

Sami Lehtola

GENERAATTORIN JATKUVATOIMINEN KUNNONVALVONTA

GENERAATTORIN JATKUVATOIMINEN KUNNONVALVONTA

Sami Lehtola
Opinnäytetyö
Kevät 2018
Sähkö- ja automaatiotekniikka
Oulun ammattikorkeakoulu

TIIVISTELMÄ

Oulun ammattikorkeakoulu
Sähkö- ja automaatiotekniikka, sähkövoimatekniikka

Tekijä: Sami Lehtola
Opinnäytetyön nimi: Generaattorin jatkuvatoiminen kunnonvalvonta
Työn ohjaaja: Heikki Kurki
Työn valmistumislukukausi ja -vuosi: Kevät 2018
Sivumäärä: 59 + 3 liitettä

Työn tavoitteena oli selvittää generaattorin jatkuvatoimisen kunnonvalvontajärjestelmän ominaisuuksia, hyötyjä ja käyttöönottoa. Työ tehtiin Fortumin Turbine and Generator Solutions -yksikölle.

Työ on rakenteeltaan tutkimusmainen. Työssä käydään läpi turbogeneraattoreiden rakennetta, kunnossapitoa, sähköisillä mittausten menetelmillä seurattavia vikaantumismekanismia sekä vaihtelevan sähköntuotannon vaikutusta generaattorin rakenteisiin. Työ pohjautuu alan kirjallisuuteen ja useisiin tieteellisiin julkaisuihin. Apuna on käytetty Fortumin sisäisiä mittaustuloksia ja asiantuntijoiden kokemuksia.

Kunnossapito ja kunnonvalvonta ovat tärkeitä tekijöitä generaattorin suorituskyvyn takaamiseksi. Generaattoreiden kasvanut vikaantumistaajuus ja muuttuvat käyttöolosuhteet vaativat entistä parempaa kunnonvalvontaa. Jatkuvatoimisen kunnonvalvonnan avulla saadaan reaaliaikaisempaa tietoa generaattorin kunnosta ja voidaan havaita käyttöparametrien muutosten vaikutus seurattaviin suureisiin. Tarkemman tiedon avulla voidaan välttää generaattoria rasittavaa kuormitusta ja hidastaa kehittyvien vikaantumismekanismien etenemistä. Lisäksi generaattorin kunnossapitotoimet voidaan suorittaa ennakoivien huoltojen sijaan perustuen generaattorin kuntoon, jolloin saavutetaan parempi käyttövarmuus ja pienemmät kunnossapidon kokonaiskustannukset.

Asiasanat: generaattori, kunnossapito, kunnonvalvonta, osittaispurkaus

ABSTRACT

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

Author: Sami Lehtola
Title of thesis: Continuous Condition Monitoring of Generators
Supervisor: Heikki Kurki
Term and year when the thesis was submitted: Spring 2018
Pages: 59 + 3 appendices

The purpose of this Bachelor's thesis was to find out the properties, advantages and introduction of the new continuous condition monitoring system of the generator. The thesis was commissioned by Fortum Turbine and Generator Solutions unit.

The structure of the work is research. In the work the structure and maintenance of turbo generators are reviewed. Additionally, the failure mechanisms of the generators and factors that affect the performance of generator are studied. The work is based on the literature of the field and on several scientific publications. Furthermore, the internal measurement results of Fortum and the experts' experiences have been utilized.

The maintenance and condition monitoring of the generator are important factors to guarantee the capacity. The grown failure frequency of the generators and the alternating operating conditions require better condition supervision than in the past. With help of continuous condition monitoring more real-time information about the condition of the generator is obtained and the effect of changes in the operating condition on the measured variables can be perceived. Exact information can be used to avoid a load which stresses the generator and to slow down the progress of the developing failure mechanisms. Furthermore, the maintenance functions of the generator can be performed instead of the anticipating maintenances based on the condition of the generator in which case a better reliability and smaller total costs of the maintenance are reached.

Keywords: generator, maintenance, condition monitoring, partial discharge

ALKULAUSE

Insinööri työ on tehty Fortumin Turbine and Generator Solutions -yksikössä. Työn valvojana on toiminut insinööri Hannu Haapakoski, jota haluan kiittää saamistani opeista ja neuvoista.

Eriyiskiitos myös Fortumin Turbine and Generator Solutions -yksikön tuotepäällikkö TkL Olli Lindgrenille sekä Oulun ammattikorkeakoulun yliopettaja Heikki Kurjelle ja lehtori Pirjo Partaselle, joilta olen saanut opastusta työni aikana.

Lämmin kiitos myös läheisilleni tuesta ja kannustuksesta opintojeni aikana.

Oulussa 3.1.2018

Sami Lehtola

SISÄLLYS

TIIVISTELMÄ	3
ABSTRACT	4
ALKULAUSE	5
LYHENTEET	8
1 JOHDANTO	9
2 VOIMAJÄRJESTELMÄ	10
2.1 Sähköntuotanto Suomessa	10
2.2 Tuotantokapasiteetin kehitys	12
3 SÄHKÖNTUOTANTO GENERAATTORILAITOKSESSA	13
3.1 Tahtigeneraattori	13
3.2 Turbogeneraattorin rakenne	15
3.2.1 Generaattorin rakenteen suunnitteluperusteet	16
3.2.2 Staattori	17
3.2.3 Roottori	21
4 GENERAATTORILAITOKSEN KUNNOSSAPITO	24
4.1 Generaattorin kunnossapito	25
4.2 Kunnossapidon kehitys	26
4.3 Kunnonvalvonta osana kunnossapitoa	28
4.3.1 Vikaantumismekanismit	29
4.3.2 Vikaantumisen havaitseminen	32
4.4 Generaattorin kunnonvalvonta ja asiantuntijapalvelut	33
4.5 Generaattorin eliniän hallinta	34
5 GENERAATTORIN KÄYNNINAIKAINEN KUNNONVALVONTA	36
5.1 Osittaispurkausmittaus	36
5.2 Ilmavälivuomittaus	40
5.3 Akselijännitteen mittaus	42
5.4 Kääminpäivävarähtelyn mittaus	43
6 JATKUVATOIMINEN KUNNONVALVONTAJÄRJESTELMÄ	46
6.1 Järjestelmän hyödyt	47
6.2 Järjestelmän rakenne	49
6.2.1 Osittaispurkausmittausantureiden asennus	49

6.2.2 Ilmavälivuoanturin asennus	50
6.2.3 Kääminpäävärähtelyanturit	52
6.2.4 Akselijännitteen- ja virran mittaus	53
7 YHTEENVETO	55
LÄHTEET	56
LIITTEET	
Liite 1 Yhteistuotantovoimalaitoksen sähkötehon seuranta	
Liite 2 Osittaispurkausaktiivisuus suhteessa generaattorin tehoon	
Liite 3 Osittaispurkausaktiivisuus suhteessa kosteuteen	

LYHENTEET

EMC-anturi	Epoxy Mica Capacitor, staattorin virtakiskoon asennettava osittaispurkausanturi
FF-anturi	Folding Flux -anturi, taitettava ilmavälivuoanturi
Hz	hertz, taajuuden yksikkö, jaksoa sekunnissa
I	virta
pC	pikocoulombi
PD	partial discharge, osittaispurkaus
pF	pikofaradi
m	metri
mA	milliampeeri
mm	millimetri
SSC	Stator Slot Coupler, staattorin käämiuraan asennettava osittaispurkausanturi
TF-anturi	The Flux -anturi, ilmavälivuoanturi
TWh	terawattitunti
U	jännite
VA	näennäisteho

1 JOHDANTO

Tämä insinööriyö on tehty Fortumin Turbine and Generator Solutions -yksikölle, joka tuottaa asiantuntijapalveluita voimalaitoksen käyttöön ja kunnossapitoon. Palvelutarjontaan kuuluu höyry- ja kaasuturbiinien, generaattoreiden sekä sähkö- ja automaatiojärjestelmien kunnossapito-, tarkastus-, kunnonvalvonta- ja konsultointipalvelut. Työn tavoitteena oli selvittää generaattorin jatkuvatoimisen kunnonvalvontajärjestelmän ominaisuuksia, hyötyjä ja käyttöönottoa.

Vikatila on usein seurausta pitkään kehittyneestä vikaantumismekanismista. Generaattoreiden vaurioitumiseen johtavien vikaantumisten syntymä- ja kehitysmekanismit tunnetaan jo varsin hyvin. Säännöllisesti suoritetuilla kunnonvalvontamittauksilla kehittyvä vikaantuminen havaitaan usein riittävän ajoissa ja generaattorin vaurioituminen voidaan estää.

Generaattoreiden kasvanut vikaantumistaajuus, vaihtelevat käyttöolosuhteet sekä syklisen käytön aiheuttamat rasitukset aiheuttavat haasteita suorituskyvyn ylläpitämiselle. Jatkuvatoimisella kunnonvalvonnalla alkava vikaantuminen voidaan havaita entistä aikaisemmin ja generaattorin kunnosta saadaan täsmällisempää tietoa. Kuntoon perustuvien tietojen pohjalta generaattorin huolto- ja kunnossapitotoimet voidaan suunnitella huolella ja toteuttaa oikea-aikaisesti. Kuntoon perustuvan kunnossapidon avulla saavutetaan parempi käyttövarmuus ja pienemmät kunnossapitokustannukset.

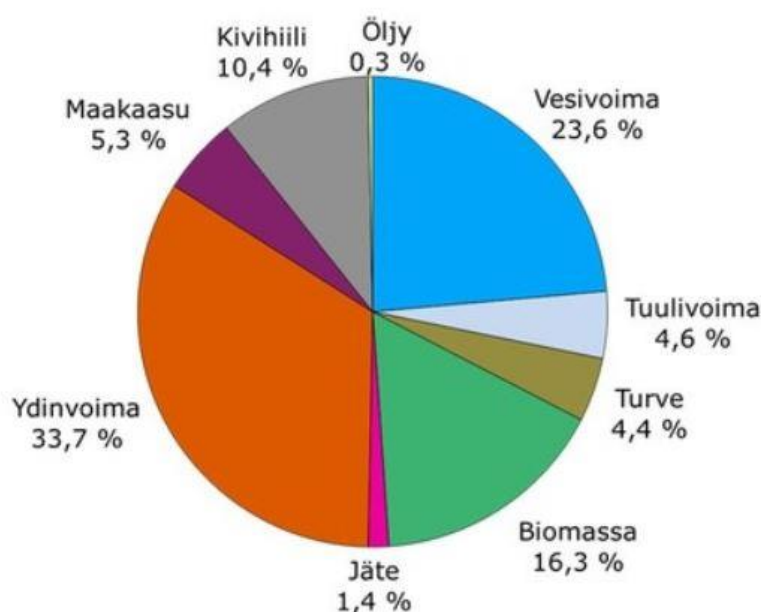
Työssä esitellään nopeasti pyörivien turbogeneraattoreiden rakennetta, niiden suorituskykyyn vaikuttavia tekijöitä, kunnossapidon perusteita sekä sähköisillä kunnonvalvontamittausmenetelmillä seurattavia vikaantumismekanismeja. Työn lopussa käydään läpi jatkuvatoimisen kunnonvalvontajärjestelmän ominaisuuksia ja rakennetta sekä järjestelmällä saavutettavia hyötyjä verrattuna perinteisiin, jaksotetusti suoritettuihin, kunnonvalvontamittauksiin.

2 VOIMAJÄRJESTELMÄ

Voimajärjestelmä koostuu sähköä tuottavista voimalaitoksista, kantaverkosta, jakeluverkoista sekä sähkökuluttajista. Suomen voimajärjestelmä on osa yhteispohjoismaista sähköjärjestelmää yhdessä Ruotsin, Norjan ja Itä-Tanskan järjestelmien kanssa. Lisäksi Suomesta on tasasähköyhteydet Venäjälle ja Viroon, joilla pohjoismainen järjestelmä on yhdistetty Venäjän ja Baltian voimajärjestelmään. (1.)

2.1 Sähköntuotanto Suomessa

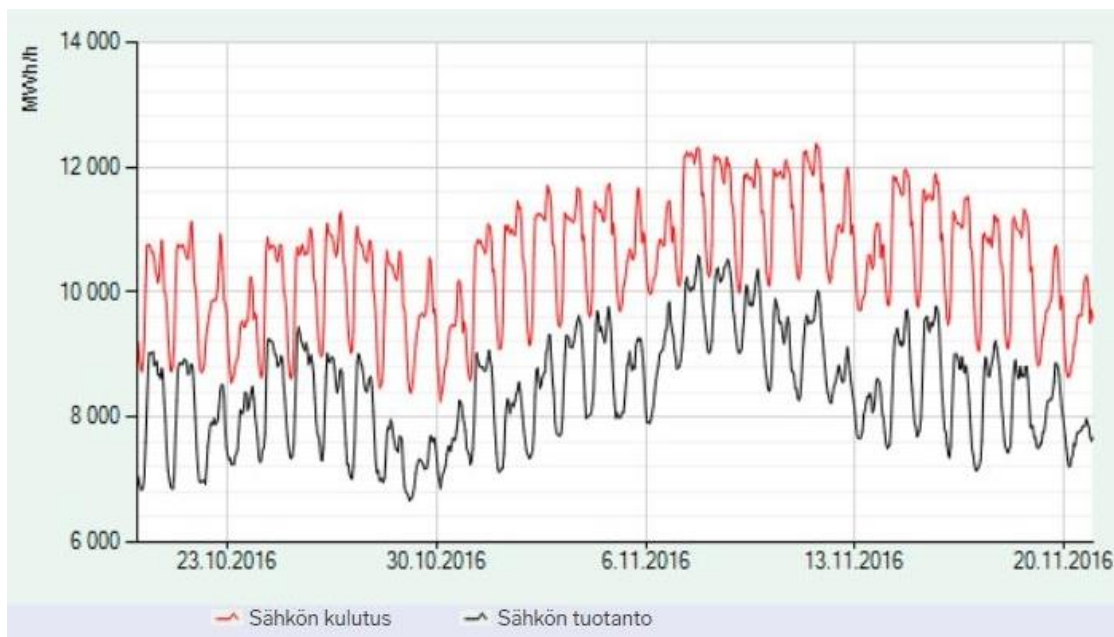
Sähköntuotanto Suomessa vuonna 2016 oli 66,2 TWh ja kokonaiskulutus kasvoi edellisvuoteen nähden 3 % ollen 85,2 TWh (2). Suomessa sähköntuotanto on moneen muuhun Euroopan maahan nähden varsin hajautettua. Sähköä tuotetaan monipuolisesti eri energialähteillä ja tuotantomuodoilla. Monipuolinen ja hajautettu tuotantorakenne lisäävät sähkön hankinnan varmuutta. Suomessa tärkeimmät energialähteet ovat ydinvoima, vesivoima, kivihiili, maakaasu ja puupolttoaineet (kuva 1). Lähes kolmasosa sähköstä tuotetaan yhteistuotantona lämmöntuotannon yhteydessä, jolloin polttoaineen energiasisällöstä saadaan hyödyksi jopa 90 %. (3.)



KUVA 1. Sähköntuotanto Suomessa energialähteittäin vuonna 2016 (3)

Suomessa on noin 400 voimalaitosta, joista yli puolet on vesivoimalaitoksia. Vesivoiman osuus sähköntuotannosta vaihtelee tuntuvasti vesitilanteen mukaan. Hyvänä vesivuonna vesivoiman osuus on keskimääräistä korkeampi, mutta silloin sähköä tuodaan myös enemmän Ruotsista ja Norjasta. Vesitilanne heijastuu aina myös fossiilisilla polttoaineilla tuotetun sähkön osuuteen. (3.)

Tuotanto voidaan primäärienergian lisäksi jaotella tuotantoprosessin tai käyttötavan perusteella. Osa voimalaitoksista on tyypillisesti käytössä jatkuvasti täydellä teholla ja osan tuotanto vaihtelee tuotantomahdollisuuksien ja kysynnän mukaan. Kuvassa 2 näkyvän sähkönkulutuksen vaihtelun vuoksi tarvitaan säätövoimaa sähköverkon tasapainon ylläpitämiseksi. Säätövoima kykenee reagoimaan sähköntuotannon ja -kulutuksen välisiin vaihteluihin lyhyessäkin ajassa. Suomessa säätövoimaa tuotetaan lauhde-, yhteistuotanto- ja vesivoimalaitoksissa. (3.)

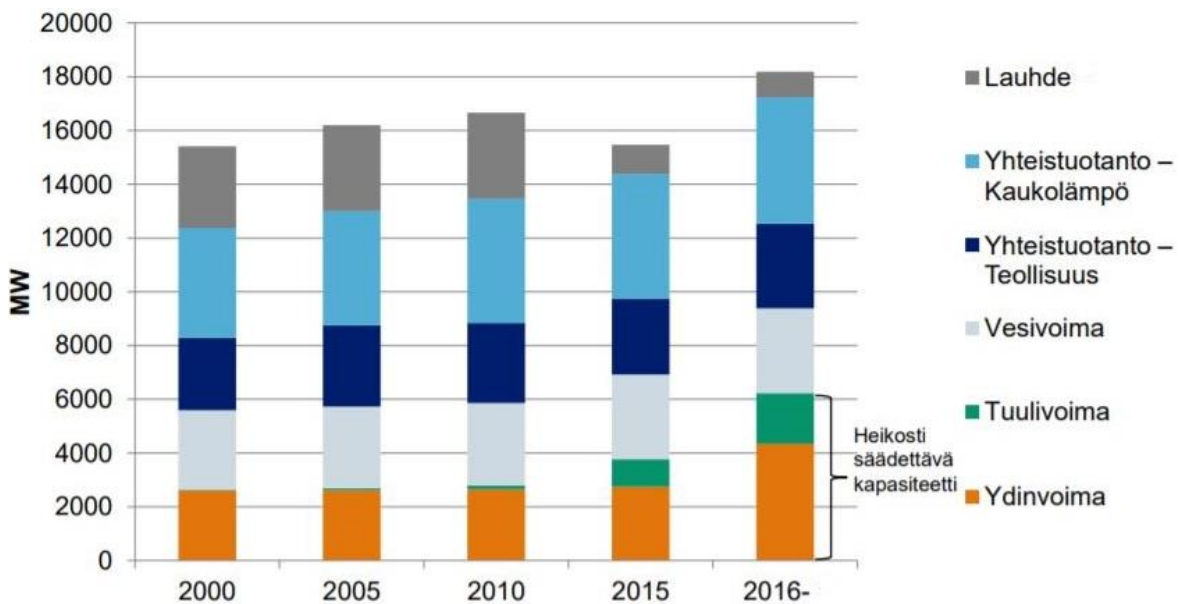


KUVA 2. Sähkön kulutuksen ja tuotannon vaihtelu kuukauden aikana (4)

Liitteessä 1 on esitetty yksittäisen yhteistuotantovoimalaitoksen prosentuaalinen tehon vaihtelu samalla ajanjaksolla kuin kuvassa 2 esiintyvä sähköntuotannon ja -kulutuksen vaihtelu. Kuvaajasta voidaan hyvin huomata yksittäisen säätövoimalaitoksen tehon vaihtelu verrattuna koko maan sähköntuotantoon ja -kulutukseen. Tehohuiput sijoittuvat tyypillisesti aamun ja illan kohdalle, jolloin myös vuorokautinen sähkönkulutus on suurimmillaan.

2.2 Tuotantokapasiteetin kehitys

Sähköntuotannon kokonaiskapasiteetti on ollut laskussa 2010-luvun aikana lauhdekapasiteetin poistumisen vuoksi, mutta viime vuosina valmistuneiden investointien johdosta kapasiteetin kokonaismäärä on kääntynyt jälleen kasvuun (kuva 3) (5, s. 8). Lämpövoimaan perustuvan sähköntuotannon poistuessa ja säiden mukaan vaihtelevan tuuli- ja aurinkoenergian osuuden lisääntyessä säätövoiman osuus kokonaiskapasiteetista pienenee huomattavasti (6).



KUVA 3. Suomen sähköntuotantokapasiteetin muutokset (5, s. 11)

Suomessa tunnin sisäisen säätötarpeen arvioidaan kasvavan noin 400 MW vuoteen 2020 mennessä pelkästään tuulivoimatavoitteen toteutumisen myötä. Päivän sisäisen säätötarpeen arvioidaan kaksinkertaistuvan vuoteen 2030 mennessä. (6.)

3 SÄHKÖNTUOTANTO GENERAATTORILAITOKSESSA

Voimalaitosten tuottama sähköenergia syntyy generaattoreissa. Generaattorit muuttavat vesi-, höyry- tai kaasuturbiinin kehittämän mekaanisen tehon sähköksi. Sähkömotorinen voima muodostuu, kun johdin liikkuu magneettikentässä. Johtimeen syntyvän jännitteen määrä riippuu magneettikentän voimakkuudesta, johtimen pituudesta ja liikenopeuden suuruudesta. Sähkövirran syntymiseksi johtimen on muodostettava suljettu virtapiiri. (7, s. 297.)

Generaattorissa liikkuva magneettivuo saadaan aikaan turbiinin pyörittämän roottorin ympärille käämityn magnetointikäämin avulla. Syntyvä sähkövirta indusoituu generaattorin staattorikäämeihin, josta se johdetaan muuntajan kautta sähköverkkoon. Voimalaitoksissa käytettävät generaattorit voidaan jakaa nopeasti ja hitaasti pyöriviin tahtigeneraattoreihin. Nopeasti pyöriviä generaattoreita käytetään höyry- ja kaasuturbiinivoimalaitoksissa ja hitaasti pyöriviä generaattoreita vesivoimalaitoksissa. (7, s. 297.)

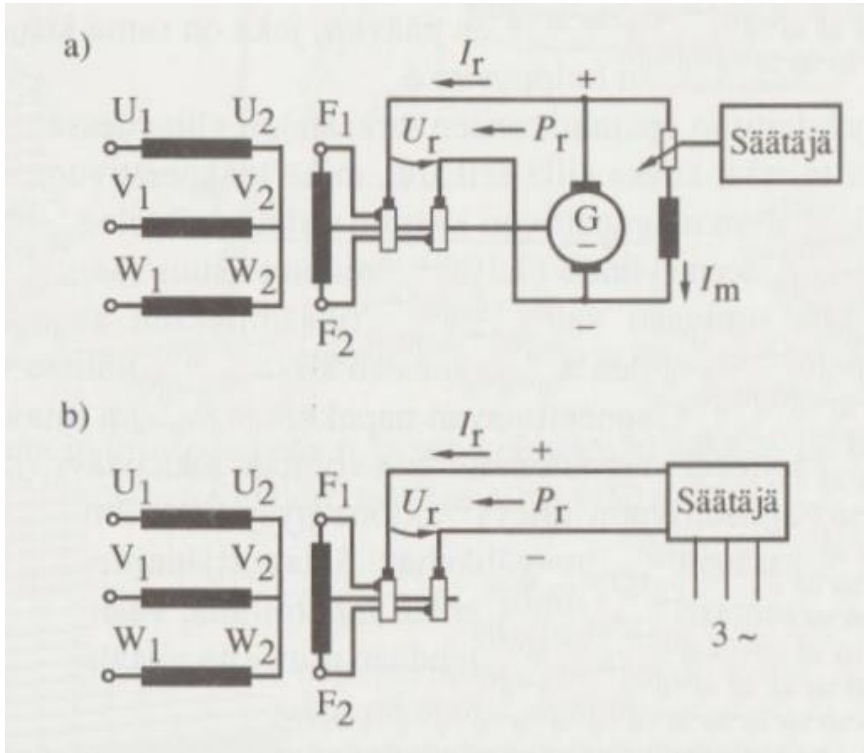
3.1 Tahtigeneraattori

Tahtigeneraattori on sähkökone, joka muuttaa voimakoneen antaman mekaanisen tehon sähkötehoksi. Tahtigeneraattorin roottori pyörii staattorivirran synnyttämän magneettikentän kanssa tarkalleen samalla nopeudella eli tahdissa. (8, s. 344.)

Kun tahtigeneraattoria pyöritetään voimakoneen avulla ja roottorin magnetointikäämiin johdetaan tasavirtaa, kehittyy koneeseen magneettivuo. Roottorin pyöriessä magneettivuoviivat leikkaavat staattorin käämisauvoja, jolloin käämitykseen indusoituu sinimuotoisesti vaihteleva kolmivaiheinen lähdejännite. Indusoituvan jännitteen taajuus määräytyy roottorin pyörimisnopeuden ja napapariluvun mukaan. Indusoituneen jännitteen tasoa voidaan säätää muuttamalla roottorin magneettivuon arvoa. (9, s. 88.)

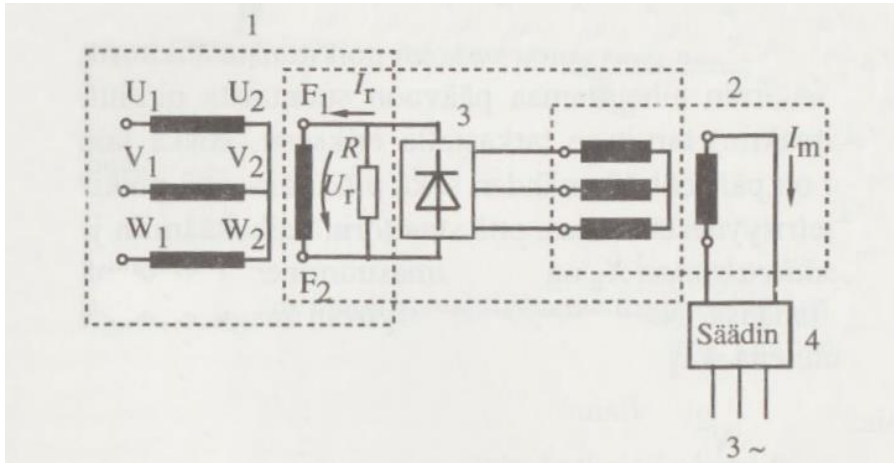
Magnetoimismenetelmien perusteella tahtikoneet jaetaan harjallisiin ja harjattomiin tahtikoneisiin. Harjallisessa tahtikoneessa magnetoimisvirta tuodaan hiilihar-

jojen ja messingistä tai teräksestä valmistettujen liukurenkaiden avulla roottori-käämiin. Tasasähkölähteenä voi olla pääkoneen kanssa samalla akselilla oleva magnetointigeneraattori tai erillinen tasasähkölähde (kuva 4). Magnetointia säädetään muuttamalla magneitoimisvirran I_m arvoa, jolloin magnetointigeneraattorin kehittämä jännite U_r muuttuu ja pääkoneen magneitoimisvirta I_r säätyy. (8, s. 348.)



KUVA 4. Harjallisen tahtigeneraattorin magneitoimismenetelmät a) magneitointi tasasähkölähteestä b) magneitointi vaihtosähkölähteestä (8, s. 348)

Harjattomassa tahtikoneessa magnetointikoneena toimii pääkoneen kanssa samalle akselille asennettu erillinen ulkonapainen vaihtosähkögeneraattori (kuva 5). Ulkonapakoneessa magneettinavat ovat staattorissa ja käämitys, johon lähdejännite indusoituu, on roottorissa. Magnetointigeneraattorin staattorikäämityksessä kehittyvä vaihtojännite tasasuunnataan tasajännitteeksi U_r , joka vaikuttaa pääkoneen magneitoimiskäämiin syöttäen siihen magneitoimisvirran I_r . Tässäkin menetelmässä magnetoinnin säätö tapahtuu säätämällä magneitoimisvirtaa I_m . Virta otetaan vaihtosähkölähteestä säätäjän kautta. Kuvassa 5 on esitetty harjattoman magnetointilaitteiston pääkomponentit. Numero 1 kuvaa pääkonetta, numero 2 magnetointikonetta, numero 3 diodisiltaa ja numero 4 säädintä. (8, s. 349–350.)

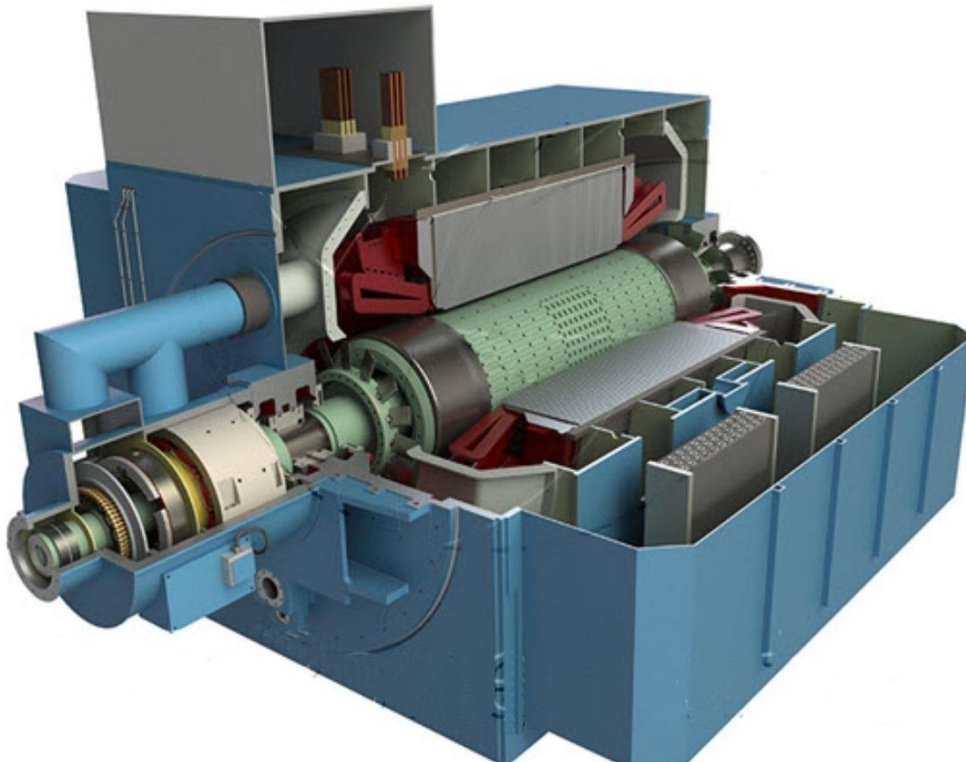


KUVA 5. Harjattoman tahtigeneraattorin magnetointi (8, s. 349)

3.2 Turbogeneraattorin rakenne

Voimakoneen ominaisuudet vaikuttavat merkittävästi siihen kytketyn generaattorin rakenteeseen. Höyry- ja kaasuturbiinivoimalaitosten turbiinit pyörivät suurella nopeudella, joten niiden generaattoreiden pyörimisnopeus on joko 3000 tai 1500 kierrosta minuutissa. Näitä nopeasti pyöriviä generaattoreita kutsutaan yleisesti turbogeneraattoreiksi. Suuren pyörimisnopeuden takia turbogeneraattorissa on pitkä akseli ja suhteellisen pieni halkaisija, jotta kehänopeus olisi teknisesti so- piva. (8, s. 344–345.)

Generaattori koostuu kahdesta pääkomponentista, staattorista ja roottorista, jotka puolestaan koostuvat useista eri komponenteista. Nopeasti pyörivään roottoriin kohdistuu kovaa mekaanista rasitusta sekä sähkömagneettisuuden ja lämmön aiheuttamaa rasitusta. Myös paikallaan olevaan staattoriin kohdistuu useita merkittäviä voimia, kuten värähtely- ja vääntörasitusta sekä sähkömagneettisuuden, lämmön ja suurjännitteen aiheuttamaa rasitusta. Edellä mainituista rasituk- sista johtuen generaattorin suunnittelussa ja rakenteessa on otettava huomioon useita kohtia koneen suorituskyvyn takaamiseksi. (10, s. 34.) Kuvassa 6 on ha- vainnollistava läpileikkauskuva umpinaparoottorilla varustetusta turbogeneraat- torista.



KUVA 6. Turbogeneraattorin läpileikkauskuva (11)

3.2.1 Generaattorin rakenteen suunnitteluperusteet

Generaattorin suunnitteluperusteisiin vaikuttaa lähtökohtaisesti kolme pääteki-
jää, joita ovat standardit, asiakkaan ja verkon asettamat vaatimukset generaatto-
rin käytölle sekä valmistajan suunnittelu- ja valmistusohjeet. Standardissa IEC
60034-3 on määritetty tahtigeneraattorin suunnittelussa huomioon otettavat läh-
tökohdat. Standardin mukaan generaattorin, jonka teho on korkeintaan 1200
MVA, on kestävä 1,5-kertainen staattorivirta 30 sekunnin ajan ilman vaurioitu-
miseen johtavaa vikaantumista. Lisäksi generaattorin on kestävä verkon oiko-
sulku koneen käydessä nimellisteholla ja 1,05-kertaisella ylijännitteellä. Käyttöön-
ottokoestuksessa staattorikäänin on kestävä kaavan 1 mukainen vaihtosäh-
köjännite U yhden minuutin ajan. (12, s. 4–9.)

$$U = 2 \cdot U_N + 1 \text{ kV}$$

KAAVA 1

U = koestusjännite (V)

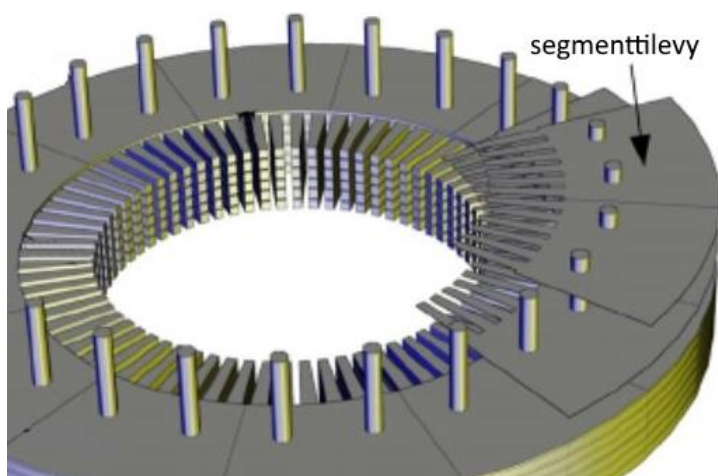
U_N = generaattorin nimellisjännite (V)

Standardin IEC 60043-3 mukaan normaalikäyttöön tulevan generaattorin roottori on suunniteltava niin, että se kestää mekaanisesti vähintään 3000 käynnistyskertoa. Sykliseen käyttöön suunnitellun generaattorin roottorin on mekaanisesti kestävä vähintään 10 000 käynnistystä. Käynnistysmäärän tulisi olla enintään 500 kertaa vuodessa, ellei suunnitteluvaiheessa ole muuta sovittu. (12, s. 8.)

Verkon asettamat käyttövaatimukset generaattoreille ovat muuttuneet huomattavasti ajan kuluessa. Ennen generaattorit suunniteltiin pääasiassa peruskuormituskäyttöön vähäisillä käynnistyskerroilla ja pienellä loistehotuotannolla. Uusien generaattoreiden suunnittelussa on huomioitava verkon muuttuneet vaatimukset sähköntuotannossa. Generaattori on suunniteltava niin, että se pystyy seuraamaan verkon syklisesti vaihtelevaa pätö- ja loistehon tarvetta. (12, s. 13.)

3.2.2 Staattori

Staattorin ydin on levypaketti, joka koostuu ohuista toisistaan eristetyistä segmenttilevyistä. Levypaketin kehä on tyypillisesti jaettu joko 10 tai 24 segmenttiin, riippuen siitä, onko kone kaksi- vai nelinapainen. Levykerrokset kasataan limittäin viereisiin kerroksiin nähden, jolloin rakenteesta saadaan mekaanisesti kestävämpi (kuva 7). Lisäksi limittäinen rakenne pienentää magneettisesta epäsymmetriasta johtuvaa akselijännitettä. Levyjen eristäminen toisistaan puolestaan pienentää levypaketissa syntyviä pyörrevirtoja ja niistä johtuvaa lämpenemistä. (10, s. 35.)



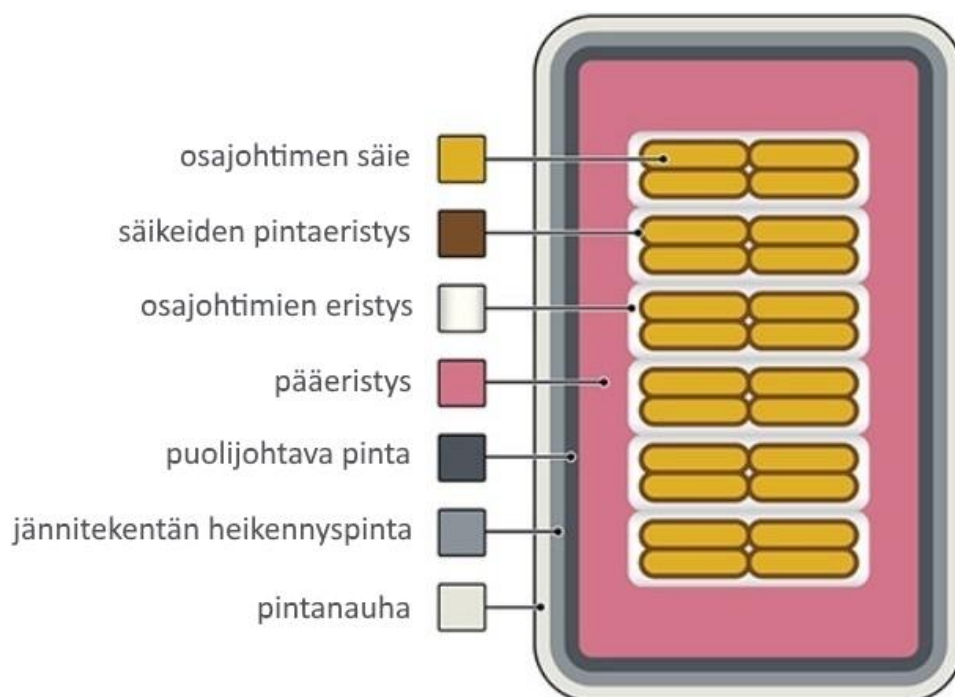
KUVA 7. Staattorin levypaketin kasaus segmenttilevyistä (13)

Segmenttilevyt asennetaan staattorirungossa olevia ohjaustankoja vasten ja levypaketti kiristetään staattoripäistä tiukaksi. Levypaketin kiristyksessä käytetään kahta erilaista rakennetta. Ensimmäisessä rakenteessa segmenttilevyssä oleva lovi asettuu staattorin rungon ohjaustankoon, jonka jälkeen levypaketin päihin laitetaan metalliset puristuslevyt, joilla levypaketti kiristetään. Toinen tapa on käyttää läpipultteja, jotka asennetaan segmenttilevyissä olevien reikien läpi. Levypaketin kumpaankin päähän asennetaan levyt, jotka tasaavat pulttien kiristyksestä syntyvän paineen koko levypaketin päädyn alueelle. (10, s. 36.)

Staattorirungon tarkoituksena on tukea levypakettia ja jäädyttimiä. Rungon on kestettävä generaattorin paino, pyörivän liikkeen aiheuttama voima sekä verkon ja generaattorin viat, jotka voivat aiheuttaa hetkellisesti hyvin suuria voimia. Rungon on myös mahdollistettava levypaketin lämpöeläminen. (10, s. 39.)

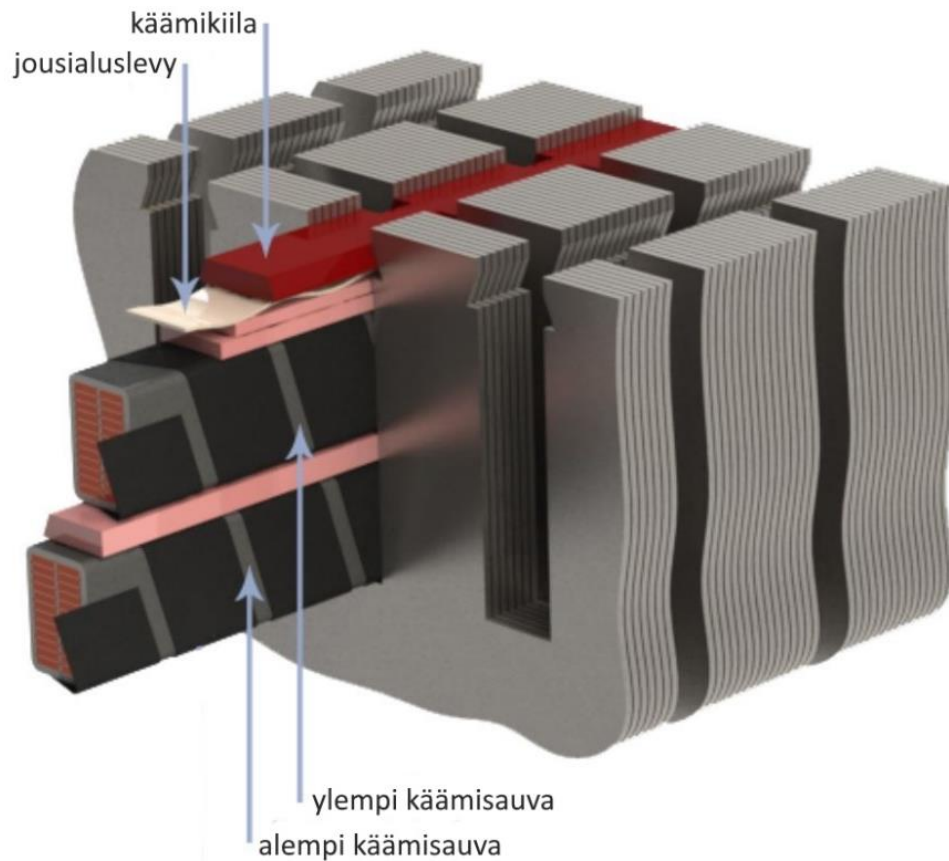
Staattorin kallein ja kriittisin osa on käämitys. Staattorikäämitys muodostuu käämisauvoista, jotka valmistetaan kuparisista toisistaan erotetuista osajohtimista. Käämisauvat asennetaan symmetrisesti levypaketissa oleviin uriin. Jokaiseen uraan asennetaan kaksi käämisauvaa päällekkäin. Staattorikäämitys jaetaan kolmeen vaiheeseen, jotka kytketään yleensä käämityksen toisesta päästä yhteen eli tähteen. Tähtikytkentä mahdollistaa käämityksen relesuojauksen toteuttamisen. (10, s. 34, 51–52.)

Kuvassa 8 on esimerkki osajohtimista koostuvan käämisauvan eristyksestä. Käämin pääeristyksen tehtävä on eristää käämisauvat toisistaan sekä levypaketista ja muista maadoitetuista osista. Pääeristys on suunniteltu kestämään sekä pääjännite että verkon vioista johtuvat ylijännitteet. Pääeristyksen alla olevan osajohdineristyksen on kestettävä normaali vaihejännite sekä hetkellisesti suuret ylijännitteet. Osajohtimien säikeiden välinen pintaeristys on alttiina vain muutaman voltin jännitteelle ja satunnaiselle ylivirrälle. Pääeristeen pinnalla on puolijohtava teippaus, jännitekentänheikennuspinta ja käämin pintanauha. (10, s. 57.)



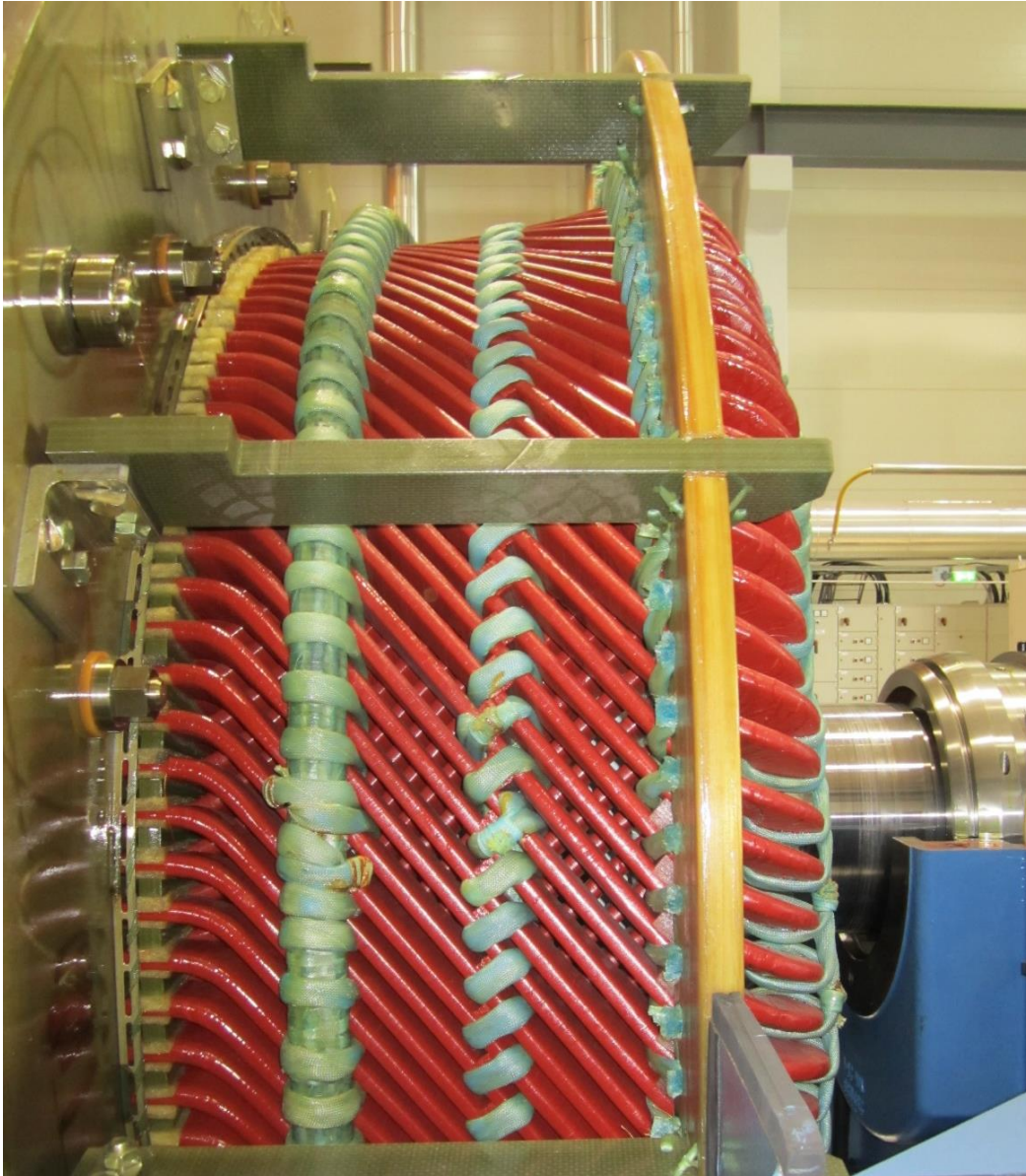
KUVA 8. Esimerkki staattorikäänin rakenteesta ja eristyksestä (14)

Kun käämityksessä kulkee virtaa, esiintyy käämiurassa vastakkaisia voimia, jotka vaihtelevat jatkuvasti virran suunnan mukaan. Käämisauvoihin kohdistuu kaksi kertaa jakson aikana huomattava värähtelyvoima. Värähtely ja eristeen vaurioituminen estetään kiilaamalla käämisauvat tiukasti levypaketin käämiuraan (kuva 9). Värähtelyn lisäksi kiilauksessa on huomioitava käämin lämpölaajeneminen, mikä voi nopeasti löystyttää kiilauksen, mikäli kiilaus ei ole kunnollinen. Kiilauksessa on käytössä erilaisia kiiloja ja tekniikoita valmistajasta riippuen. (10, s. 57.)



KUVA 9. Staattorikäämin kiilaus (15)

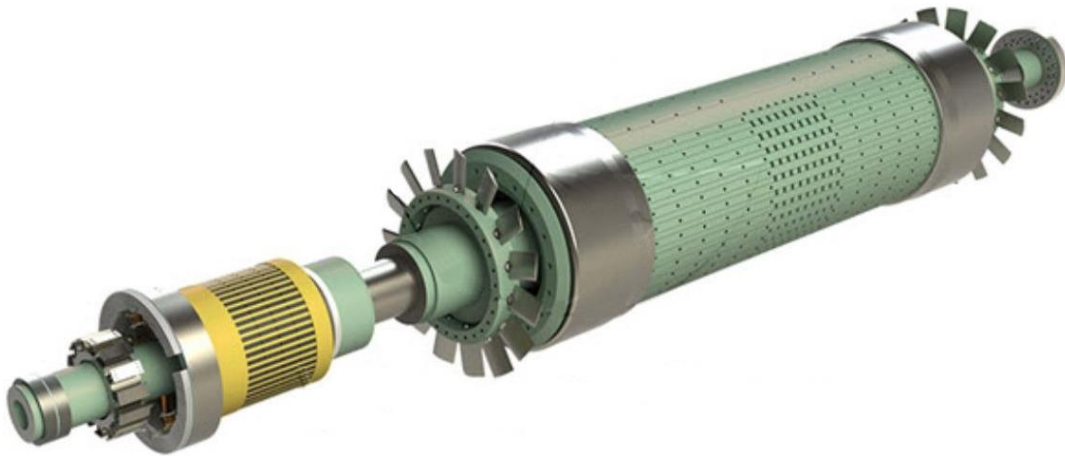
Ura-alueen lisäksi kääminpäälue on altis värähtelyä aiheuttaville voimille, mikä voi vahingoittaa käämin eristystä. Kääminpäiden muoto on mutkikas ja vaatii tukirakenteen, joka on yhtä aikaa sekä joustava että tukeva. Vahvasta sähkökentästä johtuen kääminpäiden tuennassa ei voida käyttää johtavia materiaaleja. Useimmat tukirakenteet koostuvat tukipaloista, kiristysvälineistä ja tukikaarista, jotka yhdessä käämisauvojen kanssa muodostavat tukevan rakenteen (kuva 10). (5, s. 60.)



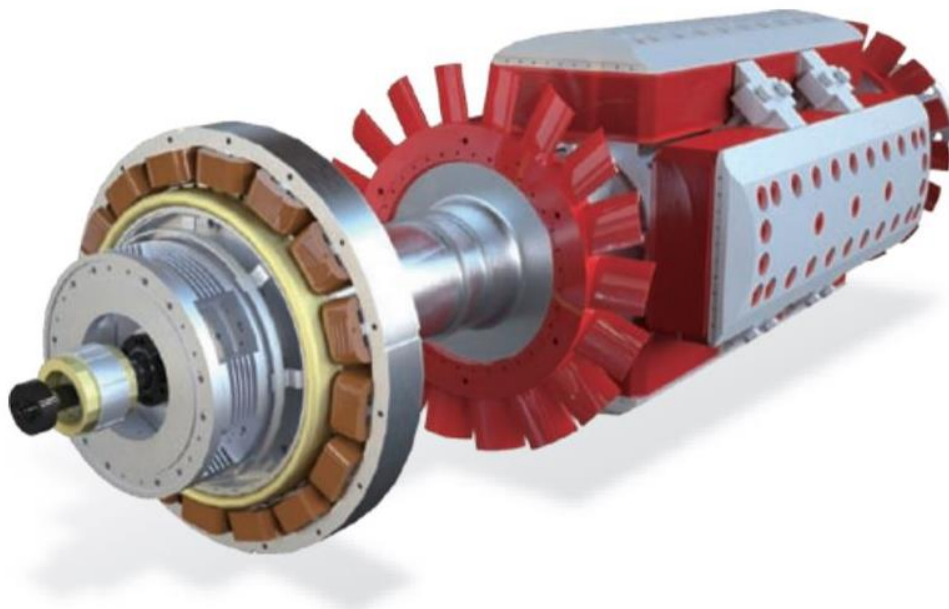
KUVA 10. Staattorin kääminpäälueen tukirakenne (16)

3.2.3 Roottori

Tahtigeneraattorin roottori on joko umpinaparakenteinen (kuva 11) tai avo- eli varsinaparakenteinen (kuva 12). Umpinaparoottoria käytetään nopeakäyntisissä tahtikoneissa ja moninapaisia avonaparoottoreita hitaissa tahtikoneissa. (8, s. 344–345.)



KUVA 11. Umpinaparoottori harjattomalla magnetoinnilla (15)

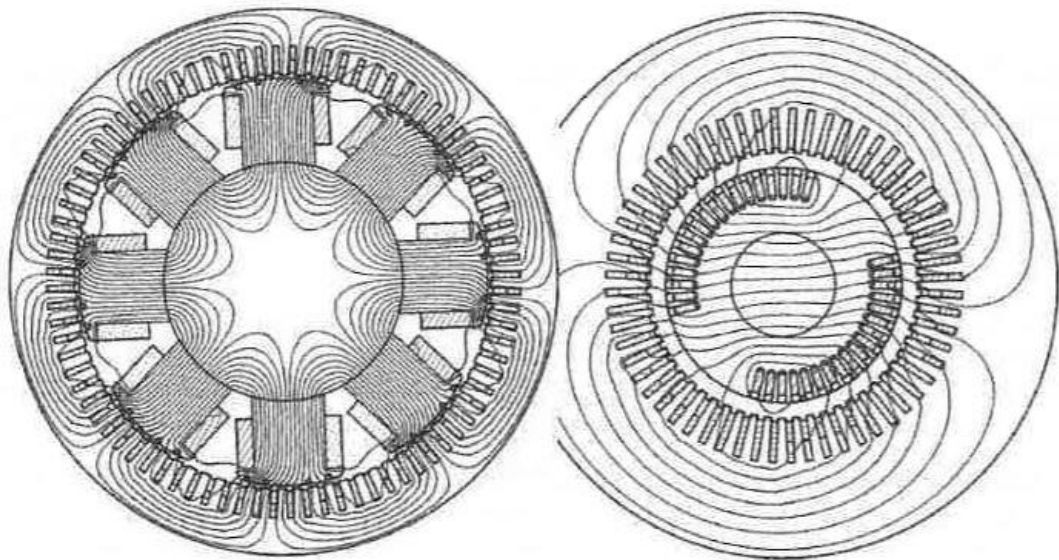


KUVA 12. Nelinapainen avonaparoottori (17, s.5)

Metallin käsittelytekniikoiden kehittyttyä roottorirungot on valmistettu yleensä yhdestä isosta terästaaksesta. Runkomateriaalin on oltava sähköisiltä ominaisuuksiltaan sopivaa ja kestävä käytön aikaiset mekaaniset rasitukset sekä lämpötilan muutoksesta aiheutuvat voimat. Turbogeneraattorin roottorin suunnittelusta hankalaa tekee sen pituus halkaisijaan nähden. Suurella nopeudella pyörivän roottorin tasapainotus on haastavaa johtuen runkoon asennettavista komponenteista, jotka lämpölaajenevat käytön aikana. (10, s. 64–66.)

Umpinaparoottori on rakenteeltaan sylinterimäinen, sillä sen magnetointikäänitys on sijoitettu roottorin runkoon koneistettuihin uriin. Magneettisilta ominaisuuksiltaan roottori on lähestulkoon symmetrinen, eli magneettivuo pystyy tunkeutumaan yhtäläisesti navan ja käämin sijoituskohdan kautta roottorirautaan kuvan 13 mukaisesti. (9, s. 87.)

Avonaparoottori on rakenteeltaan epäsymmetrinen, sillä se koostuu erillisistä roottorirunkoon kiinnitetyistä navoista. Magnetointikäänitys on käämitty näiden napojen ympärille joko lattakuparista tai muotolangasta. Epäsymmetrisestä rakenteesta johtuen avonaparakeiteinen roottori on myös magneettisilta ominaisuuksiltaan epäsymmetrinen. Ulkonevan navan kohdalla ilmapäli on pienempi ja johtaa hyvin magneettivuota, kun taas napojen välissä sijaitsevan suuremman ilmapälin kohdalla magneettivuo on heikompi. Kuvassa 13 on vasemmalla puolella avonapaisen ja oikealla puolella umpinapaisen tahtikoneen poikkileikkaukset, joissa viivat osoittavat magneettikentän kulkureitin staattori- ja roottoriraudassa sekä koneen ilmapälinissä. (9, s. 87–88.)

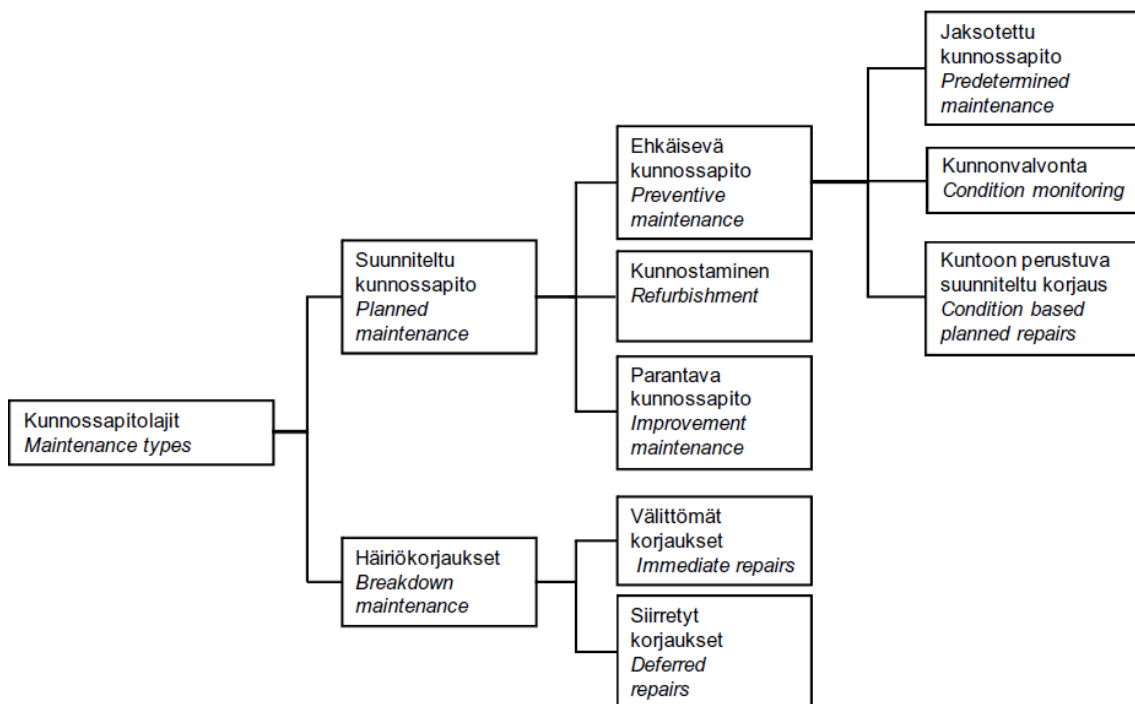


KUVA 13. Avo- ja umpinapaisen tahtikoneen magneettikentän kulkureitit (9, s. 87)

4 GENERAATTORILAITOKSEN KUNNOSSAPITO

Kunnossapidolle löytyy lukuisia eri määritelmiä, mutta perussisällöltään niiden kaikkien ydin on sama. PSK 6201 standardissa kunnossapito määritellään seuraavasti: ”Kunnossapito on kaikkien niiden teknisten, hallinnollisten ja johtamiseen liittyvien toimenpiteiden kokonaisuus, joiden tarkoituksena on säilyttää kohde tilassa tai palauttaa se tilaan, jossa se pystyy suorittamaan vaaditun toiminnan sen koko elinjakson aikana” (18, s. 2).

Kunnossapitotoiminta voidaan jakaa kuvan 14 mukaisesti kahteen pääläjiin, joita ovat suunniteltu kunnossapito ja häiriökorjaukset. Häiriökorjaukset pitää sisällään välittömät häiriökorjaukset sekä siirretyt häiriökorjaukset. Suunniteltu kunnossapito muodostuu kunnostamisesta, parantavasta kunnossapidosta ja ehkäisevästä kunnossapidosta. Nykyisin pääpaino on ehkäisevällä kunnossapidolla, josta suomenkielessä käytetään yleensä termiä kuntoon perustuva kunnossapito. Se perustuu kunnonvalvontaan, tarkastuksiin ja käyttöparametrien seurantaan.



Kuva 14. Kunnossapitolajit (18, s. 22)

4.1 Generaattorin kunnossapito

Generaattorin kunnossapito koostuu päivittäisistä ja pidemmän aikavälin toiminnoista. Tietyt osat, kuten magnetointilaitteiston hiiliharjat sekä maadoitus- ja maasulkuvalvojanhiilet altistuvat jatkuvalla kulutukselle ja vaativat määräajoin toistuvaa säätöä ja tarkastusta. Muut osat, kuten jäähdyttimet ja tuuletusjärjestelmät voivat kerätä likaa tai vieraita materiaaleja ja vaativat ajoittaista puhdistusta. Käämimeristys heikentyy ajan kuluessa ja vaatii jatkuvaa tarkastamista käyttövarmuuden ylläpitämiseksi. Kaikki osat ovat jatkuvasti alttiina värähtely-, paine- ja lämpötilamuutoksille, mikä voi johtaa materiaalien heikkenemiseen tai murtumiseen. Siksi on tärkeää huomioida koneen toiminnot ja tutkia kaikki epätavalliset muutokset äänessä, lämpötilassa, värähtelyssä ja suorituskyvyssä. Kunnossapitotoimet ja tarkastukset tulisi toteuttaa niin, että pienet viat korjataan ennen kuin ne kehittyvät suuremmiksi ongelmiksi. (19, s. 39.)

Hyväkuntoisten generaattoreiden kunnossapito ja tarkastukset ovat perusteltuja paremmalla käyttövarmuudella ja pienemmillä kokonaiskustannuksilla verrattuna siihen, että generaattoria vain käytettäisiin vikaantumiseen asti. Koneen aikataulutetuilla huolloilla saavutetaan paras hyöty, kun seisokit voidaan valmistella hyvin ja suunnitella niin, että niistä aiheutuu mahdollisimman vähän tuotantomennyksiä. (19, s. 39.)

Useat generaattorin osat ja toiminnot voidaan tarkastaa koneen käydessä. Suuremmat tarkastukset vaativat koneen käyttökäskytyksen ja mahdollisesti purkamista. On suositeltavaa, että ensimmäinen avaava revisio ja suurempi tarkastus tehdään koneen ensimmäisen käyttövuoden jälkeen. Ensimmäisen revision jälkeen konetta on mahdollista käyttää useita vuosia ennen seuraavaa revisiota. Tarkastusväli tulisi määrittellä generaattorin valmistajan ohjeiden ja käyttökokeusten perusteella, huomioiden koneen käyttötunnit, käynnistysten määrä, verkon oikosulut ja suurten transienttien määrä, turbiinin seisokit sekä kunnonvalvonnan ja aikaisempien tarkastuksien tulokset. (19, s. 39.)

Generaattorin revisiot voidaan jakaa laajuuden perusteella suuriin ja pieniin revisioihin. Suuressa revisiossa generaattorin päädyt avataan ja roottori vedetään

ulos staattorista. Staattorille, roottorille ja generaattorin apulaitteille tehdään kattavat tarkastukset ja kunnonvalvontamittaukset. Revisiossa havaitut puutteet ja viat generaattorin kunnossa korjataan koneen toimintakunnon varmistamiseksi. Suurten revisioiden välissä suoritetaan pienempiä revisioita. Pienissä revisioissa suoritetaan tyypillisesti seisokin aikaiset kunnonvalvontamittaukset sekä visuaalinen tarkastus generaattorin tarkastusluukkujen kautta. Lisäksi voidaan tehdä pienempiä purkamista vaativia töitä, kuten esimerkiksi laakereiden tarkastuksia.

Hyvä kunnossapitosuunnitelma on keskeisessä roolissa tehokkaassa huolto-seisokissa. Tarvittavien osien saatavuus on varmistettava ajoissa, sillä huollossa tarvittavilla korvaavilla komponenteilla voi olla hyvin pitkä toimitusaika. Käyttötojen, kokemuksen, kunnonvalvonnan ja aikaisempien tarkastusten perusteella voidaan ennakoida tulevia korjauskohteita ja -toimenpiteitä. Seisokin alettua tulee mahdollisimman varhain tarkistaa pitkäkestoista korjausta vaativat kohteet seisokkiajan minimoimiseksi. (19, s. 39–40.)

4.2 Kunnossapidon kehitys

Kunnossapitotoimintaa on ollut olemassa yhtä kauan kuin koneita on rakennettu ja käytetty. Alussa koneet olivat vielä varsin yksinkertaisia ja mitoituksen epätarkkuudesta johtuen reilusti ylimitoitettuja, jolloin ne kestivät enemmän käyttöä ja vaihtelevia olosuhteita. Vian korjaaminen ja määrittäminen olivat helppoja toimenpiteitä ja vikaantuneita koneita voitiin pitää seisokissa niiden pienen integraatioasteen vuoksi. Kunnossapito oli lähinnä vikaantumisen jälkeistä korjausta ja huoltoa ja ennakoiva kunnossapito koostui lähinnä puhdistamisesta, säätämisestä sekä voiteluhuollosta. (20, s. 16–17.)

Kehityksen tuomien muutoksien johdosta yhden alan osaaminen ei enää välttämättä riitä ja normaalit päivittäisen käytön ja kunnossapidon työt vaativat usean eri alan tuntemusta. Toisaalta laitteiden perushuoltoihin, laajempiin korjauksiin ja prosessien virittämiseen tarvitaan entistä syvällisempää osaamista. (21, s. 110–119.)

Teknologiameielessä prosessien sekä kone- ja laitekannan jatkuva kehitys tarkoittaa käytännössä kaikkinaisen optimoinnin lisääntymistä sekä automaation ja tietotekniikan merkityksen jatkuvaa kasvamista. Tekniikan kehitys mahdollistaa paremman suorituskyvyn pienemmillä investoinneilla. Suunnittelun laskennallista epätarkkuutta ei enää ole, minkä johdosta ylimitoituksen tarpeesta on päästy eroon. Kehityksen haittana on se, että tarkkaan suunnitellut ja optimoidut laitteet pystyvät suoriutumaan tehtävästään vain, jos kaikki käyttöparametrit ja ulkoiset ympäristökijät pysyvät niille tarkkaan määritellyissä raja-arvoissa. Tämä tarkoittaa myös sitä, että häiriöstä palautuminen vaikeutuu, joten myös kunnossapito on haastavampaa. (21, s. 27.)

Kuvan 15 perusteella voidaan huomata generaattoreiden vikaantumisessa huomattava muutos eri vuosikymmeninä valmistettujen generaattoreiden välillä. Ennen vuotta 1960 valmistettujen generaattoreiden keskimääräinen käyttöikä ennen ensimmäistä vikaantumista oli yli 50 vuotta, jonka jälkeen vikaantumiseen johtava aika on laskenut merkittävästi lähes joka vuosikymmenellä. 2010-luvulla valmistetuilla generaattoreilla keskimääräinen käyttöaika ennen ensimmäistä vikaantumista on enää reilu vuosi.



KUVA 15. Generaattoreiden keskimääräinen käyttöaika ennen ensimmäistä vikaantumista valmistusvuoden perusteella (12, s. 67)

Perinteisesti generaattorin kunnossapito on ollut ehkäisevää kunnossapitoa, joka noudattaa konservatiivisesti koneen valmistajan jaksotettua aikataulua, kokemuspohjaista tietoa ja vikatilastoja. Huolto-ohjelmat suosittelevat usein toistuvia ja toisinaan tarpeettomia kunnossapitotoimintoja, mutta samalla ne pitävät sisällään riskin odottamattomasta vikaantumisesta. Energiayhtiöt pyrkivät löytämään tehokkaampia tapoja laitteiden eliniän pidentämiseksi, vikaantumisen vähentämiseksi, huoltoseisokkien minimoimiseksi ja negatiivisten vaikutusten lieventämiseksi. Kehittyvä anturiteknologia ja signaalien käsittely yhdessä laitteeseen integroidun käynninajan kunnonvalvonnan kanssa voivat tuottaa entistä yksityiskohtaisempaa tietoa generaattorin kunnosta. Tulevaisuudessa generaattoreiden kunnossapito tulee yhä enemmän pohjautumaan kunnonvalvonnan tuottamiin tietoihin koneesta. Kuntoon perustuvalla kunnossapidolla voidaan optimoida kunnossapitotoimien ajoittaminen ja parantaa generaattorin käyttövarmuutta. (22, s. 1.)

4.3 Kunnonvalvonta osana kunnossapitoa

PSK 6201 standardin mukaan: ”Kunnonvalvonnalla määritellään kohteen toimintakunnon nykytila ja arvioidaan sen kehittyminen mahdollisen vikaantumisen, huolto- ja korjausajankohdan määrittämiseksi. Kunnonvalvonnan toimenpiteitä ovat aistein sekä mittalaittein tapahtuvat tarkastukset ja valvonta sekä mittaustulosten analysointi.” (17, s. 23.) Kunnonvalvonta siis tuottaa lähtötietoja ehkäisevän kunnossapidon ja korjauksen suunnitteluun.

Yleisesti kunnonvalvonta jaetaan kolmeen vaiheeseen, jotka ovat valvonta, vianmääritys ja ennusteen laatiminen. Valvonnan tarkoitus on havaita luotettavasti normaalista poikkeavat tilanteet. Havaitun poikkeaman jälkeen aloitetaan vianmääritys, jonka tarkoituksena on selvittää poikkeavan mittaustuloksen syy ja tunnistaa mahdollinen vikaantuminen. Viimeinen vaihe on ennusteen eli prognoosin laatiminen, jonka tarkoituksena on arvioida jäljellä olevaa käyttöaikaa ja korjaustoimenpiteiden ajankohtaa. (21, s. 281.)

Koneen kuntoa tulee valvoa menetelmillä, joilla voidaan havaita luotettavasti viat ja seurata niiden kehitystä. Suurin osa koneiden ja laitteiden vikaumisista on

satunnaisia ja vikaantumismekanismit riippuvat vain vähän koneen käyttöiästä. (21, s. 140.)

Vikaantumismekanismeilla tarkoitetaan vikaantumiseen johtavaa fyysistä, kemiallista tai muuta prosessia, kuten kulumista, syöpymistä, väsymistä tai murtumaa, joka on aistein tai mittauksin havaittavissa. Kunnonvalvonnan perusolettamuksena on, että jokaista vaurioitumista ennakoivissa havaittavissa olevia muutoksia koneen käyttäytymisessä ja vaurioitumista edeltää ajanjakso, jonka aikana vikaantumiseen viittaavia oireita voidaan seurata ja vaurioitumista ennustaa. (21, s. 140.)

Kunnonvalvonnalla pyritään havaitsemaan alkavan vikaantumisen aiheuttama muutos mitattavassa suureessa. Paras tulos saavutetaan, kun kunnonvalvontamittauksia suoritetaan säännöllisesti siten, että eri kerroilla mitatut tulokset ovat vertailukelpoisia keskenään, jolloin arvojen kehitystä on helppo seurata. (23, s. 4.)

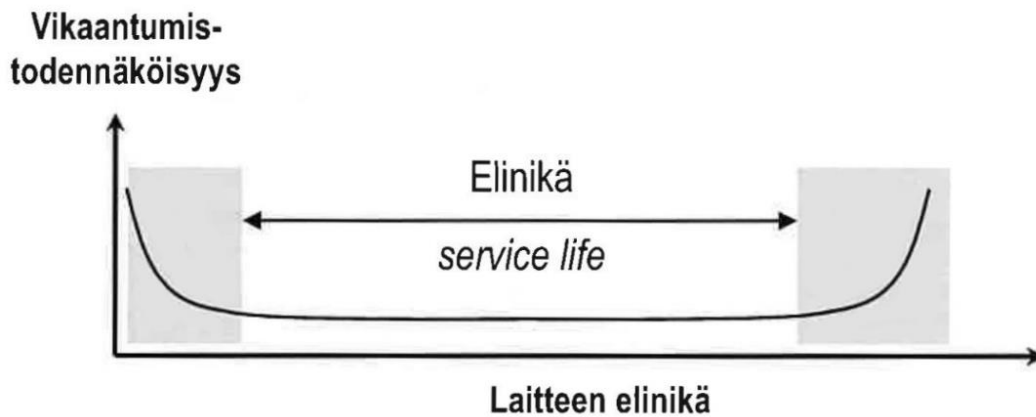
Mitä varhaisemmassa vaiheessa koneen tai laitteen kunnossa havaitaan muutoksia, sitä enemmän aikaa on käytettävissä kunnossapitotöiden suunnitteluun. Suunnitellun toiminnan kustannukset ovat vain puolet suunnittelemattoman toiminnan kustannuksista ja samalla vältetään tuotantohäiriöitä, joiden aiheuttamat katemenetykset voivat olla yli kymmenkertaisia suunnitellun kunnossapidon kustannuksiin verrattuna. (21, s. 110, 119.)

Kunnonvalvonta tulisi käsittää osana kunnossapitotoimintaa eikä ainoastaan lähtötietojen tuottajana. Toimivan kunnonvalvonnan tavoitteena on se, että havaintojen ja suositusten perusteella ryhdytään tarpeellisiin toimiin ja sitä kautta kehitetään kokonaisvaltaisesti kunnossapidon toimintaa. (21, s. 101.)

4.3.1 Vikaantumismekanismit

Laitteen vika ei synny itsestään tai ilmesty tyhjästä, sillä jokaisella vialla on oma syntymä- ja kehitysmekanismi. Vikatila on yleensä pitkän kehitysketjun viimeinen kohta. Kun vian kehitykseen päästään kiinni riittävän varhain, voidaan vaurioitumista vähentää merkittävästi. Samalla voidaan vähentää kunnossapidon määrää. (20, s. 53.)

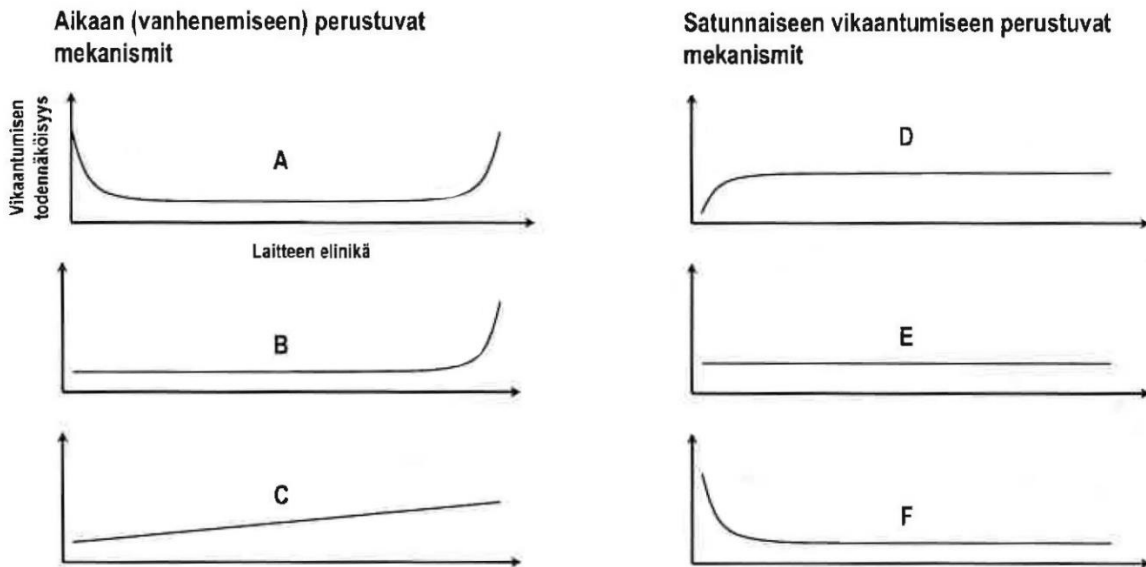
Perinteinen käsitys vikaantumisesta ja laitteen eliniästä on kylpyammekäyrän muotoinen (kuva 16), jonka mukaan laitteen käyttöönoton aikana ilmenee vikoja, jotka tasaantuvat sisäänajokauden jälkeen. Tietyn elinajan jälkeen alkaa loppukuluminen tai hajoaminen, ja vikaantumiskäyrä kääntyy jyrkkään nousuun. (20, s. 57–58.)



KUVA 16. Kylpyammekäyrä (20, s. 57)

Vikaantumistutkimuksien perusteella on löydetty kuusi toisistaan poikkeavaa vikaantumismallia (kuva 17). Kolme mallia perustuu aikaan tai työjaksojen määrään ja toiset kolme vikaantumismallia ovat satunnaisia. Aikaan pohjautuvista malleista A on perinteisen kylpyammekäyrän mukainen, jossa ilmenee alkuvaiheen vikoja ja eliniän lopussa runsasta vikaantumista. Malli B on kylpyammekäyrän mukainen, ilman alkuvaiheen vikoja ja mallissa C vikaantuminen on tasaisesti kasvavaa. (20, s. 57–58.)

Satunnaisen vikaantumisen mallissa D vikaantuminen on alussa vähäistä, mutta kasvaa nopeasti tasolle, jolle se tasaantuu. Mallissa E vikaantuminen on koko eliniän ajan tasaista ja mallissa F esiintyy alussa runsaasti lastentauteja, mutta niiden jälkeen vikaantuminen asettuu vakiotasolle. (20, s. 58.)



KUVA 17. Vikaantumismallit (20, s. 58)

On esitetty, että jopa 80 % syntyvistä vaurioista olisi satunnaisia. Puolet ennustettavista vikaantumisista on sellaisia, että ennakoivien menetelmien käyttö ei ole mielekästä. Ennakoivalla kunnossapidolla voidaan siis löytää vain noin 10 % vioista. Käytännössä tämä tarkoittaa, että kunnossapitoa ei kannata suunnitella ennakoivan kunnossapidon menetelmien mukaisesti. (20, s. 59.)

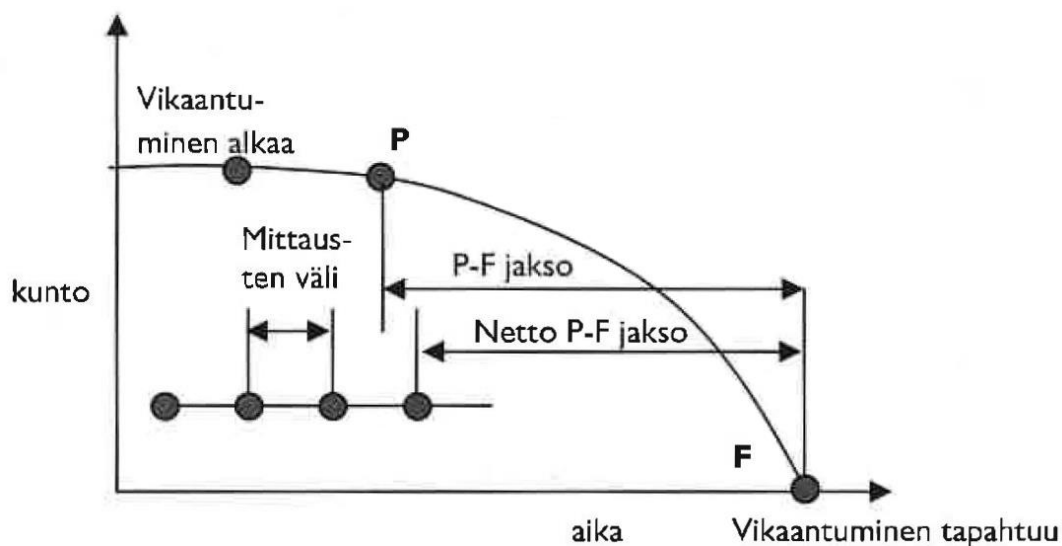
Mitä paremmin laitteen todennäköiset vikaantumismekanismit tunnetaan, sitä paremmin voidaan määrittää käytettävät kunnonvalvontamenetelmät ja valvottavat suureet. Koneen kunnan arviointi on teknisesti mahdollista toteuttaa, kun

- on olemassa raja-arvo, muutos tai muu määriteltävissä oleva piirre, joka viittaa vikaantumiseen
- aikaväli vian toteamisesta vaurioon on riittävän pitkä
- vikaantumismekanismi on sellainen, että vian kehitystä pystytään seuraamaan ja ennustamaan
- mittaukset on mahdollista toteuttaa nopeammalla aikavälillä kuin vika etenee vaurioksi. (21, s. 140.)

4.3.2 Vikaantumisen havaitseminen

Vikaantumisen eri vaiheita voidaan kuvata P-F-käyrän avulla (kuva 18). Käyrältä voidaan havaita missä vikaantuminen alkaa ja milloin se on havaittavissa erilaisilla menetelmillä. P-F-käyrä voidaan muodostaa, mikäli tunnetaan laitteen vikaantumismekanismit ja niiden kehitys. Mikäli laitteen vikaantumismekanismeja ei tunneta, voidaan P-F-käyrän määrittämisen apuna käyttää jatkuvaa kunnon seuranta tai kokeellisia mittausjaksoja. Kokeellinen seuranta on aloitettava riittävän lyhyellä mittausjaksolla, jotta mahdollinen vikaantuminen voidaan tunnistaa riittävän ajoissa. (21, s. 141, 161.)

P-F-käyrään on merkattu piste, jossa vikaantuminen alkaa, eli laitteessa tapahtuu jotain, joka alkaa heikentää sen kuntoa. Piste P (Potential Failure) on kohta, jossa kehittynyt vikaantuminen alkaa oireilla ja se voidaan jollain menetelmällä havaita. Piste F (Failure) on kohta, jossa laite vikaantuu ja menettää toimintakykynsä. Netto P-F -jaksolla tarkoitetaan vian havaitsemisen ja laitteen vikaantumisen välistä aikaa. Tämän ajan tulee olla riittävän pitkä, jotta valvonta on järkevää. (21, s. 141, 161.)



KUVA 18. P-F-käyrä ja siihen liittyviä aikakäsitteitä (21, s. 161)

P-F-jakson pituus vaihtelee eri kunnonvalvontatekniikoilla ja -menetelmillä. Kunnonvalvonnan suunnitteluvaiheessa tehtävillä valinnoilla voidaan pistettä P siirtää lähemmäs ajankohtaa, jolloin vaurioituminen alkaa. Ennustettavissa oleva P-F-

jakson pituus määrittää sen, kuinka usein mittauksia ja tarkastuksia tulee tehdä. Oikein toteutettu kunnonvalvonta antaa riittävästi aikaa huollon tai korjauksen suunnitteluun ensimmäisen havainnon ja varsinaisen vikaantumisen välillä. (21, s. 141.)

4.4 Generaattorin kunnonvalvonta ja asiantuntijapalvelut

Generaattorin oikeanlainen käyttö vaatii tuntemusta koneen rakenteesta, toimintaolosuhteista ja käynninaikaisten mittaustulosten arvioinnista. Käyttötietojen ja mittaustulosten, jotka voivat usein olla vaillinaisia, käsittely ja päätösten teko paineen alla voi olla haastavaa. Kunnossapitotoimintojen suunnittelu ja aikataulutaminen vaativat tuntemusta koneen komponenttien ikääntymismekanismeista ja niihin vaikuttavista tekijöistä. Lisäksi tarvitaan käynnin- ja seisokinaikaisia kunnonvalvonnan mittaustuloksia ja niiden analysointia generaattorin kunnan arvioimiseksi. (24, s. 36.)

Vaikka osa kunnonvalvonnan mittaustiedoista on helposti saatavilla, tarvitaan useisiin mittauksiin erikoismittalaitteita ja -osaamista. Kunnonvalvonnan tulokset saadaan parhaiten hyödynnettyä käyttämällä asiantuntijapalveluita niiden käsittelyssä. Asiantuntijoilla on käytössä kattava kokemus ja tietokanta, joiden avulla tulokset voidaan analysoida ja raportoida niin, että käyttö- ja kunnossapitohenkilöstö saavat tiedon kehittyvistä vikaantumisista. Diagnoosien perusteella voidaan suositella sopivia käyttö- tai kunnossapitotoimenpiteitä. (24, s. 36–37.)

Asiantuntijapalveluiden tärkeimmät tehtävät ovat

- käyttötietojen hankkiminen ja muutosten analysointi
- kehityksen seuranta
- tulosten vertaaminen referenssitietoihin ja normaaleihin olosuhteisiin
- mittaustulosten vertailu keskenään
- toimintahäiriöiden ja alkavan vikaantumisen tunnistaminen
- käyttö- ja kunnossapitotoimenpiteiden suositukset
- tietokannan täydentäminen ja päivittäminen (24, s. 37).

4.5 Generaattorin eliniän hallinta

Generaattorilaitoksen elinkaari on tyypillisesti noin 40–50 vuotta, joka voidaan jaotella kolmeen eri vaiheeseen. Ensimmäinen vaihe on generaattorilaitoksen hankinta- ja projektivaihe, joka pitää sisällään

- laitoksen suunnitteluperusteet
- spesifikaatiot
- tarjouskyselyt
- tehdasvalvonnan
- asennusvalvonnan
- käyttöönoton
- takuvaiheen
- ensimmäisen avaavan revision. (25.)

Hankintavaihetta seuraa generaattorilaitoksen käyttövaihe, joka kestää tyypillisesti 25–30 vuotta. Käyttövaihe muodostuu tarkastuksista, huolloista ja modernisoinneista seuraavasti:

- revisiot
 - 6–8 vuoden välein revisio, jossa roottori vedetään ulos
 - 2–3 vuoden välein pienempi revisio
- 2–3 tehdashuoltoa
- turbiini- ja generaattoriautomaation uusinta 1–2 kertaa
- laitoksen kattava kunnonvalvonta
- määräaikaistarkastukset, joilla varmistetaan käytettävyys ja käyttövarmuus. (25.)

Kolmantena vaiheena on 10–15 vuotta kestävä ylläpitovaihe, jolloin seurataan generaattorilaitoksen kuntoa pienemmillä revisioilla, kunnonvalvonnalla ja määräaikaistarkastuksilla (25).

Kokonaisuudessaan generaattorin käyttöikä on usein hyvin hankala koordinoita, vaikka käyttöolosuhteet olisivat normaalit. Useat asiat ja niiden yhteistekijät vaikuttavat koneen komponenttien kulumiseen. Tyypillisesti generaattorin elin-

ajanodote on pidempi, kun kuormitus on tasaista. Koneen ikääntymiseen vaikuttaa huomattavasti, mikäli se altistuu usein vaihtelevalle kuormitukselle tai jatkuville käynnistyksille ja pysäytyksille. (19, s. 23.)

Roottorin komponenttien elinajanodote riippuu suuresti generaattorin käynnistys- ja pysäytystaajuudesta. Toistuva keskipakovoiman muutos pysähdyksistä roottorin käyntinopeuteen rasittaa metalleja ja eristeitä, mikä voi aiheuttaa säröjä ja halkeamia rakenteissa. (19, s. 23.)

Staattorikäänin elinajanodote määräytyy useiden tekijöiden ja niiden yhteisvaikutusten perusteella. Vanhoilla eristysmateriaaleilla hallitseva vikaantumismekanismi on eristeen terminen vanheneminen. Terminen vanheneminen voi seurata normaalista pitkäkestoisesta käyttölämpötilasta, mikä heikentää eristeen kylläytysaineen sidoskykyä. Nykyaikaisten eristemateriaalien vanhenemiseen vaikuttaa käänin eri materiaalien lämpölaajeneminen suhteessa toisiinsa, magneettiset voimat, keskipakovoima ja normaalia korkeampi käyttölämpötila. Uudet generaattorit ovat tyypillisesti tehokkaampia kuin aikaisemmat vastaavat koneet, joten niiden johtimiin kohdistuu huomattavasti suurempia voimia ja kuormituksia. Kasvaneet voimat vaativat myös parempia suojajärjestelmiä. Yksittäisen komponentin jatkuva liike suhteessa muihin osiin voi johtaa hankautumiseen, eristyksen kulumiseen ja mahdolliseen generaattorin vikaantumiseen, mikäli ongelmaa ei havaita ja korjata. (19, s. 23.)

5 GENERAATTORIN KÄYNNINAIKAINEN KUNNONVALVONTA

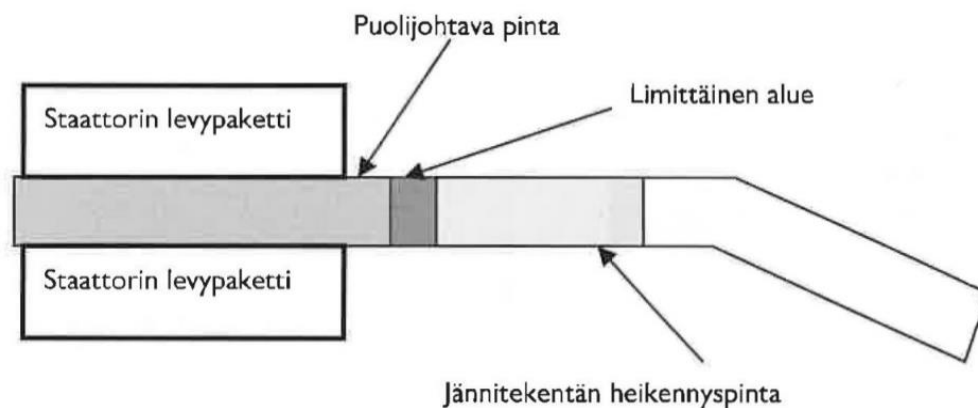
Generaattorin käyttö tulisi pitää sille suunnitelluissa raja-arvoissa optimaalisen suorituskyvyn, kunnossapidettävyyden ja kestävyuden vuoksi. Käyttöä valvotaan erilaisilla antureilla ja mittavälineillä. Generaattorin käynninaikaisilla mittauksilla voidaan tulkita generaattorin kuntoa ja varmistetaan generaattorin toiminta sallituilla käyttöparametreilla. Käynninaikaista kuntoa valvotaan mm. jännite-, virta-, lämpötila ja värähtelymittauksilla. Generaattorin anturoinnin määrä voi vaihdella generaattorin koon ja käyttötarkoituksen mukaan. Kiinteiden mittausten lisäksi generaattorille voidaan suorittaa tiettyjä kunnonvalvontamittauksia siirrettävillä mittalaitteilla generaattorin ollessa verkossa. (10, s. 179–180.)

Kunnonvalvonta auttaa havaitsemaan poikkeamat generaattorin kunnossa, jolloin vikaantumiset voidaan todennäköisemmin välttää. Mitä laajempi generaattorin käynninaikainen kunnonvalvontajärjestelmä on, sitä yksityiskohtaisempi kuva generaattorin kunnosta saadaan. Yksityiskohtaisempi tieto generaattorin kunnosta antaa joustavuutta sen käyttöön. Kunnonvalvonnan avulla voidaan myös pidentää generaattorin käyttöikää ohjaamalla käyttöä niin, että havaitun vikaantumisen eteneminen hidastuu. (10, s. 179–180.)

5.1 Osittaispurkausmittaus

Staattorikäämitysten eristyksillä on useita vanhenemis- ja vikaantumismekanismeja, joiden tunnistaminen on tärkeää tarvittavien huolto- ja korjaustoimenpiteiden määrittämiseksi. Suurjännite-eristyksen vikaantumismekanismit aiheuttavat eristeessä lisääntyviä osittaispurkauksia, joiden kehitystä seuraamalla voidaan arvioida staattorikäämityksen käytännön elinikää. Osittaispurkaukset ovat pieniä sähköisiä purkauksia, joita syntyy eristyksen vioissa. Eristyksen vanhetessa sen sisäiset osittaispurkaukset lisääntyvät. Osittaispurkausten suuruutta mitataan pikocoulombeina (pC), joka kertoo purkausvarauksen suuruuden. Mittausjärjestelmien valmistajien käyttämissä menetelmissä varauksen suuruutta mitataan usein millivolteina, jolloin varauksen suuruus pC :na vastaa tiettyä voimakkuutta millivolteina. (21, s. 377–378, 412.)

Suurjännitekäämityksen eristysrakenteessa on otettava huomioon suurjännitesähkökentän aiheuttamat vaatimukset. Eristeen rakenne on kuvan 19 mukainen. Levypaketin ura-alueella käämisauvan pinnalla on puolijohtava pinnoite, joka ehkäisee käämin pinnan ja uraseinämien välisiä osittaispurkauksia. Uran suun alueella oleva jännitekentän heikennyspinta ehkäisee käämin pinnan ja staattorin levypaketin välisiä osittaispurkauksia. Uran suulla on alue, jossa puolijohtava pinnoite ja jännitekentän heikennyspinta limittävät toisensa. (21, s. 377–378.)



KUVA 19. Suurjännitekäämin pinnoitteet (21, s. 378)

Pitkäaikainen ylikuormitus tai jäähdytyksen huono toiminta voi johtaa staattorin käämieristeen termiseen vaurioitumiseen. Termisen vanhenemisen seurauksena eristeen sisäiset osittaispurkaukset alkavat kasvaa ja käämityksen pääeristeen läpi pääsee syntymään vuotovirtoja, jotka voivat lopulta johtaa käämin maasulkuvikaan. Terminen vanheneminen on tyypillisempää vanhemmilla eristysmateriaaleilla. Nykyaikaisissa eristyksissä terminen vanheneminen on harvinaista, sillä niissä käytetty hartsi kestää paremmin ylikuumenemista. (21, s. 378.)

Staattorikäämin valmistuksessa kyllästysprosessin epäonnistumisen seurauksena eristysprosessin sisälle voi jäädä pieniä onteloita ja säröjä, jotka johtavat eristeen sisällä syntyvien osittaispurkausten kasvuun. Kyllästysprosessissa voi eristysmateriaalia päästä myös puolijohtavan pinnan ja käämiuran laidoille estäen puolijohtavan pinnoitteen oikeanlaisen toiminnan, mikä voi johtaa osittaispurkausten syntymiseen käämieristysprosessin pinnalla. (21, s. 378.)

Kiilauksen löystymisen seurauksena staattorikäänitys pääsee liikkumaan ja eristyksen puolijohtava pinta voi hankautua uraseinämää vasten. Pinnoitteen rikkoutuminen aiheuttaa käämin pinnan ja uran välille urapurkauksia, jotka heikentävät pinnoitetta edelleen. Löystynyt käänitys voi hankautua myös käämikiilausta vasten, jolloin pintapurkausten määrä kasvaa. Mikäli kääminpinnalla syntyvät purkaukset kasvavat voimakkaiksi, saattavat ne aiheuttaa otsonipitoisuuden kasvua koneen ympäristössä. (21, s. 378–379.)

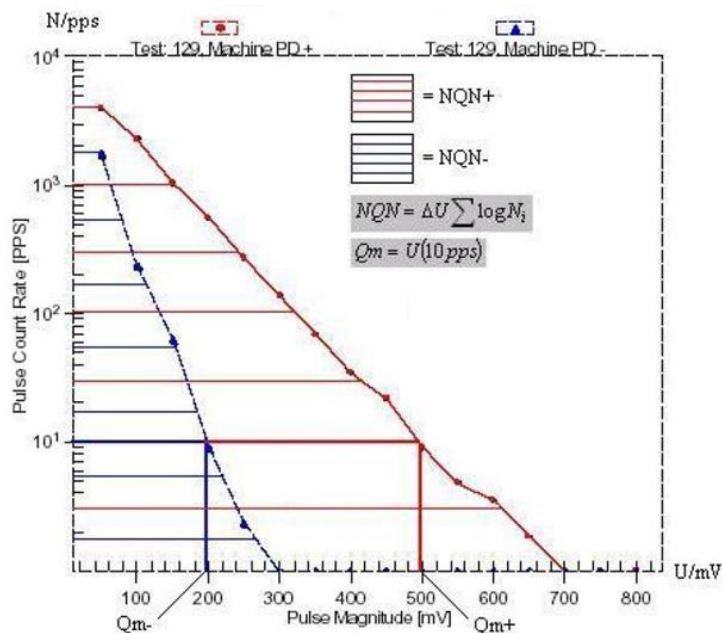
Sähköisten rasitusten seurauksena johtavan ja puolijohtavan pinnan liitoskohta voi heiketä aiheuttaen osittaispurkauksia käämieristyksen pinnalle. Uransuuluun purkaukset synnyttävät usein käämin pinnalle valkeaa jauhetta, mikä voidaan havaita visuaalisessa tarkastuksessa. Kääminpääalueella hiilipöly, lika ja mahdolliset öljyvuodot voivat aiheuttaa käämieristyksen pinnalla tapahtuvien vaiheiden välisten osittaispurkausten lisääntymistä. Ajan kuluessa vikaantumiset rupeavat aiheuttamaan vuotovirtoja, jotka johtavat pahimmillaan oikosulkuun. (21, s. 379.)

Osittaispurkausmittauksella voidaan havaita monet staattorikäänin vikaantumismekanismit, jotka määrittävät suurjännite-eristeen teknisen eliniän. Osittaispurkausten trendin seurannalla voidaan mahdollinen vikaantuminen ennakoida hyvissä ajoin ja suunnitella sen vaatimat toimenpiteet. (21, s. 379.)

Osittaispurkausmittauksia tehdään yleensä jaksotetusti kerran vuodessa. Mittaus suoritetaan tietokoneeseen liitettävällä analysaattorilla joko kiinteästi asennettujen tai siirrettävien antureiden avulla. Anturina käytetään tyypillisesti 80 *pF* kapasitiivista anturia. Lisäksi on olemassa käämiuraan staattorin käämikiilauksen alle asennettava SSC-anturi (Stator Slot Couplers). (26, s. 1.) Koneeseen kiinteästi asennetuilla antureilla voidaan osittaispurkausmittaus suorittaa milloin tahansa koneen käydessä normaalisti. Siirrettävillä antureilla tehtävässä mittauksessa generaattori on pysäytettävä ja anturit asennetaan väliaikaisesti generaattorin syötökiskoihin. Tämän jälkeen generaattori käynnistetään ja ajetaan normaaliin kuormitustilaan, jonka aikana mittaus suoritetaan. Mittauksen jälkeen generaattori on jälleen pysäytettävä antureiden purkamista varten. (21, s. 411.)

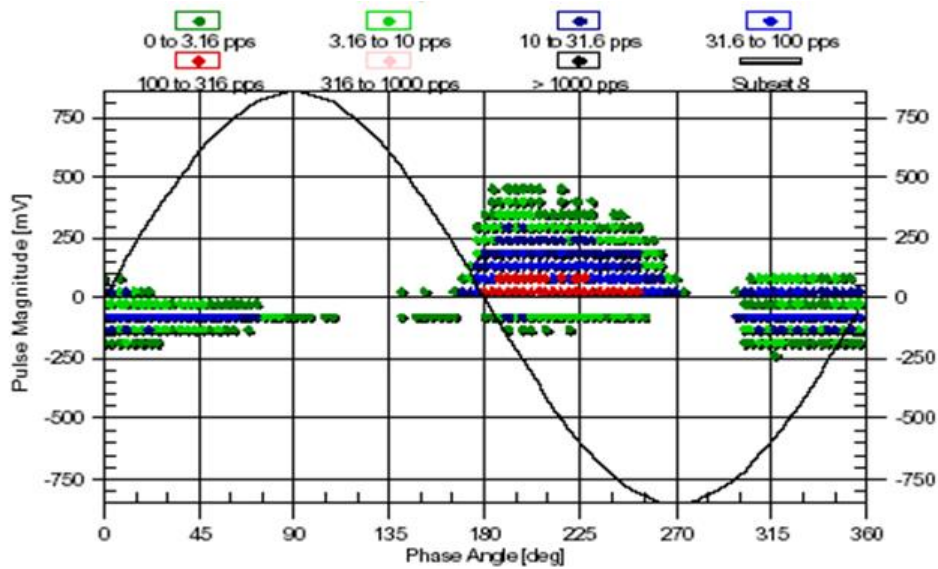
Mikäli generaattori on kytketty kytkinlaitokseen kiskoilla tai lyhyellä, alle 20 metrin pituisella kaapelilla, on jokaiseen vaiheeseen asennettava kaksi mittausanturia verkosta päin tulevien häiriöiden eliminoimiseksi. Esimerkiksi katkaisijoissa, kaapelipääteissä, eristimissä ja jakelumuuntamissa voi syntyä jännitesäröjä, koronahäiriöitä ja osittaispurkauksia. Kahden anturin järjestelmässä mittauslaitteisto pystyy erottelamaan havaitsemansa pulssit saapumisaikojen eron perusteella. Sama pulssi havaitaan molemmilla antureilla, mutta eri aikaan. Mikäli generaattorin ja kytkin laitoksen välissä on riittävän pitkä kaapeli, ulkoa päin tulevat häiriöt vaimenevat riittävästi, jolloin yksi anturi vaiheessa riittää. (27, s. 59.)

Mittaustulosten analysointi on tärkeä osa osittaispurkausmittausta. Yleisimmät tavat tulikita osittaispurkausaktiivisuutta ovat pulssin korkeus- ja vaiheanalyysit. Pulssin korkeusanalyysissä positiiviset ja negatiiviset osittaispurkauspulssit tulkitaan huomioiden niiden suuruus ja lukumäärä. Korkeusanalyysiä varten mittausohjelmisto laskee automaattisesti Q_m - ja NQN -arvot molemmille vaihekulmille. Q_m -arvo (peak magnitude) on pulssin voimakkuuden arvo sillä kohtaa käyrää, jossa pulssien esiintymistiheys on 10 pulssia/sekunti (kuva 20). Q_m -arvon perusteella voidaan arvioida osittaispurkauspulssien haitallisuutta. NQN -arvo (normalized quantity number) vastaa osittaispurkauksista syntyvää häviöenergiaa, jonka perusteella voidaan arvioida koko käämityksen yleiskuntoa. (21, s. 412–413.)



KUVA 20. Osittaispurkauspulssin Q_m -arvojen määrittäminen (28)

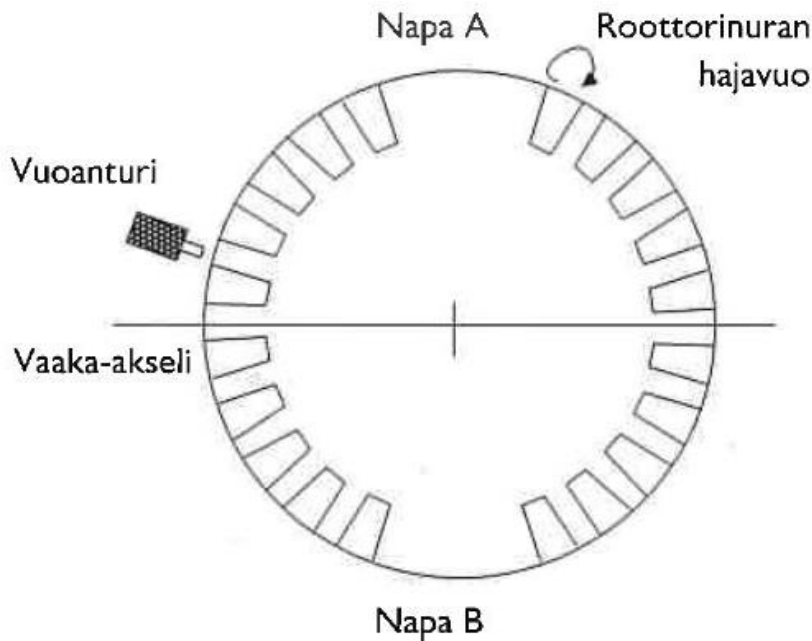
Vaiheanalyysi (kuva 21) sisältää lisäkeinoja sähköisen kohinan erottamiseksi staattorikäänin osittaispurkauksista ja antaa lisämahdollisuuksia tutkia eristyksen todellista heikkenemisprosessia. Vaiheanalyysissä mitataan osittaispurkauksen lukumäärä, suuruus sekä pulssien sijainti suhteessa syöttötaajuuden vaihekulmaan. (21, s. 412.) Vaihtojännitteellä osittaispurkaukset esiintyvät yleensä 0–90 tai 180–270 asteen välillä. Vaiheanalyysin avulla voidaan päätellä osittaispurkauksen sijainti käämissä, sillä erilaiset purkauslähteet synnyttävät eri vaihesiirtokulmissa esiintyviä purkauksia. (28.)



KUVA 21. Vaiheanalyysi (28)

5.2 Ilmavälivuomittaus

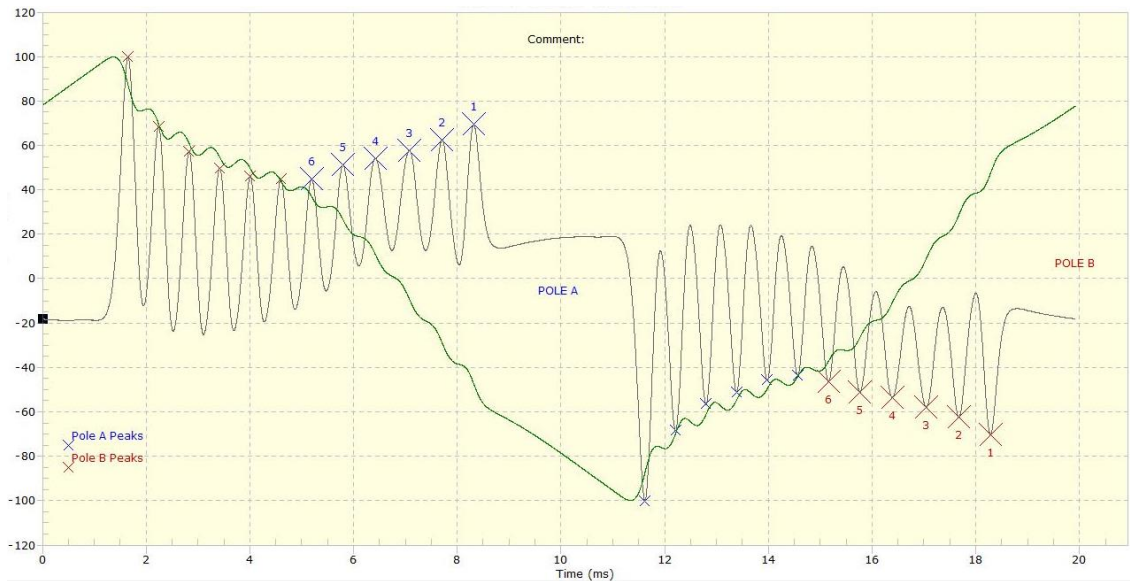
Generaattorin ilmavälivuota mitataan staattorin ja roottorin ilmaväliin asennetulla ilmavälivuoanturilla (kuva 22). Anturi on mittakela, johon roottorin navat indusoivat pyöriessään jännitteen. Indusoitava jännite mitataan erikoisanalyysaattorilla tai nopealla tallentavalla oskilloskoopilla. Aikatason signaalianalyysillä voidaan selvittää, esiintyykö roottorikäänityksessä kierrossulkuja. (21, s. 415.)



KUVA 22. Ilmavälivooanturin sijainti (21, s. 416)

Anturi asennetaan staattorin käämikiilan tai levypaketin pinnalle, josta se mittaa ilmavälin kautta roottorin käämisauvojen aiheuttamaan magneettivuota. Roottorin käämisauvoissa on yleensä erilainen kierrosluku, jotta saadaan muodostettua mahdollisimman sinimuotoinen jännite. Roottorin käämisauvat indusoivat anturin ohittaessaan vuoanturiin jännitteen, jonka suuruus on verrannollinen käämisauvan virran aiheuttamaan magneettivuohon, roottorin kehänopeuteen ja roottorin käämisauvan pinnan etäisyyteen anturista. Roottorin pyörimisnopeuden ja käämisauvan etäisyyden anturista ollessa vakioita, on ainoa muuttuva suure käämisauvan virran aiheuttama magneettivuoto. (21, s. 415.)

Mittaustuloksessa roottorin positiivisen ja negatiivisen navan jokaisen käämisauvan aiheuttamat magneettivuot näkyvät erillisinä jännitepiikkeinä (kuva 23). Mikäli käämisauvaan syntyy kahden käämikierroksen välinen kierrossulku, pienenee sen kierrosluku yhdellä ja samalla pienenee käämisauvan aiheuttama magneettivuoto. Kierrossulku ilmenee käämisauvan indusoiman jännitepiikin pienemisenä. Mittauksessa verrataan roottorin vastakkaisten napojen käämien aiheuttamaa magneettivuotoa toisiinsa. Roottorin rakenne huomioiden ehjässä käämityksessä ei ole tyypillisesti yli 3 %:n eroa napojen välillä. (22, s. 416.)



KUVA 23. Roottorin napojen ilmavälivuon mittaustulos (28)

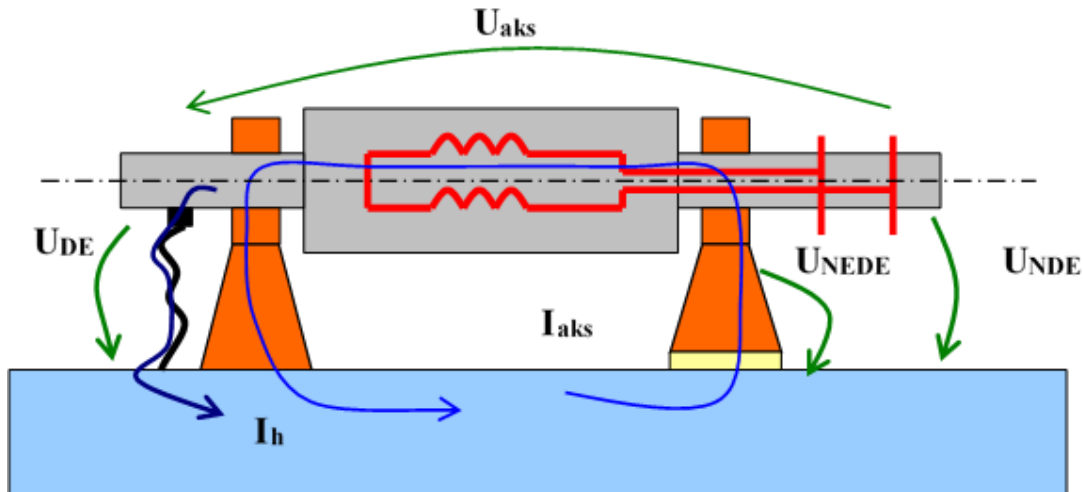
Merkittävimpiä syitä roottorikäänin kierrossulkuihin on käämityksen likaantuminen sekä keskipakovoiman ja lämpölaajenemisen aiheuttamat rasitukset. Useat tekijät vaikuttavat kierrossulusta aiheutuviin ongelmiin, mutta pahimmillaan ne kasvattavat roottorin värähtelyä huomattavasti. Kierrossulku pienentää käämisauvan resistanssia, jolloin sauva lämpenee ehjää sauvaa vähemmän. Lämpötilaerot johtavat roottorirungon epätasaiseen lämpenemiseen, mikä puolestaan voi johtaa roottorin taipumiseen. (29, s. 1–2.)

5.3 Akselijännitteen mittaus

Generaattorin käydessä voi roottorin akselin päiden välille syntyä jännite. Jännitteen indusoituminen akseliin voi johtua useista syistä, kuten vaihekäämien keskinäisestä epäsymmetriasta, roottorin epäkeskisyydestä tai roottorikäänin kierrossulusta, staattorin levypaketin epäsymmetrisyydestä tai turbiinin siipiin osuvista varauksellisista pisaroista. Myös generaattorin roottoripiiriä syöttävän magnetointilaitteiston tehoelektroniikkavika voi synnyttää akselijännitettä. (10, s. 219.)

Akselijännitettä ja -virran kulkua rajoitetaan akselimaadoituksella, joka sijaitsee yleensä generaattorin ja turbiinin välissä. Lisäksi magnetointipään laakeripukki on eristetty, jolloin akselijärjestelmässä kulkee hyvin pieni kapasitiivinen akselivirta. Jos esimerkiksi laakeripukin eristys on huono, alkaa akselivirta kasvaa laa-

kerin voitelukalvossa, mikä voi johtaa laakerin vaurioitumiseen. Kun akselin maadoitus toimii oikein, on turbiinipään akselijännite U_{DE} nolla ja akselijännite U_{AKS} sama kuin magnetointipään jännite U_{NDE} eli muutamia voltteja (kuva 24). Laakeripukin yli vaikuttava jännite on tyypillisesti yli 90 % magnetointipään akselijännitteestä. Maadoitushiilen läpi kulkevan virran I_H tulisi olla alle 100 mA. (30, s. 1.)



KUVA 24. Generaattorin akselijännitteiden periaatekuva (30, s. 1)

Akselimaadoituksen kuntoa tulee seurata visuaalisesti viikoittain sekä säännöllisillä kunnonvalvontamittauksilla. Maadoituksen toimivuus voidaan todeta mittaamalla maadoitushiilen läpi kulkeva virta ja jännite. Tahtikoneilla erilaiset vikataipaukset aiheuttavat akselijännitteeseen tiettyjen taajuuskomponenttien kasvua suhteessa muihin taajuuksiin. Seuraamalla vikakomponenttien trendiä voidaan tunnistaa mahdollisesti kehittymään lähtevä vikatyyppe. (21, s. 408.)

5.4 Kääminpäävärähtelyn mittaus

Kääminpääalueen tehtävä on mahdollistaa turvallisten käämiliitosten teko käämisauvojen välillä. Liitokset tehdään kaukana staattorirungosta eristysvikojen ehkäisemiseksi. Suurjännitegeneraattoreilla liitosten ja rungon riittävä pintavälimatka voi olla hyvinkin pitkä. Pitkälle ulottuvat kääminpäät ovat alttiita värähtelyyn johtaville liikkeille. (31, s. 2.)

Kääminpäävärähtelyä aiheuttavia herätteitä ovat käämisauvojen sähkömagneettiset voimat ja koneen pyörimisnopeudesta johtuvat voimat. Sähkömagneettinen

voima on verrannollinen staattorin virran neliöön ja sen taajuus on kaksinkertainen verkon taajuuteen nähden, eli 100 Hz 50 Hz:n järjestelmässä. Pyörimisnopeudesta johtuvat voimat esiintyvät kaksinapaisilla roottoreilla verkon taajuudella ja nelinapaisilla roottoreilla verkon taajuuden puolikkaalla. Esiintyviä voimia voidaan mitata radiaalisessa, aksiaalisessa ja tangenciaalisessa suunnassa. Radiaalista liikettä aiheuttaa samansuuntaiset virrat käämiuran ylemmässä ja alemmassa käämisauvassa ja tangenciaalista liikettä aiheuttaa saman suuntaiset virrat vierekkäisissä käämisauvoissa. Aksiaalinen liike on yleensä mitätöntä. Lisäksi kääminpäihin vaikuttaa lämpölaajenemisesta aiheutuva rasitus. (31, s. 2.)

Kääminpäiden värähtely voi löystyttää tukirakenteita, jolloin käämit pääsevät liikkumaan. Värähtely voi johtaa käämieristyksen heikkenemiseen, maasulkuun sekä käämin osajohtimien tai käämiliitosten murtumiseen. (32, s. 1.)

Kääminpääalueen kuntoa voidaan tarkastella visuaalisesti ja ominaistajuusmittauksella, jotka molemmat vaativat generaattorin päätyjen purkamista. Ominaisajuusmittauksella pyritään löytämään käämityksen luonnollinen värähtelytaajuus ja tunnistamaan löysät komponentit kääminpääalueelta. Mittaus voidaan suorittaa kaksi kanavaisella analysaattorilla. Analysaattorin toiseen kanavaan kytketään herätteen antava impulssivasara ja toiseen kanavaan värähtelyvastetta mittaava kiihtyvyyssanturi. Molemmat tarkastukset suoritetaan määrääjain koneen ollessa pysähdyksissä, eikä niillä saada käynninaikaista tietoa kääminpääalueen rakenteiden heikkenemisestä. (31, s. 2.)

Suuren jännitteen vuoksi kääminpääalueella ei voida käyttää tavanomaisia värähtelymittausmenetelmiä ja -antureita. Metalliset materiaalit voisivat lämmetä suuren virran aiheuttamassa magneettikentässä. Lisäksi metalliset komponentit pienentäisivät kääminpäiden etäisyyttä maadoitettuihin osiin, mikä voisi synnyttää alueelle osittaispurkauksia. Kääminpäiden värähtelyantureina käytetään kuituoptiikkaan perustuvia antureita, jotka eivät sisällä metallia. (31, s. 3.)

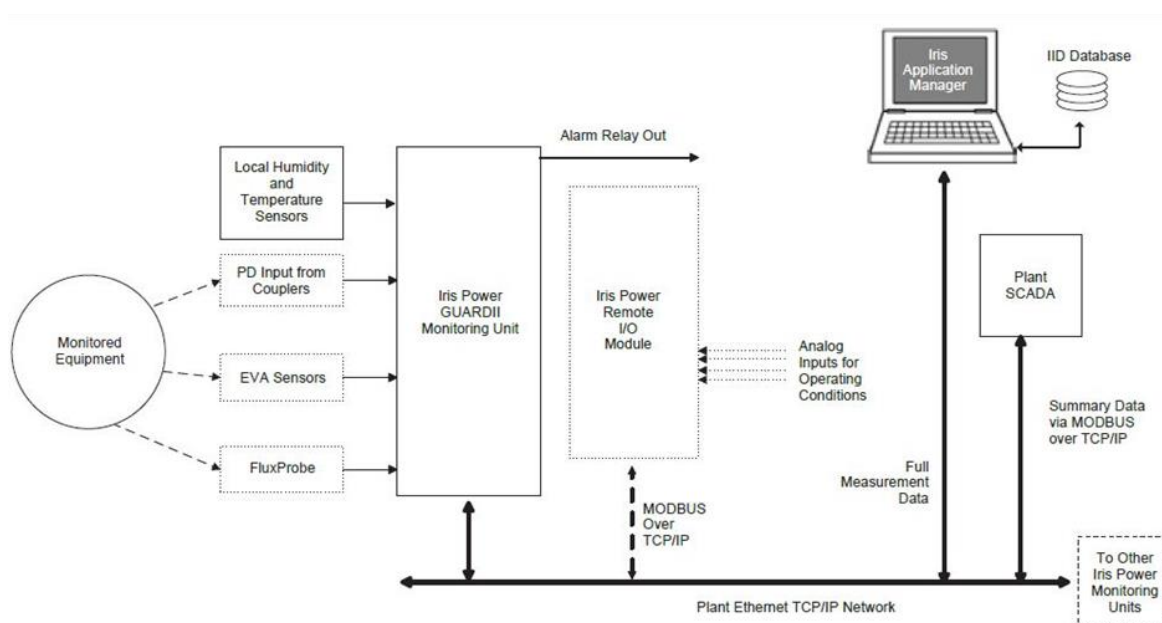
Kuituoptiikan kehittyminen ja lisääntynyt tieto kääminpääalueiden värähtelykäytöstä eri käyttöolosuhteissa ovat mahdollistaneet käynninaikaisen mittauksen hyödyntämisen. Värähtelyiden trendiseurannalla saadaan lisää tietoa

generaattorin käyttäytymisestä ja toimintakunnosta. Kääminpäiden värähtelymitauksella voidaan ajoissa havaita alkava vikaantuminen, jolloin on mahdollista välttää generaattorin vikaantuminen. Värähtelytulosten perusteella korjaustoimenpiteet ja -aikataulut voidaan suunnitella ennen revision aloittamista. (33, s. 6.)

Paras tulos saavutetaan asentamalla jokaiseen kääminpäähän oma värähtelyanturi. Antureiden hankintahinta on kuitenkin suhteellisen korkea, minkä vuoksi yleensä asennetaan suppeampi järjestelmä. Pienemmässä järjestelmässä anturit asennetaan kääminpäihin, jotka ovat ominaistajuusmittauksen perusteella herkimpiä värähtelemään. Mikäli kääminpäille ei ole tehty ominaistajuusmittausta, voidaan anturit asentaa tasaisesti ympäri kääminpääaluetta. (33, s. 6.)

6 JATKUVATOIMINEN KUNNONVALVONTAJÄRJESTELMÄ

Jatkuvatoimisella kunnonvalvontajärjestelmällä pystytään toteuttamaan generaattorin staattorikäänin osittaispurkausmittaus, ilmavälivuon mittaus, kääninpäiden värähtelymittaus sekä akselijännitteen ja -virran mittaus (kuva 25). Mittausjärjestelmän laajuus on räätälöitävissä tarpeiden mukaan. Se voidaan ottaa käyttöön joko kokonaisuudessaan tai siitä voidaan hyödyntää vain osa mittauksista. (34, s. 2.) Generaattorin jatkuvatoiminen kunnonvalvonta on mahdollista toteuttaa Iris Power Guard II -järjestelmällä.



KUVA 25. Guard II -järjestelmän rakenne (34, s. 2)

Guard II -järjestelmä voidaan liittää jo olemassa oleviin osittaispurkaus-, ilmavälivuo- ja kääninpäivärähtelyantureihin, jotka on asennettu jaksollista kunnonvalvontaa varten (34, s. 2). Mikäli generaattoriin ei ole vielä asennettu kunnonvalvonta-antureita, suoritetaan niiden asennus koneen ollessa pysähdyksissä tai revision yhteydessä. Generaattorin käyntitiedot, kuten teho, loisteho ja lämpötila otetaan jo olemassa olevasta voimalaitoksen järjestelmästä. Lisäksi järjestelmään on mahdollista liittää erillinen generaattorin ympäristön lämpötilan ja kosteuden mittaus. (26, s. 3.)

Valvontayksikkö liitetään voimalaitoksen tietojärjestelmään, jolloin mittaustulokset saadaan valvomoon. Mittaustuloksille asetetaan hälytysrajat, jotka määritellään tilastoitujen mittausten perusteella. Hälytysten perusteella voidaan alkavat vikaantumiset havaita ennen kuin vaurioituminen ehtii tapahtua. (34, s. 2.)

Järjestelmää hallitaan Windows-pohjaisen Iris Application Manager -ohjelman avulla. Ohjelman avulla voidaan suorittaa järjestelmän konfigurointi ja seurata sekä ladata mittaustuloksia tietokannasta. Mittaustuloksia voidaan ladata joko paikallisesti USB-portista tai etänä internetyhteyden kautta. Internetyhteyden avulla myös asiantuntijat voivat tarkastella mittaustuloksia ja hallita järjestelmää etänä. (34, s. 2.)

6.1 Järjestelmän hyödyt

Generaattoreiden entistä tiheämpi vikaantumistaajuus ja yhä sykliempi ajotapa voivat aiheuttaa haasteita generaattoreiden kunnossapidossa. Jatkuvatoimisella seurannalla saadaan reaaliaikaisesti tietoa koneen toimintakunnosta. Generaattorin kriittisten osien jatkuvatoimisen kunnonvalvonnan avulla kunnossapito voi painottua ennakoivan kunnossapidon sijaan enemmän kuntoon perustuviin toimenpiteisiin.

Järjestelmä mahdollistaa mittauksien tekemisen etänä, jolloin mittaushenkilön ei tarvitse varta vasten matkustaa laitokselle suorittamaan mittauksia. Generaattoreilla, joihin järjestelmä on asennettu, asiantuntijat pääsevät välittömästi käsiksi kaikkiin koneen käyntitietoihin, kuten lämpötilaan, värähtelyihin, virtaan ja jännitteeseen, mikäli on syytä epäillä häiriöitä koneen toiminnassa. Käyttö- ja kunnossapitohenkilöt saavat myös välittömästi tiedon kehittyvistä ongelmista ja osaavat varautua niihin. (26, s. 2.)

Staattorikäämin osittaispurkausaktiivisuus riippuu suuresti määrin generaattorin käyttöolosuhteista. Osittaispurkausten suuruuteen voi vaikuttaa muun muassa käämityksen lämpötila, kuormitus, jännite, ympäristön kosteus sekä vetyjäähdytetyillä koneilla vedyn paine. Jos esimerkiksi staattorikäämin kiilaus on löysä ja käämisauvat pääsevät värähtelemään urissaan, kuormituksen kasvu voi lisätä

osittaispurkausaktiivisuutta huomattavasti. Jaksotetusti toteutetussa kunnonvalvonnassa käyttöolosuhteiden tulisi olla aina samanlaiset mittaustulosten vertailun ja trendiseurannan vuoksi. Käyttöoperaattoreiden voi olla hankala saavuttaa yhtäläiset käyttöolosuhteet mittauksesta toiseen generaattorilla, joka on altis sykliselle käytölle. Jatkuvatoimisella kunnonvalvonnalla koneen käyttöolosuhteilla ei ole mittausten kannalta merkitystä. Järjestelmä seuraa jatkuvasti käyttöparametreja ja suorittaa mittauksia generaattorin käydessä normaalisti. (26, s. 2.)

Liitteen 2 kuvaajassa on esitetty erään generaattorin vaiheiden U/L1, V/L2 ja W/L3 osittaispurkausaktiivisuuden keskiarvo verrattuna sen hetkiseen tehoon. Liitteessä 3 on esitetty vaiheen V/L2 osittaispurkausaktiivisuus suhteessa ympäristön ja generaattorin jäähdytysilman kosteuteen. Kuvaajista voidaan hyvin havaita tehon ja kosteuden vaikutus staattorikäämin osittaispurkaustasoihin.

Purkausaktiivisuus reagoi tyypillisesti viiveellä käyttöparametrien muutoksiin. Esimerkiksi liitteen 2 kuvaajassa aikavälillä 28.3–2.4 generaattorin teho vaihtelee hyvin syklisesti ja purkausaktiivisuus alkaa kasvaa. Tehon vaihdellessa nopealla tahdilla purkaukset eivät kuitenkaan ehdi hiipua ennen seuraavaa tehopiikkiä, jolloin purkausaktiivisuus jatkaa tasaista kasvua.

Toisinaan jaksotetulla osittaispurkausmittauksella havaitaan merkkejä, jotka voivat johtaa suurella todennäköisyydellä vikaantumiseen, mutta korjauksia tai uudelleen käämintä ei voida suorittaa välittömästi. Jatkuvatoimisella kunnonvalvonnalla vikaantumismekanismejä ja niiden kehitystä voidaan seurata tarkasti ja sopivilla käyttöparametreilla konetta voidaan mahdollisesti käyttää kunnossapitotoimenpiteisiin asti. (26, s. 2.)

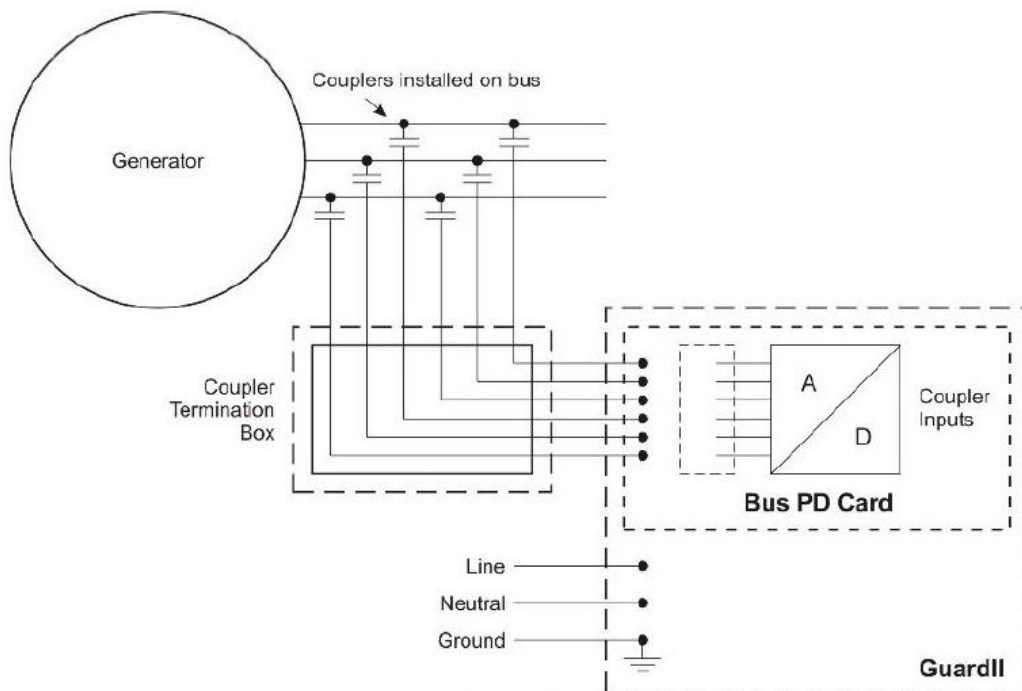
Kuvan 2 sekä liitteiden 1 ja 2 kuvaajien perusteella lauhde- ja yhteistuotantovoimallaitoksissa sähköntuotanto on hyvin vaihtelevaa. Tehon ja käyttöolosuhteiden vaihtelut altistavat generaattoreita tavallista suuremmalle rasitukselle. Tuotantokapasiteetin muuttuessa ja säätövoiman osuuden pienentyessä sähköntuotanto tulee todennäköisesti muuttumaan säätövoimallaitoksissa yhä syklisemmäksi, jolloin kunnonvalvonnan merkitys korostuu entisestään.

6.2 Järjestelmän rakenne

Jatkuvatoimisen kunnonvalvontajärjestelmän pohjana toimii Guard II -yksikkö. Yksikköön asennetaan tarpeiden mukaan valittujen mittausmenetelmien lisäosat ja moduulit.

6.2.1 Osittaispurkausmittausantureiden asennus

Jatkuvatoimista osittaispurkausmittausta varten Guard II -alustaan asennetaan PD-mittauskortti sekä generaattoriin osittaispurkausmittausanturit. Anturit voivat olla joko käämiuraan asennettavat SSC-anturit tai generaattorin virtakiskoihin asennettavat 80 pF EMC-anturit (Epoxy Mica Capacitor) (kuva 26). (35, s. 1.)



KUVA 26. Osittaispurkausmittausjärjestelmän asennus EMC-antureilla (35, s. 2)

Generaattorilla EMC-antureita asennetaan yleensä kaksi jokaiseen vaiheeseen. Toiset anturit asennetaan mahdollisimman lähelle staattorin kiskoliitoksia (kuva 27) ja toiset anturit vähintään kahden metrin päähän ensimmäisistä antureista. Kahdella anturilla saadaan erotettua verkosta tulevat häiriöt staattorikäimin osittaispurkauksista. Anturit tulisi asentaa niin, että niiden väliin ei jää häiriötä tuottavia lähteitä. (36, s. 9.)



KUVA 27. Generaattorin virtakiskoihin asennetut 80 pF EMC-anturit (28)

Antureilta mittaustieto tuodaan koaksiaalikaapeleilla liitântäkotelolle. Antureilta kotelolle tulevat kaapelit saavat olla maksimissaan 30 m:n pituiset. Liitântäkotelolta mittaustieto viedään edelleen koaksiaalikaapeleilla Guard II -alustaan asennettuun PD-mittauskorttiin. Kytöntäkotelon ja PD-kortin välinen koaksiaalikaapeli saa olla maksimissaan 2 m:n pituinen. (35, s. 16.)

6.2.2 Ilmavälivoanturin asennus

Ilmavälivoanturi asennetaan staattorin sisälle roottorin ollessa ulos vedettynä. Antureita on kahta mallia. Yleisemmin käytetään TF-anturia (kuva 28), joka soveltuu alle 50 mm ilmavälillä oleville generaattoreille. Generaattoreilla joiden ilmaväli on suurempi kuin 50 mm käytetään FF-anturia (kuva 29). Anturit on varustettu 15 m pitkällä parikaapelilla. Ilmajäähdytteisillä generaattoreilla anturi kytketään suoraan mittauskoteloon. Vetyjäähdytteisillä generaattoreilla asennetaan läpivienti, johon anturi kytketään. (37, s. 5–6.)



KUVA 28. Iris Power TF-anturi (38)



KUVA 29. Iris Power FF-anturi (39)

TF-anturi asennetaan staattorin levypaketin hammastuksen pinnalle hartsaamalla (kuva 30). Myös staattorin sisällä kulkeva anturin kaapeli hartsataan koko matkalta generaattorin runkoon kiinni. Anturi suositellaan asennettavaksi levypakettiin vaakatason kohdalle turbiinin puoleiseen päähän, jolloin se on mahdollisimman vähän tiellä roottorin ulosvedon ja asennuksen aikana. Anturi tulisi asentaa vähintään 300 mm päähän roottorin kapasta ja mahdollisista magneettikiiloista alueelle, jossa siihen vaikuttaa ainoastaan roottorikäänin magneettivuo. (37, s. 5–6.)



KUVA 30. Levypaketin pinnalle asennettu TF-anturi (15)

FF-anturi asennetaan staattorikämin kiilauksen pinnalle. Anturin pohja liimataan hartsilla kiilaan. Lisäksi anturi kiinnitetään neljällä tapilla, jotka hartsataan kiinni kiilaan porattuihin reikiin. Anturin kaapeli hartsataan generaattorin runkoon TF-anturin tavoin. Roottorin ulosvedon ja asennuksen ajaksi anturin mittapää voidaan kääntää vaakatasoon, jolloin se kääntyy pois roottorin asennuksen tieltä. (37, s. 62–70.)

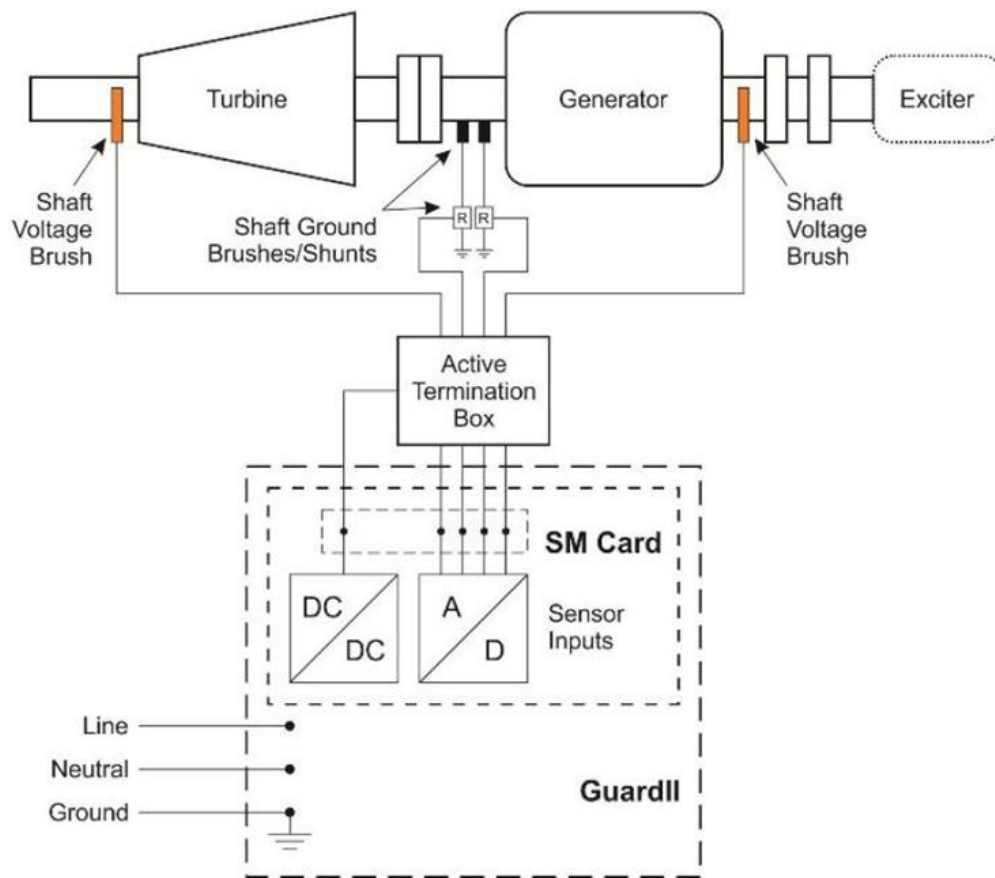
6.2.3 Kääminpäävärähtelyanturit

Kääminpääalueen värähtelymittausta varten generaattorin kääminpäihin asennetaan EVA-kiihtyvyyssanturit (End-Winding Vibration Accelerometers). Järjestelmään voidaan valinnan mukaan asentaa joko 6 tai 12 kääminpään värähtelyanturia sekä yksi staattorirungon värähtelyanturi. Anturit ovat valittavissa yksi- tai kaksiakselisella mittauksella. (40, s. 1–2.)

Anturit on varustetut 10 m pituisilla optisilla kaapeleilla, jotka viedään kytkentäkotelolle. Kytkentäkotelolta mittaustieto viedään edelleen optisella kaapelilla sähköoptisille muuntimille. Sähköoptiset muuntimet yhdistetään Guard II -alustaan parikaapeleilla. (40, s. 1–2.)

6.2.4 Akselijännitteen- ja virran mittaus

Jatkuvatoimista akselijännitteen ja -virran mittausta varten Guard II -alustaan asennetaan erillinen moduuli, joka mahdollistaa mittaukset. Moduulissa on liittimet kahdelle jännite- ja virtamittaukselle. (41, s. 1.) Generaattorille suositellaan asennettavaksi jännitemittaukset molempiin päihin. Myös virtamittauksia suositellaan asennettavaksi kaksi kappaletta. (42, s. 1.) Kuvassa 31 on esimerkki jatkuvatoimisesta akselijännitteen ja -virran mittauksen tyypillisestä asennuksesta.



KUVA 31. Esimerkki akselijännitteen ja -virran mittauksesta (42, s. 8)

Akselivirran mittausta varten asennetaan generaattorin ja turbiini välissä sijaitsevan akselin maadoitusharjan kanssa sarjaan virtashuntti, jonka avulla voidaan mitata akselin maadoitusvirta. Virtashuntti yhdistetään kaapelilla kytkentäkotelolle, josta mittaussignaali viedään edelleen Guard II -alustaan asennetulle moduulille. Moduulilta kytkentäkotelolle viedään 24 VDC syöttö. (42, s. 7–8.)

Akselijännitteen mittausta varten suositellaan asennettavaksi kaksi jännitemittausharjaa. Toinen harjoista suositellaan asennettavaksi akselin turbiinin puoleiseen päähän ja toinen harja generaattorin puoleiseen päähän. Akselijännitteen mittausharjat ja niiden osat tulee eristää eikä niitä saa kytkeä maadoitukseen. Mittausharjat yhdistetään kaapelilla kytkentäkotelolle. Jänniteharjan ja kytkentäkotelon välinen kaapeli tulisi olla alle 30 m pitkä. Kytkentäkotelolta mittaussignaali viedään edelleen Guard II -alustaan asennetulle moduulille. (42, s. 9.)

7 YHTEENVETO

Työn tarkoituksena oli perehtyä nopeasti pyörivien turbogeneraattoreiden jatkuvatoimiseen kunnonvalvontaan. Työssä käydään läpi turbogeneraattoreiden rakennetta, kunnossapitoa, kunnonvalvontaa, vikaantumismekanismeja sekä vaihtelevan sähköntuotannon vaikutusta generaattorin rakenteisiin.

Generaattoreiden kunnossapito- ja kunnonvalvontatoimintaa on ollut olemassa sähköntuotannon alusta alkaen. Perinteisesti generaattoreiden kunnossapito on pohjautunut valmistajien ennalta laatimiin huolto-ohjelmiin ja kunnonvalvonta on ollut hyvin vaihtelevaa generaattoreiden koon ja käyttötarkoituksen mukaan. Jatkuvat toimiva kunnonvalvonta on hyvin pitkään muodostunut generaattoreiden käyttöparametrien, lämpötilojen ja laakerivärähtelyiden seurannasta.

Sähköntuotannon sykliisyys yhdessä optimaalisesti mitoitettujen generaattoreiden kanssa asettaa uusia vaatimuksia kunnonvalvonnalle. Generaattoreiden käyttöparametrien ja -olosuhteiden tulee pysyä yhä tiukemmissa raja-arvoissa suorituskyvyn takaamiseksi. Sähköntuotannon vaihtelu altistaa generaattorin rakenteita useille vikaantumismekanismeille, jotka voivat lopulta johtaa koneen vaurioitumiseen.

Generaattoreiden keskeisten osien sähköiset kunnonvalvontamittaukset ovat perinteisesti pohjautuneet jaksotetusti suoritettuihin mittauksiin ja trendiseurantaan. Kehittyvä teknologia ja vikaantumismekanismien parempi tuntemus ovat mahdollistaneet generaattoreiden kriittisten osien jatkuvatoimisen kunnonvalvontajärjestelmän kehittämisen kustannustehokkaasti.

Jatkuvatoimisen kunnonvalvonnan avulla voidaan havaita käyttöparametrien ja -olosuhteiden muutosten vaikutus seurattaviin suureisiin, jolloin voidaan välttää vikaantumiselle altistavaa käyttöä. Lisäksi generaattorin kunnosta saadaan entistä tarkempaa tietoa, jolloin huolto- ja kunnossapitotoimia voidaan suunnitella ja suorittaa perustuen koneen kuntoon. Hyvin toteutetulla kunnonvalvonnalla säästetään parempi käyttövarmuus ja kunnossapidon pienemmät kokonaiskustannukset.

LÄHTEET

1. Voimajärjestelmä. Fingrid. Saatavissa: <http://www.fingrid.fi/fi/voimajarjestelma/Sivut/default.aspx>. Hakupäivä 28.11.2017.
2. Sähkön ja lämmön tuotanto. 2017. Tilastokeskus. Saatavissa: http://www.stat.fi/til/salatu/2016/salatu_2016_2017-11-02_tie_001_fi.html. Hakupäivä 28.11.2017.
3. Sähköntuotanto. 2017. Energiateollisuus. Saatavissa: https://energia.fi/perustietoa_energia-alasta/energiantuotanto/sahkontuotanto. Hakupäivä 28.11.2017.
4. Sähkön kulutus ja tuotanto. Fingrid. Saatavissa: <http://www.fingrid.fi/fi/sahko-markkinat/kulutus-ja-tuotanto/Sivut/default.aspx>. Hakupäivä 3.12.2017.
5. Energiantuotannon investoinnit ja investointipäätökset 2000-2015. 2016. Pöyry. Saatavissa: https://energia.fi/files/610/Energiainvestoinnit_2000-2015_raportti_20160317.pdf. Hakupäivä 28.11.2017.
6. Säättövoima. Energiateollisuus. Saatavissa: https://energia.fi/perustietoa_energia-alasta/energiantuotanto/sahkontuotanto/saatovoima. Hakupäivä 29.11.2017.
7. Huhtinen, Markku – Korhonen, Risto – Pimiä, Tuomo – Urpalainen, Samu 2008. Voimalaitostekniikka. Luku: 10 Voimalaitoksen sähköjärjestelmät. Keuruu: Otava kirjapaino Oy.
8. Aura, Lauri – Tonteri, Antti 1996. Teoreettinen sähkötekniikka ja sähkökoneiden perusteet. 2. uudistettu painos. Porvoo: WSOY.
9. Hietalahti, Lauri 2011. Muuntajat ja sähkökoneet. Tampere: Tammertekniikka Oy.
10. Klempner, Geoff – Kerszenbaum, Isidor 2004. Operation and maintenance of large turbogenerators. Hoboken: A John Wiley & Sons, INC publication.

11. Service. 2015. VG Power. Saatavissa: <http://vgpowerturbo.se/en/services/service/>. Hakupäivä 27.11.2017.
12. Bomba, Ralf 2016. New design criteria for the life time of turbogenerators?. Uniper Technologies GmbH.
13. He, Fei – Li, Hai – Zhu, Haiping 2014. Tolerance analysis of mechanical assemblies based on small displacement torsor and deviation propagation theories. ResearchGate. Saatavissa: https://www.researchgate.net/publication/271953201_Tolerance_analysis_of_mechanical_assemblies_based_on_small_displacement_torsor_and_deviation_propagation_theories. Hakupäivä 3.12.2017.
14. MegaSeal. IPS. Saatavissa: <http://www.ips.us/megaseal/engineering/>. Hakupäivä 27.11.2017.
15. Retrofit. 2015. VG Power. Saatavissa: <http://vgpowerturbo.se/en/services/retrofit/>. Hakupäivä 27.11.2017.
16. Fortum sisäinen materiaali. 2016. Valokuvia generaattorirevisiosta. Verkkolevy.
17. Meiden 4-Pole Synchronous Generators. Meiden. Esite.
18. PSK 6201 Kunnossapito. Käsitteet ja määritelmät. 3. painos. 2011.
19. IEEE Std 67-2005. Guide for operation and maintenance of turbine generators. 2005.
20. Järviö, Jorma - Kunnossapitoyhdistys 2007. Kunnossapito. 4. uudistettu painos. Helsinki: KP-media Oy.
21. Mikkonen, Henry - Kunnossapitoyhdistys 2009. Kuntoon perustuva kunnossapito. Helsinki: KP-media Oy.
22. Gebraeel, Nagi – Sun, Xu Andy – Yildirim, Murat 2016. Sensor-driven condition-based generator maintenance scheduling - Part 1: Maintenance problem.

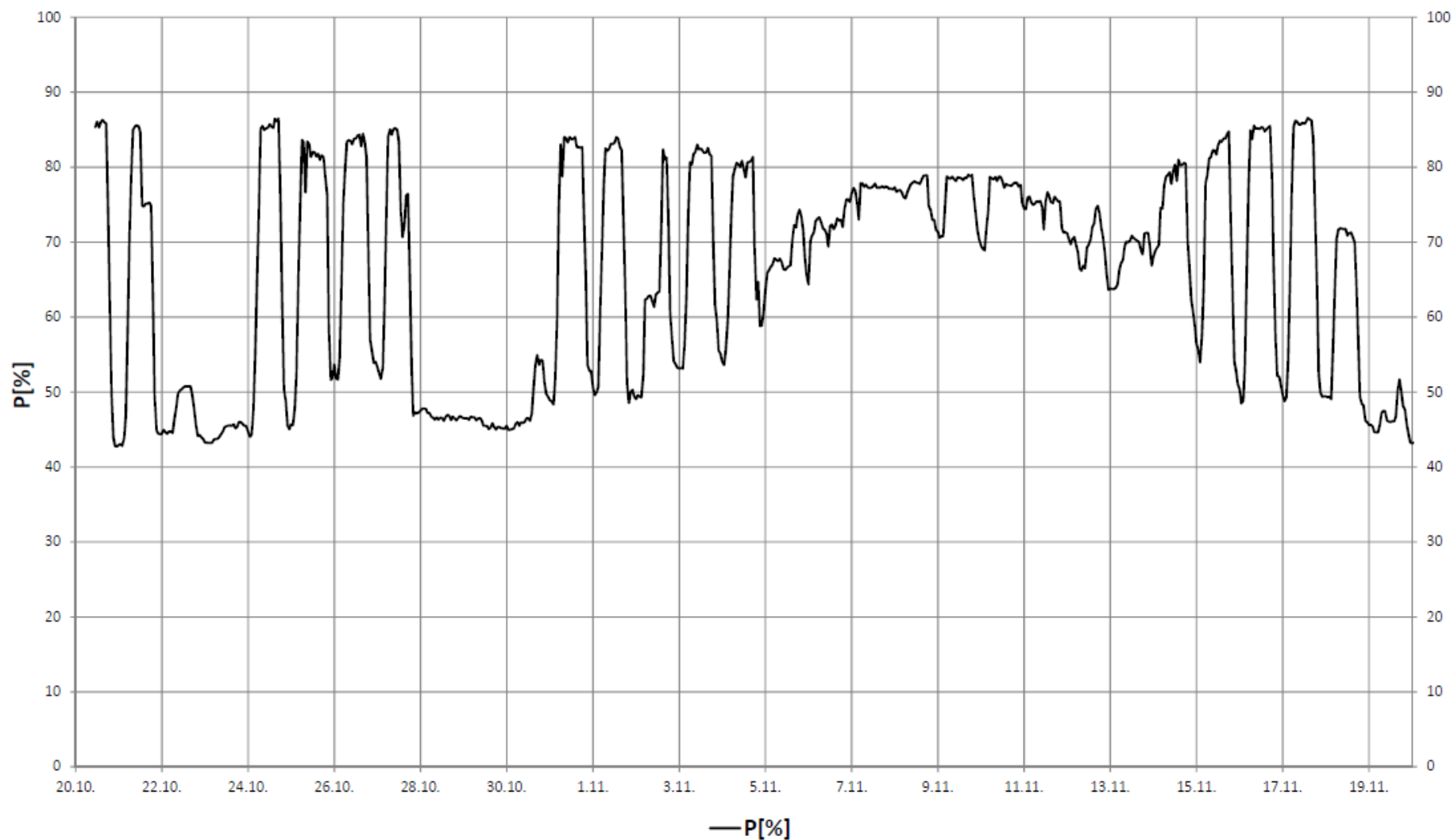
23. Teknisiä tietoja ja taulukoita. Käsikirja. ABB Oy. 2000.
24. IEEE Std 1129-2014. Guide for online monitoring of large synchronous generators (10 MVA and above. 2014.
25. Lindgren, Olli 2017. Generaattorilaitoksen hankinta. Power Solutions on the road esitysmateriaali.
26. Lloyd, B – Sasic, M – Stone, G.C. 2008. Experience with continuous on-line partial discharge monitoring of generators and motors. IEEE. Julkaisu.
27. PSK-käsikirja 5. Kunnonvalvonnan sähköiset menetelmät. 3. painos. 2007.
28. Fortum. 2017. Raportti. Sisäinen materiaali.
29. Cambell, S.R. – Lloyd B.A. – Sasic, M. 2009. New developments in flux monitoring for turbine generators. Iris Power. Julkaisu.
30. Lindgren, Olli 2006. Generaattorin akselin maadoitusharjat. Muistio.
31. Letal, John – Sasic, Mladen – Teixeira, Milene 2016. Endwinding vibration monitoring of turbogenerators. Iris Power. Julkaisu.
32. Bissonnette, Marc 2012. End-winding vibration monitoring and interpretation. IEEE. Julkaisu.
33. Tetreault, Andre – Zhenping, Zhou 2013. End.winding vibration monitoring: Pivotal in preventing major damage on a large turbo-generator. IEEE. Julkaisu.
34. Iris Power Guard II. Iris Power. Esite.
35. Guard II PD Cards. Iris Power. Manuaali.
36. BUS Couplers Installation Guide. Iris Power. Manuaali.
37. Flux Probe Installation Guide. Iris Power. Manuaali.
38. TFProbe. Iris Power. Saatavissa: <https://irispower.com/products/tfprobe/>. Hakupäivä 4.12.2017.

39. FFProbe. Iris Power. Saatavissa: <https://irispower.com/products/ffprobe/>. Hakupäivä 4.12.2017.
40. Iris Power Endwinding Vibration Accelerometer Kit for Air-Cooled Generators. Iris Power. Esite.
41. Guard II Shaft Monitoring Module. Iris Power Manuaali.
42. Saft Monitoring Installation Guide. Iris Power. Manuaali.



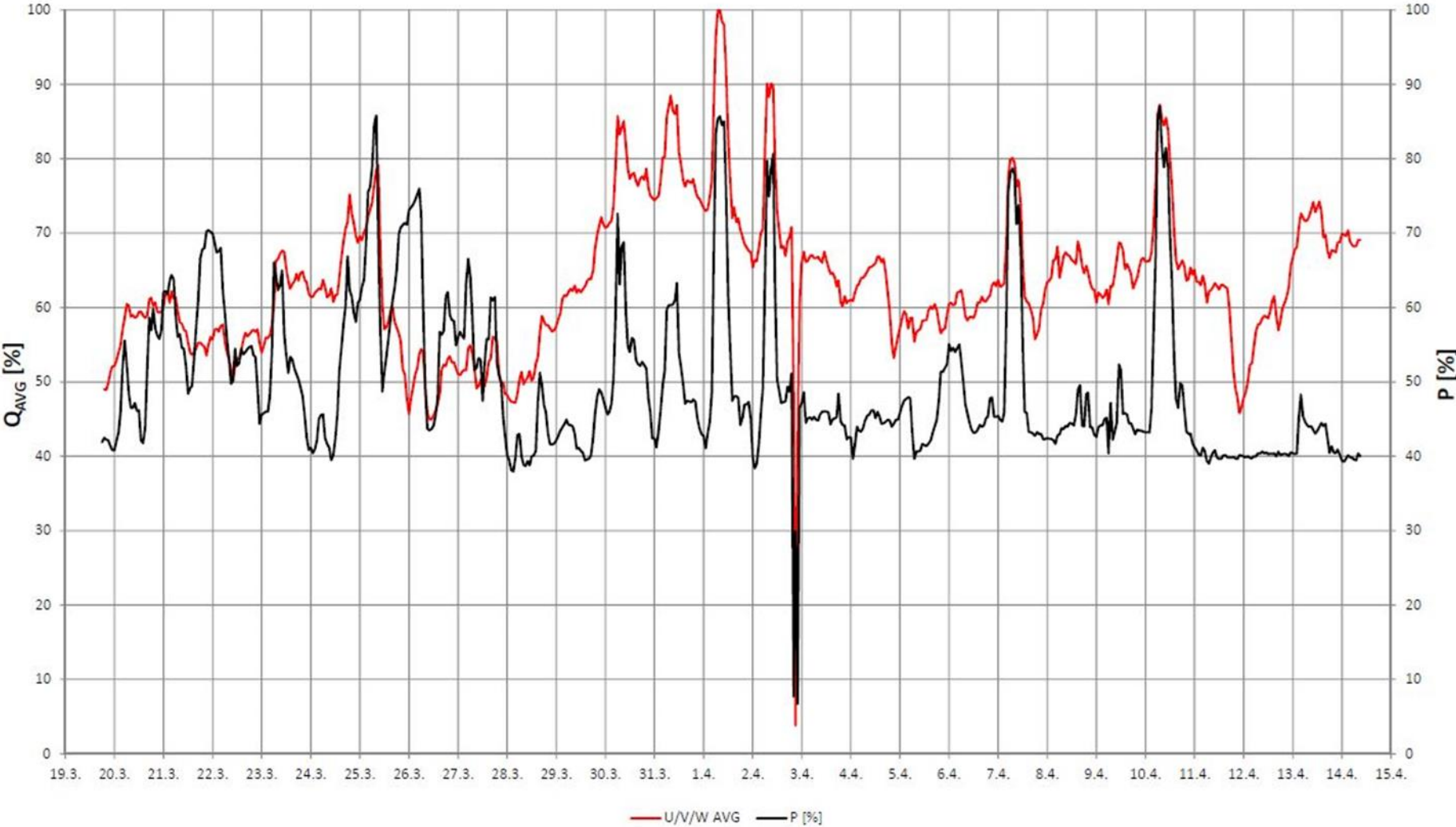
Raportti

Tehoseuranta 20.10.-20.11.





Report
On-line PD
PD activity trend plot for 19.3.-15.4.





Report
On-line PD
PD activity trend plot for 19.3.-15.4.

