

Lappeenrannan teknillinen yliopisto

Teknillinen tiedekunta

Energiatekniikan koulutusohjelma

BH10A0200 Energiatekniikan kandidaatintyö ja seminaari

Generaattorin suojauksen vaatimukset ja tarkasteleminen

Työn tarkastaja: Varadekaani, TkT Esa Vakkilainen

Työn ohjaaja: Tuotepäällikkö, TkL Olli Lindgren, Fortum

Lappeenranta 17.01.2013

TIIVISTELMÄ

Tekijän nimi: Lasse Rantaniemi

Opinnäytteen nimi: Generaattorin suojauksen vaatimukset ja tarkasteleminen

Teknillinen tiedekunta

Energiatekniikan koulutusohjelma

Kandidaatintyö 2012

Sivuja 28, kuvia 9, taulukoita 5, yhtälöitä 4

Kandidaatintyön tavoitteena on tehdä suojausasettelu ja suojausfunktion valinta generaattorille kolmivaiheisessa oikosulussa. Työssä tutkitaan generaattorin suojaukselle asetettuja vaatimuksia, vikatyyppejä, suojausratkaisuja ja vikavirran laskentaa.

Taustana työlle on olemassa olevat vaatimukset suojaukselle. Vaatimuksia esittävät kantaverkkoyhtiö, valmistaja, standardit ja vakuutusyhtiö. Lisäksi vikavirran laskennalle on oma standardi, jonka mukaan virta saadaan laskettua. Työssä käytetään Fortumin Joensuun voimalaitoksen tietoja, joiden avulla esimerkkilaskelma pystytään tekemään.

Tutkimusta tehdään tutustuen dokumenttilähteisiin. Asiantuntijahaastattelujen avulla saadaan lisätietoa sekä käytännön näkemystä suojausasioihin.

Haluan kiittää työni ohjaamisesta Olli Lindgreniä sekä asiantuntijahaastatteluista Pentti Hulkkosta.

Hakusanat: Generaattori, suojausfunktio, vikavirta.

SISÄLLYSLUETTELO

Tiivistelmä	2
Sisällysluettelo	3
Symboli- ja lyhenneluettelo	4
1 Johdanto	5
2 Suojauksen toiminnalta vaadittavat ominaisuudet	7
2.1 Kantaverkkoyhtiön asettamat vaatimukset.....	7
2.1.1 Vaatimukset poikkeuksellisella taajuudella ja jännitteellä	8
2.1.2 Vaatimukset suurilla jännitteenmuutoksilla.....	9
2.2 Generaattorin valmistajan ja standardien asettamat vaatimukset.....	10
2.3 Voimalaitoksen omistajan asettamat vaatimukset.....	12
2.4 Vakuutusyhtiön asettamat vaatimukset	13
3 Vikatyypit ja vakioidut suojausratkaisut	14
3.1 Vikatyypit.....	15
3.2 Vakioidut suojausratkaisut	15
4 Vikavirran laskenta ja suojausasettelujen tarkastelu	17
4.1 Vikavirran laskenta.....	17
4.2 Esimerkkilaitoksen tiedot	22
4.3 Verkossa tapahtuva kolmivaiheinen oikosulku	23
4.4 Generaattorikiskostossa tapahtuva kolmivaiheinen oikosulku.....	25
5 Yhteenveto	27
6 Lähdeluettelo	28
Liitteet	29

SYMBOLI- JA LYHENNELUETTELO

c	jännitekerroin
I	virta
j	imaginääri
R	resistanssi
S	näennäisteho
U	jännite
X	reaktanssi
Z	impedanssi

Alaindeksit

g	generaattori
k	oikosulku
m	muuntaja
n	nimellis-

Yläindeksit

''	alkutila
'	muutostila

1 JOHDANTO

Sähköntuotantojärjestelmän tärkein ja kallein komponentti on generaattori. Generaattorisuojaus estää generaattorin vaurioitumisen ja auttaa sähköverkon stabiilisuuden säilyttämisessä vikatilanteissa. Oikeanlaisella suojauksella generaattori toimii luotettavasti eikä aiheuta verkkoon häiriöitä.

Tahtigeneraattori voi joutua tekemisiin sisäisten ja ulkoisten vikojen kanssa. Kun suojaus havaitsee vian, se avaa mahdollisimman nopeasti katkaisijat generaattorin erottamiseksi verkosta. Generaattorin ja muiden laitteiden vahingot minimoidaan suojauksen nopealla toiminnalla ja oikeilla asetteluilla.

Normaaleissa olosuhteissa sähköverkossa tapahtuu jatkuvasti useita pienempiä muutoksia ja kuormitusten vaihteluita. Verkossa saattaa viasta aiheutuen esiintyä suurempiakin muutoksia. Tällaisissa poikkeuksellisissa tilanteissa toimimiseen on generaattorille ja sen suojaukselle esitetty vaatimuksia.

Vaatimuksia asettavat kantaverkkoyhtiö, valmistaja, standardit, voimalaitoksen omistaja ja vakuutusyhtiöt. Suojaus suunnitellaan siten, että se täyttää asetetut vaatimukset ja suojaa generaattoria sitä uhkaavilta vioilta. Vikatilanteessa generaattori pyritään irrottamaan heti verkosta generaattorin suojaamiseksi. Vaatimukset rajoittavat sitä, kuinka kauan generaattoria täytyy tai saa pitää verkossa vikatilanteissa.

Verkon stabiilisuuden ylläpitämiseksi on suojaukselle asetettu vaatimuksia. Vaatimukset asettavat rajat sille, kuinka paljon suojauksen on sallittava verkossa tapahtuvia muutoksia ja heilahduksia irrottamatta generaattoria verkosta. Suojalaitteiden tarpeeton toiminta on estettävä verkon stabiilisuuden säilymisen ja sähkön laadun kannalta.

Suojausaihetta lähestytään siten, että nykyisin generaattorin suojauksen toiminnalle annetaan vaatimukset, kun taas aikaisemmin annettiin valmiit ohjeet suojauksen toteutukseen. Käytännön muuttumisen myötä suojauksen toteutuksen vastuu siirtyi turbogeneraattorin omistajalle.

Työssä esitellään suojaukselle asetetut vaatimukset ja suojauksen toteutustapa. Tavoitteena on tehdä kolmivaiheiselle oikosululle vikavirtalaskelma, jonka perusteella valitaan suojausfunktiot. Aiheen käsittely rajataan koskemaan voimalaitoskäytössä olevia yli 5 MVA turbogeneraattoreita.

2 SUOJAUKSEN TOIMINNALTA VAADITTAVAT OMINAISUUDET

Generaattorin suojausasettelut tehdään suojaukselta vaadittujen toimintaominaisuuksien mukaan. Vaatimuksia ja rajoituksia asettavat seuraavat tahot:

- kantaverkkoyhtiö
- generaattorivalmistaja
- standardit
- omistaja
- vakuutusyhtiö

Suojauksen täytyy toimia niin, että laitos pystytään pitämään verkossa kantaverkkoyhtiön vaatimusten mukaan noudattaen kuitenkin valmistajan generaattorille asettamia rajoja.

2.1 Kantaverkkoyhtiön asettamat vaatimukset

Sähköverkolle ja sen käytölle on olemassa Euroopan laajuiset säädökset, joita hallinnoi ENTSO-E, *european network of transmission system operators for electricity*. ENTSO-E on määrittänyt pohjoisille maille Suomelle, Ruotsille, Norjalle, Tanskalle ja Islannille tarkemmat vaatimukset asiakirjassa *Nordic Grid Code*, jonka perusteella Suomen kantaverkkoyhtiö on tehnyt omat vaatimukset Suomen sisäiselle sähköverkolle ja sen käytölle.

Kantaverkkoyhtiön asettamat järjestelmätekniset vaatimukset voimalaitoksille asettavat tietyt rajat generaattorille siitä, miten sen tulisi toimia poikkeustilanteissa, kuten taajuuden ja jännitteen vaihdellessa sekä verkkoviassa. Voimalaitosten edellytetään pysyvän verkossa ja toimivan luotettavasti verkkohäiriöiden sattuessa. Lisäksi voimalaitos ei verkossa ollessaan saa aiheuttaa muille järjestelmään kytketyille laitoksille haittaa. Ilman asetettuja edellytyksiä saattaa yksittäinen häiriö aiheuttaa suurhäiriön voimalaitosten kytkeytyessä irti verkosta. (Fingrid, Voimalaitosten järjestelmäteknisetvaatimukset, 2007, s. 1).

Vaatimukset koskevat voimajärjestelmään liitettäviä uusia voimalaitoksia, mutta niitä tulee soveltaa myös silloin, kun käytössä olevien laitosten järjestelmäteknisiä ominaisuuksia muutetaan. Vaatimukset koskevat kaikkia synkronikäytössä olevia, yli 10 MVA laitoksia. (Fingrid, Voimalaitosten järjestelmäteknisetvaatimukset, 2007, s. 1).

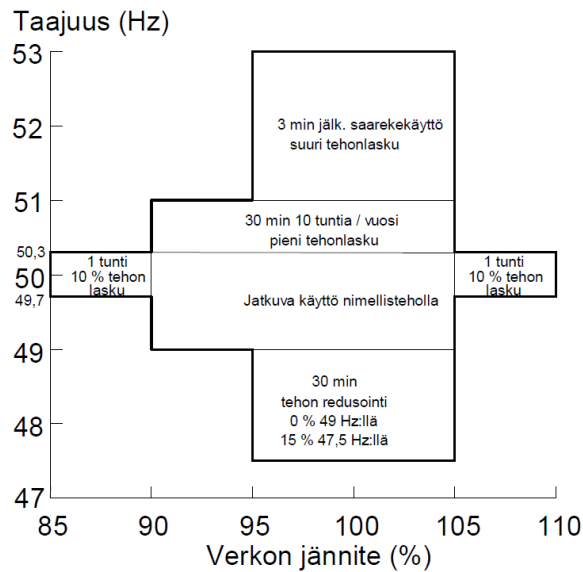
Yleisissä liittymisehdoissa kantaverkkoyhtiö velvoittaa liittyjän ottamaan huomioon laitteistonsa suunnittelussa ja käytössä sähköverkon vikojen aiheuttamat lyhytaikaiset jännitekuopat, jännitteettömyys ja käytön palautuksessa yleisesti käytettävien pika- ja aikajälleenkytkentöjen vaikutukset. Lisäksi kantaverkkoyhtiö velvoittaa liittyjän ottamaan huomioon häiriöiden vaikutukset verkkonsa kautta kantaverkkoon liittyvien muiden osapuolien sähkölaitteistoon. (Fingrid, Yleiset liittymisehdot, 2007, ss. 1-3).

Voimalaitos liittyy kantaverkkoon kytkinlaitoksen katkaisijakentän välityksellä, minkä avulla voimalaitos pystytään myös erottamaan verkosta. Verkkoon liittyvien voimalaitosten edellytetään täyttävän voimassaolevat järjestelmätekniset vaatimukset, joiden tärkeimmät vaatimukset liittyvät jännitteen säätöominaisuuksiin ja häiriökestoisuuteen.

(Fingrid, Yleiset liittymisehdot, 2007, s. 1).

2.1.1 Vaatimukset poikkeuksellisella taajuudella ja jännitteellä

Eniten suojausasetteluihin ja generaattorilta vaadittaviin ominaisuuksiin vaikuttaa kantaverkkoyhtiön vaatimukset toimimisesta poikkeavalla jännite- ja taajuusalueilla. Jatkuvan käytön alueella jännite voi vaihdella 85...110% välillä ja taajuus 47,5...53 Hz välillä. Kantaverkkoyhtiö määrittelee millä teholla ja kuinka kauan laitoksen täytyy pysyä verkossa eri taajuuksilla ja jännitteillä. Voimalaitos voi kytkeytyä verkosta välittömästi irti taajuuden laskettua alle 47 Hz tai noustessa yli 55 Hz. Kuvassa 1 on kuvattuna tehon tuotannolle asetetut vaatimukset jännitteen ja taajuuden funktiona. (Fingrid, Voimalaitosten järjestelmäteknisetvaatimukset, 2007, ss. 1-2)



Kuva 1: Tehon tuotannolle asetetut vaatimukset, kun verkon taajuus ja jännite vaihtelevat.

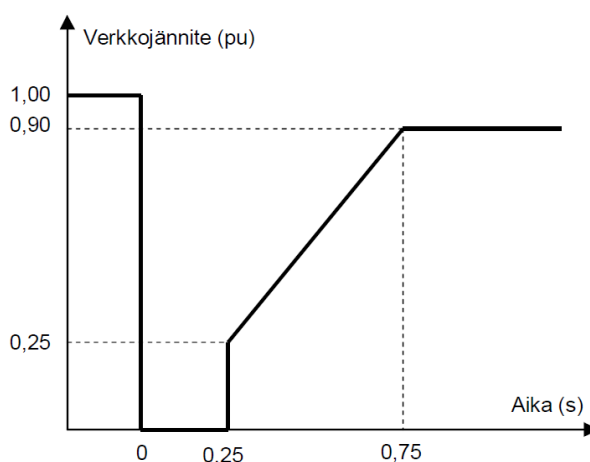
(Fingrid, Voimalaitosten järjestelmäteknisetvaatimukset, 2007, s. 2)

Voimalaitoksen säätö- ja suojausjärjestelmät vaaditaan suunniteltavan siten, etteivät verkon oikosulkujen tai kytkentätilanteiden muutosten synnyttämät hetkelliset taajuusmuutokset aiheuta kyseiseen verkkoon liitetyn voimalaitoksen irtoamista verkosta. (Fingrid, Voimalaitosten järjestelmäteknisetvaatimukset, 2007, s. 2)

2.1.2 Vaatimukset suurilla jännitteenmuutoksilla

Kantaverkkoyhtiö vaatii, että voimakoneistot on suunniteltava kestämään verkonpuolella tapahtuvat yksi-, kaksi- ja kolmivaiheisten maa- tai oikosulkujen aiheuttamat mekaaniset rasitukset, kun vian kesto on enintään 0,25 sekuntia. Tämän ajan kuluessa pyritään pääsemään eroon viasta verkon pikajälleenkytkennällä. Laitoksen täytyy pysyä stabiilisti verkossa koko tämän ajan. Suojaus täytyy siis asetella niin, ettei generaattoria irroteta verkosta heti suojauksen havahduttua vikaan. Koneisto on myös mitoitettava niin, että se ei vioitu tällaisessa tilanteessa eikä laitosta tarvitse ajaa alas seurausten tutkimiseksi. (Fingrid, Voimalaitosten järjestelmäteknisetvaatimukset, 2007, ss. 2-3)

400 kV, 220 kV tai 110 kV jänniteportaaseen liittyvät voimalaitokset omakäyttöineen on suunniteltava siten, että ne kestävät seuraavaksi kuvatus, viitteellisen verkkojännitteen vaihtelun irtoamatta verkosta: askelmainen 0,25 sekuntia kestävä verkkojännitteen lasku 0 %:iin, askelmuutosta seuraava verkkojännitteen lineaarinen nousu 90 %:iin 0,5 sekunnissa sekä tätä seuraava vakio verkkojännite 90 %. Tällöin ainoastaan pieni tehon lasku sallitaan. Kuvassa 2 on esitetty verkkojännitteessä tapahtuva vian aiheuttama vaihtelu. (Fingrid, Voimalaitosten järjestelmäteknisetvaatimukset, 2007, ss. 2-3)

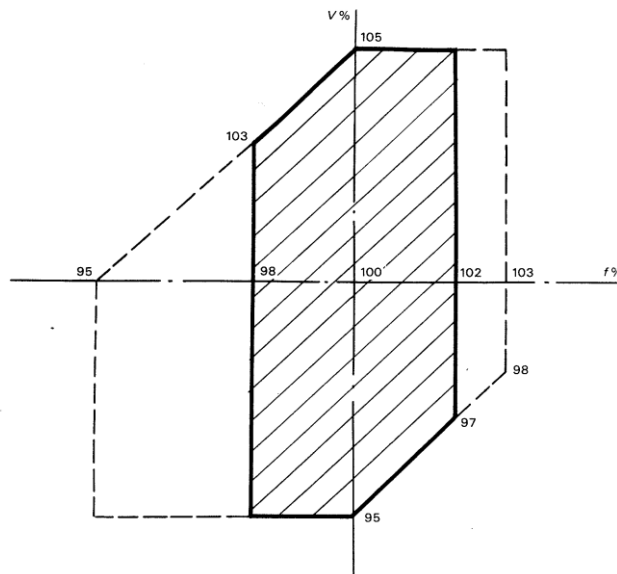


Kuva 2: Vian aiheuttama jännitekuoppa (Fingrid, Voimalaitosten järjestelmäteknisetvaatimukset, 2007, s. 2)

Kantaverkkoyhtiö haluaa, että voimalaitokset tukevat sähköverkkoa mahdollisimman pitkään, jotta ei syntyisi suurhäiriötä. Laitos ei saa kuitenkaan vaurioitua sähköverkon tukemisen vuoksi, joten voimalaitos voidaan irrottaa verkosta, jos sen liittymispisteessä esiintyy laitoksen mitoituskriteerejä suurempia tai kestoaltaan pitempiä jännitevaihteluja. (Fingrid, Voimalaitosten järjestelmäteknisetvaatimukset, 2007, s. 2)

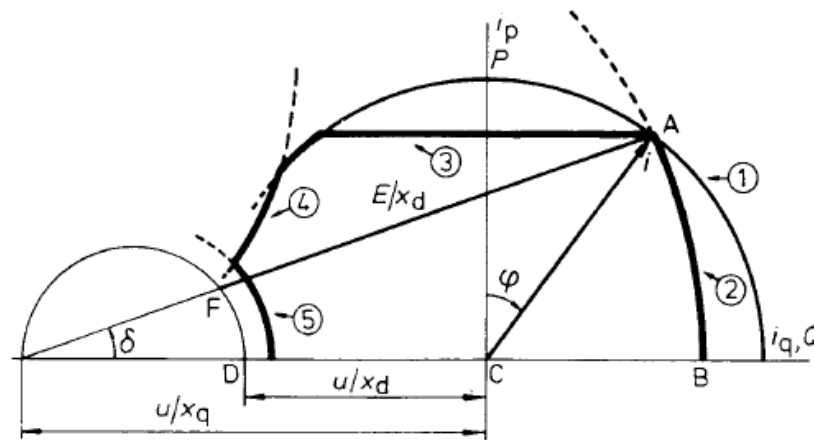
2.2 Generaattorin valmistajan ja standardien asettamat vaatimukset

Generaattorien valmistajat asettavat omat toimintarajat generaattorille standardien pohjalta. Standardit määrittävät generaattorille vaatimuksia mm. oikosulkuvirran kestoisuudelle sekä taajuuden ja jännitteen vaihtelulle. Kuvassa 3 on kuvattuna standardin määrittelemä toiminta-alue taajuuden ja jännitteen funktiona.



Kuva 3: Toiminta-alue poikkeavalla taajuudella ja jännitteellä. (CENELEC, IEC34-3, 1988)

Generaattorin valmistaja määrittää generaattorille tehon ja loistehon mukaan toimintaalueen, jossa generaattoria voidaan turvallisesti käyttää. Kuvassa 4 on esitetty PQ-diagrammi, jossa on merkitty erilaisia rajoja, joiden sisällä generaattorin teho ja loisteho täytyy pitää. PQ-diagrammista saadaan rajoitusasettelut staattorivirrälle, roottorivirrälle, magnetoinnille ja loisteholle. (Elovaara, Sähköverkot I, 2011, s. 376).



Kuva 4: Tahtigeneraattorin PQ-diagrammi, joka kuvaa sitä, miten paljon generaattori voi antaa pätötehoa verkkoon ja miten paljon se voi antaa ja ottaa loistehoa verkosta. Kuvassa loistehoa ja pätötehoa rajoittavat rajat ovat: 1 staattorin lämpenemisen asettama raja, 2 roottorin lämpenemisen asettama raja, 3 voimakoneen pätötehoraja, 4 käytännön stabiilisuusraja ja 5 alimagnetointiraja (ABB, 2007)

Standardin vaatimat taajuus- ja jännitealueet sekä valmistajan laatima PQ-diagrammi määrittävät generaattorin toiminta-alueen.

2.3 Voimalaitoksen omistajan asettamat vaatimukset

Voimalaitoksen omistaja tekee suojausasettelut, jotka täyttävät kantaverkkoyhtiön, valmistajan ja standardien vaatimukset sekä vakuutusyhtiön asettamat toimintarajat. Suojausasetteluilla generaattori pyritään suojaamaan mahdollisimman hyvin, kuitenkin pyrkien estämään turhat tuotantokatkokset.

Voimalaitoksen omistaja tavoittelee suojauksella tuotantoon varmuutta, jota voidaan parantaa suojauksen varmentamisella. Se voidaan toteuttaa kahdentamalla suojauslaitteet. Kahdentaminen kuitenkin maksaa enemmän, mutta antaa varmemman suojauksen. Suojausvarmuutta voidaan lisätä myös asettelemalla suojausfunktiot toimimaan päällekkäin.

Omistaja joutuu punnitsemaan suojausvarmuuden ja kustannusten välillä ja näin ollen tekemään teknillistaloudellisen kompromissin.

2.4 Vakuutusyhtiön asettamat vaatimukset

Vakuutusyhtiön asettamat vaatimukset pohjautuvat valmistajan, kantaverkkoyhtiön ja standardien asettamiin vaatimuksiin. Vakuutussopimuksessa olevat vaatimukset ovat yksilöllisiä ja vakuutusyhtiö velvoittaa omistajaa noudattamaan vakuutusyhtiön laatimaa omaisuussuojeluohjetta sekä valmistajan ohjeita.

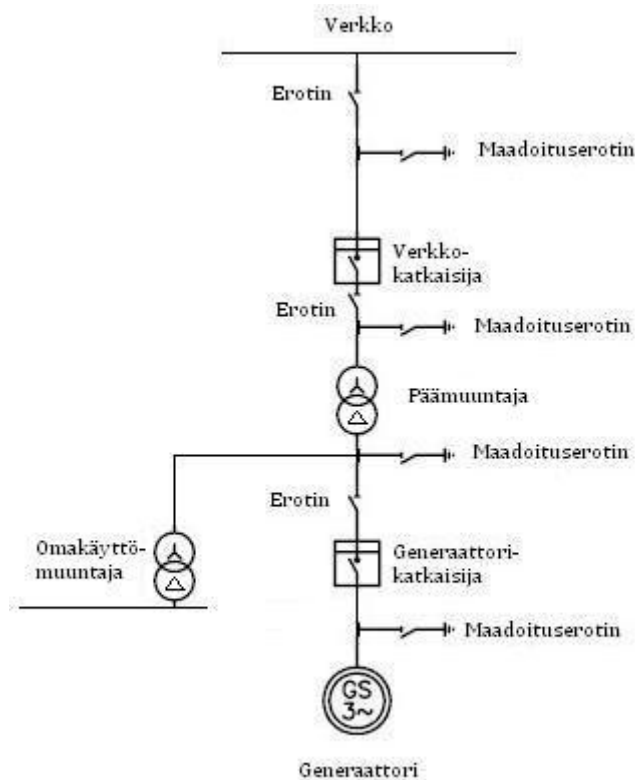
Vakuutusyhtiöillä ei ole yksittäistä omaisuussuojeluohjetta vaan ne käsitellään tapauskohtaisesti. Omaisuussuojeluohjeet eivät myöskään ole julkisia asiakirjoja. Ohjeista on yleisesti saatavilla vuonna 1988 Teollisuusvakuutuksen julkaisemaan *Turbiinin ja generaattorin suojaus* –asiakirja. Tämän asiakirja on ollut perustana nykyisille omaisuussuojeluohjeille.

Yleisesti vakuutusyhtiö velvoittaa omaisuussuojeluohjeessa omistajan tekemään ennakoivia kunnossapitotoimenpiteitä. Jos käyttöä, huoltoa tai ylläpitoa on laiminlyöty, voidaan korvausta alentaa tai se voidaan evätä kokonaan.

Omaisuussuojeluohjeessa vaaditaan, että generaattori varustetaan valmistajan suosittelemilla turvajärjestelmillä. Lisäksi generaattorin tärkeimpiä parametreja tulee valvoa jatkuvasti käynnin aikana.

3 VIKATYYPIT JA VAKIOIDUT SUOJAUSRATKAISUT

Generaattorilaitos koostuu koosta riippumatta kuvan 5 mukaan. Kuvassa 5 on esitetty yksinkertainen generaattorin verkkoonkytkentäkaavio, jossa on generaattori, päämuuntaja, katkaisijat, erottimet, maadoituserottimet ja omakäyttömuuntaja.



Kuva 5: Generaattorin verkkoonkytkentäkaavio. (Fortum, 2012) (Mörsky, 1992)

Katkaisijoilla erotetaan ja liitetään generaattori verkkoon. Generaattorin suojaus perustuu virtojen ja jännitteiden mittaamiseen, joiden perusteella ohjataan katkaisijoita. Kun generaattori tahdistetaan verkkoon, ohjaa tahdistuslaitteisto generaattori- tai verkkokatkaisijan oikealla hetkellä kiinni. (Fortum, 2012)

Eroittimilla vältetään vahinkokytkennät verkkoon. Maadoituserottimia käytetään varmistamaan huoltotöiden turvallisuus estämällä sähkön kulku erottimien toimiessa suunnittelemttomasti. Erottimen asento täytyy olla silmin havaittavissa. Erotinta voidaan ohjata käsin tai sähköisesti sekä paikallisesti tai kauko-ohjauksella. Erotin

laitetaan kiinni, kun generaattorin on valmis tahdistettavaksi verkkoon. Erottimella ei katkaista sähköä, vaan katkaisimen tehtävä on erottaa ja tahdistaa generaattori verkkoon. (Fortum, 2012)

3.1 Vikatyypit

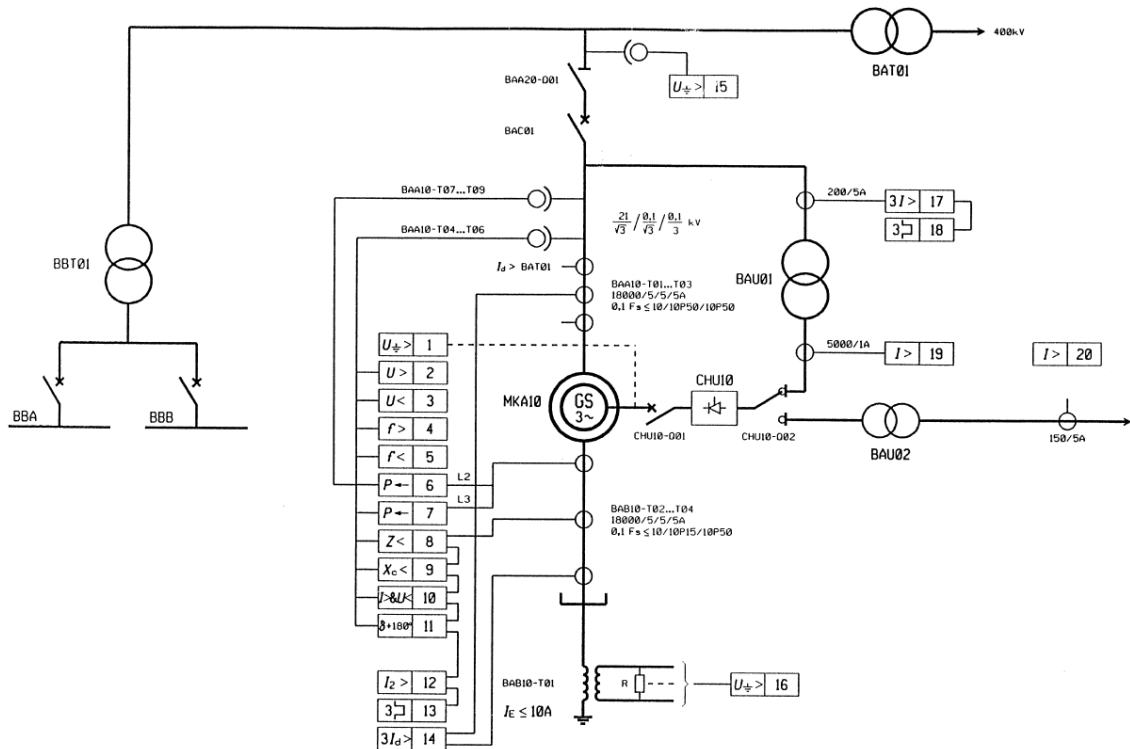
Generaattori voi joutua tekemisiin hyvin monenlaisten vikojen kanssa. Vikoja voi olla generaattorissa itsessään tai verkossa, johon generaattori on kytketty. Sisäiset viat ovat staattorin tai roottorin oiko- tai maasulkuja. Ulkoiset viat ovat generaattorista riippumattomia ja ne tapahtuvat virtakiskostoissa, muuntajissa tai verkossa. Ulkoinen vika voi olla esimerkiksi verkossa tapahtuva maasulku tai oikosulku. Viat generaattorissa tai sen läheisyydessä voivat johtaa generaattorin vakaviin vaurioihin.

Suojausasetteluilla pyritään minimoimaan erilaisten vikojen aiheuttamat vahingot. Suojaus ei saa toimia liian nopeasti, vaan sen täytyy toimia asetettujen vaatimusten mukaan. Kuitenkin suojausten halutaan toimivan ennen kuin arvot ylittävät valmistajan asettamat arvot. Liitteessä 4 on esitetty tyypillisimpiä generaattoria uhkaavia vikoja, niiden syitä ja seurauksia. Lisäksi liitteessä on valittu suojausfunktiot kyseiselle vialle.

3.2 Vakioidut suojausratkaisut

Generaattorin suojaus voidaan toteuttaa monella tavalla generaattorin koosta ja tärkeydestä riippuen. Iso ja kallis generaattori halutaan suojata vaurioilta varmemmin ja näin ollen kalliimmilla laitteilla. Tällöin suojausfunktioita on useita ja suojauslaitteisto on numeerinen. Pienempiin generaattoreihin riittää vähäisempi määrä suojausfunktioita eikä tällöin tarvita välttämättä kallista numeerista suojauslaitetta.

Generaattorin ja verkon välissä on useita mittauspisteitä, joista mitataan jännitettä ja virtaa. Suojauslaitteisto saa tietonsa näistä mittauksista, joiden perusteella suojauslaitteisto toimii. Kuvasta 6 nähdään Joensuun voimalaitoksen suojauskaavion toteutus mittauspisteistä ja mittauksista käyttävistä suojaustoiminnoista.



Kuva 6: Joensuun voimalaitoksen suojauskaavio, jossa on mittauspisteet ja mittaustuloksia käyttävät suojausfunktiot. Suojausfunktioiden selitykset: 1 Roottorin maasulku, 2 Ylijännite, 3 Alijännite, 4 Ylitaajuus, 5 Alitaajuus, 6 Takateho, 7 Takateho, 8 Ali-impedanssi, 9 Alireaktanssi, 10 Ylivirta/Alijännite, 11 Erovirta, 12 Vinokuorma, 14 Ylivirta, 15 Verkon maasulku, 17 Ylivirta, 19 Magnetoinnin ylivirta. (Fortum, 2012)

Kuten kuvasta 6 nähdään, generaattoria suojataan monella eri funktiolla. Eri suojausfunktioita on useita kymmeniä ja aina ei tarvita läheskään kaikkia. Suojauksen määrä nousee generaattorin tehon ja tärkeyden noustessa. Suojausfunktiot on standardisoitu ja niille on omat ANSI-koodit. ANSI on amerikkalainen standardi-instituutti ja tulee sanoista American National Standards Institute. ANSI-standardoituja suojausfunktioita on lähes sata. Liitteessä 5 on esitettyä suojausfunktioita ja niiden ANSI-koodit eri tehoisille generaattoreille.

4 VIKAVIRRRAN LASKENTA JA SUOJAUSASETTELUIJEN TARKASTELO

Vikojen analysoinnista saatuja tuloksia käytetään suunniteltaessa toimenpiteitä seurausten lieventämiseksi. Tällaisia toimenpiteitä ovat esimerkiksi verkon vahvistaminen, mikä on kallein ratkaisu, tai verkon käyttörajoitukset, mikä on ei-toivottava, säädön suunnittelu, releasetteluiden tarkistaminen, ja katkaisijoiden valinta.

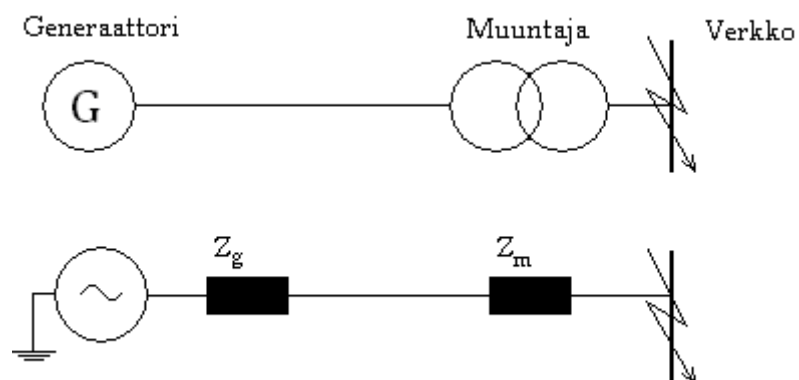
Työssä tarkastellaan releasetteluja laskemalla vikavirtoja ja ottamalla huomioon suojauksen toiminnalta vaaditut ominaisuudet. Lasketuista vikavirroista suurinta oikosulkuvirtaa käytetään kestävyuden mitoituksessa ja pienintä oikosulkuvirtaa suojien asetteluun. Releasetteluiden tarkistuksella tarkoitetaan laukaisuaikojen optimoimista, jolloin vikojen aiheuttamat termiset vaikutukset ja vaikutukset verkon stabiiliuteen pienenevät.

Vikavirtojen laskentaan on olemassa tarkat standardisoidut menetelmät, jotka löytyvät standardista *IEC 60909-0:2001: Short-circuit currents in three-phase a.c. systems*. Vikavirtojen laskentaan tarvitaan generaattorista ja muuntajasta erilaisia arvoja, jotka valmistaja on ilmoittanut. Vikavirtoja lasketaan Fortumin Joensuun voimalaitoksen generaattorin ja muuntajan tiedoilla.

Suojausasettelut ja suojien valinta pystytään tekemään laskettujen vikavirtojen perusteella, kun tiedetään valmistajan asettamat rajat ja kantaverkkoyhtiön vaatimukset. Suojausfunktioiden valinta tehdään kahdessa eri tapauksessa, joissa ensimmäisessä kolmivaiheinen oikosulku tapahtuu verkossa ja toisessa generaattorin kiskostossa.

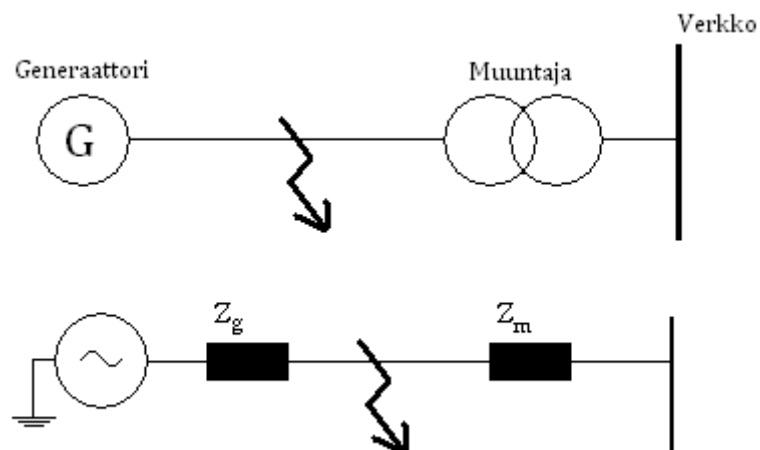
4.1 Vikavirran laskenta

Standardissa IEC 60909-0:2001 vikavirranlaskenta perustuu oikeasta tilanteesta tehtävään sijaiskytkentään. Generaattori ja muuntaja merkitään sijaiskytkennässä impedansseina. Kuvassa 7 on esitettyä sijaiskytkentä tilanteesta, jossa kolmivaiheinen oikosulku tapahtuu muuntajan ja verkon välillä.



Kuva 7: Kuvassa on sijaiskytkentä, jolla voidaan laskea verkossa tapahtuvan kolmivaiheisen oikosulun aiheuttama virta. (CENELEC, IEC 60909-0, 2001)

Kuvassa 8 on esitetty sijaiskytkentä tilanteeseen, jossa tapahtuu kolmivaiheinen oikosulku generaattorin ja muuntajan välillä



Kuva 8: Kuvassa on sijaiskytkentä, jolla voidaan laskea generaattorin ja muuntajan välissä tapahtuvan kolmivaiheisen oikosulun aiheuttama virta. (CENELEC, IEC 60909-0, 2001)

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

Taulukko 1: Jännitekerroimen c määrittäminen. (CENELEC, IEC 60909-0, 2001)

Nimellisjännite U_n	Jännitekerroin c	
	maksimi oikosulkuvirta c_{\max}	minimi oikosulkuvirta c_{\min}
Keskijännite >1 kV – 35 kV	1,10	1,10
Korkeajännite >35 kV		

Maksimi oikosulkuvirtaa käytetään mitoitettaessa komponentteja ja minimi oikosulkuvirtaa käytetään suojausasetteluissa. Työssä käytettävälle keskijännitteelle jännitekerroimet ovat 1,10. Laskettaessa kolmivaiheista oikosulkuvirtaa standardissa oletetaan vian olevan symmetrinen. Laskemisen yksinkertaistamiseksi jätetään tasajännitekomponentti huomioimatta.

Kolmivaiheisen oikosulun vikavirran I_k'' laskentaan annetaan standardissa yhtälö 1. (CENELEC, IEC 60909-0, 2001)

$$I_k'' = \frac{cU_n}{\sqrt{3}Z_k} = \frac{cU_n}{\sqrt{3}\sqrt{R_k^2 + X_k^2}} \quad (1)$$

, missä

U_n = nimellisjännite

Z_k = oikosulkuimpedanssi

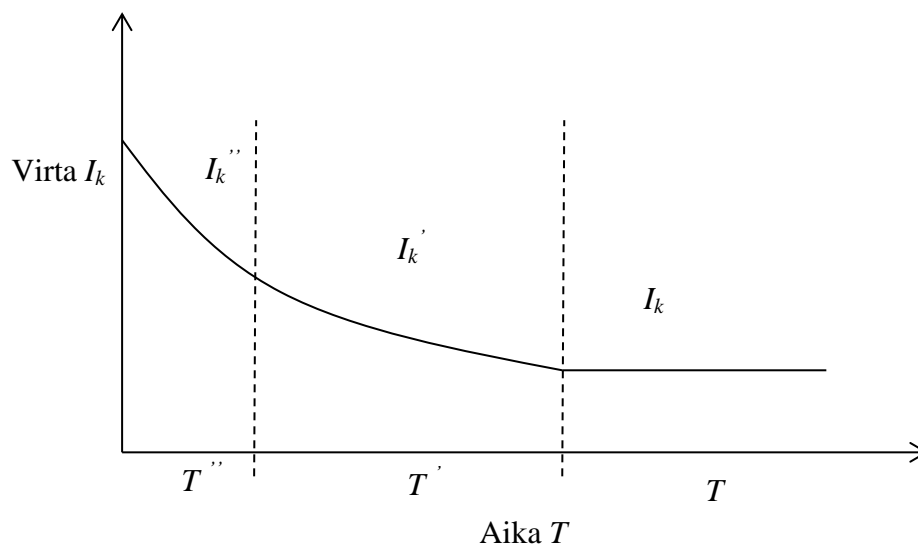
R_k = oikosulkuresistanssi

X_k = oikosulkureaktanssi

Laskennassa jätetään huomiotta generaattorin ja muuntajan oikosulkuresistanssit, koska ne ovat suhteessa niin pienet oikosulkureaktansseihin nähden. Näin ollen vikavirta saadaan laskettua yhtälöllä 2.

$$I_k'' = \frac{cU_n}{\sqrt{3}X_k} \quad (2)$$

Oikosulkureaktanssi X_k saadaan laskemalla yhteen generaattorin ja muuntajan oikosulkureaktanssit. Generaattorin valmistaja on antanut eri aikavakiolla suhteelliset oikosulkureaktanssit. Suurin oikosulkuvirta syntyy heti vian alkaessa ja alkaa pienentyä ajan kuluessa. Suurin oikosulkuvirta lasketaan käyttäen x_d'' . Kun aikaa on kulunut aikavakion verran, lasketaan seuraava virta käyttäen x_d' . Jatkuva oikosulkuvirta saadaan laskettua x_d :n avulla. Vikavirran suuruus suhteessa aikaan noudattelee kuvan 9 mukaista muotoa, josta nähdään, että vikavirta on alussa moninkertainen verrattuna jatkuvan tilan vikavirtaan. (CENELEC, IEC 60909-0, 2001)



Kuva 9: Oikosulkuvirta muuttuu ajan funktiona. (CENELEC, IEC 60909-0, 2001)

Generaattorin oikosulkureaktanssi X_g saadaan yhtälöstä 3. Lisäksi generaattorin arvot täytyy redusoida 110 kV jänniteportaaseen (Partanen, 2012)

$$X_g = \frac{x_d U_{ng}^2}{S_{ng}} \left(\frac{U_{n2}}{U_{n1}} \right)^2 \quad (3)$$

,missä

x_d = generaattorin suhteellinen oikosulkureaktanssi

U_n = generaattorin nimellisjännite

S_{ng} = generaattorin nimellisteho

U_{n1} = muuntajan ensiojännite

U_{n2} = muuntajan toisiojännite

Muuntajan oikosulkureaktanssi X_m saadaan yhtälöstä 4. (Partanen, 2012)

$$X_m = \frac{u_x U_{n1}^2}{S_{nm}} \quad (4)$$

,missä

u_x = muuntajan suhteellinen reaktiivinen oikosulkujännite

U_{n1} = muuntajan ensiöpuolen nimellisjännite

S_{nm} = muuntajan nimellisteho

4.2 Esimerkkilaitoksen tiedot

Esimerkkilaitoksena käytetään Fortumin Joensuun voimalaitosta, jonka tiedoilla saadaan vikavirrat laskettua. Taulukossa 2 on listattu vaadittavat tiedot generaattorista ja muuntajasta.

Taulukko 2: Esimerkkilaitoksen generaattorin ja muuntajan arvot. (Fortum, 2012)

Suure	Generaattori	Muuntaja
Nimellisteho S_n	90 MVA	90 MVA
Nimellisjännite U_n	10,5 kV	117 / 10,5 kV
Nimellisvirta I_n	4,95 kA	4,95 kA
Alkutilan suhteellinen reaktanssi x_d	0,158	
Muutostilan suhteellinen reaktanssi x_d	0,165	
Jatkuvantilan suhteellinen reaktanssi x_d	1,43	
Muuntajan suhteellinen reaktiivinen oikosulkujännite u_x		0,12

4.3 Verkossa tapahtuva kolmivaiheinen oikosulku

Verkossa tapahtuva kolmivaiheinen oikosulku aiheuttaa jännitekuoppa. Kantaverkkoyhtiön vaatimuksen mukaan generaattori täytyy pysyä verkossa 0,25 sekuntia eli sen ajan, mikä pikajälleenkytkennällä menee katkaista verkko ja palauttaa sähkö. Jos vika ei ole siihen mennessä poistunut, voidaan generaattori kytkeä irti. Vikavirta ei saa kuitenkaan ylittää valmistajan sille asettamaa rajaa. Lasketaan oikosulkuvirtojen suuruudet eri oikosulkureaktansseilla. Vikavirta muuntajan jälkeen saadaan laskettua yhtälöllä 1 käyttäen yhtälöjä 3 ja 4. Laskuissa kiskoston resistanssi jätetään huomiotta.

$$X_g = \frac{x_d'' U_{ng}^2}{S_{ng}} = 0,194j\Omega$$

$$X_m = \frac{u_x U_{n1}^2}{S_{nm}} = 0,147j\Omega$$

$$I_k'' = \frac{c U_n}{\sqrt{3} X_k} = 19,6 \text{ kA}$$

Taulukossa 3 on laskettuna vikavirrat alku-, muutos- ja jatkuvantilan reaktansseilla.

Taulukko 3: Taulukossa on taulukoituna vikavirrat eri generaattorin reaktansseilla.

Generaattorin suhteellinen reaktanssi	Generaattorin reaktanssi [$j\Omega$]	Vikavirta [kA]
x_d	0,158	0,194
x_d	0,165	0,202
x_d	1,43	1,752

Verkossa tapahtuva jännitekuoppa aiheuttaa suuren virtasysäyksen generaattorista verkkoon. Generaattori syöttää hetkellisesti 19,6 kA vikavirtaa. Tämän jälkeen virta alkaa tippua kohti pysyvää vikavirtaa 3,5 kA.

Suojaus saa kytkeä generaattorin irti verkosta vasta 0,25 sekunnin päästä, joten hetkellisesti generaattorin syöttämä virta on huomattavasti yli nimellisenvirran, joka on 4,95 kA, joten ylivirtasuojaukseen tehdään asettelu ajan perusteella. Ylivirran asetteluksi voidaan laittaa esimerkiksi 3 sekuntia. Eli jos ylivirta kestää yli 3 sekuntia, niin generaattori irrotetaan verkosta. (Fortum, 2012)

Jos verkon jännitekuoppa ei korjaannu sekuntienkaan päästä, syöttää generaattori vikavirtaa 3,5 kA. Koska virta on alle nimellisen, ei ylivirtasuojauksella laukaise generaattoria irti verkosta. Tilanne ei ole kuitenkaan toivottu, koska verkossa on selvästi vielä vikaa, joten generaattori halutaan kytkeä irti. Tähän voidaan käyttää ylivirta/alijännite-

suojausta. Siinä suojaus havahtuu hetkelliseen ylivirtaan, mutta irrottaa generaattorin verkosta, jos verkon jännite ei palaudu lähellekään nimellistajännitettä. (Fortum, 2012)

Vian ollessa lähellä muuntajaa voidaan se havaita ali-impedanssisuojalla, joka mittaa jännitettä ja virtaa. Jännitteen ollessa hyvin pieni ja virran ollessa suuri, laukaisee ali-impedanssisuoja generaattorin irti verkosta. (Fortum, 2012)

Jännitekuopasta pyritään pääsemään eroon johdonsuojilla, jolloin koko johto kytketään verkosta irti, jottei laitosta tarvitse ajaa alas (Elovaara, Sähköverkot I, 2011, s. 440). Tällöin laitos jää saarekekäyttöön ja palaa verkkoon vian poistuttua.

4.4 Generaattorikiskostossa tapahtuva kolmivaiheinen oikosulku

Kiskostossa tapahtuva kolmivaiheinen oikosulku eroaa verkossa tapahtuvasta oikosulusta siten, että muuntajan reaktanssia ei oteta huomioon, koska oikosulku tapahtuu generaattorin ja muuntajan välissä. Lasketaan vikavirrat samalla periaatteella kuin äskeisessä tilanteessa. Laskujen päätteeksi on taulukko 4, jossa on taulukoituna vikavirrat eri generaattorin reaktansseilla.

$$I_k'' = \frac{cU_n}{\sqrt{3}X_g} = 34,4 \text{ kA}$$

Taulukko 4: Taulukossa on taulukoituna vikavirrat eri generaattorin reaktansseilla

Generaattorin suhteellinen reaktanssi	Generaattorin reaktanssi [jΩ]	Vikavirta [kA]
x_d''	0,158	34,4
x_d'	0,165	33,0
x_d	1,43	3,8

Verrataan vikavirtojen suuruutta taulukossa 5 tapauksissa, joissa oikosulku on muuntajan jälkeen ja oikosulku on generaattorin ja muuntajan välissä.

Taulukko 5: Oikosulkuvirtojen suuruus molemmissa tapauksissa

Tila	Oikosulku muuntajan jälkeen [kA]	Oikosulku generaattorin ja muuntajan välissä [kA]
Alkutila	19,6	34,4
Muutostila	19,1	33,0
Jatkuvatila	3,5	3,8

Kuten taulukosta huomataan, ovat vikavirrat suuremmat, kun oikosulku tapahtuu generaattorin ja muuntajan välissä. Tämä johtuu siitä, että muuntaja aiheuttaa lisäreaktanssia, eli vastusta sähkövirralle. Oikosulun ollessa generaattorin ja muuntajan välissä käytetään suojauksessa edelliskohdan tapaan ylivirta/alijännite –suojaa. Lisäksi käytetään differentiaalisuojaa eli erovirtasuojaa, joka havaitsee generaattorilta lähtevän ja muuntajalle saapuvan virran eron. (Fortum, 2012)

5 YHTEENVETO

Työssä selvitettiin yli 5 MVA generaattorien suojausratkaisuja ja niille asetettuja vaatimuksia. Työssä käytiin läpi suojausasetteluille esitettyjä vaatimuksia. Vaatimuksia asettavat kantaverkkoyhtiö, valmistaja, standardit, vakuutusyhtiöt ja mahdolliset vikatilanteet. Työssä etsittiin generaattorin suojaukselle olemassa olevia funktioita, jotka ovat standardisoitu. Lisäksi työssä käytiin läpi suojauksen asettelun ja toteutuksen periaatteet ja suojausfunktioiden käyttöä. Työssä ei keskitytty suojausfunktioiden tarkempaan kuvaukseen.

Työssä valittiin tarkasteltavaksi vikatilanteeksi verkossa tapahtuva kolmivaiheinen oikosulku, josta seuraa jännitekuoppa. Tavoitteena oli suojata generaattori vikatilanteelta siten, että kantaverkkoyhtiön asettamat vaatimukset täyttyvät.

Vikatilannetta tarkasteltiin laskemalla standardisoidulla menetelmällä vikavirran suuruus. Tavoitteeseen päästiin ja saatujen virtojen avulla pystyttiin valitsemaan suojausfunktiot sekä tekemään suojausasettelut.

Suojausta täytyy aina miettiä myös taloudellisin perustein. Voidaan sanoa, että mitä enemmän suojaukseen sijoittaa, sen parempi se on. Toisaalta generaattoria ei kannata turhaan ylisuojata kalleuden vuoksi. Voimalaitoksen omistaja on loppukädessä vastuussa siitä, kuinka paljon sijoittaa generaattorin suojaukseen. Kahdennetut järjestelmät ovat usein kalliita, mutta niillä saavutettava etu on kuitenkin merkityksellinen, sillä generaattorin vaurioituminen ja tuotantokeskeytykset ovat todella kalliita. Omistaja joutuu tekemään teknistaloudellisen kompromissin valitessaan suojauslaitteistoa.

6 LÄHDELUETTELO

ABB. (2007). *TTT-käsikirja*.

Ahokas, T. (2011). Voimalaitosgeneraattoreiden suojaus ja magnetointi. *Diplomityö*. Tampereen teknillinen yliopisto.

CENELEC. (1988). IEC34-3.

CENELEC. (2001). IEC 60909-0. *EN 60909-0 Short-circuit currents in three-phase ac systems*.

Elovaara, J. (2007). *Sähkölaitostekniikan perusteet*. Helsinki: Otatieto. ISBN: 978-951-672-285-9

Elovaara, J. (2011). *Sähköverkot I*. Otatieto. ISBN: 978-951-672-360-3

Fingrid. (2007). *Voimalaitosten järjestelmätekniikka-vaatimukset*. Helsinki, Suomi: Fingrid Oy.

Fingrid. (2007). *Yleiset liittymisehdot*. Helsinki.

Fortum. (2012). Voimalaitosarkisto.

Latva, J. (2009). Vaatimukset ydinvoimalaitoksen kantaverkkoliittymälle. *Diplomityö*. Tampereen teknillinen yliopisto.

Mörsky, J. (1992). *Relesuojaustekniikka*. Hämeenlinna: Otatieto. ISBN: 951-672-175-3

Partanen, J. (2012). Sähköverkkotekniikan peruskurssi. Lappeenranta.

Siemens. (2005). Siprotec Protection Relays.

Teollisuusvakuutus. (1988). *Turbiinin ja generaattorin suojaus*. Helsinki.

LIITTEET

Liite 1: VJV 2007, Laitoksen tiedot 1/2

VOIMALAITOSTIEDOT	LIITE	1(2)
Omistaja(t): _____	Voimalaitos: _____	
	Päiväys: _____	
GENERAATTORI		
1. Nimellisarvot:		
Nimellisjännite U_n	_____	kV
Jännitealue (% nimellisjännitteestä)	_____	%
Nimellisteho S_n	_____	MVA
Nimellinen pätöteho P_n	_____	MW
Nimellisvirta I_n	_____	A
Nimellistehokerroin $\cos \varphi_n$	_____	
Nimellispyörimisnopeus n	_____	1/min
Nimellinen magnetointijännite U_{mn}	_____	V
Nimellinen magnetointivirta I_{mn}	_____	A
2. PQ-diagrammi (rajotitimet otettu huomioon)		
Kuva tai seuraavat loistehon arvot:		
Nimellisellä pätötehoilla $P = 0$:		
Q_{max}	_____	Mvar
Q_{min}	_____	Mvar
Pätötehoilla $P = 0$:		
Q_{max}	_____	Mvar
Q_{min}	_____	Mvar
3. Staattori- ja roottoripiirin rajoittimien asettelut		
4. Tyhjäkäynti- ja oikosulkukäyrät		
5. Sähköiset parametrit:		
Staattoriresistanssi R	_____	%
Reaktanssit:		
Pitkittäinen tahtireaktanssi X_d	_____	%
Pitkittäinen tahtireaktanssi X_d' (kyllästynyt)	_____	%
Poikittainen tahtireaktanssi X_q	_____	%
Pitkittäinen muutosreaktanssi X_d''	_____	%
Pitkittäinen muutosreaktanssi X_d''' (kyllästynyt)	_____	%
Poikittainen muutosreaktanssi X_q''	_____	%
Pitkittäinen alkureaktanssi X_d''''	_____	%
Poikittainen alkureaktanssi X_q''''	_____	%
Vastareaktanssi X_2	_____	%
Nollareaktanssi X_0	_____	%
Staattorin hajareaktanssi X_1	_____	%
Aikavakiot:		
Tasakomponentin aikavakio T_a	_____	s
Pitkittäinen tyhjäkäyntimuutosaikavakio T_{d0}'	_____	s
Poikittainen tyhjäkäyntimuutosaikavakio T_{d0}''	_____	s
Pitkittäinen tyhjäkäyntialkuaikavakio T_{d0}'''	_____	s
Poikittainen tyhjäkäyntialkuaikavakio T_{d0}''''	_____	s
Pitkittäinen muutosaikavakio T_d'	_____	s
Poikittainen muutosaikavakio T_d''	_____	s
Pitkittäinen alkuaikavakio T_d'''	_____	s
Poikittainen alkuaikavakio T_d''''	_____	s
6. Mekaaniset parametrit:		
Generaattorin hitausmomentti J_g	_____	kgm ²
Kunkin turbiinin hitausmomentti $J_{t1}, J_{t2}, J_{t3}, \dots$	_____	kgm ²
Hitausvakio (generaattori + turbiini) H	_____	s

Liite 2: VJV 2007, Laitoksen tiedot 2/2

Voimalaitos: _____ LIITE 2(2)

SÄÄTÖJÄRJESTELMÄ

7. Magnetointijärjestelmä:

Tyyppi: staattinen/harjaton/muu _____

Lohkokaavio asetteluiheen (sekä mahdollinen kyllästyskäyrä)

Askelvastekokeen tulokset tai seuraavat arvot:

Alkavakio t_{10} _____ sAlkavakio t_{50} _____ s

Yllitys _____ %

8. Jänniteensäädön lisästabilointipiirin lohkokaavio asetteluiheen

9. Turbiinisäätäjä:

Lohkokaavio asetteluiheen ja

Askelvastekokeen tulokset

10. Pyörimisnopeussäädön statilikka _____ %

11. Loistehostatilikka _____ %

KONEMUUNTAJA

Kytkeyntäryhmä ja maadoitustiedot _____

Nimellisteho S_n _____ MVANimellisjännitteet U_{n1} (+välittökytkin)/ U_{n2} _____ kV/kVOikosulkuresistanssi R_k _____ %Oikosulkulimpedanssi Z_k _____ %

Liite 3: Erään valmistajan generaattorin raja-arvot, asetetut arvot ja laukaisumatriisi.
(Fortum, 2012)

	Suojaus	Valmistajan esittämät rajat		Asetetut arvot	Laukaisu matriisi					
	Kuvaus	Alaraja	Kestoisuus		Verkkokatkaisija	Generaattori-katkaisija	Kenttäkatkai-sija	Omakäyttö-katkaisija	Turbiinin pikasulku	Hälytys
1	Staattorin ylikuormitus	$1,05 I_n$	Kestoaika riippuu virran suuruudesta	$1,151 I_n$ 10 s		(x)	(x)		x	x
2	Yhdistetty ylivirta/ali-jännite	$\geq 1,4 I_n$ $< 0,7 U_n$	maks. 10 s	$I \gg 4 I_n$ $I > 1,4 I_n$ 4 s $U < 0,7 U_n$ 0,1 s	x	x	x	x	x	x
3	Staattorin ylivirta	$\geq 1,4 I_n$	maks. 10 s	$I > 1,4 I_n$ 4 s	x	x	x	x	x	x
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	x x	x	x	x	x x	x x x
5	Generaattorin erovirta	$> 0,1 I_n$	min.< 0,1 s.	0,15 I_n		x	x		x	x
6	Staattorin maasulku		0,5 s	503 V 0,5 s 1,0 k Ω 2 s		x	x		x	x
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 $U \gg 1,4 U_n$	x x	x x	x x	x x	x x	x x
8	Ylijännite	1,1-1,2 U_n 1,2-1,4 U_n	maks. 6s 0,1 s	4 s 5 s		x x	x x		x	x x
9	Roottorin maasulku	20-5 k Ω $< 1000 \Omega$	1 s	1,06 I_f		x	x		x	x x
10	Roottorin ylikuormitus	1,12 I_n	Kestoaika riippuu virran suuruudesta	0,46% P_n 1,0 s		x	x		x	x

Liite 4: Taulukossa on esitettyä tyypillisimmät vikatilanteet, syyt, seuraukset ja suojausfunktion ANSI koodi.

(Fortum, 2012) (Mörsky, 1992) (Siemens, 2005)

	Vikatilanne	Syy	Seuraus	Suojausfunktio
1	Staattorin ylivirta ja ylikuormitus	Verkossa tapahtuva maa- tai oikosulku, jännitesäätäjän häiriö	Käämin kuumeneminen, eristevauriot	Ylivirtasuojaja 51 Ali-impedanssi-suojaja 21
2	Staattorin käämisulku ja maasulku	Eristyksen peittäminen kahden vaiheen väliltä tai staattorin ja generaattorin rungon väliltä.	Johtava yhteys vikapaikkojen välille, levypaketin vaurioituminen, jännitteen nousu terveissä vaiheissa	Staattorin 100% maasulkusuojaja 64G Erovirtasuojaja 87G
3	Ylijännite	Voimakoneen ryntäämisestä, kuormituksen äkillisestä häviämisestä tai jännitesäätäjän rikkoutuminen	Eristeen vanheneminen, levypaketti kuumenee	Ylijännitesuojaja 59
4	Yli- ja alitaajuus	Voimakoneen ryntääminen tai verkon pätötehotasapainon järkkäminen, voimakoneen väriseminen	Alitaajuus aiheuttaa levypaketin lämpenemisen, turpiinin siivekkeiden haurastuminen	Taajuussuojaja 81
5	Roottorin ylikuormitus	Häiriö generaattorin jännitteensäädössä, magnetointikämin kierrossulku, käyttövirhe tai verkkohäiriö	Käämin kuumeneminen ja eristeiden vanheneminen	Roottorin ylikuormitussuojaja 49R Ylijännitesuojaja 59
6	Roottorin maasulku ja kierrossulku	Eristeen peittäminen	Yksi maasulkukäytön kannalta vaaraton, mutta kaksoismaasulku vaarallinen, koska johtaa oikosulkuun	Roottorin maasulkusuojaja 64R
7	Roottorin ylijännitesuojaus	Generaattorin epäsymmetrinen oikosulku tai epätahtikäyttö	Roottorin eristevaurio	Ylimagnetointi-suojaja 24 Ylijännitesuojaja 59
9	Alimagnetointi ja epätahtikäyttö	Magnetoinnin katoaminen, viallinen jännitteen säätö tai verkon jännitteen nousu	Tahdistasta putoaminen, voimakkaita virta- ja jännitesysäyksiä staattorissa ja roottorissa	Epätahtisuojaja 78 Takatehosuojaja 32
10	Takateho	Generaattoria pyörittävän voiman katoaminen	Sähköä alkaa virrata verkosta generaattoriin, turpiinin siipien lämpiäminen	Takatehosuojaja 32 Epätahtisuojaja 78

Liite 5: Suojausfunktiot generaattorin tehon mukaan. ■ Käytettävissä, ○ Valinnainen (Fortum, 2012) (Siemens, 2005)

Suojausfunktio	ANSI	Generaattorin teho		
		5 – 50 MVA	50 – 200 MVA	> 200 MVA
Staattorin 90% maasulkusuoja	59GN, 64, 67G	■	■	■
Staattorin 100% maasulkusuoja	64G		■	■
Erovirtasuoja	87G	■	■	■
Ylivirtasuoja	51	■	○	○
Ali-impedanssi	21		■	■
Roottorin maasulkusuoja	64R	■	■	■
Vinokuormasuoja	46	■	■	■
Alimagnetointisuoja	40	■	■	■
Epätahtisuojaus	78		○	■
Staattorin ylikuormitussuoja	49	■	■	■
Roottorin ylikuormitussuoja	49R			■
Ylijännitesuoja	59	■	■	■
Ylitaajuussuoja	81	■	■	■
Alitaajuussuoja	81	■	■	■
Takatehosuoja	32	■	■	■
Alijännitesuoja	27	○	○	○
Ylimagnetointisuoja	24	○	■	■