



**TEKNIikka JA LIIKENNE**

**Sähkötekniikka**

**Sähkövoimatekniikka**

**INSINÖÖRITYÖ**

**ERISTYSTEKNINEN KOULUTUSMATERIAALI**

**Työn tekijä: Tapani Hämäläinen**  
**Työn ohjaajat: Jari Ijäs**  
**Saija Rajala**

**Työ hyväksytty: \_\_\_\_ . \_\_\_\_ . 2009**

**Jari Ijäs**  
**lehtori**



## **ALKULAUSE**

Tämä insinööriö tehtiin ABB Oy:n Helsingin Pitäjänmäen Sähkökoneet-yksikön Tuotantukitiimille. Haluan kiittää saamastani tuesta ja kannustuksesta koko Tuotantukitiimin henkilökuntaa ja erityisesti ohjaajiani Tuotantukitiimin esimiestä Saija Rajalaa sekä Metropolia ammattikorkeakoulun sähkötekniikan lehtori Jari Ijästä.

Insinööriöön julkisesta versiosta on ABB Oy:n pyynnöstä jätetty liite pois.

Järvenpäässä 10.2.2009

Tapani Hämäläinen

## TIIVISTELMÄ

<b>Työn tekijä:</b> Tapani Hämäläinen	
<b>Työn nimi:</b> Eristystekninen koulutusmateriaali	
<b>Päivämäärä:</b> 10.2.2009	<b>Sivumäärä:</b> 41 s.
<b>Koulutusohjelma:</b> Sähkötekniikka	<b>Suuntautumisvaihtoehto:</b> Sähkövoimatekniikka
<b>Työn ohjaaja:</b> lehtori Jari Ijäs <b>Työn ohjaaja:</b> esimies Saija Rajala	
<p>Tämä insinöörityö tehtiin ABB Oy:n Helsingin Sähkökonetehtaalle. Työn tarkoituksena oli rakentaa koulutusmateriaali sähkökoneiden valmistuksesta ja valmistukseen liittyvistä eristysteknisistä yksityiskohtista. Koulutusmateriaali rakennettiin sähkökoneiden valmistusohjeiden ja alan kirjallisuuden perusteella.</p> <p>Työ aloitettiin sähkökoneiden valmistusohjeisiin perehtymällä. Sen jälkeen tutustuttiin sähkökoneiden valmistukseen käytännön tasolla ja selvitettiin, minkälaisia haasteita eri työvaiheissa esiintyi. Koulutusmateriaalin yleisen eristystekniikan osuus rakennettiin alan kirjallisuuden tarjoaman aineiston avulla. Yksi koulutusmateriaalin haasteellisimmista asioista oli yhdistää yleinen eristystekniikka sähkökoneiden valmistukseen ja valmistuksen ongelmatilanteisiin.</p> <p>Työn tuloksena syntyi englanninkielinen koulutusmateriaali, jota voidaan hyödyntää tuotannon työntekijöiden kouluttamiseen ja heidän eristysteknisen tietämyksensä lisäämiseen. Koulutusmateriaalin avulla on mahdollista vähentää eri työvaiheissa ilmeneviä ongelmatilanteita. Koulutusmateriaalin päätarkoituksena onkin selventää työntekijöille eri työvaiheiden yksityiskohtien oikeanlaisen suorittamisen tärkeyttä.</p>	
<b>Avainsanat:</b> eristys, osittaispurkaus, vyyhti	

## ABSTRACT

<b>Name:</b> Tapani Hämäläinen	
<b>Title:</b> Educational Material on Insulation Technology	
<b>Date:</b> 10 February 2009	<b>Number of pages:</b> 41
<b>Department:</b> Electrical engineering	<b>Study Programme:</b> Power Systems
<b>Instructor:</b> Jari Ijäs, Senior Lecturer	
<b>Supervisor:</b> Saija Rajala, Foreman	
<p>This study was carried out for the Machine factory of ABB in Helsinki. The purpose of this study was to create educational material on the production of electrical machines and the details of insulation technology in terms of production. The educational material was created by using production instructions of electrical machines and professional literature.</p> <p>This study is based on the information found in the production instructions as well as observing the manufacturing of electrical machines. The objective was to find out what kinds of challenges occurred in the different phases of production. The part of the educational material dealing with common insulation technology was made by studying professional literature. One of the most challenging tasks of making the educational material was to combine common insulation technology with the production of electrical machines and the problem situations occurring in production.</p> <p>The educational material was created based on the findings of this study. The material can be used for educating employees who are involved in production and for increasing their knowledge of common insulation technology. In addition, it describes to employees how to reduce problem situations in the different phases of the production. The main purpose of the educational material is to clarify for employees the significance of the correct way in which the different phases should be carried out.</p>	
<b>Keywords:</b> insulation, partial discharge, coil	

# SISÄLLYS

## ALKULAUSE

## TIIVISTELMÄ

## ABSTRACT

<b>1</b>	<b>JOHDANTO</b>	<b>1</b>
<b>2</b>	<b>SÄHKÖKONE</b>	<b>2</b>
2.1	Toimintaperiaate	2
2.2	Sähkömagneettinen induktio	3
2.3	Pyörivät sähkökoneet	5
2.3.1	<i>Epätahtikone</i>	5
2.3.2	<i>Tahtikone</i>	8
<b>3</b>	<b>YLEISTÄ ERISTYSTEKNIIKASTA</b>	<b>8</b>
3.1	Eristeet, johteet ja puolijohteet	8
3.2	Sähkökenttä	10
3.3	Eristyksen tehtävät	13
3.4	Eristeaineet	13
3.4.1	<i>Kiinteät eristeet</i>	13
3.4.2	<i>Nesteet</i>	14
3.4.3	<i>Kaasut</i>	14
3.5	Eristyksen pääosat	14
3.5.1	<i>Ilmaeristys</i>	14
3.5.2	<i>Kiinteä eristys</i>	14
3.6	Eriste sähkökentässä	15
3.6.1	<i>Permittiviteetti</i>	15
3.6.2	<i>Polarisaatio</i>	17
3.6.3	<i>Dielektriset häviöt</i>	18
3.7	Sähköpurkaukset	18
3.7.1	<i>Osittaispurkaukset</i>	18
3.7.2	<i>Läpilyönti</i>	19
3.8	Eristykselle asetettavat vaatimukset	22
3.8.1	<i>Jännitekestoisuus</i>	22
3.8.2	<i>Lämmönkestoisuus</i>	22
3.8.3	<i>Mekaaniset ominaisuudet</i>	22
3.8.4	<i>Kosteudenkestoisuus</i>	23
3.8.5	<i>Kemiallinen kestoisuus</i>	23

<b>4</b>	<b>SÄHKÖKONEIDEN VALMISTUS</b>	<b>23</b>
<b>4.1</b>	<b>Vyyhdenvalmistus</b>	<b>23</b>
4.1.1	<i>Kelaus</i>	23
4.1.2	<i>Kone-eristys</i>	27
4.1.3	<i>Käsieristys</i>	28
4.1.4	<i>Levitys</i>	31
<b>4.2</b>	<b>Käämintä</b>	<b>33</b>
4.2.1	<i>Vyyhden asennus</i>	33
4.2.2	<i>Kiilaus</i>	34
4.2.3	<i>Tuenta ja sidonta</i>	34
4.2.4	<i>KytKentä</i>	35
<b>4.3</b>	<b>Kyllästys</b>	<b>36</b>
<b>4.4</b>	<b>Kokoonpano</b>	<b>39</b>
<b>5</b>	<b>YHTEENVETO</b>	<b>39</b>
	<b>VIITELUETTELO</b>	<b>41</b>

## 1 JOHDANTO

ABB on maailman suurimpia sähkövoima- ja automaatioteknologiayrityksiä, jonka tavoitteena on parantaa sen asiakkaiden kilpailukykyä ympäristömyönteisesti. ABB:n palveluksessa on yli 120 000 ihmistä noin 100 maassa.

Suomessa toimivan ABB Oy:n liiketoiminta voidaan jakaa viiteen pääalueeseen eli divisioonaan, joita ovat Sähkövoimatuotteet, Sähkövoimajärjestelmät, Automaatiotuotteet, Prosessiautomaatio ja Robotit. ABB Oy:n liikevaihto on noin 2 miljardia euroa ja henkilöstön määrä noin 7000. Kaikista saaduista tilauksista lähes 80 prosenttia menee vientiin, josta pääosa suuntautuu Eurooppaan ja Pohjois- sekä Etelä-Amerikkaan.

Tämän insinööriyön tarkoituksena oli rakentaa eristystekninen koulutusmateriaali pyörivien sähkökoneiden valmistuksesta sekä Helsingin Pitäjänmäellä sijaitsevan ABB Oy:n Sähkökonetehtaan että ABB:n ulkomaisten sähkökoneiden tuotantoyksiköiden toiminnan tehostamiseksi. Koulutusmateriaalista tuli tehdä sellainen, että se käsittelee sähkökoneiden valmistuksen työvaiheisiin liittyvien yksityiskohtien merkitystä eristystekniikan kannalta. Tarkoituksena oli myös selvittää, minkälaisia seurauksia kyseisten työvaiheiden vääränlainen suorittaminen aiheuttaisi.

Vain tilaajan käyttöön tehty koulutusmateriaali tehtiin englanniksi Microsoft PowerPoint-ohjelmalla. Materiaalia on tarkoitus käyttää tuotannon työntekijöiden koulutukseen. Koulutusmateriaalin tavoitteena on parantaa ABB:n kilpailukykyä lisäämällä työntekijöiden eristysteknistä tietämystä ja havainnollistaa lukuisten valmistuksen yksityiskohtien tärkeyttä. Koulutusmateriaalin rakentamisessa tuli käyttää hyödyksi ABB Oy:n sisäistä toiminta- ja valmistusohjekokoelmaa, P-ohjeistoa. Koulutusmateriaalin rakentamista oli tarkoitus lähestyä sähkökoneiden tuotannon kohtaamien ongelmatilanteiden kannalta.

Sähkökoneiden tuotanto voidaan jakaa viiteen pääosaan, joita ovat vyyhdenvalmistus, käämintä, kyllästys, kokoonpano ja roottorivalmistus. Tässä insinööriyössä keskitytään näistä neljään ensimmäiseen.

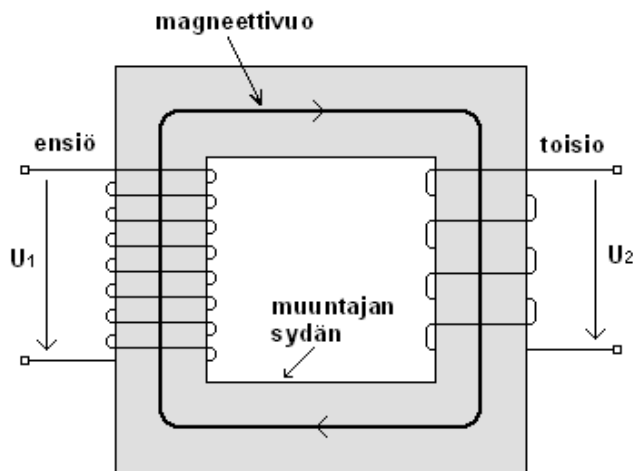
Sähkökoneita ja sähkömagneettista induktiota käsitellään tässä raportissa melko laajasti, jotta lukijalle selviää, minkälaisessa ympäristössä eristystek-

nistä koulutusmateriaalia voidaan hyödyntää, ja minkälaisiin ilmiöihin sähkökoneiden toiminta perustuu. Eristystekniikan käsittelyssä painopiste on pyörivien sähkökoneiden eristyksessä ja erityisesti staattorikäämitysten eristyksessä. Raportin loppupuolella käsitellään ABB:n tapaa valmistaa sähkökoneita ja näissä eri valmistusvaiheissa ilmenneitä ongelmatilanteita sekä niiden ratkaisuja.

## 2 SÄHKÖKONE

### 2.1 Toimintaperiaate

Sähkökone on laite, jossa energian siirtyminen eri pisteiden välillä tapahtuu sähkö- ja magneettikentän välityksellä. Sähkökoneita on kahdentyyppisiä: kiinteitä ja pyöriviä sähkökoneita. Kiinteä sähkökone on esimerkiksi muuntaja, joka muuttaa vaihtosähkön amplitudia, eli jännitettä. Muuntaja siis muuttaa sähköenergian laatua. Kuvassa 1 on esitetty muuntajan periaate. [2, s. 136 - 137; 3, s. 7 - 9.]

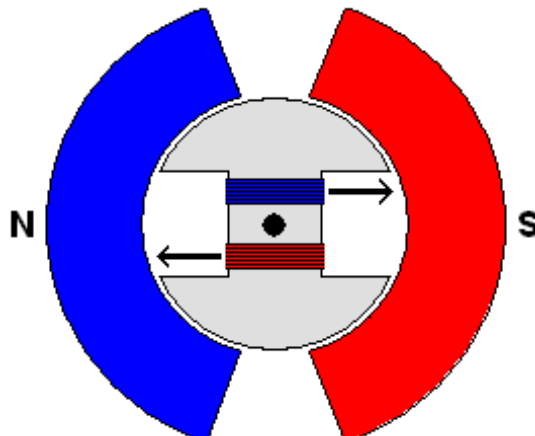


Kuva 1. Muuntajan periaatekuva

Pyöriviä sähkökoneita ovat sähkömoottorit ja sähkögeneraattorit. Pyöriviä sähkökoneita käytetään muuttamaan energiaa muodosta toiseen. Energiamuodoista toinen on aina sähköenergiaa. Näin siksi, että sähkökonetta voidaan käyttää sekä moottorina että generaattorina.

Pyörivä sähkökone koostuu aina tietyistä pääosista, joita ovat staattori ja roottori. Yleensä roottori pyörii staattorin sisällä, ja staattori pysyy paikallaan

koneen ulkopuoliseen havaintopisteeseen nähden. Kuvassa 2 on esitetty tasisähkömoottorin periaate. [2, s. 316 - 317.]



Kuva 2. Sähkömoottorin periaatekuva

## 2.2 Sähkömagneettinen induktio

Sähkökoneiden toiminta perustuu sähkömagneettiseen induktioon. Sähkömagneettinen induktio on ilmiö, jossa magneettikentän muuttuessa magneettikentässä olevaan johtavasta aineesta valmistettuun kappaleeseen muodostuu sähkömotorinen voima eli jännite. Tällaisia johtavia aineita ovat esimerkiksi metallit, kuten kupari ja alumiini. Muodostuva jännite on sitä suurempi, mitä suurempi on magneettikentän muuttumisnopeus ja mitä suurempi on kappaleen pituus. [2, s. 127 - 128.]

Kun syntyvää jännitettä halutaan hyödyntää, tulee johdekappaleen sijaan käyttää suljettua virtapiiriä, jollainen syntyy esimerkiksi yhdistämällä johdekappaleen päät keskenään sopivan kuormituksen välityksellä. Tällöin piirissä alkaa kulkea jännitteen ja kuormituksen suuruudesta riippuva virta seuraavan yhtälön, eli Ohmin lain mukaisesti:

$$U = RI \quad (1)$$

Yhtälössä  $U$  on jännite,  $R$  on kuormituksen resistanssi ja  $I$  on virta. Virta saadaan yhtälöstä jakamalla jännite resistanssilla seuraavasti:

$$I = \frac{U}{R} \quad (2)$$

Jotta tilanteesta saadaan todellisuutta paremmin kuvaava, täytyy johdekappaleita laittaa monta peräkkäin siten, että kaikkien kappaleiden läpi kulkee sama magneettivuoto. Tällöin jokaiseen kappaleeseen kehittyy samansuuruiset ja samansuuntaiset sähkömotoriset voimat, jotka voidaan suoraan summata yhteen. [2, s. 129 - 135.]

Esitettyyn tilanteeseen päästään helpoimmin asettamalla käämi, eli useista johdinkierroksista koostuva komponentti, magneetikenttään. Tällöin jokaisen johdinkierroksen voidaan ajatella edustavan yhtä johdekappaletta. Käämiin, jossa on useita johdinkierroksia, indusoituu paljon suurempi sähkömotorinen voima samalla magneettivuon tiheyden arvolla kuin yhteen johdekappaleeseen. Sähkökoneissa käämejä kutsutaan vyyhdeiksi.

Käämin johdinkierrosten lisäämisellä voidaan siis kasvattaa käämin synnyttämän jännitteen suuruutta. Toinen tapa vaikuttaa sähkömotorisen voiman kasvuun on parantaa magneetikentän muodostavien magneettinapojen välistä magneettista johtavuutta. Tällä saavutetaan suurempi magneettivuon tiheys  $B$ . [2, s. 134 - 135.]

Magneettista johtavuutta kutsutaan permeabiliteetiksi  $\mu$ , ja se on jokaiselle aineelle ominainen. Aineen permeabiliteetti kuvaa sitä, kuinka hyvin kyseinen aine johtaa magneettivuota. Permeabiliteetti on sitä suurempi, mitä parempana johteena kyseinen aine toimii magneettivuolle. Hyvin magneettivuota johtavilla ferromagneettisilla aineilla, kuten raudalla, nikkelillä ja koboltilla permeabiliteetin arvo on hyvin suuri.

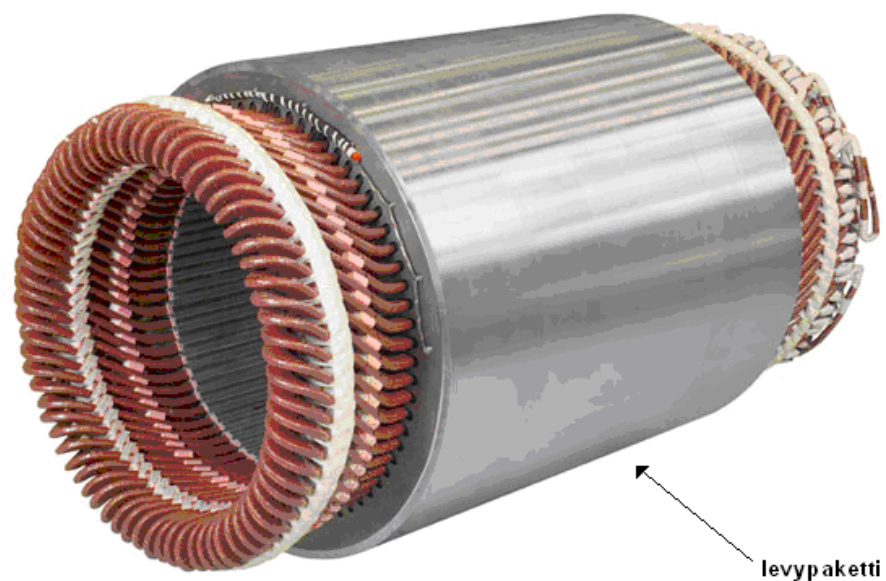
Ilman permeabiliteetti on hyvin lähellä tyhjän permeabiliteettia, joten ilman käyttäminen magneettipiirien väliaineena ei ole kovin järkevää. Ferromagneettisten aineiden, kuten raudan, käyttäminen magneettipiirien magneettivuon johtokanavana sitä vastoin on hyvin kannattavaa, sillä tällöin magneettivuon tiheys saadaan kasvatettua jopa monituhatkertaiseksi ilmaan verrattuna.

Raudan suuren permeabiliteetin vuoksi sitä käytetään muun muassa kuvassa 1 olevan muuntajan ja kuvassa 2 olevan sähkömoottorin sydämien materiaalina. Raudan käytöllä saavutetaan se etu, että koneen toiminnan kannalta oleellinen magneettivuoto kulkee lähes kokonaisuudessaan magneettipiirin läpi. Vain hyvin pieni osa magneettivuosta muuttuu niin sanotuksi hajavuoksi ja leviää ympäristöön ilman välityksellä. [2, s. 104 - 119.]

## 2.3 Pyörivät sähkökoneet

### 2.3.1 Epätahtikone

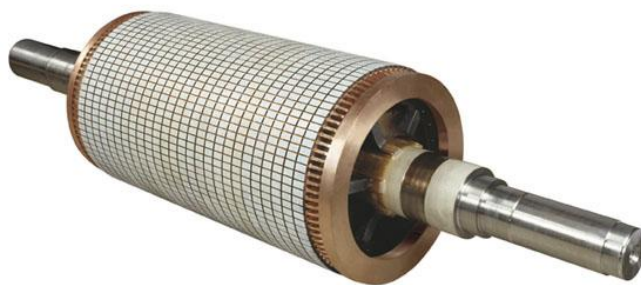
Kolmivaiheinen epätahtikone on kolmivaiheisista pyörivistä sähkökoneista yksinkertaisin. Se on myös yleisin ABB:n Sähkökoneiden valmistama moottorityyppi. Epätahtikone koostuu paikallaan olevasta staattorista ja pyörivästä roottorista. Staattorin sydän koostuu levypaketista, joka on valmistettu ohuista päällekkäin ladotuista rautaisista levyistä, eli niin sanotuista sähkölevyistä. Nämä on galvaanisesti eristetty toisistaan. Kuvassa 3 on esitetty valmis staattori sivulta kuvattuna.



Kuva 3. Valmis staattori sivulta kuvattuna [6]

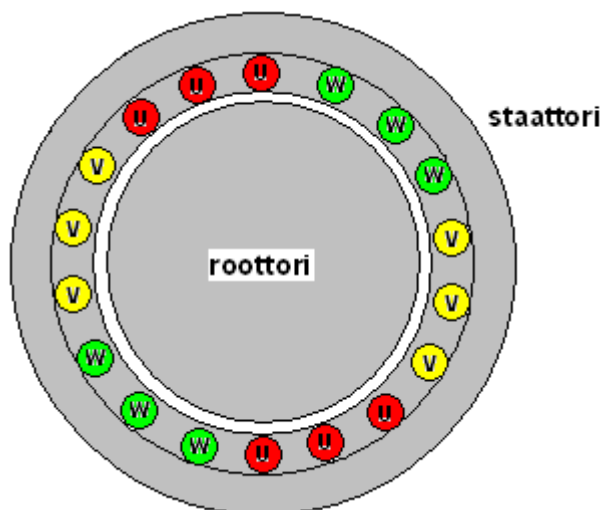
Levypaketissa on sähkölevyihin nähden kohtisuorasti uria, joissa on johtavasta aineesta, kuten kuparista tai alumiinista koostuvista johtimista valmistettuja vyyhtejä. Vyyhdet on kytketty keskenään sopivasti siten, että staattoriin syntyy pyörivä symmetrinen kolmivaiheinen magneettikenttä. Vyyhtejä ja niiden valmistusta käsitellään luvussa 4.1. [2, s. 305 - 313.]

Roottori on useimmiten niin sanottu oikosulkuroottori, joka on rakennettu samanlaisista ohuista eristetyistä sähkölevyistä kuin staattorikin. Roottorissa on paksuja pitkittäisiä kuparisia tai alumiinisia tankoja, joita kutsutaan roottorisauvoiksi. Kaikki roottorisauvat on yhdistetty molemmista päistään niin sanotulla oikosulkurenkaalla, jolloin kaikki sauvat ovat galvaanisesti hyvässä yhteydessä keskenään. Tästä tulee nimitys oikosulkukone. Kuvassa 4 on esitetty tällainen niin kutsutun häkkikäämityksen sisältävä oikosulkuroottori.



Kuva 4. Oikosulkukoneen roottori, jossa on häkkikäänitys [6]

Staattorissa olevien vyyhtien lukumäärä on yleensä paljon suurempi kuin sähkökoneen magneettisten napojen lukumäärä. Yksi magneettinen napa koostuu tällöin useasta vyyhdestä. Tällöin vyyhdet muodostavat niin sanotun vyyhtiryhmän. Vyyhtiryhmien ominaisuuksia käsitellään luvussa 4.2.4. Kuvassa 5 on esitetty vyyhtiryhmien muodostamisen periaate.



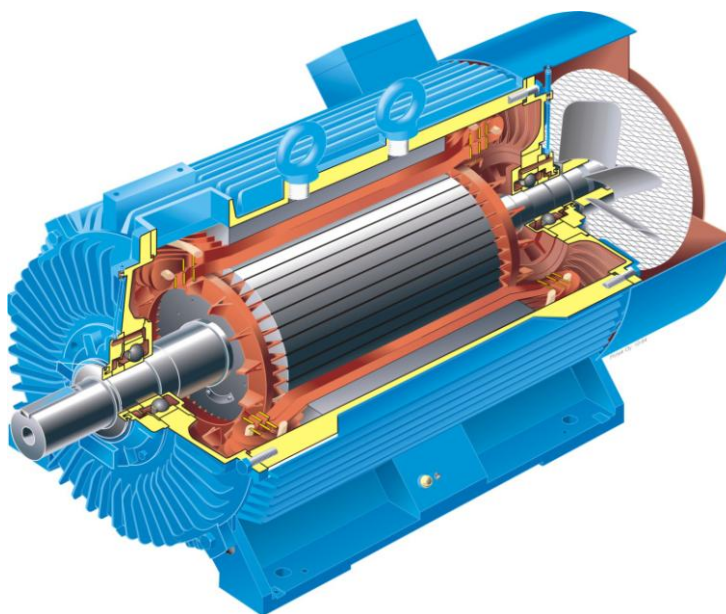
Kuva 5. Sähkökone roottorin suuntaisesti kuvattuna

Kuvasta 5 on nähtävissä, että sähkökoneen vyyhtiryhmät on muodostettu kolmesta vyyhdestä. Nämä vyyhdet voidaan kytkeä keskenään joko sarjaan tai rinnan. Kirjaimet U, V ja W kuvaavat eri vaiheita.

Kun staattorissa alkaa pyöriä symmetrinen kolmivaiheinen magneettikenttä, synnyttää se roottorisauvoihin sähkömotorisen jännitteen. Sähkömotorinen jännite saa hyvin johtavissa sauvoissa aikaan suuren virran. Suuri virta aiheuttaa ympärilleen magneettikentän. Nämä sauvoihin syntyvät magneettikentät vuorovaikuttavat staattorin magneettikentän kanssa synnyttäen root-

torin pinnan suuntaisen kokonaisvoiman. Tämän seurauksena roottori alkaa pyöriä. Roottori ei kuitenkaan pyöri täsmälleen samalla nopeudella staattorin magneettikentän kanssa, vaan jää tästä hieman jälkeen. Tällöin puhutaan niin sanotusta jättämästä. Jättämä yleensä kasvaa kuormituksen lisääntyessä. [2, s. 333.]

Kuvassa 6 on esitetty oikosulkumoottorin rakenne.



Kuva 6. Oikosulkumoottorin rakenne [6]

Oikosulkumoottori on suhteellisen edullinen ja helppo valmistaa, minkä vuoksi se on kaikista pyörivistä sähkökoneista eniten käytetty. Sillä on kuitenkin huonojakin puolia jättämän lisäksi. Merkittävä ongelma on oikosulkumoottorin käynnistyshetkellä ottama nimellisvirtaan nähden jopa 8-kertainen käynnistysvirta. Tämä suuri virta voi aiheuttaa heikossa syöttävässä sähköverkossa kohtalaisen jännitteen aleneman, mikä voi häiritä muiden verkkoon kytkettyjen laitteiden toimintaa. Jännitteen alenema laskee myös moottorin liittimille tulevaa jännitettä, jolloin moottorin käynnistymisaika pitenee. [2, s. 334 - 338.]

Oikosulkumoottoria teknisesti parempana epätahtikoneena voidaan pitää liukurengaskonetta. Liukurengaskone poikkeaa oikosulkumoottorista roottorinsa osalta. Liukurengasmootorin roottorissa on liukurenkaat, joiden kautta pystytään magneetoimaan roottorissa olevaa staattorin kaltaista käämitystä halutulla tavalla. Tällöin käynnistysvirta ja vääntömomentti asettuvat halutuiksi. [2, s. 333.]

### 2.3.2 Tahtikone

Tahtikoneessa on epätahtikoneeseen nähden se merkittävä ero, että se nimensä mukaisesti pyörii staattorin kehittämän magneettikentän kanssa samalla nopeudella, eli tahdissa. Tahtikone on rakenteeltaan epätahtikoneen kaltainen staattorin osalta. Roottorit ovat kuitenkin hyvin poikkeavia. Tahtikoneen roottorissa on vastaavanlainen käämitys kuin staattorissakin. Käämityksen avulla saadaan tuotettua magnetointi roottorille, jolloin roottorin muodostama tasainen magneettikenttä pyörii täsmälleen samassa tahdissa staattorin muodostaman magneettikentän kanssa. [2, s. 344 - 350.]

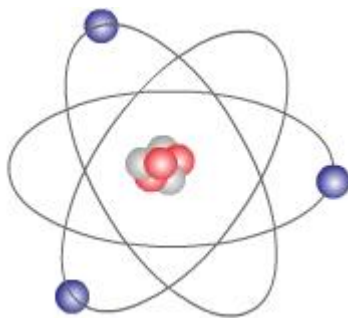
Kuten aikaisemmin todettiin, generaattori on pyörivä sähkökone, jolla mekaanista energiaa muutetaan sähköenergiaksi. Energian kulkusuunta on siis päinvastainen kuin moottorien tapauksessa. Samaa tahtikonetta on varsin helppo käyttää sekä moottorina että generaattorina. Monet suurten voimalaitosten generaattoreista ovatkin tahtigeneraattoreita. [2, s. 345 - 346.]

## 3 YLEISTÄ ERISTYSTEKNIIKASTA

### 3.1 Eristeet, johteet ja puolijohteet

Kaikki aineet voidaan jakaa kolmeen ryhmään sen perusteella, miten ne johtavat sähköä. Nämä ryhmät ovat eristeet, johteet ja puolijohteet. Eristeet ovat aineita, jotka johtavat sähköä erittäin huonosti, tai eivät ollenkaan. Johteet ovat aineita, jotka nimensä mukaisesti johtavat sähköä hyvin. Puolijohteet ovat aineita, joiden sähkönjohtavuus on näiden kahden ryhmän välissä. Puolijohteilla on myös se erikoinen ominaisuus, että niiden sähkönjohtavuus ei pysy vakiona eri olosuhteissa.

Yksinkertaisen atomimallin mukaan atomi muodostuu raskaasta positiivisesti varautuneesta ytimeistä ja ydintä tietyillä radoilla kiertävistä negatiivisesti varautuneista elektroneista. Eri alkuaineiden atomeilla on erilainen määrä elektroneja. Myös niiden jakauma eri elektronikuorilla on erilainen. Kuva 7 esittää yksinkertaista atomimallia.



*Kuva 7. Yksinkertainen atomimalli [4]*

Elektronikuoret kuvaavat sitä, miten elektronit sijoittuvat ytimen ympärille. Elektronikuoret kuvaavat siis potentiaalienergian suuruutta ytimeen nähden eli elektronien etäisyyttä ytimestä. Mitä kauempana elektronit ovat ytimestä, sitä suurempi on niiden potentiaalienergia. Mitä kauempana elektronit ovat atomin ytimestä, sitä pienempi on niiden ytimen vaikutuspiiristä irrottamiseen vaadittava energia.

Sähköisesti varautuneet hiukkaset joko hylkivät toisiaan tai vetävät toisiaan puoleensa riippuen varauksen laadusta. Samanmerkkiset varaukset hylkivät toisiaan ja erimerkkiset vetävät toisiaan puoleensa. Tällöin sähkökentässä ollessaan negatiivisesti varautuneet elektronit pyrkivät siirtymään positiivista napaa kohti. Kuten tiedetään, on sähkövirta yleensä elektronien liikettä. Sähkövirta voi kuitenkin olla myös ionien liikettä esimerkiksi suolaliuoksissa. Vaikka johteissa sähkövarausta siirtävät elektronit kulkevatkin negatiivisesta navasta positiiviseen, on sovittu, että sähkövirran suunta on positiivisesta negatiiviseen.

Johteilla, kuten metalleilla, ulommilla elektronikuorilla olevien elektronien määrä on suuri. Tällöin jo pienellä energiamäärällä on mahdollista saada suuri määrä elektroneja irrotettua. Tämän vuoksi jo pienellä metallikappaleen yli olevalla jännitteellä saadaan metallissa kulkemaan suuri sähkövirta.

Eristeillä ulommilla elektronikuorilla on hyvin vähän tai ei ollenkaan elektroneja. Tällöin niiden irrottamiseen sisemmiltä elektronikuorilta vaaditaan hyvin paljon energiaa. Tämän takia eristeet eivät juuri johda sähköä suuremmassakaan jänniterasituksessa.

Puolijohteiden sähkönjohtavuus vaihtelee lähes eristeen tasolta lähelle huonojen johteiden johtavuutta. Puolijohteilla sähkönjohtavuus yleensä paranee lämpötilan kasvaessa, koska lämpötilan nousun aiheuttama energian siirty-

minen ulompien elektronikuorien elektroneihin lisääntyy. Tällöin ne saavat riittävästi energiaa irrotakseen atomista. [2, s. 11 - 12.]

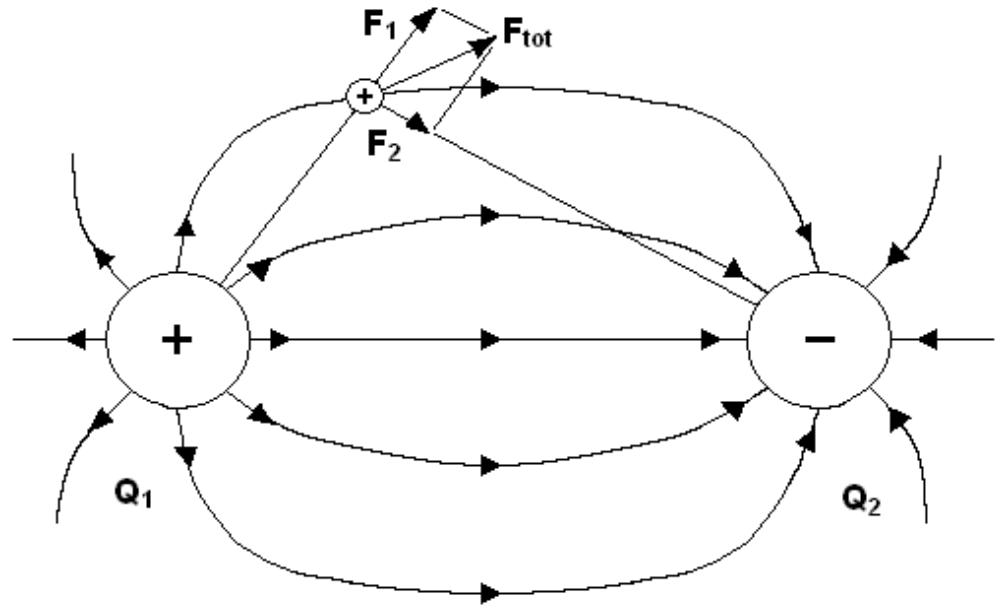
### 3.2 Sähkökenttä

Sähköisesti varautunut hiukkanen kehittää ympärilleen sähkökentän. Sähkökenttä on vuorovaikutuksessa muiden hiukkasten kanssa. Vuorovaikutuksen olemassaolo on havaittavissa hiukkasten välillä esiintyvistä voimasta. Voiman suunta riippuu hiukkasten varausten laadusta ja suuruus hiukkasten määrästä. Seuraava yhtälö ilmoittaa kahden pistemäisen varauksen välisen voimavaikutuksen suuruuden:

$$F = k * \frac{Q_1 * Q_2}{r^2} \quad (3)$$

Yhtälössä k on mittajärjestelmästä ja väliaineesta riippuva vakio,  $Q_1$  ja  $Q_2$  ovat sähkövaraukset coulombeina ja r on varausten välinen etäisyys. Edellisestä yhtälöstä selviää voiman suuruus. Voiman suunta riippuu varausten laadusta. Varausten välinen voima on vetovoima, kun kyseessä ovat varaukset ovat erimerkkiset, ja työntövoima, kun varaukset ovat samanmerkkiset. [2, s. 13.]

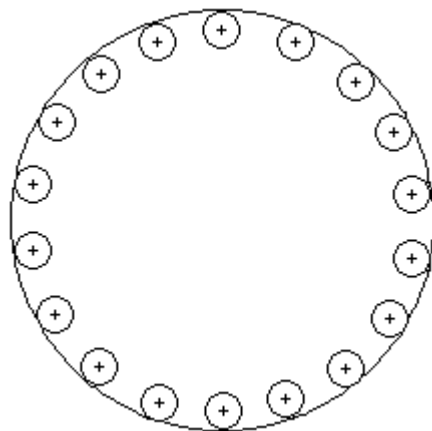
Sähkövarausten välillä esiintyvät voimat voidaan selittää niin sanotun lähivaikutushypoteesin avulla. Lähivaikutushypoteesissa varauksia kuvitellaan yhdistävän voimaviivat, joiden suunta on positiivisesta varauksesta negatiiviseen varaukseen päin. Varausten välillä esiintyvien voimien kuvitellaan siirtyvän näitä viivoja pitkin. Positiiviseen varaukseen vaikuttavan voiman suunnan perusteella määritellään voimaviivojen suunta kussakin sähkökentän pisteessä. Kuva 8 havainnollistaa asiaa.



Kuva 8. Kahden erimerkkisen varauksen muodostama sähkökenttä [lähde 2, s. 13 mukaillen]

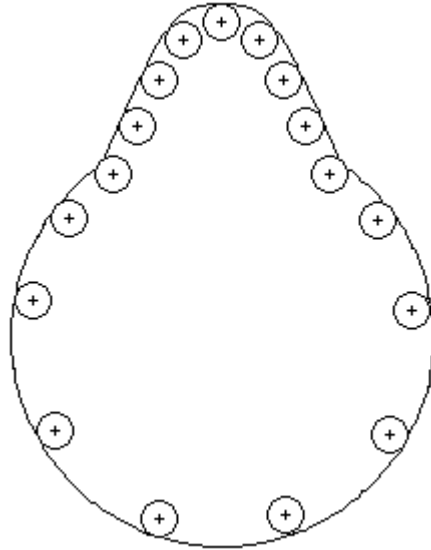
Kuvassa  $F_1$  on varauksen  $Q_1$  ja  $F_2$  varauksen  $Q_2$  positiiviseen pistevaraukseen kohdistama voima. Tällöin pistevaraukseen kohdistuva kokonaisvoima  $F_{tot}$  on kuvan mukainen. [2, s. 13.]

Sähkövarausten välisten voimien avulla on selitettävissä sähkövarausten jakautuminen johteissa. Kuvassa 9 on esitetty johdepallo, jossa pistemäiset alkeisvaraukset ovat jakautuneet tasaisesti pallon pinnalle, koska niiden toisiinsa kohdistamat työntövoimat ovat samansuuruiset. Tällöin voimat kumoavat toisensa ja sanotaan, että varausten tasaisesta jakautumisesta johtuen pinnan varauskate on vakio.



Kuva 9. Johdepalloon varautunut sähkö [lähde 2, s.14 mukaillen]

Mikäli johdekappale ei ole kuvan 9 mukainen tasainen kappale, jakautuvat alkeisvaraukset eri tavalla. Varauksia alkaa voimien epätasaisuudesta johtuen pakkautua teräviin kohtiin kuvan 10 mukaisesti.



Kuva 10. Kärjen vaikutus varauksen jakautumiseen [lähde 2, s. 14 mukailten]

Kuvasta on nähtävissä, että pinnan varauskate ei ole enää vakio, vaan kärjen alueelle on pakkautunut varauksia, jolloin varauskate on kasvanut. Muualla varausten määrä on vähentynyt, jolloin varauskate on pienentynyt. [2, s. 14.]

Sähkökentän voimakkuus tarkoittaa sitä voimaa, joka kohdistuu sähkökentässä olevaan positiiviseen varaukseen varausyksikköä kohti. Seuraava yhtälö kuvaa sähkökentän voimakkuutta:

$$E = \frac{F}{Q} \quad (4)$$

Yhtälössä  $F$  on varaukseen kohdistuva voima ja  $Q$  on varauksen suuruus. Sähkökentän voimakkuuden yksikkönä on yleisesti käytössä  $V/m$ . Kuvassa 9 olevan johdepallon pinnan kentänvoimakkuus on vakio pinnan eri kohdissa. Kuitenkin kuvassa 10 kärjen alueelle on pakkautunut paljon varauksia, jolloin sähkökentän voimakkuus on kasvanut merkittävästi. [2, s. 17 - 19.]

### 3.3 Eristyksen tehtävät

Eristys on tärkeä osa sähkökoneita ja sillä on monia tehtäviä. Yleensä eristys ajatellaan itsestään olemassa olevaksi ja vähän tilaa vieväksi. Myös eristyksen sähköneristävyys oletetaan likimain täydelliseksi. Todellisuudessa eristys joudutaan erityisesti valmistamaan, ja sen valmistaminen on yleensä melko kallista ja hidasta. Tämän lisäksi eristyksen takia sähkökoneiden koko voi kasvaa jopa 10 prosenttia. Sähköneristävyys ei ole myöskään täydellinen, vaan eristeessä kulkee aina jonkinlainen vuotovirta, joka aiheuttaa erilaisia häviöitä. [5.]

Eristyksen tärkein tehtävä on pitää eri potentiaalissa olevat osat toisistaan erillään sekä estää läpilyönti näiden välillä. Tällaisia erijännitteisiä osia sähkökoneissa ovat esimerkiksi staattori ja roottori sekä koneen runko. Toinen tärkeä tehtävä eristyksellä on tehohäviöissä syntyvän lämmön poisjohtaminen. Lisäksi eristyksellä on merkitystä sähkökoneiden käämityksen mekaanisen lujuuden aikaansaamiselle. [5.]

### 3.4 Eristeaineet

#### 3.4.1 Kiinteät eristeet

Pyörivissä sähkökoneissa kiinteillä eristeillä on suuri merkitys. Ne tukevat jännitteisiä osia ja pitävät ne erillään toisistaan. Tärkein peruste kiinteän eristeineen valinnalle on yleensä sen lämpötilakestävyys. Jännitelujuus kiinteillä eristeillä on yleensä aina hyvä, ellei eristystä ole tarkoitus saada mahtumaan hyvin pieneen tilaan. Tärkeimpiä eristeaineita ovat kiille ja erilaiset muovit. [1, s. 121.]

Kiille on sähkökoneiden ylivoimaisesti tärkein yksittäinen eristemateriaali. Sen eduiksi voidaan katsoa suuri jännitekestävyys sekä hyvä osittaispurkauksien kestävyys. Osittaispurkauksia tullaan käsittelemään luvussa 3.7. Myös lämpötilakestävyys on kiille-eristeillä korkea. Huonoja puolia kiilleellä ovat sen heikko mekaaninen kestävyys sekä korkea hinta.

Toinen tärkeä eristemateriaali sähkökoneissa on lasikuitu, jonka etuna on sen melko halpa hinta ja erinomainen vetolujuus. Lasikuitu ei kuitenkaan kestä kovin paljon taittamista, vaan murtuu helposti esimerkiksi terävien reunojen kohdalta. Lasikuitua käytetään erityisesti matalajännitteisissä sähkökoneissa staattorin ulosottojen eristämiseen ja tukemiseen. [5.]

### 3.4.2 *Nesteet*

Neste-eristystä ei pyörivissä sähkökoneissa käytetä, sillä se olisi hyvin haastavaa. Kuitenkin muuntajissa nestettä käytetään eristeenä muuntajaöljyn muodossa hyvin laajasti. Muuntajaöljyä käytettäessä etuna on se, että tällöin kiinteää eristystä ei juuri tarvita, jolloin eristyksen valmistaminen on huomattavasti helpompaa verrattuna pyöriviin sähkökoneisiin. [5.]

### 3.4.3 *Kaasut*

Pyörivissä sähkökoneissa tärkein eristekaasu on luonnollisesti ilma. Ilman jännitelujuus on kuitenkin melko huono verrattuna moniin muihin kaasuihin. Muiden kaasujen käyttäminen osana pyörivien sähkökoneiden eristystä toisi kuitenkin niin paljon haasteita muun muassa sähkökoneen tiivistämisen ja tästä seuraavan jäähdytystehon heikkenemisen myötä, että ilma tulee eristekaasuna järkevimmäksi vaihtoehdoksi. [5.]

## 3.5 **Eristyksen pääosat**

Pyörivien sähkökoneiden eristys voidaan jakaa kahteen pääosaan, joita ovat ilmaeristys ja kiinteä eristys. Yleisesti voidaan sanoa, että eristyksestä  $2/5$  jakautuu kiinteälle eristykselle ja  $3/5$  ilmaeristykselle. [5.]

### 3.5.1 *Ilmaeristys*

Ilmaeristys on tärkeä osa sähkökoneiden kokonaissähköeristyksestä. Ilman käyttäminen eristeenä on erityisen kannattavaa, koska se on täysin ilmainen eristemateriaali. Eristys on myös helppo suunnitella siten, että suuri osa jänniterasituksesta kohdistuu ilmapäleihin. Ilmalla on myös se merkittävä etu, että vikatilanteesta, kuten ilmapälin läpilyönnistä, ei aiheudu pysyvää vahinkoa. Ilmapäli nimittäin palautuu ennalleen vikatilanteen päätyttyä sähköpurkausta ylläpitävien ionien haihduttua ilmasta. [5.]

### 3.5.2 *Kiinteä eristys*

Sähkökoneissa on ilmaeristyksen lisäksi välttämätöntä käyttää kiinteää eristystä, joka pitää eri potentiaalissa olevat osat toisistaan erillään. Sähkökoneiden kiinteä eristys voidaan jakaa kahteen osaan, joita ovat vyyhtien pääeristys ja johdinten johdineristys. Pääeristyksen tehtävänä on eristää vyyhdet staattoripaketista ja toisista erivaiheisista vyyhdeistä. Johdineristyksellä

eristetään saman vyyhden eri johdinkierrokset toisistaan, jotta haluttu vyyhden johdinkierrosmäärä säilyy. [5.]

### 3.6 Eriste sähkökentässä

Eristeen ollessa sähkökentässä, vaikuttaa siihen moni asia, joiden huomioiminen on oleellisen tärkeää toimivan ja häviöiltään kohtuullisen eristyksen aikaansaamiseksi. Näistä huomioitavista asioista tärkeimmät ovat eristeen permittiviteetti, polarisaatio ja dielektriset häviöt.

#### 3.6.1 Permittiviteetti

Permittiviteetti on jokaiselle aineelle ominainen suure. Se kuvaa sitä, kuinka suuri sähkövuoto aineessa kulkee tietyllä sähkökentän voimakkuudella. Toisin sanoen permittiviteetti kuvaa sitä, kuinka hyvin kyseinen aine johtaa sähkövuota. Seuraavan yhtälön avulla voidaan määrittellä aineen permittiviteetti [1, s. 20]:

$$\varepsilon = \frac{\bar{D}}{\bar{E}} \quad (5)$$

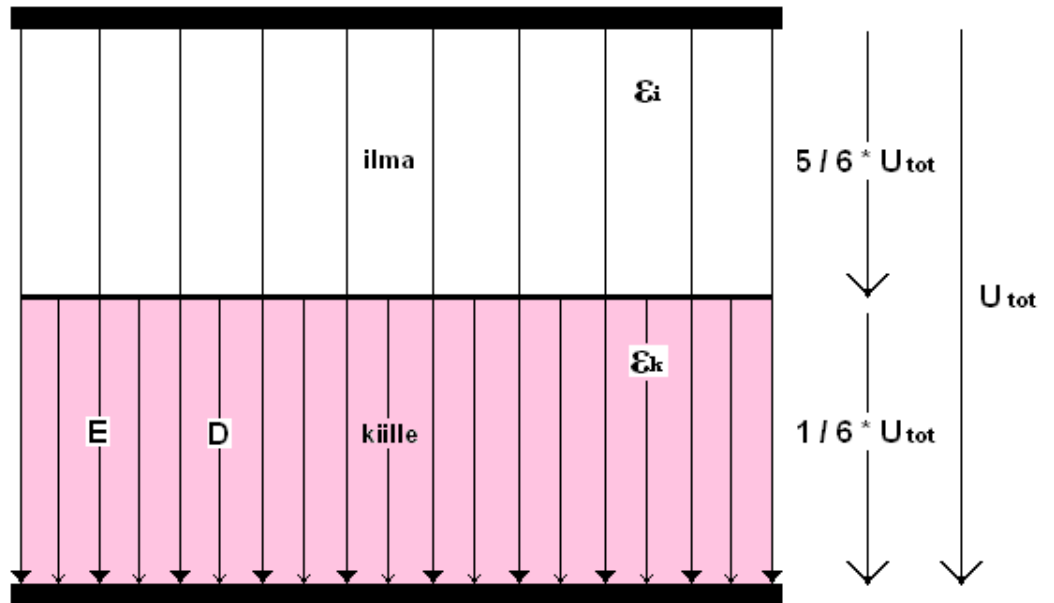
Yhtälössä D on sähkövuon tiheys ja E on sähkökentän voimakkuus. Permittiviteetti on kuitenkin käytännöllisempää ilmoittaa suhteellisena permittiviteettinä. Tämä tarkoittaa sitä, että tietyn aineen permittiviteettiä verrataan tyhjän permittiviteettiin, joka on arvoltaan 1. Kaikkien aineiden suhteellinen permittiviteetti on tätä suurempi. Esimerkiksi sähkökoneissa kiinteän eristyksen päämateriaalina käytetyn kiilteen suhteellinen permittiviteetti on välillä 5 - 7. Seuraava yhtälö määrittelee suhteellisen permittiviteetin [1, s. 20]:

$$\varepsilon_r = \frac{\varepsilon}{\varepsilon_0} \quad (6)$$

Yhtälössä  $\varepsilon$  on tietyn aineen permittiviteetti ja  $\varepsilon_0$  on tyhjän permittiviteetti. [1, s. 20].

Permittiviteetti määrittelee, kuinka jännite jakautuu tietyssä eristekokonaisuudessa eri eristeaineiden kesken. Kun eristekokonaisuus koostuu kahdesta saman paksuisesta eristeaineesta, jotka ovat homogeenisessä eli tasalaatuisessa sähkökentässä, jakautuu jännitteestä suurempi osa pienemmän permittiviteetin omaavalle aineelle. Kuvassa 11 on esimerkki tällaisesta eris-

tekokonaisuudesta. Toisena eristeenä on käytetty ilmaa, jonka suhteellinen permittiviteetti on likimain 1 ja toisena eristeenä on kiillettä.



Kuva 11. Ilman ja kiilteen muodostama eristekokonaisuus

Kuvasta nähdään, että saman paksuiset kerrokset ilmaa ja kiillettä on asetettu homogeeniseen sähkökenttään  $E$ . Sähkökentän vuoksi eristeiden läpi alkaa kulkea sähkövuo  $D$ , joka on huomattavasti suurempi kiilteessä kuin ilmaa. Tällöin kiilteen yli jää vain pieni osa sähkökentän aiheuttamasta jänniterasituksesta. [1, s. 25 - 26.]

Tilannetta voidaan verrata kahden sarjaan kytketyn erilaisen resistanssin omaavan vastuksen muodostamaan virtapiiriin. Tällöin näiden vastusten yli on tietty kokonaisjännite, joka jakautuu vastusten resistanssien suhteessa yhtälön 2 mukaisesti. Molempien vastusten läpi kulkee sama virta  $I$ , mutta suuremman resistanssin  $R$  omaavan vastuksen yli jää suurempi jännite  $U$ . Voidaan ajatella tämän olevan seurausta siitä, että kyseinen vastus johtaa virtaa huonommin. [1, s. 25 - 26.]

Kuvan 11 tilanne on itse asiassa toiminnaltaan edellistä esimerkkiä täysin vastaava. Kaksi erilaista ainetta on laitettu peräkkäin sähkökenttään  $E$ , jolloin niiden läpi kulkee sähkövuo  $D$ . Suuremman permittiviteetin  $\epsilon$  omaava aine eli kiille vastustaa sähkövuon kulkua vähemmän. Siten sen yli jää pienempi jännite pienemmän permittiviteetin omaavaan aineeseen, ilmaan nähden. Seuraava yhtälö kuvaa sähkökentän jakautumista kuvan 11 kaltaisessa tilanteessa [1, s. 25 - 26]:

$$\frac{E_1}{E_2} = \frac{\varepsilon_2}{\varepsilon_1} \quad (7)$$

Yhtälössä  $\varepsilon_1$  ja  $\varepsilon_2$  ovat aineiden 1 ja 2 permittiviteetit ja  $E_1$  ja  $E_2$  vastaavat sähkökentän voimakkuudet [1, s. 25 - 26].

Permittiviteetti on erityisen tärkeä huomioida eristekokonaisuuksissa, joissa osa eristyksestä muodostuu ilmasta ja osa jostakin korkean permittiviteettiarvon aineesta. Tällaisissa tilanteissa ilmvälisen kentänvoimakkuudet saattavat helposti nousta niin suuriksi, että välissä tapahtuu läpilyönti. [1, s. 25 - 26.]

### 3.6.2 Polarisaatio

Polarisaatio on ilmiö, jossa ulkoinen sähkökenttä kääntää eristeaineen sähkövarauksia kentän suuntaisesti. Polarisaatio perustuu siihen, että eristeissä varaukset eivät voi juuri liikkua sähkökentän mukaan, koska vapaita varauksenkuljettajia ei käytännössä ole. Johteissa taas vapaita varauksenkuljettajia on runsaasti, joten ulkoinen sähkökenttä kykenee liikuttamaan varauksia huomattavasti paremmin. Käytännössä sähkökenttä siirtää kaikki negatiiviset varauksenkuljettajat johdekappaleen sähkökentän positiiviseen päähän ja positiiviset varaukset johdekappaleen sähkökentän negatiiviseen päähän. [1, s. 49 - 53.]

Sähkökentässä, jossa kentän napaisuus vaihtelee ajan suhteen, on polarisaatiolla merkitystä. Eristeissä, joissa sähkövaraukset eivät voi liikkua johdeiden tavoin, aiheuttaa polarisaatio häviöitä. Sähkökenttä liikuttaa eristeen molekyylien positiivisia ja negatiivisia osia hieman normaaliasemastaan, jolloin molekyylien liikkeen aiheuttaman kitkan seurauksena eriste lämpenee. [1, s. 49 - 53.]

Tämän molekyyli- eli dipolipolarisaation lisäksi on olemassa myös muita polarisaation lajeja. Tällaisia ovat atomipolarisaatio ja elektronipolarisaatio. Atomipolarisaatio perustuu samaan mekanismiin kuin molekyylipolarisaatio, eli sähkökenttä pyrkii liikuttamaan eristeaineen positiivisesti ja negatiivisesti varautuneita atomeita eri suuntiin. Atomipolarisaatiolla on kuitenkin merkitystä häviöille vasta huomattavasti suuremmilla sähkökentän muuttumisnopeuksilla. Elektronipolarisaatiossa sähkökenttä pyrkii liikuttamaan atomin sähköisesti varautuneita osia, eli elektroneja ja atomin ydintä, toisiinsa nähden.

Elektronipolarisaatiolla ei juuri ole vaikutusta häviöihin, sillä tätä polarisaatiolajia esiintyy vasta hyvin suurilla sähkökentän muuttumisnopeuksilla. [1, s. 49 - 53.]

### 3.6.3 Dielektriset häviöt

Dielektriset häviöt ovat vaihtosähkökentässä esiintyviä häviöitä, jotka perustuvat molekyylikitkaan. Mikään kiinteä eriste ei ole täydellinen, sillä kaikki eristeet johtavat jonkin verran sähköä. Tasasähkökentässä olevan eristeen kaikki häviöt perustuvatkin johtavuuteen, sillä tasasähkökentässä esiintyvä polarisaatio pysyy ajan suhteen vakiona, joten liikettä vastustavaa kitkaa ei pääse syntymään. [1, s. 49 - 53.]

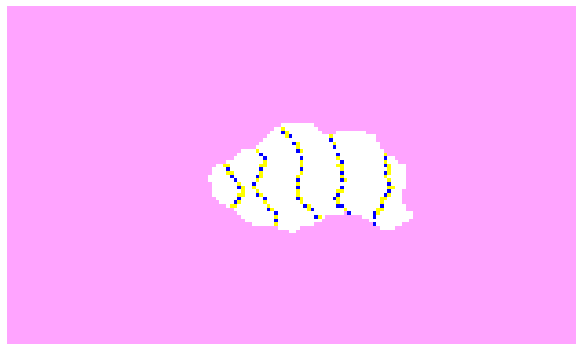
## 3.7 Sähköpurkaukset

Kaikissa vahvassa sähkökentässä olevissa eristekokonaisuuksissa tapahtuu sähköpurkauksia. Sähköpurkaukset voivat olla pieniä ja vähemmän haitallisia osittaispurkauksia tai vaikutuksiltaan tuhoisia läpilyöntejä.

### 3.7.1 Osittaispurkaukset

Osittaispurkaus on pieni läpilyönti ilmapälissä, joka ainakin toiselta sivultaan rajoittuu eristeeseen. Osittaispurkaukset ovat muihin sähköpurkauksiin verrattuna kohtuullisen pienestä eristeen tuhoamiskyvystään huolimatta yleensä kaikkein ongelmallisin ja vaikeimmin hallittava sähköpurkausten esiintymismuoto.

Osittaispurkaus syntyy, kun tietyn ilmapälin läpilyöntikentänvoimakkuus ylittää. Tämä tarkoittaa sitä, että jännite, joka kyseisen ilmapälin yli on, ylittää jännitteen, jolla ilmapälissä syntyy läpilyönti. Kuva 12 esittää eristeaineen sisällä olevaa ilmaonteloa, jossa on syntynyt osittaispurkauksia.



Kuva 12. Osittaispurkauksia ilmaontelossa

Kiinteän eristeaineen sisällä olevat ilmaontelot ovat erityisen haitallisia, koska eristeaineen permittiviteetti on yleensä huomattavasti suurempi kuin ilman. Tällöin useimmiten hyvin pienen ilmaontelon yli jää huomattavan suuri jännite kiinteän eristeaineen yli jäävään jännitteeseen nähden. Tämän vuoksi osittaispurkauksia syntyy jo melko matalalla käyttöjännitteellä toimivissa sähkökoneissa.

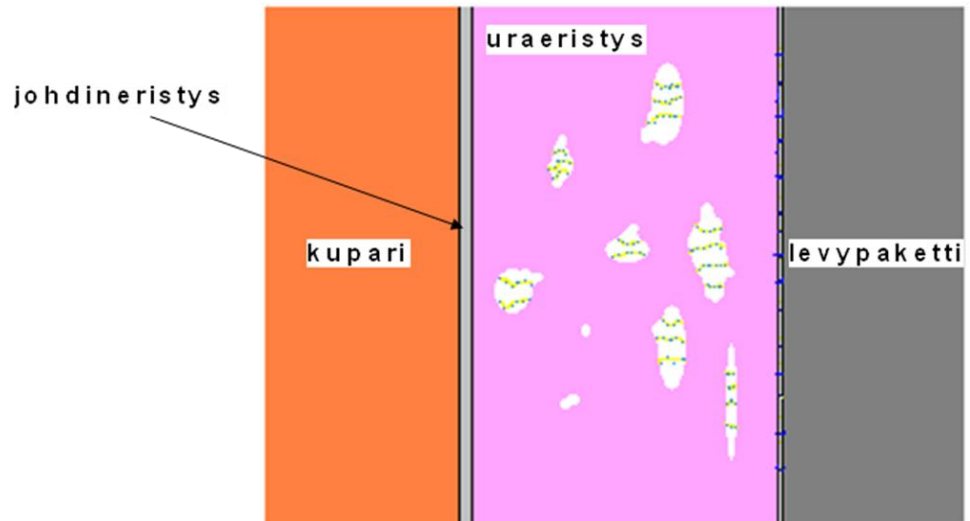
Osittaispurkausten haittavaikutus perustuu niiden eristettä kuluttavaan vaikutukseen. Eriste kuluu purkauksen aiheuttaman lämpövaikutuksen ja purkauksissa syntyvien kemiallisesti aggressiivisten aineiden, kuten typen oksidien ja otsonin eristettä kuluttavan vaikutuksen seurauksena. Osittaispurkauksia pystytään merkittävästi vähentämään kyllästäväällä staattorikäimitys. Tätä käsitellään tarkemmin luvussa 4.3. [1, s. 76 - 85.]

### 3.7.2 *Läpilyönti*

Läpilyönti on kiinteän eristyksen tapauksessa haitallisin sähköpurkauksen muoto, sillä se tuhoaa eristyksen paikallisesti kokonaan. Läpilyönti tarkoittaa tilannetta, jossa kahden eri potentiaalissa olevan elektrodin välille muodostuu täysin eristeetön kanava, ja tässä kanavassa syttyy valokaari, joka yhdistää elektrodit.

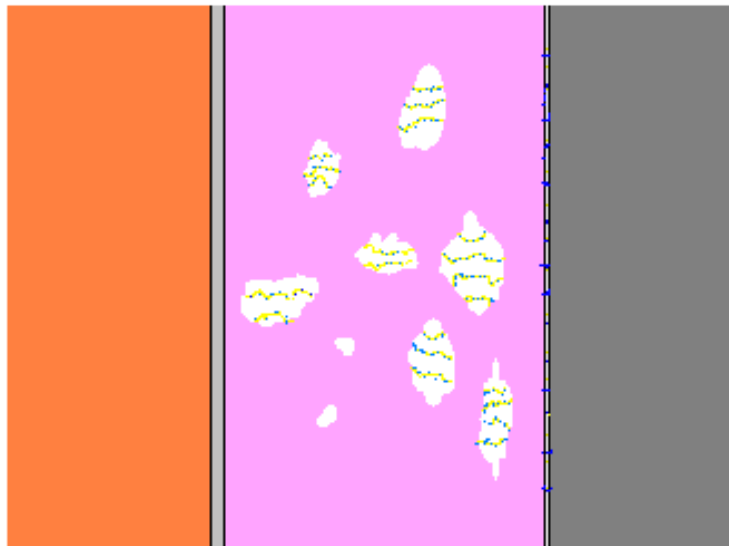
Läpilyönti voi tapahtua usealla eri tavalla. Näistä sähkökoneiden kannalta merkittävimmät ovat sähköläpilyönti, osittaispurkausläpilyönti ja lämpöläpilyönti. Sähköläpilyönti perustuu siihen, että eristeen yli on korkea jännite, joka aiheuttaa eristeessä olevaan heikkoon kohtaan sisäisen läpilyönnin. Tämä sisäinen läpilyönti heikentää eristettä, mikä johtaa nopeasti uusiin sisäisiin läpilyön-teihin ja lopulta elektrodivälin sulkeutumiseen.

Osittaispurkausläpilyönnissä eristeen sisällä olevissa ilmaonteloissa syntyy osittaispurkauksia, jotka eristettä kuluttaessaan pienentävät eristyksen jännitelujuutta, ja lopulta seurauksena on läpilyönti. Kuva 13 esittää halkileikkausta vyyhden ja staattorin levypaketin rajapinnasta.



Kuva 13. Osittaispurkauksia eristeen ilmaonteloissa

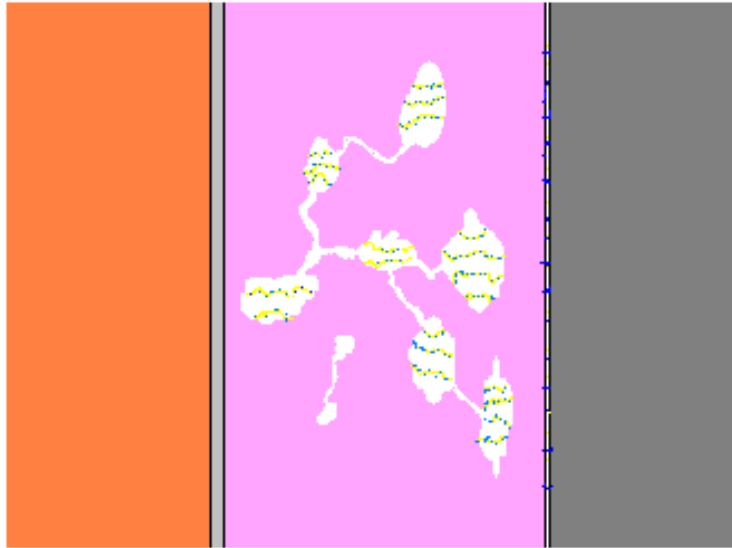
Kuvan mukainen tilanne voisi syntyä, jos staattoria ei olisi kyllästetty, tai kylästyks olisi epäonnistunut. Uraeristyksessä olevissa ilmaonteloissa on suuri kentänvoimakkuus, ja osittaispurkauksia on alkanut syntyä. Myös levypaketin ja eristyksen pinnan välillä on havaittavissa energialtaan vähäisiä osittaispurkauksia pienestä ilmavälistä johtuen. Eriste alkaa kulua osittaispurkausten takia, ja ilmaontelot suurenevät kuvan 14 mukaisesti.



Kuva 14. Osittaispurkauksien suurentamia ilmaonteloita

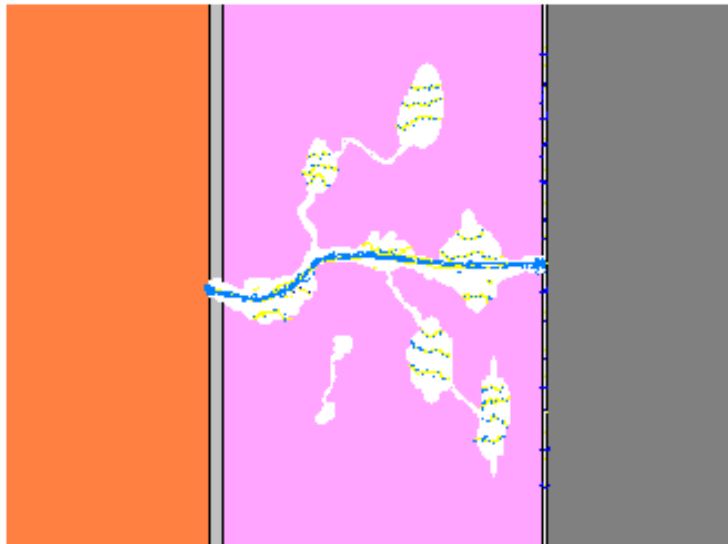
Eri ilmaonteloiden väliset eristekerrokset ovat alkaneet ohentua eristeen kuluminen seurauksena. Kuluminen on myös kiihtynyt osittaispurkausten synnyttämien typen oksidien ja otsonin eristettä syövyttävän vaikutuksen takia. Jonkin ajan kuluttua eri onteloiden välinen eristys on kulunut kokonaan pois,

ja puun mallisia kanavia onteloiden välille on alkanut syntyä. Kuvassa 15 on esitetty tällainen tilanne.



*Kuva 15. Puun mallisia kanavia onteloiden välillä*

Lopulta eriste on kulunut niin paljon, että kuparijohtimen ja levypaketin välille muodostuu ohut kanava, joka on täysin eristeetön. Tämä johtaa välittömästi läpilyöntiin, joka tuhoaa eristyksen tältä kohdalta pysyvästi. Kuva 16 esittää tällaista tilannetta.



*Kuva 16. Läpilyönti kuparijohtimen ja levypaketin välillä*

Lämpöläpilyönti perustuu eristeen johtavuuden ja dielektristen häviöiden aiheuttamaan eristeen lämpenemiseen. Eristeiden lämmitessä niiden johtavuus yleensä lisääntyy, minkä seurauksena ne lämpenevät entistä enem-

män lisäksi eristeen johtavuutta. Mikäli syntyvät häviöt lämmittävät eristettä enemmän kuin jäädyttämällä haihtuu, syntyy epävakaa tilanne, joka johtaa lopulta läpilyöntiin. [1, s. 123 - 127.]

### **3.8 Eristykselle asetettavat vaatimukset**

Sähkökoneiden eristykseen kohdistuu jatkuvasti suuri rasitus. Eristykseltä vaaditaan samanaikaisesti suurta jännitelujuutta, hyvää lämmönkestävyyttä ja mekaanisten rasitusten sietokykyä. Luvun 3.8 asiat perustuvat lähteeseen [5].

#### *3.8.1 Jännitekestoisuus*

Sähkökoneiden eristys mitoitetaan yleensä nimellisen käyttöjännitteen mukaan. Kuitenkin eristyksen tulee kestää myös hetkellisiä ylijännitteitä, joiden suuruus nimellisjännitteeseen nähden voi olla moninkertainen. Hyvä esimerkki tällaisesta on vyyhden johtimien johdineristys. Johdineristykseen kohdistuu normaalitilanteessa hyvin pieni jänniterasitus. Kuitenkin vikatilanteessa jännite yhden johdineristeen yli saattaa olla jopa tuhansia voltteja. Tämän vuoksi johdineristys joudutaan mitoittamaan suurimman jännitteen mukaan.

#### *3.8.2 Lämmönkestoisuus*

Sähkökoneiden eristys lämpenee käytössä voimakkaasti staattorin erilaisten häviöiden vuoksi. Korkea lämpötila haurastuttaa eristettä ja lisää sen johtavuutta. Kuten jännitekestoisuuden tapauksessa, myös lämpötilassa esiintyy erilaisia vaihteluita, jotka eristyksen tulee kestää. Eristykseltä edellytetään sekä normaalin käyttölämpötilan kestävyttä että hyvin korkeiden hetkellisten ja matalien lämpötilojen kestävyttä.

#### *3.8.3 Mekaaniset ominaisuudet*

Eristykseen kohdistuu voimakkaita rasituksia myös mekaanisesti. Käämityksessä tapahtuu lämpötilan muutoksista ja muista tekijöistä johtuen muodonmuutoksia, joihin eristyksen täytyy sopeutua. Tämän vuoksi eristyksellä tulee olla tietty määrä joustavuutta. Hitaiden muodonmuutosten lisäksi sähkökoneen toiminta aiheuttaa nopeaa tärinää, joka vaimentamattomana rikkoisi eristeen. Tärinää voidaan vaimentaa vyyhtien päiden tukemisella. Tätä käsitellään luvussa 4.2.3.

### 3.8.4 *Kosteudenkestoisuus*

Eristyksen tulee kestää myös kosteutta. Kosteutta päätyy eristyksen pinnalle joko nesteinä tai höyrynä. Kosteus vanhentaa eristettä ja lisää läpilyönnin todennäköisyyttä. Sähkökoneiden eristyksen kosteutta voidaan vähentää koneen sisälle asennettavilla lämmitysvastuksilla.

### 3.8.5 *Kemiallinen kestoisuus*

Monissa sähkökoneiden käyttöympäristöissä on ympäröivässä ilmassa paljon eristykselle kemiallisesti haitallisia aineita. Päästessään jäähdytysilman mukana eristyksen pinnalle, nämä aineet voivat tiivistyneen vesihöyryn kanssa reagoidessaan muodostaa laimeita happeja tai emäksiä. Tämän vuoksi eristeaineiden tulee olla myös tässä suhteessa riittävän kestäviä.

## 4 SÄHKÖKONEIDEN VALMISTUS

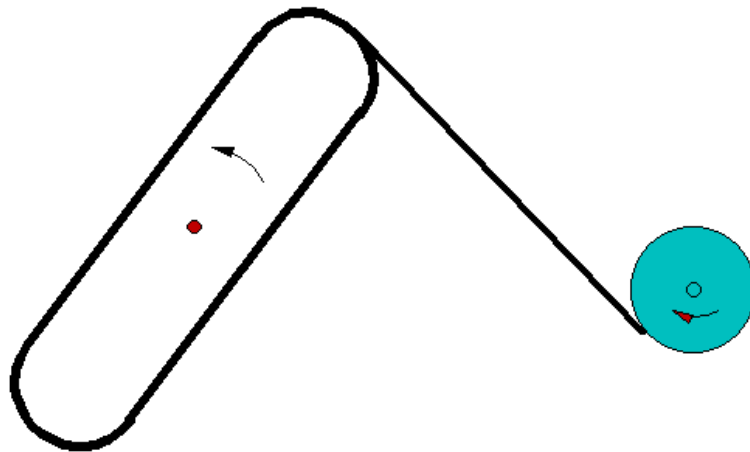
Pyörivien sähkökoneiden valmistus on jaettu viiteen osaan, joita ovat vyyhdenvalmistus, käämintä, kyllästys, kokoonpano ja roottorinvalmistus. Roottorinvalmistus on tarkoituksella jätetty tämän koulutusmateriaalin ulkopuolelle. Seuraavissa luvuissa käsitellään sähkökoneiden valmistusta ja valmistuksen aikana ilmenneitä ongelmatilanteita. Kaikki seuraavien lukujen asiat perustuvat lähteisiin [5] ja [6].

### 4.1 **Vyyhdenvalmistus**

Sähkökoneiden valmistus alkaa vyyhdenvalmistuksella, joka käsittää neljä eri vaihetta. Jokainen näistä sisältää monia työvaiheita, joiden oikeanlainen suorittaminen on ehdoton edellytys seuraavien osastojen työn onnistumiselle ja moitteettomien sähkökoneiden valmistumiselle.

#### 4.1.1 *Kelaus*

Vyyhdenvalmistus aloitetaan vyyhtiaihoiden kelauksella. Vyyhdet valmistetaan muotoillusta eristetystä kuparijohtimesta, joka toimitetaan kuparikeloisissa. Kuparikelat asetetaan telineisiin, joista niitä aletaan kelata vyyhden muotoon tietyllä kelauskoneella. Kuvassa 17 on esitetty kelauksen periaate.

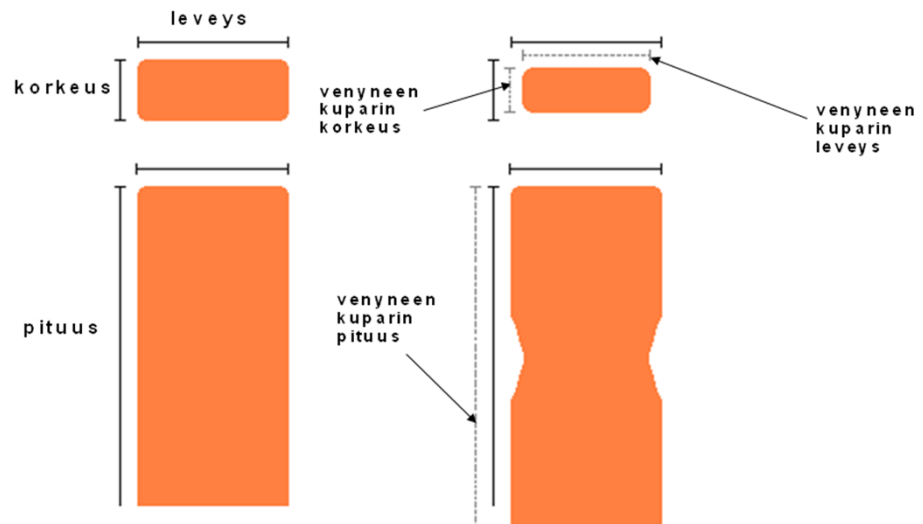


*Kuva 17. Kelauksen periaate [6]*

Kelauskoneella saadaan kelattua haluttu määrä muotoiltua kuparijohdinta päällekkäisiksi kerroksiksi, jolloin saavutetaan tietty määrä johdinkierroksia vyyhtiin. Kelauskoneella on myös mahdollista säätää kelausmittaa, eli kelattavien vyyhtiaihoiden pituutta.

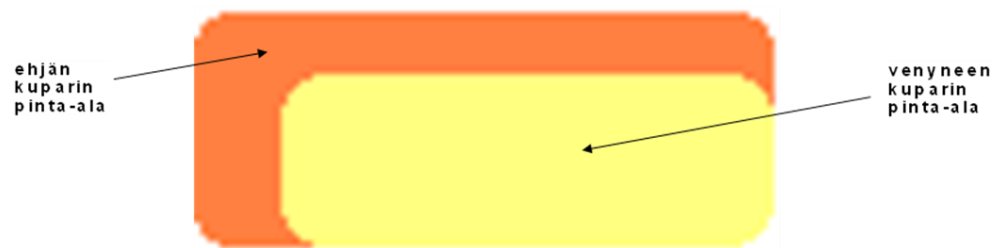
Kelaukseen liittyy asioita, joiden vaikutus valmiin sähkökoneen laatuun on huomattava. Yksi merkittävimmistä on jarruvoiman käyttö. Kelauksen tavoitteena on saavuttaa mahdollisimman suorasivuinen vyyhtiaihio. Tällöin kelauskoneen ja kuparikelan välisen kuparijohtimen tulee olla sopivalla kireydellä. Tämän vuoksi kuparikelatelineissa on jarrut, joiden jarruvoimaa voidaan säätää. Jarruvoiman säätöä oikean suuruiseksi voidaankin pitää yksijohdinkelauksessa haastavimpana yksittäisenä toimenpiteenä.

Mikäli jarruvoima olisi liian pieni, tulisi vyyhtiaihioista pallomaisia, eli niiden sivut eivät olisi suoria, vaan ulospäin kaarevia. Jos taas jarruvoima olisi liian suuri, tulisi vyyhtiaihioista pussimaisia, jolloin niiden sivut olisivat sisäänpäin kaarevia. Tarvittavan jarruvoiman suuruuteen vaikuttaa lähinnä kuparijohtimen pinta-ala; mitä suurempi pinta-ala, sitä suurempi jarruvoima. Toinen liian suuren jarruvoiman aiheuttama ongelma on kuparin venyminen. Kuvassa 18 on esitetty tilanne, jossa johdin on venynyt.



Kuva 18. Kuparin venyminen

Kuparin venyminen ei kuitenkaan ole niin suuri ongelma kuin sen aiheuttama johtimen pinta-alan pieneneminen venyneessä kohdassa. Kuvassa 19 on esitetty pinta-alan pieneneminen liiallisen jarruvoiman seurauksena.



Kuva 19. Kuparin pinta-alan pieneneminen

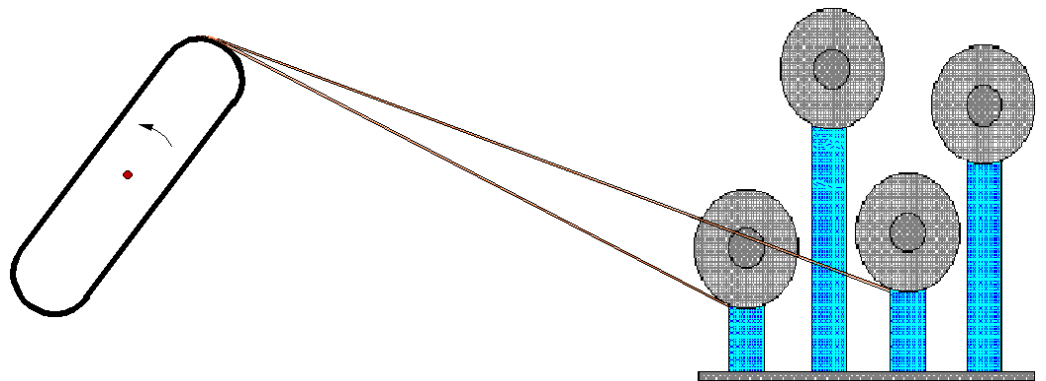
Pinta-alan pieneneminen aiheuttaa kasvua johtimen resistanssissa. Pienempi pinta-ala aiheuttaa myös valmiissa sähkökoneessa virrantiheyden kasvamisen venyneessä kohdassa, jolloin johdin lämpenee venyneestä kohdasta enemmän kuin muualta. Lämpeneminen johtaa sekä kyseisen kohdan johtimen johdineristyksen että vyyhden pääeristyksen eliniän lyhenemiseen.

Toinen merkittävä asia on sähkökoneen ominaisuuksien, kuten häviöiden, muuttuminen. Ääritapauksessa johtimen lämpeneminen voisi olla niin rajua, että johdineristys tuhoutuisi kyseisestä kohdasta kokonaan, jolloin seurauksena on kierrosoikosulku.

Liian pienen jarruvoiman synnyttämä pussimaisuus vyyhtiaihioissa tuo oman ongelmansa. Kun liian löysällä jarrulla kelattua vyyhtiä kone-eristetään, voi-

vat löysästi toisissaan kiinni olevat eri kerrosten johtimet hankautua toisiaan vasten, jolloin seurauksena voi olla johdineristeen rikkoutuminen.

Yksijohdinkelaus on kelauksessa kaikkein helpoin tilanne. Kun vyyhtiaiho on tarpeen kelata useista johtimista, ilmenee uusia asioita, jotka tulee ottaa huomioon. Tärkein huomioitava asia on, että jokaisella kelalla on samansuuruiset jarruvoimat. Mikäli näin ei ole, voi seurauksena olla samanlaisia ongelmia kuin yhden johtimen tapauksessakin. Kuva 20 esittää monijohdinkelauksen periaatteen.

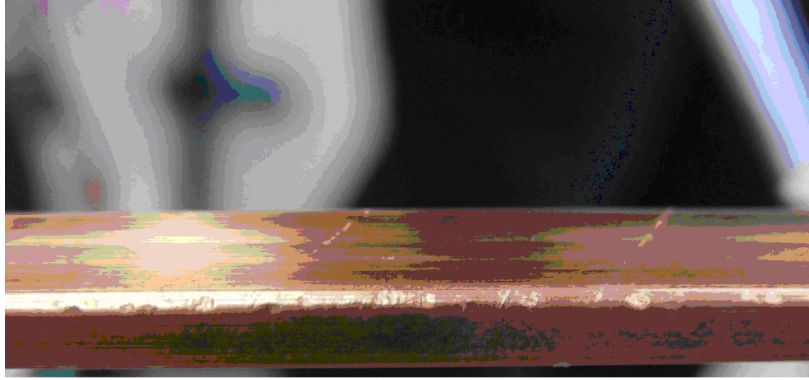


Kuva 20. Monijohdinkelauksen periaate [6]

Kelauksen aikana tulee myös tarkkailla kelattavan kuparijohtimen ja sen johdineristeen laatua. Tärkeää on havainnoida, että kuparijohdin on joka kohdasta tasaista, eikä minkäänlaisia kohoumia tai koloja esiinny. Kuvissa 21 ja 22 on esimerkkejä huonolaatuisesta kuparista.



Kuva 21. Kohouma kuparijohtimessa [6]



Kuva 22. Kuoppia kuparijohtimessa [6]

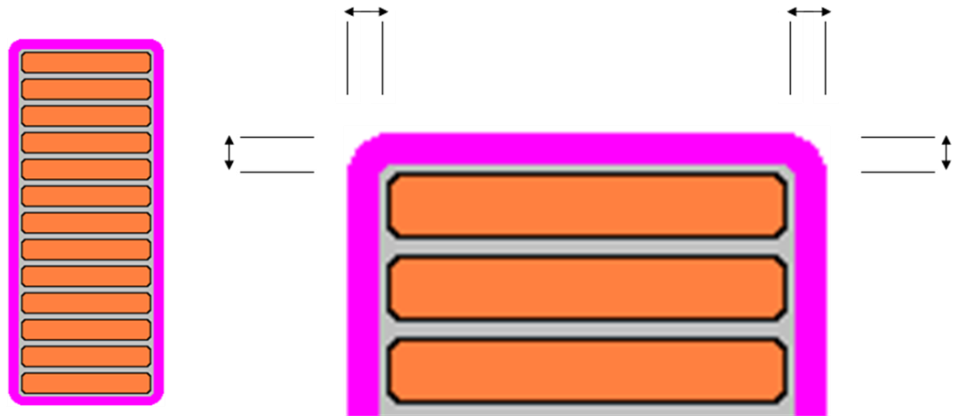
Molempien kuvien tapauksessa vaarana on sekä johdineristyksen että vyyhden uraeristyksen rikkoutuminen. Uraeristys tarkoittaa sitä eristystä, joka vyyhdessä on staattoripaketin uran kohdalla. Johdineristeestä on kelauksen aikana tärkeää havainnoida se, että eristys sisältää kiillettä. Toinen huomiotava asia on, että johdineristyksen limitus on tasaista ja halutunlaista.

#### 4.1.2 Kone-eristys

Kone-eristyksessä vyyhtiaihioita eristetään erityisellä eristyskoneella, joka suorittaa suurimman osan vyyhtien kokonaiseristämisestä. Eristyskoneessa on eräänlainen kietomakehä, johon eristenauhat kiinnitetään. Vyyhti asetetaan kietomakehän sisään. Kietomakehä liikkuu vyyhden alueella halutun matkan kietoen kelatun johdinnipun päälle kiille-eristenauhaa. Kuten kelauksessa, myös kone-eristyksessä on useita työvaiheita, joiden onnistuminen on valmiin sähkökoneen laadun kannalta tärkeää.

Ensimmäinen tarkistettava asia on, että vyyhtiaihio on asetettu keskelle eristyskoneen kietomakehää. Mikäli vyyhtiaihio on sivussa kietomakehän keskikohdasta, on seurauksena eristenauhan rypistymistä vyyhtiaihion pinnalla. Tällöin eristenauha saattaa taittua jyrkästi rypyjen kohdalta, jolloin eristenauhan kiillekerros murtuu. Tämä pienentää eristyksen jännitelujuutta.

Eristyskoneessa eristenauhojen jarruvoimaa on mahdollista säätää. Tämä onkin tärkeä toimenpide, jolla nauha saadaan kiedottua sopivan kireälle. Tavoitteena on saada joka puolelle vyyhden sivua tasaisen paksu eristys. Tällöin eristyksen jännitelujuus ja elinikä ovat halutunlaiset. Kuvassa 23 on esimerkki tällaisesta eristyksestä. Kuvassa on vyyhden sivun halkileikkaus, jossa uloimpana on uraeristys ja keskellä päällekkäiset johdineristyksellä eristetyt johtimet.



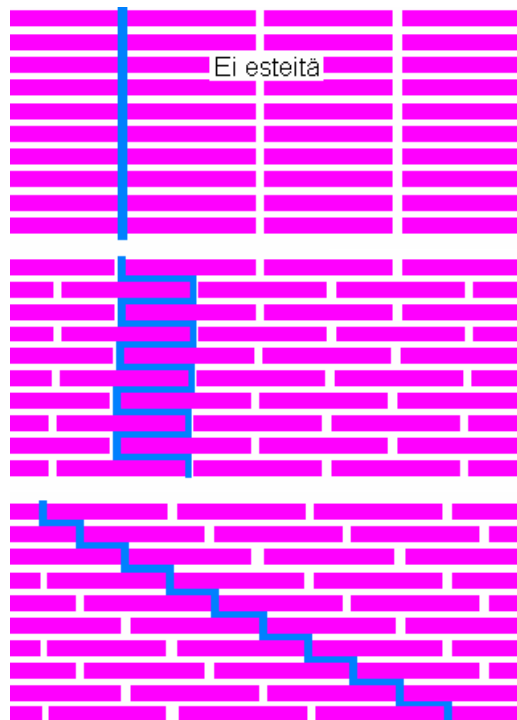
Kuva 23. Vyyhden sivun halkileikkaus

Mikäli eristenauhan jarruvoima on liian suuri, voi eristys puristua haluttua ohuemmaksi vyyhden sivun kulma-alueilta. Tällöin eristyksen elinikä lyhenee. Jarruvoiman ollessa liian suuri, voi eristenauha venyä ja kiille-eriste murtua. Tällöin eristyksen jännitelujuus pienenee merkittävästi.

Myös liian pienellä eristenauhan jarruvoimalla eristetyt vyyhdet tuovat omat ongelmansa. Eristenauhan jäädessä löysälle tulee eristyksestä haluttua paksumpi. Tällöin vyyhden asettaminen uraan kääminnä on hyvin vaikeaa, ja vaarana on eristenauhan repeäminen kääminnän aikana. Toinen ongelma on eristenauhan rypistyminen eristämisen aikana. Tällöin seurauksena voi olla samat vahingot kuin tilanteessa, jossa vyyhti on asetettu sivuun kietomakehän keskikohdasta.

#### 4.1.3 Käsieristys

Vyyhtejä voidaan eristää eristyskoneen lisäksi myös käsin. Tällöin eristenauhaa kiedotaan käsin telineessä olevan vyyhden ympärille. Suurimmat ongelmakohdat käsieristyksessä ovat oikeanlaisen kiedontavoiman käyttäminen sekä eristenauhan limityksen säilyttäminen tasaisena ja rypyttömänä. Liian suuresta tai pienestä kiedontavoimasta on samanlaiset seuraukset kuin kone-eristyksen tapauksessakin. Limityksen säilyttäminen tasaisena on tärkeää, jotta eristyksestä tulee tasaisen paksuinen ja laadukas. Kuvassa 24 on esimerkkejä erilaisista limityksistä.



Kuva 24. Erilaisia limityksiä [6]

Kuvasta 24 nähdään, että ylimmässä tapauksessa eristenauhat eivät limity toistensa päälle ollenkaan. Sähkö pyrkii kulkemaan aina lyhintä reittiä, jolloin tämä tapaus on jännitelujuuden kannalta huonoin vaihtoehto, sillä tässä matka on lyhin mahdollinen eri potentiaalissa olevien kohteiden välillä. Tässä tapauksessa nämä kohteet ovat vyyhden johdin ja staattorin levypaketti. Kahdessa alemmassa tapauksessa limitystä esiintyy, jolloin sähköän kulke- ma, niin sanottu ryömintämatka, on pidempi. Tällöin myös eristyksen jännite- lujuus on suurempi.

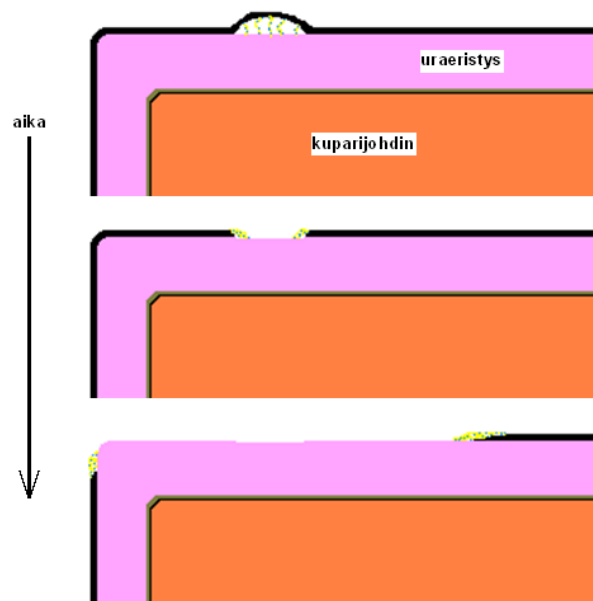
Joissakin korkeajännitteisten sähkökoneiden vyyhdeissä käytetään uraeris- tyksen päällä niin sanottua johtavaa nauhaa. Yksi haasteellisimmista asiois- ta käsieristyksessä onkin juuri johtavan nauhan kiedonta. Johtava nauha on grafiitista valmistettua nauhaa, jonka tehtävänä on luoda eristyksen pinnalle tasainen maapotentiaali. Maapotentiaali syntyy siitä, että johtava nauha on hyvässä galvaanisessa yhteydessä staattoripakettiin vyyhtien staattoripaket- tiin asennuksen jälkeen.

Johtavan nauhan käytön syy on siinä, että sen avulla voidaan vähentää vyyhden pinnan ja staattoripaketin välisiä osittaispurkauksia merkittävästi, tai jopa poistaa ne kokonaan. Johtavan nauhan toimintaperiaatteen vuoksi on tärkeää, että nauha on kiedottu tasaisesti ja rypyttömästi, ja että päättämi-

nen on tehty siististi. Johtavan nauhan ja vyyhden eristyksen väliin ei saa jäädä suuria ilmataskuja, eikä johtavassa nauhassa saa olla minkäänlaisia reikiä.

Mikäli johtavan nauhan alle jäisi liian suuri ilmaontelo, alkaisi tässä ontelossa kehittyä osittaispurkauksia. Syynä tähän olisi se, että johtavan nauhan ollessa maapotentiaalissa, olisi vyyhden pinnan ja johtavan nauhan välinen jännite kyseisessä kohdassa niin korkea, että osittaispurkauksien syntymiseen vaadittava jännite ylittyisi.

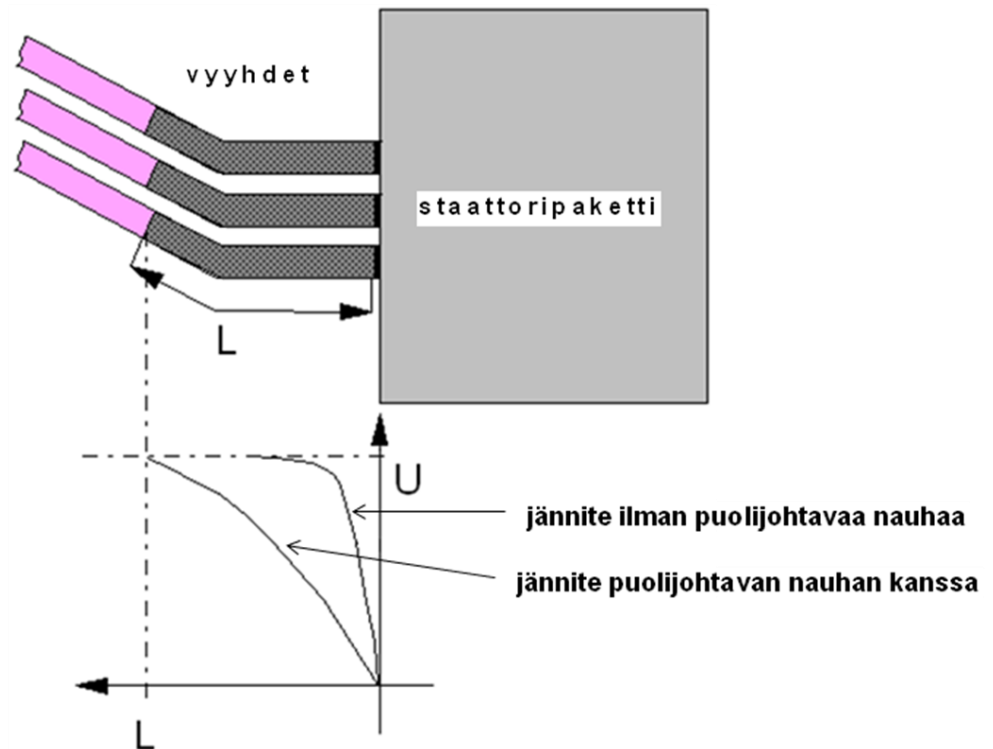
Vastaava tilanne olisi, mikäli johtavassa nauhassa olisi reikä. Tällöin reiän kohdalta paljaana olevan eristyksen pinnan jännite olisi maahan nähden huomattavan korkea, mikä johtaisi osittaispurkauksien syntymiseen. Kuvassa 25 on esitetty, miten johtava nauha kuluu, jos sen alle on jäänyt liian suuri ilmaontelo.



Kuva 25. Johtavan nauhan kuluminen

Johtavan nauhan lisäksi joissakin korkeajännitteisissä vyyhdeissä käytetään niin sanottua puolijohtavaa nauhaa. Se on valmistettu piikarbidista, ja sen tehtävänä on tasata jännitteen nousua vyyhden kulma-alueilla. Ilman puolijohtavaa nauhaa jännite vyyhden eristyksen pinnalla olisi hyvin korkea jo lähellä staattorin levypakettia. Tällöin vaarana voisi olla erilaisten sähköpurkauksien syntyminen vyyhden ja levypaketin välillä.

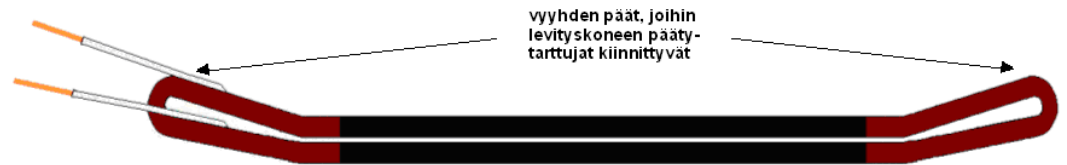
Käsieristyksessä puolijohtavan nauhan kiedonnassa tulee huomioida, että puolijohtavaa nauhaa kiedotaan sopivan matkaa johtavan nauhan päälle. Tavoitteena on sopivanlainen galvaaninen yhteys näiden nauhojen välillä. Kuva 26 esittää vyyhden aluetta, jolle puolijohtavaa nauhaa kiedotaan, sekä puolijohtavan nauhan vaikutusta jännitteen nousuun.



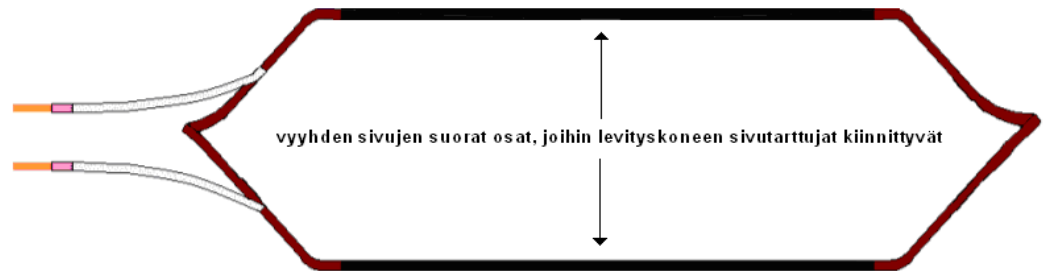
Kuva 26. Puolijohtavan nauhan vaikutus [5]

#### 4.1.4 Levitys

Ennen kuin vyyhdet siirtyvät käämintään, tulee ne levittää erityisellä levityskoneella. Levityksen tarkoituksena on saattaa vyyhdet lopulliseen muotoonsa. Lopullinen muoto on sellainen, jossa vyyhdet staattoripaketissa ollessaan täyttävät kaikki kyseiseltä staattorilta edellytetyt ilmavälivaatimukset. Vyyhden tulee myös olla muodoltaan sellainen, että se on käämittynä staattoripaketissa täsmälleen oikeassa asennossa. Tällöin vyyhteen ei jää merkittäviä jännityksiä ja vyyhden sivut ovat samansuuntaiset kuin staattoripaketin uran seinämät. Vyyhden muodon tulee myös olla sellainen, jossa sen kääminta on mahdollisimman helppoa. Kuvissa 27 ja 28 on esitetty, miltä vyyhti näyttää levityksen jälkeen.



Kuva 27. Vyyhti levityksen jälkeen sivulta kuvattuna



Kuva 28. Vyyhti levityksen jälkeen ylhäältä kuvattuna

Tärkeintä levityksessä on tarkistaa levityskoneen asetukset ennen levitystä, jotta vyyhdeistä saadaan oikean muotoisia. Asetusten tarkistamisen jälkeen vyyhti levitetään ja asetetaan kuvan 29 mukaisesti puumalliin. Puumalli kuvaa staattoripakettia, ja sillä on samat mitoitukselliset arvot kuin staattoripaketillakin. Puumallin avulla voidaan siis tarkistaa, kuinka hyvin vyyhti sopisi staattoripakettiin.



Kuva 29. Vyyhti asetettuna puumalliin

Levitys on hyvin haasteellinen työvaihe ja vaatii paljon ammattitaitoa. Tästä johtuen pienetkin virheet vyyhden levityksessä voivat johtaa suuriin ongelmiin myöhemmissä työvaiheissa. Levityskoneessa on sivu- ja päätytarttijat,

joiden avulla levityskone muuttaa vyyhden muotoa. Tarttujista tulee huomioida päätytarttujien asema sivutarttujiin nähden, jotta levitetystä vyyhdestä tulee oikean muotoinen.

Mikäli päätytarttumat on asetettu väärin, voi ilmaväli vyyhden ja sähkökoneen rungon välillä jäädä liian pieneksi. Toinen väärästä tarttujien asetuksesta aiheutuva ongelma on se, että vyyhden ja roottorin välinen ilmaväli voi jäädä liian pieneksi. Ääritapauksessa vyyhti ottaisi suoraan roottoriin kiinni.

## 4.2 Kääminta

Vyyhdenvalmistuksen jälkeen levitetty vyyhdet siirtyvät käämintaan, jossa ne asennetaan staattoripakettiin ja kytketään halutulla tavalla. Kääminta voidaan jakaa neljään eri työvaiheeseen, joita ovat vyyhden asennus uraan, kiihtaus, tuenta ja sidonta sekä kytkentä.

### 4.2.1 Vyyhden asennus

Ensimmäinen vaihe kääminnässä on vyyhtien asennus staattoripaketin uriin. Vyyhdet asennetaan yleensä siten, että yhteen staattoriuraan tulee kaksi erivaiheista vyyhden sivua, eli yksi pintasivu ja yksi pohjasivu. Kuvassa 30 on esitetty staattoripaketti ilman vyyhtejä.



Kuva 30. Staattoripaketti [6]

Vyyhden sivujen väliin tulee eristettyjä välitäytteitä, jotka estävät näiden erivaiheisten vyyhtien suoran koskettamisen toisiinsa. Kuvassa 31 on esitetty uraan asetettuja vyyhtejä, joiden pohjasivujen päälle on asetettu välitäytteitä.



*Kuva 31. Asennettuja vyyhtejä ja välitäytteitä [6]*

Vyyhtien asennuksessa on tärkeää asentaa vyyhti huolellisesti oikeassa kulmassa uraan. Mikäli vyyhden levitys on epäonnistunut ja vyyhden sivut ovat eri kulmassa staattoripaketin uriin nähden, on vyyhden asennus uraan eristeen repeämättä todella haastavaa. Toinen vyyhden asennusta vaikeuttava tekijä on liian paksu eristys. Tällainen tilanne voisi syntyä esimerkiksi silloin, kun eristyskoneella eristettäessä on käytetty liian pientä jarruvoimaa.

#### *4.2.2 Kiilaus*

Vyyhtien asennuksen jälkeen vyyhdet kiilataan paikoilleen urakiiloja käyttäen. Urakiilat asennetaan jokaiseen staattoriuraan urissa oleviin koloihin. Kiilojen tarkoituksena on pitää vyyhdet paikallaan urassa. Kiilauksessa urakiilojen tiukkuuden varmistaminen onkin tärkeimpiä toimenpiteitä.

#### *4.2.3 Tuenta ja sidonta*

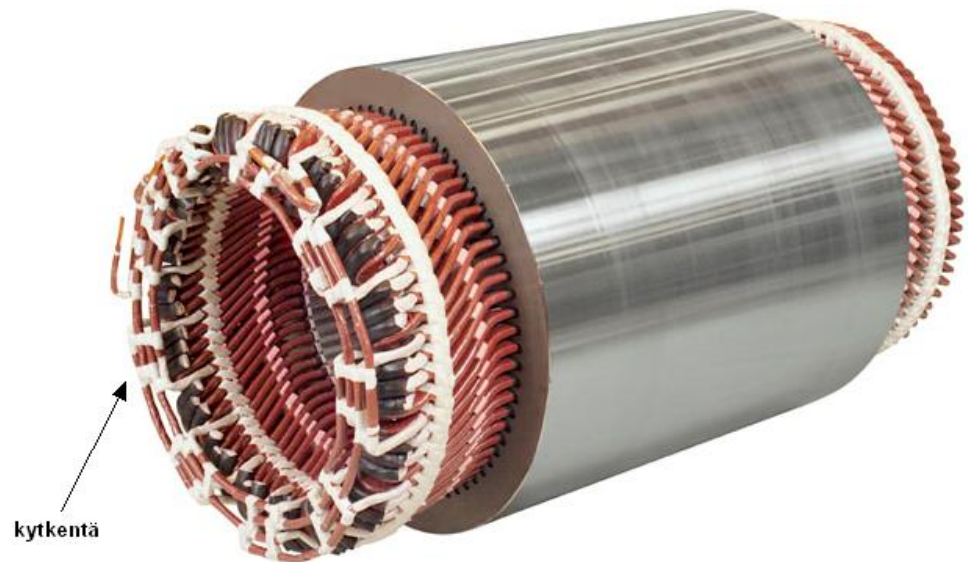
Kun vyyhdet on asennettu ja kiilattu, tulee niiden päät tukea ja sitoa. Tukeminen tehdään vyyhden päiden väliin asennettavilla eristävillä tukipaloilla. Sidonta suoritetaan tietynlaisella tukirenkaalla, joka kiertää koko staattorin kehän molemmilla puolilla staattoria. Tukemisen ja sitomisen tarkoituksena on tukea vyyhtejä, jotta käämityksestä saadaan mekaanisesti riittävän vahva. Tuennassa on tärkeää huomioida, että erivaiheisten vyyhtien väliin tulee riittävän paksut tukipalat, koska näissä väleissä esiintyy suurin jänniterasitus.

Mikäli näihin vaiheväleihin olisi laitettu liian ohuita tukipaloja, jäisivät ilmavälit liian pieniksi, jolloin väleissä voisi esiintyä käytön aikana osittaispurkauksia, jotka tuhoaisivat eristettä. Mikäli tukipalaa ei vaihdettaisi ajoissa oikean kokoiseksi, voisi seurauksena olla läpilyönti näiden vaiheiden välillä eristeen tuhouduttua.

Vyyhtien sidonnassa tärkeää on huomioida, että vyyhtien päiden ja koneen rungon välille jää riittävän suuri ilmaväli. Ilmaväli voi jäädä liian pieneksi, jos vyyhden levityksessä päätytartujat ovat olleet asetettuina liian ylös. Liian pieni ilmaväli lisää vyyhden pään jänniterasitusta, koska tällöin kiinteälle eristykselle jakautuvan jännitteen osuus kasvaa.

#### 4.2.4 Kytcentä

Kytcentän tarkoituksena on yhdistää sekä eri puolilla staattoria olevat samojen vaiheiden vyyhdet tai vyyhtiryhmät että vyyhtiryhmien yksittäiset vyyhdet, jolloin saadaan halutulla tavalla toimiva kytcentä. Kytcentässä on tärkeää huomioida, että esiintyvät limitysmatkat ja ilmaeristysvälit ovat jänniteluokkien mukaiset. Mikäli näin ei olisi, voisi seurauksena olla eristystä tuhoavia osittaispurkauksia. Kuvassa 32 on esitetty kytcentä staattori.



Kuva 32. Valmis staattori kytcentäpästä kuvattuna [6]

Toisinaan vyyhtien johtimet on tarpeen jakaa useiksi osajohtimiksi. Jaetut johtimet voivat olla joko vierekkäin tai päällekkäin. Jaetun johtimen vyyhtejä on mahdollista valmistaa käyttämällä vyyhtien kelauksessa useita kuparikelajoja. Mikäli jaetut johtimet ovat päällekkäisiä ja yhteen vyyhtiryhmään kuuluu

useita vyyhtejä, ei vyyhtien toisiinsa yhdistämistä voida suorittaa perinteisellä tavalla. Syynä on se, että päällekkäisistä johtimista ulompi joutuu kulkemaan pidemmän matkan kuin sisempi. Kuvassa 33 on esitetty osa vyyhden päätä ja ulosotto, jossa on kaksi päällekkäistä johdinta.



*Kuva 33. Vyyhden ulosotto, jossa kaksi päällekkäistä johdinta*

Nämä kaksi johdinta ovat sähköisesti rinnakkaisia. Silti niissä kulkevat virrat eivät olisi samansuuruisia johtimien pituuserosta johtuen. Johtimissa kulkeva virta jakautuu näiden impedanssien suhteessa, jolloin pienemmän impedanssin omaavan, eli lyhyemmän matkan kulkevan johtimen virta olisi suurempi kuin pidemmän johtimen. Tällöin suurempivirtainen johdin lämpenisi liikaa, ja tämä lyhentäisi eristyksen elinikää ja lisäisi sähkökoneen häviöitä.

Tällaisen tilanteen välttämiseksi päällekkäisten johdinten tapauksessa käytetään niin sanottua johtimien vuorottelua. Tämä tarkoittaa sitä, että ulompaa ja sisempää johdinta vuorotellaan tietyin välein sopivalla kytkennällä, jolloin johtimien väliset pituuserot tasaantuvat. Tällöin virta jakautuu eri johtimiin tasaisemmin ja koneen lämpenemä ja häviöt ovat pienemmät.

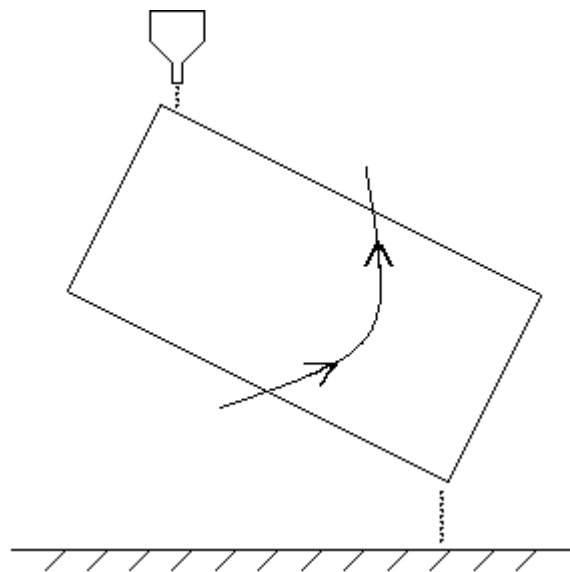
### 4.3 Kyllästys

Kääminnän jälkeen staattori on valmis siirrettäväksi kyllästyksen. Kyllästys on tärkeä työvaihe, jolla on useita merkittäviä vaikutuksia eristyksen ominaisuuksiin. Tärkeimpänä vaikutuksena voidaan pitää käämityksen mekaanisen lujuuden kasvua. Kyllästysaine tukee kovettuessaan tehokkaasti käämitystä ja vähentää merkittävästi vyyhtien päiden tärinää. Myös vyyhtien värinä staattoriurassa vähenee, koska kyllästysaine kiinnittää vyyhden tehokkaasti uraan. Toinen merkittävä asia on käämityksen eristyksen jännitelujuuden huomattava kasvu. Tämä on seurausta siitä, että kyllästysaine tunkeutuu eristyksen sisään ja täyttää pienet eristykseen jääneet ilmaontelot. Tällöin myöskään osittaispurkauksia ei pääse ilmenemään eristyksen sisällä.

Kolmas hyötyvaikutus kyllästyksellä on se, että käämityksen lämmönjohtavuus paranee, jolloin lämpenemä on pienempi ja koneen elinikä pidempi.

Neljänneksi eduksi voidaan katsoa se, että käämitys saa sileän ja kiiltävän pinnan. Tämän ansiosta käämitys ei likaannu kovin helposti ja sen puhtaana pitäminen on helpompaa. Myös staattoripaketin korroosionkestävyys paranee kyllästysaineen ansiosta.

Erilaisia staattorien kyllästystapoja on neljä. Näitä ovat valutuskyllästys, upotuskyllästys, tyhjö-painekyllästys eli VPI ja RR-tekniikka. Valutuskyllästystä käytetään erityisesti pyörölankakoneiden kyllästykseen, koska tällä menetelmällä saadaan tehokkaasti täytettyä pyörölankakäämityksen kohtuullisen suuret johdinvälit. Valutuskyllästyksessä esilämmitettyä staattoripakettia pyöritetään kaltevassa asennossa, ja samanaikaisesti käämityksen yläpään kaadetaan kyllästyshartsia. Tällöin hartsin viskositeetti pienenee ja sen juoksevuus kasvaa, minkä seurauksena hartsia alkaa tunkeutua eristykseen ja valua johdinten väleissä myös käämityksen alaosaan. Kuvassa 34 on esitetty valutuskyllästyksen periaate.



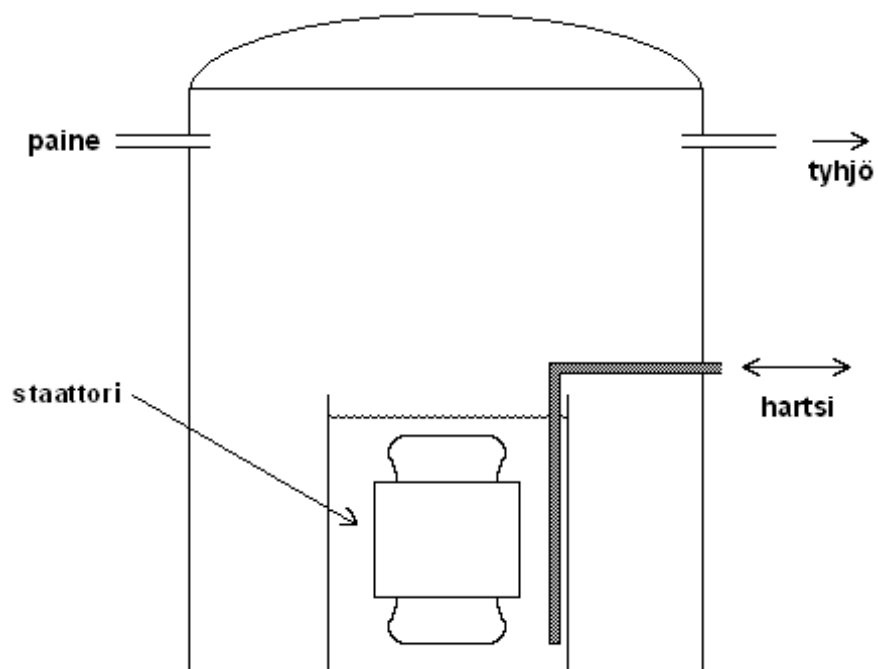
*Kuva 34. Valutuskyllästyksen periaate*

Kyllästyshartsin ollessa valunut koko staattorin matkalle asetetaan staattori vaakasuoraan ja pyörittämistä jatketaan jonkin aikaa. Tämän jälkeen hartsia kovetetaan lämmittämällä käämitystä.

Upotuskyllästyksessä käämitys upotetaan hitaasti kyllästysaineeseen ja annetaan sen olla upoksissa noin 10 - 20 min. Hitaalla upottamisella varmistetaan, että koko käämitys varmasti kyllästyy. Upotuskyllästettyä staattoria

voidaan pyörittää lämmityksen aikana. Tällä vähennetään hartsin valumista pois käämityksestä.

Tyhjökyllästys eli VPI-menetelmä (Vacuum Pressure Impregnation) on usein käytetty menetelmä suurjännitteisten staattorien kyllästämiseen. Tässä menetelmässä kyllästys aloitetaan asettamalla kyllästettävä staattori kyllästysastiaan. Tämän jälkeen kyllästysastia suljetaan ja sinne pumpataan tyhjö. Tällä saadaan poistettua eristyksessä oleva ilma lähes kokonaan. Kun ilma on saatu poistettua käämityksestä, alkaa lämmitetyn hartsin siirto kyllästysastiaan. Hartsia siirretään pumppujen avulla säiliöön niin kauan, että koko staattori on hartsin pinnan alapuolella. Kuvassa 35 on esitetty tyhjökyllästyksen periaate.



*Kuva 35. Tyhjökyllästyksen periaate*

Kun staattori on kokonaan peittynyt, alkaa säiliön paineen nosto. Säiliöön muodostetaan normaaliin ilmanpaineeseen nähden merkittävä ylipaine, mikä seurauksena hartsia saadaan paremmin tunkeutumaan eristyksen ahtaisiin tiloihin, kuten eristenauhakerrosten väliin. Sopivan ajan kuluttua paine laskeetaan normaalin ilmanpaineen tasolle ja ylimääräinen hartsia imetään säiliöstä pois. Tämän jälkeen kyllästyssäiliö avataan ja staattori siirretään lämmitettäväksi, jotta hartsia saadaan kovettumaan.

Nykyään harvemmin käytetty RR-tekniikka (Resin Rich) poikkeaa muista menetelmistä siten, että siinä ei varsinaista kyllästystä tarvita ollenkaan, vaan käämityksessä käytetään runsaasti sideainehartsia sisältäviä eristeaineita. Tässä menetelmässä hartsi kovetetaan staattoriurien osalta erityisillä lämpöpuristimilla.

#### 4.4 Kokoonpano

Kokoonpanossa valmis staattori asennetaan sisälle sähkökoneen runkoon ja roottori asennetaan staattorin sisään. Kokoonpanossa tehdään myös lopulliset sähköiset kytkennät. Kokoonpanossa eristysteknisesti tärkeintä on havainnoida ilmaeristysvälien täyttymistä. Mikäli ilmaeristysvälit ovat liian pieniä, voi esimerkiksi osittaispurkauksia ilmetä, jolloin sähkökoneen elinikä lyhenisi.

### 5 YHTEENVETO

Tämän insinööriyön aiheena oli eristysteknisen koulutusmateriaalin tekeminen sähkökoneiden valmistuksesta. Työssä tutustuttiin yksityiskohtaisesti sähkökoneiden valmistukseen ja valmistuksen eri työvaiheisiin eristystekniikan kannalta. Eri työvaiheissa keskityttiin erityisesti mahdollisiin valmistuksessa ilmeneviin ongelmatilanteisiin ja eristysteknisesti haastaviin asioihin.

Sähkökoneiden valmistukseen perehdyttiin valmistusohjeiden avulla. Koulutusmateriaaliin sisällytettiin sähkökoneiden valmistuksen lisäksi myös runsaasti yleiseen eristystekniikkaan liittyviä asioita. Nämä asiat yhdistettiin läheisesti sähkökoneiden valmistukseen. Tällöin koulutusmateriaalia on mahdollista hyödyntää myös sähkökoneiden valmistuksen koulutuksen lisäksi yleisen eristysteknisen tietämyksen lisäämiseen.

Koulutusmateriaalia ei ole vielä tämän raportin kirjoittamishetkellä päästy hyödyntämään, joten arviota koulutusmateriaalin käytännön toimivuudesta ei voida antaa. Tuotannontukitiimiltä saatu palaute koulutusmateriaalista antaa kuitenkin viitteitä siitä, että sen ulkoasu ja sisältö ovat onnistuneita. Voidaan siis sanoa, että insinööriyölle asetetut tavoitteet täyttyivät. Koulutusmateriaalista saatava hyöty on työn tilaajalle suuri. Koulutusmateriaali on tehty englanniksi, joten sitä voidaan käyttää Suomen lisäksi myös ABB:n ulkomaisissa tuotantoyksiköissä tuotannon työntekijöiden koulutukseen.

Tämä insinööriyö lisäsi kirjoittajan tietämystä erityisesti yleisestä eristystekniikasta ja lukuisten merkitykseltään vähäisiltä tuntuvien asioiden tärkeydestä sähkökoneiden valmistuksessa. Koulutusmateriaalia voitaisiin tulevaisuudessa laajentaa, ja valmistuksen eri vaiheisiin voitaisiin perehtyä entistä syvällisemmin.

**VIITELUETTELO**

- [1] Aro, Martti - Elovaara, Jarmo - Karttunen, Matti - Nousiainen, Kirsi - Palva, Veikko, *Suurjännitetekniikka*. 2. painos. Jyväskylä: Otatieto 2003 (1996)
- [2] Aura, Lauri - Tonteri, Antti, *Teoreettinen sähkötekniikka ja sähkökoneiden perusteet*. 3. painos. Vantaa: WSOY 2000 (1994)
- [3] Aura, Lauri - Tonteri, Antti, *Sähkökoneet ja tehoelektronikan perusteet*. 1. painos. Porvoo: WSOY 1996
- [4] Atomin rakenne [verkkodokumentti, viitattu 27.1.2009]  
<http://www.oph.fi/etalukio/fysiikka/fysiikka8/kuvat/atomi.jpg>
- [5] Paloniemi, Paavo - Keskinen, Eero. Luentosarja: Sähkökoneiden eristykset [verkkodokumentti, viitattu 2.2.2009] Saatavissa ABB: n sisäisestä verkosta.
- [6] P-ohjeisto [online-tietokanta, viitattu 2.2.2009] Saatavissa ABB: n sisäisestä verkosta.