

Mikael Puumalainen

**SÄHKÖMOOTTOREIDEN ERISTEIDEN KUNNON TUTKIMINEN OSITTAISPUR-  
KAUSMITTAUKSILLA**

# SÄHKÖMOOTTOREIDEN ERISTEIDEN KUNNON TUTKIMINEN OSITTAISPUR- KAUSMITTAUKSILLA

Mikael Puumalainen  
Opinnäytetyö  
Syksy 2024  
Sähkö- ja automaatiotekniikan tutkinto-  
ohjelma  
Oulun ammattikorkeakoulu

## TIIVISTELMÄ

Oulun ammattikorkeakoulu  
Sähkö- ja automaatiotekniikan tutkinto-ohjelma, Sähkötekniikka

---

Tekijä: Mikael Puumalainen

Opinnäytetyön nimi: Sähkömoottoreiden eristeiden kunnon tutkiminen osittaispurkausmittauksilla

Työn ohjaajat: Jarkko Iisakkala (ABB), Lari Kylmänen (OAMK)

Työn valmistumislukukausi ja -vuosi: Syksy 2024

Sivumäärä: 32 + 1 liite

---

Tässä opinnäytetyössä tutustuttiin sähkömoottoreiden perusteisiin, sähkömoottoreiden eristeisiin ja niiden kyllästysmenetelmiin, osittaispurkauksiin sekä osittaispurkausmittauksiin. Työn tilaajana toimi ABB Motion Services Suomen korjaamo Oulussa.

Työn varsinaisena osuutena oli luoda osittaispurkausmittauksien suorittamisesta ohjekirja, joka on tarkoitettu vain ABB:n käyttöön. ABB Oy:llä osittaispurkausmittauksia suoritetaan staattoreiden uusintakäämitysten yhteydessä sekä tulevaisuudessa kenttäolosuhteissa. Ohjekirjan tekemisessä hyödynnettiin IEC-standardia sekä mittalaittevalmistajan ohjeita.

Eristeet ovat erittäin tärkeitä sähkömoottoreiden toiminnan kannalta, joten niiden kuntoa kannattaa tarkkailla. Osittaispurkaukset ovat pieniä sähköpurkauksia, jotka ylittävät eristeen sähkölujuuden vain osittain kahden eri potentiaalissa olevan johtimen tai johtimen ja maan välillä. Toisin sanoen osittaispurkaukset ovat epätäydellisiä oikosulkuja. Osittaispurkaukset vahingoittavat eristeitä ja pitkällä aikavälillä ne voivat johtaa täydelliseen oikosulkuun.

Osittaispurkausmittauksilla pystytään tutkimaan eristeiden kuntoa, sekä mittaustulosten perusteella voidaan päätellä, esiintyykö mitattavassa laitteessa osittaispurkauksia esimerkiksi normaalin käytön jännitepiikkien aikana. Lisäksi käytössä olleista laitteista voidaan tutkia, onko eristyksen osittaispurkausten syttymisjännitteellä vielä riittävästi marginaalia, jotta laite voidaan muuttaa taa-juusmuuttajaohjatuksi.

---

Asiasanat: sähkömoottori, eriste, osittaispurkaus, osittaispurkausmittaus

## ABSTRACT

Oulu University of Applied Sciences  
Degree Programme in Electrical and Automation Engineering, Option of Electrical Engineering

---

Author: Mikael Puumalainen

Title of thesis: Examining Condition of Electric Motors' Insulations with Partial Discharge Measurements

Supervisors: Jarkko Iisakkala (ABB), Lari Kylmänen (OAMK)

Term and year when the thesis was submitted: Autumn 2024

Number of pages: 32 + 1 appendix

---

In this thesis we look at the basics of electric motors, their insulations and impregnation methods, partial discharges, and partial discharge measurements. This thesis was done for ABB Oy Motion Service's unit in Oulu.

The practical part of this thesis was to create a manual for partial discharge measurements, which is only meant for employees of ABB. Partial discharge measurements are used by ABB during the rewinding process of stators. In the future these measurements will also be performed in on-site conditions. The manual was made with the help of IEC standards and the manuals provided by the measuring device's manufacturer.

Insulations are crucial for the operation of electric motors, so it is advised to monitor the condition of them. Partial discharges are small electric discharges, which close the gap only partly between two conductors in a small area within the insulation. It can be stated that partial discharges are imperfect short-circuits. Partial discharges damage insulations and in the long run they can lead to a total short-circuit.

With partial discharge measurements we can examine the condition of insulations, and conclude based on the measurements, if partial discharges appear during normal usage in the measured machine.

---

Keywords: electric motor, insulation, partial discharge, partial discharge measurement

# SISÄLLYS

1	JOHDANTO .....	6
2	SÄHKÖMOOTTORIT .....	7
2.1	Kiertokenttäkoneet .....	7
2.1.1	Epätahtikone .....	10
2.1.2	Tahtikone .....	12
2.2	Pyörivien sähkökoneiden eristeet .....	13
3	OSITTAISPURKAUKSET .....	16
3.1	Sisäinen purkaus .....	16
3.2	Pintapurkaus .....	18
3.3	Koronapurkaus .....	19
4	OSITTAISPURKAUSMITTAUKSET .....	21
4.1	On-line-mittaukset .....	21
4.1.1	HFCT-mittaus .....	21
4.1.2	Akustinen mittaus .....	22
4.1.3	HF-, VHF- ja UHF-menetelmät .....	22
4.1.4	TEV-menetelmä .....	24
4.2	Off-line-mittaukset .....	26
4.2.1	DAC-mittaus .....	26
4.2.2	VLF-mittaus .....	26
4.3	Pyörivien sähkökoneiden osittaispurkausmittaukset .....	27
4.4	Taajuusmuuttajien aiheuttamat jännitepiikit ja osittaispurkaukset .....	27
5	YHTEENVETO .....	29
	LÄHTEET .....	30
	LIITE 1 PD-mittausohjeistus .....	33

# 1 JOHDANTO

Tämän opinnäytetyön tilaajana toimii ABB Motion Services Suomen korjaamo Oulussa. Työn tarkoituksena on tutkia erilaisia menetelmiä osittaispurkausten mittaamiseen sekä luoda ohjekirja sähkömoottoreiden osittaispurkausmittauksista.

Sähkömoottoreiden eristeiden kuntoa voidaan tutkia eristysvastus- sekä toistoaltomittauksilla. Näillä mittausmenetelmillä ei kuitenkaan ole mahdollista tunnistaa kaikkia vikoja, kuten esim. käämien tai vaiheitten välisien kuparilankojen yhteyttä toisiinsa. Tästä syystä erillinen osittaispurkausmittaus on tarpeen.

Työssä käydään läpi sähkömoottoreiden perusteita, eristeitä, eristeiden kyllästysmenetelmiä, osittaispurkauksia sekä osittaispurkausmittauksia. Ohjekirjan tekemisessä hyödynnetään IEC-standardeja sekä mittalaittevalmistajan ohjeita. Itse ohjekirja jää vain ABB:n sisäiseen käyttöön.

## 2 SÄHKÖMOOTTORIT

Sähkömoottori on laite, jolla muunnetaan sähköenergiaa liike-energiaksi. Sähkömoottorin toiminta perustuu päälle- ja poislyötyihin sähköisiin magneetteihin. Sähkömoottorin kaksi tärkeintä osaa ovat roottori, joka pyörii akselin mukana, sekä staattori, joka pysyy paikallaan moottorin rungossa. Staattorissa sekä roottorissa voidaan saada aikaiseksi sähkömagneettinen kenttä, ja jotta saadaan luotua liike-energiaa, tarvitaan vastapariksi toinen sähkömagneettinen kenttä tai kestopagneetteja.

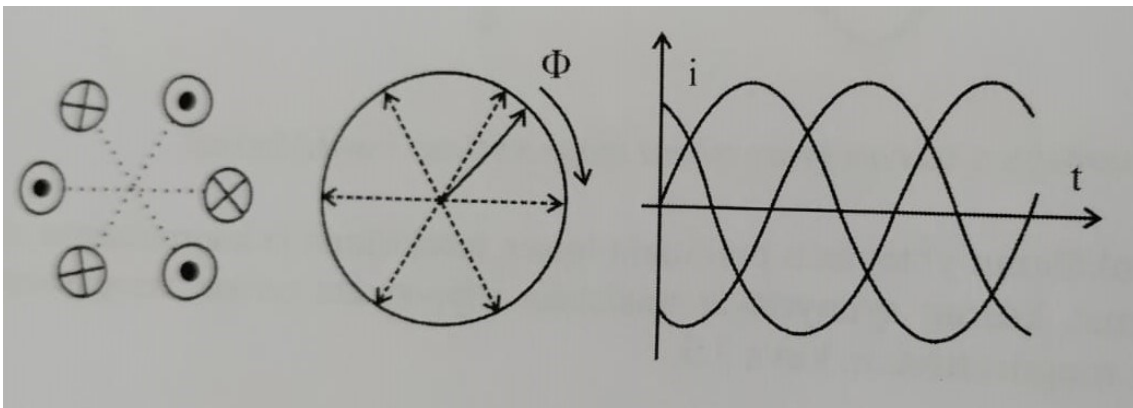
(1)

Sähkömoottorityyppejä on olemassa paljon, sekä tasa- että vaihtojännitteellä toimivia. Tämän takia tässä opinnäytetyössä keskitytään vain tämän työn kannalta olennaisimpiin sähkömoottorityyppeihin eli epätahtikoneeseen ja tahtikoneeseen.

### 2.1 Kiertokenttäkoneet

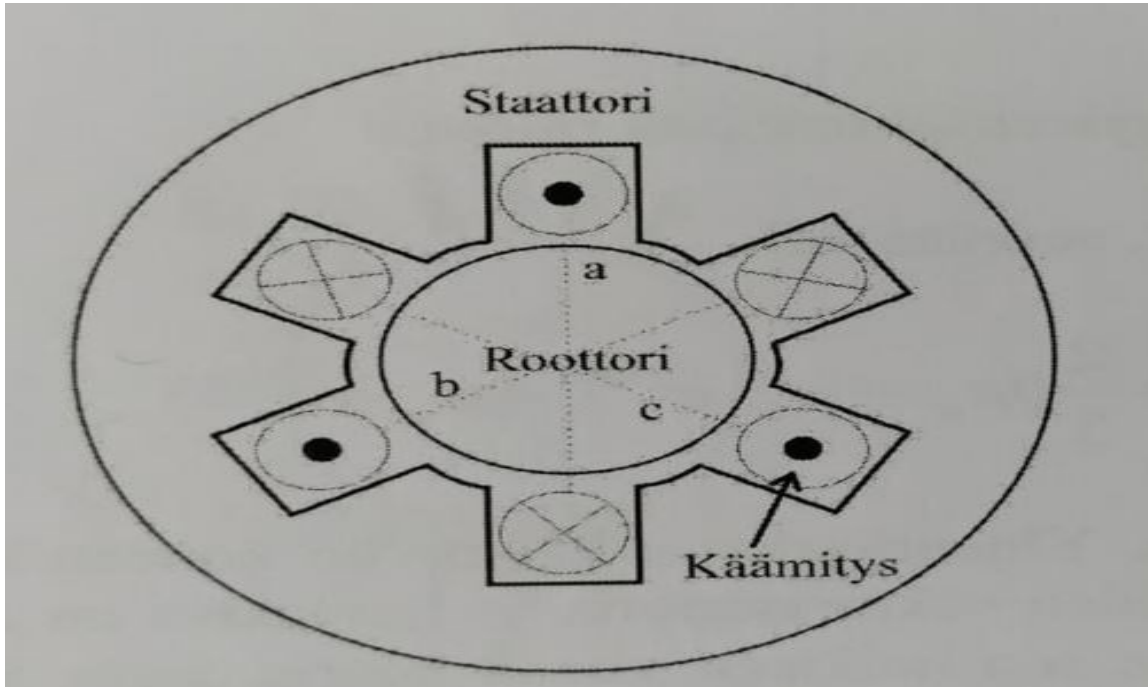
Epätahti- ja tahtikoneet ovat kiertokenttäkoneita, koska näiden koneiden toiminta perustuu pyörivään sähkömagneettikenttään. Pyörivä kenttä saadaan luotua staattorikämmityksen avulla koneen ilmaväliin. (2.)

Kiertokenttä saavutetaan siten, että 3-vaiheista vaihtovirtaa syötetään kolmeen käämiin, jotka ovat  $120^\circ$ :n vaihesiirrossa toisistaan. (2.) Kuvassa 1 on havainnollistettu magneettivuon vaihtelu käämeissä.

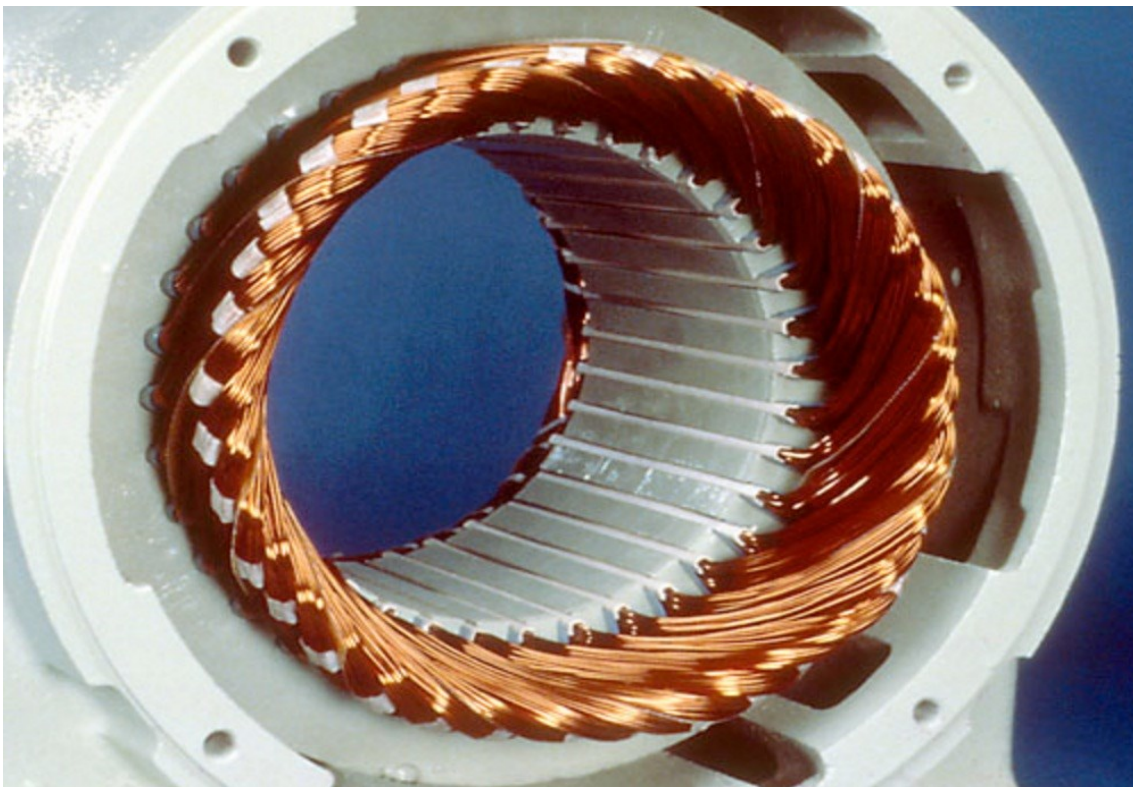


KUVA 1. Magneettivuon vaihtelu kolmessa käämissä (2, s. 52)

Kun kiertokenttä on saavutettu, käämien keskellä sijaitseva roottori lähtee pyörimään kiertokentän mukana. Se miten itse roottori pyörii, riippuu siitä, onko kyseessä epätahti- vai tahtikone. (2) Kuvien 2 ja 3 avulla voi verrata periaatteellista ja todellista staattorikäymistä.



KUVA 2. Periaatteellinen käämityksen sijoitus staattoriuriin (2, s. 53)

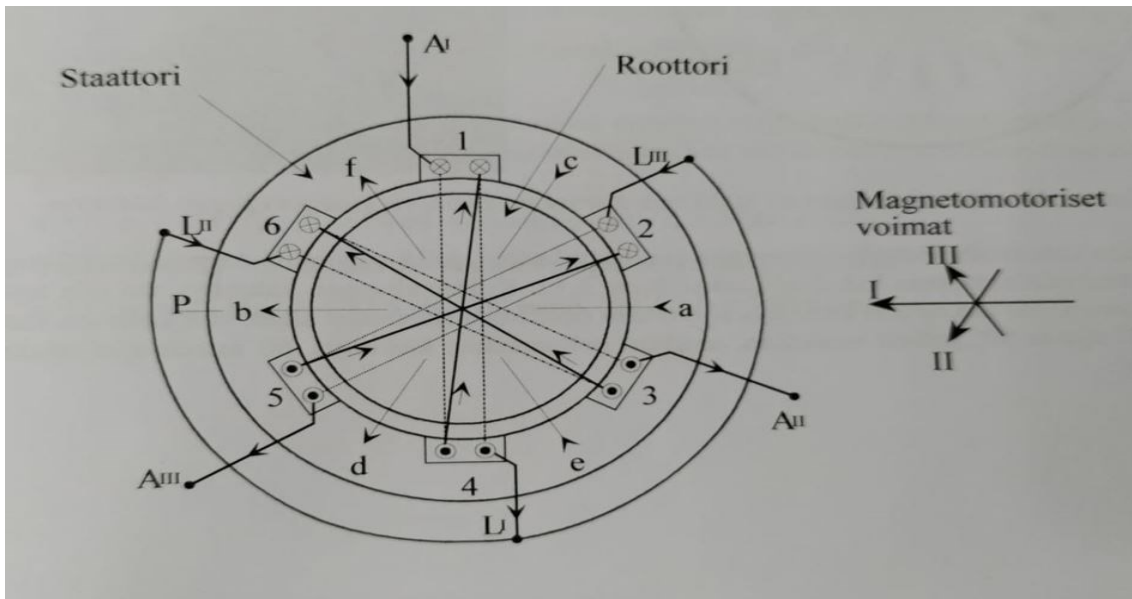


KUVA 3. Staattorikäämitys (3)

Kuvan 4 avulla voidaan vielä tarkastella kaikista yksinkertaisinta kolmivaiheista staattorikäänitystä eli kaksinapaista käänitystä. Vaiheen 1 käämi on urissa 1 ja 4, vaiheen 2 käämi on urissa 3 ja 6 ja vaiheen 3 käämi on urissa 2 ja 5. Vaiheen 1 käämi on siis  $120^\circ$ :n kulmassa vaiheisiin 2 ja 3 nähden. (2, s. 56.)

Kuvitellaan, että käämit ovat kytkettynä tähteen ja käämeihin vaikuttaa symmetrinen 3-vaihejännitte. Käämeissä kulkee virta siten, että jokaisessa vaiheessa virta sekä magnetomotorinen voima ovat aina saman vaiheisia. Kun vaiheen 1 virta on huippuarvossaan, niin samalla vastaava magnetomotorinen voimakin on huippuarvossaan kuvan 4 mukaisesti välillä a-b. Tällä hetkellä vaiheiden 2 ja 3 virrat ovat negatiivisia ja ne ovat suuruudeltaan puolet huippuarvosta. Resultoiva magnetomotorinen voima on siis sen vaiheen magnetomotorisen voiman suuntainen, jossa virralla on sen hetkinen huippuarvo, eli vaiheella 1 a-b, vaiheella 2 c-d ja vaiheella 3 e-f. Resultoiva magnetomotorinen voima luo magneettivuon, joka on kuvassa 4 oikealta vasemmalle. Oikealle syntyy yksi N-napa ja vasemmalle yksi S-napa. Kun vaihe 2 saavuttaa virran huippuarvonsa, magneettikenttä pyörähtää  $120^\circ$  ja N-napa siirtyy koilliseen ja S-napa lounaaseen. Kun vaihe 3 saavuttaa virran huippuarvonsa, pyörähtää magneettikenttä taas  $120^\circ$  ja N-napa siirtyy kaakkoon ja S-napa luoteeseen. Lopputuloksena on pyörivä magneettikenttä, joka tässä tapauksessa pyörähtää jakson aikana yhden kierroksen. 50 Hz:n taajuudella kenttä pyörii siis 50 kierrosta sekunnissa ja 3 000 kierrosta minuutissa. (2, s. 56.)

Tarkasteltua käänitystä kutsutaan kaksinapaiseksi, koska se synnyttää aina vain yhden N-navan ja yhden S-navan. Jos käänityksen sijoittaisi staattoriin siten, että käämien vastinparit olisivatkin  $180^\circ$ :een sijasta  $90^\circ$ :een päässä toisistaan, saataisiin nelinapainen eli kahden napaparin käänitys. Pienentämällä vastinparien kulmaa saadaan käänityksestä aina suurempinapainen, eli seuraavaksi olisi kuusinapainen käänitys  $60^\circ$ :n sijoittelulla jne. (2, s. 56.)



KUVA 4. Kolmivaiheinen staattorikäänitys (2, s. 55)

Koneen staattorikentän pyörimisnopeuden voi laskea kaavan 1 avulla. Pyörimisnopeus laskee, kun napaparien lukumäärä nousee. Pyörimisnopeutta voi säätää myös muuttamalla taajuutta taajuusmuuttajalla.

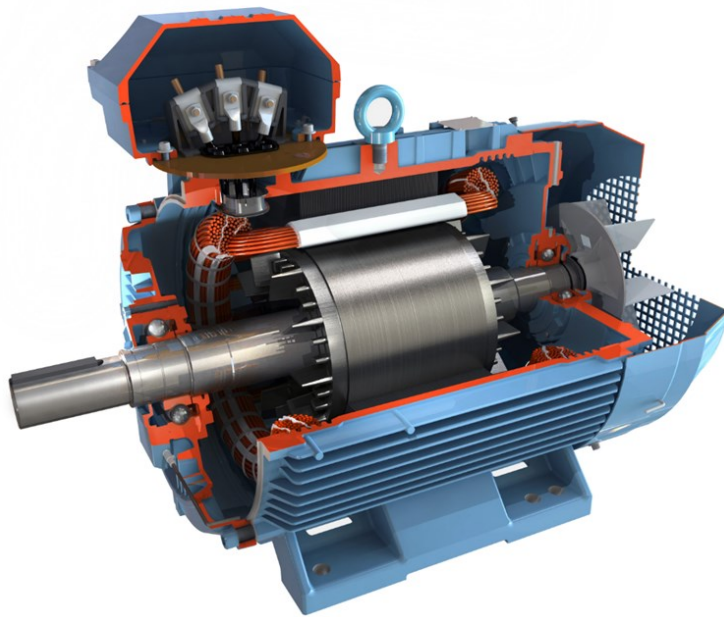
KAAVA 1. Staattorikentän pyörimisnopeus.

$$n_S = \frac{f}{p} \times 60$$

Kaavassa 1  $n_S$  on staattorikentän pyörimisnopeus (r / min),  $f$  on vaihtosähkön taajuus ja  $p$  on napaparien lukumäärä.

### 2.1.1 Epätahtikone

Epätahtikone on yleisin teollisuudessa esiintyvä sähkökonetyyppi johtuen sen yksinkertaisuudesta ja kestävydestä. Epätahtikoneita kutsutaan myös induktiokoneiksi sekä oikosulkukoneiksi. (2, s. 59.)



KUVA 5. Epätahtikoneen leikkauskuva

Epätahtikoneita käytetään lähinnä moottoreina, mutta niitä voidaan käyttää myös generaattoreina. Olennaista epätahtikoneen toiminnalle on se, että sähköteho viedään roottorin käämitykseen sähkömagneettisen induktion avulla. Epätahtikoneesta puuttuu siis suora galvaaninen yhteys roottorin ja sähköverkon välillä. Tästä johtuu nimi induktiokone. (2, s. 59–60.)

Nimi epätahtikone johtuu siitä, että roottorin pyörimisnopeus jää aina staattorikentän pyörimisnopeutta pienemmäksi. Jos roottorin pyörimisnopeus vastaisi staattorikentän pyörimisnopeutta, ei roottoriin pääsisi syntymään lähdejännitettä tai vääntömomenttia. (2, s. 60.)

Kaavojen 2 ja 3 avulla voi laskea suhteellisen ja absoluuttisen jättämän. Jättämällä tarkoitetaan sitä, kuinka paljon hitaammin roottori pyörii verrattuna staattorikenttään.

KAAVA 2. Suhteellinen jättämä.

$$s = \frac{n_s - n}{n_s} \times 100 \%$$

Kaavassa 2  $s$  on suhteellinen jättämä,  $n_s$  on staattorikentän pyörimisnopeus ja  $n$  on roottorin pyörimisnopeus.

Täydellä kuormalla suhteellinen jättämä on noin 2–5 % riippuen konetyypistä (2, s. 60).

KAAVA 3. Absoluuttinen jättämä.

$$\Delta n = n_s - n$$

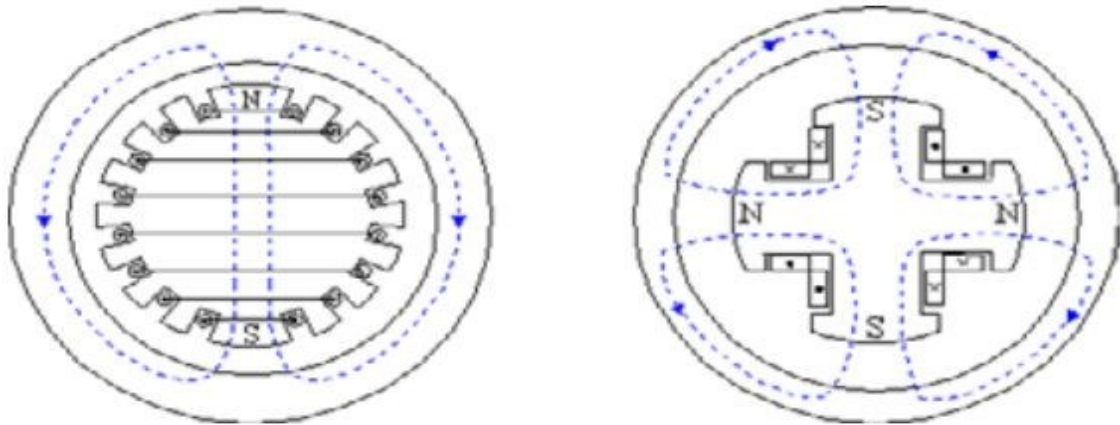
Kaavassa 3  $\Delta n$  on absoluuttinen jättämä,  $n_s$  on staattorikentän pyörimisnopeus ja  $n$  on roottorin pyörimisnopeus.

Epätahtikoneet ovat joko oikosulku- tai liukurengaskoneita. Oikosulkukoneissa roottorikäänitys oikosuljetaan eli roottorin alumiinisauvat yhdistetään roottorin päissä alumiinirenkailla. Tätä kutsutaan myös häkkikäänitykseksi. Liukurengaskoneissa roottorikäänitystä ei oikosuljeta vaan sen toisesta päästä tuodaan johtimet ulos liukurenkaiden avulla. Roottoriin voidaan täten kytkeä vastus, jolla pystytään säätämään moottorin käynnistysmomenttia sekä generaattorikäytössä parantamaan generaattorin hyötysuhdetta. (2, s. 61, 78.)

### 2.1.2 Tahtikone

Tahtikoneet ovat tärkeimpiä generaattoreina käytettäviä pyöriä sähkökoneita. Tahtikoneita voi käyttää myös moottoreina, mutta moottorikäyttö yleistyy vasta 1 MW:n mekaanista tehoa tarvittaessa. (2, s. 87.)

Tahtikoneet voidaan jakaa kahteen konetyyppiin roottorirakenteen mukaan umpinapa- ja avonapakoneisiin. Tahtikoneen ja epätahtikoneen staattoreilla ei ole juuri minkäänlaisia eroja, mutta tahtikoneen roottorissa on häkkikäänityksen sijaan vierasmagnetoitava naparakenne. Magnetointi tapahtuu siis ulkoisella tasasähkölähteellä. (2, s. 87.)



KUVA 6. Magneettikentän kulkureitti umpinaparoottorissa ja avonaparoottorissa (4)

Umpinapakoneessa roottorin rakenne on sylinterimäinen ja magnetointikäämitys on sijoitettu roottorin uriin. Lähtökohtaisesti kaksinapaiset tahtigeneraattorit, esimerkiksi turbogeneraattorit, ovat umpinapakoneita. (2, s. 87.)

Avonapakoneessa roottorin rakenne koostuu erillisistä navoista, joiden ympärille käämitään magnetointikäämitys. Magnetointikäämitys rakennetaan lattakuparista tai muotolangasta. Lähtökohtaisesti moninapaiset tahtigeneraattorit, esimerkiksi hidasnopeuksiset vesivoimageneraattorit ovat avonapakoneita. (2, s. 87–88.)

## 2.2 Pyörivien sähkökoneiden eristeet

Eristeet ovat materiaaleja, joiden sähkön johtavuus on huono verrattuna johtimiin. Pyörivien sähkökoneiden eristeiltä vaaditaan sähköistä lujuutta, lämmön ja mekaanisen rasituksen kestävyyttä sekä suurjännitekoneissa osittaispurkausten sietokykyä. (5, s. 7–8.)

Pyörivien sähkökoneiden eristeet voidaan jakaa kahteen luokkaan: pääeristeisiin ja johdineristeisiin (5, s. 8).

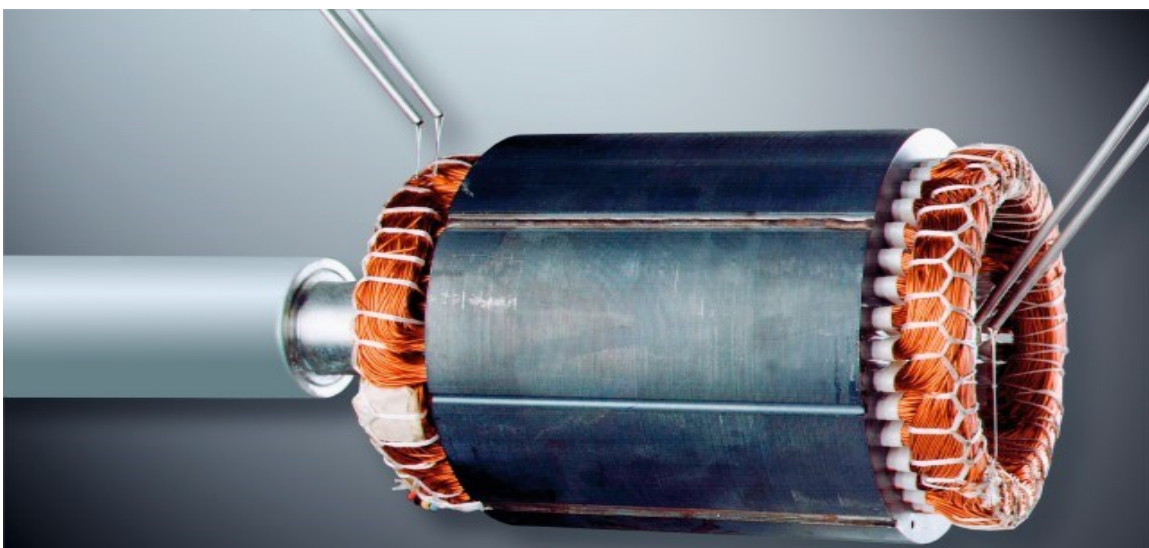
Pääeristeiksi luokitellaan eristeet, jotka erottavat koneen eri potentiaalissa olevat osat toisistaan. Pääeristeitä ovat esimerkiksi uraeristeet, vaiheväliseristeet, kytkennän johtimien sekä liitosten eristeet ja roottorin magneettinapojen napaeristeet. Käämityksen ilmavälit toimivat osana pääeristystä

ja ilmavälit heikentävät myös kosteuden ja lian aiheuttamia pintavirtoja. Ilmavälit parantavat myös käämityksen jäähdystystä. (5, s. 9.)

Johdineristeillä eristetään käämin kierrokset toisistaan. Myös johdineristeiltä vaaditaan sähköistä lujuutta ja varsinkin lämmön kestävyyttä. Yleisin johdineriste pienjännitekoneissa on amidi-imidipäällystetty polyesteri-imidimuovi, joka tunnetaan paremmin nimellä emali. Emalia käytetään pyörölangoissa lähes poikkeuksetta, kun taas muotolangoissa tyypillinen johdineriste valmistetaan levymaisesta eristeestä, joka leikataan kapeaksi nauhaksi ja kiedotaan muotolankajohtimen ympärille. (5, s. 8.)

Kyllästäminen on tärkeä osa eristyksen kokonaisuutta, jossa kyllästyslakka tai -hartsitunkeutuu eristyksen rakoihin ja huokosiin täyttääkseen ne. Kun kyllästysaine kovettuu, se parantaa käämityksen mekaanista lujuutta sekä lämmönjohtavuutta. Kyllästysaineen kovettuminen muodostaa myös tiiviin kalvon, joka estää kosteuden ja lian pääsyn eristeen sisälle. (5, s. 10.) Hartsikyllästystä käytetään mm. staattorien, roottorien sekä muuntajien käämien käsittelyyn.

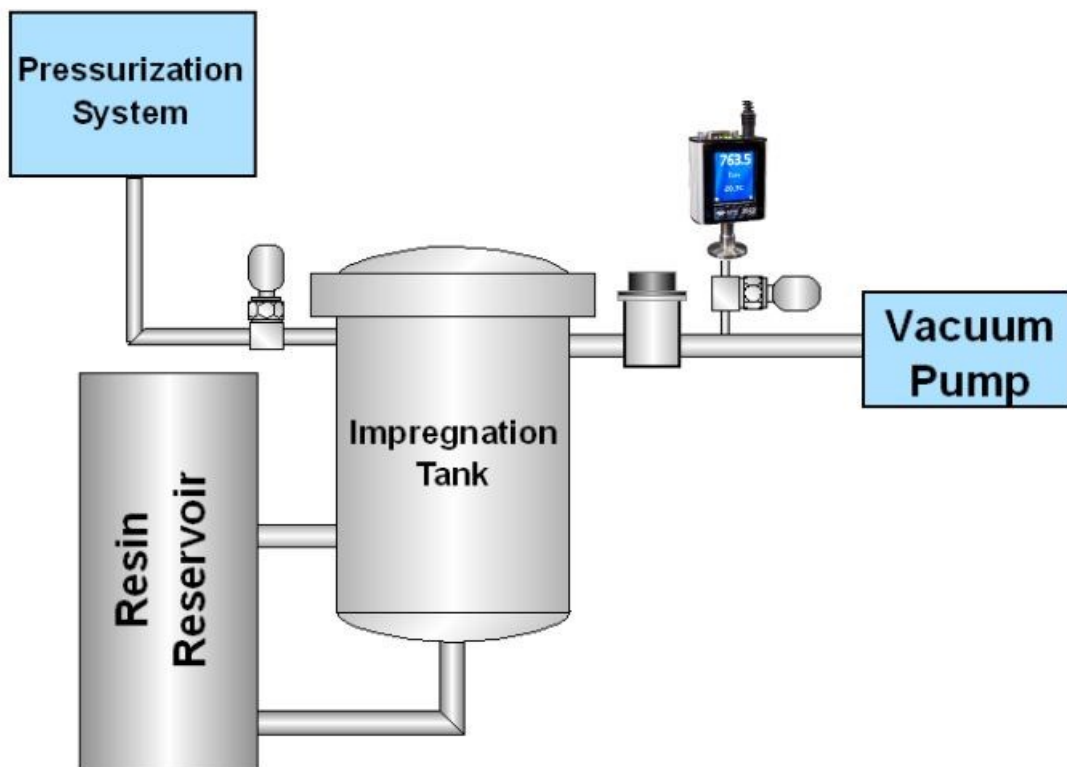
On olemassa muutamia erilaisia kyllästysmenetelmiä, joista ensimmäinen on valutuskyllästysmenetelmä. Tässä kyllästysmenetelmässä kappale esilämmitetään ennen kyllästysaineen valuttamista. Valutus suoritetaan joko vaakatasossa, jolloin valutus pisteitä on useita tai 5–20°:een kulmassa yhdellä valutus pisteellä. Valutuksen aikana kappaletta pyöritetään siten, että kyllästysaine kerkeää valumaan tasaisesti. Valutuksen jälkeen kappale siirretään uuniin, jossa hartsitunkeutuu kappaleen pinnalle. (6, s. 18.) Kuvassa 7 on nähtävissä vaakatasossa käytettävät valutus pisteet.



KUVA 7. Valutuskyllästysvalutus pisteet (7)

Uputuskyllästysmenetelmässä esilämmitetty kappale lasketaan altaaseen, johon pumpataan kyl-  
lästysainetta. Kappaletta pidetään upotettuna hartsiin siihen asti, että ilmakuplat häviävät altaan  
pinnalta. Seuraavaksi hartsi pumpataan pois ja ylimääräinen hartsi valuu varastoaltaaseen. Hart-  
sattu kappale siirretään uuniin, jossa hartsi pääsee kuivumaan ja kovettumaan. (6, s. 19.)

Tyhjiökyllästysmenetelmässä hartsi esilämmitetään ja levitetään kappaleen pinnalle hyödyntämällä  
lämpöä ja alipainetta. Kappale sijoitetaan kyllästyssäiliöön, johon luodaan tyhjiö imemällä ilmat  
pois. Seuraavaksi hartsi pumpataan säiliöön, jossa kappaletta pidetään upotettuna hartsiin muuta-  
man minuutin ajan. Seuraavaksi säiliöön luodaan ylipaine, jotta hartsi saadaan tunkeutumaan pa-  
remmin ilmarakoihin. Seuraavaksi hartsi pumpataan varastosäiliöön ja ylimääräinen hartsi valute-  
taan käsittelystä kappaleesta pois. Lopuksi kappale siirretään uuniin kuivumaan. (6, s. 20.) Kuvassa  
8 on esitettyä tyhjiökyllästyslaitteiston rakenne.



KUVA 8. Tyhjiökyllästyslaitteiston rakenne (8)

### 3 OSITTAISPURKAUKSET

Osittaispurkauksilla tarkoitetaan pieniä sähköisiä purkauksia, jotka yleensä esiintyvät eristyksen vioissa. Normaalikäytössä osittaispurkauksia ilmenee, kun laitteen nimellisjännite on  $\geq 3$  kV. (9, s. 411.) Taajuusmuuttajakäytössä osittaispurkauksia esiintyy alhaisemmilakin jännitteillä. Osittaispurkaukset ovat epätäydellisiä sähköpurkauksia, eli sähkökentän voimakkuus ylittää vain osittain eristysosan sähkölujuuden kahden johtimen välillä.

Osittaispurkauksia voi esiintyä vaihtojännitteen lisäksi myös tasa- ja syöksyjännitteillä, nesteissä, kaasuissa, kiinteissä eristeissä ja rajapinnoilla. Osittaispurkauksilla on kemiallisia sekä fysikaalisia vaikutuksia eristeiden lisäksi myös ympäristöön. Osittaispurkaukset tuottavat eristeitä syövyttäviä happoja sekä kaasuja ja tämän lisäksi radiohäiriöitä sekä UV-säteilyä. (14, s. 80.)

Osittaispurkaukset ovat suuruudeltaan pikocoulombien (pC) kokoisia, mutta mittalaittevalmistajien mielestä mittaustulokset ovat tarpeeksi tarkkoja, jos ne esitetään millivolteina. Tällöin osittaispurkauksen varauksen suuruudelle pikocoulombeina löytyy vastaava arvo millivolteina (mV). (9, s. 411.)

Muutamia esimerkkejä osittaispurkauksien syntymisen syistä ovat eristyspinnan likaantuminen ja kuluminen, kosteuden pääsy eristeisiin, valmistusvirheet, ylikuormituksen lämpövaikutukset sekä käämityksen löystyminen. (9, s. 411.)

Eristeiden heikkeneminen ja pahimmassa tapauksessa täydellinen vikaantuminen ovat yleisiä osittaispurkauksien aiheuttamia haittoja. Muita haittoja ovat käyttökatkokset, tulipalot, verkon ylikuormitukset sekä henkilökohtaisen turvallisuuden vaarantuminen. (10.)

#### 3.1 Sisäinen purkaus

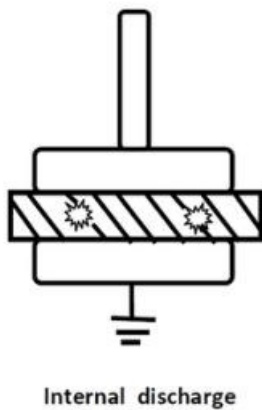
Niin kuin nimestäkin voi päätellä, sisäiset purkaukset tapahtuvat eristeen sisällä. Varsinkin tämän tyyppin osittaispurkaukset ovat eristeelle haitallisia. (10.) Eristeeseen voi alkaa muodostumaan kuvan 9 mukainen ns. sähköpuu, joka jatkaa laajenemistaan täydelliseen vikaantumiseen asti.



KUVA 9. Osittaispurkausten aiheuttama sähköpuu (12)

Sisäisiä purkauksia ilmaantuu, kun valmistusvirheet ja ylikuumentumiset aiheuttavat runkoeristyksen säröilyä, joka taas johtaa eristeeseen muodostuvaan onteloon tai ilmataskuun. Purkaukset tapahtuvat näissä onteloissa ja ilmataskuissa. (9, s. 411.)

Sisäiset purkaukset ovat siitä petollisia, että ne eivät tuota minkäänlaista ääntä, hajua tai visuaalista merkkiä ennen vikaantumista (11).

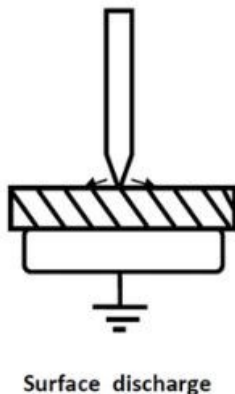


KUVA 10. Sisäinen purkaus (13)

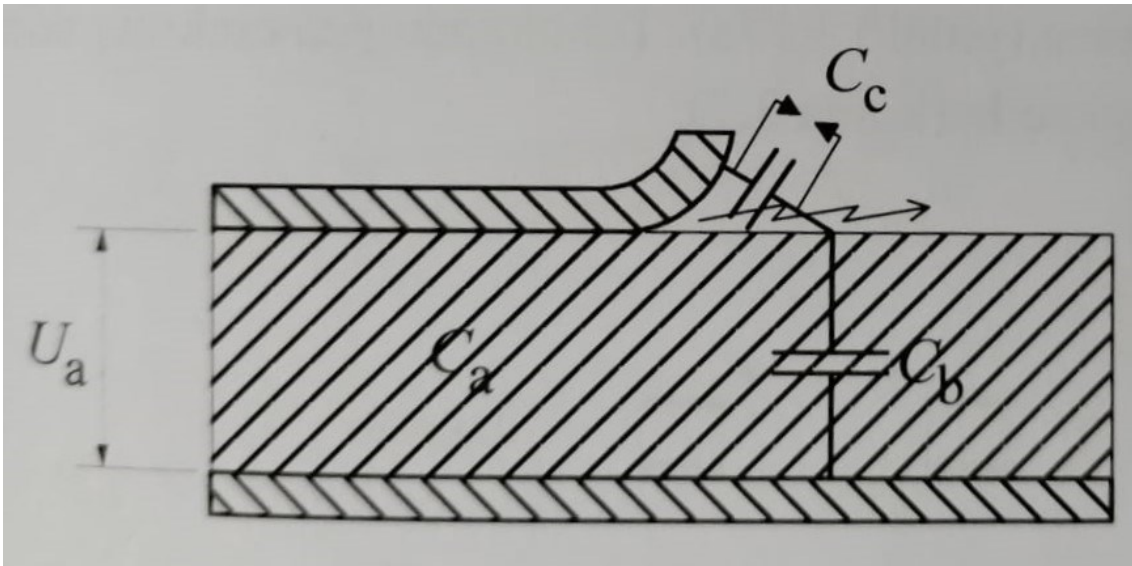
### 3.2 Pintapurkaus

Pintapurkaukset kulkevat eristeen pintaa pitkin. Niin kuin sisäiset purkaukset, myös pintapurkaukset ovat erittäin haitallisia eristeiden kunnolle. Syitä pintapurkauksien syntymiselle ovat kosteuden pääsy eristeisiin, eristyspinnan likaantuminen ja kuluminen. (10.)

On olemassa myös pintapurkauksen eri variaatioita. Yksi näistä on nimeltään liukupurkaus, joka on voimakas ja todella haitallinen pintapurkaus. Näitä purkauksia voi syntyä kahden eristeen rajapinnalla, jos sähkökentän rajapinnan suuntainen komponentti on tarpeeksi suuri. Kuva 11 havainnollistaa liukupurkauksen rakennetta, eli sähkökenttä taipuu eristeiden rajapinnalla ja tällä kentällä on myös pinnan suuntainen komponentti. Liukupurkaukset uudelleenmuotoilevat sähkökentän jakaumaa ja tämä voi johtaa täydelliseen eristysrakenteen ylilyöntiin tai varsinaisen elektrodialueen ulkopuolella tapahtuvaan läpilyöntiin. (14, s. 85.) Läpilyönti on täydellinen purkaus, jonka purkauskanava kulkee eristeen läpi. Jos purkauskanava on kahden erilaisen eristeen rajapinnalla, joista toinen on kaasumainen, on kyse ylilyönnistä. (14, s. 63.)



KUVA 11. Pintapurkaus (13)



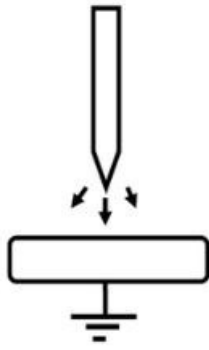
KUVA 12. Liukupurkauksen rakenne (14, s. 85)

### 3.3 Koronapurkaus

Koronapurkaukset ovat osittaispurkauksia, jotka syntyvät elektrodin pinnalla joko ilmassa tai jossain muussa kaasussa. (14, s. 90.) Toisin sanoen, purkaus tapahtuu suoraan johtimen terävästä pinnasta ilmaan tai toiseen kaasuun. (10)

Koronapurkauksia esiintyy lähinnä suurjännitteellä (110 kV:sta ylöspäin) kantaverkossa ja ne ovat selvästi paljaalla korvalla kuultavissa, varsinkin kostealla säällä.

Koronapurkaukset ovat poikkeuksellisia verrattuna muihin osittaispurkauksien muotoihin, sillä ne esiintyvät jännitteen puolijakson huipulla, toisin kuin sisäiset purkaukset ja pintapurkaukset, jotka esiintyvät jännitteen nousevalla ja laskevalla osuudella. Koronapurkaukset poikkeavat muista osittaispurkauksista myös siinä mielessä, että ne eivät ole läheskään yhtä haitallisia. Koronan aiheuttamat haitat ovat lähinnä ääni-, radio- ja TV-häiriöt johtojen välittömässä läheisyydessä. (14, s. 90, 96.) Koronasta aiheutuu myös koronahäviöitä, jotka voivat yltää huonolla säällä yhtä suureksi kuin virtalämpöhäviöt, mutta kun tarkastellaan vuoden aikaväliä, koronahäviöt ovat alle kymmenesosan virtalämpöhäviöistä. (14, s. 95.)



Corona discharge

*KUVA 13. Koronapurkaus (13)*

## 4 OSITTAISPURKAUSMITTAUKSET

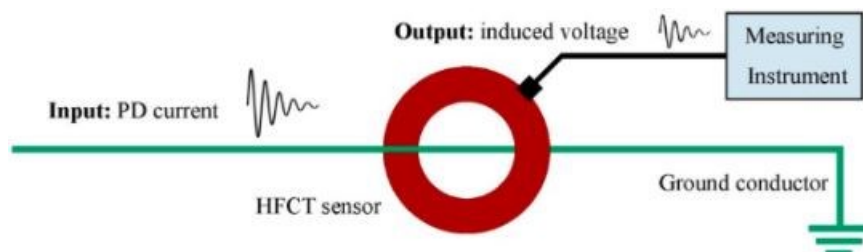
Osittaispurkausmittaukset perustuvat purkauksien lähettämiin signaaleihin, joita ovat ääniaallot, sähkömagneettinen säteily sekä sähköiset signaalit. Osittaispurkausmittaukset voidaan jakaa näihin kolmeen mittausmenetelmään, sekä on-line ja off-line-mittauksiin. (14, s. 199–203.)

### 4.1 On-line-mittaukset

On-line-mittaukset ovat mittauksia, jotka suoritetaan mitattavan laitteiston ollessa normaalissa käytössä. On-line-mittauksien etuna on se, että jos anturit voidaan asentaa jännitteisenä, ei tarvita käyttökatoa. Koska mittaukset tehdään käytön aikana, pystytään osittaispurkauksien esiintymistä tarkkailemaan pitkällä aikavälillä, jolloin saadaan otettua huomioon, miten esimerkiksi kuormituksen vaihtelu ja kaapelien / laitteiston lämpötilan vaihtelu vaikuttaa osittaispurkauksiin. On-line-mittauksien huonona puolena on se, että testausjännitettä voi harvoin säätää kesken käytön. (15, s. 35.)

#### 4.1.1 HFCT-mittaus

HFCT eli High Frequency Current Transformer-mittauksessa anturina toimii suurtaajuusvirtamuuntaja, joka asennetaan kaapelin ympärille tai kaapelipäätteen maadoitusjohtimeen. Anturia voi käyttää joko oskilloskoopin tai varsinaisen osittaispurkausmittalaitteen kanssa. (15, s. 35.) Kuvassa 14 on esitettyinä maadoitusjohtimeen asennettu HFCT-anturi.



KUVA. 14 HFCT-anturin toiminta maadoitusjohtimeen asennettuna (16)

#### 4.1.2 Akustinen mittaus

Akustinen mittaus perustuu osittaispurkausten aiheuttamaan akustiseen aaltoon ultraäänialueella. Nämä aallot leviävät sisäisessä rakenteessa ulkopinnan kohtaamiseen asti. Erilaisilla aaltotyypeillä on erilaisia etenemisnopeuksia, ja läpäisy sekä heijastukset rajapinnoilla aiheuttavat vaimennusta, absorboitumista ja hajaantumista. Tyypillisesti mittaus tapahtuu rajapinnoilla, joissa akustiset aallot ilmaistaan ja muunnetaan anturien avulla sähköisiksi signaaleiksi. Akustiseen mittaukseen sopivia antureita ovat piezosähköinen anturi, kondensaattorimikrofoni sekä akusto-optinen anturi. Anturit voivat olla kosketus- tai etäantureita ja passiivisia tai aktiivisia. (14, s. 200–201.)

Akustisia osittaispurkausten mittauksia tehdään itse osittaispurkausten lähteen paikantamiseen. Yleisesti akustisia mittauksia tehdään tehomuuntajien sekä kaasueristeisten kytkinlaitteistojen osittaispurkausten paikantamiseen. Akustisia mittauksia voidaan myös hyödyntää mittamuuntajien, staattorikäymitysten, läpivientien sekä kaapelipäätteiden ja -jatkosten osittaispurkausten paikantamiseen. Tämä mittausmenetelmä on toimiva myös sähköisesti häiriöalttiissa tiloissa, kuten esimerkiksi teollisuus- ja sähköasemaympäristössä, joissa mittaukset eivät välttämättä onnistu sähköisellä tai sähkömagneettisen säteilyn mittaamiseen perustuvilla menetelmillä. (14, s. 201.)

#### 4.1.3 HF-, VHF- ja UHF-menetelmät

HF-, VHF- ja UHF-menetelmillä yhteistä on se, että ne ovat sähkömagneettisen säteilyn mittaamiseen perustuvia menetelmiä. Osittaispurkaukset aiheuttavat ääntä, sähköisesti eteneviä virtapulsseja sekä sähkömagneettisia häiriöaaltoja. Nämä menetelmät mittaavat juuri näitä häiriöaaltoja. (14, s. 203.)

HF-kaista toimii parhaiten kaapeleille, VHF- ja UHF-kaistat muuntajille ja GIS-laitoksille, kun taas pyöriville sähkökoneille soveltuvat kaikki taajuusalueet. Esimerkiksi paineisessa SF<sub>6</sub>-kaasussa, jota käytetään GIS-laitosten kaasueristeinä, osittaispurkaukset syntyvät todella pienissä elektrodiväleissä, jolloin pulssien nousuaikakin on lyhyt (jopa < 100 ps). Lyhyen nousuajan takia pulssien taajuussisältö ulottuu yli 1 GHz:n alueelle. (14, s. 203.)

Suurtaajuiset aallot, joiden aallonpituus on yli 1 m, aiheuttavat resonanssivärähtelyjä GIS-laitosten sisällä. Osittaispurkausten havainnointi ja paikallistaminen perustuvat juuri näiden värähtelyjen mittaamiseen. GIS-laitoksiin asennetaan jo valmistusvaiheessa kiinteitä antureita, joiden ilmoittamia signaaleja voidaan valvoa ilman käyttökeskeytyksiä. (14, s. 203.)

Osittaispurkauksista aiheutuva resonanssivärähtely kulkee nopeasti radioaallon tavoin GIS-laitoksen sisällä, jossa useat anturit havaitsevat purkauksen aiheuttaman värähtelyn lähes yhdenaikaisesti. Purkausten paikantaminen perustuu pulssien amplitudieroihin. UHF-alueen mittauksen hyvänä puolena on se, että ne eivät ole niin herkkiä ulkoisille häiriötekijöille. Mittauksissa tulee kuitenkin ottaa huomioon mahdolliset radio-, TV- ja matkapuhelinliikenteen aiheuttamat häiriöt valitsemalla sopiva taajuuskaista. (14, s. 203.)

HF- ja VHF-alueen mittauksissa käytettävien antureiden toiminta perustuu kapasitiiviseen, induktiiviseen ja sähkömagneettiseen ilmaisuperiaatteeseen. UHF-alueen anturit ovat yleensä kiekko- tai kartiomaisia antureita ja kentänohjauselektrodeja, jotka toimivat antennin lailla tällä taajuusalueella. (14, s. 204.)

VHF- ja UHF-menetelmien osittaispurkausmittauksien etuja verrattuna tavanomaisiin pienemmän taajuuden mittauksiin ovat:

- Galvaanisen yhteyden tarpeettomuus mitattavaan kohteeseen, eli mittauksen suorittamiseen ei tarvita käyttökeskeytystä
- Suurempi vastustus häiriölle ja kohinalle, eli herkkiä mittauksia voidaan suorittaa, vaikka itse jännitelähde olisi häiriöllinen
- VHF- ja UHF-menetelmillä voidaan paikantaa osittaispurkausten lähteet ja löytää viat
- VHF- ja UHF-ilmaisimet tallentavat purkauksen pulssimuodon ja siihen liittyvät taajuudet, eli näillä menetelmillä on mahdollista tunnistaa osittaispurkausten lähteen luonne erimuotoisten ja -taajuisien pulssien ja akustisten signaalien avulla.

VHF- ja UHF-menetelmien huonoja puolia ovat: laitteiden komponenttien hinnat, mittalaitteet soveltuvat vain yhdelle laitetyypille (GIS-laitteistot, muuntajat, staattorikämmitykset) ja kalibrointi näennäisvarauksena (pC) ei ole mahdollista. (14, s. 204.) Taulukossa 1 on esitettyä HF-, VHF- ja UHF-menetelmien taajuusalueet sekä aallonpituudet.

TAULUKKO 1. Radiotaajuusalueiden leveydet ja aallonpituudet (17)

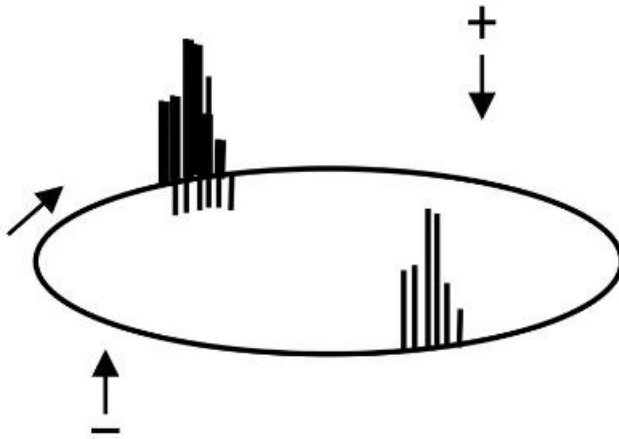
Designation	Abbreviation	Frequencies	Wavelengths
Very Low Frequency	VLF	3 kHz - 30 kHz	100 km - 10 km
Low Frequency	LF	30 kHz - 300 kHz	10 km - 1 km
Medium Frequency	MF	300 kHz - 3 MHz	1 km - 100 m
High Frequency	HF	3 MHz - 30 MHz	100 m - 10 m
Very High Frequency	VHF	30 MHz - 300 MHz	10 m - 1 m
Ultra High Frequency	UHF	300 MHz - 3 GHz	1 m - 100 mm
Super High Frequency	SHF	3 GHz - 30 GHz	100 mm - 10 mm
Extremely High Frequency	EHF	30 GHz - 300 GHz	10 mm - 1 mm

#### 4.1.4 TEV-menetelmä

Sisäiset osittaispurkaukset tuottavat sähkömagneettisia pulsseja, jotka liikkuvat purkaukkohta ympäröivien metalliosien kautta maahan. Purkauksen törmätessä metalliosan impedanssiin syntyy suuritaajuinen jännitepulssi, joka on 0,1 mV ja muutaman voltin väliltä. Nämä suuritaajuiset jännitepulssit karkaavat metalliosien liitoskohtien kautta laitteen sisäpinnalta ulkopinnalle ja lopulta maahan. (18, s. 4.)

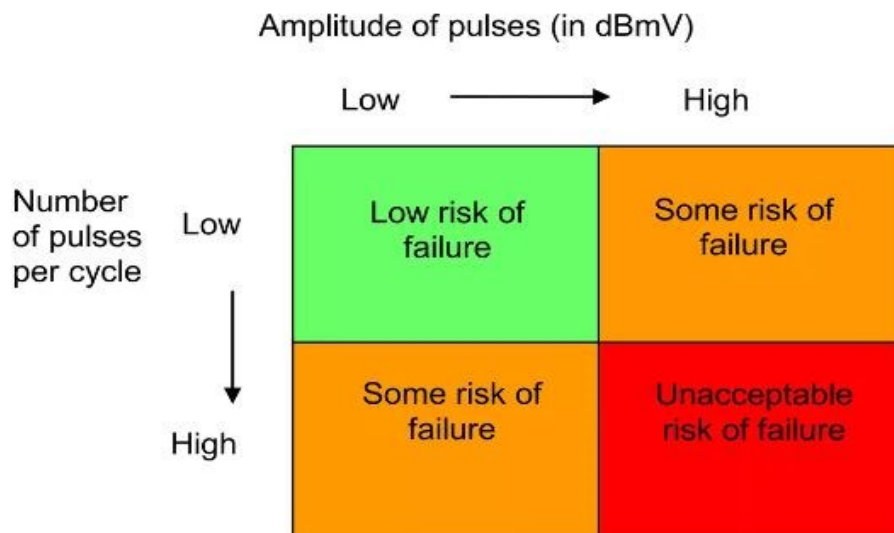
Näitä pulsseja tutkittiin ensimmäistä kertaa vuonna 1974, jolloin EA Technologyn John Reeves antoi pulseille nimeksi Transient Earth Voltages (TEVs), eli vapaasti käännettynä transienttimaajännitteet. Nimi perustuu pulssien todella lyhyeen keston ja niiden maahan kulkeutumiseen. Tutkimusten aikana kävi ilmi, että nämä TEV-signaalit ovat suoraan verrannollisia osittaispurkausten voimakkuuteen. TEV-menetelmä antaa täten hyvän kuvan laitteistojen eristeiden kunnosta. (18, s. 4.)

TEV-menetelmä mittaa jännitepulssien voimakkuutta ja pulssien määrää jakson aikana (18, s. 5). Kuva 15 esittää laitteen ulkopuolelta mitattujen pulssien voimakkuutta ja määrää.



KUVA 15. Lissajous'n kuvio sisäisistä purkauksista (18, s. 5)

TEV-menetelmällä osittaispurkauksien vakavuutta mitataan kuvan 16 avulla. Mittaustuloksia verrataan tietokannan tuloksiin. Jos osittaispurkausten taso on ylimmässä 5 %:ssa verrattuna tietokannan tuloksiin samanlaisessa laitteistossa, luokitellaan osittaispurkausten vakavuus punaiseen laatikkoon. Jos osittaispurkausten taso on ylimmässä 25 %:ssa verrattuna tietokannan tuloksiin, luokitellaan vakavuus oranssiin laatikkoon. Tämän tason alapuolella osittaispurkauksista ei aiheudu suurta riskiä. (18, s. 6.)



KUVA 16. Osittaispurkausten vakavuuden arviointi TEV-menetelmän mittaustuloksilla (18, s. 6)

## 4.2 Off-line-mittaukset

Off-line-mittauksilla mitattava kaapeli tai laite tulee erottaa sähköverkosta mittauksien ajaksi. Testijännite syötetään mitattavaan kohteeseen erillisellä mittauslaitteistolla.

Off-line-osittaispurkausmittaukset ovat kätevä menetelmä purkauspaikkojen paikantamiseen kaapeleissa. Paikannus perustuu kulkuaikamittaukseen, eli laskemalla mittalaitteelle suoraan tulevan pulssin ja kaapelin toisesta päästä heijastuvan pulssin välinen aikaero. (15, s. 32.) Off-line-mittauksia tehdään myös pyöriville sähkökoneille esimerkiksi staattorikäymitysten uusimisen yhteydessä.

### 4.2.1 DAC-mittaus

DAC-mittauksen (Damped Alternating Current) testijännitteenä käytetään aaltomuodoltaan vaihtelevaa sinimuotoista värähtelyä. Kaapelia syötetään DC-jännitelähteellä ja puretaan ilmasydämisen kelan kautta, joka johtaa kaapelin kapasitanssin ja kelan induktanssin muodostamaan resonanssi-piiriin. DAC-mittauksen etuna on mittauslaitteiston pieni koko verrattuna 50 Hz:n mittauslaitteistoihin. Laitteiston pieni koko johtuu siitä, että sen ei tarvitse syöttää suurta kapasitiivista virtaa jatkuvasti. DAC-mittauksen huonona puolena on se, että värähtelyn taajuus poikkeaa normaalista 50 Hz:n taajuudesta ja kaapelin kapasitanssi vaikuttaa taajuuteen. Osittaispurkausmittaukset suoritetaan koelaitteiston omalla kytkentäkondensaattorilla, mittausimpedanssilla ja osittaispurkausmittalaitteella (15, s. 31, 34.)

### 4.2.2 VLF-mittaus

VLF-mittauksessa (Very Low Frequency) testijännitteenä käytetään pienitaajuisia (0,1 Hz) jännitteitä. VLF-mittauksella osittaispurkausmittaus tehdään samalla lailla kuin DAC-mittauksessa, eli koelaitteiston omalla kytkentäkondensaattorilla, mittausimpedanssilla ja osittaispurkausmittalaitteella. VLF-mittauksen huonoja puolia ovat testauksen hitaus pienen testaustaajuuden takia ja testausjännitteen poikkeaminen normaalista 50 Hz:n taajuudesta. (15, s. 35.)

### **4.3 Pyörivien sähkökoneiden osittaispurkausmittaukset**

Pyöriville sähkökoneille tehdään osittaispurkausmittauksia lähinnä koneiden kokoonpanon yhteydessä sekä uusintakäämitysten yhteydessä. Nämä mittaukset suoritetaan off-line-mittauksina. On-line-menetelmiä pystytään hyödyntämään vain keski- ja suurjännitekoneiden kunnon valvonnassa.

Mittaukset suoritetaan IEC-standardien mukaisesti, joissa suoritettaviksi mittauksiksi on määrätty seuraavat: phase to phase (vaiheiden välit), phase to ground (vaiheiden ja maan välit) ja turn to turn (käämien kierrosten välit) (19).

Mitattavia arvoja ovat PDIV (Partial Discharge Inception Voltage), RPDIV (Repetitive Partial Discharge Voltage), RPDEV (Repetitive Partial Discharge Extinction Voltage) ja PDEV (Partial Discharge Extinction Voltage). Arvot mitataan mainitussa järjestyksessä, eli testijännitettä nostetaan RPDIV-arvon saavuttamiseen asti, jonka jälkeen testijännitettä lasketaan PDEV-arvon saavuttamiseen asti. Liitteessä 1 käydään tarkemmin läpi edellä mainittuja mittauksia.

Mittaustuloksia tarkastellessa tulee ottaa huomioon mitattavan kohteen IVIC-luokitus (Impulse Voltage Insulation Class). IVIC-luokkia ovat A (Benign), B (Moderate), C (Severe), D (Extreme) ja S (Manufacturer specified). Mitä korkeampi IVIC-luokka, sitä parempi rasituksenkesto laitteella tulee olla, johon sisältyy myös osittaispurkausten kestäminen. (19.) Liitteessä 1 käydään läpi, miten IVIC-luokka vaikuttaa vaadittaviin tuloksiin osittaispurkausmittauksissa.

### **4.4 Taajuusmuuttajien aiheuttamat jännitepiikit ja osittaispurkaukset**

Luvussa 3 mainittiin, että osittaispurkauksia alkaa ilmenemään yli 3 kV:n nimellisjännitteillä normaalikäytössä ja taajuusmuuttajakäytöissä alhaisemminkin jännitteillä. Taajuusmuuttajien käyttämät invertterit toimivat IGBT:llä (Insulated Gate Bipolar Transistor) ja PWM:llä (Pulse Width Modulation). IGB-transistorien erittäin nopeat kytkennät voivat aiheuttaa jännitepiikkejä, jotka ovat osasyllisiä osittaispurkausten esiintymiselle. Toinen osasyllinen osittaispurkauksille on nopea pulsusin nousuaika. Nopeista jännitepulsseista johtuvat epätasaiset jännitteenjakaumat kierrosten yli aiheuttavat jänniterasitusta kierrosten välillä, joka kuluttaa kierroseristettä. (20, s. 28–32.)

Lähinnä jännitevälin 400 V – 1000 V pyörölankakoneet voivat altistua jännitepiikeistä johtuviin ongelmiin. Keskijännitekoneissa sekä muotokuparilla käämityissä koneissa on paremmat kierroseristeet, joten jännitepiikit ja osittaispurkaukset eivät ole niin suuri huolenaihe. (20, s. 28–29.)

Jännitepiikeistä ja nopeista nousuajoista aiheutuvia ongelmia voidaan suodattaa asentamalla taajuusmuuttajan ja moottorin välille DU/dt-suodatin (21).



KUVA 17. Trafoxin DU/dt-suodatin (21)

## 5 YHTEENVETO

Opinnäytetyön tavoitteena oli tutustua osittaispurkauksiin, sekä luoda ohjekirja sähkömoottoreiden osittaispurkausmittauksista. Ohjekirjan avulla ABB:n työntekijät pystyvät suorittamaan tarpeelliset osittaispurkausmittaukset sähkömoottoreiden käämien uusintojen yhteydessä. Täten saadaan tuoteistettua osittaispurkausmittaukset.

Aloitin osittaispurkausmittauksiin tutustumisen 2023 keväällä yritysprojektin yhteydessä. Tällöin kuitenkin vain toisella mittausmenetelmällä (antennilla) pystyttiin saamaan toistuvasti järkeviä tuloksia. Opinnäytetyön aikana mittalaite kävi kalibroinnissa, jonka jälkeen myös kytkentälaitteella suoritettut mittaukset onnistuivat. Mittausmenetelmä valitaan lähinnä sen mukaan, onko moottorin roottori paikallaan vai ei. Antennilla voidaan mitata vain staattoreita, sillä antenni tulee sijoittaa juuri staattorin keskelle mittausten ajaksi. Kytkentälaitteella voidaan mitata myös kokonaan kasassa olevia moottoreita. ABB:n koestajat ovat kokeilleet mittauksia ohjeiden avulla onnistuneesti muutamia kertoja, ja ohjeisiin on tehty lisäyksiä heidän kommenttiensa perusteella.

Osittaispurkausmittaukset ovat tehokas tapa vikojen toteamiseen / paikantamiseen. Tässä työssä käsiteltiin enemmän sähkömoottoreiden osittaispurkausmittauksia, mutta esimerkiksi myös kaapelivikojen paikantamisessa hyödynnetään osittaispurkausmittauksia.

Tulevaisuudessa mittalaitteen käyttöä voisi monipuolistaa suorittamalla osittaispurkausmittauksia kenttäolosuhteissa. Antennimenetelmän mittauksia varten tulisi myös hankkia tukeva teline, jolla antenni voidaan sijoittaa luotettavasti keskelle staattoria mittausten ajaksi.

## LÄHTEET

1. VEM motors Finland Oy. Mikä on sähkömoottori? Hakupäivä 27.2.2024. <https://www.vem.fi/toimialatietoa/mika-on-sahkomoottori/>.
2. Hietalahti, Lauri 2011. Muuntajat ja sähkökoneet. Tampere: Tammertekniikka.
3. Typical Failures in Three-Phase Stator Windings. Kuvakaappaus. Alexandria Armature Works. Hakupäivä 29.2.2024. <https://www.aawva.com/resource/2016/3/25/typical-failures-in-three-phase-stator-windings>.
4. Korpinen, Leena. Sähkökoneet osa 2. Sähkövoimatekniikkaopus. Pdf-tiedosto. Hakupäivä 21.3.2024. [http://www.leenakorpinen.fi/archive/svt\\_opus/10sahkokoneet\\_2osa.pdf](http://www.leenakorpinen.fi/archive/svt_opus/10sahkokoneet_2osa.pdf).
5. Metsberg, Heikki 2006. Sähkökoneen staattorikäimityksen kehittäminen. Helsingin ammattikorkeakoulu. Sähkötekniikan tutkinto-ohjelma. Sähkövoimatekniikka. Insinööriyö. Hakupäivä 2.4.2024. [https://www.doria.fi/bitstream/handle/10024/4283/stadia\\_1163523267\\_1.pdf;jsessionid=3F7CAA77E7CCF68400DFF85802005A14?sequence=1](https://www.doria.fi/bitstream/handle/10024/4283/stadia_1163523267_1.pdf;jsessionid=3F7CAA77E7CCF68400DFF85802005A14?sequence=1).
6. Saira, Antti 2010. Hartsaamon käyttöönotto The Switch Drive System Oy:lle. Saimaan ammattikorkeakoulu. Kone- ja tuotantotekniikka. Tuotantotekniikan ja kunnossapidon suuntautumisvaihtoehto. Opinnäytetyö. Hakupäivä 5.4.2024. <https://core.ac.uk/download/pdf/38002285.pdf>.
7. Von Roll Holding AG. Products, Impregnation. Kuvakaappaus. Hakupäivä 5.4.2024. <https://www.dolphins.com/products/impregnation/>.
8. Vacuum Pressure Impregnation (VPI) Systems. Kuvakaappaus. Teledyne Hastings Instruments. Hakupäivä 5.4.2024. <https://www.teledyne-hi.com/resourcecenter/Application%20Notes/vacuum%20pressure%20impregnation%20system.pdf>.

9. Kunnossapitoyhdistys Promaint 2009. Kuntoon perustuva kunnossapito. 1. painos. Helsinki: KP-Media Oy.
10. Fluke. Osittaispurkauksen tärkeimmät syyt ja tyypit. Hakupäivä 16.2.2024. <https://www.fluke.com/fi-fi/lue-lisaa/blogi/vuodontunnistus/osittaispurkaus>.
11. EA Technology. What is Partial Discharge? A Guide to Understanding and Managing PD. Hakupäivä 16.2.2024. <https://eatechnology.com/sea/news-blogs/blogs/2021/what-is-partial-discharge-a-guide-to-understanding-and-managing-pd/>.
12. Erwin, Tim. Introduction to Partial Discharge (Causes, Effects, and Detection). Pdf-tiedosto. Hakupäivä 16.2.2024. <https://site.ieee.org/sas-pesias/files/2020/05/IEEE-Alberta-Partial-Discharge.pdf>.
13. ResearchGate. Kuvakaappaus. Types of Partial Discharge. Hakupäivä 16.2.2024. [https://www.researchgate.net/figure/Types-of-Partial-Discharge\\_fig5\\_351509593](https://www.researchgate.net/figure/Types-of-Partial-Discharge_fig5_351509593).
14. Aro, Martti, Elovaara, Jarmo, Karttunen, Matti, Nousiainen, Kirsi & Palva, Veikko 2015. Suurjännitetekniikka. 4. painos. Helsinki: Otatiето.
15. Keränen, Juha, Muranen, Sami, Pakonen, Pertti & Verho, Pekka 2018. Keskijännitekaapeleiden kunnan arviointi häviökerroin- ja osittaispurkausmittauksilla. Pdf-tiedosto. Hakupäivä 9.4.2024. <https://www.elenia.fi/files/3e2eee203359f4f61ffe51cf8a4540df0fb4d251/keskija-nnitekaapeleiden-kunnan-arviointi-ha-vio-kerroin-ja-osittaispurkausmittauksilla-loppuraportti.pdf>.
16. Álvarez, Fernando, Garnacho, Fernando, Ortego, Javier & Sánchez-Urán, Miguel Ángel 2015. Kuvakaappaus. Application of HFCT and UHF Sensors in On-Line Partial Discharge Measurements for Insulation Diagnosis of High Voltage Equipment. Hakupäivä 10.4.2024. <https://www.mdpi.com/1424-8220/15/4/7360>.
17. RF Page. Kuvakaappaus. What are Radio Frequency bands and its uses? Hakupäivä 15.4.2024. <https://www.rfpage.com/what-are-radio-frequency-bands-and-its-uses/>.

18. Davies, Neil 2015. Partial Discharge (PD) techniques for measuring the condition of ageing HV/MV switchgear. Hakupäivä 16.4.2024. [https://www.slideshare.net/thorneandderick1985/partial-discharge-techniques-for-measuring-condition-of-mv-hv-switch-gear?from\\_action=save](https://www.slideshare.net/thorneandderick1985/partial-discharge-techniques-for-measuring-condition-of-mv-hv-switch-gear?from_action=save).
19. IEC 60034-18-41:2014. Rotating electrical machines – Part 18-41: Partial discharge free electrical insulation systems (Type I) used in rotating electrical machines fed from voltage converters – Qualification and quality control tests. International Electrotechnical Commission. Hakupäivä 7.5.2024. <https://webstore.iec.ch/publication/118>. Vaatii lisenssin.
20. Hämäläinen, Henry 2008. Virranahto ja jänniterasitukset taajuusmuuttajakäytössä. Lappeenrannan teknillinen yliopisto. Sähkötekniikan koulutusohjelma. Diplomityö. Hakupäivä 19.9.2024. <https://lutpub.lut.fi/bitstream/handle/10024/43803/nbnfi-fe200902101172.pdf;jsessionid=2024A8E65F1F8FE3F297698F54D0B503?sequence=3>.
21. Trafox. DU/dt-suodattimet. Hakupäivä 24.9.2024. <https://www.trafox.fi/tuotteet/suodattimet/dudt-suodattimet/>.

