



Osaamista
ja oivallusta
tulevaisuuden
tekemiseen

Santtu Lamroth

Sähkökoneen esivalmistettu kytkentärenkaisto

Metropolia Ammattikorkeakoulu

Insinööri (AMK)

Sähkö- ja automaatiotekniikan

tutkinto-ohjelma

Insinöörityö

Tekijä Otsikko	Santhu Lamroth Sähkökoneen esivalmistettu kytkentärenkaisto
Sivumäärä Aika	41 sivua + 7 liitettä 2.5.2019
Tutkinto	Insinööri (AMK)
Tutkinto-ohjelma	Sähkö- ja automaatiotekniikan tutkinto-ohjelma
Ammatillinen pääaine	Sähkövoimatekniikka
Ohjaajat	Production Development Manager Juha Jernström Lehtori Sampsa Kupari
<p>Insinööritöiden tavoitteena oli kehittää generaattorin staattorin käämintään uusi työmenetelmä. Perimmäisenä ajatuksena oli löytää tapa suorittaa kääminnän kytkentä nykyistä nopeammin. Tarkastelun alla oli pitkälle vakioitu tahtigeneraattori, jonka tuotannon kappalemäärät ovat suuret ja tuotantoputki verrattain lyhyt.</p> <p>Työtä varten käytiin läpi aiheeseen liittyviä työ- ja suunnitteluohjeita, keskusteltiin tuotannon asiantuntijoiden kanssa ja tarkasteltiin staattorikääminnän tuotantoaikoja. Tarkoituksena oli löytää ratkaisu, jossa kääminnän tekemän kytkentärenkaiston esivalmistusta lisätäisiin mahdollisimman paljon. Tarkempaan selvitykseen valikoitui kaksi toisistaan poikkeavaa menetelmää, joista toinen lisää kääminnän alihankinnan osuutta ja toinen enemmän tuotannon työvaiheiden samanaikaisuutta.</p> <p>Insinööritöiden lopputuloksena suunniteltiin valmiiksi eristetty kytkentärenkaisto kuusihaaraiselle käämitykselle tarvittavine valmistusdokumentteineen ja työpiirustus, jossa esitetään renkaiden asennus kokonaiseksi renkaistoksi. Lisäksi aiheesta laadittiin lyhyt muistio, jonka tarkoituksena on ohjata mahdollisten tulevien neljä- ja seitsemän haaraisten kytkentöjen kytkentärenkaiden suunnittelua ja toteutusta. Suunniteltiin myös periaatteet kytkennän tekemiseen nykyisellä tavalla, mutta samanaikaisesti vyyhtien asennuksen kanssa.</p> <p>Läpimenoaikatarkastelussa ja menetelmien vertailussa arvioitiin uusien työmenetelmien lyhentävän kokonaisläpimenoaika. Erityisesti valmiiksi eristettyjen renkaiden käytön edut vaikuttavat sen verran hyviltä, että hanketta olisi syytä kokeilla ja käynnistää pilottiprojekti.</p>	
Avainsanat	generaattori, läpimenoaika, staattorin käämintä, alihankinta

Author Title	Santtu Lamroth Pre-fabricated Connection Rings for Electric Machine
Number of Pages Date	41 pages + 7 appendices 2 May 2019
Degree	Bachelor of Engineering
Degree Programme	Degree Programme in Electrical and Automation Engineering
Professional Major	Electrical Power Engineering
Instructors	Juha Jernström, Production Development Manager Sampsa Kupari, Senior Lecturer
<p>This final year project was commissioned by ABB Oy, Motors and Generators and the purpose of it was to develop Synchronous Generator stator winding by designing a new winding procedure. The goal was to find out a way to carry out the winding connection faster, so that delivery cycle of a generator project could be shortened.</p> <p>For this project, several factory standards and instructions were studied, and production time information was examined. Selected method to shorten the winding connection time was to increase the prefabrication and subcontracting of the connection components. Two different methods were in focus.</p> <p>As result of this project, a new, pre-insulated connection ring for six parallel branches -connection was designed. The connection ring design included manufacturing documents, installation drawings and design instructions for expanding the method to four and seven parallel branches -connections. Also, basic procedures for a different way to carry out the connection were designed.</p> <p>Different connection methods were compared, and it was estimated that new methods could decrease the working time at stator winding. Especially the new design of the connection rings seems to be a technique which should be tested further and a commissioning project should be started.</p>	
Keywords	Generator, Delivery cycle, Stator winding, Subcontracting

Sisällys

Lyhenteet ja sanasto

1	Johdanto	1
2	Tuotannon prosessien esittely	1
2.1	Staattorin valmistus	2
2.1.1	Staattorin kääminta	4
2.1.2	Staattorin valmistuksen muut työvaiheet	6
2.2	Muut työvaiheet	8
3	Staattorikääminnän uudet menetelmät	9
3.1	Lattakuparista valmistettu, valmiiksi eristetty renkaisto	10
3.1.1	Renkaiden valmistus	11
3.1.2	Renkaiden eristys	13
3.1.3	Renkaiden asennus	15
3.1.4	Valmiiksi käämityn staattoripaketin nosto	18
3.2	Muotolankakuparista esivalmistettu renkaisto	21
3.3	KytKentäratkaisujen vertailu	25
4	Suunnittelu	26
4.1	Suunnittelun toimintamalli	26
4.2	Uusi kytKentärengasnimike	29
4.3	Muut suunnittelutyöt	32
5	Läpimenoaika- ja tilatarkastelu	34
5.1	Läpimenoaika	34
5.2	Tilatarkastelu	35
6	Yhteenveto	39

Liitteet

Liite 1. Piirustus: 3AFP9202587-CONNECTION RING 6-BRANCH. Liite vain työn tilaajan käyttöön

Liite 2. Piirustus: 3AFP9202852-CONNECTION RING 6-BRANCH ASSEMBLY. Liite vain työn tilaajan käyttöön

Liite 3. Piirustus: 3AFP9204037-INSULATED CONNECTION RING 6-BRANCH. Liite vain työn tilaajan käyttöön

Liite 4. Piirustus: 3AFP9203718-ST. WINDING RINGS CONNECTION. Liite vain työn tilaajan käyttöön

Liite 5. Suunnittelumuistio. Liite vain työn tilaajan käyttöön

Liite 6. Staattorin noston tilatarkastelu ja yleisnäkymät kytkentärenkaiston 3D-mallista

Liite 7. Linkkejä

Lyhenteet ja sanasto

ADAF 10	Seostamaton kuumavalssattu teräslevy, paksuus 10 mm. P-standardi 3AFP9883263.
APGNF 0.18	Kiille-eristyspaperi, fleece-kiille-fleece, sinkkinaftenoitu. P-standardi 3AFP9910591.
BKFD 35x10	Lattakupari 35 mm x 10 mm, vedetty, happivapaa. P-standardi 3AFP9883286.
BKXS	Vannekupari, pehmeäksi hehkutettu, eristetty kiillepaperinauhalla. Koodin viimeinen kirjain määrittää eristysluokan. P-standardi 3AFP9879083.
BOPOK	Polyesterikuitunauha, lämpökutistuva. P-standardi 3AFP9884762.
BPGNW	Kiille-eristysnauha. P-standardi 3AFP67472705.
BPHH	Eristysputki. P-standardi 3AFP9911542.
BPRNA	Lasikuituteippi. P-standardi 3AFP13967946.
BPRUG 25x0.09	Pintanauha, lämpökutistuva. P-standardi 3AFP10213070.
BXAHC 2,5	Hopeajuotelanka, halkaisija 2,5 mm. P-standardi 3AFP9911420.
L1	Staattorin levypaketin eli aktiiviosien pituus.
LP	Roottorin napasydämen eli aktiiviosien pituus, aina sama kuin L1.

PDM	Product Data Management. Suunnittelujärjestelmä.
PIE/PT-ohje	Suunnitteluohje.
P-ohje	Pitäjänmäen konetehtaan tuotannon työohje.
P-standardi	Pitäjänmäen konetehtaan tehdas- ja ostostandardi alihankittavalle materiaalille.
SAP	ABB:n käyttämä toiminnanohjausjärjestelmä.
t	Metrinen tonni. 1000kg.
Team Center	ABB:n käyttämä PDM-järjestelmä.

1 Johdanto

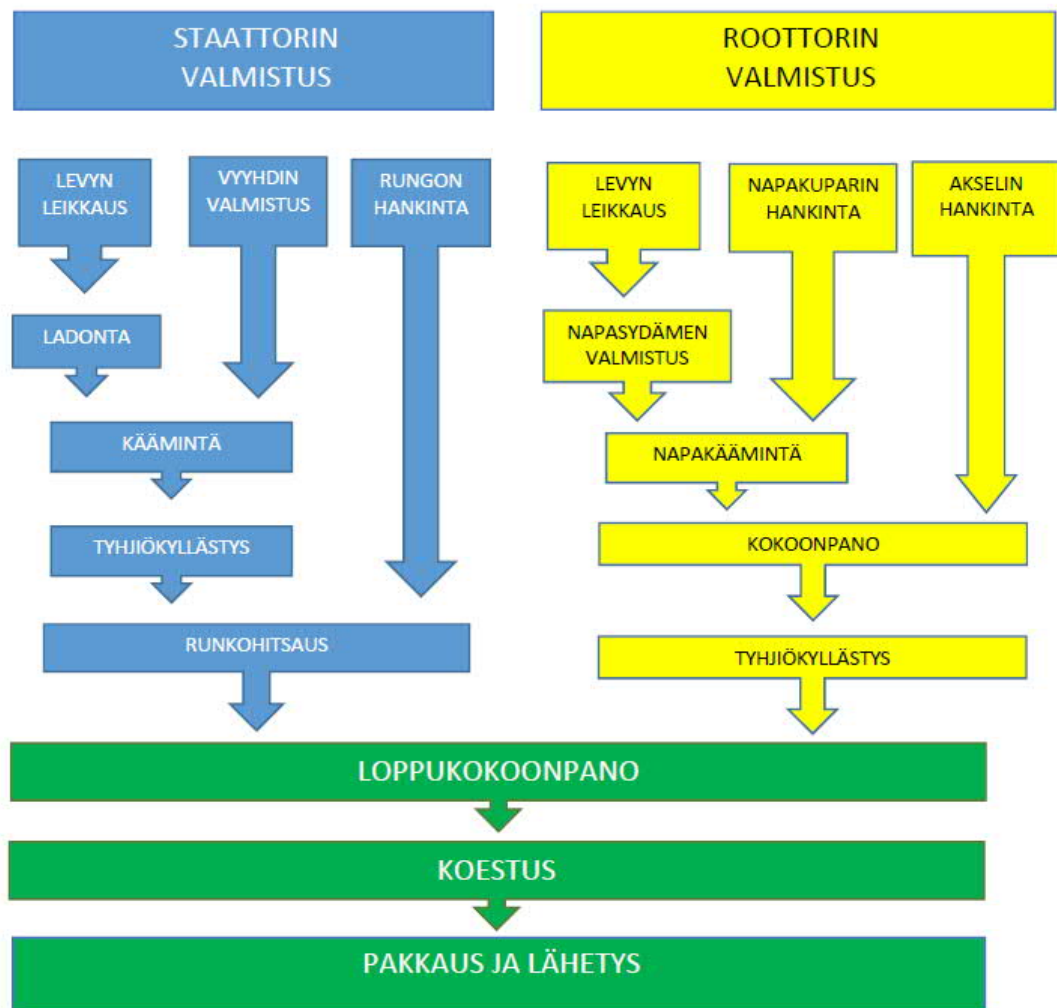
Insinööriyön tavoitteena on kehittää uusi työtapo ja -menetelmä staattorin kääminnän nopeuttamiseksi. Lähtökohtana on kääminnässä käytettävien osien ja komponenttien mahdollisimman pitkälle viety esivalmistus. Staattorin käämintä on ollut viime vuosina tahtikoneiden tuotannon ”pullonkaula” ja kyseistä työvaihetta nopeuttamalla voidaan saada aikaan kustannussäästöjä kokonaistuotantoajan pienentyessä. Tarkastelun alla on erityisesti tahtigeneraattori sen lukumäärällisesti runsaan tuotannon ja pitkälle viedyn vakioinnin vuoksi.

Työn tilaaja on ABB Oy, Moottorit ja generaattorit, Tahtikoneet ja se toteutettiin Helsingin konetehtaalla Pitäjänmäellä. Työssä hyödynnetään tahtikoneiden suunnittelun ja tuotannon käytössä olevia suunnitteluohjelmia, tehdasstandardeja ja työohjeita.

Staattorikääminnän nopeuttamiseksi etsitään ratkaisuja, joita voidaan vertailla toisiinsa ja myös nykyiseen tapaan toimia. Työssä esitetään suunnittelumenetelmät ja toteutustavat, joilla ratkaisuja haetaan. Esitettyihin uusiin toimintamalleihin esitetään tarvittavat perustelut ja ohjeet, miten uudet työmenetelmät voidaan ottaa käyttöön. Lisäksi arvioidaan uusien menetelmien vaikutus läpimenoaikaan.

2 Tuotannon prosessien esittely

Tahtikoneiden tuotantoprosessi jakaantuu useisiin eri vaiheisiin, joista osaa pystytään viemään eteenpäin samanaikaisesti toisten vaiheiden kanssa. Mitä enemmän samanaikaisia tuotannon työvaiheita on, sitä nopeammin valmis generaattori saadaan tuotantoputkesta läpi. Kuvassa 1 on esitetty yksinkertaistettu hahmotelma eri tuotantovaiheiden samanaikaisuuksista. On huomattava, että kuvassa on esitetty asia vain periaatteen tasolla, eli mitkä työvaiheista olisi mahdollista toteuttaa samaan aikaan, jos tehtaalla olisi tuotannossa vain yksi kone kerrallaan. Todellisuudessa eri työvaiheiden alkaminen riippuu monesta tekijästä.



Kuva 1. Tuotannon eri työvaiheiden samanaikaisuus

Tämä työ keskittyy vain staattorin kääminnän nopeuttamiseen joko lisäämällä esivalmistuksen ja alihankinnan osuutta tai lisäämällä oman tuotannon samanaikaisuutta. Tässä luvussa esitellään yleisluonteisesti myös muita tuotannon prosesseja, jotta tuotantoputkesta saadaan kokonaisvaltaisempi kuva.

2.1 Staattorin valmistus

Staattorin valmistuksessa on useita eri työvaiheita, joita voidaan suorittaa samaan aikaan toistensa kanssa. Osa komponenteista valmistetaan alihankintana, esimerkiksi

staattorirunko johon valmis staattoripaketti kiinnitetään hitsaamalla. Osa työvaiheista voidaan suorittaa tai koko staattoripaketti valmistaa myös ABB:n muulla tehtaalla kuin Helsingin konetehtaalla, esimerkiksi Virossa. Kuvassa 2 nähdään runkoon hitsattu staattoripaketti käännön jälkeen. Ennen rungon kääntöä staattoripaketti kulkee tuotantoputkessa pystyasennossa.



Kuva 2. Valmis staattorirunko hitsaamossa.

Yksi erityispiirre eri dieselkonevalmistajille meneviin generaattoreihin on tärinän kesto. Jotkin generaattorit asennetaan yhteiselle alustalle dieselmoottorin kanssa ja näin dieselin aikaansaama tärinä välittyy myös generaattorille. Toisissa dieselmoottori-generaattoriseteissä alustat ovat erilliset ja ainoa tärinän välittäjä on akselikytkin. Tärinän kesto tulee huomioida kaikissa rakenteissa, esim. staattoripaketin runkoon kiinnityksessä ja kääminnän kytkentärenkaiston tuennassa. Tarkastelun alle on valittu näissä rajoissa tärinöiden suhteen hankalin tilanne ja näin ollen tässä työssä esitettyjä ratkaisuja voidaan soveltaa kaikkien dieselvalmistajien generaattoreissa P-ohjeet huomioiden.

2.1.1 Staattorin käämintä

Lyhykäisyydessään kääminnässä asennetaan vyyhdet hitsatun levypaketin uriin, kytkeään juottamalla käämityskaavion mukaisesti, eristetään kytkennät, valmistellaan ulosotot loppukokoonpanoa varten ja koestetaan staattori. Muita työvaiheita edellisten lisäksi tai niihin kuuluvina ovat

- PT-100-anturien asennus, joka tehdään ennen vyyhtien asennusta.
- Risteilyjen teko tasoitusvirtojen vähentämiseksi, tehdään vyyhtien asennuksen jälkeen.
- Väliyhdistäjien teko kytkennän yhteydessä
- Kytkentärenkaiden mitoitus ja valmistus.

Nykyisen työtavan mukaan ei ole mahdollista edesauttaa kytkentää ennen vyyhtien asentamista vaan se toteutetaan pitkälti ammattitaitoa vaativana käsityönä vyyhtien asennuksen jälkeen. Mikäli kytkentärenkaat voitaisiin esivalmistaa alihankintana tai edes esivalmistella samaan aikaan vyyhtien asennuksen yhteydessä niin vähentäisi se kääminnän läpimenoaikaa. Myös vaikutus kokonaisläpimenoaikaan olisi tuntuva, semminkin kun staattorikäämintä on viime vuosina ollut tuotannon ”pullonkaula”, johtuen pitkälti suuresta käsityön määrästä ja tilarajoista.

Kuvassa 3 on esitetty keskeneräinen staattori tuotantopaikallaan kääminnässä. Vasemalla alhaalla näkyy asentamattomia vyyhtejä ja ylhäällä näkyvät vielä kytkemättömät vyyhdet. Nykyisellä työtavalla kaikki vyyhdet tulee olla asennettuna ja ulosottoja lukuun ottamatta kytkettynä ennen kuin kytkentärenkaita voidaan edes mitoittaa.



Kuva 3. Staattori kääminnässä.

Tahtigeneraattorin staattorin sisähalkaisija on n. 2020 mm ja ulkohalkaisija n. 2500 mm, näin ollen kovin montaa työntekijää ei mahdu esimerkiksi asentamaan vyyhtejä uriin samanaikaisesti tai suorittamaan kytkentää N-pään ulkokehälle. Myöskään staattorien kapasiteettimäärän kasvattaminen kääminnässä samaan aikaan ei varsinaisesti nopeuttaisi läpimenoaika johtuen kääminnän tuotantotilojen rajallisuudesta (= seinät tulevat vastaan). Näin ollen läpimenoaika ei voida lyhentää palkkaamalla ja kouluttamalla lisää henkilökuntaa, ainakaan mainittavissa määrin.

2.1.2 Staattorin valmistuksen muut työvaiheet

Tuotannon prosessissa ensimmäinen työvaihe on sähkölevyjien leikkaus puristamossa. Johtuen joidenkin tahtigeneraattoreiden suuresta vakioinnista, leikkausta ohjaavat ja määrittävät suureet ja arvot ovat vakiokoneilla aina samat, näin ollen leikkauskoneiden asetuksissa on vakiintunut toimintamalli.

Valmiiksi leikatut levyt siirretään ladontaan, jossa ne ladotaan päällekkäin ladontahäkissä. Tässä työvaiheessa määrävänä mittana on L1, joka tarkoittaa paketin tehollista pituutta, puhutaan myös aktiiviosien pituudesta. Tarkastelussa olevissa tahtigeneraattoreissa L1-mitta on joko 1150 mm tai 1200 mm. Ladontatyön jälkeen seuraa paketin puristus, hitsaus ja viimeistely (esim. paketin urat hiotaan). Kuvassa 4 nähdään valmiiksi ladottu ja selkápalkkeihin hitsattu staattorin levypaketti.

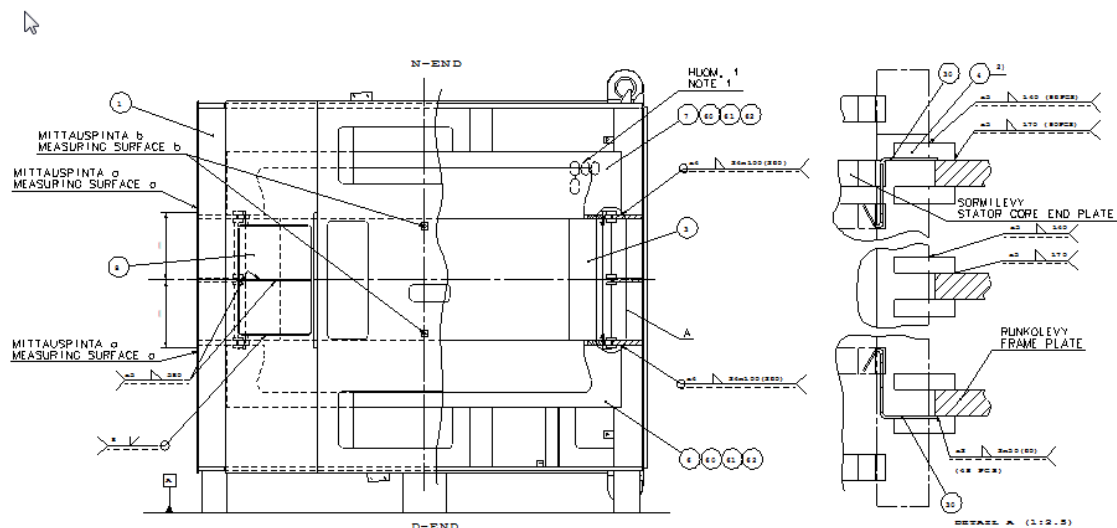


Kuva 4. Valmis AMZ-moottorin levypaketti ladonnassa.

Samaan aikaan jo levyjen leikkauksen kanssa voidaan toteuttaa vyyhtien valmistus. Pääpiirteittäin tässä työvaiheessa muotolankakupari muotoillaan oikean pituiseksi ja muotoiseksi vyyhdeksi ja sen ympärille kiedotaan eristemateriaali. Nykyään useimmiten vyyhdet asennetaan kyllästämättöminä ja koestamattomana suoritetaan koko staattorin tyhjiökyllästys samalla kertaa.

Kääminnän yhdistettyä vyyhdet ja levypaketin kuten edellä kuvailtiin, siirretään valmis staattoripaketti tyhjiökyllästettäväksi. Tyhjiökyllästyksessä käytettävä hartsi kovettaa kääminnän tukisidokset ja jäykistää rakenteen.

Valmis staattoripaketti luovutetaan runkohitsaamoon, jossa se keskitetään ja hitsataan kiinni valmiiseen, alihankittuun runkoon. Hitsaus tapahtuu hitsaamalla siteitä, tietynlaisia hakasia paketin selkäpalkkeihin ja rungon välilevyjen kehälle. Kuvassa 5 oikealla on esitetty yksityiskohta siteiden, osa nro. 4, hitsauksesta.



Kuva 5. Ote tahtigeneraattorin hitsauspiirustuksesta. [7.]

Tarkastelun alla olevan generaattorin suurempi tärinä vaikuttaa myös sidepalojen määrään, kuten on vaikuttanut myös rungon tukirakenneratkaisuihin ja hitsisaumojen koon. Valmis staattorirunko on näiden työvaiheiden jälkeen siirrettävissä tuotantoputkessa eteenpäin.

2.2 Muut työvaiheet

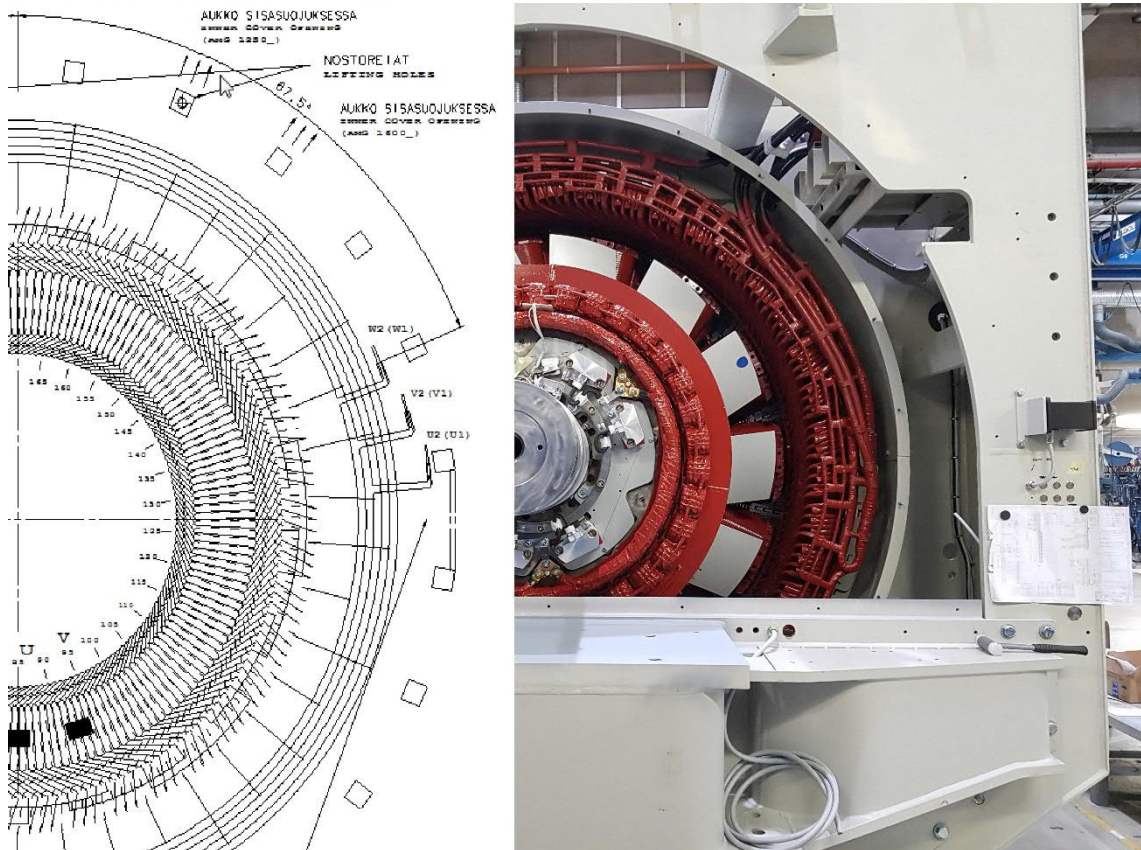
Roottorin valmistus konetehtaalla alkaa myös puristamosta kuten staattorinkin. Napasydämen sähkölevyt leikataan vakiomuotoon, puristetaan yhteen ja kiinnitetään toisiinsa valmiiksi napasydämeiksi. Napasydämen valmistuttua se käämitään, tämä työ ositetaan usein myös ulkopuolelta. Valmis napa joko tyhjiökyllästetään tai asennetaan suoraan roottorikeskus/akseli – kokoonpanolle ja kyllästetään kokonaisena.

Pääpiirteissään roottorin kokoonpano tapahtuu seuraavasti:

- Sylinterinmuotoinen roottorikeskus krympataan kiinni akselin laippaan.
- Asennetaan herätinkoneen roottori akselille.
- Asennetaan keskukselle valmiiksi käämityt navat.
- Suoritetaan käämitukien ym. osien asennus ja roottorin kytkentä.
- Kyllästetään ja tasapainotetaan roottori.

Roottorin ja staattorin valmistuttua liitetään ne yhteen loppukokoonpanossa. Täällä myös asennetaan generaattorin varusteet, oheislaitteet ja suojukset, laakeroidaan kone ja suoritetaan tarvittavat tarkastukset ja mittaukset (mm. ilmaväli ja laakerivälykset).

Yksi loppukokoonpanossa tapahtuva työ liittyy läheisesti staattorikäämintään, liitännän teko. Käämintä jättää ulosotot paljaina kuparilattoina staattorin N-päähän. Näihin ulosottoihin liitetään tarvittavat, suunnittelussa määritellyt (valitaan virran ja jännitteen mukaan) kaapelit, jotka kiinnitetään ulosottoihin puristusliitoksien. Kaapelit viedään liitântäkiskoille, ykköspäät pää- eli vaiheliitântään ja kakkospäät virtamuuntajien kautta neutraalikiskolle. Jotta säästetään materiaalia, aikaa ja vaivaa, tulee ulosottojen sijaita Staattorin käämitys-piirustuksessa esitettyssä asemassa kehällä, kuvassa 6 on havainnollistava esimerkki siitä, miten asia toteutuu käytännössä.



Kuva 6. Ote käämityskaaviosta ja sen toteutuksesta. [8.]

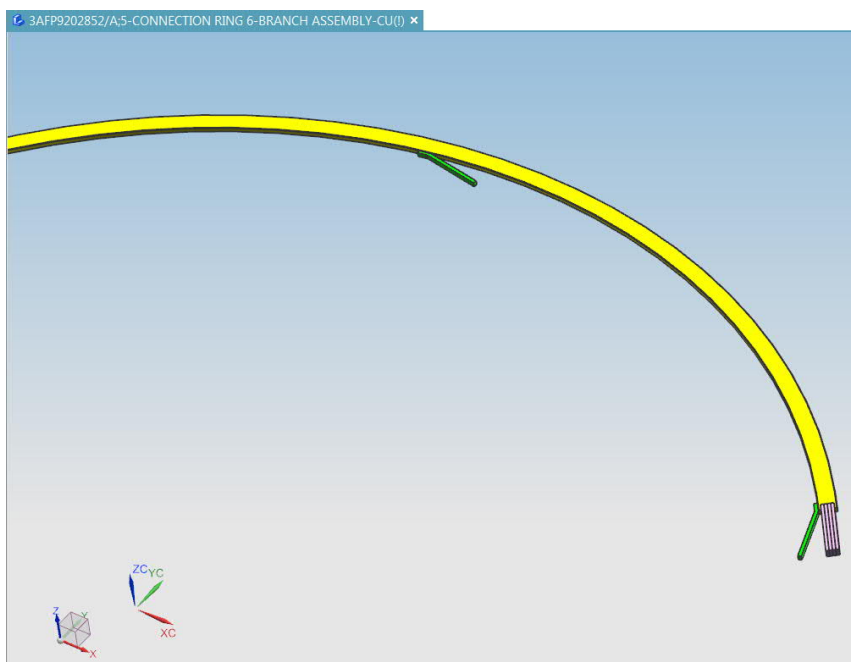
Loppukokoonpanon jälkeen generaattori koestetaan. Koekentällä ajetaan generaattorille tarvittavat testit ja suoritetaan vaaditut mittaukset, paikalla on usein myös asiakas. Koestuksen jälkeen on vuorossa maalaus. Maalin kuivuttua lähettämö pakkaa generaattorin, krymppaa akselikytkimen, asentaa kuljetuslukitukset ja lisää määränpäässä asennettavat varusteet. Vakio TAHTI -generaattorit kiinnitetään useimmiten valmiiksi kiinni lopulliseen, jaettavaan alustaan kuljetuksen ajaksi.

3 Staattorikääminnän uudet menetelmät

Tätä työtä varten tehtiin kaksi erilaista rakennetta tai tapaa suorittaa käämityksen kytkentä, jotka eroavat nykyisestä käytännöstä. Ensimmäinen rakenne lisää alihankinnan osuutta huomattavasti toista enemmän ja myös eroaa nykyisestä kytkentämenetelmästä enemmän kuin toinen.

3.1 Lattakuparista valmistettu, valmiiksi eristetty renkaisto

Renkaiden valmistuksessa päädyttiin 35 mm x 10 mm happivapaasta lattakuparista katkaistuihin ja mankeloituihin renkaisiin. Jokaiseen renkaaseen juotetaan kiinni rinnakkaisien haarojen lukumäärän mukaan eristetystä lattakuparista valmistetut BKXS 9x7 -sisääntulot ja BKXS 14.6x6 -ulosotot. Renkaat eristetään valmiiksi lukuun ottamatta sisääntulojen ja ulosottojen päitä. Renkaiden kokoonpanoituokset tehdään alihankinnassa, eristys voidaan tehdä joko alihankinnassa tai omin voimin. Kuvassa 7 nähdään renkaan kokoonpanon 3D-mallista osa. Sisääntulot on esitetty vihreällä ja ulosotot haalean violetilla värillä.



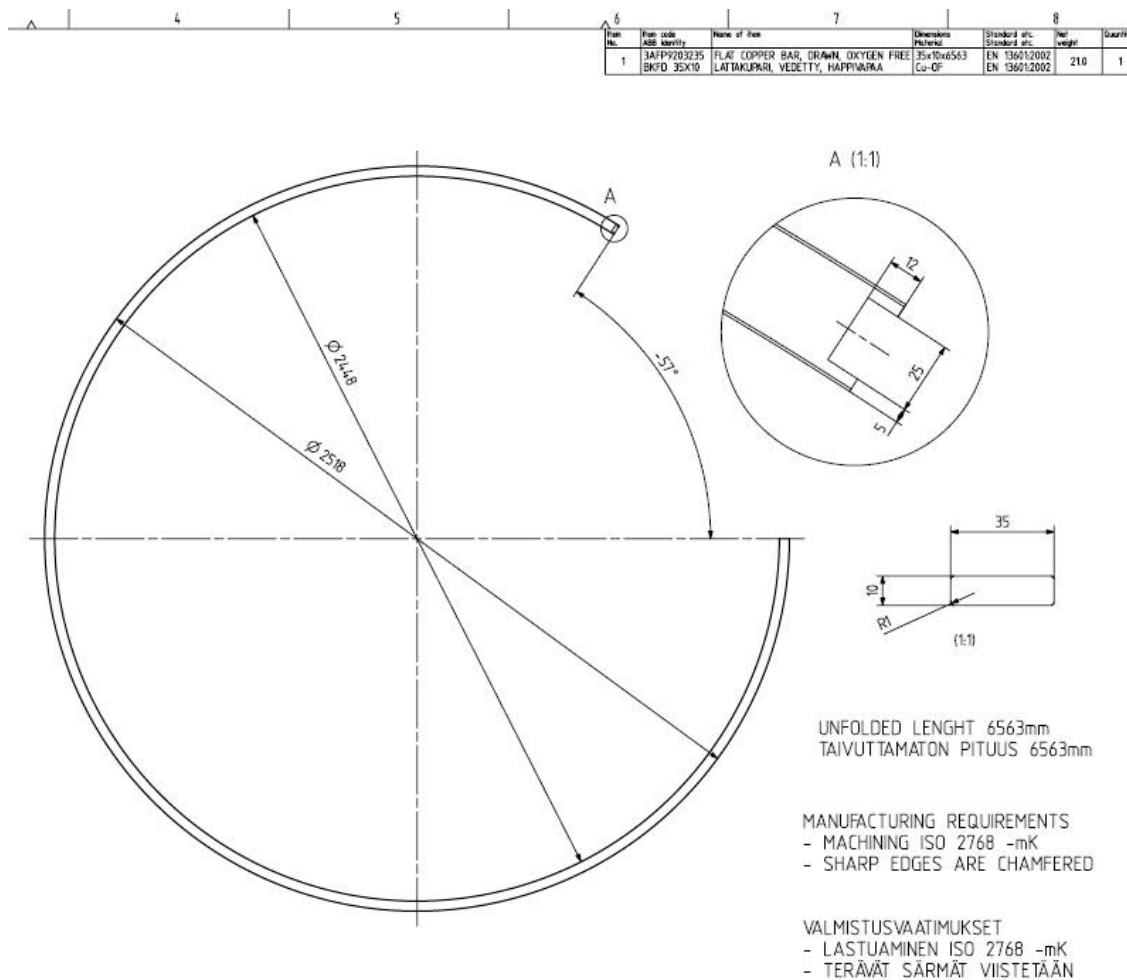
Kuva 7. Kytkentärenkaan kokoonpanon 3D-malli.

Koska vakioissa tahtigeneraattoreissa on kolme erilaista staattorityyppiä (4, 6 ja 7 rinnakkaista haaraa), vaaditaan renkaitakin kolme eri tyyppiä, jossa rinnakkaisien haarojen lukumäärä on huomioitu ja kuparin määrä kehällä optimoitu. Pilottiprojektia varten on tehty valmistusdokumentaatio kuuden rinnakkaisen haaran renkaista. Neljä- ja seitsemän haaraisille renkaille suunnitellaan omat renkaat, mikäli pilottiprojektin tulokset ja kokemukset edesauttavat menetelmän vakioimista.

3.1.1 Renkaiden valmistus

Renkaat valmistetaan katkaisemalla BKFD 35x10 -lattakuparista valmistuspiirustuksen mukainen taivuttamaton määrämitta. Rengas mankeloidaan muotoonsa haluttuun halkaisijaan. Toiseen päähän rengasta työstetään 25 mm x 12 mm:n upotus ulosottoja varten. Rengas on tarkoitettu valmistettavaksi alihankinnassa ja siitä on olemassa oma valmistuspiirustus, jossa esitetään mankeloinnin ja upotuksen työstön mittatiedot. P-standardin 3AFP9883286 mukainen BKFD 35x10 -lattakupari sisältää reunojen pyöristyksen R1. Terävien särmien puuttuminen helpottaa eristystä.

Rengas voidaan valmistaa myös kahdesta tai kolmesta osasta, jotka liitetään toisiinsa konetehtaalla. Osien päihin työstetään ”lohenpyrstöliitos” vastakappaleineen ja kiinnisovittamisen jälkeen liitos juotetaan. Renkaan työstö- ja kokoonpanopiirustuksissa, liitteet 1 ja 2, on esitetty optiohuomiolla varustettu työstö- ja toimintaohje. Useasta osasta valmistettu rengas helpottaa sen käsittelyä ja kuljetusta. Ajatuksena on, että pilottiprojekti hoidetaan valmiiksi kokonaisella renkaalla ja mahdollinen kytkentärenkaiden käyttö vaihtomenetelmänä toisi mukanaan menetelmän jatkokehityksen. Mikäli useammasta osasta valmistettu rengas katsotaan jo etukäteen käyttökelpoisemmaksi kuin yksiosainen, voidaan menetelmä tuki ottaa käyttöön jo pilottiprojektia valmistellessa.



Kuva 8. Ote 12-napaisen, 6 rinnakkaisen haaran renkaan valmistuspiirustuksesta, kuvannot on tässä tuotu lähemmäs toisiaan kuin mitä hyväksytyssä piirustuksessa tulee olemaan.

Renkaan sisääntulot katkaistaan BKXS 9x7:n valmiiksi eristetystä vannekuparista ja taivutetaan hieman, jotta ne saadaan siististi asetettua renkaan sisäkehälle. Sisääntulot juotetaan kiinni renkaaseen n. 20 mm:n matkalta käyttäen hopeajuotelankaa BXAHC 2,5. Sisääntulot taivutetaan rengaskokoonpanon staattoriin asennuksen yhteydessä oikealle kohdalle. Ulosotot BKXS 14.6x6 ovat myös valmiiksi leikatut, ja ne juotetaan n. 25 mm:n matkalta. BKXS valittiin sisääntulojen ja ulosottojen materiaaliksi sen helpon taivutettavuuden vuoksi. Renkaan kokoonpanosta on olemassa oma valmistuspiirustus ja myös tämä työvaihe on tarkoitettu toteutettavaksi alihankinnassa.

Suunnittelussa käytettävä renkaan kuparin pinta-ala määräytyy virran mukaan. Renkaat on mitoitetu käyttäen virran tiheyden maksimiraja-arvona 3,5 A/mm². Raja-arvo määri-

teltiin soveltaen PIE/PT-ohjetta *Liitäntäjohtimien puristusliitokset - A0D32C3E*, jossa generaattoreiden kaapelit mitoitetaan virran tiheyden maksimiarvolla 4 A/mm^2 . Tahtikoneissa ei ole käytössä varsinaista ohjetaulukkoa staattorikäämien virrantiheydelle, vaan käämien johtimien poikkipinta-ala määräytyy pääsääntöisesti koneen lämpenemästä ja on näin aina tapauskohtainen.

Aikojen saatossa toimitetuilla vakio-tahtigeneraattoreilla maksimivirta on ollut n. 1210 A, 11 kV:n generaattorilla. Näin ollen renkaiden pinta-alaksi valittiin

$$\text{Paksuus} \times \text{leveys} = \text{Pinta-ala} \Leftrightarrow 10 \text{ mm} \times 35 \text{ mm} = 350 \text{ mm}^2,$$

josta saadaan virran tiheys seuraavasti:

$$\text{Maksimivirta} / \text{Pinta-ala} = \text{Virrantiheys} \Leftrightarrow 1210 \text{ A} / 350 \text{ mm}^2 = 3,46 \text{ A/mm}^2 < 3,5 \text{ A/mm}^2.$$

3.1.2 Renkaiden eristys

Sähköjohtimien eristys määräytyy jännitteen mukaan. Vakio-tahtigeneraattoreita on kolmella eri jännitteellä 11 kV, 13,8 kV ja 15 kV, jotka jakautuvat kahteen eri jänniteluokkaan: 7201–11 500 V ja 11 501–15 000 V. Näin renkaiden eristystä tehdään tapauksesta riippuen kahta erilaista. [1, s.35–36.]

Vaikka tässä mallissa kuparin pinta-ala on vakioitu ja mitoitettu korkeimmalle mahdolliselle virralle, eristykset toteutetaan ohjeiden mukaan kahdelle eri jänniteluokalle. Syynä tähän on se, että suuremmilla jännitteillä eristystä vaaditaan enemmän ja eristekerroksen kasvaessa johtimien jäähtyminen heikkenee. Mikäli jännite on matalampi, kasvaa virran arvo ja sitä myötä myös johtimien lämpeneminen. Näin ollen kaikkia renkaiden eristystä ei voi mitoittaa maksimijännitteen mukaan, jotta lämpenemä pysyy halutussa luokassa. Hieman ylimitoitettu kuparin pinta-ala taas ei aiheuta poikkeamaa generaattorin toimintaan. Jos uusi kytkentärenkaisto otetaan käyttöön kaikkiin vakio-tahtigeneraattoreihin, eli siitä muodostuu vakiomenetelmä, niin kuparin pinta-alaa voidaan optimoida enemmän. Tämä säästäisi materiaalikustannuksia ”hukkakuparin” vähentyessä.

Renkaat eristetään P-ohjeen P-1508 mukaisesti. Koska tarkoitus on, että lattakuparin särmät ovat pyöristetty, ei lasikuituteippiä BPRNA tarvitse käyttää mekaanisena suojana eristyksen alla. Eristemateriaalina käytetään APGNF 0.18 -kiille-eristyspaperia tai BPGNW -kiillenauhaa. Koska tarkoitus on saada tehtyä eristystyö mahdollisimman nopeasti, on varmasti parempi käyttää nauhamaista eristettä BPGNW, kuin 1000 mm pitkiä paperiarkkeja APGNF 0.18. P-01508:n mukaan olisi eristyksen kannalta mahdollista käyttää myös eristysputkea BPHH, mutta koska renkaan kehä on pitkä, kuusihaaraisella renkaalla n. 300 °, ei se tässä tapauksessa ole mahdollista. [1, s.35–36.]

Taulukko 1. APGNF-0.18 kiillepaperin kerrokset 11kV, 13,8kV ja 15kV -generaattoreille. [1, s.36]

Vyyhtieristyksen mitoitusjännite U_{er} / V	Eristysputki tai	APGNF- 0.18, 5B	L3-mitta (hylkäysraja)
0...1000	2 x BPRH tai yksi BPHH a/ 6 kV	2.5	30 (25)
1 001...3 400	BPHH a/6 kV	3.5	30 (25)
3401...4200	BPHH a/ 6kV	3.5	35 (30)
4201...7200	BPHH a/ 6kV	4.5	55 (50)
7201...11 500	BPHH a/ 10kV	6.5	70 (65)
11 501...15 000	BPHH a/ 15kV	8.5	90 (80)

Eristeen päälle kiedotaan pintanauhaa BPRUG 25 x 0.09, nauha kiedotaan ½-nousulla. Eristeen tulee peittyä kokonaan. Sisääntulojen ja ulosottojen kuparit jätetään paljaaksi eristeestä, jotta ne voidaan aikanaan juottaa tai liittää kaapeleihin puristusliitoksella. [1, s.35.]

Renkaan eristyksen ottama tila lasketaan seuraavasti:

(APGNF 0.18 paksuus x kierrosten lkm. + BPRUG x 2) x 2

⇔

$(0,18 \text{ mm} \times 8,5 + 0,09 \text{ mm} \times 2) \times 2 = 3,42 \text{ mm} \sim 3,5 \text{ mm}$. (13,8 kV:n ja 15 kV:n generaattori)

$(0,18 \text{ mm} \times 6,5 + 0,09 \text{ mm} \times 2) \times 2 = 2,7 \text{ mm}$. (11 kV:n generaattori)

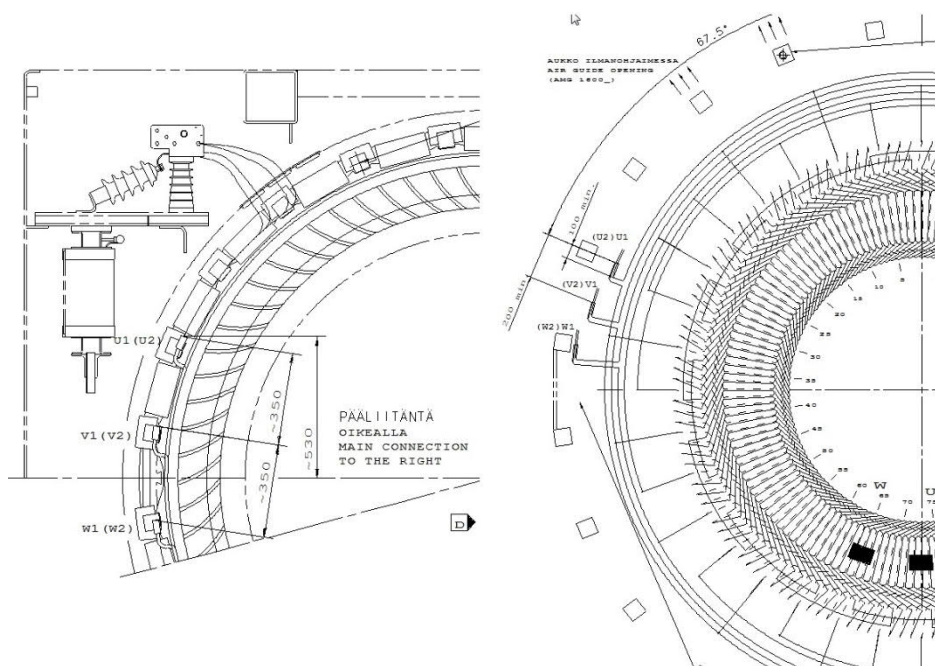
Edellä olevissa kaavoissa ensimmäinen, sulkumerkkien sisäpuolella oleva kerroin 2 tulee BPURUG -nauhan kietomisesta $\frac{1}{2}$ -nousulla ja toinen, sulkumerkkien ulkopuolella oleva kerroin 2 tulee lattakuparin kahden puolen eristemäärästä. Eli lattakuparin 35 mm x 10 mm:iin lisätään laskemalla saatu 3,5 mm (tai 2,7 mm), ja saadaan lopulliset mitat 38,5 mm x 13,5 mm (tai 37,7 mm x 12,7 mm). Tämä on huomioitu kannakkeiden suunnittelussa.

Eristyksen valmistuspiirustukseen ja muihin dokumentteihin tulee liittää viittaus kyseiseen P-ohjeeseen, jossa eristys on käyty seikkaperäisesti läpi. Valmistuspiirustus ja tuotannon osaluettelo on oiva paikka tehdä viittaus. Eristyksessä tarvittavat materiaalit esitetään renkaan eristysnimikkeen osaluettelossa.

Pilottiprojekti on tarkoitus eristää käsityönä aiemmin mainittujen ohjeiden mukaan. Mikäli valmiiksi eristettyjen renkaiden käyttö laajenee tai muuttuu vakiomenetelmäksi, kannattaa kytkentärenkaat eristää koneellisesti. Vyyhdenvalmistuksessa on jo käytössä useita erilaisia koneita, jotka kietovat eristenauhan kuparijohteen ympärille. Näitä koneita ei luultavasti voi käyttää kytkentärenkaiden eristykseen, johtuen kytkentärenkaan suuresta halkaisijasta, vaan olisi investoitava uuteen. Valmistajia tällaisille koneille ja laitteille löytyy useita, esimerkkejä eri ratkaisuista on koottu liitteeseen 7. Mikäli investointi ei ole mahdollinen, voi eristyksen teettää myös alihankintana.

3.1.3 Renkaiden asennus

Valmiiksi eristetyt renkaat asennetaan yksi kerrallaan päällekkäin kannakkeiden varaan, käämityskaavion ja -piirustuksen mukaiseen asentoon ja järjestykseen. Sisääntulot juotetaan ja eristetään ohjeiden P-10586 ja P-1508 mukaisesti. Renkaiden päällekkäisten vaiheiden järjestys valitaan tuotannossa tapauskohtaisesti noudattaen vanhoja hyväksi havaittuja käytänteitä. Kuvassa 9 vertaillaan vakiokäämityskaavion ja -piirustuksen välisiä eroja ulosottojen sijoittumisesta. Kuvassa huomataan, että nykyinen käämityskaavio ei aivan pidä paikkaansa ulosottojen sijoittumisen kohdalla, vaan on tiiviimpi. Käämityskaaviossa eri vaiheiden päiden ulosottojen etäisyys kehällä on n. 10°, kun se käämityspiirustuksessa on n. 15°. Uuden renkaiston käyttöönoton yhteydessä täytyy myös käämityskaaviot ja -piirustukset tehdä uusiksi.



Kuva 9. Ote 12-napaisen, 6 rinnakkaisen haaran käämityspiirustuksesta ja -kaaviosta. [9 & 10.]

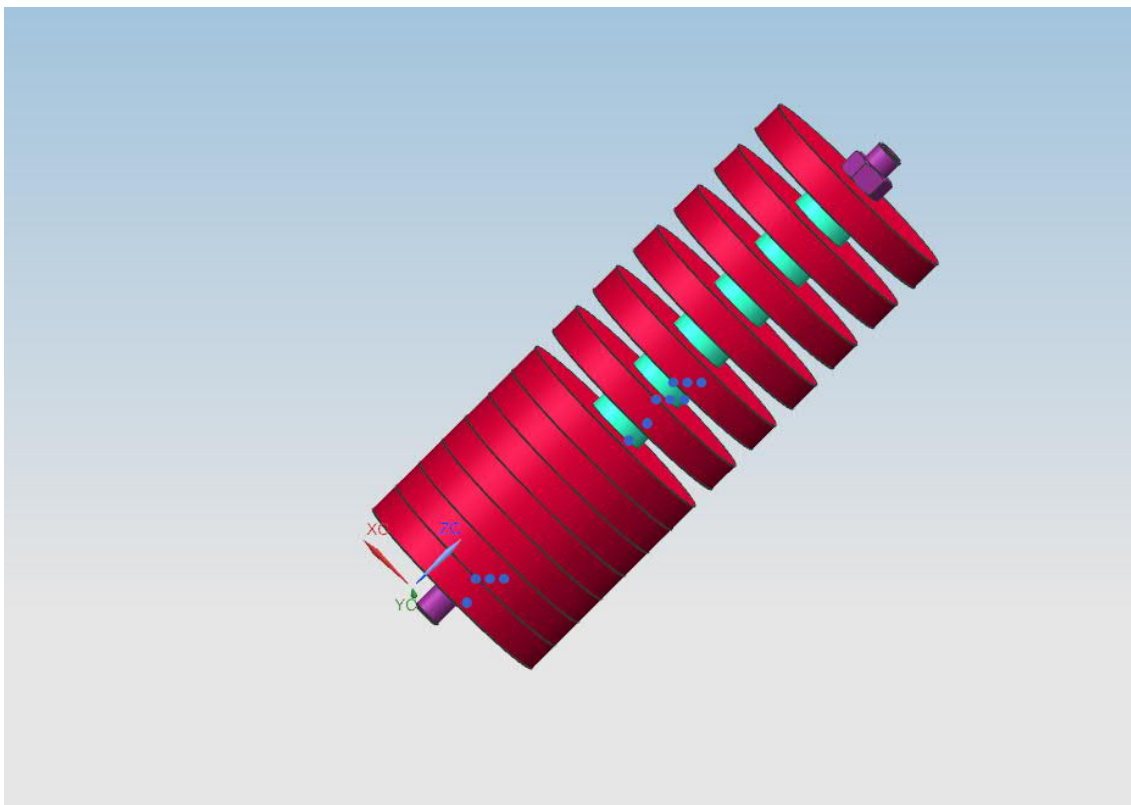
Uudella renkaistolla eri vaiheiden välinen keskinäinen etäisyys kehällä on sama kuin sisääntuloilla, 20°. Ei ole mielekäästä tehdä jokaiselle vaiheelle omaa rengasta, vaan hankitaan kuusi samanlaista rengasta generaattoria kohden. Kun rinnakkaisten haarojen lukumääriä on kolme eri määrää, kasvaisi eri tyyppisten renkaiden lukumäärä pahimmassa tapauksessa 18 kappaleeseen. Näin toimien aiheutuisi kohtuuttoman paljon ylimääristä vaivaa ja esimerkiksi riski väärän renkaan asentamisesta väärään paikkaan kasvaisi.

Renkaiden tuenta ja kannakointi toteutetaan olevan kuvan 10 mukaisella polyamidi 66:sta eli nylonista valmistetuilla kannakkeilla, jotka ovat päällekkäin pinottavat. Polyamidikannakkeet rakentuvat selkäpalkin päähän ruuvattavasta, M16 -vaarnaruuviin pujotettavista levyistä D120 mm x 17,5 mm ja D34 mm x 13 mm, päähän tulee mutteri. Polyamidi 66 valittiin kannakemateriaaliksi, koska se on kohtuullisen luja materiaali eikä johda sähköä.

Kannakkeita mitoittaessa otettiin huomioon P-ohjeessa P-01343 mainittu ”Yhdistetty pinta- ja ilmaeristysväli”, joka määritellään seuraavasti: ”Ryömintämatka tarkoittaa etäisyyttä eristyksen pintaa pitkin paljaasta jännitteisestä osasta maadoitettuun osaan.” P-

ohjeen kuvassa 8 kuitenkin esitetään vaadittavat mitat eristetystä puristusliitoksesta [5, s. 13,28]. Kyseistä ohjetta onkin syytä tulkita siten, että eristetyn liitoskohdan ja maadoitetun osan väli vaatii ottamaan huomioon P-01343:ssa annetut yhdistetyt pinta- ja ilmaeristysvälit. Kyseessä olevilla jännitteillä pintaryömintämatkavaatimus on 120 mm [5, s. 13,28]. Kyseinen mitta täyttyy latomalla seitsemän kappaletta isoja kannakelevyjä renkaiston alle ennen ensimmäisen renkaan kytkentää ($7 \times 17,5 \text{ mm} = 122,5 \text{ mm}$). Kyseinen mitta olisi myös voitu toteuttaa yhdellä 120 mm paksulla nylonlevyllä, mutta on aina parempi, mitä vähemmän erillisiä nimikkeitä on käytössä. Lisäksi näin kannakointimenetelmä on helpommin laajennettavissa toisiin jänniteluokkiin tai konetyyppeihin.

Pienempi polyamidilevy paksuus on mitoitettu hieman eristetyn kuparirenkaan paksuutta pienemmäksi, jotta aikaansaataisiin riittävä puristus pitämään renkaat tiukasti paikoillaan. Tämä vähentää kytkentäjuotoksille tärinän aiheuttamaa räsitusta. Kuvassa 10 nähdään 3D-malli kannakekokoonpanosta, jota käytetään 3D-malleissa ja niihin yhteydessä olevissa piirustuksissa.



Kuva 10. Kannakeosien kokoonpanon 3D-malli.

Selkápalkkeja joihin kannakkeet asennetaan, on tahtigeneraattorissa 24 kpl tasaisesti levypaketin ulkoreunalle jaettuna. Tästä muodostuu renkaiden tuentaväli:

Renkaan sisäkehä $\times \pi$ / selkápalkkien lukumäärä – ison kannakelevyn segmentin mitta renkaan kohdalla = Tuentaväli



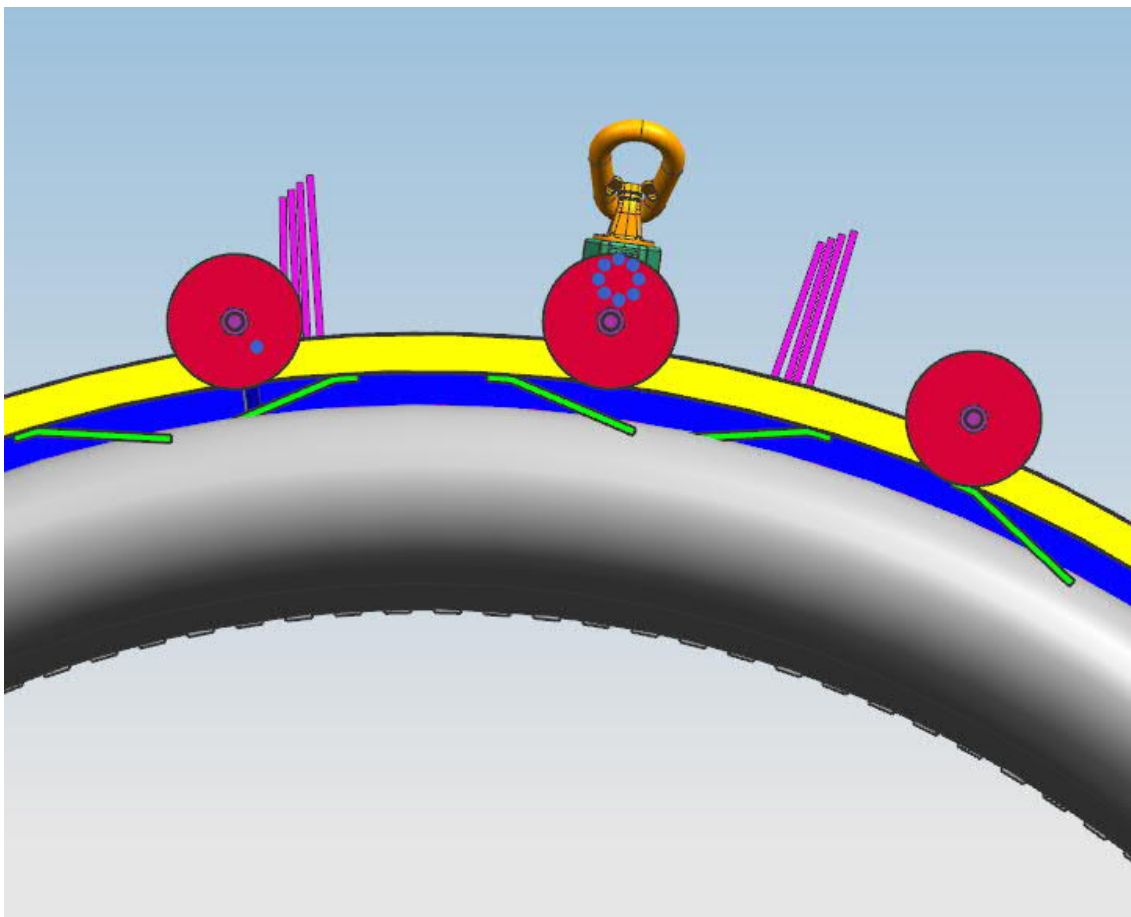
$$2448 \text{ mm} \times \pi / 24 - 110 \text{ mm} = 210 \text{ mm}$$

Lopputulos 210 mm eroaa P-ohjeessa P-1508 ohjeistetusta maksimiarvosta 150 mm. Mutta koska P-ohjeessa mainittu ”tukevan johtimen” poikkipinta-alan määritelmä on yli 30 mm² ja nyt kyseessä olevien renkaiden yhden renkaan poikkipinta-ala on 350 mm², voidaan katsoa välin olevan riittävä [1, s.39]. Semminkin kun kannakkeiden materiaali ja rakenne on tukeva verrattuna perinteiseen sidontatuentaan, jossa huovalla ympäröity laminaattipala tai -palat asetetaan johtimien väliin ja päälle kiedotaan polyesterinauhaa BOPOK [3, s.1]. Voitaisiin jopa harkita vaihtoehtoa, jossa kannakkeita sijoitetaan vain joka toiseen selkápalkkiin. Näin ollen yllä mainittua kaavaa käyttämällä saataisiin tuentaväliksi n. 530 mm. Näin toimien saataisiin tuentaan käytettyä työaikaa lyhennettyä entisestään. Tämä vaihtoehto vaatii kyllä ehdottomasti värinäanalyysin.

Kun renkaat on asennettu, juotettu ja kannakkeet kiristetty, täytyy juotoskohdat vielä eristää. P-1508:ssa on erikseen mainittu kovajuotoskohdan eristys. [1, s.35.]

3.1.4 Valmiiksi käämityn staattoripaketin nosto

Koska kaikessa ABB:n toiminnassa on lähtökohtana ja tärkeimpänä toimintamallina turvallisuus, kiinnitetään myös tässä työssä erityistä huomiota käämityn staattoripaketin turvalliseen nostoon. Raskaiden ja isokokoisten esineiden nostotyö muodostaa aina riskin. Kuvassa 11 nähdään lattakuparilla käämityn staattoripaketin nostokorvat selkápalkkeissa.



Kuva 11. Kuvakaappaus käämityksen 3D-mallista ylhäältä päin. Nostokorvien sijoittuminen kytkentärenkaisiin nähden riittävälle etäisyydelle on selkeästi nähtävissä.

Nykyinen tapa nostaa valmiiksi käämitty staattoripaketti on tehdä se neljän selkápalkin päihin ruuvatusta M30-kierretangosta, joiden päässä on nostosilmukka. Syynä kierretankojen käyttämiseen on, että nostettavasta rakenteesta saadaan mahdollisimman jäykkä, eikä esim. nostoliinat tai -ketjut pääse missään tilanteessa taipumaan ja ottamaan kiinni kytkentään tai vyyhtien päihin.

Lattakuparikytketty staattoripaketti nostetaan myös selkápalkkeihin kiinnitetyillä nostorenkailla. Nämä nostorengaat ruuvataan selkápalkkien sivuun työstettyihin kierrereikiin. Nykyistä suuremman halkaisijan omaavan käämityn staattoripaketin nostossa tulee kiinnittää erityinen huomio siihen, että staattori saadaan mahtumaan rungon päätylevyn aukosta sisälle. Tehtaalla on käytössä nostorenkaita WLL 6,7t 90deg ja kyseisiä renkaita on ajateltu käytettäväksi myös tähän nostoon.

Liitteessä 6 on esitetty tilatarkastelu eri nostovaihtoehtoista, joita on kolme:

- Nostorenkaat WLL 6,7t 90deg ruuvataan kiinni sivupinnasta M30-kierreikää lukuun ottamatta työstämättömiin selkápalkkeihin.
- Selkápalkkeista jysytään päistä 5 mm säteen suunnassa ja syntyneelle pinnalle työstetään M30-kierreikää.
- Otetaan lähtökohdaksi toisenlainen nostorengas.

Ensimmäisen vaihtoehdon nostossa, paketti lasketaan varovasti sisään siihen asti, jolloin nostorenkaat saapuvat rungon ulkolevyn tasalle. Tämän jälkeen pakettia ajetaan n. 5 mm rungon pohjan suuntaan ja lasketaan, kunnes nostorenkaat ovat ohittaneet ulkolevyn (tämä on mahdollista, koska rungon ulkolevyn aukko ei ole symmetrinen ympyrä, vaan pohjan puolella on enemmän tilaa), sitten paketti ajetaan takaisin keskelle ja lasketaan oikealle hitsauskorkeudelle. Tilatarkastelusta huomataan, että tämä vaihtoehto on melkoista millipeliä.

Mikäli selkápalkkeista poistetaan säteen suunnassa ainetta 5 mm, mahdollistaa se suoran, keskeisen laskun WLL 6,7t 90deg -nostorenkaita käyttäen. Selkápalkit ovat 60 mm x 60 mm -rakenneterästä ja on luultavaa, että 5 mm:n teräksen poisto ei tuota lujuuden kannalta ongelmia. Asian voi tuki tarkistaa lujuuslaskennassa.

Kolmannessa vaihtoehdossa vaihdetaan nostorengas hieman pienempään. Nostorengaan WLL 6,7t 90deg tunnus tulee sanoista Work Load Limit, eli vapaasti suomennettuna nostokuormaraja, 6,7 tonnia 90°:een nostolla, joka on heikoin nostotilanne kyseisellä nostoapuvälineellä. $4 \times 6,7 \text{ t} = 26,8 \text{ t}$ ja kun vakio-tahtigeneraattorin käämityn staattori-paketin maksimimassa on n. 16 t, riittää kyseinen nostorengas mainiosti. Kyseisen renkaan valmistajan mallistossa pykälää pienempi on nostokyvyltään 4,0 t, joten neljä rengasta menisi aika lähelle maksimirajaa. Tämä vaihtoehto on syytä tarkastaa huolellisesti lujuuslaskennassa.

Nostorenkaille löytyy useita eri valmistajia, mutta WLL 6,7t 90deg -nostorengas sopisi parhaiten muilta mitoiltaan, lukuun ottamatta yllä mainittua äärimittaa, kyseisen staattori-paketin nostoon. Sillä on tarpeeksi nostokykyä ja pituutta. Kuvassa 11 nähdään, kuinka

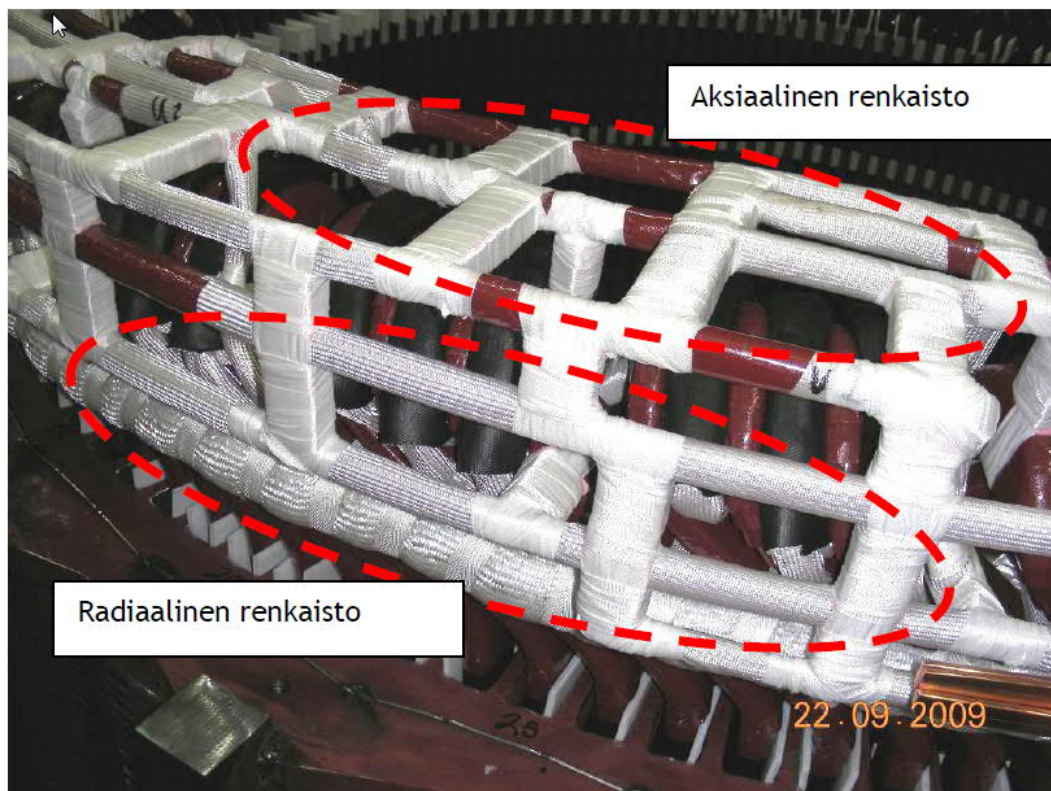
työstämättömään selkäpalkkiin kiinnitetyt nostorenkaat asettuvat riittävälle etäisyydelle kytkentärenkaistosta, eivätkä nostoliinat tai -ketjut näin ollen pääse kytkentää vahingoittamaan. Myöskään 5 mm:n siirto sisäänpäin säteen suunnassa ei olisi ongelma, tarvittaessa ainetta voisi poistaa vaikka 10 mm, jos se ei ole lujuusteknisesti ongelma.

Nostossa käytetään apuna myös H-palkkia, joka on H-kirjaimen muotoinen nostoapuväline ja sellaisia on jo käytössä mm. propulsiomootoreiden nostoissa, kuvassa 4, sivulla 6 näkyy staattoripaketin yläpuolella esimerkki H-palkista.

3.2 Muotolankakuparista esivalmistettu renkaisto

Tässä työssä esitetään myös rinnakkainen tapa toteuttaa staattorikäänityksen kytkentä. Tämä menetelmä pohjautuu pitkälti olemassa olevaan tapaan toimia. Kytkentärenkaat valmistetaan ja kootaan yhteen etukäteen. Renkaiden valmistus voidaan siis toteuttaa samanaikaisesti vyyhtien uraan asentamisen kanssa ja nostaa valmis renkaisto paikalleen heti väliyhdistäjien teon jälkeen. Näin toimien esim. tuotannon henkilömäärän lisäämisestä olisi konkreettista hyötyä läpimenoaikaa ajatellen. Mutta koska lähtökohtana tälle insinööriyölle oli saada aikaan mahdollisimman pitkälle viety esivalmistus, on tässä esitetty vain muotolankakuparirenkaiston esivalmistuksen periaatteet ja menetelmän vertailu vanhaan tapaan ja lattakuparirenkaistoon.

P-1508:n mukaan kytkentärenkaistoja on kaksi eri perustyyppiä, L- ja I-tyyppinen kytkentärenkaisto. Dieselgeneraattorin akselin nimelliskorkeuden ollessa 1600, käytetään L-tyyppistä kytkentärenkaistoa, jossa toinen osa renkaistoa on sijoitettu radiaalisesti ja toinen osa aksiaalisesti toimien ikään kuin käänityksen pään jatkeena. [1, s.40.] Kuvassa 12 on esitelty L-tyypin renkaisto. Myös muotolankakuparista esivalmistettu renkaisto toteutetaan tällä tapaa.

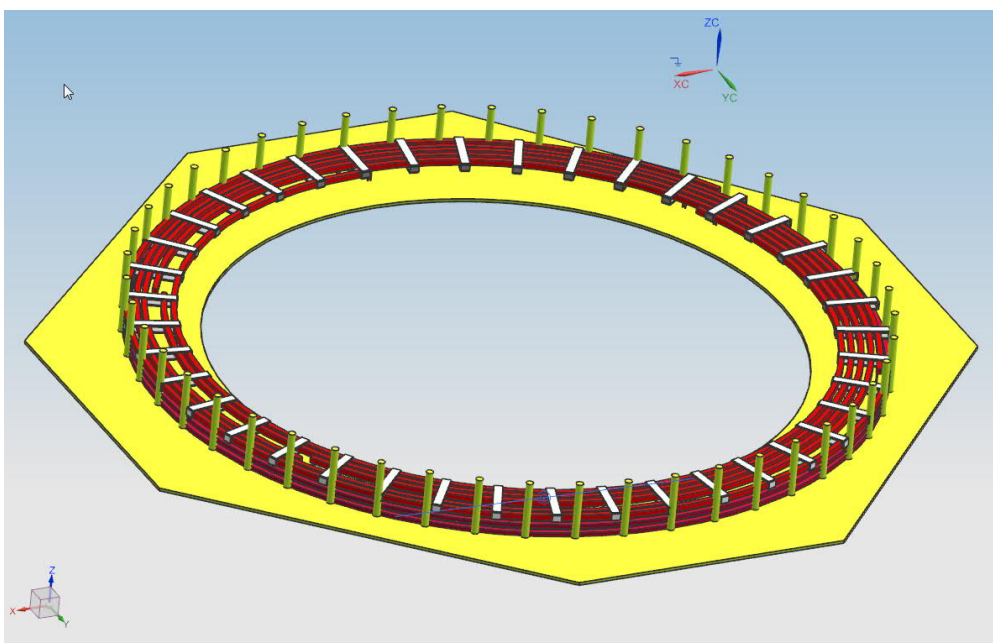


Kuva 12. L-tyypin kytkentärenkaiston havainnekuva. [1, s.43].

Esivalmistettua kytkentärenkaistoa ei varsinaisesti suunnitella samalla tapaa kuin latta-kuparista valmistettua kytkentärenkaistoa, vaan sen valmistus tapahtuu hyvin pitkälti samoin kuin nykyisin, vain eri paikassa. Työskentely vaatii edelleenkin korkeaa ammattitaitoa, sen lisäksi myös tarkempia mittauksia ja hahmotuskykyä, kun rengasta ei voida kiinnittää sitomalla vyyhden päihin sitä mukaa kun se valmistuu. Jonkinlainen ohje kuitenkin tulee laatia tai päivittää P-ohjeita.

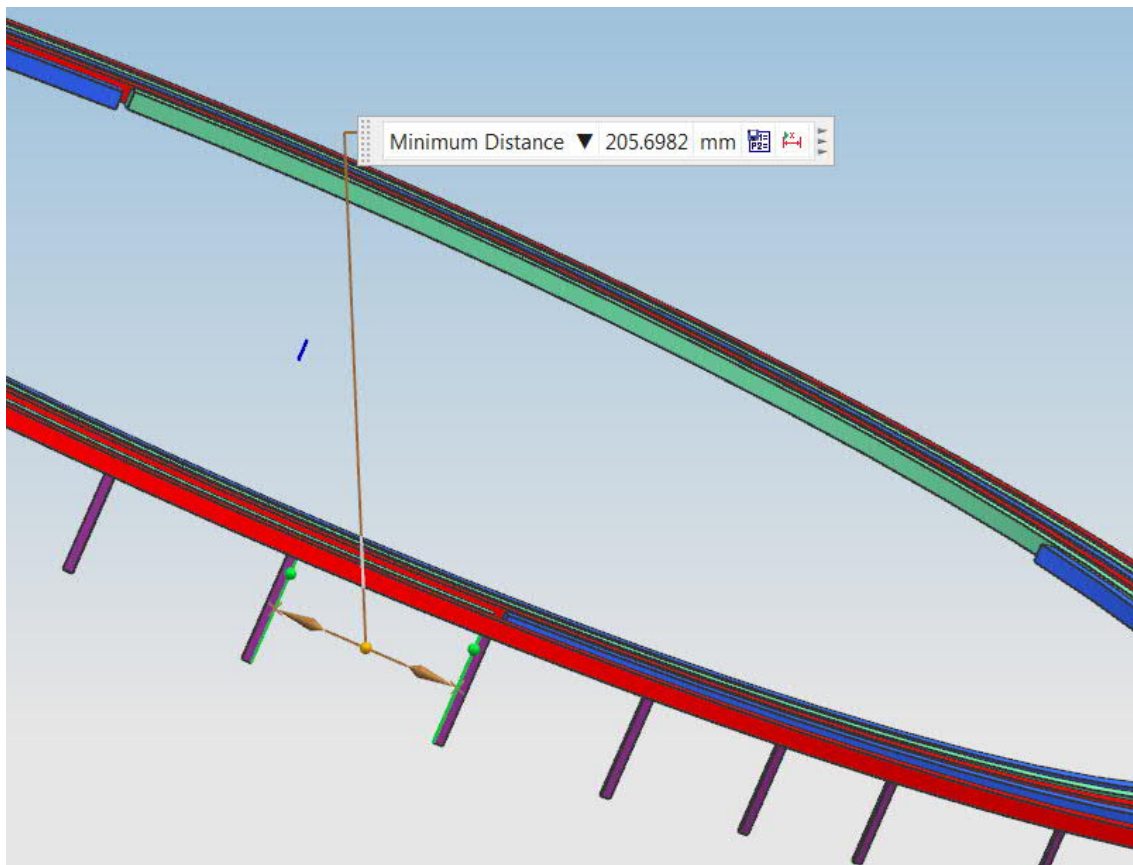
Valmiin renkaiston nosto täytyy miettiä tarkkaan ja suunnitella siihen kenties tähän tarkoitettu nostoapuväline. Tämän tyyppinen renkaisto ei ole kovin jäykkä ja väärällä tavalla suoritettu nosto saattaa aiheuttaa muodonmuutoksia. Myös renkaiden välisiin tuentasidoksiin tulee kiinnittää huomiota, mahdollisimman moni sidos olisi hyvä saada valmiiksi ennen nostoa. Osa renkaiden välisistä tuennoista toimivat myös sidontoina vyyhtien päihin ja tällaiset sidokset päästään tekemään vasta renkaiston ollessa lopullisella paikallaan.

Ehdotuksena on, että renkaiston valmistukseen suunnitellaan siihen soveltuva jigi, eli asennusteline, jossa on huomioitu vyyhdenpäiden kehän halkaisija. Tarkoitus on, että asennuksen aikana suoritettavia mittauksia tarvitsisi tehdä mahdollisimman vähän ja tukisidonnat on helppo tehdä. Kuvassa 13 on hahmoteltu asennusteline muotolankakupari renkaiston esivalmistusta varten. Siinä teräslevyyn on porattu reikiä kehälle, jonka halkaisija määräytyy staattorin vyyhdenpäiden muodostamasta kehästä. Reikiin asennetaan terästäpit, johon muotolankakupari voidaan väliaikaisesti sitoa ja kun renkaisto on kokonaisuudessaan valmis, voidaan nämä sidokset katkoa ja nostaa renkaisto paikalleen.



Kuva 13. 3D-Hahmotelma muotolankakuparirenkaiston jigistä. Renkaisto esitetty punaisella värillä, tukisidokset valkoisella. Alustassa seisovat tapit mahdollistavat sidontatuntojen teon.

Suurin haaste muotolankakuparista esivalmistetun renkaiston asennuksessa on kytkentäjuotokset, esimerkiksi neljän rinnakkaisen haaran kytkennässä sisääntuloja on 24 kpl, ja kuusihaaraisessa kytkennässä jo 36 kpl. Vaikeutena korostuu erityisesti tilan puute, kun sisääntulojen haaroja on toistensa tiellä. Kuvassa 14 on mallinnettu renkaiden sisääntulot violetilla värillä.



Kuva 14. 3D-hahmotelma kuusihaaraisesta muotolankakuparirenkaistosta. Sisääntulot sijoittuvat 10° etäisyydelle toisistaan kehälle, tästä syntyy keskinäinen etäisyys n. 200 mm.

Käytössä olevien juotostyövälineiden käyttö näissä väleissä, jossa kummallakin puolella on seuraava tai edellinen haara, voi olla haastavaa ja hidasta. Nykyisessä valmistustavassa tätä ongelmaa ei ole, kun toinen puoli on aina "vapaa" kehällä eteenpäin mentäessä. Ongelmaa voitaisiin lähestyä esimerkiksi pilotoimalla 4-haaraisia kytkentöjä ja laajentamalla tätä seuraaviin haaralukuihin, kun tarvittavat menettelytavat ovat löytyneet.

Muutenkin tällainen "puoliksi uusi" -menetelmä vaatii enemmän työtapojen hakemista, kun tiettyjä vanhoja asennusmenetelmiä ei voi enää käyttää ja kun taas toisia pitää tai voi soveltaen käyttää. Toisaalta menetelmä on melko joustava, verrattuna kiinteään lattakuparirenkaistoon ja tavallisuudesta poikkeavat rakenteet on mahdollista toteuttaa. Myös ehdotetun jigin käyttöä voi helposti lisätä koskemaan toisen staattorihalkaisijan kohteita.

3.3 KytKentäratkaisujen vertailu

Taulukossa 2 on vertailtu uusia menetelmiä nykyiseen työtapaan ja keskenään. Taulukoissa on käytetty +- ja - -merkintää kuvaamaan positiivista tai negatiivista muutosta tai tilaa, merkinnät eivät siis tarkoita minkään mittayksikön tai suureen kasvamista tai vähenemistä (esim. jos tuotantoaika vähenee, niin kyseessä on positiivinen muutos, eli + merkki). Kaikilla toimintamalleilla on omat hyvät ja huonot puolensa.

Taulukko 2. Uudet menetelmät vs. nykyinen menetelmä.

	Samanaikainen toteutus	Kannakointi	Materiaalikustannukset	Asennustila ja sen rajat	Menetelmän joustavuus
Nykyinen kytKentä	-	-	+	+	+
Lattakuparista valmistetut renkaat	+	+	-	+	-
Esivalmistetut muotolankakuparit	+	-	+	-	+

Taulukossa 2 ensimmäisessä sarakkeessa oleva "Samanaikainen toteutus" tarkoittaa menetelmän tai sen osien valmistusta ja toteutusta samaan aikaan tai ennen vyyhtien uraan asennusta. Samanaikaisuus tarkoittaa kokonaisläpimenoajan vähenemistä, joka on tämän insinööriyön lähtökohta ja tavoite.

Seuraavassa sarakkeessa "Kannakointi", lähestytään läpimenoajan säästöä tuennan kannalta. Valmiit, päällekkäin pinottavat ja ruuvikiristeiset kannakkeet nopeuttavat kytKennän tuentaa varmasti, jos sitä vertaa perinteiseen sidontatuentaan.

Keskimmäisen sarakkeen "Materiaalikustannukset" ottaa huomioon lattakuparista valmistettujen renkaiden ylimääräisen kuparin määrän verrattuna tapauskohtaisemmin tehtyyn kytKentään. Myöskin kannakkeisiin kuluva polyamidi sekä sen työstö on pyritty huomioimaan.

Seuraavan sarakkeen "Asennustila ja sen rajat" vertaa tuotantotilojen tarvetta. Staattorin ulkohalkaisijan ollessa noin 2,5 m vaatii staattorin vieressä etukäteen valmistettava renkaisto melko ison työalueen. Tämä työtapa, joka pohjautuu pitkälti vanhaan tapaan, on

syötä tehdä staattorin välittömässä läheisyydessä renkaiston noston ja sen tapauskohtaisuuden toteutustavan vuoksi. Suoraan staattorin päälle vannekuparista rakennettava kytkentä on tilaa säästävin vaihtoehto, kun kytkentä tehdään vannekuparin pala kerrallaan. Tosin valmiiksi eristettyjen renkaiden paikalle tuonti ja asennus eivät juurikaan lisää tilantarvetta.

Taulukon viimeisessä sarakkeessa ”Menetelmän joustavuus” on arvioitu työtavan soveltumista eri akselikorkeuden koneille. Myös tavallisesta poikkeava staattori tai sen kytkentä olisi helposti toteuttavissa. Lattakuparista valmistettujen renkaiden mitat ja haarojen lukumäärä on ennalta määrätty ja näin ollen on muihin tapauksiin suunniteltava uusi rengas.

Yhteenvedona taulukosta 2 voidaan todeta, että lattakuparista valmistetut renkaat saavat + -merkinnän kumpaankin kokonaisläpimenoaikaan vaikuttaviin sarakkeisiin. Koska läpimenoajan säästö on tämän insinööritoiminnan tavoite ja perustava lähtökohta, voidaan suositella kyseisen menetelmän käyttöönottoa ja pilotointia.

4 Suunnittelu

Koska uudessa työmenetelmässä käytetään paljon uusia osia ja komponentteja, oli ne ensiksi suunniteltava. Työn suunnitteluprosessi noudatti pitkälti Tahtikoneiden suunnittelukäytäntöjä. Siksi on hyvä esitellä suunnittelun toimintaa myös yleisellä tasolla, jotta saataisiin hyvä kuva siitä, mikä on johtanut tässä työssä esiteltyihin suunnitteluratkaisuihin.

4.1 Suunnittelun toimintamalli

Tahtikoneen osaluettelo koostuu karkeasti jaotellen tuotannon työvaiheisiin pohjautuvista osista, joiden alla on nimikkeitä. Kuvassa 15 näkyy ote vakio-tahtigeneraattorin staattorikäynnin tuotannon osaluettelon rakenne PDM-järjestelmän kautta nähtynä. PDM-ohjelmana käytettävä Team Center on suunnittelijan työkalu. Kuvassa 16 on esimerkki siitä, kuinka ko. osaluettelo näyttäytyy tuotannolle.

9595HG401/A;2 - ABB Latest by Creation Date - Date - "Now"				
BOM Line	Find No.	Weight	Type Designat...	Quantity
3AFP200767660/A;1-Impregnated stator-CU100 x 1	3	15922.822	AMG 1600SS1...	1
3AFP200767658/A;1-Wound stator core-CU001 x 1	3	15922.822	AMG 1600SS1...	1
3AFP5115000-D/E;2-WINDING DIAGRAM		0	AMG, AMZ 12...	
3AFP5115782-D/B_002;1-ST. WINDING TRANSPOSITIONS		0	AM_	
3AFP5124884-D/E;1-MOUNTING OF PT100-ELEMENTS		0	AMG, AMZ	
3AFP5135930-D/D_001;1-STATOR WINDING		0	AMG, AMZ 16...	
3AFP60042012/A;1-TEMPERATURE DETECTOR-PYR PT100LG1...		0.02	PYR PT100LG1...	6
3AFP200767655/A;1-Stator core-CL001 x 1	1	12728.262	AMG 1600SS1...	1
3AFP200767659/A;1-Stator coil-CU002 x 1	2	3156.494	AMG 1600SS1...	1
3AFP5124885/D;1-SLOT WEDGE MACHINING-CU x 6	40	0	CU	6
3AFP9870496/A;2-POLYESTER LAMINATE-APRH x 144	41		APRH	144
3AFP9869755/B;1-SLOT WEDGE-BPSE 4X20X42 x 720	42	0.01	BPSE 4X20X42	720
3AFP9870496/A;2-POLYESTER LAMINATE-APRH x 576	43		APRH	576
3AFP9869748/B;5-POLYESTER LAMINATE-APRH 10X15X30 x 2...	44	0.008	APRH 10X15X...	262
3AFP10211786/A;1-POLYESTER FILT-AOMHZ 300 x 1	45	0.4	AOMHZ 300	1
3AFP10210470/A;1-POLYESTER HOSE, FILLED-BPRLM 50 x 1	46	0.56	BPRLM 50	1
3AFP10210453/A;1-POLYESTER HOSE, FILLED-BPRLM 30 x 1	47	0.29	BPRLM 30	1
3AFP10207452/A;2-TERYLENE BAND-BOPO/K 19X0,6 x 1	48	0.009	BOPO/K 19X0,6	1
3AFP10211662/A;1-GLASS MICA PAPER, POROUS-APGNW 0,1...	49	0.243	APGNW 0,18	1
3AFP10211247/A;2-SURFACE TAPE-BPRUG 25X0,09/55/110 x 1	50	0.002	BPRUG 25X0,0...	1
3AFP10212511/A;1-INSULATING TUBE-BPHH 12/10KV x 1	51	0	BPHH 12/10KV	1
3AFP10207029/A;1-SILICON GLASS HOSE-BPRJB 4 x 1	53	0.015	BPRJB 4	1
3AFP13806454/A;1-TERYLENE BAND-BOPO/K 20X0,22 x 1	54	0.002	BOPO/K 20X0,...	1
3AFP9891863/A;1-GLASS HOSE, VARNISHED-BPRH x 144	55		BPRH	144
3AFP14508937/C;1-SOLDERING WIRE-BXAH 2,5 x 1	56	1	BXAH 2,5	1
3AFP14150021/A;2-POLYESTHER TAPE-BSJN/L20X0,08 x 1	57	0.001	BSJN/L20X0,08	1
3AFP9879019/C;1-ABUTMENT JOINTER-MTGPL 185 x 6	60	0.14	MTGPL 185	6
3AFP9879019/C;1-ABUTMENT JOINTER-MTGPL 185 x 6	61	0.14	MTGPL 185	6

Kuva 15. Kuvakaappaus PDM-järjestelmästä.

Tuotannon osaluettelo koostuu työvaiheeseen kuuluvista 3AFP2 -alkuisista osista, esim. staattorin levypaketti – Stator Core ja 3AFP9- tai 3AFP5-alkuisista nimikkeistä esim. 3AFP9869755-SLOT WEDGE-BPSE 4X20X42, jotka voivat olla projekti- eli työnnumero-kohtaisia eli ostettavia tai tehtaan varastosta löytyviä ns. hyllynimikkeitä. Lisäksi osaluettelossa löytyy viittaukset asennustyössä tarvittaviin P-ohjeisiin ja työvaihetta koskevat mittatiedot. Lisäksi suunnittelija voi erikseen lisätä ylimääräisiä tekstitietoja osaluetteloon. Näin toimitaan, mikäli kyseessä on esim. vakiosta poikkeava rakenne tai mitta. Kuvassa 16 näkyy kuvan 15 osaluettelorakenteen lopputulos eli osaluettelon pdf-versio, jonka perusteella tuotanto saa tarvittavat tiedot työvaiheen valmistukseen.



kg

BU Motors and Generators

57	3AFP14150021	A	POLYESTHER TAPE	BSJNL20X0,08
60	3AFP9879019	C	ABUTMENT JOINTER	MTGPL 185
61	3AFP9879019	C	ABUTMENT JOINTER	MTGPL 185

PART DIMS

A1CU = 279,74 mm² Cross sectional area of stator phase copper
 B1CU = 12,80 mm Width of stator copper
 DELTA = 11,00 mm Air gap
 L1 = 1200,00 mm Length of stator
 NLI = 464,00 mm Measure of air guide from the core
 RISTEILYJÄ = 1,00 pcs Qty of crossings/ phase/ parallel branch
 RV_MIN = 21,30 mOhm Stator phase resistance MIN. at 20C
 U_LMAER = 11,00 kV Air insulation gap design voltage
 VAKO = 4,00 Slots/pole/phase
 VPK_TOD = 444,00 mm Space remaining for the connection
 VYYHLEV = 10,00 Stator coil width

SPECIAL INSTRUCTIONS

P-01508 Winding work instruction of stator
 P-10965 Supporting of stator winding ends

ADDITIONAL INFORMATION

Main terminal direction: RIGHT
 CONNECTING EXCITATION CRIMP CONNECTION:
 -Abutment jointers in one connection 2 x MTGPL 185
 -Parallel branches in the first abutment jointer 2
 -Parallel branches in the second abutment jointer 2
 -Rectangular copper profile filling: (min 220) 243 ... 265 mm²
 -Pre-crimping jaws: Mandrel / Die: 25R21DL / 25R21ML, Press head V2500
 -Crimp die: 13B27L, Press head V1300, Number of crimps. 2
 -Max crimp height. N= 20,6mm
 VT:

AB/ = 1,00 KPL Support ring and insertion ring/end
 BUK = 21,00 mm Width of stator slot wedge
 H1CU = 2,81 mm Height of stator copper
 LAMPENLK = B Temperature rise class
 NULOSOTOT = 6,00 pcs Number of stator outlets
 RV = 22,42 mOhm Stator phase resistance at 20C
 STRINHA = pcs 4 Parallel branches in stator
 U_TEST1 = 11,00 kV Dimensioning voltage for production testing
 VIRTÄ = 1137,10 A Rated current
 VPKMAX = 0,00 mm TheorMaxLengthOfCoilEnd+CollectRing
 Y1 = 161,00 mm Position of support cord 1

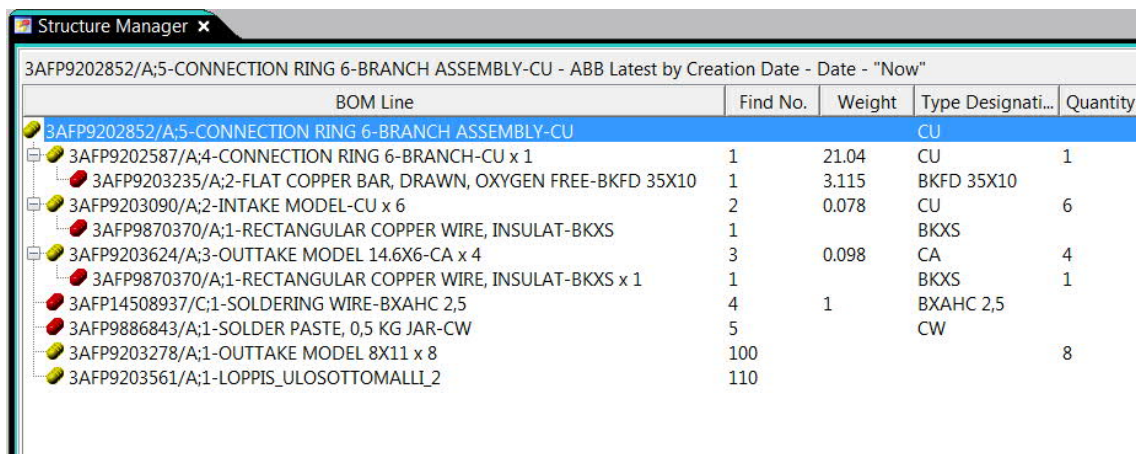
Revisions of sub-components are based on BOM document creation date and they might be outdated.
 Use always the latest approved revisions of all sub-components and drawings.

1	0,290	288,000	m
6	0,840	6,000	1
6	0,840	6,000	1

B12 = 17,50 mm Width of stator slot on the air gap side
 D12 = 2020,00 mm Inside diameter of core
 KYTKTYP = Y III Type of connection
 N = 1,00 KPL Support piece pair rows/end
 NVYYH = 144,00 pcs Number of stator coils
 RV_MAX = 23,54 mOhm Stator phase resistance MAX. at 20C
 U_ER = 11,00 kV Insulation design voltage
 U1 = 11,00 kV Main voltage of machine
 VP_TOD = 444,00 mm Space remaining on the coil
 VPMAX = 334,90 mm Theor. maximum length of coil end
 Y2 = 0,00 mm Position of support cord 2

Kuva 16. Kuvakaappaus CU001-pdf-osaluettelosta sivulta 2. Huomaa osaluettelossa näkyvät mittatiedot, viittaukset ohjeisiin ja ylimääräinen informaatio, joita ei suoraan PDM-järjestelmän näkymässä näy. [11.]

ABB:llä käytössä olevan järjestelmän nimikkeet rakentuvat siten, että combo-nimikkeellä on 3D-malli ja siitä tehty valmistuspiirustus. Lisäksi nimikkeeseen alla on sen materiaali, esim. rakenneteräs ADAF 10. Mikäli kyseessä on kokoonpanonimike, on sen alla kaikki kokoonpanossa käytettävät nimikkeet valmistuspiirustuksineen ja materiaaleineen. Lisäksi on huomattava, että kaikilla alinimikkeillä ei tarvitse olla valmistuspiirustusta, mikäli ne ovat ns. materiaalinimikkeitä. Näille nimikkeille ei ole tehty juurikaan etukäteistyöstöä, vaan ne on esim. katkaistu osaluettelossa ilmoitettuun määrämittaan tai leikattu halutun paksuisesta levystä suorakaiteen muotoon. Kuvassa 17 on esimerkki uuden kuusihaaraisen kytkentärenkaiston kokoonpanosta ja sen alinimikkeistä. Kuvassa näkyvät punaiset nimikkeet ovat samanarvoisia kellertävien combo-nimikkeiden kanssa, ne on vain tehty vanhan CAD-järjestelmän aikaan.



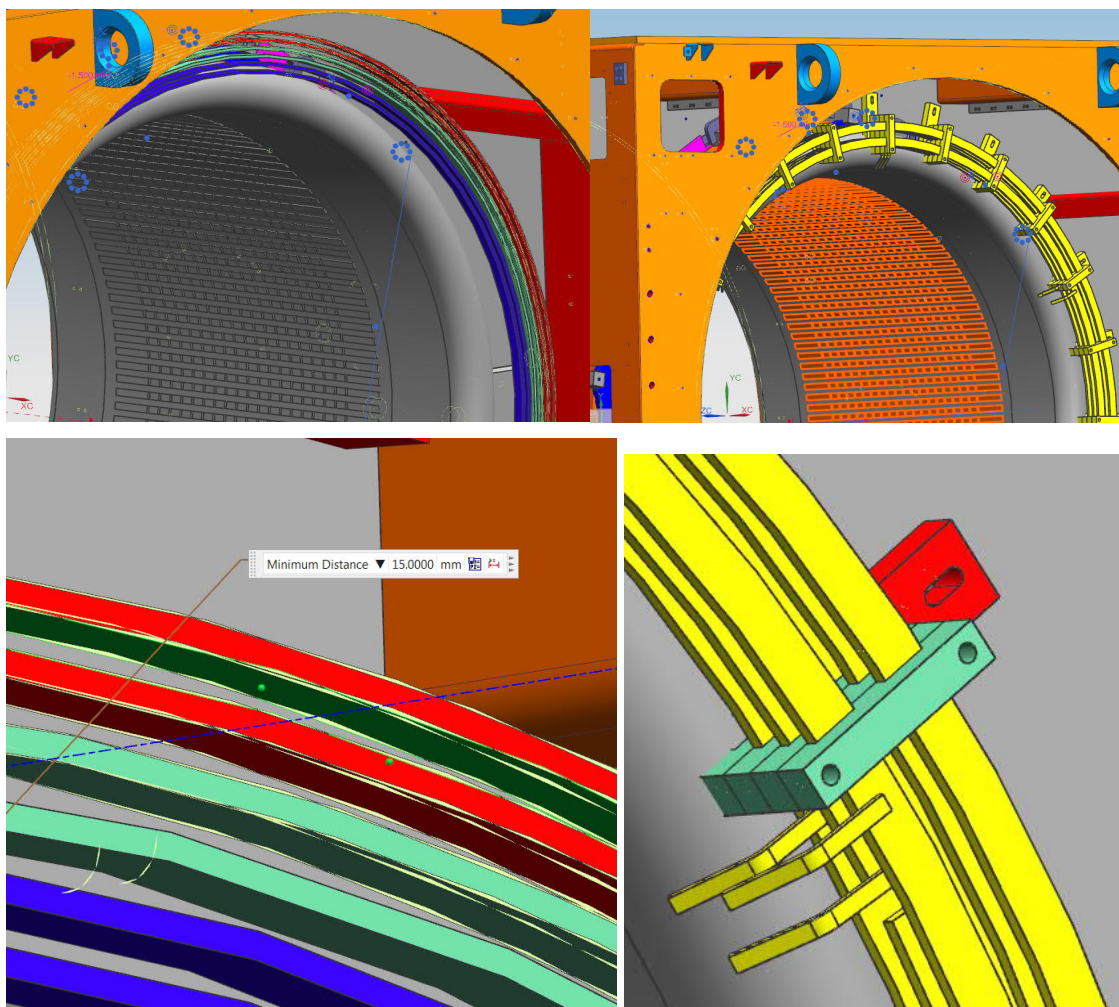
BOM Line	Find No.	Weight	Type Designati...	Quantity
3AFP9202852/A;5-CONNECTION RING 6-BRANCH ASSEMBLY-CU			CU	
3AFP9202587/A;4-CONNECTION RING 6-BRANCH-CU x 1	1	21.04	CU	1
3AFP9203235/A;2-FLAT COPPER BAR, DRAWN, OXYGEN FREE-BKFD 35X10	1	3.115	BKFD 35X10	
3AFP9203090/A;2-INTAKE MODEL-CU x 6	2	0.078	CU	6
3AFP9870370/A;1-RECTANGULAR COPPER WIRE, INSULAT-BKXS	1		BKXS	
3AFP9203624/A;3-OUTTAKE MODEL 14.6X6-CA x 4	3	0.098	CA	4
3AFP9870370/A;1-RECTANGULAR COPPER WIRE, INSULAT-BKXS x 1	1		BKXS	1
3AFP14508937/C;1-SOLDERING WIRE-BXAH 2,5	4	1	BXAH 2,5	
3AFP9886843/A;1-SOLDER PASTE, 0,5 KG JAR-CW	5		CW	
3AFP9203278/A;1-OUTTAKE MODEL 8X11 x 8	100			8
3AFP9203561/A;1-LOPPIS_ULOSOTTOMALLI_2	110			

Kuva 17. Kuvakaappaus PDM-järjestelmästä uusi kytkentärenkaisto.

Kokoonpanon ylimmän tason piirustus sisältää kokoonpano-ohjeet, esimerkiksi tässä tapauksessa juotosohjeet ja -mitat. Lisäksi kokoonpanon osaluettelon voi myös esittää integroituna piirustuksessa, nyrkkisääntönä tähän on, että aliosia ei ole enempää kuin kolme. Kuvassa järjestysnumeroilla 100 ja 110 näkyvät "Outtake model"- ja "Ulosottomalli"-combonimikkeet ovat ns. "Phantom"-osia, jotka ovat piilotettu 3D-malliin, eivätkä näy piirustuksessa tai osaluettelossa. Ne ovat kuitenkin jätetty kokoonpanolle mahdollisesti myöhemmin tapahtuvaa kehitystyötä silmällä pitäen.

4.2 Uusi kytkentärengasnimike

Uuden kytkentärenkaiston suunnittelun alussa tutkittiin erilaisia vaihtoehtoja, miten renkaat tulisi sijoittaa, mitoittaa ja tukea. Asiantuntijaryhmän kanssa päädyttiin renkaiden keskinäisen sijoittelun osalta melko varhaisessa vaiheessa yhteen ratkaisuun, jota alettiin viemään eteenpäin. Myös periaate selkápalkkien toimimisesta kannakoinnin perustana oli alusta alkaen selvä. Kuvassa 18 nähdään kaksi ehdotusta, joita arvioitiin palaverissa. Eri ehdotuksista, kaikkiaan kuusi erilaista renkaistoa, luotiin 3D-mallit tarkastelua varten ja keskustelun pohjaksi.

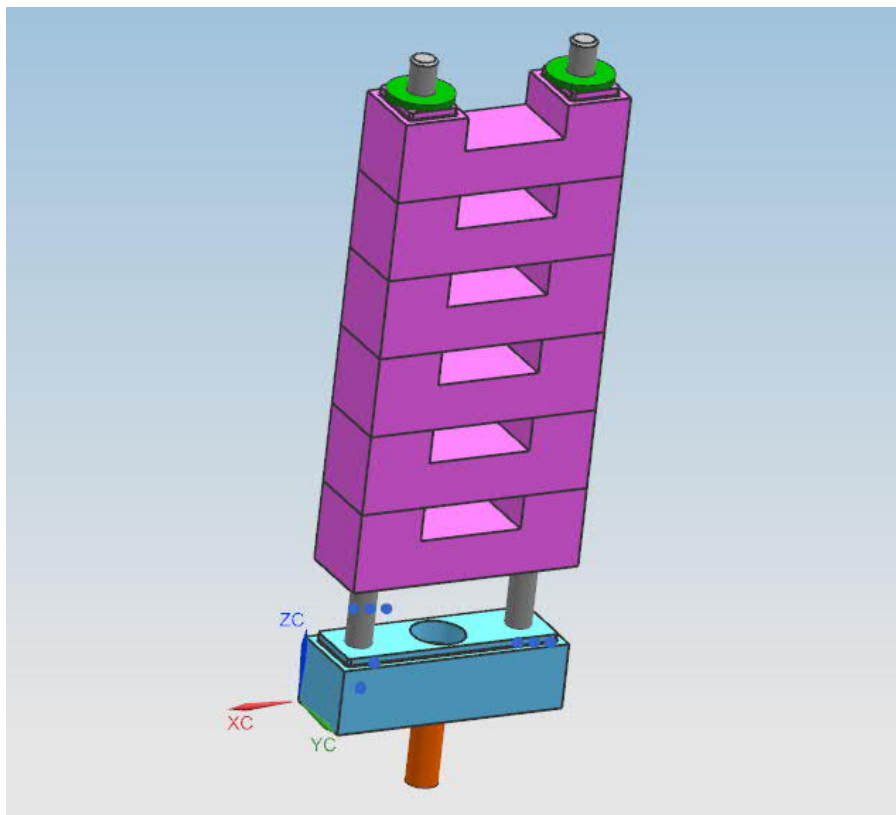


Kuva 18. Kuvakaappaus 3D-mallista. Vasemmalla radiaalisuuntaan vierekkäiset renkaat, oikealla yhdistelmä, sekä radiaali- että aksiaalisuuntaan vierekkäiset renkaat.

Kuvassa 18 on nähtävissä, että lopullista sijoittelua ei ollut vielä tehty, vaan kyseessä oli esittelymalli. Esimerkiksi oikealla alhaalla näkyvä, vihreällä korostettu kannakemalli menee osittain vyyhdenpäiden mallin sisään.

Toinen kriittinen asia ratkaistavaksi oli tuentajärjestely. Vaikka periaate selkápalkkeihin tuennasta oli sovittu, tuli itse kannakkeet mitoittaa ja suunnitella. Kuvassa 18 nähdään punaisella värillä korostettu kannakkeen jalka, joka oli tarkoitus ruuvata selkápalkkiin. Erityisen pitkälle pääsi ”Lego”-työnimellä kulkenut kannakemalli, jota esitellään kuvassa 19. Lego-nimitys tuli kannakeosiin tehdyistä huulloksista ja urista, joiden tarkoitus oli pitää kannake paremmin paikallaan asennuksen aikana, ennen sen kiristystä. Kuvassa 18

näkyvä sinisellä korostettu, kaksilla kierteillä varustettu jalka oli tarkoitus ruuvata selkäpalkkiin ja lopuksi kiristää kannake kahdella pitkällä vaarnaruuvilla ja muttereilla.



Kuva 19. Vaihtoehtoinen kannakemalli. Alin violetti kannakepala piilotettu mallista, jotta nähdään kannakkeen rakenne paremmin.

Jossain vaiheessa päädyttiin viemään eteenpäin yksiruuvista, pyöreistä levyistä koottua kannaketta. Tämän kannakemallin etuina voidaan pitää melko laajaa tuentapinta-alaa, ainoastaan yhden ruuvin käyttöä ja levyjen pyöreästä muodosta johtuvaa asennuksen joutuisuutta, symmetriselä muodolla kun ei ole väliä, miten päin sen asettelee. Yhden ruuvin käyttö on kuitenkin merkityksellisin etu. Tärisevässä, pyörivässä koneessa kaikki rungon sisäpuoliset ruuviliitokset muodostavat riskin niiden aukeamisesta ja ruuviosien kulkeutumisesta ilmapäliin, joka aikaansaisi mittavat vahingot. Nykyisillä, tehokkailla ruuvien lukitustavoilla tämä riski on saatu minimoitua, mutta ei kokonaan poistettua. Pääsääntönä generaattorin sisäpuolisiin liitoksiin onkin ruuviliitosten välttäminen. Kannakoinnissa ruuvien vähentäminen kolmasosaan pienentää entisestään pientä riskiä ruuvien avautumisesta.

Sitä mukaa kun ratkaisut tarkentuivat, suunniteltiin ne pitkälti valmiiksi olemassa olevien suunnittelukäytäntöjen mukaan. Tässä vaiheessa työn alle otettiin valmistus- ja työohje-piirustukset sekä osaluettelot.

Kuvassa 17 näkyvä järjestysnumerolla 1 oleva ”Connection ring 6-branch” -combonimike on kytkentärenkaan valmistusnimike ja sen alla on lattakuparin BKFD 35x10 nimike materiaalina. Tämän nimikkeen piirustus ja osaluettelo on tarkoitettu alihankinnan käyttöön.

KytKentärenkaan kokoonpanopiirustus 3AFP9202852 on myös tarkoitettu alihankinnan käyttöön ja eikä siinä ole ohjeistettu renkaan eristystä. Se että renkaan valmistusnimike toimii kokoonpanon aliosana, mahdollistaa useamman alihankkijan kilpailutuksen, kun esimerkiksi jollain alihankkijalla voi olla vain kuparin työstöön tarvittavia koneita ja jollain toisella juottamiseen keskittyvää osaamista.

Kokoonpanonimike ja -piirustus toimii taas aliosana 3AFP9204037-INSULATED CONNECTION RING 6-BRANCH -piirustukselle, jossa on esitetty yksittäisen renkaan eristys. Ainakin ensi alkuun valmiiksi eristetyn renkaan nimike ja piirustus on tarkoitettu sisäiseen, oman tuotannon käyttöön. Myöhemmin, mikäli uusi työmenetelmä vakioidaan, voi renkaan eristysten ostaa ulkopuolelta. Valmiiksi eristetyn kytkentärenkaan kokoonpanonimike tulee näkymään käämityn staattorin – Wound stator core – CU001:n osaluettelossa.

Renkaiston asentamisesta ja kytkennästä on myös tehty piirustus 3AFP9203819. Tässä työpiirustuksessa on viitattu CU001-osaluetteloon, johon on lisätty renkaiston kannakkeet tarvittavine ruuviosineen. Lisäksi piirustuksessa esitetään viitaukset tarvittaviin P-ohjeisiin.

4.3 Muut suunnittelutyöt

Uuden kytkentärenkaiston suunnitteluun liittyy läheisesti muita suunnittelutehtäviä, jotka kuitenkin ovat tämän raportin ulkopuolella. Nämä asiat tulee ratkaista ja toteuttaa ennen hankkeen pilotointia.

Koska kytkentärenkaat on tarkoitus tukea staattorin selkápalkkeihin, on niitä syytä jatkaa. Pilottihankkeen vastaava suunnittelija suunnittelee uudet, pidemmät selkápalkit. Näissä selkápalkkeissa tulee huomioida kannakkeiden ruuvikiinnitys (M16 -ruuvi) ja neljään palkkiin sivulle ruuvattavat nostorenkaat WLL 6,7t 90deg. Käämityn staattoripaketin nostoa käsiteltiin tarkemmin luvussa 3.1.4. 3D-mallin tilatarkastelussa kävi ilmi, että selkápalkkeja tulee jatkaa N-päästä 60 mm. Koska nostorengaan tyviosan suurin halkaisija on 70 mm, tulee M30 reiän keskipiste mitoittaa 50 mm palkin N-päästä. Näin toimien saadaan nostorengas ruuvattua paikalleen ilman että se ottaa mihinkään ylimääräiseen kiinni.

Koska uusien renkaiden asennus eroaa merkittävästi vanhasta tavasta, niin tulisi Stator Winding -piirustus päivittää. Pilottihankkeessa riittää osaluettelon vakiopiirustuksen rinnalle lisättävä piirustus uusien kytkentärenkaiden asennuksesta ja osaluettelon tekstiviittäus. Mikäli uusi tapa toteuttaa kääminnän kytkentärenkaat otetaan käyttöön vakiotavaksi, voidaan vakiopiirustus päivittää tapaa vastaavaksi.

Lattakuparirenkaista on tehty kuusihaarainen versio, jota pilotoidaan aikanaan. Kuten aiemmin on esitetty, löytyy vakio-tahtigeneraattoreista myös neljä- ja seitsemänhaaraiset kytkennät. Mikäli näissä generaattorityypeissä halutaan käyttää esivalmistettua lattakuparirenkaistoa, tulee näille tehdä valmistusdokumentit kuparirengaan valmistuksesta ja -juottamisesta. Kytkentärenkaan eristyspiirustus ja renkaiston asennuspiirustus ovat geneerisiä piirustuksia ja niissä on maininta myös muista vaihtoehdoista. Pilottiprojektin valinta ja alkaminen saattaa ottaa aikaa ja tämän vuoksi on laadittu suunnittelussa huomioon otettavista asioista muistio, liite 5. Tämä muistio voidaan myöhemmin muokata tarvittaessa suunnitteluohjeeksi.

Lisäksi saattaa olla tarpeen teettää lujuustarkastelu polyamidi 66 -ruuvikiinnitteiselle kannakoinnille. Vaikka renkaiston kokonaismassa on arviolta vain noin 150 kg ja jokainen rengas on juotettu kuusihaaraisen renkaan tapauksessa kuudesta kohtaa kiinni vyyhtiryhmien päihin, olisi silti hyvä varmistaa kannakeruuvien materiaalin soveltuvuus. Verrattuna esimerkiksi 8.8 lujuusluokan teräsruuviin, jonka myötöraja on 640 N/mm^2 , polyamidi 66:n vetolujuus on minimissään 65 N/mm^2 eli noin kymmenesosa. [6, s. 471.]

5 Läpimenoaika- ja tilatarkastelu

Koska staattorikääminnin nopeuttaminen on tämän insinööriyön tavoite ja lähtökohta, tuli selvittää nykyinen tilanne ja arvioida uuden menetelmän vaikutus kääminnin läpimenoaikaan. Lisäksi on esitetty tilatarkastelu kriittisiltä osilta.

5.1 Läpimenoaika

Staattorikääminnystä saadun arvion mukaan kaksi työntekijää tekee yhdessä kahdeksan tunnin työvuorossa valmiiksi neljän vaiheiden pään kytkennän tahtigeneraattorille. Koska kolmivaihegeneraattorissa on yhteensä kuusi vaiheen päätä, ottaa vakio-tahtigeneraattorin kytkentä $2 \times 1,5 \times 8 = 24$ miestyötuntia. Tämä siis väliyhdistäjien teon jälkeen, sisältäen tarvittavat juotokset. Jos juotoksiin kuluva aika arvioidaan olevan tästä noin $\frac{1}{4}$, syntyy aikasäästöä valmiiksi eristetyillä renkailla siten 16 h/staattori.

Toinen arvio kytkentäajasta pohjautuu urakka-aikalaskelmaan ja siinä on arvioitu kytkentäajaksi 42 h. tämä arvio jakaantuu seuraavasti:

1. vaiheiden teko ja eristys – 15 h
2. kytkennän tuenta – 27 h.

Sidontatuentojen tekoon käytetty aika on näistä kahdesta huomattavan iso. Oletetaan, että juotoksiin ja niiden eristykseen kuluva aika on sama 6 h, kuin edellisessä aika-arviossa ja tuentaan käytettävä aika uudella menetelmällä vain 1 h. Näin saadaan aikasäästöksi $42 \text{ h} - (7+1) \text{ h} = 35 \text{ h}$. Tuentaan käytettävän ajan arvion suuri muutos johtuu uuden menetelmän tehokkuudesta, laminaattipalojen paketointi ja nauhan pyörittäminen on hidadista verrattuna ruuvien kiristämiseen, erityisesti jos tuentaväliä voidaan uuden menetelmän avulla kasvattaa (ks. luku 3.1.3).

Toiminnanohjausjärjestelmä SAP:ista valittiin satunnaisesti eri tahtigeneraattoriprojekteja ja etsittiin niistä kääminnin työaikatiedot. Kyseiset työnumerot ja positiot oli toteutettu vuosina 2016–2019. Kääminnin läpimenoajoista laskettiin keskiarvo, 240 h/staat-

torin käämintä. Täytyy muistaa, että kyseinen 240 h keskiarvo kaikesta kääminnän käyttämästä työajasta, pitäen sisällään mm. tauot, lounasajan (vuorotyössä on käytössä 20 min. ruokatauko, joten lounas sisältyy 8 h:n työaikaan), palaverit, siirtymät, ym. Näin ol-
len aika-arviossa tulee käyttää tehollista työaika. Tehokas työaika työpäivää kohden on
eri arvioissa esitetty välille 5–6 h. Jos käyttää tässä puolivälistä saatua kerrointa, 5,5 h,
saadaan staattorikääminnän työajan keskiarvoksi $240 \text{ h} \times 5,5 \text{ h} / 8 \text{ h} = 165 \text{ h}$.

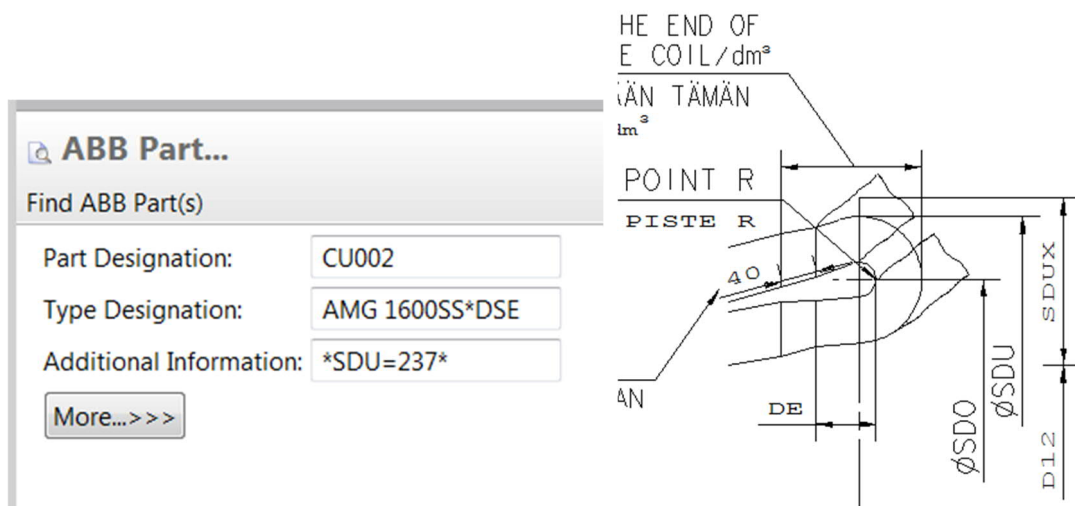
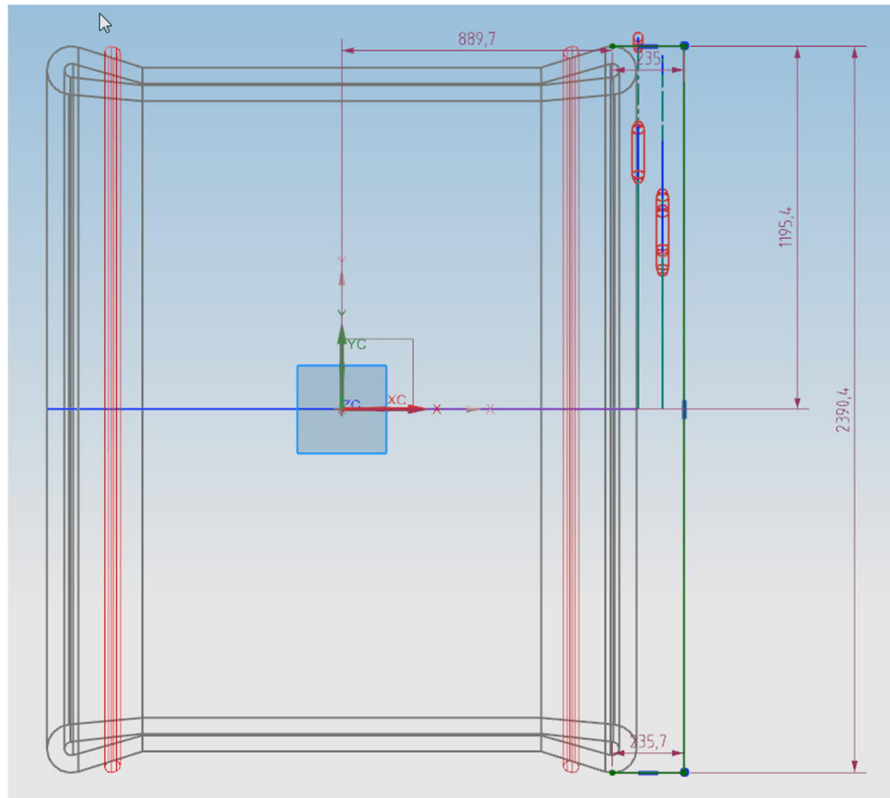
Mikäli renkaat hankitaan valmiiksi eristettyinä, tulee säästetty aika vähentää edellä mai-
nitusta 165 tunnista. Kun aiemmin esitettyjä aika-arvioita vertaa keskenään, saadaan
uuden menetelmän hyödyksi minimissään $100 \% \times 16 \text{ h} / 165 \text{ h} = 10 \%$:n aikasäästö
(mikäli alihankinnan osuus on minimissään). Maksimiarvio pohjautuu taas urakka-aika-
laskelmaan, ja se on $100 \% \times 35 \text{ h} / (165 - 35) \text{ h} = 27 \%$:n aikasäästö. Näistä arvioista
urakka-aikalaskelma vaikuttaa luotettavammalta, sillä se perustuu kuitenkin vuosien var-
rella suoritettuihin mittauksiin ja kokemuksiin, toisen arvion ollessa enemmän ”mututun-
tumalla” tehty. Silti ei pidä kumpaakaan arviota sulkea kokonaan pois tai käyttää ai-
noana, vaan todetaan, että aikaansaatu aikasäästö tulee olemaan lähempänä 27:ää pro-
senttia kuin kymmentä. Täytyy myös muistaa, että alihankinnan määrää ei tässä vai-
heessa vielä tiedetä, vaan kysymyksessä ovat todelliset minimi- ja maksimiarvot.

Kuten edellä on todettu, käämintä on jo jonkin aikaa ollut ”pullonkaulana” tuotannossa.
Jos 35 h muutetaan suoriksi kustannuksiksi, se ei kovin paljon kokonaisen generaattori-
projektin kokonaiskustannuksissa tunnu, varsinkaan jos materiaalikustannukset ja ali-
hankkijoiden katteet lasketaan mukaan tai jos säästettyä 35:tä tuntia verrataan kokonais-
läpimenoaikaan. Mutta sijoittamalla aikaansaatu aikasäästö oikeaan kontekstiin, eli ni-
menomaan kiireellisimpään tuotantovaiheeseen, aletaan olemaan jo lähellä asian ydintä.
Uuden menetelmän lisääntyneet materiaalikustannukset ovat huomattavasti vähemmän,
kuin esimerkiksi yhden generaattoriprojektin myöhästymissakot. Lisäksi toimitusvar-
muus paranee, kun kriittisen tuotantovaiheen työmenetelmiä parannetaan.

5.2 Tilatarkastelu

Uudentyyppiset lattakuparirenkaat vaativat jonkinlaisen tilatarkastelun, koska niiden si-
joittuminen vyyhdenpäihin nähden poikkeaa muista tavoista. Seuraavissa kuvissa on
selvitetty tarkemmin, miten renkaiden sijoittumisen sopivuus varmistettiin. Kuvassa 20

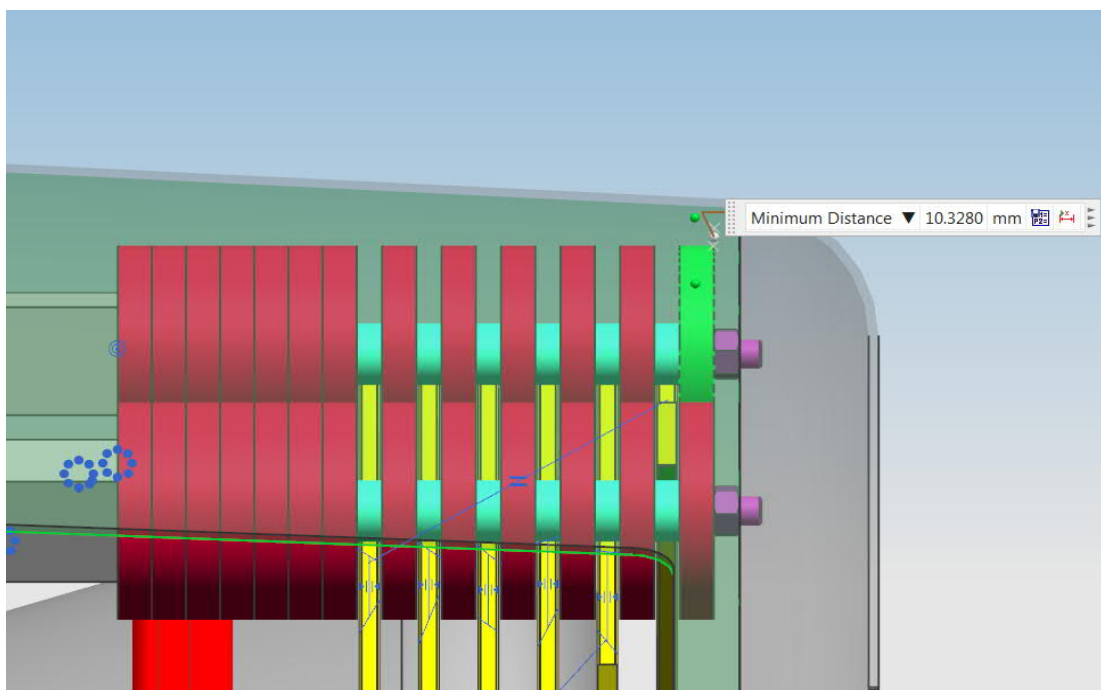
nähdään ylhäällä 3D-mallinnetun staattoripaketin vyyhdenpäiden maksimiulkohalkaisija, $SDU = 2390,4$ mm, johon viitataan myös alhaalla, oikealla olevassa otteessa vyyhdenvalmistuspiirustuksesta.



Kuva 20. Maksimi-SDU-mitan selvitys.

Koska vyyhdenpään ulkohalkaisija oli tärkeä mitta määrittäessä renkaiston halkaisijaa, sijoittelua ja kannakointia, täytyi varmistua siitä, että 3D-mallin staattorimalli on mahdollisimman todenmukainen. PDM-järjestelmästä haettiin SDU-mitalle yksi kerrallaan mahdollisimman suurta arvoa, kuvassa 20 vasemmalla alhaalla. Hakujen tuloksena selvisi, että vakio-tahtigeneraattoreiden SDU-halkaisijan vaihteluväli on 2350 mm–2379 mm. Kuvassa 20 käy ilmi, että staattorimallin maksimihalkaisija menee hieman vaihteluvälin maksimiarvon yli, eli tilanne on mitoituksen kannalta todellista hankalampi. Joskin noin 10 mm:n heitto mallin ja todellisen välillä on täysin hyväksyttävissä.

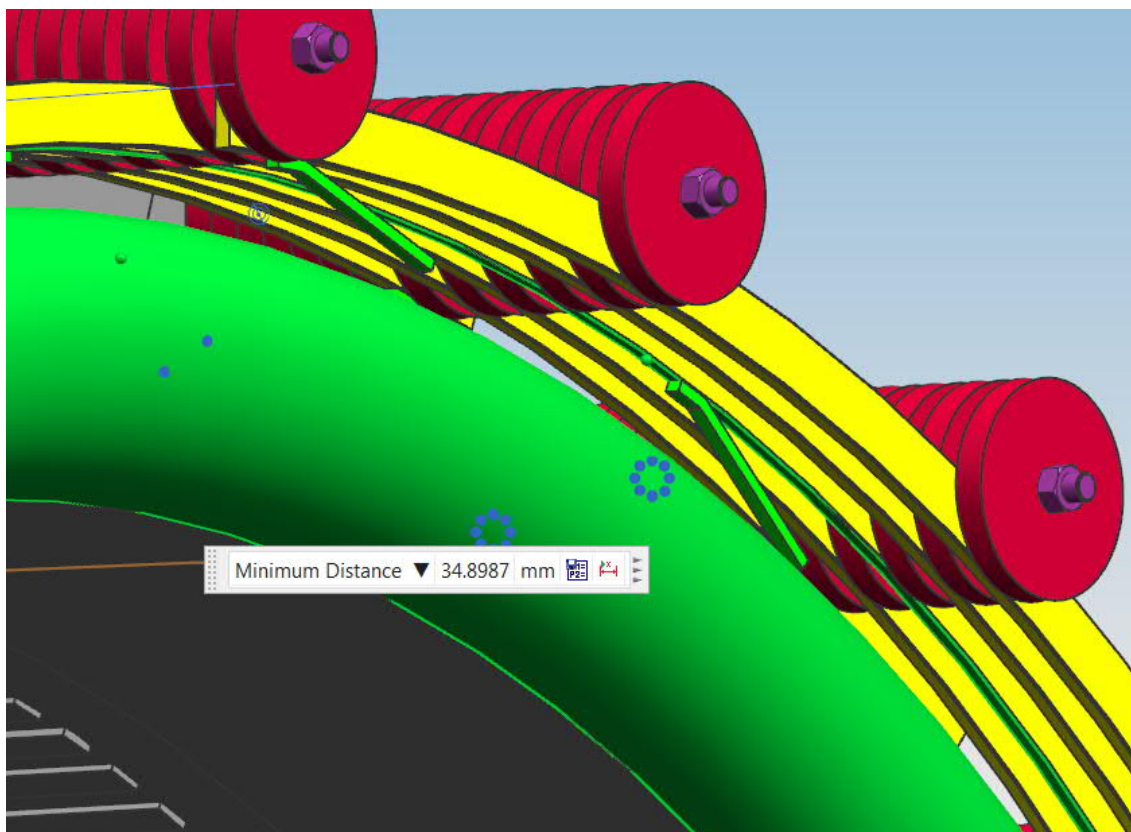
Toinen kriittinen kohde on kannakkeiden mahtuminen ilmanohjaimen 3AFP9096299 alle. Kuvassa 21 nähdään että varaa löytyy noin 10 mm. Koska ilmanohjaimen 3D-malli on suorassa yhteydessä sen valmistuspiirustukseen, voidaan katsoa mallin pitävän täysin paikkansa mittojen osalta. Levykannakkeet taas on paikoitettu staattorin selkápalkkeihin, jotka paikoittuvat staattorin sähkölevyjen mukaan. Sähkölevyjen valmistuspiirustuksessa käytetään 0,01–0,03 mm:n toleransseja, joten mahdolliset virheet tai heitot näissä mitoissa voidaan laskea nollassa. Sidepalkkien hitsauksessa sen sijaan tulla hieman heittoa, arviolta maksimissaan +2 mm halkaisijaan, mutta sekään ei ao. kuvan mukaan muodostu ongelmaksi.



Kuva 21. Ilmaohjaimen ja kannakkeen välinen minimietäisyys.

Ainoa heitto levykannakkeissa syntyy kannakelevyjien keskireiän ollessa halkaisijaltaan 18 mm, kun siitä läpimenevä ruuvi on halkaisijaltaan 16 mm. Näin ollen heittoa syntyy maksimissaan 1 mm.

P-01343:n mukaan ilmaräli C3 erivaihteisten vyyhtien välillä on 15 kV:n jännitteellä minimissään 14 mm [5, s. 13,26]. Kuvassa 22 nähdään tuon vaatimuksen täyttyvän hyvin, lähin rengas paikoittuu noin 35 mm:n etäisyydelle vyyhden päistä.



Kuva 22. Vyyhdinpäiden ja renkaiden välinen minimietäisyys, n. 35 mm.

Kun lisäksi isojen levykannakkeiden paksuus on 17,5 mm, täyttyy vaatimus myös eri vaihteisten kytkentärenkaiden osalta. Koska renkaat sijaitsevat pienempien levykannakkeiden muodostaman kehän sisäpuolella, täyttyy myös P-ohjeen kuvan 7 mukainen 10 mm:n ilmaräli vaatimus [5, s. 27].

6 Yhteenveto

Insinööriyössä suunniteltiin uusi työmenetelmä tai valmistustapa vakio-tahtigeneraattorin staattorikääminnän kytkentävaiheeseen. Tavoitteena oli lyhentää staattorikääminnän läpimenoaikaa esivalmistettujen tai esivalmisteltujen kytkentärenkaiden avulla ja saada osa nykyisistä, peräkkäisistä työvaiheista samaan aikaan toteutettaviksi. Myös alihankinnan osuuden kasvattamista tutkittiin.

Lopputuloksena suunniteltiin hyvin pitkälti alihankittava kytkentärenkaisto, joka on valmistettavissa ja eristettävissä jo ennen muun kääminnän alkamista. Samanaikaisesti suunniteltiin myös periaatteet enemmän nykyiseen työtapaan pohjautuvasta menetelmästä, joka kuitenkin olisi toteutettavissa ennen kääminnän alkua. Näitä kahta työtapaa verrattiin nykyiseen toimintamalliin sekä toisiinsa.

Vertailussa huomattiin erityisesti alihankitun, lattakuparista valmistetun renkaiston edut läpimenoajan suhteen ja tämä renkaisto suunniteltiin hyvin pitkälle valmiiksi. Kuusihaaraisen kytkennän kytkentärenkaiden valmistus-, juotos-, eristys- ja asennuspiirustukset osaluettelointeen löytyvät tämän raportin liitteinä. Lisäksi liitteenä löytyy lyhyt muistio tarvittavista suunnittelutehtävistä, jotka tulee suorittaa uuden renkaiston käyttöönottoprojektin yhteydessä. Koska tarkastelun alla olevaa generaattoria valmistetaan kolmea eri vakiotyyppiä, löytyy muistiossa myös suunnitteluohjeet neljä- ja seitsemänhaaraisille kytkentärenkaille. Muistion ohjeet ovat pienin lisäyksin sovellettavissa myös muiden kokoluokkien generaattoreille. Renkaiston käytön laajentamista voidaan pohtia, mikäli kokemukset pilottiprojektista ovat rohkaisevia.

Joitain asioita jäi tässä projektissa vielä auki ja tärkeimpänä niistä voidaan pitää kannakemateriaalin selvitystä. Kestääkö nyt valittu polyamidi 66 esimerkiksi tyhjiökyllästyksen ja riittääkö sen lujuus pitämään renkaiston paikoillaan generaattorin ollessa ajossa? Tämä asia kyetään varmasti selvittämään piirustusten ja muiden suunnitelmien lopullisen tarkastuksen yhteydessä. Kaikista renkaistossa käytettävistä osista on olemassa 3D-malli, joka on yhteydessä valmistuspiirustukseen ja osaluetteloon. Materiaalien tai mahdollisten mittamuutosten teko myöhemmin ei ole mikään aikaa vievä ongelma, vaan on toteutettavissa hyvinkin helposti ja nopeasti. Kytkentärenkaiden perusperiaate on kunnossa ja siinä on otettu huomioon eri asiantuntijoiden huomiot ja ideat. Lisäksi tilatarkastelu on tehty ja renkaiden kustannustehokas valmistettavuus on huomioitu.

Tämä insinööriyöraportti ei sisällä pilottiprojektin valmistelua muilta kuin suunnittelu-
muistion osalta. Mutta mikäli pilottiprojekti tulevaisuudessa käynnistetään, tullaan sitä
mielenkiinnolla seuraamaan.

Lähteet

1. P-ohje P-1508, 3AFP9400422. 2018. KÄÄMITYKSINÄ KYLLÄSTETTÄVIEN VAIHTOVIRTAKONEIDEN STAATTORIKÄÄMINTÄOHJE, UN = 0...15 000 V.
2. P-ohje P-10586, 3AFP9400711. 2018. Kovajuottamalla tehtävät liitokset staattorinkääminnässä.
3. 3AFP9402440. 2019. SOP KytKentärenkaiston tuenta.
4. P-standardi 3AFP9911506. 2016. Lifting eye bolt – Nostosilmukkaruuvi.
5. P-ohje P-01343, 3AFP9402155. 2018. Eristysteknilliset päämitat: limikäämitys, muotokupari.
6. Valtanen Esko. 2002. Tekniikan Taulukkokirja, 12. painos. Jyväskylä: Genesis-Kirjat Oy.
7. Piirustus 3AFP5146837, rev H. 2013. MOUNTING OF STATOR CORE.
8. Piirustus 3AFP5115002, rev D_003. 2010. WINDING DIAGRAM.
9. Piirustus 3AFP5135930, rev D. 2013. STATOR WINDING.
10. Piirustus 3AFP5115000, rev E. 2019. WINDING DIAGRAM.
11. Osaluettelo 3AFP200767658, rev A. 2018. Wound stator core-CU001.