

Teemu Lämsä

GENERAATTORIN STAATTORIN KÄYTTÖIÄN PIDENTÄMINEN

GENERAATTORIN STAATTORIN KÄYTTÖIÄN PIDENTÄMINEN

Teemu Lämsä
Opinnäytetyö
Kevät 2023
Sähkö- ja automaatiotekniikan tutkinto-
ohjelma
Oulun ammattikorkeakoulu

TIIVISTELMÄ

Oulun ammattikorkeakoulu
Sähkö- ja automaatiotekniikan tutkinto-ohjelma, Sähkötekniikka

Tekijä: Teemu Lämsä
Opinnäytetyön nimi: Generaattorin staattorin käyttöiän pidentäminen
Työn ohjaaja: Ensio Sieppi
Työn valmistumislukukausi ja -vuosi: Kevät 2023
Sivumäärä: 47 + 1 liite

Opinnäytetyön tavoitteena oli perehtyä generaattorin staattorin käyttöiän pidentämiseen eri huolto- ja korjaustoimenpiteiden avulla. Työ tehtiin TGS Finland Oy:lle.

Työ on rakenteeltaan tutkimusmainen. Työssä perehdytään generaattorin staattorin huoltoon, kunnonvalvontaan, mittauksiin, vikaantumismekanismeihin ja niiden korjauksiin sekä staattorin uusintaan. Työn tekemisessä on käytetty alan kirjallisuutta ja TGS Finland Oy:n sisäistä materiaalia sekä asiantuntijoiden kokemusta.

Generaattorit ovat elintärkeitä Suomen sähköntuotannon kannalta ja siksi on tärkeää, että niiden kuntoa valvotaan säännöllisesti ja tarpeelliset huollot suoritetaan. Generaattorin staattorilla on lukuisia eri vikaantumismekanismia, jotka voivat nopeasti johtaa vikaantumiseen ja pidempiaikaiseen seisakkiin. Staattorin elinikään voidaan vaikuttaa säännöllisellä kunnonvalvonnalla, jossa mahdolliset vikaantumismekanismit havaitaan ja korjataan.

Asiasanat: generaattori, staattori, kunnonvalvonta, vikaantuminen

ABSTRACT

Oulu University of Applied Sciences
Electrical engineering programme, Electrical power engineering

Author: Teemu Lämsä
Title of thesis: Prolonging the Life of a Generators Stator
Supervisor: Ensio Sieppi
Term and year when the thesis was submitted: Spring 2023
Number of pages: 47 + 1 appendix

The purpose of this Bachelor's thesis was to find out how to extend the lifetime of a generator's stator by means of different maintenance and repair measures. The thesis was done for TGS Finland Oy.

The structure of the work is research-like. In the work we learn about generator stator maintenance, condition monitoring, measurements, failure mechanisms and their repairs, as well as stator renewal. The literature of the field and TGS Finland Oy's internal material, as well as the experience of experts, have been used in the work.

Generators are vital for Finland's electricity production, and therefore it is important that their condition is monitored regularly and the necessary maintenance performed. The generator stator has numerous different failure mechanisms that can lead to failure and longer downtime. The lifetime of the stator can be affected by regular condition monitoring, where possible failure mechanisms are detected and repaired.

Keywords: generator, stator, condition monitoring, failure

ALKULAUSE

Kiitos TGS Finland Oy:lle ja sen henkilöstölle työn mahdollistamisesta. Erityiskiitokset insinööri Hannu Haapakoskelle, jolta sain ohjausta ja neuvoja työn aikana, sekä yliopettaja Ensio Siepille opinnäytetyön ohjauksesta.

Oulussa 16.4.2023

Teemu Lämsä

SISÄLLYS

| | |
|--|----|
| TERMIT JA LYHENTEET | 8 |
| 1 JOHDANTO | 9 |
| 2 SÄHKÖTUOTANTO SUOMESSA..... | 10 |
| 3 SÄHKÖTUOTANTO TAHTIGENERAATTORILLA | 12 |
| 3.1 Staattori..... | 13 |
| 3.2 Roottori..... | 15 |
| 3.3 Magnetointi..... | 16 |
| 4 GENERAATTORIN HUOLTO JA KUNNONVALVONTA | 18 |
| 4.1 Generaattorin huolto..... | 19 |
| 4.1.1 Operatiivinen huolto..... | 20 |
| 4.1.2 Huoltosuunnitelma | 20 |
| 4.2 Generaattorin kunnonvalvonta | 21 |
| 4.3 Jatkuva toiminen kunnonvalvonta | 22 |
| 4.4 Staattorin kunnonvalvontamittaukset ja tarkastukset..... | 22 |
| 4.4.1 Eristysvastusmittaus | 22 |
| 4.4.2 Tasavirtavastusmittaus | 24 |
| 4.4.3 Osittaispurkausmittaus..... | 25 |
| 4.4.4 Häviökulmamittaus..... | 28 |
| 4.4.5 Kapasitanssimittaus | 29 |
| 4.4.6 Levypaketin rautasulkumittaus..... | 29 |
| 4.4.7 Urakohtainen hohtopurkausmittaus | 30 |
| 4.4.8 Urakiilauksen tarkastus | 31 |
| 4.4.9 Aistinvaraiset tarkastukset | 32 |
| 5 STAATTORIN VIKAANTUMISMEKANISMIT..... | 34 |
| 5.1 Likainen tai kostea käämitys..... | 34 |
| 5.2 Käämityksen huonot liitokset..... | 35 |
| 5.3 Kääminpääalueen sidosten löystyminen | 36 |
| 5.4 Käämityksen eristeen kuluminen | 37 |
| 5.5 Osittaispurkausjäljet eristepinnassa | 38 |
| 6 TÄHTIPISTEEN KÄÄNTÄMINEN | 40 |
| 7 GENERAATTORIN UUSIMINEN..... | 43 |

| | | |
|---|------------------|----|
| 8 | YHTEENVETO | 44 |
| | LÄHTEET | 45 |
| | LIITE | 48 |

TERMIT JA LYHENTEET

| | |
|----------|---|
| ac | alternating current, vaihtovirta |
| dB | desibeli |
| DE | Drive end, generaattorin turbiinipää |
| Hz | hertz, taajuuden yksikkö, jaksoa sekunnissa |
| k | kilo |
| mV | millivoltti |
| M | mega |
| nC | nanocoulombi |
| NDE | Non-drive end, generaattorin magnetointipää |
| pF | pikofaradi |
| pC | pikocoulombi |
| TWh | terawattitunti |
| V | voltti |
| Ω | ohmi |
| δ | delta |

1 JOHDANTO

Generaattorit ovat elintärkeitä Suomen sähköntuotannon kannalta ja siksi on tärkeätä, että niiden kuntoa valvotaan säännöllisesti ja tarpeelliset huollot suoritetaan. Generaattorin staattorilla on lukuisia eri vikaantumismekanismeja, jotka voivat nopeasti johtaa vikaantumiseen ja pidempiaikaiseen seisakkiin. Staattorin elinikään voidaan vaikuttaa säännöllisellä kunnonvalvonnalla, jossa mahdolliset vikaantumismekanismit havaitaan ja korjataan.

Opinnäytetyön toimeksiantajana toimi TGS Finland Oy, jonka palveluihin kuuluu mm. voimalaitosten käyttöön ja kunnossapitoon liittyvät asiantuntijapalvelut sekä huolto- ja kunnossapitopalvelut. Työn tavoitteena oli perehtyä generaattorin staattorin käyttöiän pidentämiseen eri huolto- ja korjaustoimenpiteiden avulla, jotka ovat keskeinen osa TGS Finland Oy:n tarjoamia palveluita.

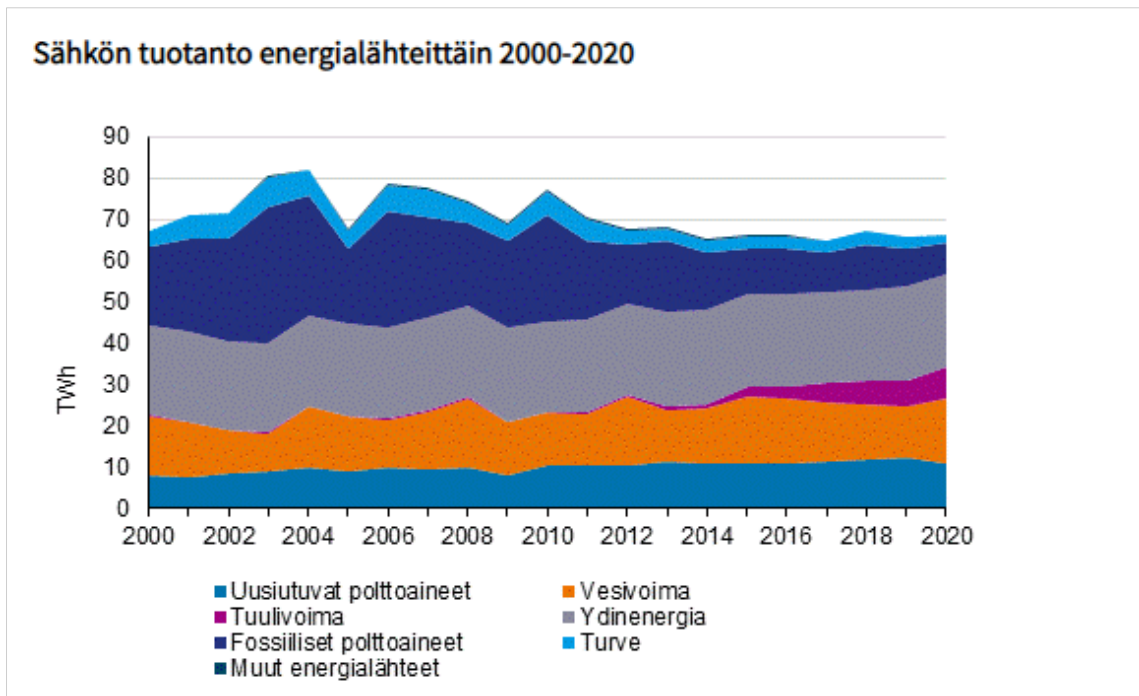
Työn alussa käsitellään Suomen sähköntuotantoa, turbogeneraattoreiden rakennetta ja niiden huoltoa ja kunnonvalvontaa, johon kuuluu generaattorin staattorille tehtävät sähköiset ja mekaaniset kunnonvalvontamittaukset sekä tarkastukset. Työn lopussa perehdytään siihen, millaisia eri vikaantumismekanismeja staattorilla on ja miten ne pystytään mahdollisesti korjaamaan. Onnistuneilla korjaustoimenpiteillä staattorille voidaan saada useita vuosia lisää käyttöikää, riippuen vikaantumismekanismin vakavuudesta. Kyseisistä korjauksista tähtipisteen kääntö on harvinaisempi, mutta erittäin toimiva ja usein helposti tehtävissä oleva ”korjaustoimenpide”, josta on otettu erillinen esimerkkitapaus.

2 SÄHKÖNTUOTANTO SUOMESSA

Suomessa tuotetaan sähköä monipuolisesti usealla eri energialähteellä ja tuotantomuodolla, joista tärkeimpiä ovat ydinvoima, vesivoima, kivihiili, maakaasu ja puupolttoaineet. Myös tuulivoiman osuus on selvästi nousussa. Vesivoiman osuus sähköntuotannosta riippuu sen vuotisesta vesitilanteesta. Hyvänä vesivuotena vesivoiman osuus kokonaissähköntuotannosta on suurempi, mutta siinä tapauksessa sähköä tuodaan myös pohjoismaisilta markkinoilta, kuten Norjasta ja Ruotsista. Tämän takia vesitilanne heijastuu aina myös fossiilisten polttoaineiden käyttöön sähköntuotannossa. (1.)

Suomessa on noin 120 sähköä tuottavaa yritystä ja noin 400 voimalaitosta, joista yli puolet on vesivoimalaitoksia. Sähköntuotantomme on hyvin monipuolista ja hajautettua verrattuna moneen muuhun Euroopan maahan, mikä lisää sähkön hankinnan varmuutta. Sähköstä melkein kolmannes tuotetaan yhteistuotantona lämmöntuotannon kanssa, jonka takia polttoaineen energiasisällöstä jopa 90 % saadaan muutettua sähköksi ja lämmöksi. (1.)

Suomen sähköntuotanto vuonna 2020 oli 66,6 TWh, eli 66,6 miljardia kilowattituntia. Vuoteen 2019 verrattuna kokonaissähköntuotanto pysyi melkein samana tuotannon kasvaessa vain 0,5 TWh ja kokonaiskulutuksen laskiessa 4,5 TWh, ollen 81,6 TWh. Kokonaiskulutuksesta 82 % katettiin Suomen omalla sähköntuotannolla ja loput 18 % sähkön nettotuonnilla Pohjoismaista, Venäjältä ja Viirosta. Kokonaissähköntuotannosta ennätyselliset 34,7 TWh katettiin uusiutuvilla energialähteillä, kuten vesivoimalla ja tuulivoimalla. Tämä on ensimmäinen kerta noin 50 vuoteen, kun yli puolet Suomen sähköntuotannosta on tuotettu uusiutuvilla energialähteillä. Kasvu johtui enimmäkseen vesivoiman tuotannon noususta, jonka osuus sähköntuotannosta riippuu sen vuotisesta vesitilanteesta. Kuvassa 1 on esitetty Suomen sähköntuotanto energialähteittäin vuosina 2000–2020. (2, s. 1–2.)

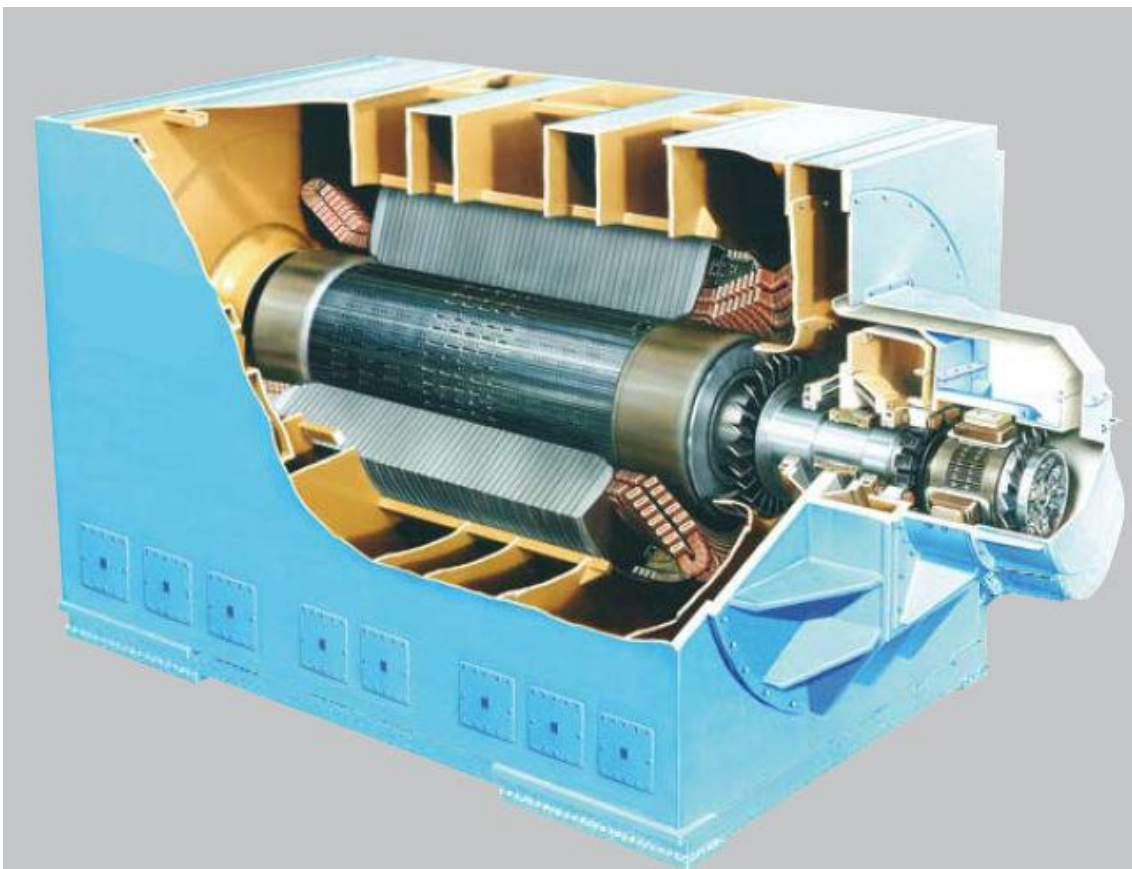


KUVA 1. Sähkön tuotanto energialähteittäin 2000–2020 (2, s. 1)

3 SÄHKÖNTUOTANTO TAHTIGENERAATTORILLA

Voimalaitoksissa sähköenergia tuotetaan generaattoreilla, jotka muuttavat höyry-, tuuli-, vesi- tai kaasuturbiinin tai moottorin kehittämän mekaanisen energian sähköksi. Generaattori koostuu kahdesta pääkomponentista, jotka ovat staattori eli seisoja ja roottori eli pyörijä. Staattori on runkoon kiinnitetty osa, jonka sisällä laakereiden varassa oleva roottori pyörii. (3, s. 19.) Kuvassa 2 on esitetty poikkileikkauskuva kaksinapaisesta turbogeneraattorista.

Kun roottoriin johdetaan liukurenkaiden ja harjojen kautta tasavirtaa, koneeseen kehittyä magneettivuo. Roottorin pyöriessä magneettivuoviivat leikkaavat staattorin käämisauvoja, jolloin staattorikäämitykseen indusoituu kolmivaiheinen lähdejännite, joka vaihtelee sinimuotoisesti. Indusoituvan jännitteen taajuus määräytyy koneen napapariluvusta ja akselin pyörimisnopeudesta. Indusoituneen jännitteen tasoa voidaan säätää muuttamalla roottorin tasakentän eli magneettivuon arvoa pyörimisnopeuden ollessa vakio. (4, s. 88.)



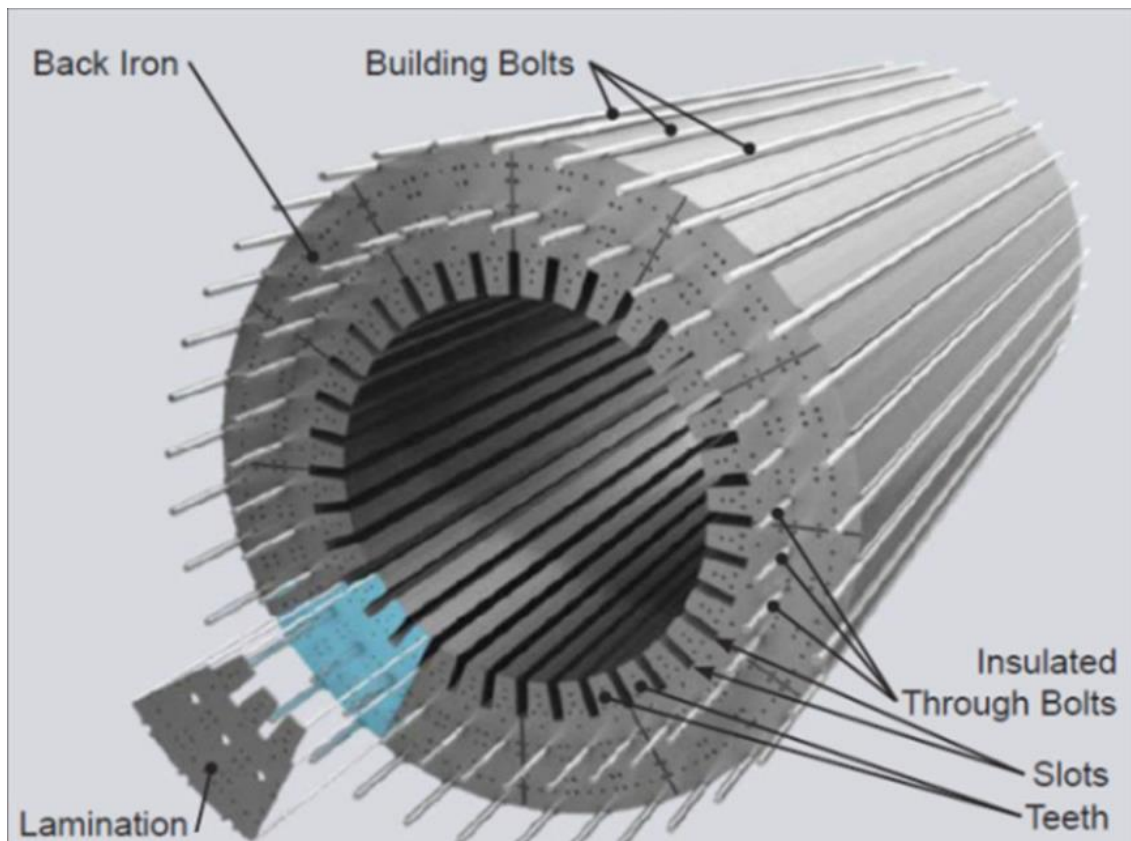
KUVA 2. Kaksinapaisen turbogeneraattorin poikkileikkauskuva (5)

3.1 Staattori

Generaattorin staattori koostuu kolmesta pääkomponentista, jotka ovat runkorakenne, levypaketti, eli rautasydän ja staattorikäänitys.

Staattorin rungon tarkoitus on tukea rautasydäntä ja toimia paineastiana vetyjäähdytteisissä generaattoreissa. Runkoon kohdistuu useita jatkuvia ja tilapäisiä kuormituksia, jotka sen tulee kestää. Sen on myös kyettävä liikkumaan rautasydämen lämpölaajenemisen ja supistumisen mukana. Kaiken tämän huomioon ottamiseksi rautasydämen ja rungon välisessä mekaanisessa kytkennässä on hieman joustavuutta. Turbogeneraattoreissa runkorakenne asennetaan yleensä erilliselle jousitetulle alustalle, mikä auttaa vaimentamaan rautasydämen ja rungon luontaista tärinää. Staattorin runkoa suunniteltaessa pitää myös ottaa huomioon rungon ominaistaajuus, joka ei saa olla lähellä generaattorin ja verkon taajuutta, eli 50 Hz tai sen kerrannaisia. (6, s. 39–40.)

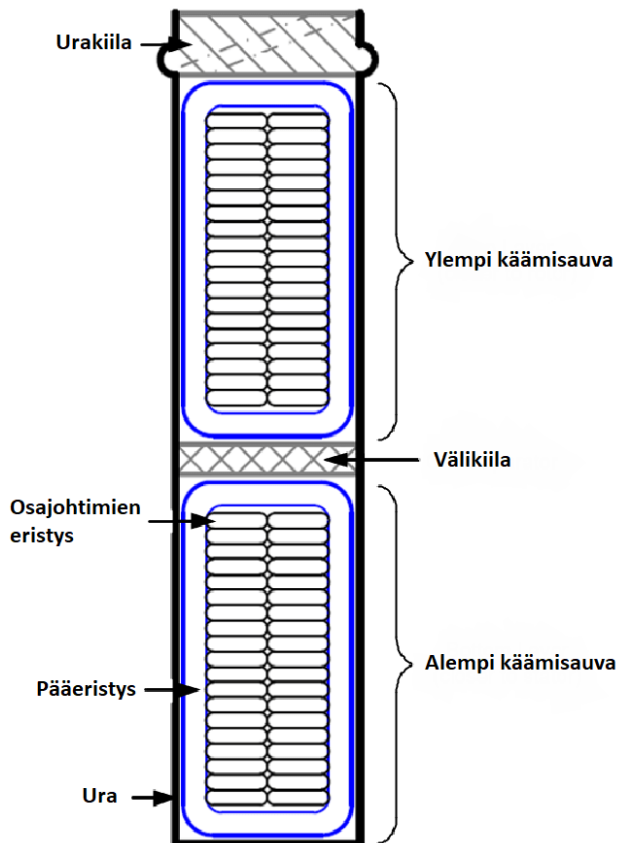
Levypaketin eli rautasydämen (kuva 3) tarkoitus on pitää käänitys paikoillaan urissaan ja johtaa magneettivuota. Se koostuu 0,355 mm tai 0,483 mm paksuisista teräslevyistä. Teräslevyt on segmentoitu, eli täysi kehä koostuu useammasta teräslevystä, joita on yleensä 10–24. Tähän vaikuttaa se, onko generaattori kaksi- vai nelinapainen. Lisäksi jokainen teräslevy on eristetty molemmin puolin. Tämän avulla vältetään levyjen välisiltä pyörrevirroilta ja niihin liittyviltä lämpötilan nousuilta. Jokainen kerros on porrastettu suhteessa ala- ja yläpuolen kerroksiin, mikä lisää rautasydämen rakenteellista kestävyyttä ja pienentää roottorin magnetointipiirin epäsymmetriasta johtuvaa akselijännitettä. (6, s. 35.)



KUVA 3. Turbogeneraattorin levypaketti (7)

Staattorikäänitys koostuu eristetyistä kuparisista käämisauvoista, jotka asennetaan rautasydämen sisäpuolella oleviin uriin tasaisin välein symmetrisen magneettivuon aikaansaamiseksi (kuva 4). Jokaisessa urassa on kaksi käämisauvaa päällekkäin. Niitä kutsutaan yleisesti ylä- ja alasauvoiksi. Käänitys on jaettu kolmeen vaiheeseen, jotka on melkein aina tähtikytketty, eli jokainen vaihe on toisesta päästä yhdessä. Tähtikytkennän avulla saadaan symmetria vaiheiden välille sekä mahdollistetaan neutraali maadoituspiste ja käänityksen relesuojaus. (6, s. 51–52.)

Pyörrevirtojen ja rautahäviöiden pienentämiseksi käämisauvat koostuvat useista toisistaan eristetyistä kuparisäikeistä eivätkä yhdestä isosta kuparitangosta. Kuparisäikeiden välisistä eristyksistä huolimatta säikeet ovat yleensä yhteydessä toisiinsa käämisauvan molemmista päistä. Tämä mahdollistaa haitallisten kiertovirtojen kulkemisen käämisauvojen ylä- ja alasäikeiden välillä. Kiertovirtojen vaikutusten vähentämiseksi kuparisäikeet ovat ”Roebel punottu”. (6, s. 53.)



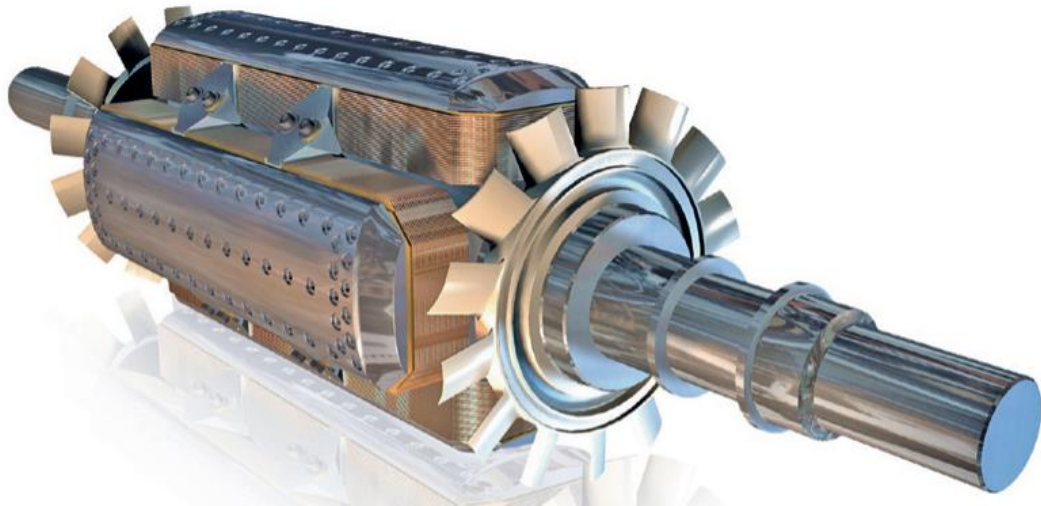
KUVA 4. Esimerkki staattorikäänityksen rakenteesta (8, s. 6)

3.2 Roottori

Tahtikoneiden roottorit voidaan jakaa umpi- ja avonapaisiin. Umpinapaisessa roottorissa (kuva 5) on sylinterimäinen rakenne, jossa käämitys asennetaan roottorissa oleviin uriin. Avonapaisessa roottorissa (kuva 6) käämitys ei ole urissa, vaan roottori koostuu erillisistä navoista. Umpinaparootoreita käytetään yleensä nopeasti pyörivissä koneissa, kuten turbogeneraattoreissa. Avonapaisia roottoreita sen sijaan käytetään hitaasti pyörivissä koneissa, kuten vesivoimalaitoksien generaattoreissa. (9, s. 2.)



KUVA 5. Umpinapainen roottori (10)



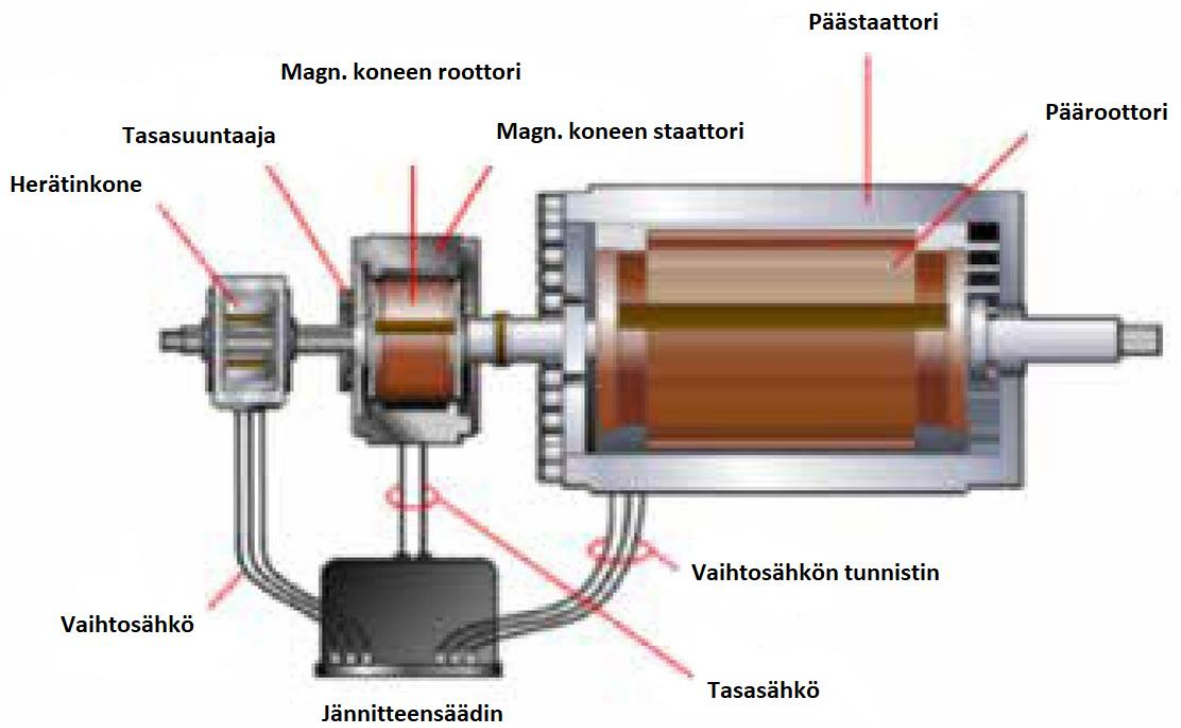
KUVA 6. Avonapainen roottori (11, s. 2)

3.3 Magnetointi

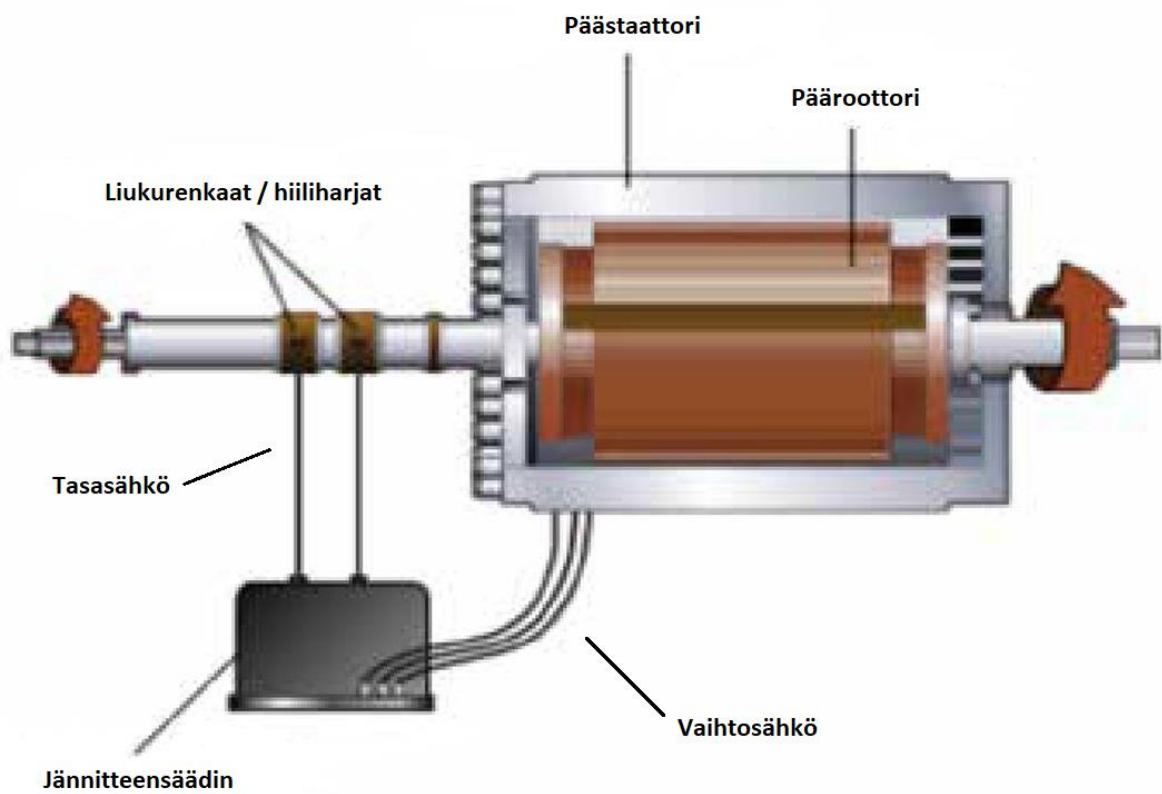
Tahtigeneraattorit voidaan jakaa magnetointitavan perusteella kahteen eri ryhmään: harjattomiin ja harjallisiin. Harjattomat generaattorit ovat varsin yksinkertaisia rakenteeltaan, jonka takia suurin osa nykyään valmistettavista tahtigeneraattoreista on harjattomia. (3, s. 38.)

Harjattomassa magnetoinnissa (kuva 7) magnetoimisvirta johdetaan roottorille magnetointikoneen avulla, joka on kytketty samalle akselille roottorin kanssa. Usein harjattomassa magnetoinnissa samalla akselilla on myös herätinkone, jonka avulla magnetointikoneen tarvitsema virta tuotetaan. Tahtikoneissa magnetointikone on ulkonapakone, jossa staattorikäänitys magnetoidaan tasavirralla ja roottorissa on kolmivaiheinen käänitys, johon virta indusoituu. Roottorissa on diodisilta, jonka avulla indusoitunut virta tasasuunnataan. (3, s. 38.)

Harjallisessa magnetoinnissa (kuva 8) magnetointi suoritetaan hiiliharjojen avulla. Hiiliharjat tulevat roottoriakselilla sijaitseville liukurenkaille, jotka ovat yhteydessä roottorin napoihin. Magnetoimisvirta saadaan joko ulkopuolisesta tasasähkölähteestä tai generaattorin akselilla sijaitsevasta magnetointigeneraattorista. Harjallisella magnetoinnilla on omat hyvät ja huonot puolensa. Sen säätö on nopeampaa kuin harjattomassa. Toisaalta liukurenkaat vaativat säännöllistä huoltoa ja hiiliharjoista irtoaa koneelle haitallista hiilipölyä. (3, s. 41–42.)



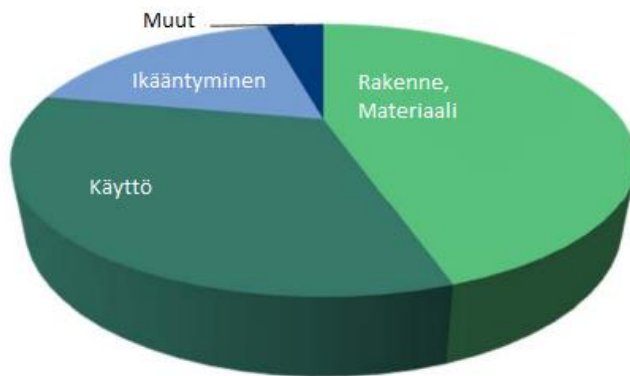
KUVA 7. Harjaton magnetointi, jossa on herätinkone (12)



KUVA 8. Harjallinen magnetointi ulkoisella tasasähkölähteellä (12)

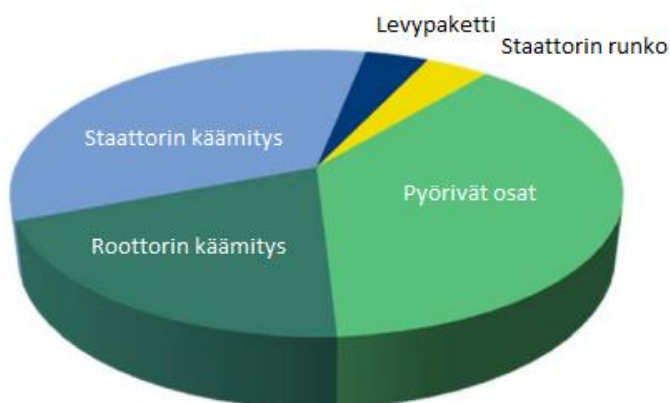
4 GENERAATTORIN HUOLTO JA KUNNONVALVONTA

Generaattori on teknisesti monimutkainen ja pitkäaikaiseen käyttöön suunniteltu laitekokonaisuus. Sen käyttöikään vaikuttavat monet eri asiat, kuten virheellinen käyttö, ikääntyminen, rakenne ja materiaalit. Kuvassa 9 on esitetty Allianz-vakuutusyhtiön suorittaman tutkimuksen tulokset turbogeneraattoreiden vikaantumiseen johtaneista syistä. (13, s. 3.)



KUVA 9. Turbogeneraattorin vikaantumisen syyt (13, s. 3)

Vikaantumisen aiheuttanut osa riippuu tietenkin myös generaattorin tyypistä ja rakenteesta. Pohjoisamerikkalainen yhtiö NERC on tehnyt luotettavuustutkimuksen kaksi- ja nelinapaisista turbogeneraattoreista. Kaksinapaisissa turbogeneraattoreissa, jotka pyörivät 3000 rpm, suurin osa vikaantumista johtuu roottorista. Sen sijaan nelinapaisissa turbogeneraattoreissa, jotka pyörivät puolet hitaammin eli 1500 rpm, suurin osa vikaantumista johtuu staattorista. Kuvassa 10 on esitetty nelinapaisen turbogeneraattorin vikaantuneiden komponenttien osuudet. (13, s. 4.)

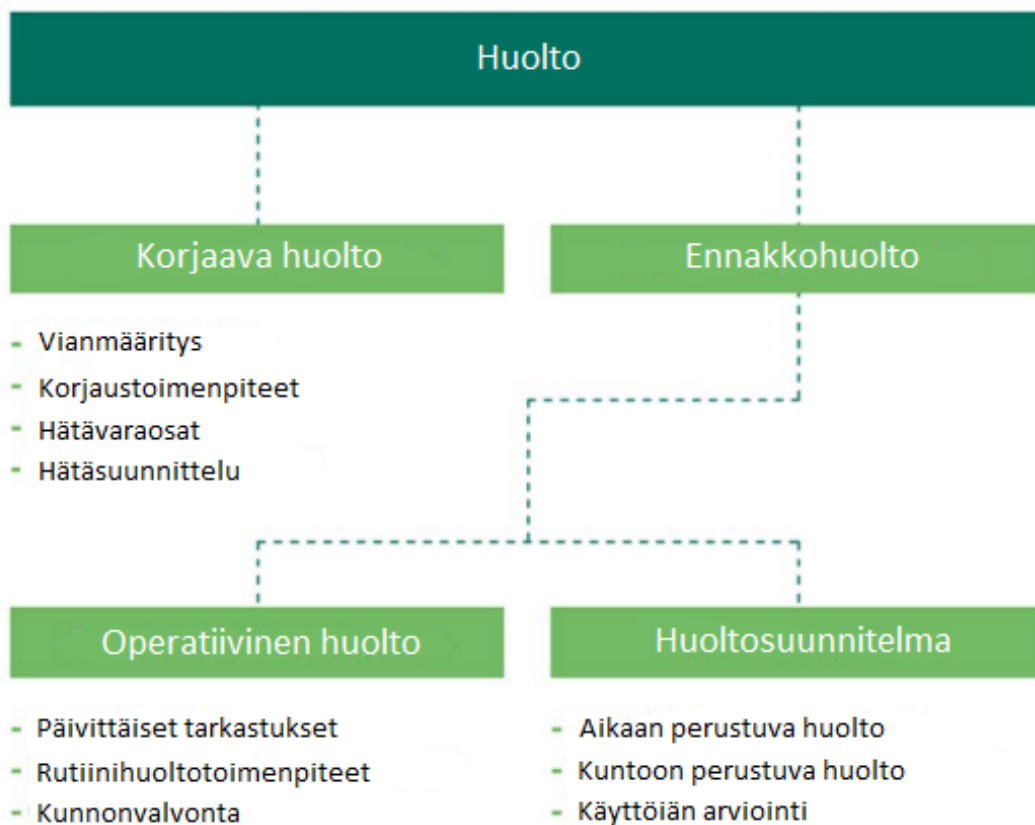


KUVA 10. Vikaantunut komponentti nelinapaisessa turbogeneraattorissa (13, s. 4)

Epänormaalien ja haitallisten olosuhteiden välttämiseksi generaattorit on varustettu suojarleillä. Tästä huolimatta generaattorin suunnitellun käyttöiän varmistamiseksi ja käytettävyyden ylläpitämiseksi on tärkeää tarkastaa kriittisten osien todellinen kunto säännöllisesti ja huoltaa laitteiston kuluvat osat. (13, s. 4.)

4.1 Generaattorin huolto

Huolto voidaan jakaa korjaavaan ja ennaltaehkäisevään huoltoon. Ennaltaehkäisevä huolto puolestaan voidaan jakaa operatiiviseen huoltoon ja huollon suunnitteluun. Ennaltaehkäisevän huollon tarkoitus on säilyttää generaattorin alkuperäinen luotettavuus ja käytettävyys sekä minimoida korjaavan huollon tarpeet. (Kuva 11.) (13, s. 4.)



KUVA 11. Generaattorin huolto jaettuna korjaavaan ja ennakoivaan huoltoon (13, s. 5)

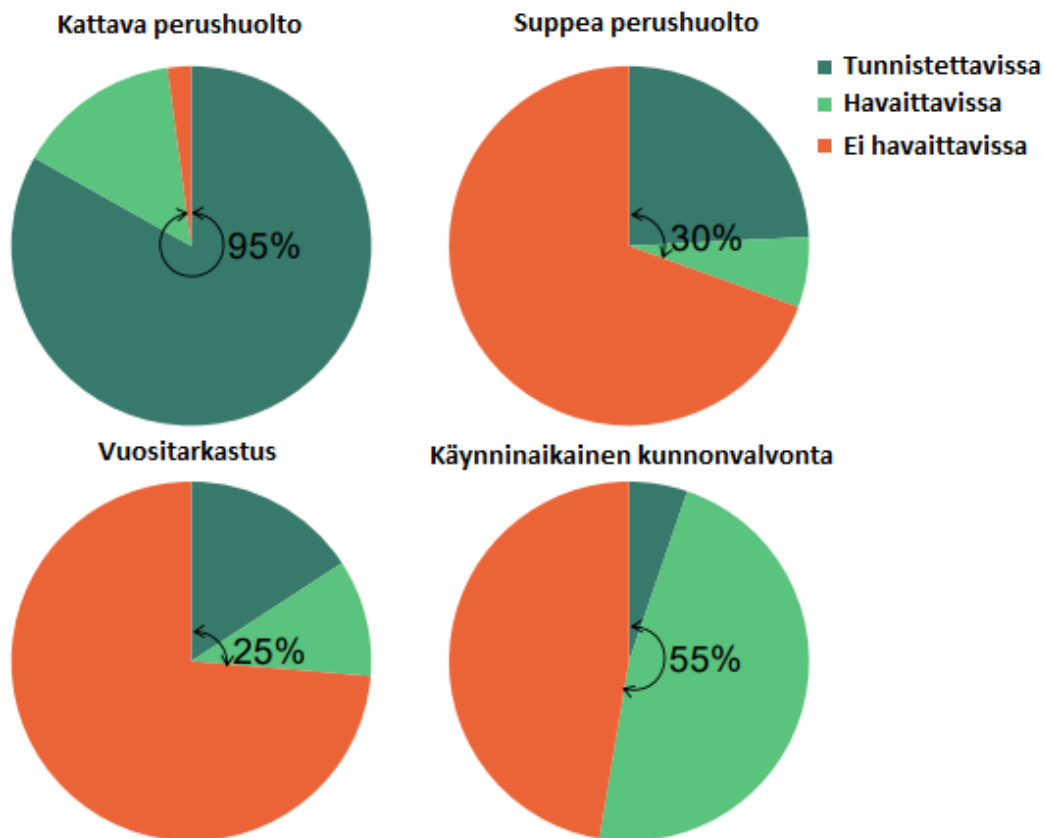
4.1.1 Operatiivinen huolto

Operatiivinen huolto on tärkeä osa generaattorin huoltokokonaisuutta käytettävyyden ja käyttöiän kannalta. Siihen kuuluvat laitoksen oman käyttö- ja kunnossapitohenkilökunnan suorittamat pienet tarkastus- ja huoltotoimet, kuten käynnin aikaisten tietojen seuranta, kuluvien osien vaihdot ja käynnin aikainen kunnonvalvonta. Operatiivinen huolto voidaan jakaa kolmeen osaan, jotka ovat päivittäiset tarkastukset, rutiinihuoltotoimenpiteet ja kunnonvalvonta. (3, s. 92–93.)

4.1.2 Huoltosuunnitelma

Uuden generaattorin huoltosuunnitelma on yleensä aikaperusteinen, riippuen valmistajan kokeuksesta kyseisestä generaattorityypistä. Suunnitelman sisältö ja sen toteutus määräytyy yleensä sen mukaan, miten mahdolliset viat voivat kehittyä ja ovat havaittavissa. Käytännön takia on tärkeää suunnitella generaattorin huoltosuunnitelma yhteneväksi turbiinin huoltosuunnitelman kanssa. Hyvä koordinointi, resurssien suunnittelu ja materiaalien sekä varaosien hankinta johtavat tehokkaaseen huoltoon. (13, s. 5.)

Aikaan perustuva huoltosuunnitelma voidaan yleisesti jakaa kolmeen eri laajuuteen, jotka ovat kattava perushuolto (major overhaul), suppea perushuolto (minor overhaul) ja vuosihuolto (safety check). Näistä tärkein on kattava perushuolto, jonka avulla kaikki generaattorin kriittiset komponentit saadaan tarkastettua, diagnosoitua, puhdistettua ja huollettua. Kuvassa 12 on esitetty eri huoltolaajuuksien sekä käynnin aikaisen kunnonvalvonnan kyvyt tunnistaa ja havaita eri vikatilat. (13, s. 5.)



KUVA 12. Huoltolaajuuksien ja käynninaikaisen kunnonvalvonnan kyvyt tunnistaa ja havaita vika-tilat (13, s. 13)

Generaattorin oltua käytössä useamman vuoden on yhä tärkeämpää muuttaa huoltosuunnitelma kuntoon perustuvaan, eli suunnitella huollot kriittisten komponenttien todellisen kunnon perusteella. Kuntoon perustuvassa huoltosuunnitelmassa suoritetaan samoja perushuoltoja kuin aikaan perustuvassa huoltosuunnitelmassa, mutta tarvittaessa muutetaan huoltojen aikaväliä ja laajuutta löydösten mukaan. (13, s. 7.)

4.2 Generaattorin kunnonvalvonta

Kunnonvalvonnalla tarkoitetaan koneiden ja laitteiden kunnonarviointia niiden koko käyttöiän ajan. Sen tärkein tehtävä on tunnistaa vikojen kehittyminen varhaisessa vaiheessa. Vian havaitseminen hyvissä ajoin on tärkeää, koska se antaa huoltohenkilöstölle enemmän vapautta käyttökatojen aikataulutuksessa, mikä lyhentää laitoksen seisokkiaikoja ja pienentää tuotantotappioita. Lisäksi säännöllinen ja pitkäaikainen kunnonvalvonta mahdollistaa generaattorin kunnon trendiseurannan, jonka avulla huoltotoimenpiteet voidaan aikatauluttaa paremmin. (14, s. 4–8.)

4.3 Jatkuva toiminen kunnonvalvonta

Generaattorille voidaan asentaa Iris Power Guard II+ -järjestelmä, jos sen kuntoa halutaan seurata jatkuvatoimisesti. Staattorikäämyksen kannalta sen oleellimmat ominaisuudet ovat automaattinen osittaispurkausmittaus ja kääminpään värähtelymittaus koneen käydessä. Kyseinen järjestelmä voidaan asentaa jälkikäteen ja siihen voidaan yhdistää jo olemassa olevat anturit, kuten käynnin aikaisen osittaispurkausmittauksen anturit.

Iris Power Guard II+ -järjestelmän automaattisen osittaispurkausmittauksen avulla purkaustasojen muutoksiin päästään käsiksi reaaliaikaisesti toisin kuin perinteisessä käynnin aikaisessa osittaispurkausmittauksessa, joka suoritettaisiin puolen vuoden tai vuoden välein.

Iris Power Guard II+ voi toimia ”erillisenä” järjestelmänä, jolloin arkistoidut mittaustulokset pitää käydä hakemassa laitteelta tai se voidaan yhdistää laitoksen valvontajärjestelmään, jolloin tiedonkeruu ja analyysit onnistuvat etänä. Halutessa on myös mahdollista saada kaikki Guard II+ -järjestelmän antamat hälytykset näkyviin valvomoon. (15.)

4.4 Staattorin kunnonvalvontamittaukset ja tarkastukset

Kunnonvalvontamittaukset ja tarkastukset voidaan jakaa käynnin aikana (online) ja seisokin aikana (offline) suoritettaviin. Online kunnonvalvontamittaukset suoritetaan generaattorin käydessä ja offline kunnonvalvontamittaukset suoritetaan generaattorin seistessä. Seuraavat luvut käsittelevät yleisimpiä staattorin kunnonvalvontamittauksia ja tarkastuksia.

4.4.1 Eristysvastusmittaus

Eristysvastusmittauksella mitataan yksitellen jokaisen vaiheen ja maan, mukaan lukien rautasydämen, välinen eristysvastus ohmeina. Tätä mittausta pidetään yleisesti ensimmäisenä testinä eristysjärjestelmän vikojen havaitsemiseksi ja varmistuksena sille, että eristys on tarpeeksi hyvässä kunnossa suurjännitemittauksia varten. Hyvän eristysvastusmittauksen tulokset ovat yleensä $M\Omega$ luokkaa, kun käämykseen syötetään 500–5000 V DC minuutin ajan. IEEE Standardin 43 [4] mukaan pienin sallittu eristysvastus on $1 M\Omega \text{ per kV} + 1 M\Omega$. (6, s. 492–493.)

Syötettävän jännitteen suuruus riippuu yleensä koneen käyttöjännitteestä, tilaajan tai käyttäjän käytännöstä, aiemmasta kokemuksesta ja eristyksen kunnosta. Saadut mittaustulokset ovat jossain määrin jänniteriippuvaisia, mutta tällä ei ole merkitystä, jos käämitys on kuiva ja hyvässä kunnossa. Mittaustuloksiin vaikuttavat myös ulkoiset tekijät, kuten ilmankosteus, käämityksen likaisuus ja lämpötila, jonka takia tulokset tulee redusoida yleensä 40 tai 75 °C peruslämpötilaan kaavan 1 mukaan riippuen siitä, onko kyseessä vesivoima- vai turbogeneraattori. (6, s. 493.)

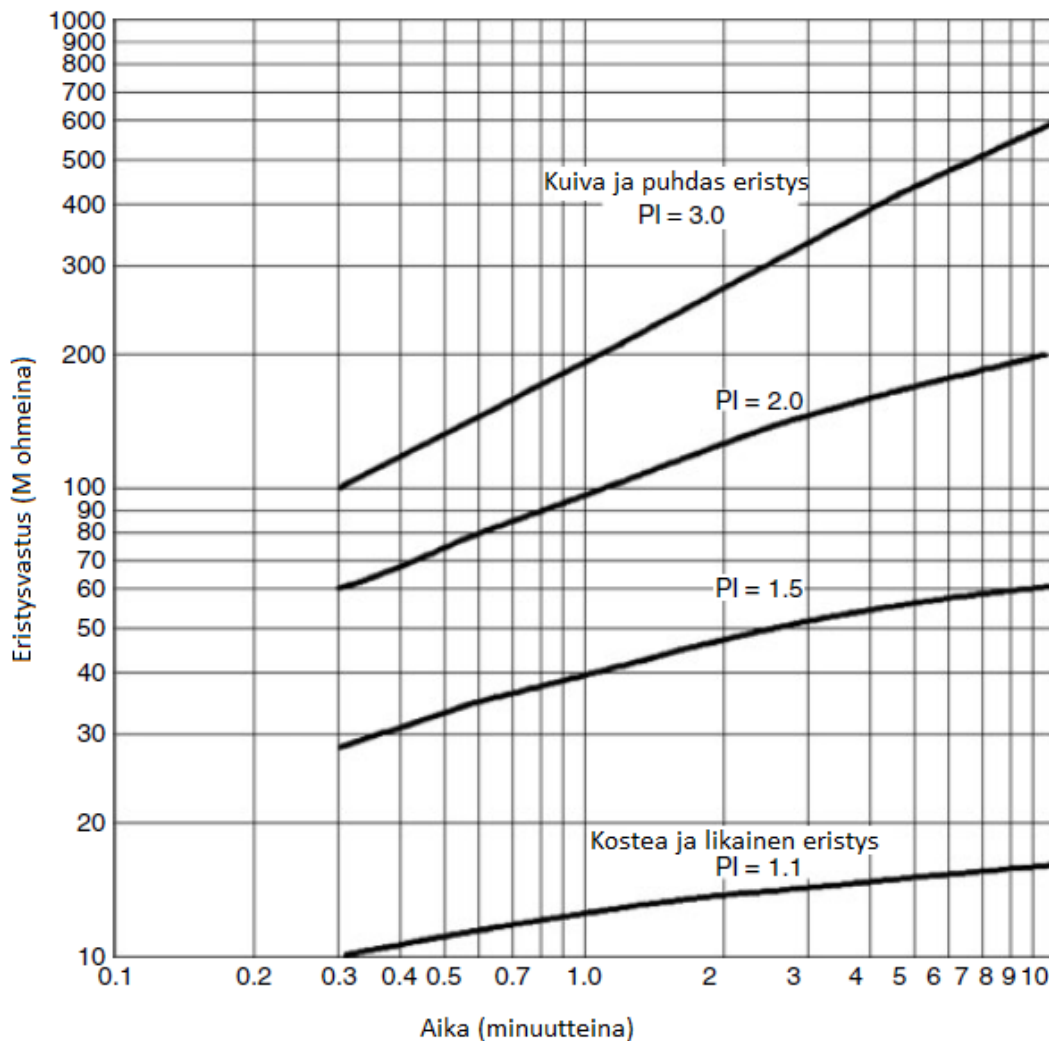
KAAVA 1. Eristysvastuksen redusointi haluttuun lämpötilaan

$$R (X \text{ } ^\circ\text{C}) = K \times R_{\text{mitattu}}(^\circ\text{C})$$

Kaavassa 1 $R (X \text{ } ^\circ\text{C})$ on eristysvastus redusoituna haluttuun lämpötilaan, K on lämpötilariippuvainen kerroin ja R_{mitattu} on mitattu eristysvastus. (6, s. 493.)

Ensimmäisten minuuttien aikana mitatun eristysvastuksen muutoksen suuruus riippuu eristyksen kunnosta ja likaisuuden sekä ilmankosteuden määrästä. Tästä syystä eristyksen ollessa puhdas ja kuiva eristysvastuksella on taipumus kasvaa, kun varaus ”imeytyy” eristeen dielektrisiin materiaaleihin. Jos eristys onkin viallinen, likainen tai märkä, varaus ei pysy eikä eristysvastus kasva vika paikassa olevan jatkuvan vuotovirran takia. Eristyksen kuivuuden ja puhtauden määrittämiseksi 10 minuutin ja 1 minuutin lukemien suhteesta saadaan arvo, jota kutsutaan polarisaatioindeksiksi. (6, s. 493–494.)

Suositteltu minimi polarisaatioindeksi riippuu eristyksen tyypistä sekä siitä, onko käämityksessä puolijohtava pinnoite. Kuvassa 13 on esitetty eristysvastuksen polarisaatioindeksi ajan funktiona. (6, s. 494–495.)



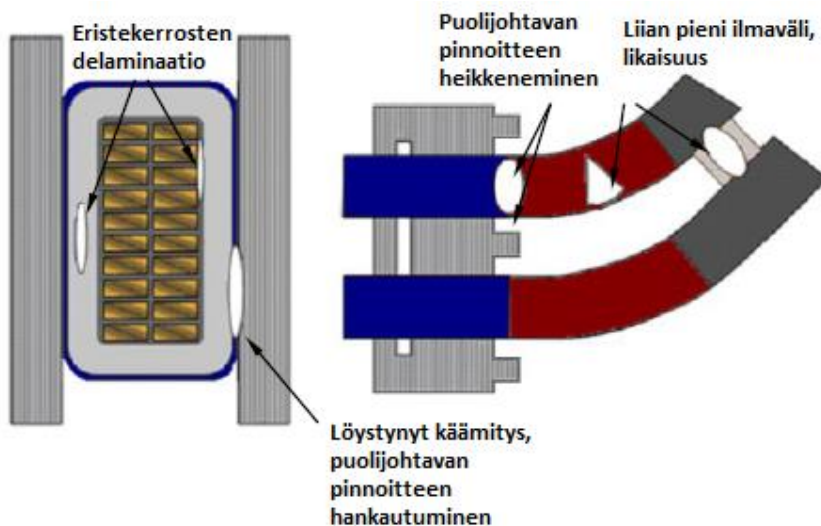
KUVA 13. Eristysvastuksen polarisaatioindeksi ajan funktiona (6, s. 496)

4.4.2 Tasavirtavastusmittaus

Tasavirtavastusmittauksessa mitataan vaihekohtaisesti käämityksen kuparin resistanssi. Tarkoitus on havaita käämityksessä mahdollisesti esiintyvät oikosulut, huonot tai väärät liitokset sekä avoimet piirit. Käämin alhaisen tasavirtavastuksen takia mittaustulokset pitää saada vähintään neljän desimaalin tarkkuudella. Mittauksen aikaisella käämin lämpötilalla on erittäin suuri vaikutus saattaviin mittaustuloksiin, jonka takia koneen olisi hyvä olla huoneenlämpöinen mitatessa, ja saadut mittaustulokset tulisi redusoida peruslämpötilaan, joka on yleensä 20 °C vertailun kannalta. Mittaustuloksia analysoidessa vaihekohtaisia vastuksia verrataan keskenään ja/tai tehdasmittauksiin. (6, s. 492.)

4.4.3 Osittaispurkausmittaus

Osittaispurkaukset ovat pieniä sähköisiä purkauksia, joita syntyy eniten eristyksen vikapaikoissa. Kaikissa suurjännitemoottoreiden ja generaattoreiden eristyksissä tapahtuu jonkin verran osittaispurkauksia, mutta eristys on suunniteltu kestäämään ne. Tiedetään, että niitä tapahtuu jo vuosia ennen vikaantumista ja kun eristys vanhenee, sen sisäiset osittaispurkaukset lisääntyvät. Monet vikaantumismekanismit, jotka määrittävät staattorin käämieristyksen käytännön eliniän, ovat seurausta osittaispurkauksista. Osittaispurkausmittausten ja niiden trendien seurannan avulla voidaan mahdollinen vikaantuminen ennakoita jo hyvissä ajoin ja suunnitella sen vaatimat huoltotoimenpiteet hyvissä ajoin. Osittaispurkausmittauksella voidaan havaita useat eri eristyksen vanhenemis- ja vikaantumismekanismit, kuten sähköiset urapurkaukset, käämin johtavan tai puolijohtavan pinnan kuluminen ja ontelot tai säröt eristeessä (kuva 14). (16, s. 378, 411.)



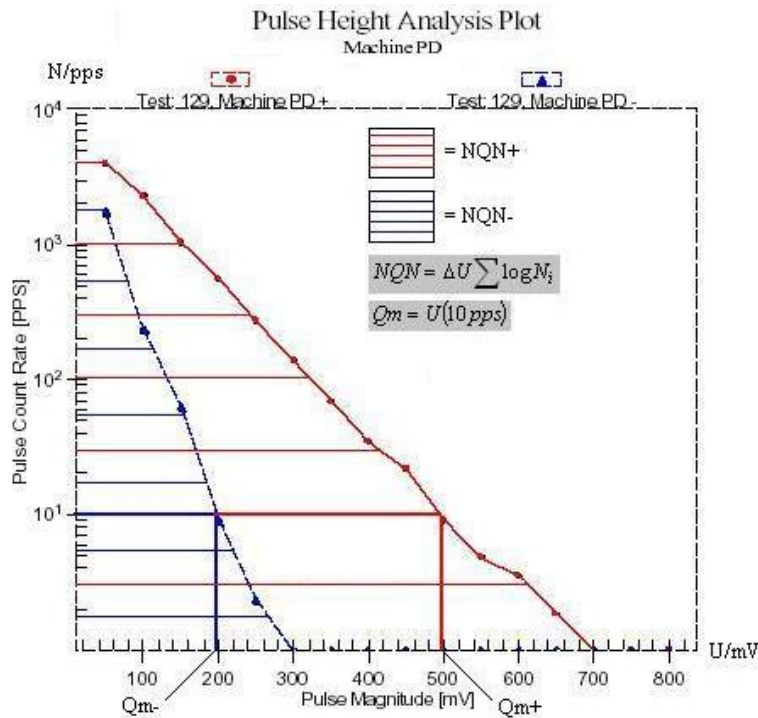
KUVA 14. Osittaispurkausten eri aiheuttajia staattorikäämityksessä (17)

Mittaus voidaan suorittaa kahdella eri tavalla: käynninaikaisena mittauksena (online) tai koneen seistessä (offline). Online osittaispurkausmittaus tehdään osittaispurkausanalyysaattorilla joko kiinteiden tai siirrettävien antureiden avulla. On olemassa useita eri antureita, joilla osittaispurkausmittaus voidaan tehdä. Näistä yleisin on 80 pF kapasitiivinen anturi. Asentamalla koneeseen kiinteät anturit voidaan mittaus suorittaa milloin tahansa koneen käydessä. Jos käytetään siirrettäviä antureita, pitää kone pysäyttää antureiden asennusta ja purkamista varten. Offline osittaispurkausmittaus tehdään yleensä aina siirrettävillä antureilla, mikäli ei voida käyttää hyväksi kiinteitä antureita. Mittauksen aikana kone on kytketty pois verkosta ja käämitykseen nostetaan jännite erillisen laitteiston avulla. (16, s, 411.)

Osittaispurkausten suuruutta mitataan purkausten varauksen suuruudella (pC). On myös mahdollista, että varauksen suuruutta mitataan millivolteina. Tällöin purkauksen varauksen suuruus pC vastaa tiettyä voimakkuutta millivolteina. (16, s. 412.)

Osittaispurkausmittausten analysointi on tärkeä osa mittausta. Yleisin tapa tulkita PD-aktiivisuutta on pulssin korkeusanalyysi (Pulse Height Analysis, PHA). PHA-tulostuksessa positiiviset ja negatiiviset PD-pulssit tulkitaan huomioiden niiden suuruus ja lukumäärä. Toinen tapa luokitella PD-aktiivisuutta on mitata osittaispurkausten lukumäärä, suuruus sekä pulssin sijainti suhteessa syöttötaajuuden vaihekulmaan. Tätä menetelmää kutustaan PD-pulssin vaiheanalyysiksi (PD Pulse Phase Analysis, PPA). (16, s. 412.)

Pulssin korkeusanalyysiä varten mittausohjelmisto laskee automaattisesti kaksi erilaista arvoa molemmille vaihekulmille. Näistä toinen on Qm-arvo (peak magnitude), joka on pulssin voimakkuuden arvo sillä kohtaa käyrää, jossa pulssien esiintymistiheys on 10 pulssia/sekunti. Tämän lukeman perusteella voidaan arvioida purkauspulssien haitallisuutta. Qm-arvot lasketaan molemmille puolijaksoille erikseen (negatiiviselle puolijaksolle lasketaan Qm+ arvo eli positiiviset pulssit, ja positiiviselle puolijaksolle lasketaan Qm- arvo eli negatiiviset pulssit). NQN-arvo (normalized quantity number) sen sijaan kuvaa vaihekulmakäyrien alapuolelle jäävää osaa ja vastaa osittaispurkauksista syntyvää häviöenergiaa. Tämän lukeman perusteella voidaan arvioida koko käämityksen yleiskuntoa. Myös NQN-arvot annetaan molemmille puolijaksoille erikseen (NQN+ ja NQN- arvot). (Kuva 15.) (16, s. 412–413.)



KUVA 15. Osittaispurkausmittauksen pulssinkorkeusanalyysi (PHA) (17)

Generaattoreiden eri rakenteiden, eristyskäytäntöjen ja jänniteluokitusten takia niiden osittaispurkaustasot vaihtelevat paljon. Sellaiset purkaustasot, jotka ovat yhdelle koneelle normaalit, voivat olla toiselle koneelle korkeat. Tämän takia on vaikea vetää selkeää rajaa eri osittaispurkaustasojen välille. Sen sijaan osittaispurkausten trendiseurannan avulla voidaan päästä käsiksi kyseisen koneen päeeristuksen ikääntymisen tahtiin. Taulukossa 1 on esitetty pidemmän ajan trendianalyysi osittaispurkaustasoista.

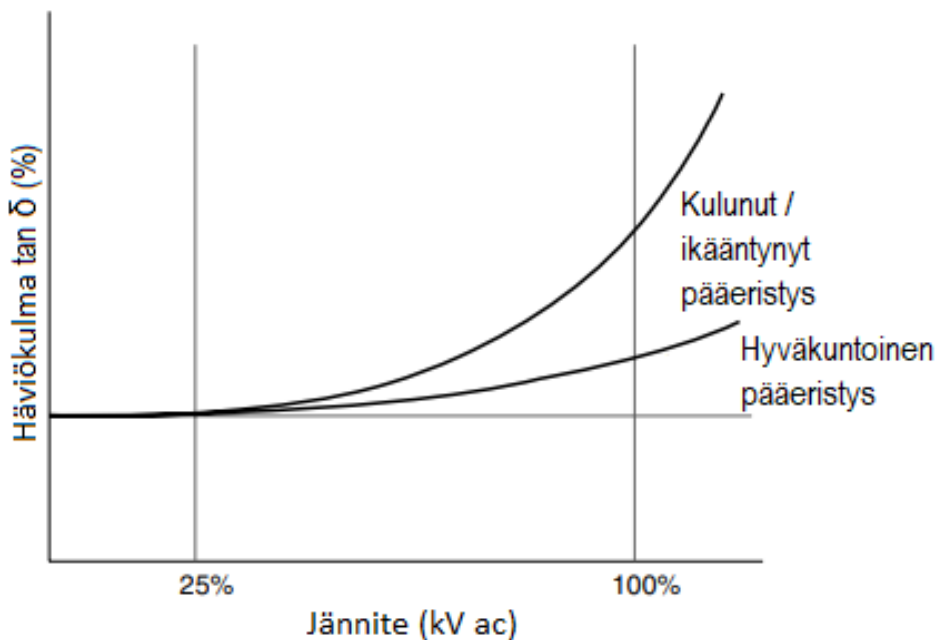
TAULUKKO 1. Pidemmän ajan trendianalyysi osittaispurkaustasoista (17)

| | | |
|-----------------------------|--|---|
| <i>Stable ± 25%</i> | Slope of the line and change within an expected range | No significant change in activity |
| <i>Slow upward</i> | Minor, but notable, increasing slope over several months | Not significant, but should be closely monitored if sustained |
| <i>Upward trend</i> | Minor, but notable, increasing slope over limited months | |
| <i>Downward trend</i> | Minor, but notable, decreasing slope over several months | |
| <i>Significant increase</i> | Increasing slope over limited months | Significant changes are unusual, and should be closely monitored during the next testing cycle. Retest is highly recommended. |
| <i>Significant decrease</i> | Decreasing slope over limited months | |
| <i>Rapid deterioration</i> | Doubling of PD in 6 months or rapid increase over a short interval | Should be retested and perhaps supplemented with offline tests and visual inspections. |
| <i>Unknown</i> | The Q_m values are too volatile to be evaluated. This normally occurs when the current test results are outside of what would be considered reasonable for a consistent trend. | |

4.4.4 Häviökulmamittaus

Häviökulma- eli $\tan \delta$ -mittauksessa syötetään vaihekohtaisesti vaihtojännitettä käämitykseen ja mitataan pääeristyksen kuntoa mittaamalla dielektrisiä häviöitä. Saataville mittaustuloksille ei ole suoraa määrettä, vaan ne esitetään prosentteina. Mitä korkeampi mitattu $\tan \delta$ on, sitä huonommassa kunnossa pääeristys on. $\tan \delta$:n kasvu käämityksen käyttöiän aikana johtuu yleensä pääeristeen sisäisten onteloiden lisääntymisestä, delaminaatiosta ja/tai puolijohtavan pinnan heikkenemisestä urasualueella. Edellä mainitut pääeristeen viat johtuvat yleensä osittaispurkauksista. Saataviin mittaustuloksiin vaikuttaa myös paljon kääminlämpötila ja syötetyn jännitteen suuruus mittaushetkenä. Tämän takia mittaustuloksia verrattaessa olisi hyvä, että keskenään verrattavat mittaustulokset olisi suoritettu samanlaisilla lämpötiloilla ja jännitetasoilla. (6, s. 503.)

Häviökulmamittaus voidaan tehdä myös jännitteen funktiona, jolloin mittauksia suoritetaan eri jännitetasoilla. Mittausten aikana $\tan \delta$ kasvaa suhteessa pääeristyksessä esiintyviin onteloihin tai delaminoitumiseen. Nopea muutos häviökulmassa jännitteen noustessa viittaa siihen, että pääeristyksessä on useita onteloita tai muita osittaispurkausten aiheuttamia vikaantumismekanismeja. Mittaus suoritetaan yleensä 25 ja 100 %:lla vaihejännitteestä, mutta sen voi suorittaa myös tiheämmillä mittaussiväleillä. Mittaus antaa hyvän käsityksen käämityksen yleisestä kunnosta, mutta sen avulla ei pysty erottamaan yksittäisiä huonoja käämisauvoja. (Kuva 16.) (6, s. 503–504.)



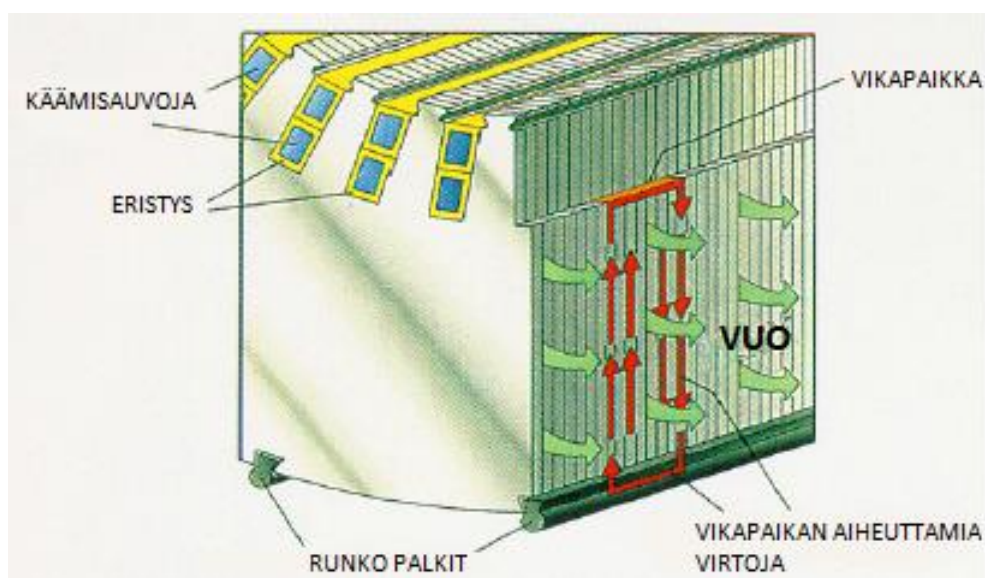
KUVA 16. Häviökulma jännitteen funktiona (6, s. 504)

4.4.5 Kapasitanssimittaus

Staattorikäämyksen kapasitanssimittaus tehdään vaihekohtaisesti vaihtojännitteellä muiden vaiheiden ollessa maadoitettuina. Se tehdään usein osittaispurkaus- ja häviökulmamittauksen kanssa samalla jännitteen nostolla. Käämin tehokerroin mitataan kapasitanssilla vaihekohtaisen käämikapasitanssin arvon määrittämiseksi. Vertailemalla mitattuja kapasitanssiarvoja edellisiin mittauksiin ja/tai tehdasmittauksiin voidaan arvioida pääeristyksen kuntoa. Yleensä ajan mittaan laskeva vaihekohtainen kapasitanssi viittaa pääeristyksen kulumiseen. (6, s. 502.)

4.4.6 Levypaketin rautasulkumittaus

Levypaketin rautasulku- eli EL-CID-mittauksella voidaan havaita staattorin levypaketin eristettyjen teräslevyjen väliset oikosulut ja niistä aiheutuvat kiertovirrat. Ennen EL-CID-mittausta levypaketin koestus on tehty rengaskokeella, jossa levypakettiin indusoidaan nimellis- tai lähes nimellisvuo. Indusoitunut vuo aiheuttaa kiertovirtoja levypaketin viallisilla alueilla, mikä saa aikaan liiallista lämpenemistä. Lämpenevät kohdat voidaan havaita infrapunalaitteistolla. Rengaskoe on todettu toimivaksi vuosien saatossa, mutta se vaatii suuren virtalähteen, paljon aikaa ja työtä sekä resursseja. EL-CID-mittaus on kehitetty helpommaksi vaihtoehdoksi rengaskokeelle. Sen mittausmenetelmä perustuu vikojen havaitsemiseen mittaamalla vika-alueella virrasta johtuva magneettivuo, kun levypakettiin indusoiduu vain 3–4 % nimellisvuosta. Kuvassa 17 on esitetty levypaketissa olevan vikapaikan aiheuttamien vikavirtojen kulku. (6, s. 469–470.)



KUVA 17. Vikapaikan aiheuttamien vikavirtojen kulku levypaketissa (18, s. 1)

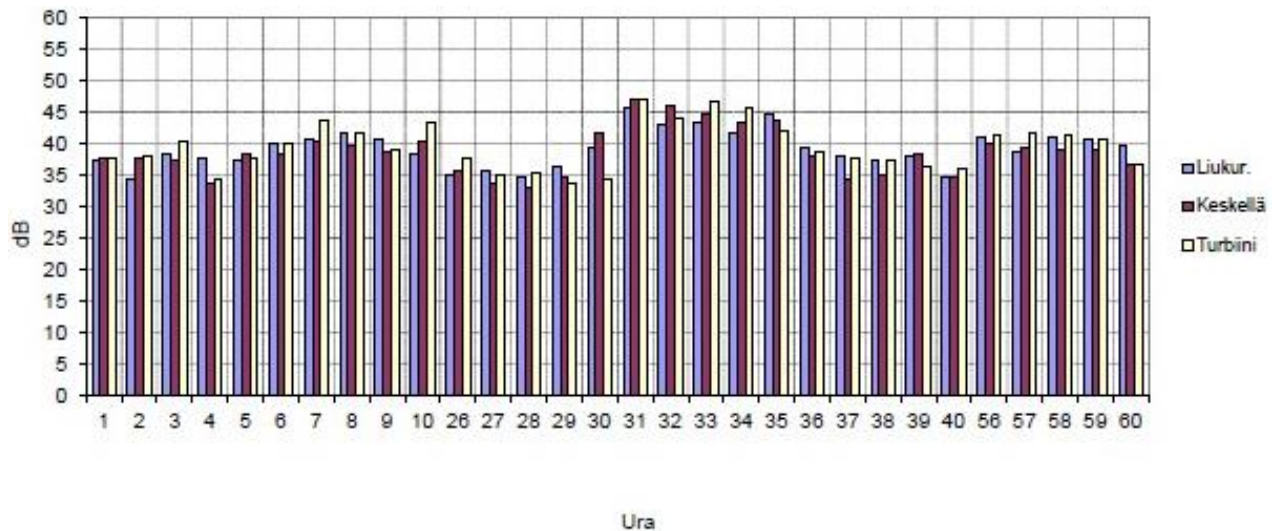
4.4.7 Urakohtainen hohtopurkausmittaus

Urakohtaisen hohtopurkausmittauksen tarkoituksena on löytää käämityksestä kohdat, joissa on erityisen korkeat purkaustasot. Kyseisiä paikkoja voivat olla mm. suuren jänniterasituksen alaiset paikat tai paikat, joissa käämitys on päässyt värähtelemään.

Staattorikäämityksen sauvat on sijoitettu staattorin magneettisesti aktiivisen osan eli staattorin levypaketin uriin kahteen kerrokseen. Mittauksessa staattorikäämitykseen syötetään vaihekohtaisesti suurjännitettä ja staattorin urat skannataan induktiivisella anturilla, jonka avulla mitataan osittaispurkausten tuottamaa MHz-taajuisista signaalia. Tulokset ilmoitetaan desibeleinä (dB). (19.)

Mittaustulosten varsinaisen lukuarvon sijasta on oleellisempaa vertailla urien purkaustasoja keskenään sekä myös staattorin aksiaalisuunnassa. Uudelle koneelle on tyypillistä, että mitatut tulokset ovat urien kesken tasaisia. Normaalisti vanhentuneesta käämityksestä mitatut signaalitasot ovat jänniteriippuvaisia ja suurempia, kuin uudella käämityksellä. Sen sijaan mm. käämisauvojen värähtely urissa ja siitä johtuva purkaussuojarakenteiden vaurioituminen tuottaa voimakkaan signaalin kohdissa, joissa käämitys on päässyt värähtelemään. Tällöin saatu tulos poikkeaa uuden tai normaalisti vanhentuneen koneen tuloksista. (19.)

Kuvassa 18 on esitetty mittaustulokset staattorikäämityksen yhden vaiheen urakohtaisesta hohtopurkausmittauksesta. Mittaus on suoritettu kolmesta eri kohdasta käämistystä. Läheltä ajopäätä (DE) eli turbiinipäätä, keskeltä käämistystä ja vapaasta päästä (NDE). Kyseinen käämitys on jo huomattavasti vanhentunut ja siinä havaittiin visuaalisesti merkkejä värähtelystä. Tämä näkyy huomattavasti korkeampina purkaustasoina mm. urassa 31, joka on käämityksen kuumanpään ensimmäinen sauva.



KUVA 18. Yhden vaiheen urakohtainen hohtopurkausmittaus (17)

4.4.8 Urakiilauksen tarkastus

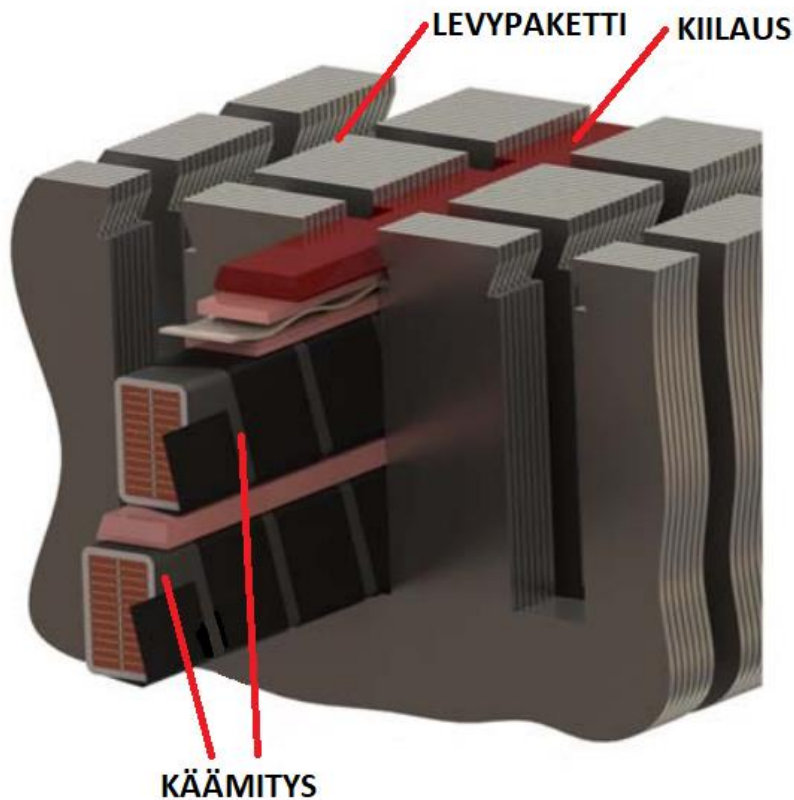
Staattorikäänitys on tuettu levypakettiin kiilauksen avulla (kuva 19). Jos kiilaukset löystyvät, se mahdollistaa käänneosien värähtelyn urissa, jolloin eristys pääsee hankaamaan levypakettia vasten ja kuluu. Tämä voi johtaa lopulta maasulkuun vikapaikan kohdalla. Kyseisten vikaantumismekanismien välttämiseksi on tärkeää tarkastaa kiilauksen tiukkuus, kun se on mahdollista. (6, s. 485.)

Kiilauksen tarkastukseen on olemassa useita eri mittalaitteita ja mittaussuunnitelmia, joiden avulla sen tiukkuus voidaan määrittää. Tarkastettavalle kiilaustyyppille täytyy valita oikea mittaussuunnitelma, jotta kiilaukset tulevat tarkastettua oikein. Esimerkiksi joustokiilaukset voidaan tarkastaa vain tietyillä mittaussuunnitelmilla, jotta tulos on luotettava. Kiilaukset voidaan tarkastaa myös manuaalisesti koputtamalla sopivan kokoisella ja painoisella työkalulla, kuten vasaralla tai lenkkiavaimella. Kiiloja koputtaessa tiukat kiilat värähtelevät hyvin vähän ja päästävät korkean, kovan äänen. Löysät kiilat puolestaan värähtelevät paljon ja päästävät onton, matalan äänen. Tarkastuksen tekijällä täytyy olla riittävästi kokemusta erottaakseen kiilojen tiukkuusasteet toisistaan, koska kiilauksia on erilaisia eivätkä ne kaikki kuulosta ja tunnu samalta. (6, s. 485.)

Kriteerit uran tai koko staattorin uudelleen kiilaukselle riippuvat koneen valmistajasta sekä tarkastuksen suorittajasta. Tästä huolimatta seuraavaa voidaan pitää nyrkkisääntönä.

Ura vaatii uudelleen kiilausta, jos:

- urassa on vähemmän kuin 75 % tiukkoja kiiloja
- kolme tai useampi vierekkäinen kiila on täysin löystyneitä
- molemmat päätykiilat ovat löysällä (6, s. 487.)



KUVA 19. Poikkileikkauskuva staattorin urasta (13, s. 11)

4.4.9 Aistinvaraiset tarkastukset

Aistinvaraiset tarkastukset ovat erittäin tärkeä osa kunnonvalvontaa. Mahdolliset viat ja poikkeamat huomataan usein ensin aistinvaraisilla tarkastuksilla, ennen kuin ne näkyisivät mittauksissa. Kaikkia vikoja ei myöskään ole mahdollista havaita muuten kuin kyseisillä tarkastuksilla. Staattorin kunnonvalvonnassa aistinvaraiset tarkastukset koostuvat näkö-, kuulo- ja hajuaisteilla tehtävistä tarkastuksista.

Aistinvaraiset tarkastukset pääsevät täyteen potentiaaliinsa, kun ne tehdään kunnonvalvontamittausten yhteydessä. Näin tehdessä aistinvaraisilla havainnoilla voidaan tukea saatuja mittaus- tuloksia tai mittaustuloksilla voidaan tukea aistinvaraisia havaintoja. Kuvassa 20 on osittaispurkausjälki, joka havaittiin visuaalisessa tarkastuksessa staattorikäimityksen urasuualueella.



KUVA 20. Osittaispurkausjälki urasuualueella, joka havaittiin visuaalisessa tarkastuksessa (17)

5 STAATTORIN VIKAANTUMISMEKANISMIT

Generaattorit, kuten kaikki muutkin koneet ja laitteet, kuluvat käytettäessä, vanhenevat ja vikaantuvat. Seuraavat luvut käsittelevät staattorin vikaantumismekanismia ja niiden mahdollisia korjaustoimenpiteitä.

5.1 Likainen tai kostea käämitys

Pidempien seisokkien tai varastoinnin aikana staattorikäämitys voi imeä kosteutta, jos ympäristössä on korkea ilmankosteus. Mikäli kosteus saavuttaa eristyksen pinnalla pitkäaikaisesti kaste-pisteen, voi käämitys vettyä ja sen eristyskyky romahtaa. Tämä saattaa aiheuttaa staattorikäämitykseen maasulun, kierrossulun tai vaiheiden välisen oikosulun. Näiden seurauksena käämitys saattaa palaa jonkin aikaa käynnistyksen jälkeen. Mikäli eristysvastus on liian alhainen normaalia käyttöä varten, tulee käämitys kuivata ennen käyttöönottoa. (16, s. 372.)

Ympäristön aiheuttama likaantuminen (kontaminoituminen), joka voi johtua mm. hiilipölystä tai öljystä, voi myös aiheuttaa staattorikäämityksen eristyksen kunnon heikkenemisen ja vaurioitumisen. Jos eristysvastus putoaa liian alhaiseksi, tulee käämitys puhdistaa ennen käyttöönottoa. Kontaminaation määrästä ja tilanteesta riippuen käämitys voidaan puhdistaa paikallisesti puhdistusaineella ja räteillä, kuivajäällä tai pesemällä ja uunikuivaamalla. Kuvassa 21 on esimerkki likaisesta staattorikäämityksestä. (16, s. 373.)



KUVA 21. Likainen staattorikäänitys (17)

5.2 Käämityksen huonot liitokset

Staattorikäänityksen käämisauvat on yhdistetty toisiinsa molemmista päistä juottamalla. Jos juotoksissa on tapahtunut valmistusvaiheessa virhe tai niihin kohdistuu mekaanista rasitusta, on mahdollista, että juotokset murtuvat. Murtunut kohta aiheuttaa kuumen pisteen, joka voi johtaa käämityksen palamiseen. On myös mahdollista, että käämisauvojen osajohtimien välinen eriste pettää tai osajohtimia katkeaa, jolloin syntyy kuumia pisteitä sekä kierrossulkuja, mikä voi myös johtaa käämityksen palamiseen. Staattorikäänitykseen yhteydessä olevien kuparikiskojen pulttiliitosten löystyminen on myös yleinen kuumien pisteiden aiheuttaja, jonka vuoksi ne olisi hyvä tarkistaa aina huoltotöiden yhteydessä. Käämisauvojen juotosvika korjataan vikapaikan uudelleen juotoksella ja eristyksellä. Jos kyseessä on vakava osajohdinvika, täytyy viallinen käämisauva vaihtaa uuteen, mikä on huomattavasti työläämpää kuin juotosvian korjaus.

Huonot liitokset ja kierrossulut voidaan usein havaita tasavirtavastusmittauksen avulla. Kuumat pisteet sen sijaan voidaan paikantaa lämpökuvauksen avulla koneen käydessä tai seistessä, jos käämistä saadaan lämmitettyä mm. hitsauskoneen avulla.

Kuvassa 22 on esimerkki vesivoimageneraattorin kääminpääalueen kokoajakiskossa esiintyvistä huonosta liitoksesta. Vika havaittiin tasavirtavastusmittauksella, jonka jälkeen vikapaikkaa alettiin etsimään avaamalla liitoskohtia. Vikapaikassa oli selkeitä lämpenemisen jälkiä, sekä osa jatkosholkeista oli täysin löysällä.



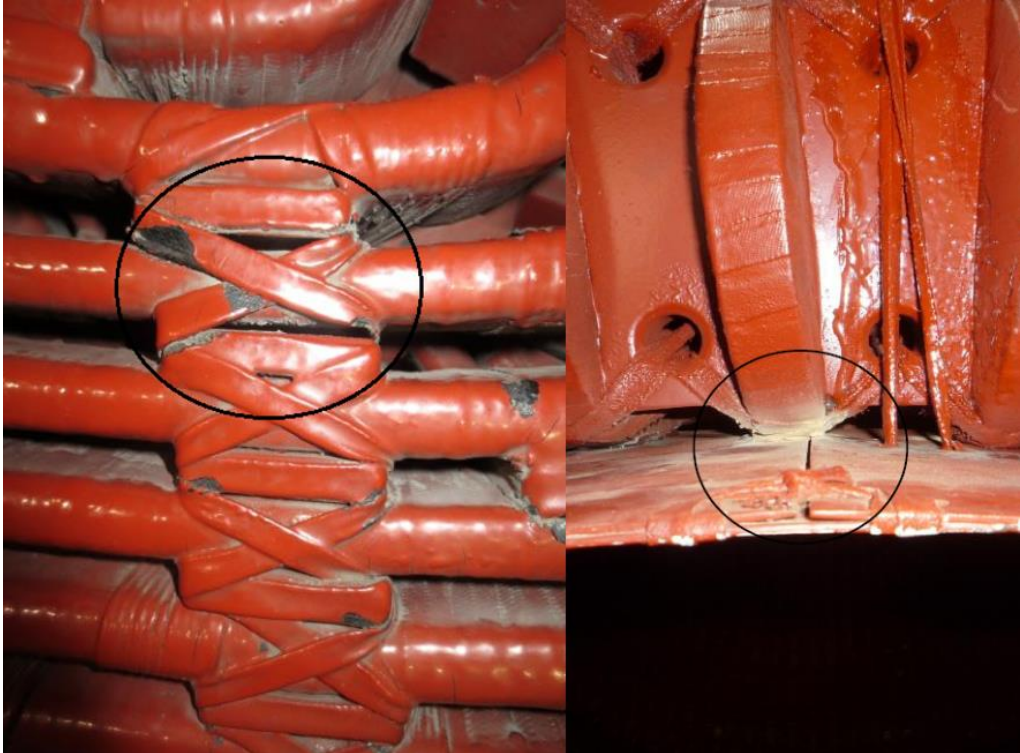
KUVA 22. Huono liitos kääminpääalueella kokoajakiskossa (17)

5.3 Kääminpääalueen sidosten löystyminen

Staattorin kääminpääalueella on useita eri sidoksia ja tukipaloja, jotka pitävät käämityksen tiukasti paikallaan. Mekaanisista tai magneettisista voimista johtuen sidokset ja tukipalat voivat päästä löystymään. Pahimmassa tapauksessa löystynyt käämitys pääsee värähtelemään 50 Hz:n tai sen kerrannaisten taajuuksella, mikä voi aiheuttaa murtumia ja täten huonoja liitoksia, lämpenemistä ja oikosulkuja.

Kääminpääalueen sidosten, tukipalojen ja tukirakenteiden kuntoa seurataan pääasiassa aistinvaraisella tarkastuksella revisioiden yhteydessä. Käynninaikana värähtelemään päässeet rakenteet tunnistetaan yleensä värähtelypölystä, jota kerääntyy värähtelevän kohdan ympärille (kuva 23).

Koneen seistessä voidaan myös suorittaa kääminpääalueen ominaistajuusmittaus, jossa kääminpääalueeseen kohdistetaan keinotekoista värähtelyä vasaran avulla, ja vaste mitataan siirrettävällä kiihtyvyyssanturilla. Anturin paikkaa vaihdellaan ja värähtelyt mitataan useammasta eri kohdasta. Koneen käydessä kääminpääalueen värähtelyjä on mahdollista seurata Iris Power Guard II+ -kennonvalvontajärjestelmällä. Tällöin kääminpääalueelle ja staattorin runkoon on asennettu kiinteitä värähtelyantureita, joiden avulla värähtelytasoa voidaan seurata jatkuvasti.



KUVA 23. Löystynyt tukisidos (vasemmalla) ja värähtelypölyä (oikealla) kääminpääalueella (17)

5.4 Käämityksen eristeen kuluminen

Käämityksen eristeen kuluminen johtuu yleensä joko osittaispurkauksista, jotka ”syövät” eristettä ajan kuluessa, tai käämisauvojen värähtelystä urissa. Osittaispurkauksista johtuvalle eristyksen kulumiselle ei usein ole yksinkertaista korjaustoimenpidettä, koska ”vikapaikat” ovat yleensä käämityksen sisällä, lukuun ottamatta eristepinnassa tapahtuvia osittaispurkauksia.

Käämisauvojen värähtelyn aiheuttaa yleensä levypaketin tai kiillauksen löystyminen. Niiden värähtely huomataan usein värähtelypölystä, jota esiintyy löystyneen käämisauvan uran alueella. Jos käämisauvat ovat päässeet värähtelemään urissa, ne voidaan tapauskohtaisesti vaihtaa uusiin.

Vaihtotyöhön vaikuttaa se, onko staattori hartsikyllästetty valmistusvaiheessa, eli käsitelty hartsilla tai lakalla. Tämä auttaa käämitystä kestävämmän kuormituksen aiheuttamaa tärinää, mutta samalla tekee käämisauvojen ja urakiilauksen uusinnasta erittäin vaikeaa. (20, s. 1.)

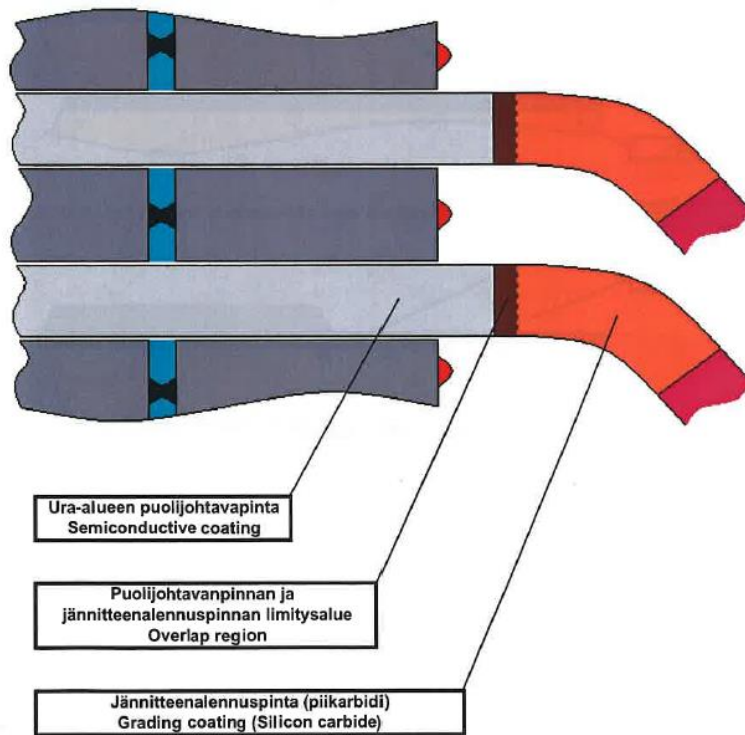
Käämisauvoja uusitaan yleensä paikoittain edellyttäen, että tiedetään, mitkä sauvat ovat viallisia. Tämä tulee huomattavasti halvemmaksi kuin koko käämityksen, staattorin tai jopa generaattorin uusiminen ja sen avulla saadaan staattorille lisää käyttöikää. Jos käämisauvoja joudutaan uusimaan värähtelyongelmien takia, on tärkeää, että ne korjataan, etteivät käämisauvat pääse värähtelemään uudestaan ja täten kulumaan. Kuvassa 24 on esimerkki käämisauvasta, jonka puolijohdava pinnoite on päässyt kulumaan levypaketin värähtelyongelmien takia.



KUVA 24. Värähtelyistä johtuvan hankauksen takia kulunut käämisauva (17)

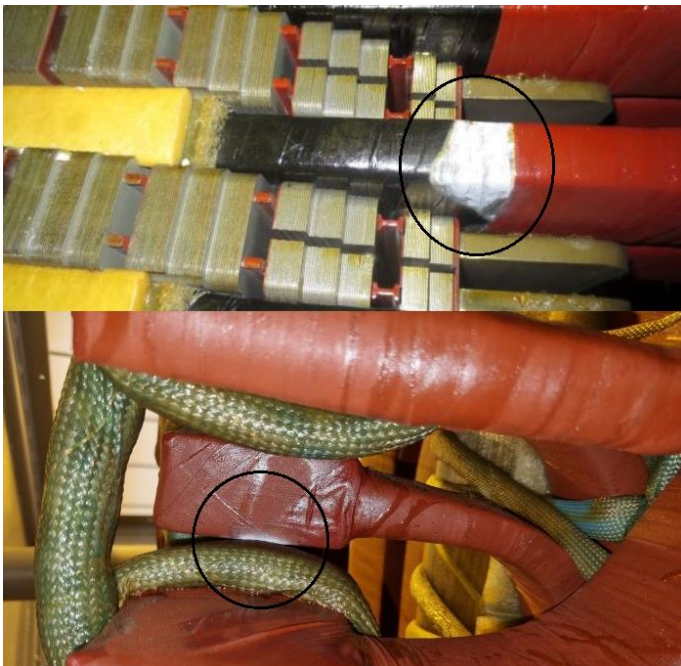
5.5 Osittaispurkausjäljet eristepinnassa

Generaattorin tyypistä, eristysmenetelmistä ja valmistusvirheistä johtuen on mahdollista, että käämityksen pääeristeen pinnassa alkaa syttymään osittaispurkauksia. Yleensä purkaukset tapahtuvat urasualueella puolijohdavan pinnoitteen heikentyessä, jännitteenalennuspinnan puutteen takia tai kääminpääalueella liian pienen ilmavälin takia. Kyseiset purkaukset voidaan havaita mittauksilla ja visuaalisesti. Jos purkauspaikoille ei tehdä mitään, on hyvin todennäköistä, että tulevaisuudessa vikapaikan kohdalla tapahtuu maa- tai oikosulku. Kuvassa 25 on esitetty staattorikäämityksen eri pinnoitteet.



KUVA 25. Staattorikäämityksen eri pinnoitteet (17)

Vikapaikka voidaan korjata uudelleen eristämällä, jos purkauskohta ei ole levinnyt käsiksi pääsemättömälle alueelle, kuten ura-alueelle. Tämä yleensä antaa lisää aikaa käämitykselle, mutta ei korjaa vikaa lopullisesti. Kuvassa 26 on esimerkki urasuu- ja kääminpääalueella olevista osittaispurkausjäljistä.



KUVA 26. Osittaispurkausjälkiä urasuualueella (ylhäällä) ja kääminpääalueella (alhaalla) (17)

6 TÄHTIPISTEEN KÄÄNTÄMINEN

Tähtipisteen kääntämisellä tarkoitetaan staattorikäämyksen verkonpuolen ja tähtipisteen kääntämistä ristiin, eli verkonpuoli ja tähtipiste vaihtavat paikkaansa. Generaattorin normaalissa käyttötilanteessa staattorikäämyksen jänniterasitus on suurimmillaan käämyksessä, joka on lähellä verkonpuolta ja pienenee, mitä lähemmäs tähtipistettä mennään, teoriassa 0 V:iin asti. Tähtipisteen kääntämisen avulla aiemmin suuremman jänniterasituksen alla ollut ja todennäköisesti kulunut osa käämistä saadaan pienemmän jänniterasituksen alle, ja aiemmin alhaisen jänniterasituksen alla ollut hyväkuntoinen käämytys saadaan suuremman jänniterasituksen alle. Tähtipisteen kääntämisen avulla staattorikäämykselle voidaan saada huomattavasti lisää käyttöikää olettaen, että vika-
paikka on lähempänä verkonpuolta kuin tähtipistettä. Tähtipisteen kääntämisessä täytyy myös huomioida se, että koko käämykseen vaikuttaa sama virta. Jos käämytys on päässyt värähtelemään, lähempänä tähtipistettä oleva osa käämistä on myös kulunut, ja silloin tähtipisteen kääntämisestä ei ole hyötyä.

Hyvänä esimerkkinä toimii ELIN-merkkinen 4-napainen 10,5 kV jänniteluokan turbogeneraattori, joka on valmistettu vuonna 2002. Kyseiselle generaattorille tehtiin suppea perushuolto kesällä 2018. Huollon aikana suoritettussa visuaalisessa tarkastuksessa löydettiin osittaispurkausjälkiä W-vaiheelta alemmasta käämisauvasta urasuualueelta (kuva 27). Generaattorille suoritettiin myös offline osittaispurkausmittaus ja todettiin, että W-vaiheen purkaustasot kasvavat erittäin paljon nimellijännitteelle noustessa.

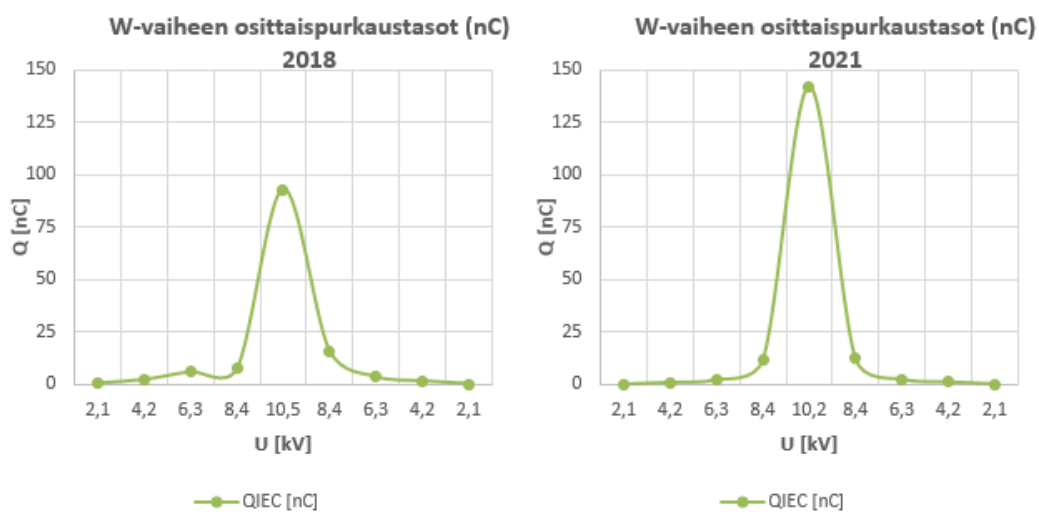


KUVA 27. Osittaispurkausjälkiä W-vaiheella alemmassa käämisauvassa urasuualueella (17)

Huollon aikaisten löydösten perusteella generaattorille asennettiin käynninaikainen osittaispurkausmittausjärjestelmä syksyllä 2018. Koneelle tehtiin viisi käynninaikaista osittaispurkausmittausta ennen seuraavaa suppeaa perushuoltoa. Näiden mittausten perusteella käynninaikaiset osittaispurkaustasot eivät olleet huolestuttavan korkeat, mutta ne olivat trendiltään kasvavat jokaisella vaiheella.

Kesällä 2021 suoritettiin seuraava suppea perushuolto. Tämän perushuollon yhteydessä suoritetussa offline osittaispurkausmittauksessa ei pystytty nousemaan nimellisjännitteelle W-vaiheen kohdalla, koska vaarana oli eristeen rikkoutuminen aiemmin löydetyn vikapaikan kohdalta.

Kuvassa 28 on esitetty W-vaiheen offline osittaispurkaustasot vuosien 2018 ja 2021 mittauksissa. Yleisesti voidaan sanoa, että alle 20 nC:n osittaispurkaustasot nimellisjännitteellä ovat niin sanottu normaaleja. Kyseisellä koneella W-vaiheen osittaispurkaustasot olivat vuonna 2018 lähes 100 nC ja vuoden 2021 mittauksissa jo melkein 150 nC. Mittaustulosten ja visuaalisten havaintojen perusteella generaattorille päätettiin tehdä tähtipisteen käänntö syksyllä 2021.



KUVA 28. Generaattorin W-vaiheen osittaispurkaustasot offline mittauksissa vuosina 2018 ja 2021 (17)

Tähtipisteen jälkeisten käynninaikaisten osittaispurkausmittausten perusteella osittaispurkaustasot laskivat huomattavasti tähtipisteen käännön jälkeen. Purkaustasot olivat aiemmin olleet 100–200 Qm kaikilla vaiheilla ja tähtipisteen käännön jälkeen vain 30–50 Qm. Tarkemmat käynninaikaisten osittaispurkausmittausten tulokset on esitetty liitteessä 1.

Tähtipisteen käännöllä saatavan käyttöiän pituutta on hankala arvioida tarkasti, mutta todennäköisesti puhutaan 2–5 vuodesta, riippuen tähtipisteen kääntöön johtaneen vikapaikan kunnon etenemisestä ja koneen käytöstä. Tähtipisteen käännön jälkeen koneen omistajan on hyvä alkaa miettiä koneen uusintaa, sillä koneen tai sen pääkomponenttien toimitusajat voivat olla jopa lähemmäs vuoden mittaisia, eikä koneen jäljellä olevasta käyttöiästä voida olla varmoja.

Tähtipisteen käännön jälkeen on myös tärkeää tihentää kunnonvalvontamittausten väliä. Reagoimalla nopeasti koneen kunnossa tapahtuviin muutoksiin pystytään aikatauluttamaan mahdolliset korjaus- ja huoltotoimenpiteet tehokkaasti.

7 GENERAATTORIN UUSIMINEN

Vikaantuneen staattorin uusinnalle on käytännössä kolme järkevää vaihtoehtoa: staattorin uudelleenikäimintä, uuden staattorin hankinta tai uuden generaattorin hankinta. Paras vaihtoehto edellä mainituista on hyvin tapauskohtainen.

Staattorin uudelleenikäiminnässä olemassa olevasta levypaketista poistetaan vanha käämitys ja asennetaan uusi tilalle, edellyttäen, että levypaketti on käyttökunnossa. Staattorin uudelleenikäimintä ei monesti ole vaihtoehtona pienemmissä koneissa, koska niiden staattorit on hartsikyllästetty, mikä tekee uudelleenikäiminnästä vaikeaa ja lisää rikkoutumisen riskiä.

Uuden staattorin hankinta on usein järkevä vaihtoehto, jos generaattori on muuten normaalissa käyttökunnossa. Uutta staattoria hankkiessa voidaan tapauskohtaisesti hankkia uusi staattori rungolla tai pelkkä aktiiviosa, eli levypaketti ja käämitys.

Joissain tapauksissa sen sijaan uuden staattorin ja uuden generaattorin välinen hintaero purku- ja asennustöineen on niin pieni, että voi olla järkevämpää hankkia kokonaan uusi generaattori pelkän staattorin sijasta. Uuden koneen hankinta myös lyhentää usein käyttökatkoa, koska on nopeampaa purkaa vanha kone pois ja asentaa uusi sen sijaan, että uudelleen käyttäisi mm. vanhan koneen levypakettia. Täten myös käyttökatkosta johtuvat kustannukset pienevät, mikäli seisakki sattuu sellaiselle ajankohdalle, jossa kone olisi käytössä.

8 YHTEENVETO

Opinnäytetyön tarkoituksena oli perehtyä generaattorin staattorin käyttöön pidentämiseen eri kunnonvalvontamenetelmien sekä huolto- ja korjaustoimenpiteiden avulla. Työssä käsiteltiin Suomen sähköntuotantoa, turbogeneraattoreiden rakennetta ja niiden huoltoa sekä kunnonvalvontaa, johon kuuluvat generaattorin staattorille tehtävät sähköiset ja mekaaniset kunnonvalvontamittaukset sekä tarkastukset. Lisäksi työssä perehdyttiin syvemmin staattorin eri vikaantumismekanismeihin ja niiden mahdollisiin korjaustoimenpiteisiin.

Noin 400 generaattorin avulla tuotetaan merkittävä osa Suomen sähköstä. Omavaraisuuden ja huoltovarmuuden turvaamiseksi on tärkeätä, että niiden kuntoa valvotaan säännöllisesti ja tarpeelliset huollot suoritetaan. Generaattorin staattorilla on lukuisia eri vikaantumismekanismeja, jotka voivat nopeasti johtaa vikaantumiseen ja pidempiaikaiseen seisakkiin. Staattorin elinikään voidaan vaikuttaa säännöllisellä kunnonvalvonnalla, jossa mahdolliset vikaantumismekanismit havaitaan ja korjataan.

Staattorikäymityksen vikapaikat sijaitsevat usein alueella, johon ei päästä helposti käsiksi ja täten niiden korjaaminen on erittäin vaikeata tai jopa mahdotonta. Jos vikapaikoille ei tehdä mitään, on generaattorin elinikä hyvin rajallinen. Kyseisissä tapauksissa voidaan suorittaa tähtipisteen kääntäminen, joka antaa generaattorille mahdollisesti useamman vuoden lisää käyttöaikaa. Korjaustoimenpiteiden jälkeen on tärkeätä muuttaa koneen huoltosuunnitelma vastaamaan koneen kuntoa, eli suorittaa kunnonvalvontamittauksia tiheämmin. Koneen omistaja voi käyttää saadun lisäajan hyödykseen ja alkaa suunnittelemaan generaattorin uusintaa.

LÄHTEET

1. Energiateollisuus. Sähkön tuotanto. Hakupäivä 21.10.2022. <https://energia.fi/energia/energiantuotanto/sahkontuotanto>
2. Tilastokeskus. Sähkön ja lämmön tuotanto 2020. Hakupäivä 21.10.2022. https://www.stat.fi/til/salatu/2020/salatu_2020_2021-11-02_fi.pdf
3. Kauppinen, Jukka, Wikström, Rauno & Hietalahti, Lauri 2020. Generaattorit - käyttö, huolto ja kunnossapito. Tampere: Tammertekniikka.
4. Hietalahti, Lauri 2011. Muuntajat ja sähkökoneet. Tampere: Tammertekniikka.
5. DAX 2-Pole Turbogenerators. Kuvakaappaus. Direct Industry. Hakupäivä 9.1.2023. <https://pdf.directindustry.com/pdf/brush-group/dax-2-pole-turbogenerator/26585-483123.html>
6. Klempner, Geoff & Kerszenbaum, Isidor 2004. Operation and maintenance of large turbo-generators. Hoboken: John Wiley & Sons, Inc., Publication.
7. Lake, Michael 2016. Kuvakaappaus. Why is a Generator Stator Core made of laminated steel? LinkedIn artikkeli. Hakupäivä 9.1.2023. <https://www.linkedin.com/pulse/why-generator-stator-core-made-laminated-steel-michael-lake>
8. Chowdhury, Ritwik, Finney, Dale & Normann, Fischer 2018. Kuvakaappaus. Using the multi-loop fault analysis method for setting and evaluating generator protection elements. ResearchGate. Hakupäivä 9.1.2023. https://www.researchgate.net/publication/324793651_Using_the_multi-loop_fault_analysis_method_for_setting_and_evaluating_generator_protection_elements
9. Korpinen, Leena. Sähkökoneet osa 2. Sähkövoimatekniikkaopus. Pdf-tiedosto. Hakupäivä 25.10.2022. http://www.leenakorpinen.fi/archive/svt_opus/10sahkokoneet_2osa.pdf

10. Generator parts. Kuvakaappaus. General Electric. Hakupäivä 10.1.2023. <https://www.ge.com/steam-power/services/generators/parts>
11. High power 4-pole generators from 50 to 85 MVA for mid-size steam and gas turbines. Kuvakaappaus. ABB. Hakupäivä 10.1.2023. https://library.e.abb.com/public/07aa5fb4d6098793c1257de100272afc/Product%20note%20AMS%20product%20family%20LR_300115.pdf
12. Snyder, Bryan. Kuvakaappaus. Excitation Selections. Caterpillar Inc. Hakupäivä 10.1.2023. https://www.cat.com/en_US/by-industry/electric-power/Articles/White-papers/excitation-selections.html
13. Csaba, Gabor 2019. Diagnostics of generators- From failure modes to risk of forced outage. Pdf-tiedosto. Raportti. Fortum. Hakupäivä 27.10.2022. <https://irispower.com/wp-content/uploads/2019/07/Generator-diagnostics-based-on-100-failure-modes-Csaba-IRMC-2019-ppt.pdf>
14. Tavner, Peter, Ran, Li, Penman, Jim & Sedding, Howard 2008. Condition Monitoring of Rotating Electrical Machines. London: The Institution of Engineering and Technology.
15. Iris Power. Guard II+ - Generator and motor condition based monitoring. Hakupäivä 1.2.2023. <https://irispower.com/products/guardii/>
16. Kunnossapitoyhdistys Promaint 2009. Kuntoon perustuva kunnossapito. 1. painos. Helsinki: KP-Media Oy.
17. TGS Finland Oy. Valokuvia generaattori revisioista. Sisäinen materiaali. Verkkolevy.
18. Bertenshaw, David.R. 2006. Kuvakaappaus. Analysis of stator core faults – A fresh look at the EL CID vector diagram. ResearchGate. Hakupäivä 13.1.2023. https://www.researchgate.net/publication/340634319_Analysis_of_stator_core_faults_-_A_fresh_look_at_the_EL_CID_vector_diagram
19. TGS Finland Oy. Sisäinen materiaali. Verkkolevy.

20. Työturvallisuuskeskus 2019. Käämien hartsikyllästys. Pdf-tiedosto. Hakupäivä 10.1.2023.

<https://ttk.fi/wp-content/uploads/2022/04/Kaamien-hartsikyllastys.pdf>

ELIN- Generaattorin Online osittaispurkaustasot vuosina 2018-2022

