

Timo Nikkari

# Matalajännitteisen muotokuparitahtikoneen laskentalogiikan kehittäminen

Metropolia Ammattikorkeakoulu

Insinööri (AMK)

Sähkötekniikka

Insinöörityö

6.2.2018

Tekijä Otsikko  Sivumäärä Aika	Timo Nikkari Matalajännitteisen muotokuparitahtikoneen laskentalogiikan kehittäminen 38 sivua 6.2.2018
Tutkinto	Insinööri (AMK)
Tutkinto-ohjelma	Sähkötekniikka
Ammatillinen pääaine	Sähkövoimatekniikka
Ohjaajat	Tuotepäällikkö John Shibutani Lehtori Jukka Karppinen
<p>Insinööriyössä kehitettiin laskentalogiikkaa ABB:n matalajännitteisten muotokuparitahtikoneiden mitoittamista varten. Tavoitteena oli löytää tapa, jolla sähkölaskenta voitaisiin toteuttaa automaattisesti mitoituksessa. Nykyisellään käytössä oleva laskentalogiikka on suunniteltu korkeajännitteisiä koneita silmällä pitäen, joten se ei täysin sovellu matalajännitteisten koneiden mitoittamiseen.</p> <p>ABB:n valmistamat muotokuparitahtikoneet ovat suurimmaksi osaksi olleet korkeajännitteisiä, joten matalajännitteisten osalta ei ole ollut suurta tarvetta automaattiselle mitoitukselle, koska yksittäiset tapaukset on voitu mitoittaa käsin. Mikäli matalajännitteisiä muotokuparitahtikoneita halutaan alkaa valmistamaan suurempia määriä, niiden mitoittamiselle on pitänyt kehittää uusi laskentalogiikka, jonka pohjalta voidaan kehittää automaattista mitoitusohjelmaa.</p> <p>Kehitystyö aloitettiin perehtymällä nykyiseen laskentalogiikkaan ja sen yhtälöihin. Tämän jälkeen logiikkaa tutkittiin hyödyntämällä manuaalista mitoitusohjelmaa, jolla mitoitettiin erilaisia muotokuparitahtikoneita eri jännite- ja tehokokoluokissa. Tätä kautta alettiin ymmärtämään matalajännitteisten koneiden mitoittamiseen liittyviä ongelmia. Yhdeksi merkittäväksi ongelmaksi havaittiin staattorikämmityksen tehollisten johdinkierrosten vähäinen lukumäärä, joka teki mitoituksesta kankeaa, koska vanha logiikka perustui niiden muuttamiseen.</p> <p>Lopputuloksena syntyi staattoriurien muuttamiseen perustuva uusi laskentalogiikka, joka on periaatteessa jatke vanhaan logiikkaan. Se voidaan ohjelmoida mitoitusohjelmaan, jolloin matalajännitteisten koneiden mitoituksesta tulee nopeampaa. Mikäli matalajännitteisten koneiden valmistusmääriä kasvatetaan tulevaisuudessa, on niiden automaattiselle mitoitukselle olemassa nyt laskentalogiikka, joka voidaan ottaa käyttöön.</p>	
Avainsanat	muotokupari, matalajännitteinen, tahtikone, laskentalogiikka, mitoitus

Author Title Number of Pages Date	Timo Nikkari Development of Calculation Logic for Form Wound Low Voltage Synchronous Machine 38 pages 6 February 2018
Degree	Bachelor of Engineering
Degree Programme	Electrical Engineering
Professional Major	Electrical Power Engineering
Instructors	John Shibutani, Product Manager Jukka Karppinen, Lecturer
<p>In this bachelor's study, calculation logic was developed for dimensioning ABB's low voltage form wound synchronous machines. The goal was to find a way in which electric calculation could be done automatically during dimensioning. The calculation logic that's in use currently has been designed for high voltage machines, so it doesn't completely work when dimensioning low voltage machines.</p> <p>Form wound machines, which are produced by ABB, have mostly been high voltage. There hasn't been a high demand for an automatic low voltage dimensioning, because it has been possible to dimension individual cases manually. If the production rate for low voltage form wound machines will be increased, a new calculation logic for their dimensioning would be required to be developed. From that an automatic dimensioning program could be developed further.</p> <p>The development was started by studying the current calculation logic and its formulas. After this a manual dimensioning program was used to study the logic further by dimensioning different form wound machines with different voltage and power values. This way an understanding of the problems with the dimensioning of low voltage machines started to form. One significant problem was observed to be the low number of the effective conductor turns in stator winding, which caused the dimensioning to be not very flexible. This is because the old logic was based on changing the turns.</p> <p>The end result is a new logic which is based on changing stator slots. The logic is basically a continuation to the old calculation logic and it can be programmed into a dimensioning program, which will make the dimensioning of low voltage machines faster. If the production quantity of low voltage machines is increased in the future, there is now a calculation logic for automatic dimensioning that can be used.</p>	
Keywords	form wound, low voltage, synchronous machine, calculation logic, dimensioning

## Sisällys

1	Johdanto	1
2	Tahtikone	2
2.1	Rakenne	3
2.2	Toimintaperiaate	6
3	Muotokuparikäämitys	8
3.1	Käämityksen valmistus	8
3.2	Rakenne staattorissa	10
4	Korkeajännitteisen tahtikoneen mitoitus	11
4.1	Mitoituksen periaate	12
4.2	Mitoitukseen vaikuttavat tekijät	13
4.2.1	Teho	13
4.2.2	Pyörimisnopeus ja taajuus	15
4.2.3	Lämpenemä	17
4.2.4	Virta	18
4.2.5	Jännite	18
4.2.6	Jännitteenalenema ja oikosulkuvirta	20
4.3	Muuttujaparametrit	21
4.3.1	Koneen pituus	21
4.3.2	Teholliset johdinkierrokset	22
4.4	Mitoituksen välivaiheet	23
4.4.1	Pituuden muutos	23
4.4.2	Staattorikäämityksen muutos	24
5	Matalajännitteisen tahtikoneen mitoitus	27
5.1	Mitoitukseen liittyviä ongelmia	27
5.2	Urien muuttaminen	28
5.3	Mitoittaminen käytännössä	31
5.3.1	Laskentatyökalu	31
5.3.2	Esimerkkimitoitus	32
5.4	Jatkokehitysajatuksia	35
6	Yhteenveto	36



## 1 Johdanto

Insinööriyön tavoitteena on kehittää uusi laskentalogiikka ABB:lle matalajännitteisten muotokuparitahtikoneiden mitoitusta varten. Tavoitteena on saada aikaiseksi uusi laskentalogiikka, jonka avulla koneiden sähkömitoitus voidaan tehdä automaattisesti. Laskentalogiikan pohjalta on myöhemmin mahdollista kehittää mitoitusohjelmaa, jolloin matalajännitteisten koneiden mitoitus nopeutuu ja helpottuu.

Tahtikoneiden mitoittamiseen on ABB:lla käytössä kaksi ensisijaista mitoitusohjelmaa, joista toisen avulla koneet mitoitetaan manuaalisesti ja toisen avulla automaattisesti. Laskentalogiikka on käytännössä vakioitu tapa mitoittaa kone, mikä on ohjelmoitu automaattiseen mitoitusohjelmaan. Mitoitusohjelma on suunniteltu ensisijaisesti korkeajännitteisille koneille, eikä sen laskentalogiikka sovellu sellaisenaan matalajännitteisten koneiden mitoitukseen. Tästä syystä matalajännitteisiä koneita on tähän mennessä jouduttu mitoittamaan manuaalisesti.

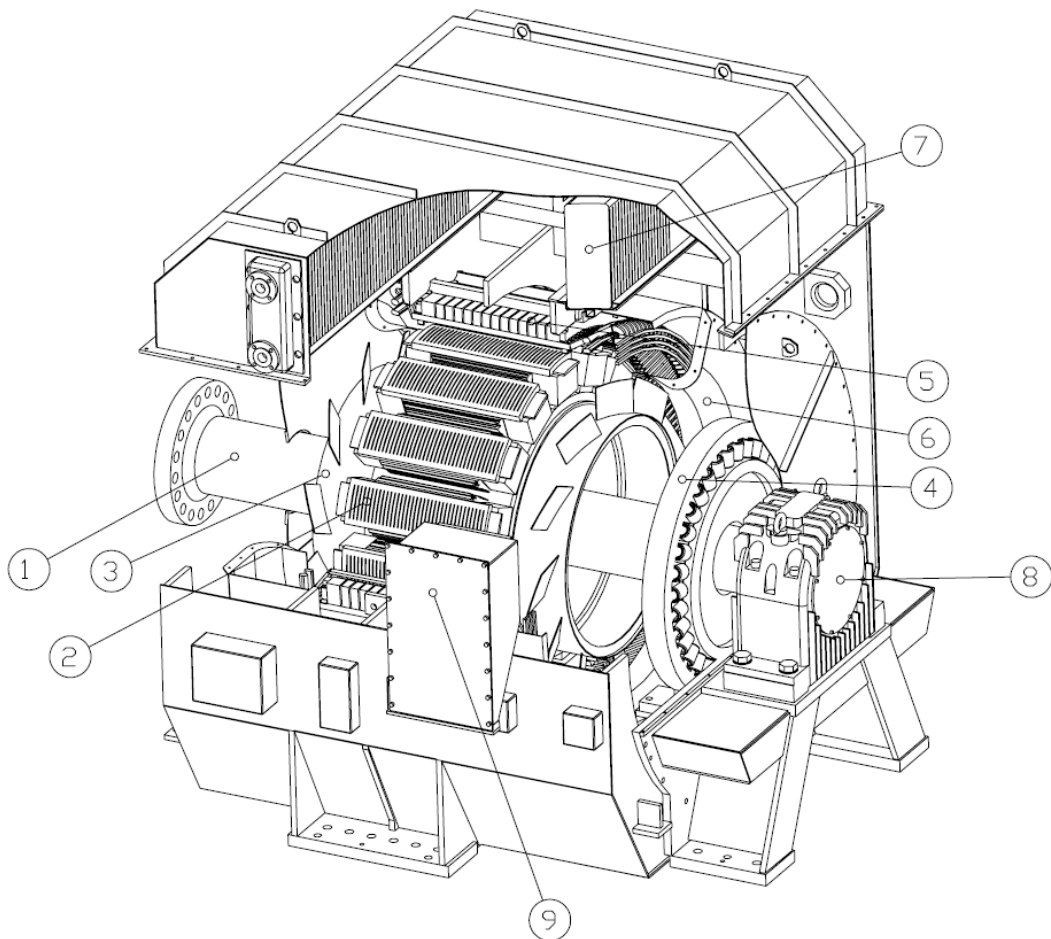
Työn alussa esitellään tahtikoneen rakenne ja toimintaperiaate sekä muotokuparikäämityksen valmistus ja rakenne. Tämän jälkeen perehdytään korkeajännitteisen muotokuparitahtikoneen mitoitukseen ja laskentalogiikkaan. Lopuksi käsitellään matalajännitteisen tahtikoneen mitoitukseen liittyviä ongelmia, jonka jälkeen esitellään uusi laskentalogiikka ja sen avulla tehty mitoitus.

### ABB Oy

ABB on Sveitsissä pääkonttoriaan pitävä teollisuuskonserni, joka on yksi maailman johtavista sähkökonevalmistajista. Se on syntynyt 1988, kun ruotsalainen Asea ja sveitsiläinen Brown Bover fuusioituivat. ABB:n suomalaisen tytäryhtiön, ABB Oy:n, ytimenä on entinen Strömberg, joka oli Suomessa merkittävä sähkötekniikan teollisuusyhtiö, kunnes Asea osti sen vuonna 1986. ABB Oy työllistää Suomessa 5100 henkeä ja sen liikevaihto on noin 2,2 miljardia euroa. Sen Motors and Generators -yksikkö valmistaa moottoreita ja generaattoreita teollisuuden tarpeisiin ympäri maailmaa. Pienjännitekoneet valmistetaan Vaasassa ja korkeajännitteiset Helsingin Pitäjänmäellä. Helsingissä valmistettuihin koneisiin lukeutuu muun muassa korkeajännitemoottoreita, dieselgeneraattoreita sekä kestopagneettimoottoreita. [1; 2; 3; 4.]

## 2 Tahtikone

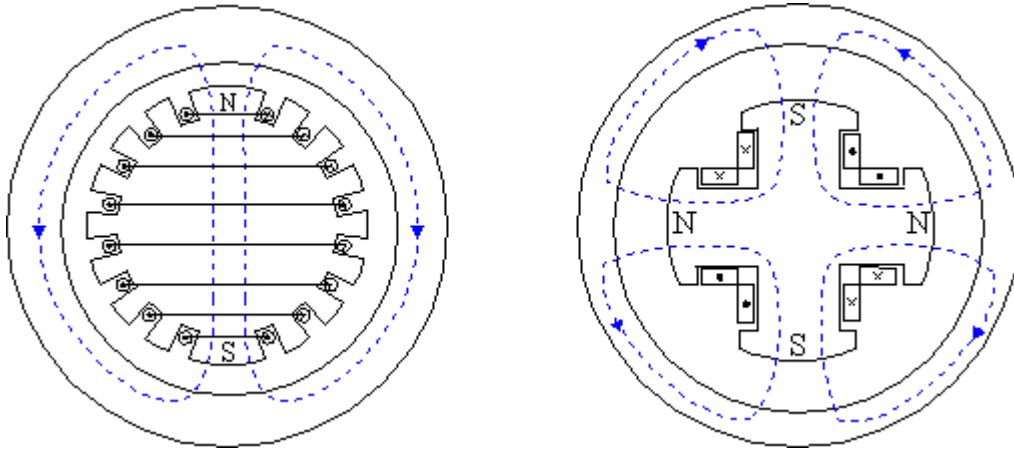
Tahtikone on pyörivä vaihtosähkökone, jonka roottori pyörii samalla nopeudella, eli samassa tahdissa, kuin sen staattorissa kiertävä magneettikenttä. Tahtigeneraattori muuttaa sitä pyörittävän mekaanisen tehon sähkötehoksi verkkoon. Mekaaninen teho saadaan voimakoneesta, joka on kytketty sen akseliin. Tahtikoneet ovat yleisimpiä teollisuudessa käytettyjä generaattoreita, ja niitä käytetään korkeatehoisessa sähköntuotossa, kuten sähkö- ja varavoimalaitoksissa niiden hyvien säätömahdollisuuksien ja korkean hyötysuhteen takia. Sähkövoimalaitoksissa tyypilliset voimakoneet ovat vesi-, höyry- ja kaasuturbiineja ja varavoimalaitoksissa dieselmoottoreita. Kuvassa 1 on esitetty tyypillinen tahtikoneen rakenne. Kyseessä on pukkilaakerikone, jossa laakerit lepäävät erillisten laakeripukkien päällä, sen sijaan että ne olisivat suoraan koneen rungossa kiinni, kuten kilpilaakerikoneissa. [5, s. 87; 6, s. 214–215; 7, s. 11.]



Kuva 1. Pukkilaakerikone, jossa on runkoon integroidut laakeripukit. Tahtikoneen pääosat: 1. roottoriakseli, 2. roottorin napa, 3. tuuletin, 4. magnetointikone, 5. staattori, 6. ilmanohjain, 7. lämmönvaihdin, 8. laakeri, 9. päälitöntäkotelo. [7, s. 15.]

## 2.1 Rakenne

Tahtikone koostuu staattorista ja sen sisällä pyörivästä roottorista, joka voi olla joko avo- tai umpinapainen. Avonapaisia koneita käytetään enimmäkseen matalan pyörimisnopeuden käytöissä ja umpinapaisia korkeissa pyörimisnopeuksissa. Avo- ja umpinaisen koneen karkeat rakenteelliset erot sekä niissä kulkeva magneettivuon on esitetty kuvassa 2. [5, s. 87; 6, s. 214–215; 7, s. 11.]



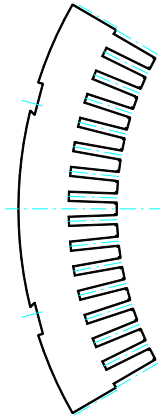
Kuva 2. Magneettivuon kulkureitti tahtikoneissa. Vas: 2-napainen umpinapakone. Oik: 4-napainen avonapakone. [8, s. 1.]

### Staattori

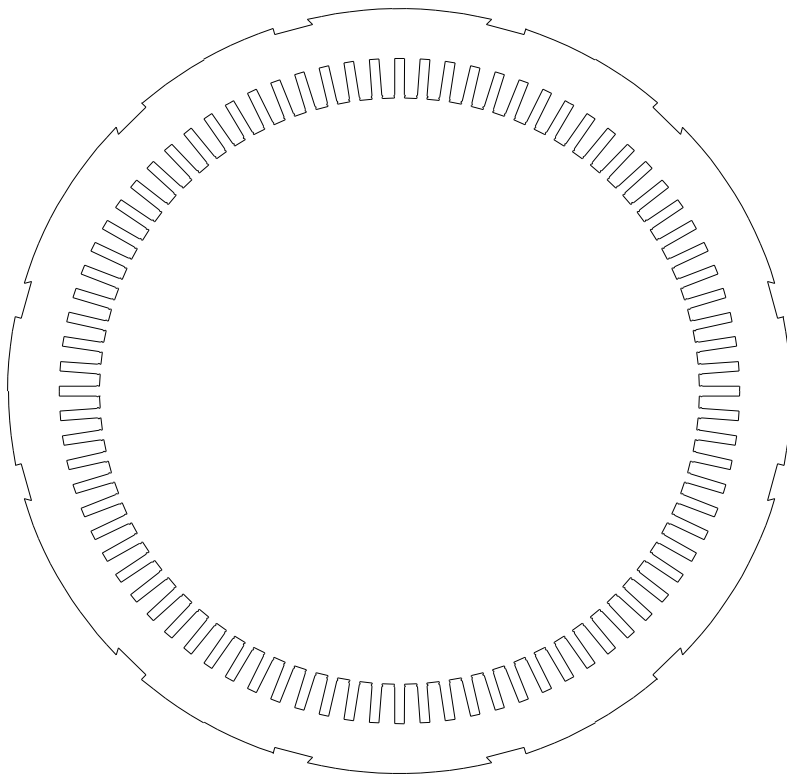
Staattori koostuu rautaosasta ja kuparikäämityksestä. Rautaosa, joka koostuu staattoriselästä ja -hampaista, rakennetaan puolen millimetrin paksuisista uritetuista segmenttilevyistä, jotka on ladottu siten, että ne muodostavat sylinterin muotoisen staattorin (ks. kuvat 3 ja 4). [7, s. 11.]

Levyrakennetta käytetään staattorikäämityksestä aiheutuvien pyörrevirtojen vähentämiseksi. Sylinterin sisäpuolella olevien hampaiden väliin jääviin uriin sijoitetaan eristetyt kuparivyyhdet, joista kolmivaiheinen käämitys muodostuu. Staattorin levyrakenteeseen jätetään ilmasolia, joiden läpi jäähdytysilma pystyy virtaamaan. Parempi jäähdyvyys parantaa koneen hyötysuhdetta, ja sen fyysinen koko saadaan hieman pienemmäksi. [7, s. 11.]





Kuva 3. Staattorin uritettu segmenttilevy [8, s. 4].



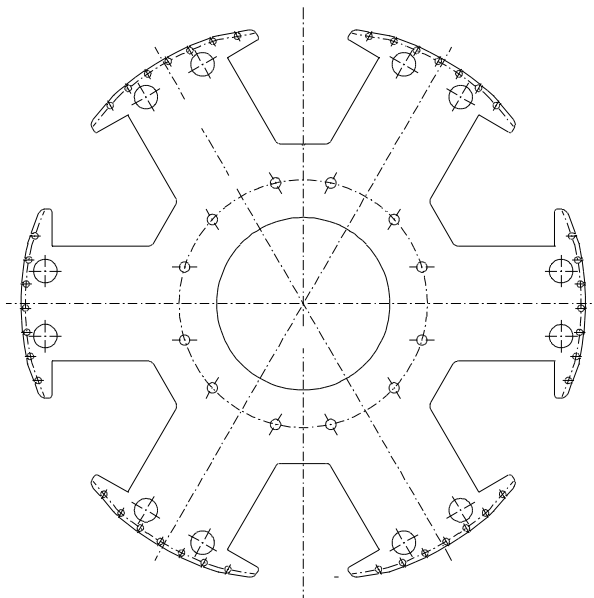
Kuva 4. Segmenttilevyistä koottu staattorin kehä [8, s. 5].

### Roottori

Umpinapainen roottori rakennetaan sylinterimäiseksi ja sen magnetointikäämitys sijoitetaan roottorin pinnalla oleviin uriin. Umpinaparottorin rautaosa rakennetaan yleensä yhtenäisestä rautakappaleesta koneistamalla. Tämä yhtenäinen rakenne tekee roottorista

magneettisesti lähes symmetrisen, minkä ansiosta magneettivuo pystyy tunkeutumaan tasaisesti rautaosaan navan ja magnetointikäänin kautta. Kaksinapaiset tahtigeneraattorit ovat useimmiten nimenomaan umpinapakoneita, koska avonapainen rakenne ei ole yhtä käytännöllinen kaksinapaisena. [5, s. 87; 6, s. 229; 7, s. 12.]

Avonapainen roottori koostuu akselista, roottorirenkaasta ja ulkonevista navoista, joiden ympärille magnetointikäänitys on asennettu. Navat voidaan pienissä koneissa rakentaa yhtenäisistä, päällekkäin ladotuista tähtinapalevyistä, jotka puristetaan akselin ympärille (ks. kuva 5). Huomattavasti yleisempi tapa on kuitenkin rakentaa navat erikseen joko massiiviraudasta tai teräslevyistä ja kiinnittää roottoriin pulteilla tai lohenpyrstökiinnityksellä, jonka sisälle akseli puristetaan. Levyrakenteisessa navassa on pienemmät pyörrevirtahäviöt, mutta se ei ole mekaanisesti yhtä kestävä kuin massiivirautainen. Napojen ympärillä oleva magnetointikäänitys tehdään joko lankakuparista tai lattakuparista, joista jälkimmäinen on kalliimpi, mutta mekaanisesti kestävämpi. Lattakuparin jäähdytysominaisuudet ovat myös parempia kuin lankakuparin. Napojen päihin sijoitetaan päistään yhteen kytketyt vaimennuskäämit, jotka muodostavat oikosuljetun häkkikäänityksen. Vaimennuskäämejä ei tarvita massiiviraudasta tehdyissä navoissa. [5, s. 87; 7, s. 12–13.]



Kuva 5. 6-napaisen koneen tähtinapalevy [8, s. 6].

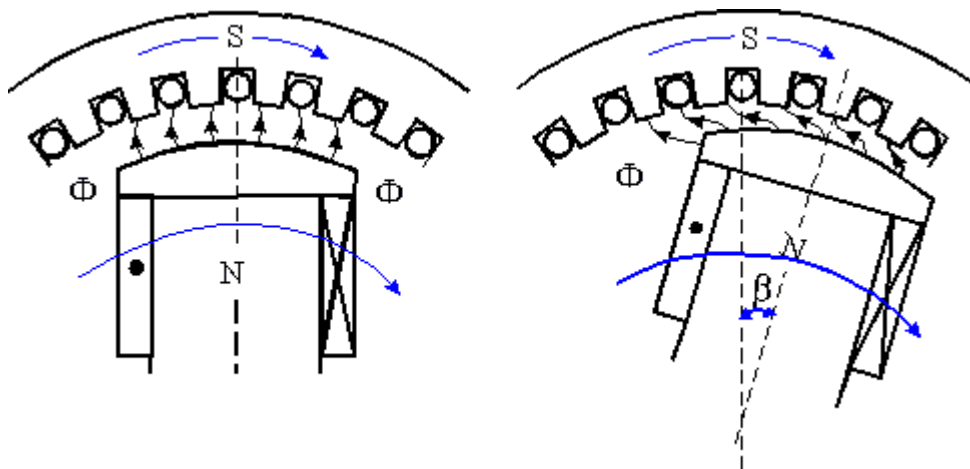
Johtuen avonapaisen roottorin rakenteesta se on magneettisesti epäsymmetrinen. Toisin sanoen roottorin navat johtavat hyvin magneettivuota, mutta niiden välissä olevat

suurehkot ilmavälit eivät. Avonapakoneet ovat yleensä moninapaisia, ja niitä käytetään matalan pyörimisnopeuden käytöissä. [5, s. 87–88; 7, s. 12–13.]

## 2.2 Toimintaperiaate

Tahtigeneraattori toimii siten, että jokin voimakone, esimerkiksi diesel-moottori, pyörittää generaattorin akselia, jonka ympärille roottori on rakennettu. Roottorin navoissa on magnetointikäänitys, johon johdetaan tasajännitteinen magnetointivirta. Napoihin johdettu tasavirta synnyttää magneettivuon, joka roottorin pyöriessä leikkaa staattorin käämejä ja indusoi niihin sinimuotoisen kolmivaiheisen vaihtolähdejännitteen. Staattorikämeihin indusoituva vaihtovirta synnyttää kolmivaiheisen magneettikentän, joka lähtee kiertämään staattoria samassa tahdissa, kuin missä roottori pyörii. Näin saadaan tuotettua vaihtojännitteistä sähkötehoa, joka syötetään sähköverkkoon. [5, s. 88–89; 6, s. 215.]

Staattorissa pyörivä magneettikenttä pyörii samalla nopeudella kuin koneen roottori. Tyhjäkäynnissä kuorman momentti on nolla, jolloin staattorin magneettikenttä ja roottorin navassa olevan magneettikentän välinen kulma on  $0^\circ$ . Kun generaattori kytketään verkkoon, syntyy kuorma, jonka momentti jarruttaa staattorin magneettikenttää. Staattori- ja roottorikentän välille syntyy napakulma, jonka suuruus määräytyy kenttien välisen momentin mukaan, joka on yhtä suuri kuin kuorman momentti. Tätä kulmavaihtelua on havainnollistettu kuvassa 6. Maksimimomentti saavutetaan, kun kulma on  $90^\circ$ . Jos kulma kasvaa tätä suuremmaksi, kone putoaa tahdista, sillä roottori ei kykene pyörimään staattorikentän mukana. [8, s. 3]



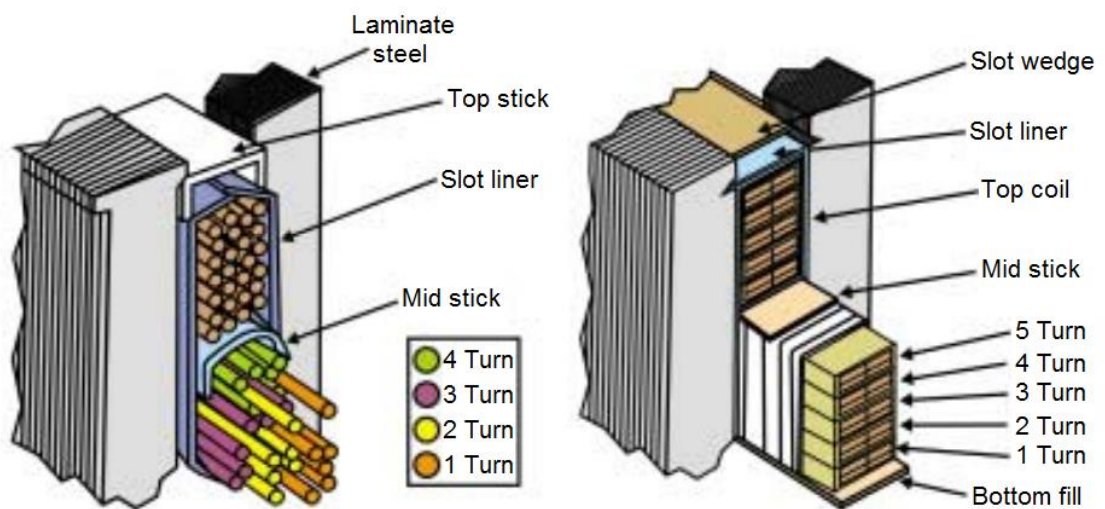
Kuva 6. Tahtigeneraattori tyhjäkäynnissä ja kuormitettaessa [8, s. 3].

Magnetointivirta luodaan yleensä harjattomasti, mutta se voidaan toteuttaa myös harjallisesti. Harjattomassa tavassa käytetään magnetointikonetta, joka on koneen akselille asennettu pienempi generaattori, joka on vakionopeuskoneissa käytännössä nurinpäin käännetty tahtigeneraattori eli ulkonapakone. Sen staattorissa oleviin napakäämeihin johdetaan tasavirta, joka indusoi roottorissa olevaan kolmivaihekäämitykseen vaihtovirran, kun akseli pyörii. Vaihtovirta tasasuunnataan diodisillalla ja saadulla tasavirralla magnetoidaan pääkoneen roottorin käämitys. [5, s. 89; 6, s. 217–218; 7, s. 13.]

Harjallisessa magnetoinnissa magnetointivirta johdetaan ulkoisesta jännitelähteestä roottoriin liukurenkaiden ja hiiliharjojen avulla. Jännitelähde on joko tasajännitteinen tai sitten vaihtojännitteinen, jonka virta tasasuunnataan. Harjallisen magnetoinnin säätöominaisuudet ovat nopeampia kuin harjattomassa, mutta se vaatii kausittaista huoltoa, koska hiiliharjat kuluvat ja tahtikoneen sisään kertyy hiilipölyä. [5, s. 89; 6, s. 218–219; 7, s. 13.]

### 3 Muotokuparikäämitys

Staattorin käämitys toteutetaan yleensä joko lankakuparista tai muotokuparista. Lankakuparikäämitys koostuu pyöreistä nippuun laitetuista kuparilangoista, joiden keskinäinen järjestys kierrosten mukaan heittelee. Muotokuparikäämitys tehdään yksittäisestä suorakulmaisesta johtimesta, joka kierretään siistiksi vyyhdeksi, jonka kierrokset ovat järjestyksessä. Tätä rakenteellista eroa on havainnollistettu kuvassa 7. Tässä työssä käsitellään muotokuparikoneita, joten lankakuparia ei juuri käydä läpi vaan keskitytään muotokupariin. [9, s. 1–2.]

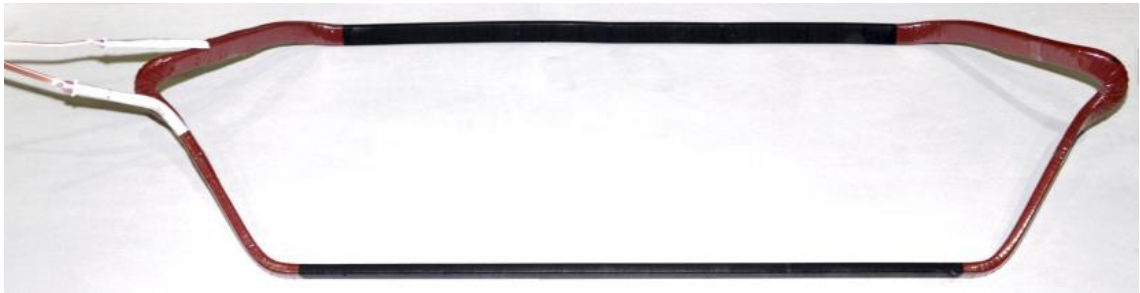


Kuva 7. Kuparijohtimien rakenne urassa. Vasemmalla lankakupari- ja oikealla muotokuparikäämitys. [9, s. 2–3.]

#### 3.1 Käämityksen valmistus

Staattorin käämitys koostuu useammasta staattorikoloihin asetetusta vyyhdestä, joiden muotokuparijohdin on eristetty, jotta se kestäisi kierrosten väliset potentiaalierot sekä muut jännitepiikit. Valmistus aloitetaan sillä, että kuparijohdin kierretään vyyhdeksi, siten että kierrokset ovat järjestyksessä, eli ensimmäisen kierroksen jälkeen tulee toinen ja kolmas ja niin edelleen. Joissain tapauksissa voidaan käyttää kahta vierekkäistä johdinta, koska erittäin leveätä kuparia on vaikea muotoilla. Samaten jos kuparista tulisi liian paksu, voidaan käyttää päällekkäisiä rinnankytkettyjä osajohtimia. Kun vyyhti on kierretty, se muotoillaan koneen avulla sopivan levyiseksi ja pituiseksi, jotta se on oikean

muotoinen staattoria varten (ks. kuva 8). Tämän jälkeen vyyhti peitetään eristysteipillä, joka suojaa sitä sähköisiltä ja mekaanisilta rasituksilta. [9, s. 2.]



Kuva 8. Muotokuparivyyhti [10, s. 17].

Vyyhdet asennetaan uriin tukevasti uraeristuksen ja urakiilojen avulla. Uraeristys sijaitsee johtimien ja levypaketin välissä ja se suljetaan urakiilan avulla. Vyyhden päihin asetaan tukipaloja varmistamaan hyvä jäähtyvyyden. Lisäksi tukipalat yhdessä vyyhdenpäiden sitomisen kanssa parantavat käämityksen jämakkyyttä ja pitävät sen paikallaan kovissakin liikevoimissa. Kun vyyhdet ovat paikoillaan, tehdään lopulliset kolmivaihe- ja ulostulokytkennät, jotka myös eristetään. [6, s. 127–128; 9, s. 2.]

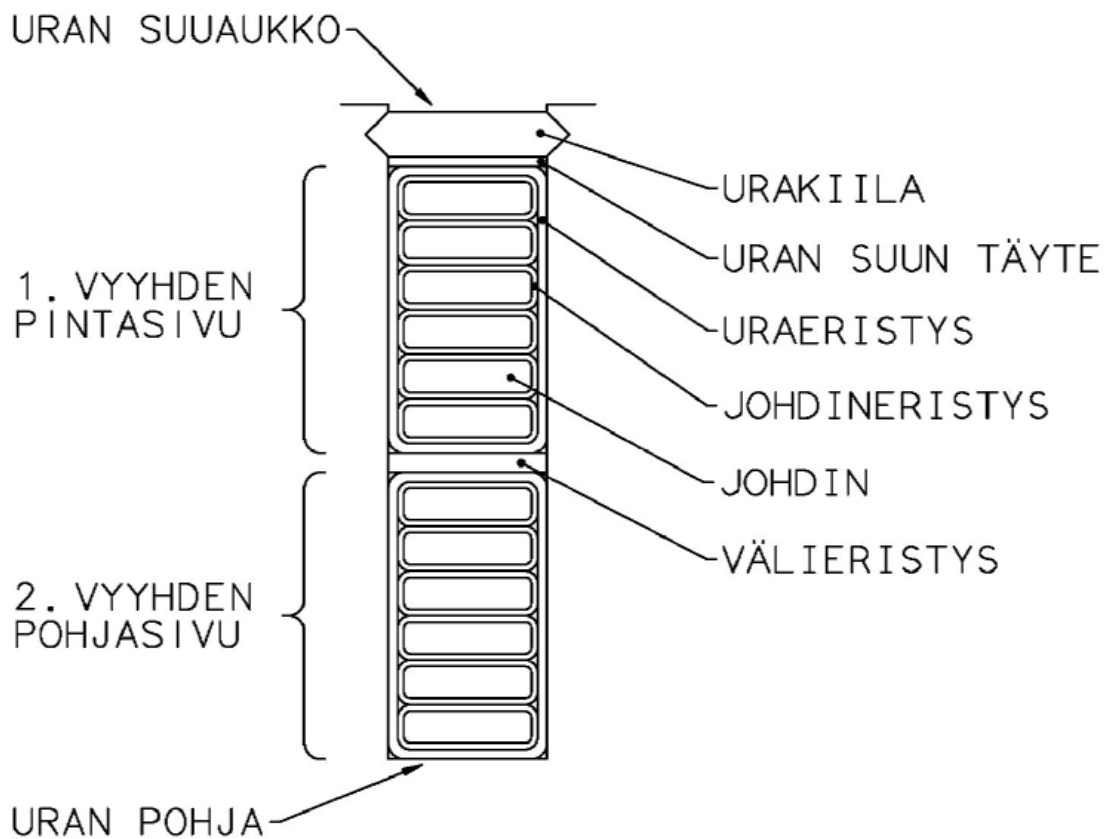
Lopuksi vyyhdet ja staattori tyhjiö-painekyllästetään, jos sitä ei ole jo vyyhteille tehty. Toinen vaihtoehto on kyllästä vyyhdet jo ennen staattoriuriin asentamista. Vyyhtejä, jotka on kyllästetty ennen uraan asentamista, kutsutaan koviksi. Jos ne kyllästetään staattorin kanssa, niitä kutsutaan pehmeiksi. Tyhjiö-painekyllästämisessä vyyhdet ja staattori altistetaan tyhjiölle, joka poistaa ilman ja kosteuden niistä. Tämän jälkeen vyyhdet kyllästetään paineen alla tekohartsilla, joka levittyy tasaisesti. Vyyhdet ja staattori laitetaan uuniin, jossa hartsi kovettuu ja luo suojaavan kerroksen, joka myös tekee käämityksen rakenteesta jämän ja kestävä. [7, s. 11; 9, s. 2.]

Vyyhtien kyllästys tehdään muun muassa seuraavista syistä:

- vaikuttaa eristysteknisen lujuuden määräytymiseen
- parantaa lämmönsiirtokykyä
- kasvattaa mekaanista lujuutta
- parantaa kosteuden ja lian sietokykyä
- parantaa puhdistettavuutta
- varmistaa vyyhden kiinnittymisen uraan pehmeän vyyhdin tapauksessa. [7, s. 11.]

### 3.2 Rakenne staattorissa

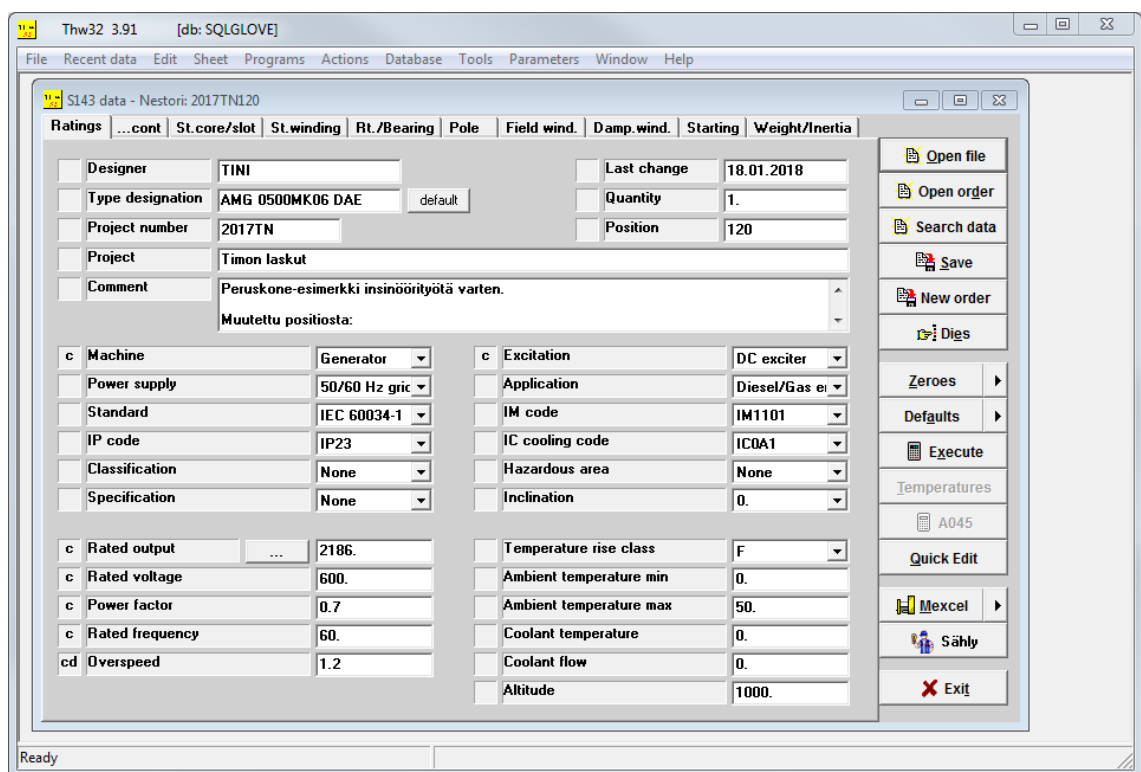
Staattorin käämitys rakennetaan kaksikerroslimittäisenä. Staattorin urat on mitoitettu siten, että niihin mahtuu kaksi muotokuparivyyhteä päällekkäin. Vyyhdet asennetaan staattoriin limittäin siten, että vyyhden toinen sivu asettuu uran alaosaan. Toinen sivu asennetaan seuraavan määritetyn uran yläosaan. Seuraava ura määrittyy vyyhdenleveyden mukaan, ja näiden kahden uran väliin jää aina muita uria. Näin ollen yhdessä urassa on aina kahden eri vyyhden sivut päällekkäin. Staattoriuran poikkileikkaus on esitetty kuvassa 9, jossa näkyy päällekkäiset vyyhdet ja niiden johtimet sekä eristys. [10, s. 20 ja 22.]



Kuva 9. Staattoriuran ja vyyhtien poikkileikkaus [10, s. 22].

## 4 Korkeajännitteisen tahtikoneen mitoitus

ABB:n sähkönlaskijat mitoittavat tahtikoneita käyttäen enimmäkseen THW-mitoitusohjelmaa (ks. kuva 10), jossa on sisällä alilaskentaohjelmia, jotka laskevat eri osa-alueita. THW on oikeastaan käyttöliittymä näille läpilaskentaohjelmille ja siinä määritellään koneen parametrit, joita aliohjelmat sitten käyttävät lähtöarvoina. Laskentaohjelmiin lukeutuvat S143 pääkoneen laskentaan, S125 koneen lämpenemän laskentaan, A045 apukoneen laskentaan, A111 verkkokäynnistyksen laskentaan ja A081 tahdistusjättämän laskentaan. Nämä ohjelmat ottavat THW:hen syötetyt parametrit ja syöttävät niistä saadut tulokset erilliseen tiedostoon tai tietotaulukkoon, josta sähkönlaskija lukee ne. [7, s. 29.]



Kuva 10. THW-ohjelman pääikkuna.

Käytössä on myös lähinnä myyntipuolen käyttöön suunniteltu Nestori-niminen mitoitusohjelma, joka käyttää samoja alilaskentaohjelmia kuin THW. Nestorissa käyttäjän tarvitsee kuitenkin vain syöttää halutun koneen perustiedot, kuten esimerkiksi teho, jännite ja pyörimisnopeus. Ohjelma suorittaa syötettyjen arvojen perusteella alilaskentaohjelmat ja valitsee tulosten mukaan sopivan koneen automaattisesti. Käyttäjä voi tämän jälkeen



vielä muuttaa valintaa tai tehdä hienosäätöjä. Koska Nestorin käyttäminen vaatii huomattavasti vähemmän manuaalista laskentaa verrattuna THW:hen, se soveltuu hyvin myyjien käyttöön, eikä vaadi yhtä korkeaa sähkötekniistä osaamista.

#### 4.1 Mitoituksen periaate

Mitoituksen lähtökohtana on pyrkiä varmistamaan, että koneen valmistus on mahdollisimman kustannustehokasta. Koneen valmistuskustannuksiin vaikuttaa erittäin paljon olemassa olevat työkalut ja suunnittelun tarvittava määrä. Kun sähkölaskija aloittaa koneen mitoituksen THW:llä, hän valitsee sen pohjaksi ennestään mitoitettun tai valmistettun koneen, joka vastaa mahdollisimman paljon asiakkaan vaatimuksia. Ideaalisessa tilanteessa ennestään valmistettu kone täyttää kaikki asiakkaan vaatimukset sellaisenaan, mutta useimmiten näin ei ole. Tällöin valittua konetta pyritään muuttamaan sen verran, että se täyttää vaatimukset, mutta kuitenkin mahdollisimman vähän, ettei kaikkia valmistustyökaluja ja suunnitteluprosessia tarvitsisi tehdä uudestaan. Käytännössä tämä tarkoittaa muun muassa sitä, että suunnittelussa valitaan sellainen koneen poikkileikkaus, eli staattorin uramitta ja roottorin napojen mitat, että sen runko voidaan rakentaa olemassa olevilla staattori- ja roottorimeisteillä. Näin koneen mitoituksesta tulee myös tarkempaa, koska siinä voidaan hyödyntää vanhoilla meisteillä valmistettujen koneiden testituloksia ja verrata niitä laskettuihin arvoihin. [7, s. 36; 11, s. 2.]

Tällaisista ennestään mitoitetuista ja valmistetuista koneista on myös valittu sopivia ”peruskoneita” Nestori-mitoitusohjelmaa varten. Peruskoneen valinta ei periaatteellisesti eroa siitä, että valitaan mitoituksen pohjaksi vanha sopiva kone, mutta peruskoneet muodostavat ”virallisen” ylläpidetyn konelistan, jota Nestorin on helppo käyttää. Peruskoneiden tulee olla riittävän laadukkaita, mahdollisimman kustannustehokkaita, ja niille on yleensä olemassa valmiit työkalut. Tällaisia koneita myös pyritään valmistamaan mahdollisimman paljon. [11, s. 2.]

Käytännössä kun sopiva ennestään valmistettu kone on valittu mitoituksen pohjaksi, asiakkaan vaatimusten aikaansaamiseksi riittää usein vain pituuden ja käämityksen muuttaminen. Koneen levypaketin pituutta ja staattorikäämitystä muutetaan siten, että kone pysyy magneettisesti samanlaisena ja termiset arvot ovat sopivia. Tällä menetelmällä yli 80 %:ssa tapauksista saadaan mitoitettua sopiva kone. [7, s. 37; 11, s. 2.]

## 4.2 Mitoitukseen vaikuttavat tekijät

Asiakkaan vaatimukset täyttävän koneen mitoitukseen vaikuttaa teho, pyörimisnopeus ja taajuus, lämpenemä, virta, jännite sekä jännitteenalenema ja oikosulkuvirta [8, s. 22–27].

### 4.2.1 Teho

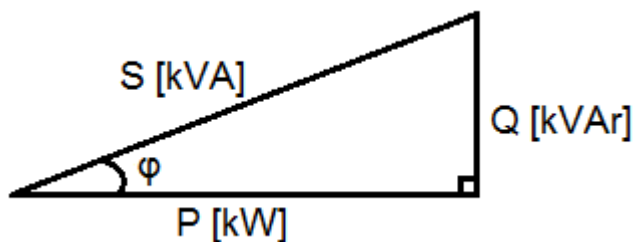
#### Nimellisteho

Generaattorista halutaan yleensä tietty näennäisteho tietyllä tehokertoimella. Teho pitää saada tuotettua ilman, että kone lämpenee liikaa. Kaavassa 1 on kuvattu tehokertoimen vaikutus koneen nimellistehoon. [8, s. 22.]

$$S_n \text{ [kVA]} = \frac{P_n \text{ [kW]}}{\cos \varphi} \quad (1)$$

$S_n$  on nimellinen näennäisteho  
 $P_n$  on nimellinen pätöteho  
 $\cos \varphi$  on tehokerroin.

Kuvassa 11 on havainnollistettu tätä vaikutusta ”tehokolmion” avulla.



Kuva 11. Näennäis- (S), pätö- (P) ja loistehon (Q) välinen suhde.

Mekaaninen teho on myös oleellinen suure mitoituksessa. Voimakone syöttää sen generaattorille akselin kautta. Kaavassa 2 kuvataan mekaanisen tehon vaikutus pätötehoon. [8, s. 22.]

$$P [kWe] = \eta * P_m [kWm] \quad (2)$$

$P$  on pätöteho

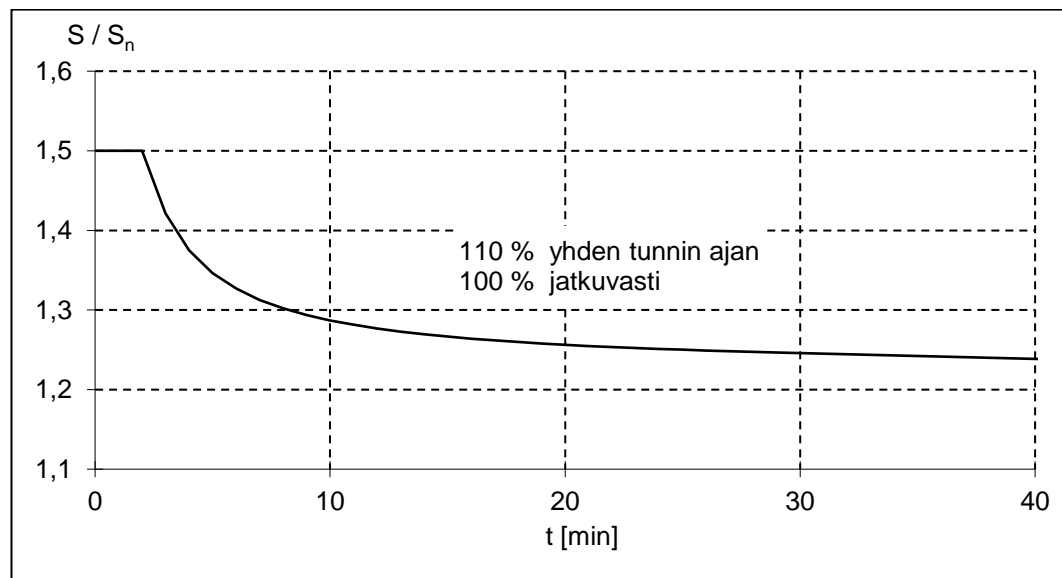
$\eta$  on generaattorin hyötysuhde

$P_m$  on voimakoneen mekaaninen teho.

Hyötysuhdetta ei voida tietää ennen mitoitusta, jos teho on määritelty voimakoneen mekaanisen tehon avulla. Tällöin myös generaattorin pätöteho on tuntematon. Hyötysuhteen arvioidaan yleensä olevan 0,95...0,98. Tarkempi pätötehon määrittäminen voidaan tarvittaessa iteroida ensimmäisen laskentakierroksen jälkeen. [8, s. 22.]

### Ylikuormitus

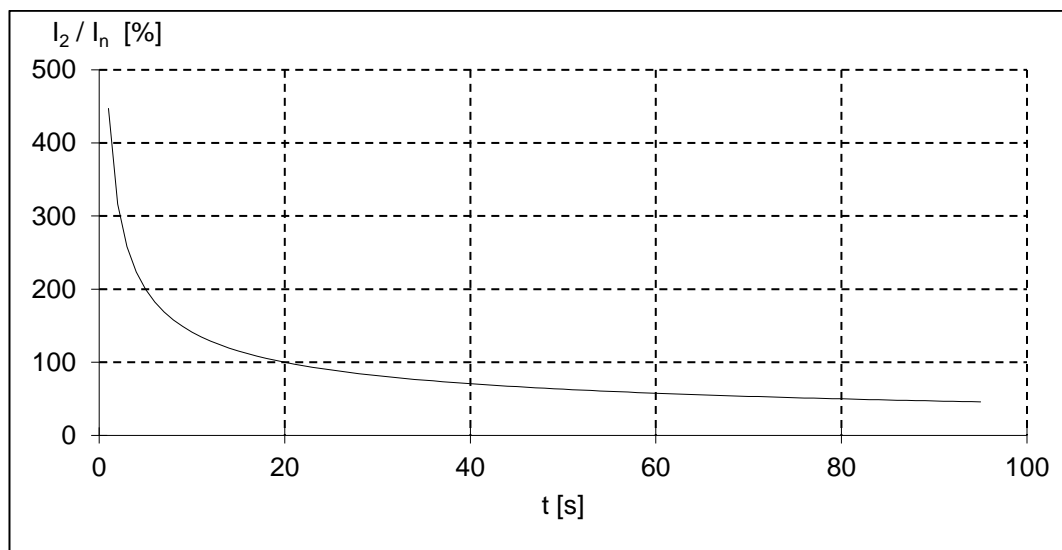
Tahtikoneen lämpenemisaikavakiot ovat suhteellisen pitkiä, joten lämpötila ei ehdi nousta liian korkeaksi lyhyiden kuormitushuippujen aikana. Tämän takia koneesta voidaan lyhyen ajan ottaa nimellispistettä huomattavasti enemmän tehoa. Suurin sallittu teho on kuitenkin määriteltävä niin, että huomioidaan koko järjestelmän lämpenemisraajat, koska joillain komponenteilla voi olla tiukemmat rajoitukset. Kuvassa 12 on esitetty standardigeneraattorille sallittu ylikuormitus joka kuudes tunti. [8, s. 22.]



Kuva 12. Standardigeneraattoreille sallittu ylikuormitus [8, s. 23].

## Epäsymmetrinen kuormitus

Epäsymmetrinen kuormitus tarkoittaa tilannetta, jossa vaiheiden väliset virrat ovat erisuuruisia. Tällainen kuormitus aiheuttaa sen että generaattorissa alkaa pyöriä vastakkaissuuntainen magneettikenttä, joka luo lisälämpenemää aiheuttavia virtoja. Kuvassa 13 on määritelty epäsymmetrisen kuorman maksimiarvo, kun vastapyörivän virran  $I_2$  ja nimellisvirran  $I_n$  suhde ei saa nousta käyrän yläpuolelle. Jatkuvassa tilassa suhteen maksimiarvo on 8 %. [8, s. 23.]



Kuva 13. Maksimi epäsymmetrinen kuorma standardigeneraattoreille [8, s. 24].

Yllä olevan käyrän peruspisteenä on kaava 3 [8, s. 23]:

$$\left(\frac{I_2}{I_n}\right)^2 * t = 20 \text{ s} \quad (3)$$

$I_2$  on vastapyörivä virta  
 $I_n$  on nimellisvirta  
 $t$  on aika sekunteina.

### 4.2.2 Pyörimisnopeus ja taajuus

Se, että tahtikone pyörii tahdissa, johtaa siihen, että pyörimisnopeus, taajuus ja napapari-  
 riluku ovat verrannollisia toisiinsa. Tämä on esitetty kaavassa 4: [7, s. 29; 8, s. 24.]

$$n [rpm] = \frac{60 \cdot f [Hz]}{p} \quad (4)$$

$n$  on pyörimisnopeus  
 $f$  on taajuus  
 $p$  on napapariluku.

Keskinopeat dieselmoottorit pyörivät yleensä 400...1000 rpm. Mitä suurempaa tehoa ne syöttävät, sitä hitaammin ne pyörivät. Tämä johtaa siihen että suurin osa generaattoreista voidaan valmistaa levyrakenteisina ja navat voidaan kiinnittää pulteilla akseliin. Nopeuden kasvaessa, napoihin kohdistuu suurempi keskipakoisvoima, minkä takia saatetaan joutua käyttämään lohenpyrstökiinnitystä sekä tarvittaessa rakentamaan navat massiiviraudasta. Nämä rakennemuutokset vaikuttavat koneen valmistuskustannuksiin. [8, s. 24.]

Standardeissa generaattorille on asetettu vaatimus kyetä pyörimään 20 % (IEC) ja 25 % (NEMA) ylinopeutta nimellisestä pyörimisnopeudesta. Mikäli koneelta vaaditaan korkeampia arvoja, sitä tulee tarkastella tapauskohtaisesti. [8, s. 24.]

Generaattorin taajuudelle sallitaan jonkin verran alenemaa riippuen tehokertoimesta ja kuormasta. Taulukossa 1 on esitetty taajuusvaihtelun alarajat. [8, s. 24.]

Taulukko 1. Standardigeneraattoreiden alitaajuuskapasiteetti [8, s. 24].

Taajuus %	Kuorma <i>nimellisjännitteellä</i>		
	Tehokerroin 0,8 P = nimellisteho	Tehokerroin 1,0 P = nimellisteho	Tyhjäkäynti P=0
100	Jatkuvasti	Jatkuvasti	Jatkuvasti
96	Jatkuvasti	Jatkuvasti	Jatkuvasti
95	30 min	Jatkuvasti	Jatkuvasti
92,5	2 min	30 min	Jatkuvasti
90		2 min	Jatkuvasti
87,5			30 min
85			2 min

### 4.2.3 Lämpenemä

Koneen mitoituksessa pitää ottaa merkittävästi huomioon ympäristöolosuhteet, kuten ympäristön sekä lämmönvaihtimen jäädyttävän aineen lämpötilat. Nämä yhdessä lämpenemäluokan kanssa määrittävät koneelle suurimman sallitun lämpenemän. Lämpenemäluokka määrittää suurimman absoluuttisen lämpötilan, jota koneen lämpötila ei saa ylittää. Asiakas määrittää lämpenemäluokan ja valmistaja valitsee koneelle eristysluokan niin, että eristykset kestävät lämpenemäluokan salliman maksimilämpötilan. Sallittu maksimilämpötila on alhaisempi kuin eristeen kestävä lämpötila, koska lämpenemä mitataan resistanssimittauksella, jonka tuloksena on käämin keskimääräinen lämpenemä. Eli absoluuttisen tarkkaa korkeinta lämpötilaa ei saada mitattua, joten siihen pitää jättää virhemarginaali. [8, s. 25.]

Taulukossa 2 on esitetty kolme yleisintä lämpenemäluokkaa ja niiden lämpötilarajat. Yleisimmin käytetään B- ja F-luokkaa lämpenemässä ja F-luokkaa eristeessä. Lisäksi maksimilämpötilat vaihtelevat jonkin verran esimerkiksi standardin, jänniteluokan ja vaikiintuneiden käytäntöjen mukaan. [8, s. 25.]

Taulukko 2. Lämpenemäluokkien suurimmat sallitut lämpötilat [12, s. 38].

Lämpenemäluokka	Maksimilämpötila resistanssimittauksella (°C)	Eristeen kestävä maksimilämpötila (°C)
B	120	130
F	145	155
H	165	180

Koneen sallittu lämpenemä lasketaan kaavan 5 mukaan, kun koneessa ei ole lämmönvaihdinta, ja kaavan 6 mukaan, kun koneessa käytetään lämmönvaihdinta [8, s. 25].

$$T_{emprise} [K] = T_{max} - T_{ambient} \quad (5)$$

$$T_{emprise} [K] = T_{max} - (T_{coolant} + \Delta T) \quad (6)$$

$T_{max}$  on luokan sallima maksimilämpötila resistanssimittauksella

$T_{ambient}$  on ympäristön lämpötila

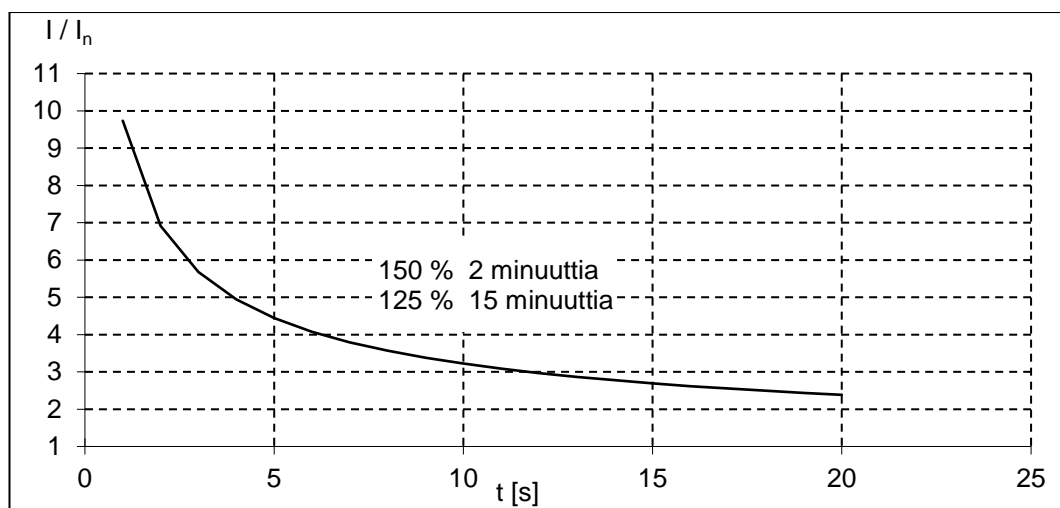
$T_{coolant}$  on jäädytysaineen lämpötila

$\Delta T$  on lämmönvaihtimesta ulos tulevan ilman ja lämmönvaihtimen jäädytysaineen lämpötilan erotus.

Lämpenemään vaikuttaa lisäksi koneen asennuskorkeus merenpinnasta. Koneen jäähtymisominaisuudet ovat riippuvaisia ilman tiheydestä, joka pienenee mitä korkeammalle noustaan, jolloin samalla ilman jäädyttämisen pinnan lämmönluovutuskerroin huononee. Jos koneen sijoituskorkeus ylittää 1000 metriä, sallitusta lämpenemästä vähennetään noin 1 % per 100 m. [8, s. 25.]

#### 4.2.4 Virta

Pysyvän tilan virta saadaan suoraan tehosta ja jännitteestä. Virtalämpöhäviöt aiheuttavat suurimman osan lämpenemästä, joten koneen pysyvän tilan suurimmat sallitut virrantiheydet määritetään suurimmaksi osaksi sallitun lämpenemän perusteella. Vikatilanteissa virta saattaa kuitenkin nousta huomattavan paljon nimellisarvostaan. Kuvan 14 käyrässä on esitetty standardigeneraattoreille määritelty virtakestoisuus kuuden tunnin välein. [8, s. 25–26.]



Kuva 14. Standardigeneraattorien virtakestoisuus kuuden tunnin välein [8, s. 26].

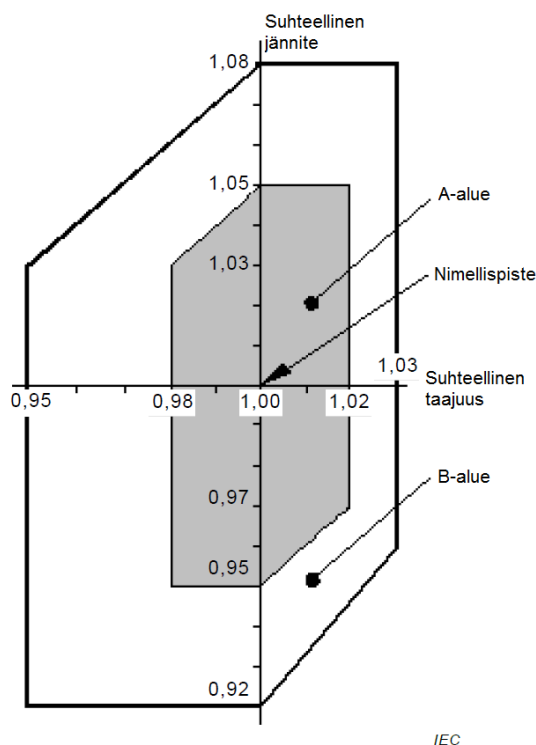
#### 4.2.5 Jännite

Käytetty staattorin eristysluokka eli jänniteluokka määritetään jännitteen avulla. Eristeet vievät tilaa raudalta ja kuparilta, joten kahdesta samankokoisesta koneesta saatava teho muuttuu hieman jännitteen mukaan. [8, s. 26.]

Nimellisjännitteen mukainen eristysluokka määritellään seuraavien jännitteiden mukaan, siten että jokainen listattu jännitteen arvo on kyseisen luokan maksimijännite:

- $\leq 1\,000\text{ V}$
- $\leq 2\,500\text{ V}$
- $\leq 3\,400\text{ V}$
- $\leq 4\,200\text{ V}$
- $\leq 7\,200\text{ V}$
- $\leq 11\,500\text{ V}$
- $\leq 13\,800\text{ V}$
- $\leq 15\,000\text{ V}$  [8, s. 26; 13, s. 17].

IEC 60034-1 -standardissa jännitteenvaihtelulle on määritelty A- ja B-raja-alueet (ks. kuva 15). A-raja-alueella koneen odotetaan toimivan normaalisti 5 %:n jännitteenvaihtelulla. B-alueella eli 5...8 %:n vaihtelulla koneen odotetaan edelleen toimivan, mutta siltä ei odoteta enää täydellistä suorituskykyä. Jos jännitteenvaihtelu ei pysy näissä rajoissa, eristysluokaksi tulee valita nimellistä suurempi luokka, koska lämpenemä kasvaa merkittävästi. [8, s. 26; 14, s. 34–36.]



Kuva 15. Jännitteen ja taajuuden vaihtelun rajat generaattoreille [14, s. 36].

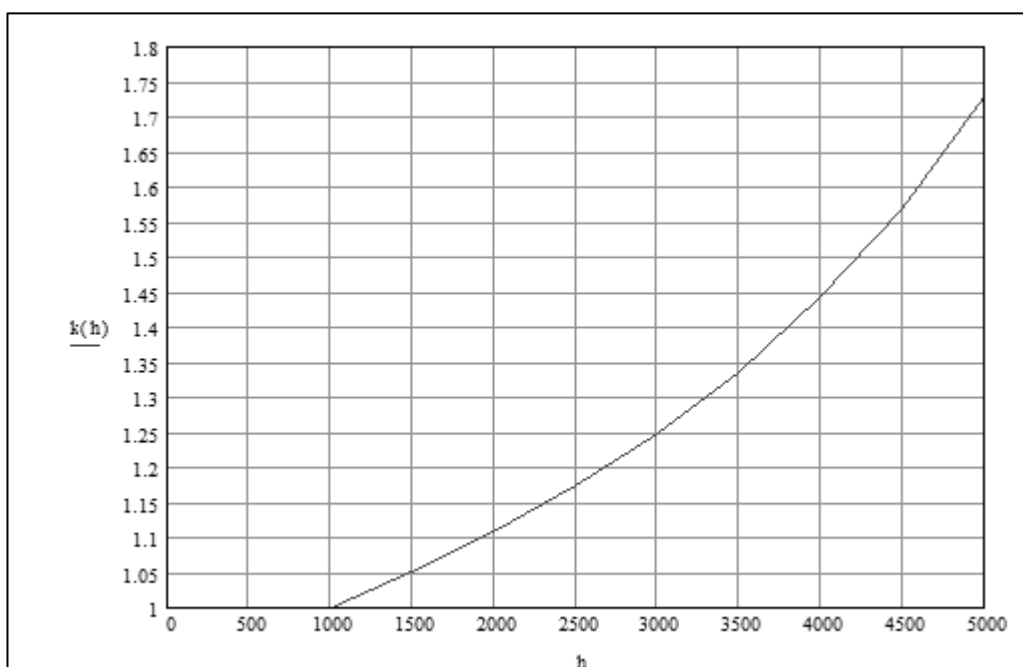


Staattorin eristysluokkaan vaikuttaa lisäksi koneen sijoituskorkeus. Kaavassa 7 on esitetty korkeuskertoimen ja nimellisjännitteen vaikutus välitäytteet ja ilmavälien mitoittamiseen. [8, s. 26.]

$$\text{Mitoitusjännite} = k * U_n \quad (7)$$

$k$  on korkeuskerroin  
 $U_n$  on nimellisjännite.

Korkeuskerroin  $k$  saadaan koneen asennuskorkeudesta  $h$ , kuvassa 16 olevan käyrän mukaan. Huomioitavaa on, että mikäli nimellisjännite on suurempi kuin 7,2 kV, maksimi asennuskorkeus on 3500 m. [8, s. 26–27.]



Kuva 16. Korkeuskerroin sijoituskorkeuden funktiona [8, s. 27].

#### 4.2.6 Jännitteenalenema ja oikosulkuvirta

Laivojen sähköverkoissa generaattorin reaktanssit, erityisesti  $X_d'$  ja  $X_d''$ , halutaan pitää alhaisina, sillä alhainen reaktanssi pienentää jännitevaihtelua äkillisissä kuorman muutoksissa. Laivan verkko on yleisesti ottaen suhteellisen heikko, joten jännite ei saa laskea kuormankytentätilanteissa enempää kuin 15...20 %. Alhaista reaktanssia pidetäänkin

laivageneraattorin tärkeimpänä ominaisuutena, vaikka se tarkoittaakin, että mitoituksessa joudutaan valitsemaan yleensä suurempi generaattori. [8, s. 27.]

Maakäytössä generaattori kytketään yleensä jäykkään verkkoon, jonka mukaan jännite määräytyy. Tällaisissa käytöissä vaaditaan usein korkeampaa reaktanssia kuin laivakäytössä, koska korkean reaktanssin koneissa on pienemmät oikosulkuvirrat, mikä avittaa katkaisimien kykyä avautua oikosulkutilanteessa. Yleensä laivakäytöissä  $X_d$  pitää olla alle 20 %, kun taas maakäytöissä 20...26 %. [8, s. 27.]

#### 4.3 Muuttujaparametrit

Korkeajännitteisen tahtikoneen mitoituksessa tietyt muuttujaparametrit ovat oleellisia, ja niiden avulla yleensä saadaan sopiva kone laskettua. Näihin lukeutuvat staattorilevypaketin pituus, tehollisten johdinkierrosten lukumäärä, vyyhdenleveys, rinnankytkettyjen haarojen määrä ja staattorikuparin leveys ja paksuus. Näiden parametrien muuttaminen on käyty läpi mitoituksen välivaiheiden yhteydessä, luvussa 4.4.

##### 4.3.1 Koneen pituus

Koneen staattorilevypaketin pituus voidaan johtaa yhtälöstä 8 [7, s. 37]:

$$T = K_c * D^2 * L \quad (8)$$

$T$  on koneen momentti  
 $K_c$  on konevakio  
 $D$  on ilmaväliahkaisu  
 $L$  on levypaketin pituus.

Yllä olevasta yhtälöstä momentti  $T$  tunnetaan ja konevakio  $K_c$  sekä  $D$  tulevat peruskoneen perusteella, sillä oletuksella, että konevakio pysyy suunnilleen samana pituuden muuttuessa. Yhtälön avulla voidaan määrittää pituus, josta koneen mitoitus aloitetaan. Tosin yleensä pituus on myös jo valmiiksi tiedossa. [7, s. 37.]

Koneen pituudella tarkoitetaan staattorin levypaketin eli levysydämen kokonaispituutta, mukaan lukien staattorin ilmasolat. Roottorin pituus määritellään staattorin perusteella ja

yleisesti ottaen sen pituus on yhtä suuri kuin staattorin. Levypaketin pituudelle on määriteltä minimi- ja maksimipituudet peruskonekohtaisesti. Maksimipituuteen vaikuttaa esimerkiksi jäähdytysilman kierto, mekaaniset värähtelyt ja valmistettavuus. Minimipituuteen vaikuttaa esimerkiksi navan kiinnitykset. Yleensä maksimipituus on oleellisempi, koska yleensä pyritään taloudellisista syistä valitsemaan mahdollisimman pienihalkaisijainen kone. [7, s. 37.]

#### 4.3.2 Teholliset johdinkierrokset

Staattoriuran tehollisten johtimien lukumäärä vaikuttaa koneen magneettiseen tiukkuteen eli magneettiisiin vuontiheyksiin. Vuontiheyksille on määriteltä taulukon 3 mukaiset maksimiarvot [7, s. 37.]

Taulukko 3. Tahtikoneen vuontiheyksien tyypilliset raja-arvot [15, s. 9].

Ilmavälivuontiheyden huippuarvo	< 1 T
Staattorin hampaan maksimivuontiheyden huippuarvo	< 2 T
Staattorin selän vuontiheyden huippuarvo	< 1,6 T
Napavarren vuontiheyden huippuarvo	< 1,65 T

Vuontiheyksiin vaikuttavat lisäksi koneen mitat, kuten ilmavälin suuruus, napavarren sekä staattorihampaan leveys ja korkeus, staattoriselän korkeus ja vyyhdenleveys. Ilmavälin vuontiheyden huippuarvo lasketaan kaavalla 9. [7, s. 38; 16, kohta 210.]

$$\hat{b}_i = \frac{\sqrt{6}}{6} * \frac{U_n}{\beta * \tau * \xi_1 * f} * \frac{3 * a}{l_i * Q * J} \quad (9)$$

$U_n$  on koneen nimellisjännite

$\beta$  on vuontiheyden perusaallon huippuarvon suhde maksimiarvoon

$\tau$  on napajako

$\xi_1$  on perusaallon käänkerroin

$f$  on taajuus

$a$  on rinnakkaisten haarojen lukumäärä

$l_i$  on ilmavälin tehollinen pituus

$Q$  on staattorin uraluku

$J$  on tehollisten johdinkierrosten lukumäärä.

Kun koneen poikkileikkaus ja vyyhdenleveys pidetään vakiona, voidaan yhtälö kirjoittaa kaavan 10 muodossa [7, s. 38]:

$$\hat{b}_i = k * \frac{U_n * a}{l_i * J * f} \quad (10)$$

Tästä saadaan johdettua yhtälö 11, jonka avulla voidaan muuttaa pituutta, jännitettä, taajuutta sekä käämitystä ja silti pitää kone magneettisesti lähes vakiona [7, s. 38].

$$L_0 * U_1 * f_0 * J_0 * a_1 = L_1 * U_0 * f_1 * J_1 * a_0 \quad (11)$$

$L_0$  on peruskoneen staattorin levypaketin kokonaispituus

$L_1$  on uusi staattorin levypaketin kokonaispituus.

#### 4.4 Mitoituksen välivaiheet

Mitoitus aloitetaan sillä, että etsitään sopiva ennestään mitoitettu tai valmistettu kone, jonka pohjalta asiakkaan vaatimukset saadaan toteutettua. Yleensä valitaan kone, jolla on sama napapariluku ja jonka runkokokoa eli levypaketin ulkohalkaisijaa ei tarvitse muuttaa [7, s. 44]. Valitulle koneelle annetaan uudet lähtöarvot, kuten teho, jännite, taajuus ja tehokerroin, mikäli ne eivät vielä vastaa asiakkaan vaatimuksia. Tämän jälkeen suoritetaan seuraavaksi selostetut mitoitusvälivaiheet.

##### 4.4.1 Pituuden muutos

Kun pohja- tai peruskone on valittu ja uudet lähtöarvot annettu, koneen staattorin levypaketille eli levysydämelle lasketaan uusi pituus. Peruskoneille on määritelty tietyt minimi- ja maksimipituusrajat, joiden sisällä pituuden tulisi pysyä. Uusi pituus lasketaan kaavan 12 mukaan [11, s. 11].

$$L_1 = \frac{f_0}{f} * \frac{P}{P_0} * L_0 \quad (12)$$

$L_1$  on uusi staattorin levypaketin kokonaispituus

$L_0$  on peruskoneen levypaketin kokonaispituus

$f$  on uusi taajuus

$f_0$  on peruskoneen taajuus

$P$  on uusi teho

$P_0$  on peruskoneen teho.

Saatu tulos pyöristetään 100 mm portaittain lähimpään 50 mm:n arvoon, eli ..., 850, 950, 1050, ... jne. Roottorin pituus määritellään tämän jälkeen staattorin pituuden mukaan ja se on yleisesti ottaen aina yhtä pitkä. [7, s. 37.]

#### 4.4.2 Staattorikäämityksen muutos

Kun koneelle on laskettu uusi pituus, muutetaan staattorin käämistä, koska koneen sähkömagneettiset arvot ovat muuttuneet ja uusi kone pyritään pitämään magneettisesti samanlaisena, kuin vanha kone. Staattorikäämityksen muutos aloitetaan sillä että haetaan eristysluokka peruskoneen jännitteelle sekä uuden koneen jännitteelle. Mikäli eristysluokka muuttuu uudessa koneessa, muuttuu myös eristeen paksuus. Tällöin staattorin kuparileveyttä muutetaan siten, että uran leveys pysyy samana. Tämän jälkeen kuparijohtimelle määritetään minimi- ja maksimipaksuus. Seuraavaksi lasketaan, yhtälön 13 mukaan, vakoluvun  $q$  pienin mahdollinen jakaja  $n$ . Yhtälön nimittäjässä lukuarvo 3 on kolmivaihekäämityksessä käytetty vakio. [7, s. 44; 11, s. 12.]

$$q = \frac{Q}{3 \cdot 2 \cdot p} = \frac{m}{n} \quad (13)$$

$q$  on staattorin vakoluku  
 $Q$  on staattorin uraluku  
 $p$  on koneen napapariluku  
 $m$  on kokonaisluku  
 $n$  on kokonaisluku.

Seuraavaksi lasketaan uran korkeus kiilaan asti. Kaavalla 14 lasketaan rinnakkaisten eli rinnankytkettyjen johdinhaarojen lukumäärän maksimiarvo [7, s. 44–45; 11, s. 12].

$$a_{max} = \frac{2 \cdot p}{n} \quad (14)$$

$p$  on koneen napapariluku  
 $n$  on vakoluvun pienin jakaja.

Tämän jälkeen lasketaan tehollisten johdinkierrosten lukumäärä urassa kaavalla 15, ilman että huomioidaan rinnakkaisia haaroja. Lisäksi lasketaan kierrosten minimi- ja maksimimäärä per ura. [7, s. 45; 11, s. 12.]

$$J_{temp} = \frac{L_0}{L_1} * \frac{U}{U_0} * \frac{f_0}{f} * J_0 \quad (15)$$

$J_0$  on peruskoneen tehollisten kierrosten lukumäärä  
 $L_1$  on uusi staattorin levypaketin eli levysydämen kokonaispituus  
 $L_0$  on peruskoneen levypaketin kokonaispituus  
 $U$  on uusi jännite  
 $U_0$  on peruskoneen jännite  
 $f$  on uusi taajuus  
 $f_0$  on peruskoneen taajuus.

Seuraavaksi lasketaan sallitut rinnakkaisten haarojen arvot kaavalla 16. Eli jos yhtälön arvo on kokonaisluku, on kyseinen a-arvo sallittu haarojen lukumäärä. [7, s. 45; 11, s. 12.]

$$\frac{2*p}{n*a} = m \quad (16)$$

$p$  on napapariluku  
 $n$  on vakoluvun pienin jakaja  
 $a$  on rinnakkaisten haarojen lukumäärä,  $1 \dots a_{max}$   
 $m$  on kokonaisluku.

Lasketaan tehollisten kierrosten lukumäärä urassa kaikilla rinnakkaisten haarojen lukumäärillä yhtälöllä 17. Saatu tulos pyöristetään ylöspäin lähimpään parilliseen kokonaislukuun. [7, s. 45; 11, s. 12.]

$$J = \frac{a}{a_0} * J_{temp} \quad (17)$$

$J_{temp}$  on tehollisten kierrosten lukumäärä ilman haarojen huomioimista  
 $a$  on rinnakkaisten haarojen lukumäärä  
 $a_0$  on peruskoneen rinnakkaisten haarojen lukumäärä.

Lopuksi lasketaan johdinkierrosten lukumäärä eri osajohdinten lukumäärillä. Sallitut osajohdinten määrät ovat yleensä 1 ja 2, mutta toisinaan on käytetty myös 3:a ja 4:ää. Jos saatu tehollisten kierrosten lukumäärä on maksimi- ja minimiarvon sisällä, siirretään seuraavat arvot, jotka määrittävät koneen magneettisen tilan, käämitystaulukkoon koneen läpilaskentaa varten:

- levysydämen pituus
- tehollisten johdinkierrosten lukumäärä

- rinnakkaisten haarojen lukumäärä
- osajohdinten lukumäärä
- vyyhdenleveys
- johdinkuparin paksuus [7, s. 45; 11, s. 12].

## 5 Matalajännitteisen tahtikoneen mitoitus

Matalajännitteisillä eli LV-koneilla (low voltage) tarkoitetaan sellaisia koneita, joiden nimellisjännite on alle 1000 V. Yleisimmät nimellisjännitteet, joita käytetään, ovat 400, 480 ja 690 voltia. Tällä hetkellä LV-koneiden mitoitus täytyy tehdä aina käsin THW:lla, sillä nykyinen laskentalogiikka, jota Nestori hyödyntää, ei osaa ottaa matalajännitteisyyttä huomioon. Uuden laskentalogiikan on tarkoitus korjata tämä, ja se voidaan myöhemmin ohjelmoida Nestorin sisälle. Tässä luvussa käsitellään matalajännitteisen tahtikoneen mitoitusta, siihen liittyviä ongelmia sekä uuden logiikan kehittämistä. Lisäksi esitetään esimerkkimitoitus, jolla havainnollistetaan mitoituslogiikan ongelmia ja sen toimintaa käytännössä.

### 5.1 Mitoitukseen liittyviä ongelmia

Matalajännitteisiä muotokuparitahtikoneita mitoitettaessa sovelletaan periaatteessa samaa laskentalogiikkaa, kuin korkeajännitteisissäkin. Ongelmaksi muodostuu kuitenkin se että matalajännitteisille ei ole määritetty juuri yhtään peruskonetta, joten mitoitus Nestorilla epäonnistuu usein, koska se joutuu käyttämään korkeajännitteisiä peruskoneita. Lisäksi matalajännitteisiä muotokuparitahtikoneita on ylipäätänsä mitoitettu ja valmistettu ABB:lla verrattain vähän. Tämän johdosta niille on vaikea löytää sopivaa pohjakonetta mitoittamista varten THW:lla.

Mitoituksessa tulee myös ottaa huomioon se, että alhaisen jännitteen myötä tehollisten johdinkierrosten määrä voi urassa olla liian pieni. LV-koneissa tehollisten määrä urassa vaihtelee usein neljän ja kahdeksan välillä. Urassa tulisi olla vähintään neljä tehollista johdinkierrosta eli kaksi per vyyhti. Tämä mahdollistaa sen, että vyyhti muodostuu vähintään yhdestä kokonaisesta kierroksesta (toisen kierroksen muodostuessa kun johdinpäät kytketään), jolloin sen rakenne on mekaanisesti kestävämpi. Vaikka kaksi tehollista urassa voi olla sähköisesti hyvä ratkaisu, se on käytännössä vaikea toteuttaa valmistuksessa. Myöskään napojen vaimennustangot eivät saa osua staattorin urien kanssa samaan linjaan, koska se aiheuttaisi suuria harmonisia yliaaltoja. Lisäksi staattorivirran ylärajaksi on määritelty 5000 A. [17.]

Jos pohjakoneeksi valitaan ennestään mitoitettu korkeajännitteinen kone, muutos jänniteluokassa aiheuttaa ongelmia. Jänniteluokan pudotessa pienenee myös tarvittavan



eristeen paksuus. Ja koska staattoriurat pyritään pitämään samankokoisina, joudutaan kuparijohtimen leveyttä muuttamaan suuremmaksi. Pyörrevirtahäviöt kasvavat merkittävän paljon kuparin mittojen suhteessa, joten se ei saa olla liian leveä tai paksu [15, s. 1]. Liian suuret kuparin mitat vaikeuttavat myös vyyhden muotoilua. Tähän on yksi ratkaisu täyttää ura ylimääräisellä eristeaineella, mutta tämäkään ei ole tarkoituksen mukaista, koska eristeaine on kallista. Tällöin sähkönlaskijan tulee muuttaa uramittoja ja valita toinen meistityökalu, mutta sitä ei voi pitää vakiona mitoitusratkaisuna nykyisen laskenta-logiikan puitteissa. Näin ollen toimivaa laskentalogiikkaa varten olisi hyvä käyttää ennestään mitoitettuja matalajännitteisiä koneita. Lisäksi uudella logiikalla tulisi jotenkin ratkaista liian vähäisiin tehollisiin liittyvä ongelma.

## 5.2 Urien muuttaminen

Normaalisti koneiden mitoitus on perustunut siihen, että koneen poikkileikkausrakenne pidetään samana. Kuten aiemmin luvussa 4.4 on selostettu, uusi mitoitettu kone pyritään pitämään magneettisilta arvoiltaan samanlaisena, muuttamalla sen pituutta ja staattorikämmitystä. Staattorikämmityksessä käytännössä muutetaan tehollisia johdinkierroksia ja johdinkuparin mittoja. LV-koneilla johdinkierrosten muuttaminen ei kuitenkaan aina onnistu. Jos peruskoneen urassa on jo ennestään neljä tehollista kierrosta, mitoitus saattaa epäonnistua, koska uraan ei saada enää vähempää kierroslukua. Esimerkiksi, jos uudeksi tehollisten arvoksi lasketaan 2,7 kierrosta, se täytyy pyöristää 4:ään. Jos uusi kone on edelleen tarkoitus pitää magneettisilta arvoiltaan samanlaisena, pitää keksiä uusi muuttujaparametri tilanteisiin, joissa teholliseen ei saada sopivaa arvoa.

Uudeksi parametriksi päätettiin kokeilla uralukujen muuttamista. Luvussa 4.4.2 on esitetty ilmavälin vuontiheyden huippuarvon yhtälö (kaava 9), josta on saatu johdettua nykyisessä laskentalogiikassa käytössä olevat muuttujat (kaavat 10 ja 11). Ilmavälin vuontiheyden huippuarvon yhtälössä on myös urien lukumäärälle muuttuja. Koska normaalissa logiikassa arvo pysyy vakiona, se supistuu pois, mutta jos siitäkin tehdään muuttujaparametri, voidaan yhtälö esittää kaavan 18 muodossa.

$$\hat{b}_i = k * \frac{U_n * a}{l_i * J * f * Q} \quad (18)$$

$\hat{b}_i$  on ilmavälin vuontiheyden huippuarvo  
 $U_n$  on koneen nimellisjännite

$a$  on rinnakkaisten haarojen lukumäärä  
 $l_i$  on ilmavälin tehollinen pituus  
 $J$  on tehollisten johdinkierrosten lukumäärä  
 $f$  on taajuus  
 $Q$  on staattorin uraluku  
 $k$  on muutossuhde.

Tästä saadaan johdettua yhtälö 19, joka on päivitetty versio yhtälöstä 11. Kuten aikaisemminkin, ideana on säilyttää kone magneettisesti vakiona, joten muuttujaparametrit muuttuvat aina tietyssä suhteessa. Yhtälön avulla voidaan nyt myös määrittellä uraluvun muuttaminen.

$$L_0 * U_1 * f_0 * J_0 * a_1 * Q_0 = L_1 * U_0 * f_1 * J_1 * a_0 * Q_1 \quad (19)$$

$Q_0$  on peruskoneen staattorin urien lukumäärä  
 $Q_1$  on uusi staattorin urien lukumäärä.

Yhtälöstä saadaan muodostettua uusi kaava tehollisten johtimien lukumäärän laskemiseen (vrt. kaava 15, luvussa 4.4.2):

$$J_{temp} = \frac{L_0}{L_1} * \frac{U}{U_0} * \frac{f_0}{f} * \frac{Q_0}{Q} * J_0 \quad (20)$$

$J_0$  on peruskoneen tehollisten kierrosten lukumäärä  
 $L_1$  on uusi staattorin levypaketin eli levysydämen kokonaispituus  
 $L_0$  on peruskoneen levypaketin kokonaispituus  
 $U$  on uusi jännite  
 $U_0$  on peruskoneen jännite  
 $f$  on uusi taajuus  
 $f_0$  on peruskoneen taajuus.  
 $Q_0$  on peruskoneen staattorin urien lukumäärä  
 $Q_1$  on uusi staattorin urien lukumäärä.

Todennäköisesti teholliset lasketaan ensin huomioimatta uralukua. Ajatuksena on, että tehollisille johdinkierroksille lasketaan vanhan logiikan mukaan väliaikainen arvo. Saatu  $J_{temp}$ -arvo pyöristetään sopivampaan arvoon  $J$ . Näistä kahdesta arvosta lasketaan muutossuhde, joka kerrotaan alkuperäisellä uraluvulla (ks. kaava 21), jolloin saadaan uusi uraluku, jonka avulla uudesta koneesta saadaan magneettisesti lähes samanlainen kuin peruskoneesta.

$$Q_{temp} = \frac{J_{temp}}{J} * Q_0 \quad (21)$$

$Q_{temp}$  on uusi laskennallinen uraluku  
 $J_{temp}$  on laskennallinen arvo tehollisten johdinkierrosten lukumäärälle  
 $J$  on uusi valittu tehollisten lukumäärä  
 $Q_0$  on peruskoneen uraluku.

Kun uusi uraluku on laskettu, se pyöristetään lähimpään sopivaan arvoon, joka yleensä määritellään siten, että urien määrä on jaollinen vaiheiden ja napojen tulolla (ks. kaava 13). Saatu uraluku on myös periaatteessa mahdollista pyöristää muuhun arvoon, mutta tällöin pitää varmistaa kaavan 16 avulla, että valitulle uraluvulle löytyy sallittuja rinnakkaisia haaroja. Tämä ei todennäköisesti tule olemaan hyvä ratkaisu useimmissa mitoituksissa, koska silloin rinnakkaisten haarojen lukumäärää täytyy vähentää ja sitä myöten myös tehollisten määrää. Koska usein tehollisia ei alun perinkään voida vähentää, joudutaan tyytymään tiettyihin uralukuihin.

Kun uusi uraluku on valittu, täytyy seuraavaksi muuttaa staattorin urien ja hampaiden mitat vastaamaan sitä. Tämän voi tehdä välillisesti muuttamalla kuparinleveyttä kääntäen verrannollisesti samassa suhteessa uraluvun muutoksen kanssa kaavalla 21. Kun uusi kuparinleveys syötetään mitoitusohjelmaan, se laskee sen ja eristeen paksuuden mukaisesti uudet mitat staattorin urille ja hampaille.

$$B_{Cu} = \frac{Q_0}{Q} * B_{Cu0} \quad (22)$$

$B_{Cu}$  on uusi johdinkuparin leveys  
 $Q_0$  on peruskoneen uraluku  
 $Q$  on uusi uraluku  
 $B_{Cu0}$  on peruskoneen johdinkuparin leveys.

Lopuksi vielä muutetaan vyyhdenleveys uuden napajakon mukaan sopivaksi kaavalla 22, jotta jänteistys pysyy samana.

$$K_{pitch} = \frac{K_0}{\tau_0} * \tau \quad (23)$$

$K_{pitch}$  on vyyhdenleveys  
 $K_0$  on peruskoneen vyyhdenleveys  
 $\tau$  on uusi napajako  
 $\tau_0$  on peruskoneen napajako.

## 5.3 Mitoittaminen käytännössä

### 5.3.1 Laskentatyökalu

Laskentalogiikan sujuvampaa testaamista varten tehtiin Excel-taulukkolaskentaohjelmalla laskentatyökalu (ks. kuva 16), joka laskee tärkeimmät välivaiheet nopeasti siihen syötettyjen lähtöarvojen mukaan. Työkaluun syötetään peruskoneen lähtötiedot omalle riville ja toiselle riville uuden koneen lähtötiedot eli teho, jännite ja taajuus. Näistä työkalu laskee uudet väliaikaiset arvot pituudelle, tehollisille, uraluvulle, kuparin mitoille ja vyyhdenleveydelle. Väliaikaisista arvoista käyttäjä pyöristää sopivat arvot uudelle koneelle. Työkalu myös tarkistaa, onko valittu uusi uraluku sopiva käyttäen hyödyksi muun muassa sallittujen rinnakkaisten haarojen kaavaa (ks. kaava 17, luvussa 4.4.2). Tämän jälkeen hän syöttää tiedot THW:hen, joka laskee koneen läpi.

	Napapari p	Nopeus n [rpm]	Teho S [kVA]	Jännite U [V]	Taajuus f [Hz]	Pituus L1 [mm]	Teholliset J	Uraluku Q	Cu leveys B1Cu [mm]	Cu paksuus H1Cu [mm]	osajohtime J1 & J2	Mittasuho BCu/HCu	Vyh.leveys napajako	jänteistys	
Peruskone	3	1200	2186	600	60	750	4	90	9,82	3,01	2	3,262458	12	15	4/5
Uusi kone		1000	3000	690	50	1250	4	72	12,275	3,01	2	4,078073	10	12	5/6
temp arvot			uusi pituus L <sub>temp</sub> [mm]		teholliset, Q vakio J <sub>temp</sub>	teholliset, Q-muutos J <sub>temp</sub>	uusi uraluku Q	uusi Cu leveys B1Cu [mm]	uusi Cu paksuus H1Cu [mm]	uudet osa- johtimet J1 & J2	uusi mit- tasuhde BCu/HCu	uusi vyyh- leveys	uusi napajako		
			1235,1327		3,312	4,14	74,52	12,275	3,01	2	4,078073	9,6	12		
									epätarkka						
Rinnakkai- set haarat	3*2*p	vakoluku q	pienin jakaja n	max rinnakkaiset haarat a <sub>max</sub>											
Peruskone	18	5	1	6											
Uusi kone	18	4	1	6											
	sallitut rinnakkaiset haarat			laskentatulokset m											
	peruskone/ uusi kone			perusk.	uusi k.										
	1	sallittu	sallittu	6	6										
	2	sallittu	sallittu	3	3										
	3	sallittu	sallittu	2	2										
	4	ei sallittu	ei sallittu	1,5	1,5										
	5	ei sallittu	ei sallittu	1,2	1,2										
	6	sallittu	sallittu	1	1										
	7	ei sallittu	ei sallittu	0,8571429	0,8571429										
	8	ei sallittu	ei sallittu	0,75	0,75										
	9	ei sallittu	ei sallittu	0,6666667	0,6666667										
	10	ei sallittu	ei sallittu	0,6	0,6										

Kuva 17. Excelillä tehty laskentatyökalu.

Työkalulla voi siis melko kätevästi tehdä alustavia mitoituslaskelmia THW:ta varten ja mahdollisesti nopeuttaa toimintaa jonkin verran. Luonnollisesti työkalu on tarpeeton, kun käytetään Nestoria.

### 5.3.2 Esimerkkimitoitus

Seuraavaksi on selostettu esimerkki, jossa mitoitettiin uusi kone käyttäen hieman muutettua ennestään mitoitettua LV-konetta peruskoneena. Aluksi mitoitus tehtiin käyttäen vanhaa laskentalogiikkaa ja sen jälkeen uudella periaatteella. Kummassakin tapauksessa on ensin laskettu Excelillä uudet arvot, jotka on sen jälkeen syötetty THW:hen, josta on sitten tarkistettu muun muassa vuontiheydet ja lämpenemät.

Peruskoneeksi valittiin kuusinapainen AMG 500 -generaattori, jonka tämän esimerkin kannalta oleelliset tiedot ovat seuraavat:

- Teho: 2186 kVA
- Jännite: 600 V
- Taajuus: 60 Hz
- Pituus: 750 mm
- Teholliset: 4
- Uraluku: 90
- Kuparin leveys 9,82 mm.
- Vyyhdenleveys: 12
- Lämpenäluokka: F
- Ympäristön lämpötila: 50 °C.

Uuden koneen lähtöarvoiksi valittiin:

- Teho: 3000 kVA
- Jännite: 690 V
- Taajuus: 50 Hz.

Uudet lähtöarvot syötettiin Exceliin (ks. kuva 18) ja koneen staattorilevypaketille laskettiin uusi pituus (ks. kaava 12, luvussa 4.4.1):

$$L_1 = \frac{60}{50} * \frac{2186}{3000} * 750 = 1235,13 \approx 1250 \text{ mm} \quad (24)$$

Tulokseksi saatiin 1235,13 mm, joka pyöristettiin 1250 mm:iin ja syötettiin uuden koneen tietoihin. Uuden pituuden avulla laskettiin uudet teholliset kierrokset urassa (ks. kaava 15, luvussa 4.4.2):



$$J_{temp} = \frac{750}{1250} * \frac{690}{600} * \frac{60}{50} * \frac{90}{72} * 4 = 4,14 \quad (27)$$

Tulokseksi saatiin 4,14. Tästä huomaa jo, että ainakin teoriassa voidaan uuden uraluvun avulla saada sopiva kone aikaiseksi, koska teholliset pyöristyvät nyt paljon helpommin 4:ään. Lopuksi laskettiin vielä uusi johdinkuparin leveys sekä vyyhdenleveys:

$$B_{Cu} = \frac{90}{72} * 9,82 = 12,275 \approx 12,28 \text{ mm} \quad (28)$$

$$K_{pitch} = \frac{12}{15} * 12 = 9,6 \approx 10 \quad (29)$$

Arvoiksi saatiin pyöristettynä 12,28 mm ja 10 uraa.

THW:hen syötettiin uusi uraluku, kuparinleveys ja vyyhdenleveys ja kone laskettiin taas läpi. Tällä kertaa päästiin magneettisesti hyvin lähelle peruskonetta. Vuontiheyksien arvot pysyivät melkein prosentin tarkkuudella samoina. Lämpenemälaskennan tulokseksi saatiin staattorissa 88,3 °C ja roottorissa 94,9 °C. Staattorin lämpenemä kasvoi tällä kertaa vain vajaa 13 astetta ja roottori pysyi lähes samana. Kumpikin lämpenemä pysyi F-luokan rajojen sisällä, eikä kone ylikuumenisi käytössä. Näin ollen hyödyntämällä uutta laskentalogiikkaa saatiin mitoitettua hyvä matalajännitteinen tahtikone.

	Pituus L1 [mm]	Teholliset J	Uraluku Q	Cu leveys B1Cu [mm]	Cu paksuus H1Cu [mm]	osajohtime J1 & J2	Vyh.leveys
Peruskone	750	4	90	9,82	3,01	2	12
Uusi kone	1250	4	72	12,28	3,01	2	10
temp arvot	teholliset, Q vakio	teholliset, Q-muutos	uusi uraluku	uusi Cu leveys	uusi Cu paksuus	uudet osa- johtimet	uusi vyyh. leveys
	$J_{temp}$	$J_{temp}$	$Q_{temp}$	B1Cu [mm]	H1Cu [mm]	J1 & J2	
	3,312	4,14	74,52	12,275	3,01	2	9,6

Kuva 19. Peruskoneen ja uuden koneen arvot, sekä lasketut väliaikaiset arvot.

Esimerkkimitoitus osoittaa, että uusi laskentalogiikka toimii teoriassa ainakin tietyissä tapauksissa, joissa vanhalla logiikalla ei saada hyvää tulosta. Se ei kuitenkaan ratkaise kaikkia matalajännitteisiin muotokuparitahtikoneisiin liittyviä ongelmia. Edelleen saattaa

tulla vastaan tapauksia, joissa esimerkiksi uusi laskennallinen uraluvun arvo ei ole läheläkään sellaista uralukua, joka kyseiselle runkokoolle ja napaluvulle sopisi. Tällöin laskettua arvoa pitäisi pyöristää niin paljon, että hyöty on minimaalinen. On myös tapauksia, joissa ainoa teoriassa järkevä ratkaisu olisi kaksi tehollista johdinkierrosta urassa, jolloin vyyhdet tulisi rakentaa yksikierroksisina. Näistä ongelmista huolimatta urien muuttaminen antaa lisää joustavuutta mitoitukseen ja sen voisi ottaa osaksi uutta mitoitusperiaatetta.

#### 5.4 Jatkokehitysajatuksia

Jotta uusi laskentalogiikka voitaisiin ottaa käyttöön Nestorissa, pitää sitä varten ensin suunnitella muutama peruskone, esimerkiksi yksi jokaiselle eri runkokoolle, joita LV-koneille käytetään. Lisäksi tulisi määritellä tarkemmin, mitkä uraluvut sopivat minkäkin roottorin vaimennuskäämiratkaisujen kanssa. Myös lämpenemälaskentaa tulisi kehittää, sillä tällä hetkellä se ei ole tarpeeksi tarkka matalajännitteisille koneille.

Kun urien muuttamisesta tehdään osa normaalia mitoitusperiaatetta, johtaa se siihen, että koneen valmistustapaa tulee myös muuttaa. Nykyisin tahtikoneiden staattorin segmentit lyödään kerralla meistin avulla. Meistit ovat kalliita ja sen takia segmenteille on pyritty määrittelemään tietyt mittavaihtoehdot ja koneet on suunniteltu näistä vaihtoehdoista, jotta ei tarvitse jokaista uutta konetta varten tilata uutta meistiä. Segmenttejä voidaan valmistaa myös uraleikkaimen avulla, joka leikkaa yhden uran kerrallaan segmentilevyyn. Uraleikkaimet ovat halvempia ja soveltuvat paremmin valmistuskäytäntöön, jossa urien mitat vaihtelevat usein eri koneissa. Tämä tapa on jo käytössä induktiokoneiden kanssa, joten sen voisi ottaa myös käyttöön matalajännitteisiä tahtikoneita valmistettaessa.

LV-koneiden mitoituksen helpottamiseksi voisi löytyä myös muita ratkaisuja, joita ei tässä työssä huomioitu. Nykyisellään staattorin levypaketin pituudet vaihtelevat aina 100 mm:n välein. Sille että pituus valittaisiin vaikka 50 mm:n välein tai vielä tarkemmin, ei ole valmistusteknistä estettä. Käytäntö on vain vakiintunut muun muassa kustannusteknisistä syistä. Tämä voisi olla helpottava ratkaisu mitoitustilanteille, joissa urienkaan muuttaminen ei auta. Olisi myös tarpeen kehittää ratkaisu, kuinka yksikierrosvyyhtisiä koneita voitaisiin valmistaa. Tämä avaisi jälleen lisää joustavuutta ja vaihtoehtoja LV-koneiden mitoitukseen, kun staattorin uraan saisikin asettaa kaksi tehollista johdinkierrosta.



## 6 Yhteenveto

Insinööriyön tarkoituksena oli kehittää uusi laskentalogiikka matalajännitteisten muotokuparitahtikoneiden sähkömitoittamista varten. Työtä tehtiin kokopäiväisesti noin viiden kuukauden ajan. Se edistyi aluksi hitaasti, koska kesätyöharjoittelusta saatu tietotaito ei aivan vastannut työn vaatimuksia, joten aluksi aikaa kului mitoituksen teoriaan syventyessä. Työ saatiin kuitenkin tehtyä ja tavoitteisiin päästiin onnistuneesti.

Työ aloitettiin syventymällä nykyiseen laskentalogiikkaan, jonka jälkeen alettiin tutki-  
maan THW:n avulla mitoittamista käytännössä tekemällä mitoituksia eri tehon ja jännitteen arvoilla sekä korkea- että matalajännitteillä. Tätä kautta alkoi nousta esille LV-koneiden mitoitukseen liittyviä ongelmia. Merkittävimmiksi ongelmatekijöiksi voitiin todeta peruskoneiden puute ja staattorikäätymyksen tehollisten johdinkierrosten vähäinen lukumäärä. Ensimmäinen ongelmatekijä on triviaali, ja se ratkeaa sillä, että sähkösuunnittelija määrittelee hyvät matalajännitteiset peruskoneet. Jälkimmäinen ongelma liittyy suoraan mitoituslogiikkaan, ja se saatiin ratkaistua luomalla uusi muuttujaparametri, jossa muutetaan staattoriurien lukumäärää ja mittoja.

Suurin osa ABB:n valmistamista tahtikoneista ovat korkeajännitteisiä, eikä matalajännitteisten koneiden mitoituksen automatisoimiselle ole sen takia ollut juuri tarvetta, koska sähkösuunnittelija on voinut hoitaa yksittäiset mitoitustapaukset manuaalisesti. Mikäli ABB:lla aletaan jatkossa valmistaa enemmän myös matalajännitteisiä muotokuparitahtikoneita, on niiden automaattista mitoitusta varten nyt olemassa pohja laskentalogiikalle. Uuden laskentalogiikan mukainen urien muuttaminen on ratkaisuna karkeahko, mutta toimiva, ja se saadaan lisättyä nykyiseen logiikkaan melko saumattomasti. Mikäli se todetaan toimivaksi ratkaisuksi myös käytännössä, eikä vain teoriassa, voidaan se ottaa käyttöön Nestori-mitointiohjelmassa. Tämän jälkeen pitää enää määritellä peruskoneet ja korjata lämpenemälaskentaa LV-koneita varten.

## Lähteet

- 1 Fortune global 500: ABB. 2016. Verkkoaineisto. Fortune. <<http://fortune.com/global500/abb/>>. Luettu 8.11.2017.
- 2 ABB Oy, Motors and Generators. 2017. Verkkoaineisto. ABB Oy. <<http://new.abb.com/fi/abb-lyhyesti/suomessa/yksikot/motors-and-generators>>. Luettu 17.10.2017.
- 3 ABB Suomessa. 2017. Verkkoaineisto. ABB Oy. <<http://new.abb.com/fi/abb-lyhyesti/suomessa>>. Luettu 8.11.2017.
- 4 Suomalaiset juuret: Strömbergin jalanjäljillä vuodesta 1889. 2017 Verkkoaineisto. ABB Oy. <<http://new.abb.com/fi/abb-lyhyesti/historia/suomalaiset-juuret>>. Luettu 8.11.2017.
- 5 Hietalahti, Lauri. 2011. Muuntajat ja sähkökoneet. Tampere: AMK-Kustannus Oy Tammertekniikka.
- 6 Aura, Lauri & Tonteri, Antti J. 1996. Sähkökoneet ja tehoelektronikan perusteet. Porvoo: WSOY.
- 7 Shibutani, John. 1999. Tahtimootorin mitoitusohjelman kehittäminen myynnin ja suunnittelun tarpeisiin. Diplomityö. Teknillinen korkeakoulu.
- 8 Shibutani John. 2001. Tahtikoneen toimintaperiaate ja parametrit. Yrityksen sisäinen dokumentti. ABB Oy.
- 9 Form-Wound Coils Random-Wound Coils. 2001. Verkkoaineisto. Kato Engineering Inc. <[http://www.emersonindustrial.com/en-en/documentcenter/electric-power-generation/KatoEngineering/Literature/FWRW\\_BK\\_PDF\\_0701.pdf](http://www.emersonindustrial.com/en-en/documentcenter/electric-power-generation/KatoEngineering/Literature/FWRW_BK_PDF_0701.pdf)>. Luettu 1.11.2017.
- 10 Saari Jussi. 2009. Staattorikäämyksen vyyhdenlevityksen kehittäminen. Diplomityö. Teknillinen korkeakoulu.
- 11 Nestorin peruskoneohje. 2005. Yrityksen sisäinen dokumentti. ABB Oy.
- 12 ABB Engine Generator Handbook. 2017. Yrityksen sisäinen dokumentti. ABB Oy.
- 13 S143:n datan ohje. Yrityksen sisäinen dokumentti. ABB Oy.
- 14 IEC 60034-1 -standardi. 2017. Rotating electrical machines – Part 1: Rating and performance. 13. painos.

- 15 Niuhon helppi. 2015. Yrityksen sisäinen dokumentti. ABB Oy.
- 16 Synkronikoneiden laskentaohjeet. 1972. Yrityksen sisäinen dokumentti. ABB Oy.
- 17 Väinämö, Markku. 2017. R&D team leader, Motors and Generators, ABB Oy, Helsinki. Keskustelu 11.12.2017.