

Juha Seppänen

VOIMALAITOKSEN KYKY SELVIITYÄ HÄIRIÖTILANTEISSA

VOIMALAITOKSEN KYKY SELVIITYÄ HÄIRIÖTILANTEISSA

Juha Seppänen
Opinnäytetyö
Kevät 2017
Sähkötekniikka
Oulun ammattikorkeakoulu

TIIVISTELMÄ

Oulun ammattikorkeakoulu
Sähkö- ja automaatiotekniikka, Sähkötekniikka

Tekijä(t): Juha Seppänen
Opinnäytetyön nimi: Voimalaitoksen kyky selviytyä häiriötilanteissa
Työn ohjaaja: Tuotepäällikkö Olli Lindgren, Fortum
Yliopettaja Heikki Kurki, Oulun ammattikorkeakoulu

Työn valmistumislukukausi- ja vuosi: kevät 2017

Sivumäärä: sivuja 69 + liitteitä 12

Työssä tutkittiin mihin asioihin pitää kiinnittää huomiota selvitettäessä voimalaitoksen toimintaedellytyksiä häiriötilanteissa voimalaitoksella ja sen läheisissä sähköverkoissa. Sääto- suojaus- ja automaatiojärjestelmien suunnittelu ja käyttöönotto vaatii tietämystä niistä vaatimuksista, mitä eri toimijat asettavat voimalaitoksille. Tärkeimpänä lähtökohtana tässä työssä käytettiin voimalaitosten järjestelmätekniisiä vaatimuksia ja eri standardeja.

Voimalaitoksen häiriösietokykyä tarkasteltiin selvittämällä vaatimuksia, joita asetetaan sähköverkon, voimalaitoksen suojalaitteiden ja säätöjärjestelmien toiminnalle. Lisäksi tarkasteltiin, miten varmistetaan, että vaatimukset toteutuvat järjestelmien käyttöönotossa, määräaikaikaiskoetuksessa sekä sähköjärjestelmien muutostilanteissa.

Varsinainen työ sähköjärjestelmän vaatimusten täyttymisen varmistamiseksi suoritettiin yhden vesivoimalaituskoneiston peruskorjauksen yhteydessä. Sähköjärjestelmille suoritettiin asennustarkastukset ja käyttöönottokoestukset. Tutkimusaineistona käytettiin käyttöönottokoetuksessa tallennettua materiaalia ja loppuraportteja.

Käyttöönotossa tehtyjen koestusten perusteella voidaan todeta, että voimalaitoksen suojaus- ja säätöjärjestelmät täyttävät voimalaitoksille häiriötilanteisiin asetetut järjestelmätekniisetvaatimukset. Sähköjärjestelmät ovat myös sähköturvallisuuslain mukaisia.

Asiasanat: generaattorit, jännite-epäsymmetria, muuntajat, sähköntuotanto, sähkönjakelu, relesuojaus

ABSTRACT

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

Author(s): Juha Seppänen
Title of thesis: Power Generator`s Ability to Withstand Electrical Disruptions
Supervisor(s): Olli Lindgren, Product Manager
Heikki Kurki, Principal Lecturer
Term and year when the thesis was submitted: Spring 2017
Number of pages: 69 pages + 12 appendices

This thesis studies the issues to which attention should be paid in order to ensure the power plant operation during disruptions at the power plants and the nearby power grids. The designer must be aware the requirements related to the operation of the control, protection and automation systems. The work is based on the realization of technical standards and technical system requirements of power system.

The work has been done at Fortum's Turbine and Generator Solutions unit. This unit makes turbine and generator maintenance in Finland and abroad. The branch of business also includes the turbine and generator control, protection, automation systems design, installation and maintenance.

The work describes the power plant and the electricity grid fault situations and how faults affect the production of electricity at the power plants. The work describes how the requirements are fulfilled in commissioning tests and periodic tests.

The work has been carried out in connection with the renovation of a hydropower plant. All electrical systems at the power plant were renewed in the renovation. Commissioning test protocols and final test reports have been used as research material.

Keywords: generators, power plants, power lines, power transmission, electric relays, electric transformers

ALKUSANAT

Insinööriytyö on tehty Fortum Turbine and Generator Solutions-yksikössä opinnäytteeksi Oulun ammattikorkeakoulun energia ja automaatio osastolle.

Työn ohjaajana toimi Oulun ammattikorkeakoulun sähkö- ja automaatiotekniikan osastolta yliopettaja Heikki Kurki ja kieliopillisena tarkastajana lehtori Pirjo Partanen Oulun ammattikorkeakoulusta. Heitä haluan kiittää saamistani neuvoista.

Työn valvojana toimi Fortum Turbine and Generator Solutions -yksiköstä tuotepäällikkö TkL Olli Lindgren ja Häntä haluan kiittää lämpimästi tämän projektin matkan varrella saamistani tuesta ja neuvoista.

Kiitokset myös perheelleni, joka on jaksanut ymmärtää ja kannustaa ikuista opiskelijaa.

Vaalassa 17.3.2017

Juha Seppänen

SISÄLLYS

| | |
|--|----|
| TIIVISTELMÄ | 3 |
| ABSTRACT | 4 |
| ALKUSANAT | 5 |
| SISÄLLYS | 6 |
| MERKKIEN JA LYHENTEIDEN SELITYKSET | 8 |
| 1 JOHDANTO..... | 9 |
| 2 VAATIMUKSIA VOIMALAITOSTEN HÄIRIÖNSIETOKYVYLLE | 10 |
| 2.1 Voimalaitoksen järjestelmätekniset vaatimukset häiriötilanteessa | 10 |
| 2.1.1 Mittaukset ja tiedonvaihto voimalaitoksen toiminnan aikana..... | 11 |
| 2.1.2 VJV-referenssipiste, pimeäkäynnistys, suojaus ja sähkön laatu..... | 12 |
| 2.1.3 Voimalaitosten toiminta eri jännitteillä ja taajuuksilla | 12 |
| 2.1.4 Tahtikonevoimalaitoksen säätöjen vaatimukset..... | 15 |
| 2.2 Yleisten liittämisehtojen vaatimukset häiriötilanteissa | 19 |
| 2.2.1 Voimalaitoksen liittäminen sähköverkkoon | 19 |
| 2.2.2 Sähköverkon maadoitustavat | 20 |
| 2.3 Standardit ja lait vaikutus häiriötarkasteluun | 20 |
| 3 VOIMALAITOKSEN KRIITTISET KOMPONENTIT HÄIRIÖTILANTEISSA | 22 |
| 3.1 Generaattorit..... | 22 |
| 3.2 Tehomuuntajat | 24 |
| 3.3 Voimalaitoksen säätöjärjestelmät..... | 24 |
| 3.3.1 Generaattorin jännitteensäätö | 25 |
| 3.3.2 Muuntajan jännitteensäätö..... | 26 |
| 3.3.3 Turpiininsäätö | 27 |
| 4 SÄHKÖNSIIRTOVERKON HÄIRIÖT | 32 |
| 4.1 Sähköverkoissa häiriöitä aiheuttavat tekijät | 32 |
| 4.2 Sähköverkon vikojen vaikutus sähköntuotannolle | 33 |
| 4.3 Sähköverkon suojaus..... | 34 |
| 4.4 Sähköntuotannon suojaaminen sähköverkon vikoja vastaan | 34 |
| 4.4.1 Sähköverkon viat sähköntuotannossa | 34 |
| 4.4.2 Generaattorin suojaus sähköverkon vioissa | 36 |

| | | |
|-------|---|----|
| 5 | STABIILIUS HÄIRIÖTILANTEISSA..... | 38 |
| 5.1 | Kulmastabiilius | 38 |
| 5.2 | Jännitestabiilius..... | 39 |
| 5.3 | Taajuusstabiilius | 39 |
| 5.4 | Stabiiliuden parantamismahdollisuuksia | 40 |
| 6 | VOIMALAITOKSEN HÄIRIÖNSIETOKYVYN VARMISTAMINEN | 42 |
| 6.1 | Käyttöönottokeistukset..... | 42 |
| 6.1.1 | Mittamuuntajien käyttöönottokeistukset..... | 44 |
| 6.1.2 | Suojareleiden käyttöönottokeistukset | 45 |
| 6.1.3 | Suojareleiden käyttöönottokeistus generaattorin sisäisissä vioissa..... | 46 |
| 6.1.4 | Suojareleiden käyttöönottokeistus generaattorin ulkoisissa vioissa..... | 50 |
| 6.1.5 | Säätöjärjestelmien käyttöönottokeistukset..... | 52 |
| 6.1.6 | Muuntajien ja omakäytön käyttöönottokeistukset | 56 |
| 6.2 | Määräaikaiskoestukset | 59 |
| 6.2.1 | Suojareleiden määräaikaiskoestukset | 59 |
| 6.2.2 | Säätöjärjestelmien määräaikaiskoestukset..... | 61 |
| 6.2.3 | Muuntajien ja omakäytön määräaikaiskoestukset | 62 |
| 6.3 | Muutokset voimalaitoksella ja sähköverkossa..... | 62 |
| 7 | YHTEENVETO | 65 |
| | LÄHTEET | 67 |
| | LIITTEET | 69 |

MERKKIEN JA LYHENTEIDEN SELITYKSET

| | |
|---------------|--|
| AVR | automatic voltage regulator |
| c | jännitekerroin |
| $\cos \phi$ | tehokeroin, pätötehon P suhde näennäistehoon S |
| EMC | electromagnetic compatibility, sähkömagneettinen yhteensopivuus |
| f | taajuus |
| FACTS | Flexible AC Transmission Systems, joustavat AC-siirtojärjestelmät |
| $\cos \gamma$ | tehokeroin, pätötehon P suhde näennäistehoon S |
| Hz | hertsi |
| IEC | International Electrotechnical Commission |
| IEEE | Institute of Electrical and Electronics Engineers |
| I_k | jatkuvantilan oikosulkuvirta |
| I_k' | muutostilan oikosulkuvirta |
| I_k'' | alkutilan oikosulkuvirta |
| kV | kilovoltti |
| ms | millisekunti |
| MW | megawatti |
| MVA | megavoltiampeeri |
| P_{\max} | maksimiteho |
| <i>p.u.</i> | per unit (mitatun arvon suhde nimellisarvoon) |
| PSS | Power System Stabilizer, (Lisästabilointipiiri). Jännitteensäätäjän lisätoiminto, jonka tavoitteena on parantaa matalataajuisten tehoheilahtelujen vaimennusta sähköjärjestelmän eri alueiden välillä. |
| R_k | oikosulkuresistanssi |
| rpm | kierrosta minuutissa |
| SFS | Suomen Standardisoimisliitto |
| THD | total harmonic distortion, harmoninen kokonaissärö |
| U | jännite |
| U_n | nimellisjännite |
| X_k | oikosulkureaktanssi |
| Z_k | oikosulkuimpedanssi |

1 JOHDANTO

Generaattorin ja sähköverkon viat johtavat usein voimalaitoksen kytkeytymiseen irti sähköverkosta. Mitä suurempitehoisia ovat sähköverkosta irtoavat yksiköt, sitä suurempi häiriöriski tämä on koko pohjoismaiselle energiantuotannolle ja sähköverkolle. Jos voimalaitoksen lähellä syntyneen vian seurauksena sähköverkon jännite laskee voimakkaasti, ei tehoa saada syötettyä verkkoon ja sen seurauksena generaattorin pyörimisnopeus kasvaa. Jos pyörimisnopeus kasvaa liian suureksi, irttoa voimalaitos verkosta. Pysyäkseen verkossa voimalaitoksen pitää pystyä nopeaan tehonsäätöön heti vian synnyttyä.

Tehonmuutos näkyy myös verkon taajuuden muutoksena. Taajuuden laskunopeuden ja taajuuskuopan syvyyteen vaikuttavat sähköverkosta irronneen voimalaitoksen teho sekä sähköjärjestelmään kytkettyjen generaattoreiden ja niiden turpiinin liike-energia. Pohjoismaisessa sähköjärjestelmässä liike-energia on pyörivissä tahtigeneraattoreissa ja niiden turpiineissa. Liike-energian määrä suhteessa tehoon on suurempi lämpövoimalaitoksissa kuin vesivoimalaitoksissa. Suomessa liike-energian osuus on noin 25 % koko pohjoismaisen sähköjärjestelmän liike-energiasta ja Ruotsissa noin puolet. (1, s. 4.)

Työssä käsitellään voimalaitoksen selviytymistä generaattorin vioista ja sähköverkon lähivioista. Lähivika-termillä tarkoitetaan voimalaitoksen lähellä tapahtuvaa vikaa. Tällöin vikapaikan ja generaattorin liitinjännitteen välissä on merkittävänä tekijänä ainoastaan generaattorin muuntajan impedanssi. Aihetta käsitellään eri tahojen vaatimusten ja standardien sekä sähköntuotantoon ja -siirtoon liittyvien kriittisten tekijöiden pohjalta. Työssä käsitellään perinteisiä höyry- ja kaasuturpiinivoimalaitoksia sekä vesivoimalaitoksia.

Lopuksi tarkastellaan voimalaitoksen häiriökestoisuutta relesuojausten ja säätöjärjestelmien kannalta ja miten eri vaatimusten täytyminen todennetaan voimalaitosten käyttöönotossa, määräaikaistarkastuksissa sekä muutostilanteissa voimalaitoksen elinkaaren aikana. Työn on tehty Fortumin Turbine and Generator Solutions -yksikössä. Tämä yksikkö huoltaa turpiineita ja generaattoreita Suomessa ja ulkomailla. Toimialaan kuuluvat myös turpiinin ja generaattorin säätö-, suojaus- ja automaatiojärjestelmien suunnittelu, asennus ja huolto.

2 VAATIMUKSIA VOIMALAITOSTEN HÄIRIÖNSIETOKYVYLLE

Vaatimuksia voimalaitosten toiminnalle asettavat seuraavat:

- voimalaitosten järjestelmätekniset vaatimukset, VJV2013, Fingrid
- yleiset liittymisehdot, YLE2013, Fingrid
- standardit ja lait.

2.1 Voimalaitoksen järjestelmätekniset vaatimukset häiriötilanteessa

Suomessa järjestelmäteknisten vaatimusten toteutumisesta vastaa Fingrid Oyj. Vaatimusten lähtökohtana on pohjoismainen sääntökokoelma "Nordic Grid Code". Järjestelmäteknisillä vaatimuksilla pyritään varmistamaan, että voimalaitos kestää sähköverkossa tapahtuvat taajuus- ja jännitevaihtelut. (2, s. 6.)

Voimalaitoksen tulee tukea sähköverkon toimintaa häiriötilanteissa eli toimia luotettavasti häiriön aikana ja sen jälkeen. Voimalaitos ei myöskään saa aiheuttaa haittaa muulle sähköjärjestelmälle ja siihen liitetuille laitteille. Vaatimukset varmistavat myös sen, että liittymispisteen verkonhaltijalla ja Fingridillä on riittävät, ajan tasalla olevat tiedot sähköjärjestelmästä. Tällä varmistetaan käyttövarmuuden ylläpito. Käyttövarmuutta lisää se, että voimalaitoksilla on tehonsäätöön nähden samantyyppiset ominaisuudet. (2, s. 6.)

Voimalaitokset jaetaan neljään eri teholuokkaan (VJV 2013) niiden mitoitustehon ja maantieteellisen sijainnin mukaan. Teholuokittelu on taulukon 1 mukainen. Jatkossa käsitellään vaatimuksia jotka koskevat teholuokkien 2, 3 ja 4 voimalaitoksia. Teholuokan mukaan määritellään voimalaitoksen

- mittaukset ja tiedonvaihto voimalaitoksen toiminnan aikana
- VJV-referenssipiste
- pimeäkäynnistysominaisuudet
- suojausasettelut
- sähkönlaatu
- voimalaitoksen toiminta eri jännitteillä, taajuuksilla ja omakäytöllä
- voimalaitoksen säätöjärjestelmien toiminta. (2, s. 23 - 44.)

TAULUKKO 1. Voimalaitosten teholuokittelu (2, s. 10)

| Teholuokka | Voimalaitoksen mitoitusteho P_{\max} |
|--------------|--|
| Teholuokka 1 | Voimalaitoksen mitoitusteho on vähintään 0,5 MW mutta alle 10 MW. ($0,5 \text{ MW} \leq P_{\max} < 10 \text{ MW}$) |
| Teholuokka 2 | Voimalaitoksen mitoitusteho on vähintään 10 MW mutta alle 25 MW. ($10 \text{ MW} \leq P_{\max} < 25 \text{ MW}$) |
| Teholuokka 3 | Voimalaitoksen mitoitusteho on vähintään 25 MW mutta alle 100 MW. ($25 \text{ MW} \leq P_{\max} < 100 \text{ MW}$) |
| Teholuokka 4 | 1) Voimalaitoksen mitoitusteho on vähintään 100 MW ($P_{\max} \geq 100 \text{ MW}$) tai 2) Voimalaitoksen mitoitusteho on vähintään 10 MW ja laitos liittyy Lapissa Valajaskosken ja Pirttikosken 220 kV:n sähköasemien Isoniemen ja Kokkosnivan johtolähtöjen takana sijaitsevaan sähköverkkoon. |

2.1.1 Mittaukset ja tiedonvaihto voimalaitoksen toiminnan aikana

Voimalaitoksista pitää liittyjän tehdä ilmoitus liittymispisteen verkonhaltijalle sekä Fingridille samana päivänä ennen tehon syötön aloittamista. Käytöstä vastaavan toimijan on oltava tavoitettavissa joka hetki. Voimalaitoksista tulee toimittaa reaaliaikaiset mittaustiedot:

- pätö- ja loistehomittaukset
- tuntikohtaiset energiamittaustiedot
- kytkinlaitteiden tilatiedot.

Lisäksi toimijan tulee muuttaa 15 minuutin kuluessa Fingridin pyynnöstä pätö- tai loistehonsäädön tilaa tai asetusta. Teholuokan 4 voimalaitoksista tulee lisäksi toimittaa tiedot voimalaitoksen ja sen säätöjen toiminnasta häiriö- ja muutostilanteissa Fingridille. Voimalaitoksille tulee asentaa häiriö- ja heilahtelutallentimet, joiden tulee täyttää seuraavat vaatimukset:

- Häiriötallentimen näytteenotto- ja tallennustaajuus tulee olla vähintään 1 kHz ja tallennusaika muutamia sekunteja.
- Heilahtelutallentimen näytteenottotaajuus tulee olla vähintään 1 kHz ja tallennustaajuus vähintään 50 Hz sekä tallennusaika kymmeniä sekunteja.
- Tallenteet tulee toimittaa Fingridille pyynnöstä 24 tunnin kuluessa.
- Tallennusjärjestelmän käynnistysarvot asetellaan yhteistyössä Fingridin kanssa. (2, s. 23 - 24.)

2.1.2 VJV-referenssipiste, pimeäkäynnistys, suojaus ja sähkön laatu

VJV-referenssipisteet on määritelty myös voimalaitosten teholuokan mukaan. Voimalaitosten referenssipiste on generaattorimuuntajan yläjännitepuolen kohta, joka on sähköisesti lähimpänä voimalaitoksen liittymispistettä. Liittyjän tulee ilmoittaa Fingridille voimalaitoksen suunnitteluvaiheessa, mikäli voimalaitos on kohtuullisin kustannuksin varustettavissa pimeäkäynnistysominaisuudella, joka tarkoittaa voimalaitoksen kykyä käynnistää sähköntuotanto oman voimanlähteen avulla ilma ulkopuolista sähkön syöttöä. Kustannusten kattamisesta sovitaan liittyjän ja Fingridin kesken. (2, s. 25 - 26.)

Liittyjän vastuulla on määrittää voimalaitoksen ja sen liittynnän suojausasettelut. Asetteluiden tulee olla sellaiset, että voimalaitos pysyy verkossa sähköverkon häiriön aikana niin kauan kuin se on mahdollista turvallisuuden ja käytettävän teknologian sallimissa rajoissa. Asetteluiden pitää täyttää VJV-referenssipisteessä määritellyt jännitteen ja taajuuden vaihtelut. Voimalaitoksen suojausten suunnittelussa otetaan huomioon sähköverkossa tapahtuvien häiriöiden ja vikojen aiheuttamat lyhytaikaiset muutokset virroissa, jännitteissä, taajuudessa sekä johtojen pika- ja aikajälleenkytkennät. (2, s. 25 - 26.)

Liittyjän tulee varautua liittymäpisteen verkonhaltijan määrittämään sähkönlaatuun voimalaitosta suunniteltaessa. Voimalaitoksen vaikutus sähkölaatuun voidaan arvioida esimerkiksi IEC-standardin 61400-21 mukaisesti. (2, s. 25 - 26.)

2.1.3 Voimalaitosten toiminta eri jännitteillä ja taajuuksilla

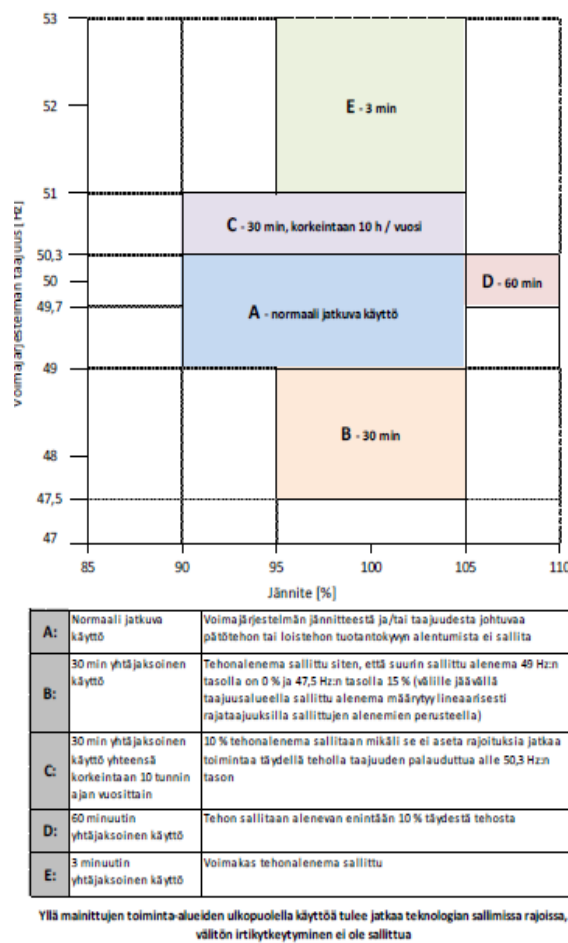
Nimellisjännitteet Suomen kantaverkossa ovat taulukon 2 mukaiset. Taulukosta nähdään myös liittymispisteen jännitteet sekä sallitut vaihteluvälit eri tilanteissa.

TAULUKKO 2. Kantaverkon jännitteet (2, s. 27)

| Nimellisjännite Un/kV | Liittymispisteen Un/kV | Normaali vaihtelu- väli U/kV | Poikkeus- häiriöti- lanne vaihteluväli U/kV |
|--------------------------|---------------------------|------------------------------------|---|
| 110 | 118 | 105 - 123 | 100 - 123 |
| 220 | 233 | 215 - 245 | 210 - 245 |
| 400 | 410 | 395 - 420 | 360 - 420 |

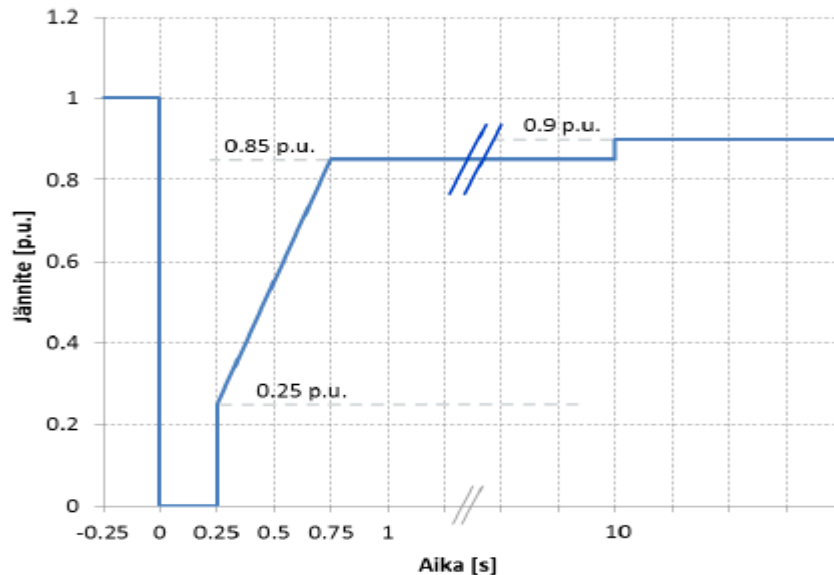
Mitoituksen perustana käytettävä liittymispisteen normaali käyttöjännite (100 %:n arvoa vastaava jännite) vaihtelee liittymispisteittäin, ja liittyjän on aina kysyttävä se liittymispisteen verkonhaltijalta. Pohjoismaisen sähköjärjestelmän taajuus on normaalisti 49,9–50,1 Hz. Sähköverkon taajuus voi vaihdella 49,5–50,5 Hz tai poikkeuksellisesti jopa 47,5–53 Hz. (3, s. 7.)

Voimalaitoksen on kyettävä toimimaan keskeytyksettä ja normaalisti, kun VJV-referenssipisteen jännite on 90 - 105 % ja taajuus on 49,0 - 50,3 Hz. Jatkuvan toiminta-alueen jännitteen 100 %:n arvo on 400 kV:n verkossa on aina 400 kV. Muissa verkoissa 100 %:n vastaava arvo on kysyttävä voimalaitoksen liittymispisteen verkonhaltijalta. Kuvassa 1 on myös vaaditut toiminta-ajat, kun taajuudet ja jännitteet ovat normaalin toiminta-alueen ulkopuolella.



KUVA 1. Kuvassa on voimalaitokselta vaaditut verkossapysymisajat erilaisilla VJV-referenssipisteen jännitteillä ja taajuuksilla (2, s. 28)

Voimalaitoksen tulee myös selviytyä lyhytaikaisesta jännitehäiriöstä menettämättä tahtikäyttöään, ja jatkaa toimintaa normaalisti häiriön jälkeen. Voimalaitoksen tulee selviytyä myös häiriön jälkeisistä lyhytaikaisista jännitteen amplitudin ja vaihekulman vaihteluista. Esimerkiksi jännitteen pudotua 0 V:iin tulee voimalaitoksen toimia 250 ms ajan (kuva 2). (2, s. 29.)



KUVA 2. Teholuokan 4 voimalaitokselta vaadittu lyhytaikaisen jännitehäiriön sietokyky (2, s. 32.)

Voimalaitosten tulee lisäksi palauttaa pätöteho yhden sekunnin kuluessa lyhytaikaisen jännitehäiriön jälkeen. Jos palautumisaika kestää kauemmin, on se hyväksyttävä erikseen Fingridillä. Pysyviä tehomuutoksia ei sallita jännitehäiriön jälkeen. Voimalaitoksen sähköntuotantolaitteiston toiminnasta jännitehäiriön yhteydessä tulee toimittaa laskelma liittymispisteen verkonhaltijalle voimalaitoksen vaatimusten todentamisprosessin vaiheessa 1. Taulukossa 3 on teholuokan 4 voimalaitoksen jännitehäiriölaskennassa käytettävät lähtötiedot.

TAULUKKO 3. Jännitehäiriölaskelmassa teholuokan 4 voimalaitoksista käytettävät lähtötiedot (2, s. 33)

| Lähtötieto | Häiriö 1 | Häiriö 2 |
|---|----------|----------|
| Jännitehäiriön kesto | 150 ms | 250 ms |
| VJV-referenssipisteen jäännösjännite häiriön aikana | 0 p.u. | 0,0 p.u. |
| Oikosulkutehotaso ennen häiriötä | Normaali | Normaali |
| Oikosulkutehotaso häiriön jälkeen | Minimi | Normaali |

Taajuuden muutosnopeuden ollessa alle 2 Hz/s voimalaitoksen tulee toimia normaalisti. Jos taajuuden muutosnopeus on tasan 2 Hz/s, tulee laitoksen pysyä verkossa 1,25 sekunnin ajan. Yli 2 Hz/s muutosnopeudella voi voimalaitos erota verkosta muulloin kuin lyhytaikaisen jännitehäiriön aikana. (2, s. 27 - 32.)

2.1.4 Tahtikonevoimalaitoksen säätöjen vaatimukset

Taajuuden ja pätötehon säätö

Tahtikonevoimalaitoksella tulee olla pätötehon säätöön, tehotason ylläpitoon ja pyörimisnopeussäätöön vaadittavat toiminnollisuudet. Voimalaitoksen minimitehon tulee olla mahdollisimman pieni. Laitosten säätö on toteutettava siten, että voimalaitoksen lyhytaikaista ylikuormituskykyä voidaan hyödyntää tehokkaasti. Vesi-, kaasuturpiini- ja moottorivoimalaitoksien tulee käynnistyä täydelle teholle 15 minuutissa.

Voimalaitoksen tehonsäätäjille asetetut keskeiset vaatimukset häiriötilanteissa:

- Voimalaitoksella tulee olla turpiinisäätäjä ja siihen liittyvä pyörimisnopeudensäätö, joilla voidaan asetella teho ja sen muutosnopeus.
- Tehonsäädön kuolleen alueen tulee olla mahdollisimman pieni.
- Pätötehon muutosnopeusvaatimukset häiriötilassa on määritetty vasteaikoina taajuuden 0,5 Hz:n muutokselle. Vähintään puolet vaaditusta kokonaismuutoksesta tulee saavuttaa 5 sekunnissa häiriöstä ja kokonaismuutos 30 sekunnissa häiriöstä.
- Vesi-, kaasuturpiini- ja moottorivoimalaitosten tehomuutoksen tulee häiriötilanteissa olla vähintään ± 10 % mitoitustehosta, kun teho on 50–100 % mitoitustehosta. Tehomuutos voidaan rajoittaa voimalaitoksen ominaisuuksien mukaiseen suurimpaan sallittuun tehomuutokseen, kun laitoksen teho on alle 50 %.
- Sähkön ja lämmön yhteistuotantolaitosten välittömän tehomuutoksen häiriötilanteissa tulee olla vähintään ± 5 % mitoitustehosta, kun laitoksen teho on 50–90 % mitoitustehosta. Tehomuutos voidaan rajoittaa kyseisen voimalaitoksen ominaisuuksien rajaamaan suurimpaan sallittuun tehomuutokseen, kun laitoksen teho on alle 50 %. (2, s. 34 - 36 .)

Voimalaitoksen taajuussäätäjille häiriötilanteessa on asetettu keskeiset vaatimukset:

- Taajuussäädön pitää pystyä automaattisesti tukemaan sähköjärjestelmän taajuutta häiriötilanteessa.
 - Taajuussäätö seuraa sähköjärjestelmän taajuutta.
 - Taajuussäädölle pitää pystyä asettelemaan kuollut alue asettelualueen ollessa 0,0 - 1,0 Hz enintään 0,01 Hz:n portaissa.
 - Taajuussäädölle pitää pystyä asettelemaan lineaarinen statiikka (pätötehon suhteellinen muutos verrattuna taajuuden muutokseen) asettelualueen ollessa 2-12 % enintään yhden prosenttiyksikön portaissa.
 - Taajuussäädöllä pitää olla vähintään kaksi tilaa: normaalitila ja häiriötila.
 - Taajuussäädön herkkyys pitää olla vähintään 10 mHz ja reagointiaika enintään 2 s.
 - Taajuussäädön tilanmuutokseen (normaalitila / häiriötila) johtavat asetelut:
 - taajuusrajat +/- 2 Hz
 - tilanmuutoksen viive 0-60 s enintään sekunnin portain
 - tilan palautumisen viive 0-600 s enintään sekunnin portain.
- (2, s. 34 -36 .)

Generaattorin jännitteensäätö

Generaattorin jännitteensäädön ensisijainen käyttötapa on liitinjännitteen vakiojännitesäätö ja sen varajärjestelmänä pitää olla magnetointivirransäätö (käsissäätö). Jos käytetään muuta säätötapaa, pitää säädön toimia kuten liitinjännitteen vakiojännitesäätö. Muita säätötapoja ovat esimerkiksi vakiolostehosäätö ja vakiotehokerroinsäätö. (2, s. 39 - 44.)

Tahtikonevoimalaitosten generaattoreilla pitää olla generaattorin liitinjännitteen vakiojännitesäätö. Säädön toiminnan pitää olla jatkuvaa, ja sen vaikutuksesta loistehon muutokset VJV -referenssipisteessä pitää tapahtua portaattomasti. Säädön avulla täytyy voida hyödyntää voimalaitoksen loistehokapasiteetti sen tuottaessa pätötehoa sähköjärjestelmään. Säädön toiminta ei saa häiriintyä verkon jännitteen ja taajuuden muutoksista tai lyhytaikaisista jännitehäiriöistä. Säädön toimintatilan ja toimintapisteen muutosten tulee tapahtua rauhallisesti ilman merkittäviä heilahteluita laitoksen tuottamassa lois- tai pätötehossa. Muutokset eivät saa olla myöskään toistuvia. (2, s. 39 - 44.)

Jännitesäätäjälle on asetetut keskeiset vaatimukset häiriötilanteissa:

- Sähköjärjestelmän käyttövarmuuden turvaamiseksi jännitteensäätäjä tulee toteuttaa kaksikanavaisena.
- Enimmäisjännite on staattisella magnetoinnilla oltava vähintään kaksi kertaa ja harjattomalla magnetoinnilla vähintään 1,6 kertaa generaattorin mitoituskuormitusta vastaava magnetointijännite.
- Enimmäisjännitettä tulee kyetä ylläpitämään vähintään 10 sekunnin ajan.
- Säätäjän tulee suoriutua tyhjäkäyväälle generaattorille tehdyistä askelvastekokeista taulukon 4 mukaisesti.
- Jänniteylitys askelvastekokeessa saa olla enintään 15 % kokonaismuutoksesta.
- Askelvaste ei saa värähdellä.
- Loistehostatiikan asettelualue pitää olla +/- 1-10 % yhden prosentin portaisissa.
- Teholuokan 4 voimalaitosten generaattoreilla on lisäksi oltava lisästabiloitipiirit (PSS) vaimentamaan generaattorin ja sähköjärjestelmän välisiä heilahteluja 0,2 - 2 Hz:n taajuuksilla (ei saa vahvistaa 0,3 Hz:n järjestelmätaajuisia vaihteluja). (2, s. 39 - 44.)

TAULUKKO 4. Säätäjän toiminta-ajat askelvastekokeissa (2, s. 43)

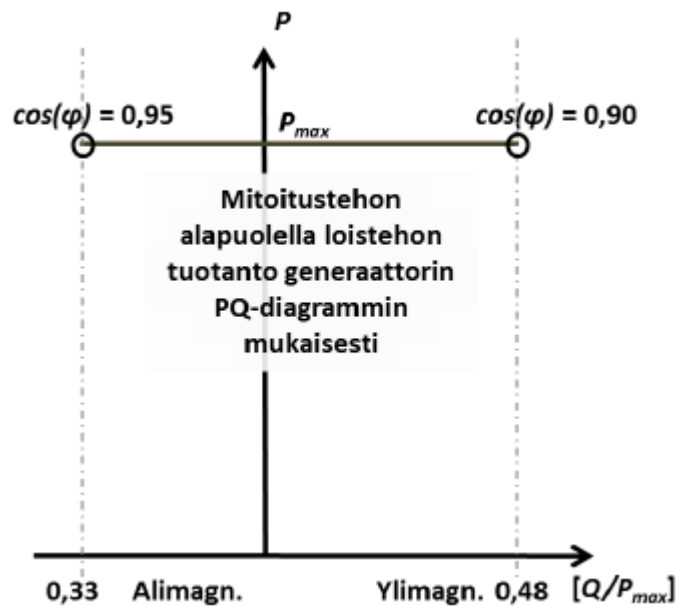
| U Askelmuutos % | Staattinen magnetointi 90% muutoksesta saavutettu t/s | Harjaton magnetointi 90% muutoksesta saavutettu t/s |
|--------------------|---|---|
| 95 → 105 | 0,2-0,3 | 0,2-0,5 |
| 105 → 95 | 0,2-0,3 | 0,2-0,8 |

Jännitesäätäjässä pitää olla seuraavat suojat ja rajoittimet:

- Säätäjässä tulee olla generaattorin ylikuormitusrajoitin.
- Generaattorin virranrajoittimin tulee olla käänteisaikatoiminen, jotta generaattorin jännitteensäätölaitteiden ylikuormitusalueita voidaan hyödyntää.
- Rajoittimien pitää toimia mahdollisimman viiveettömästi voimakkaiden yli- tai alijännitteiden välttämiseksi voimalaitoksen VJV-referenssipisteessä.
- Alimagnetoinnin rajoittimen toiminta tulee koordinoida virtarajoittimien (staattori, roottori, magnetointi) sekä magnetoinnin katoamissuojauksen ja mahdollisen lisästabiloitipiirin (PSS) kanssa.

- Ylimagnetoinnin rajoittimen toiminnan tulee koordinoida virtarajoittimien sekä ylivoimien (staattori, roottori, magnetointi) ja mahdollisen lisästabilointipiirin kanssa.
- Jos voimalaitoksella on muita kompensointilaitteita, niiden toiminta on koordinoitava voimalaitoksen generaattoreiden säätäjien toiminnan kanssa. (2, s. 39 - 44.)

Lisäksi sähköjärjestelmän toiminnan ja stabiiliuden vuoksi voimalaitoksen generaattorien ja generaattorimuuntajien reaktanssien tulisi olla mahdollisimman pieni. Generaattorien pitää toimia jatkuvasti maksimi mitoitusteholla P_{max} , kun tehokerroin generaattorin liittimistä mitattuna on välillä 0,95 kapasitiivista ... 0,9 induktiivista. (Kuva 3.)



KUVA 3. Tahtikonevoimalaitokselta vaadittu loistehokapasiteetti (2, s. 39)

Kun generaattorin toimii mitoitustehoa pienemmillä tehoilla, sen tulee kyetä tuottamaan tai kuluttamaan loistehoa generaattorin mitoitusjännitteellä ja -taajuudella laaditun PQ-diagrammin mukaisesti (liite 1). Liittyjän on toimitettava verkonhaltijalle laskelma loistehokapasiteetista VJV-referenssipisteessä. Laskelma tehdään 50 Hz:n taajuudella ja siinä on otettava huomioon voimalaitoksella olevat loistehoa kuluttavat tai tuottavat komponentit. Jännitesäädön rajoittimien, suojausten ja lisäsäätöjen asetelujen tulee olla sellaiset, että loistehokapasiteetti tulee hyödynnettyä mahdollisimman tarkasti kuitenkin niin, ettei ole riskiä, että generaattori eroaisi verkosta. (2, s. 40 - 41.)

Omakäytölle jääminen ja toiminta omakäytöllä

Voimalaitos on suunniteltava siten, että se pystyy siirtymään turvallisesti omakäytölle silloin, kun VJV-referenssipisteen jännitteet tai taajuudet ovat sellaiset, että voimalaitos saa siirtyä omakäytölle. Vesivoimalaitosten ja reservikaasuturpiinivoimalaitosten on toimittava omakäytöllä vähintään kahdeksan tunnin ajan.

Muut kuin vesi- ja ydinvoimalaitokset on suunniteltava siten, että ne toimivat omakäytöllä vähintään tunnin ajan. Tämän jälkeen niiden pitää olla uudelleen käynnistettävissä ja tahdistettavissa takaisin sähköjärjestelmään mahdollisimman nopeasti tekniset reunaehdot huomioiden, kuitenkin enintään neljässä tunnissa seuraavien 12 tunnin aikana. Ydinvoimalaitosten on toimittava omakäytöllä ja oltava käynnistettävissä turvamääräysten edellyttämällä tavalla. (2, s. 37.)

2.2 Yleisten liittymisehtojen vaatimukset häiriötilanteissa

Yleisten liittymisehtojen (YLE2013) perustana on pohjoismaisten kantaverkkoyhtiöiden sääntökoelma "Nordic Grid Code", joka on osa eurooppalaista sääntökoelmaa. Liittymisehdoilla määritetään ja varmistetaan verkkojen yhteensopivuus sekä määritetään oikeudet, velvollisuudet ja vastuut. (3, s. 2.)

2.2.1 Voimalaitoksen liittäminen sähköverkkoon

Voimalaitos tai sähkölaitteisto, johon on kytketty voimalaitos, liitetään kantaverkkoon kytkinlaitoksessa katkaisijakentän välityksellä. Poikkeuksena on eräät pienet alle 5 MVA:n voimalaitokset ja enintään 25 MVA:n voimalaitokset, joiden kantaverkkoon syöttämä oikosulkuvirta on enintään 1,2-kertainen verrattuna voimalaitoksen nimellisvirtaan. Voimajohtoon liitettävä voimalaitos on varustettava eroonkytkentäreleistyksellä. Yli 5 MVA:n voimalaitos on lisäksi varustettava tietoliikennetydellä kantaverkon pikajälleenkytkennän mahdollistamiseksi. Yli 250 MVA:n voimalaitokset liitetään pääsääntöisesti 400 kV:n sähköverkkoon. (3, s. 3 - 4.)

Suomessa suurin askelmainen tehonmuutos voimalaitoksen liittymässä vuonna 2013 oli 900 MW. Arvioidun voimajärjestelmän kehityksen mukaan suurin askelmainen tehonmuutos voimalaitoksen

liittymässä voi olla 1650 MW. Tämä raja saavutetaan silloin, kun Olkiluoto 3 kytetään verkkoon. (1, s. 4.)

2.2.2 Sähköverkon maadoitustavat

Suomessa on 400 kV:n ja 220 kV:n sähköverkot tehollisesti maadoitettu. Tämä tarkoittaa sitä, että maasulkukerroin on tällöin enintään 1,4. 110 kV:n sähköverkot ovat puolestaan osittain maadoitetut; maasulkukerroin on tällöin enintään 1,8. Maasulkukerroin tarkoittaa maasulun aikana terveessä vaiheessa esiintyvän jännitteen ja normaalin vaihejännitteen välistä suhdetta. (3, s. 8.)

400 kV:n ja 220 kV:n muuntajien tähtipiste on maadoitettava kuristimen välityksellä, ellei sähköjärjestelmän käyttö edellytä muuta. Maadoituskuristimen tehtävä on rajoittaa maasulkuvirtaa. 110 kV:n muuntajan tähtipiste maadoitetaan vain valituilla asemilla maadoituskuristimen kautta, jotta maasulkusuojaus toimii eikä maasulkuvirta kasva liian isoksi. Maadoittamattomien muuntajien tähtipisteisiin suositellaan asennettavan ylijännitesuojat ylijännitteitä vastaan. (3, s. 8.)

2.3 Standardit ja lait vaikutus häiriötarkasteluun

Voimalaitosten liityntöjen on noudatettava Suomen sähköalaa koskevaa lainsäädäntöä. Keskeisiä lakeja ovat Sähköturvallisuuslaki 1035/2016 ja Sähkömarkkinalaki 588/2013. Nämä lait määrittävät mm. liityntöjen teknisiä ratkaisuja. Sähköturvallisuuslain 1035/2016 tarkoitus on määritelty seuraavassa:

"Tämän lain tarkoituksena on varmistaa sähkölaitteen ja -laitteiston käytön pitäminen turvallisena ja estää sähkön käytöstä aiheutuvien sähkömagneettisten häiriöiden haitalliset vaikutukset sekä turvata sähkölaitteen tai -laitteiston sähkövirran tai magneettikentän välityksellä aiheuttamasta vahingosta kärsineen oikeudet. Lisäksi lain tarkoituksena on varmistaa sähkölaitteiden vaatimustenmukaisuus ja vapaa liikkuvuus. Tässä laissa säädetään sähkölaitteille ja -laitteistoille asetettavista vaatimuksista, sähkölaitteiden ja -laitteistojen vaatimustenmukaisuuden osoittamisesta ja vaatimustenmukaisuuden valvonnasta, sähköalan töistä ja niiden valvonnasta sekä sähkölaitteen ja -laitteiston haltijan vahingonkorvausvelvollisuudesta." (4, luku1 § 1.)

Sähköverkkoon liittymisessä sovelletaan seuraavia standardeja:

- EN-60071-1 Insulation co-ordination – Part 1: Definitions, principles and rules
- EN 60071-2 Insulation co-ordination – Part 2: Application guide
- EN 50341 Overhead electrical lines exceeding AC 45 kV:

- EN 50341 – 1 Part 1: General requirements – Common specifications
- EN 50341 – 3-7 National Normative Aspects (NNA) for Finland.
- SFS 6001 Suurjännitesähköasennukset
- SFS 6002 Sähkötyöturvallisuus
- IEC/TR 60815 Guide for selection of insulations in respect of polluted conditions.

Kytkinlaitoksen liittymisessä noudatetaan standardien osalta seuraavaa järjestystä (Fingrid):

1. SFS-EN, EN ja HD asiakirjat
2. SFS standardit, jotka vastaavat IEC standardeja
3. IEC standardit ja CEE julkaisut
4. Muut SFS standardit. (5, s. 8.)

Jakeluverkon jännitteelle ja taajuudelle on standardi SFS-EN 50160. Kyseinen standardi antaa vaatimukset pien- ja keskijänniteverkkojen sähkönlaadulle. Alue- ja siirtoverkkojen sähkölaadulle ei ole standardia, mutta Fingrid Oyj on asettanut 110 kV:n jännitteelle omat vaatimuksensa. Standardissa IEEE 1159 luokitellaan jännitekatkokset, jännitekuopat ja ylijännitteet, kuten taulukossa 5 on esitetty. (6, s. 454.)

TAULUKKO 5. IEEE 1159:n luokittelu katkokseille, kuopille ja ylijännitteille (7, s. 21)

| Luokka | Tyyppi | Tyypillinen kesto | Tyypillinen suuruus xU_n |
|---------------|--------------------|-------------------|----------------------------|
| Hetkellinen | Kuoppa (sag/dip) | 0,5–30 sykliä | 0,1–0,9 |
| | Ylijännite (swell) | 0,5–30 sykliä | 1,1–1,8 |
| Lyhytaikainen | Katkos | 0,5–3 sekuntia | < 0,1 |
| | Kuoppa | 0,5–3 sekuntia | 0,1–0,9 |
| | Ylijännite | 0,5–3 sekuntia | 1,1–1,8 |
| Tilapäinen | Katkos | 3 s–1 min | < 0,1 |
| | Kuoppa | 3 s–1 min | 0,1–0,9 |
| | Ylijännite | 3 s–1 min | 1,1–1,8 |

Vaihtosähköjärjestelmän vikavirtalaskentaa käsittelee standardi IEC 60909-0:2001: *Short-circuit currents in three-phase a.c. systems*. Tässä standardissa lasketaan vikavirrat laitevalmistajan antamiin arvoihin pohjautuen. Tällaisia arvoja ovat mm. oikosulkureaktanssit. Laskennan tuloksia voidaan käyttää relesuojauksen asettelujen määrittämisessä. (8, s. 13 - 15.)

3 VOIMALAITOKSEN KRIITTISET KOMPONENTIT HÄIRIÖTILANTEISSA

Voimalaitoksessa on komponentteja, joiden toiminta voi häiriintyä komponentin sisäisen vian tai sähköverkon vian seurauksena siinä määrin, että sähköntuotanto keskeytyy. Sähköverkossa itsessään on vikaantuvia komponentteja ja sähköverkko on myös alttiina ulkoisille vikoja aiheuttaville tekijöille. Tässä luvussa käsitellään generaattoria ja muuntajaa sekä näiden säätöjärjestelmiä.

3.1 Generaattorit

Generaattori on kallein yksittäinen osa sähköverkossa. Se joutuu alttiiksi sähköisille ja termisille rasituksille. Pyörivänä koneena se joutuu myös alttiiksi mekaanisille rasituksille. Generaattoriin liittyy myös mekaaninen voimakone kuten vesi- tai höyryturpiini sekä magnetointilaitte. Kaikki nämä tuovat oman lisänsä generaattorin suojaukseen vikoja vastaan. Stabiiliuden säilyttämisen kannalta suojausten tarpeeton toiminta on kuitenkin estettävä. Suojien tarpeeton toiminta aiheuttaa myös kustannuksia ja heikentää sähkön laatua. (9, s. 141 - 142.)

Suojauksen suunnittelu alkaa häiriömekanismien tuntemisesta ja suojaustarpeista. Generaattorinviat voidaan jakaa sisäisiin ja ulkoisiin vikoihin. Generaattorin sisäisiä vikoja ovat mm. seuraavat:

- staattorin oikosulku (kaksi- tai kolmivaiheinen)
- staattorin ylivirta (jos virranmittaus on generaattorin tähtipisteen puolella)
- staattorin kierrossulku
- staattorin maasulku
- roottorin maasulku (yksin- tai kaksinkertainen)
- roottorin ylijännite, jännitteen nousu
- roottorin ylivirta
- roottorin kierrossulku.

Generaattorin ulkoiset viat voidaan erotella niiden esiintymispaikan mukaan seuraavasti.

Vikoja sähköverkossa:

- epäsymmetrinen kuorma
- epätahtikäyttö
- maasulku
- oikosulut
- ylivirta
- ylikuormitus
- Ali - ja ylimagnetointi (verkon kuormitustilanne)
- alitaajuus
- siirtoverkon häiriötilanteesta johtuva tehonheilahtelu.

Vikoja turbiinissa tai säätäjässä:

- takateho
- yli- ja alijännite
- yli- ja alitaajuus
- ylimagnetointi.

Muita vikoja:

- generaattorikatkaisijan vika
- laakerivirta
- jäähdytysjärjestelmän toimintahäiriöt
- tulipalo.

Virheet suojauksen suunnittelussa ja toteutuksessa lisää myös häiriöiden mahdollisuutta. Myös itse suojarieleet voivat vikaantumisen seurauksena aiheuttaa generaattorin irtoamisen verkosta. (9, s. 141 - 142.)

3.2 Tehomuuntajat

Muuntajavikoja tapahtuu vähemmän kuin yksi sataa muuntajavuotta kohden. Muuntajavikoja aiheuttavat yllämpö, likainen muuntajaöljy, osittaispurkaukset eristyksessä, ilmastolliset ylijännitteet sekä kytkentäyllijännitteet. Muuntajan ulkopuoliset oikosulut aiheuttavat mekaanisia voimia käämeihin. Muuntajavian sattuessa ovat kuitenkin vauriot yleensä pahoja ja niistä aiheutuu pitkiä ja kalliita keskeytyksiä sähköjakeluun. Täten muuntajan suojaus ja kunnonvalvonta ovat tärkeitä vaurioiden minimoimiseksi. Muuntajan sähköisiä vikoja ovat

- ylivirta
- erovirta
- käämi- ja kierrossulku
- maasulku
- ylikuormitus
- ylijännite.

Muuntajan vikoja vastaan suojaudutaan myös mekaanisilla suojalaitteilla. Tällaisia suojalaitteita mm. ovat

- kaasurele
- käämikytkinsuoja (virtausrele, ylipainerele)
- ylipainesuoja (muuntajan säiliö sekä käämikytkimen säiliössä)
- kosketinlämpömittari
- öljynpinnanvalvontamittari
- jäähdytyspuhaltimet ja niiden valvontalaitteet.

Muuntajasuojaus kattaa sähköisten suojausten osalta laitteet, jotka rajoittuvat ylä- ja alajännitepuolien virtamuuntajien väliin. Muuntajan käämikytkimeen liittyy usein jännitesäätäjä, joka huolehtii siitä, että muuntajan toisiojännite pysyy vaadituissa rajoissa. Vikaantuessaan jännitesäätäjä voi aiheuttaa jopa häiriön sähköjakeluun. (9, s. 189 - 190.)

3.3 Voimalaitoksen säätöjärjestelmät

Voimalaitoksen säätöjärjestelmien pitää täyttää VJV2013-vaatimukset. Voimalaitoskoneistolla on pääsääntöisesti kahdenlaisia säätöjärjestelmiä: tehonsäätö- ja jänniteensäätöjärjestelmät. Nämä

säätöjärjestelmät kytkeytyvät taajuudensäätöön ja loistehonsäätöön siten, että pätötehoa säädetään taajuuden avulla ja jännitettä loistehon avulla. Säätöjärjestelmillä pyritään pitämään sähkön kulutuksen ja tuotannon välillä tasapainotila ja tukea näin sähköjärjestelmän stabiiliutta. (6, s. 358 - 378.)

Säätöjärjestelmiä voi olla useita vaihtoehtoisia voimalaitoksen eri käyttötilanteita varten. Esimerkiksi paperitehtaan voimalaitoksella voidaan tehdä pelkästään sähköä, kun tehdas on huolto- seisakissa. Säätöjärjestelmä voi olla myös yhdistettyjärjestelmä, missä jokainen säätötoiminto voidaan toteuttaa omalla säätimellä mutta ne ohjaavat kuitenkin samaa servoventtiiliä. (10, s. 154 - 157.)

3.3.1 Generaattorin jännitteensäätö

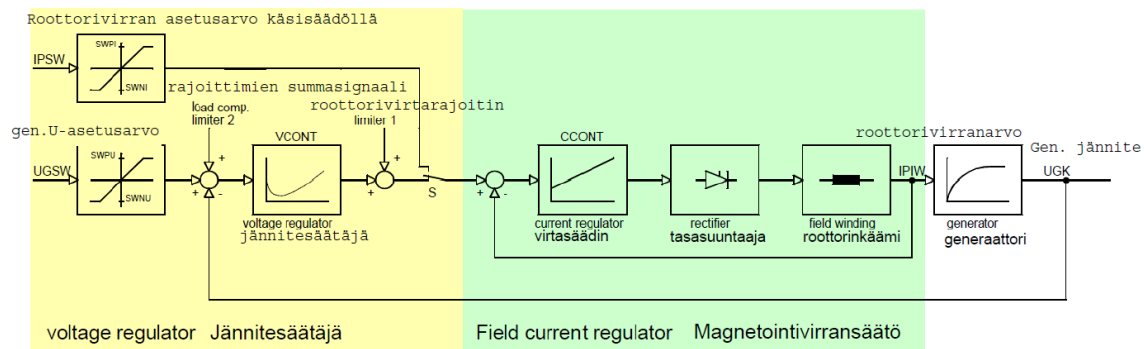
Jännite on paikallinen suure, joten sitä on säädettävä paikallisesti. Jännitesäädön tarkoituksena on pitää sähkönlaatu hyvänä, pitää yllä käyttövarmuutta, välttää yli- ja alijännitteitä ja siirtää sähköä edullisesti minimoimalla häviöt. Generaattorin vikatilanteissa puolestaan vaaditaan jännitesäätäjältä generaattoria suojaavia toimia. (6, s. 374 - 375.)

Käynnistyksen aikana tahdistinlaite ohjaa jännitesäätäjällä generaattorin jännitteen saman suuruiseksi verkon jännitteen kanssa, ennen kuin generaattorin katkaisija ohjataan kiinni. Kun jännitteet ovat saman suuruiset, ei generaattorin loistehossa esiinny piikkiä verkkoon kytkeytymisen hetkellä. Loistehopiikki aiheutuu jännite-erosta verkon ja generaattorin jännitteen välillä. (6, s. 374 - 375.)

Jännitesäätäjistä voidaan erottaa kaksi kokonaisuutta: säätö- suojaus- ja rajoitintoiminnot sisältävä osa sekä magnetointiosa, jossa magnetointivirta ja jännite muutetaan generaattorille sopiviksi virraksi ja jännitteeksi. Nykyisin käytetään paljon staattista magnetointilaitetta, jossa magnetointiosa on toteutettu tehoelektronikan komponenteilla. (11, s. 103 - 108.)

Magnetointivirran suuruutta muuttamalla saadaan generaattorin napajännitteen suuruus muuttamaan. Generaattorin ollessa verkossa magnetointivirtaa muuttamalla saadaan muutettua gene-

raattorin syöttämän loistehon suuruutta. Staattisen magnetointilaitteen automaattinen jännitesäätäjä (AVR) säätelee tyristorireiden sytytyskulmaa pitääkseen generaattorin napajännitteen vakiona. Kuvassa 4 on staattisen magnetointilaitteen jännitesäätäjän lohkokaavio. (11, s. 103 - 108.)



KUVA 4. Staattisen magnetointilaitteen jännitesäätäjän lohkokaavio (12, s. .7)

Generaattoreiden PQ-diagrammi antaa loistehon suurimmalle ja pienimmälle raja-arvolle. Pienin raja-arvo määräytyy generaattorin stabiiliusrajan mukaan tai staattorin ja roottorinpäätyjen lämpenemisestä magneettikentän vaikutuksesta. Suurimman raja-arvon määrää roottorivirran suurin arvo. (6, s. 374 - 375.)

3.3.2 Muuntajan jänniteensäätö

Voimalaitoksen keskijänniteverkon jännitetasoa ja loistehotasapainoa voidaan säätää muuntajan käämikytkimellä tai väliottokytkimellä. Lisäksi kytkinlaitoksilla voi olla kondensaattoriparistoja tähän tarkoitukseen.

Muuntajan jänniteensäätö tapahtuu säätämällä muuntajan muuntosuhdetta käämikytkimen avulla. Yläjännitekäämin johdinkierroslukua muutetaan, koska virta on yläjännitepuolella pienempi kuin alajännitepuolella. (6, s. 376 - 378.)

Käämikytkin on yleensä varustettu myös automaattisella jänniteensäätäjällä, jolloin haluttu jännitetaso pidetään automaattisesti vakiona. Käämikytkimellä voidaan muuntosuhdetta muuttaa noin +/- 15 %. Käämikytkimen jänniteensäätäjään vaaditaan säädettävästä kohteesta vähintään yhden pääjännitteen mittausta ja kaksi lähtökosketinta käämikytkimen ohjaamista varten. (6, s. 376 - 378.)

Käämikytkimen jännitteensäätäjässä voi olla suojaustoimintoja kuten alijännitelukitus, ylivirtalukitus ja ylijännitteen havaitsemistoiminto. Alijännitelukitus estää käämikytkimä toimimasta, jos jännite on liian alhainen säädettäväksi. Tällainen tilanne voi aiheutua esimerkiksi viallisesta jännitemittauspiiristä tai ylivirtatilanteesta. Ylivirtalukitusta käytetään estämään käämikytkimen toiminta muuntajan ylivirtatilanteesta ja näin estämään käämikytkimen mahdollinen vaurioituminen. Jos halutaan käyttää ylivirran lukitusta, pitää johdottaa vähintään yhden vaiheen virta jännitesäätäjälle. Ylijännitetilanteessa jännitesäätäjä antaa nopean alasohjauksikäskyn käämikytkimelle, kunnes jännite on laskenut alle määritetyn raja-arvon. (6, s. 376 - 378.)

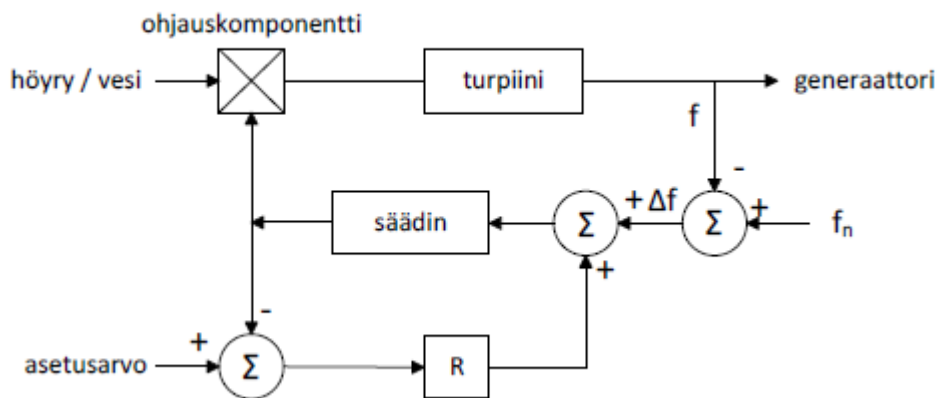
Käämikytkimellä tapahtuva jännitesäätö on hidas suurissa jännitemuutoksissa, koska käämikytkimen askeltaminen portaalta toiselle vie aikaa. Yleensä ohjauspulssi käämikytkimelle annetaan 30 - 60 sekunnin kuluttua siitä, kun jännitesäätäjä havahtuu. (6, s. 376 - 378.)

Väliottokytkimiä käytetään pienjännitejakelumuntajissa (20 / 0,4 kV) kuten voimalaitosten omakäyttömuuntajissa. Väliottokytkimen asentoa ei voida muuttaa muuntajan ollessa käytössä, joten se ei sovellu automaattiseen jännitesäätöön. Väliottokytkimellä voidaan säätää jännitettä noin +/- 5 %. (6, s. 376 - 378.)

Voimalaitosten omakäytön keskuksiin on usein asennettu automaattisesti kytkeytyviä kondensaattoriparistoja. Kondensaattoriparistolla tehdään kapasitiivista loistehoa kompensoimaan esimerkiksi vaihtosähkömoottoreiden aiheuttamaa induktiivista loistehoa. Loistehon määrä halutaan pitää mahdollisimman pienenä, koska loistehon siirtäminen kuormittaa sähköverkkoa. Tästä syystä kannattaa myös loisteho kompensointi tehdä mahdollisimman lähellä loistehon kulutuspiistettä. (10, s. 298.)

3.3.3 Turpiininsäätö

Turpiininsäätäjä reagoi verkon taajuuden muutoksiin säätämällä turpiinin tuottamaa tehoa. Kuva 5 esittää turpiininsäätäjän periaatteellista toimintakaaviota. Säätimen sisäänmeno on erosuure, joka muodostetaan taajuuserosta statiikasta. Statiikan säätö on hyvin merkittävä koneistojen yhteiskäytössä. Jos rinnan kytketyissä voimalaituskoneistoissa olisi turpiininsäätäjien statiikka esimerkiksi nolla, ei kuormituksen jako koneistojen kesken olisi stabiili, vaan toinen turpiini voisi kuormittua täysin ja toinen käydä tyhjäkäynnillä. (13, s. 150.)



KUVA 5. Turpiinisäätäjän periaatteellinen kaavio (14, s.16)

Turpiinisäätäjillä voi olla erilaisia käyttötiloja. Vesivoimalaitoksen turpiinisäätäjällä voi olla esimerkiksi normaali-, häiriö- ja saarekekäyttötila. Siirtymien käyttötilasta toiseen tapahtuu automaattisesti taajuusmittausten perusteella. Turpiinisäätäjä vaihtaa käyttötilasta toiseen, jos taajuusmuutos ja sen kesto täyttävät vaihtamiselle asetetut ehdot. (2, s. 35.)

Turpiinisäätäjän tehtävänä on ohjata myös voimalaitoskoneiston käynnistymistä ja tahdistusta sähköverkkoon. Turpiinisäätäjän tehtävänä on myös pysäyttää koneisto vakavissa häiriöissä. Sähköverkon häiriöissä, jossa voimalaitos saa irrota sähköverkosta, on turpiinisäätäjän tehtävänä hallitusti ohjata voimalaitos omakäytölle. (2, s. 38.)

Höyryvoimalaitoksen turpiininsäätö

Höyryvoimalaitoksen säätöjärjestelmiä ovat sähkötehon, kaukolämmön ja prosessihöyryn säätöjärjestelmät. Voimalaitoksen käyttäjä asettaa halutun sähkötehon, kaukolämmön tuotannon tai höyryntuotannon asetuksen. Asetusarvot määräytyvät sen mukaan, minkä tyyppinen laitos on kysymyksessä. (10, s. 154 - 157.)

Lähtökohtaisesti höyryvoimalaitoksen tehonsäätö perustuu kattilan tuottaman tuorehöyryn paineen ohjaamiseen. Säädön tehtävänä on päästää turpiiniin höyryä nimellisellä pyörimisnopeudella siten, että turpiinin synnyttämä vääntömomentti on yhtä suuri kuin generaattorin vääntömomentti. Turpiinin pyörimisnopeus on tärkein turpiinin säätösuureista. Tuorehöyryn paineen säätö jaetaan kahteen pääryhmään: kiinteän paineen säätöön ja liukuvan paineen säätöön. (10, s. 154 - 157.)

Kiinteän paineen säädössä säädin ohjaa polttoaineen ja palamisilman syöttöä kattilaan. Säädin seuraan höyrynpainetta ja vertaa sitä paineen asetusarvoon. Tällä säätötavalla pyritään pitämään tuotetun höyrynpaine vakiona. Samanaikaisesti säädetään turpiinin säätöventtiilillä generaattorin sähkötehoa tai turpiinille menevän höyrynpainetta. (10, s. 154 - 157.)

Liukuvan paineen säätö soveltuu suuriin, pääasiassa sähköä tuottaviin voimalaitoksiin. Tässä säätötavassa höyrynpaine muuttuu lineaarisesti kattilan tehon mukaan. Turpiinin säätöventtiili pidetään täysin auki ja sähkötehoa säädetään polttoaineen syöttöä muuttamalla. Jos säätöventtiiliä kuristetaan hieman, puhutaan ohjatusta liukuvan paineen säädöstä. Tällöin saadaan nopeampi säätö hetkellisiin generaattorin tehonmuutoksiin. (10, s. 154 - 157.)

Etupainesäätöä käytetään prosessihöyryn ja sähkön yhteistuotantovoimalaitoksissa. Etupainesäädöllä tarkoitetaan kattilalta tulevan höyryn paineen säätöä ennen turbiinin pikasulkuventtiilejä. Sitä säätämällä pyritään estämään kattilan sammuminen. Paineen säädön lisäksi ohjataan sähkö- tai lämpötehoa kattilan polttoainemäärää säätämällä. (10, s. 154 - 157.)

Ydinvoimalaitoksen säätötapa vastaa höyrylaitoksen kiinteän paineen säätöä. Siinä päänhöyrytukin painetta säädetään reaktorin tehoa muuttamalla turpiinin säätöventtiileiden ollessa vakioasennossa. Loviisan kaltaisen ydinvoimalaitoksen turpiinin ja reaktorin tehon säädössä käytetään neutronivuon säätöä ja painesäätöä. Neutronivuon säätöä käytetään käynnistyksen yhteydessä tai muissa poikkeusoloissa. Tällainen poikkeustila voi olla esimerkiksi reaktorintehon kasvaminen liian suureksi. Painesäätöä käytetään normaalissa ajotilanteessa. (10, s. 158.)

Kaasuturpiinivoimalaitoksen turpiininsäätö

Kaasuturbiinin tehoa säädetään polttoainemäärää säätämällä. Säätö suoritetaan mitattujen pyörimisnopeus, paine ja lämpötila-arvojen perusteella. Säätöjärjestelmän tehtäviä ovat turpiinin käynnistyminen ja pysäytys, pyörimisnopeuden hallinta normaalikäytöllä ja häiriöissä, turpiinin lämpötilan rajoittaminen ja ulostulotehon säätö. (10, s. 221.)

Vesivoimalaitoksen turpiininsäätö

Vesiturpiininsäätö perustuu pyörimisnopeuden ja tehon säätöön ohjaamalla turpiinin läpi menevän veden määrää. Turpiininsäätömenetelmä voi olla esimerkiksi sellainen, missä on kolme säätäjälohkoa ja digitaalinen kombinointi. Tällainen säätölogiikka on esimerkiksi Fortumin Utasen voimalaitoksen turpiininsäätäjissä.

Pääsäätäjä antaa teho- tai taajuusohjeen mukaisen johtopyöränasennon ohjearvon johtopyörän asemäsäätäjälle, joka säätää johtopyörän haluttuun asemaan. Juoksupyörän asemäsäätäjä säätää juoksupyörän digitaalisen kombinaattorin ohjaamaan asemaan. (15, s. 1 - 5.)

Koneiston ollessa kytkettynä sähköverkkoon tulee pätötehon asetusarvo joko pätötehon laitossäätäjältä, varaohjausjärjestelmästä tai käyttäjän valintana valvomojärjestelmästä. Pääsäätäjä käyttää mittausarvona taajuusmittauksia, jos generaattorin taajuus on 46 - 54 Hz ja taajuusmittaus on toimintakuntoinen. Muulloin pyörimisnopeustiedosta saatavaa mittausta käytetään taajuussäätäjän mittausarvona. Pyörimisnopeusmittausta käytetään esimerkiksi koneistoa käynnistettäessä ennen kuin generaattorissa on jännite. (15, s. 1 - 5.)

Turpiininsäätäjässä on neljä eri tilanteissa valittavat parametrit. Ensimmäiset parametrit ovat käytössä, kun generaattorikatkaisija on auki. Toiset parametrit ovat käytössä, kun turpiininsäätäjä on tehokäytöllä. Kolmannet parametrit valitaan, kun turpiininsäätäjä on häiriökäytöllä ja neljännet, kun turpiininsäätäjä on saarekekäytöllä. (15, s. 1 - 5.)

Turpiininsäätäjä omakäyttötilanteissa ja saarekekäytöllä

Saarekekäyttö tarkoittaa sitä, että voimalaitos on erotettuna verkosta ja sen tuottama sähkö käytetään voimalaitoksen laitteiden tarpeisiin tai syötetään tiettyä sähköverkon osaa. Sähköverkko voi tällöin muodostua joistakin teollisuuslaitoksista, asuntoalueista ja sähköverkkoon voi olla liittyneenä muita voimalaitoksia. Saarekekäytölle joudutaan sähköverkossa tapahtuvan häiriön seurauksena tai saarikäyttötilanne voi olla myös ennalta suunniteltu. (14, s.8.)

Saarekkeen taajuussäätöön pätevät samat periaatteet kuin yhteiskäytössäkin, mutta sähköverkon koko saarekkeessa on olennaisesti pienempi kuin normaalissa käyttötilanteessa. Pienessä verkossa on vähemmän generaattoreita, joten tahdissa pitävä voima on tällöin pienempi. Sähköverkon taajuus on tällöin herkempi tehonmuutoksille. (14, s.8.)

Taajuusstabiiliuden parantamiseksi saarekkeessa voidaan hyödyntää energiavarastoja, kuten akkuja, superkondensaattoreita tai vauhtipyöriä. Ennen kuin voimalaitoksen taajuussäätö alkaa vaikuttaa, alkavat energiavarastot syöttämään tehoa nopean vasteensa ansiosta. Hyötynä tästä on se, että tehoepätasapaino häiriön alussa pienenee, taajuuden muutosnopeus hidastuu ja kokonais-taajuuspoikkeama jää tällöin pienemmäksi. Energiavarasto voi jatkaa tehon syöttöä myös voimalaitosten taajuussäädön aktivoituttua, jolloin se tukee taajuuden palautumista häiriön jälkeen. (16, s. 7.)

4 SÄHKÖNSIIRTOVERKON HÄIRIÖT

Sähkösiirtoverkot ovat pääsääntöisesti avojohtoja ja tämänkin tähden alttiina erilaisille vioille. Niiden pituudet vaihtelevat muutamasta kilometristä 400 km:in asti. Maakaapeleita käytetään lähinnä kaupunkien ja teollisuuslaitosten verkoissa. Maakaapeleita käytetään 110 kV:n johdoista pienempiin jännitteisiin päin. Tällöin pituudet ovat yleensä joitain satoja metrejä.

400 kV:n johdot ovat rengasjohtoja, kun taas 110 kV:n verkossa on myös säteittäisjohtoja. Kanta-verkko muodostuu 400 kV:n, 220 kV:n ja 110 kV:n johdoista. Jakeluverkkoon kuuluu myös 110 kV:n johtoja, mutta pääsääntöisesti jakeluverkko käsittää alle 110 kV:n johdot. Tässä luvussa käsitellään sähköverkkojen vikojen aiheuttajia ja vikojen vaikutuksia sähköntuotannolle. (9, s. 253 - 258.)

4.1 Sähköverkoissa häiriöitä aiheuttavat tekijät

Avojohtoilla viat ovat pääsääntöisesti vaiheiden tai vaiheen ja maan välisiä valokaarivikoja. Näitä vikoja aiheuttavat yleensä luonnonilmiöt, rakenneviat tai vieraan esineen joutuminen johtoon. Salama aiheuttaa moninaisia vikoja: se voi iskeä suoraan vaihejohtimeen, ukkosjohtimen tai pylvään kautta takaiskuna vaihejohtimeen. Takaisku tapahtuu yleensä yhteen johtimeen, jolloin syntyy yksivaiheinen maasulku. Kun salama iskee suoraan vaihejohtimeen, saa se aikaan syöksyaaltojännitteen. Syöksyaaltojännite lähtee iskukohdasta molempiin suuntiin pitkin johtoja ja voi rikkoa esimerkiksi eristimiä ja katkaisijapilareita. Samalla voi aiheutua yksi- tai useampivaiheinen maasulku. (9, s. 253 - 258.)

Myrsky voi aiheuttaa kaksivaiheisia oikosulkuja, jos tuulen voimasta kaksi vaihetta osuu yhteen, tai yksivaiheisia maasulkuja, jos johdin osuu pylvääseen tai puu kaatuu johdon päälle. Talvella jää- ja lumikuormat voivat aiheuttaa johtimien katkeamisen ja saada aikaan yksivaiheisen maasulun. Lumikuormat voivat kaataa myös puita johtojen päälle ja aiheuttaa myös yksivaiheisen maasulun. Rakennevikoja voi esiintyä kaikissa sähköverkon komponenteissa: pylväs voi katketa, harus pettää, eristinketju voi katketa, mittamuuntajiin ja katkaisijoihin voi tulla eristysvikoja. Kosteus ja eristinketjujen likaisuus voi aiheuttaa yksivaiheisia maasulkuja. (9, s. 253 - 258.)

Ihminen omalla toiminnallaan voi aiheuttaa myös johtovikoja: työkone voi osua johtoon tai kaataa pylvään, purjevereen masto voi osua johtoon. Käyttötoimenpiteinä tehtävissä johtokytkennoissä voidaan jännite kytkeä vahingossa työmaadoitettuun johtoon. Ilkivalta on myös yksi tekijä vian aiheuttajana. Näistä aiheutuu yleensä suuriresistanssinen yksivaiheinen maasulku. (9, s. 253-258.)

Kaapeliverkoissa tyypillisiä vikoja ovat kaapelipäätteiden pettäminen tai kaapelin ollessa maahan upotettu, kaivinkone voi katkaista sen. Näistä aiheutuu yleensä yksivaiheisia maasulkuja. Kahden yksivaiheisen maasulun eli kaksoismaasulun esiintyminen yhtä aikaa verkon eri paikoissa voi aiheuttaa vakavan vaarajännitetilanteen. Kaksoismaasulkuja esiintyy lähinnä maasta erotetussa verkossa, ei niinkään suoraan maadoitetussa verkossa, jossa on nopea maasulun laukaisuaika. (9, s. 253 - 258.)

4.2 Sähköverkon vikojen vaikutus sähköntuotannolle

Sähköverkon viat aiheuttavat suuren riskin voimalaitoksen irtikytkeytymiselle verkosta. Mitä suurempia irtikytkeytyvät voimalaitokset ovat, sitä suuremman häiriövaaran ne aiheuttavat muulle sähköverkolle. Erilaisissa vioissa sallitaan erilaiset irtikytkeytymisajat samalla stabiiliusrajalla. Kolmivaiheinen oikosulku on kriittisin, kun taas maasululle sallitaan paljon pitemmät irtikytkeytymisajat. (9, s. 253 - 258.)

Stabiiliusraja määräytyy vikatyypin ja -ajan mukaan. Stabiiliusraja määräytyy ohimenevien vikojen pikajälleenkytkentäajan lisäksi koko ajaksi käyttöön jäävien johtojen kuormituksen mukaan, kun viallinen johto kytketään irti joko pysyvästi tai pikajälleenkytkennän ajaksi. Tämän lisäksi stabiiliuteen vaikuttaa vian aikana pienentynyt jännite, mikä pienentää siirtokykyä vian aikana. Maasulun kestoajkojen pituudet määräytyvät vaarajännitteiden mukaan, ei stabiiliuden mukaan. (9, s. 253 - 258.)

Vikaantuvia komponentteja sähköverkoissa ovat itse johdot tai kiskot ja niiden tukirakenteet, mittamuuntajat, katkaisijat ja erottimet. Myös sähköverkon toisiokojeet, kuten suojarieleet voivat aiheuttaa häiriöitä vikaannuttuaan. (9, s. 253 - 258.)

4.3 Sähköverkon suojaus

Sähköverkon suojauksessa käytetään pääsuojana distanssirelettä, koska se on helppo tapa toteuttaa luotettava, edullinen ja selektiivinen oikosulku- ja maasulkusuojaus rengasverkoissa. Rengasverkon suojauksessa pyritään siihen, että vikaa lähinnä olevat katkaisijat avautuvat. Distanssirele mittaa sijoituspaikkansa ja vikapaikan välisen impedanssin sijoituspaikassaan esiintyvien virtojen ja jännitteiden avulla. Distanssirele tunnistaa vikapaikan etäisyyden lisäksi sen suunnan. Nopeimmat distanssireleet pystyvät mittaamaan yhden vaihtovirtajakson aikana (20 ms) vikapaikan impedanssin ja antamaan laukaisukäskyn. Kun tähän lisätään katkaisijan toiminta-aika, saadaan vika- paikka erotettua nopeimmillaan noin 100 ms:n kuluessa vian syntymisestä.

Muita johtosuojauksessa käytettäviä suojauslaitteita ovat

- heilahtelusalparele
- ylivirtasalparele
- nollavirtarele
- maasulunsuuntarele
- jälleenkytkentärele
- tahdissaolonvalvontarele (9, s. 57, 261).

4.4 Sähkötuotannon suojaaminen sähköverkon vikoja vastaan

Tässä luvussa käsitellään sähköverkon vikoja, joilla on vaikutusta sähköntuotantoon. Lisäksi kerrotaan miten nämä sähköverkon viat näkyvät sähköntuotannossa ja mitkä generaattorin suojaustoiminnot suojaavat voimalaitoskoneistoa sähköverkon vikoja vastaan.

4.4.1 Sähköverkon viat sähköntuotannossa

Kanta- ja jakeluverkon viat voivat näkyä sähköntuotannossa jännitealenemana (alijännitteenä), jännitekuoppa, ylijännitteenä, epäsymmetriana ja ali- tai ylitaajuutena. Jännitekuoppa on lyhyen aikaa kestävä alijännitetilanne. Jännitekuoppa kestää yleensä puolesta jaksosta eli 10 ms:sta yhteen minuuttiin. Jännitteen suuruus vaihtelee jännitekuopassa yli 1 %:sta 90 %:iin nimellisjännitteestä. Jännitealenemalla tarkoitetaan yli 90 %:n jännitetasoa, ja se voi kestää enemmän kuin minuutin

ajan. Jännitekuoppien aiheuttajana ovat yleensä sähköverkossa tapahtuvat oiko- ja maasulut. Suurin osa jännitekuopista kestää alle sekunnin, koska relesuojaus erottaa oikosulkuvat verkosta alle sekunnin kuluttua vian syntymisestä. Siirtoverkossa oikosulut erotetaan yleensä 100 ms:n aikana. Standardit eivät määrittele raja-arvoja jännitekuoppien kestolle tai niiden määrälle. (6, s. 440.)

Jännitekuopat näkyvät vikapaikan ulkopuolella. Mitä suuremmissa jänniteportaassa jännitekuoppa esiintyy, sitä laajemmalla alueella se näkyy. Tämä johtuu siitä, että jännitekuoppa näkyy alemmissa jänniteportaissa, kun taas esimerkiksi 110 kV:n järjestelmässä oleva jännitekuoppa ei välttämättä näy 400 kV:n jännitteessä. (6, s. 440.)

Symmetrinen jännitekuoppa syntyy kolmivaiheisessa oikosulussa ja epäsymmetrinen muissa oikosuluissa ja maasuluissa. Jännite-epäsymmetria tarkoittaa kolmivaihejärjestelmässä sitä, että vaihejännitteiden tehollisarvot tai niiden väliset kulmat eivät ole samat. epäsymmetrian mittarina käytetään epäsymmetriakerrointa, mikä on vastakomponentin tai nollakomponentin suhde myötäkomponenttiin. (6, s. 440 - 441.)

Jännite-epäsymmetria siirtyy muuntajan läpi. Tähti-kolmiokytkennässä olevan muuntajan (esimerkiksi YNd11) läpi ei nollajännite kuitenkaan siirry. Muuntajan kolmioon kytketty käämi ei ole yhteydessä maahan, ja tämä estää nollajännitteen siirtymisen muuntajan läpi. epäsymmetria jää alajännitepuolella tämän seurauksena vähäiseksi eikä näy kuluttajalle. (6, s. 440 - 441.)

Lyhytaikaiset ylijännitteet aiheutuvat pääasiassa salamoiden synnyttämistä ilmastollisista ylijännitteistä tai kytkentäylijännitteistä, joita aiheuttavat kompensointikondensaattoreiden kytketyminen verkkoon. Kytkentä synnyttää lähes 200 prosentin suuruisen ja taajuudeltaan 350 - 550 Hz jännitteen. (6, s. 439.)

Ali- ja ylitaajuushäiriöt verkossa johtuvat tehotasapainon muutoksista, joita aiheuttavat kuormituksen irtoaminen sähköverkosta (ylitaajuus) tai kuormituksen lisääntymisestä esimerkiksi oikosulun seurauksena (alitaajuus). (6, s.439.)

Teholuokan 4 voimalaitoksen generaattorin on tuettava sähköverkkoa häiriön aikana vähintään 0,25 sekunnin ajan (VJV2013). Tänä aikana johtosuojaus yrittää kytkeä vikapaikan irti verkosta. Sähköverkon oikosulku- ja maasulkuvioissa generaattoria suojaavat ylivirtasuoja, napaoikosulkusuoja, ali-impedanssisuoja. Generaattorin syöttämä oikosulkuvirran suuruus riippuu siitä, kuinka

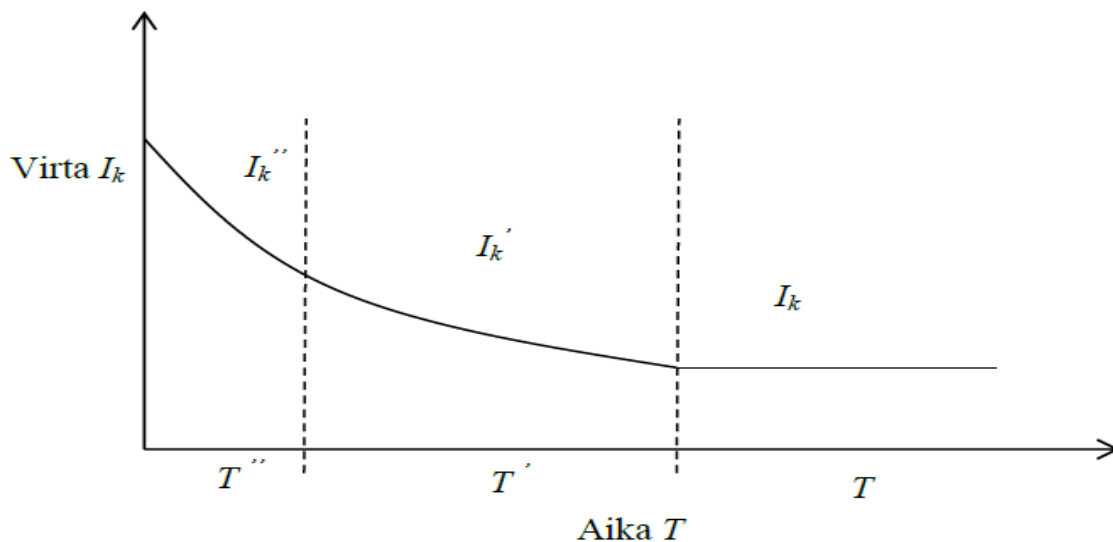
kaukana oikosulku sijaitsee generaattorista. Sähköverkossa tapahtuvan vian vikavirtoja pienentävät muuntajien ja johtojen reaktanssit. Nämä on laskettava yhteen generaattorin reaktanssien kanssa. (17, s. 376 - 377.)

4.4.2 Generaattorin suojaus sähköverkon vioissa

Generaattorista voidaan määrittää kolme erilaista reaktanssia ja täten kolme erilaista oikosulkuvirtaa:

- alkutilan reaktanssi
- muutosvaiheen reaktanssi
- jatkuvan tilan reaktanssi.

Oikosulun alkuvaiheessa on generaattorin syöttämä vikavirta huipussaan. Virta alkaa heti ensisysäyksen jälkeen pienetä kohti jatkuvan tilan oikosulkuvirtaa. Jatkuvan tilan oikosulkuvirta voi olla pienempi kuin generaattorin nimellisvirta. Kuvassa 6 on esitetty oikosulkuvirran luonne. Liitteessä 2 on uuden generaattorin käyttöönoton yhteydessä tehdyn sysäisoikosulkukokeen tulos. (8, s. 33.)



KUVA 6. Oikosulkuvirran käyttäytyminen ajan funktiona: oikosulkuvirta pienenee alkutilan oikosulkuvirrasta I_k'' muutostilan oikosulkuvirran I_k' myötä jatkuvan tilan oikosulkuvirraksi I_k (8, s.33)

Jos jatkuvan oikosulkutilan virta on pienempi kuin generaattorin nimellisvirta, ei ylivirtarele tällöin havahdu. Tilanne on kuitenkin epänormaali ja generaattori pitää irrottaa verkosta. Tällaisessa

viassa toimii napaoikosulkusuoja, joka muodostuu ylivirta- ja alijännitesuojasta. Toiminta on sellainen, että ensin ylivirtarele havahtuu oikosulun seurauksena ja jos samaan aikaan ilmenee alijännite, laukaistaan asetellun ajan kuluessa generaattori eroon verkosta. (9, s. 142 - 145.)

Lähellä generaattoria tapahtuvassa viassa toimii myös ali-impedanssisuoja. Ali-impedanssisuoja mittaa myös generaattorin virtaa ja jännitettä kuten napaoikosulkusuojakin. Vikatilanteessa releen mittaama virta kasvaa ja jännite pienenee, eli releen mittaama impedanssi pienenee alle asetellun impedanssiarvon. Rele asetellaan toimimaan generaattorin tahtireaktanssia pienemällä arvolla. Kolmivaiheinen oikosulkuvirta I_k lasketaan kaavalla 1. (9, s. 142 - 145.)

$$I_k = \frac{c \times U_n}{\sqrt{3} \times Z_k} = \frac{c \times U_n}{\sqrt{R_k^2 + X_k^2}} \quad \text{KAAVA 1}$$

missä c on jännitekerroin, katso Liite 3
 U_n on nimellisjännite
 Z_k on oikosulkuimpedanssi
 R_k on oikosulkuresistanssi
 X_k on oikosulkureaktanssi

Generaattorin ylijännite voi johtua sähköverkon kuorman vähenemisestä. Ylijännite huonontaa generaattorin staattorikäänin eristeitä ja saa aikaan staattorinlevypaketin kuumenemisen. Ylijännitettä vastaan suojaudutaan ylijännitereleellä. (9, s.153 - 155.)

Sähköverkon jännitteen nousu voi aiheuttaa generaattorilla epätahtiin joutumisen tai alimagnetointitilan. Vika aiheuttaa staattorille ja roottorille virta- ja jännitesykäyksiä. Suurten generaattoreiden alimagnetointitilaan joutuminen voi vaarantaa sähköverkon stabiiliuden. Vikaa vasten suojaudutaan alimagnetointi- ja takatehoreleellä. (9, s.162 - 166.)

Ali- ja ylitaajuus johtuvat niin ikään sähköverkon kuormituksen muutoksista. Ylitaajuus ei ole niin kriittinen voimalaitoskoneiston kannalta kuin alitaajuus. Alitaajuus vaikuttaa turbogeneraattoreilla lähinnä turbiineihin. Turbiinin siivet lämpenevät alitaajuudella. Toisaalta alitaajuus aiheuttaa staattorin levypaketin lämpenemistä. Taajuutta valvotaan taajuusreleellä. Liitteessä 4 on erään generaattorin valmistajan määrittämät suojausasettelut generaattorille. (9, s. 155 - 156.)

5 STABIILIUS HÄIRIÖTILANTEISSA

Sähköverkon tilaan kohdistuu koko ajan muutoksia, sillä kuormat, tuotanto ja siirtotilanteet muuttuvat jatkuvasti. Sähköverkko on epälineaarinen ja dynaaminen järjestelmä. Jos sähköverkon taajuus ja jännite pysyvät hyväksytyissä rajoissa ja tahtigeneraattorit tahdissa, on verkko stabiilissa tilassa. Stabiiliuden määritelmä on seuraava: "voimajärjestelmän stabiilius tarkoittaa sitä, että voimajärjestelmä pystyy tietyssä käyttötilanteessa saavuttamaan siihen kohdistuneen häiriön jälkeen tasapainotilan ja järjestelmä pysyy suurimmaksi osaksi ehjänä". Jos esimerkiksi yksi generaattori irtaota verkosta häiriön seurauksena, voi muu järjestelmä silti olla stabiili. (6, s. 216 - 217.)

Stabiilius jaetaan kolmeen osaan

- kulmastabiilius
- jännitestabiilius
- taajuusstabiilius.

5.1 Kulmastabiilius

Kulmastabiiliusongelma on kysymyksessä silloin, kun sähköverkon ja siinä olevien generaattoreiden jännitteiden väliset vaihekulmaerot kasvavat liikaa. Tällöin alkavat jännitteidenkulmat heilua toisiaan vastaan. Generaattoreiden tuottama loisteho ei riitä pitämään verkon jännitteitä hyväksyttävällä tasolla. Kulmastabiilius on vaarassa sähköverkon vian jälkeen tai suuren tehonsiirron ja verkon heikon vaimennuksen takia. Generaattoreilla kulmastabiilius riippuu siitä, pystyykö generaattori palauttamaan tasapainon mekaanisen ja sähköisen tehon välillä verkon muutosten jälkeen. (6, s. 216 - 245.)

Generaattorin säätöjärjestelmä vaikuttaa myös stabiiliuteen. Tärkeimpinä ovat jännitteensäätö ja mahdollisesti siihen integroitu lisästabilointisäätö. Siirto johdolla pätö- ja loistehon siirtoon vaikuttaa johdon impedanssi, jossa merkitsevä on reaktanssi. Johdolla voidaan siirtää pätötehoa vain, jos johdon päiden jännitteiden välillä on kulmaeroa. Teho muuttuu sinimuotoisesti kulmaeron muuttuessa. Pätötehon siirtokapasiteetti riippuu johdon reaktanssista ja jännitteiden itseisarvoista. Mitä

isompi on reaktanssi, sitä pienempi on siirtokapasiteetti. Mitä pitempi johto, sitä pienempi stabiiliuden määräämä siirtokapasiteetti on. Käytännössä raja johdonpäiden väliselle kulmaerolle on 30 astetta. Tällöin loisteho on noin puolet siirretystä pätötehosta. (6, s. 216 - 245.)

5.2 Jännitestabiilius

Jännitestabiilius on vaarassa silloin, kun jännitteet eivät pysy vakaina häiriön jälkeen vaan joko laskevat tai nousevat liikaa tai jäävät heilahtelemaan. Jännitestabiilius liittyy kuormiin ja niiden kuluttamaan tai tuottamaan loistehoon. Mitä vähemmän verkon alueella on generaattoreita tuottamassa loistehoa häiriön jälkeen, sitä suurempi vaara on menettää stabiilius kyseisessä verkon osassa. Samoin, jos verkossa on paljon tahtigeneraattoreita, voi jännitestabiilius olla vaarassa, koska generaattorit kuluttavat paljon loistehoa verkon maa- ja oikosuluissa. (6, s. 246 - 253.)

Jännitestabiilius riippuu järjestelmän, kuorman, säätöjen ja suojausjärjestelmien ominaisuuksista. Järjestelmän epälineaarinen vaste häiriöön täytyy huomioida, kun tutkitaan jännitestabiiliutta. Tämä tarkoittaa, että täytyy ottaa huomioon moottorit, käämikytkimet sekä generaattoreiden roottorivirtarajoitukset. Usein häiriöissä tapahtuu siten, että menetetään kulma- sekä jännitestabiilius: jännitteet romahtavat ja generaattorit menettävät tahtikäynnin. Jänniteromahdus voi johtua pelkästään siitä, että tehonsiirrot johdolla kasvavat liikaa ja loistehon kulutus kasvaa. (6, s. 246 - 253.)

5.3 Taajuusstabiilius

Taajuusstabiilius menetetään, jos voimajärjestelmä ei kykene pitämään vakaata taajuutta kuormituksen tai tuotannon muutoksen jälkeen. Taajuusstabiilius on vaarassa silloin, jos tuotannon ja kulutuksen välillä on merkittävä epätasapaino. Taajuusstabiiliuden yhteydessä käytetään termejä piensignaalistabiilius ja suursignaalistabiilius. Piensignaalistabiilius on pienten muutosten tai häiriöiden aiheuttamaa stabiiliuden muutosta. Tällaisia muutoksia tai häiriöitä aiheuttavat kuorman muutokset tai johtokytkennät. Suursignaali muutoksia aiheuttavat isojen generaattoreiden irtoamiset verkosta, oikosulut ja maasulut verkossa. (6, s. 254 - 256.)

Taajuudenmuutosten jälkeen lisätään tai vähennetään generaattoreiden tehoa tai irrotetaan kuormaa, jotta saadaan tasapaino pysymään verkossa. Jos tämä ei onnistu, voi verkko romahtaa. Taa-

juusromahdus on ilmiö, jossa verkon taajuus on laskenut ensin jonkun vian seurauksena eikä taajuuden laskua saada hallintaan. Alitaajuus on verkon kannalta kriittisempi kuin ylitaajuus, koska verkosta on helpompi irrottaa tuotantoa kuin lisätä sitä. Järjestelmän taajuus laskee sitä nopeammin mitä vähemmän siinä on liike-energiaa. Liike-energia on sitoutunut generaattoreiden ja moottorien pyöriin massoihin sekä muihin pyöriin reserveihin. (6, s. 254 - 256.)

Alitaajuus on turbogeneraattoreille erityisen vahingollista. Turpiinin siivet vaurioituvat, jos verkon taajuus laskee alle 47 Hz:n, ja verkkoon ajetaan edelleen tehoa. Pohjoismaisessa verkossa isot lämpövoimalaitokset irrotetaan verkosta, jos taajuus laskee alle 47,5 Hz. Jos verkosta irtoaa useita voimalaitoksia, voi seurauksena olla taajuusromahdus. (6, s. 254 - 256.)

5.4 Stabiiliuden parantamismahdollisuuksia

Verkon stabiiliuden parantaminen lisää verkon siirtokapasitanssia ja käyttövarmuutta. Verkon käyttö pitää suunnitella siten, että se kestää pienet muutokset sekä ennustettavat tapahtumat, kuten oikosulkujen vaikutukset menettämättä stabiiliutta. Verkon kyky säilyä stabiilina häiriön jälkeen riippuu sen tilasta ennen häiriötä, säätöjärjestelmistä, verkon komponenteista ja itse häiriön vakavuudesta. (6, s. 257 - 258.)

Verkon tilaan vaikuttavat siirron suuruus ja kytkentätilanne. Verkon komponentteja ovat generaattoreiden, muuntajien ja johtojen reaktanssit. Säätöjärjestelmiä puolestaan ovat generaattoreiden ja muuntajien jännitesäätäjät, lisästabilointisäädöt sekä tasasähköyhteyksien säädöt. Verkon stabiiliutta voidaan parantaa kaikilla sellaisilla tavoilla, joilla voidaan pienentää siirtoreitin reaktanssia. Pitkät siirtojohdot (isot reaktanssit) heikentävät jännite- ja kulmastabiiliutta. Reaktansseja voidaan pienentää rakentamalla rinnakkaisia johtoja sekä sarjakompensoinnilla. Johtojen jännitteen nosto parantaa stabiiliutta. Jännitettä voidaan nostaa muun muassa rinnan- ja sarjakompensoinnilla. (6, s. 257 - 258.)

Vikojen nopea irtikytkentä parantaa myös stabiiliutta. Ohimenevä johtovika poistuu yleensä pikajälleenkytkennän avulla. Yksivaiheisten vikojen yksivaiheinen jälleenkytkentä parantaa yleensä verkon stabiiliutta, koska tällöin generaattori syöttää edelleen verkkoon tehoa kaksivaiheisesti. Generaattoreiden nopea jännitteensäätö parantaa suursignaalistabiiliutta mutta voi heikentää vaimennusta. (6, s. 257 - 258.)

Suurjännitteisten tasasähköyhteyksien tehomodulisäädöt sekä säädettävät sarjakompensointilaitokset parantavat stabiiliutta vaimentamalla verkon sähkömekaanisia heilahteluja. Myös staattiset kompensointilaitteistot, FACTS-laitteet, ovat hyviä stabiiliuden parantajia. Jännitelähdetasasuuntaajalla varustettu tasasähköyhteys parantaa jännite- ja kulmastabiiliutta, koska sillä on nopea päätö- ja loistehonsäätöominaisuus. (6, s. 257 - 258.)

6 VOIMALAITOKSEN HÄIRIÖNSIETOKYVYN VARMISTAMINEN

Voimalaitoksen suunnitteluvaiheessa mitoitetaan sähköjärjestelmät siten, että ne kestävät oikosulkutilanteet, ja suojausasettelut lasketaan siten, että sähköverkon ja voimalaitoksen suojaukset toimivat selektiivisesti toisiinsa nähden VJV2013 ja YLE2013 vaatimusten mukaisesti. Voimalaitoksen säätöjärjestelmien on myös toimittava edellä mainituissa ohjeissa edellytyillä tavoilla. Sähköjärjestelmien käyttöönottokestuksissa mm. tarkistetaan suojausten oikea toiminta sekä säätöjärjestelmien toiminta.

Sähköjärjestelmille suoritetaan käyttöönottokeustusten lisäksi määräaikaikoestuksia, joita suoritetaan sähkölaitteistosta vastaavan henkilön laatiman ohjeistuksen mukaan. Suomessa käytetään yleisimmin kolmen vuoden ajanjaksoa.

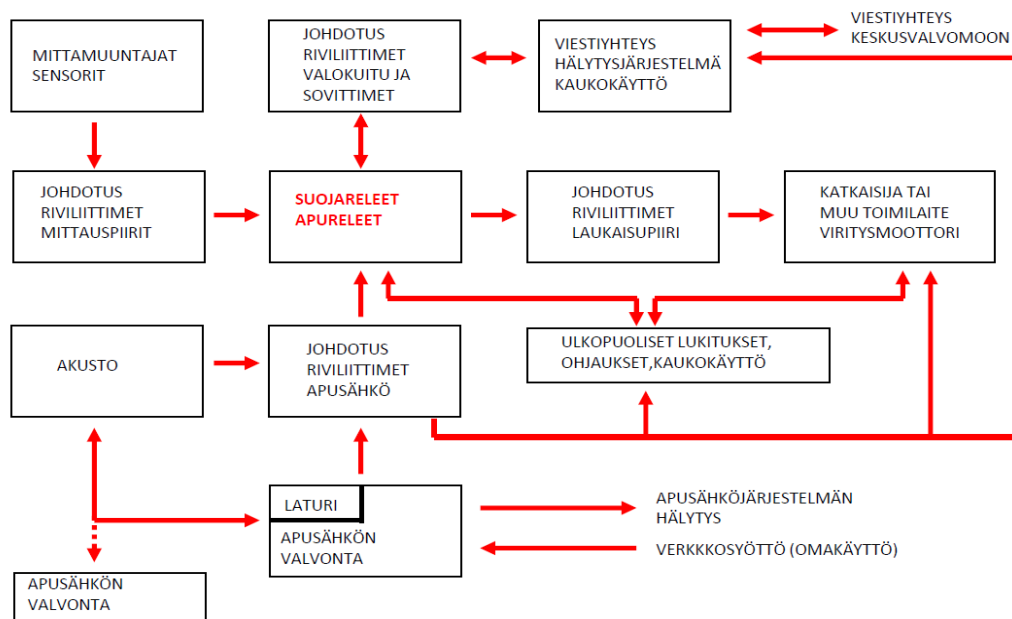
Sähköverkkoa muutetaan ja kehitetään ajansaatossa: muuntajia vaihdetaan, uusia voimajohtoja rakennetaan, generaattoreita ja niiden säätäjiä uusitaan. Näissä muutostilanteissa pitää myös varmistaa voimalaitoksen häiriönsietokykyinen toiminta.

6.1 Käyttöönottokeustukset

Käyttöönottokeustus on laajuudeltaan suuri, sillä se koskettaa koko laitteistoa. Esimerkiksi suoja-rele ei yksinään pysty suoriutumaan tehtävistään, vaan tarvitsee toimiakseen muita komponentteja. Näin ollen suoja-releiden lisäksi on mittamuuntajien, katkaisijoiden, lukituspiirien ja apusähköyhteyksien johdotukset ja kytkennät on tarkistettava liitin liitimeltä ja laitteiden toiminta on tunnettava, jotta pystytään määrittelemään, toimiiko koko kokonaisuus oikein.

Johdotukset on asennettava suunnitelmien ja määräysten mukaisesti. Johdotusten eheys ja eristysvastukset on mitattava. Kuvassa 7 on esitetty suojausjärjestelmään kuuluvat komponentit.

Suojausjärjestelmä



KUVA 7. Suojajärjestelmään kuuluvat komponentit (18, s. 38)

Johdotusten ja laitteiden asentamisessa tulee kiinnittää huomiota sähkömagneettiseen yhteensopivuuteen (EMC). Voimalaitoksilla ja kytkinasemilla sähkömagneettisen yhteensopivuuden ongelmat aiheutuvat pääsääntöisesti suurjännitelaitteista tai niiden asennuksista. Näissä tiloissa kannattaa kiinnittää huomiota toisilaitteiden ja kaapeleiden valintaan sekä asennus- ja maadoitustapa valintoihin. EMC:n toteutuminen varmistaa, että signaalit menevät perille muuttumatta haitallisesti. (10, s. 486.)

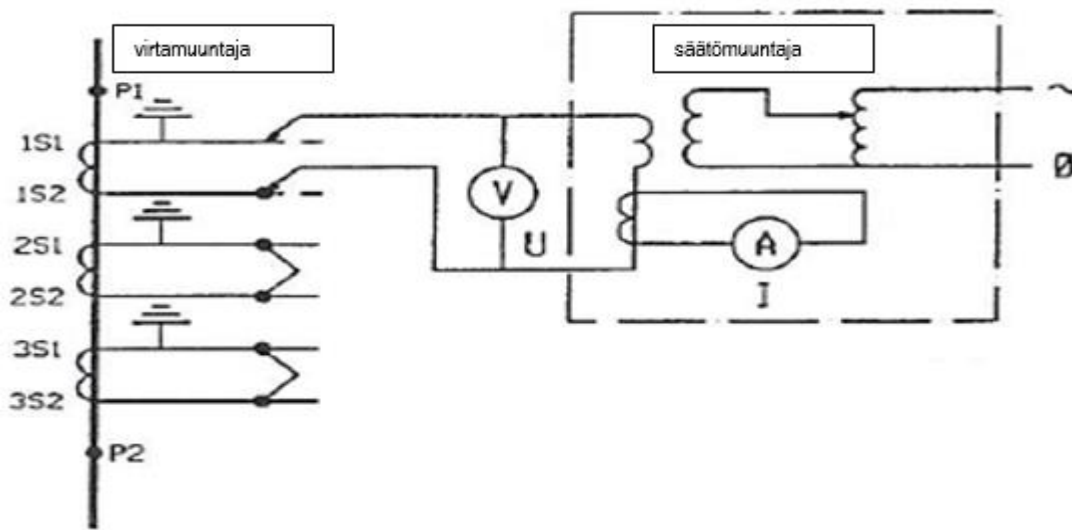
Käyttöönottokoestusta tarkastellaan erään vesivoimalaitoskoneiston käyttöönotossa saatujen tulosten pohjalta. Voimalaitoksen generaattori on ulkoisella staattisella magnetointilaitteella varustettu generaattori. Koneiston turpiini on malliltaan Francis-turpiini.

Generaattorin nimellisarvoja:

- teho 34 MVA
- tehokerroin 0,9
- jännite 10,5 kV
- staattorivirta 1869,5 A
- pyörimisnopeus 125 rpm
- magnetointivirta 718 A
- magnetointijännite 263 V.

6.1.1 Mittamuuntajien käyttöönotto-koestukset

Virta- ja jännitemuuntajista mitataan napaisuus, muuntosuhde, toisiotaakka ja eristysvastus. Virtamuuntajista pitää varmistaa lisäksi se, onko suojarole kytketty suojauskäämiin. Tämä voidaan tehdä mittaamalla kyseisen käämin magneetoimiskäyrä ja määrittämällä siitä virtamuuntajan ylivirtaluku. Ylivirtaluku voidaan määrittellä likimääräisesti kuvan 8 mukaisella kytkennällä nostamalla säätömuuntajan jännitettä, kunnes saavutetaan nimellisvirta virtamuuntajan toiossa. Virtamuuntajan ensiö ei saa olla oikosuljettu mittauksen aikana.



KUVA 8. Ylivirtaluvun mittauskytkentä.

Likimääräinen arvo tarkkuusraja- ja mittarivarmuuskertoimelle n saadaan laskettua kaavalla 2.

$$n \approx (U_1 \times I_N) / S_N$$

KAAVA 2

missä U_1 on virtamuuntajan toision jännite [V]

I_N on toision nimellisvirta [A]

S_N on virtamuuntajan nimellisteho [VA]

Jännitemuuntajan kiertokenttä on myös varmistettava mittauksin. Erittäin tärkeää suojausten toiminnan ja henkilöturvallisuuden sekä laitevaurioiden välttämisen kannalta on virta- ja jännitemuuntajapiirien oikea kytkentä. Erityistä huomiota pitää kiinnittää muuntajien maadoituksiin. Liitteessä 5

on virtamuuntajan mittauspöytäkirja. Tarkistetut johdotukset merkitään kuviin esimerkiksi värjäämällä ne huomiovärein. Piirikaaviot ja johdotuspiirustukset vertaillaan keskenään, ja mahdolliset muutokset merkitään piirustuksiin puhtaaksi piirtämistä varten.

6.1.2 Suojareleiden käyttöönotto-koestukset

Suojareleille tehdään käyttöönotossa niin sanottu toisiokoestus, jossa releelle syötetään koestuslaitteella vikatilannetta vastaavat virrat ja jännitteet. Suojarele havahduttuaan suorittaa laukaisun katkaisijalle ja antaa hälytyssignaalin valvomoon. Kaikki releeltä lähtevät ja releelle tulevat signaalit testataan aina vastaanottavalle laitteelle asti. Kaikki releeseen ohjelmoidut suojausfunktiot testataan ja saadut tulokset verrataan suojauskaavioon mihin halutut asettelut on laskettu.

Suojareleiden koestuksen lisäksi koestetaan myös tahdistuslaitteet. Tällä varmistetaan, että generaattorit ja muuntajat voidaan kytkeä turvallisesti sähköverkkoon. Tahdistuslaitteisiin kuuluvat tahdistin ja tahdissaolonvalvoja. Tahdistuslaitteisiin läheisesti liittyvät myös turpiinisäätäjä sekä generaattorin jännitesäätäjä. Tahdistin antaa turpiinisäätäjälle pyörimisnopeuden eli taajuuden säätökäskyjä ja jännitesäätäjälle jännitteen säätökäskyjä.

Suojauksen toiminta voidaan varmistaa toisiokoestuksen lisäksi myös primäärikoestuksena, jos on käytettävissä esimerkiksi riittävän tehokkaat virransyöttölaitteet. Suojauksen toiminta voidaan testata myös keinovikakoestuksella. Keinovikakoestuksessa voidaan esimerkiksi johdon maasulkusuojauksen toimintasuuntaa varmistaa maadoittamalla yksi vaihejohtimista työmaadoitusvälineellä ja sen jälkeen kytkemällä katkaisijalla jännite johtoon. Jos rele on asennettu ja aseteltu oikein, laukaisee rele halutun katkaisijan auki. Jos suojaus toimii väärin, voi seurauksena olla isompi sähköjakeluhäiriö. Keinovikakoestuksella simuloidaan lähivikaa ja sen toteutuksesta sovitaan aina tapauskohtaisesti. Useimmiten voimalaitoksen toiminta lähiviassa osoitetaan laskentatarkastuksella.

6.1.3 Suojareiden käyttöönottokeustus generaattorin sisäisissä vioissa

Ennen kuin voimalaituskoneistoa aletaan käynnistämään on syytä testata roottorin maasulkusuo-
jan toiminta. Maasulku on helppo testata säädettävällä vastuksella. Säätvastus kytketään roottorin
kiskon ja maan väliin. Pienentämällä vastusta, saadaan roottorin maasulkusuoja toimimaan.

Tämän jälkeen ennen generaattorin magnetoimista jännitteiseksi käyttöönotossa voidaan myös
muita suojalaitteita testata primäärisesti. Kytkemällä generaattorikiskoon kolmivaiheinen oikosulku
voidaan testata mm. ylivirta- ja erovirtasuoja. Käynnistämällä voimalaituskoneisto ja hitaasti mag-
netointijännitettä nostamalla saadaan generaattorin virta nousemaan ylivirtareleen toimintapistee-
seen. Generaattorin ollessa oikosulussa ei staattoriin nouse jännitettä. Ainoastaan staattorin virta
kasvaa magnetointia lisäämällä. Ylivirtareleen testaus tehdään alennetuilla asetteluilla siksi, että
virtaa ei tarvitsisi nostaa yli generaattorin nimellisvirran.

Tasasuuntaajamagnetoiduilla generaattoreilla lähellä generaattoria tapahtuvissa oikosuluissa ei
ylivirtarele toimi, vaan suojausta on lisättävä jännitteestä riippuvalla ylivirtareleellä tai ali-impedans-
sireleellä. Kyseinen magnetointi ei riitä syöttämään oikosulkuvirtaa riittävästi, vaan virta putoaa no-
peasti alle releen havahtumisarvon.

Generaattorin erovirtarele voidaan testata vastaavalla tavalla. Silloin vain estetään yhden staattorin
vaiheen virran meno erovirtareleelle, jolloin erovirtarele tuntee tämän puuttuvan virran erovirtana.
Erovirtarele on generaattorin pääsuoja. Sen varasuojina voidaan pitää ylivirtasuojaa, jännitteestä
riippuvaa ylivirtasuojaa ja ali-impedanssisuojaa. Taulukossa 6 on generaattorin suojauskaviossa
esitetyt erovirtasuojan asetellut ja siltä vaaditut laukaisut ja hälytykset.

TAULUKKO 6. Generaattorin suojauskaaviossa olevat erovirtasuojan asetellut

| SUOJAUS- TOIMINNOT | NIMITYS | TYYPPI | TUNNUS | RELEEN ASETTELUARVO | ASETT. PRIMAÄRI- ARVO. | LAUKAISUT | | | | | | | | | | HÄLYTYKSET | | | | | | | | |
|-----------------------|----------------------|----------|----------------|--|------------------------------|--------------|--------------|----------|----------|--------------|--------------|---|---|--------------|--------------|------------|--------|-----------|--|--|--|--|----------|--------------|
| | | | | | | 4BBA02-00 L1 | 4BBA02-00 L2 | MAGN. L1 | MAGN. L2 | TURP.PKAS. 1 | TURP.PKAS. 2 | | | KATK.VIKA L1 | KATK.VIKA L2 | | AUTOM. | VARASUOJA | | | | | | |
| 3 Id> 3 Id>> | GEN. EROVIRTASUOJA 1 | VAMP 265 | 4CHA01- A02 | Id=>0,75xlv Slope1=20%, Slope2=100% Id>>=8xlv | 280A 15kA | X | X | X | X | X | X | X | X | | | 1 | | | | | | 4CHA01 HÄLYTYKSET ON KYTKETTY KONEISTON AUTOM.-ASEMAAN 4CRH02 | | |
| | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | H4.078 H4.078 | 3) 3) | H4.082 3) |

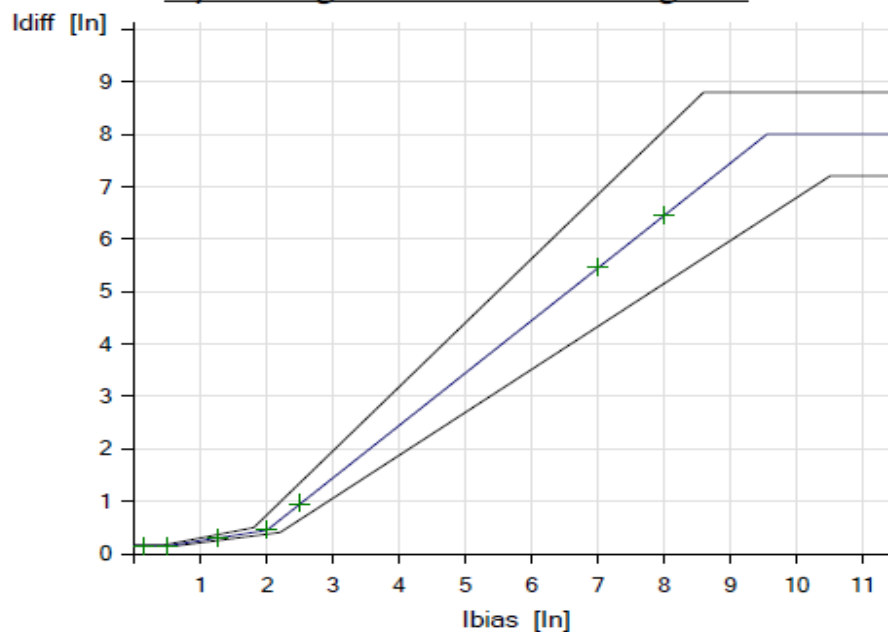
Taulukossa 7 on käyttöönottokeistuksessa saadut erovirtareleen yhden vaiheen (L1) koestustulokset. Eravirtarele on aseteltu taulukon 8 mukaisilla asetteluilla. Koestus on suoritettu toisiokoestuksena Omicron 256 -koestuslaitteella. Koestustulos vastaa suojauskaaviossa vaadittua arvoa 280 A.

TAULUKKO 7. Eravirtareleen ominais- ja vakavointikäyrän toisiokoestustulokset

Test Results for Fault Location L1-E at Reference Side PRIMARY

| Ibias | Idiff Nominal | Idiff Actual | Dev (rel) | Dev (abs) | Check Test | State | Result |
|---------|---------------|--------------|-----------|------------|------------|--------|--------|
| 0,15 In | 0,150 In | 0,146 In | -2,50 % | -0,0038 In | | Tested | Passed |
| 0,50 In | 0,150 In | 0,153 In | 2,27 % | 0,0034 In | | Tested | Passed |
| 1,25 In | 0,300 In | 0,297 In | -1,05 % | -0,0032 In | | Tested | Passed |
| 2,00 In | 0,450 In | 0,455 In | 1,01 % | 0,0045 In | | Tested | Passed |
| 2,50 In | 0,950 In | 0,953 In | 0,33 % | 0,0031 In | | Tested | Passed |
| 7,00 In | 5,450 In | 5,458 In | 0,15 % | 0,0082 In | | Tested | Passed |
| 8,00 In | 6,450 In | 6,460 In | 0,15 % | 0,0095 In | | Tested | Passed |

Operating Characteristic Diagram



Taulukossa 8 on saman eravirtareleen primäärikoestustulos, joka suoritettu generaattorin kolmivaiheisen oikosulkuajon aikana. Koestustulos on myös yhteneväinen suojauskaaviossa vaaditun toiminta-arvon kanssa.

TAULUKKO 8. Erovirtareleen primäärikoestustulokset

A02 Erovirtasuojan koestus

| Rele asettelu | I/A | Rele |
|---------------|------------|-----------------|
| Id=15% (280A) | 281 | 0.15xIgn |

Laukaisut: 4BBA02.Q0 L1&L2 RL:lle, Pikasulku L1&L2, Magn L1&L2, Gen.suoja 1 laukaisuhälytys.

Myös staattorin maasulkusuojat voidaan testata ennen jännitteennostoa staattoriin. Kytkemällä maadoitusköydellä generaattorin yksi vaihe maapotentiaaliin ja nostamalla hitaasti magnetointia saadaan maasulkuvirta ja -jännite nousemaan ja suoja-arele toimimaan sen mittaamien suureiden noustessa yli asetteluarvojen. Maasulkusuojauksen toimintasuunta saadaan myös selville kytkemällä maadoitusköysi oletetulle suojausalueelle tai sen ulkopuolelle. Taulukossa 9 on suunnatun maasulkusuojan sekä suuntaamattoman maasulkusuojan primäärikoestustulokset. Maasulkujännitteeseen (U_0) perustuva suoja toimii varasuojana. Taulukon vasemmassa reunassa on maasulkusuojan asettelut ja lihavoidulla fontilla suoja-areleen mittaamat arvot.

TAULUKKO 9. Suunnatun maasulkusuojan sekä suuntaamattoman maasulkusuojan primäärikoestus

A01 Suunnatun maasulkusuojan laukaisu

| Rele asettelu | I_0 | U_0 | Kulma |
|--------------------------------|-------------|--------------|------------|
| $I_0 \geq 0.04A, U_0 \geq 10V$ | 42mA | 12.7V | 18° |
| Kulma 0, $t_0 \geq 0.5s$ | | | |
| $U_0 \geq 20V, t_0 \geq 2s$ | - | 20.5V | - |

Laukaisut: 4BBA02.Q0 L1&L2 RL:lle, Pikasulku L1&L2, Magn L1&L2, Gen.suoja 1 laukaisuhälytys

Generaattorin ylijänniterele voidaan testata heti ensimmäisessä jännitteennostossa generaattoriin. Ylijännitereleen asetteluja lasketaan lähelle generaattorin nimellisjännitettä, jotta ei kuormiteta tarpeettomasti käämien eristystä. Taulukossa 10 on generaattorin ylijännitesuojan testaus alennetulla asettelulla.

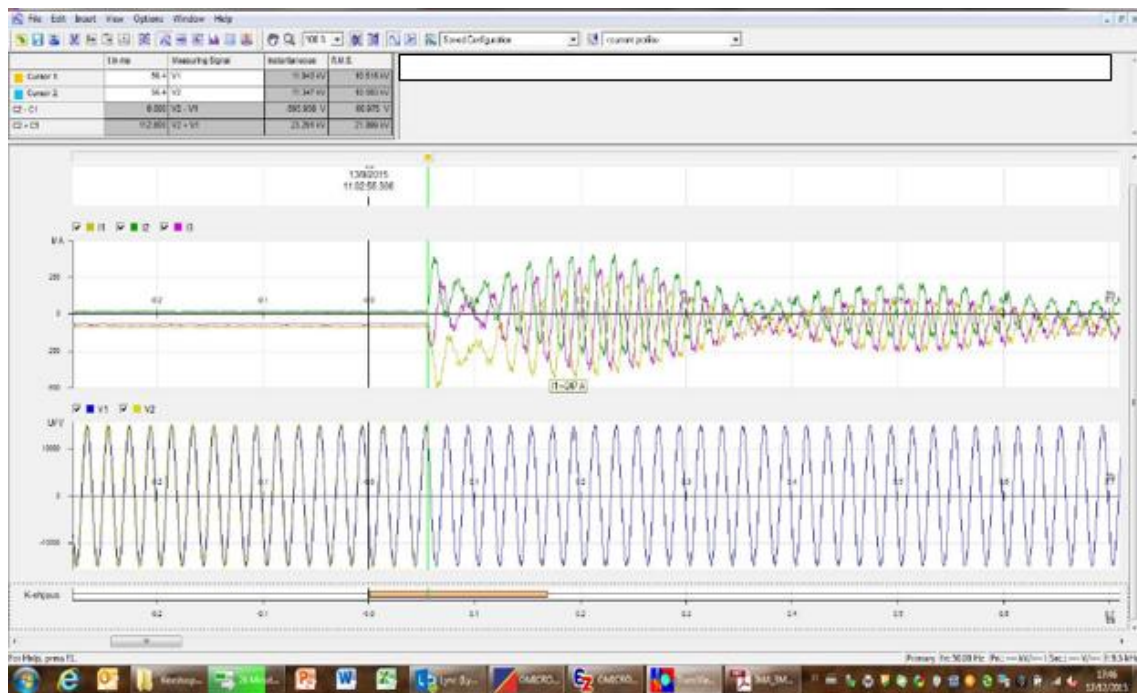
TAULUKKO 10. Generaattorin ylijännitesuojan primäärikoestus alennetulla asettelulla

A03 Ylijännitesuojan koestus alennetulla asettelulla

| Rele asettelu | U/kV | Rele |
|----------------------|-------------|------------------|
| $U \geq 105\%, 1.5s$ | 11.0 | 104.8%Ugn |

Laukaisut: 4BBA02.Q0 L1&L2 RL:lle, Pikasulku L1&L2, Magn L1&L2, Gen.suoja 1 laukaisuhälytys.

Verkkoontahdistuksen yhteydessä ensimmäinen tahdistus on kokeellinen tahdistus. Tällöin tarkastetaan tahdistuslaitteen mittaamat jännitteet, ja sen antamien säätökäskyjen perillemeno turpiinisäätäjälle ja jännitesäätäjälle. Myös katkaisijan kiinniohjauspulssin oikea toiminta pitää testata. Kuvassa 9 on esitetty generaattorin ensimmäinen tahdistus verkkoon. Kuvassa mustan pystyviivan kohdalla tahdistin antaa kiinniohjauspulssin katkaisijalle. Vihreän viivan kohdalla katkaisija on kiinni ja generaattori alkaa syöttää tehoa verkkoon. Tahdistus on onnistunut hyvin, koska jännite- ja virtakäyrissä ei esiinny suuria piikkejä.



KUVA 9. Generaattorin ensimmäinen tahdistus verkkoon. Tahdistushetki on tallennettu generaattorin suoja releen häiriötallentimella.

Nykyisin valokaarisuojausta käytetään myös generaattorin suojaukseen. Generaattorin kiskoliitosten läheisyyteen sijoitetaan valokaarianturit. Valokaarisuojaan liitetään valotiedon lisäksi virtaehto, jolloin valokaarisuoja ei laukaise pelkän valotiedon mukaan, vaan kohteessa pitää olla myös ylivirtaa. Valokaarisuojaus testataan syöttämällä koestuslaitteella riittävä virta valokaarisuojalle ja valaisemalla valoanturi samalla esimerkiksi salamavalolla.

6.1.4 Suojareleiden käyttöönottokeustus generaattorin ulkoisissa vioissa

Vinokuorma- ja ylikuormitussuojan testaus voidaan suorittaa kuten ylivirta- ja erovirtasuojien testaus magnetoitaessa generaattoria oikosulkua vasten. Epäsymmetrinen kuormitus aiheuttaa roottorin lämpenemistä. Näin ollen vinokuormasuoja estää myös roottoria lämpenemästä liikaa. Ylikuormitustilanteeseen joudutaan harvoin, koska turbiinin teho ei yleensä riitä saamaan generaattoria ylikuormaan. Taulukossa 11 on esitetty vinokuormasuojan primäärikoestus. Koestus on suoritettu generaattorin kaksivaiheisen oikosulkukokeen aikana.

TAULUKKO 11. Vinokuormasuojan primäärikoestus kaksivaiheisen oikosulkuajon aikana. koestusta ei tehty laukaisuun asti. Suoja on ollut havahtuneena 17% laukaisuajasta.

A01 Vinokuormasuojan koestus

| Rele asettelu | I2/A | Rele |
|-------------------|------|------|
| K2=10%,K1=20s INV | 195 | 10% |

Havahtuneena 17% laukaisuajasta.

2-vaiheinen oikosulku: I2=195A, IL1=349A, IL2=349A, IL3=0A

Generaattorin ollessa verkkoon kytkettynä voidaan tarkistaa takatehosuojan toiminta. Takatehosuoja testataan säätämällä turpiinin pyörimisnopeutta alaspäin niin paljon, että generaattori alkaa ottamaan tehoa verkosta eli se pyörii moottorina. Generaattorille takateho ei ole yleensä vaaraksi. Takatehorele estää turpiinia vahingoittumasta. Takatehorele on kuitenkin osa generaattorisuojausta, koska takateho voidaan tunnistaa sähköisillä suureilla. Taulukossa 12 on takatehosuojan primäärikoestustulokset. Takatehosuojan asettelu on kyseisellä generaattorilla –4 % generaattorin nimellistehosta 34 MW. Asettelu vastaa tehoa –1,36 MW.

TAULUKKO 12. Takatehosuojan primäärikoestuksen tulokset

A03 Takatehosuojan koestus

| Rele asettelu | P / MW | Rele |
|---------------|--------|------|
| P<- 4.0%, 1s | -2 | -5% |
| P<- 4.0%, 60s | -2 | -7% |

Hälytys 1-porras, automaatioon takateho ehto

Laukaisu: 4BBA02.Q0 ja hälytys takateho 2-porras

Laukaisuhetki

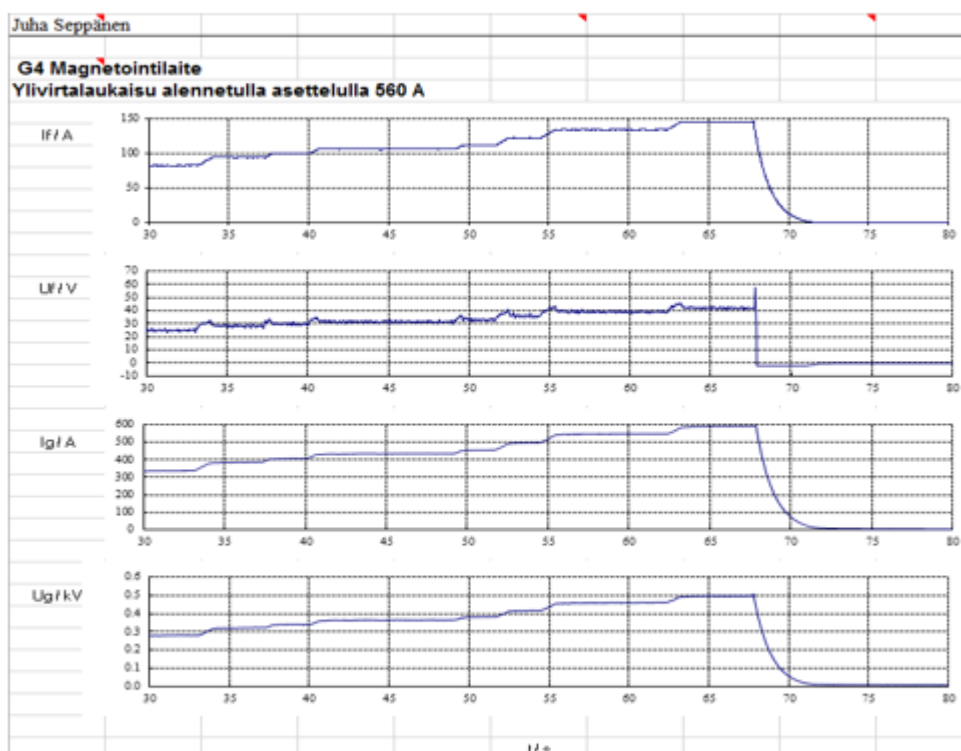
Ylivirtasuojan testaus suoritettiin kolmivaiheisen oikosulkukokeen aikana alennetuilla asetteluilla. Taulukossa 13 on generaattorisuojauskaaviossa esitetyt ylivirtasuojan asetteluarvot. Ylivirtasuojan I>-portaan asetteluarvo on 2804 A ja sen toiminta-aika on 5 sekuntia.

Koestuksen ajaksi I>-portaan asettelu on laskettu 560 A:iin. Taulukosta nähdään magnetoinnin poistuminen eli kenttäkatkaisijan laukeaminen ylivirtasuojan toimittua.

TAULUKKO 13. Ylivirtasuojan primääri koestus alennetulla asettelulla

| SUOJAUS- TOIMINNOT | NIMITYS | TYYPPI | TUNNUS | RELEEN ASETTELUARVO | ASETT. PERIMÄÄR- ARVO | LAUKAISUT | | | | | | | | HÄLYTYKSET | | | |
|-----------------------|---------|--------|--------|------------------------|-----------------------------|--------------|--------------|---------|---------|---------------|---------------|--------------|--------------|------------|-----------|---|--|
| | | | | | | 4BBA02-Q0 L1 | 4BBA02-Q0 L2 | MAGN L1 | MAGN L2 | TURP.PIKAS. 1 | TURP.PIKAS. 2 | KATK.VOIK L1 | KATK.VOIK L2 | AUTOM. | YLIASIAJA | ALHAAN HÄLYTYKSET ON KYTNETTY KONEISTON AUTOM.-ASEMAAN KÄNNÄ | |

| | | | | | | | | | | | | | | | | | | |
|------|-----------------|--|--|-----------------|--------|------|---|---|---|---|---|--|--|--|--|--|-------|----|
| 3 I> | GEN YLIVIRTA I> | | | I>[Set] on=1,6A | 1=5,0s | 2BBA | X | X | X | X | X | | | | | | ILMÄN | 3) |
| 3 I> | GEN YLIVIRTA I> | | | I>[Set] on=1,6A | 1=5,0s | 2BBA | X | X | X | X | X | | | | | | ILMÄN | 3) |



A01 Ylivirtasuojan koestus

| Rele asettelu | I/A | Rele |
|---------------|-----|---------|
| I>=0.3xIgn,5s | 592 | 0.3xIgn |

Laukaisut: 4BBA02.Q0 L1&L2 RL:lle, Pikasulku L1&L2, Magn L1&L2, Gen.suoja 1 laukaisuhälytys.

Generaattorin ollessa verkkoon kytkettynä voidaan tarkistaa alimagnetointisuojaan toiminta. Alimagnetointisuoja testataan säätämällä generaattorin jännitettä alemmaksi kuin on sähköverkon jännite. Tällöin generaattori ottaa sähköverkosta loistehoa. Alimagnetointiasettelu pitää suojareleessä asetella kokeen ajaksi siten, että magnetointilaitteella pystytään säätämään jännitettä riittävästi. Normaali tilanteessa alimagnetointisuojaan toiminta-alue on magnetointilaitteen säätörajojen ulkopuolella, että alimagnetointisuoja ei toimisi tarpeettomasti. Taulukossa 14 on esitetty suojareleiden käytössä olevat alimagnetointiasetelut sekä koestustulokset alennetuilla asetteluilla – 30%.

TAULUKKO 14. Generaattorin alimagnetointisuoja primäärikoestus alenetuilla asetteluilla

| SUOJAUS-TOIMINNOT | NIMITYS | TYYPPI | TUNNUS | RELEEN ASETTELUARVO | ASETT. PRIMAÄRIARVO. | LAUKAISUT | | | | | | | | | | HÄLYTYKSET | | | | |
|-------------------|-------------------|--------|--------|---|----------------------|--------------|--------------|----------|----------|----------------|----------------|--|--|--|--|---------------|---------------|--------|-----------|--|
| | | | | | | 4BBA02-Q0 L1 | 4BBA02-Q0 L2 | MAGN. L1 | MAGN. L2 | TURP. PIKAS. 1 | TURP. PIKAS. 2 | | | | | KATK. VIKA L1 | KATK. VIKA L2 | AUTOM. | VARASUOJA | 4CHAD1 HÄLYTYKSET ON KYTKETTY KONESTON AUTOM.-ASEMAAN 4CRH02 |
| Q< | GEN.ALMAGNETOINTI | | | Q<=60%Scn Q<=48%Scn t=2s tmax 1s=30s/4,3MIN | | X | X | X | X | X | X | | | | | 1 | | | | H4004 31 |

A01 Alimagnetointisuoja koestus alennetulla asettelulla

| Rele asettelu | Q / MVar | Rele |
|---------------|----------|------|
| Q<=-30%, 2s | -10.5 | -31% |

Laukaisut: 4BBA02.Q0 L1&L2 , Pikasulku L1&L2, Magn L1&L2, Gen.suoja 1 laukaisuhälytys.

6.1.5 Säätöjärjestelmien käyttöönotto-koestukset

Voimalaitoksen käyttöönotossa tehdään voimalaitoksen jännite- ja turpiinisäädölle VJV2013 mukaiset testit. Käyttöönotto-koeket suoritaan erikseen laaditun ohjelman mukaan. Käyttöönotossa tallennetaan seuraavat suuret:

- generaattorin liitinjännite
- generaattorin tai sen magnetointikoneen magnetointijännite
- generaattorin taajuus
- generaattorin tai sen magnetointikoneen magnetointivirta
- generaattorin päto- ja loisteho
- säädettävän suureen asetteluarvo ja sen muutos. (2, s. 47.)

Magnetointilaitteen (jännitesäätäjä) käyttöönotossa tehdään voimalaitosten järjestelmäteknisten vaatimusten varmistamiseksi tehtäviä testejä. Kuvassa 10 on mittausjärjestelyt magnetoinnin käyttöönottomittauksista.



KUVA 10. Magnetoinnin käyttöönottokoestuksen mittausjärjestelyt

Käyttöönottokokeessa suoritettiin magnetoinalaitteelle seuraavat mittaukset:

- generaattorin jännitteen 10 % askelvastekoe alas ja ylös suuntaan (liite 6)
- roottorin virtarajoittimien toiminnan testaus (liite 7)
- U/f-rajoittimen toiminnan testaus (liite 8)
- staattorin virtarajoittimien toiminnan testaus (liite 9)
- alimagnetointirajoittimen toiminnan testaus (liite 10)
- PSS:n toiminnan testaus
- loistehon poislyöntikoe (liite 11).

Generaattorille tehtiin samassa yhteydessä magnetoinalaitteen mittausten kanssa myös muita mittauksia ja kokeita. Generaattorille tehtiin mm. kolme- ja kaksivaiheinen virransiirtokäyrän mittausta, jännitteen tyhjäkäyntikäyrän mittausta, jännitteen THD-mittausta, jännitteen käyrämuodon mittausta, akselijännitteen mittausta sekä kaksi- ja kolmevaiheiset sysäyskokeet. Sysäyskokeiden tuloksista lasketaan generaattorin oikosulkureaktanssit ja aikavakiot, joita verrataan generaattorin valmistajan ilmoittamiin vastaaviin arvoihin (taulukko 15).

TAULUKKO 15. Valmistajan ilmoittamat ja sysäysoikosulkukokeessa määritetyt generaattorin reaktanssiarvot ja aikavakiot.

| | Mitattu | Valmistajan laskema |
|---------|---------|----------------------------|
| x_d | 0,88 pu | 1,367 pu (ei saturoitunut) |
| x_d | 0,83 pu | 1,307 pu (saturoitunut) |
| x_d' | 0,48 pu | 0,33 pu |
| x_d'' | 0,31 pu | 0,30 pu |
| T_d' | 1,12 s | 0,719 s |
| T_d'' | 0,015 s | 0,056 s |
| T_a | 0,232 s | 0,179 s |

Turpiinisäätäjälle käyttöönottokokeina tehtiin taajuusohjatun käyttöreservin ja taajuusohjatun häiriöreservin sekä säädön kuolleen alueen mittaukset VJV2013:sta mukaisesti. Mittaukset tehtiin kolmella teholla:

- maksimiteho, $P_{\max} = 21$ MW
- puoliteho, $P_{50\%} = 14$ MW
- minimiteho, $P_{\min} = 5$ MW.

Mittausten perusteella koneistolle määritettiin seuraavat taajuudensäätöominaisuudet taulukon 16 mukaisesti.

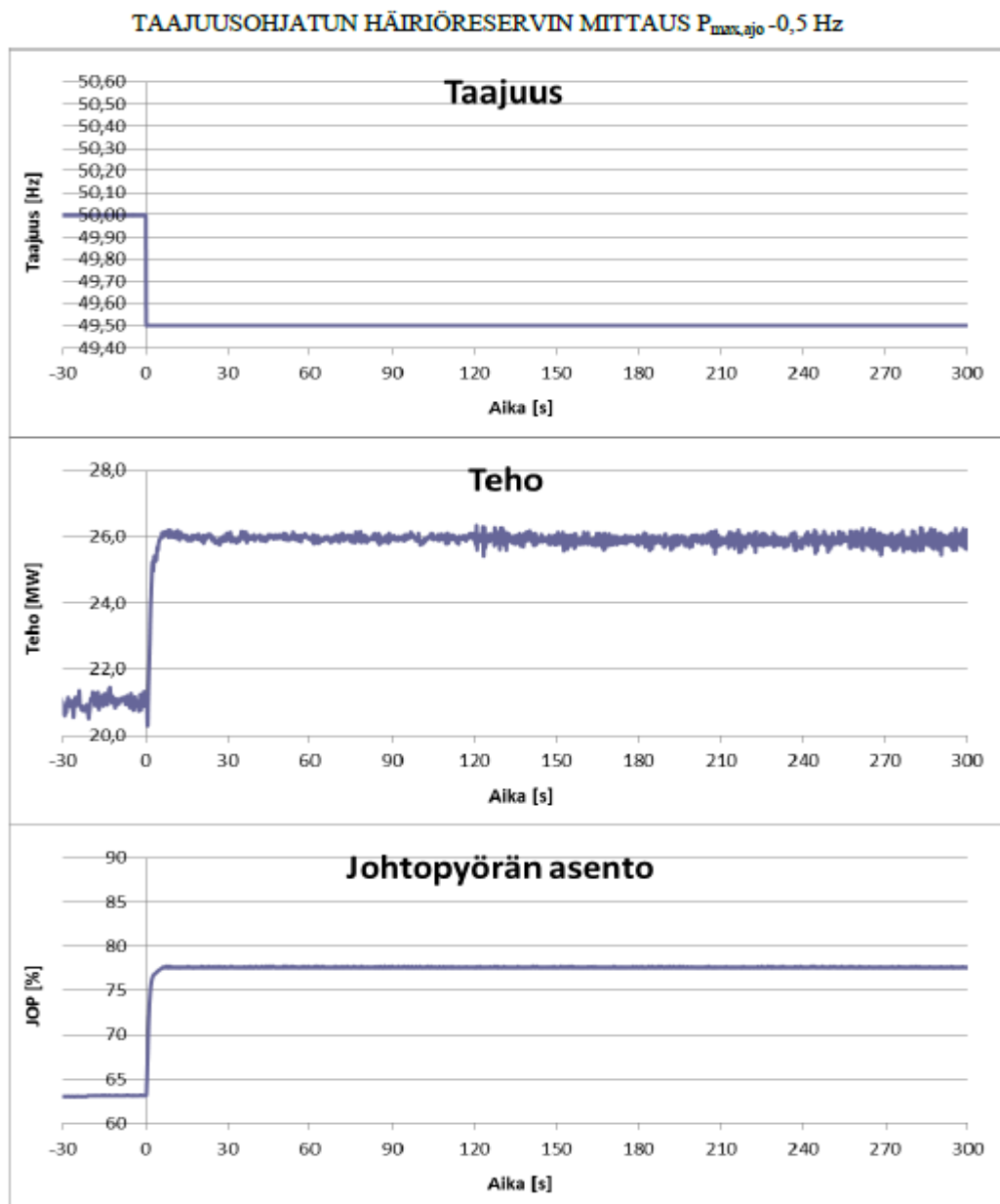
TAULUKKO 16. Voimalaitoskoneiston käyttöönotossa mitatut taajuudensäätöominaisuudet

| Suure | haluttu arvo | mitattu minimi | mitattu keskiarvo | Mitattu maksimi | lopputulos |
|---|--------------|----------------|-------------------|-----------------|-------------------|
| Säädön kuollut alue Δf_k | 10 mHz | | | 10 mHz | 10 mHz |
| Taajuusohjattu käyttöreservi P_f Statiikalla 5,6 % | 1,10 MW | 1,11 | 1,18 | 1,29 | 1,1 MW |
| Taajuusohjattu häiriöreservi P_h Statiikalla 6 % | 5,0 MW | 4,94 | 5,02 | 5,09 | 4,9 MW |
| Säätövoima R statiikalla % | 11,0 MW/Hz | | | | 11,1 MW/Hz |
| Taajuudensäädön kuollut aika ΔT | | 0,6 | 1,0 | 1,1 | 1,1 s |

Säätökoemittaukset tehtiin askelvastekokeiden avulla keskeyttämällä kokeen ajaksi verkon taajuusmittaus ja syöttämällä kyseiseen taajuusmittaushaaraan askelmuutosta vastaava simuloitu numeerinen taajuusarvo. Mitta-arvon muuntimilta saatavat pätötehomittaus, johtopyörän asento-

mittaus sekä simuloitua taajuuden oloarvot rekisteröitiin tallentavalla mittausasemalla, jonka näytteenottoväli oli mittausten aikana 50 ms. Yhden mittauksen mittausjakso oli 6 minuuttia. Mittaukset tehtiin nykyisen käytännön mukaisesti kolmella tehoalueella, joista mikään ei ollut turpiinin kannalta optimaalinen. Tästä syystä tehon huojunta oli mittauksissa huomattavaa. Taulukossa 17 on taajuusohjatun häiriöreservin mittaustulos.

TAULUKKO 17. Taajuusohjatun häiriöreservin mittaustulokset maksimiteholla 0,5 Hz askelmuutoksella



Lisäksi turpiinisäätäjälle tehtiin pikasulkukokeita ja tehon poislyöntikokeita. Pikasulkukokeilta varmistetaan turpiinin turvallinen sulkeutuminen. Pikasulku aikaan saadaan esimerkiksi simuloimalla

laakerin yllämpölaukaisu. Tehonpoislyöntikokeiden tarkoitus on selvittää turpiinisäätäjän toiminta äkillisessä tehon häviämässä. Tehonpoislyöntikoe suoritetaan avaamalla generaattorin katkaisija, jolloin generaattori irtoaa sähköverkosta. Liitteessä 12 on esitetty tehonpoislyöntikoe täydeltä teholta.

6.1.6 Muuntajien ja omakäytön käyttöönotto-koestukset

Muuntajan suojalaitteille tehdään käyttöönotossa toisiokoestukset kuten generaattoreillekin. **Päämuuntajan** suojiin on toimittava selektiivisesti generaattori suojiin kanssa samoin kuin niiden on toimittava selektiivisesti myös sähköverkkoon päin. Muuntajasuojien suojausalue käsittää muuntajan ala- ja yläjännitepuolien suojaukseen käytettyjen virtamuuntajien välisen alueen. Lisäksi muuntaja kuuluu yläjännitepuolen johtolähdön suojausalueeseen sekä alajännitepuolen kiskon maasulkusuojausalueeseen.

Muuntajan yläjännitepuoli on varustettu nopealla suojauksella, joka ehtii muuntajaviassa laukaista viallisen muuntajan verkosta johtolähdön pikajälleenkytkennän aikana. Muuntajan yläjännitepuolen ylivirtareleen pikalaukaisuporras toimii yläjännitepuolen vioissa. Hidastettuporras toimii alajännitepuolen vioissa sekä varasuojana alajännitepuolen kiskovioissa. Jos muuntajan läpi voidaan syöttää tehoa molempiin suuntiin, on syytä laittaa ylivirtasuojat muuntajan molemmille puolille sisäisiä vikoja varten. Muuntajan ylivirtareleen havahtumisarvo voidaan nykyisissä releissä verkkoon kytkennän hetkeksi kaksinkertaistaa, jotta kytkentävirtasysäys ei laukaisisi muuntajaa välittömästi pois verkosta.

Muuntajan erovirtareleen yliaaltosalpa on syytä ottaa käyttöön. Yliaaltosalpa on olemassa 2. harmoniselle ja 5. harmoniselle yliaallolle. 2. harmonista yliaaltoa esiintyy muuntajaa verkkoon kytkettäessä ja 5. harmonista yliaaltoa ylijännitetilanteissa, joissa muuntajan magnetoimisvirta kasvaa voimakkaasti. Yliaaltosalpa estää useimmissa tapauksissa muuntajan turhan verkosta laukeamisen. Taulukossa 18 on erään päämuuntajan käytössä olevat sähköiset suojaukset.

TAULUKKO 18. Erään päämuuntajan suojauskaavio

| SUOJAUS-TOIMINNOT | NIMITYS | TYYPPI | TUNNUS | HELEEN-ASETELJÄARVO | ASETT. PRIMÄÄRIARVO. | LAUKAISUT | | | | | | | | | | HÄLYTYKSET | | | |
|-------------------|--------------|----------------------------|----------|---------------------|--|-----------------|--------------|--------------|--------------|----------|----------|----------|----------|---------------|---------------|------------|------------|-------------|----------------------|
| | | | | | | 3BBA02-00 L1 | 3BBA02-00 L2 | 4BBA02-00 L1 | 4BBA02-00 L2 | 3.0.0 L1 | 3.0.0 L2 | 3.0.0 L3 | 3.0.0 L4 | KATK.VIKKA L1 | KATK.VIKKA L2 | | 03 ja 04 L | KINNOHJESTO | |
| Elinv Umvv | 3 l 3 l>> | YLIVIRTA l YLIVIRTA l>> | VAMP 257 | RTM0-A01 | $I > 1,5 I_{N} = 7,5 A$ $t > 2,0 s$ $I >> B$ KÄYTÖSSÄ | 600A | x | x | x | x | x | x | x | x | | 1) | 2) | 4) | R145, FG, H009, H103 |
| | Uo> & Io> | SUUNNATTU MAASULKUSUOJA | | | $I_{01} > 0,24 I_{N} = 1,2 A$ $U_{0} > 2,0 V$ $t > 1,3 s$ Peruskulna -80° Sektori ±88 cap | 96A, 1,27kV | x | x | x | x | x | x | x | x | | 1) | 2) | 4) | R145, FG, H009, H103 |
| | | | | | $I_{01} >> 2,4 I_{N} = 12 A$ $U_{0} > 2,0 V$ $t >> 0,1 s$ Peruskulna -80° Sektori ±88 cap | 960A, 1,27kV | x | x | x | x | x | x | x | x | | 1) | 2) | 4) | R145, FG, H009, H103 |
| | Io> Io>> | NOLLAVIRTA | | | $I_{0} > 0,24 I_{N} = 1,2 A$ $t > 4,0 s$ $I_{0} >> 2,4 I_{N} = 12 A$ $t >> 0,1 s$ | 96A 960A | x | x | x | x | x | x | x | x | | 1) | 2) | 4) | R145, FG, H009, H103 |

Muut muuntajaa sisäisiltä vioilta suojaavat suojalaitteet ovat mekaanisia laitteita. Näissä on mekaaninen toimielin, joka ohjaa koskettimia, joiden kautta saadaan sähköiset hälytykset ja laukaisut.

Kaasurele tunnistaa, jos muuntajan öljyyn alkaa muodostua kaasua esimerkiksi kierrossulun takia muuntajan käämissä. Kaasurele sijaitsee muuntajan ja sitä ylempänä olevan öljynpaisuntasäiliön välisessä putkessa. Kaasu kertyy kaasureleeseen ja saa aikaan hälytyksen. Jos kaasua muodostuu paljon, on seurauksena muuntajan laukaisu eroon sähköverkosta. Kaasurele koestetaan yleensä pumpaamalla ilmaa releeseen kyseiseen tarkoitukseen olevan venttiiliin kautta. Kaasureleessä on yleensä myös painike, jolla testaus voidaan suorittaa. Kaasun muodostuminen kertoo usein alkavasta käämiviasta.

Lämpömittarilla valvotaan öljyn sekä käämin lämpötilaa. Lämpömittarit on varustettu hälytys- ja laukaisukoskettimilla. Lämpömittarin koestus suoritetaan irrottamalla anturiosa muuntajasta ja lämmittämällä sitä tarkoitukseen tehdyllä anturin keittolaitteella. Lämpömittarilla toteutetaan myös jäädytyspuhaltimien käynnistys. Kääminlämpötilaa valvovassa lämpömittarissa on lisäksi käämiä matkiva vastuselementti, jota syötetään kuormitusta vastaavalla virralla. Virta saadaan muuntajan alajännitepuolen yhteen vaiheeseen asennetusta virtamuuntajasta. Käämin lämpömittariin vaikuttavat öljynlämpötila ja vastuksen lämpötila.

Ylipaineventtiili estää muuntajan säiliön tai käämikytkimen säiliön repeämistä muuntajan vakavissa vioissa, joissa paine muuntajan sisällä kasvaa äkillisesti. Ylipaineventtiilissä on testaamista varten vipu, jolla venttiiliin koskettimien toiminta voidaan testata.

Virtausrelettä käytetään käämikytkimen suojalaitteena. Virtausrele voi olla myös muuntajan suoja-laite. Virtausrele asennetaan samoin kuin kaasurele suojattavan kohteen öljysäiliön ja öljynpaisun-tasäiliön väliin. Virtausreleessä on vipu sen testausta varten.

Muuntajan öljynpinta ja tuuletinvika ovat hälyttäviä toimintoja. Ne eivät laukaise muuntajaa eroon verkosta. Kaasurele toimii muuntajan öljynpinnan laskiessa niin paljon, että kaasurele täyttyy il-malla. Taulukossa 19 on erään päämuuntajan käytössä olevat mekaaniset muuntajasuojat.

TAULUKKO 19. Taulukossa on erään päämuuntajan suojauskaaviossa esitetyt mekaanisten suo-jien toiminnan kuvaus.

| SUOJAUS-TOIMINNOT | NIMITYS | TYYPPI | TUNNUS | HELEEN-ASETTELUARVO | ASETT. PRIMAÄRIARVO. | LAUKAISUT | | | | | | | | | | | HÄLYTYKSET | |
|-------------------|-------------------------------|--------|----------|---------------------|----------------------|--------------|--------------|--------------|--------------|----------|----------|----------|----------|--------------|--------------|------------|------------|------------------------------|
| | | | | | | 3BBA02-00 L1 | 3BBA02-00 L2 | 4BBA02-00 L1 | 4BBA02-00 L2 | 3.8.0 L1 | 3.8.0 L2 | 3.9.0 L1 | 3.9.0 L2 | KATK.VIKA L1 | KATK.VIKA L2 | G3 ja G4 L | | KUNNOLLESTO |
| | MUUNTAJAN KAASURELE | | S20 | | | X | X | X | X | X | X | 3i | 3i | 3i | 3i | 3i | 4i | H0444 (HÄL.) H0098 LAUK.) |
| | MUUNTAJAN ÖLJYN LÄMPÖ | | S10 | | | X | X | X | X | X | X | 3i | 3i | 3i | 3i | 3i | 4i | H0443 (HÄL.) H0097 LAUK.) |
| | MUUNTAJAN ÖLJYN PINTA | | S25 | | | | | | | | | | | | | | | H0445 (HÄL.) |
| | MUUNTAJAN KÄÄMIN LÄMPÖ (PRI) | | S15 | | | X | X | X | X | X | X | 3i | 3i | 3i | 3i | 3i | 4i | H0446 (HÄL.) H0098 LAUK.) |
| | MUUNTAJAN KÄÄMIN LÄMPÖ (SEKI) | | S16 | | | X | X | X | X | X | X | 3i | 3i | 3i | 3i | 3i | 4i | H0446 (HÄL.) H0098 LAUK.) |
| | MUUNTAJAN KÄÄMIN LÄMPÖ (TER) | | S17 | | | X | X | X | X | X | X | 3i | 3i | 3i | 3i | 3i | 4i | H0446 (HÄL.) H0098 LAUK.) |
| | MUUNTAJAN YLIPAINE | | S40 | | | X | X | X | X | X | X | 3i | 3i | 3i | 3i | 3i | 4i | H0099 LAUK.) |
| | TUULETINVIKA, Suojakytk | | F40...49 | | | | | | | | | | | | | | | H0447...H0449 (HÄL.) |

Käämikytkimellä varustetussa muuntajan käyttöönotossa testataan myös jännitesäätäjä, joka ohjaa käämikytkintä. Jännitesäätäjä testataan toisiokoestuksena koestuslaitteella kuten suoja-releetkin.

Jännitesäätäjälle asetellaan perusjännitetaso, joka halutaan sähköverkossa pitää yllä. Lisäksi ase-tellaan erojännitearvo, jonka ylittämisen jälkeen käämikytkintä ohjaamalla palautetaan haluttu pe-rusjännitetaso. Toiminta-aika ohjaukselle on yleensä kymmenistä sekunneista minuutteihin. Ero-jännitteen suuruus asetellaan suurin piirtein samaksi kuin käämikytkimen yhden askeleen aiheut-tama muutos jännitteeseen. Tällöin käämikytkin ei ala säätämään edestakaisin .

Jännitesäätäjä voidaan testata tämän lisäksi myös primäärisesti poikkeuttamalla käsiohjauksella käämikytkintä niin paljon, että jännitesäätäjä yrittää korjata jännitemuutoksen. Kääntämällä jänni-tesäätö automaattiohjaukselle todetaan jännitesäädön toiminta.

Omakäyttömuuntajat saavat syöttönsä yleensä generaattorin kiskostosta. Generaattorin ollessa irti verkosta omakäyttömuuntaja saa syötön valtakunnan verkosta päämuuntajan kautta. Omakäyttömuuntajan sähköisiä suoja ovat ylivirta- ja maasulkusuoja. Sähköisenä suojana voi olla myös sulakkeet. Muita suoja ovat yleensä vain lämpösuoja. Kaasureleitä tai ylipaineventtiileitä ei ole senkään takia, että omakäyttömuuntajat ovat nykyään kuivamuuntajia.

Omakäyttömuuntaja syöttää omakäyttökeskusta, josta saadaan voimalaituskoneiston tarvitsemien pumppujen ja puhaltimien käyttö sähkö. Omakäyttökeskusten syötöt on suojattu ylivirtareleillä. Ylivirtarele on joko itsenäinen rele, joka saa virtatiedon mittamuuntajalta tai sitten se on integroitu keskuksen katkaisijaan. Keskusten suojana nykyään käytetään enenevässä määrin myös valokaarisuojausta. Keskusten valokaarisuojaus voi olla myös ylipaineeseen perustuva. Tällainen suojaus ei tarvitse virtahtoa, sillä rele reagoi valokaaren aiheuttamaan ilman paineen nousuun.

Omakäyttökeskuksissa voi olla kaksi tai useampia varasyöttöyhteyksiä. Varasyötöt tulevat toisilta voimalaituskoneistoilta tai muualta ulkopuoliselta sähkölaitokselta. Tällä parannetaan voimalaitoksen häiriönsietokykyä. Omakäyttökeskukset on varustettu syötönvaihtoautomaatiikalla, jolloin varsinaisen syötön hävittyä saadaan syöttö siirtymään varasyötön perään ja näin turvataan voimalaituskoneiston apulaitteiden sähkön saanti. Käyttöönottokeistuksessa testaan käytännössä vaihtoautomaatiikan toiminta. Testauksen aikana voimalaituskoneiston tulee pysyä normaalisti käynnissä.

6.2 Määräaikaiskoestukset

Määräaikaiskoestuksia suoritetaan laitteistosta vastaavan tekemän kunnossapito-ohjelman mukaisesti. Määräaikaistarkastukset voivat olla osaltaan myös lain velvoittamia. Määräaikaiskoestusten perusteella voidaan arvioida laitteiston kuntoa. Määräaikaiskoestukset pyritään tekemään huolto-
seisakkien yhteydessä, jolloin voidaan havaitut viat korjata samanaikaisesti ilman erillistä tuotannon keskeytystä.

6.2.1 Suojareiden määräaikaiskoestukset

Määräaikaiskoestuksessa tarkistetaan yleensä vain suojareleen toiminta. Tarkistetaan suojareleen asettelut vastaavatko ne suojauskaaviossa annettuja arvoja. Määräaikaiskoestus suoritetaan

yleensä toisiokoestuksena kuten käyttöönottokeustuskin. Mittaus- ja laukaisupiirien kunto tarkistetaan yleensä mittaamalla, varsinkin johto- ja muuntajasuojien ollessa kyseessä. Näissä tapauksissa koestus tehdään usein johdon tai muuntajan ollessa normaalikäytössä. Tällöin ei katkaisijaa voi laukaista auki, koska seurauksena on häiriö sähköjälkijohdossa. Vaativimmat kohteet, kuten generaattorit, tehdään keskeytyksessä. Määräaikaiskoestuksessa pyritään löytämään viat suojarleissä ja suojauspiireissä. Määräaikaiskoestuksessa tehdään seuraavia tarkastuksia:

- Laitteille ja asennuksille tehdään silmämääräinen tarkistus.
- Mitataan releiden apujännitteet.
- Releiden toimintarajat ja -ajat ovat suojauskaavion mukaiset. Tarvittaessa tehdään asettelumuutokset.
- Kytkennot ovat piirikaavioiden ja johdotuspiirustusten mukaiset siltä osin mitä normaalissa suojauskoestuksessa tulee ilmi.
- Tehdyt muutokset on päivitetty piirikaavioihin ja johdotuspiirustuksiin.
- Kun koestus tehdään suojauskohteen ollessa käytössä, on mahdolliset muut suojarleed oltava toiminnassa toista relettä koestettaessa.
- Koestuksessa on huomioitava, että koestettavat funktiot voidaan koestaa ilman suojauskohteelle, muille suojauskohteille tai järjestelmille aiheutuvaa häiriötä ja haittaa. Turhien hälytysten aiheuttamista on vältettävä..
- Releiden laukaisusignaalit mitataan relekaapista katkaisijalle lähtevältä liittimeltä, jos katkaisijan laukaisu ei ole mahdollista
- Releen indikointitoimintaa pitää tarkkailla koestuksen aikana.
- Koestuksen lopussa katkaistaan releen apusähköt, jolloin releen itsevalvonnan on annettava hälytys. Apusähköjen palautuksen jälkeen on releen käynnistytävä ja toimittava normaalisti ilman virhetoimintoja.
- Suojauskohteen käyttöönoton jälkeen mitataan tai luetaan releestä kaikkien virtapiirien virrat ja jännitepiirien jännitteet sekä apujännitteet.

Määräaikaiskoestuksen työvaiheet ovat seuraavat:

1. Koestus valmistellaan ottamalla esille koestettavan kohteen piirikaaviot ja johdotuskuvat ja perehtymällä kohteeseen. Koestuslaitteet laitetaan valmiiksi.
2. Asetteluarvot luetaan releestä ja verrataan niitä suojauskaavioon oikeellisuuden varmistamiseksi.
3. Tarkistetaan mittamuuntajien toisiopiirit. Mitataan virrat ja jännitteet yleismittarilla tai pihtivirtamittarilla. Uudenaikaisissa releissä voidaan mittausarvot lukea myös releen näytöltä.
4. Mitataan releen apujännite.
5. Erotetaan katkaisijalle menevät laukaisusignaalit. Varmistetaan mittaamalla, että ollaan erotettu oikeat signaalit. Signaalit erotetaan siten, että mahdolliset muut suojalaitteet voivat vielä laukaista katkaisijan vikatilanteessa.
6. Oikosuljetaan releen virranmittauspiirit esimerkiksi mittajohdoilla ennen niiden avaamista. Aukinaisessa virtapiirissä esiintyy vaarallisen suuria jännitteitä.
7. Aukaistaan releen jännitemittauspiirit.
8. Tehdään koestuskytkennät ja kytketään koestuslaitteen virran- ja jännitteensyöttö releen vastaaviin sisäänmenoihin. Kytchentäpaikat nähdään piirikaaviosta ja johdotuskuvasta nähdään kummalta puolelta johdin releelle lähtee. Tuodaan releen laukaisu- ja hälytys-signaalit koestuslaitteen sisääntuloihin.
9. Koestetaan releen kaikki käytössä olevat toiminnot: havahtumiset, palautumiset, hälytykset, laukaisut, lukitukset. Kirjataan koestusarvot ylös ja tarkistetaan niiden oikeellisuus.
10. Puretaan koestuskytkennät.
11. Kytetään jännitemittauspiirit.
12. Kytetään virranmittauspiirit ja poistetaan oikosulut.
13. Kytetään laukaisupiirit. Varmistetaan ensin mittaamalla, ettei laukaisut ole päällä.
14. Varmistetaan mittaus- ja laukaisupiirien kunto.

6.2.2 Säätöjärjestelmien määräaikaiskoestukset

Säätöjärjestelmille tehtävät määräaikaistarkastukset rajoittuvat lähinnä suojalaitteisiin ja järjestelmän yleisen kunnon tarkastuksiin. Säätökokeita, kuten askelvastekokeita ei tehdä, jos niihin ei ole tiettyä syytä tai verkon haltijan toimesta sellaisia vaadita.

Jännite- ja turpiinisäätäjälle tehdään silmämääräinen tarkastus. Tällöin tarkastetaan laitteiston ja sen komponenttien kunto, kuten magnetointilaitteesta (jännitesäätäjä) magnetointikatkaisijan koskettimet ja kentänheikennysvastuksen eheys.

Magnetointilaitteensäädön rajoittimet testataan syöttämällä koestuslaitteella mittasuureet säätimelle sekä tyristorisillan ohjauspulssit tarkastetaan oskilloskoopilla. Säätökaapin kaikki apujännitteet mitataan.

Jos järjestelmään kuuluu mitta-arvonmuuntimia, tarkistetaan niiden mittaustarkkuus. Turpiinisäätäjän tarkistettavia mittasignaaleja ovat teho, loisteho, sähköverkon taajuus sekä turpiinin pyörimisnopeus. Tarkastuksista ja koestuksista tehdään pöytäkirja.

6.2.3 Muuntajien ja omakäytön määräaikaistestit

Muuntajien kaikki suojalaitteet testataan kunnossapito-ohjeen mukaisesti määräajoin. Muuntajan käämeistä mitataan eristys- ja tasavirtavastukset. Muuntajien käämikytkimet vaativat säännöllistä huoltoa. Käämikytkintä ajetaan portaalta toiselle siten, että piirin eheyttä mitataan vastusmittauksella koko ajan, kun siirrytään portaalta toiselle. Piiri ei saa katketa missään vaiheessa ajon aikana.

Lisäksi öljyristeisistä muuntajista otetaan öljynäytteitä, jotka tutkitaan laboratoriossa mahdollisten kaasujen ja muiden epäpuhtauksien löytämiseksi. Öljylle suoritetaan myös läpilyöntijännitteen määrittäminen. Omakäyttökeskusten suojalaitteille suoritetaan toisiokoestukset. Vaihtoautomaatiikan toiminta testataan primäärisesti.

6.3 Muutokset voimalaitoksella ja sähköverkossa

VJV2013 mukaan on jatkuvasti seurattava, että voimalaitos täyttää ne vaatimukset, jotka sille on asetettu liittymäsopimuksessa. Voimalaitoksen on toimittava vaatimusten mukaisesti myös sen jälkeen, kun vaatimukset on käyttöönottokokeissa todennettu. Mikäli havaitaan, että voimalaitoksen toiminta on ristiriidassa vaatimusten kanssa tai havaitaan normaalikäytön aikana voimalaitoksen toiminnan poikkeavan vaatimuksista, on ryhdyttävä heti toimenpiteisiin asian korjaamiseksi.

Jos voimalaitoksen laitteisiin tai järjestelmiin tehdään sellaisia muutoksia, jotka vaikuttavat voimalaitoksen järjestelmäteknisiin vaatimuksiin, on asiasta ilmoitettava sähköverkon haltijalle ja Fingridille ennen muutosten toteuttamista. Tehtävien muutoksien takia voidaan voimalaitoksen vaatimustasoa joutua muuttamaan. Tällaisia muutoksia voimalaitoksella voi olla generaattorin uusiminen tai jännite- ja turpiinisäätäjän uusiminen. Säätäjän säätövasteeseen voi tulla muutoksia jo komponenttien mekaanisen kulumisen seurauksena.

Voimalaitoksen lähellä olevan sähköverkon muutokset voivat aiheuttaa myös muutoksia voimalaitokselle asetettaviin vaatimuksiin. Sähköverkon muutokset vaikuttavat varsinkin sähköverkon suojaustoimintoihin. Suojausasettelut pitää määrittää uudestaan. Tähän on olemassa apuvälineinä erilaisia verkoston laskentaohjelmia.

Sähköverkon suojauksen selektiivisyyden tarkastelun apuna voidaan käyttää esimerkiksi Microsoft Excel-ohjelmaa. Taulukossa 20 on tehty luvussa 7.1 käytettyjen käyttöönottoetäisyyden pohjalta ylivirtasuojauksen selektiivisyyden tarkastelu. Suojauskaavioista poimitut ylivirta-asetteluarvot on syötetty Excel-tilaan. Taulukon arvoista on piirretty Excel-ohjelman avulla kuvaajat. Kaikki asetellut on redusoitu 10 kV:n jännitetasolle. Tässä tapauksessa 110 kV:n ylivirta-asetellut on laskettu päämuuntajan muuntosuhteen mukaisesti kaavalla 3.

$$\bar{I}'_2 = (U_{2n}/U_{1n}) \times \bar{I}_2 \quad \text{KAAVA 3}$$

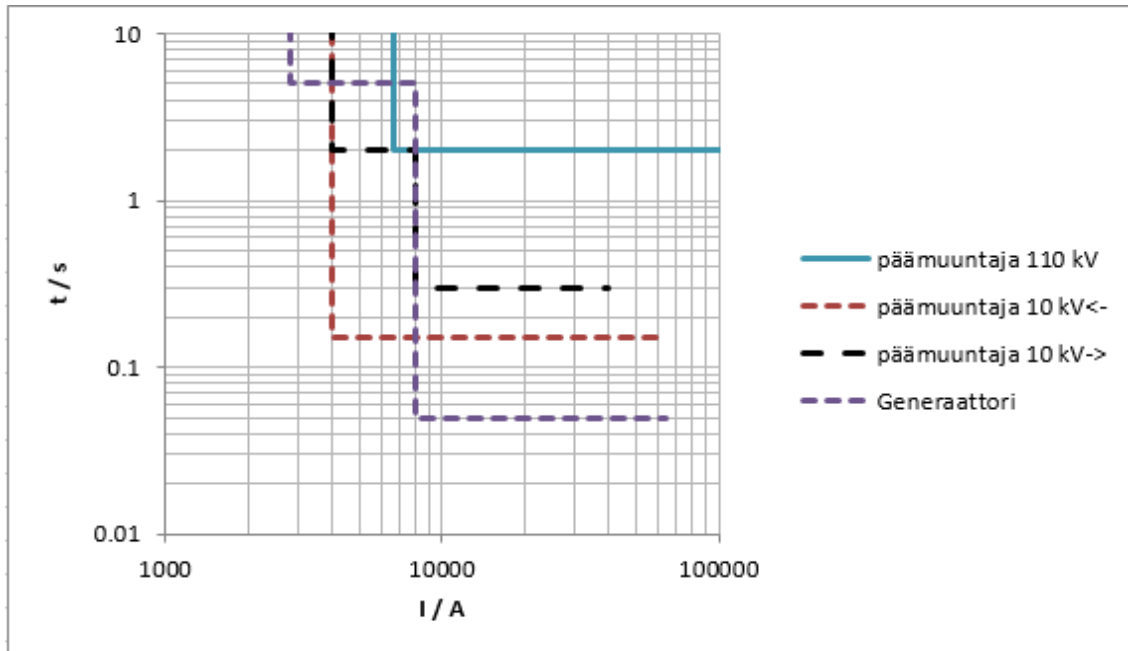
missä \bar{I}'_2 = redusoitu virta
 U_{2n} = redusoitavan jännitetason jännite
 U_{1n} = jännite, siitä jännitetasosta johon redusoidaan
 \bar{I}_2 = redusoitava virta

Päämuuntajan 110 kV:n ylivirtasuojassa oli käytössä vain yksi suojaustaso, jonka asetellut oli 600 A. Päämuuntajan jännitetasot ovat $U_{2n} = 117 \text{ kV}$ ja $U_{1n} = 10,5 \text{ kV}$. Tästä saadaan kaavalla 3 laskettua päämuuntajan 600 A:n virta-asettelun vastaavuus 10,5 kV:n tasossa.

$$\bar{I}'_2 = U_{2n}/U_{1n} \times \bar{I}_2 \quad \Rightarrow \quad \bar{I}'_2 = 117 \text{ kV} \div 10,5 \text{ kV} \times 600 \text{ A} = 6686 \text{ A}$$

Tuloksena saadaan, että 600 A:n virta-asettelu 110 kV:n jännitetasossa vastaa 6686 A:n virtaa 10,5 kV:n jännitetasossa.

TAULUKKO 20. Taulukossa on ylivirtasuojauksen selektiivisyys tarkastelua generaattorilta päämuuntajan 110 kV:n ylivirtasuojaukseen asti. 110 kV:n virta on redusoitu 10 kV:n jännitetasoon. Päämuuntajan 10 kV:n ylivirtasuoja on suunnattu molempiin suuntiin. Generaattorista verkkoon päin toiminta-aika on pitempi. Punainen katkoviiva kuvaa virta-asettelua verkosta generaattoriin päin ja musta katkoviiva päinvastaiseen suuntaan.



Voimalaitoksella tehdyt muutokset täytyy todentaa esimerkiksi askelvastekokein, jos muutosten seurauksena voimalaitoksen teholuokka muuttuu ylöspäin. Voimalaitoksen rakenteen tai toiminnollisuuden muutokset, joilla on myös vaikutusta järjestelmäteknisiin ominaisuuksiin ja toimintoihin, täytyy todentaa kokein. Suojareleisiin tehtävät muutokset täytyy testata ainakin muutettujen toimintojen osalta.

7 YHTEENVETO

Työssä perehdyttiin voimalaitoksen kykyyn selviytyä häiriötilanteissa. Häiriöitä aiheuttavat voimalaitoksen läheisyydessä tapahtuvat sähköverkon oiko- ja maasulut, joita aiheuttavat useat eri tekijät. Voimalaitoksella nämä viat näkyvät sähköjärjestelmän jännitteen ja taajuuden muutoksina. Asiaa tarkasteltiin eri standardien ja sähköjärjestelmästä vastaavan toimijan Fingridin vaatimusten pohjalta. Voimalaitoksen häiriösietokykyä tarkasteltiin selvittämällä sähköverkon ja voimalaitoksen suojalaitteiden ja voimalaitoksen säätöjärjestelmien toiminnan vaatimuksia ja sitä, mitä toimenpiteitä vaatimusten toteutumisen varmistamiseksi tehdään.

Tutkimusaineistona käytettiin yhden vesivoimakoneen käyttöönottokeustusmateriaalia. Vesivoimakoneelle suoritettiin peruskorjaus. Peruskorjaus käsitti generaattorin ja turpiinin uusimisen säätö- ja ohjauksjärjestelmineen. Peruskorjaukseen liittyi myös päämuuntajan sekä kaikkien sähkökeskusten uusiminen 400 V:sta 10 kV:iin asti. Keskusten uusinta tehtiin kaksi vuotta aiemmin.

Kokeet suoritettiin kolmessa jaksossa siten, että ensin tehtiin tarkastukset ja mittaukset koneiston seisoessa vesitiet tyhjänä, seuraavaksi kokeet ja mittaukset koneiston käydessä tyhjäkäynnillä ja lopuksi kokeet koneiston ollessa verkossa tehoajolla. Yhteenvetona tehdyistä kokeista ja tarkastuksista voidaan todeta, että koneisto toimii hyvin ja täyttää sille asetetut vaatimukset.

Määräaikaiskoestuksia suoritetaan laitteistosta vastaavan tekemän kunnossapito-ohjelman mukaisesti. Nämä voivat olla osaltaan myös lain velvoittamia. Määräaikaiskoestusten perusteella voidaan arvioida laitteiston kuntoa. Määräaikaiskoestukset pyritään tekemään huoltoseisakkien yhteydessä, jolloin voidaan havaitut viat korjata saman aikaisesti ilman erillistä tuotannon keskeytystä.

Kun voimalaitoksen laitteisiin tai järjestelmiin tehdään sellaisia muutoksia, jotka vaikuttavat voimalaitoksen järjestelmätekniisiin vaatimuksiin, on asiasta ilmoitettava sähköverkon haltijalle ja Fingridille ennen muutosten toteuttamista. Voimalaitoksen on toimittava vaatimusten mukaisesti myös sen jälkeen, kun vaatimukset on käyttöönottokokeissa todennettu. Mikäli havaitaan, että voimalaitoksen toiminta on ristiriidassa vaatimusten kanssa tai havaitaan normaalikäytön aikana voimalaitoksen toiminnan poikkeavan vaatimuksista, on ryhdyttävä heti toimenpiteisiin asian korjaamiseksi.

Voimalaitoksen selviytymiseen häiriöstä vaikuttaa osaltaan se, mistä voimakone saa energiansa. Vesivoimalaitos tarvitsee toimiakseen vähemmän apulaitteita kuin esimerkiksi höyryvoimalaitos. Tämän vuoksi höyryvoimalaitokset ovat herkempiä myös sähköverkon häiriöille. Taajuusmuuttajakäytöt ovat häiriöherkkiä sähköverkon jännitevaihteluille. Tämä seikka vaikuttaa hyvin paljon voimalaitoksen verkossa pysymiseen verkkohäiriön aikana.

Voimalaitosten järjestelmätekniset vaatimukset ovat erilaiset eri tuotantomuodon laitoksilla. Vesi-voimalaitokset ovat tärkeitä säätövoiman tuottajia, joten niiden vaatimuksen sähköverkon tuen-
nassa ovat suuremmat kuin muilla voimalaitoksilla.

E erityisen tärkeitä höyryvoimalaitoksen toiminnan kannalta ovat ilma- ja savukaasukaasupuhaltimet ja polttoaineen syöttöpumput. Sähkökäyttöihin ja muiden apulaitteiden vaikutusta häiriökestoisuuteen tässä työssä ei käsitellä. Siinä voisi olla yksi uusi työn aihe.

Vaatimuksiin voimalaitoksille sekä liittymisehtoihin tulee lähitulevaisuudessa muutoksia. Muutospaineita aiheuttaa sähköjärjestelmässä tapahtuva tuotantorakenteen muutos. Hajautettua sähköntuotantoa kuten tuulivoimaa tulee lisää. Älykkäät sähköverkot ja tiukentuneet vaatimukset toimitusvarmuudelle asettavat uusia vaatimuksia sähköntuotannolle. Sähköntuotantorakenteen muutoksen myötä tarvitaan lisää säätövoimaa.

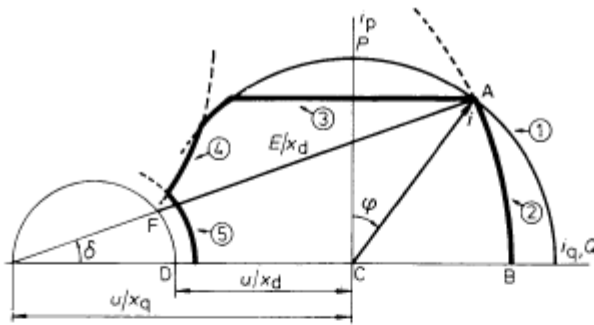
LÄHTEET

1. Perustelut Fingridin yleisissä liittymisehdoissa (YLE2013) asetetulle 1650 MW tehorajalle. 2012. Fingrid. Saatavissa: [http://www.fingrid.fi/fi/asiakkaat/asiakasliitteet/Liittyminen/Fingrid%20Oyj%20perustelu muistio%20tehonmuutosrajalle%20YLE2013.pdf](http://www.fingrid.fi/fi/asiakkaat/asiakasliitteet/Liittyminen/Fingrid%20Oyj%20perustelu%20muistio%20tehonmuutosrajalle%20YLE2013.pdf). Hakupäivä 11.3.2017.
2. Voimalaitosten järjestelmätekniset vaatimukset VJV2013. 2013. Fingrid. Saatavissa: <http://www.fingrid.fi/fi/asiakkaat/asiakasliitteet/Liittyminen/2013/Voimalaitosten%20j%C3%A4rjestelm%C3%A4tekniset%20vaatimukset%20VJV2013.pdf>. Hakupäivä 1.1.2016.
3. Fingrid OYJ:n yleiset liittymisehdot YLE2013. 2012. Fingrid. Saatavissa: <http://www.fingrid.fi/fi/asiakkaat/liittyminen/Yleiset%20liittymisehdot/Sivut/default.aspx>. Hakupäivä 1.8.2016.
4. L 16.12.2016/1135. Sähköturvallisuuslaki.
5. Parviainen, Petri – Sederlund, Jarno. 2016. Fingrid. Kantaverkkoon liittymisen periaatteet. Saatavissa: http://www.fingrid.fi/fi/asiakkaat/asiakasliitteet/Kantaverkkopalvelut/Liittymisen_periaatteet.pdf. Hakupäivä 11.8.2016.
6. Elovaara, Jarmo – Haarla, Liisa 2011. Sähköverkot I, Järjestelmäteknikka ja sähköverkon laskenta. Otatieto. Tallinna: Raamatutrükikoda.
7. Alanen, Raili – Hätönen, Hannu 2006. Sähkön laadun ja jakelun luotettavuuden hallinta, State of art -selvitys. VTT. Saatavissa: <http://www.vtt.fi/publications/index.jsp>. Hakupäivä 8.12.2016.
8. EN 60909-0. 2001. Short-circuit currents in three-phase ac systems. European Committee for Electrotechnical Standardization. Brussels: CENELEC.
9. Mörsky, Jorma 1992. Relesuojaustekniikka. Toinen korjattu painos. Hämeenlinna: Karisto Oy.

10. Huhtinen, Markku – Korhonen Risto – Pimiä Tuomo – Urpalainen Samu 2008. Voimalaitos-tekniikka. Keuruu: Otavan kirjapaino Oy.
11. Klempner, John – Kerszenbaum, Isidor 2004. Operation and maintenance of large turbo-generators. New Jersey, Hoboken: John Wiley and Sons, inc. Saatavissa: <http://elib.peaceland.edu.ng:8383/greenstone3/sites/localsite/collect/peacelan/index/asoc/HASH0140/29c3658e.dir/doc.pdf>. Hakupäivä 11.3.2017.
12. Andritz Hydro 2012. Excitation training part 3. Fortum, Inkoon voimalaitos. Koulutus 17.1.2012.
13. INSKO 1981. Julkaisu 45-78 Vesivoimalaitokset, 2. painos. Helsinki: Insinööritieto Oy.
14. Ruokolainen, Pia 2016. Voimalaitoksen säätöominaisuudet- ja periaatteet saarekekäytössä. diplomityö. Tampere: Tampereen teknillinen yliopisto.
15. Riikonen, Timo 2005. Toimintakuvaus UT3 digitaalinen turpiinisäätäjä . Fortum Power and Heat Oy, Hydro Power. Arkistotunnus: A/OJT-L10-126, Q-FS-L3 - UT3. Tehty 10.2.2005.
16. Delille, Gauthier – François, Bruno – Malarange, Gilles 2010. Dynamic Frequency Control Support: a Virtual Inertia Provided by Distributed Energy Storage to Isolated Power Systems. Saatavissa: http://www.cricte2004.eletrica.ufpr.br/anais/IEE_ISGT_2010/2049350.pdf. Hakupäivä 11.3.2017.
17. Elovaara, Jarmo — Haarla, Liisa 2011. Sähköverkot II, Järjestelmätekniikka ja sähköverkon laskenta. Otatiето. Tallinna: Raamatutrükikoda.
18. Vedenjuoksu, Timo 2014. Sähköjärjestelmien relesuojaus, suojarleet. Koulutusmateriaali. ABB Oy Medium Voltage Products.
19. Teknisiä tietoja ja taulukoita. 2000. ABB. Yhdeksäs painos. Vaasa.

LIITTEET

- Liite 1. Generaattorin PQ -diagrammi
- Liite 2. Generaattorin sysäysoikosulkukoe
- Liite 3. Oikosulkulaskelman jännitekertoimet
- Liite 4. Generaattorin suojausasettelut
- Liite 5. Virtamuuntajan mittauspöytäkirja
- Liite 6. Generaattorin jännitesäätäjän 10%-askelvastekoe
- Liite 7. Generaattorin jännitesäätäjän roottorivirtarajoin
- Liite 8. Generaattorin jännitesäätäjän U/f-rajoitin
- Liite 9. Generaattorin staattorivirtarajoin
- Liite 10. Generaattorin alimagnetointirajoin
- Liite 11. Generaattorin loistehon poislyöntikoe
- Liite 12. Generaattorin 100%:n tehon poislyöntikoe

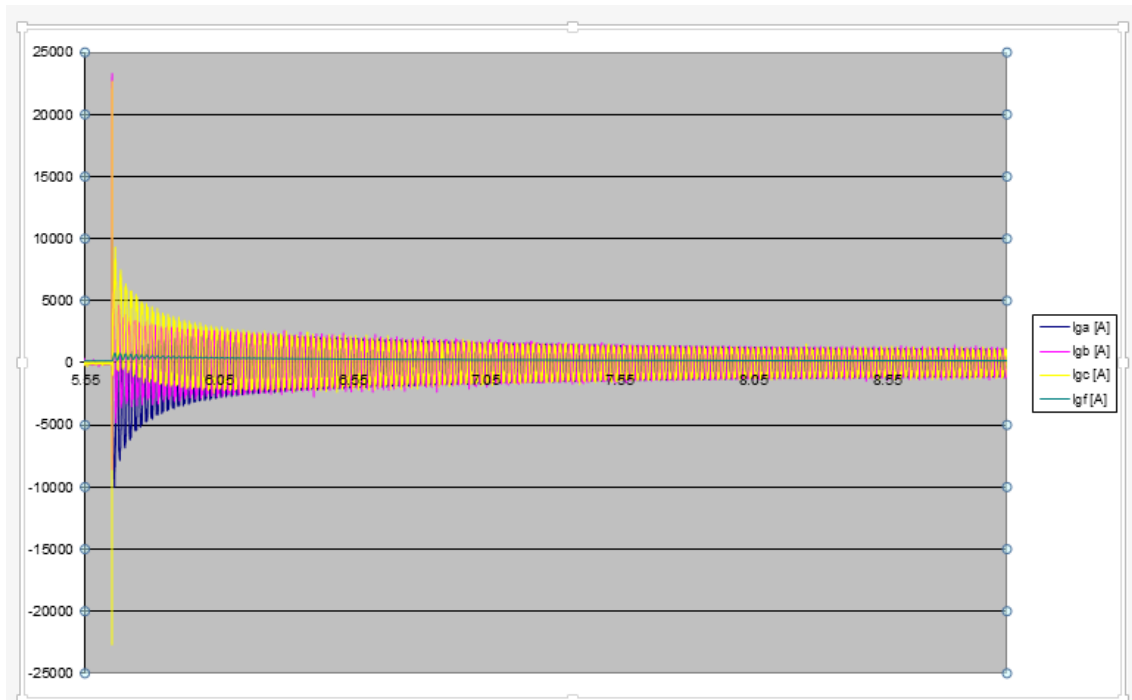


Tahtigeneraattorin osoitindiagrammi.

- A = kuormituspiste (nimellikäyttöpiste),
 - B = tyhjäkäyntipiste nimellismagnetoinilla,
 - C = tyhjäkäyntipiste tyhjäkäyntimagnetoinnilla,
 - D = tyhjäkäyntipiste ilman magnetointia,
 - \overline{CA} = staattorivirta (= i),
 - \overline{FA} = nimellismagnetointivirta,
 - \overline{DC} = tyhjäkäyntimagnetointivirta,
 - 1 = vakiostaattorivirtakäyrä, staattorin lämpenemisen asettama raja,
 - 2 = vakiomagnetointikäyrä, roottorin lämpenemisen asettama raja,
 - 3 = voimakoneen pätötehoraja,
 - 4 = käytännön stabiilisuusraja,
 - 5 = alimagnetointiraja,
 - u = staattorijännite,
 - P = pätöteho,
 - Q = loisteho,
 - I = staattorivirta (i_p = pätövirta i_q = loisvirta),
 - E = tyhjäkäyntijännite nimellismagnetoinnilla,
 - x_d = pitkittäinen tahtireaktanssi,
 - x_q = poikittainen tahtireaktanssi,
 - δ = kuormituskulma (napakulma),
 - φ = tehokulma ($\cos \varphi$ = tehokerroin),
- (tehot, virrat, jännitteet ja reaktanssit suhteellisarvoja).

(19, s. 459)

Generaattorin toimiessa mitoitustehoa pienemmillä tehoilla sen tulee kyetä tuottamaan tai kuluttamaan loistehoa generaattorin mitoitusjännitteellä ja -taajuudella laaditun PQ -diagrammin mukaisesti. Aihetta käsitellään sivulla 18.



Kuvassa on generaattorille tehdyn sysäysoikosulkukokeen tuloksena saatu virran kuvaaja. Kuvaajassa nähdään generaattorin kolmen vaiheen (a,b ja c) virrat sekä generaattorin magnetointivirta I_{gf} . Kokeessa generaattori magnetoidaan 50 % jännitteeseen. Tässä tapauksessa generaattorin nimellisjännite U_n oli 10,5 kV, joten generaattorin jännitteeksi aseteltiin 5,25 kV. Generaattorin katkaisija ohjattiin kiinni kolmivaiheista oikosulkua vasten. Generaattorin kiskot, katkaisijan sähköverkon puolelta, oli kytketty irti sähköverkosta, ja sen jälkeen kiskot oli kytketty yhteen eli oikosulkuun. Generaattori oli oikosulussa noin 5 s, minkä jälkeen generaattorin magnetointikatkaisija avattiin. Oikosulkukäyrää on tallenteessa noin 3,5 sekunnin ajalta. Virran huippuarvo on noin 23000 A. Asiaa käsitellään sivulla 36.

| Nominal voltage U_n | Voltage factor c for the calculation of | |
|--|---|--|
| | maximum short-circuit currents $c_{max}^{1)}$ | minimum short-circuit currents c_{min} |
| Low voltage 100 V to 1 000 V (IEC 60038, table I) | 1,05 ³⁾ 1,10 ⁴⁾ | 0,95 |
| Medium voltage >1 kV to 35 kV (IEC 60038, table III) | 1,10 | 1,00 |
| High voltage²⁾ >35 kV (IEC 60038, table IV) | | |
| ¹⁾ $c_{max}U_n$ should not exceed the highest voltage U_m for equipment of power systems. ²⁾ If no nominal voltage is defined $c_{max}U_n = U_m$ or $c_{min}U_n = 0,90 \times U_m$ should be applied. ³⁾ For low-voltage systems with a tolerance of +6 %, for example systems renamed from 380 V to 400 V. ⁴⁾ For low-voltage systems with a tolerance of +10 %. | | |

(8, s.41.)

Standardissa IEC 60909-0:2001 määritetään oikosulun laskemisessa nimellisjännitteelle jännitekerroin c , joka on voimassa tietylle jännitealueelle. Oikosulkulaskelmaa käsitellään sivulla 37.

| | Suojaus | Valmistajan esittämät rajat | | Asetetut arvot |
|----|---------------------------------|--|-------------------------------------|---|
| | | Alaraja | Kestoisuus | |
| 1 | Staattorin ylikuormitus | $1,05 I_{in}$ | Kestoika riippuu virran suuruudesta | $1,151 I_n$ 10 s |
| 2 | Yhdistetty ylivirta/aliäännite | $\geq 1,4 I_{in}$ $< 0,7 U_n$ | maks. 10 s | $I \gg 4 I_{in}$ $I > 1,4 I_{in}$ 4 s $U < 0,7 U_n$ 0,1 s |
| 3 | Staattorin ylivirta | $\geq 1,4 I_{in}$ | maks. 10 s | $I > 1,4 I_{in}$ 4 s |
| 4 | Alitaajuus | $< 0,97 f_n$ $< 0,95 f_n$ $< 0,90 f_n$ | 0,5 s 10 s 5 s | 49,0 Hz 0,15 s 47,5 Hz 1,5 s 47,5 Hz 6,0 s |
| 5 | Generaattorin erovirta | $> 0,1 I_n$ | min < 0,1 s | $0,15 I_n$ |
| 6 | Staattorin maasulku | | 0,5 s | 503 V 0,5 s 1,0 kΩ 2 s |
| 7 | Blokin erovirta /ali-impedanssi | $> 0,5 I_n$ $< 50 \%$ yksikön muuntajan impedanssista | < 0,1 s 0,5 s | $U > 1,25 U_n$ 2,0 s $U \gg 1,4 U_n$ |
| 8 | Ylijännite | 1,1-1,2 U_n 1,2-1,4 U_n | maks. 6s 0,1 s | 4 s 5 s |
| 9 | Roottorin maasulku | 20-5 kΩ < 1000 Ω | 1 s | $1,06 I_f$ |
| 10 | Roottorin ylikuormitus | $1,12 I_n$ | Kestoika riippuu virran suuruudesta | $0,46 P_n$ 1,0 s |

Taulukossa on erään generaattorivalmistajan suosittelemat asetelut ja viimeisessä sarakkeessa omistajan käyttöönottamat asetelut. Generaattorin suojausta käsitellään sivulla 37.

Asema _____

Asiakas / Omistaja _____

FORTUM POWER AND HEAT OY

Mittauskohde _____

GEN TAHTIPISTE VIRTAMUUNTAJAT

VIRTAMUUNTAJAN KILPIARVOT

| | L1 | | | L2 | | | L3 | | | |
|--------------------------------------|----------------|--------|---------|----------------|--------|---------|----------------|---------|---------|----|
| | 1s1-1s2 | 2s1-2s | 3s1-3s2 | 1s1-1s2 | 2s1-2s | 3s1-3s2 | 1s1-1s2 | 2s1-2s2 | 3s1-3s2 | |
| Valmistaja | ABB | | | ABB | | | ABB | | | |
| Tyyppi | TPU 45.43 | | | TPU 45.43 | | | TPU 45.43 | | | |
| Sarjanumero | 1VLT5113005689 | | | 1VLT5113005680 | | | 1VLT5113005695 | | | |
| Nimellisenävirta, I _n | 2000 | | | 2000 | | | 2000 | | | A |
| Nimellistoisivirta, I _{sn} | 5/5/1 | | | 5/5/1 | | | 5/5/1 | | | A |
| Nimellisjännite, U _n | 12/28/76 | | | 12/28/76 | | | 12/28/76 | | | kV |
| Nimellistaakka | 7,5 | 15 | 20 | 7,5 | 15 | 20 | 7,5 | 15 | 20 | VA |
| Tarkkuusluokka | 0,2 | 5P15 | 5P40 | 0,2 | 5P15 | 5P40 | 0,2 | 5P15 | 5P40 | |
| Sisätaakka | | | | | | | | | | Ω |
| Mittarivarmuuskerr., F _s | 5 | | | 5 | | | 5 | | | |
| Terminen kestovirta, I _{th} | 60 | | | 60 | | | 60 | | | kA |
| Dyn. kestovirta, I _{dyn} | 126 | | | 126 | | | 126 | | | kA |

MITTAUKSET

Mittauslaitteet/Mittalaitetunnus: **SYRKER 760 SER01MI302, FLUKE 87 SER03MI247**
Megger BM 403/2 SER01MI317, Megger BM21 SER01MI290
OMICRON 256-6 AG 166B

| | R | | | S | | | T | | |
|---|---------|--------|---------|---------|--------|---------|---------|---------|---------|
| | 1s1-1s2 | 2s1-2s | 3s1-3s2 | 1s1-1s2 | 2s1-2s | 3s1-3s2 | 1s1-1s2 | 2s1-2s2 | 3s1-3s2 |
| Napaisuuskoe + => P1, - => P2 | OK | OK | OK | OK | OK | OK | OK | OK | OK |

Muutosohde

mitattu I_p 50 A **126,21 126,0 25,5** **126,0 126,0 25,6** **126,1 126,0 25,4** mA

Eristysvastus

| | Mittausväli | L1 | L2 | L3 | |
|----------------|---|-----|-----|-----|----|
| jännite 5000 V | Ensiö - toisiokäämit, maa | 7 | 4 | 6 | GΩ |
| jännite 250 V | 1. toisiokäämi - ensiö, toisiokäämit, maa | >10 | >10 | >10 | GΩ |
| | 2. toisiokäämi - ensiö, toisiokäämit, maa | >10 | >10 | >10 | GΩ |
| | 3. toisiokäämi - ensiö, toisiokäämit, maa | >10 | >10 | >10 | GΩ |

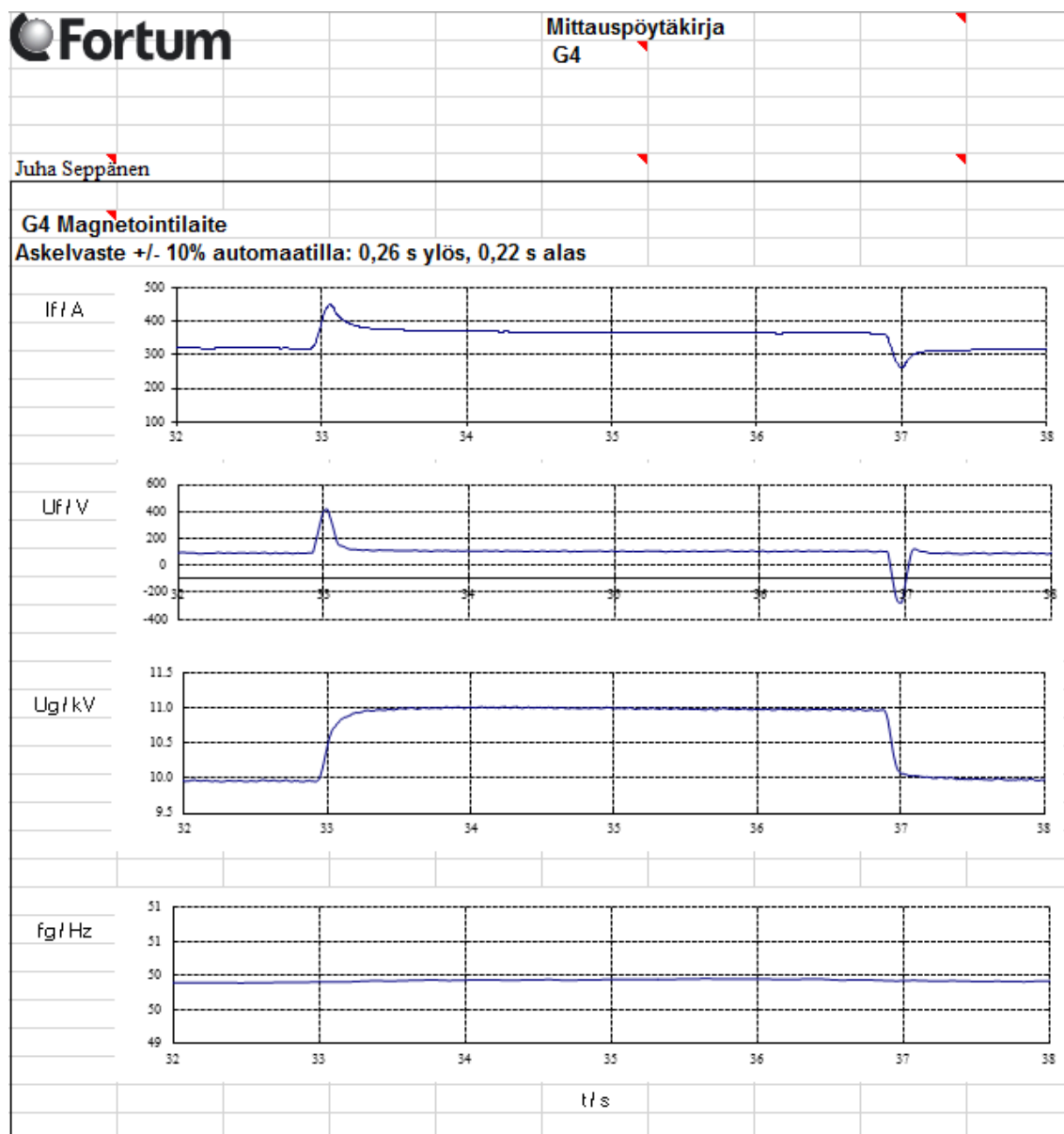
Ylivirtaluku 5 A

| | L1 | L2 | L3 | |
|----------------|------|------|------|---|
| 14,7 | 14,7 | 14,7 | 14,7 | V |
| 0,05 A | 89 | 89 | 89 | V |
| 0,002 A | 282 | 282 | 282 | |

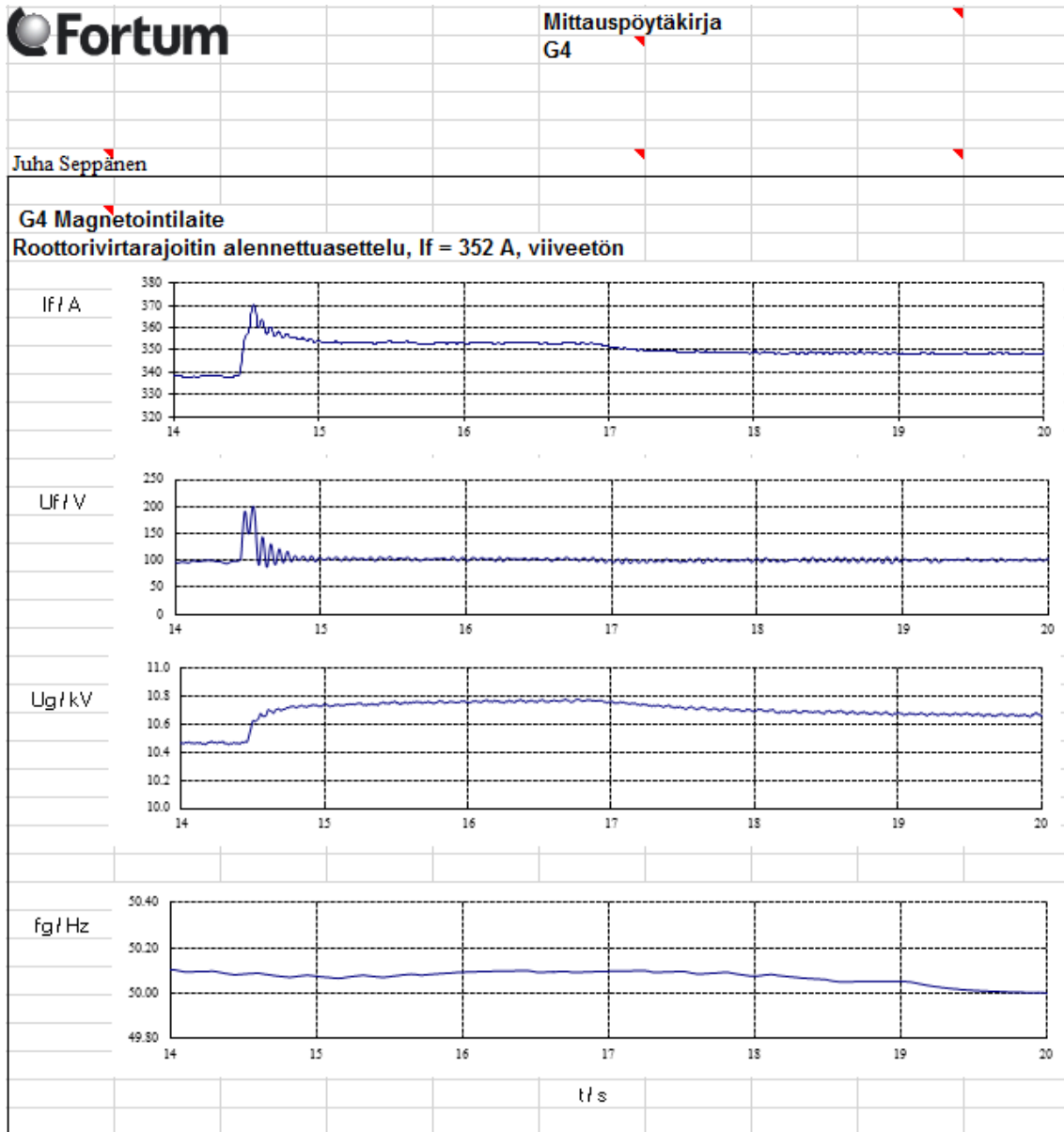
Lisätiedot: _____

Päivämäärä _____ Koestaja(t) **JSE** Puhelin _____

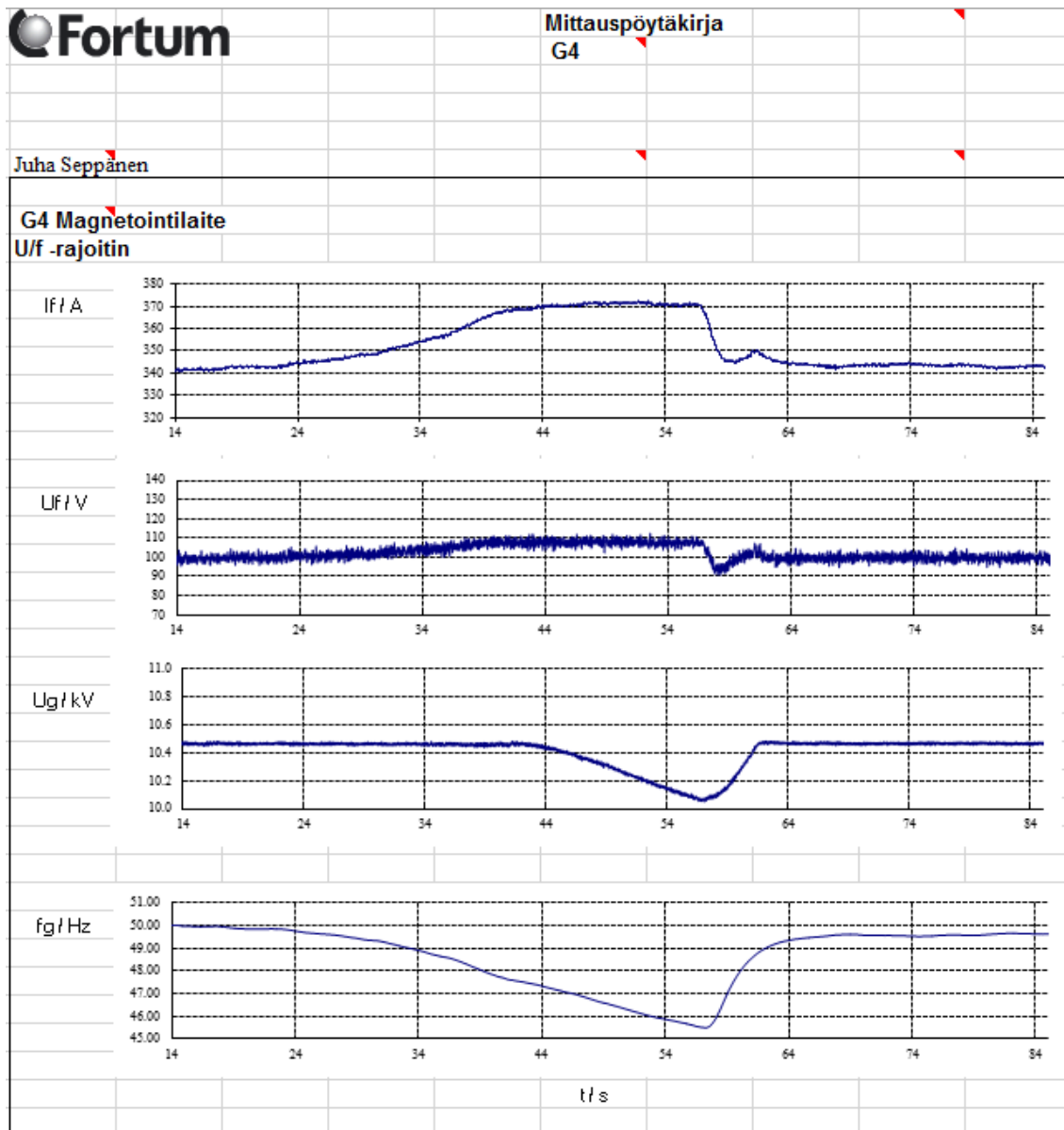
Mittauspöytäkirjaan on kirjoitettu virtamuuntajien kilpiarvot. Suoritettuja mittauksia ovat napaisuuskoe, muuntosuhdemittaus, eristysvastusmittaus sekä ylivirtaluvun määrittäminen. Ylivirtalukua ei ole tässä määritetty kovin tarkasti, mutta haluttu tulos on kuitenkin saavutettu. Taulukosta nähdään, että 1s1-1s2 sydämen nimellisvirralla 5A jännite ei nouse kuin 14,7 V:in. Tästä voidaan päätellä, että sydän 1s2-1s2 on mittaussydän. Toisten sydänten 2s1-2s2 ja 3s1-3s2 kohdalla huomataan, että jännite nousee korkealle eikä virta nouse lähellekään nimellisvirta-arvoa. Tästä voidaan päätellä näiden sydänten olevan suojaussydämiä. Asiaa käsitellään sivuilla 44.



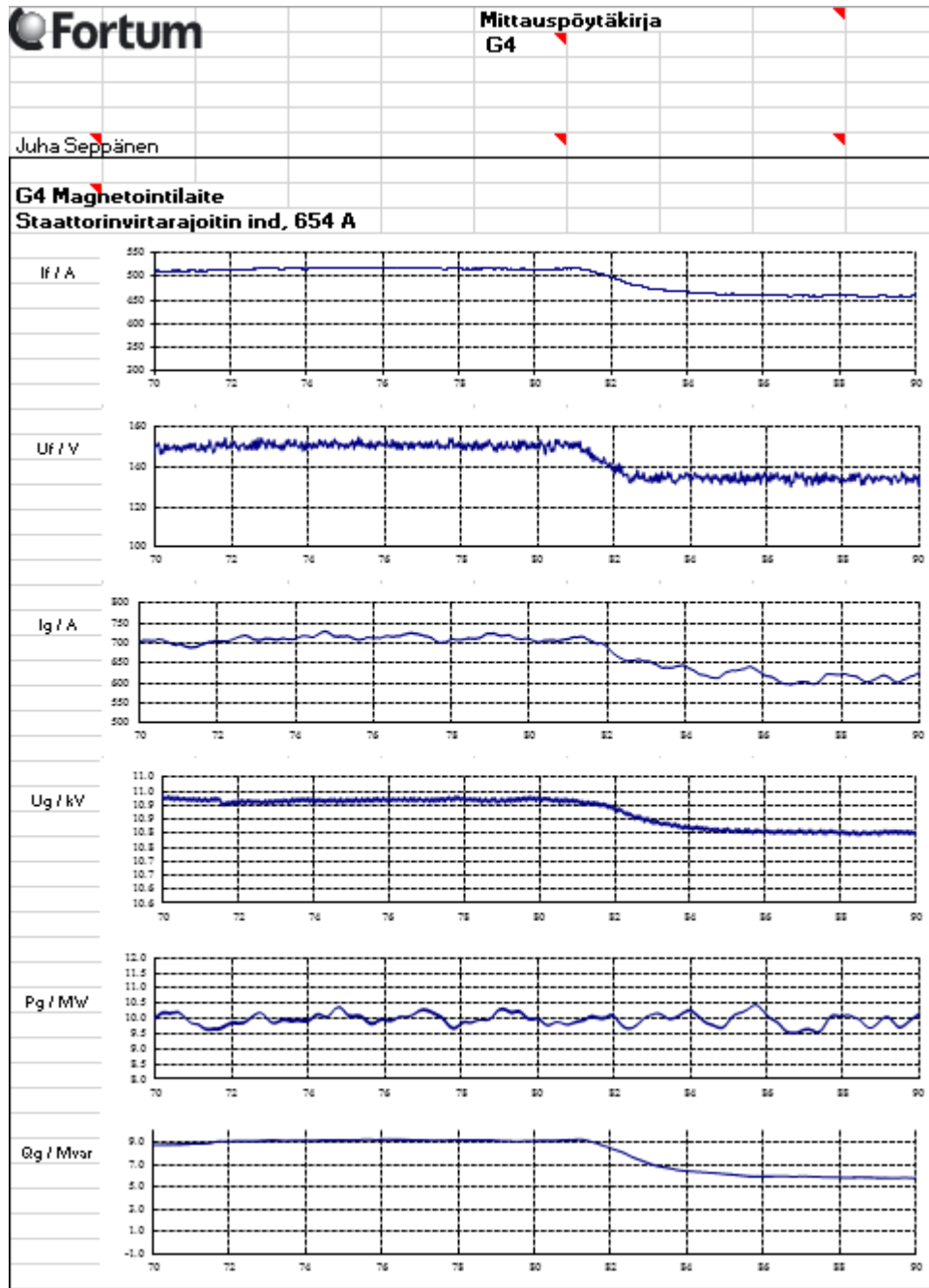
Liitteessä on generaattorin askelvastekokeen tulokset. Jännitesäätäjä on automaattisäädöllä ja sille annetaan +/-10 % askelmuutos. Generaattorin jännite muuttuu askelmuutoksen seurauksena 10 kV:sta 11 kV:iin ja takaisin 10 kV:in. Kokeen tulos täyttää vaaditun tason. Vasteaikavaatimus on voimalaitoksen järjestelmätekniisten vaatimusten (VJV2013) mukaan 0,2 - 0,3 s, kun kokonaismuutoksesta on tapahtunut 90 %. Tässä tapauksessa 90 % muutos ylös suuntaan kesti 0,26 s ja alas suuntaan 0,22 s. Jännitteen muutoksessa ei tapahtunut ylisäätöä eikä värähtelyä. VJV2013 mukaan ylitystä saa tapahtua korkeintaan 15 % mitatusta liitinjännitteen kokonaismuutoksesta. Tähän viitataan sivulla 53.



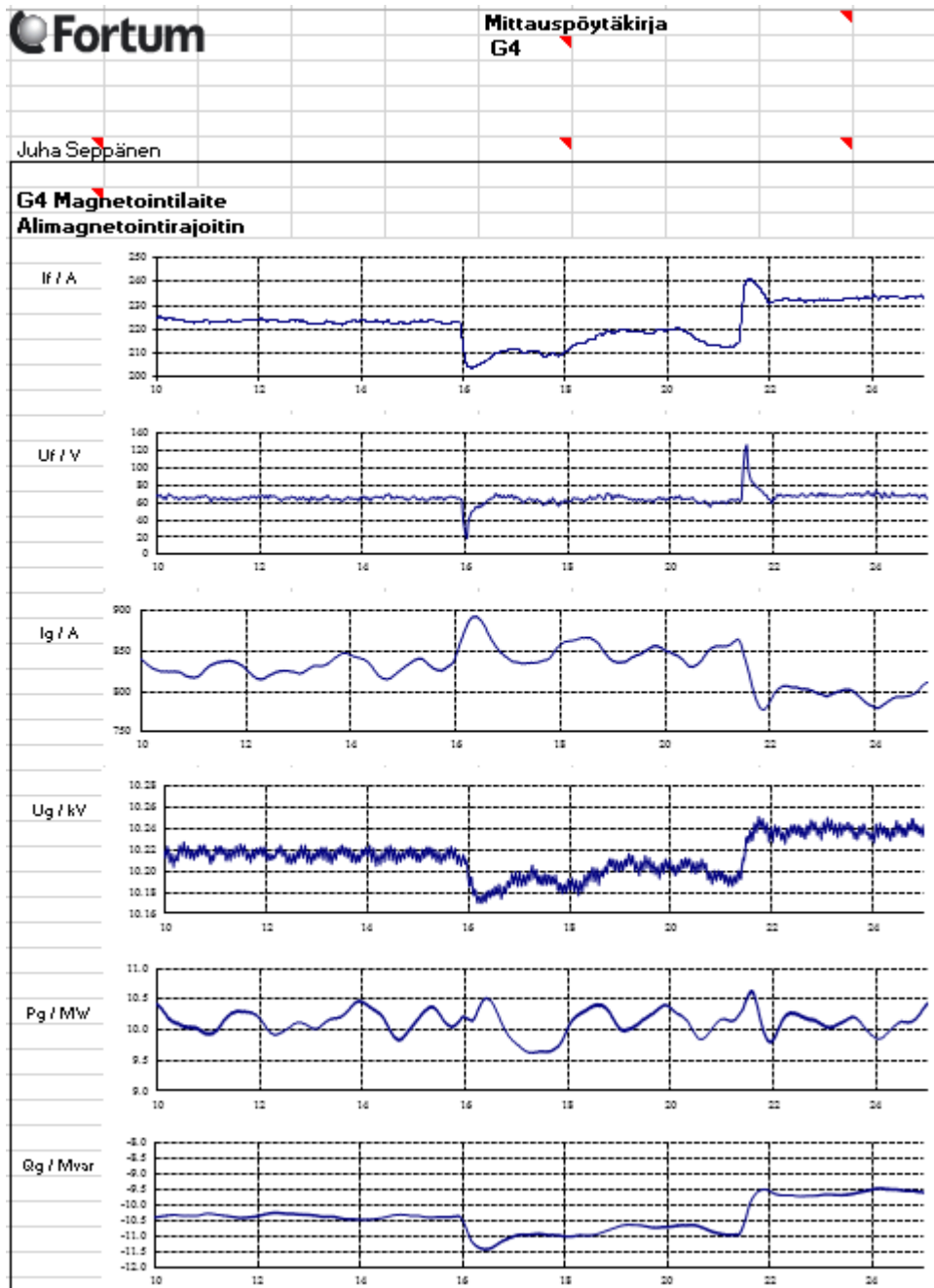
Roottorin magnetoimisvirtaa nostetaan kunnes rajoitustoiminto tulee päälle. Rajoitin pudottaa magnetoimisvirran noin 352 A:in. Roottorivirtarajoittimen asettelu on pudotettu kokeen ajaksi 352 A:in. Roottorivirtarajoinin toimii oikein. Tähän viitataan sivulla 53.



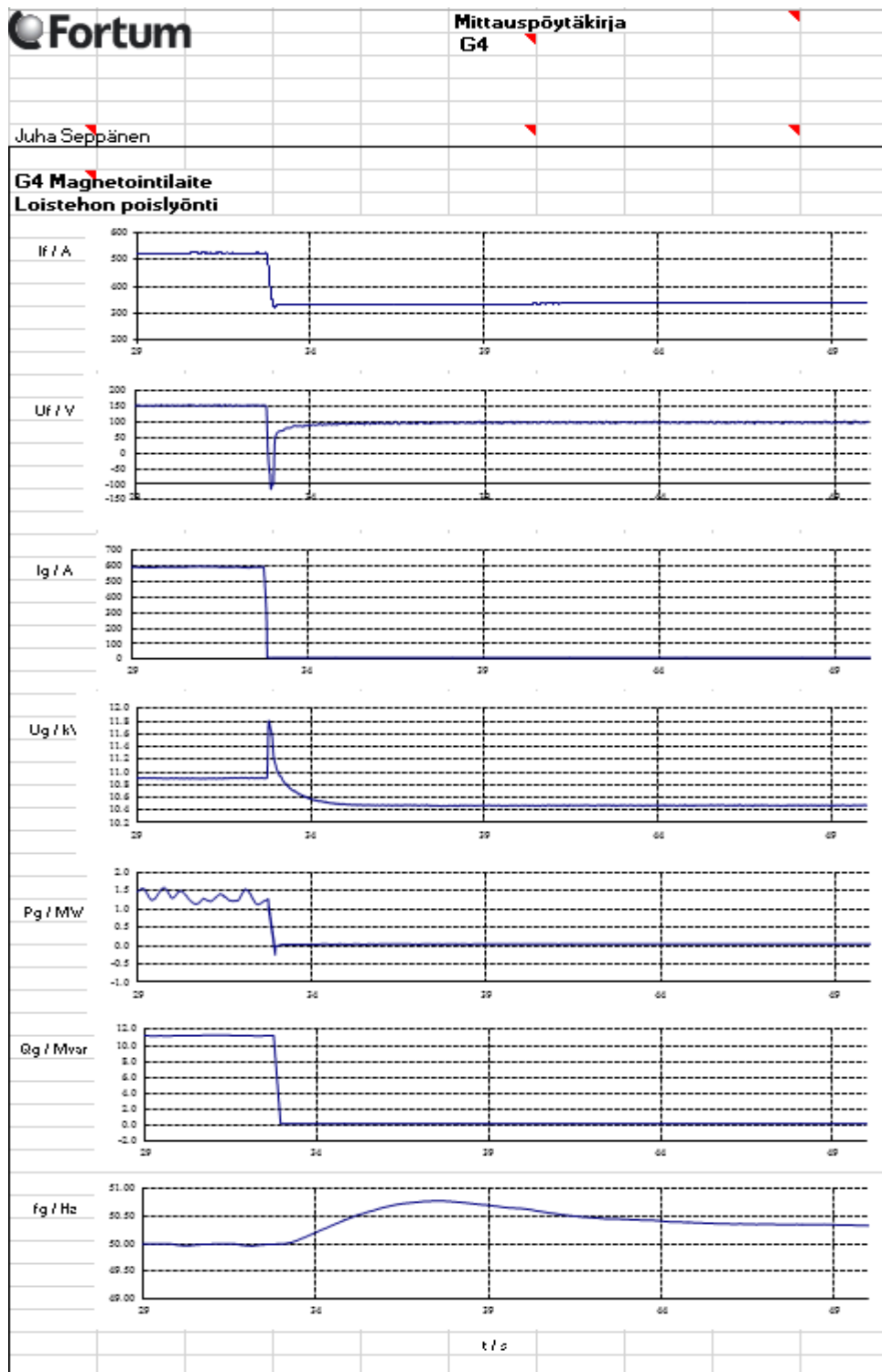
U/f-rajoittimen testaus suoritetaan siten, että turpiinin pyörimisnopeutta rajoitetaan. Generaattorin magnetoimisvirta ja -jännite alkavat nousta pyörimisnopeuden (fg) laskiessa. Rajoittimen toimiessa magnetoimisvirran ja -jännitteen lasku pysähtyvät. Tähän viitataan sivulla 53.



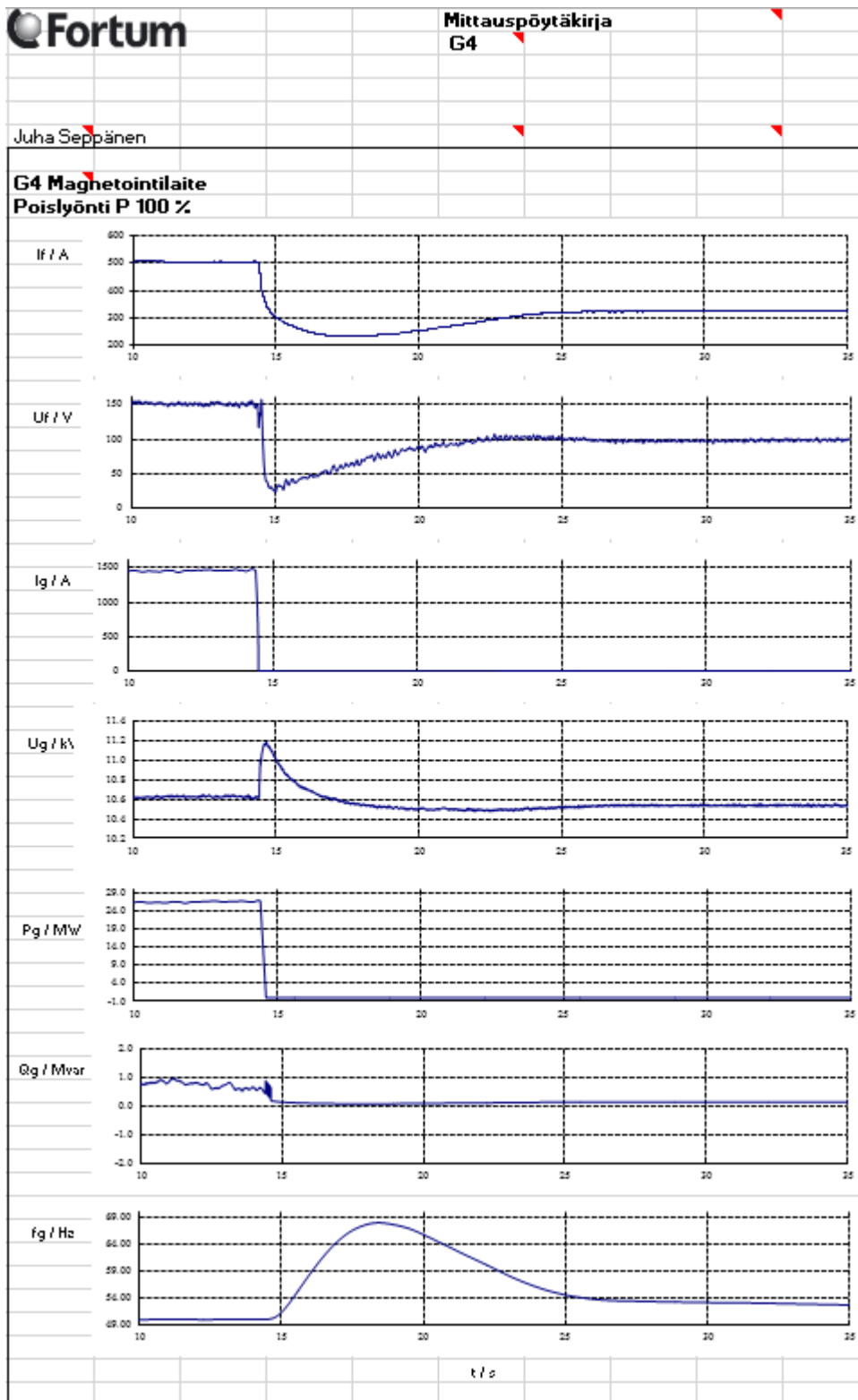
Liitteessä on generaattorin staattorivirtarajoitimen testaustulokset. Staattorivirtarajoin oli asetettu 654 A:iin. Generaattoria kuormitettiin n. 700 A:n virralla. Jännitesäätäjä oman toimintaväijensä kuluttua säätää kuormitusvirran alle 654 A:n. Staattorivirtarajoin toimii tulosten mukaan oikein. Tähän viitataan sivulla 53.



Alimagnetointirajoitin rajoittaa loistehon kasvun ja antaa hälytyksen. Jos rajoitin ei toimi, laskee jännite generaattorin edelleen ja generaattori laukeaa generaattorin suojarleean alimagnetointi-suojan toimesta pois verkosta. Tähän viitataan sivulla 53.



Loistehon poislyöntikokeessa avataan generaattorin katkaisija. Katkaisijan avauduttua ja loistehon syötön katkettua pitää koneiston jäädä pyörimään jännitteisenä. Liitteestä huomataan, että katkaisijan avautumishetkellä syntyy jännitepiikki generaattorin jännitteeseen. Jännitepiikki on sallituissa rajoissa. Myös koneiston kierrosnopeus pyrkii nousemaan kuormituksen hävittyä generaattorista. Turpiinisäätäjä toimii ja hillitsee pyörimisnopeuden kasvua. Tähän viitataan sivulla 53.



Tehon P_g hävittyä generaattorista pyrkii generaattorin jännite U_g nousemaan sekä koneiston taajuus f_g kasvamaan. Taajuus f_g kuvaa koneiston pyörimisnopeutta. Magnetointilaite rajoittaa jännitteen nousua ja turpiinisäätäjä hillitsee pyörimisnopeuden kasvua. Koneisto jää hallitusti pyörimään tyhjäkäynnille uutta verkkoon tahdistusta varten. Asiaa käsitellään sivulla 56.