



Osaamista
ja oivallusta
tulevaisuuden
tekemiseen

Kalle Kinnunen

Tahtikoneiden roottorien jälkikoneistusprosessin määrittäminen ja epätasapainoon vaikuttavat tekijät

Metropolia Ammattikorkeakoulu

Insinööri (AMK)

Konetekniikka

Insinöörityö

8.5.2020

Tekijä Otsikko	Kalle Kinnunen Tahtikoneiden roottorien jälkikoneistusprosessin määrittäminen ja epätasapainoon vaikuttavat tekijät
Sivumäärä Aika	63 sivua + 4 liitettä 8.5.2020
Tutkinto	Insinööri (AMK)
Tutkinto-ohjelma	Konetekniikka
Ammatillinen pääaine	Koneensuunnittelu
Ohjaajat	Yliopettaja Jyrki Kullaa Design Engineer Roope Aho
<p>ABB:n Pitäjänmäen konetehtaalla oli havaittu epätasapaino-ongelmia 710- ja 900-kokoluokan tahtikoneiden roottoreissa. Ongelmaa oli yritetty korjata jälkikoneistamalla roottorit napalevyypaketin ja akselin kutistusliitoksen jälkeen. Roottorien ominaisuuksista ei kuitenkaan ollut määritetty selkeitä kriteereitä jälkikoneistusprosessin suunnittelulle.</p> <p>Insinööriyön tavoitteena oli tutkia jälkikoneistettuja tähtinapaisia roottoreita ja selvittää roottorien rakenteelliset ominaisuudet, joiden perusteella jälkikoneistusprosessin tarpeellisuus voitaisiin määrittää. Insinööriyön toisena tavoitteena oli selvittää tähtinapaisten roottorien keskeisimpiä epätasapainoon vaikuttavia tekijöitä. Selvitystyössä tutkittiin roottorien rakennetta, ABB:n suunnitteluohjeistusta, alaan liittyvää kirjallisuutta sekä verrattiin roottorien rakenteellisia ominaisuuksia niiden tasapainotuksessa mitattuihin epätasapainoihin.</p> <p>Insinööriyössä vertailtiin jälkikoneistettujen ja jälkikoneistamattomien roottorien tasapainotusraporttien tuloksia toisiinsa. Tuloksena vertailussa oli, että jälkikoneistetut roottorit olivat ennen tasapainotusta keskimäärin suuremmassa epätasapainossa kuin jälkikoneistamattomat roottorit. Jälkikoneistettuja roottoreita oli tehty suhteellisesti paljon vähemmän kuin jälkikoneistamattomia roottoreita, joten jälkikoneistettuja roottoreita oli vertailussa vähemmän. Jälkikoneistettujen roottorien pieni otanta aiheutti vertailuun epävarmuutta.</p> <p>Insinööriyön toisena tavoitteena oli selvittää tähtinapaisten roottorien keskeisimpiä epätasapainoon vaikuttavia tekijöitä. Selkeimmäksi epätasapainoa aiheuttavaksi tekijäksi huomattiin laakeriväli. Selvitystyössä löydettiin yhteys suurien epätasapainojen ja tasapainotustasoilta mitattujen epätasapainojen kulma-asemien välillä. Yhteyden tulkittiin johtuvan roottorien kutistusliitoksen aiheuttamista muodonmuutoksista. Muodonmuutosten yhteys epätasapainoihin pitää tulevaisuudessa varmistaa käytännön mittauksilla.</p> <p>Insinööriyön alussa jälkikoneistusprosessin oletettiin vähentävän roottorien epätasapainoa. Oletus osoittautui vääräksi insinööriyön edetessä. Roottoreissa havaitut epätasapaino-ongelmien todettiin insinööriyön aikana tehdyn selvitystyön pohjalta johtuvan nykyisestä jälkikoneistusprosessista. Tuotannon epätasapaino-ongelmien huomattiin alkaneen suunnilleen samaan aikaan kuin jälkikoneistusprosessi otettiin käyttöön. Jälkikoneistusprosessin aiheuttamien suurempien epätasapainojen todettiin johtuvan sen heikosta valmisteknisestä soveltuvuudesta epätasapainojen vähentämiseen. Työssä esiteltiin mahdollisia ratkaisuja jälkikoneistusprosessin kehittämiseen. Insinööriyön pohjalta suositeltiin nykyisen jälkikoneistusprosessin käytön lopettamista.</p>	
Avainsanat	Tahtikone, sähkömoottori, generaattori, roottori, epätasapaino, koneistus

Author	Kalle Kinnunen
Title	Defining the Post-Machining Process of Synchronous Machine Rotors and Factors Affecting Rotor Unbalance
Number of Pages	63 pages + 4 appendices
Date	8 May 2020
Degree	Bachelor of Engineering
Degree Programme	Mechanical Engineering
Professional Major	Machine Design
Instructors	Jyrki Kullaa, Principal Lecturer Roope Aho, Design Engineer
<p>At the ABB Pitäjänmäki factory unbalance problems have emerged in 710 and 900 size synchronous machine rotors. An attempt to correct the problem has been made by post-machining the rotors after shrink fitting the star-pole rotor core to the rotor shaft. However, no satisfactory design criteria for post-machining process had been defined from rotor properties.</p> <p>The goal of the Bachelor's thesis was to study post-machined star-pole rotors and to determine the structural properties, from which the necessity of the post-machining process could be determined. The second goal was to find out the main factors influencing the unbalance of star-pole rotors. To reach the given goals, this thesis examined the structure of the rotors, ABB's design guidelines, the relevant literature, and compared various rotor properties with the unbalances measured during the rotor balancing.</p> <p>The balancing results of the post-machined rotors were compared to the balancing results of the non-post-machined rotors. The result of the comparison showed that before balancing the post-machined rotors were, on average, more unbalanced than the non-post-machined rotors. The post-machining process was relatively new, so post-machined rotors had been manufactured a relatively lower quantity than to non-post-machined rotors. The small sample size of the post-machined rotors caused minor uncertainty in the comparison.</p> <p>In addition, the objective was to find out the main factors influencing the imbalance of star-pole rotors. The most significant cause of the rotor unbalance was the rotor's bearing distance. During the thesis, a correlation was found with the angular positions of large unbalances and unbalances measured from correction planes during balancing. It was interpreted to be due to deformations caused by the shrink fit to the rotors. The correlation between rotor deformations and unbalances must be ensured in the future with measurements.</p> <p>At first, the post-machining process was assumed to reduce the rotor unbalance. The hypothesis, however, turned out to be wrong as the thesis progressed. It was deduced that the large unbalances in the rotors were caused by the post-machining process. Production unbalance problems had started approximately at the same time as the implementation of the post-machining process had begun. The large imbalances caused by the post-machining process were interpreted to be because of the manufacturing problems during machining. As a result of the thesis it was recommended to stop the post-machining of star-poled rotors.</p>	
Keywords	Synchronous machine, Motor, Generator, Rotor, Unbalance, Machining

Sisällys

Symbolit

Määritelmät

1	Johdanto	1
1.1	Insinööriyön taustaa	1
1.2	Insinööriyön tavoitteet	2
1.3	Yritysesittely ABB Oy, Motors and Generators	2
2	Sähkökoneet	3
2.1	Sähkökoneiden yleinen toimintaperiaate	3
2.2	Tahtikoneiden pääosat	4
2.3	Roottori ja sen naparakenne	5
3	Lähtötilanne ja selvitystyö	8
3.1	Lähtötilanne	8
3.2	Roottorin napalevy paketti	9
3.2.1	Kutistusliitos	9
3.2.2	Vaimennuskäämitys	16
3.3	Roottorien tasapainotus	18
3.3.1	Roottorin tasapainotuksen suunnittelu	18
3.3.2	Tasapainotus tahtikoneiden kokoonpanossa	20
3.3.3	Ongelmat tähtinapaisten roottorien tasapainotuksessa	21
3.4	Jälkikoneistusprosessi	24
3.4.1	Jälkikoneistusprosessin historia	25
3.4.2	Jälkikoneistuksen suunnitteluohjeistus	27
3.5	Roottorirakenteiden vertailu	28
3.5.1	Roottorien vertailukriteerit ja -menetelmät	28
3.5.2	Jälkikoneistettujen roottorien vertailu	29
3.5.3	Jälkikoneistamattomien roottorien vertailu	33

3.6	Jatkoselvitys jälkikoneistusprosessista	43
3.6.1	Roottorien epätasapaino-ongelmat ja alihankinta	43
3.6.2	Pyörrevirta-anturien mittapintojen jälkikoneistus	44
3.6.3	Jälkikoneistusprosessin kehittäminen	45
4	Johtopäätökset ja suositukset	50
4.1	Johtopäätökset	50
4.1.1	Jälkikoneistusprosessi	51
4.1.2	Roottorien epätasapainoon vaikuttavat tekijät	52
4.2	Roottorien vertailun luotettavuusarviointi	57
5	Yhteenveto	58
	Lähteet	60
	Liitteet	
	Liite 1. Tasapainotuspiirustus	
	Liite 2. Tasapainotusraportti	
	Liite 3. Taulukoita	
	Liite 4. Havainnekuva pystysorvista	

Symbolit

f	Sähkövirran taajuus	$[Hz]$
G	Tasapainotusluokka	$\left[\frac{mm}{s}\right]$
m	Massa	$[kg]$
n	Kierrosnopeus	$\left[\frac{1}{s}\right]$
P	Sähkökoneen napaparien lukumäärä	
U_{me}	Mitattu alkuepätasapaino	$[kgmm]$
U_{per}	Sallittu jäännösepätasapaino	$[kgmm]$
U_{rm}	Sallittu kokonaisjäännösepätasapaino	$[kgmm]$
ΔU	Kokonaisjäännösepätasapainon laskemiseen käytetty vähennystoleranssi	
ω	Kulmanopeus	$\left[\frac{1}{s}\right]$

Määritelmät

Alkuepätasapaino	Epätasapaino ennen tasapainotusta
Jäännösepätasapaino	Epätasapaino tasapainotuksen jälkeen

1 Johdanto

Epätasapainoa ilmenee lähes kaikissa pyörivissä koneenosissa, ja sitä voidaan pitää yhtenä merkittävimmistä värähtelyjen aiheuttajista koneenrakennuksessa. Epätasapainolla tarkoitetaan massakeskipisteen poikkeamista pyörimisakselilta, ja se johtuu usein koneenosan geometrisistä ominaisuuksista tai valmistusepätarkeyksien summautumisesta. Pyörivää konetta käytettäessä poikkeama massakeskipisteen ja pyörimisakselin välillä aiheuttaa keskipakovoiman, joka toimii herätteenä haitallisille värähtelyille. Epätasapainon vähentämiseksi pyöriviä koneenosia tasapainotetaan lisäämällä tai poistamalla osasta massaa.

Pyörivissä sähkökoneissa epätasapainon aiheuttamat värähtelyt ovat ongelma, joka korostuu varsinkin korkealla ja laajalla kierrosnopeusalueella toimivissa koneissa. Värähtelyt lisäävät meluhaittaa sekä ennenaikaisista kulumista ja pahimmillaan voivat aiheuttaa vaurioita sähkökoneen rakenteisiin. Värähtelyongelmat luovat myös imagohaittaa. Melu ja korkea ääriä käytön aikana eivät luo mielikuvaa laadukkaasta sähkökoneesta.

1.1 Insinööriyön taustaa

ABB:n Tahtikoneet-yksikössä on ollut ongelmia sähkökoneiden roottorien suurissa jännösepätasapainoissa. Epätasapaino-ongelmia ilmenee ainoastaan tähtinapaisissa roottoreissa, joita käytetään akselikorkeuden mukaan luokiteltuna pienimmässä, akselikorkeudeltaan 710 mm ja 900 mm kokoluokan tahtikoneissa. Epätasapainon on oletettu syntyvän, kun akseli ja roottori liitetään toisiinsa lämpötilaerojen avulla tehtävällä kutistusliitoksella. Ongelmaa on yritetty korjata jättämällä roottorin akselille työvaraa ennen kutistusliitosta ja jälkikoneistamalla roottorin tarkat pinnat kutistusliitoksen jälkeen. Jälkikoneistusprosessin suunnittelulle ei kuitenkaan ole selkeää määrittelyä.

Suuret epätasapainot ovat hidastaneet ja vaikeuttaneet roottorien tasapainotusta sekä aiheuttaneet värähtelyjä sähkökoneen kokoonpanon jälkeisessä loppukoestuksessa. Värähtelyt loppukoestuksissa ovat ajoittain aiheuttaneet myöhästymiä, kun koneita on jouduttu purkamaan ja roottoreita tasapainottamaan uudestaan loppukoestusalueella.

1.2 Insinööriyön tavoitteet

Insinööriyön tavoitteena on tutkia jälkikoneistettuja tähtinapaisia roottoreita ja selvittää niiden rakenteelliset ominaisuudet, joista jälkikoneistuksen tarve voidaan määrittää. Tällä hetkellä suunnitteluosastolla ei ole yhtenäisiä ja selkeitä kriteerejä jälkikoneistusprosessille. Työn toisena tavoitteena on selvittää muita suuriin alkuepätasapainoihin vaikuttavia tekijöitä roottorin rakenteessa ja kokoonpanon työvaiheissa. Työn lopputuloksena suunnitteluosastolla olisi selkeät kriteerit jälkikoneistusprosessin suunnittelulle ja roottorien suuriin alkuepätasapainoihin vaikuttavia tekijöitä olisi saatu selvitettyä.

1.3 Yritysesittely ABB Oy, Motors and Generators

ABB on sähkövoima- ja automaatiotekniikkaan keskittyvä teknologiakonserni. ABB työllistää maailmanlaajuisesti 147 000 henkilöä, ja konsernin liikevaihto on yli 25 miljardia euroa. Insinööriyö tehdään ABB:n Motors and Generators -linjalla Suomessa sijaitsevalle Tahtikoneet -yksikölle. Motors and Generators kokonaisuudessaan työllistää 13 000 henkeä 31 eri tehtaassa, joista Pitäjänmäen tehtaalla on töissä noin 900 henkilöä. Linjan liikevaihto vuonna 2018 oli 300 miljoonaa euroa. (ABB 2020c.)

2 Sähkökoneet

Työssä termillä ”sähkökone” tarkoitetaan moottoria tai generaattoria, ottamatta kantaa kumpi se tarkalleen on. Tässä luvussa kuvataan sähkökoneiden, erityisesti tahtikoneiden toimintaa ja rakennetta. Osiossa 2.1 avataan sähkökoneiden toimintaa ja osiossa 2.2 tahtikoneen rakennetta pääosien tarkkuudella. Kappaleen lopussa käydään läpi roottoria ja sen naparakennetta.

2.1 Sähkökoneiden yleinen toimintaperiaate

Sähkökoneiden tarkoituksena on muuttaa sähkömagnetismin avulla energiaa muodosta toiseen. Generaattoreilla voidaan muuttaa mekaanista energiaa sähköenergiaksi ja moottoreilla sähköenergiaa mekaaniseksi energiaksi. Teoriassa rakenteellisesti samaa sähkökonetta voidaan käyttää moottorina tai generaattorina (Luomi 1995). Sähkökoneet voidaan karkeasti luokitella kolmeen pääluokkaan, jotka ovat epätahtikone, tahtikone ja tasavirtakone. Epätahtikoneita kutsutaan myös induktiokoneiksi. Tässä insinööriyössä keskitytään tahtikoneisiin.

ABB:n Pitäjänmäen tehtaalla valmistetaan tahtikoneita ja epätahtikoneita. Koneet eroavat peruseriaatteeltaan siinä, pyöriikö koneen roottori samalla vai eri kierrosnopeudella kuin staattorin magneettikenttä. Tahtikoneissa roottori pyörii staattorin magneettikentän kanssa samaa nopeutta. Tahtimoottorin kierrosnopeus voidaan laskea yhtälöstä 1. (Beaty & Kirtley 1998: 7.)

$$n = \frac{f}{P} \tag{1}$$

n on roottorin kierrosnopeus $\left[\frac{1}{s}\right]$

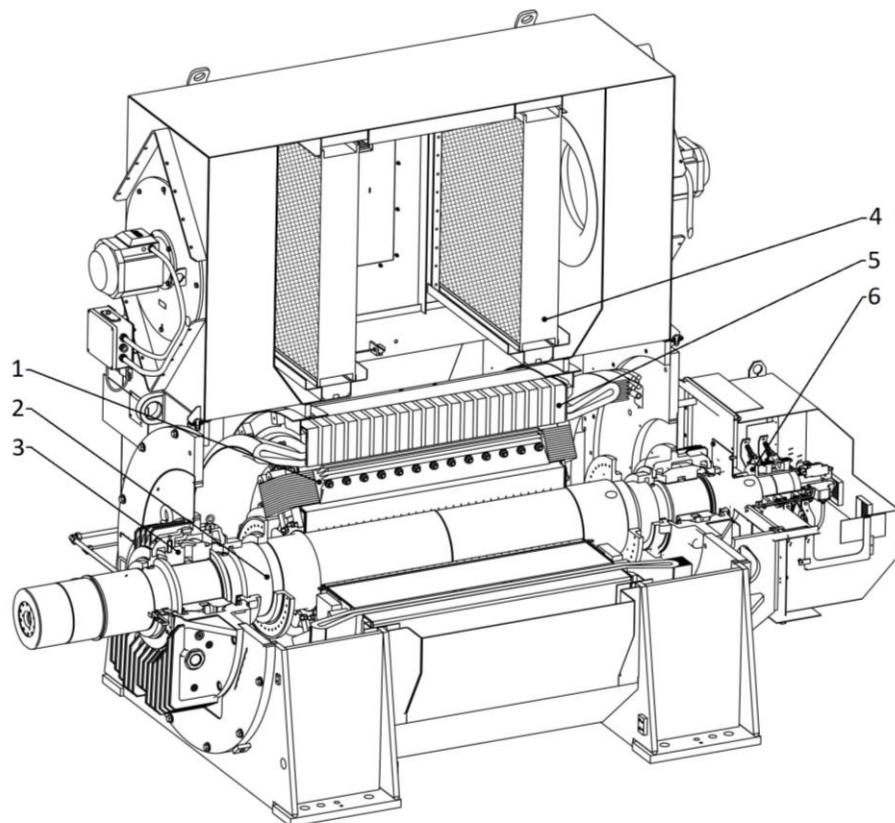
f on staattoriin syötetyn sähkövirran taajuus [Hz]

P on koneen napaparien lukumäärä

2.2 Tahtikoneiden pääosat

Tahtikoneiden, kuten sähkökoneiden yleensäkin tärkeimmät pääosat ovat roottori ja staattori. Staattori on sylinterimäinen usein koneen runkoon kiinnitetty osa, jossa on kolmivaihekäämitys. Sähkökonetta käytettäessä moottorina staattorin käämitykseen on johdettu sähkövirta ja käytettäessä generaattorina roottorin magneettikenttä indusoi käämitykseen sähkövirran. Roottori on staattorin sisällä pyörivä akseli, jossa on joko sähkötai kestmagneetteja. Koneen toimiessa moottorina, staattoriin johdetun sähkövirran aiheuttama magneettikenttä pyörittää roottoria. Generaattorikäytössä roottoria pyöritetään ulkoisella voimalla ja roottorin pyörivä magneettikenttä indusoi staattorin käämitykseen sähkövirran.

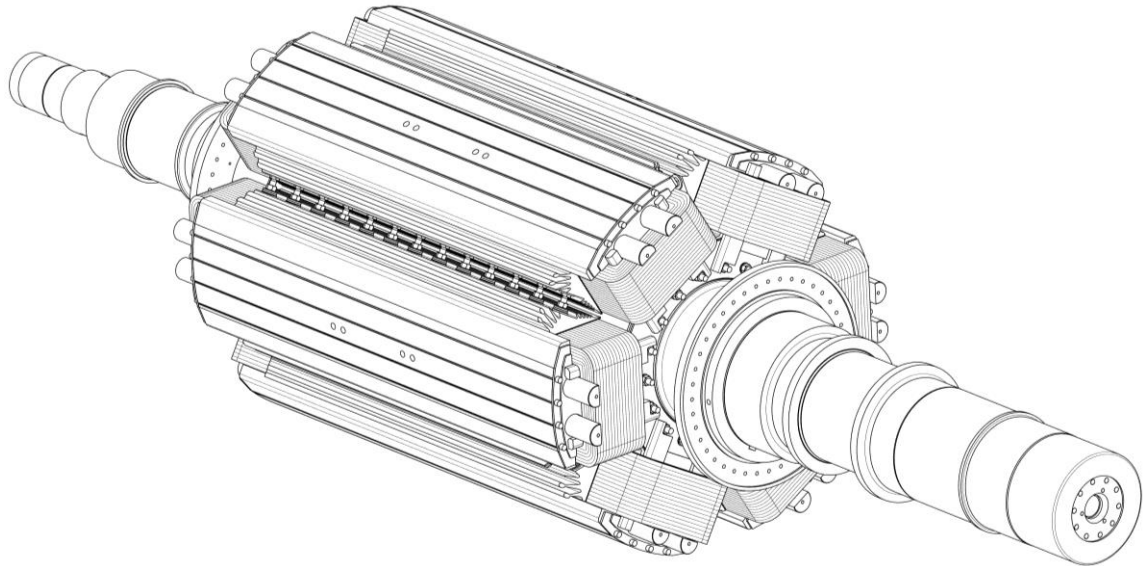
Roottori laakeroidaan tahtikoneissa liukulaakereilla. Pienemmissä koneissa laakerit kiinnitetään koneen päädystä oleviin laakerikilpiin. Suuremmissa koneissa laakerit asennetaan erillisille laakeripukeille, jotka kiinnitetään koneen pätyihin. Tärkeimpiin pääosiin kuuluvat myös lämmönvaihdin ja kytkentäkotelo. (Kuva 1.)



Kuva 1. Tahtikoneen pääosat. 1. roottorin magneettinavat, 2. roottorin akseli, 3. Liukulaakeri ja laakerikilpi, 4. lämmönvaihdin, 5. staattori, 6. liukurenkaisto.

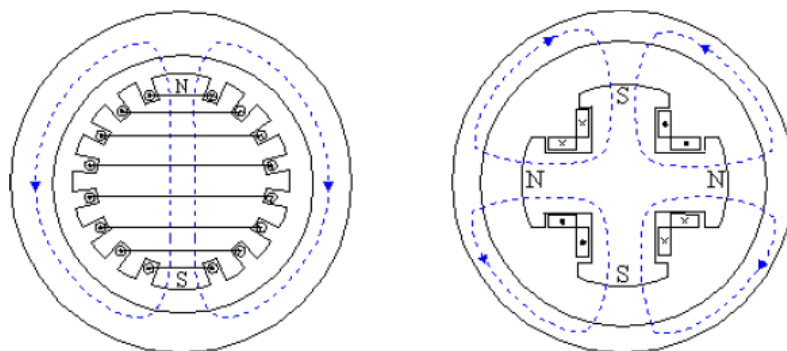
2.3 Roottori ja sen naparakenne

Tahtikoneiden roottorit voidaan luokitella umpinapaisiin tai avonapaisiin. Roottorin napojen tehtävänä on muodostaa roottoriin magneettikenttä, joka reagoi staattorin käämitysten kanssa. Napa voi olla sähkö- tai kestmagnetoitu. Työssä käsiteltävät roottorit ovat sähkömagnetoituja avonaparootteita (kuva 2).



Kuva 2. Tahtikoneen avonapainen roottori, jossa on kuusi sähkömagnetoitua napaa.

Sähkömagnetoitun roottorin napa koostuu kahdesta osasta, jotka ovat napakäämitys ja napasydän. Napakäämitys on käämi, jolla muodostetaan navan magneettikenttä. Napasydän on osa, joka magnetoituu käämityksen muodostamasta magneettikentästä. Umpinapaisessa roottorissa käämitykset ovat roottorin ulkopinnalla olevissa urissa ja roottorin akseli toimii napasydämenä. Avonapaisessa roottorissa käämitys kierretään erillisten avonaisten napasydämien päälle. (Kuva 3.) (Boldea 2015: 7.)

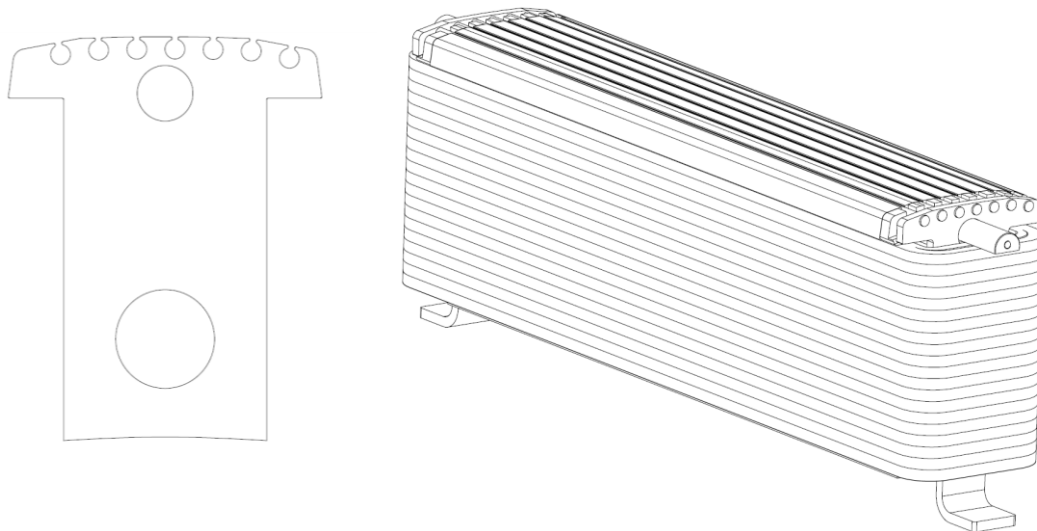


Kuva 3. Umpinapainen (vasemmalla) ja avonapainen roottori. Kuvaan on piirretty katkoviivoilla napojen läpi kulkevat magneettivuot (Shibutani 2004).

Tyypillisessä avonapaisessa roottorissa napasydän on tehty 0,5–4 mm paksuisista napalevyistä, jotka ladotaan napalevypaketiksi. Levyistä ladotussa navassa on pienemmät pyörrevirtahäviöt verrattuna yhdestä osasta valmistettuun massiivirautaiseen napaan (Pyrhönen 2008b: 34). Ladottu levypaketti lukitaan työntämällä paketin läpi tukitankoja, jotka hitsataan levypaketin päistä. Napasydämen ympärille käämitään napakäämi. Napakäämi voidaan valmistaa käämimällä pinnoitettua kuparilankaa käämintäkoneella suoraan napasydämen ympärille tai kovajuottamalla lattakuparista napasydämen ulkomittojen mukainen nouseva spiraali. Navat voidaan valmistaa irtonaparakenteena tai tähti-naparakenteena. (ABB 2020a.)

Irtonaparakenne

Irtonaparakenteisessa roottorissa navat ladotaan ja käämitään erillisinä kokonaisuuksina (kuva 4). Irtonapaisissa roottoreissa käytetään akselia, jossa on napa-alueella suuri halkaisija. Navat asennetaan akselille pulttaamalla tai lohenpyrstöuralla. Navat voidaan pulkata napalevyjen yläpuolelta tai akselin puolelta riippuen roottorin akselin rakenteesta. Lohenpyrstöuria käytettäessä navat työnnetään akseliin koneistettuihin uriin ja lukitaan kiiloilla urien seiniä vasten. (ABB 2018c.)

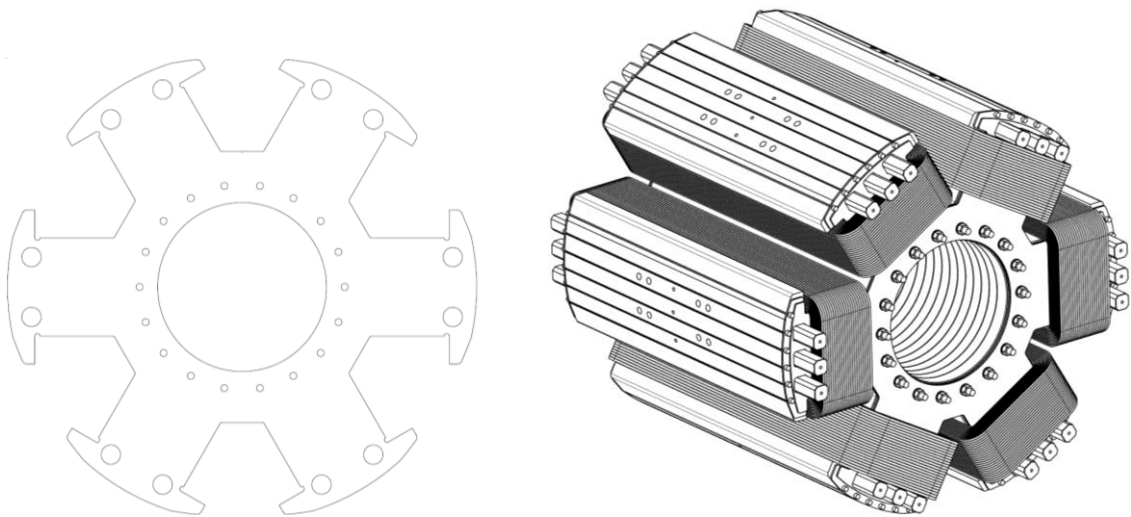


Kuva 4. Napalevy ja navan alapuolelta pultattava lankakuparista käämitty irtonapa. Napasydämen leveämpää yläosaa kutsutaan napakengäksi.

Tähtinaparakenne

Tähtinaparakennetta käytetään pienissä 4- ja 6-napaisissa koneissa, joissa akselikorkeus on 710 mm tai 900 mm. Näissä koneissa on usein korkea nimelliskierrosnopeus. Napalevyjen tähtimäisen muodon takia naparakenteelle muodostunut nimeksi tähtinaparakenne ja roottorille tähtiroottori. Virallisempi nimitys tähtinaparakenteelle on integroitu naparakenne.

Tähtinaparakenteessa kaikki roottorin napasydämet on leikattu yhteen levyyn (kuva 5). Yhtenäinen rakenne on mekaanisesti kestävämpi ja sähköisiltä ominaisuuksiltaan parempi verrattuna irtonaparakenteeseen. Irtonaparakenteessa kiinnityspultit aiheuttavat magneettisia epäjatkuvuuskohtia ja ovat mekaanisesti heikompia keskipakoisvoimia vastaan. Napalevyypaketti ja akseli liitetään toisiinsa lämpötilaeroihin perustuvalla kutistusliitoksella, joten tähtinaparakenteella voidaan käyttää akselia, jossa napa-alueen halkaisija on pienempi. (ABB 2019a.) Pienempi akselin halkaisija alentaa valmistuskustannuksia (Silander 2001). Roottorien akselit koneistetaan taotusta aihioista, joiden materiaalina on rakenneteräs tai nuorrutusteräs.



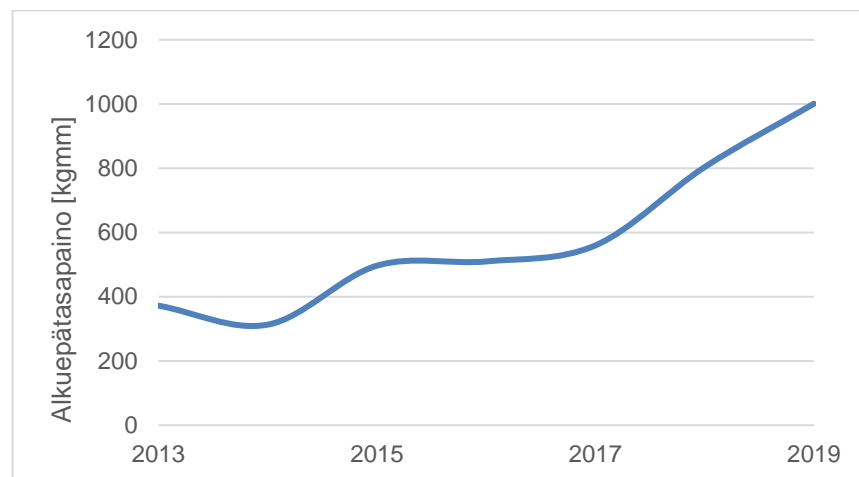
Kuva 5. Tähtinapalevy ja käämitty tähtinapalevyypaketti.

3 Lähtötilanne ja selvitystyö

Tässä kappaleessa käydään läpi insinööriyön lähtötilannetta ja selvitystyötä. Kappaleessa 3.1 esitetään työn lähtötilanne. Kappaleissa 3.2 ja 3.3 käydään läpi tähtinapaisten roottorin rakennetta ja tasapainotusta. Samalla kuvataan edellä mainituista mahdollisia roottorin epätasapainon aiheuttajia. Kappaleessa 3.4 kerrotaan jälkikoneistusprosessista ja siihen liittyvästä selvitystyöstä. Kappaleessa 3.5 vertaillaan tähtinapaisten roottorien rakenteellisia ominaisuuksia alkuepätasapainoon ja irtonaparakenteisiin roottoreihin. Luvun lopussa avataan selvitystyötä, joka tehtiin roottorien vertailun tulosten pohjalta.

3.1 Lähtötilanne

ABB:n kokoluokan 710–900 tahtikoneissa on aiheutunut ongelmia tähtinapaisten roottorien suurien jäännösepätasapainojen takia. Epätasapaino on aiheuttanut värähtelyjä roottoreissa tasapainotuksen ja loppukoestuksen yhteydessä, mikä on johtanut kustannuksiin kasvaneen työvaihekohtaisen työajan ja myöhästymän muodossa. Ongelmat ovat ilmenneet muutaman viime vuoden aikana, mikä näkyy selvästi roottorien keskimääräisen epätasapainon kasvuna (kuva 6).



Kuva 6. Tähtinapaisten roottorien keskimääräinen alkuepätasapaino vuosina 2013–2019.

Ongelman juurisyys on oletettu, että roottoriin muodostuu epätasapainoa kutistusliitoksen yhteydessä. Tämän korjaamiseksi on suunnitteluosastolla päätetty ottaa käyttöön jälkikoneistusprosessi. Jälkikoneistusprosessissa roottorin akselin tarkkoihin pintoihin jätetään työvaraa ennen kutistusliitosta ja työvaralliset pinnat koneistetaan kutistusliitoksen jälkeen. Työvara on suurempi kuin mahdolliset kutistusliitoksen aiheuttamat muodonmuutokset. Jälkikoneistusprosessin suunnittelulle ei kuitenkaan ole määritetty selkeitä kriteereitä. Jälkikoneistukseen viittaavat suunnitteluohjeet ovat puutteelliset, joten jälkikoneistuksia on tehty ilman johdonmukaista ohjeistusta, usein suunnittelijan oman harkinnan mukaan.

Työn tavoitteena on määrittää kriteerit, millaisille roottoreille jälkikoneistuksia kannattaa suunnitella. Toisena tavoitteena on selvittää roottorin rakenteesta ja työvaiheesta mahdollisia epätasapainoa aiheuttavia tekijöitä.

3.2 Roottorin napalevypaketti

Roottorin napalevypaketin rakennetta tutkittiin ja pyrittiin löytämään mahdollisia osia, työvaiheita tai ilmiöitä, jotka voisivat aiheuttaa roottoriin merkittävää epätasapainoa.

3.2.1 Kutistusliitos

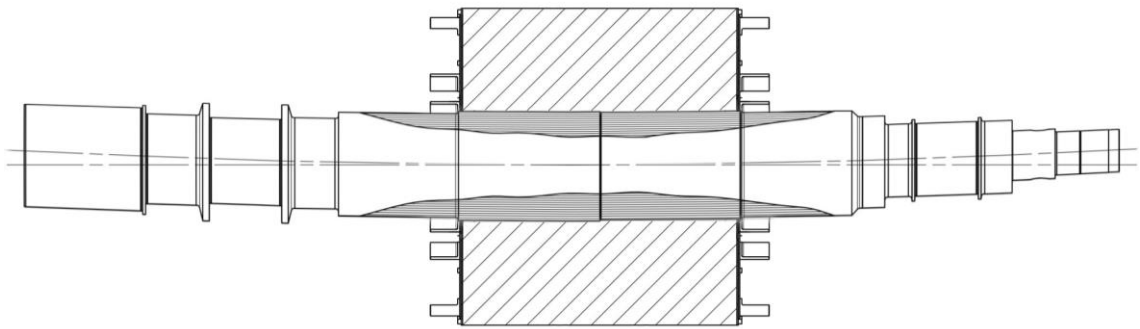
Napalevypaketti ja akseli liitetään yhteen kutistusliitoksella. Se perustuu akselin ja napalevypaketin lämpötilaeroon, joka lasketaan suunnitteluohjeistossa olevalla Excel-laskurilla. Napalevypakettia lämmitetään ja tarpeen vaatiessa akselia jäähdytetään. Liitos tehdään akselin ja napalevypaketin ollessa pystysuunnassa. Kutistusliitoksen aikana roottorin akseliin ja napalevypakettiin muodostuu sisäisiä jännityksiä, jotka saattavat aiheuttaa akseliin pysyviä muodonmuutoksia kuten taipumaa (Toten 2007: 330).

Kutistusliitoksen aiheuttamat muodonmuutokset

Kutistusliitoksen aiheuttamat muodonmuutokset perustuvat akselin pinnan ja keskiosan lämpötilaeroihin kutistusliitoksen aikana. Lämmitetystä napalevypaketista johtuu lämpöä akselin pinnalle, jolloin akselin pinta ja pintakerrokset alkavat laajentua lämpötilan

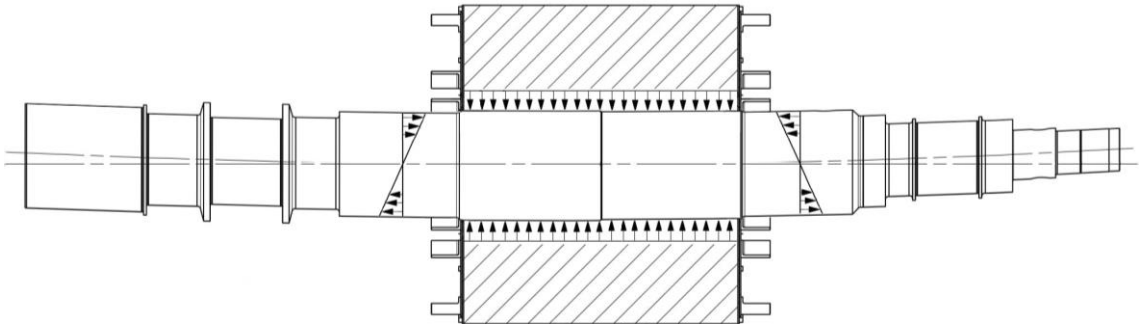
vaikutuksesta. Akselit ovat paksuja, joten akselin keskiosa lämpenee hitaasti. Akselin pintakerros aiheuttaa lämpölaajentuessaan akseliin jännitystilän. (Kula, E. & Weiss, V. 1982: 20.) Seuraavana esitetään kaksi mahdollista teoriaa, kuinka kutistusliitos saattaa aiheuttaa akseliin pysyviä muodonmuutoksia.

Ensimmäinen teoria on, että napalevypaketin aiheuttama puristusjännitys kutistusliitoksen jäähtyessä saattaa tehdä akselin tilapäisistä muodonmuutoksista pysyviä. Akselin lämmenneen pintakerroksen lämpölaajeneminen voi aiheuttaa suurempia jännityksiä kuin viileämpi keskiosa pystyy vastustamaan, jolloin akseliin voi tulla muodonmuutoksia (kuva 7). Jos jännitykset eivät ylitä myötörajaa, muodonmuutokset ovat palautuvia.



Kuva 7. Havainnekuva akselin muodonmuutoksista kutistusliitoksen aikana. Tummenneulla alueella on havainnollistettu napalevystä akseliin johtuvaa lämpöä.

Napalevypaketin jäähtyessä se puristuu lämmenneelle akselille. Napalevypaketin puristuessa akseliin, akselissa voi olla vielä lämpötilaerojen aiheuttamia muodonmuutoksia. Napalevypaketin aiheuttama puristusjännitys voi mahdollisesti estää akselin muodonmuutosten palautumisen, vaikka akseli jäähtyisi (kuva 8). Toisin sanoen napalevypaketin puristusjännitys voi olla tarpeeksi suuri lukitakseen lämpötilaerojen aiheuttamat muodonmuutokset pysyviksi. Kyseisessä tilanteessa akseliin jäisi sisäinen jännitystila, joka pyrkisi suoristamaan akselia. Akseli todennäköisesti palautuisi alkuperäiseen muotoonsa, jos kutistusliitos irrotettaisiin.



Kuva 8. Havainnekuva roottorista, jossa napalevypaketin puristusjännitys on lukinnut akselin taipuneeseen tilaan. Kuvassa on havainnollistettu kutistusliitoksen ja taipuman aiheuttamia normaalijännityksiä.

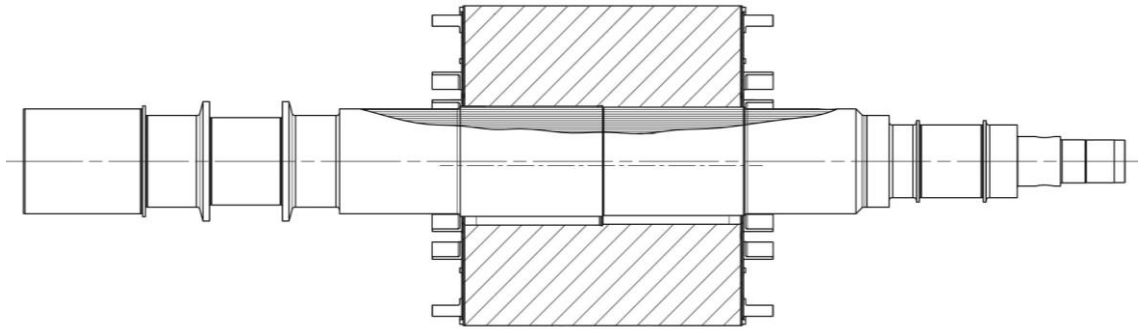
Toinen teoria miten kutistusliitos voi aiheuttaa muodonmuutoksia on akselin myötäminen lämpölaajenemisen aiheuttamista jännityksistä. Akselin pintakerroksen laajentuessa akselin viileämpi keskiosa pyrkii vastustamaan pinnan lämpölaajenemisesta, aiheuttaen akseliin sisäisen jännitystilän. Jos akselin pinnan lämpölaajenemisesta aiheutuvat jännitykset ovat paikoitellen suurempia kuin myötöraja, voi akseli myötää. Myötörajan ylittyessä akseliin voi aiheutua pysyviä muodonmuutoksia. Myötörajan ylittyminen lämpölaajenemisen aiheuttamien jännitysten seurauksena on epätodennäköinen teoria muodonmuutosten syntymiseen, koska akselit ovat suurikokoisia ja kutistusliitoksessa käytettävät lämpötilaerot ovat suhteellisen matalia. Kutistusliitoksen lämpötilaero on usein välillä 160–230 °C:ta.

Kutusliitoksen aiheuttavat muodonmuutokset johtuvat todennäköisesti toisesta tai molemmista edellä mainituista tekijöistä. Muodonmuutosten voimakkuuteen vaikuttaa myös akselin materiaali. Materiaalin lujuusominaisuudet ja lämpölaajenemiskerroin ovat merkityksellisiä materiaalivakioita muodonmuutosten näkökulmasta.

Seuraavana käsitellään kutistusliitoksen epäkeskeistä asennusta ja akselin valmistuksessa muodostuvia sisäisiä jännityksiä, mitkä voivat myös vaikuttaa muodonmuutoksiin.

Kutusliitoksen asennuksen aikana napalevypaketti on pystysunnassa ja akseli lasketaan napalevypaketin reikään. Kutusliitospinnoilla on molemmissa osissa olakkeet, joiden varaan akseli lasketaan. Tavoitteena on saada akseli laskettua keskelle napalevypakettia. Jos napalevypaketin liitospinta ei ole täysin linjassa akselin kanssa, voi akselin kutusliitospinta ottaa epätasaisesti kiinni napalevypakettiin. Kyseisessä tilanteessa

akseli alkaa lämpenemään ensimmäisestä kohdasta, joka osuu lämmitettyyn napalevypakettiin. Epätasainen lämpeneminen voi aiheuttaa akseliin sisäisiä jännityksiä ja muodonmuutoksia, kun akseli lämpölaajenee epätasaisesti. (Kuva 9.)



Kuva 9. Leikkauskuva epäkeskeisesti asennetusta kutistusliitoksesta. Lyhyempi keskiviivoista on napalevypaketin keskiviiva. Tummennetulla alueella on havainnollistettu akselin epäkeskeistä lämpenemistä kohdasta, joka osuu ensin lämmitettyyn napalevypakettiin. Kuvassa kutistusliitospintojen välystä on suurennettu merkittävästi havainnollisuudet tarkia. Napalevypaketin liitospinnan halkaisija on todellisuudessa lämmitettynä noin 0,1 mm suurempi kuin akselin liitospinnan halkaisija.

Myös roottorin akselin valmistusprosessista aiheutuneet sisäiset jännitykset voivat edesauttaa muodonmuutoksien syntymistä. Akselin aihio on valmistettu takomalla. Takominen aiheuttaa usein epätasaisia plastisia muodonmuutoksia taottavan kappaleen rakenteeseen. Nämä voivat aiheuttaa taottuun kappaleeseen sisäisiä jännityksiä. (Howes ym. 2002: 13.) Akselitakeet jännityksenpoistohehikutetaan koneistuksen yhteydessä, mutta hehikutuksesta huolimatta akseleihin saattaa jäädä jännityksiä. Ne voivat kumota tai vahvistaa lämpölaajenemisen aiheuttamia jännityksiä. Sisäisten jännitysten summautuminen lämpölaajenemisen aiheuttamiin jännityksiin voi altistaa akselin esimerkiksi taipumaan tiettyyn suuntaan kutistusliitoksen yhteydessä.

Kutistusliitoksen lämpötilaerot

6-napaisten moottorien levypaketit käämitään ja eristetään ennen kutistusliitosta, koska roottorit ovat kooltaan niin isoja, etteivät ne mahdu käämityskoneeseen akselin asentamisen jälkeen. Käämejä ja eristeitä saa ei kuumentaa yli 160 °C:n lämpötilaan, koska korkeat lämpötilat aiheuttavat niiden ennenaikaista vanhenemista. Liitoksen lämpötilaeron kasvaessa joudutaan jäähdyttämään akselia, jotta haluttu lämpötilaero saavutetaan. 6-napaisten roottorien kutistusliitos tehdään ABB:n Pitäjänmäen konetehtaalla. (ABB 2019a.)

4-napaisten roottorien levypaketit mahtuvat käämityskoneeseen kutistusliitoksen jälkeen, joten käämitys ja eristeet eivät rajoita lämpötiloja. Levypakettia voidaan kuumentaa noin 350 °C:n asti. 4-napaisten roottorien kutistusliitos tehdään alihankintana. (ABB 2019a.)

Kutistusliitoksen jäähtyminen ja roottorien jälkilämmitys

Kutistusliitoksen asennusohjeessa (ABB 2018a: 4–7) ohjeistetaan antamaan liitoksen jälkeisten lämpötilaerojen tasaantua huoneenlämpötilassa. Eräästä induktiokoneen roottorista on tehty ”case study” (Patwardhan ym. 2013), jossa kokeiltiin jäähdyttää roottoria hallitusti. Kokeessa roottori lepäsi pystyasennossa ja lämpötilaeroja jäähdytettiin puhaltamalla ilmaa roottorin napalevypaketin yläosaan (kuva 10). Liitoksen alaosa pidettiin eristettynä. Kokeessa verrattiin roottoria rakenteeltaan identtiseen roottoriin, joka oli annettu jäähtyä huoneenlämmössä. Hallitusti jäähdytetyssä roottorissa oli merkittävästi pienempi taipuma roottorin akselissa. Hallittua jäähdyttämistä ei kuitenkaan käytetä selvitystyön mukaan yleisesti induktiokoneiden roottoreissa.



Kuva 10. Hallittu jäähdytysprosessi sovellettuna induktiokoneen roottoriin. Kuvassa näkyy ainoastaan napalevypaketti. Napalevypaketti on eristetty alaosasta ja sen yläosaa jäähdytetään kolmella puhaltimella. (Patwardhan ym. 2013.)

Eräissä induktiokoneiden roottorien valmistusohjeessa (ABB 2020b) kuitenkin kielletään kutistusliitoksen jäähdyttäminen puhaltamalla siihen ilmaa. Ohjeessa mainitaan ilman puhaltamisen aiheuttavan jännityksiä ja taipumaa akseliin. Valmistusohjeessa todennäköisesti tarkoitetaan satunnaista puhaltamista roottoriin ilman selkeää suunnitelmallisuutta.

Induktiokoneiden roottorit ovat rakenteeltaan erilaisia verrattuna tahtikoneiden roottoreihin, mutta hallittua jäähdyttämistä voidaan yrittää soveltaa tähtinapaisien roottorien kutistusliitosprosessiin. Ennen prosessin soveltamista on selvitettävä tarkalleen, miksi induktiokoneiden roottoreissa ei yleisesti käytetä hallittua jäähdyttämistä ja mikä on prosessin tieteellinen tausta.

Kutistusliitoksen asennusohjeessa (ABB 2018a) ohjeistetaan myös, että napalevypaketin sisähalkaisijan läheisyydessä olevia kiinnitysmuttereita löysätään kierros ennen levypaketin lämmittämistä. Napalevypaketin jäähtymisen jälkeen ne kiristetään 50 Nm:n momenttiin. Jos ruuveja ei avata ennen lämmitystä, voi levypaketin lämpölaajeneminen venyttää levypaketin kierretankoja. Levypaketin jäähtyessä kiinnitysmutterit löystyvät ja napalevyihin voi tulla rakoja. Tämä taas osaltaan voi luoda epätasapainoa roottoriin, kun levyt eivät ole täysin kiinni toisissaan ja ne voivat päästä liikkumaan roottorin pyöriessä. Suuret keskipakovoimat liikkuvissa levyissä voivat aiheuttaa levyjen myötämistä ja muodonmuutoksia. Asennusohjeen noudattaminen varmistettiin alihankkijalta.

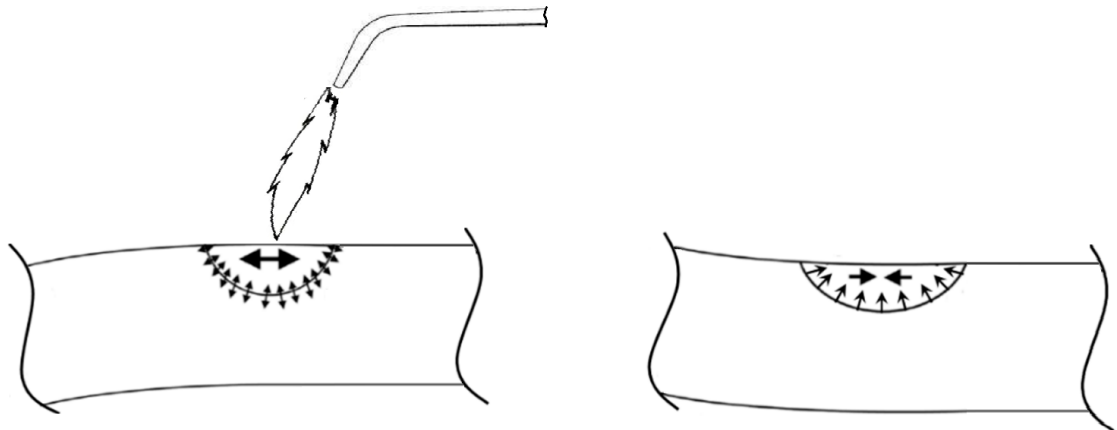
Selvitystyössä perehdyttiin kutistusliitoksessa muodostuneiden jännitysten vähentämiseen roottorien jälkilämmitysprosessilla. Roottorin lämmittäminen esimerkiksi uunissa kutistusliitoksen jälkeen voisi vapauttaa muodonmuutoksia aiheuttavia jännityksiä. Jännitysten vapauttaminen vaatii joko korkean lämpötilan tai pitkän lämmitysajan matalamassa lämpötilassa (Totten 2007: 332; Howes ym. 2002: 170). Roottoreita ei voida lämmittää korkeisiin lämpötiloihin, joten roottoreita olisi jälkilämmitysprosessissa pidettävä uunissa pitkään. Lämmönkesto on heikko varsinkin 6-napaisilla roottoreilla. ABB:n Pitäjänmäen konetehtaalla ei myöskään ole tarpeeksi suurta uunia jälkilämmitysprosessia varten. Selvitystyön pohjalta todettiin, että jälkilämmitysprosessi ei todennäköisesti olisi kustannustehokas ratkaisu rottorien sisäisten jännitysten vähentämiseen.

Muodonmuutosten oikaisuprosessi

Kutistusliitoksen aiheuttamia muodonmuutoksia on mahdollista oikaista akselien paikallisella kuumentamisella. Akselia kuumennetaan kaasuliekillä. Oikaisuprosessia on sovellettu ABB:n konetehtaalla induktiokoneiden roottoreissa (ABB 2009b). Prosessia sovelletaan yleisesti teollisuudessa esimerkiksi suurien kaasuturbiinien akselien oikaisuun (Poursaeidi 2018) ja hitsausten aiheuttamien muodonmuutosten oikaisemiseen (Masubuchi 1980: 322–324).

Huomioitavaa oikaisuprosessissa on, että kuumentaminen ei poista akselissa olevia sisäisiä jännityksiä. Kuumentaminen luo akseliin uuden jännityskeskittymän, jonka tarkoituksena on kumota akselin sisäisiä jännityksiä. Akselin lämpötila on pidettävä alle päästölämpötilan, jotta materiaalin mikrorakenne ei muutu. Liiallisella kuumentamisella voidaan aiheuttaa materiaalin rakenteeseen epäjatkuvuuskohtia, jotka voivat altistaa akselin esimerkiksi väsymisilmiöille. Useissa lähteissä korostetaan oikaisuprosessin olevan usein kokemusperäiseen tietoon pohjautuvaa, joten prosessin kokeilemiseen ja pilotointiin olisi mahdollista saada apua induktiokoneiden roottorikokoonpanolta. (ASM 1988: 1485; Masubuchi 1980: 322–324.)

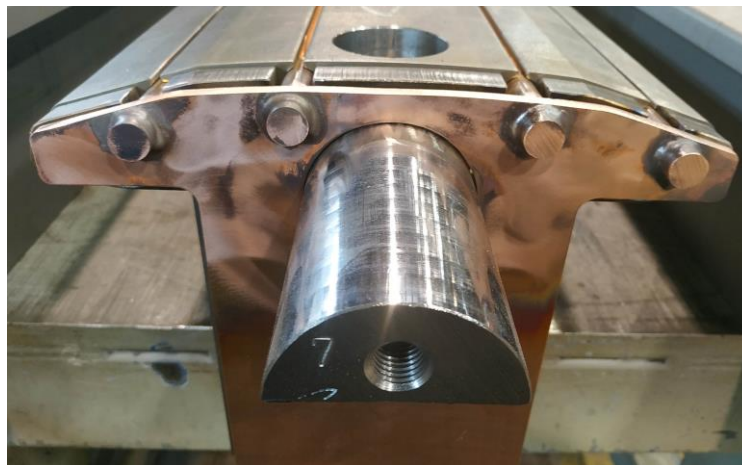
Induktiokoneiden roottorien oikaisuprosessissa (ABB 2009b) roottorista mitataan tasapainotusprosessin aikana roottorin heitto ja kuumennetaan pistemäisesti roottorin akselia heiton vastakkaiselta puolelta, mahdollisimman läheltä roottorin napalevypakettia. Kuumennus tehdään roottorin ollessa tasapainotuskoneessa. Kuumennettava kohta laajenee lämmön vaikutuksesta ja jäähtyessä se kutistuu tilavuudeltaan alkuperäistä pienemmäksi. Kutistuminen aiheuttaa paikallisen jännityskeskittymän, jossa on suuri vetojännitys (kuva 11). Lopputuloksena roottori taipuu lämmitettävän kohdan suuntaan. Kuumennettavan kohdan tulee olla ylöspäin, jolloin myös roottorin massa pyrkii suoristamaan akselia prosessin aikana. Prosessia voitaisiin mahdollisesti yrittää soveltaa tahtikoneiden roottoreihin.



Kuva 11. Havainnekuva akselin oikaisusta kaasuliekillä. Vasemmassa kuvassa paikallisesti kuumennettu kohta laajenee. Oikeassa kuvassa kuumennettu kohta jäähtyy ja kutistuessaan aiheuttaa paikallisen vetojännitystilän (mukailen Astarita ym. 2018: 9).

3.2.2 Vaimennuskäämitys

Vaimennuskäämitys on roottorin napalevyjen sisään, lähelle ulkohalkaisijaa asennetut kuparista tai pronssista valmistetut tangot (kuva 12). Vaimennuskäämit toimivat häkikäämityksenä, jolla verkon taajuudella toimivissa moottoreissa käynnistetään moottori epätahtiin. Ne myös vaimentavat haitallisia ulkoisia magneettikenttiä. (Pyrhönen, 2008a: 67.)



Kuva 12. Kuvassa irtonapasydän, jossa on neljä vaimennuskäämiä.

Lämmitessään vaimennuskäämit ovat mahdollinen taipuman aiheuttaja tähtinapaisissa roottoreissa. Vaimennuskäämien materiaalina on kupari tai pronssi, joten lämpölaajeneminen on suurempaa kuin teräslevyistä valmistetussa napalevypaketissa (Karkela ym.

2004: 72–74). Käämit ovat myös pitkiä ja pituus lisää lämpölaajenemisen vaikutusta. Käämit on kiinnitetty napalevyihin tuukkaamalla (kuva 13). Tuukkauksessa vaimennuskäämin näkyvää yläosaa lyödään iskuvasaralla, jolloin tanko puristuu uransa seinämiä vasten (ABB 2018b).

Käämit tuukataan napalevypakettiin koko pituudeltaan, joten käämien suurempi lämpölaajeneminen työntää napalevypakettia auki. Tämä voi aiheuttaa jännityksiä levypaketin sisälle, kun napalevypakettia lämmitetään kutistusliitosta varten. Napalevypaketin jäähtyessä jännityksen voivat aiheuttaa muodonmuutoksia akselille. Sama ilmiö on mahdollinen tahtikoneen lämmitessä normaalissa käytössä, jolloin roottoriin saattaa tulla epätasapainoa käytön aikana, kun vaimennuskäämit pyrkivät työntämään levypakettia auki.



Kuva 13. Vaimennuskäämien tuukkaus (ABB, 2018b).

Mahdollisia ratkaisuja ongelmaan voisivat olla esimerkiksi:

- Vaimennuskäämien tuukkaus ainoastaan napalevypaketin keskeltä tai tasavälein, jolloin vaimennuskäämit pääsisivät laajenemaan vapaammin.
- Vaimennuskäämien ja napalevypaketin välisen kitkan vähentäminen, jolloin lämpölaajenemisen aiheuttama levypakettia auki työntävä voima olisi pienempi.

Selvitystyön yhteydessä huomattiin kuitenkin, että Leskinen (2008: 31) on tutkinut vaimennuskäämien tuukkausta ja todennut, että tuukkaus ainoastaan levypaketin keskeltä lisää haitallista kipinöinti-ilmiötä. Vaimennuskäämin ollessa irti napalevypaketista pitkältä matkalta, sähkövaraus ei pääse kulkemaan käämistä napalevyihin ja kappaleiden välille syntyä potentiaaliero. Potentiaalieron kasvaessa tarpeeksi suureksi, se tasaantuu aiheuttaen kipinöitä vaimennuskäämin ja napalevypaketin välillä. Ilmiö aiheuttaa eristevaurioita. Leskinen ei ollut kuitenkaan tutkinut tilannetta, jossa tuukkaus tehtäisiin esimerkiksi tasaväleihin.

3.3 Roottorien tasapainotus

Roottorin kokoonpanon jälkeen se tasapainotetaan koneen suunnitteluvaiheessa määritettyyn tasapainotusluokkaan. Roottorin epätasapaino on suurimpia värähtelyn aiheuttajia sähkökoneissa, joten tasapainotuksella pyritään varmistamaan, ettei valmis sähkökone ylitä IEC-standardissa määriteltyjä värähtelyrajoja. Tasapainotusprosessissa roottorin epätasapaino mitataan tasapainotuskoneella ja roottorille asennetaan lisämassoja kompensoimaan epätasapainoa. Lisämassat asennetaan kahdelle tasapainotustasolle, jotka sijaitsevat napalevypaketin eri puolilla, lähellä levypaketin päätyjä. Alkuepätasapainon aiheuttajia roottoreissa ovat valmistus- ja kokoonpanoepätarkkuudet.

3.3.1 Roottorin tasapainotuksen suunnittelu

Roottorien tasapainotusluokkaan ja tasapainotukseen liittyvät arvot lasketaan roottorin suunnittelun yhteydessä. Tahtikonesuunnittelussa laskentaan on tehty Excel-taulukko (ABB 2016), jolla lasketaan roottorin suurin sallittu jäännösepätasapaino ja tasapainotuksessa käytettävä kierrosluku. Taulukkoon syötetään roottorin mittatietoja, massa, kierrosnopeus ja suunniteltu roottorin tasapainotusluokka.

Tasapainotusluokan arvo on vakio, jonka tarkoituksena on vakioida kulmanopeuden ja massan vaikutus suurimpaan sallittuun jäännösepätasapainoon. Yleisesti koneensuunnittelussa tasapainotusluokan arvo valitaan taulukosta sovelluskohtaisten vaatimusten mukaan. Tahtikoneiden roottorit suunnitellaan usein G 6,3 tasapainotusluokkaan.

Poikkeuksena ovat tähtinapaiset roottorit, jotka suunnitellaan G 1 tasapainotusluokkaan. Tasapainotusluokitus on määritetty yhtälössä 2 (ISO 21940-11 2016).

$$G = \frac{U_{per}}{m} \cdot \omega \quad (2)$$

U_{per} on suurin sallittu jäännösepäatasapaino [kgmm]

G on tasapainotusluokka $\left[\frac{mm}{s}\right]$

m on roottorin massa [kg]

ω on roottorin suurin käyttökulmanopeus $\left[\frac{1}{s}\right]$

Roottorin suurin sallittu jäännösepäatasapaino (3) lasketaan samasta yhtälöstä 2.

$$U_{per} = \frac{G \cdot m}{\omega} \quad (3)$$

U_{per} on suurin sallittu jäännösepäatasapaino [kgmm]

G on tasapainotusluokka $\left[\frac{mm}{s}\right]$

m on roottorin massa [kg]

ω on roottorin suurin käyttökulmanopeus $\left[\frac{1}{s}\right]$

ISO 21940-14 (2016) mukaan yhtälöllä 3 lasketusta jäännösepäatasapainosta vähennetään suhteellinen vähennystoleranssin määräämä osuus. Vähennys tehdään yhtälöllä 4.

$$U_{rm} = U_{per} \cdot (1 - \Delta U) \quad (4)$$

U_{rm} on sallittu kokonaisjäännösepäatasapaino [kgmm]

U_{per} on suurin sallittu jäännösepäatasapaino [kgmm]

ΔU on vähennystoleranssi

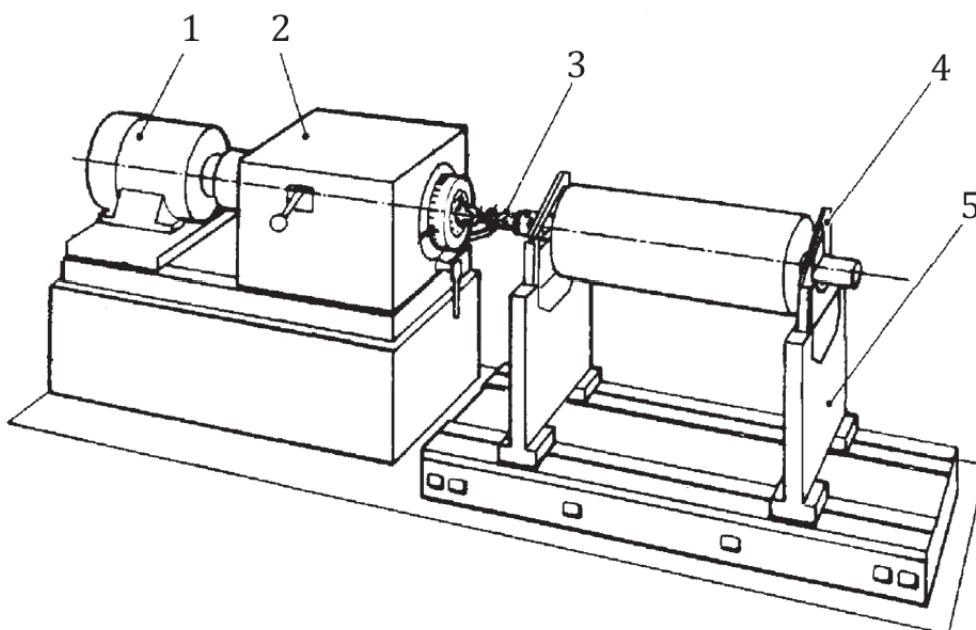
Vähennystä käytetään kompensoimaan mahdollisia tasapainotusprosessissa olevia epävarmuustekijöitä. Vähennystoleranssi riippuu tasapainotusluokasta, ja se määritetään roottorien tasapainotuksen epävarmuustekijöistä. ABB:n tahtikoneissa

tasapainotusluokalle G 6,3 vähennystoleranssiksi on määritetty 0,5 ja luokalle G 1 on määritetty 0,3 (ABB 2016). Lopuksi sallittu kokonaisjännösepäatasapaino jaetaan vielä kahdella, jolloin saadaan sallittu jännösepäatasapaino per tasapainotustaso.

Suureiden laskemisen jälkeen, suunnittelija tekee roottorista tasapainotuspiirustuksen (liite 1). Siihen kirjataan lasketut suureet ja muut tasapainotuksessa tarvittavat tiedot, kuten tasapainotustasojen sijainnit. Tasapainotuspiirustuksen tarkoituksena on toimia tasapainotuksen työohjeena.

3.3.2 Tasapainotus tahtikoneiden kokoonpanossa

Pitäjänmäen konetehtaan tahtikonepuolella roottorien tasapainotukseen käytetään Schenck H8V -tasapainotuskonetta (kuva 14). Tasapainotuskone laskee roottorien alkuepäatasapainon mittaamalla epäatasapainosta aiheutuvia voimia kappaleen pyöriessä. Tasapainotettava roottori nostetaan tasapainotuskoneen tukilaakereille ja lukitaan paikalleen apulaakereilla. Roottoria pyöritetään tasapainotuskoneen moottorin ja vaihteiston avulla. Voimansiirto vaihteistolta roottorin päähän tapahtuu erillisellä kardaaniakselilla. Roottorin pyöriessä tasapainotuskoneessa, tukilaakereissa olevat voima-anturit mitaavat epäatasapainosta aiheutuvia voimia ja tasapainotuskoneen ohjaus laskee mitattujen voimien perusteella epäatasapainon suuruuden ja kulman tasapainotustasoilla. Samalla koneen ohjaus määrittää lisämassojen suuruudet ja mihin kulmaan lisämassat pitää lisätä. Tähtinapaisissa roottoreissa tasapainotustasoille on roottorikokoonpanossa kiinnitetty levyt, joihin lisämassat asennetaan. Roottori saadaan harvoin tasapainoon yhdellä ajolla, joten samaa tasapainotusprosessia jatketaan, kunnes roottorin epäatasapaino on sallituissa rajoissa. (Schenck, 1995.)



Kuva 14. Havainnekuva tasapainotuskoneesta. 1. moottori 2. vaihteisto 3. kardaanii 4. tukilaakerit ja apulaakeri. 5. jalusta (mukaillen ISO 21940-2 2016: 16).

Tasapainotuksen tuloksista tasapainotuskoneelta tulostetaan tasapainotusraportti paperille. Raportissa ilmoitetaan roottorin arvot tasapainotusta ennen ja sen jälkeen. Raporttiin tulostuvia arvoja ovat:

- alkuepätasapaino ja alkuepätasapainon kulma-asema tasapainotustasoilla
- roottorin epätasapainon suhde suurimpaan sallittuun jäännösepätasapainoon
- tasapainotustasoille asennettujen lisämassojen paino ja asennuskulma
- tasapainotuskierrosnopeus.

Raportit skannataan ja tallennetaan pdf-muotoon. Lopuksi paperiset raportit arkistoidaan tuotantomappiin. Liitteenä 2 on esimerkki tasapainotusraportista.

3.3.3 Ongelmat tähtinapaisten roottorien tasapainotuksessa

Tähtinapaiset roottorit ovat jäykkiä eli niiden nimelliskierrosnopeudet ovat alle kriittisen pyörimisnopeuden. Jäykät roottorit eivät taivu merkittävästi pyöriessään, joten ne voidaan tasapainottaa selkeästi nimellisnopeutta alhaisemmilla kierrosnopeuksilla (Adams 2000: 333). Tähtiroottorien nimelliskierrosnopeus vaihtelee noin 1000–1800 rpm välillä

ja roottoreita tasapainotetaan usein nopeudella 550 rpm. Tasapainotuskierrosnopeutta rajoittaa roottorikokoonpanon tasapainotuskoneen dynaaminen kuormankantokyky.

Alhaisella kierrosnopeudella tasapainotetut roottorit voivat aiheuttaa ongelmia sähkökoneiden loppukoestuksessa. Alhainen kierrosnopeus ei ota huomioon mahdollisia rakenteellisia muutoksia roottorissa, kun se pyörii korkeilla kierrosnopeuksilla. Tähtinapaisten roottorien tapauksessa nimelliskierrosnopeudet voivat olla yli kolminkertaiset verrattuna tasapainotuksessa käytettävään kierrosnopeuteen. Tasapainotuksen aikaiset epätasapainon ja keskipakoisvoiman aiheuttamat voimat jäävät pienemmiksi verrattuna sähkökoneen normaalin käytön aikana vaikuttaviin voimiin. Edellä mainitut voimat kasvavat kierrosnopeuden suhteessa toiseen potenssiin. (Berry 2001: 4–7). Roottoreita pyöritetään ensimmäistä kertaa nimelliskierrosnopeuksilla vasta koko sähkökoneen kokoonpanon jälkeisessä loppukoestuksessa.

Teoria roottorin tasapainotilan muutoksesta pyörimisliikkeen aikana perustuu napalevyjen ja käämitysten liikkumiseen tai asettumiseen korkeamman kierrosnopeuden aiheuttamien voimien vaikutuksesta. Asettuminen voi olla tilapäinen tai pysyvä. Ilmiötä on epäilty epätasapainon aiheuttajaksi roottorikokoonpanon ja loppukoestuksen toimesta.

Korkean kierrosnopeuden aiheuttama keskipakoisvoima vähentää kutistusliitoksen puristusjäännitystä. Puristusjäännityksen vähentyminen muuttaa roottorin sisäistä jännitystilaa. Jännitystilan muutos voi aiheuttaa muodonmuutoksia akselissa tai napalevyypaketissa.

Keskipakoisvoima vaikuttaa myös napakäämityksiin. Napakäämitykset on tuettu sivuilta alumiinisilla käämituilla ja käämityksen yläreuna tukeutuu napaa vasten. Navan päädyistä käämitystä tukevat napalevyypaketin tukitankojen päät (kuva 15). Tukitankojen päät voivat mahdollisesti taipua käämitysten liikkuaessa keskipakoisvoimien vaikutuksesta (Heikel 2010). Myös käämitysten kulmat ovat alttiita pyörimisliikkeen aiheuttamille voimille, koska niitä ei ole tuettu mitenkään. Käämitystä tukee roottorikokoonpanon aikana tehtävä pinnoitus. Pinnoitus tehdään tyhjiökylästä. Kyllästyksessä roottori pinnoitetaan epoksihartsilla, jonka tarkoituksena on toimia sähköisenä eristeenä ja lujittaa narakennettä (Boulter ym. 2014; 38–39).



Kuva 15. Kuva roottorista staattorin sisällä. Kuvassa näkyy napojen välissä olevat käämituet ja navan päätyjä tukevat kaksi tukitankoa. Roottori ja staattori on pinnoitettu punaisella epoksihartsilla.

Napalevyjen ja käämitysten asettuminen loppukoestuksen aikana saattaa muuttaa roottorin tasapainotilaa, jolloin voidaan mahdollisesti ylittää suurimmat sähkökoneiden IEC-standardissa määritellyt värähtelyrajat. Värähtelyrajojen ylittyessä, joudutaan sähkökoneetta purkamaan ja roottori tasapainottamaan uudelleen loppukoestuspaikalla. Tasapainottaminen loppukoestusalueella on hidasta ja työlästä. Roottorien laadun ja kustannusten kannalta olisi parempi, että roottorit voitaisiin tasapainottaa nimellisa nopeudella tasapainotuskoneessa.

Konetehtaan induktiokoneiden kokoonpanossa induktiokoneiden roottoreita tasapainotetaan korkeilla kierrosnopeuksilla. Induktiopuolen tasapainotuskoneella tasapainotetaan roottoreita korkeimmillaan nopeudella 3000 rpm. Ratkaisuna ylempänä esitettyyn ongelmaan voisi olla roottorien tasapainotus induktiopuolen tasapainotuskoneella.

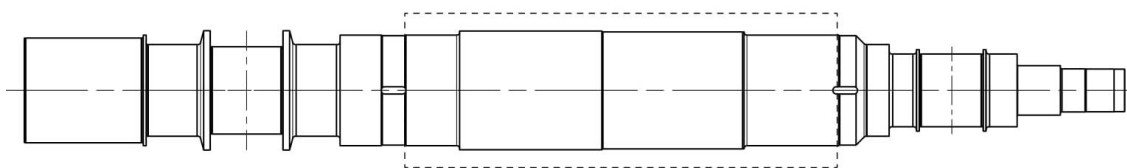
Selvitystyön edetessä saatiin tieto, että tasapainotuskoneella ei päästä merkittävästi korkeampiin kierrosnopeuksiin tähtinapaisilla roottoreilla niiden suuren massa takia. Korkeilla kierroksilla tasapainotetut induktiokoneiden roottorit ovat kevyitä verrattuna tähti-roottoreihin. Tasapainotuskierrosnopeus olisi jäänyt noin samaan luokkaan kuin tahtikonepuolella. Selkeän eron muodostamiseksi nykyiseen 550 rpm tasapainotusnopeuteen, kierrosnopeudeksi tarvittaisiin noin 1500 rpm.

Napalevyjen ja käämitysten asettumista pitäisi tutkia loppukoestuksessa. Mahdollisia asettumisen aiheuttamia siirtymiä voitaisiin tutkia esimerkiksi vertaamalla ylinopeuskoetta ennen ja kokeen jälkeen sähkökoneista mitattuja värähtelytasoja. Toinen mahdollinen tapa siirtymien tutkimiseen on venymäliuskamittaus. Tutkimusten perusteella olisi mahdollista päätellä, onko asettumisen aiheuttamat siirtymät selkeä ongelma ja vaatiiko se korjaavia toimenpiteitä.

3.4 Jälkikoneistusprosessi

Roottorin jälkikoneistuksella tarkoitetaan roottorin akselin koneistamista napalevypaketin kutistusliitoksen jälkeen. Akseliin on jätetty työvara kaikille pinnoille paitsi liitospinnalle, johon napalevypaketti liitetään. Liitoksen jälkeen työvaralliset pinnat koneistetaan nimellisiin mittoihin (kuva 16).

Jälkikoneistusprosessia on käytetty tähtinapaisissa roottoreissa pienentämään laakeripintojen ja tarkkojen pyörrevirta-antureiden mittapintojen välistä heittoa ja yleisesti vähentämään roottorien alkuepätasapainoa.



Kuva 16. Kuva tähtinapaisen roottorin akselista. Akselin keskelle on merkitty alue, johon ei jätetä työvara. Laakeripinnat on merkitty akseliin pystykatkoviivoilla.

3.4.1 Jälkikoneistusprosessin historia

Selvitystyön aikana käytiin läpi ABB:n tietokannoista löytyvä aineisto jälkikoneistuksesta. Aineiston ja roottorien valmistuspäivien perusteella jälkikoneistusprosessi on määritelty tähtiroottoreille vuonna 2009. Prosessi otettiin käyttöön, kun kahdessa saman projektin identtisissä tähtinapaisissa sähkömoottoreissa oli suuria vaikeuksia saada pyörrevirta-antureiden mittaustuloksia vaadittuihin toleransseihin (ABB 2009a).

Pyörrevirta-anturi toimii indusoimalla jännitteen mittapinnalle ja mittaamalla indusoituneen jännitteen suuruutta. Jännitteen suuruus vaihtelee etäisyyden funktiona (IEC 60947-5-2 2019: 27), joten ABB:n sähkökoneissa anturilla mitataan akselin värähtelyliikettä. Mitattavan akselin sähkömagneettiset ominaisuudet pitää olla mittapinnalla tasalaatuiset, jotta anturi ei tulkitse ominaisuuksien muutosta akselin liikkeeksi (Littrel 2005: 5–17). Magneettisten ja sähköisten ominaisuuksien vaihteluita kutsutaan sähköiseksi heitoksi. Mittapinnan pitää olla myös geometrisesti mahdollisimman pyöreä ja heitoton suhteessa roottorin pyörimisakseliin. Tästä syystä mittapinnoilla on erittäin tarkat pinnan- karheus- ja heittotoleranssit. Mittapinnat hiotaan ja viimeistellään huolellisesti.

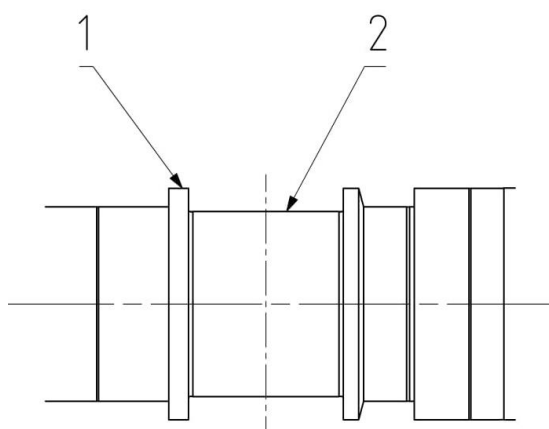
Kahdessa identtisessä tahtimoottorissa olleen ongelman juurisyynä oli pyörrevirta-anturien mittapinnan hiomisprosessi. Se aiheutti mittapinnoille suuria lämpötilojen vaihteluita ja nämä muuttivat mittapintojen magneettisia ominaisuuksia. Osasyiksi mainittiin myös akselin taipuma kutistusliitoksen aikana, joka oli lisännyt mittapintojen ja pyörimisakselin välistä heittoa.

Ongelman toistumisen estämiseksi tehtiin ohjeistus mittapinnoilla varustettujen roottorien suunnittelu- ja valmistusprosessista (ABB 2019c). Siinä ohjeistetaan mittapintojen ”timantointi” eli kiillottaminen timantilla, jonka on todettu vähentävän mittapintojen sähköistä heittoa (Littrel, 2005: 5–17). Ohjeessa määritetään myös jälkikoneistamaan kaikki roottorit, joissa on pyörrevirta-antureiden mittapintoja. Jälkikoneistuksen tarkoituksena ohjeessa kerrotaan laakeripintojen ja mittapintojen välisen mekaanisen heiton vähentäminen.

Jälkikoneistusprosessi mainitaan ABB:llä käytettävän pyörrevirta-anturivalmistajan dokumentissa (Bently Nevada 1999), jossa ohjeistetaan pyörrevirta-antureissa ja niiden mittaustuloksissa ilmenevien ongelmien korjaamista. Jälkikoneistusta kuvataan

dokumentissa vaihtoehtoiseksi prosessiksi mittapintojen mekaanisen heiton vähentämiseen. Samassa dokumentissa ohjeistetaan myös mittapintojen kiillottaminen.

Tähtinapaisissa roottoreissa laakeripinnat ja pyörrevirta-antureiden mittapinnat suunnitellaan kuitenkin erittäin lähelle toisiaan (kuva 17). Mahdolliset kutistusliitoksen aiheuttamat muodonmuutokset vaikuttavat pintojen väliseen mekaaniseen heittoon tai epäkeskisyyteen todennäköisesti vain vähän. Myös ennen jälkikoneistusprosessiin määrittämistä eli ennen vuotta 2009, tehtiin ilman merkittäviä ongelmia lukuisia tähtinapaisia roottoreita, joissa on ollut pyörrevirta-antureiden mittapintoja.



Kuva 17. Pyörrevirta-anturien mittapintojen paikka roottorin akselissa. 1. mittapinta 2. laakeripinta.

Jälkikoneistusprosessia on alettu lähivuosina soveltamaan uudelleen, tarkoituksena roottorin alkuepätasapainon vähentäminen.

Pyörrevirta-antureilla varustettuja tähtinapaisia sähkökoneita ei tehty vuosina 2010–2017. Viimeisin pyörrevirta-antureilla varustettu sähkökone tehtiin vuoden 2018 alkupuolella. Samoihin aikoihin jälkikoneistusta alettiin soveltamaan alkuepätasapainon vähentämiseen. Luultavasti viimeisin pyörrevirta-anturilla varustettu kone toi jälkikoneistusprosessin takaisin suunnitteluosaston tietoisuuteen ja jälkikoneistusprosessia alettiin soveltamaan roottorien alkuepätasapainojen vähentämiseen. Jälkikoneistuksen uusi käyttötarkoitus otettiin nopealla aikataululla käyttöön ja kirjattiin suunnitteluohjeistukseen. Vuonna 2019 toimitettiin 12 tähtinapaista konetta, joista 11 oli jälkikoneistetulla roottorilla.

Jälkikoneistuksen alkuepätasapainoa vähentävä vaikutus perustuu kutistusliitosten aiheuttamien muodonmuutosten poistamiseen. Ennen jälkikoneistusta, roottori keskiteetään tarkasti sorviin, jolloin koneistuksen jälkeen koko roottorin pitäisi olla samankeskinen.

3.4.2 Jälkikoneistuksen suunnitteluohjeistus

Jälkikoneistusprosessi on määritelty epäselvästi tahtikoneosaston suunnitteluohjeistossa. Suunnitteluohjeistusta tähtiroottorien jälkikoneistukseen löytyy kahdesta eri suunnitteluohjeesta.

Roottorin rakenne -suunnitteluohje (ABB 2019a) ohjeistaa, että jälkikoneistus tehdään kaikille 4-napaisille roottoreille. Ohjeessa mainitaan asiasta yhdellä lauseella ja ilman johdonmukaisia perusteluja. Ohjeistuksen taustalla on ilmeisesti esiintyneet epätasapaino-ongelmat. Tarkoituksena ilmeisesti varmistaa roottorin samankeskiisyys ja minimoida epätasapaino.

Värähtelymittalaitteiden suunnittelu -suunnitteluohje (ABB 2019c) ohjeistaa jälkikoneistettavaksi roottorit, joihin koneistetaan mittapintoja pyörrevirta-antureille. Antureista ja mittapinnoista on kerrottu enemmän kappaleessa 3.4.1. Tarve jälkikoneistukselle on perusteltu sillä, että anturien tarvitsemat mittapinnat vaativat erittäin tarkat pinnankarheus- ja ympyrämäisyystoleranssit. Tarkoille mittapinnoille voi tulla muodonmuutoksia tai heittoa, kun roottorikeskus liitetään akselille, joten tarkat pinnat jälkikoneistetaan liitoksen jälkeen.

Jälkikoneistuksia on kuitenkin suunniteltu moniin roottoreihin, jotka eivät täytä edellä lueteltuja määrittelyjä. Roottorien jälkikoneistuksia on tehty suunnittelijan oman harkinnan mukaan ilman selkeää tietopohjaa siitä, millaisille roottoreille jälkikoneistus kannattaa tehdä.

3.5 Roottorirakenteiden vertailu

Insinööriyön tavoitteena oli selvittää, millaisille roottoreille jälkikoneistus kannattaa tehdä. Selvitystä tehtiin vertailemalla valmistettuja roottoreita ja niiden alkuepätasapainoja keskenään. Tämän kappaleen ensimmäisessä osiossa määritellään vertailumenetelmät ja vertailukriteerit. Toisessa osiossa vertaillaan jälkikoneistettuja roottoreita jälkikoneistamattomiin roottoreihin. Viimeisessä osiossa vertaillaan jälkikoneistamattomia roottoreita ja irtonapaisia roottoreita. Siinä tavoitteena oli selvittää, miten roottorin naparakenne vaikuttaa roottorien alkuepätasapainoon.

3.5.1 Roottorien vertailukriteerit ja -menetelmät

Roottorien vertailu tehtiin keräämällä toiminnanohjausjärjestelmästä Excel-taulukoon roottoreita ja taulukoimalla kyseisten rottorien rakenteelliset ominaisuudet ja muut vertailtavat muuttajat. Vertailussa suhteutettiin vertailtavat muuttajat rottorien alkuepätasapainoihin.

Roottorien vertailtavat ominaisuudet:

Roottorien napojen lukumäärä vaikuttaa tähtirottorien kutistusliitoksen lämpötilaan.

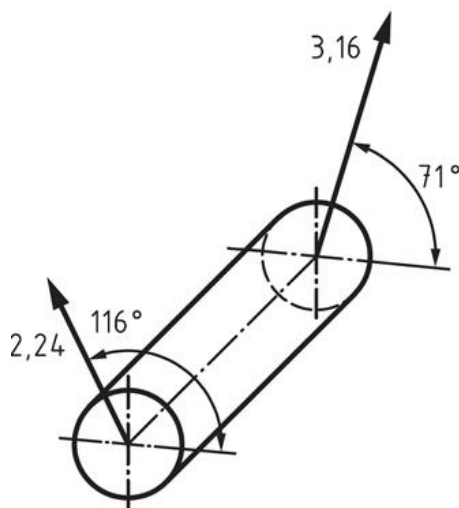
Akselin ja napalevypaketin liitospinnan halkaisija on todennäköisesti epätasapainoon ja akselin kutistusliitoksen aikaisiin muodonmuutoksiin vaikuttava tekijä.

Laakerivälän pituus on usein lähellä koko akselin pituutta ja akselin pituus on todennäköisesti epätasapainoon vaikuttava tekijä.

Napalevypakettien pituus vaikuttaa suoraan kutistusliitoksen jäähtymisnopeuteen. Pitkämpi napalevypaketti varastoi enemmän lämpöenergiaa ja jäähtyy hitaammin. Pitkä napalevypaketti myös lämmittää akselia pidemmältä matkalta, joka lisää lämpölaajenemisen vaikutusta akselissa.

Alkuepätasapainolla tarkoitetaan roottorin epätasapainoa ennen tasapainotusta. Alkuepätasapainot on mitattu tasapainotustasoilta (kuva 18).

Epätasapainon kulmalla tarkoitetaan astelukua, joka kertoo missä kulmassa epätasapainon massakeskipiste on kyseisellä tasapainotustasolla. Epätasapainon kulmaa voidaan ajatella epätasapainovektorin kulma-asemana tasapainotustasolla. Vertailussa käytetään myös termiä "epätasapainojen välinen kulma". Esimerkiksi kuvassa 18 epätasapainojen välinen kulma on 116 astetta vähennettynä 71 astetta.



Kuva 18. Epätasapainoa ja sen kulma-asemaa havainnollistava kuva. Vektorin pituus kuvaa epätasapainon suuruutta (ISO 21940-11 2016).

Vertailtavien rakenteellisten ominaisuuksien valintaan vaikutti tiedon saatavuus. Vertailtaviin ominaisuuksiin olisi haluttu roottorin akselin pituus laakerivälin sijaan ja roottorin massa. Kyseisten ominaisuuksien selvittämiseen olisi mennyt kohtuuttomasti aikaa, sillä niitä ei dokumentoida samaan järjestelmään kuin muita muuttujia.

3.5.2 Jälkikoneistettujen roottorien vertailu

Roottorien vertailu aloitettiin hakemalla jälkikoneistettuja ja jälkikoneistamattomia roottoreita toiminnanohjausjärjestelmästä ja siirtämällä haetut roottorit Excel-taulukkoon. Jälkikoneistettuja roottoreita löytyi 23 kappaletta, jotka olivat kaikki järjestelmään tallennetut jälkikoneistetut roottorit.

Jälkikoneistamattomia roottoreita löytyi suuri määrä. Valittuihin 23:een jälkikoneistettuun roottoriin jälkikoneistus oli suunniteltu ilman selkeitä kriteereitä, joten jälkikoneistamattomia roottoreita valittiin myös satunnaisesti. Jälkikoneistamattomien roottorien otannaksi

valittiin 60 roottoria. Jälkikoneistamattomia roottoreita lisättiin muutama roottori lisää, jotta saatiin otantaan tasaisesti eri pituisia roottoreita. Lopulliseksi määräksi saatiin 63 roottoria.

Suurin osa roottoreista oli koneista, joiden kokoluokka on 900 ja napojen lukumäärä on 6. Tämän todettiin johtuvan siitä, että koneet ovat valikoitu satunnaisesti ja kyseisten ominaisuuksilla varustettuja koneita on tehty selkeästi kaikkein eniten. Taulukoiduista roottoreista suurimmassa osassa oli myös liitospinnan halkaisija 408 mm, joka on yleisin liitospinnan halkaisija 900 kokoluokan koneissa. Seuraavana on esitetty tärkeimpiä havaintoja vertailusta.

Alkuepätasapaino

Excel-tilukosta laskettiin keskiarvot alkuepätasapainoista tasapainotustasoilla jälkikoneistettujen ja jälkikoneistamattomien välillä. Keskimäärin jälkikoneistetuissa roottoreissa oli suurempi alkuepätasapaino kuin jälkikoneistamattomissa (taulukko 1).

Taulukko 1. Keskimääräinen alkuepätasapaino tähtirootoreissa.

Roottori	Alkuepätasapaino [kgmm]			Otanta [kpl]
	Keskiarvo	Keskihajonta	Mediaani	
Jälkikoneistettu	878	609	761	23
Jälkikoneistamaton	467	232	435	63

Jälkikoneistusprosessia on viime vuosina käytetty roottorien alkuepätasapainon vähentämiseen, joten tulos oli yllättävä.

Vertailussa pitää ottaa huomioon suhteellisen pienen otannan vaikutus keskiarvon hajontaan. Jälkikoneistettujen roottorien otannassa oli muutamia roottoreita, joiden keskimääräinen alkuepätasapaino oli huomattavan suuri. Kyseiset roottorit nostavat alkuepätasapainon keskiarvoa kohtuuttomasti. Keskimääräinen alkuepätasapaino päätettiin laskea vielä kerran, jotta hajonnan vaikutus saataisiin minimoitua. Uudessa laskennassa poistettiin viisi jälkikoneistettua roottoria, joissa oli kaikkein suurimmat alkuepätasapainot. Jäljelle jäi 18 roottoria, joiden keskimääräinen epätasapaino on esitetty taulukossa 2. Havainnollisuuden vuoksi myös otannasta poistetut roottorit lisättiin taulukkoon.

Taulukko 2. Keskimääräinen alkuepätasapaino tähtiroottoreissa. Jälkikoneistettujen roottorien otannasta poistettu viisi epätasapainoisinta roottoria.

Roottori	Alkuepätasapaino [kgmm]			Otanta [kpl]
	Keskiarvo	Keskihajonta	Mediaani	
Jälkikoneistettu	614	295	583	18
Poistetut jälkikoneistetut	1828	734	1662	5
Jälkikoneistamaton	467	232	435	63

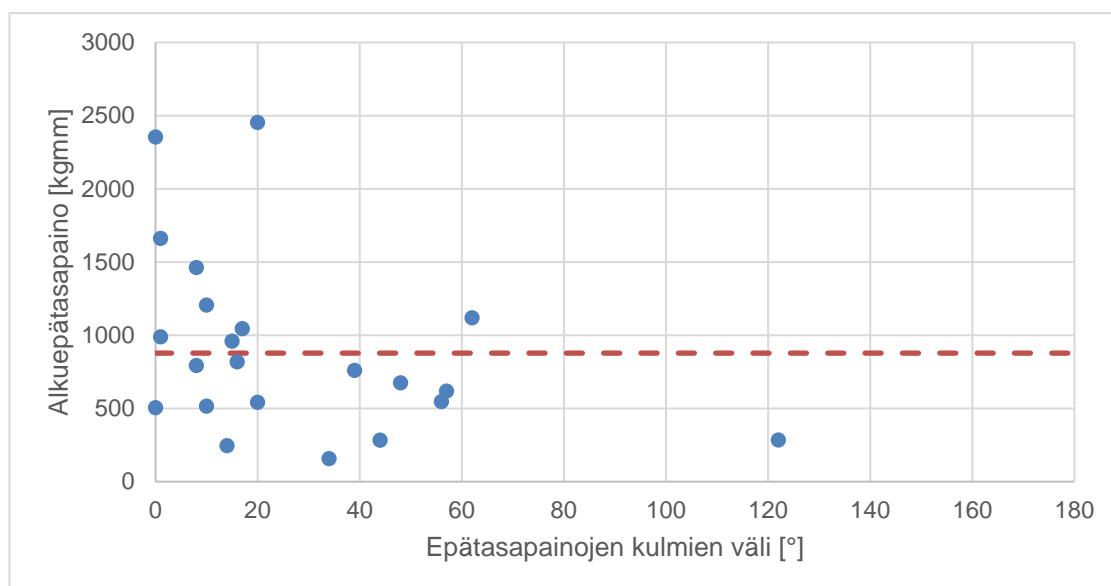
Poistamalla viisi epätasapainoisinta roottoria, jälkikoneistettujen roottorien keskimääräiset epätasapainon arvot siirtyvät lähelle jälkikoneistamattomien vastaavia arvoja. Kuitenkin jälkikoneistettujen roottorien alkuepätasapaino on edelleen keskimäärin suurempi kuin jälkikoneistamattomien roottorien.

Todennäköisesti jälkikoneistettujen roottorien otannasta poistetut viisi roottoria ovat ”yksittäistapauksia”, eli esimerkiksi virheitä jälkikoneistuksen suorittamisessa. Vertailusta poistetuista roottoreista kolme roottoria ovat samanlaisia ja ne on tehty samalla tilauksella. Todennäköisesti kaikki kyseisen tilauksen roottorit on tehty peräkkäin ja mahdolliset virheet ovat kopioituneet kaikkiin roottoreihin. Tämä tukee osaltaan teoriaa yksittäistapauksista. Jälkikoneistettujen roottorien otanta on kuitenkin suhteellisen pieni, joten tuloksessa on epävarmuutta.

Epätasapainojen kulmat

Yksittäisistä epätasapainon kulumista ei saatu tuloksia vertailussa. Selkeä ilmiö löytyi, kun verrattiin kahden tasapainotustason epätasapainojen kulmia keskenään (kuva 19). Kulmat olivat suurimmassa osassa alle 20 astetta.

Epätasapainojen osuminen samalle kulma-alueelle aiheutuu todennäköisesti jälkikoneistuksessa, kun roottori asetetaan sorviin ja napalevyä yritetään keskittää laakeripintojen suhteen. Jälkikoneistamattomien epätasapainojen kulmien tulkinta esitetään seuraavassa kappaleessa.



Kuva 19. Jälkikoneistettujen epätasapainojen kulmien väli. Katkoviiva kuvaa alkuepätasapainon keskiarvoa (878 kgmm).

Jälkikoneistettuiden roottorien epätasapainojen kulmat tasapainotustasoilla olivat lähellä toisiaan. Tämä viittaa siihen, että epätasapainosta suuri osa on staattista epätasapainoa (McMillian 2003: 44). Allaire ym. (1976) julkaisussaan tulkitsevat tämän usein olevan koneistetuissa roottoreissa merkki siitä, että laakeripintoja ei ole koneistettu keskeiseksi roottorin napalevyypaketin suhteen. Staattinen epätasapaino jälkikoneistetussa roottorissa tarkoittaa käytännössä, että roottorin napalevyypaketin painopiste akseli eroaa lähes yhdensuuntaisesti pyörimisakselista.

Vertailu suhteessa muihin ominaisuuksiin

Jälkikoneistettujen roottorien vertailua muiden rakenteellisten ominaisuuksien mukaan kokeiltiin ja todettiin, että roottoreita on tehty liian vähän todennukaisten tulosten ja korrelaatioiden löytämiseksi. Esimerkiksi laakerivälän mukaan vertailtuna (liite 3, taulukko 1), keskiarvoina lasketuissa tuloksissa näkyy selvästi suuria eroja, jotka mahdollisesti tasaantuisivat otannan määrän kasvaessa.

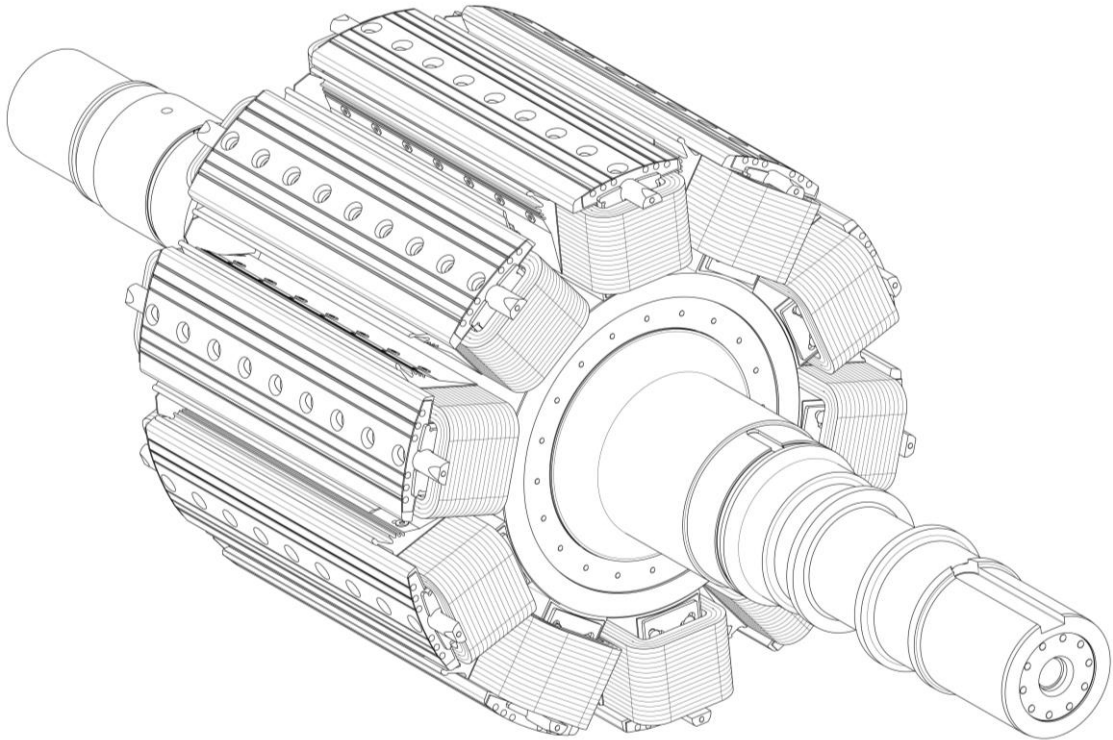
3.5.3 Jälkikoneistamattomien roottorien vertailu

Insinöörityön toisena tavoitteena oli selvittää epätasapainoa aiheuttavia tekijöitä tähtinapaisissa roottoreissa. Tässä kappaleessa esitetyn vertailun tavoitteena oli tunnistaa, mitkä tähtinapaisten roottorien rakenteelliset muuttujat ja ominaisuudet korreloivat alkuepätasapainon kanssa. Vertailussa käytettiin samoja vertailumenetelmiä ja vertailukriteereitä kuin aikaisemmassa kappaleessa.

Tähtinapaisia jälkikoneistamattomia roottoreita verrattiin saman kokoluokan irtonapaisiin roottoreihin. Roottorien ollessa samaa kokoluokkaa, vertailulla voidaan mahdollisesti selvittää tähtinaparakenteen ominaisuuksien vaikutuksia alkuepätasapainon muodostumiseen. Tässä kappaleessa termillä ”tähtinapainen roottori”, tarkoitetaan jälkikoneistamattonta tähtinapaista roottoria, ellei toisin ole mainittu.

Irtonapaiset roottorit

710- ja 900-kokoluokan sähkökoneita tehdään ABB:llä myös irtonapaisilla roottoreilla (kuva 20). Tyypillisesti pienet irtonapaiset sähkökoneet ovat generaattoreita. Irtonaparakenne suunnitellaan pieniin sähkökoneisiin, jos roottoriin pitää saada yli 6 napaa. Tähtinapaisia roottoreita ei voida valmistaa suuremmilla napaluvuilla, koska napalevypaketin napojen välit pienenevät liikaa. Liian pienet välit navoissa tekevät käämimisen käämintäkoneessa mahdottomaksi (Santanen 2005). 710- ja 900-kokoluokan irtonapaiset roottorit ovat pituuden, massan ja halkaisijan suhteen samaa kokoluokkaa tähtinapaisien roottorien kanssa. Irtonapaiset ja tähtinapaiset roottorit tasapainotetaan usein myös samalla kierrosnopeudella.

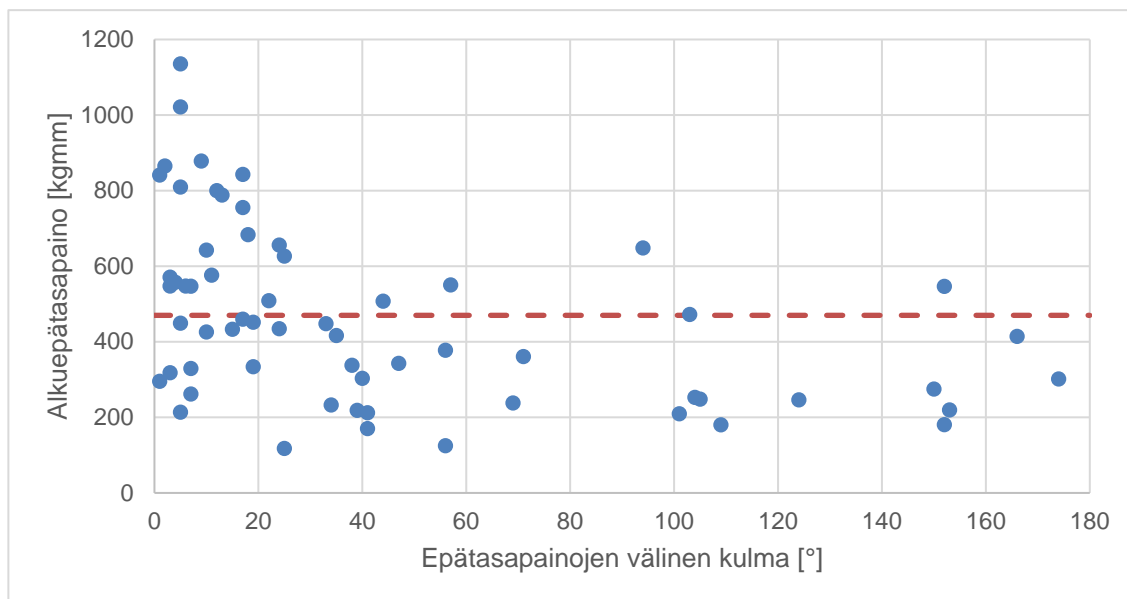


Kuva 20. 900-kokoluokan sähkökoneen irtonapainen roottori.

Irtonapaisista roottoreista tehtiin taulukko samalla tavalla kuin tähtinapaisista roottoreista aikaisemmassa kappaleessa. Taulukkoon listattiin samat rakenteelliset ominaisuudet ja tasapainotusraporttien tulokset. Irtonapaisia valittiin satunnaisesti otanta ja taulukkoon täydennettiin muutama roottori, jotta saatiin tasainen jakauma eri pituisia roottoreita. Vertailtavien irtonapaisten roottorien lopulliseksi määräksi tuli 45 roottoria. Vertailuun käytettiin samoja kriteereitä ja menetelmiä. Vertailemalla irtonapaisista roottoreista tehtyä taulukkoa tähtinapaisten rottorien taulukkoon havaittiin selkeitä ilmiötä, joita käsitellään seuraavana.

Epätasapainojen väliset kulmat

Kuvassa 21 on kuvaaja tähtinapaisten rottorien epätasapainojen välisen kulman suhteesta alkuepätasapainoon. Rottorien alkuepätasapainon ollessa pieni, noin 150–400 kgmm, epätasapainojen välinen kulma vaihtelee suhteellisen tasaisesti koko kulma-asteikon välillä. Alkuepätasapainon kasvaessa epätasapainojen välinen kulma pienenee.

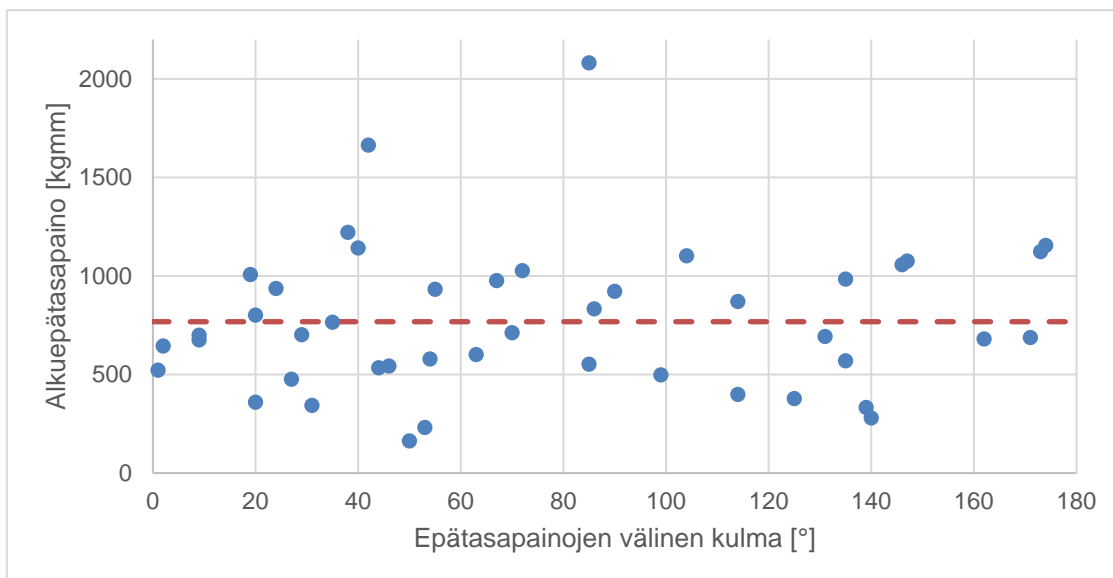


Kuva 21. Tähtinapaisten roottorien epätasapainojen välinen kulma suhteessa epätasapainoon. Katkoviiva kuvaa alkuepätasapainon keskiarvoa (467 kgmm).

Ilmiö on samanlainen kuin jälkikoneistetuissa roottoreissa. Sen voidaan jälkikoneistamattomissa roottoreissa tulkita tukevan käsitystä roottorin akselin taipumisesta kutistusliitoksen aikana. Osa roottoreista ei taivu tai taipuu erittäin vähän, jolloin epätasapaino on pieni ja epätasapainojen kulma-asetat ovat satunnaisia. Joidenkin roottorien akselit taipuvat enemmän kutistusliitoksen aikana. Akseli taipuu kaarevaan muotoon. Näin tasapainotustasolle muodostuu epätasapainot, joiden välinen kulma on pieni.

Irtonapaisissa roottoreissa epätasapainon kulmien välillä ja alkuepätasapainon suuruudella ei ollut selkeää suhdetta (kuva 22). Alkuepätasapainon arvoja löytyi keskiarvon molemmilta puolilta tasaisesti läpi kulma-asteikon. Tämä oli ennakoitu tulos, koska roottorien napojen liittämiseen ei käytetä kutistusliitosta. Navat pultataan kiinni roottorin akseliin.

Irtonapaisten roottorien epätasapainojen välinen kulma käyttäytyy samalla tavalla kuin tähtinapaisten roottorien epätasapainojen välinen kulma pienillä alkuepätasapainon arvoilla. Havainto tukee käsitystä roottorin taipumisesta kutistusliitoksen aikana.



Kuva 22. Irtonapaisten roottorien epätasapainojen välinen kulma suhteessa epätasapainoon. Katkoviiva kuvaa alkuepätasapainon keskiarvoa (768 kgmm).

Laakeriväli

Laakerivälien pituuksissa on suuria eroja koneiden välillä. Laakerivälin pituus suunnitellaan käytännössä sähkökoneen pituuden ja staattorin pituuden mukaan. Laakerivälin ja epätasapainon vertailu tehtiin jakamalla koneita luokkiin laakerivälin perusteella ja vertailemalla laakeriväli luokkien keskimääräisiä alkuepätasapainoja keskenään. Luokat muodostettiin, koska roottorien laakerivälien arvoissa oli suuria vaihteluita, mutta samalla laakerivälin arvolla oli usein monta roottoria. Luokat pyrittiin muodostamaan noin 200 mm:n välein, jotta kaikkiin luokkiin saataisiin lähes sama määrä roottoreita. Tähtinapaisissa roottoreissa suurimman ja pienimmän laakerivälin ero oli vertailussa noin 800 mm, joten laakeriväleistä muodostettiin neljä luokkaa. Irtonapaisista roottoreista muodostettiin kolme luokkaa, koska taulukoiduissa irtonapaisissa roottoreissa laakerivälien vaihtelu oli pienempää. Luokkia muodostui suhteellisen vähän, mikä voi vaikuttaa tulosten luotettavuuteen. Laakeriväli luokista laskettiin myös laakerivälien keskiarvot luokkien sisällä, jotta luokat olisivat selkeämmin vertailukelpoisia.

Tähtinapaisten roottorien laakerivälin suhdetta alkuepätasapainoon vertaillen huomattiin, että alkuepätasapaino kasvaa lähes lineaarisesti laakerivälin kasvaessa (taulukko 3).

Taulukko 3. Tähtinapaisten roottorien keskimääräinen epätasapaino laakerivälin mukaan luokiteltuna.

Laakeriväli luokka	Laakeriväli [mm]	Epätasapaino [kgmm]		Otanta [kpl]
	Keskiarvo	Keskiarvo	Keskihajonta	
2428-2590	2501	335	115	14
2628-2790	2702	422	211	17
2828-2905	2861	494	229	17
2990-3228	3074	627	239	15

Laakeriväli vaikuttaa käytännössä aina koko roottorin akselin pituuteen. Laakerivälin pidentyessä alkuepätasapaino kasvaa, jolloin keskimäärin epätasapainojen välinen kulma pienenee. Tästä voidaan päätellä, että todennäköisesti pidemmät tähtinapaiset roottorit ovat alttiimpia taipumaan kutistusliitoksen aikana.

Irtonapaisissa roottoreissa laakeriväli luokkia oli vain kolme, joten tulosten tulkintaan pitää suhtautua varautuneemmin. Laakerivälin suhdetta alkuepätasapainoon vertailtaessa ei löytynyt selkeää johdonmukaisuutta laakerivälin pituuden ja alkuepätasapainon välillä (taulukko 4). Alkuepätasapaino on kuitenkin kohtuullisella erolla suurin pisimmässä laakeriväli luokassa.

Taulukko 4. Irtonapaisien keskimääräinen epätasapaino laakerivälin mukaan luokiteltuna.

Laakeriväli luokka	Laakeriväli [mm]	Epätasapaino [mm]		Otanta [kpl]
	Keskiarvo	Keskiarvo	Keskihajonta	
2590-2790	2676	785	274	14
2905-2990	2950	621	309	15
3020-3190	3169	890	455	16

Tulosten johdonmukaisuuden puutteesta voidaan päätellä, että irtonapaisissa roottoreissa laakerivälin pituuden vaikutus alkuepätasapainoon on todennäköisesti pienempi kuin tähtinapaisissa roottoreissa. On myös mahdollista, että otanta on liian pieni ja siitä syystä laakeriväli luokkia on liian vähän, jolloin vertailusta ei saada realistista tulosta.

Napalevypaketin ja napojen pituudet

Tähtinapaisissa roottoreissa napalevypaketin pituus vaikuttaa myös kutistusliitoksen lämpötilaerojen muutosnopeuteen. Pidempi napalevypaketti varastoi enemmän lämpöä, joten lämpötilojen muutokset ovat hitaampia. Lämpötilaerojen muutosnopeus voi olla merkittävä tekijä mahdollisien kutistusliitoksen aikana syntyvien jännitysten ja muodonmuutosten kannalta. Napalevypaketin pituus vaikuttaa myös akselin kutistusliitospinnan pituuteen, jolloin kutistusliitoksen aikana akseliin johtuu pidemmältä matkalta lämpöä ja lämpölaajenemisen vaikutus on suurempi. Pitkät navat ovat usein syynä siihen, että roottoriin suunnitellaan pitkä laakeriväli, joten usein laakerivälin pituus ja napojen pituudet ovat suhteessa toisiinsa.

Vertailu tehtiin jakamalla roottorit tasaisesti neljään keskiarvoluokkaan, samalla tavalla kuin laakerivälivertailussa. Navan pituuden arvo 1350 mm oli yleinen molemmissa roottorirakenteissa, joten siitä muodostui yksi luokka.

Vertailtaessa tähtinapaisien roottorien napalevypaketin pituuden suhdetta alkuepätasapainoon (taulukko 5), huomattiin keskimääräisten alkuepätasapainojen olevan samaa suuruusluokkaa kuin laakerivälivertailussa. Alkuepätasapaino kasvoi lineaarisesti, poikkeuksena navan pituudella 1350 mm. Kyseinen navan pituus on erittäin yleinen, joten laakerivälin pituuden hajonta on suuri kyseisellä napalevypaketin pituuden arvolla. Suuri laakerivälin pituuden hajonta todennäköisesti aiheuttaa poikkeaman tulosten lineaarisuudessa.

Taulukko 5. Tähtinapaisten roottorien keskimääräinen alkuepätasapaino napalevypaketin pituuden mukaan luokiteltuna.

Navan pituus	Napalevypaketin pituus [mm]		Epätasapaino [kgmm]		Otanta [kpl]
	Keskiarvo	Keskiarvo	Keskihajonta		
550-950	792	346	116		12
1050-1250	1174	443	210		17
1350	1350	435	231		19
1450-1750	1517	632	239		15

Irtonapaisten roottorien vertailussa navan pituuden mukaan tulokset ovat myös samaa suuruusluokkaa laakerivälin mukaan vertailtujen tulosten kanssa (taulukko 6). Ilmiö on sama kuin tähtinapaisissa roottoreissa.

Taulukko 6. Irtonapaisten keskimääräinen alkuepätasapaino navan pituuden mukaan luokiteltuna.

Navan pituus	Navan pituus [mm]		Epätasapaino [mm]		Otanta [kpl]
	Keskiarvo	Keskiarvo	Keskihajonta		
650-850	800	775	276		16
950-1150	981	604	283		16
1350	1350	961	478		13

Molemmissa roottorirakenteissa oli sama ilmiö. Jaettaessa roottorit keskiarvoluokkiin laakerivälin ja napojen pituuden mukaan, keskiarvoluokkien vertailtavat keskiarvot ovat hyvin lähellä toisiaan. Vertailun tulokset olivat siis lähes samanlaiset. Seuraavan alaot-sikon alla käsitellään napalevypaketin ja laakerivälin pituuden välisistä yhtäläisyyksistä.

Laakerivälin pituuden ja napalevypaketin pituuden yhtäläisyys vertailutuloksissa

Navan pituuden ja laakerivälin pituuden vertailujen tuloksissa oli selkeitä yhtäläisyyksiä. Sama ilmiö oli havaittavissa tähti- sekä irtonapaisissa roottoreissa. Taulukoiden keskiarvoja vertaillessa suurin osa arvoista on ± 50 mm:n tai kgmm:n sisällä. Liitteenä olevissa taulukoissa on esitetty yhtäläisyydet (liite 3, taulukot 2 ja 3).

Napalevypaketin pituuden ja laakerivälin pituuden vertailutulosten yhtäläisyydestä voidaan päätellä, että todennäköisesti epätasapainoa aiheuttava tekijä on molemmissa muuttujissa sama. Taulukoista huomataan myös, että laakeriväli ja napalevypaketin pi-tuus ovat keskimäärin suhteessa toisiinsa.

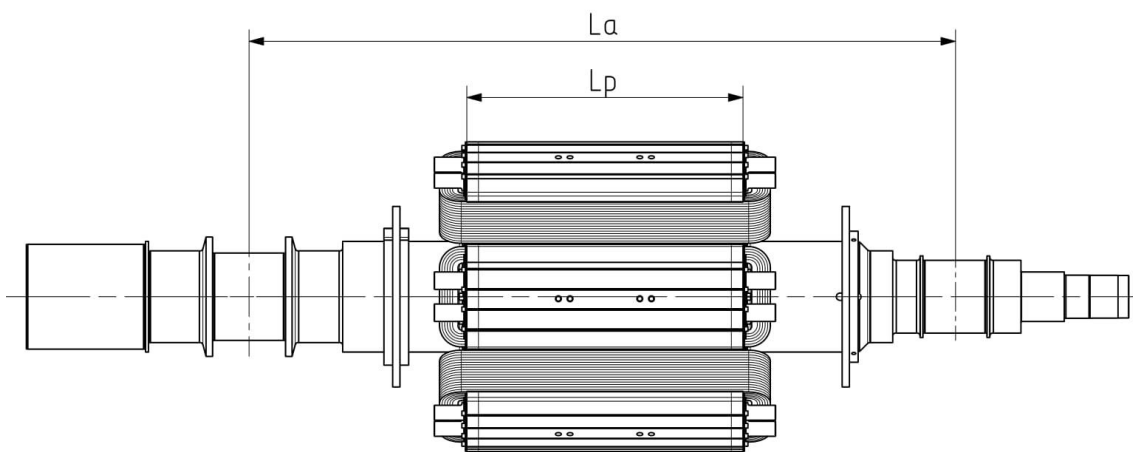
Jatkotutkimus napalevypaketin pituuden vaikutuksesta alkuepätasapainoon

Vertaamalla napalevypaketin pituutta ja laakerivälin pituutta alkuepätasapainoon, huomattiin napalevypaketin pituuden ja laakerivälin pituuden olevan selkeästi suhteessa

toisiinsa. Vertailusta ei voida päätellä, kummalla muuttujalla on suurempi vaikutus alkuepätasapainoon.

Vertailuun määritettiin muuttuja, jolla voidaan korostaa napalevypaketin pituuden vaikutusta alkuepätasapainoon. Käytännössä muuttujalla pyritään erottamaan roottorit, joissa on suhteessa pitkä laakeriväli ja lyhyt napalevypaketti ja vastakkain lyhyt laakeriväli ja pitkä napalevypaketti. Jos napalevypaketin pituudella on suurta merkitystä epätasapainoon, epätasapainon arvot olisivat muuttujan ääriarvoilla selkeästi erilaiset.

Muuttujan arvo lasketaan vähentämällä napalevypaketin pituus laakerivälistä (kuva 23). Muuttujan arvon kasvaessa napalevypaketti lyhenee suhteessa laakeriväliin ja arvon vähentyessä napalevypaketti pitenee suhteessa laakeriväliin.



Kuva 23. Havainnekuva napalevypaketin pituuden (L_p) vähentämisestä laakerivälistä (L_a).

Kaikista vertailun roottoreista laskettiin muuttujan arvot, eli laakerivälin pituus vähennettynä napalevypaketin pituudella. Muuttujan arvoista luotiin tähtinapaisille roottoreille neljä luokkaa, joista laskettiin vertailtavien ominaisuuksien keskiarvot (taulukko 7). Irtonapaisista muodostettiin kolme luokkaa (liite 3, taulukko 3). Tähtinapaisten roottorien vertailussa huomattiin, että suurin keskimääräinen epätasapaino ei ole muuttujan arvolta suurimmassa tai pienimmässä keskiarvoluokassa. Muuttujan vaihteluvälin ääripäissä pitäisi olla merkittävä ero epätasapainoissa, jos napalevypaketin pituudella olisi selkeä vaikutus alkuepätasapainoon.

Tähtinapaisten roottorien vertailussa suurin keskimääräinen alkuepätasapaino oli keskiarvoluokassa, jossa oli suurin laakeriväli. Irtonapaisten roottorien vertailussa

alkuepätasapaino ei ollut suurimmillaan luokassa, jossa on suurin laakeriväli. Irtonapais-
ten roottorien vertailuissa muuttujan keskimääräiset hajonnat olivat hyvin pieniä. Pienet
hajonnat johtuvat todennäköisesti pienistä laakerivälin ja navan pituuden vaihteluista.

**Taulukko 7. Jatkotutkimus tähtinapaisten roottorien napalevypaketin pituuden vaikutuk-
sesta alkuepätasapainoon. Laakerivälin pituus (La) ja Napalevypaketin pituus (Lp).**

La–Lp	Laakeriväli [mm]		Napalevypaketti [mm]		Epätasapaino [kgmm]		Otanta [kpl]
	K. arvo	K. hajonta	K. arvo	K. hajonta	K. arvo	K. hajonta	
1122,5-1424	2666	132	1364	34	321	184	7
1478	2786	208	1308	208	356	201	24
1524-1640	2911	179	1328	162	638	281	18
1655-1955	2692	218	929	262	381	154	14

Taulukosta huomattiin, että muuttujalla ei ole selkeää yhteyttä alkuepätasapainoon. Sel-
kein yhteys oli laakerivälillä. Voidaan päätellä, että laakerivälin pituudella on suurempi
merkitys epätasapainon muodostamisessa kuin napalevypaketin pituudella. Vertailun
epävarmuustekijät olivat kuitenkin suuret, joten vertailusta ei voida tehdä luotettavia joh-
topäätöksiä. Epävarmuustekijänä tähtinapaisten roottorien osalta vertailussa oli, että na-
palevypaketin pituus oli keskimäärin lähes sama kolmessa vertailuluokassa. Myös muut-
tujan arvoltaan pienimmässä keskiarvoluokassa otanta oli pienempi kuin muissa vertai-
luokissa. Ongelman ratkaisemiseksi tarvittaisiin todennäköisesti suurempi otanta root-
toreita.

Alkuepätasapainon muutos vuosina 2003–2019

Vertailussa tutkittiin tähtinapaisten roottorien valmistusvuosien suhdetta alkuepätasapai-
noin (taulukko 8). Vertailussa jaettiin roottorit valmistusvuoden mukaan kolmeen luok-
kaan. Kaikki vertailun roottorit oli valmistettu vuosien 2003–2019 välillä. Luokkia vertail-
lessa huomattiin, että tähtinapaisten roottorien keskimääräinen alkuepätasapaino on py-
synyt käytännössä samana vuosien 2003–2019 välillä. Tuloksesta voidaan päätellä, että
satunnaisotannalla on saatu suhteellisen tasainen jakauma kaikista tähtinapaisista root-
toreista, ja tähtinapaisten roottorien valmistusprosessi on pysynyt tasalaatuisena vuo-
sien kuluessa.

Taulukko 8. Tähtinapaisten roottorien keskimääräinen alkuepätasapaino vuosina 2003–2019.

Valmistusvuosi	Alkuepätasapaino [kgmm]		Otanta [kpl]
	Keskiarvo	Keskihajonta	
2003–2006	469	215	21
2007–2013	458	258	21
2014–2019	475	221	21

Akselimateriaalin vaikutus alkuepätasapainoon

Akselimateriaalin vaikutusta tutkittiin ainoastaan tähtinapaisten roottorien osalta. Akselimateriaalina käytetään rakenneterästä tai nuorrutusterästä. Otannassa olleiden roottorien akseleista suurin osa oli valmistettu nuorrutusteräksestä. Vuosina 2003–2007 puolet roottorien akseleista oli valmistettu rakenneteräksestä ja puolet nuorrutusteräksestä. Vuoden 2008 jälkeen kaikki akselit olivat valmistettu nuorrutusteräksestä. Vuosina 2003–2007 valmistetuissa roottoreissa ei havaittu selkeää korrelaatiota alkuepätasapainon ja akselimateriaalin välillä.

Alkuepätasapainojen satunnaiset vaihtelut

Roottorien alkuepätasapainoissa on myös suuria satunnaisia eroja. Ilmiö todettiin molemmilla naparakenteilla. Vertailutaulukossa oli rakenteeltaan identtisiä tai lähes samantaisia roottoreita, joiden alkuepätasapainojen vaihteluväli oli suuri. Ero epätasapainojen arvoissa oli suurimmillaan yli kolminkertainen. Vertailussa oli myös identtisiä roottorirakenteita, joiden alkuepätasapainot olivat lähes samat. Huomiota herätti myös muutama kolmen identtisen roottorin sarja, joissa kahden roottorin alkuepätasapainot olivat lähellä toisiaan ja kolmannen roottorin alkuepätasapaino poikkesi merkittävästi.

Useimmilla identtisillä tai lähes samantaisilla tähtinapaisilla roottoreilla alkuepätasapainon kasvaessa epätasapainojen kulmat lähestyvät toisiaan. Todennäköisesti roottorin alkuepätasapainoihin ja muodonmuutoksiin kutistusliitoksen aikana vaikuttaa muutkin kuin rakenteelliset tekijät, kuten kutistusliitoksen epätasainen jäähtyminen. Alkuepätasapainon vaihteluihin vaikuttaa myös roottorin osien kuten akselin, napalevyjen ja käämistysten valmistus- ja kokoonpanoepätarkkuudet.

3.6 Jatkoselvitys jälkikoneistusprosessista

Kappaleessa kuvataan tehtyjä havaintoja, toimenpiteitä ja kehitysehdotuksia selvitystyön aikana huomattujen jälkikoneistettujen roottorien suurien alkuepätasapainojen pohjalta.

3.6.1 Roottorien epätasapaino-ongelmat ja alihankinta

Roottorien vertailussa huomattiin jälkikoneistetuissa roottoreissa olevan keskimäärin suurempi alkuepätasapaino kuin jälkikoneistamattomissa roottoreissa. Jälkikoneistusprosessi oli otettu käyttöön samoihin aikoihin, kun epätasapaino-ongelmat tuotannossa alkoivat. Todennäköisesti tuotannossa ilmenneet ongelmat roottorien tasapainotuksessa ja loppukoestuksessa ovat seurausta jälkikoneistettujen roottorien suurista alkuepätasapainoista.

Loppukoestuksessa ilmenneitä värähtelyongelmia ei dokumentoida järjestelmällisesti, joten loppukoestuksessa ilmenneistä värähtelyongelmista löytyi vain vähän dokumentoitua tietoa. Jälkikoneistuksen yhteyttä tuotannon ongelmiin tukee kuitenkin selvitystyön yhteydessä löytynyt tuotannon poikkeama (ABB 2019b). Poikkeaman raportti oli eräästä sähkökoneesta, jossa oli jälkikoneistettu roottori. Sähkökoneessa oli ollut värähtelyongelmia loppukoestuksessa. Loppukoestuspaikalla oli tutkittu roottorin akselia ja akselista oli mitattu jälkikoneistetun ja jälkikoneistamattoman pinnan välillä erittäin suuria heittoa. Roottorin tasapainotusraportista huomattiin, että roottorilla oli erittäin suuri alkuepätasapaino. Todennäköisin juurisyy suuriin heittoihin ja alkuepätasapainoihin oli virhe jälkikoneistuksessa.

Jälkikoneistetuissa roottoreissa havaituista suurista alkuepätasapainoista otettiin yhteyttä alihankkijaan, joka koneistaa akseleita, roottoreita ja tekee jälkikoneistukset. Asiasta keskusteltiin puhelimitse ja aiheesta päätettiin pitää palaveri alihankkijan tehtaalla.

Palaverissa keskusteltiin jälkikoneistusprosessin eri osa-alueista. Alihankkijan mukaan roottorin keskittäminen sorviin on haastavin osuus jälkikoneistusprosessissa ja se on haasteellista kahdesta syystä:

- Roottorin napalevypaketissa ei ole tarkkaa referenssipintaa, josta mitattaisi napalevypaketin heitto suhteessa akseliin. Napalevypaketin ja akselin laakeripintojen välinen heitto on tärkeä minimoida keskittämällä roottori tarkasti sorviin, koska napalevypaketissa on suuri osa roottorin massasta. Eli käytännössä napalevypaketin painopiste akseli pitää saada samaan linjaan akselin laakeripintojen kanssa, jotta roottorin painopiste akseli on mahdollisimman lähellä roottorin tulevaa pyörimisakselia.
- Roottorin tyhjiökyllästys, jossa ulkopinnat kyllästetään epoksihartsilla ennen jälkikoneistusprosessia, aiheuttaa epätasaisuutta roottorin pinnoille. Epoksihartsipinnoite ei ole tasapaksu, joten se vaikeuttaa heiton mittaamista roottorin napalevypaketista.

Parannusehdotuksena epätasaiselle epoksihartsipinnalle olisi hioa pienissä määrin hartsia pois keskittämiseen tarvittavilta pinnoilta. Pintoihin voidaan jälkikäteen levittää lisää hartsia. Napalevypakettiin koneistettavia referenssipintoja ja niihin liittyviä kehitysehdotuksia on käsitelty kappaleessa 3.6.3.

Jälkikoneistuksen aikana on erittäin epätodennäköistä, että roottorin epätasapaino jää koneistajalta huomaamatta. Sorvatessaan epätasapainoista roottoria koneistaja huomaa varmasti heiton jälkikoneistetun pinnan ja kutistusliitospinnan välillä. Epätasapainon pitäisi tulla ilmi viimeistään, kun työvaiheiden välillä sorvi pysäytetään useita kertoja ja epätasapainoinen roottori pysähtyy ja hakeutuu aina samaan kohtaan ”epätasapaino alaspäin”. Alihankkija oli tietoinen jälkikoneistusprosessin uudemmassa tarkoituksesta, eli epätasapainon vähentämisestä. Tästä syystä herää epäily alihankkijan laadunvalvonnan luotettavuudesta. Alihankkijalta on myös mahdollisesti hävinnyt vuosien aikana merkittävää jälkikoneistusprosessiin liittyvää osaamista, esimerkiksi eläköitymisen seurauksena.

3.6.2 Pyörrevirta-anturien mittapintojen jälkikoneistus

Alihankkijan kanta jälkikoneistusprosessin määrittämiseen oli, että jälkikoneistus täytyy tehdä pyörrevirta-antureiden mittapinnoilla varustetuille roottoreille. Perusteluna oli, että mittapinnoille vaadittaviin geometrisiin toleransseihin ei päästä ilman jälkikoneistusta, koska kutistusliitoksen aikaiset lämpötilaerot aiheuttavat muodonmuutoksia akselissa.

Alihankkijan kantaa vastaan ovat kappaleessa 3.4.1 esitetyt huomiot, joilla voidaan perustella miksi jälkikoneistusprosessia ei välttämättä tarvittaisi pyörrevirta-antureiden mittapinnoilla varustetuissa roottoreissa:

- Laakeripinnat ja pyörrevirta-antureiden mittapinnat ovat vierekkäin ja kaukana kutistusliitospinnasta, jolloin lämpötilojen ja muodonmuutosten vaikutus jää pieneksi.
- Pyörrevirta-antureilla varustettuja tähtinapaisia roottoreita on tehty ennen jälkikoneistusprosessin määrittämistä ilman merkittäviä ongelmia.
- Jälkikoneistusprosessi on määritelty yhden projektin ongelmien pohjalta.

Jälkikoneistusprosessin tarpeellisuus pyörrevirta-antureilla varustetuille roottoreille pitää määrittää erillisellä jatkotutkimuksella. Tarpeellisuuden määrittämiseksi pitää tehdä selvitystyötä alihankkijan kanssa ja suorittaa käytännön mittauksia roottoreista. Johtopäätöksen tekemiseen ei tällä hetkellä ole tarpeeksi tietoa.

3.6.3 Jälkikoneistusprosessin kehittäminen

Jos jälkikoneistusprosessia halutaan tulevaisuudessa käyttää alkuepätasapainojen vähentämiseen, roottorien napalevyypakettien keskittämiseen pitää kehittää luotettava ratkaisu. Ratkaisuna roottorien keskitysongelmaan voisi olla napalevyypakettiin koneistettavat referenssipinnat, jotka olisivat keskeisiä napalevyypaketin kutistusliitospinnan kanssa. Kutistusliitoksen jälkeen referenssipinnoista voitaisiin jälkikoneistuksessa keskittää roottori napalevyypaketin kutistusliitospinnan suhteen.

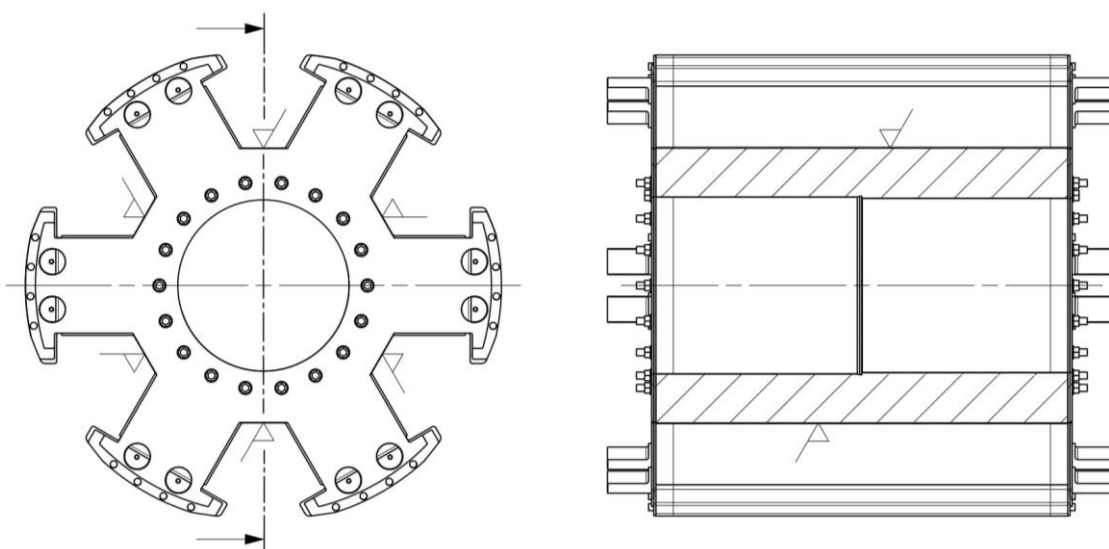
Napalevyypaketin kutistusliitospinta sorvataan pystysorvilla, jossa on usein pyörivät työkalut. Samalla pystysorvilla voidaan koneistaa napoihin referenssipinnat. Referenssipintojen koneistaminen napojen päälle eli napakenkään olisi yksinkertaisin ratkaisu. Kuitenkin napakengän geometrialla on suuri merkitys navan tehokkaassa toiminnassa, joten siihen ei tulisi tehdä muutoksia. Napakengässä on myös usein vaimennuskäämitys, joka asettaa lisää rajoitteita referenssipinnoille. Mahdollisena ratkaisuna olisi koneistaa referenssipinnat napojen väleihin, jolloin referenssipintojen koneistus voitaisiin tehdä kutistusliitospinnan kanssa samalla kiinnityksellä. Referenssipintojen koneistuksessa pitää

käyttää pystysorvin pyöriä työkaluja ja kulmapäätä. Alihankkijan konekannassa on referenssipintojen koneistukseen soveltuvia pystysorveja. Liitteenä 4 on esimerkkikuva pystysorvista, jossa on pyörivät työkalut ja kulmapää.

Roottorit tyhjiökylästetään kokoonpanon jälkeen, jolloin koneistetut referenssipinnat peittyvät epoksihartsilla. Referenssipinnat pitää hioa puhtaaksi ennen roottorin keskittämistä ja ne pitää kyllästää uudestaan ennen roottorin käyttöä. Hiottujen pintojen kyllästys voidaan tehdä levittämällä pinnoille ilmassa kuivuvaa hartsia.

Seuraavana on esitetty esimerkkinä kolme tapaa, jolla referenssipinnat olisi mahdollista toteuttaa. Referenssipinnat on esimerkeissä suunniteltu napojen väleihin ja koneistettavaksi pystysorvilla kutistusliitospinnan kanssa samalla kiinnityksellä.

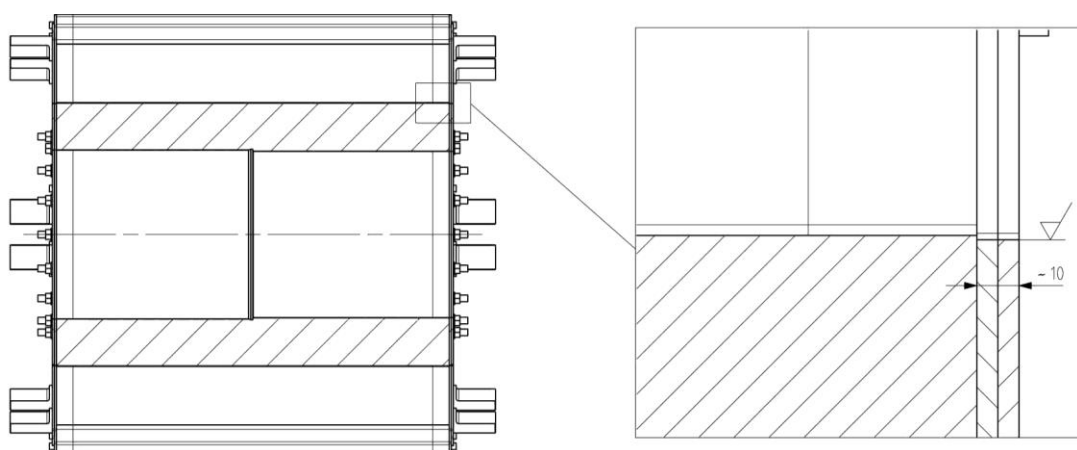
Yksinkertaisin ratkaisu olisi koneistaa napojen välit kokonaan (kuva 24). Näin koko napalevyypaketin pituudella olisi referenssipinta, joten keskittäminen kutistusliitoksen jälkeen voitaisiin tehdä mielivaltaisesti halutusta kohdasta napalevyypakettia. Todennäköisesti koko pintaa ei kuitenkaan voida käyttää keskittämiseen, koska referenssipintojen hiominen epoksihartsista ja niiden uudelleen kyllästäminen vaatisi paljon työtä. Epoksihartsia voidaan esimerkiksi hioa pois pieniltä alueilta pitkin referenssipintoja.



Kuva 24. Referenssipintojen koneistaminen napojen väleihin koko navan pituudelta.

Toinen mahdollinen tapa referenssipintojen koneistukselle olisi koneistaa referenssipinnat napalevypaketin päätylevyihin (kuva 25). Napojen välien kohdalla päätylevyjen muoto on lähes sama kuin napalevyillä, kuitenkin päätylevy on napalevyä muutaman millin pienempi. Päätylevyjen paksuus on 5 mm ja niitä asennetaan yksi tai kaksi riippuen napalevypaketin rakenteesta. Napalevypakettiin asennetaan kaksi päätylevyä, jos napalevypaketissa on vaimennuskäämitys. Kahden päätylevyn rakenteessa sisempi päätylevy on kuparia. Referenssipintojen koneistus olisi mahdollista tehdä napojen välissä oleville tasoille päätylevyissä.

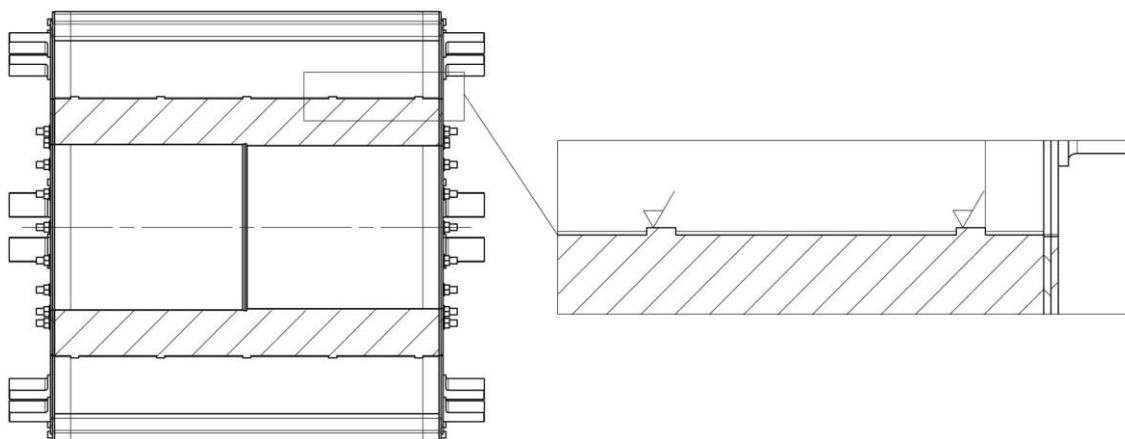
Mahdollisena ongelmana on referenssipintojen kapeus, jos roottorissa on vain yksi päätylevy. Liian kapea referenssipinta ei estä roottorin keskittämistä, mutta se lisää roottorin keskittämisen vaatimaa työtä. Toisena mahdollisena ongelmana on referenssipintojen puuttuminen roottorin keskialueelta, mikä voi estää roottorin tarkan keskittämisen ennen jälkikoneistusta.



Kuva 25. Napalevypaketin leikkauskuva, jossa on esitetty napalevypaketin päätylevyihin koneistettavat referenssipinnat. Referenssipinnat koneistettaisiin napalevypaketin kummallekin puolelle, jokaisen navan väliin.

Ratkaisuna voisi olla myös napalevypaketin pitkälle sivulle koneistetut referenssipinnat, jotka tulisivat hieman ulos napalevypaketin pinnasta (kuva 26). Referenssipinnat olisi mahdollista muodostaa esimerkiksi napalevypaketin ladonnan aikana latomalla halutuin välein napalevyjä, joissa olisi napojen välissä olake. Näin saataisiin halutuin välein referenssipintoja, joista roottori voitaisiin keskittää. Olakkeet pitäisi koneistaa referenssipinnoiksi kutistusliitospinnan koneistuksen yhteydessä. Olakkeissa on vähän koneistustyötä ja roottorin keskitystä voidaan tehdä monesta kohtaan. Ratkaisu vaatii kuitenkin

rakenteellisia muutoksia roottoriin, mikä todennäköisesti lisää napalevyypaketissa olevia haitallisia epäjatkuvuuskohtia ja sähköisiä häviöitä. Myös muutokset napalevyissä ja napalevyjen latomisessa voivat olla ongelma. Muutokset voivat kasvattaa kustannuksia, koska napalevyypakettiin tarvittaisiin lisää erilaisia napalevyjä. Ne todennäköisesti myös lisääisivät työtä ja virheiden mahdollisuuksia napalevyypakettien kokoonpanossa.



Kuva 26. Napalevyypaketin leikkauskuva, jossa on esitetty viisi olakkeista koneistettua referenssipintaa napojen väleissä.

Yleisinä ongelmana napalevyypakettiin tehtävissä koneistuksissa on, että koneistaminen voi mahdollisesti luoda napalevyihin haitallisia purseita. Koneistettaessa napalevyjä terä ei välttämättä lastua kaikkea koneistettavaa materiaalia. Terä voi muovata lastuttavaa materiaalia, jolloin lastuttavaan pintaan syntyy purseita. Napalevyypaketissa olevat purseet voivat toimia ”johtimina” ja johtaa napalevyihin indusoituneita pyörrevirtoja levyjen välillä (Boulter ym. 2014; 147). Purseet täytyy poistaa huolellisesti koneistuksen jälkeen.

Napojen väleihin koneistettavista referenssipinnoista tulee tasopintoja, joiden keskittäminen on haastavampaa kuin täysin pyöreältä pinnalta. Nykyisellä tähtinaparakenteella pyöreiden referenssipintojen koneistaminen on vaikeaa, koska roottorissa ei ole selkeitä alueita, joihin niitä voitaisiin koneistaa. Todennäköisesti myöskään kahdella kiinnityksellä ei saada koneistettua pyöreitä referenssipintoja ja niiden toteuttaminen vaatisi todennäköisesti muutoksia napalevyypaketin rakenteeseen.

Jälkikoneistaminen ABB:n Pitäjänmäen konetehtaalla

ABB:n Pitäjänmäen konetehtaalle on tarkoitus lähitulevaisuudessa hankkia uusi sorvi induktiokoneiden roottorien viimeistelyä varten. Sorvilla olisi mahdollista tehdä tähtinapaisten roottorien jälkikoneistuksia. Konetehtaan nykyisillä työstökoneilla ei voida jälkikoneistaa tähtinapaisia roottoreita. Uudella sorvilla pystyttäisiin jälkikoneistamaan kaikkia 710- ja 900-kokoluokan tähtinapaisia roottoreita. Uuteen sorviin ei kuitenkaan tule pyöriviä työkaluja. Jälkikoneistusprosessia olisi mahdollisuus kehittää sisäisesti, jos jälkikoneistus tehtäisiin ABB:n Pitäjänmäen konetehtaalla. Nykyisten alihankintaan perustuvien prosessien kehittäminen on kallista, koska alihankkijan laskutushinta on todennäköisesti merkittävästi korkeampi verrattuna tehtaan henkilöstön ja laitteiden kuluihin. Kehitysprosessin aikana joudutaan tekemään testejä ja koeprojekteja alihankkijan tiloissa.

4 Johtopäätökset ja suositukset

Luvussa käydään läpi selvitystyön tulokset ja tuloksista tehdyt johtopäätökset. Luvun kappaleissa on myös ehdotettu suosituksia, joilla voitaisiin mahdollisesti vähentää roottorien alkuepätasapainoa ja parantaa olemassa olevia työvaiheita ja prosesseja.

Kappaleessa 4.1 on lyhyt yhteenveto jälkikoneistusprosessista ja siinä on määritetty, millaisille roottoreille jälkikoneistus kannattaa tehdä. Kappaleessa esitetään myös merkittävimmät selvitystyön aikana havaitut roottorien alkuepätasapainoa aiheuttavat tekijät. Kappaleessa 4.2 on roottorien vertailun luotettavuusanalyysi, jossa pohditaan roottorien vertailua, vertailun luotettavuutta ja mitä vertailussa olisi voinut tehdä paremmin.

4.1 Johtopäätökset

Insinööriyön taustalla olivat ongelmat roottorien jäännösepätasapainoissa. Suuret epätasapainot olivat hidastaneet ja vaikeuttaneet roottorien tasapainotusta ja aiheuttaneet värähtelyongelmia sähkökoneiden loppukoestuksessa. Työn alussa yleinen käsitys oli, että epätasapaino-ongelmia oli pyritty korjaamaan jälkikoneistusprosessilla

Jälkikoneistusprosessi oli otettu käyttöön samoihin aikoihin, kun epätasapaino-ongelmat tuotannossa alkoivat. Selvitystyön aikana jälkikoneistuksen todettiin keskimäärin lisäävän alkuepätasapainoa toisin kuin oli tarkoitus. Tästä pääteltiin, että tuotannossa esiintyneet värähtelyongelmat ovat todennäköisesti yhteydessä jälkikoneistettujen roottorien suuriin alkuepätasapainoihin.

Insinööriyön tärkeimpänä tavoitteena oli määrittää roottorien ominaisuuksista kriteerit jälkikoneistuksen suunnittelulle. Toisena tavoitteena oli selvittää roottorien ominaisuuksista ja työvaiheista epätasapainoa aiheuttavia tekijöitä.

Työn alussa tavoitteet liittyivät selkeästi toisiinsa, koska jälkikoneistuksen oletettiin vähentävän roottorien alkuepätasapainoa. Olisi loogista jälkikoneistaa roottoreita, joiden rakenteessa tai työvaiheissa on monia epätasapainoa aiheuttavia tekijöitä. Työn edetessä oletus jälkikoneistuksen vaikutuksesta osoittautui vääräksi, joten tavoitteet osaltaan eriytyivät toisistaan.

4.1.1 Jälkikoneistusprosessi

Tähtinapaisten roottorien jälkikoneistusprosessi luotiin vähentämään pyörrevirta-antureiden mittapintojen epätarkkuuksia vuonna 2009. Keväällä 2018 jälkikoneistusprosessi nousi uudestaan esille ja jälkikoneistusprosessin soveltaminen alkoi myös roottoreihin, joissa ei ole pyörrevirta-antureiden mittapintoja. Prosessin uutena tarkoituksena oli roottorien alkuepätasapainojen vähentäminen.

Pyörrevirta-antureiden mittapintojen jälkikoneistus

Jälkikoneistusprosessin soveltamista kannattaa selvitystyön pohjalta jatkaa tähtinapaisiin roottoreihin, joissa on pyörrevirta-antureiden mittapintoja. Jälkikoneistuksella varmistetaan laakeripintojen ja mittapintojen samankeskeytyminen.

Pyörrevirta-antureilla varustettujen koneiden roottorien jälkikoneistusprosessiin kannattaa kuitenkin suhtautua kriittisesti. Jälkikoneistusprosessi määriteltiin vuonna 2009 yhden ongelmaprojektin pohjalta ja ongelmaprojekti saattoi olla yksittäistapaus. Juurisyyinä ongelmaprojektissa oli sähköinen heitto, jota jälkikoneistuksella ei voida korjata. Roottorien akseleissa pyörrevirta-antureiden mittapinnat ja laakeripinnat ovat vierekkäin, joten akselien mahdolliset muodonmuutokset vaikuttavat todennäköisesti mittapintojen ja laakeripintojen väliseen heittoon vain vähän.

Lähivuosina pyörrevirta-antureilla varustettuja tähtinapaisia sähkökoneita on suunniteltu niin vähän, että prosessin tutkimiseen ei toistaiseksi kannata käyttää resursseja. Kuitenkin ennen jälkikoneistusprosessin ohjeistamista, vuosina 2003–2009 tehtiin paljon pyörrevirta-antureilla varustettuja tähtinapaisia sähkökoneita. Jos tulevaisuudessa pyörrevirta-anturillisia koneita suunnitellaan enemmän, ABB:llä kannattaa selvittää, onko jälkikoneistusprosessi kokonaisuudessaan tarpeellinen vai riittäisikö esimerkiksi pelkkä mittapintojen sähköistä heittoa vähentävä kiillotus.

Alkuepätasapainon vähentäminen jälkikoneistamalla

Kappaleessa 3.5.2 kuvatun vertailun mukaan, jälkikoneistusprosessia ei kannata nykyisellään soveltaa roottorien alkuepätasapainon vähentämiseen. Nykyinen

jälkikoneistusprosessi ei vähennä roottorien alkuepätasapainoa verrattuna jälkikoneistamattomiin roottoreihin.

Jälkikoneistetuissa roottoreissa alkuepätasapainojen hajonta oli suuri. Osassa jälkikoneistetuista roottoreista oli erittäin suuret alkuepätasapainot. Alihankkijan edustan kommentti suuriin alkuepätasapainoihin oli, että ennen jälkikoneistusta roottori on haastavaa keskittää sorviin. Alihankkija toimittaa kaikista tilatuista roottoreista mittapöytäkirjat, joihin ei kuitenkaan ole mitattu heittoa jälkikoneistettujen ja jälkikoneistamattomien pintojen välillä. Alihankkijaa ohjeistettiin mittaamaan tulevaisuudessa heitot myös kyseisten pintojen välillä.

Laadukkaasti ja oikein tehty jälkikoneistus on todennäköisesti toimiva keino alkuepätasapainon vähentämiseksi varsinkin pitkille roottoreille. Jos jälkikoneistusprosessia halutaan tulevaisuudessa käyttää roottorien alkuepätasapainon vähentämiseen, kannattaa jälkikoneistusprosessia kehittää alihankkijan kanssa. Roottorin keskittäminen sorviin ennen jälkikoneistusta pitää kehittää luotettavammaksi. Esimerkiksi kappaleessa 3.6.3 on kuvattu referenssipintojen koneistusta napalevypakettiin, jolla keskittämistä voitaisiin mahdollisesti helpottaa. Kappaleessa on myös muutamia esimerkkejä referenssipintojen mahdollisesta toteutuksesta.

Vaihtoehtona alihankkijan kanssa tehtävään kehitystyöhön on myös jälkikoneistusprosessin siirtäminen tehtäväksi ABB:n Pitäjänmäen konetehtaalle. Lähitulevaisuudessa konetehtaalle on tulossa uusi sorvi roottorien koneistusta varten. Konetehtaalla tehtynä jälkikoneistuksen laadunvalvonta olisi helpompaa ja prosessia voisi kehittää tehokkaammin yhteistyössä sisäisen tuotannon kanssa.

4.1.2 Roottorien epätasapainoon vaikuttavat tekijät

Laakeriväli, kutistusliitos ja taipuma vertailussa

Selvitystyön aikana tehdyn vertailun selkein alkuepätasapainoa aiheuttava tekijä oli roottorin laakeriväli. Kappaleessa 3.5.3 kuvatussa vertailussa huomattiin, että keskimäärin roottorien alkuepätasapaino kasvaa lähes lineaarisesti laakerivälin kasvaessa. Napalevypaketin pituuden ja laakerivälin suhde alkuepätasapainoon huomattiin olevan myös

lähes sama. Molemmat muuttujat ovat usein suhteessa roottorin akselin pituuteen, joka on mahdollisesti syynä alkuepätasapainon lineaariseen kasvuun. Vertailussa yritettiin selvittää, kumman muuttujan vaikutus alkuepätasapainoon on suurempi vertailemalla laakerivälin ja napalevypaketin pituuksien suhdetta. Kuitenkaan pituuksien suhteen vertailusta ei saatu niin luotettavaa tulosta, että siitä voitaisiin tehdä johtopäätöksiä. Todennäköisesti suuremmalla roottorien otannalla olisi mahdollista saada luotettavampi tulos. Muuttujien lähes sama suhde alkuepätasapainoon viittaa siihen, että alkuepätasapainoa aiheuttava tekijä on molemmissa muuttujissa sama.

Mahdollisena juurisyyntä alkuepätasapainon lineaariseen kasvuun on, että kutistusliitoksen aikana napalevypaketista akseliin johtuva lämpö aiheuttaa suuremman lämpölaajenemisen pidemmissä akseleissa. Myös pidempi napalevypaketti varastoi enemmän lämpöä ja lämmittää akselia pidemmältä matkalta.

Vertailussa todettiin, että alkuepätasapainon ja siten laakerivälin kasvaessa roottorien epätasapainojen välinen kulma pieneni. Ilmiö voidaan tulkita roottorin taipumisena kutistusliitoksen aikana. Roottorin taipuu kaarevaan muotoon, joten epätasapainojen kulmat lähestyvät toisiaan. Akselin taipuminen kaarevaan muotoon voidaan tulkita aiheutuvan roottorin epäkeskeisestä lämpenemisestä kutistusliitoksen aikana. Kutistusliitoksen aiheuttamia muodonmuutoksia on käsitelty tarkemmin kappaleessa 3.2.1.

Pienillä alkuepätasapainon arvoilla epätasapainojen kulmien asema oli satunnainen, joten pienillä alkuepätasapainoilla roottorin voidaan tulkita pysyvän lähes suorana. Tulkin-
taa tukee myös irtonapaisten roottorien epätasapainojen kulmien asettuminen satunnaisesti, koska irtonapaisten roottorien voidaan olettaa olevan lähes suorina. Alkuepätasapainon ja epätasapainojen välisten kulmien suhteelle ei selvitystyön aikana havaittu muuta syytä kuin akselin kaareva taipuma. Epätasapainojen kulmien suhde roottorin taipumaan pitää tulevaisuudessa varmistaa käytännössä mittaamalla roottoreita tasapainotuksen yhteydessä.

Monissa rakenteeltaan identtisissä tai lähes identtisissä roottoreissa oli suuria eroja alkuepätasapainojen välillä. Sama alkuepätasapainon ja epätasapainojen kulmien välinen suhde oli havaittavissa myös identtisissä roottoreissa. Verrattaessa identtisiä roottoreita, joilla on suuret erot alkuepätasapainossa, alkuepätasapainon kasvaessa

epätasapainojen kulmat lähestyvät toisiaan. Havainnon pohjalta voidaan päätellä, että roottorien taipumiseen kutistusliitoksen aikana vaikuttaa muitakin kuin rakenteellisia tekijöitä.

Vertailussa selvitettiin myös akselimateriaalin ja roottorin valmistusvuoden suhdetta alkuepätasapainoon. Tuloksena molemmista vertailuista oli, että muuttujilla ei ollut selkeää suhdetta alkuepätasapainoon. Akselimateriaalin vertailussa oli pieni otanta, joka heikensi vertailun tuloksen luotettavuutta.

Tähtinapaisten roottorien kutistusliitosprosessia olisi tulevaisuudessa mahdollista tutkia ainakin seuraavilla tavoilla:

- Kappaleessa 3.2.1 on mainittu hallittu jäähdyttäminen, joka on tarkoitettu roottorin kutistusliitoksen aikaisten muodonmuutosten vähentämiseen. Hallitussa jäähdyttämisessä roottorin napalevypakettia jäähdytetään toisesta päästä ja vastakkainen pää pidetään eristettynä. Hallitun jäähdyttämisen on huomattu eräässä tutkimuksessa vähentävän kutistusliitoksen jälkeen tapahtuvia muodonmuutoksia. Hallitun jäähdyttämisen soveltamista tähtinapaisiin roottoreihin kannattaa tutkia enemmän ja mahdollisesti kokeilla prosessia käytännössä.
- Roottorin kutitusliitoksen aikaisia lämpötilaerojen muutoksia olisi mahdollista tutkia esimerkiksi lämpökameralla. Sillä voitaisiin tutkia, esimerkiksi kuinka tasaisesti napalevypaketti on lämmennyt uunissa, miten epätasaisesti napalevypaketti keskimäärin jäähtyy tai kuinka paljon akseliin johtuu lämpöä napalevypaketista. Lämpökameralla tehtyjä mittauksia voitaisiin verrata esimerkiksi roottorista kutistusliitoksen jälkeen mitattuihin heittoihin.

Kappaleessa 3.2.2 on kuvattu vaimennuskäämityksen mahdollisia vaikutuksia roottorin muodonmuutoksiin ja epätasapainoon. Roottorien vertailussa vaimennuskäämitysten ja alkuepätasapainon välille ei löytynyt yhteyttä. Suurimmassa osassa roottoreita oli neljä vaimennuskäämiä. Näiden pituus on sama kuin napalevypaketin pituus, joten vertailussa vaimennuskäämityksen pituus muuttujana sisältyi napalevypaketin pituuteen.

Selvitystyön pohjalta roottorien tasapainotuksen yhteydessä voisi kokeilla ainakin kolmen uuden työvaiheen tai -tavan soveltamista.

- Tasapainotuskone mittaa roottorin kulma-asemaa roottorin pyöriessä tasapainotuksen aikana. Roottorit asetetaan tasapainotuskoneeseen aina kiilaura ylöspäin, jotta tasapainotuksessa mitattavat epätasapainojen kulmat olisivat vertailukelpoisia tasapainotusten välillä. Kuitenkin useissa roottoreissa ei ole kiilauraa ja ilmeisesti kiilaurattomat roottorit asetetaan tasapainotuskoneeseen ilman selkeää logiikkaa. Kiilaura on useimmissa roottoreissa samassa linjassa kuin akselin napalevyypaketin puoleinen kaapeliporaus. Roottorit ilman kiilauraa kannattaisi asemoida kaapeliporauksen mukaan, jolloin kaikki roottorit olisivat samassa asennossa ennen tasapainotusta. Toimenpide parantaisi rottorien tasapainotusraporttien vertailukelpoisuutta.
- Tasapainotuksen yhteydessä kannattaisi mitata tähtinapaisten rottorien heitto roottorin eri pinnoilta ja dokumentoida mittaukset. Mittauksiin kuluva aika olisi todennäköisesti muutama minuutti, ja rottorien kokoonpanon jälkeisistä heitoista saataisiin käytännön mittausdataa. Mittausdatan pohjalta olisi mahdollista tehdä järjestelmällistä tutkimusta rottorien ominaisuuksien ja kutistusliitoksen vaikutuksesta rottorien epätarkkuuksiin ja alkuepätasapainoon.
- Tähtinapaisia rottoreita olisi ehkä mahdollista oikaista kaasuliekillä. Prosessia on kuvattu tarkemmin kappaleessa 3.2.1. Oikaisuprosessia käytetään yleisesti teollisuudessa ja sitä on myös käytetty induktiokoneiden rottorissa. Induktiokoneiden rottorikokoonpanolta olisi mahdollista saada apua ja ohjeistusta prosessiin liittyen. Prosessi tehdään rottorin ollessa tasapainotuskoneessa. Roottorista mitataan heitto ja kuumennetaan rottorin akselia heiton vastakkaiselta puolelta, läheltä napalevyypakettia. Kuumennettu kohta jäähtyessään kutistuu alkuperäistä pienempään tilavuuteen, joten se taivuttaa rottorin akselia heiton vastakkaiseen suuntaan.

Pyörimisliikkeen aiheuttamat muodonmuutokset

Kappaleessa 3.3.3 on kuvattu mahdollisia pyörimisliikkeiden aiheuttamia muodonmuutoksia rottoreissa. Epätasapainon ja keskipakoisvoiman aiheuttamia rasituksia ja

muodonmuutoksia roottoreissa ei voida nykyisessä tasapainotusprosessissa ottaa täysimääräisinä huomioon, koska roottorit tasapainotetaan selvästi nimelliskierrosnopeutta matalammalla kierrosnopeudella. Ongelmana tähtinapaisissa roottoreissa on mahdollinen käämitysten ja napalevyjen asettuminen. Käämitykset ja napalevyt saattavat liikkua keskipakoisvoimien vaikutuksesta roottorin pyöriessä korkeilla kierroksilla, ja roottorin tasapainotila voi muuttua tilapäisesti tai pysyvästi.

Mahdollisia jatkotoimenpiteitä selvitystyön pohjalta:

- Pyörimisliikkeen aiheuttamista muodonmuutoksista korkeilla kierrosnopeuksilla ei ole selkeää dokumentoitua dataa, joten ilmiötä pitäisi tutkia. Käämitysten ja napalevyjen asettumista ja siirtymiä olisi mahdollista tutkia loppukoestuksen yhteydessä esimerkiksi venymäliuskamittauksilla tai seuraamalla sähkökoneiden värähtelytasojen muutoksia koestuksen eri vaiheissa. Konetehtaalla ilmiön vaikutusta on pidetty merkittävänä. Mittauksilla voitaisiin määrittää ilmiön vaikutukset ja todellinen suuruusluokka.
- Käämitysten ja napalevyypaketin asettumisen aiheuttama epätasapaino saadaan otettua huomioon, jos tasapainotus tehdään roottorin nimelliskoepudella. Ehdoton parannus tahtikoneiden roottorikokoonpanoon olisi tukevampi tasapainotuskone, jolla pystyttäisiin tasapainottamaan tähtinapaisia roottoreita nimelliskoepudella.
- Parannuksena olisi myös ohjeistaa loppukoestushenkilökunta dokumentoimaan ja raportoimaan selkeämmin ongelmista, joiden oletetaan liittyvän roottorien epätasapainoon ja epätasapainon aiheuttamiin värähtelyihin. Loppukoestukseen olisi mahdollista luoda esimerkiksi lisäraporttipohja, joka värähtelyongelmien ilmetessä täytetään ja tallennetaan projektikansioon. Ongelmien dokumentointi mahdollistaisi värähtelyongelmien laadukkaamman järjestelmällisen tutkimisen.

4.2 Roottorien vertailun luotettavuusarviointi

Osiossa pohditaan kappaleessa 3.5 esitetyn roottorien ominaisuuksien vertailun menetelmiä ja luotettavuutta.

Otanta vertailussa oli kohtuullisen hyvä. Kokonaisuudessaan tähtinapaisia roottoreita oli valittu noin kolmannes kaikista toiminnanohjausjärjestelmästä löytyneistä tähtinapaisista roottoreista. Sillä saatiin luotettava otanta tähtinapaisista roottoreista. Jälkikoneistettujen roottorien vertailu kärsi, koska niitä oli tehty vähän ja ne kaikki olivat mukana vertailussa. Vertailussa käytetyt irtonapaiset roottorit olivat noin 7% kaikista järjestelmästä löytyvistä vastaavan kokoluokan roottoreista. Kokonaisuudessaan irtonapaisia roottoreita oli tehty noin kolminkertainen määrä tähtinapaisiin roottoreihin verrattuna.

Otannan koko oli osaltaan kompromissi. Suurempi otanta olisi ollut parempi vertailun kannalta, mutta otannan hankkiminen olisi vienyt enemmän työaikaa. Otannan hankkiminen piti tehdä ”käsini” ja se oli työlästä. Roottorien tasapainotusraporttien tuloksia jouduttiin taulukoimaan Excel-työkirjaan yksi kerrallaan, koska tasapainotusraportit olivat skannattuna pdf-muodossa. Vertailutaulukkoon dokumentoitiin myös monia ominaisuuksia ja mittatuloksia, joista ei saatu tutkimukseen selkeitä tuloksia.

Vertailua tehtiin laakerivälin ja napalevyypaketin tapauksissa jakamalla otanta mahdollisimman tasakokoisiin luokkiin vertailtavan muuttujan absoluuttisten arvojen mukaan. Osaan vertailtavista luokista jäi selkeästi vähemmän roottoreita kuin muihin luokkiin. Tämä mahdollisesti heikentää tulosten luotettavuutta.

Vertailun jälkeen huomattiin, että vertailu olisi pitänyt tehdä jälkikoneistamattomien tähtinapaisten osalta kahdessa osassa. Konekokoluokkia olisi pitänyt vertailla omissa taulukoissaan. Samalla otantaa olisi pitänyt valikoida vähemmän sattumanvaraisesti ja hakea enemmän 4-napaisia roottoreita. Esimerkiksi 4-napaisissa roottoreissa kutistusliitos tehdään alihankintana ja mahdollisesti roottorin akselia, joten kyseisten muuttujien vaikutus jäi selvittämättä. Kaksiosainen vertailu olisi kuitenkin vaatinut selkeästi suuremman otannan roottoreita.

5 Yhteenveto

Insinööriyön alussa lähtötilanteena oli tähtinapaisissa roottoreissa ilmenneet epätasapaino-ongelmat. Oletettiin, että ongelmia oli yritetty korjata soveltamalla jälkikoneistusprosessia roottoreihin. Jälkikoneistusprosessilta puuttui selkeät suunnittelukriteerit, joten työn tavoitteena oli määrittää kriteerit roottorien jälkikoneistuksen suunnittelulle. Toisena tavoitteena oli roottorien rakennetta ja valmistusprosessia tutkimalla löytää merkittävimpiä roottorien alkuepätasapainoa aiheuttavia tekijöitä.

Tulosten yhteenveto

Selvitystyön edetessä jälkikoneistuksen todettiin olevan vaikea toteuttaa niin, että prosessi vähentäisi roottorien alkuepätasapainoa. Tulos oli merkittävä, koska jälkikoneistusprosessin vaikutuksen oletettiin olevan päinvastainen. Jälkikoneistusprosessin todettiin vaativan jatkokehitystä, jotta se soveltuisi alkuepätasapainojen vähentämiseen. Työssä esitettiin kehitysehdotuksia jälkikoneistusprosessin parantamiseksi. Tuloksena suositeltiin lopettamaan nykyisen jälkikoneistusprosessin käyttö, jos tarkoituksena on roottorin alkuepätasapainon vähentäminen. Johtopäätöksenä tuloksista oli, että jälkikoneistusprosessi oli aiheuttanut osan tuotannossa havaituista epätasapaino-ongelmista.

Jälkikoneistus on määritetty tarpeelliseksi ABB:n suunnitteluohjeistuksessa tähtinapaisille roottoreille, joihin koneistetaan pyörrevirta-antureiden mittapintoja. Selvitystyön pohjalta kyseenalaistettiin pyörrevirta-antureiden mittapinnoilla varustettujen roottorien jälkikoneistuksen tarpeellisuus. Jälkikoneistuksen tarpeellisuuden selvittämiseksi tarvitaan kuitenkin lisää tietoa roottorien epätarkkuuksista ja esimerkiksi kutistusliitoksen aiheuttamista muodonmuutoksista.

Työn toisen tavoitteena tutkittiin roottorin rakenteen ja roottorikokoonpanon työvaiheiden vaikutusta alkuepätasapainoihin. Työssä onnittiin vahvistamaan teoriaa kutistusliitoksen aiheuttamista muodonmuutoksista ja niihin liittyvistä alkuepätasapainoista. Teoriasta ei ollut aikaisemmin tehty selkeää tutkimusta ABB:llä. Lähes kaikki teoriaan liittyvä tieto oli ”hiljaista tietoa”, joten työn perusteella teorialle saatiin tutkimusperustaa. Kutistusliitoksen aiheuttamia muodonmuutoksia pitää vielä tulevaisuudessa tutkia käytännön tasolla, jotta ilmiöstä ja sen vaikutuksista saataisiin selkeä ja kokonaisvaltainen käsitys.

Työn tavoitteiden toteutuminen ja pohdinta

Työn ensimmäisenä tavoitteena oli suunnittelukriteerien määrittäminen jälkikoneistusprosessille. Tavoitteen tarkoituksena oli selvittää minkälaisia roottoreita kannattaa jälkikoneistaa. Työn edetessä huomattiin, että jälkikoneistusprosessi ei nykyisellään sovellu alkuepätasapainojen vähentämiseen. Eli käytännössä merkittävin työn tavoitetta tukenut hypoteesi osoitettiin vääräksi. Johtopäätöksenä oli suositella jälkikoneistusprosessin lopettamista. Työn tuloksena havaittiin jälkikoneistusprosessin soveltumattomuus alkuepätasapainojen vähentämiseen, jälkikoneistuksen rooli tuotannon epätasapaino-ongelmissa ja esitettiin useita suosituksia jälkikoneistusprosessin jatkokehitykseen. Näiden havaintojen pohjalta voidaan todeta työn tavoitteen toteutuneen suhteellisen hyvin.

Toisena tavoitteena oli selvittää merkittävimpiä roottorien alkuepätasapainoja aiheuttavia tekijöitä. Tavoite liittyi työn alussa ensimmäiseen tavoitteeseen ja työn edetessä tavoitteista tuli selkeästi erilliset. Roottorien alkuepätasapaino saatiin työn aikana yhdistettyä useisiin rakenteellisiin ominaisuuksiin ja valmistusmenetelmiin. Tuloksena todettiin useita roottorien alkuepätasapainoihin vaikuttavia tekijöitä, niiden taustaa ja monille ennestään tunnetuille tekijöille luotiin vahvempi pohja. Tuloksena esitettiin myös suosituksia työn havaintojen pohjalta. Työn tavoitteen voidaan sanoa suurilta osin täyttyneen.

Työn aikana ei ymmärretty kyseenalaistaa ja päivittää käytettyjä tutkimusmenetelmiä. Työn kokonaiskuva alkoi hahmottua vasta työn loppupuolella, joten tarve päivittää tutkimusmenetelmiä huomattiin liian myöhään. Silloin niihin ei voitu aikarajoitteiden takia enää vaikuttaa. Esimerkiksi roottorien vertailusta olisi ollut mahdollista saada kattavampia ja luotettavampia tuloksia, jos vertailumenetelmiä olisi ymmärretty kehittää työn edetessä.

Kokonaisuudessaan työ olisi pitänyt sijoittaa pidemmälle aikavälille tai työn aloituspäivä olisi pitänyt määrittellä tarkemmin. Työhön piti kuulua roottorien käytännön mittauksia, joilla olisi voinut tutkia työn aikana havaittuja ilmiöitä käytännössä. Pidempi aikaväli tai tarkasti määritetty aloituspäivä olisi mahdollistanut paremmin roottorien käytännön mitaukset. Aikaa työn tekemiseen kului noin kolme kuukautta ja siinä ajassa mittauksia ei päästy tekemään. Syinä tähän olivat tähtinapaisten roottorien pieni valmistusmäärä ja poikkeustila konetehtaalla.

Lähteet

ABB Motors and Generatorsin sisäiset lähteet

ABB, 2009a. Root Cause Analysis of Shaft measurement surface runout problem on AMZ Motor. ABB sisäinen dokumentti.

ABB, 2009b. Työohje roottorin tasapainottamiselle. P-11605 (ohje on vanha, mutta ohjeessa on kattava kuvaus oikaisuprosessista, uudempi oikaisuohje esimerkiksi 3AFP9400526/P-03998). ABB sisäinen dokumentti.

ABB, 2016. Dynamic balancing of rotor. Excel-laskentapohja, ABB sisäinen dokumentti.

ABB, 2018a. Akselin asennus roottorikeskukseen kutistusliitoksella. ABB sisäinen dokumentti.

ABB, 2018b. Roottorilevypaketin ladonnan työohje (tähtiroottori). ABB sisäinen dokumentti.

ABB, 2018c. Tahtikoneen roottorin kokoonpano. ABB sisäinen dokumentti.

ABB, 2019a. Roottorin rakenne. ABB Oy. PIE/PT-ohjeisto. ABB sisäinen dokumentti.

ABB, 2019b. Tuotannon poikkeama numero 256625332. ABB sisäinen dokumentti.

ABB, 2019c. Värähtelymittalaitteiden suunnittelu. PIE/PT-ohjeisto. ABB sisäinen dokumentti.

ABB, 2020a. "Standardinapojen" rakenne (moott. ja gen.). PIE/PT-ohjeisto. ABB sisäinen dokumentti.

ABB, 2020b. V-tyyppin kestopagneettiroottorin valmistus. ABB sisäinen dokumentti.

Patwardhan, S. S.; Porsby, G.; Shinde, S. & Wood, B. 2011. Balance instability and vibration on 6 MW induction motor rotor. ABB sisäinen dokumentti.

Shibutani, J. 2004. Tahtikoneen toimintaperiaate. Tietämyskanta. ABB sisäinen dokumentti.

Silander, E. 2001. Standardiratkaisujen käyttö tahtikoneiden valmistuksessa. ABB sisäinen dokumentti.

Julkiset lähteet

ABB. 2020c. ABB:stä lyhyesti. Verkkoaineisto. <<https://new.abb.com/fi/abb-lyhyesti>>. Luettu 4.4.2020.

Adams M. L. jr. 2000. Rotating Machinery Vibration from Analysis to Troubleshooting. Marcel Dekker Inc. U.S.A.

Allaire, P. E.; Barrett, L. E.; & Gunter, E. J. 1976. Balancing of multimass flexible rotors. Proc. 5th Turbomachinery Symp. Texas. A&M University.

Astarita, A.; Carlone, P & Rubino, F. 2018. Thermo-Mechanical Finite Element Modeling of the Laser Treatment of Titanium Cold-Sprayed Coatings. University of Salerno & University of Naples. Italy.

ASM. 1988. ASM Handbook Volume 14: Forming and Forging. 3. painos. ASM international. U.S.A.

Beaty, W. H. & Kirtley, J. L. 1998. Electric Motor Handbook. McGraw-Hill Companies inc. U.S.A.

Bently Nevada. 1999. Runout White Paper. Baker Hughes Company.

Berry, J. E. 2001. Field Dynamic Balancing Using Portable Instruments. s. 4-7, Technical Associates of Charlotte.

Boldea, I. 2015. Synchronous Generators. CRC Press. U.K.

Boulter, E. A; Culbert, I.; Dhrirani H. & Stone, G. C. 2014. Electrical Insulation for Rotating Machines. 2. painos. John Wiley & Sons. U.S.A.

Heikel, C. 2010, Development of Support for Field Winding of Rotor of Electric Synchronous Machine with Salient Poles. Diplomityö. Aalto-yliopisto. Aaltodoc-tietokanta.

Howes, M.; Inoue, T. & Totten, G. 2002. Handbook of Residual Stress and Deformation of Steel. ASM International. U.S.A.

IEC 60947-5-2:2019. Low-voltage switchgear and controlgear – Part 5-2: Control circuit devices and switching elements – Proximity switches. Geneva. Switzerland: International Electrotechnical Commission.

ISO 21940-2:2016. Mechanical vibration — Rotor balancing — Part 2: Vocabulary.

ISO 21940-11:2016. Mechanical vibration — Rotor balancing — Part 11: Procedures and tolerances for rotors with rigid behavior.

ISO 21940-14:2016. Mechanical vibration — Rotor balancing — Part 14: Procedures for assessing balance errors.

Karkela, L; Kervinen, M.; Meriläinen, P.; Parkkila I. & Seppänen R. 2004. MAOL-taulukot. Otava. Keuruu.

Kula, E. & Weiss, V. 1982. Residual Stress and Stress Relaxation. Springer Science+Business Media. U.S.A.

Leskinen, V. 2008. Sähkökoneen magnetointinapojen valmistuksen kehittäminen. Insinööriyö. Ei julkaistu.

Littrel, N. 2005. Understanding and mitigating shaft runout. Orbit. Vol. 25. No 3.

Luomi, J. 1995. Sähkövoimatekniikka. Teknillinen korkeakoulu. Sähkömekaniikan laboratorio.

Masubuchi, K. 1980. Analysis of Welded Structures. Massachusetts Institute of Technology. Pergamon Press Inc. U.S.A.

McMillan, R. B. 2003. Rotating Machinery: Practical Solutions to Unbalance and Misalignment. Fairmont Press, U.S.A.

Poursaeidi, E. & Yazdib, K. M. 2018. Application of Hot Spotting Method for the Straightening of a Large Turbine Rotor. University of Zanjan. Department of Mechanical Engineering.

Pyrhönen, J. 2008a. Pyörivän sähkökoneen suunnitleminen. Luku 2. BL30A0400 Design of an electrical machine -kurssin opetusmoniste. Lappeenrannan teknillinen yliopisto. Sähkötekniikan osasto.

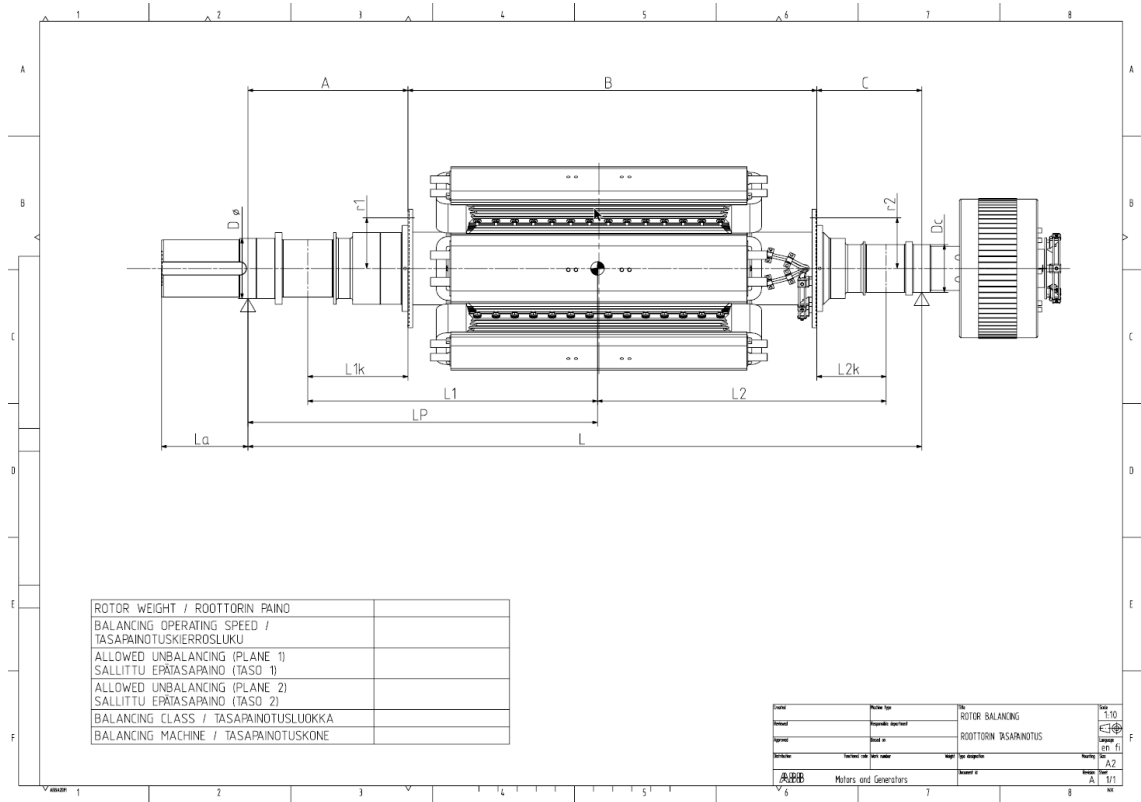
Pyrhönen, J. 2008b, Pyörivän sähkökoneen suunnitleminen. Luku 3. BL30A0400 Design of an electrical machine -kurssin opetusmoniste. Lappeenrannan teknillinen yliopisto. Sähkötekniikan osasto.

Santanen T. 2005. Tahtigeneraattorin tähtiroottorin kustannustehokas valmistaminen. Diplomityö. Teknillinen korkeakoulu. Aaltodoc-tietokanta.

Schenck. 1995. User's Instructions for Horizontal Balancing Machine. Schenck Type H8V. Käyttöohje. SCHENCK RoTec GmbH.

Soraluce. 2019. SORALUCE Vertical Turning Centers. Tuotekatalogi. Danobat Group.

Totten, G. E. 2007. Steel Heat Treatment: Metallurgy and Technologies. Taylor & Francis Group. U.S.A.



Balancing report

User

JAHA

Type data

Rotor type AMZ 0900SM06 LSB
 Last change 21.4.2016 8:42
 Set speed 550 rpm

ABC geometry

Position of correction planes



Distance a 284 mm
 Distance b 1491 mm
 Distance c 535 mm
 Radius 1 265 mm
 Radius 2 265 mm



Measuring Results, Run: 1

4/21/2016

Rotor ID 7152HG102
 Measuring speed 550 rpm

Unbalance

Correction Plane 1 1738 g 37 ° 18.4 * Tol
 Correction Plane 2 1579 g 49 ° 16.7 * Tol

Correction

Correction Plane 1 - Mass (Add) 1,74 kg 217 ° 18.4 * Tol
 Correction Plane 2 - Mass (Add) 1,58 kg 229 ° 16.7 * Tol

Measuring Results, Run: 3

4/21/2016

Rotor ID 7152HG102
 Measuring speed 550 rpm

Unbalance

Correction Plane 1 32,4 g 159 ° in Tol
 Correction Plane 2 22,3 g 139 ° in Tol

Correction

Correction Plane 1 - Mass (Add) 32,4 g 339 ° in Tol
 Correction Plane 2 - Mass (Add) 22,3 g 319 ° in Tol

Date

Signature

Stamp

Taulukko 1. Jälkikoneistettujen keskimääräinen alkuepätasapaino suhteessa laakeriväliin.

Laakeriväli	Laakeriväli [mm]		Alkuepätasapaino [kgmm]		Otanta [kpl]
	Keskiarvo	Keskiarvo	Keskihajonta		
2505-2828	2710	712	701	8	
3028	3028	1269	618	7	
3174-3296,5	3270	702	225	8	

Taulukko 2. Tähtinapaisten roottorien laakerivälin pituuden ja napalevypaketin pituuden yhtäläisyys vertailutuloksissa. Napalevypaketin pituudesta on käytetty termiä ”navan pituus”. Korostettuna keskiarvot, jotka eivät ole ± 50 yksikön sisällä.

Laakeriväli	Kesk. Laakeriväli [mm]	Kesk. navan pituus [mm]	Kesk. Epätasapaino [kgmm]	Otanta [kpl]
2428-2590	2501	871	335	14
2628-2790	2702	1209	422	17
2828-2905	2861	1321	494	17
2990-3228	3082	1525	639	16

Navan pituus	Kesk. Laakeriväli [mm]	Kesk. navan pituus [mm]	Kesk. Epätasapaino [kgmm]	Otanta [kpl]
550-950	2500	792	346	12
1050-1250	2737	1174	443	17
1350	2803	1350	435	19
1450-1750	3066	1531	631	16

Taulukko 3. Irtonapaisten roottorien laakerivälin pituuden ja napalevypaketin pituuden yhtäläisyys vertailutuloksissa. Korostettuna keskiarvot, jotka eivät ole ± 50 yksikön sisällä.

Laakeriväli	Kesk. Laakeriväli [mm]	Kesk. navan pituus [mm]	Kesk. epätasapaino [kgmm]	Otanta [kpl]
2590-2790	2676	836	785	14
2905-2990	2950	930	621	15
3020-3190	3169	1275	890	16
Navan pituus	Kesk. Laakeriväli [mm]	Kesk. navan pituus [mm]	Kesk. epätasapaino [mm]	Otanta [kpl]
650-850	2744	800	775	16
950-1150	2940	981	604	16
1350	3190	1350	961	13

Taulukko 4. Jatkotutkimus irtonapaisten roottorien navan pituuden vaikutuksesta alku epätasapainoon. La on laakeriväli ja Lp on navan pituus

La-Lp	Laakeriväli [mm]		Navan pituus [mm]		Epätasapaino [kgmm]		Otanta [kpl]
	K. arvo	K. hajonta	K. arvo	K. hajonta	K. arvo	K. hajonta	
1740	1740	19	850	0	782	263	8
1840-1855	1843	64	1274	159	836	473	18
1955-2340	2067	69	876	128	697	292	19



Kuva 1. Pyörivillä työkaluilla varustettu pystysorvi. Sorvin karalla on kulmapää, joka mahdollistaa työstämisen kappaleen säteen suunnassa (Soraluce 2020: 13).