erillisillä puhaltimilla, joilla vesisumua imetään, jolloin vesi on ilmassa pidempään. Lisäpuhaltimia käytetään, mikäli vesi ei vapaasti sumuttuen ehdi jäähtyä tarpeeksi. Altailta kierto jatkuu jälleen uudelleen pumppujen avulla takaisin linjoille.



Kuva 4. JVL-2:n jäähdytystornit ja jäähdytysvesiallas

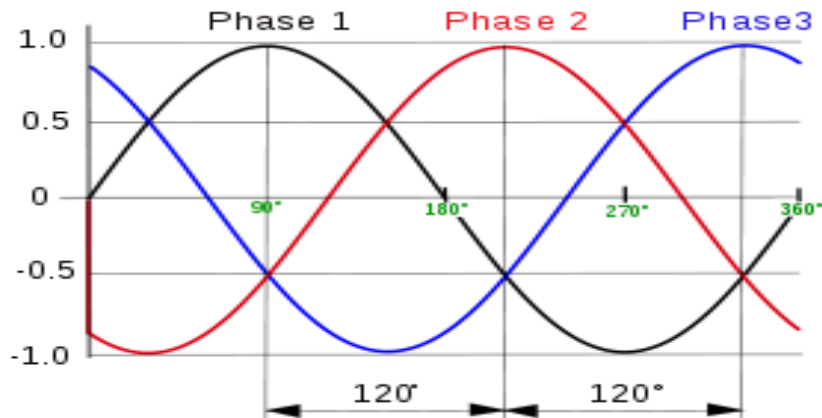
2 SÄHKÖMOOTTORIT

2.1 Vaihtosähkömoottorit

Pyörivät sähkökoneet, tutummin moottorit ja generaattorit, ovat laitteita joilla voidaan muuttaa mekaaninen energia sähköenergiaksi ja toisin päin. Nykyään käytössä olevat koneet ovat pääsääntöisesti vaihtosähkökoneita, tosin joitain tasasähkömoottoreita on vielä käytössä, lähinnä teollisuudessa. Nykyisin käytössä olevat generaattorit ovat pääsääntöisesti vaihtosähkölaitteita.

2.1.1 Staattorikenttä

Yleisimmät käytössä olevat koneet, tahti- ja epätahtikoneet ovat toiminnaltaan ns. kiertokenttäkoneita, joissa pyörivä magneettikenttä luodaan staattorikäämityksen avulla. Rakenteeltaan staattori on yksinkertainen rautalevystä tehty lieriö, jonka uriin käämi-vyyhdet sijoitetaan. Perinteisissä kolmivaihemoottoreissa pyörivä magneettikenttä toteutetaan syöttämällä kolmivaiheiseen staattorikäämitykseen kolmivaiheinen vaihtojännite 120° :n vaihesiirrolla. (Hietalahti 2011a, 51–52,56)



Kuva 5. Symmetrinen 3-vaiheinen jännite. (Powermaxx www-sivut, hakupäivä 25.3.2013)

Kytettäessä staattorikäämitys symmetriseen kolmivaihejännitteeseen (kuva 5), alkaa käämeissä kulkea symmetrinen virta, jonka mmv (magnetomotorinen voima) on virran kanssa samanvaiheinen. Yhden vaiheen virran ollessa huipussa on sen mmv vastaavasti huipussaan, samaan aikaan muiden vaiheiden virrat on puolet maksimiarvosta, negatiivisella puolella, kuten kuvan 5 kuvaajasta näkee. Resultoiva magnetomotorinen voima on kuitenkin maksimiarvossaan olevan vaiheen suuntainen. Tästä johtuen staattorissa

syntyy magneettivuo, jolla on N- ja S-navat. Kentän pyörähtäessä magneettivuon navat muuttavat paikkaansa, jolloin syntyy pyörivä magneettikenttä. (Hietalahti 2011a, 56)

Staattorikentän nopeus

Oikosulkumoottoreiden pyörintänopeus määräytyy staattorin magneettikentän pyörintänopeudesta. Perusrakenteinen moottori, jossa on yksi S ja N napa, on kaksinapainen. Kuvassa 6 on esitetty yksinkertaistettu, kolmivaiheisen oikosulkumoottorin kytkentä ja käämintäperiaate. Kaksinapaisessa koneessa kenttä pyörii 50Hz verkossa 50 r/s, josta seuraa 3000r/min. Kaksinapaisessa moottorissa käämien vastinparit ovat 180°:n päässä toisistaan. Moottoriin voidaan käämiä sama vaihe useampaankin kertaan, jolloin saadaan aikaan staattorin kehälle useampia napoja. Sijoitettaessa käämien vastinparit 90°:n päähän toisistaan, saadaan aikaan nelinapainen moottori. Nelinapaisessa koneessa on luotu staattorin kehälle kaksi magneettikentän kierrosta, jolloin pyörintänopeus laskee 1500r:een/min. Napapareja voi olla enemmänkin, jolloin pyörintänopeus laskee edelleen. Moottorin pyörintänopeus voidaan laskea kaavan 1 mukaan.

$$n_s = \frac{f}{p} \quad (1)$$

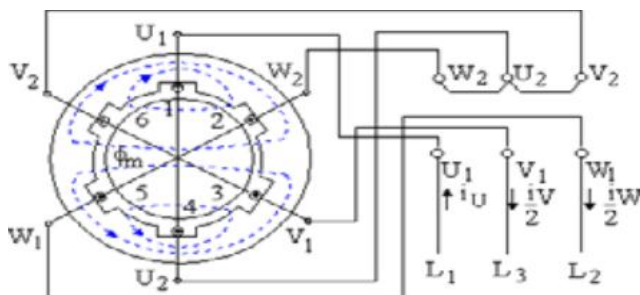
Jossa

n_s = synkroninen nopeus

f = taajuus Hz

p = napapariluku

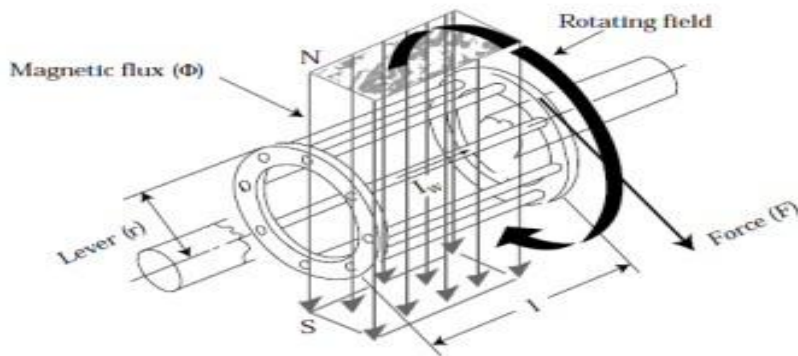
Oikosulkumoottorin pyörimisnopeutta voidaan säätää vain muuttamalla koneen napaparilukua tai ohjaamalla sitä taajuusmuuttajalla (ks. kaava 1). Napapariluku määräytyy staattorin kääminnästä, eikä sitä voida muuttaa jälkeenpäin. Staattoriin voidaan käämiä kaksi erillistä käämitystä, jolloin saadaan aikaan kaksinopeusmoottori. Taajuusmuuttaja-ohjauksella vaikutetaan suoraan staattoriin syötettävän jännitteen taajuuteen, jolloin staattorin magneettikentän nopeus muuttuu. (Hietalahti 2011a, 60)



Kuva 6. Oikosulkumoottorin yksinkertaistettu kytkentä ja käämitys. (Korpinen 1998, hakupäivä 5.2.2013)

2.1.2 Roottorikenttä

Moottorin pyörivä osa on akseli, joka virallisesti tunnetaan roottorina. Roottori sijaitsee keskellä staattorikäimitystä, jonne se on tuettu laakereiden avulla moottorin runkoon kiinni. Roottorikäimityksen leikatessa staattorikäimityksen tuottamaa magneettivuota siihen indusoituu lähdejännite. Yhdistettäessä roottorikäimitys suljetuksi virtapiiriksi roottorissa alkaa kulkea lähdejännitteen aiheuttama roottorivirta. Roottorivirta saa aikaan magnetomotorisen voimavaikutuksen, joka saa roottorin pyörimään (kuva 7). Roottoreiden rakenteissa on eroja moottorityypistä riippuen, rakenne-eroista on kerrottu tarkemmin moottorityypeittäin.



Kuva 7. Roottorikenttä ja magneettiset voimavaikutukset. (Motorsystems www-sivut, hakupäivä 6.2.2013)

2.2 Epätahtimoottorit

Epätahtimoottorissa roottori pyörii aina staattorin magneettikenttää hitaammin, mistä epätahtimoottori- nimityskin johtuu. Roottorin pyöriessä siihen indusoituu lähdejännite, joka saa aikaan roottorivirran ja vääntömomentin. Mikäli roottori saavuttaisi staattorikentän nopeuden, se ei leikkaisi magneettivuota eikä roottoriin indusoituisi jännitettä. Tyhjäkäynnissä roottori saavuttaa lähes staattorikentän nopeuden. Epätahtimoottorin staattorin kentän ja roottorin pyörimisnopeuseroa kutsutaan jättämäksi. Jättämän yhteydessä puhutaan usein käsitteestä suhteellinen jättämä, joka on jättämän prosentuaalinen arvo. Suhteellinen jättämä määritellään kaavan 2 mukaan.

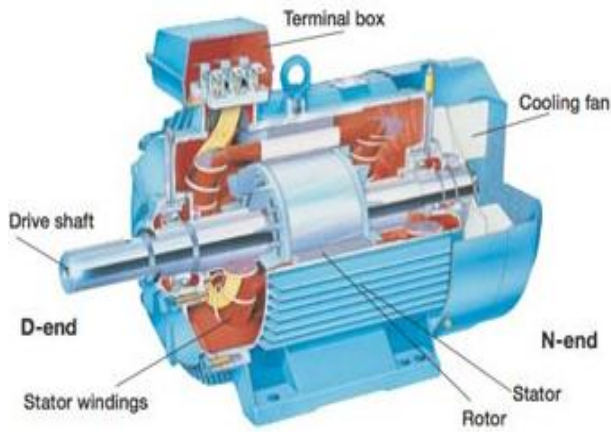
$$s = \frac{n_s - n}{n_s} * 100\% \quad (2)$$

Jossa,

s= jättämä

n_s= synkroninen nopeus

n= todellinen pyörimisnopeus



Cooling fan= Tuuletin

D-end= Vetopää

Drive shaft= Käyttöakseli

N-end= Vapaapää

Rotor= Roottori

Stator windings= Staattorikäänitys

Stator= Staattori

Terminal box= Kytentäkotelo

Kuva 8. Oikosulkumoottorin leikkauskuva ja rakenne. (Goldberg 2012, hakupäivä 13.2.2013)

2.2.1 Oikosulkumoottori

Oikosulkumoottori on yleisin käytössä oleva epätahti- tai induktiomoottori. Oikosulkumoottorin rakenne ja osat on esitetty kuvassa 8. Oikosulkumoottorin nimitys johtuu roottorin oikosuljetusta käämityksestä. Roottori on rakenteeltaan yksinkertainen, rautalevyistä koottu lieriö, jonka pinnalla on urat käämistä varten. Käämit ovat painevalettuja alumiini- tai kuparisauvoja, jotka ovat päistään oikosuljettu. (Aura & Tonteri 1996a, 165)

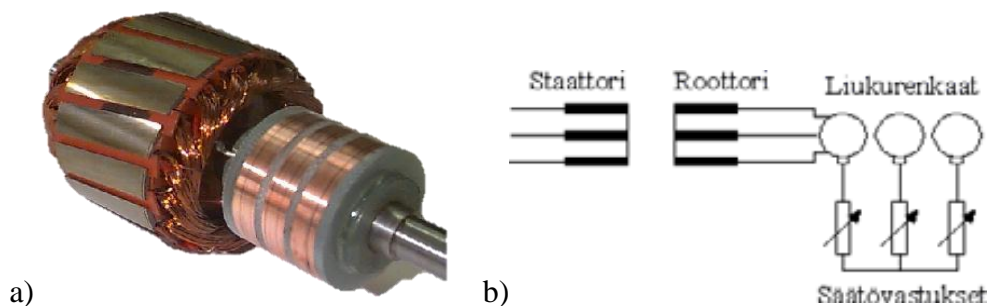
Rakenteeltaan oikosulkumoottori on yksinkertainen ja suljettu (kuva 9). Suljetun rakenteensa vuoksi moottori on suhteellisen kestävä ulkoisia tekijöitä vastaan. Moottoreita on saatavilla suoraan hyllytavaran monilla eri tehoilla. Oikosulkumoottori on edullinen yksinkertaisen rakenteensa ja suurten valmistuserien vuoksi. Hyvän saatavuutensa, edullisuuden ja helppokäyttöisyytensä vuoksi oikosulkumoottorit ovatkin suosittuja käytössä. (Hietalahti 2011a, 59)



Kuva 9. Oikosulkumoottori (Mechanicalengineering www-sivut, hakupäivä 6.2.2013)

2.2.2 Liukurengasmoottori

Liukurengasmoottori poikkeaa oikosulkumoottorista vain roottorin osalta. Roottorikäänitys on eristetty, eikä sitä ole oikosuljettu roottorissa. Liukurengasmoottoreissa roottori on käämittävä staattorin kanssa samalle napaluvulle. Roottori on kytketty tähteen, ja käämien toiset päät tuodaan moottorin ulkopuolelle liukurenkaiden ja hiiliharjojen avulla. Kuvissa 10 a ja b näkyy liukurengaskoneen roottori ja koneen periaatteellinen kytkentä, tosin kuvan 10 b mukainen kytkentä on nykyään jo harvinainen. Moottorin ulkopuolella hiiliharjojen kautta johdettu roottorikäänitys viedään ulkoiseen käynnistysvastukseen. Vastuksella vaikutetaan roottoripiirin resistanssiin, jolla on merkitystä moottorin käynnistysvirtaan ja momenttiin. Liukurengasmoottorin käynnistysmomentti suhteessa virtaan on suuri. Roottori tulee oikosulkea moottorin käynnistyttyä. Oikosuljenta tapahtuu asettamalla ulkoiset vastukset nolnaan tai käyttämällä moottorissa oikosulkulaitetta. Oikosulkulaite oikosulkee roottorin ja nostaa hiiliharjat ylös, jolloin hiiliharjat eivät kulu turhaan eikä synny turhia hankaushäviöitä. Liukurengasmoottoreita ei juuriakaan enää käytetä kuin joissain harvoissa erikoissovelluksissa, jossa tavallisen oikosulkumoottorin käynnistysvirta kasvaisi liian suureksi tai käynnistysaika tulisi liian pitkäksi, jota moottori ei kestä. (Aura & Tonteri 1996a, 196–197)



Kuva 10 a) Esimerkki liukurengasroottorista b) Liukurengasmoottorin kytkentäperiaate. (a, Kikuchi & Kenjo 1997, hakupäivä 6.2.2013 b, Korpinen 1998a, hakupäivä 5.2.2013)

2.3 Tahtimoottorit

2.3.1 Perinteinen tahtimoottori

Tahtimoottorissa roottori pyörii staattorin magneettikentän kanssa samalla nopeudella. Rakenteeltaan tahtimoottori on epätahtimoottorin kaltainen, ainoa rakenteellinen ero on roottorissa. Tahtimoottorissa roottori ei ole lieriömäinen, kuten epätahtimoottorissa on. Roottori on navoitettu, jolloin se voi tahdistua staattorikenttään. Roottorin rakenne voi olla umpi- tai avonapainen (kuva 11). Umpinapaista rakennetta käytetään suurilla kierrosluvuilla, kun taas avonapaista pienemmillä kierroksilla. Tahtimoottori tarvitsee toi-

miakseen tasajännitemagnetoinnin. Magnetointi voidaan hoitaa ulkoisella DC-jännitteellä, jolloin kyseessä on harjallinen moottori tai moottorin sisäisellä generaattorirakenteella, jolloin kyseessä on harjaton moottori. Markkinoilla on myös kestmagne-toituja tahtimoottorimalleja, jolloin erillistä magnetointia ei tarvita. Magnetointia muut-tamalla voidaan moottorin tehokerrointa $\cos \varphi$ muuttaa, joten moottoria on mahdollista käyttää loistehon kompensointiin. (Aura & Tonteri 1996a, 214, 255)



Kuva 11. Avonapaisen tahtimoottorin roottori, jossa vaimennuskäämitys. (Csanyi 2012, hakupäivä 7.2.2013)

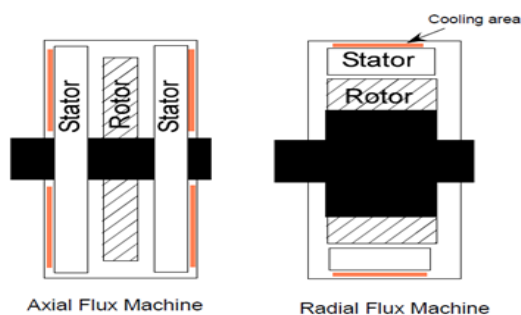
Tahtimoottori voidaan käynnistää suoraan oikosulkumoottorin tavoin verkkoon, mikäli siinä on häkki- eli vaimennuskäämitys. Tahtimoottoreiden vaimennuskäämitys on usein kuitenkin niin heikkorakenteinen, ettei se jaksaa käynnistää konetta riittävän nopeasti. Vaimennuskäämityksen ensisijainen tehtävä onkin tasata koneen käyntiä erilaisissa kuormitustilanteissa. Ilman häkkikämmitystä olevia tahtimoottoreita ei voida käynnistää lainkaan suoraan verkkoon. Häkkikämmityksellä varustettujen, mahdollisesti suoraan käynnistettävien tahtimoottoreiden käynnistykseen voidaan käyttää kaikkia oikosulku-moottorin käynnistystapoja. Ilman häkkikämmitystä olevat moottorit voidaan käynnistää käyttämällä taajuusmuuttajaa, jolloin kone käynnistyy suoraan tahtiin. Tahtimoottoreita käytetäänkin yleensä taajuusmuuttajien kautta. Tahtimoottoreita on aiemmin käytetty pääasiassa hitaissa ja suuritehoisissa, MW- luokan käytöissä. Nykyään tahtimoottoreita on saatavilla suuremmillekin pyörimisnopeuksille. Suuremmat nopeudet ovat mahdol-listuneet kestmagneitoitujen roottoreiden kehittymisen myötä. Tahtimoottoreita käytetään nykyään pääasiassa vaadittaessa yli MW- tehoa. (Aura & Tonteri 1996a, 256; ABB 2011d, 6–7)

Tahtimoottoria käynnistettäessä ei tasavirtamagnetointi saa olla päällä, sillä se voi aiheuttaa napakäämiin vastakkaisen kentän, joka voi estää koneen käynnistymisen. Tasavirtamagnetointi kytketään päälle vasta kun moottori on saavuttanut lähes tahtinopeuden. Moottori tahdistuu vasta magnetointivirran kytkemisen jälkeen. Taajuusmuuttajakäy-

töissä magnetointi tosin tulee kytkeä päälle heti, muutoin kone ei magnetoidu eikä käynnisty. Ilman taajuusmuuttajaa käynnistettäessä magnetointikäämi tulee olla kuitenkin oikosuljettu riittävän pienellä vastuksella käynnistyksen aikana, muutoin siihen voi indusoitua staattorista vaarallinen jännite. Korkeajännite voi aiheuttaa tapaturman tai moottorin rikkoutumisen. Tahtimoottori käytöissä tuleekin olla käynnistyslogiikka, jolla hallitaan staattorikäämin magnetointi ja roottorikäämin oikosuljenta. Harjallisissa moottoreissa käynnistyslogiikka on ulkoinen järjestelmä, kun taas harjattomissa moottoreissa logiikka on sisäinen järjestelmä. (Aura & Tonteri 1996a, 256–257)

2.3.2 Kestomagneettimoottori

Kestomagneettimoottori on kehittynyt viime vuosina voimakkaasti, ja sen soveltamista on tutkittu teollisuuden, hajautetun energiatuotannon että sähköajoneuvojen moottoriksi. Kehityksen ovat mahdollistaneet kehittyneet kestomagneetit, jotka eivät enää demagnetoidu herkästi, tosin haittana on joidenkin kestomagneettimateriaalien lämmönkesto. Rakenteeltaan kestomagneettimoottori on oikosulkumoottorin tyyppinen, sen staattori koostuu dynamolevypaketista, jonka urissa on kolmivaihekäämitys. Moottorin ominaisuudet riippuvat voimakkaasti roottorin rakenteesta, joten roottorirakennetta muuttamalla voidaan moottorin ominaisuuksia muuttaa. Moottorit on jaettu kahteen päätyyppiin, radiaali- ja aksiaalivuokoneiksi, sen mukaan miten magneettivuo vaikuttaa akselilinjaan nähden (kuva 12). Kestomagneettimoottori vaatii aina oman vektorisäätöön kykenevän taajuusmuuttajan, joten sitä ei voi ajaa suoraan verkosta. (Hietalahti 2011a, 111–112,116)



Kuva 12. Aksiaali- ja radiaalivuorakenteisen moottorin periaatteellinen rakenne (Green-carcongress 2010, www-sivu, hakupäivä 22.2.2013)

Aksiaalivuorakenteinen moottori voi koostua useammastakin staattori-roottori yhdistelmästä. Sijoittamalla useampia yhdistelmiä peräkkäin voidaan koneen suorituskykyä kasvattaa. Epäsymmetrinen rakenne, yksi staattori-roottori yhdistelmä aiheuttaa suuren magneettisen aksiaalivoiman. Suuren aksiaalivoiman vuoksi akselille tulee rakentaa

riittävän voimakas aksiaalilaakerointi. Symmetrisessä rakenteessa, jonka ilmaväli on yhtä suuri joka puolella moottoria ei tätä ongelmaa synny, silloin magneettiset aksiaalivoimat kumoutuvat. Aksiaalivoima on voima, joka syntyy, kun magneettikenttä pyrkii vetämään rautarakennetta puoleensa. Aksiaalivoima voi olla vääntömomenttia tuottavaa voimaa suurempi. (Hietalahti 2011a, 111)

Radiaalivuorakenteisen moottorin roottori voidaan toteuttaa useammalla eri tavalla, massiivi- tai levyrakenteisena. Roottori voidaan toteuttaa myös ilman rautaa, mutta silloin se vaatii voimakkaat magneetit, koska magneettikenttä kulkee ilman ylitse. Raudaton rakenne vaatii myös moottoria ohjaavalta taajuusmuuttajalta suurta kytkentätiheyttä. Massiivirakenteissa roottorissa magneetit on liimattu roottorin pintaan, mutta tätä menetelmää voidaan käyttää lähinnä pienillä pyörimisnopeuksilla. Suurilla nopeuksilla magneettien kiinnipysyminen varmistetaan esim. hiilikuitupantojen avulla. Pintamagneeteilla toteutetun moottorin käyttö kentänheikennysalueilla on hankalaa, sillä taajuusmuuttajan tulee kyetä syöttämään suuri demagnetoivavirta, joka estää jännitteen nousun. Kentänheikennysalueella koneen vääntömomentti heikkenee, eikä sitä sen vuoksi juurikaan käytetä. (Hietalahti 2011a, 114,116)

Upotettaessa magneetit roottoriin voidaan ne sijoitella eri asentoihin. Upotetuin magneetein varustetun roottorin sähköisetkin ominaisuudet muuttuvat verrattuna pinnalla oleviin magneetteihin. Upotettaessa magneetit roottoriin ne voidaan valmistaa suorakaitteen muotoon, jolloin magneettien hankalalta muotoilemiselta vältytään. Upotettuja magneetteja käytettäessä roottorista tulee arvokkaampi, mutta se on puolestaan mekaanisesti ja sähköisesti varmempi ratkaisu. Rakenteen suurin etu saavutetaan kuitenkin sähköisissä ominaisuuksissa, rakenteella roottorin mmv saadaan helposti sinimuotoiseksi. Moninapaisilla hitaasti käyville koneilla on usein vakoluku q pieni, jolloin staattorin mmv sisältää paljon harmonisia aaltoja. Harmoniset aallot aiheuttavat vääntömomenttivärettä. Vääntömomenttiväre vähenee, kun roottorin mmv on sinimuotoinen. (Hietalahti 2011a, 114)

2.3.3 Synkronireluktanssimoottori

Synkronireluktanssimoottori on uusi tulokas moottorimarkkinoilla, se on kehittynyt vasta viime vuosien aikana varteenotettavaksi vaihtoehdoksi oikosulkumoottorien tilalle. Moottori on rakenteeltaan oikosulkumoottorin tyyppinen, mutta roottori on täysin erilainen. Moottorit ovat myös pienempiä ja kevyempiä kuin vastaavat oikosulkumoot-

torit. Reluktanssikoneen roottorissa ei ole häkkikäimitystä eikä magneetteja, kuten kuvasta 13 voi huomata. Magneettien ja käämien sijaan roottorissa hyödynnetään ilmaa ja magneettista epäsymmetriaa. Moottorin etuna on sen synkroninen käynti, se ei tarvitse erillisiä pyörintäantureita. Moottori omaa lisäksi hyvän hyötysuhteen ja tehokkuuden, samalla se on kuitenkin keveä ja pienirakenteinen. Synkronireluktanssimoottoreiden hyötysuhde on IE3-luokan taajuusmuuttajaohjattua moottoria parempi. Moottorin heikkoutena voidaan pitää sen pientä ilmväliä staattorin ja roottorin välissä, joten se ei välttämättä sovellu tärinälle alttiisiin kohteisiin. Synkronireluktanssimoottori vaatii aina oman vektorisäätöisen taajuusmuuttajaohjauksen. (Hietalahti 2011a, 110; ABB 2012, 17–18)



Kuva 13. Synkronireluktanssimoottori (ABB 2012)

2.3.4 Avonapainen reluktanssikone

Avonapainen reluktanssimoottori (kuva 14) on rakenteeltaan yksinkertainen, mutta säätöteknisesti vaativin moottorityyppi. Moottorin yksinkertaisesta rakenteesta johtuen se voidaan integroida jopa suoraan käyttökohteeseensa. Moottorin ainoa käänitys sijaitsee staattorissa, sekin on yksinkertaisempi kuin oikosulkumoottorilla. Moottorin häviöt syntyvät pääasiassa staattorikäänityksessä, joten jäähdytys on helppo toteuttaa. Helpon jäähdytyksen ansiosta koneen kuormitettavuutta voidaan kasvattaa. Moottorin vääntömomentti on virran suunnasta riippumaton, jolloin ohjaimen tehokytinten määrää voidaan vähentää. Moottori tarjoaa suuren vääntömomentin jo pienilläkin nopeuksilla, kuitenkin suhteellisen pienillä virroilla. Moottorin heikoista puolista voidaan mainita sen pulssimainen, epäjatkuva vääntömomentti, joka aiheuttaa mekaanista värähtelyä ja akustista melua. vääntövärähtelyä voidaan nykyisin rajoittaa pienillä nopeusalueilla, mutta laajoilla nopeusalueilla rajoittaminen on käytännössä mahdotonta. Moottori vaatii toimiakseen aina oman vektorisäätöisen taajuusmuuttajan, lisäksi taajuusmuuttajassa tulee olla hyvin suodatettu välipiiri koneen ottaman pulssimaisen tehon vuoksi. (Hietalahti 2011a, 123)



Kuva 14. Reluktanssi moottorin staattori ja roottori (Goldberg 2012, hakupäivä 13.2.2013)

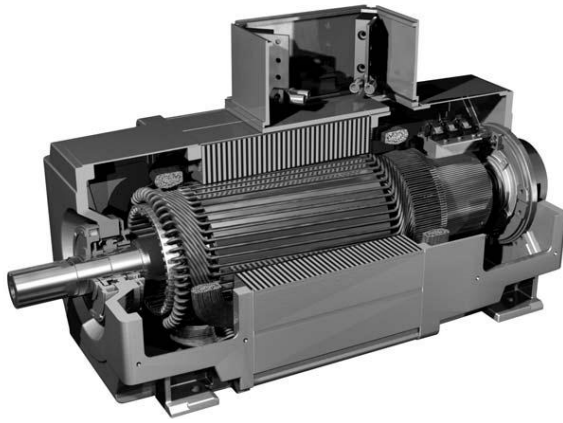
2.4 Tasavirtamoottorit

Tasavirtamoottorit ovat olleet aiemmin suosittuja teollisuuden säädetyissä käytöissä niiden helpon ohjattavuuden ja ominaisuuksien muokattavuuden vuoksi. Tasavirtakoneen ominaisuuksiin voidaan vaikuttaa muuttamalla ankkuripiirinjännitettä tai magneetointia kentänheikkennysalueilla. Tasavirtakoneet saavuttavat lähes täyden vääntömomentin suoraan käynnistyshetkestä alkaen. Tasavirtamoottoreita voidaan ohjata yksinkertaisilla säädetyillä suuntaajilla ja hakkuriteholähteillä.

2.4.1 Rakenne

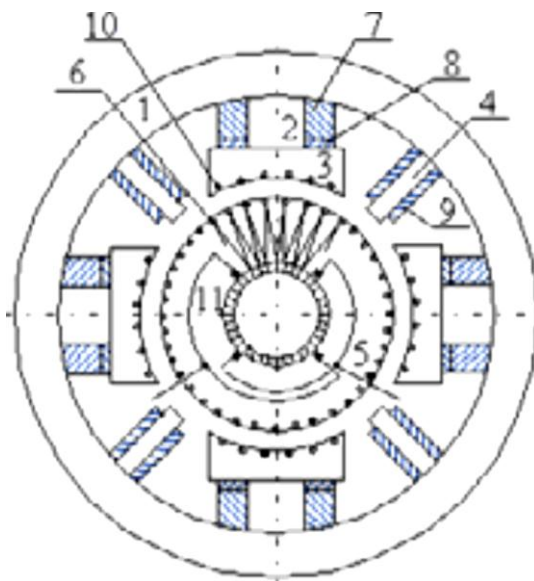
Rakenteellisesti ja toiminnallisesti tasavirtamoottori poikkeaa oikosulkusulkumoottoreista monella tavalla. Kummankin toiminta perustuu kuitenkin magneettikenttiin, vaihtojännitekoneilla on luonnollisesti vaihtuva magneettikenttä, tasavirtakoneilla se on tasakenttä. Tasavirtamoottorin staattorista käytetään usein nimitystä seisvoja, ja roottoria nimitetään usein ankkuriksi. Kuvassa 15 on tasavirtamoottorin leikkauskuva, jossa etualalla näkyy roottori ja oikealla taempana kommutaattori ja hiiliharjat.

Moottoreiden heikkouksia ovat monimutkainen rakenne ja jatkuva huollon tarve sekä ulkoisen jäähdytyspuhaltimen tarve roottorin jäähdytykseen. Roottori on tasavirtamoottorin monimutkaisin ja rakenteellisesti hankalin osa, mikä tekee siitä arvokkaan. Toiseksi moottorin kuluvat osat, hiiliharjat ja kommutaattori vaativat jatkuvaa seuranta ja huoltoa. (Hietalahti 2011a, 35)



Kuva 15. Tasavirtakoneen rakenne (ABB 2011a, hakupäivä 5.2.2013)

Tasavirtakoneen tärkeimmät sähköiset osat ovat: ankkuri ja ankkurikäänitys, kommutaattori, magneettinavat staattorissa, staattorikehä sekä hiiliharjat (kuva 16). Tasavirtakoneilla staattori voi olla tehty raudasta, sillä se toimii tasamagneettikentässä. Moottorin kehän ja napojen rautaosat ovat yleensä täysrautaa, mutta ne voivat olla myös rakennettu sähkölevystä rautahäviöiden vähentämiseksi. Ankkurin sydän on valmistettu sähkölevystä, sillä se pyörii tasamagneettikentässä, jolloin pyörintäliike aiheuttaa siihen vuon vaihteluita ja rautahäviöitä. (Aura & Tonteri 1996a, 267)



- 1= Staattorikehä
- 2= Päänavan sydän
- 3= Napakenkä
- 4= Kääntönavan sydän
- 5= Ankkurin rautasydän
- 6= Ankkurikäänitys
- 7= Sivuvirtakääänitys
- 8= Sarjavirtakääänitys
- 9= Kääntönavankääänitys
- 10= Kompensointikäänitys

Kuva 16. Tasavirtakoneen sähköiset osat (Korpinen, 1998b, hakupäivä 25.3.2013)

2.4.2 Toiminta

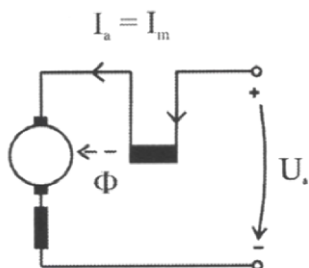
Tasavirtamoottoreiden toiminta perustuu seisojalla luotavaan magneettikenttään, jota kutsutaan pääkentäksi. Kun seisojan eli staattorin keskelle sijoitettuun ankkuriin syötetään ulkoinen virta, ankkuri magnetoituu, jolloin syntyy magneettisia voimavaikutuksia

staattorin ja ankkurin välille. Näiden voimavaikutusten johdosta ankkuri lähtee pyörimään. (Aura & Tonteri 1996a, 267)

Moottorin toiminnalle välttämätön pääkenttä muodostetaan staattorissa erilaisten magnetointikäämitysten avulla. Näiden lisäksi staattorissa sijaitsevat kääntönapa- ja kompensointikäämitykset, joiden avulla kommutaattorin kipinöintiä kumotaan. Kääntönapa-käämitys on kytkettävä aina sarjaan ankkurin kanssa. Tasavirtamoottorissa teho syötetään hiiliharjojen kautta kommutaattoriin, josta edelleen ankkurikäämityksiin. Kommutaattorin avulla syötettävän tasajännitteen napaisuus ankkurissa vaihtuu, ts. kommutaattori on mekaaninen vaihtosuuntain. Kommutaattori synnyttää ankkurissa vaihtuvan magneettikentän, joka saa sen pyörimään staattorin luomassa tasakentässä. Tasavirtamoottoreiden ominaisuuksia ja soveltuvuutta voidaan muokata muuttamalla niiden magnetointia. Yleisimmät moottorityypit ovat: sarjamagnetoitu, sivuvirtamagnetoitu ja vierasmagnetoitu. Teollisuussovelluksissa yleisimmin on käytössä vierasmagnetoitu moottori. (Aura & Tonteri 1996a, 267–269)

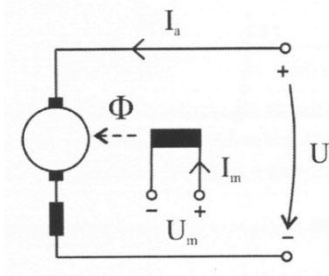
2.4.3 Moottorityypit

Sarjamagnetoidun moottorin (kuva 17) magnetointi tapahtuu päänavoille asennettujen sarjakäämitysten avulla. Käämitys on kytketty sarjaan ankkurin kanssa, jolloin moottori magnetoituu ankkurivirralla. Sarjamoottori käynnistetään muuttamalla ankkurijännitettä $0 - U_n$ tai sarjavastuksen avulla. Moottorin käynnistämiseen tulee käyttää sarjavastusta, mikäli ankkurijännitettä ei voida säätää. Sarjamoottoria ei saa päästä koskaan tyhjäkäyntiin, tyhjäkäynnissä koneen kierrokset nousevat vaarallisen korkeiksi. Sarjamoottoria ei juuri enää käytetä muualla kuin pienissä akkukäyttöisissä sovelluksissa. (Aura & Tonteri 1996a, 296–297)



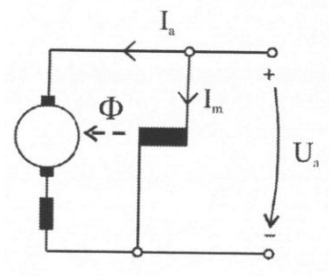
Kuva 17. Sarjamagnetoidun DC-moottorin periaatekytkentä (Hietalahti 2011a, 42)

Vierasmagnetoitu moottori (kuva 18) magnetoidaan erillisellä magnetointivirralla, erillisen magnetointikäätymyksen avulla. Konetta käynnistettäessä kytketään ensin magnetointi päälle, jonka jälkeen ankkurivirta voidaan kytkeä. Moottori käynnistetään säätämällä ankkurijännitettä $0-U_n$ tai säätämällä ankkuripiirin sarjavastusta, mikäli lähteen jännitettä ei voida säätää. Sarjavastusta käytetään ainoastaan käynnistyshetkellä. Vierasmagnetoidun moottorin pyörimisnopeutta voidaan säätää muuttamalla ankkurijännitettä, magnetoimisvirtaa I_m tai lisäämällä resistanssia ankkuripiiriin. Ankkuripiirin resistanssia lisäämällä menetetään pyörimisnopeusriippumaton kuormitettavuus, eikä tekniikkaa muutenkaan ole juuri enää käytössä. Ankkurijännitesäätöä voidaan käyttää nopeusalueella $0-n_n$, magnetointivirran säätöä käytetään kentänheikennysalueella aina $2,5*n_n$ nopeuteen saakka. Vierasmagnetoitu moottori on yleisin teollisuuden käyttämä tasajännitemoottori. (Aura & Tonteri 1996a, 291–294)



Kuva 18. Vierasmagnetoidun DC-moottorin periaatekytkentä (Hietalahti 2011a, 44)

Sivuvirtamoottori (kuva 19) on rakenteeltaan vierasmagnetoidun moottorin tyyppinen, ero on vain magnetointitavassa. Sivuvirtamoottorissa magnetointijännite otetaan ankkuripiirin rinnalta. Sivuvirtamoottorin käynnistystä ja pyörimisnopeutta voidaan säätää magnetoimis- tai ankkuripiirin asennettavalla sarjavastuksella. Liitinjännitteen muuttamista ei voida käyttää, koska silloin ankkuri- ja magnetointivirta muuttuu yhtä aikaa. (Aura & Tonteri 1996a, 294–296)



Kuva 19. Sivuvirta DC-moottorin periaatekytkentä (Hietalahti 2011a, 43)

2.5 Moottoreiden tiedot ja käyttö

2.5.1 Kilpiarvot

Moottoreiden ominaisuudet määritellään IEC 60034 standardissa. Tärkeimmät tiedot, jotka moottorista tulee tietää, on esitetty moottorin arvokilvessä (kuva 20). Arvokilvissä esiintyviä tietoja ovat: Moottorin tyyppi ja malli, valmistaja, valmistusvuosi, nimellijännite, -virta, -teho, -taajuus, $\cos \phi$, nopeus, sallittu pyörimissuunta, käyttötapa, asennustapa, suojausluokka, käämierityksen lämpöluokka, hyötysuhde, paino, sekä laakereiden tiedot.

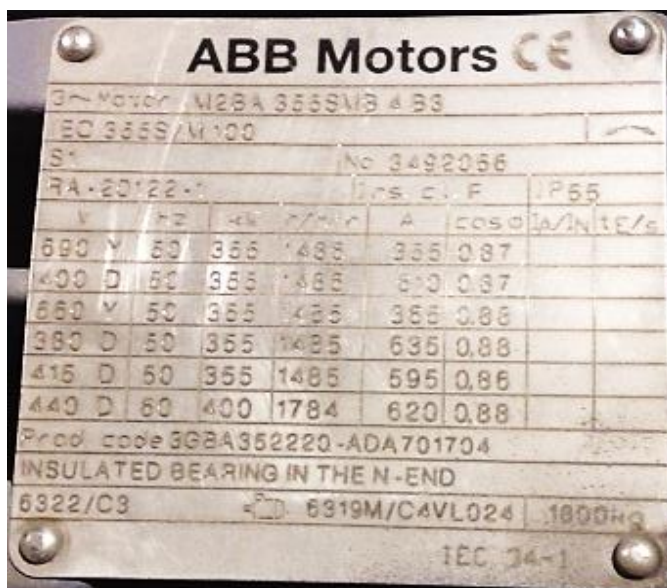


ABB Motors CE

3~ Motor M2BA 355SVB 4 B3
 EO 355S/M100
 S⁺ No 3492056
 RA-20122-1 Ins. cl. F IP55

V	f _z	kW	r/min	A	cosφ	IA/NI/IC/c
690 V	50	355	1485	335	0.87	
400 D	50	355	1485	510	0.87	
660 V	50	355	1485	355	0.88	
380 D	50	355	1485	635	0.88	
415 D	50	355	1485	595	0.86	
440 D	50	400	1784	620	0.88	

Prod. code 3GBA35222Q-ADA701704
 INSULATED BEARING IN THE N-END
 6322/C3 6319M/CAVL024 1800kg
 IEC 34-1

Kuva 20. Erään ABB:n moottorin arvokilpi

2.5.2 Hyötysuhdeluokat

Hyötysuhteet noudattavat IEC 60034-30 standardia, joka on uusittu 2008. Uusittu luokitus kattaa 2-, 4- ja 6-napaiset 0,75-375 kW:n moottorit, myös Ex-luokitellut. Uusittu standardi yhtenäistää maailmanlaajuisesti moottoreiden hyötysuhdeluokituksen. Moottorit luokitellaan nykyään ns. IE-luokituksella, aiemman EFF-luokituksen sijaan. Hyötysuhteet on jaettu neljään eri luokkaan:

- IE1, Standard
- IE2, High
- IE3, Premium
- IE4, Super premium.

IE-4 luokan osalta standardisointi on vielä kesken, mutta sekin valmistuneen vuoden 2013 aikana. Käytettävien moottoreiden energiatehokkuus määritellään EU:n direktiivissä 640/2009, jonka vaatimukset otetaan käyttöön vuosien 2011- 2017 aikana vaiheittain. Kesäkuusta 2011 alkaen on moottoreiden tullut täyttää IE-2 luokan vaatimukset. Vuodesta 2015 alkaen 7,5- 375 kW:n moottoreiden tulee täyttää IE-3 luokan vaatimukset tai IE-2 luokkaan kuuluvat koneet tulee asentaa taajuusmuuttajakäyttöisinä. Vuodesta 2017 alkaen 0,75-7,5kW:n moottorien tulee täyttää IE-3 luokan vaatimukset tai IE-2 luokkaan kuuluvat koneet on asennettava taajuusmuuttajakäyttöisinä. (Motiva 2011, 8–9, hakupäivä 28.1.2013)

2.5.3 Lämpötilankesto





































Käämityksen lämpötilankesto jaetaan kolmeen luokkaan, jotka merkitään kirjaintunnuksin B, F ja H. Luokkien maksimilämpötila kertoo lämpötilan, joka käämityksen eristeiden tulee kestää. Taulukossa 1 on esitetty tarkemmin suurimmat sallitut lämpötilat tietyille eristysluokalle. (ABB 2011b, 9)

Taulukko 1. Käämieristysluokkien korkeimmat sallitut lämpötilat (ABB 2011b, 9)

MÄÄRITELMÄ	ERISTYSLUOKKA		
	B	F	H
Suurin sallittu ”kuumimman pisteen” lämpötila. °C	130	155	180
Suurin sallittu vastusmittauksella määritetty lämpötila. °C	120	145	165
Suurin sallittu käämityksen lämpenemä, kun ympäristön lämpötila hetkellisesti +40 °C.	80	105	125

2.5.4 Asennustavat

Asennustavaltaan moottoreita on pääasiassa kahdenlasia, jalallisia ja laipallisia. Moottoreita on saatavilla myös näiden yhdistelmiä. Koneiden rakenne- ja asennuslaji ilmaistaan IEC-tunnuksin. Tunnuksille on olemassa kaksi vaihtoehtoista järjestelmää, code I ja II. Kuvassa 21 on tyypillisiä moottoreiden asennustapoja tunnuksineen ja kokoineen, kuva on ABB:n esitteestä. Samalla tunnuksella olevat moottorit ovat keskenään mitallisesti yhteensopivia valmistajasta riippumatta. (Aura & Tonteri 1996b, 338)

Code I/Code II							
Foot-mounted motor	IM B3 IM 1001	IM V5 IM 1011	IM V6 IM 1031	IM B6 IM 1051	IM B7 IM 1061	IM B8 IM 1071	M000007
							
Flange-mounted motor, large flange	IM B5 IM 3001	IM V1 IM 3011	IM V3 IM 3031	*) IM 3051	*) IM 3061	*) IM 3071	
							M000008
Flange-mounted motor, small flange	IM B14 IM 3601	IM V18 IM 3611	IM V19 IM 3631	*) IM 3651	*) IM 3661	*) IM 3671	M000009
							
Foot- and flange-mounted motor with feet, large flange	M B35 IM 2001	IM V15 IM 2011	IM V36 IM 2031	*) IM 2051	*) IM 2061	*) IM 2071	
							M000010
Foot- and flange-mounted motor with feet, small flange	IM B34 IM 2101	IM V17 IM 2111	IM 2131	IM 2151	IM 2161	IM 2171	M000011
							
Foot-mounted motor, shaft with free extensions	IM 1002	IM 1012	IM 1032	IM 1052	IM 1062	IM 1072	
							M000012
*) Not stated in IEC 60034-7.							

Kuva 21. Moottoreiden asennuslajit, Code I ja II tunnuksin. (ABB 2011b, 7)

2.5.5 Käyttötavat

Käyttötapa kertoo, millaiseen käyttöön moottori on käyntiajallisesti suunniteltu. Moottoreiden käyttötavat ilmoitetaan ns. S-merkinnällä standardin IEC 60034-1 mukaan. Käyttötavat on jaettu kymmeneen osaan, käyttötapojen mukaan luokitellen. Taulukossa 2 on eriteltyä käyttötavat ja niiden kuvaukset. (Motiva 2011, 26–28, hakupäivä 28.1.2013)

Taulukko 2. Standardin IEC 60034-1 mukaiset käyttötavat.

S1: Jatkuva käyttö

Kone toimii vakiokuormituksella niin pitkän ajan, että loppulämpötila saavutetaan.

S2: Lyhytaikainen käyttö

Kone toimii vakiokuormituksella määrätyn, niin lyhyen ajan, että loppulämpötilaa ei saavuteta. Jokaista toiminta-aikaa edeltää niin pitkä tauko, että kone saavuttaa ympäröivän ilman tai muun jäähdytysaineen lämpötilan. Suositeltuja käyttöaikoja ovat 10, 30, 60 ja 90 min.

S3: Jaksollinen ajoittaiskäyttö

Käyttö muodostuu sarjasta keskenään samanlaisia jaksoja, joista jokaiseen kuuluu toiminta-aika vakiokuormituksella sekä seisonta-aika. Loppulämpötilaa ei saavuteta jakson aikana. Ajoittaiskäyttökerroin on 15, 25, 40 tai 60 %, jossa jakson pituus 10 min.

S4: Jaksollinen ajoittaiskäyttö

Käyttö muodostuu sarjasta keskenään samanlaisia jaksoja, joista jokaiseen kuuluu käynnistysaika, toiminta-aika vakiokuormituksella sekä seisonta-aika. Loppulämpötilaa ei saavuteta jakson aikana. Käytössä moottori pysähtyy luonnollisella tavalla hidastuen tai mekaanisella jarrulla jarruttaen, jolloin moottori ei rasitu termisesti.

S5: Jaksollinen käynnistys- ja jarrutuskäyttö

Käyttö muodostuu sarjasta keskenään samanlaisia jaksoja, joista jokaiseen kuuluu käynnistysaika, toiminta-aika vakiokuormituksella, jarrutusaika ja seisonta-aika. Loppulämpötilaa ei saavuteta jakson aikana. Käytössä käytetään sähköistä jarrutusta, esim. vastavirtajarrutusta.

S6: Pysähtymätön ajoittaiskäyttö

Käyttö muodostuu sarjasta keskenään samanlaisia jaksoja, joista jokaiseen kuuluu toiminta-aika vakiokuormituksella sekä tyhjäkäyntiaika. Loppulämpötilaa ei saavuteta jakson aikana. Ajoittaiskäyttökerroin on 15, 25, 40 tai 60 %, jossa jakson pituus 10 min.

S7: Keskeytymätön käynnistys- ja jarrutuskäyttö

Käyttö muodostuu sarjasta keskenään samanlaisia jaksoja, joista jokaiseen kuuluu käynnistysaika, toiminta-aika vakiokuormituksella sekä jarrutusaika. Jarrutus tapahtuu sähköisesti. Loppulämpötilaa ei saavuteta jakson aikana.

S8: Pysähtymätön määräjaksollinen käyttö

Käyttö muodostuu sarjasta keskenään samanlaisia jaksoja. Jokaiseen jaksoon kuuluu toiminta-aika vakiokuormituksella määrätyllä nopeudella, jota välittömästi seuraa toiminta-aika toisella nopeudella ja toisella vakiokuormituksella. Pyörimisnopeuksia voi olla kaksi tai useampia. Loppulämpötilaa ei saavuteta jakson aikana. Voidaan käyttää esim. napavaihtokoneilla.

S9: Käyttö vaihtelevalla kuormalla ja nopeudella.

Käyttö muodostuu sallitulla käyttöalueella tapahtuvista kuorman ja nopeuden vaihteluista, jotka yleensä eivät ole jaksollisia. Tämä käyttö sisältää usein tapahtuvia ylikuormituksia, jotka voivat merkittävästi ylittää nimelliskuorman. Ylikuormituksen suuruus on huomioitava moottorin nimellistehon valinnassa

S10: Käyttö vaihtelevalla vakiokuormalla.

Käyttöjakso muodostuu enintään neljästä osajaksosta erisuurella vakiokuormalla. Käyttöaika kullakin vakiokuormalla on niin pitkä, että loppulämpötila saavutetaan.

3 TAAJUUSMUUTTAJAT

3.1 Taajuusmuuttajat

Taajuusmuuttaja on laite, jolla voidaan muuttaa siihen liitetyn kuorman syöttöjännitteen taajuutta. Taajuusmuuttajia käytetään pääasiassa moottoreiden ohjaukseen.

Taajuusmuuttajat jakaantuvat kahden tyyppisiin laitteisiin, välipiirillisiin ja välipiirittömiin. Välipiiritöntä muuttajaa kutsutaan yleensä suoraksimuuttajaksi. Välipiirillisessä taajuusmuuttajassa tuleva vaihtojännite ensin tasasuunnataan, jonka jälkeen muodostetaan uudestaan halutun jännitteinen ja taajuinen vaihtosähkö. Suorillamuuttajilla syötettävä vaihtojännite vaihtosuunnataan suoraan uudelle halutulle taajuudelle.

Yleisin käytössä oleva muuttajatyyppe on välipiirillinen taajuusmuuttaja, suoramuuttajia käytetään yleensä vain suuritehoisilla MW- teholuokan käytöillä. Tekstissä taajuusmuuttajalla tarkoitetaan perinteistä, välipiirillistä taajuusmuuttajaa, mikäli muuta ei mainita.

3.2 Välipiirillinen taajuusmuuttaja

Rakenteellisesti välipiirillinen taajuusmuuttaja voidaan jakaa kolmeen päälohkoon: tasasuuntaajaan, jossa vaihtosähkö tasasuunnataan; välipiiriin, sekä invertertiin, jossa tasajännite vaihtosuunnataan. Taajuusmuuttajan toimintaa ohjaa ns. ohjauspiiri, joka tarkkailee tulevaa jännitettä, välipiirinjännitettä sekä lähtöä. Teknisesti taajuusmuuttajat voidaan jakaa kahteen ryhmään välipiirin toteutuksen mukaan, jännitevälipiirillisiin (VSD) tai virtavälipiiriisiin (CSI). (Hietalahti 2011b, 90)

3.2.1 Tasasuuntaus

Jännitevälipiirillisessä taajuusmuuttajassa välipiirin DC-jännitettä pidetään vakiona. Välipiirin jännite tasataan suurehkon kondensaattorin avulla. Yleensä tasasuuntaus toteutetaan 6-pulssisella diodisillalla, mutta voidaan toteuttaa myös 12-pulssisena tai 6-pulssisena tyristori-/ transistorisiltana. Kuvassa 22 on 6-pulssisella diodisillalla toteutetun jännitevälipiirillisen taajuusmuuttajan periaatteellinen kytkentä. Diodisillan tuottama jännite on vakio, joka voidaan laskea kaavalla 3.

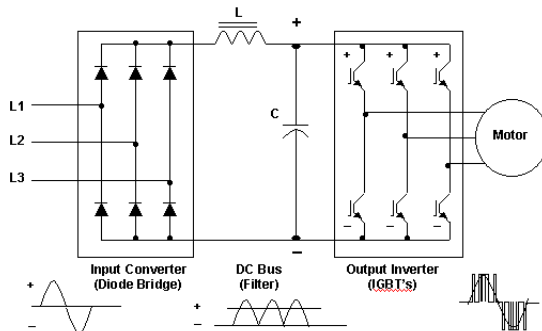
$$U_{dc} = 1,35 * U \quad (3)$$

Jossa

U = verkon pääjännite

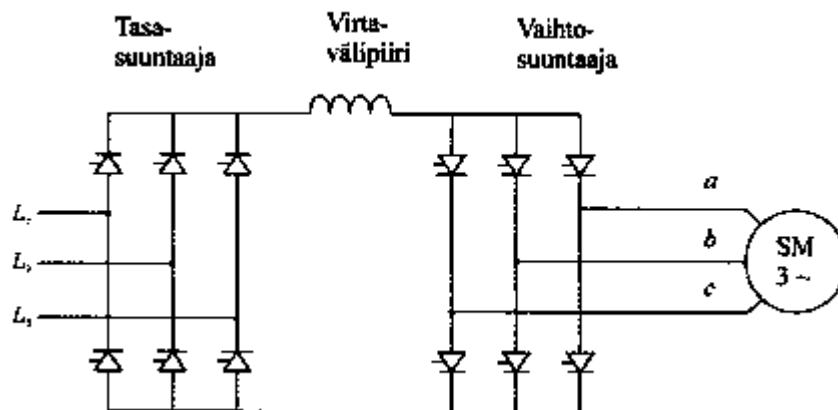
U_{dc} = sillan jännite

Kaavan 3 mukaan laskien, 400 V verkkoon kytketyn 6-pulssisella diodisillalla toteutetun taajuusmuuttajan välipiirissä on n. 540 V tasajännite. (Hietalahti 2011b, 90,92)



Kuva 22. Jännitevälipiirillisen taajuusmuuttajan rakenne (Polka 2001, hakupäivä 6.2.2013)

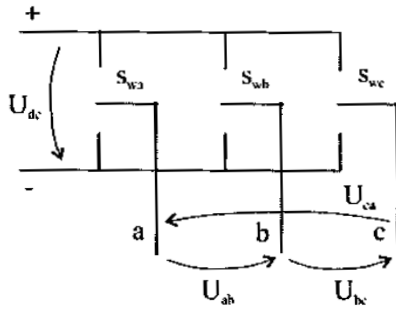
Virtavälipiirillisessä taajuusmuuttajassa (kuva 23) pyritään välipiiriin virta tasoittamaan. Virtavälipiirillisten taajuusmuuttajien tasasuuntaus on toteutettu yleensä 6-pulssisella tyristorisillalla. Välipiiriin virtaa tasoitetaan induktanssin eli kelan avulla. Virtavälipiirillistä taajuusmuuttajaa käytetään yleensä suuritehoisilla tahtimoottorikäyttöillä. Virtavälipiirillisen taajuusmuuttajan heikkouksia ovat tyristorisillan tuottamat yliaallot ja loisteho verkkoon sekä kelan suuri koko. Pienillä tehoilla tyristorisilta ottaa verkosta huomattavasti loistehoa suhteessa pätötehoon. (Hietalahti 2011b, 95)



Kuva 23. Virtavälipiirillisen taajuusmuuttajan rakenne (Hietalahti 2011b, 95)

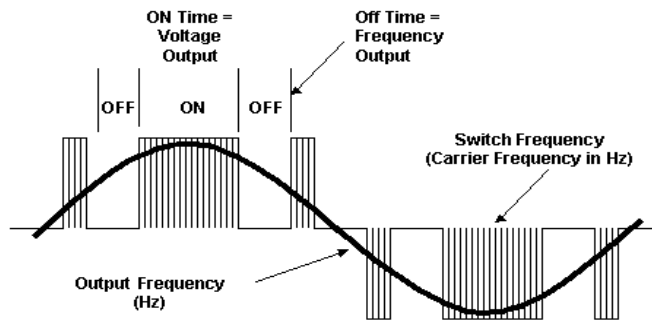
3.2.2 Vaihtosuuntaus

Taajuusmuuttajien lähtöjännite muodostetaan invertterillä. Invertteri on laite, jolla tasajännite vaihtosuunnataan vaihtojännitteeksi. Invertterin toiminta voidaan yksinkertaistaa kuvaamalla sitä kolmella vaihtokytkimellä (kuva 24), joita ohjataan vuorotellen + ja - kiskoihin, siten että muodostuu kolmivaiheverkko, jossa on 120° vaihesiirto.

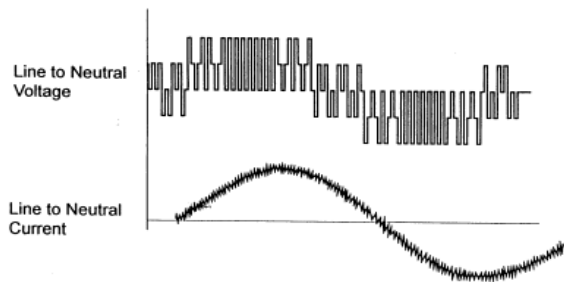


Kuva 24. Kolmivaiheinvertterin kytkinmalli (Hietalahti 2011b, 87)

Invertterin tuottama jännite on käytännössä tiheää kantiaaltoa, joka tasoittuu säröytyneeksi siniaalloksi. Nykyään taajuusmuuttajissa invertterit on toteutettu PAM- tai PWM-tekniikoilla, joista PWM on yleisempi. PAM-tekniikalla säädetään pulssin tehoa ja PWM-tekniikalla säädetään pulssin leveyttä. Kuvassa 25 on esitetty PWM-moduloinnin periaatteellinen toiminta ja jännitteen/virran aaltomuoto, joka menee moottorille. Tarkoituksena PWM-moduloinnissa on katkoa vakio tasajännite kestoltaan ja leveydeltään pulsseiksi, joista integroimalla saadaan siniaallon tapainen jännite (kuva 26). Pulssinleveysmodulaatiolla muodostetaan kampamainen pääjännite, jossa pulssien leveys ja lukumäärä muuttuu taajuuden mukaan. Pienillä taajuuksilla pulssien määrä lisääntyy puolijaksoa kohti, suuremmilla taajuuksilla pulssit vastaavasti vähentyvät. Vaihtokytkiminä käytetyiltä komponenteilta vaaditaan suurta kytkentätiheyttä, jonka vuoksi ohjaus tulee olla mikroprosessoripohjainen. Kytkiminä käytetään nykyään IGBT-transistoreja, aiempien GTO-tyristoreiden sijaan. Virtavälipiirillisissä taajuusmuuttajissa vaihtosuuntaus on toteutettu yleensä tyristoreilla tai GTO-komponenteilla. IGBT-transistoreiden käyttö virtavälipiirillisissä taajuusmuuttajissa vaatii sarjaan kytketyt diodit, joilla varmistetaan virran yksisuuntainen kulku. (Hietalahti 2011b, 87–89)



Kuva 25. PWM- moduloinnin periaate (Polka 2001, hakupäivä 6.2.2013)



Kuva 26. Taajuusmuuttajan moottorille syöttämän jännitteen ja virran aaltomuoto (Polka 2001, hakupäivä 6.2.2013)

Vaihtosuuntaajan PWM-moduloitua lähtöä ohjataan skalaari, vektori tai DTC (Direct Torque Control) -säädöllä. Ohjaustavoista skalaarisäätö on yksinkertaisin, jolla ohjataan vain jännitettä ja taajuutta. Skalaarisäätö ei huomioi moottorin ominaisuuksia, joten kilpiarvoja ei tarvita. Vektorisäätö perustuu laskennallisiin moottorimalleihin ja monimutkaisiin matemaattisiin laskutoimituksiin, joiden perusteella moottoria säädetään. Vektorisäädetyissä käytöissä tarvitaan moottorin nopeus- ja virtatieto. Säätö tapahtuu säätelemällä erikseen momenttia ja käämivuota. DTC-ohjauksella säädetään vektorisäädön tavoin vuota ja momenttia erikseen. DTC-säädöllä saavutetaan nopeampi taajuusvaste kuin muilla ohjaustavoilla, koska erillistä modulaattoria ei tarvita. Säätö perustuu hystereesisäätöön, jossa momentti pyritään säilyttämään tietyllä alueella käyttäen sopivaa jännitevektoria. (Hietalahti 2011b, 107,111; Hedman 2009, 9–13, hakupäivä 18.2.2013)

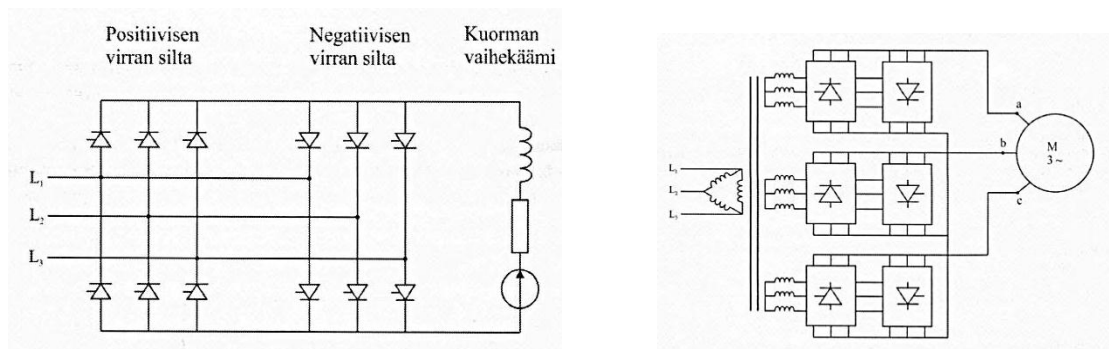
3.3 Välipiiritön taajuusmuuttaja

Välipiirittömässä eli suorassa muuttajassa ei ole tasajännitevälipiiriä. Suorilla muuttajilla tulevan vaihtojännitteen taajuus muutetaan suoraan uudelle halutulle jännitteelle ja taajuudelle ilman tasasuuntausta. Suoramuttajia on olemassa kahden tyyppisiä, syklo- ja matriisikonverttereita. Teknisesti syklokonvertteri ja matriisikonvertteri eivät eroa

juuri toisistaan. Syklokonvertteri on matriisikonvertteria huomattavasti yleisemmin käytetty.

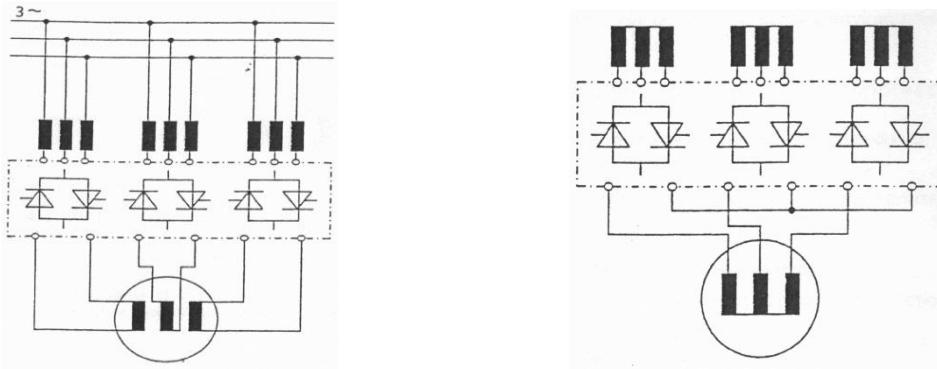
3.3.1 Syklokonvertteri

Rakenteeltaan syklokonvertteri on melko monimutkainen laite, johtuen monista puoli-johdekomponenteista. Syklokonvertteri perustuu vastarinnankytkettyihin tyristorisiltoihin. Yksinkertaisimmillaan syklokonvertterissa yksi vaihe muodostetaan kahdella vastakkain kytketyllä kuusipulssi tyristorisillalla (kuva 27a), jolloin yhdelle vaiheelle tulee 12 tyristoria. Kolmivaiheverkko muodostetaan kytkemällä kolme siltaa rinnakkain (kuva 27b), ja ohjaamalla siltoja siten että vaihe-eroksi saadaan 120° :tta. Syklokonverttereissa suurin lähtötaajuus jää noin puoleen syöttävän verkon taajuudesta, 50 Hz:n verkolla lähtötaajuus on enintään n. 25Hz. Pienestä lähtötaajuudesta ja monimutkaisesta rakenteesta johtuen syklokonverttereita käytetään pääasiassa hitailla, suuritehoisilla käytöillä. Syklokonvertteri käyttöjen lähtötehot ovat tyypillisesti 1-15MW:n luokkaa. (Hietalahti 2011b, 96–97; Siemens, 8)



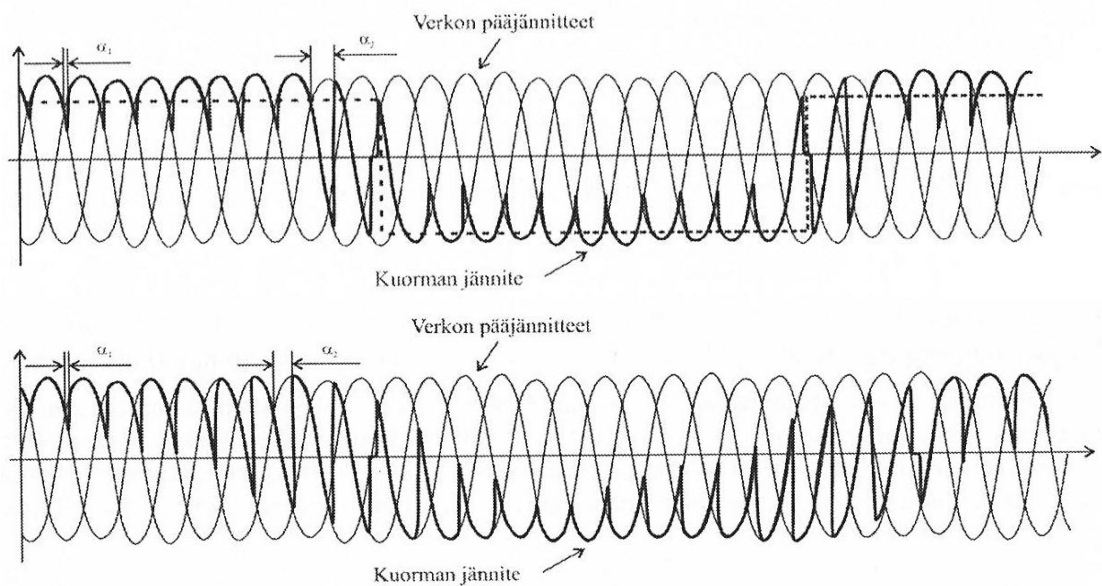
Kuva 27. a) 6- Pulssinen syklokonvertterin tyristorisilta ja b) syklokonvertterin kolmivaiheinen kokonaisuus. (Hietalahti 2011b, 97)

Siltojen kytkentä voidaan toteuttaa sovelluksesta riippuen avoimena tai suljettuna. Avoimessa kytkennässä (kuva 28a) siltoja ei ole kytketty yhteen (vrt. tähtikytkentä), jolloin moottorille viedään kuusi johdinta. Avoimessa kytkennässä tosio on yhteydessä vain magneettisesti moottorissa, jolloin syöttöpuolen vaiheita ei tarvitse galvaanisesti erottaa. Suljetussa kytkennässä (kuva 28b) tyristorisillat ovat lähtöpuolelta tähteenkytkettynä, tässä kytkennässä tulevat vaiheet tulee erottaa syöttömuuntajilla. Syöttömuuntajana voidaan käyttää esim. kolmikäämimuuntajaa. Suljettuja siltoja voidaan kytkeä myös kaksi rinnan, jolloin saadaan 2×6 -pulssinen syklokonvertteri. Tässä rakenteessa syöttömuuntajilla tulee luoda 30° :een vaihesiirto tulopuolelle. (Siemens, 8–9)



Kuva 28. a) Syklokonvertterin avoin kytkentä ja b) -suljettu kytkentä (Siemens, 8–9)

Syklokonvertteria ohjataan tavallisesti sini- tai trapetsiohjauksella. Avoimessa kytkennässä voidaan käyttää ainoastaan siniohjausta, suljetussa rakenteessa molemmat ohjaukset ovat mahdollisia. Trapetsiohjauksella saadaan yläosiltaan tasoittuneempaa jännitettä kuin siniohjausta käytettäessä (kuvat 29a ja 29b). Trapetsiohjauksella saadaan 15 % suurempaa perusaaltoa kuin siniohjauksella, mutta trapetsiohjauksen ongelmaksi voi osoittautua haitalliset 3:lla jaolliset yliaallot. Muutoin 6-pulssisillan luonteenomaiset 5., 7., 11., ja 13. yliaallot ovat amplitudi ja vaihemoduloinnin seurauksena hajaantuneet luonteenomaisen yliaallon ympärille yliaaltoerpeiksi. Parhaimmillaan syklokonvertteri käytöllä voidaan saavuttaa tehokerroin $\cos \phi$ 0,84 siniohjauksella ja trapetsiohjauksella 1. Käytännössä trapetsiohjauksella päästään tehokertoimeen 0,8- 0,87 ja sini ohjauksella 0,73- 0,75. Heikohkot tehokertoimet johtuvat pääasiassa jännitereservistä, syöttömuuntajista ja kommutoinnin vaatimasta loistehosta. (Hietalahti 2011b, 98)



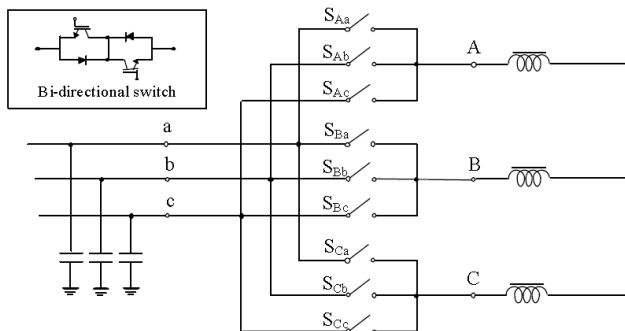
Kuva 29. Syklokonvertterin jännite, a) trapetsiohjauksella (ylempi kuva), b) siniohjauksella (alempi kuva) (Hietalahti 2011b, 98)

3.3.2 Matriisikonvertteri

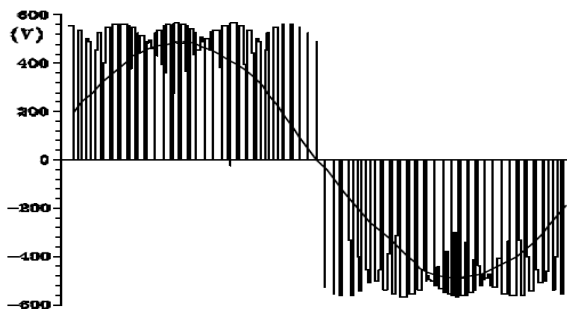
Matriisikonvertteri on syklokonvertterin tavoin suora, välipiiritön taajuusmuuttaja. Matriisikonvertterilla voidaan siirtää tehoa molempiin suuntiin, tuottaen jatkuvaa sinimuotoista virtaa. Matriisikonvertteri toimii siis kaikissa neljässä tehokvadrantissa.

Matriisikonvertterin toiminta perustuu tehpuolijohteilla toteutettuun kytkentään, jossa jokainen syöttävä vaihe voidaan kytkeä mihin tahansa ulostulevaan vaiheeseen. Kytkentä voidaan yksinkertaistaa ajattelemalla se kuvan 30. mukaiseksi kytkinmalliksi.

Ulostuleva jännite muodostetaan matriisikonvertterilla suoraan leikkaamalla sopivia osia syöttöjännitteestä, kuva 31. Tehopuolijohteina kytkennässä käytetään yleensä IGBT-transistoreja, joiden kanssa on diodi sarjassa tai estojännitekestoisia IGBT-komponentteja eli RBIGBT-komponentteja. (Hietalahti 2011b, 99–101; Matteini 2001)



Kuva 30. Matriisikonvertterin kytkinmalli (Matteini 2001, 16)



Kuva 31. Matriisikonvertterin ulostuleva jännite (Matteini 2001, 17)

Matriisikonvertteri on pienikokoinen, joten se on mahdollista integroida jopa suoraan moottoriin. Matriisikonvertterin heikkouksia ovat RBIGBT-komponenttien teknologinen uutuus ja toistaiseksi niiden heikko jännitekestoisuus, maks. 600 V. Toisekseen, vaiheet eivät saa milloinkaan oikosulkeutua ja kuormavirralla täytyy olla aina kulkutie. Matriisikonvertterilla voidaan tuottaa verkon taajuus, mutta ulostulojännite rajoittuu oikosulkumoottorikäytössä 86 %:iin syöttävästä jännitteestä, jolloin 400 V verkossa

maks. jännite on $n \cdot 0,86 \cdot 400 \text{ V} = 386 \text{ V}$. Puhtaalla sini- kolmiovertailumenetelmällä saavutetaan vain 50 %:n jännite. (Hietalahti 2011b, 99–101; Matteini 2001)

Matriisikonvertterin käyttö on rajoittunut joihinkin erikoissovelluksiin ja paikkoihin joissa on rajalliset tilat, mutta vaaditaan suuntaajakäyttöä, tällaisia käyttökohteita ovat esim. lentokoneet. Matriisikonvertterilla on mahdollista yhdistää eri taajuudella käyvät sähköverkot yhteen. (Hietalahti 2011b, 99)

3.4 Taajuusmuuttajan käyttöönotto

Taajuusmuuttajaa käyttöönotettaessa tulee taajuusmuuttaja ensin parametroida. Parametroinnissa taajuusmuuttajalle syötetään käytettävän moottorin perustiedot, jotka löytyvät moottorin arvokilvestä. Parametrointi voidaan suorittaa suoraan taajuusmuuttajan käyttöpaneelilta tai PC:llä laitetoimittajan ohjelmistolla, kolmas vaihtoehto on suorittaa parametrointi automaatiojärjestelmästä väylän kautta. Taajuusmuuttajassa voi olla satoja aseteltavia parametreja, joten niiden syöttämien on helpompaa PC:llä. PC-liityntämahdollisuus voi olla taajuusmuuttajissa suoraan, mutta väylä vaatii yleensä oman väylätyyppikohtaisen väyläsovittimen. Tärkeimmät taajuusmuuttajalle syötettävät parametriarvot ovat:

- kieli
- käyttösovellus (vakio, pumppukäyttö, puhallinkäyttö jne.)
- moottorin jännite ja virta
- moottorin nimellistaajuus
- moottorin nimellisnopeus
- moottorin $\text{Cos } \varphi$
- erilaiset toiminnalliset raja-arvot
- nopeusohje (AI, DI, kiinteä)
- ohjauspaikka (etä-/paikalliskäyttö).

Parametrien syöttämisen jälkeen moottorille tehdään ns. ID-ajo, vektorisäätöä käytettäessä ID-ajo on pakollinen. Taajuusmuuttaja tunnistaa ID-ajossa moottorin sähköiset arvot, kuten staattori-resistanssin, hajainduktanssit ja roottoriaikavakion, joiden perusteella taajuusmuuttaja luo moottorista ns. sähköisen sijaiskytkennän. ID-ajo tapahtuu On- tai Off-line tilassa, On-line tilassa muuttaja saa myös roottorin hitausmassan mitattua. Moottori tulee olla ID-ajoa tehtäessä kuormittamaton. (Hietalahti 2011b, 107; Hietalahti 2012, 152–153)

Taajuusmuuttajanohjaus tapahtuu yleensä automaation kautta, joka voidaan toteuttaa joko väylän kautta tai perinteisillä AI/DI tuloilla. Perinteisiä AI/DI ohjeita käytettäessä AI- tulojen kautta ohjataan nopeutta ja voidaan lukea moottorin lämpötilaa termistoreilta. DI-tuloja käytetään yleensä päälle/pois ohjauksiin, mutta voidaan käyttää myös nopeusohjeena, tällöin nopeudet ovat kiinteitä, ennalta ohjelmoituja arvoja. AO/DO- lähdöllä saadaan vastaavasti taajuusmuuttajalta erilaisia tietoja prosessista riippuen, joista yleisimmät: nopeus, virta, momentti, jännitteet yms. DO-lähdöistä saadaan hälytykset. Liityntöjen määrä vaihtelee taajuusmuuttajittain, mutta lähtöjä/tuloja on yleensä mahdollista lisätä lisäkorteilla. Väyläpohjaisissa sovelluksissa taajuusmuuttajalta saadaan yleensä kaikki tarvittavat toiminta-arvot ulos. Perinteisiä sovelluksia käytettäessä lähtöjen määrä rajoittaa tietojen saantia.

4 MOOTTORI- JA TAAJUUSMUUTTAJAKÄYTÖT

4.1 Taajuusmuuttajakäytöt

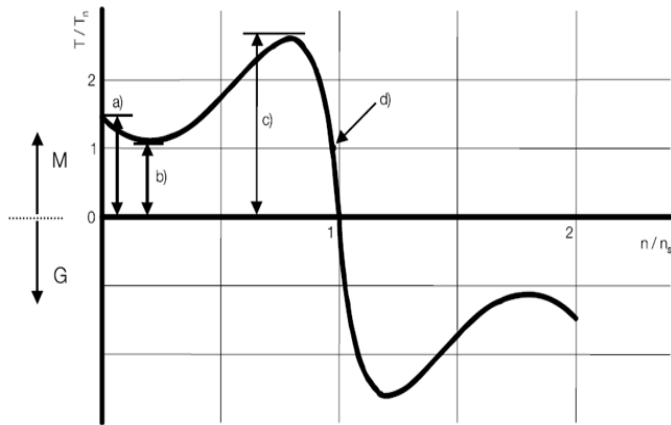
Yhä suurempi osa teollisuuden ja kiinteistöjen moottorikäytöistä on taajuusmuuttajaohjattuja. Taajuusmuuttajaa käyttämällä moottoreiden hyötysuhteet paranevat, mikä säästää energiaa. Energian säästöstä suurin osa syntyy koneiden säädettävyydestä, jolloin moottoreilla voidaan ajaa aina tarvittavalla nopeudella. Moottoreita ei läheskään aina tarvitse ajaa täysillä, esim. puhallin- ja pumppaussovellukset. Taajuusmuuttajaa käyttäen oikosulkumoottorista saadaan maksimivääntömomentti jo pienilläkin kierroksilla. Monissa sovelluksissa, joissa on tarvittu suurta momenttia heti käynnistyshetkestä alkaen, on voitu luopua DC-moottoreista ja korvata ne taajuusmuuttaja- oikosulkumoottori tai tahtimoottori yhdistelmällä.

Laajemmissa sovelluksissa voidaan käyttää ns. komponentteittain toteutettua ratkaisua (linjakäyttö), jossa taajuusmuuttaja on hajautettu osiin siten että, yhteen tasasuuntausyksikköön ja välipiiriin on liitetty monia vaihtosuuntaajia, jotka ohjaavat omia moottoreitaan. Vaihtosuuntaajayksikkö voi ohjata myös monia rinnakkaisia moottoreita. Nämä moottorit toimivat suurin piirtein samalla nopeudella, koska ne saavat saman jännitteen ja taajuuden.

4.2 Oikosulkumoottorin vääntömomentti

4.2.1 Suorakäytöllä (DOL)

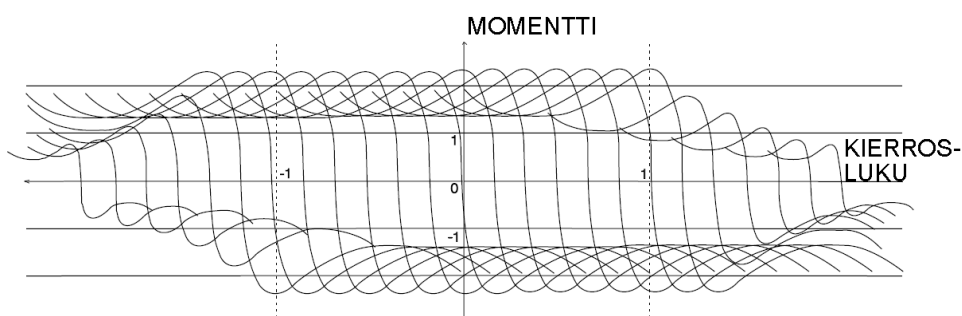
Oikosulkumoottorin optimaalisin käyttöalue on lähellä sen nimellispistettä olevalla suoralla. Nimellispisteessään kone toimii nimellisillä, suunniteluilla vääntö-, virta- ja nopeusarvoilla. Maksimivääntömomentin oikosulkumoottori saavuttaa hieman alle nimellisenopeuden. Kuvan 32 momenttikäyrästä huomataan, että moottorin momentti ei ole käynnistyshetkellä lähelläkään maksimiarvoa. Oikosulkumoottorin momentin käyttäytymien, varsinkin käynnistettäessä, tulee huomioida moottorin mitoituksessa. Suoralla käytöllä moottoria ei voida kuormittaa maksimimomentilla käynnistyshetkellä.



Kuva 32. Oikosulkumoottorin momenttikäyrä, suorakäyttö. Kuvassa a) starttimomentti, b) minimimomentti, c) maksimimomentti ja d) nimellismomentti (ABB Tekninen opas 7, 9)

4.2.2 Taajuusmuuttajakäytöllä

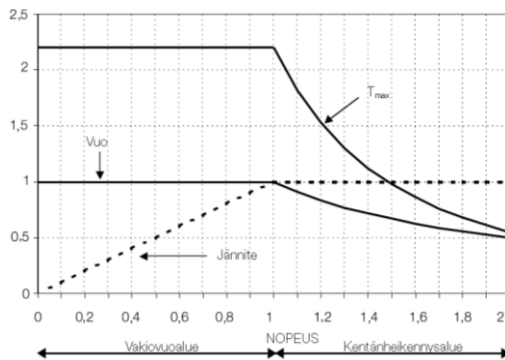
Taajuusmuuttaja ohjaa moottoria vakiovuoalueella. Moottori toimii vakiovuoalueella silloin, kun sen nopeus on enintään nimellinopeus. Nimellinopeutta suurempaa toiminta-aluetta kutsutaan kentänheikennysalueeksi. Taajuusmuuttajaa käytettäessä moottoria voidaan kuormittaa alusta alkaen lähes täydellä momentilla. Täydellä momentilla toimimisen mahdollistaa taajuusmuuttajan säätötekniikka, joka hyödyntää momenttikäyrän vakiovuoaluetta. Käytännössä siis hyödynnetään vain momenttikäyrän pystysuorahkoa osaa, jota siirretään momenttikuvaajalla sivusuunnassa taajuuden mukaan (kuva 33).



Kuva 33. Oikosulkumoottorin momenttikäyrä, taajuusmuuttajakäyttö (ABB Tekninen opas 7, 10)

Momenttikäyrän muodon säilymisen ehtona on että magneettivuo moottorissa pidetään vakiona. Edellinen ehto täyttyy, jos staattorikäämiin indusoituu induktiojännite U_i , joka kumoaa verkon pääjännitteen U . Samaan aikaan moottorin magneettivuo ϕ hakeutuu sellaiseen arvoon, jotta jännite U_i voi kumota pääjännitteen U . Kuormituksen kasvaessa

magneettivuo ϕ muuttuisi, mikäli verkosta ei otettaisi samalla lisävirtaa roottorisauvoihin indusoituneiden virtojen aiheuttaman lisävuon kumoamiseen. Edellä olevan ehdon toteutumiseksi moottorin syöttöjännittä tulee pienentää samalla kun taajuutta pienennetään. Kuvan 34 kuvaajista nähdään, miten jännite muuttuu nopeuden eli taajuuden mukana. Moottorin jännitettä ei voi laskea täysin nolnaan, koska jännitteen kadotessa moottori pysähtyy. Jännitteenlasku taajuusmuuttajassa on huomioitu IR-kompensoinnilla. IR-kompensoinnissa moottorille syötetään lisäjännite, jolla kumotaan käämien impedanssin aiheuttama jännitehäviö. IR-kompensoinnilla luodaan myös moottorille nollanopeudesta lähdettäessä tarvittava irrotusmomentti. Moottorin jännitettä ei myöskään nosteta yli nimellisen arvon, koska käämityksen jännitekestoisuus on suunniteltu nimellisjännitteelle. (Hietalahti 2011b, 111)



Kuva 34. Moottorin maksimimomentti, -jännite ja -vuo nopeuden funktiona. Kuvassa ei näy IR- kompensointi. (ABB Tekninen opas 7, 11)

Taajuusmuuttajaa käytettäessä on moottoria mahdollista käyttää nimellistaajuutta korkeammilla taajuuksilla. Nimellistaajuuden ylittävää aluetta kutsutaan kentänheikennysalueeksi. Suurilla taajuuksilla induktiivinen reaktanssi kasvaa, joka aiheuttaa vuon pienenemisen (kuva 34). Vuon pienenemisen myötä myös moottorin vääntömomentti pienenee. Vääntömomentti pienenee magneettivuohon nähden neliöllisesti. Moottorin mekaaninen teho säilyy kuitenkin vakiona, koska pyörimisnopeus kasvaa. Moottori kippaa, eli jumittuu mikäli maksimimomentti ylittyy hetkellisestikään. Moottoria voidaan usein syöttää kaksinkertaisella nimellistaajuudella, mutta suurempien taajuuksien käyttö tulee varmistaa moottorin valmistajalta. (Hietalahti 2011b, 111–112)

4.3 Oikosulkumoottorin valinta taajuusmuuttajakäyttöön

Moottorin valinnassa taajuusmuuttaja käyttöön tulee huomioida tiettyjä asioita, joilla voidaan ehkäistä moottorin ennenaikaista rikkoutumista. Seuraavassa on muutamia perusasioita ABB:n moottorin valinnasta taajuusmuuttaja käyttöön:

- 1) Moottorin teho 100kW- 350kW tai IEC- runkokoko on välillä 315- 355, tulee moottorin N- päässä olla eristetty laakeri.
- 2) Moottorin teho yli 350kW tai IEC-runkokoko on välillä 400- 450, tulee moottorin N-päässä olla eristetty laakeri, sekä muuttajassa dU/dt -suodin.
- 3) Nimellisjännite U_n alle 500 V, riittää standardi eristys.
- 4) Nimellisjännite U_n 500- 600 V, vaaditaan kestävämpi eristys tai dU/dt -suodin
- 5) Nimellisjännite U_n 600- 690 V, vaaditaan kestävämpi eristys ja dU/dt -suodin
- 6) Nimellisjännite U_n 600- 690 V, moottorikaapelin pituus yli 150m, vaaditaan kestävämpi erityys.

(ABB 2011b s. 11)

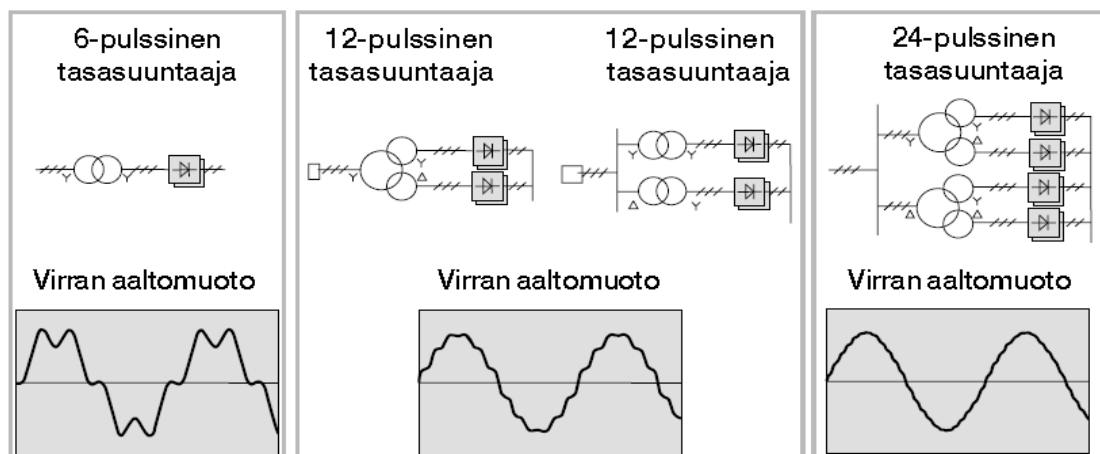
4.4 Moottorinsuojaus taajuusmuuttajakäytössä

Taajuusmuuttajakäytöissä moottorin suojaukseen käytetään taajuusmuuttajalle aseteltavia hälytys- ja suojausparametreja. Taajuusmuuttajakäytöillä ei tarvitse käyttää perinteistä lämpörelettä tai moottorinsuojakytintä, vaan jännite voidaan kytkeä suoraan sulakkeilta taajuusmuuttajalle. Tyypillisesti suojauksena käytetään virta-, yli- tai alijännite-, vaihe-, moottorin lämpötila- ja oikosulku/maasulku-valvontaa. Suojaukseen on mahdollista käyttää myös momenttirajoja, mutta pumppauskäytöillä se ei ole järkevä vaihtoehto. Virtaraja voidaan asettaa tarkastikin, jos tiedetään kuorman momentti, sillä virta on suoraan verrannollinen momenttiin. Perussuojaukseen voidaan käyttää moottorin 120- 150 %:n nimellisvirtaa, jolloin voidaan sulkea pois turhat laukeamiset ja varmistetaan moottorin käynnistyminen. Pidempiaikaiselta ylikuormalta tämä ei suojaa moottoria, mutta lämpötilan valvonta suojaa näissä tilanteissa moottoria rikkoutumiselta. Lämpötilan valvontaan kannattaa käyttää moottorissa olevia termistoreja, termistorit tulee huomioida moottoria tilattaessa. Lämpötilavalvonnassa voidaan hyödyntää toissijaisena vaihtoehtona taajuusmuuttajan laskennallista moottorin lämpötilaa, mikäli moottorissa ei ole termistoria.

Suorilla lähdöillä moottorien suojaus perustuu yleensä lämpöreleiden tai moottorin-suojakytinten käyttöön. Suojien toiminta perustuu virranmittaukseen, virran kasvaessa yli asetusarvon katkaisee suoja virran. Suojalaitteiden asetteluarvot tulisi tarkistaa, että ne vastaavat asennetun moottorin arvoja.

4.5 Taajuusmuuttajakäyttöjen verkkovaikutukset

Taajuusmuuttajakäytöllä on paljon hyviä puolia, mutta ei käyttö aivan ongelmatonta-kaan ole. Haittoja taajuusmuuttaja aiheuttaa tasa- ja vaihtosuuntauksessa. Diodi ja tyris-tori -tasasuuntaussillat tuottavat verkkoon erilaisia häiriöitä, kuten virta- ja jännitesärö-jä, loistehoa ja yliaaltoja. Häiriöt voivat levitä verkossa kauaksikin aiheuttaen haittaa muille verkkoon liitetuille laitteille. Etenkin 6-pulssisiltojen jännite ja virta on hyvin säröytynyttä. Yliaaltojen osalta eniten syntyy 5. yliaaltoa, seuraavia 7., 11. ja 13. aaltoa on jo reilusti vähemmän. Kuvassa 35 on vertailuna eri pulssilukuisten suuntaajien vai-kutukset verkkovirtaan. (Hietalahti 2011b, 92,95; ABB tekninen opas 6, 18–19)



Kuva 35. Suuntaajien tuottamat häiriöt verkkovirtaan (ABB tekninen opas 6, 18)

Vaihtosuuntauksessa häiriöitä aiheuttaa jännitteen epä-sinimäisyys, sillä taajuusmuutta-jissa käytetään yleisesti PWM-modulointia lähtöjännitteen muodostamisessa. PWM-moduloinnin tuottama lähtöjännite on pilkottua tasajännitettä, kuten kuvan 26 s.33 jän-nite- ja virtakuvaajista huomataan. Jännite ja virta ovat keskiarvillisesti siniaaltoa.

Nykyisten taajuusmuuttajien vaihtosuuntaimissa käytettävillä IGBT-transistoreilla on suuri kytkentätiheys, 1-8kHz. Vaihtosuuntaajan nopeat kytkentäpulsit aiheuttavat moottoriin voimakkaita suuritaajuisia jännitepulsseja, jotka voivat voimistua vielä moottorissa ja moottorikaapelissa. Voimistuminen on sitä voimakkaampi, mitä pidempi moottorikaapeli on. Pulslien voimistuminen johtuu kaapelin ja moottorin eriävis-

tä/muuttuvista impedansseista ja kapasitansseista. Moottorin käämeihin vaikuttava jännite on tyypillisesti 1,6- 1,9 – kertainen taajuusmuuttajan välipiiriin nähden. (Hämäläinen 2008, 28–29; Hietalahti 2011b, 90; PSK 7711, 3)

Jännitepulssit ovat yleensä jakautuneet epätasaisesti eri vaiheiden välille, jolloin moottorin käämityksiin voi syntyä mm. osittaispurkauksia. Jännitepulssien vaiheepäsymmetria vaihtelee tyypillisesti 30- 90 %:n välillä syötetystä jännitteestä. Osittaispurkauksia esiintyy herkemmin pienillä 400- 1000V:n pyörölankakäämityillä koneilla, kun taas keskijännitemoottoreissa on jo vahvempi kierroseristys. Purkauskohtiin syntyy eristevikojen vuoksi kiertovirtoja, jotka lämmittävät moottoria. Tyypillisesti osittaispurkaukset syntyvät lähellä käämivyyhtien syöttöpistettä, joissa jännite on suurimmillaan. (Hämäläinen 2008, 28–29,35,37)

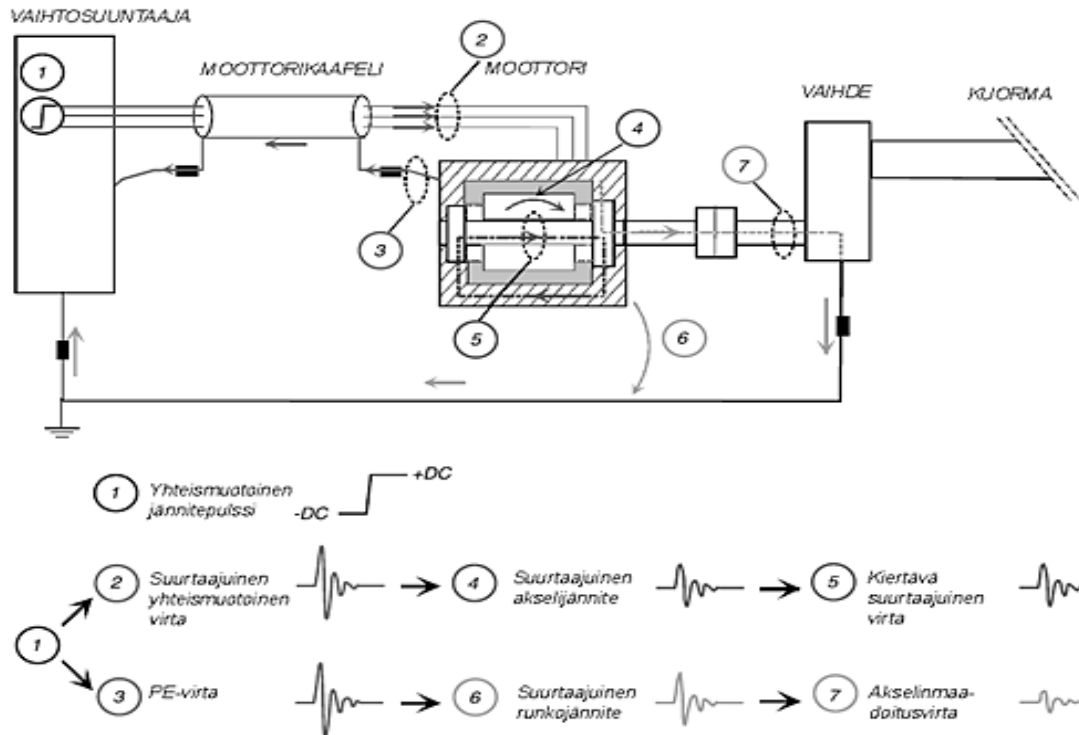
4.6 Laakerivirrat

Laakerivirrat ovat nousseet merkittäväksi haitaksi nykyään erilaisissa taajuusmuuttajakäytöissä. Laakerivirrat johtuvat pääasiassa suurtaajuisista jännite ja kytkentäpulsseista. Pientaajuiset, moottorin epäsymmetriasta aiheutuvat laakerivirrat voidaan välttää moottorien hyvällä suunnittelulla ja huolellisella valmistuksella. Laakerivirtojen muodostumiseen vaikuttaa lähinnä moottorin- ja akselinmaadoitus sekä moottorin koko. Yhteistä laakerivirtojen synnylle on staattorista roottoriin ja akselille indusoituva jännite, joka kasvettuaan tarpeeksi suureksi kumoaa laakerin öljykalvon impedanssin, jolloin virta pääsee kulkemaan laakereiden kautta. Laakerivirroissa tulee huomioida lisäksi laakerin lämpötilan vaikutus öljykalvon impedanssin suuruuteen, impedanssi pienenee lämpötilan noustessa. Kuvassa 36 on esitetty erilaisia reittejä, miten laakerivirrat voivat kulkea järjestelmässä. Tyypillisimmät, suuntaajakäytöissä esiintyvät suurtaajuiset laakerivirrat ovat:

Kiertävä virta, jossa staattoria kiertävä suuritaajuinen vuo indusoi suurtaajuisen virran akselille. Esiintyy lähinnä suurilla moottoreilla.

Akselinmaadoitusvirta, jossa moottorin rungon jännite kasvaa lähdemaahan nähden. Esiintyy moottoreilla, joiden akseli on maadoitettu taakan kautta.

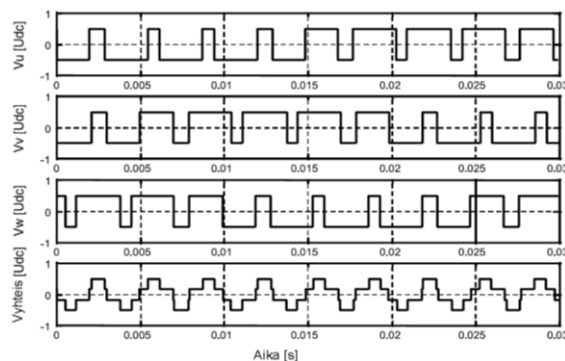
Kapasiivinen purkausvirta, jossa moottorin sisäisten hajakapasitanssien aiheuttama jännitteiden jakauma kasvattaa akselijännitettä, joiden seurauksena laakerivirtapulsseja syntyy. Esiintyy lähinnä pienillä moottoreilla, joiden akselia ei ole maadoitettu taakan kautta. (ABB Tekninen opas 5, 6–7)



Kuva 36. Suurtaajujen, kiertävien virtojen tyypillisimmät reitit (ABB Tekninen opas 5, 11)

4.6.1 Yhteismuotoinen virtapiiri

Suurtaajuinen akselivirta johtuu vaihtovirtajärjestelmissä virran vuotamisesta ns. yhteismuotoiseen virtapiiriin. Yhteismuotoinen virtapiiri syntyy kun kolmivaihejärjestelmän neutraali-jännitteiden vektorisumma ei ole nolla. Tyypillisesti vektorisumma symmetrisessä järjestelmässä on nolla, mutta suuntaajien PWM-moduloinnilla kahdesta lähdejännitteestä ei voi muodostua hetkellistä nolla-arvoa. Yhteismuotoisen neutraali-jännitteen taajuus on hakkurin kytkentätaajuinen. (kuva 37) (ABB Tekninen opas 5, 7–8)



Kuva 37. Suuntaajan vaihejännitteet u, v, w sekä yhteisjännite. (ABB Tekninen opas 5, 8)

Yhteismuotoinen virta kulkeutuu takaisin lähteeseen maadoitusjohtimen ja suuntaajan hajakapasitanssien kautta. Hajakapasitanssi aiheutuu kolmivaiheverkon ulkopuolella. Hajakapasitanssia voi muodostua mm: moottorissa, moottorikaapelissa ja laakereissa. Paluuvirta suuntaajalle kulkee yleensä moottorinrunгон kautta PE-johtimeen, mutta mahdollisesti myös rakennusten eri metallirakenteiden kautta. Virta voi lähteä kiertämään myös moottorin ja taakan välillä. Virran kulkiessa erilaisten induktanssien läpi aiheutuu jännite-eroa moottorin ja suuntaajan rungon tasoon nähden. Jännite-ero voi kasvaa yli 100 volttiin, jolloin virta voi päästä kiertämään moottorin akselille kytketyn maadoitetun kuorman kautta suuntaajalle. (ABB Tekninen opas 5, 8–10)

4.6.2 Kipinätyöstö

Laakerivirta on suuntaajan hakkurista johtuen pulssimaista sykkivää virtaa. Pulssien ollessa tarpeeksi voimakkaita, ne läpäisevät laakerin eristekyvyn. Voimakkaat pulssit irrottavat laakerista metallihiukkasia rasvaan, tätä hiukkasten irtoamista kutsutaan kipinätyöstöksi, EDM. Kipinätyöstön jäljet näkyvät laakerissa ns. pyykkilautakuviona (kuva 38). Kipinätyöstön aiheuttama pyykkilautakuvio voidaan havaita värähtelymittausten avulla, jossa näkyy sarja taajuuskomponentteja 1500- 4000Hz taajuusalueella. EDM: n aiheuttamat viat voivat tulla esiin hyvinkin nopeasti, jopa 1-6 kuukaudessa käyttöönotosta. (ABB Tekninen opas 5, 6; PSK 5707, 32)



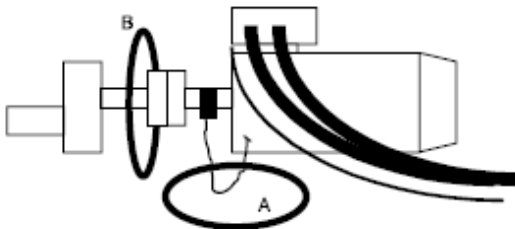
Kuva 38. Kipinätyöstön vioittama laakeri (Fläktwoods, hakupäivä 28.2.2013)

4.6.3 Laakerivirtojen mittaaminen

Laakerivirtojen mittaus on hankalaa, mutta mittauksilla voidaan selvittää luotettavasti onko laakereiden vikaantumisen syynä laakerivirrat. Laakerivirtojen mittaukset eivät onnistu vakiomoottoreilla suoraan, vaan mittauksiin joudutaan käyttämään erilaisia erikoismittausmenetelmiä. Mittaukset voidaan tehdä esimerkiksi käyttäen ns. Rogowskyn-virta-anturia. Mittalaitteen täytyy kyetä mittaamaan 10 kHz- 2 MHz taajuusalueella,

virran mittausalueen tulee kattaa huippuarvot 150 -200A saakka, mutta kyettävä havaitsemaan samalla muutamien milliampeereiden suuruisia RMS arvoja. Moottorin tulee pyöriä mittauksen aikana vähintään 10 %:n nopeudella nimellinopeudestaan. Mittaustulosten tulkintaa vaatii asiantuntemusta. (ABB Tekninen opas 5, 18)

Laakerivirtojen mittauksessa (kuva 39) ensimmäisessä vaiheessa selvitetään suurtaajuisten summavirran mahdollisuus, jossa selvitetään kaapeloinnin ja suojojohdinten liitoksen soveltuvuus taajuusmuuttajakäyttöön. Toiseksi voidaan mitata akselijännite, koska sekin jo mahdollisesti paljastaa laakerivirran olemassaolon. Kolmannessa vaiheessa mitataan kiertovirta ja akselinmaadoitusvirta. Kiertovirta on taajuusmuuttajan akseliin indusoiman jännitteen aiheuttama virta. Akselinmaadoitusvirta johtuu kaapeloinnin ja maadoitusten puutteellisuudesta tai virheistä. (ABB 2013, 27)



Kuva 39. Laakerivirran mittausasetelmat a) Kiertovirran mittaus, b) Akselimaadoitusvirran mittaus (ABB Tekninen opas 5, 18)

4.6.4 Laakerivirtojen ehkäiseminen

Laakerivirtoja voidaan välttää muutamalla eri tavalla, joista tärkeimmät ovat: maadoitus, laakerivirtapiirien eristys ja suurtaajuisten virtojen vaimennus. Suurtaajuisten virtojen vaimennus voidaan toteuttaa käyttämällä kuristimia tai suodattimia.

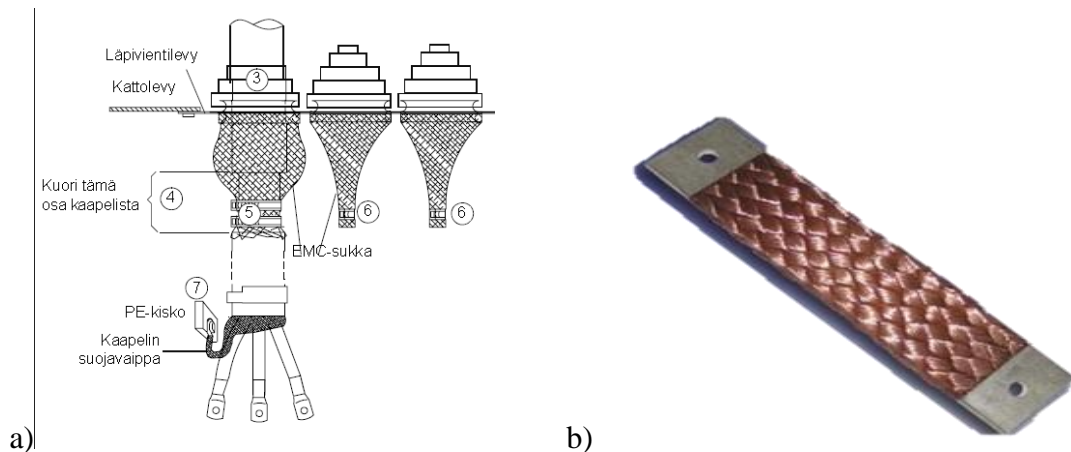
Käytettäviä suodatin- tai kuristinvaihtoehtoja ovat:

- 1) Invertterin lähtökuristin, kaapelin kanssa sarjaan asennettava kuristin invertterin päähän, jolla hidastetaan jännitteen nousuaikaa. Kuristin tosin pudottaa napajännitettä sekä heikentää moottorin hyötysuhdetta.
- 2) Kaapelin päätesovitin, sovittaa kaapelin impedanssin moottorin impedanssiin. Estää jännitepiikkien syntymistä, mutta sovitinta ei nykyään enää juuri käytetä.
- 3) dU/dt - suodin, vaimentaa vaihtosuuntaajan jännitepiikkejä, vähentää kapasitiivisia vuotovirtoja sekä vaimentaa suurtaajuisia haittoja mm. laakerivirtoja. Suodattimen valintaan vaikuttaa moottorin ominaisuudet. Rajoittaa jännitteen nousunopeutta.

- 4) Sinisuodin, vaimentaa lähtöjännitteen suurtaajuisia komponentteja, jolloin ulostuleva jännite on lähes siniaaltoa. Käytetään pääasiassa mikäli: moottoria ei ole tarkoitettu taajuusmuuttajakäyttöön, moottorikaapelit ovat pitkät, jännitteen huippuarvoille on asetettu rajoitukset, jännitteenlasku sovellukset ja jännitteenosto sovellukset. Suotimella voidaan vähentää myös moottoreiden taajuusmuuttajakäytöstä johtuvia ääniä. (ABB 2009, 39,42; Hämäläinen 2008, 44–45)

Maadoitusjärjestelmän tulisi olla mahdollisimman pieni-impedanssinen, jolla taataan hyvä virran paluureitti suuntaajalle. Hyvä maadoitus voidaan toteuttaa muutamilla perusratkaisuilla:

- 1) Käytetään symmetristä moottorikaapelia, jolloin kaapelissa ei pääse indusoitumaan jännitteitä. Moottorikaapelina tulisi käyttää suojapunoksella olevaa kaapelia, esim. MCMK tai MCCMK tyyppistä kaapelia.
- 2) Maadoitusliitännöjen tulee olla 360°:een liitoksia sekä taajuusmuuttajalla että moottorilla, samalla saavutetaan hyvä EMC-suojaus (kuva 40a).
- 3) Lisätään moottorin rungosta maapotentiaaliin suurtaajuinen maadoitus, leveä kuparipunos, joka johtaa suurtaajuisia virtoja pyöreätä paremmin (kuva 40b).
- 4) Oikosuljetaan moottorin ja käytettävän laitteen rungot ulkopuolisella potentiaalitasauksella. (ABB Tekninen opas 5, 15–17)



Kuva 40. a) 360° maadoitusliitos b) Suurtaajuinen maadoituspunos (ABB Tekninen opas 5, 16–17)

5 KUNNONVALVONTA

5.1 Mitä kunnossapito on?

Kunnossapidolla tarkoitetaan laitteiden jatkuvaa käyttövalmiuden ylläpitoa. Kunnossapidon tarkoitus on muuttunut viimeaikoina rikkoutuneiden laitteiden korjauksesta ennakoidun huollon suuntaan. Ennakoivalla huollolla voidaan estää yllättäviä laitteiden rikkoutumisia ja tuotantokeskeytyksiä, joista voi seurata suuriakin taloudellisia haittoja. Eri standardit määrittelevät kunnossapidon tarkoituksen hieman eri tavoilla, seuraavassa yleisimmät määritelmät lyhennettyinä:

- PSK 6201: Kunnossapito on kokonaisuus teknistä, hallinnollista ja johtamiseen perustuvaa toimintaa, joilla laitteisto pidetään ennallaan tai palautetaan tilaan, jossa laitteisto voi toimia sen odotetun elinjakson ajan.
- SFS-EN 13306: Koostuu kaikista laitteen teknisestä, hallinnollisesta ja johtamiseen liittyvästä toiminnasta laitteen eliniän aikana, jolla laitteen toiminta ylläpidetään tai palautetaan toimintakyky tasolle, jolla laite suoriutuu toiminnoista.
- John Moubrey: Kunnossapidolla varmistetaan laitteen toiminta ylläpidettäväksi tasolla, jolla laite suoriutuu vaadituista tehtävistä.

(Mikkonen 2009, 25–26)

Kunnossapidolliset toimet on jaettu kahteen pääryhmään, suunniteltuun kunnossapitoon ja häiriökorjaukseen. Suunnitellulla kunnossapidolla ehkäistään vikoja ja parannellaan laitteistoa, jolloin huollot voidaan tehdä vähäisillä haitoilla tuotannolle.

Häiriökorjaukseen kuuluvat akuutit viat, joista on haittaa tuotannolle tai pysäyttävät sen. Ryhmät jakautuvat edelleen pienempiin lohkoihin, jotka tarkentuvat tiettyyn kunnossapitotoimeen, mutta tässä yhteydessä pienryhmistä nousee oleellisimmaksi suunnitellun kunnossapidon alle kuuluva kuntoon perustuva kunnossapito. (Mikkonen 2009, 95–99)

Kuntoon perustuva kunnossapito

Kuntoon perustuva kunnossapito perustuu standardiin SFS-EN 13306, joka määrittää kuntoon perustuvan kunnossapidon seuraavasti: ”*Preventive maintenance based on performance and/or parameter monitoring and the subsequent actions*” (Ennakoiva kunnossapito perustuu suorituskykyyn ja/tai parametrien seurantaan ja myöhempisiin toimiin). Kuntoon perustuvalla kunnossapidolla pyritään ehkäisemään vikoja ennen

kuin ne ehtivät syntyä. Vikojen ehkäisy perustuu tunnettuihin parametriarvoihin, joita tarkkailemalla voidaan huomata vikaantumiset muuttuneina mittausarvoina. Lisäksi tarkkailuun kuuluu olennaisena osana kentällä tapahtuvat kierrokset, joiden avulla voidaan havaita alkavia vikoja kuulo- ja näköhavainnoin, sekä tehdä erilaisia tarkistuksia. Kuntoon perustuvan kunnossapidon avulla kohteille voidaan määrittää vikaantumisen todennäköisyys, joiden perusteella huolto- ja korjausaikataulut voidaan suunnitella. (Mikkonen 2009, 100–101)

5.2 MACHsense-P

MACHsense-P on ABB:n induktiomoottoreille kehittämä kunnonvalvonta- ja analysointipalvelu. Yksittäisellä mittauksella saadaan arvio koneen nykyisestä kunnosta, korjaustarpeista ja arvio koneen eliniästä. Mittausta toistamalla sopivin määrävälein havaitaan alkavat viat ajoissa ja laitteet voidaan huoltaa suunnitellusti.

Suoritetuista mittauksista laaditaan yksityiskohtainen raportti, josta selvenee roottorin, laakereiden, sähkösyötön ja asennuksen mahdolliset viat ja niiden vakavuus, syyt ja seuraukset. Mittaukset on jaettu standard ja advanced-tasoon.

Standard-mittauksessa tehdään perusmittaukset, jolla nähdään onko järjestelmässä suurempia ongelmia. **Advanced**-mittauksella tarkennetaan mahdollisia havaittuja ongelmia. Mittausten tarkempi sisältö on esitetty taulukossa 3. (ABB 2012b)

Taulukko 3. MachSense-P mittausten sisältö. (ABB 2012b)

Mittauspalvelun taso	Mittaus koska	Mittaus mitä	Analyysointi	Mittaus kuinka usein
STANDARD	<ul style="list-style-type: none"> Koneen ollessa toiminnassa normaali kuormituksella 	<ul style="list-style-type: none"> Värähtelyt, jännitteet, virrat, lämpötilat (staattori, jäähdytin, ympäristö) pyörimisnopeus Käyttö-, huolto- ja korjaushistoria 	<ul style="list-style-type: none"> Roottorianalyysi <ul style="list-style-type: none"> roottorinkäämityksen viat, ilmavälin epäkeskeisyys, epätasapaino, roottorisauvojen/käämien mekaaninen löysyys, roottorin taipuma Laakerianalyysi <ul style="list-style-type: none"> laakeriviat ja laakerien asennusvirheet Asennus <ul style="list-style-type: none"> kiinnityksen/perustuksen jousto/pehmeys, linjausvirhe, resonointi-ilmiöt Sähkönsyötön laatu <ul style="list-style-type: none"> harmonisten yliaaltojen suuruus, särö, vaihe-epäsymmetria, yli/alijännitteet Suosituksien jatkotoimenpiteille 	<ul style="list-style-type: none"> Kuuden kuukauden välein
ADVANCED	<ul style="list-style-type: none"> Koneen ollessa toiminnassa useilla eri kuormituksilla, käynnistys, pysäytys 	<ul style="list-style-type: none"> Värähtelyt, jännitteet, virrat, lämpötilat (staattori, jäähdytin, ympäristö) pyörimisnopeus Käyttö-, huolto- ja korjaushistoria 	<ul style="list-style-type: none"> Sama kuin yllä Jäähydyksen analyysi liikaantuminen Juurisyyanalyysi 	<ul style="list-style-type: none"> Kun oletetaan vian olemassaolo standardimittausten perusteella tai muiden havaintojen pohjalta ja halutaan selvittää asiaa tarkemmin

Mittaukset

Mittaukset tehdään kahdessa erässä, sähkönsyöttö- ja värähtelymittaukset erikseen, mittauksen aikana laitteiston tulee olla normaalikuormituksella. Mittaustulokset skaalataan ja yhdistetään analysointivaiheessa yhteen, jolloin koneen kunnosta saadaan muodostettua kokonaiskuva. Sähkönsyötön mittauksessa moottorin lähdöstä mitataan virrat ja jännitteet, joiden perusteella lasketaan kuorma, pyörimisnopeus, jättämä, vaiheepäsymmetria, harmonisten yliaaltojen osuus (THD, HCF/HVF) sekä impedanssi. Pyörimisnopeutta ja jättämää voidaan verrata kilpiarvoihin, ja lopuksi kokonaismittaus tuloksia verrataan IEC/NEMA – standardien arvoihin. Värähtelymittaus toteutetaan kahdena erillisenä mittauksena, kummatkin nelikanavaisena. Tehtävät värähtelymittaukset ovat PCA (Principal component analysis) ja EM (Electromagnetic) -mittaukset.

- **PCA-mittauksessa** anturit kiinnitetään DE- ja NDE- laakerikilpiin, joilla mitataan koneen mekaaninen kunto.
- **EM-mittauksessa** kiinnitetään anturit runkoon ja jalustaan, joilla saadaan sähköiset voimat mitattua.

Värähtelymittausten jälkeen tuloksista suodatetaan kahta erillistä algoritmia ja kohinanvaimennusta käyttäen laakereihin kohdistuvat värähtelyt, joiden pohjalta laaditaan arvio laakereiden kunnosta. Mittausohjelma sisältää laakeritietokannan, jonka tietojen pohjalta se analysoi ko. laakerityyppiä koskevat viat ja kertoo ne käyttäjälle. Lisäksi laakereiden kunnosta lasketaan seuraavat parametri arvot: Crest, Kurtosis, HF RMS ja HF Pk-Pk. Lasketuilla parametreilla varmistetaan että, laakereiden kunto arvioidaan oikein ja mahdolliset viat tulevat esille varhaisessa vaiheessa. (ABB 2012b; ABB www-sivut, hakupäivä 25.2.2013)

5.3 Värähtelymittaukset

Värähtelymittauksilla valvotaan teollisuudessa yleensä erilaisten pyörivien koneiden ja laitteistojen kuntoa. Värähtelyvalvontaa käytetään usein moottorin ja kuorman valvontaan. Värähtelymittauksilla on mahdollista havaita alkavat viat mm. laakereissa, jolloin ne eivät pääse yllättämään ja rikkomaan laitteita. Värähtelymittausten käyttö on kannattavinta kriittisillä laitteilla, joiden äkillisellä rikkoutumisella on merkittäviä taloudellisia vaikutuksia. (Mikkonen 2009, 223)

5.3.1 Värähtelymittausten toteutus

Värähtelymittausten suunnittelu ja toteuttaminen on monimutkainen prosessi, johon vaikuttavat monet seikat. Suunniteltaessa kohteeseen värähtelymittausta, tulee tuntea prosessin toiminta ja siitä aiheutuvat normaalit värähtelyt, vikaantumisriskit sekä laitteen kriittisyys tuotannolle. Prosessin tuntemuksen pohjalta voidaan määrittellä mm. tarvittava mittausväli, vika-arvioinnit, toimintaympäristö ja käytettävä laitteisto. (Mikkonen 2009, 223)

Käytettävä laitteisto ja mittausmenetelmä valitaan prosessin vaatimusten mukaan. Valvonnan määrittelyssä tulee varmistua ensin että laitteiston valvonta on teknisesti ja taloudellisesti mahdollista ja järkevää toteuttaa värähtelymittauksilla. Lisäksi valinnassa tulee ottaa huomioon laitteiston kriittisyys tuotannolle. Kriittisiin kohteisiin mittaus on järkevää toteuttaa käyttämällä kiinteitä on-line mittausjärjestelmiä, mutta vähemmän kriittisille kohteille riittää kertaluonteiset, määräväleihin toteutettavat mittaukset. Kertaluonteiset mittaukset voidaan toteuttaa joko irtomittareilla tai puolikiinteästi. Puolikiinteässä tavassa laitteistossa on valmiina anturit, joista tiedot luetaan kannettavaan pääte-laitteeseen. Käsimittausta käytettäessä mittaus tulisi toistaa aina samasta kohdasta. (PSK 5705, 2–3, 6–7)

Määritettäessä mittauksille määräaikoja, tulee huomioida mm. käytettävä valvontamenetelmä, kriittisyys ja häiriöherkkyys sekä mahdollinen aiempi huoltohistoria. Mittausten määräaikojen määrittelyssä voidaan käyttää apuna PSK standardin 5705 taulukkoa 1 (liite 3). Värähtelyvalvonnan tason määrittelyssä voidaan hyödyntää saman standardin ohjetta O3. (PSK 5705, 8–9)

5.3.2 Anturit

Värähtelymittausten perustana on värähtelyn mittaukseen käytetty tunnistin eli anturi. Anturin avulla mekaaninen liike muunnetaan sähköiseksi signaaliksi. Ensimmäinen käytetty tunnistin oli tappi tai ruuvimeisseli, jonka avulla laakeria kuunneltiin tai tunnusteltiin. Ennen sähköisten menetelmien kehittymistä käytettiin mekaanisia mittalaitteita, jotka perustuivat fyysiseen kosketukseen mitattavaan kohteeseen. Mekaaniset laitteet olivat herkkiä kulumiselle ja suuntaukselle. (Mikkonen 2009, 234)

Sähköiset anturit voidaan jakaa matala- ja korkeataajuisiin antureihin. Matalataajuisella värähtelyllä tarkoitetaan tässä alle 20kHz värähtelyä, ja korkeataajuisella 20kHz-1GHz

värähtelyä. Käytettävän anturityypin ratkaisee se, minkä tyyppistä värähtelyä tarvitsee mitata. Yleisimmät matalataajuisten värähtelyn mittaukseen käytetyt anturityypit ovat: kiihtyvyyssanturit, nopeusanturit, siirtymäanturit, lasermittaukset ja MEMS- anturit. (Mikkonen 2009, 235–243)

Korkeataajuisten värähtelyn mittaukseen yleisesti käytettyjä menetelmiä ovat: Is-kusysäysmittaus, ultraäänimittaus pinnalta ja akustinen emissio. Korkeiden taajuuksien mittaaminen teollisuudessa on haastavaa, sillä korkeataajuisia värähtelyjä syntyy ilman tai nesteen virratessa voimakkaasti putkistossa ja venttiileissä. Korkeataajuinen värähtely etenee rakenteissa pitkiäkin matkoja, mikä voi tuottaa häiriötä mittauksiin kauempaa. (Mikkonen 2009, 247–248)

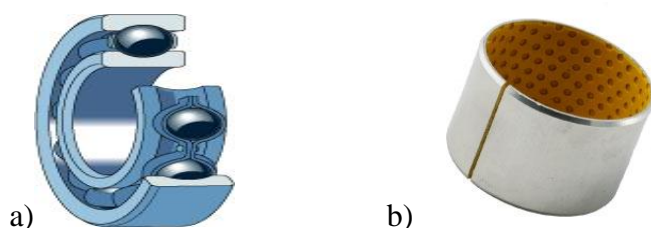
5.4 Moottoreiden ennakkohuolto

Moottoreiden ennakkohuolto käsittää laakereiden voitelun, värähtelymittaukset, sähkölaadun mittaukset sekä moottoreiden puhdistuksen.

5.4.1 Laakerityypit

Käytössä on yleisesti pääasiassa kahden tyyppisiä laakereita, vierintä- ja liukulaakereita (kuva 41). Vierintälaakereiden rakenne koostuu kahden metallirenkaan väliin sijoitetuista kuulista, rullista tai neuloista. Vierintälaakereita käytetään pääasiassa nopeasti pyörivissä kohteissa, esim. moottoreissa. Vierintälaakereilla on vähäinen huollontarve. (SKF www-sivut, hakupäivä 25.3.2013)

Liukulaakeri koostuu kahdesta, yleensä erimateriaalia olevista sisäkkäisistä renkaista. Liukulaakereita käytetään pääasiassa hitaissa ja raskaasti kuormitetuissa kohteissa. Liukulaakeri kestää vierintälaakeria paremmin aksiaalista liikettä. Liukulaakerit voivat olla huoltovapaita, jolloin niitä ei tarvitse esim. voidella jälkeinpäin. (D&E Trading, www-sivut, hakupäivä 25.3.2013)

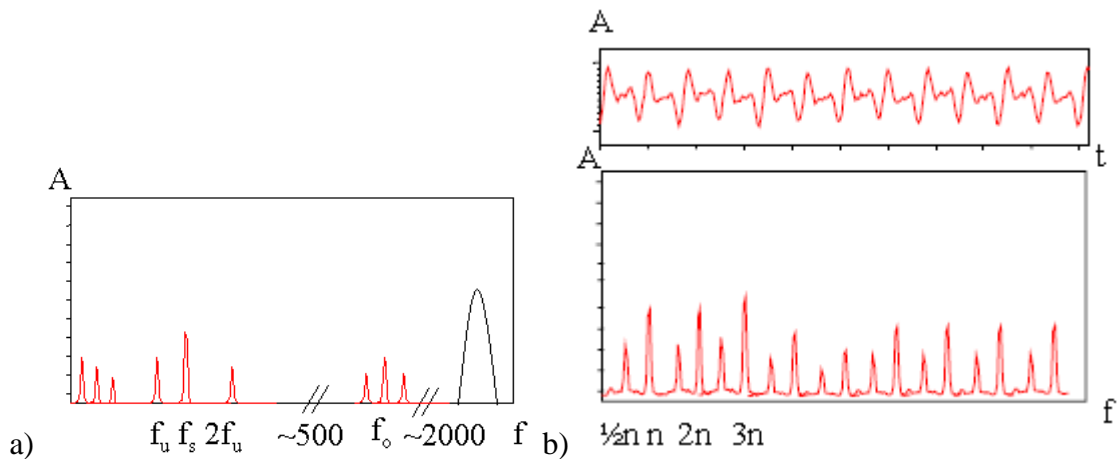


Kuva 41. a) Vierintälaakeri b) Liukulaakeri (a, SKF b, D&E Trading, hakupäivä 25.3.2013)

5.4.2 Laakeriviat

Laakereiden ennenaikaiseen kulumiseen vaikuttaa monia seikkoja. Suurimmat syyt ennenaikaiseen vikaantumiseen ovat moottoreiden ja siihen liitettyjen laitteiden erinäiset linjaus- ja suuntausvirheet sekä voiteluvirheet. Liian vähäinen voitelu tai voiteluaineen mukana laakeriin päässeet epäpuhtaudet kuluttavat laakeria. Lisäksi voitelussa ja voiteluaineiden valinnoissa tulee huomioida ympäristön olosuhteet, kuten lika ja lämpö. Laakereiden voitelun tilaa voidaan valvoa värähtelymittausmenetelmien avulla. (Mikkonen, 254–255)

Vierintälaakereiden ennenaikaisista kulumisista puolet johtuu erilaisista voiteluvirheistä. Viat vierintälaakereissa näkyvät monina eritaajuisina värähtelyinä, riippuen minkä tyyppinen vika on kyseessä. Vierintälaakereiden viat esiintyvät pääsääntöisesti korkeilla taajuuksilla (kuva 42a). Liukulaakereiden viat puolestaan johtuvat usein erilaisista kulumisista, välyksistä, voiteluvirheistä, epäpuhtauksista sekä suunnittelu- ja asennusvirheistä. Lisäksi erilaiset käyttötoimenpiteet, kuten ylikuormitukset sekä käynnistys tai pysäytystoimet voivat vioittaa laakeria. Liukulaakereiden viat näkyvät pääsääntöisesti normaalien pyörimistaajuuksien ja aliharmonisten komponenttien kasvuna (kuva 42b). Lisää vikojen tarkempia kuvauksia ja erilaisia vikaspektrejä löytyy PSK-standardin 5707 kohdista 13 ja 14. (Mikkonen, 254; PSK 5707, 14, 17–18)



Kuva 42 a) Vierintälaakerin ylikuorma tai virheellien asento b) Liukulaakerin kuluminen (PSK 5707, 15,18)

5.4.3 Laakereiden voitelu

Laakereiden säännöllinen voitelu parantaa merkittävästi niiden elinikää ja säästää moottoria. Laakerin rikkoutumien rikkoo pahimmassa tapauksessa koko moottorin. Laake-

reiden voitelussa tulee aina noudattaa vähintään moottorin valmistajan ilmoittamia vähimmäismääriä. Voitelun perusohjeet löytyvät moottoreiden huolto-ohjeista.

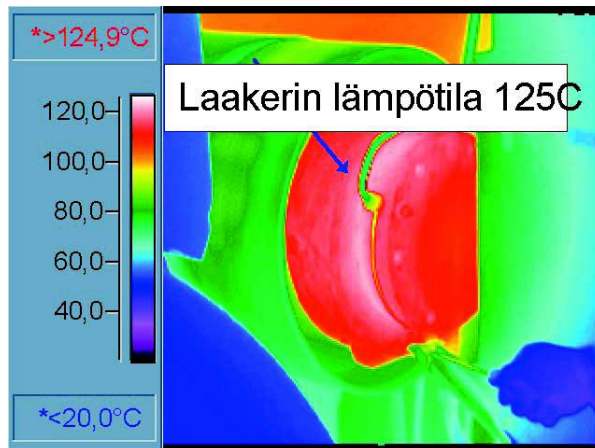
Laakereiden voiteluohjeet on jaettu arvioidun keston mukaan L_1 ja L_{10} kategorioihin. Pääasiallinen ohje on noudattaa L_1 periaatetta, joka tarkoittaa että 99 % laakereista toimii häiriöttömästi käyttöikänsä ajan, L_{10} periaatteen mukaan laakereista 90 % toimii käyttöikänsä ajan häiriöttömästi. L_{10} periaatetta noudatetaan pääasiassa moottoreille, joissa on kestovoidellut laakerit runkokokoon IEC250 saakka. Voiteluohjeiden arvot ovat moottorin käyttötunteja, joka laakereiden tulisi kestää moottorin ollessa vaakaan asennettuna, pystyyn asennuksessa arvot tulee puolittaa. Voiteluohjetta L_1 noudatetaan suuremmille moottoreille ja moottoreille joissa on jälkivoideltavat laakerit. L_1 arvot voidaan muuntaa L_{10} arvoiksi kertomalla L_1 arvo 2,7:llä. (ABB 2009b, 15–16; ABB 2003, 5)

Taulukoissa (liitteet 1 ja 2) on ilmoitettu moottorin runkokoko ja laakerityyppi, jonka perusteella voiteluaineen määrä nähdään. Taulukossa ilmoitettua voiteluaineen määrää on noudatettava, sillä liiallinen tai liian vähäinen rasvan määrä voi rikkoa laakerin.

Voiteluväli määräytyy moottorin tehon, runkokoon, kierrosnopeuden, laakereiden, käytettävän ja ympäristön olosuhteiden mukaan. Laskennalliset voiteluvälit pätevät +25 °C lämpötilassa. Lämpötilan noustessa laakerissa 15 °C tulee arvot puolittaa. Taajuusmuuttajakäytössä tulee huomioida toiminta-alue, jossa moottori toimii. Laakerin lämpötila ei saa nousta yli 80 °C, tai muutoin voiteluväli tulee puolittaa. Laakereiden suurinta käyttölämpötilaa +110 °C ei saa ylittää. Suurnopeus sovelluksiin on omat voitelukäytännöt joihin saa lisätietoja moottorien valmistajilta. (ABB 2009b, 16–17)

5.4.4 Lämpökuvaus

Lämpökuvaus on käyttökelpoinen työkalu kunnossapidossa. Lämpökameralla ja infrapuna-lämpömittarilla voidaan mitata kohteen lämpötila koskematta siihen, mikä mahdollistaa mittaukset pyörivistä, liikkuvista ja jännitteisistä osista, esim. sähkökunnossapidossa keskuksien kuvaaminen. Lämpökuvauksella nähdään laaja-alainen kuva kohteesta, jossa lämpenemät näkyvät selvästi muusta ympäristöstä poikkeavalla värillä. Moottoreiden kunnonvalvonnassa lämpökameralla nähdään moottorin pintalämpötila, mutta tärkein mittaustieto on laakereiden ja laakerikilpien lämpötilat (kuva 43). Lämpökuvauksella voidaan saada laakeriviat selville, ennen kuin ne ehtivät pahentua ja aiheuttaa muuta vahinkoa. (Stjerberg 2000, hakupäivä 22.2.2013)



Kuva 43. Lämpökamerakuva laakerista (Stjerberg 2000, hakupäivä 22.2.2013)

5.4.5 Moottoreiden puhdistus

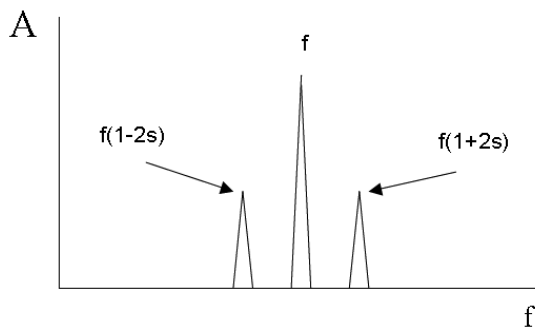
Moottoreiden lämpötilalla on suora vaikutus niiden keston. Moottoreiden jäähtytys hoidetaan pääsääntöisesti johtamalla staattorikäämityksen lämpö moottorin runkoon, josta se luovuttaa lämmön ympäröivään ilmaan. Jäähdystehon lisäämiseksi moottorin pinta-alaa on kasvatettu urittamalla pinta, sekä sijoittamalla moottorin päähän puhallin, jolla puhalletaan ilmaa moottorin pinnalle. Tasavirtakoneilla pinnallinen jäähtytys ei riitä, vaan niissä täytyy olla lisäksi ulkoinen puhallin, jolla puhalletaan ilmaa moottorin sisään. Tasavirtakoneilla sisäinen ilmakierto tarvitaan ankkurin jäähdyttämiseksi. Hitaille ja/tai raskaasti kuormitetuille oikosulkumoottoreille joudutaan usein asentamaan erillinen puhallin, omalla moottorilla, jotta jäähdysteho saadaan riittäväksi. Ulkoista puhallinta käytetään pääasiassa taajuusmuuttajaohjatuilla moottoreilla.

Moottorin pinta ja puhaltimen ilmanottoaukot tulee pitää mahdollisimman puhtaina moottorin pinnallisen ilmakierron takaamiseksi. Lika ja pöly toimivat eristeenä moottorin pinnalla, jolloin lämpö ei pääse poistumaan moottorista. Liian korkeat lämpötilat lyhentävät staattorikäämityksen eristeiden ikää, jolloin käämitys vikaantuu hiljalleen. Lämpötilan noustessa kriittiselle tasolle eriste vaurioituu välittömästi, josta seuraa ns. moottorin palaminen. Toisekseen moottorin vetopään laakerin ulkopinta kannattaa puhdistaa, jotta laakeriin ei joutuisi sitä kautta likaa. Likaantumien nostaa myös laakerin lämpötilaa, koska se estää lämmön haihtumista ilmaan. Laakerin pääasiallinen jäähtymien tapahtuu kuitenkin johtamalla, moottorin laakerikilpeen. Lika ja lämpö lyhentävät laakerin käyttöikä, josta seuraa laakerin ennenaikainen kuluminen ja vaihto.

5.4.6 Sähkönlaatumittaukset

Sähkomoottoreiden vikojen havainnointiin voidaan käyttää värähtelymittausten lisäksi virta- ja jänniteanalyyssejä. Virta- ja jänniteanalyysseillä saadaan selville monia moottorin sisäisiä jo syntyneitä tai alkavia vaurioita staattorista ja roottorista. Sähkönlaatuun perustuvista mittauksista käytetään myös nimitystä MCSA-tekniikka (Motor Current Signal Analysis). Mittaukset tehdään staattorista mittaamalla jännite ja virta, joiden pohjalta analyysi laaditaan. Analyysi on helpompi tehdä ns. suorakäyttöisille koneille kuin taajuusmuuttajakäyttöille, koska taajuusmuuttaja itsessään tuottaa huomattavia häiriöitä. Mittaus voidaan toteuttaa kertaluonteisina mittauksina tai asentamalla syöttöön kiinteät analysaattorit. Staattorivirrasta voidaan havaita mm. roottorin sauvavauriot, staattiset ja dynaamiset ilmavälit sekä laakerivaurioita. (Mikkonen 2009, 386)

Roottorin sauvavaurio syntyy todennäköisimmin moottorin käynnistyshetkellä, jos roottoriin kohdistuu suuria fyysisiä ja sähköisiä voimia. Yleisimmin vaurio on murtuma tai katkeama oikosulkurenkaan ja sauvan liitoksessa. Roottorin kunnosta saadaan virtamittauksella luotettavampi kuva kuin värähtelymittauksilla. Sauvojen viat näkyvät staattorivirrassa syöttötaajuuden molemminpuolisina sivunauhoina, joiden taajuus poikkeaa kaksi kertaa jättämättaajuuden verran syöttötaajuudesta (kuva 44). (Mikkonen 2009, 387–388; PSK 7707, 3)



Kuva 44. Verkkotaajuus ja ensimmäiset sivunauhataajuudet (PSK 7707, 3)

Staattorivirran mittaus voidaan suorittaa moottorille, joka on vakio-kuormitteinen (väh.50 % maks.), -nopeuksinen, ja -taajuuksinen. Mittauksen vaatima pitkähkö vakio – kuormitus ja – nopeus voi olla hankala saavuttaa tietyillä käytöillä. Mittaus on mahdollista toteuttaa myös ns. transientti kuormitustilanteissa, mutta tällöin mittaus on hankalaa toteuttaa. Transientti mittausmenetelmien kehitys on vielä tutkimuksen alla. Yksi mahdollisuus on käyttää ns. STFT-menetelmää (Short- Time Fourier Transform). Mikäli kuormitus on muuttuvaa, mittausta ei voida tällöin tehdä taajuusmuuttajaohjatuille koneille. Virtaspektrillä voidaan havaita staattiset ja dynaamiset -epäkeskeisyydet sekä

laakerivauriot tiettyinä taajuuksina spektrissä, mutta luotettavammin nämä tulevat esiin värähtelymittauksissa. Virtaspektri analysoidaan logaritmisella asteikolla. (Mikkonen 2009, 387–391; PSK 7707, 2)

Roottorin vauriota on mahdollista selvittää mittaamalla staattorin N-päästä aksiaalinen magneettivuo ja moottorin tarkka pyörimisnopeus. Tämä mittausmenetelmä käyttää hyödyksi oikosulkumoottorin jättämää. Jättämästä aiheutuu roottorin vikaantuessa kasvua tietyille staattorivirran taajuuksille. Samalla mittauksella voi tulla esille myös taajuusmuuttajan tasasuuntaussillan ongelmat, joita muuttajan omat vikadiagnostiikat harvoin tunnistavat (Mikkonen, 399–401)

Oikosulkumoottorit ovat herkkiä jännite-epäsymmetrialle. Virheet jännite-epäsymmetriassa voivat kerrannaistua huomattavasti virtasymmetriaan. Kasvanut virta aiheuttaa moottorissa häviöitä ja ylimääräistä lämpenemää, josta taas aiheutuu hyötysuhteen ja käynnistysmomentin muutoksia. Moottoreiden tulee kestää standardin IEC 60034-1 mukaan 1 %:n jännite-epäsymmetriaa jatkuvasti tai 1,5 %:n epäsymmetriaa muutaman minuutin jaksoilla. Jännite-epäsymmetria johtuu yleensä syöttävästä verkosta, mutta voi aiheutua myös käämityksen epäsymmetriasta taikka näiden yhdistelmänä. Verkonpuoleinen epäsymmetria voi johtua syöttöpiirin löysistä liitoksistakin. Epäsymmetriamittauksessa jännitteet mitataan tehollisarvoina ja mittaus tulisi suorittaa mahdollisuuksien mukaan moottorin liittimistä, jotta mahdolliset löysien liitoksien aiheuttamat viat tulisivat esille. Toinen vaihtoehto on mitata jännitteet turvakytkimen tai keskuksen lähteviltä liittimiltä. Mittaus on nopeaa suorittaa kolmivaiheisella mittarilla, jolla virtaa ja jännitettä voidaan mitata yhtä aikaa. (Mikkonen 2009, 397–399; PSK 7707, 2)

6 KUNNOSSAPITO JÄÄHDYTYSVESILAITOKSELLE JA RAP-5:LLÄ

6.1 Ennakkohuolto

Moottoreille ja eri laitteille suoritetaan tiettyjä ennakkohuollollisia toimenpiteitä, joilla laitteet saadaan kestämaan ja pysymään toiminnassa. Tehtaalla voiteluhuollosta ja värähtelymittauksista vastaa ennakkohuoltoryhmä (EHU). Ennakkohuollolliset toimenpiteet suoritetaan kierroksittain eri laitteille ja laitteistoille sopivin määrävälein. Huoltojen väli määräytyy ennalta tutkittujen ja kokemusperäisten huomioiden mukaan. Ennakkohuollon pääasialliset toimenpiteet moottoreilla ja pumpuilla ovat laakereiden voitelu ja värähtelymittaukset. Värähtelymittauksia voidaan tehdä ennakoitua tiheämminkin, mikäli laitteissa on syytä epäillä vikaa.

Tässä osiossa tarkastellaan työnkohteena olevien laitteiden ennakkohuoltoa, toimenpiteitä ja niiden toistotaajuutta. Ennakkohuollon tiedot pohjautuvat pääasiassa KUTI:n tietoihin.

6.2 JVL:n moottoreiden voiteluhuollon määrittäminen

Moottoreiden laakereiden voiteluväliä määritettäessä rajattiin ensin moottorit, jotka kuuluvat työn aihepiiriin. Työssä keskitytään käsittelemään JVL-1 ja 2-laitosten jäähdytysveden kierrätyspumppuja, vaikka laitoksilla on muitakin pumppuja. Moottoreiden rajauksen jälkeen moottorit etsittiin kentältä ja otettiin niiden tiedot ylös arvokilvistä ja verrattiin niitä järjestelmässä oleviin tietoihin. Moottoreiden tiedot eivät olleet täysin paikkansapitäviä tietojärjestelmissä, koska moottoreita on uusittu niiden tietojen syöttämisen jälkeen useasti. Moottoreiden tiedotkin olisi hyvä kuitenkin päivittää järjestelmiin aina muutoksien yhteydessä.

Voitelutiheyttä määritettäessä tärkeimmät tiedot ovat moottorin laakerityypit, runkoko-ko ja pyörimisnopeus, joiden pohjalta voiteluohje voidaan katsoa taulukosta suoraan (liite 2). Taulukosta nähdään suositeltu voiteluväli käyttötunteina ja voiteluaineen määrä. Moottorissa olevan laakerintyyppi (kuula-, rulla-, liukulaakeri) voidaan varmistaa valmistajan moottoriesitteessä olevien taulukoiden avulla (liite 1). Pääsääntöisesti prosessimootoreissa on jälkivoideltavat kuula- tai rullalaakerit, joiden voitelussa noudatetaan L₁- ohjetta.

Monissa moottoreissa oli lisäksi erillinen voiteluohje, jossa usein oli suositeltua tiheämpi voiteluväli, mitä laakereiden mukainen voiteluväli taulukkoarvojen mukaan olisi. Voitelussa tulee noudattaa ensisijaisesti moottorissa ilmoitettua ohjetta. Moottorit ovat asennettuina normaaleihin käyttöolosuhteisiin ympäristön lämmön ja lian suhteen.

JVL-1

JVL-1 laitoksella jäähdytyksen kierrätyspumpuilla on käytössä useampaa moottorityyppejä laitoksen iästä johtuen (taulukko 4). Rikkoutuneiden moottoreiden tilalle on vaihdettu uusia ja tehdaskunnostettuja moottoreita, josta johtuen käytössä on monenlaisia koneita. Tällä hetkellä käytössä olevat moottorit ovat ABB:n ja Strömbergin (nyk. ABB) valmistamia 110- 250 kW:n, 400/690 V, 1500rpm oikosulkumoottoreita, joita ajetaan 400 V jännitteellä. Moottorit ovat vaakatasoon asennettuja, jalallisia moottoreita. Kaikkiaan käytössä on 5 kierrätyspumppua. Pumput P1,P3 ja P5 ovat taajuusmuuttajaohjattuja, loput ovat suorakäyttöisiä. Taulukossa 5 on listattuna JVL-1:n moottorit.

Taulukon mukainen voiteluväli L₁-periaatteen mukaan 315 runkokoolle on 7600 käyttötuntia ja 355 runkokoolle 5600 käyttötuntia, pois lukien erillisohjeistettujen pumppujen P2, P3 ja P4 moottorit. Pumpun P2 moottorilla voiteluohje oli 3000 käyttötuntia ja pumppujen P3 ja P4 voiteluohje oli 2200 käyttötuntia. Pumppujen P1 ja P5 moottoreilla ei ollut erillistä voiteluohjetta tai se ylitti taulukon suositusarvon.

Taulukko 4. JVL-1:n kierrätyspumppujen moottorit

PUMPPU	TYYPPI	VALMISTAJA	TEHO	KOKO	OHJAUS
P1	HXR 315L 4 B3-W	ABB	200	315	Taajuus
P2	M2B2 355 S B3	ABB	250	355	Suora
P3	HXUR 712 G2 B3	STRÖMBERG	250	355	Taajuus
P4	M2BA 355 SMA	ABB	250	355	Suora
P5	M3BP 315 SMA	ABB	110	315	Taajuus

JVL-2

JVL-2 laitoksella jäähdytyksen kierrätyspumpuilla on pääasiassa käytössä ABB:n M3BP 355-tyyppiset 315- 400 kW:n, 400/690 V, 1500rpm:n oikosulkumoottorit, joita ajetaan 690 V jännitteellä. Moottorit ovat vaakatasoon asennettuja, jalallisia moottoreita. Pumput P3 ja P6 on taajuusmuuttajaohjattuja, loput ovat suorakäyttöisiä. Taulukossa 5 on listattuna JVL-2:n moottorit.

Taulukon mukainen voiteluväli L_1 -periaatteen mukaan ko. runkokoon moottoreiden laakereille on 5600 käyttötuntia, eli n. 7,5 kk. Kaikissa moottoreissa oli kuitenkin erillinen voiteluohjekilpi, joissa voiteluväliksi suositeltiin 6000 h, moottorin ollessa vaakatasoon asennettuna normaaleissa käyttöolosuhteissa.

Taulukko 5. JVL-2:n kierrätyspumppujen moottorit

PUMPPU	TYYPPI	VALMISTAJA	TEHO	KOKO	OHJAUS
P2	M3BP 355 SMC	ABB	355	355	Suora
P3	M3BP 355 MLA	ABB	400	355	Taajuus
P5	M2BA 355 SMC	ABB	355	355	Suora
P6	M3BP 355 MLA	ABB	400	355	Taajuus
P7	M3BP 355 SMB	ABB	315	355	Suora

6.3 Toteutuva ennakkohoolto

6.3.1 JVL-laitokset

JVL-1 ja 2:lla ennakkohooltoon kuuluu määräajoin suoritettavat moottoreiden värähtelymittaukset ja moottoreiden/pumppujen laakereiden voitelut. Värähtelymittausten väli kummallakin laitoksella on 2kk, joka on PSK 5705-standardin mukainen määräaika pumppu- ja puhallinsovelluksiin. JVL-1:lle myöhemmin asennettu jäähdytyspumppu P5 ei kuulu toistaiseksi värähtelymittaus kierrokselle, mutta sekin kannattaisi lisätä mukaan mittauskierrokselle. Voiteluhuollon väli JVL-1:llä on 3kk, jolloin käyttötunteja voi kertyä enimmillään $3\text{kk} \times 30\text{pv} \times 24\text{h} = 2160\text{h}$. JVL-2:lla väliä on 6kk, jolloin käyttötunteja voi kertyä enimmillään $6\text{kk} \times 30\text{pv} \times 24\text{h} = 4320\text{h}$. Voiteluhuoltojen toistotaajuus on riittävä JVL-1:llä kaikille moottoreille, jossa lyhimmat ilmoitetut voiteluvälit olivat pumpuilla P3 ja P4, 2200h. JVL-2:lla voitelun toistotaajuus on riittävä lukuun ottamatta pumpun P5 moottoria, jossa voiteluväliksi on ilmoitettu 3000h. Muiden moottoreiden ilmoitettu voiteluväli oli 6000h. Laakereiden voiteluväli taulukkoarvojen mukaan on JVL-1:n pumpulle P1 7600h ja muiden pumppujen moottoreille 5600h. JVL-2:lla vastaavat taulukkoarvot ovat 5600h.(Kuti)

Pumput ovat pääsääntöisesti tehtaan normaali ajoilla käynnissä koko ajan, joten huollon tarve voidaan ajatella jatkuvalla käytöllä. Todellisuudessa kaikki pumput eivät kuitenkaan ole koko ajan käynnissä, johtuen mm. normaaleista huoltotauoista linjoilla. Talvi-

aikaan jäähdytystarve on vähäisempi, jolloin moottoreiden ei tarvitse pyöriä täydellä teholla koko ajan (taajuusmuuttajakäytöt). Suoralla käytöllä olevien pumppujen virtaama on täysi niiden käydessä, yhteisvirtausta säädellään taajuusmuuttajakäyttöillä. Kesällä tuotannon käydessä moottorit ovat pääsääntöisesti täydellä teholla käytössä. (lisäkkä 19.2.2013, haastattelu)

6.3.2 RAP-5/ TCM-valssain

TCM-valssaimella on käytössä 3 syklokonvertteri ohjattua 6 MW:n, 800V:n Siemensin valmistamaa tahtimoottoria. Moottoreiden nimellinopeus on 310 rpm ja -taajuus 21Hz.

TCM-valssaimen päämoottoreiden ennakkohuoltoon kuuluu laakereiden voitelu ja kunnon tarkistus viikoittain. Kunnontarkistuksessa laakereista mitataan lämpötila ja värähtelyarvot. Samalla tarkistetaan laakereiden voiteluöljyn määrä. Voiteluöljyt vaihdetaan 5kk välein kokonaan. Moottoreilla on jatkuva värähtelymittaus, joten säännöllisiä, käsin tehtäviä kierroksia ei ole. Suurten tahtimoottoreiden kunto tarkistetaan vuosittain. Moottorista vuosittain tarkistettavat asiat ovat: liukurenkaat (kunto, naarmut); hiiliharjat (kuluminen, liikkuvuus pidikkeissä, pidikkeiden kunto); akselinmaadoitus (hiiliharjat, pidikkeet) sekä roottorin ja vaimennussauvojen kunto silmämääräisesti. Tarkistuksien yhteydessä moottorista puhdistetaan ylimääräinen hiilipöly pois. (Fyhr 20.2.2013, haastattelu; Kuti)

6.4 Moottoreiden vikaantumistiheys jäähdytysvesilaitoksilla

Työn yhtenä tarkoituksena oli tutkia syytä pumppujen moottoreiden tiheälle vaihtotahdille JVL -1:llä ja -2:lla. Pumppujen moottoreita rikkoutuu keskimäärin kerran vuodessa, vaikka laitoksilla ei ole moottoreita jäähdytysveden kierrätyksen pumppauskäytöissä tällä hetkellä kuin 10 kappaletta. Kaikki käytössä olevat moottorit ovat oikosulkumoottoreita, joiden keskimääräinen käyttöikä on n. 20 vuotta.

Moottoreiden vikaantumistiheyttä selvitettiin tutkimalla laitteistojen huoltohistoriaa KUTI:lta. Historiatietoja löytyi kattavammin vuodesta 2007 alkaen. Vaikka historiatiedot eivät ole kovin pitkältä ajalta, löytyi kuitenkin viimeisten viiden vuoden ajalta 9 moottorin vaihtoa. Vaihdot ja vikaantumiset kohdistuivat samoille käyttöpaikoille koko ajan, JVL-1:llä pumpun P3 moottori on vaihdettu keskimäärin 1 ½ vuoden välein 2009-2012 välisenä aikana. Yksittäiset vaihdot on tehty pumpun P1 moottorille 2009 ja pum-

pun P2 moottorille 2007. JVL-2:lla pumpun P3 moottori on vaihdettu vuosina 2010 ja 2012, sekä pumpun P6 moottori 2010 ja 2011. Pumpun P6 moottorin vaihto väli on ollut vain ½-vuotta, joka on hyvin lyhyt ikä moottorille.

Vikaantuneet moottorit ovat taajuusmuuttajaohjattuja, paitsi JVL-1:n pumpu 2, joka on suorakäyttöinen. Pumpun P2 rikkoutuminen on yksittäistapaus, joka johtunee normaalista kulumisesta, muiden moottoreiden rikkoutumiseen vaikuttaa todennäköisesti taajuusmuuttajaohjaus. Rikkoutuneet moottorit ovat olleet JVL-1:llä 200 ja 250 kW tehoisia, JVL-2:lla 400kW koneita. Vastaavia, 200 kW:n taajuusmuuttajaohjattuja oikosulkumoottoreita on rikkoutunut myös RESAlla, missä ne ovat sekoittajakäytössä. Moottorit ovat tyypillisesti rikkoutuneet tai vika on aiheutunut laakereista, mikä viittaa taajuusmuuttajakäytöissä laakerivirtoihin. Laakerivirtojen mahdollisuus kannattaa tutkia tarkemmilla mittauksilla. Laakerivirroista on kerrottu tarkemmin kappaleessa 4.6. (Iisakka 19.2.2013, haastattelu; Kutu)

6.5 Sähköisen ylikuormasuojauksen käyttö

Kesällä 2012- JVL-2:lla pumpun P3 moottorin rikkoutumisen yhteydessä huomattiin taajuusmuuttajan pysäyttäneen moottorin maasulkuun, joka yleensä aiheutuu käämin eristyksen pettämisestä, jolloin virta pääsee käämistä moottorin runkoon. Moottori oli tilanteen jälkeen todella kuuma päältäpäin, vielä useampi tunti poiskeytyneen jälkeenkin. Tapauksessa ihmetytti, miksei taajuusmuuttaja ollut pysäyttänyt moottoria ylivirtaan tai -lämpöön. Taajuusmuuttajan parametreja tutkittaessa huomattiin, että ylivirta raja oli lähemmäs 200 % nimellisvirrasta, eikä muut rajat, kuten lämmönvalvonta ollut pysäyttävänä rajana käytössä. Tässä tapauksessa moottorin lämpötilan valvonta olisi todennäköisesti suojannut moottorin palamiselta. Moottorin tuhoutumisen aiheutti vikaantunut laakeri, joka lopuksi jumittui, josta seurasi moottorin reilu ylikuormittuminen. Kyseisessä tapauksessa tuhoutunut moottori oli 400kW prosessimoottori.

Moottorin vaihdon yhteydessä ohjaavan taajuusmuuttajan rajat tarkistettiin ja suojaukset asetettiin käyttöön. Muidenkin taajuusmuuttajaohjattujen lähtöjen parametrit kannattaa tarkistaa ja korjata vastaamaan moottorin arvoja, jolloin voidaan säästyä todennäköisesti vakavammilta moottori vaurioilta, joista seuraa aina ylimääräisiä kustannuksia.

7 MITTAUKSET

7.1 Värähtelymittaus käytännössä

Ennakkohuoltoryhmän suorittamalla värähtelymittauskierroksella JVL-1 ja -2:lla värähtelyarvot mitataan moottorista ja pumpusta (kuva 45). Värähtelyarvot mitataan moottorissa N- ja D-päistä moottorin rungosta mahdollisimman läheltä laakerikilpiä, mikäli moottorissa ei ole tehdasasennettua mittauspistettä. Mittaukset tulisi suorittaa moottoreihin kiinteästi asennetuista mittauspisteistä. Pumpun värähtelyarvot mitataan laakerin ja pesän läheltä. Mittauksessa käytetään magneettikiinnitteistä mittapäätä. Mittapään asettelussa tulee huomioida anturin kiinnittymien mittauskohtaan tukevasti. Perusmittaukset tapahtuvat yksikanavaisesti.



Kuva 45. Värähtelymittaus JVL-2:n eräällä moottorilla

Ennen mittauksen aloittamista moottorin hetkellinen kierrosluku mitataan stroboskoopin avulla (kuva 46). Stroboskoopissa on vilkkuva valo, jonka vilkkumistaajuutta voidaan säätää. Mittaus tapahtuu esim. moottorin tuulettimesta, jonka pyörintä näyttää pysähtyvän, kun stroboskoopin vilkhdustaajuus sattuu samalle taajuudelle moottorin pyörintätaajuuden kanssa. Lisäksi pyörintätaajuus tarkistetaan vielä värähtelymittarin spektristä, koska stroboskoopilla mitattu pyörintätaajuus voi olla vallitsevan pyörintätaajuuden monikerta. Moottorin kierrosluku tulee tietää, jotta pyörimistaajuus saadaan laskettua, sillä mittaustulosten arviointi perustuu osakseen pyörimistaajuuteen ja sen monikertoihin. Taajuusmuuttajaohjatuilla moottoreilla olisi lisäksi hyvä tietää mittaushetkellä vallitseva taajuusohje.



Kuva 46. Pyörimisnopeuden mittaaminen stroboskoopilla

Tulosten perusanalysointi onnistuu käytössä olevalla mittarillakin, mutta sitä ei juuri käytetä korkeahkon virhemahdollisuuden vuoksi. Käytännössä tulosten analysointi tehdään lataamalla mittausdata PC-ohjelmistoon, joka analysoi tulokset mm. laakereiden tietojen pohjalta. Analysoitaessa tuloksia tulee laakerin tyyppi ja valmistaja olla tiedossa, koska jokaisella laakerityypillä on omat yksilölliset vikataajuudet. Vikojen havainnointi perustuu suurimmalta osaltaan mittauspisteen pitkänajan trendien seurantaan, käytännössä arvojen kasvun/ muutosten seurantaan (Annala 28.2.2013, haastattelu)

Taajuusmuuttajaohjatuista moottoreista vikaa etsittäessä olisi tärkeää tietää taajuusmuuttajan sen hetkellinen taajuusohje, jotta ohjaustaajuudet ja siitä aiheutuvat värähtelytaajuudet voidaan sulkea pois mekaanisista värähtelyistä tai paikantaa mahdollinen vika moottorin sähköisiin osiin (staattori ja roottori). Mittaajalla tulisi olla tietty perustuntemus taajuusmuuttajasta ja sen aiheuttamista värähtelytaajuuksista. Hetkellisen taajuusohjeen näkee taajuusmuuttajan näytöltä, mikäli käytettävässä taajuusmuuttajassa on näyttö tai toinen vaihtoehto on saada ohje järjestelmästä. Taajuusohjeen katsominen järjestelmästä edellyttää sähköpuolen henkilöiden paikalla olemista. (Annala 28.2.2013, haastattelu)

Värähtelymittauksissa tällä hetkellä käytössä olevalla mittarilla ei ole mahdollista mitata kuin yhdellä kanavalla kerrallaan, mikä hankaloittaa mittausta vianhakutilanteissa. Vianhakutilanteet ovat kuitenkin jokseenkin vähäisiä verrattaessa rutiini värähtelymittauksiin, joten mittarissa olevasta puutteesta ei ole suurta haittaa. Kahdella kanavalla mitattaessa vikoja on helpompi paikantaa, kun tuloksia saadaan yhtä aikaa kahdesta pisteestä. Vianhaussa on tärkeää löytää ensin rakenteiden ominaisvärähtelytaajuudet, joiden kautta vikaa voidaan paikantaa. Kahdella kanavalla vikaa paikantaessa toisella ka-

navalla mitataan itse kohdetta ja toisella rakennetta, jotta voidaan sulkea pois mahdollisesti muualta tulevat värähtelyt. (Annala 28.2.2013, haastattelu)

Huomioitavaa mittauksista

Tehtaan oman ennakkohuoltoryhmän suorittamista mittauksista ei tehdä raporttia, jossa mitatut arvot näkyisivät. Raportin puuttuessa mittausten tulokset jäävät mittausporukan tietoon, eikä tuloksista informoida esim. alueen kunnossapidosta vastaavaa mestaria, mikäli niissä ei ole poikkeamia. Tulokset on mahdollista saada jälkeinpäin erikseen pyytämällä niitä. Raportointi järjestelmän puuttuessa tulosten/vikaantumisten seuraaminen osastoilla on mahdotonta/ hyvin hankalaa.

Värähtelymittauksissa toinen huomioitava seikka liittyy mittauspisteisiin. Tällä hetkellä käytettäviä mittauspisteitä ei ole merkitty moottoreiden runkoihin. Muut, kuin moottoreiden kiinteät mittauspisteet tulisi merkitä, jotta mittaus voidaan tehdä uudelleen samasta kohtaa. Mittauksia tekee tällä hetkellä ainoastaan yksi henkilö, joten mittaukset toistuvat samoista kohdista nyt, mutta mittaajan vaihtuessa mittapisteiden sijaintitieto ei välttämättä välity enää seuraavalle mittaajalle. Trendiseurannan kannalta olisi tärkeää, että mittaukset on toistettu aina samasta paikkaa.

Värähtelymittaukset ovat kokonaisuutta ajatellen kutakuinkin kunnossa, ainoastaan JVL-1:lle myöhemmin lisätyn pumpun P5 moottori ei ole mukana värähtelymittaus kierroksella, mutta se kannattaisi lisätä kierrokselle.

Värähtelymittausten tulosten jakelusta ja laajuudesta voisi lisäksi keskustella alueen työnjohdon ja ennakkohuollon välillä, jolloin mittaustarpeet ja päämäärät saataisiin selvitettyä.

7.2 Laakerivirtojen mittaus

JVL:n moottoreiden tiheää rikkoutumista selvitellessä esille nousi laakerivirtojen mahdollisuus moottoreita rikkovana tekijänä, koska rikkoutumiset tapahtuivat vain taajuusmuuttajaohjatuilla moottoreilla ja muussa kunnossapidossa ei ollut havaittavissa puutteita.

Laakerivirtojen mittaustyö tilattiin ulkopuoliselta toimijalta, koska mittaukset vaativat erikoisosaamista ja asiantuntemusta sekä erikoismittalaitteita. Mittauksessa mittalaitteena toimi oskilloskooppi, jossa mittaustulokset näkyvät käyrämuodossa ja toisekseen oskilloskoopin mittaustaajuus on korkea. Laakerivirrat esiintyvät käytännössä melko korkeilla taajuuksilla taajuusmuuttajakäytöissä, johtuen inverterin suuresta kytkentätaajuudesta. Mittauksessa virrat mitattiin ns. Rogowskyn- kelalla, josta mittaussignaali vietiin mV-muuntimen/vahvistimen kautta oskilloskoopille (kuva 47). Moottoreilta mitattiin akseli- ja kiertovirta sekä akselijännite. Akselivirta mitataan suoraan akselin ympäriltä, moottorin ja taakan välistä, kiertovirta puolestaan mitataan akselin ja rungon väliin asetettavan oikosulkulenkin avulla. Akselijännitteen mittausta tehtiin hiiliharjaperiaatteella akselin pinnalta tavallisella oskilloskoopin mittapäällä, jonka päässä oli metallivillan tapainen tuppo. Akselijännite mitattiin akselin ja moottorinrunгон väliltä. Jokaisella mittauskerralla moottorin hetkellinen ohjaustaajuus ja laakerien lämpötilat kirjattiin ylös. Laakereiden lämpötilat mitattiin infrapunamittarilla. Mittausten aikana yhdeltä moottorilta mitattiin myös ns. yhteismuotoinen virta, yhteismuotoinen virta on virtaa joka ei pääse palaamaan suuntaajalle, vaan palaa moottorikaapeliin ja – runkoon, josta edelleen kulkeutuu esim. rakenteisiin moottorin akselia myöden.



Kuva 47. Akselivirran mittaaminen Rogowskyn- kelalla pumpun akselilta.

Mittausten yhteydessä tarkasteltiin samalla moottoreiden kytkentää moottorin ja taajuusmuuttajan päässä, lähinnä maadoitusten osalta. Maadoitusten on tärkeää olla toteutettu ns. 360°:n maadoituksina, kuten aiemmin teoriassa on todettu. Hyvällä maadoituksella virralle taataan hyvä paluutie suuntaajalle, jolloin haitallisia laakerivirtoja ei pitäisi päästä syntymään. Laakeri- ja akselivirtoja voidaan lisäksi estää asentamalla suurtaajuinen maadoitusjohdin moottorinrunгон ja taakan väliin, tässä tapauksessa pumpun ja moottorin välille. Toinen oleellinen seikka kytkennöissä taajuusmuuttajan

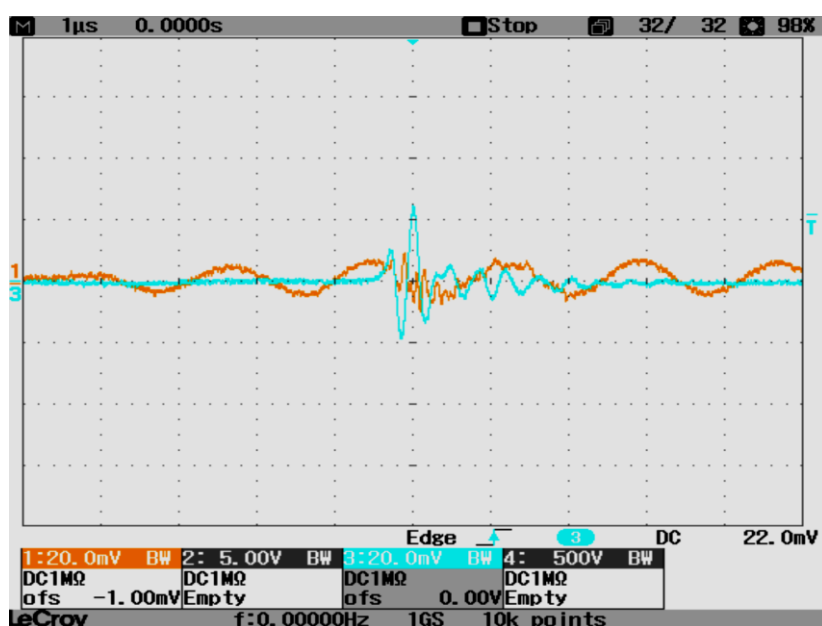
päässä maadoituksen lisäksi ovat dU/dt suotimet sekä vaihejohtimien ympärille asennettavat ferriittirenkaat. dU/dt suotimella ja ferriittirenkailla estetään lähinnä yhteismuotoisen virran syntymistä.

Mittaustulokset

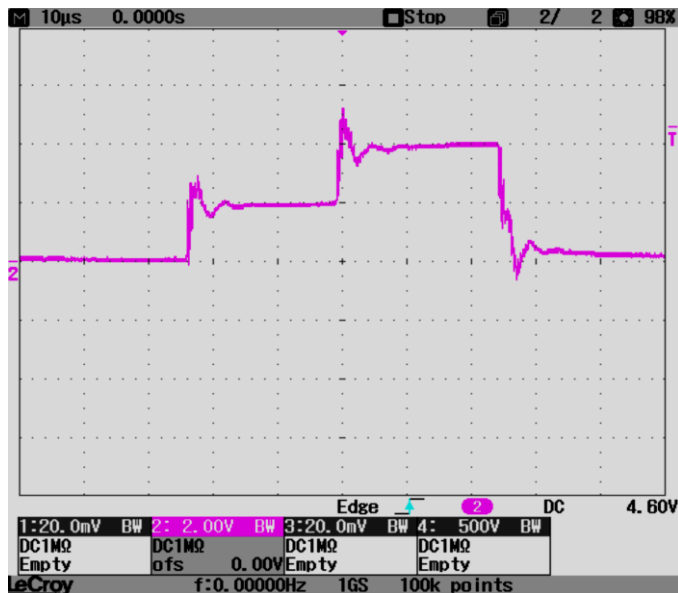
Jäähdytysvesilaitoksille suoritetuissa laakerivirtamittauksissa löytyi JVL-2:lla merkkejä laakerivirroista, selvimmin merkkejä laakerivirrasta oli havaittavissa pumpulla P3, pumpun P6 moottorin osalta ei selviä merkkejä laakerivirroista ollut havaittavissa virtamittauksilla. Akselijännitettä mitattaessa oli kuitenkin havaittavissa selviä merkkejä laakerivirroista myös pumpulla P6. Pumpun P6-jännitemittauksen tulos oli poikkeava, siinä oli havaittavissa selviä merkkejä kipinäpurkauksista. JVL-1:llä ei ollut havaittavissa selviä merkkejä laakerivirroista.

JVL-laitoksilla taajuusmuuttajaohjattujen kierrätyspumppujen moottoreiden ohjauksessa käytetään ABB:n ACS-600 sarjan taajuusmuuttajia, joissa on dU/dt -suodattimet, mutta ei yhteismuotoisenvirran cmf-suodattimia.

JVL-1:llä mitattiin ainoastaan pumpun P3 moottori, joka on vaihdettu useasti laakerivierojen vuoksi. Mittauksissa ei kuitenkaan havaittu suoraan suurempia ongelmia tai seikkoja, jotka viittaisivat laakerivirtoihin. Moottorilla akselivirran mitattu huippuarvo oli alle 400 mA ja kiertovirran huippuarvo n. 500 mA (kuva 48). Akselijännitteen huippuarvo oli n. 5 V (kuva 49). (Keskitalo 9.4.2013, sähköpostiviesti)



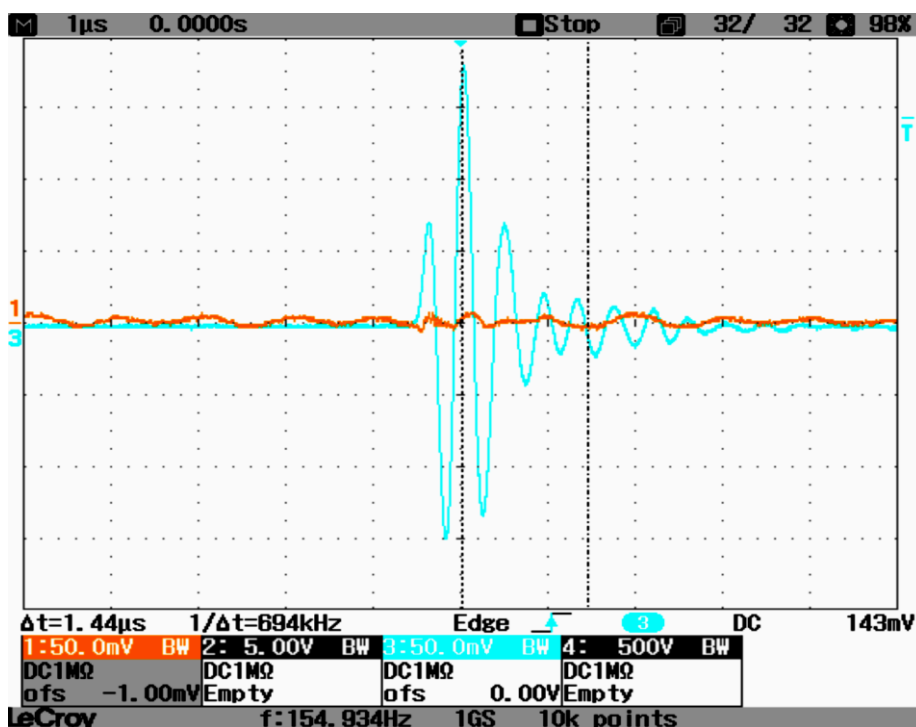
Kuva 48. JVL-1 pumpun P3 moottorin virtamittaus. 1-kanava akselivirta, 3-kanava kiertovirta. Skaalaus 0,4A/div, aika 1 μs/div.



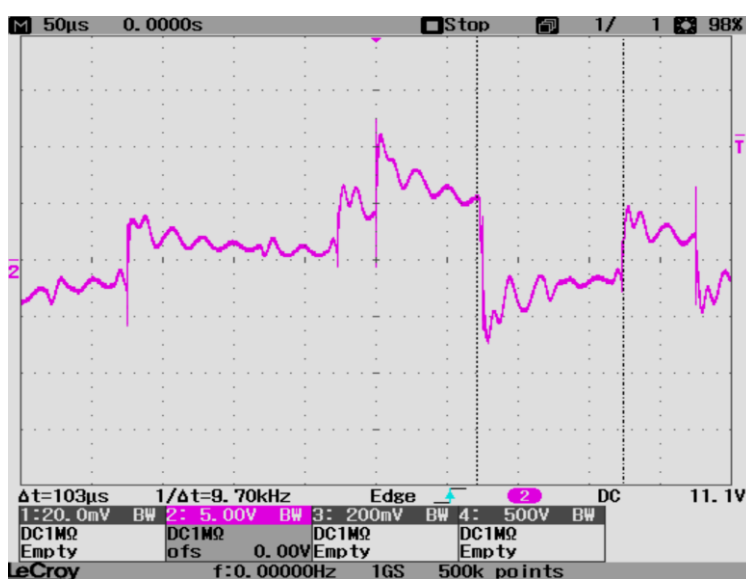
Kuva 49. JVL-1 pumpun P3 moottorin jännitemittaus akselin ja rungon väliltä. Skaalaus 2V/div, aika 10 µs/div.

PSK- standardin 7708 mukaan havaitut, alle 1 A:n huippuvirrat eivät pitäisi olla haitallisia, jännitteen osalta 3-10V:n arvot voivat olla jo haitallisia laakereille, mutta eivät pitäisi aiheuttaa välitöntä riskiä. Mittaushetkellä laakerin lämpötila oli n.45- 50 °C, jolloin laakerin öljykalvon impedanssi on vielä korkeahko, joten läpilyöntejä ei pääse niin helposti syntymään. Arvot tosin voivat kasvaa laakerin lämpötilan noustessa, jolloin laakerin öljykalvo ohenee ja impedanssi pienenee. Moottorissa on eristetty laakeri N-päässä, jonka tulisi olla ko. moottorityypille riittävä suoja laakerivirtoja vastaan taajuusmuuttajakäytössä. Kyseisen pumpun moottori on kuitenkin rikkoutunut useasti, joten ko. paikassakin voi laakerivirtoja esiintyä laakerin korkeammilla lämpötiloilla. (Keskitalo 9.4.2013, sähköpostiviesti; PSK 7708, 10–11)

JVL-2:lla mitattiin pumppujen P3 ja P6 moottorit, joissa on ollut usein laakerivaurioita. Mittausten mukaan näillä moottoreilla on havaittavissa haitallisia laakerivirtoja/jännitteitä. Pumpun P3 moottorilla akselivirran huippuarvot olivat 500 mA luokkaa 850 kHz taajuudella, ja kiertovirran mitattu huippuarvo oli 3,5A:n luokkaa 2 MHz taajuudella, jossa oli havaittavissa toistuva pulssi (kuva 50). Akselijännitteen huippuarvo oli 11 V:n luokkaa (kuva 51). Havaittu 3,5 A:n virta on todennäköisesti N-pään laakerin yli kulkeva kapasitiivinen vuotovirta. Virta on tosin suurehko kapasitiiviseksi virraksi, mutta mahdollinen yhteismuotoisen suodattimen puuttuessa. D-pään laakerin lämpötila mitaushetkellä oli n. 45 °C. (Keskitalo 9.4.2013, sähköpostiviesti)



Kuva 50. JVL-2 pumpun P3 moottorin virtamittaus. 1-kanava akselivirta, 3-kanava kiertovirta. Skaalaus 1A/div, aika 1 μ s/div.



Kuva 51. JVL-2 pumpun P3 moottorin jännitemittaus akselin ja rungon väliltä. Skaalaus 5V/div, aika 50 μ s/div.

Pumpulla P6 virtojen huippuarvot olivat 500 mA luokkaa, samoin akselijännite oli 11 V:n luokkaa, jossa pitkällä aikavälillä havaittavissa selkeitä jännitetason nopeita romahduksia (kuva 52). D-pään laakerin lämpötila mittaushetkellä oli n. 65 °C. Pumpulla P6 havaitut virrat voivat olla suurempiakin, mutta niitä ei saatu mitattua kunnolla lämpimän laakerin pienen impedanssin vuoksi, laakeri oli mittaushetkellä hyvin virtaa johtava, josta nopeat jännitepulssit todennäköisesti johtuivat. (Keskitalo 9.4.2013, sähköpositiivisesti; PSK 7708, 10–11)



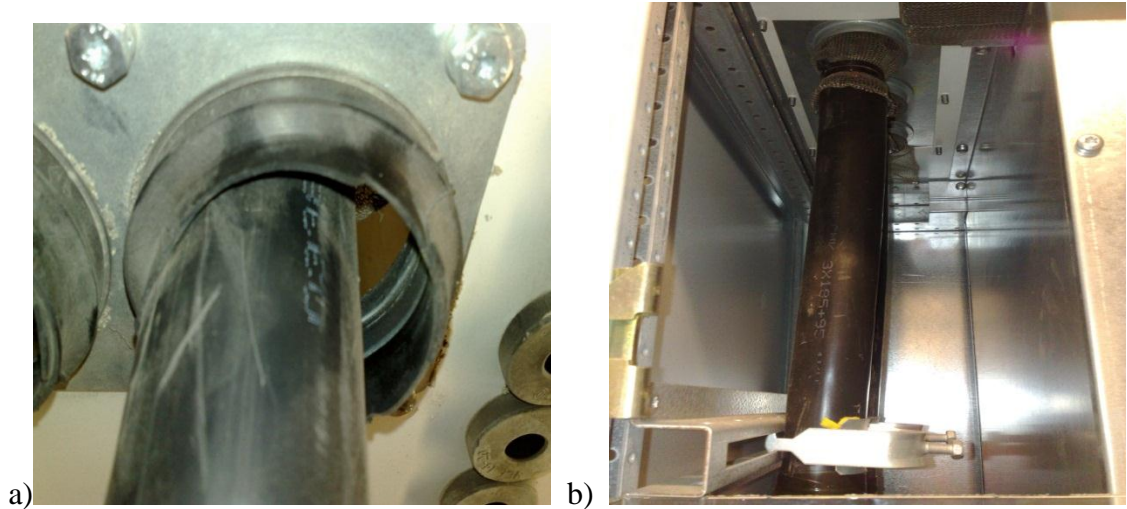
Kuva 52. JVL-2 pumpun P6 moottorin jännitemittaus akselin ja rungon väliltä. Skaalaus 5V/div, aika 5 μs/div.

PSK- standardin 7708 mukaan alle 1 A:n arvot eivät ole haitallisia, mutta havaitulla 3,5 A:n pulssilla on jo merkittäviä vaikutuksia laakereiden käyttöikään, samoin havaitut 11 V:n akselijännitteen pulssit ovat haitallisia, ja niillä on merkittäviä vaikutuksia laakereiden käyttöikään. Pumpulla P6 havaitut nopeat jännitepulssit viittaavat kipinäointiin laakerissa, jännite purkautuu laakerin läpi runkoon, josta seuraa ns. kipinätyöstö. Mittauksissa havaitut virrat todennäköisesti kasvavat vielä hieman laakereiden lämmitessä lisää. Mittaushetkellä JVL-1:llä ja JVL-2:lla pumppujen P3 laakerit olivat selvästi viileämmät kuin täydellä kuormituksella ajettaessa, esim. kesäaikaan. JVL-2:n moottoreilla suurin ongelma oli kiertovirta, joka pahenee entisestään laakereiden lämmitessä enemmän. (Keskitalo 9.4.2013, sähköpostiviesti; PSK 7708, 10–11)

Kytkennoissä havaitut puutteet

Kohteiden kytkentöjen yleisluonteisessa tarkastelussa tuli ilmi muutamia puutteita laitteiden asennuksessa ja kaapeleiden kytkennöissä niin taajuusmuuttajien kuin moottoreidenkin päässä, etenkin JVL-2:lla. Moottoreiden päässä virheitä oli lähinnä läpivientilaippojen ja kaapeleiden 360°:een maadoitusten toteutumisessa. Kytkentäkoteloiden koostuessa useista osista, tulisi maadoitusyhteyden eheys tarkistaa koko kotelon osalta. Maadoitusyhteys jää helposti heikoksi kaapeliläpivientilaipan ja kytkentäkotelon välille laippatiivisteistä johtuen, mikäli ne eivät ole johtavia. Kiinnityspulttien reiät ovat helposti maalinpeitossa, joten yhteys jää tässäkin heikoksi tai täysin eristetyksi. Taajuus-

muuttajien päässä kytkennöistä puuttuivat yhteismuotoisen virran cmf-suodattimet sekä JVL-2:lla useammasta taajuusmuuttajasta moottorikaapeleiden 360°:een maadoitus puuttui kokonaan tai kytkentä oli puutteellinen. Osassa taajuusmuuttajia kaapeleiden emc-läpivienti sukat olivat repeytyneet (kuva 53a), viereisessä kuvassa (kuva 53b) on esitetty oikeaoppinen EMC-läpivienti ja vedonpoisto kaapeleille taajuusmuuttajalla. Suurimmat asennustekniset viat tulivat ilmi uudemmalla JVL-2 laitoksella. JVL-1:llä ei havaittu suurempia asennusteknisiä puutteita. Edellä mainitut seikat tulisi tarkistaa kaikista alueen laitteista, ja korjata havaitut viat ohjeiden mukaisiksi. (Keskitalo 9.4.2013, sähköpostiviesti)

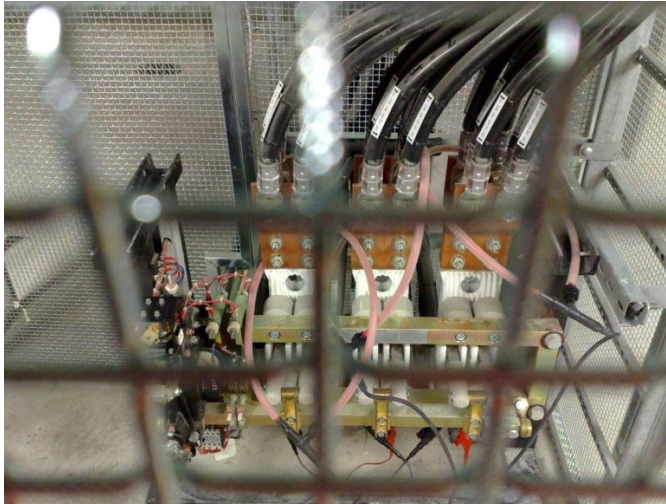


Kuva 53. a) Virheellinen EMC- läpivienti, b) Oikeaoppien EMC- läpivienti.

7.3 MACHsense-P mittaus

RAP-5:n TCM-valssaimen kolmelle päämoottorille suoritettiin ABB:n MACHsense-P mittaus, jolla yritettiin löytää syy 2-standilla havaitulle 300 Hz värähtelylle. Mittaus tehdään kahdessa vaiheessa, koostuen virta/jännite- sekä värähtelymittauksesta. Tulokset yhdistetään myöhemmin erillisellä analysointi-ohjelmistolla, jolloin saadaan kuva moottorin kunnosta. Tässä tapauksessa oli tarkoitus selvittää johtuuko havaittu värähtely sähkönsyötöstä vai onko kyseessä mekaanisista komponenteista johtuva värähtely. Erilaiset muuttajat voivat aiheuttaa värähtelyä laitteisiin, joka ilmenee mahdollisesti mekaanisena värähtelyinä. Mittauksissa käytetään erillistä, tälle mittaukselle ABB:n kehittämää mittalaitetta ja ohjelmistoa.

Sähkönlaadun mittauksessa jokaiselta vaiheelta mitattiin virta, jännite ja taajuus samanaikaisesti, virrat mitattiin Rogowskyn- kelalla moottorille meneviltä vaiheilta ja jännite samoilta vaiheilta hauenleuoilla (kuva 54). Jännite- ja virtamittauksissa käytettiin sopivaa muunninta, jolla signaalit vietiin mittalaitteelle. Sähkönlaadusta otettiin muutama n.15sek. otanta moottorin käydessä tasaisella nopeudella.



Kuva 54. Virtojen ja jännitteiden mittaus erotus-kontaktorilta.

Värähtelymittaus tehtiin neljällä anturilla, antureista kaksi oli D-pään laakerikilvessä, yksi moottorin rungossa N- ja D-päässä. Lisäksi otettiin yksi mittaus, jossa N-pään anturi siirrettiin moottorin alustaan. Värähtelymittauksissa otettiin muutama n. 6sek. otanta moottorin käydessä tasaisesti. Antureina mittauksissa käytettiin magneettikiinnitteisiä värähtelyantureita, kuten kohdassa 7.1 käsitellyissä perusvärähtelymittauksissakin.

Johtopäätöksiä

Suoraan mittausdatasta sähkönlaadun osalta oli havaittavissa kohonneita värähtelytasoja lähellä 150 Hz ja 300 Hz taajuuksia, sekä värähtelyarvoissa oli havaittavissa selkeästi suuremmat arvot 2-standin moottorilla kuin 1 ja 3 -standien koneilla. Sähköisistä arvoista 150 Hz värähtelytaso viittaa kolmanteen harmoniseen yliaaltoon ja 300 Hz:n värähtely viittaa kuudenteen harmoniseen yliaaltoon. Sähköiset arvot olivat kaikilla kolmella moottorilla suurin piirtein yhtenäiset, hienoisia eroja oli johtuen moottorin eri pyörimisnopeuksista ja kuormittumisista. Mittausarvojen pohjalta on mahdollista olettaa, että havaittu 300 Hz värähtely johtuu moottoria syöttävästä syklokonvertteristä, mutta asia varmistunee virallisista tuloksista, jotka tulevat myöhemmin. Viralliset tulokset eivät ehtineet tulla ennen työn luovutusajankohtaa.

Työn tarkoituksena oli selvittää RAP-5:n TCM-valssaimella havaitun värähtelyn syytä, sekä syytä jäähdytysvesilaitoksilla olevien moottoreiden tiheähköön rikkoutumiseen. Työn edetessä selvittely keskittyi lähinnä jäähdytysvesilaitoksien moottoreiden rikkoutumissyiden selvittelyyn, osin erinäisistä aikataulullisista syistä johtuen. Toisaalta jäähdytysvesilaitoksien moottoreiden rikkoutumisen syyn selvittelyssäkin tuli paljon uusia asioita esille, joita täytyi tutkia tarkemmin, mm. laakerivirrat ja taajuusmuuttajakäyttöjen haitat. TCM-valssaimen osalta työtä aloitettaessa selvisi, että työn tilaaja joutuu tekemään tarkennuksia ja lisäselvittelyjä havaitulle värähtelylle. Lisäselvityksillä tutkittiin mm. mistä ja miten arvot on mitattu, ja vaikuttaako ajotilanne värähtelyyn. Lisäksi haluttiin vertailla, vastaavatko automaattisen värähtelymittausjärjestelmän tulokset käsimittarilla mitattuja tuloksia.

Työn alussa rajattiin ensin työn aihepiiriin kuuluvat moottorit. Ensimmäisessä vaiheessa, moottoreiden rajauksen jälkeen kartoitettiin moottoreiden ennakkohuollolliset toimenpiteet ja tarkasteltiin niiden sopivuutta ja riittävyttä käytössä oleville koneille. Tärkeimmät ennakkohuollolliset toimenpiteet moottoreille ovat laakereiden voitelu ja värähtelymittaukset. Ennakkohuollolliset toimenpiteet ovat riittävät tällä hetkellä moottoreille, joita tässä työssä selviteltiin. Muistakin moottoreista, jotka ovat samalla alueella mm. puhallinkäytöissä, tulisi tarkistaa vastaavat seikat, jotka pumppujen moottoreille nyt on tarkastelu.

Saatavilla olevien historiatietojen mukaan vikaantumistiheyttä tutkittaessa, huomattiin rikkoutumisten keskittyneen samoille pumpuille. Huomattuamme vikojen keskittymisen samoille käyttöpaikoille, etsittiin mitä yhteistä ko. käyttöpaikoilla on. Käyttöpaikoilla yhteistä oli taajuusmuuttajilla toteutettu moottoreiden ohjaus. Rikkoutumisilla ja taajuusmuuttajilla näytti olevan selvä syy-yhteys, sillä vastaavilla rinnakkaisilla suorakäyttöisillä moottoreilla ei rikkoutumisia tapahdu normaalia enempää.

Rikkoutumisten aiheuttajaksi epäiltiin laakerivirtoja, jotka ovat todennäköisiä suurehkoilla taajuusmuuttajakäytöillä. Toinen seikka, joka viittasi laakerivirtoihin oli moottoreiden pääasiallinen rikkoutuminen laakereista. Lisäksi laakereihin ilmestyi ennen niiden rikkoutumista värähtelymittauksilla havaittava särö, joka kuulemma viittasi tiheään epätasaisuuteen laakerikehällä. Tiheä epätasaisuus taas viittaa laakerivirtoihin. Laakerivirtojen mahdollisuus varmistettiin tilaamalla ulkopuolien yritys mittaamaan laakerivir-

rat ja tutkimaan käytöt. Mittauksissa laakerivirtoja todettiin esiintyvän jossain määrin kaikissa mitatuissa koneissa, selvimmin ongelmia esiintyi JVL-2:n moottorikäytöissä. Mittauksien yhteydessä tutkiin samalla syitä, miksi käytöissä esiintyy laakerivirtoja. Suurimmat syyt laakerivirtoihin tässä tapauksessa olivat puutteelliset maadoitukset tai puutteet maadoitusjohtimien kytkennöissä moottorin että taajuusmuuttajan päässä, sekä yhteismuotoisten virtojen suodattimien puuttuminen taajuusmuuttajilta.

Taajuusmuuttajilla ongelmaseikoiksi huomatu erilliset kytkentä- ja asennusvirheet voitaisiin välttää lukemalla asennusohjeet huolellisesti, mikäli tehdään uudisasennuksena tai muutostyönä taajuusmuuttajien- tai taajuusmuuttajaohjattujen moottoreiden asennuksia. Toinen seikka, joilla ongelmia voisi välttää, olisi järjestää/kysellä laitetoimittajalta erilaisia asennuskoulutuksia/kursseja taajuusmuuttajien asennuksiin ja käyttöönottoihin.

Samalla alueella havaittiin aiemmin yhden moottorin rikkoutumisen yhteydessä puutteita moottoria ohjaavan taajuusmuuttajan moottorinsuojausparametreissa. Parametriverhe paljastui moottorin palamisen seurauksena. Ko. käytössä taajuusmuuttajan olisi pitänyt katkaista moottorin syöttö ylivirran tai -lämmön mukaan, mutta käyttö keskeytyi vasta moottorin mentyä maasulkuun. Tilanteessa moottorin ylivirta-asetus oli liian korkealla ja termistorisuojaus oli kaikei pois käytöstä. Vastaavien tilanteiden estämiseksi olisi hyvä tarkistaa muidenkin taajuusmuuttajien raja-arvot ja parametroidit vastaamaan käytössä olevien moottoreiden arvoja. Tilanteissa, joissa moottori ylikuormittuu reilusti voi taajuusmuuttajakin rikkoutua, mikäli käyttö ei kytkeydy ajoissa pois päältä.

RAP-5:n TCM-valssaimella havaitun 300Hz:n värähtelyn syyn tutkiminen jäi tässä työssä lopulta melko vähäiseksi. Värähtelyn syytä oli tarkoitus selvittää MACHsense-mittauksella, joka oli tarkoitus toteuttaa kevättalven aikana, mutta mittaus siirtyi huhtikuun alkupuolelle, joten mittauksen viralliset tulokset eivät ehtineet saapua tämän työn toteutuksen aikarajojen puitteisiin. Mittauksella oli tarkoitus selvittää värähtelyn syy, tai ainakin paikantaa värähtelyn lähde. Värähtely voi olla sähköinen tai mekaaninen, joka tulisi selvittää tällä mittauksella, koska siinä yhdistyy sähkönsyötönmittaus ja värähtelymittaus. Yksi mahdollinen syy värähtelyyn voi olla syklokonverterikäytöstä johtuva sähköinen värähtely, koska vastaavaa värähtelyä oli havaittu tehtaalla toisellakin valssaimella, jossa on käytössä samantapainen ohjaus.

9 POHDINTA

Työssä tuli vastaan monia uusia asioita, ja moniin asioihin sai syvällisemmän kuvan, mitä koulun opetuksessa on tullut esille. Uudet asiat liittyivät työnaihepiiriin kuuluviin asioihin, kuten erilaisiin sähkömoottoreihin, erilaisiin sähkömoottorikäyttöihin, moottoreiden kunnossapitoon ja kunnonvalvontaan jne. Moottoreiden osalta tuli tutustuttua moniin erilaisiin moottorityyppeihin, joista ei ole aiemmin kuullut mitään, töissä eikä koulussa.

Työnaikana sain perustuntemuksen siitä, miten sähkömoottoreiden kuntoa voidaan valvoa monilla eri menetelmillä, kuten värähtelymittauksilla tai sähkönsyötönmittauksilla. Samalla oppi, miten tärkeää laitteiden peruskunnossapito on.

Kuitenkin tärkein asia, joka tuli työtä tehdessä esille, olivat taajuusmuuttajakäyttöjen haitat ja ongelmat. Ongelmista oli jo entuudestaan jonkinlainen pintapuolinen kuva, mutta eteen tuli monia uusia ja yllättäviä seikkoja, mitä taajuusmuuttajakäytöt aiheuttavat. Taajuusmuuttajakäyttöjen aiheuttamista ongelmista päälimmäiseksi nousivat laakerivirrat, joita esiintyy yllättävän paljon, varsinkin suuremmilla moottoreilla (yli 100kW), unohtamatta pienempiäkään käyttöjä. Yllättävä seikka laakerivirroissa oli, miten ne syntyvät ja kuinka pienistä, yleensä asennuksessa, tapahtuvista virheistä ne johtuvat ja kuinka helppo ne olisi välttää oikeilla asennustavoilla.

LÄHTEET

- ABB ACS800- Taajuusmuuttajat tuoteluettelo_ FIN 2009a, PDF- dokumentti, hakupäivä 28.1.2012
<[http://www05.abb.com/global/scot/scot201.nsf/veritydisplay/5650b5982159014bc125760300212d38/\\$file/FI_ACS800singledrivescatalogREVK.pdf](http://www05.abb.com/global/scot/scot201.nsf/veritydisplay/5650b5982159014bc125760300212d38/$file/FI_ACS800singledrivescatalogREVK.pdf)>
- ABB MACHsense-P esite, 06/2011c, PDF-dokumentti, hakupäivä 31.1.2013
<[http://www05.abb.com/global/scot/scot234.nsf/veritydisplay/3f67be4c933a3b33c1257a6800342ed6/\\$file/AB_FactFile%20MACHsense-P2_low%20res%20FI.pdf](http://www05.abb.com/global/scot/scot234.nsf/veritydisplay/3f67be4c933a3b33c1257a6800342ed6/$file/AB_FactFile%20MACHsense-P2_low%20res%20FI.pdf)>
- ABB Moottoreiden laatuopas, 3/2003, PDF- dokumentti, hakupäivä 20.2.2013
<[http://www05.abb.com/global/scot/scot259.nsf/veritydisplay/49d50c78179dab40c2256d28002bfd63/\\$file/moottoreiden%20laatuopas%2003-2003.pdf](http://www05.abb.com/global/scot/scot259.nsf/veritydisplay/49d50c78179dab40c2256d28002bfd63/$file/moottoreiden%20laatuopas%2003-2003.pdf)>
- ABB Pienjännitemoottoreiden käyttöohje_ FIN 1/2009b, PDF- dokumentti, hakupäivä 19.2.2013
<[http://www05.abb.com/global/scot/scot259.nsf/veritydisplay/742083e5ed30ca63c12579ed003dbee/\\$file/Standard_Manual_Low_Voltage_FI_revE%20lores.pdf](http://www05.abb.com/global/scot/scot259.nsf/veritydisplay/742083e5ed30ca63c12579ed003dbee/$file/Standard_Manual_Low_Voltage_FI_revE%20lores.pdf)>
- ABB- Power asiakaslehti 2/2012, PDF- dokumentti, hakupäivä 22.1.2013
<http://abb.smartpage.fi/fi/power_2_2012/files/ABB_0212.pdf>
- ABB Prosessimoottorit tuoteluettelo 05/2011b, PDF- dokumentti, hakupäivä 28.1.2012
<[http://www05.abb.com/global/scot/scot234.nsf/veritydisplay/c4fabac2479e4a1dc125798a0024d79d/\\$file/Catalog%20Process%20perf%209AKK104556%20EN%2005_2011%20RevC.pdf](http://www05.abb.com/global/scot/scot234.nsf/veritydisplay/c4fabac2479e4a1dc125798a0024d79d/$file/Catalog%20Process%20perf%209AKK104556%20EN%2005_2011%20RevC.pdf)>
- ABB Synchronous motors (tahtimoottorit), esite 12/2011d, PDF- dokumentti, hakupäivä 26.3.2013
<[http://www05.abb.com/global/scot/scot234.nsf/veritydisplay/822ae96e598fd891c125796f0032e75d/\\$file/Brochure_Synchronous_motors_9AKK105576_EN_122011_FINAL_LR.pdf](http://www05.abb.com/global/scot/scot234.nsf/veritydisplay/822ae96e598fd891c125796f0032e75d/$file/Brochure_Synchronous_motors_9AKK105576_EN_122011_FINAL_LR.pdf)>
- ABB Tasavirta/ DMI- moottoreiden tuoteluettelo 2011a, PDF- dokumentti, hakupäivä 5.2.2013
<[http://www05.abb.com/global/scot/scot234.nsf/veritydisplay/4a43defb2e83aea2c125784f00380340/\\$file/DC_motors_DMI_catalog_low%20res.pdf](http://www05.abb.com/global/scot/scot234.nsf/veritydisplay/4a43defb2e83aea2c125784f00380340/$file/DC_motors_DMI_catalog_low%20res.pdf)>
- ABB Tekninen opas 5, 2000, Laakerivirrat uusissa vaihtovirtakäytöissä, PDF- dokumentti, hakupäivä 8.2.2013
<[http://library.abb.com/global/scot/scot201.nsf/veritydisplay/4afd9ccb5eb991fc1256d280083a4d2/\\$File/Tekninenopasnro5.pdf](http://library.abb.com/global/scot/scot201.nsf/veritydisplay/4afd9ccb5eb991fc1256d280083a4d2/$File/Tekninenopasnro5.pdf)>
- ABB Tekninen opas 6, 2001, Vaihtovirtakäyttöjen yliaalto-opas, PDF- dokumentti, hakupäivä 8.2.2013
<[http://library.abb.com/global/scot/scot201.nsf/veritydisplay/9aaf3178627952c7c1256d2800411f8d/\\$File/Tekninen_opas_nro_6.pdf](http://library.abb.com/global/scot/scot201.nsf/veritydisplay/9aaf3178627952c7c1256d2800411f8d/$File/Tekninen_opas_nro_6.pdf)>
- ABB Tekninen opas 7, 2001, Sähkökäytön mitoitus, PDF- dokumentti, hakupäivä 8.2.2013
<[http://library.abb.com/global/scot/scot201.nsf/veritydisplay/b11dafa92973be93c1256d2800415027/\\$File/Tekninen_opasnro7.pdf](http://library.abb.com/global/scot/scot201.nsf/veritydisplay/b11dafa92973be93c1256d2800415027/$File/Tekninen_opasnro7.pdf)>
- ABB:n www-sivut 2013, hakupäivä 25.2.2013
<<http://www.abb.fi/product/seitp322/7aac0decac30c3d7c1257a02003ec6e0.aspx?productLanguage=fi&country=FI&tabKey=7>>
- Annala, Petri, työntekijä (värähtelymittaukset), Outokumpu Stainless Oy, haastattelu 28.2.2013
- Aura, Lauri & Tonteri, Antti J. 1996a. Sähkökoneet ja tehoelektroniikan perusteet. Porvoo: WSOY.
- Aura, Lauri & Tonteri, Antti J. 1996b. Teoreettinen sähkötekniikka. 2. uudistettu painos. Porvoo: WSOY.

- D&E Trading Oy www-sivut, hakupäivä 25.3.2013
<<http://www.detrading.fi/layers/index.php?id=215>>
- Edvard, Csanyi 2012, Tahtimoottorin rakenne, hakupäivä 7.2.2013 <<http://electrical-engineering-portal.com/synchronous-motor-construction>>
- Fläktwoods www-sivut, PDF- dokumentti hakupäivä 28.2.2013
<<http://www.flaktwoods.fi/184/4659/3/2f950ca9-9360-44eb-af6c-054c85411850>>
- Fyhr, Einari, kunnossapitoinsinööri, Outokumpu Stainless Oy, haastattelu 20.2.2013
- Goldberg, Lee H. 2012, Digikey, Energiaratkaisuja, hakupäivä 13.2.2013<<http://www.digikey.com/us/en/techzone/energy-harvesting/resources/articles/ev-drive-electronics-evolve.html>>
- Greencarcongress 2010, www-sivu, hakupäivä 22.2.2013<<http://www.greencarcongress.com/2010/06/evo-20100601.html>>
- Halttu, Timo 2011. TH2-servohydrauliikan kunnossapito. Opinnäytetyö. Kemi-Tornion Ammattikorkeakoulu, Kemi.
- Hietalahti, Lauri. 2011a. Muuntajat ja sähkökoneet. Tampere: Tammertekniikka.
- Hietalahti, Lauri. 2011b. Tehoelektroniikan perusteet. Tampere: Tammertekniikka.
- Hietalahti, Lauri. 2012. Säädetyt sähkömoottorikäytöt. Tampere: Tammertekniikka.
- Hedman, Antti 2009, ABB Oy, Taajuusmuuttajat, PDF- dokumentti, hakupäivä 18.2.2013 <<http://www.pkky.fi/Resource.phx/pkky/projektit/taitaja-osaaminen/sahko.htx.i2025.pdf>>
- Hämäläinen, Henry 2008. Virranahto ja jänniterasitukset taajuusmuuttajakäytöissä. Diplomityö. Lappeenrannan tekninen yliopisto, Lappeenranta.
- Iisakka, Juha, työnjohtaja, Outokumpu Stainless Oy, haastattelu 19.2.2013
- Kenjo, Takashi & Kikuch, Tatsuya 1997, Liukurengasroottori, hakupäivä 7.2.201 <<http://www.ewh.ieee.org/soc/es/Nov1997/09/INDEX.HTM>>
- Keskitalo, Arto, ABB Service, Laakerivirta tarkastukset. sähköpostiviesti arto.keskitalo@fi.abb.com 9.4.2013.
- Keskitalo, Arto 2013, ABB Service, Sähkökoneet, korjaamo ja kenttähuoltopalvelut, Esittelykalvot, PowerPoint-esitys.
- Korpinen, Leena. 1998a. Sähkövoimatekniikkaopus, osa 10/1. PDF- dokumentti, hakupäivä 5.2.2013
<http://www.leenakorpinen.fi/archive/svt_opus/10sahkokoneet_1osa.pdf>
- Korpinen, Leena. 1998b. Sähkövoimatekniikkaopus, osa 10/2. PDF- dokumentti, hakupäivä 25.3.2013
<http://www.leenakorpinen.fi/archive/svt_opus/10sahkokoneet_2osa.pdf>
- Kuti, Outokummun kunnossapidon tietojärjestelmä
- Matinlassi, Ilpo. Tandem valssaimen laitekoulutus, PowerPoint-esitys. Onet, Outokummun sisäinen intranet, hakupäivä 11.3.2013
- Matteini, Marco 2001. Control techniques for matrix converter adjustable speed drives, University of Bologna. PDF- dokumentti
<http://www.die.ing.unibo.it/dottorato_it/Matteini/Matteini_PhD_part2.pdf>
- Mechanical engineering-blogi, 2010, hakupäivä 6.2.2013
<<http://www.mechanicalengineeringblog.com/tag/squirrel-cage-induction-motor>>
- Mikkonen, Henry. 2009. Kuntoon perustuva kunnossapito. Helsinki: KP-Media Oy.
- Motiva 2011, Energiatehokkaat sähkömoottorit, PDF- dokumentti, hakupäivä 28.1.2012
<http://www.motiva.fi/files/5342/Energiatehokkaat_sahkomoottorit.pdf>
- Motorsystems www-sivut PDF- dokumentti, hakupäivä 6.2.2013<
<http://www.motorsystems.org/files/otherfiles/0000/0122/emsa_motor_basics.pdf>
- Onet, Outokummun sisäinen intranet, hakupäivä 6.3.2013
- Polka, Dave 2001, Elektronisten moottoriohjainten toiminta, Automatedbuildings www-sivut, hakupäivä 6.2.2013
<<http://www.automatedbuildings.com/news/jul01/art/abbd/abbd.htm>>

- Powermaxx www-sivut, hakupäivä 25.3.2013
<<http://www.powermaxx.org/industrial.htm>>
- PSK 5702, 2007, Kunnanvalvonnan värähtelymittaus. Mittauspisteen valinta ja tunnistaminen, PSK standardisointi, hakupäivä 31.3.2013 <www.psk-standardisointi.fi>
- PSK 5703, 2006, Kunnanvalvonnan värähtelymittaus. Anturin, liittimen ja kaapelin valinta sekä asennus, PSK standardisointi, hakupäivä 31.3.2013 <www.psk-standardisointi.fi>
- PSK 5705, 2006, Kunnanvalvonnan värähtelymittaus. Mittaustoiminnan suunnittelu, PSK standardisointi, hakupäivä 31.3.2013 <www.psk-standardisointi.fi>
- PSK 5706, 2002, Kunnanvalvonnan värähtelymittaus. Valvontamenetelmät, PSK standardisointi, hakupäivä 31.3.2013 <www.psk-standardisointi.fi>
- PSK 5707, 2011, Kunnanvalvonnan värähtelymittaus. Vianmääritys, PSK standardisointi, hakupäivä 31.3.2013 <www.psk-standardisointi.fi>
- PSK 7707, 2001, Kunnanvalvonnan sähköiset menetelmät. Pyörivät epätahtikoneet, staattorivirran symmetria- ja spektrimittaus, PSK standardisointi, hakupäivä 31.3.2013 <www.psk-standardisointi.fi>
- PSK 7708, 2004, Kunnanvalvonnan sähköiset menetelmät. Pyörivät epätahtikoneet, Akselijännitteen ja –virran mittaus, PSK standardisointi, hakupäivä 12.4.2013 <www.psk-standardisointi.fi>
- PSK 7711, 2001, Kunnanvalvonnan sähköiset menetelmät. Pyörivät epätahtikoneet, Liitinjännitteen mittaukset, PSK standardisointi, hakupäivä 31.3.2013 <www.psk-standardisointi.fi>
- SKF www-sivut, kuulalaakerit, hakupäivä 25.3.2013
<<http://www.skf.com/group/products/bearings-units-housings/ball-bearings/deep-groove-ball-bearings/single-row-deep-groove-ball-bearings/index.html>>
- Siemens AG, 1992. Sitor converter Cubicle/ Simovert D cycloconverter. Käyttöohje.
- Stjernberg, Timo 2000, Lämpökamera kunnossapidon työkaluna, Kunnossapitolehden liite, kunnossapitokoulu 4/2000 56, PDF- dokumentti, hakupäivä 22.2.2013
<http://www.promaint.net/alltypes.asp?menu_id=110>

LIITTEET

- LIITE 1 ABB:n oikosulkumoottoreiden laakerityypit
- LIITE 2 ABB:n prosessimoottoreiden L₁ ja L₁₀ voitelusuositukset
- LIITE 3 Värähtelymittausten suositellut toistovälit