

**AKUSTISEN MITTAUSTEKNIIKAN HYÖDYNTÄMINEN STAATTO-
RIERISTYKSEN OSITTAISPURKAUSTEN HAVAINNOIMISESSA**

Kalle Kreuz
Opinnäytetyö (AMK)
Kevät 2025
Sähkö- ja automaatiotekniikan tutkinto-ohjelma
Oulun ammattikorkeakoulu

TIIVISTELMÄ

Oulun ammattikorkeakoulu
Sähkö- ja automaatiotekniikan tutkinto ohjelma
Sähkötekniikka

Tekijä: Kalle Kreuz

Opinnäytetyön otsikko: Akustisen mittaustekniikan hyödyntäminen staattorieristyksen osittaispurkausten havainnoimisessa

Työn ohjaaja: Ensio Sieppi

Työn valmistumislukukausi ja -vuosi: kevät 2025

Sivumäärä: esim. 51 + 8 liitettä

Voimalaitosgeneraattoreiden kunnossapito on tärkeä osa Suomen jatkuvan sähkön tuotannon turvaamisessa. Eri mittaustekniikoiden kehittyessä pystytään tehostamaan sekä kehittämään kunnonvalvonnan eri osa-alueita. Akustinen mittaustekniikka on jo käytössä monilla eri tekniikan alueilla. Tässä opinnäytetyössä tutkittiin, onko akustisesta mittaustekniikasta hyötyä generaattoreiden kunnonvalvonnassa.

Opinnäytetyön tavoitteena oli tutkia akustisen mittaustekniikan mahdollisuuksia staattorieristyksen osittaispurkausten havainnoimisessa. Työn toimeksiantajana toimi TGS Finland Oy. Työ toteutettiin tutkimusmaisesti. Työssä käydään läpi voimalaitosgeneraattoreiden rakennetta, osittaispurkausten teoriaa staattorieristyksessä ja akustisen mittaustekniikan teoriaa sekä toteutettiin akustisten mittalaitteiden käytännön testaaminen staattorieristyksen osittaispurkausten havainnoimisessa. Työn teoria pohjautuu alan kirjallisuuteen ja tutkimuksiin sekä hyödyksi käytettiin toimeksiantajan sisäisiä materiaaleja.

Työn tuloksena pystytään toteamaan akustisen mittaustekniikan kykenevän havainnoimaan osittaispurkauksia staattorieristyksessä sekä olevan hyödyllinen työkalu generaattoreiden kunnonvalvonnassa.

ABSTRACT

Oulu University of Applied Sciences
Degree Program in Electrical and Automaton Engineering
Option of Electrical Engineering

Author: Kalle Kreuz

Title of thesis: Utilization of Acoustic Measurement Technology in Detecting Partial Discharges in Stator Insulation

Supervisor: Ensio Sieppi

Term and year when the thesis was submitted: Spring 2025

Number of pages: e.g. 51 + 8 appendices

The maintenance of power plant generators is a crucial part of ensuring Finland's continuous electricity production. As various measurement technologies advance, it becomes possible to enhance and develop different aspects of condition monitoring. Acoustic measurement technology is already widely used in various fields of engineering. This thesis investigates whether acoustic measurement technology can be beneficial for monitoring the condition of generators.

The aim of this thesis was to explore the potential of acoustic measurement technology in detecting partial discharges in stator insulation. The thesis was done for TGS Finland Oy and conducted in a research-oriented manner. The thesis covers the structure of power plant generators, the theory of partial discharges in stator insulation, the fundamentals of acoustic measurement technology, and the practical testing of acoustic measurement devices for detecting partial discharges in stator insulation. The theoretical part is based on industry literature, researches and internal company documents.

The results of the thesis confirm that acoustic measurement technology can detect partial discharges in stator insulation and serves as a valuable tool for generator condition monitoring.

SISÄLLYS

| | |
|--|----|
| TIIVISTELMÄ..... | 2 |
| ABSTRACT..... | 3 |
| SISÄLLYS..... | 4 |
| SANASTO..... | 5 |
| 1 JOHDANTO | 6 |
| 2 ENERGIANTUOTANTO SUOMESSA..... | 7 |
| 3 SÄHKÖNTUOTANTOGENERAATTORI VOIMALAITOKSESSA | 9 |
| 3.1 Tahtigeneraattori..... | 9 |
| 3.2 Staattori..... | 11 |
| 3.3 Roottori..... | 15 |
| 3.4 Magnetointi..... | 17 |
| 4 OSITTAISPURKAUKSET PYÖRIVIEN SUURJÄNNITTEKONEIDEN ERISTEESSÄ..... | 20 |
| 4.1 Osittaispurkausten syntyminen | 20 |
| 4.2 Osittaispurkauskohdat pyörivissä sähkökoneissa | 21 |
| 4.3 Osittaispurkausmittaukset | 23 |
| 4.3.1 On-line mittaus..... | 24 |
| 4.3.2 Off-line mittaus..... | 24 |
| 5 AKUSTINEN MITTAUSTEKNIikka..... | 26 |
| 5.1 Akustisen kuvantamisen perusteet..... | 27 |
| 5.2 Akustisen kameran käyttö osittaispurkausten havainnoimisessa | 27 |
| 5.3 Akustiseen mittaamiseen vaikuttavia tekijöitä..... | 29 |
| 5.4 Kuvantamisessa huomioitavat asiat..... | 29 |
| 6 TESTAAMINEN JA TULOKSET | 30 |
| 6.1 Mittauskohde ja esivalmistelut..... | 30 |
| 6.2 Urakohtainen osittaispurkausmittaus | 32 |
| 6.3 Akustiset mittalaitteet..... | 34 |
| 6.4 Akustinen mittaus..... | 36 |
| 6.5 Mittaustulokset..... | 40 |
| 7 JOHTOPÄÄTÖKSET JA POHDINTA | 46 |
| LÄHTEET..... | 47 |
| LIITTEET..... | 51 |

SANASTO

| | |
|------|---|
| AE | Akustinen emissio |
| C | Columbi |
| dB | Desibeli |
| DE | Drive end (turbiinipääty) |
| Gt | Gigatavu |
| Hz | Hertzi |
| IEC | International Electrotechnical Commission |
| kg | Kilogramma |
| kHz | Kilohertzi |
| kV | Kilovoltti |
| lkm | Lukumäärä |
| m | Metri |
| m/s | Metriä sekunnissa |
| NDE | Non drive end (liukurengaspääty) |
| PRPD | Vaihepurkauskuvaaja |
| TWh | Terawattitunti |
| URDV | Radiohäiriöjännite |
| μV | Mikrovoltti |

1 JOHDANTO

Sähkö ja energiantuotanto ovat modernin yhteiskunnan peruspilari, ne mahdollistavat sekä kotitalouksien että kansantalouden, tuotannon ja teollisuuden sujuvan toiminnan. Sähköllä on nyky-yhteiskunnassa elintärkeä rooli lähes kaikilla elämänalueilla, ja siksi jatkuvan ja luotettavan sähköntuotannon varmistaminen on yhteiskunnan kannalta tärkeää. Voimalaitosten kunnossapito on keskeinen osa tässä tehtävässä, sen avulla taataan tuotannon häiriöttömyys ja varmistetaan energian saatavuus kaikissa tilanteissa.

Opinnäytetyön toimeksiantajana toimi TGS Finland Oy, joka tarjoaa voimalaitoksille ja teollisuuslaitoksille käyttöön ja kunnossapitoon liittyviä asiantuntijapalveluita kuten turbiinien ja generaattoreiden huolto-, kunnossapito- ja kunnonvalvontapalveluita.

Opinnäytetyön tarkoituksena on tutkia akustisen mittaustekniikan hyötyjä ja mahdollisuuksia generaattorin staattorin eristeen osittaispurkauksien havainnoimisessa. Opinnäytetyössä käsitellään osittaispurkauksien teoriaa generaattoreissa, testataan akustista mittaustekniikkaa osittaispurkauksien havainnointiin sekä tutkitaan akustista mittaustekniikkaa ja sen luotettavuutta jo käytössä oleviin mittausten menetelmiin verrattuna.

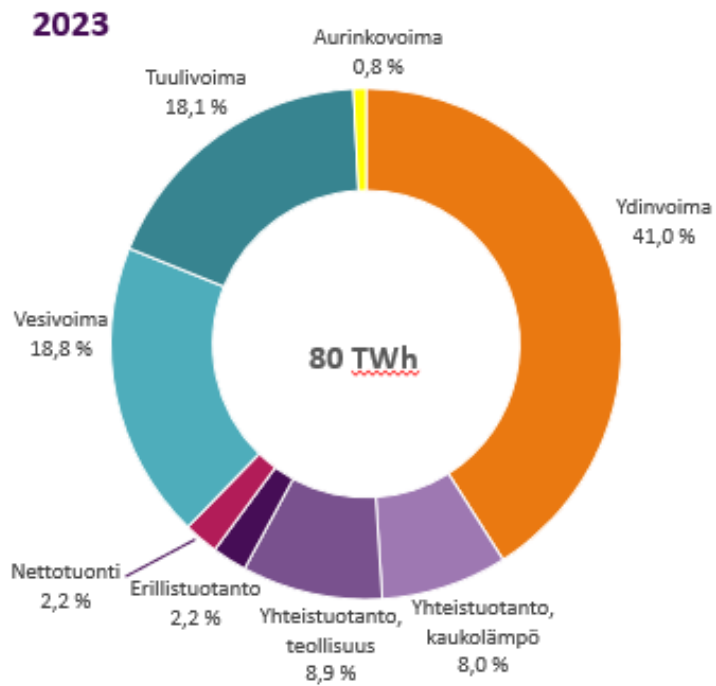
2 ENERGIANTUOTANTO SUOMESSA

Suomessa sähköä tuotetaan monipuolisesti eri energialähteillä ja tuotantomuodoilla, mikä varmistaa energiansaannin vakauden ja joustavuuden. Tärkeimpiä energialähteitä ovat ydinvoima, vesivoima, puupolttoaineet sekä tuulivoima, jonka osuus on viime vuosina kasvanut merkittävästi. Vuonna 2023 nämä energialähteet muodostivat Suomen sähköntuotannon perustan. (Energiateollisuus 2024.)

Suomessa toimii noin 120 sähköntuotantoa harjoittavaa energiayritystä, ja maassa on noin 400 voimalaitosta, joista yli puolet on vesivoimalaitoksia. Tämä monipuolinen ja hajautettu tuotantorakenne parantaa sähkön toimitusvarmuutta. Yhteistuotannon osuus sähköntuotannosta on merkittävä, sillä noin viidennes sähköstä tuotetaan lämmöntuotannon yhteydessä. Tällöin jopa 90 % polttoaineen energiasta saadaan hyödynnettyä sekä sähkönä että lämpönä, mikä tehostaa tuotantoa ja vähentää energiankulutuksen ympäristövaikutuksia. (Energiateollisuus 2024.)

Vuonna 2023 tapahtui muutos Suomen energiantuotannossa. Kotimaisen tuotannon kasvu, uusiutuvien energialähteiden käytön lisääntyminen ja sähkön nettotuotannon huomattava väheneminen korostivat energiantuotannon kehitystä. Sähkön kokonaiskulutus laski 2 % ja oli 79,8 TWh. Siitä kotimaista tuotantoa oli 98 %. Ydinvoima oli suurin yksittäinen sähköntuotannon energialähde, se kattoi 41 % kokonaiskulutuksesta. Erityisesti Olkiluoto 3 -yksikön ensimmäinen täysi käyttövuosi kasvatti ydinvoimatuotantoa merkittävästi, ja sen osuus oli 32,7 TWh, joka vastasi 35 %:n kasvua. Vesivoima ja tuulivoima olivat myös merkittäviä energialähteitä, ja niiden yhteenlaskettu osuus kokonaiskulutuksesta oli 37 %. Vesivoiman osuus vaihtelee vuosittain vesitilanteen mukaan. Vesivoiman osuus oli 19 % kokonaistuotannosta, kun taas tuulivoiman tuotanto kasvoi 14,5 TWh:iin, se kattoi 18 % sähkön kokonaistuotannosta. Aurinkovoimatuotanto kasvoi huomattavasti, 65 % edellisistä vuosista, mutta osuus kokonaiskulutuksesta pysyy pieninä, 0,8 %:ssa. (Tilastokeskus 17.4.2024.)

Kuvassa 1 on esitetty Suomen sähköntuotanto ja vienti vuonna 2023.

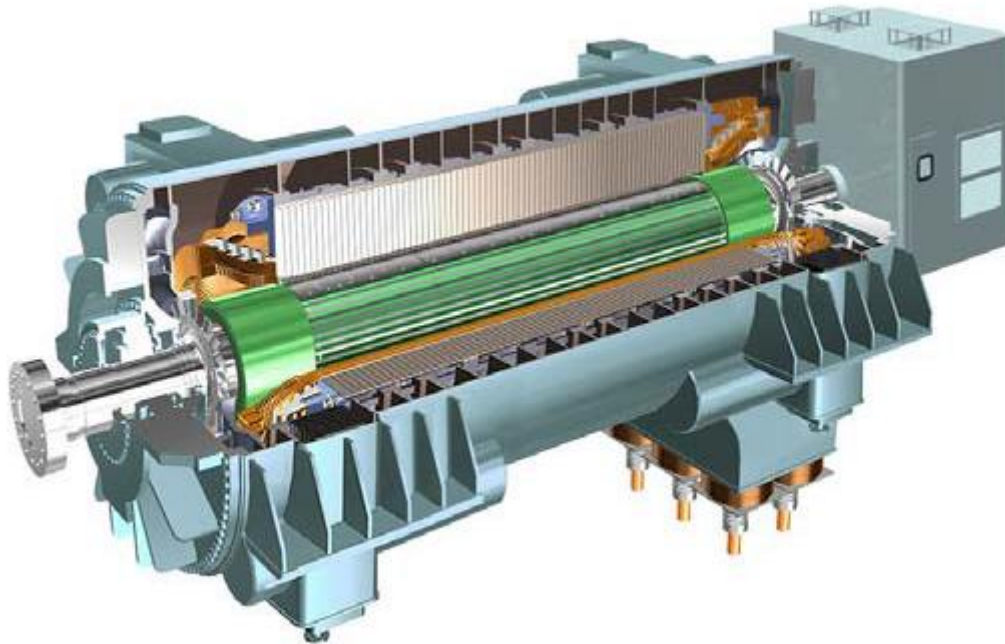


KUVA 1. Vuoden 2023 sähkön tuotanto ja tuonti (Energiateollisuus 30.1.2024)

3 SÄHKÖNTUOTANTOGENERAAATTORI VOIMALAITOKSESSA

3.1 Tahtigeneraattori

Generaattori on laite, joka muuntaa mekaanisen liike-energian sähkövirraksi. Se koostuu kahdesta aktiivisesta pääkomponentista: kiinteästä staattorista eli runkoon kiinnitetyistä osista ja pyörivästä roottorista, joka pyörii laakereiden varassa staattorin sisällä. Generaattorin tyyppi määräytyy sen mukaan, miten osat magnetoidaan ja missä käyttövirta syntyy - staattorissa vai roottorissa. (Hietalahti, Kauppinen & Wickström 2020, 19–23.)



KUVA 2. Umpinapaisen tahtigeneraattorin halkileikkaus (Hamdy 26.4.2023)

Roottorin pyörimiseen tarvittava liike-energia voidaan saada eri lähteistä, kuten vesivoimalaitoksen padotun veden virtauksesta tai höyrystä höyryturbiineissa. Höyry tuotetaan esimerkiksi maakaasulla, kivihiilellä, pelleteillä, turpeella, öljyllä tai ydinpolttoaineella. (Hietalahti, Kauppinen & Wickström 2020, 19–23.)

Tahtikoneen staattorissa on kolmivaiheinen käämi, ja sen sisällä pyörii roottori. Kun roottori pyörii ulkoisen voiman avulla, roottorin magnetoimiskäämiin johdetaan tasavirtaa harjojen ja liukurenkaiden tai magnetointikoneen avulla, näin koneeseen saadaan aikaan magneettinen vuo. Pyörivän roottorin magneettivuovivat leikkaavat staattorin kääminsauvoja ja indusoivat sinimuotoisesti vaihtelevan lähdejännitteen käämitykseen. Lähdejännitteen suuruus voidaan johtaa kaavasta 1. (Hietalahti, Kauppinen & Wickström 2020, 19–23.)

$$E = \frac{2 \cdot \pi \cdot f}{\sqrt{2}} \cdot \xi_k \cdot N \cdot \theta_m \quad \text{KAAVA 1}$$

f = taajuus (Hz)

ξ_k = käämityskerroin

N = yhden vaiheen johdinkierrosten määrä (lkm)

θ_m = yhden navan päävuo (C)

Indusoidun jännitteen taajuus määräytyy akselin pyörimisnopeuden ja koneen napaparinluvun mukaan. Jos pyörimisnopeus on vakio, mikä on generaattorin normaali käyttötilanne, indusoidun jännitteen tasoa voidaan säätää muuttamalla roottorin magneettivuon arvoa. Taajuuden riippuvuus roottorin pyörimisnopeudesta voidaan laskea kaavan 2 mukaan. (Hietalahti, Kauppinen & Wickström 2020, 21–23.)

$$f = \frac{n_s}{p} \quad \text{KAAVA 2}$$

f = taajuus (Hz)

n_s = akselin pyörimisnopeus (m/s)

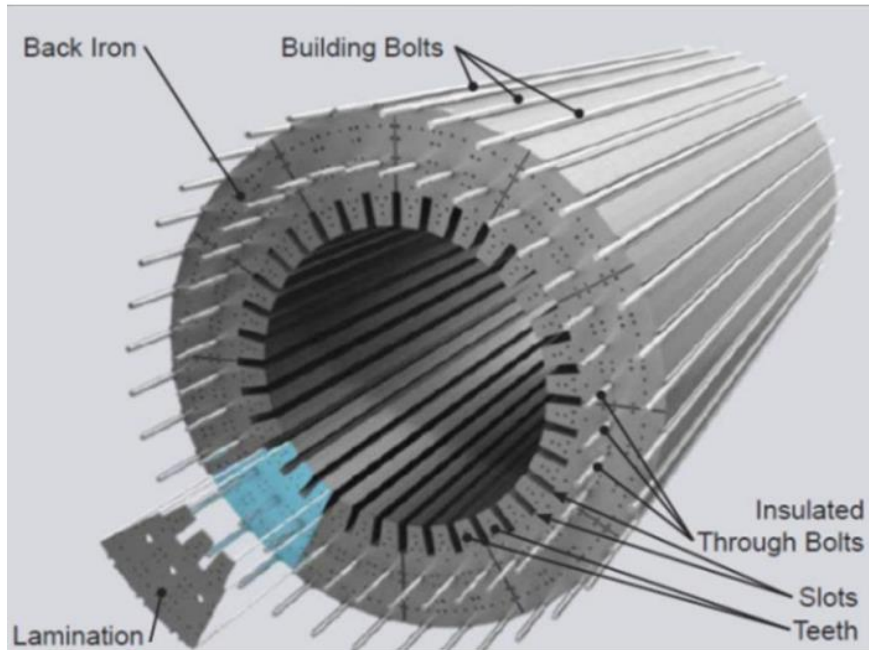
p = napapari luku (lkm)

3.2 Staattori

Staattori koostuu kolmesta ydinkomponentista: runkorakenteesta, levypaketista ja käämityksestä.

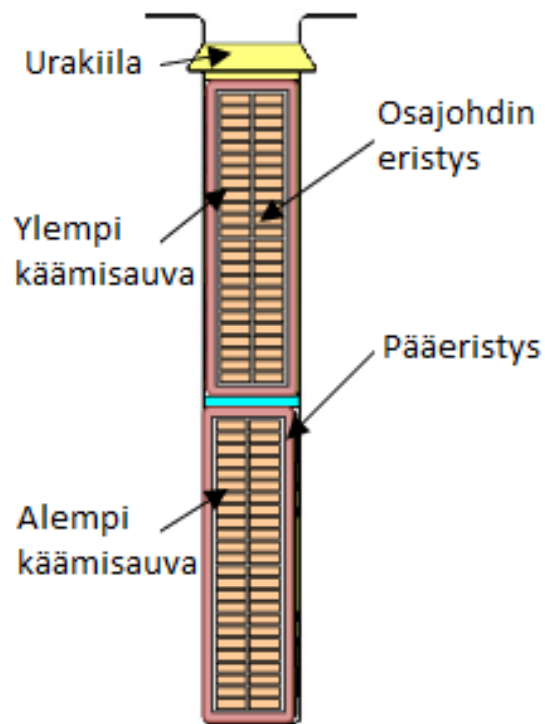
Staattorin runkorakenne toimii tukena staattoriytimelle. Sen on kestävä staattorinytimestä johtuvaa lämpenemisen ja jäähtymisen aiheuttamaa laajenemista ja supistumista sekä staattoriytimessä syntyvien magneettikenttien aiheuttamia voimia. Runkorakenne toimii myös generaattorin jalustana ja ulkokuorena. Se on suunniteltava kestäämään generaattorin paino, pyörivän koneen tärinä ja voimajärjestelmän häiriöistä sekä generaattorin vioista aiheutuvat hetkelliset rasitukset. Vetyjäähdytteisissä generaattoreissa runkorakenne toimii myös paineastiana vetykaasulle ja tukena vetyjäähdyttimille. (Klempner, Geoff & Kerszenbaum 2004, 46–48.)

Staattorin levypaketti eli staattorin ydin koostuu toisistaan eristetyistä teräslevyistä. Teräslevyt ovat segmentoituneita ja niistä muodostuu levypaketin kehä (kuva 3). Kehä muodostuu 10–24 erillisestä teräslevystä riippuen siitä, onko staattori kaksi- vai nelinapainen. Teräslevyt porrastetaan edellisen kerroksen suhteen. Porrastuksella kasvatetaan levypaketin mekaanista lujuutta merkittävästi. Porrastuksella myös pienennetään magneetti-piirin epäsymmetrian vuoksi syntyvää roottorin akselijännitettä. Teräslevyt eristetään kummaltakin puolelta estämään pyörrevirtojen leviämistä viereisiin teräslevyihin. Eristäminen vähentää pyörrevirtahäviöitä ja niiden aiheuttamaa lämpötilan nousua. (Klempner, Geoff & Kerszenbaum 2004, 41–46.)

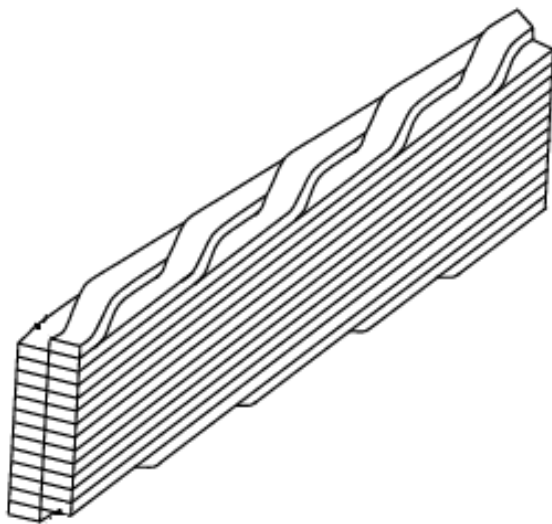


KUVA 3. Terässegmenttilevy levypaketissa (Power Service Group 2016)

Staattorikäänitys koostuu eristetyistä kuparijohtimista eli käämisauvoista, jotka on sijoitettu symmetrisesti levypaketin uriin. Jokaisessa urassa on kaksi johdinta päällekkäin: pintasauva, joka sijaitsee uran pinnassa, ja pohjasauva, joka on uran pohjassa (kuva 4). Pyörrevirtojen vaikutusten vähentämiseksi johtimet koostuvat useista kuparisäikeistä eli osajohtimista, jotka ovat eristettyjä toisistaan mutta yhdistettyjä käämisauvan kummassakin päässä. Magneettikentän ero uran ala- ja yläosan välillä voi luoda osajohtimien ylä- ja alasäikeiden välille ylimääräisiä kiertovirtoja. Kiertovirtojen vähentämiseksi jokaisessa käämisauvassa osajohtimet ovat Roebel-transponoituja eli punottu siten, että jokainen osajohdin kiertää jokaisen paikan osajohdinpinossa vähintään kerran käämisauvan koko pituudelta (kuva 5). (Klempner, Geoff & Kerszenbaum 2004, 67–69.)



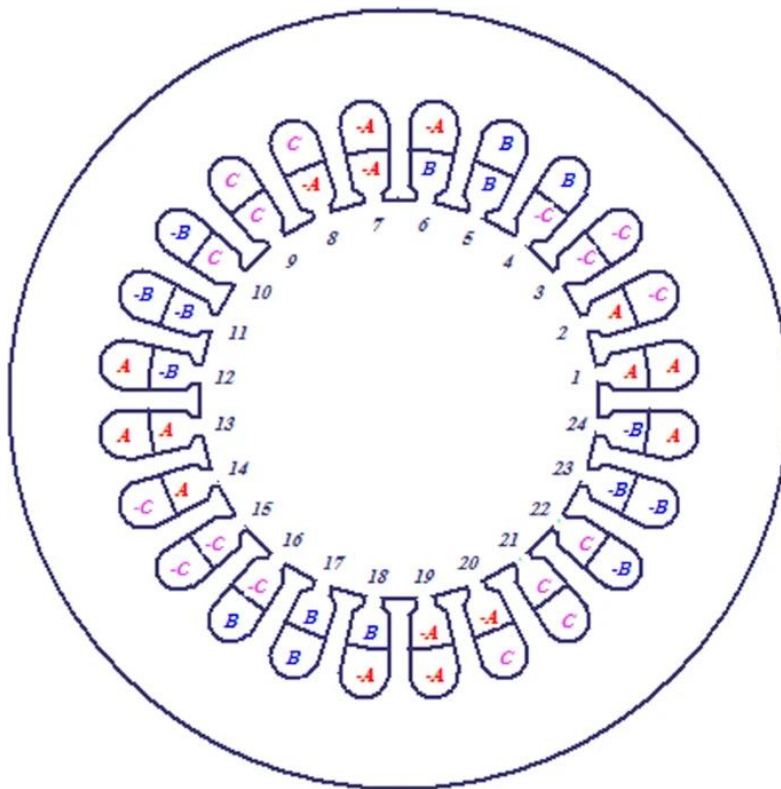
KUVA 4. Kuparijohtimet urassa (Fujita ym. 2016)



KUVA 5. Roebel transponoitu käämisauva (Fujita ym. 2016)

Staattorikäänitys on jaettu kolmeen vaiheeseen. Jokaista vaihetta kohti ovat käämisauvaparit asetetaan uriin siten, että niiden jännitehuippujen välinen ero on

120 astetta. Kuvassa 6 on esimerkki vaiheiden asettelusta levypaketin urissa. Vaiheet on lähes aina toisesta päästä tähtikytettyjä. Tähtikytettä mahdollistaa neutraalipisteen maadoituksen, käämityksen releensuojauksen sekä luo symmetriaa vaiheiden välille. Kun samaan vaiheeseen kuuluvat käämisauvat liitetään yhteen, muodostuu sauvoista käämikierrokset. (Klempner, Geoff & Kerszenbaum 2004, 61–69.)



KUVA 6. Esimerkki käämisauvojen asettelusta 24-uraisessa staattorissa (*Journal of Electrical Engineering & Technology* 2020)

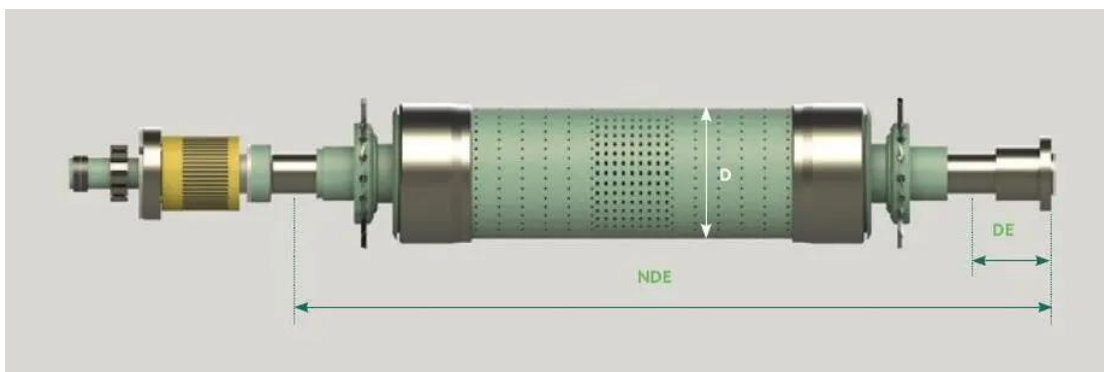
Käämisauvoissa virtaava virta luo jokaisessa urassa reaktiovoiman, joka vaihtelee virran tason ja virtaussuunnan mukaan. Tämä aiheuttaa vaihtosyklien aikana käämisauvojen välillä hylkiviä ja vetäviä voimia. Näin ollen käämisauvat kohtavat jatkuvia värähtelyvoimia ura-alueella. Käämisauvat kiilataan uraan tiukasti estämään sauvojen värähtelyliikkeen ja välttämään värähtelystä aiheutuvat eristeen hankausvauriot. (Klempner, Geoff & Kerszenbaum 2004, 73.)

Vaikka käämisauvat on kiilattu tiukasti uraan, on käämisauvan pinnan ja levypaketin uran välissä runsaasti onteloita. Tarpeeksi korkeissa jännitteissä onteloissa syntyy voimakkaita osittaispurkauksia. Onteloissa syntyviä osittaispurkauksia vältetään käyttämällä johtavaa nauhaa käämisauvan ympärillä levypaketin ura-

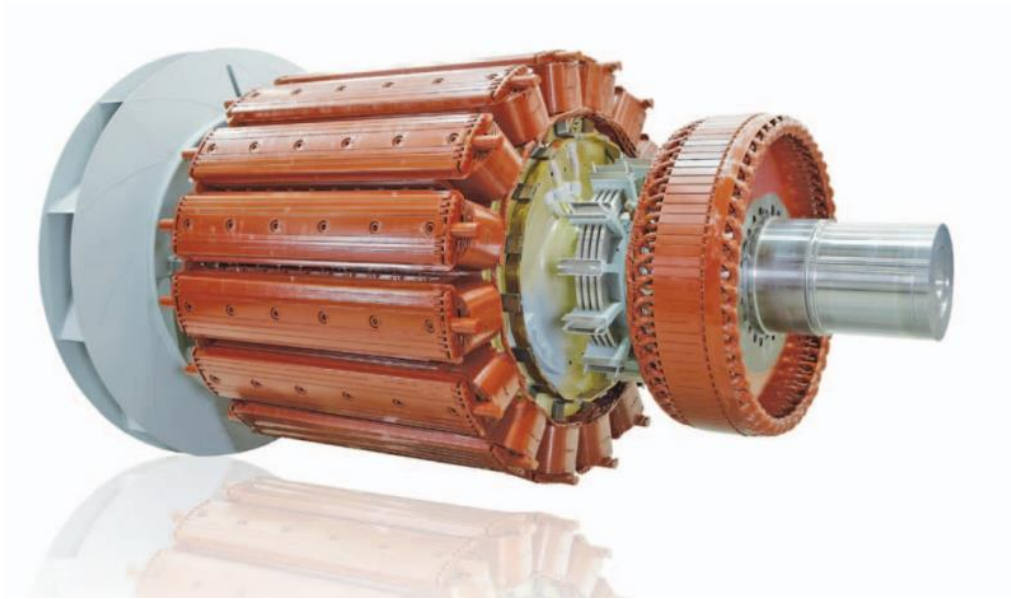
alueella. Johtava nauha saa käämisauvan pinnan lähes ontelottomaksi sekä liittää sauvan eristyksen pinnan levypaketin maapotentiaaliin. Suuresta potentiaalierosta syntyvää kipinöintiä staattorin käämityksen ura-alueen ja käämityksen pään välillä estetään käyttämällä puolijohtavaa nauhaa. Puolijohtavalla nauhalla saadaan käämieristyksen pinnan potentiaalijakauma tasaiseksi ura-alueen ja kääminpään välillä, jolloin potentiaaliero on pieni. (Hietalahti, Kauppinen & Wickström 2020, 68.)

3.3 Roottori

Tahtikoneet jaetaan yleisesti kahteen eri roottorirakennetyyppiin: lieriörakenteinen eli umpinaparoottori (kuva 7) ja varsinaparakenteinen eli avonaparoottori (kuva 8). Umpinaparoottoreita käytetään yleensä nopeakäyntisissä tahtikoneissa kuten höyry- ja turbiinilaitoksen generaattoreissa. Avonaparoottoreita käytetään yleensä hidaskäyntisissä tahtikoneissa kuten vesivoimalaitoksien generaattoreissa. (Aura & Tonteri 1996, 215.)



KUVA 7. Umpinaparoottori (Fortum, Turbo and Generator Services)

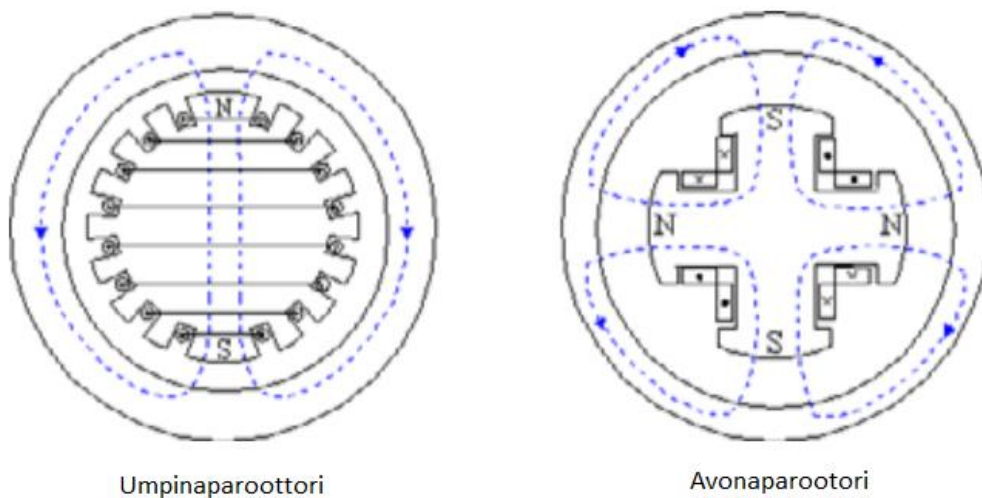


KUVA 8. Avonaparoottori (ABB catalogue)

Umpinaparoottorin rakenne on sylinterimäinen. Magnetointikäämitys on sijoitettu roottorin akselin suuntaisiin uriin. Umpinaparoottorit koneistetaan tyypillisesti suuresta rautatakeesta. Roottori on magneettisilta ominaisuuksiltaan lähes magneettisesti symmetrinen eli magneettivuoto vaikuttaa roottorirautaan tasaisesti navan ja magnetointikäämin sijoituskohdan kautta. (Hietalahti 2011, 87.)

Avonaparoottori koostuu erillisistä navoista. Magnetointikäämitys käämitään navan ympärille lattakuparista tai muotolangasta. Avonaparoottori on magneettisilta ominaisuuksiltaan magneettisesti epäsymmetrinen eli napa johtaa hyvin magneettivuota navan kohdalla, mutta huonosti napojen välissä johtuen suuresta il-mävälisestä. (Hietalahti 2011, 87.)

Kuvassa 9 on esitetty avo- ja umpinapaisen roottorin magneettikenttäkuviot.

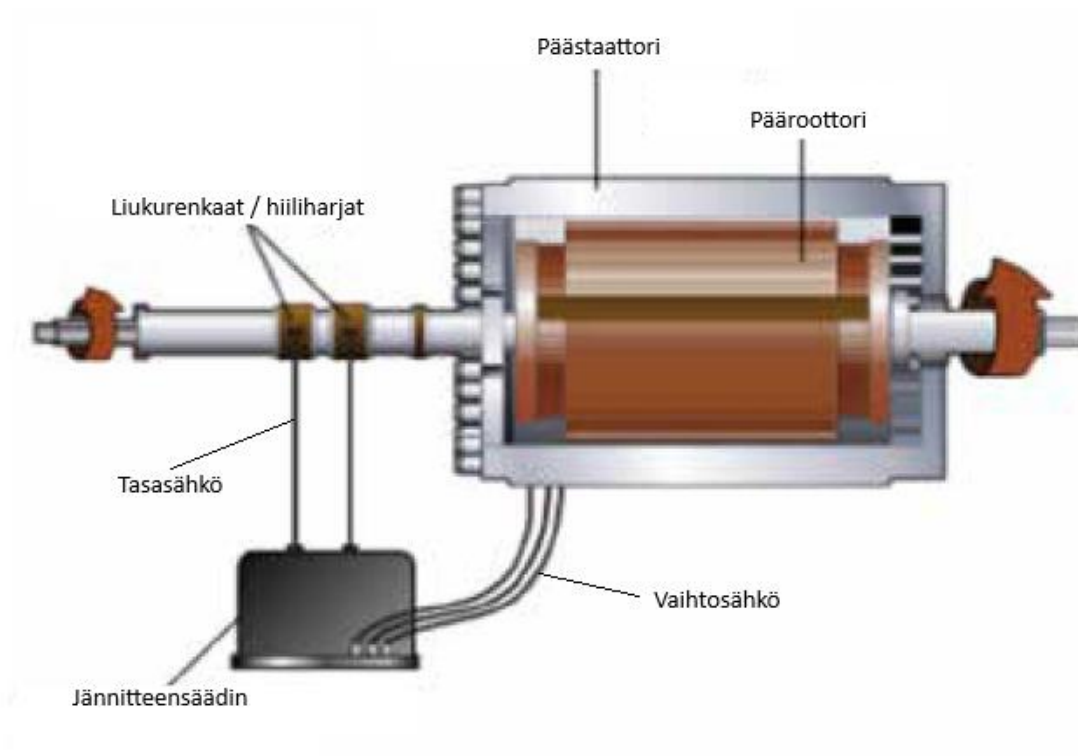


KUVA 9. Umpi- ja avonapaisen roottorin magneettikenttäkuviot (Korpinen 1998)

3.4 Magnetointi

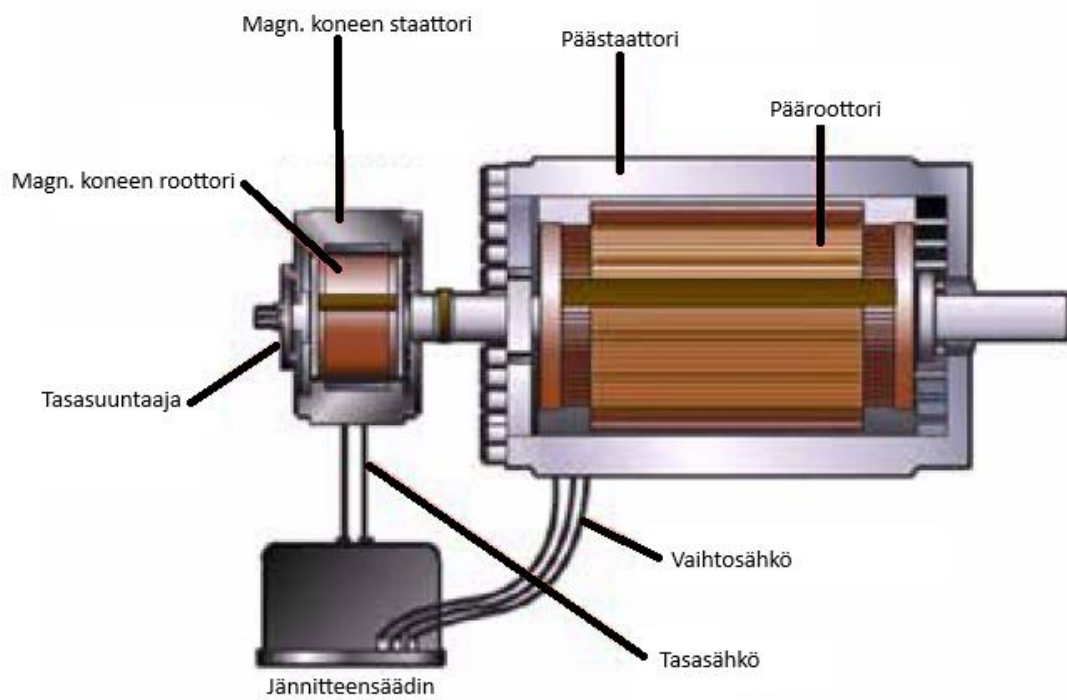
Tahtigeneraattorit voidaan jakaa magnetoititavan perusteella kahteen eri tyyppiin, harjallisiin ja harjattomiin. Harjattomat generaattorit ovat magnetoitijärjestelyiltään yksinkertaisia verrattaessa harjalliseen magnetoitijärjestelyyn ja siksi suurin osa nykyään valmistettavista generaattoreista on harjattomia. (Hietalahti, Kauppinen & Wickström 2020, 38.)

Harjallisessa magnetoinnissa (kuva 10) roottorin magnetoimisvirta tuodaan ulkoisesta tasasähkö- tai vaihtosähkölähteestä hiiliharjojen ja teräksestä tai messingistä valmistettujen liukurenkaiden avulla roottorikäämiin. Tasasähkölähde voi olla samalle akselille pääkoneen kanssa asennettu magnetoitigeneraattori tai täysin erillinen tasasähkölähde. (Aura & Tonteri 1996, 217–218.) Hiiliharjojen ja liukurenkaiden vaatiman säännöllisen huoltamisen ja hiiliharjoista syntyvän haitallisen pölyn takia pyritään nykyään käyttämään magnetoitijärjestelmänä magnetoitikonetta (Hietalahti, Kauppinen & Wickström 2020, 41).



KUVA 10. Harjallinen magnetointi (muokattu Snyder 2025)

Harjattomassa magnetoinnissa (kuva 11) roottorin magnetoimisvirta johdetaan roottorille magnetointikoneella. Magnetointikoneen roottori on kiinnitetty pääkoneen akseliin ja magnetointikoneen staattori on kiinteä ja osana pääkoneen runkoa. Magnetointikoneen staattori magnetoidaan tasavirralla, jolloin pyörivän magnetointikoneen roottorin kolmivaihekäämitykseen indusoituu virta. Roottorissa on kiinteästi asennettu diodisilta, joka tasasuuntaa roottorissa syntyvän kolmivaihevirrän. Tasasuunnattu magnetointivirta johdetaan roottorikäämitykseen magnetointitietä pitkin. (Hietalahti, Kauppinen & Wickström 2020, 38.)



KUVA 11. Magnetoitinkone (muokattu Snyder 2025)

4 OSITTAISPURKAUKSET PYÖRIVIEN SUURJÄNNITTEKONEIDEN ERISTEESSÄ

Osittaispurkaukset ovat sähköisiä purkauksia, jotka tapahtuvat kahden tai useamman elektronin välillä väliaineessa. Purkauksia syntyy, kun sähkökentän arvo ylittää väliaineen läpilyöntilujuuden. Osittaispurkauksien energiatasot ovat pienempiä kuin täydellisessä sähköisessä purkauksessa. Osittaispurkaukset jaotellaan pintapurkauksiin, jotka tapahtuvat eristemateriaalin pinnalla sekä sisäisiin purkauksiin, jotka tapahtuvat eristemateriaalin sisällä. Täydellistä purkausta kutsutaan läpilyöntiksi, kun purkaus kulkeutuu kokonaan eristeen läpi. Osittaispurkaukset ovat normaali ilmiö kaikissa suurjännitteisissä laitteistoissa, mutta purkauksien kehittymistä pidetään merkinä sähköeristeen vikaantumisesta. Purkausten valvominen ja havainnoiminen parantaa mahdollisuutta ennaltaehkäistä mahdollisia purkausten kehittymiä ja niiden aiheuttamia vahinkoja. (Dmitriev ym. 2023, 11–12.)

4.1 Osittaispurkausten syntyminen

Sähköiset eristeet eivät ole täydellisiä. Eristeiden läpi kulkee aina jonkin verran vuotovirtaa. Kun sähkökentän voimakkuus ylittää materiaalin läpilyöntilujuuden, virta kulkeutuu eristeessä ionisaation seurauksena. Eristemateriaalin ionisoituminen tarkoittaa, että eristemateriaalin elektronit irtoavat ja muodostavat ioneista ja elektroneista koostuvaa kaasua. Kaasun ionit ja elektronit syntyvät elektronivyöryn seurauksena. Elektronivyöry on prosessi, jossa yksi vapaa elektroni liikkuu sähkökentän vaikutuksesta ja törmää neutraali atomin kanssa, vapauttaen lisäelektrodin sekä jättäen jälkeensä positiivisen ionin. Jokaisen törmäyksen jälkeen elektronien määrä kaksinkertaistuu ja syntyneet elektronit pystyvät ionisoimaan uusia atomeja. Vapaat elektronit ovat suuressa osassa vuotovirtojen syntymistä, sillä elektronivyöryprosessi alkaa aina yhden vapaan elektronin altistuksessa voimakkaalle sähkökentälle. Elektronivyöryprosessissa syntyneet elektronit ja ionit kykenevät johtamaan virtaa elektrodien välillä, yleensä virta ei ylitä koko elektrodien väliä ja tätä ilmiötä kutsutaan osittaispurkaukseksi. (Dmitriev ym. 2023, 13–15.)

4.2 Osittaispurkaukset pyörivissä sähkökoneissa

Eristemateriaalissa dielektrisesti epähomogeeniset kohdat ovat paikkoja, joissa sähkökentät voivat kasvaa ja nämä ovat ominaisia paikkoja osittaispurkausten kehittymiselle. Osittaispurkaukset vaativat yleisesti kaasutilavuuden kehittyäkseen. Tällaisia kohtia ovat esimerkiksi kaasuontelot eristeessä, ontelot johtimien vieressä sekä eristeen rajapinnassa. Eristemateriaalin dielektrisyyteen vaikuttavia tekijöitä ovat eristeen rajapinnan ominaisuudet, ontelossa olevan kaasun tyyppi sekä kaasun paine. Yleisiä syitä eristemateriaalissa syntyneisiin epähomogeenisiin kohtiin ovat valmistusvirheet, käytön aikana tapahtuva kuluminen sekä osittaispurkausten aiheuttama eristeen kuluminen. (IEC 60034-27:2006, 19–24.)

Pyörivissä sähkölaitteissa on useita mahdollisia syntypaikkoja osittaispurkauksille. Osittaispurkausten sijaintiin, määrään, ominaisuuksiin ja kehittymiseen vaikuttaa merkittävästi laitteiston suunnittelu, käytettävät materiaalit, valmistusmenetelmät, käyttötavat ja huoltaminen. Eristeen sisällä syntyvät kaasuontelot ja sisäinen delaminoituminen eli eristekerroksien halkeilu voivat kehittyä lämpövanhenemisen, väärän käyttötavan, värähtelyn tai eroosion seurauksena. Eri paikassa ja eri syystä syntyvillä osittaispurkauksilla on ominaisuuksia, joiden perusteella niitä pystytään paikantamaan ja tulkitsemaan. (IEEE 1434: 2000, 7–9.)

Sisäisellä delaminoitumisella tarkoitetaan dielektrisen eristeen eristyskerrosten erottumista. Sisäinen delaminoituminen johtuu tyypillisesti mekaanisesta rasituksesta kuten puristautumisesta tai venymisestä, jonka seurauksena eristekerrosten väliin pääsee ilmaa ja syntyy ontelo. Onteloissa oleva kaasu toimii sähköisenä polkuna, joka johtaa sähkövarausten kertymiseen ja syntyy osittaispurkauksia. Eristeen sisällä tapahtuvat osittaispurkaukset voivat aiheuttaa eristeen heikkenemistä, josta seuraa eristemateriaalin sähköisen lujuuden heikentyminen.

Urapurkaukset ovat osittaispurkauksia, joita esiintyy sähköisten koneiden urissa. Urapurkaukset ovat tyypillisesti energialtaan suurempia kuin muut osittaispurkaustyyppit ja ovat tuhoisa purkaustyyppi sähköisille koneille. Urapurkaukset aiheuttavat eristemateriaalin heikkenemistä ja voivat aiheuttaa myös urassa olevan kuparijohtimen heikkenemistä, josta seuraa kuparijohtimen lämpötilan nousu ja täten vanhenemisen nopeutuminen. Tyypillisiä syitä ura-alueen purkauksiin ovat

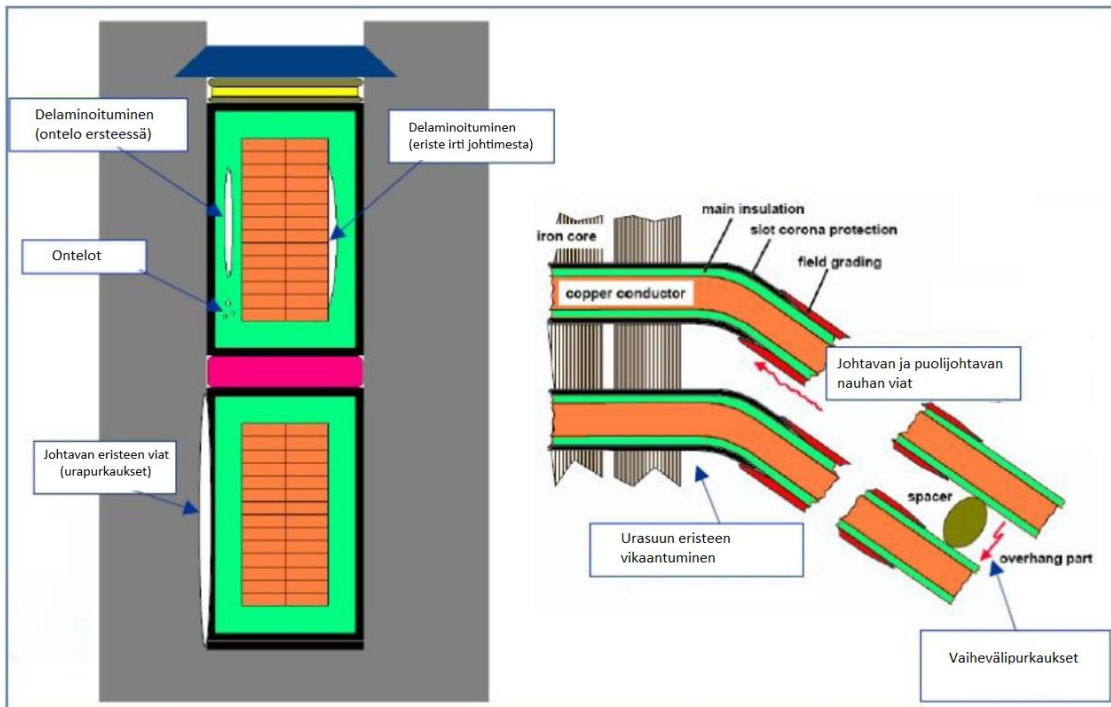
urassa olevat ilma- ja metallihiukkaset, vesi, muu lika, urassa olevan käämisauvan johtavan pinnoitteen ja uran hankauksesta johtuva eristeen kuluminen, johtavan pinnoitteen katkokset, eroosio, erottuminen ja huokoisuus. (Dmitriev ym. 2023, 30–31.)

Osittaispurkauksia esiintyy myös ura-alueen ulkopuolella käämityksen päässä ja urasuualueella. Kuvassa 12 on esimerkki urasuualueen osittaispurkauksen aiheuttamasta eristeen kulumisesta. Tyypillisiä syitä ura-alueen ulkopuolella tapahtuville osittaispurkauksille ovat mekaaniset vauriot eristeessä sekä eristeen liikaantuminen. Urasuualueen purkaukset syntyvät tyypillisesti urassa olevan käämisauvan johtavan pinnoitteen ja urasuun alueella olevan puolijohtavan pinnoitteen vikaantumisen johtuvan potentiaalieron takia. (IEEE 1434: 2000, 7–9.)

Kuvassa 13 on esitetty tyypillisiä kohtia osittaispurkauksille ura-alueella sekä ura-alueen ulkopuolella.



KUVA 12. Osittaispurkauksen jälki urasuualueella (TGS Finland Oy 2025)



KUVA 13. Tyypillisiä purkauskohtia käämityksessä ura- sekä ura-alueen ulkopuolella (muokattu Mukhtar 2021)

4.3 Osittaispurkausmittaukset

Jatkuvat osittaispurkaukset heikentävät voimakkaasti suurjännitesähkölaitteiden eristystä ja voivat johtaa lopulta sähkölaitteen vikaantumiseen. Osittaispurkauksien säännöllinen havainnointi ja diagnosointi ovat tärkeässä roolissa suurjännitelaitteistojen kunnossapitoa ja huoltosuunnitelmaa. Säännöllisellä osittaispurkauksien valvonnalla pystytään pidentämään laitteistojen käyttöikä ja välttämään mahdollinen laitteen vikaantuminen ja siihen liittyvät korjaus kustannukset. (Cruz ym. 2022, 2.)

Pyörivien koneiden osittaispurkaustestit voidaan suorittaa käynnissä olevalle koneelle, jolloin niitä kutsutaan on-line mittauksiksi. Testit voidaan myös suorittaa seisovalle koneelle, eli off-line mittauksina. Mittauksia suunniteltaessa on otettava huomioon mittaustarkoitus, sillä molemmilla testityyleillä on omat hyvät ja huonot puolensa. (IEEE 1434: 2000, 30.)

4.3.1 On-line mittaus

Markkinoilla tarjolla olevat laitteet antavat mahdollisuuden suorittaa on-line mittauksia jaksottaisesti tai jatkuvasti koneiden ollessa käynnissä. On-line mittauksien aikana pystytään ottamaan huomioon koneen kunnon tarkastelun kannalta vaikuttavia tekijöitä, kuten kuormitukset, jännitteet, virrat, lämpötilat ja kosteus. On-line mittaukset mahdollistavat trendiseuraamisen, se on koneiden kunnossapidon kannalta tärkeä työkalu koneen vanhenemisen ja kunnon seurantaan. Trendiseuraaminen tarjoaa myös mahdollisuuden suunnitella mahdollisia huoltoja seisakkien aikana. Sen avulla pystytään vähentämään kustannuksia. (IEEE 1434: 2000, 30–31.)

On-line mittaukset tarjoavat hyödyllistä tietoa koneen kunnosta. Saatujen mitaustulosten perusteella ei voida tehdä lopullisia johtopäätöksiä koneen kunnosta. Käämityksen osittaispurkaustuloksiin voivat vaikuttaa sähköinen kohina, vaimennus ja kaistanleveysongelmat. Nämä tekijät voivat luoda harhaanjohtavia tuloksia, eivätkä kuvaa todellista koneen kuntoa. Mittausdataa käytetään suuntaa antavana tietona koneen kunnosta ja lopullisia päätelmiä varten tulisi tehdä laajempia mittauksia koneelle. (IEEE 1434: 2000, 30.)

4.3.2 Off-line mittaus

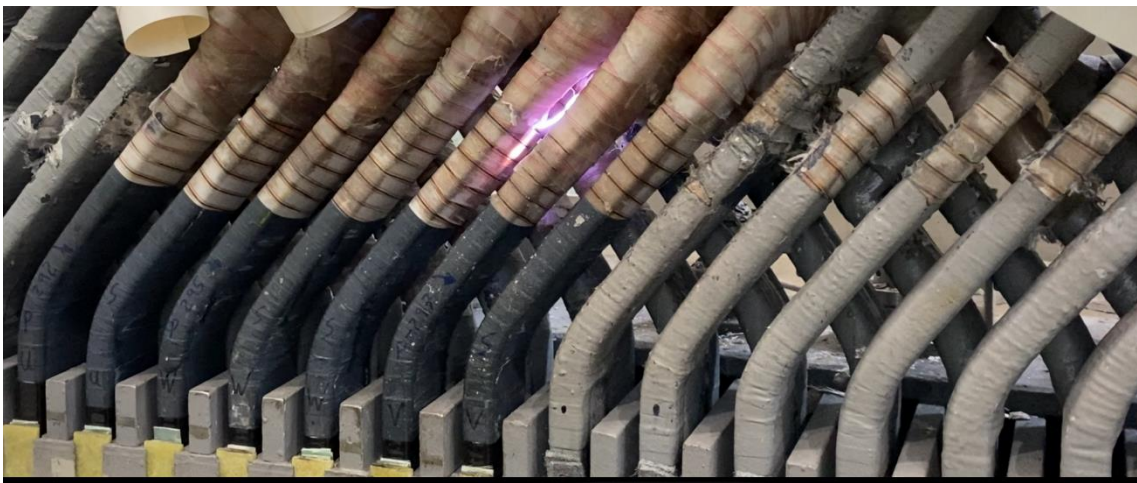
Off-line mittaukset toimivat hyvänä täydennyksenä On-line mittauksille. Off-line mittaukset antavat kattavamman ja luotettavamman kuvan käämityksen eristyksen kunnosta. On-line mittauksiin verrattuna off-line mittaukset ovat huomattavasti kalliimpia. Mittauksien ajaksi mitattava kone joudutaan ajamaan alas tuotannosta sekä erottamaan sähköverkosta. (IEEE 1434: 2000, 31.)

On-line- ja off-line mittaukset eivät ole aina vertailukelpoisia johtuen eri mitausolosuhteista. Pyörivän koneen värähtely ja lämpölaajeneminen käämityksessä voivat vaikuttaa saatuihin mitaustuloksiin. Off-line mittaukset suoritetaan seisovalle koneelle, joten sähkömekaanista tai mekaanista rasitusta ei ole käämityksessä mittauksien aikana. Käämin lämpötila on seisovalla koneella yleensä alhaisempi, mikä on huomioitava mittauksia tehdessä. Off-line mittauksissa jännite jakautuu tasaisesti käämitykselle verrattaessa on-line mittaukseen, jolloin

nollapotentialissa ei ole jänniterasitusta. Tämä voi saada aikaan osittaispurkausaktiivisuutta lähellä nollapotentialia, jota ei näy on-line mittauksessa. (IEEE 1434: 2000, 31.)

Off-line mittauksessa käämitys energisoidaan erillisellä jännitelähteellä. Tämä mahdollistaa yksittäisen vaiheen energisoinnin kerrallaan, mikä mahdollistaa vaiheiden välisen purkauksien havainnoimisen. Off-line mittaus pystytään suorittamaan lähes häiriöttömänä. Tämä johtuu lähinnä siitä, että mitattava laite on erotettu yleisestä sähköverkosta ja sitä energisoidaan erillisellä jännitelähteellä. Erillisen jännitelähteen kautta saattaa siirtyä pientä häiriösignaalia käämitykseen, mutta tämä pystytään helposti erottelamaan mittauksesta. Kone voidaan tarkastaa seisakin aikana myös aistinvaraisesti. Sen avulla pystytään mahdollisesti tunnistamaan osittaispurkauslähteitä kipinöinnin tai äänen perusteella. (IEEE 1434: 2000, 31.)

Kuvassa 13 on off-line mittauksien aikana visuaalisesti havaittu kipinöintiä vesivoimageneraattorin staattorin ura-alueen ulkopuolella.



KUVA 13. Visuaalinen kipinähavainto off-line mittauksessa. (TGS Finland Oy 2025)

5 AKUSTINEN MITTAUSTEKNIikka

Akustiset kamerat ovat mittalaitteita, joiden avulla pystytään visualisoimaan ultraääniä ja paikantamaan niiden lähteitä. Akustisten kuvantamislaitteiden tarkkuus ja käytännöllisyys ovat kehittyneet viime vuosien aikana. Akustisten mittalaitteiden (kuva 14) hyödyntäminen on kasvanut kehityksen ansiosta merkittävästi teollisuusaloilla sekä muilla tekniikan aloilla. Akustiset mittalaitteet ovat tehokas työkalu laitteiden ja järjestelmien ennakoivassa huoltamisessa. Vialliset laitteet ja järjestelmät tuottavat ultraääniä. Nämä äänet pystytään saamaan akustisten mittalaitteiden avulla näkyviin ja vikatilanteet pystytään ottamaan huomioon ajoissa. (Boston Dynamics 2024.)



KUVA 14. Osittaispurkauksien havainnoimiseen käytettävä äänikamera. (Infra-dex 2025a)

5.1 Akustisen kuvantamisen perusteet

Ääni on paineaalto, joka liikkuu ilmassa, eristeessä tai muussa väliaineessa. Äänen intensiteettiä mitataan desibeleinä (dB), se ilmaisee ääniaallon amplitudin. Kovissa äänissä äänen paine on iso ja ääniaallon amplitudi on korkea. Ääniaallolla on taajuus, jolla se etenee väliaineessa. Taajuutta mitataan hertseinä (Hz), se ilmaisee äänen sävelkorkeutta. Ihmisen korva pystyy kuulemaan ääniä 20Hz:n ja 20kHz:n väliltä. Osittaispurkauksien äänen taajuus alue on yleisesti 32 kHz tai korkeampi purkauksien luonteesta riippuen. (Boston Dynamics 2024.)

Akustiset kamerat koostuvat mikrofoniyhdistelmästä, äänenkäsittelyosasta sekä näyttöstä. Mikrofoniryhmät koostuvat tyypillisesti kymmenistä tai sadoista mikrofoneista. Mikrofoniryhmien koot voivat muuttua kameran mallin ja valmistajan mukaan. Mikrofonit havainnoivat kohteesta syntyvää ääntä kameraan asetettujen asetusten mukaisesti. Kameran äänenkäsittelyosa yhdistää optisen ja akustisen kuvan kameran näytölle. Kohteesta syntyvää ääntä pystytään tutkimaan erilaisilla menetelmillä: saapumisaikaerolla, saapumiskulmalla, näiden yhdistelmällä ristikorrelaatiolla sekä säteenmuodostumisella. Äänen intensiteettiä voidaan mitata akustisen anturin avulla. Joissain kameroissa on myös äänenhiukkasten tai paineen mittaussominaisuuksia. (Sensor tips 2023.)

Saapumisaikaeromenetelmää käytettäessä tarvitaan tasainen väliaine ultraäänsignaalin kulkeutumiselle. Akustisten aaltojen on kuljettava suoraan äänilähteeltä sensorille. Saapumisaikaeromenetelmässä akustisten signaalien saapumisaikojen erot antureille tallennetaan ja aikaeroja osoittavat epälineaariset yhtälöt ratkaistaan. Tämän avulla saadaan osittaispurkauksien sijainti selvitettyä. Menetelmän käyttöä hankaloittavat akustisten signaalien etenemisreitit sekä mahdolliset väliaineet. Eri väliaineissa kulkeutuvien signaalien nopeudet muuttuvat väliaineesta riippuen, mikä vaikuttaa aikaeroista saatuihin tuloksiin. (Wang ym. 2018.)

5.2 Akustisen kameran käyttö osittaispurkauksen havainnoimisessa

Akustinen osittaispurkauksen havaitseminen perustuu purkauksista syntyvään akustiseen aaltoon eli purkauksen aiheuttamaan ultraääneen. Purkauksista syntyvät akustiset aallot etenevät väliaineessa eli suurjännitelaitteen eristettä pitkin

tai eristeen sisällä olevissa ilmataskuissa olevassa kaasussa eristeen pintaan. Neste- ja kaasueristyksessä äänikentän säteily etenee ideaalisesti pallomaisella paineella pitkittäisinä aaltoliikkeinä. Kiinteissä eristyksissä aallon eteneminen on mutkikkaampaa. Osittaispurkauksesta syntyvä teho liikkuu ultraääninä ja nämä ääniaallot pystytään havaitsemaan akustisten antureiden avulla. Akustiset anturit voivat olla piezo-sähköantureita, kondensaattorimikrofoni tai akusto-optisia antureita. Mittalaite muuttaa sensoriin saapuneen äänen tulkittavaan muotoon. Havainnointiin käytettävä taajuusalue on tyypillisesti ultraäänialue: noin 20 kHz – 250 kHz. Myös käytetään kuuloaluetta noin 100 Hz – 20 kHz. Taajuusalue muokautuu käytettävän eristemenetelmän mukaan. (IEC TS 62478:2016, 15.)

Osittaispurkauksesta syntynyttä akustisen aallon ilmiötä kutsutaan akustiseksi emissioksi (AE). Purkauksen tapahtuessa vapautunut lämpöenergia voi haihtua aiheuttaen laajenemista ja supistumista ja mahdollisesti ympäröivän materiaalin höyrystymistä. Tämä ilmiö tuottaa akustisen aallon. AE:ssa syntynyt energia on verrannollinen purkauksessa vapautuvaan energiaan. Tämän takia pystytään päättelemään osittaispurkauksien varauksien määrä varaussiirron avulla, koska vapautunut energia on verrannollinen varaukseen. Jännitteellä, jolla osittaispurkaus syntyy, ei ole vaikutusta AE:n taajuuteen tai aikamuotoihin. Akustisten antureiden luomien spektrien avulla on mahdollista luokitella osittaispurkaukset eri tyyppeihin, kun mittauskaistaa on tarpeeksi. (Kirkcaldy, Lewin, Lees & Rogers 2022.)

Vaihekorrelaatiotiedolla voidaan analysoida saatuja tuloksia. Vaihekorrelaatiota käytetään avuksi akustisten mittauslaitteiden antamissa PRPD-kaavioissa. Vaihekorrelaatio saadaan sovitettua jännitteen aaltomuotoon lisäsynkronointimekanismilla, koska jännitteen aaltomuoto ei esiinny AE:ssa. Tämän synkronointi voi olla viiveessä verrattaessa sähköiseen mittaukseen, sillä akustisen aallon on kuljettava väliaineen tai väliaineiden läpi akustiselle sensorille. Tämän takia PRPD-kaavioissa voi esiintyä vaiheviiveitä. (Kirkcaldy ym. 2022.)

Sisäistä delaminoitumista pystytään havaitsemaan mittaamalla ultraääniaaltojen äänen nopeutta materiaalissa ja aaltojen vaimennusta. Äänen nopeutta käytetään materiaalin homogeenisuuden mittaamiseen ja vaimennusta ilmarakojen esiintymisen havaitsemiseksi kerrosten välillä. (Dmitriev ym. 2023, 29.)

5.3 Akustiseen mittaamiseen vaikuttavia tekijöitä

Antureihin saapuvien äänien signaalin kulku-aika ja vaimennus ovat voimakkaasti riippuvaisia väliaineen materiaalista. Syvällä eristyksessä syntyvien osittaispurkauksien ultraäänisignaalit vaimenevat voimakkaasti. Akustiset sensorit eivät pysty havaitsemaan vaimentunutta signaalia tai mittalaitteen herkkyys ei ole riittävä. Akustiset signaalit myös kerrostuvat johtuen heijastuksista. Kerrostuminen vaikeuttaa osittaispurkauksia aiheuttavan vian tunnistamista ja paikantamista. (Aro, Elovaara, Karttunen, Nousiainen & Palva 2015, 200–201.)

5.4 Kuvantamisessa huomioitavat asiat

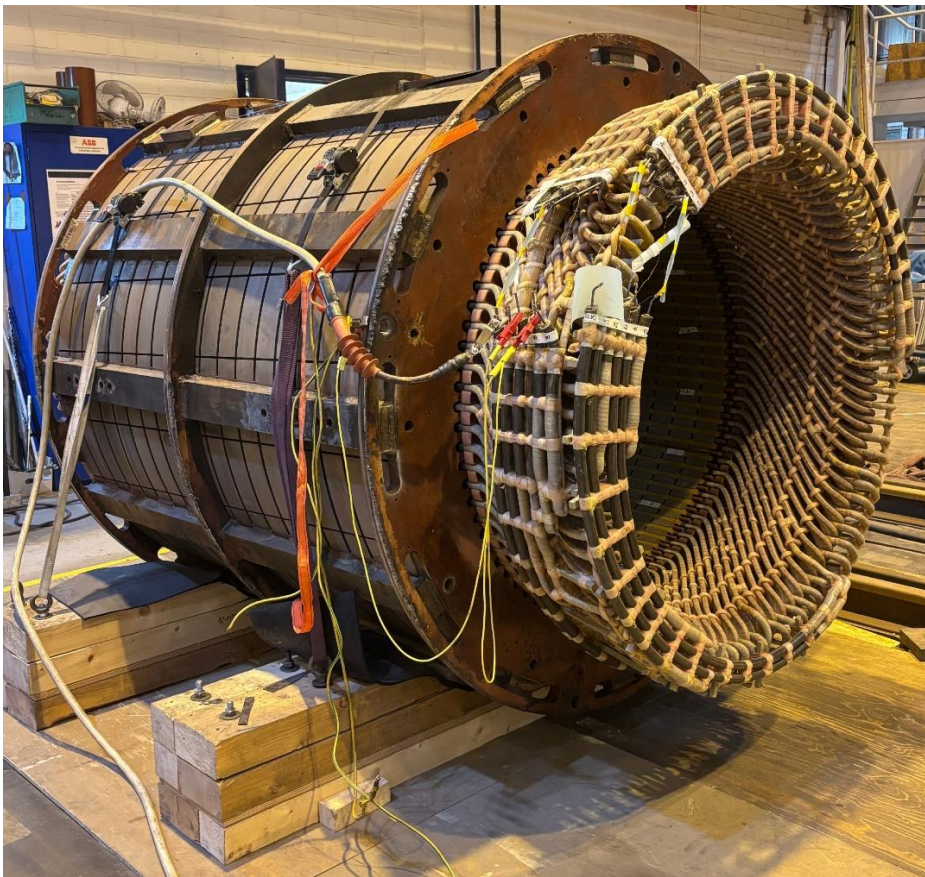
Akustisien kameroiden valmistajia on useita, sekä niitä on suunniteltu moneen eri käyttötarkoitukseen. Prosessilaitoksilla ja vaarallisilla alueilla, joilla saattaa olla räjähtäviä kaasuja tai höyryjä, on kameroiden oltava ATEX-hyväksytyjä. Pölyisissä tiloissa sekä ulkoympäristöissä kuvattaessa on kamerasuositeltavaa olevan riittävä ympäristöolosuhteisiin nähden. Mitattavat etäisyydet muuttuvat eri kuvauskohteiden välillä. Kameroiden välillä on eroja tunnistusalueen kantamien välillä. Käyttöön riittävä tunnistusalue helpottaa ja nopeuttaa vika-alueiden paikantamista. (Megger 2024.)

Mikrofonien määrä vaikuttaa yksityiskohtaisempaan kuvantamiseen. Suurempi määrä mikrofoneja parantaa kuvantamisen laatua. Erittäin meluisissa paikoissa akustinen tarkennustoiminto auttaa kohdistamaan mittauksen haluttuun äänilähteeseen ja sulkemaan pois mahdollisen taustamelun ympäriltä. Akustinen tarkennustoiminto ei kaikissa kameratyypeissä kuulu perusasetuksiin. Akustisen kamerasuositeltavat optiset kuvat ja videot ovat tärkeä osa analysoinnissa ja mahdollisia vikoja paikantaessa. Yksityiskohtainen äänilähteen tarkastelu on mahdollista korkearesoluutioisilla optisilla kuvilla. Riittävä resoluutio täyttyy kamerasuositeltavalla ollessa vähintään 8 megapikseliä. Tietyt kameravalmistajat tarjoavat sisäänrakennettua analysointitoimintoa. Nämä instrumentit pystyvät tarjoamaan välittömiä tuloksia heti kuvauspaikalla. Instrumenttien avulla voidaan havaita pintapurkauksen, sisäisen purkauksen ja koronapurkauksen eron. (Megger 2024.)

6 TESTAAMINEN JA TULOKSET

6.1 Mittauskohte ja esivalmistelut

Mittaukset suoritettiin generaattorin rungosta purettuun staattorin aktiiviosaan (kuva 15), jossa tiedetään jo ennestään olevan suuret osittaispurkaustasot sekä pääeristyksen olevan paikoittain huonossa kunnossa. Aktiiviosa koostuu levypaketeista ja käämityksestä. Kuvassa 16 on esitetty generaattorin kilpiarvot, josta aktiiviosa on purettu. Aktiiviosa on kiinnitetty tukevasti puusta valmistettuihin pukkeihin varmistamaan turvallisen työskentelyn aktiiviosan lähettyvillä.



KUVA 15. Generaattorin aktiiviosa

| L D W | | | |
|-----------------------------------|--------|-------|-----------|
| Type: S 5 E 1000 M 62 – 4 ZE + WK | | | |
| 3 ~ Gen. | | No.: | |
| Y | 10500 | V | 1198 A |
| S1 | 21789 | kVA | cos φ 0,9 |
| → u - v - w | 1500 | 1/min | 50 Hz |
| Exc. | 80,0 | V | 5,8 A |
| Therm.-Kl. F | P 85 K | IP54 | IC 81 W |
| 48,0 t | | | |
| DIN 60034, IEC 34 | | | |
| | | | |
| | | | |

KUVA 16. Generaattorin kilpiarvot (TGS Finland Oy 2025)

Mittauksia varten staattorin sisälle merkattiin teipillä uranumerointi viiden uran välein käämityksen DE- ja NDE-päähän sekä käämityksen keskelle helpottamaan urien tunnistamista. Staattorissa on 84 uraa. Testausalue rajattiin huomioiden turvallisuuksista, sekä alueen reunoille asetettiin merkkivaloja varoittamaan suurjännitetöistä. Mittauksissa yksittäinen vaihe energisoitiin syöttämällä vaiheeseen suurjännitettä säädettävällä 32 kV:n syöttömuuntajajärjestelmällä muiden vaiheiden ollessa maadoitettuna.

Ennen jännitteen kytkemistä staattorin eristykselle suoritettiin eristysvastusmittaus. Eristysvastusmittauksen tarkoitus on todeta, että käämitys ei ole maasulussa tai vaihesulussa esimerkiksi pääeristyksen rikkoutumisen vuoksi. Mittaustuloksien perusteella käämitys ei ole maasulussa tai vaihesulussa, ja käämitykseen voidaan kytkeä jännite. Eristysvastusmittaus suoritettiin Megger MIT1025 -eristysvastusmittarilla.

6.2 Urakohtainen osittaispurkausmittaus

Generaattorin aktiiviosalle suoritettiin tuloksien vertailua varten mittaukset yrityksellä ennestään käytössä olevalla urakohtaisella osittaispurkausmittalaitteistolla.

Urakohtaisella osittaispurkausmittauksella voidaan paikantaa käämityksen ura-alueella kohdat, joissa purkausaktiivisuus on suurin. Urakohtainen osittaispurkausmittaus suoritetaan yleisesti staattorille, jonka on-line- tai off-line mittaustuloksissa on esiintynyt poikkeavan korkeita osittaispurkausmääriä. Urakohtainen osittaispurkausmittaus voidaan suorittaa vain generaattoreille, joista roottori on poistettu staattorin sisältä, sekä varsinaparakenteisille koneille, joista roottori on poistettu tai navat on vedetty ulos staattorin sisältä. (Sedding, Wendel & Sasic 2018.)

Mittauksessa yksi käämivaihe energisoidaan suurjännitteellä (50 Hz) vähintään vaihejännitetasoon tai hieman korkeammalle muiden vaiheiden olleessa maadoitettuna. Staattoriryttimen urat, joissa kulkee jännitteisen vaiheen käämitys, käydään läpi induktiivisella sensorilla, joka on kytketty mittalaitteistoon. Sensori havaitsee purkausten luomat signaalit. Signaalit tallennetaan urien molemmista päistä sekä keskeltä uraa ja jokainen vaihe käydään läpi. (Koponen 2022, 3.)

Urakohtaisessa osittaispurkauksessa käytettävä mittari on radiohäiriöanturi, joka on tarkoitettu mittaamaan radiohäiriöitä ja radiotaajuuksien häirintää. Anturi ei pysty suoraan osoittamaan standardin määrittelemiä suureita, mutta se voi antaa luotettavan osoituksen purkauksen sijainnista uralla. Anturilla havaitaan radiohäiriönjännitearvo U_{RDV} ja yksikkönä on mikrovolti μV . (IEC 60270:2000, 35, 85.)

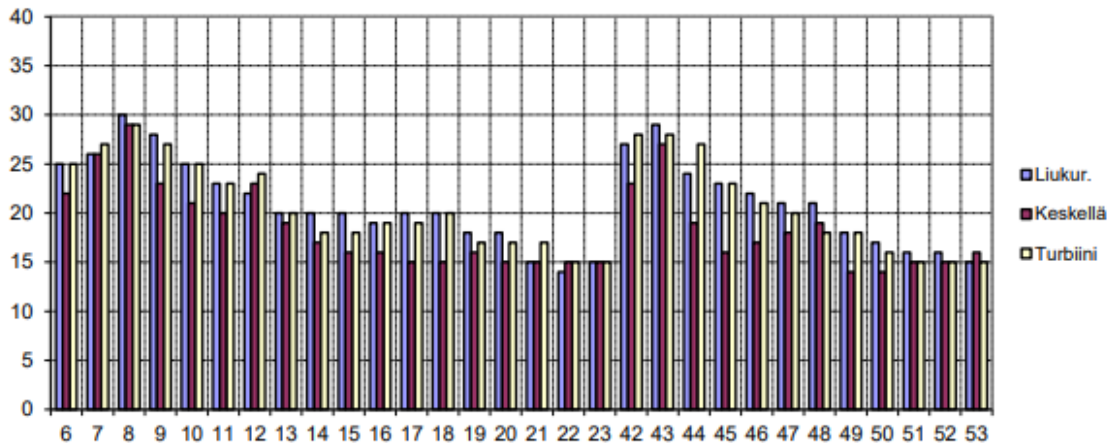
Jokaisesta urasta kirjataan mittarin antamat radiohäiriöjännitearvot mittauspöytäkirjaan pöytäkirjassa määritetyn uran kohdalle. Mittaustulos muunnetaan pöytäkirjassa desibeleiksi kaavan 3 mukaan. Desibelilukemat esitetään kuvaajassa, josta nähdään paremmin käämityksen heikot kohdat. Kuvassa 17 on esimerkki kuvaajasta. Kuvaajassa näkyvät tulokset yhden vaiheen jokaisen uran kolmesta mittauskohdasta. (Koponen 2022, 14–15.)

$$dB = 20 \log\left(\frac{U_{RDV}}{0,4}\right)$$

KAAVA 3

URDV = mitatturadiohäiriöjännite (µV)

0,4 = empiirisesti päätetty vakio



KUVA 17. Esimerkki kuvaaja (Koponen 2022)

Aktiiviosan urakohtaisessa mittauksessa jännite nostettiin jokaisella vaiheella mitattaessa noin vaihejännitteeseen (6,3 kV). Jokaisen vaiheen urat käytiin läpi kolmesta mittauspisteestä: ura-alueen reunalta NDE- ja DE-päässä sekä uran keskikohdalla. Aktiiviosan tarkemmat mittaustulokset on esitetty liitteessä 1. Mittaustuloksista huomattiin, että U-vaiheella suurimmat poikkeamat purkaustasoissa esiintyivät urissa 3, 4, 28, 44, 47 ja 50. Vaiheella V suurimmat poikkeamat purkaustasoissa esiintyivät urissa 14, 29, 32, 56,71 ja 74. Vaiheella W suurimmat poikkeamat purkaustasoissa esiintyivät urissa 15, 18, 42, 57, 60 ja 75. Tulosten perusteella näkyy, että U-vaiheen purkaustasot ovat kokonaisuudessaan pienempiä verrattaessa V- ja W-vaiheen purkaustasojen keskiarvoon. Jokaisella vaiheella suurimmat poikkeamat esiintyivät NDE-pään mittauspisteessä. Tarkemmat mittaustulokset ovat esitettynä liitteessä 1.

6.3 Akustiset mittalaitteet

Akustiset mittaukset suoritettiin kahden eri valmistajan kameralla. Mittauksissa käytettiin Fluke ii915 -äänikameraa ja Flir Si2 Pro -äänikameraa. Testaukseen valittujen kameroiden valinta perustui valmistajien luotettavuuteen sekä kameroiden saatavuuteen.

Fluke ii915 -äänikamera

Fluke ii915 -äänikamera (kuva 17) on suunniteltu teollisuuden ja kunnossapidon tarkoituksiin. Kameran taajuusalue on 2 kHz–100 kHz. Tunnistusalue on 0,5 m – 120 m ja näkökenttä $63^{\circ} \pm 5^{\circ}$. Näyttö on seitsemän tuuman LCD-näyttö, joka toimii kosketuksella. Muistikapasiteetti on 32 Gt. Ladattavan Li-ion akun akunkesto on kuusi tuntia ja latausaika neljä tuntia. Kameran koko on 186 mm x 322 mm x 65 mm, paino 2 kg ja kotelointiluokitus IP40. Kamerassa on kaksi USB-C-porttia ja Wifi-ominaisuus. Reaaliaikainen SoundMap- kuva ja valokuvan yhdistelmä muuttaa ääniaallot näkyväksi kuvaksi. Kamerassa on kolme eri tilaa LeakQ-, PDQ- ja MecQ-tila. LeakQ-tila on paineilma-, kaasu-, höyry- ja alipainejärjestelmien vuotojen havaitsemiseen käytettävä toiminto. MecQ-tila on mekaanisten osien aiheuttamien äänien tunnistamiseen käytettävä toiminto. PDQ-tila on osittaispurkauksien havainnoimiseen käytettävä toiminto. Kameralla voidaan tallentaa valokuvia ja videokuvaa akustisista havainnoista. Fluke Connect sovelluksella voidaan luoda raportti tallennetuista havainnoista ja kuvista sekä saada arvio vikatiilan luonteesta ja kustannuksista. (Fluke 2025.)



KUVA 17. Fluke ii915 -äänikamera (Fluke 2025)

Flir Si2 Pro -äänikamera

Flir Si2 Pro (kuva 18) on Suomessa valmistettu äänikamera osittaispurkausten, kaasu- ja paineilmapuotojen sekä mekaanisten vikojen paikantamiseen. Kamerassa on 124 matalakohina MEMES-mikrofonia. Kamerassa on tekoäly, jonka avulla kamera tunnistaa kuvattavan kohteen taajuusalueen ja säätää taajuusalueita automaattisesti. Taajuuskaistan leveys on 2 kHz–130 kHz ja näkökenttä 75°. Kameran tekoäly tunnistaa automaattisesti kuvattavan kohteen osittaispurkauksien tyypit (negatiivinen korona, positiivinen ja negatiivinen korona, kelluva purkaus, pinta- tai sisäinen purkaus) ja arvioi vian vakavuuden sekä antaa toimenpideehdotuksen. Alle viiden metrin etäisyydeltä kuvatessa tekoäly säätää kuvaetäisyyttä automaattisesti tarkan tuloksen luomiseksi. Kamera tunnistaa äänilähteitä tehokkaasti 200 metriin saakka. 8-kertainen zoomaustoiminto helpottaa havainnointia pitkillä matkoilla. Sisäänrakennetut led-työvalot mahdollistavat kuvamisen hämärissä tiloissa. Kamerassa on viiden tuuman TFT LCD resistiivinen kosketusnäyttö. Ladattavan Li-ion akunkesto on 2,5 tuntia ja latausaika 2 tuntia. Koteloluokitus on IP54. Kamerassa on sisäistä muistia 128 Gt ja tiedonsiirto toimii wifi-yhteydellä pilvipalveluun tai ulkoisella USB-muistitikulla. Flir Acoustic

Viewer-raportointiohjelmistolla voidaan luoda raportit mitatuista havainnoista ja kuvista. (Flir 2025.)



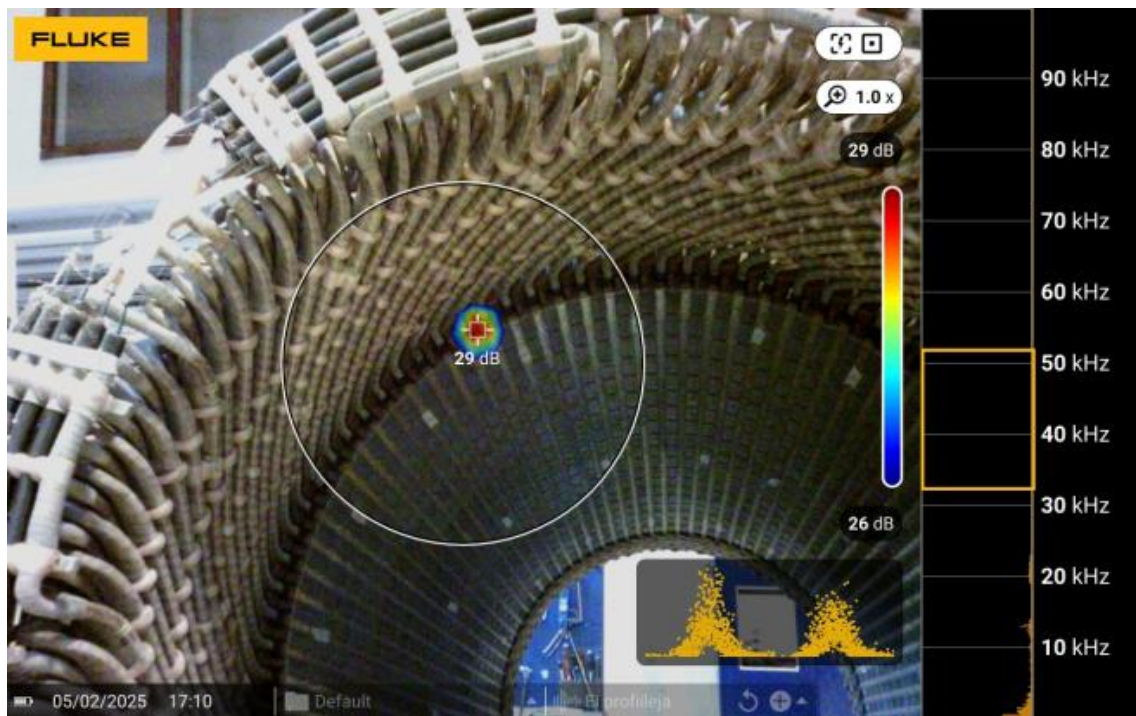
KUVA 18. Flir Si2-Pro -äänikamera (Infradex 2025b)

6.4 Akustinen mittaus

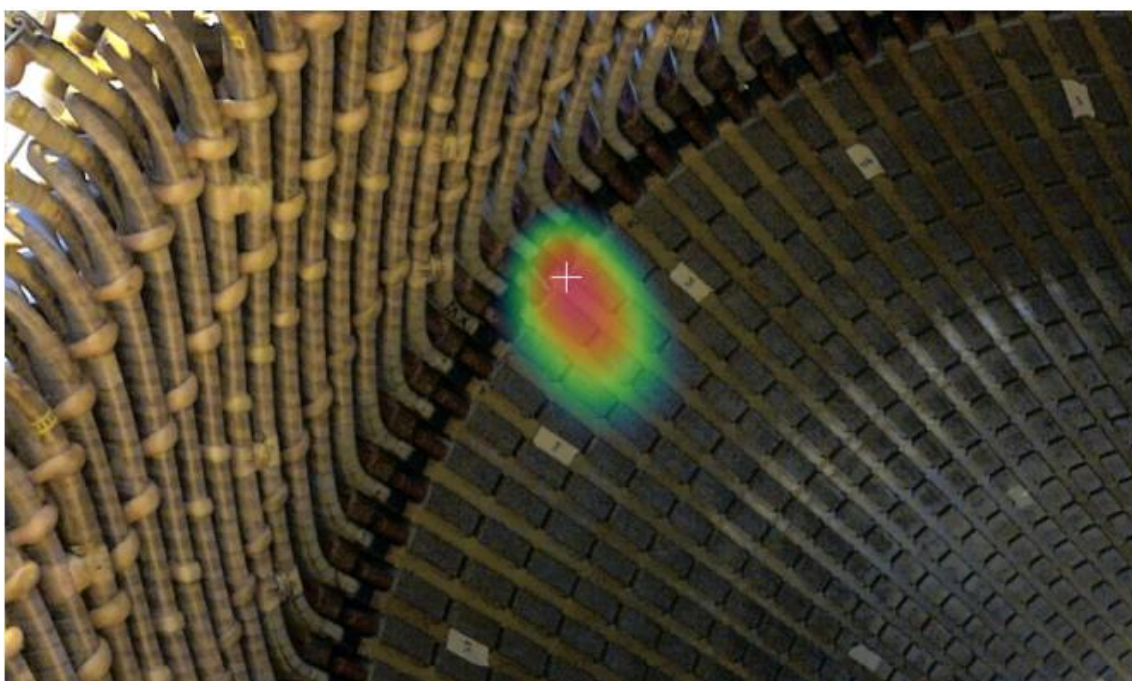
Kummallakin kameralla suoritettiin jokaiselle vaiheelle kuvantamismittaukset. Jännitettä pidettiin mittauksien aikana noin vaihejännitteen tasolla (6,3 kV). Kumpikin kamera alkoi havaitsemaan osittaispurkausaktiivisuutta noin 4 kV:n kohdalla nostaessa jännitettä testautasoon.

Mittaukset suoritettiin turvallisen etäisyyden päästä jännitteistä staattoria. Staattori käytiin läpi kauttaaltaan kummallakin kameralla turvallisesti kuvattavilta osilta. Kuvassa 19 on Fluke ii915 -äänikameran ottama kuva osittaispurkauskohdasta ja kuvassa 20 on Flir Si2-Pro -äänikameran ottama kuva samasta osittaispurkauskohdasta. Jokaisella vaiheella tallennettiin kameroiden havaitsemat

osittaispurkaukokohtat. Tallennetuista havainnoista luotiin raportit kameravalmistajan omalla ohjelmalla. Salassa pidettävissä liitteissä 2 ja 3 on esitetty tarkemmat raportit Fluke ii915 -äänikameran mittaustuloksista ja Flir Si2 Pro -äänikameran mittaustuloksista.

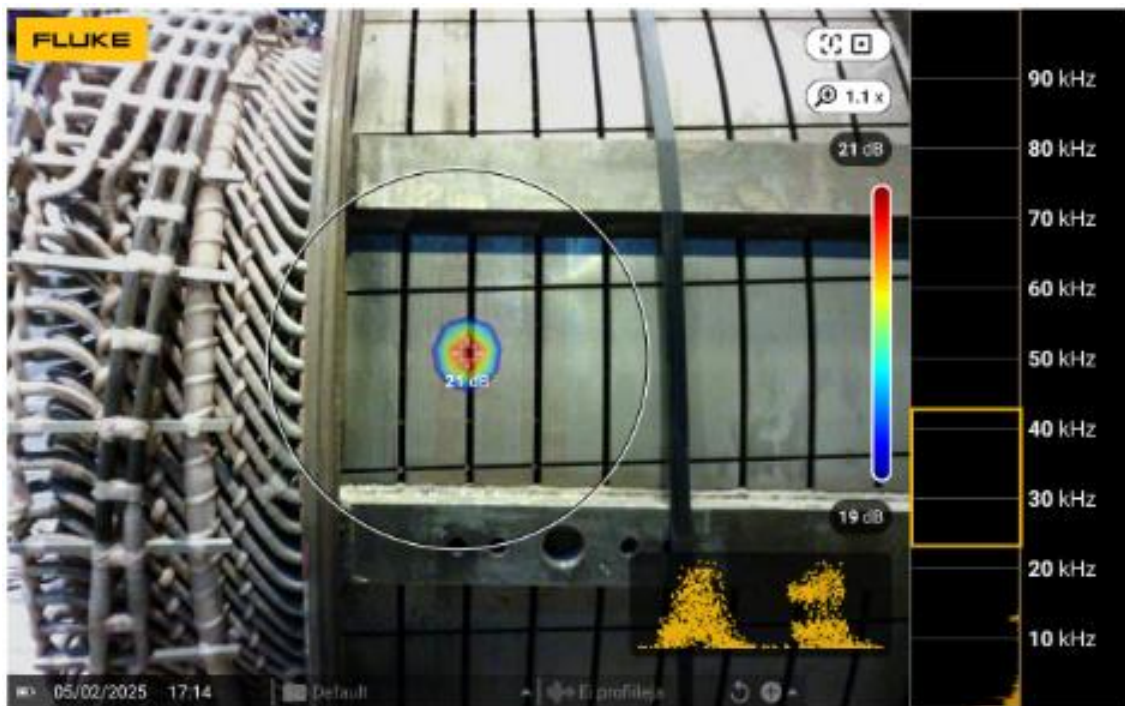


KUVA 19. Fluke ii915 -äänikameran ottama kuva osittaispurkaushavainnosta



KUVA 20. Flir Si2-Pro -äänikameran ottama kuva osittaispurkaushavainnosta

Kameroiden havaitsemia osittaispurkausesiintymiä näkyi pääasiassa staattorin urasuunalueella ja ura-alueella. Kamerat havaitsivat myös osittaispurkauksia levypaketin ilmasolan välistä. Kuvassa 21 on kameran havaitsema osittaispurkausaktiivisuus ilmasolan välistä.



KUVA 21. Osittaispurkaushavainto ilmasolan välistä

Visuaalisessa tarkastuksessa näkyi kameroiden havaitsemisissa kohdissa selkeää eristyksen kulumista ja grafiittielektrodin vaurioitumista. Kuvassa 22 on kameran havaitsema osittaispurkausaktiivisuus pohjasauvassa urasuunalueella staattorin selkäpuolelta katsottuna ja kuvassa 23 on visuaalinen kuva eristeen kulumisesta kyseisessä pohjasauvassa, ylemmässä pohjasauvassa näkyy kunnossa oleva musta grafiittielektrodi.



KUVA 22. Osittaispurkaushavainto pohjasauvassa staattorin selkäpuolelta

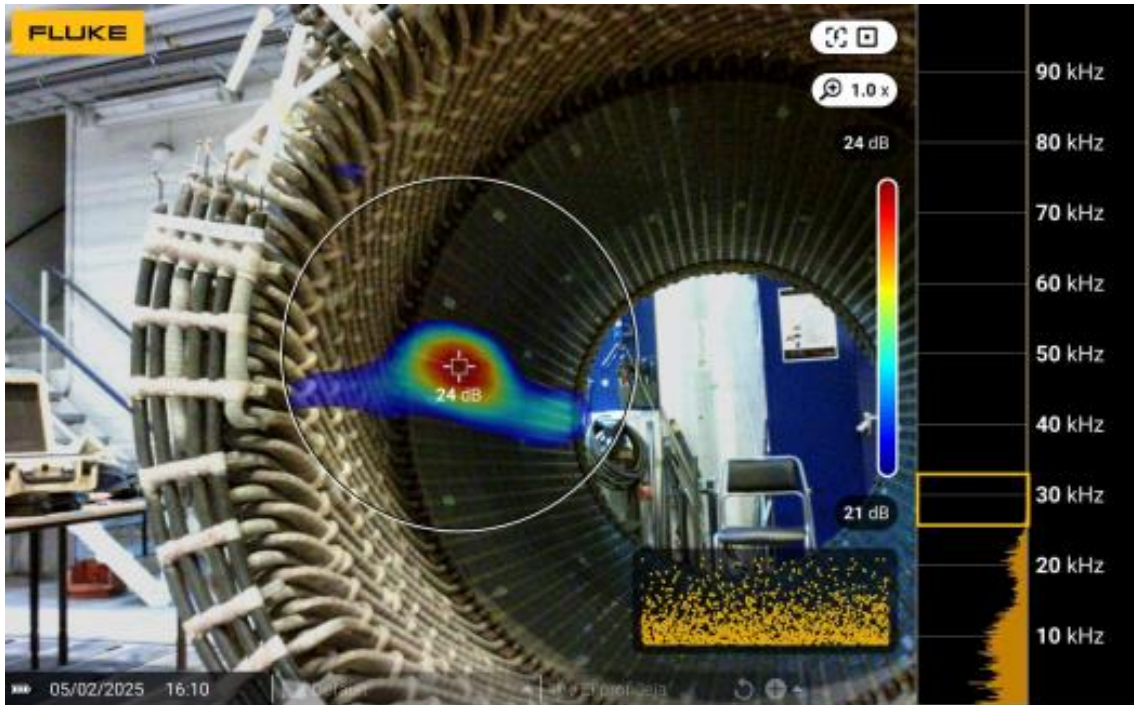


KUVA 23. Vaurioitunut grafiittielektrodi pohjasauvassa

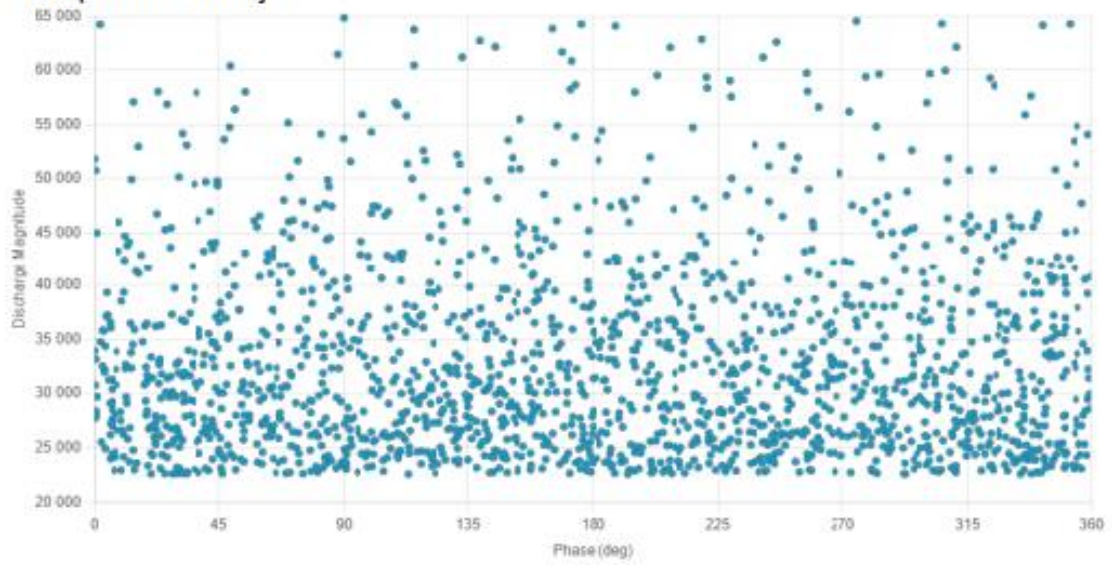
6.5 Mittaustulokset

Akustisten mittaustuloksien perusteella huomataan staattorieristyksen olevan vaurioitunut ja huonossa kunnossa, purkausaktiivisuutta ilmenee useissa kohdissa käämitystä jokaisella vaiheella. Suuri osa purkaushavainnoista esiintyi urasualueella. Fluke Connect -raportointiohjelman luomassa raportissa lähes kaikille havaituille purkauksille purkaustyyppiä arvioitiin pintapurkaus tai ulkoinen purkaus. Liitteessä 4 on Fluke -Connect raportointiohjelman luoma kuvaus yksittäisestä osittaispurkaushavainnosta. Flir Acoustic Viewer -raportointiohjelman luomassa raportissa kaikille havaituille purkauksille purkaustyyppiä arvioitiin pinta- tai sisäinen purkaus. Liitteessä 5 on Flir Acoustic Viewer -raportointiohjelman luoma kuvaus yksittäisestä osittaispurkauksesta.

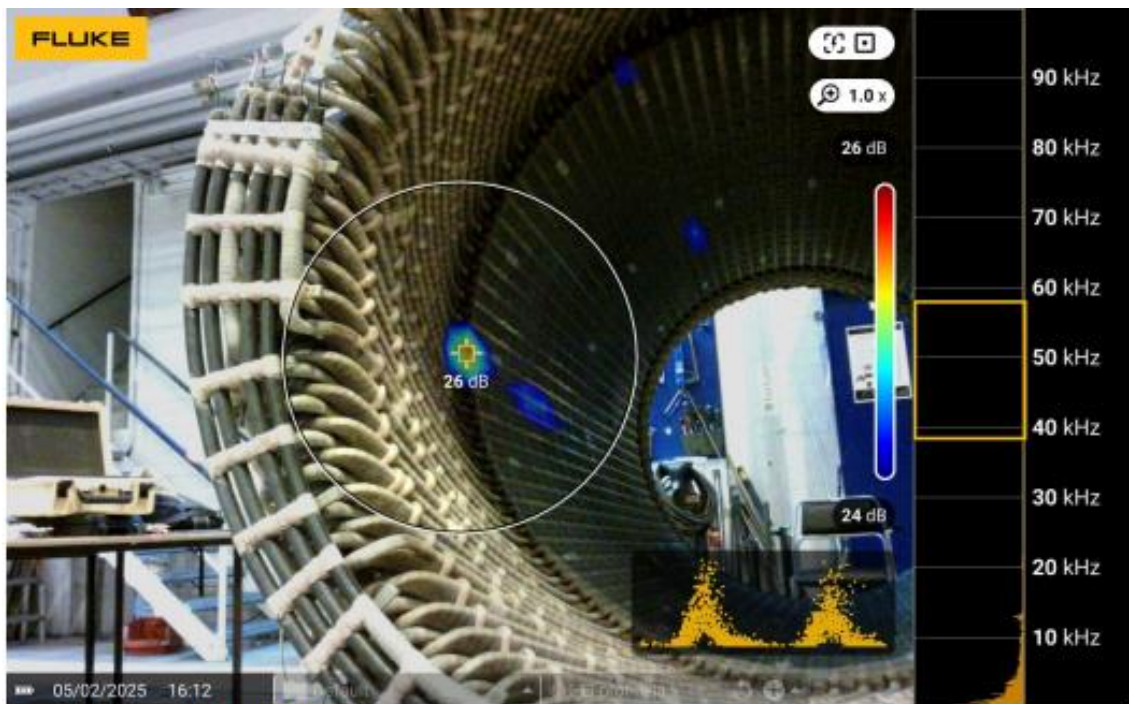
Taajuuskaista on asetettava standardin ohjeistuksen mukaisesti Fluke:n äänikameraa käyttäessä. Standardin IEC TS 62478:2016 ohjeistuksen mukaan asetettaessa taajuuskaista yli 20 kHz:n kohdalle, kamera alkoi havaitsemaan purkausaktiivisuutta. Suuri osa purkauksista esiintyi noin 30 kHz:n – 60 kHz:n taajuusalueella. Taajuuskaistan ollessa liian pienellä alueella purkauksesta syntyvää taajuutta katsoessa kamera ei pystynyt luomaan havaitusta purkauksesta purkauskuvaajaa ympärillä esiintyvien muiden purkauksien aiheuttamien häiriöiden seurauksena. Kuvassa 24 on urassa 60 syntyneiden purkauksien purkauskuvaaja liian pienellä taajuusalueella. Suurentamalla taajuuskaistaa ja asettamalla se oikealle taajuusalueelle kamera pystyi havaitsemaan yksittäisen purkauksen tarkemmin ja luomaan purkauskuvaajan havainnosta. Kuvassa 25 on esitetty uran 60 purkauskuvaaja oikeilla taajuusalueilla. Flir -äänikameralla tällaista ilmiötä ei pystytty havaitsemaan tekoälyn säätäessä taajuusaluetta automaattisesti purkauksien mukaan.



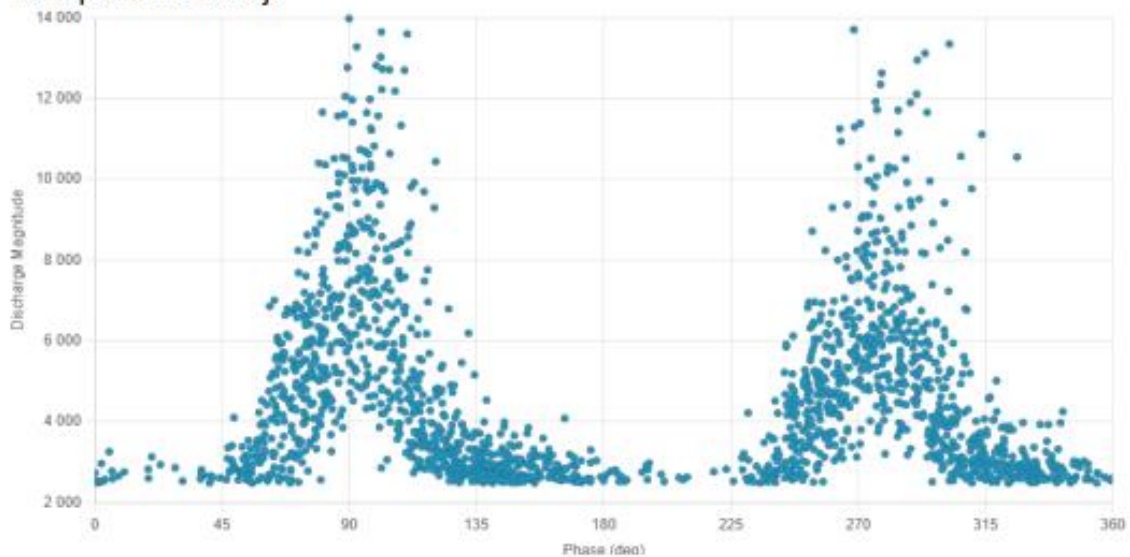
Vaihepurkauskuvajaaja



KUVA 24. Liian pieni taajuusalue



Vaihepurkauskuvaaja

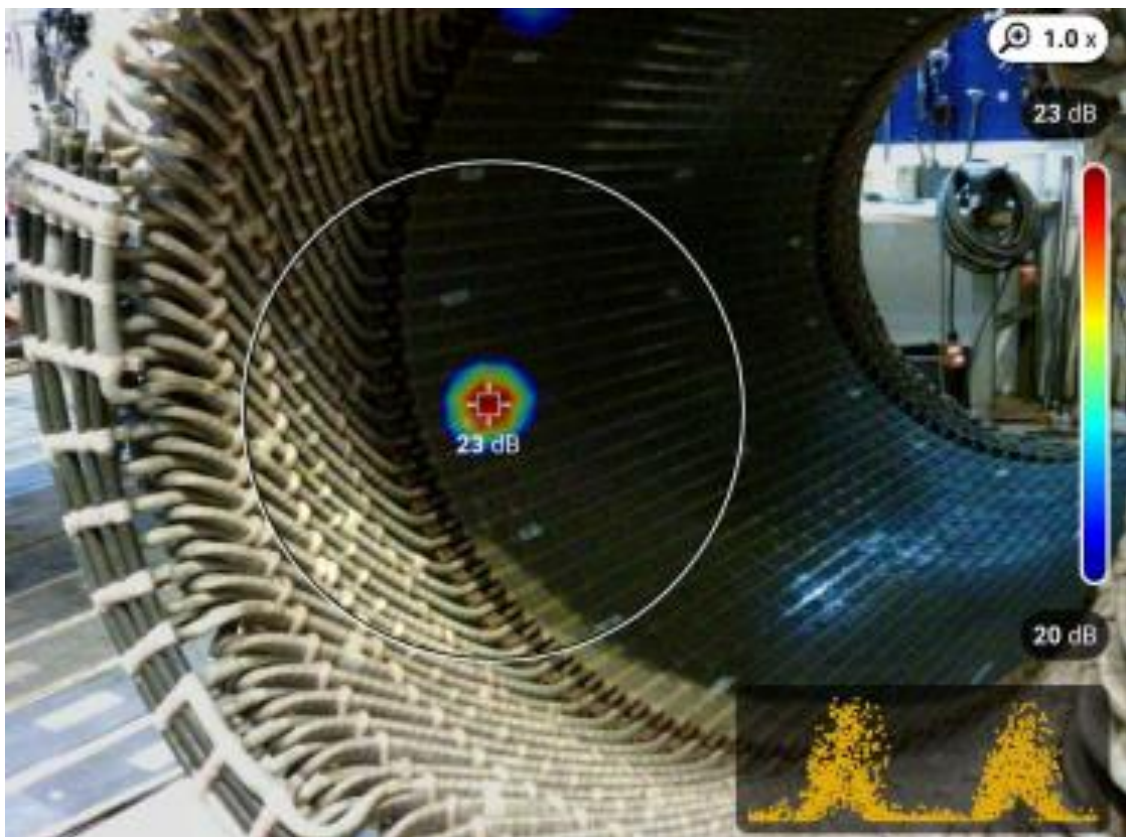


KUVA 25. Oikea taajuusalue

Vertaillessa urakohtaisen osittaispurkausmittauksen ja akustisten mittausten tuloksia, akustiset mittaukset osoittivat osittaispurkausaktiivisuutta samoille urille ja urien alueille kuin urakohtaisessa mittauksessa. Akustisilla mittauksilla pystytään suoraan visualisoimaan purkauskohdan sijainti staattorissa toisin kuin urakohtaisessa mittauksessa. Urakohtaisessa mittauksessa täytyy käydä jokainen staattorin ura läpi sokeasti, jonka jälkeen pystytään toteamaan, missä urissa on eniten osittaispurkausaktiivisuutta ja suorittamaan tarkennetut mittaukset kyseisille urille. Akustisessa mittauksessa pystyi huomaamaan selkeästi tiettyjen urien

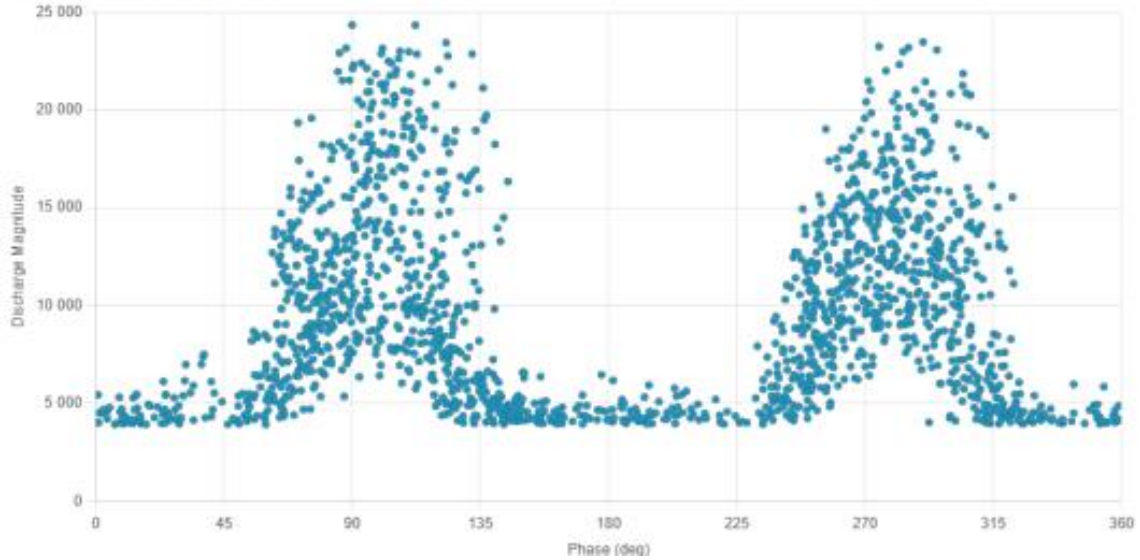
kohdalla osittaispurkauksien syntyvän urasualueella. Näitä purkauskohtia ei havaittu urakohtaisessa mittauksessa. Käytössä olevalla mittaustavalla ei käydä läpi urasuunaluetta eikä käämityksen osia ura-alueen ulkopuolelta. Urakohtaisella mitta-anturilla voidaan myös tehdä mittauksia ura-alueen ulkopuolella, mutta se ei ole käytännöllinen tai tehokas tapa todeta ura-alueen ulkopuolisia purkauksia.

Mittauksissa saatujen vaihepurkauksuvaajien perusteella pystytään toteamaan, että osittaispurkausilmiö on jaksollista ja purkauksuvaajan purkaushuippu kohdistuu suuressa osassa havaittuja purkauksia noin 90 ja 270 asteen vaihekulman kohdalle. Kuvassa 26 on esitetty havaittu purkauskohta ja kuvassa 27 on esitetty vaihepurkauksuvaaja V-vaiheella urasta 56. Havaittu purkaus on ura-alueella, kuvaajan perusteella purkaukset kohdistuvat noin 90 ja 270 asteen vaihekulman kohdalle ja suurimmat arvot ovat 25000 yksikköä.



KUVA 26. Ura 56 purkaushavainto

Vaihepurkauskuvaaja

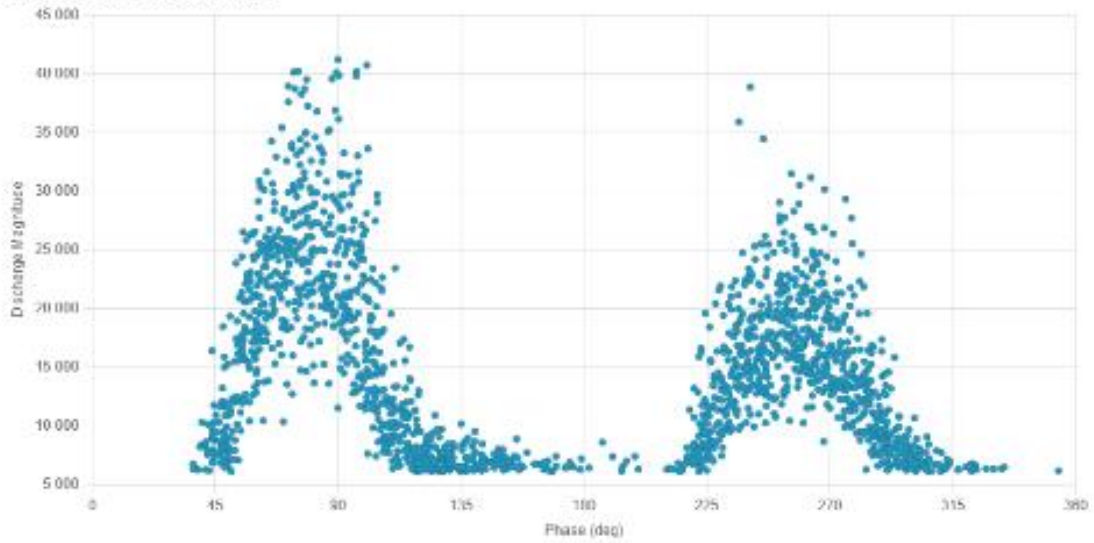


KUVA 27. Uran 56 vaihepurkauskuvaaja

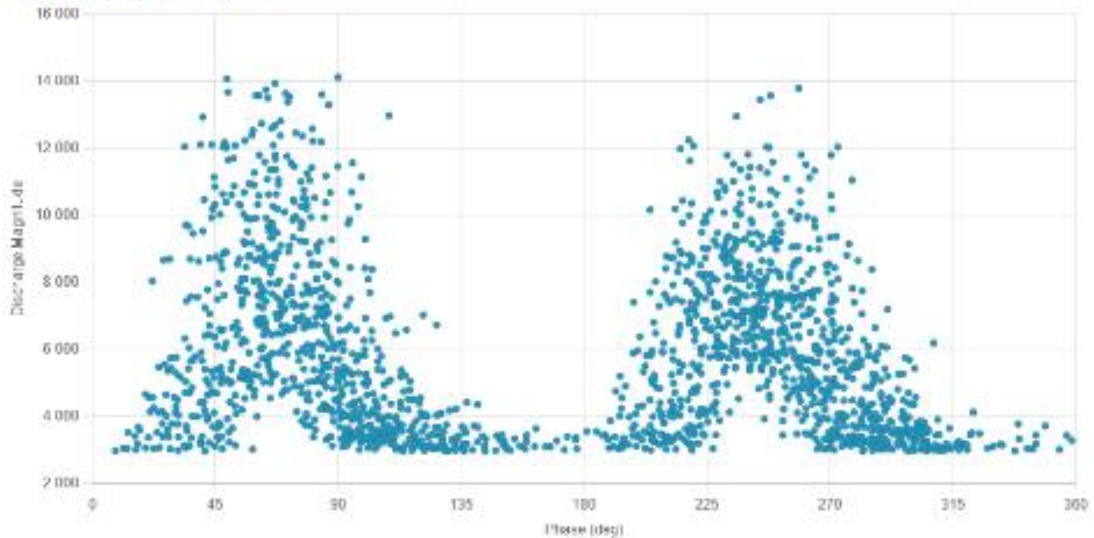
Tutkittujen osittaispurkaustilastojen perusteella sähköisissä osittaispurkausmittauksissa ura-alueella syntyvät osittaispurkaukset keskittyvät yleisesti 45 ja 225 asteen vaihekulman kohdalle (Iris Power 2013, 12). Kuvassa 26 esitetyn purkauksen purkauskeskittymä kohdistuu tilastojen perusteella poikkeukselliseen kohtaan. Tämä havainto voi mahdollisesti johtua vaihekorrelaation synkronointivirheestä akustisessa mittauksessa.

Nostaessa jännitettä yli vaihejännitteen kameran havaitsema osittaispurkausten määrä sekä osittaispurkausten intensiteetti nousivat. Kuvassa 28 on Fluke Connect -raportointiohjelman ilmoittamat purkauskuvaajat U-vaiheen urasta 4 kahdella eri jännitetasoilla.

Vaihepurkauskuvaaja



Vaihepurkauskuvaaja



KUVA 28. Vaihepurkauskuvaajat noin 8 kV:n (ylempi) ja noin 6 kV:n (alempi) jännitetasoilla.

Lopputuloksena akustinen mittaustekniikka on hyödyllinen työkalu staattorieristyksen tarkentavissa mittauksissa. Akustisella mittaustekniikalla pystytään todentamaan ja visualisoimaan havaitut osittaispurkaukset eristyksessä. Tämä helpottaa mahdollisten purkausten tulkitsemista ja jatkotoimenpiteiden arvioimista sekä purkausten kehittymisen seuraamista.

7 JOHTOPÄÄTÖKSET JA POHDINTA

Työn tarkoituksena oli tutkia akustisen mittaustekniikan mahdollisuuksia ja hyötyä staattorieristyksen osittaispurkauksien havainnoimisessa. Työssä esitetään generaattoreiden staattorieristyksessä esiintyvien osittaispurkauksien teoriaa ja niiden akustista käyttäytymistä. Akustisten laitteiden toimintaa ja soveltuvuutta osittaispurkauksien havainnoimisessa testattiin käytännön kohteessa.

Tutkimuksen ja testausten tulosten mukaan akustinen mittaustekniikka toimisi tehokkaana lisäyksenä staattorieristyksen tarkentavissa mittauksissa, kun on-line tai off-line mittauksissa on ilmennyt poikkeavia tuloksia. Akustisella mittauksella pystytään tekemään tehokas katsaus staattorieristyksen kunnosta pienillä resurssivaatimuksilla.

Vertaillen urakohtaista mittausta ja akustista mittausta, akustisten mittalaitteiden testaustuloksien perusteella pystytään toteamaan akustisten mittauksien kykenevän tuottamaan samat tulokset kuin urakohtainen mittausmenetelmä. Ajallisesti ja työllistävyyden näkökulmasta akustisilla mittalaitteilla pystytään suorittamaan purkauksien havainnoiminen tehokkaammin kuin urakohtaisilla mittalaitteilla sekä akustisella mittauksella purkauskohtien visualisoiminen on selkeää. Akustiset mittaukset ovat myös tehokas tapa todeta ura-alueen ulkopuolisia purkauksia.

Akustisten mittalaittevalmistajien raportointiohjelmilla luodut raportit antavat selkeän kuvan purkaukskohdista eristyksessä. Laitteiden ja raportointiohjelman esittämään dataan purkauksien luonteesta ei pystytä suoraan luottamaan mittauksessa esiintyvien häiriömahdollisuuksien takia, mutta tätä dataa voidaan käyttää hyödyksi purkausten analysoimisessa sekä data toimii hyvänä apuvälineenä tulevaisuuden mittauksia katsoessa. Tämän datan luotettavuuden parantamista voidaan pitää akustisen mittaustekniikan kehityskohteena tulevaisuudessa.

LÄHTEET

ABB 2024. Kuvakaappaus. Brochure Synchronous motors. Katalogi. Luettavissa: https://www.tecnicaindustriale.it/abb_catalogues/Brochure_Synchronous_motors_9AKK105576_EN_17082016_LowRes.pdf. Luettu: 22.11.2024.

Aro, M., Elovaara, J., Karttunen, M., Nousiainen, K. & Palva, V. 2015. Suurjännitetekniikka. 4 painos. Otatieto. Helsinki

Aura, L. & Tonteri, A.J. 1996. Sähkökoneet ja tehoelektroniikan perusteet. WSOY. Helsinki.

Boston Dynamics 2024. What is Acoustic Imaging. Luettavissa: <https://bostondynamics.com/blog/what-is-acoustic-imaging/>. Luettu: 27.1.2025.

Cruz, J.d.S., Fruett, F., Lopes, R.d.R., Takak,i F.L., de Andrade Tambascia, C., de Lima, E.R. & Giesbrecht, M. 2022. Partial Discharges Monitoring for Electric Machines Diagnosis. A Review. MDPI. Switzerland. Luettavissa: <https://doi.org/10.3390/en15217966>. Luettu: 12.12.2024.

Dmitriev, V., Oliveira, R., Zampolo, R., Moutinho de Vilhena, P., de Souza Brasil, F. & Fernandes, M. 2023. Partial Discharges in Hydroelectric Generators. Springer Cham. Switzerland.

Energiateollisuus 30.1.2024. Kuvakaappaus. Energiavuosi 2023 – Sähkö. Power point esitys. Luettavissa: https://energia.fi/wp-content/uploads/2024/03/Sahko-vuosi-2023_30012024.pptx. Luettu: 26.10.2024.

Energiateollisuus 2024. Sähköntuotanto. Luettavissa: <https://energia.fi/energia-tietoa/energiantuotanto/sahkontuotanto/>. Luettu: 26.10.2024.

Flir 2025. Acoustic Imaging Cameras. FLIR Si2-Pro™. Luettavissa: <https://www.flir.eu/products/si2-pro/?vertical=condition+monitoring&segment=solutions&srsId=AfmBOooziDr8iCR5KPGb3LrkmMT4upySOBZD8maiptwnNbbzl7zjd819>. Luettu: 24.2.2025.

Fluke 2025. Teollisuuskuvaukset. Fluke ii915 -äänikamera. Luettavissa: <https://www.fluke.com/fi-fi/tuote/teollisuuskuvaukset/fluke-ii915>. Luettu: 24.2.2025.

Fortum 2024. Kuvakaappaus. Turbo and Generator Services. High-speed balancing of generator rotors. Luettavissa: <https://www.fortum.com/products-and-services/power-plant-services/enext/turbines-generators/generator-maintenance/rotor-high-speed-balancing>. Luettu: 22.11.2024.

Fujita, M., Hirose, T., Ueda, T., Ishizuka, H., Okubo, M., Nagakura, K. & Tokumasu, T. 2016. Kuvakaappaus. Toshiba Corporation. Inter-strand Circulating Current Analysis of End-region Transposed Coil of Power Generator using 3D Multi-layer FEM. Luettavissa: <https://ieeexplore.ieee.org/stamp/stamp.jsp?tp=&number=7837302&tag=1>. Vaatii lisenssin. Luettu: 21.11.2024.

Hamdy, A. 26.4.2023. Kuva LinkedIn-alustalla. Generator. Luettavissa: <https://www.linkedin.com/pulse/generator-ahmed-hamdy-abd-elrahman>. Luettu: 20.11.2024.

Hietalahti, L., Kauppinen, J. & Wikström, R. 2020. Generaattorit, käyttö, huolto ja kunnossapito. Tammertekniikka Oy. Tampere.

Hietalahti, L. 2011. Muuntajat ja sähkökoneet. Tammertekniikka Oy. Tampere.

IEC 60034-27:2006. Rotating electrical machines – Part 27:Off-line partial discharge measurements on the stator winding insulation of rotating electrical machines. International Electrotechnical Commission. Switzerland. Luettu: 2.12.2024.

IEC 60270:2000. High-voltage test techniques - Partial discharge measurements. Third edition. International Electrotechnical Commission. Switzerland. Luettu: 21.2.2025.

IEC TS 62478:2016. Technical specification. High voltage test techniques - Measurement of partial discharges by electromagnetic and acoustic methods. International Electrotechnical Commission. Switzerland. Luettu:18.12.2024.

IEEE 1434 :2000 (R2005). IEEE Guide to the Measurement of Partial Discharges in Rotating Machinery. The Institute of Electrical and Electronic Engineers, inc. Vahvistettu 22.9.2005. New York. Luettu: 4.12.2024.

Infradex 2025a. Kuvakaappaus. Äänikamerat. Si2-PD. Luettavissa: <https://www.infradex.com/flir-si2-pd/>. Luettu: 19.2.2025.

Infradex 2025b. Kuvakaappaus. Äänikamerat. Flir Si2-Pro. Luettavissa: <https://www.infradex.com/flir-si2-pro/>. Luettu: 25.2.2025.

Iris Power 2013. Interpretation of Partial Discharge Results. Electrical Rotating Machine Stator Windings. Document. TGS Finland Oy. Sisäinen materiaali.

Journal of Electrical Engineering & Technology 2020. Kuvakaappaus. Comparative Analysis of Three-phase and Five-phase Permanent-magnet Motor Based on Finite Element Method. Luettavissa: [https://www.researchgate.net/publication/341889978 Comparative Analysis of Three-phase and Five-phase Permanent-magnet Motor Based on Finite Element Method](https://www.researchgate.net/publication/341889978_Comparative_Analysis_of_Three-phase_and_Five-phase_Permanent-magnet_Motor_Based_on_Finite_Element_Method). Luettu: 21.11.2024.

Kirkcaldy, L., Lewin, P., Lees, G. & Rogers, R. Partial Discharge Detection Using Distributed Acoustic Sensing. The Institute of Electrical and Electronic Engineers, inc. New York. Luettavissa: <https://ieeexplore.ieee.org/document/9530118>. Vaatii lisenssin. Luettu: 17.2.2025

Klempner, G. & Kerszenbaum, I. 2004. Handbook Of Large Turbo-Generator Operation And Maintenance. A John Wiley & Sons, Inc. Hoboken.

Koponen, O. 2022. TGS Finland Oy. Sisäinen materiaali.

Korpinen, L. 1998. Kuvakaappaus. Sähkökoneet osa 2. Sähkövoimatekniikka-opus. Pdf-tiedosto. http://www.leenakorpinen.fi/archive/svt_opus/10sahkokooneet_2osa.pdf. Luettu: 25.11.2024.

Megger 2024. Johdatus akustiseen kuvantamiseen. Luettavissa: <https://www.megger.com/en-gb/blog/april-2024/an-introduction-to-acoustic-imaginq>. Luettu: 29.1.2025.

Mukhtar, H. 30.11.2021. Kuva LinkedIn-alustalta. Major Categories of Partial Discharge Pulses-An Extract from Routine Study. Luettavissa: <https://www.linkedin.com/pulse/major-categories-partial-discharge-pulses-an-extract-from-mukhtar>. Luettu: 4.12.2024.

Power Services Group 2016. Kuvakaappaus. Why is a Stator Core Made of Laminated Steel. Luettavissa: <https://www.powerservicesgroup.com/2016/01/why-is-a-stator-core-made-of-laminated-steel/>. Luettu: 21.11.2024.

Pyökäri, T. 1971. Sähkökoneoppi. Tapiola, Sininen Kirja Oy.

Sedding, H., Wendel, C. & Sasic, M. 2018. PCIC Europe. Luettavissa: https://pcic.energy/wp-content/uploads/ME18_06.pdf. Luettu: 21.2.2025.

Sensor tips 2023. How does an acoustic camera work and what's it good for. Luettavissa: <https://www.sensortips.com/frequently-asked-question-faq/how-does-an-acoustic-camera-work-and-whats-it-good-for/>. Luettu: 27.1.2025.

Snyder, B. 2025. Kuvakaappaus. Excitation Selections. Caterpillar Inc. Luettavissa: https://www.cat.com/en_US/by-industry/electric-power/Articles/White-papers/excitation-selections.html. Luettu: 17.2.2025.

TGS Finland Oy 2025. Valokuvakirjasto. Sisäinen materiaali.

Tilastokeskus 17.4.2024. Tiedote. Energian hankinta ja kulutus. Luettavissa: <https://stat.fi/julkaisu/cln2zc9wg8fgb0cut7vm9hil8>. Luettu: 26.10.2024.

Wang, Y., Fan, Y., Qin, S., Chang, D., Shao, X., Mu, H. & Zhang, G. 2018. Partial discharge localization methodology for power transformers based on improved acoustic propagation route search algorithm. Luettavissa: <https://digital-library.theiet.org/doi/full/10.1049/iet-smt.2018.5092>. Luettu: 3.2.2025.

LIITTEET

Liite 1 TGS- LDW aktiiviosan hohtopurkausmittaus urittain 2025

Liite 2 TGS- Fluke ii915 Acoustics Report (salassa pidettävä)

Liite 3 TGS- Flir Si2-Pro Acoustics Report (salassa pidettävä)

Liite 4 Fluke Connect yksittäinen purkaushavainto

Liite 5 Flir Acoustic Viewer yksittäinen purkaushavainto

STAATTORIPAKETIN URAKOHTAINEN HOHTOPURKAUSMITTAUS

Kalibrointiasetukset

| | | | |
|-------------------|---------------|---------------------|---------------|
| Mittaustaajuus | 1200,0 MHz | U_N | 10,50 kV |
| Häiriötaso | dB | C_v | 0,155 μF |
| 0 dB | 0,1 μV | Uraluku | 84 |
| Mittaussondi | Induktiivinen | Käämikaavion numero | - |
| Kalibrointipulssi | 10000 pC | | |
| Pulssitaajuus | 100 Hz | | |
| | 20 °C | lopussa | 19,8 °C |
| | 30 % | lopussa | 31 % |

Kalibrointimittaus

Q Kalibraattori 10000 pC

Mittaus jännitteen funktiona

Mittausura 29
Mittaustaajuus 1200,0 MHz

| Liitin n:o | Ura n:o | Purk.taso dB | U μV |
|---------------|------------|-----------------|--------------|
| U1 | 1 | 21 | 4,3 |
| keski | 3 | 5 | 0,8 |
| | 7 | 9 | 1,1 |
| | 22 | 14 | 2,0 |
| | 25 | 14 | 2,0 |
| | 28 | 24 | 6,0 |

| V1 kV | Purk.taso dB | U μV |
|----------|-----------------|--------------|
| 1 | -10 | 0,1 |
| 2 | -10 | 0,1 |
| 3 | 10 | 1,2 |
| 4 | 22 | 5,1 |
| 5 | 31 | 14,7 |
| 6 | 36 | 25,0 |
| 7 | 38 | 32,2 |
| 8 | #LUKU! | |

| U-vaihe | |
|---------|---------|
| Aika | Taso |
| min | μV |
| 0 | 10,5 |
| 5 | 11,2 |
| 10 | 11,9 |
| 13 | 11,9 |



NDE 6,3 kV
Ura 43



| V-vaihe | |
|---------|---------|
| Aika | Taso |
| min | μV |
| 0 | 20,4 |
| 5 | 18,4 |
| 10 | 18,2 |
| 13 | 18,4 |



NDE 6,3 kV
Ura 29

| W-vaihe | |
|---------|---------|
| Aika | Taso |
| min | μV |
| 0 | 8,3 |
| 5 | 9,6 |
| 10 | 10,2 |
| 13 | 10 |

NDE 6,3 kV
Ura 36

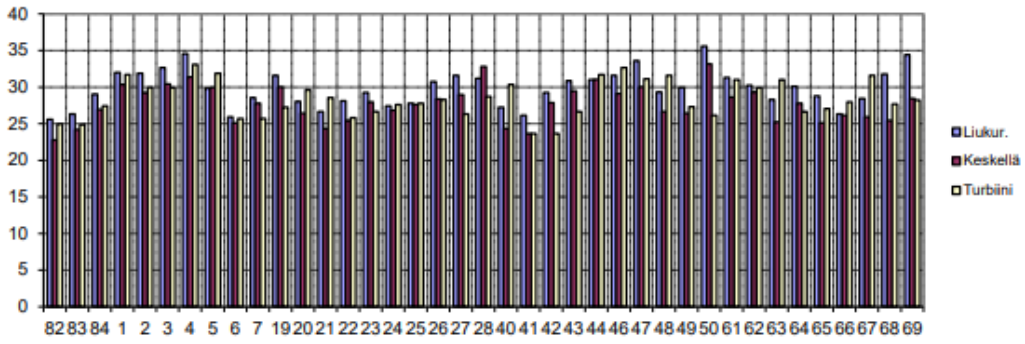
| Vaihe U | | | | | | | | | | |
|--------------|------|-----|------------------|---|---|------------|-------------|-------------------|---------|----------|
| Syöttöliitin | | Ura | Sauvojen vaiheet | | Purkaustasot | | | Purkaustasot (µV) | | |
| Liitin n:o | U kV | | 1200 |  |  | Liukur. dB | Keskellä dB | Turbiini dB | Liukur. | Keskellä |
| U1 KP pint | 6,3 | 82 | U | W | 26 | 23 | 25 | 7,6 | 5,5 | 7,1 |
| | | 83 | U | W | 26 | 24 | 25 | 8,3 | 6,5 | 7,0 |
| | | 84 | U | W | 29 | 27 | 27 | 11,3 | 8,9 | 9,4 |
| | | 1 | U | U | 32 | 30 | 32 | 15,9 | 13,2 | 15,4 |
| | | 2 | U | U | 32 | 29 | 30 | 15,7 | 11,6 | 12,6 |
| | | 3 | U | U | 33 | 30 | 30 | 17,2 | 13,3 | 12,5 |
| | | 4 | U | U | 35 | 31 | 33 | 21,4 | 14,8 | 18,1 |
| | | 5 | V | U | 30 | 30 | 32 | 12,4 | 12,6 | 15,7 |
| | | 6 | V | U | 26 | 25 | 26 | 7,9 | 7,2 | 7,7 |
| | | 7 | V | U | 29 | 28 | 26 | 10,7 | 9,8 | 9,2 |
| U2 TP pint | | 19 | U | W | 32 | 30 | 27 | 15,2 | 12,7 | 12,1 |
| | | 20 | U | W | 28 | 26 | 30 | 10,1 | 8,4 | 10,7 |
| | | 21 | U | W | 27 | 24 | 29 | 8,6 | 6,6 | 7,8 |
| | | 22 | U | U | 28 | 25 | 26 | 10,2 | 7,5 | 8,6 |
| U1 KP phj | | 23 | U | U | 29 | 28 | 27 | 11,6 | 10,0 | 9,6 |
| | | 24 | U | U | 27 | 27 | 28 | 9,4 | 8,8 | 9,8 |
| U1 KP phj | | 25 | U | U | 28 | 28 | 28 | 9,8 | 9,6 | 10,4 |
| | | 26 | V | U | 31 | 28 | 28 | 13,8 | 10,5 | 8,3 |
| | | 27 | V | U | 32 | 29 | 26 | 15,2 | 11,2 | 10,9 |
| | | 28 | V | U | 31 | 33 | 29 | 14,5 | 17,5 | 13,2 |
| U1 KP pint | | 40 | U | W | 27 | 24 | 30 | 9,2 | 6,6 | 6,1 |
| | | 41 | U | W | 26 | 24 | 24 | 8,1 | 6,1 | 6,1 |
| | | 42 | U | W | 29 | 28 | 24 | 11,6 | 9,9 | 8,6 |
| | | 43 | U | U | 31 | 29 | 27 | 14,0 | 11,9 | 15,4 |
| U2 TP phj | | 44 | U | U | 31 | 31 | 32 | 14,2 | 14,3 | 17,2 |
| | | 46 | U | U | 32 | 29 | 33 | 15,2 | 11,4 | 14,4 |
| | | 47 | U | U | 34 | 30 | 31 | 19,2 | 12,7 | 15,2 |
| | | 48 | V | U | 29 | 27 | 32 | 11,7 | 8,6 | 9,3 |
| U1 KP phj | | 49 | V | U | 30 | 26 | 27 | 12,6 | 8,4 | 8,1 |
| | | 50 | V | U | 36 | 33 | 26 | 24,1 | 18,2 | 14,2 |
| | | 61 | U | W | 31 | 29 | 31 | 14,7 | 10,8 | 12,5 |
| | | 62 | U | W | 30 | 29 | 30 | 13 | 11,7 | 14,2 |
| | | 63 | U | W | 28 | 25 | 31 | 10,4 | 7,3 | 9,4 |
| | | 64 | U | U | 30 | 28 | 27 | 12,8 | 9,8 | 8,6 |
| | | 65 | U | U | 29 | 25 | 27 | 11 | 7,2 | 9 |
| | | 66 | U | U | 26 | 26 | 28 | 8,3 | 8,1 | 10 |
| | | 67 | V | U | 28 | 26 | 32 | 10,6 | 7,9 | 15,2 |
| | | 68 | V | U | 32 | 25 | 28 | 15,5 | 7,5 | 9,7 |
| | | 69 | V | U | 34 | 28 | 28 | 21 | 10,6 | 10,3 |
| | | | | | | | | | | |

| Vaihe V | | | | | | | | | | |
|--------------|------|------------|------------------|---|---|------------|-------------|-------------------|---------|----------|
| Syöttöliitin | | Ura | Sauvojen vaiheet | | Purkaustasot | | | Purkaustasot (µV) | | |
| Liitin n:o | U kV | | 1200 |  |  | Liukur. dB | Keskellä dB | Turbiini dB | Liukur. | Keskellä |
| V2 TP pint | 6,3 | 5 | V | U | 34 | 33 | 32 | 19,0 | 18,2 | 15,3 |
| | | 6 | V | U | 31 | 29 | 31 | 14,7 | 11,3 | 14,7 |
| | | 7 | V | U | 31 | 29 | 29 | 14,6 | 11,5 | 11,2 |
| | | 8 | V | V | 32 | 30 | 29 | 15,4 | 13,0 | 11,9 |
| | | 9 | V | V | 32 | 32 | 30 | 16,3 | 15,3 | 12,8 |
| | | 10 | V | V | 29 | 29 | 30 | 11,7 | 10,8 | 12,0 |
| | | 11 | V | V | 29 | 28 | 29 | 10,9 | 10,3 | 10,8 |
| | | 12 | W | V | 32 | 31 | 30 | 15,6 | 13,9 | 12,2 |
| | | 13 | W | V | 33 | 33 | 30 | 16,9 | 17,3 | 15,6 |
| | | 14 | W | V | 36 | 33 | 32 | 23,9 | 18,7 | 15,5 |
| | | 26 | V | U | 27 | 26 | 32 | 9,0 | 7,6 | 6,2 |
| | | 27 | V | U | 27 | 24 | 24 | 8,8 | 6,5 | 6,4 |
| | | 28 | V | U | 31 | 28 | 24 | 14,7 | 9,9 | 7,8 |
| | | V1 KP pint | | 29 | V | V | 36 | 33 | 26 | 25,4 |
| 30 | V | | | V | 32 | 32 | 32 | 15,5 | 15,8 | 19,4 |
| 31 | V | | | V | 32 | 31 | 34 | 16,5 | 13,7 | 16,2 |
| V2 TP phj | | 32 | V | V | 35 | 31 | 32 | 21,8 | 14,2 | 16,6 |
| | | 33 | W | V | 33 | 29 | 32 | 17,3 | 10,8 | 11,8 |
| V2 TP pint | | 34 | W | V | 26 | 24 | 29 | 7,8 | 6,7 | 6,8 |
| | | 35 | W | V | 28 | 26 | 25 | 9,8 | 7,9 | 6,2 |
| | | 47 | V | U | 33 | 28 | 24 | 17,1 | 10,6 | 9,7 |
| | | 48 | V | U | 32 | 31 | 28 | 16,3 | 13,5 | 15,2 |
| | | 49 | V | U | 28 | 27 | 32 | 10,3 | 9,4 | 10,7 |
| | | 50 | V | V | 31 | 31 | 29 | 14,5 | 14,5 | 9,6 |
| V1 KP phj | | 51 | V | V | 32 | 29 | 28 | 15,7 | 11,7 | 11,2 |
| | | 52 | V | V | 30 | 29 | 29 | 12,3 | 10,9 | 11,6 |
| | | 53 | V | V | 30 | 29 | 29 | 13,0 | 10,8 | 10,4 |
| V2 TP phj | | 54 | W | V | 30 | 29 | 28 | 12,5 | 11,9 | 9,9 |
| | | 55 | W | V | 32 | 31 | 28 | 16,3 | 14,4 | 13,1 |
| | | 56 | W | V | 39 | 35 | 30 | 37,0 | 22,5 | 19,4 |
| | | 68 | V | U | 26 | 26 | 34 | 7,9 | 7,6 | 8,4 |
| | | 69 | V | U | 26 | 25 | 26 | 8,3 | 7,5 | 10,4 |
| | | 70 | V | U | 30 | 26 | 28 | 13,3 | 8,3 | 9,8 |
| | | 71 | V | V | 35 | 32 | 33 | 22,3 | 16,2 | 17,1 |
| 72 | V | V | 32 | 31 | 32 | 15,5 | 14,2 | 16,3 | | |
| V2 TP phj | | 73 | V | V | 33 | 31 | 31 | 17,4 | 14,5 | 14 |
| | | 74 | W | V | 35 | 31 | 34 | 23,3 | 14 | 20,1 |
| | | 75 | W | V | 32 | 29 | 31 | 15,6 | 11,3 | 14,4 |
| | | 76 | W | V | 28 | 27 | 27 | 10,6 | 8,6 | 9,1 |
| | | 77 | W | V | 30 | 27 | 26 | 12,9 | 9,3 | 7,7 |

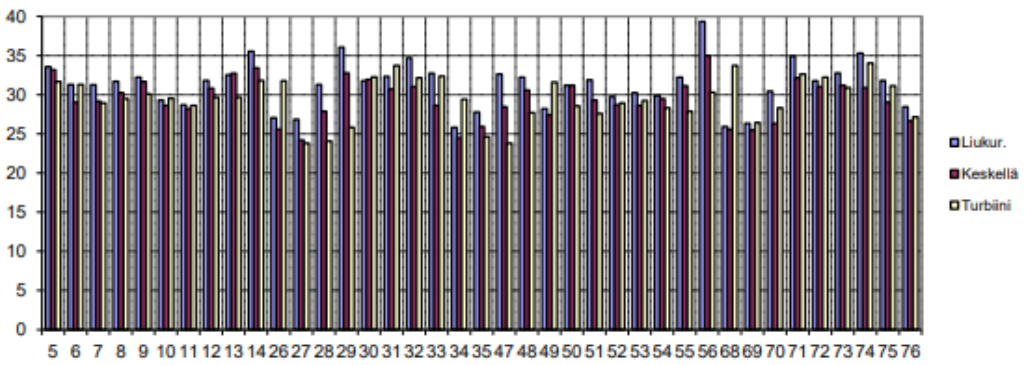
| Vaihe W | | | | | | | | | | |
|---------------|---------|------------|---|---|---------------|----------------|----------------|-------------------|----------|----------|
| Syöttöliitin | | Ura n:o | Sauvojen vaiheet | | Purkaustasot | | | Purkaustasot (µV) | | |
| Liitin n:o | U kV | |  |  | Liukur. dB | Keskellä dB | Turbiini dB | Liukur. | Keskellä | Turbiini |
| W1 KP pint | 6,3 | 12 | W | V | 30 | 27 | 27 | 13,3 | 8,5 | 8,6 |
| | | 13 | W | V | 28 | 25 | 25 | 10,2 | 7,2 | 7,2 |
| | | 14 | W | V | 28 | 27 | 27 | 10,6 | 8,9 | 9,1 |
| | | 15 | W | W | 36 | 32 | 33 | 25,5 | 15,8 | 17,2 |
| | | 16 | W | W | 33 | 32 | 33 | 17,8 | 16,0 | 17,8 |
| | | 17 | U | W | 34 | 31 | 31 | 19,2 | 13,4 | 15,0 |
| | | 18 | U | W | 35 | 32 | 34 | 23,2 | 15,3 | 21,1 |
| | | 19 | U | W | 33 | 30 | 30 | 18,5 | 12,2 | 12,2 |
| | | 20 | U | W | 30 | 27 | 30 | 12,2 | 9,4 | 8,0 |
| | | 21 | U | W | 34 | 32 | 26 | 20,4 | 15,4 | 9,6 |
| W2 TP pint | 6,3 | 33 | W | V | 34 | 31 | 28 | 19,1 | 14,0 | 10,4 |
| | | 34 | W | V | 32 | 31 | 28 | 16,4 | 14,8 | 14,4 |
| | | 35 | W | V | 30 | 28 | 31 | 12,7 | 10,0 | 9,9 |
| | | 36 | W | W | 31 | 29 | 28 | 14,4 | 10,8 | 9,9 |
| | | 37 | W | W | 32 | 30 | 28 | 16,7 | 12,1 | 10,8 |
| W1 KP phj | 6,3 | 38 | W | W | 30 | 28 | 29 | 12,3 | 10,4 | 9,7 |
| | | 39 | W | W | 33 | 29 | 28 | 17,6 | 11,2 | 12,0 |
| W1 KP pint | 6,3 | 40 | U | W | 31 | 29 | 30 | 14,3 | 11,1 | 10,4 |
| | | 41 | U | W | 34 | 30 | 28 | 20,7 | 13,3 | 13,1 |
| | | 42 | U | W | 36 | 35 | 30 | 25,5 | 22,2 | 20,5 |
| | | 54 | W | V | 28 | 25 | 34 | 10,0 | 7,3 | 7,2 |
| | | 55 | W | V | 27 | 24 | 25 | 8,8 | 6,3 | 7,4 |
| | | 56 | W | V | 30 | 26 | 25 | 13,3 | 8,4 | 9,0 |
| | | 57 | W | W | 36 | 32 | 27 | 24,4 | 15,5 | 15,2 |
| | | 58 | W | W | 34 | 33 | 32 | 20,5 | 16,9 | 19,5 |
| | | 59 | W | W | 33 | 30 | 34 | 18,4 | 12,8 | 14,3 |
| | | 60 | W | W | 36 | 32 | 31 | 24,5 | 15,2 | 21,0 |
| W2 TP phj | 6,3 | 61 | U | W | 31 | 29 | 34 | 14,2 | 11,2 | 12,6 |
| | | 62 | U | W | 30 | 29 | 30 | 13,0 | 11,0 | 11,7 |
| | | 63 | U | W | 35 | 30 | 29 | 21,6 | 12,8 | 10,7 |
| | | 75 | W | V | 35 | 32 | 29 | 22,9 | 15,4 | 13,4 |
| | | 76 | W | V | 32 | 30 | 31 | 15,8 | 12,7 | 19,3 |
| W1 KP phj | 6,3 | 77 | W | V | 30 | 27 | 34 | 12,9 | 9,4 | 12 |
| | | 78 | W | W | 34 | 30 | 28 | 21,0 | 13,3 | 10,3 |
| | | 79 | W | W | 30 | 29 | 29 | 13,3 | 11,2 | 10,9 |
| | | 80 | W | W | 31 | 30 | 30 | 13,6 | 12,8 | 12,2 |
| | | 81 | U | W | 31 | 28 | 30 | 14,2 | 10,3 | 12,6 |
| | | 82 | U | W | 31 | 28 | 28 | 14,8 | 10,6 | 9,8 |
| | | 83 | U | W | 33 | 31 | 30 | 18,1 | 13,8 | 13,1 |
| | | 84 | U | W | 35 | 33 | 32 | 23,0 | 18,3 | 15,6 |

HOHTOPURKAUSTASOJEN VAIHEKOHTAISET KUVAAJAT

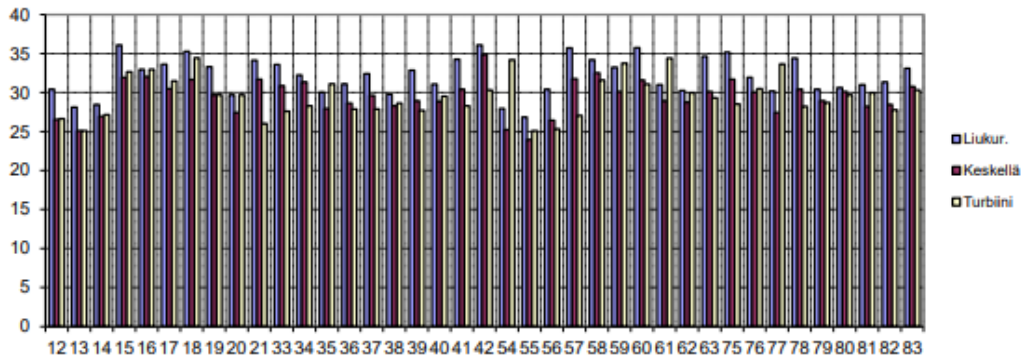
Vaihe U



Vaihe V



Vaihe W



FLUKE

| Kohteen nimi | Kohteen tunnus | Kohteen tyyppi | Kohteen tila | Kiireellisyysluokitus | Vaatii toimenpiteitä |
|--------------|----------------|----------------|---------------|-----------------------|----------------------|
| | | Ei määritelty | Ei määritelty | Ei määritelty | Ei määritelty |

Ääni kuva



Kuvan tiedot

| | |
|--------------------|------------------------|
| Tallennustila | PDQ |
| Päivämäärä ja aika | 02/05/2025 04:17:18 PM |
| Kamera | i915-67109716 |
| Tutkimuksen nimi | Default |
| Sarjanumero | |
| Pulssimäärä | 53159 |
| Purkaustyyppi | External (manual) |

Huomautukset

- Muistiinpano
W ura 84
50hz
- Muistiinpanot
Ei muistiinpanoja.
- Säämerkinnät
Ei muistiinpanoja.

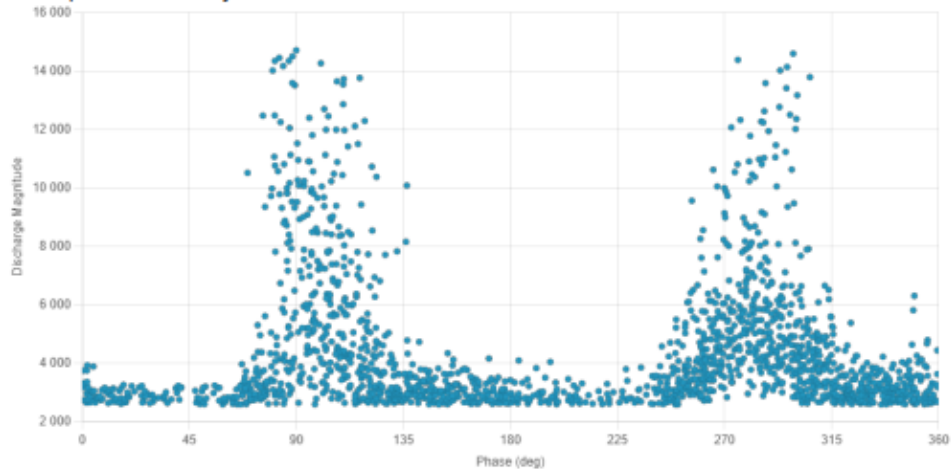
Purkaustodennäköisyys

| | | |
|--------------|----|---|
| Ulkoinen | 75 | % |
| Sisäinen | 0 | % |
| Pintapurkaus | 25 | % |
| Muu | 0 | % |

PDQ Mode™ -tiedot

| | | |
|----------------------|------|----|
| Suhteellinen kosteus | 30 | % |
| Taajuus | 50 | Hz |
| Ympäristön lämpötilä | 20 | °C |
| Jännite | 6300 | V |

Vaihepurkauskuvaaja

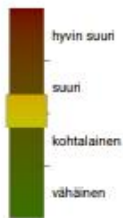


v ura5

Acoustic Camera -raportti
7.2.2025



Vakavuusaste



Kuvaus
Tämä luokitellaan pinta- tai sisäiseksi purkaukseksi. Tässä vaiheessa purkaus näyttää olevan suhteellisen heikkoa, mutta se voimistuu ajan myötä ja saattaa lopulta johtaa eristeen täydelliseen hajoamiseen.

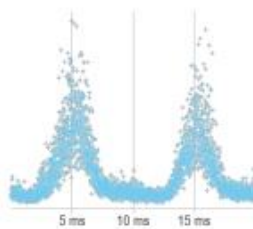
Suositus
Tarkastetaan määräajoin.

Ominaisuudet

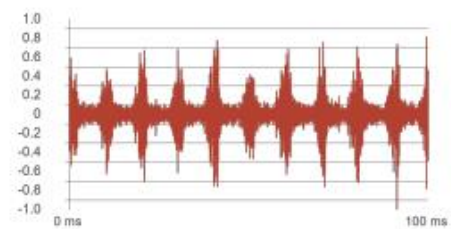
| | |
|---------------|----------------------|
| Taso | 12.5 dB |
| Luontipvm | 5.2.2025 |
| Laitte | |
| Laitteen nimi | |
| Etäisyys | 2 m |
| Jännite | 6.300000190734863 kV |
| Sijainti | staattori |

Osittaispurkaustyyppi PRPD

- negatiivinen korona
- positiivinen ja negatiivinen korona
- kelkka purkaus
- pinta- tai sisäinen purkaus



Aaltomuoto



Kommentit

Tunnisteet