

KEMI-TORNION AMMATTIKORKEAKOULU

Tuulipuiston 20kV sähköverkon suojaus

Marko Mella-Aho

Sähkövoimatekniikan koulutusohjelman opinnäytetyö
Sähkövoimatekniikka
Sähkövoimainsinööri (AMK)

KEMI 2012

ALKUSANAT

Tämä opinnäytetyö on tehty Winwind Oy:lle osana Kemi-Tornion ammattikorkeakoulun sähkötekniikan koulutusohjelmaa.

Haluan kiittää opinnäytetyön mielenkiintoisesta aiheesta Winwind Oy:n Kimmo Kaappolaa sekä Sami Kanervaa, jotka toimivat työn valvojina.

Lisäksi haluan kiittää myös Onni Tervämäkeä, Jorma Hourulaa sekä Jouni Miettistä, jotka kukin ovat jaksaneet neuvoa ja opastaa koko työn ajan.

Omat kiitokset ansaitsevat myös opinnäytetyöni ohjaajat Antero Martimo ja Jaakko Etto.

Viimeisimpänä, mutta ei vähäisimpänä, haluan kiittää vaimoani Iiristä sekä lapsiani, jotka ovat jaksaneet kannustaa ja odottaa iskää kotiin.

TIIVISTELMÄ

Kemi-Tornion ammattikorkeakoulu, Tekniikan ala	
Koulutusohjelma	Sähkötekniikka
Opinnäytetyön tekijä	Marko Mella-Aho
Opinnäytetyön nimi	Tuulipuiston 20kV sisäverkon suojaus
Työn laji	Opinnäytetyö
päiväys	16.1.2012
sivumäärä	92 + 9 liitesivua
Opinnäytetyön ohjaaja	Ins. Antero Martimo ja Di Jaakko Etto
Yritys	Winwind Oy
Yrityksen yhteyshenkilö/valvoja	Kimmo Kaappola Ins., sähkö- ja automaatio- osaston päällikkö / Sami Kanerva, Tekniikan tohtori, vanhempi spesialisti

Tässä opinnäytetyössä tutkittiin tuulipuiston 20 kV sähköverkon oikosulku- ja maasulkusuureita sekä uusien liittymisvaatimusten vaikutusta suojauksiin. Työ tehtiin Winwind Oy:lle.

Työn tavoitteena oli suunnitella ja dokumentoida puiston sähköasemien johtolähtöjen 20 kV suojaus sekä muuttuneen kuormituksen myötä myös sisäverkon 20 kV kaapelointi mitoitettiin uusiksi. Työssä käytettiin uuden WinWinD3-voimalan perustietoja, pois lukien taajuusmuuttaja, josta käytettiin oletustietoja, koska uusia teknisiä mitoitusarvoja ei ollut tätä työtä tehdessä käytettävissä.

Työn alussa on esitelty tuulivoima-alaa yleisesti sekä Winwind Oy, joka on tuulivoimaloita valmistava ja toimittava yritys.

Työn teoriaosassa on käsitelty tuulivoimalaitoksen- ja sähköaseman suojauksen kannalta tärkeimmät komponentit. Ison osan teoriasta sai myös relesuojaus, sen erilaiset toteuttamistavat, virran ja jännitteen mittaukseen tarvittavat komponentit sekä niiden valintaan vaikuttavat tekijät.

Työn loppuosassa laskettiin tuulipuiston eri osiin vaikuttavat maksimi- ja minimioikosulkuvirrat IEC60909-0 perusteella sekä puiston kaapeliverkossa esiintyvät maasulkuvirrat. Mittaustulosten perusteella on käsitelty mahdollisia tuulipuiston suojaustapoja sekä yhden sähköaseman johtolähdön osalta on määritelty oikosulkusuojauksen- sekä maasulkusuojauksen suojausasetukset.

Työ rajattiin liittymäpisteen ja tuulivoimalan muuntajan väliseen alueeseen. Työstä rajattiin pois puiston kommunikaatioon tarvittava kaapelointi sekä sähköasemasähköistys.

Avainsanat: tuulivoima, relesuojaus, oikosulkuvirta, maasulkuvirta.

ABSTRACT

Kemi-Tornio University of Applied Sciences, Technology	
Degree Programme	Electrical Engineering
Name	Marko Mella-Aho
Title	Design of Wiring and Protection of a 20kV Wind Park
Type of Study	Bachelor's Thesis
Date	January 16, 2012
Pages	92+9 appendices
Instructor	Antero Martimo, BScEng, Jaakko Etto, Msc.Eng
Company	Winwind Oy
Contact Person/Supervisor from Company	Kimmo Kaappola, BSc / Sami Kanerva, Dsc (Tech)

The research in this thesis has been done in the 20 kV wind farm power considering the grid short-circuit and the earth fault protection. Regarding the short-circuit and the earth fault protection the subscription requirements were also on focus.

During the research an extensive variety of protection possibilities were studied. The selected protection works reliably and safely in every situation.

The first part introduces the history of wind power as well as a company which manufactures and supplies wind power plants. The second part, the theoretical part describes the drive theory and its functioning under fault conditions. The other major grid components are processed in the same section. In the work, also the plant and the effect of the park components on the short-circuit were analyzed. The protection on the primary circuit is a two-phase circuit. The earth fault current and –voltage are also in a big role in this work because of the important safety role they have.

The protection settings of the park are defined after the results of the calculations of the network company. The work is also a cross-section of the wind power and can also be used as a training guide.

Keywords: wind power, short circuit, earth fault, current.

SISÄLLYSLUETTELO

ALKUSANAT	I
TIIVISTELMÄ	II
ABSTRACT	III
KÄYTETYT MERKIT JA LYHENTEET	VI
1. JOHDANTO	1
2. TUULIVOIMA	3
2.1. Tuulisuus Suomessa	5
2.2. Tekniset tiedot	6
3. TUULIPUISTON PÄÄKAAVIO	8
4. TUULIPUISTON KOMPONENTIT	9
4.1. Generaattori	9
4.2. Taajuusmuuttaja	9
4.2.1. Täystehotaajuusmuuttajalla varustettu tuulivoimala	10
4.2.2. Täystehotaajuusmuuttajan toiminta vikatilanteissa	14
4.3. Muuntajat	15
4.4. Kytkinlaitteet	17
4.4.1. Katkaisija	18
4.4.2. Ilmakatkaisija	19
4.4.3. Öljy- ja vähäöljykatkaisija	20
4.4.4. Paineilmakatkaisija	20
4.4.5. SF ₆ -katkaisija	21
4.4.6. Tyhjökatkaisija	21
4.5. Erottimet	22
5. SÄHKÖVERKON VIAT	23
5.1. Symmetriset viat	24
5.1.1. 3-vaiheinen oikosulku	24
5.2. Epäsymmetriset viat	26
5.2.1. 2-vaiheinen oikosulku	26
5.2.2. Maasulku	26
6. YLEISTÄ SUOJAUKSESTA	30
6.1. Suojareleet	30
6.1.1. Suojareleiden liityntä muihin järjestelmiin	31
6.2. Reletyypit	32
6.2.1. Ylijänniterele	32
6.2.2. Alijänniterele	32
6.2.3. Taajuusreleet	32
6.2.4. Virtareleet	32
6.2.5. Differentiaalirele	33
6.2.6. Nollavirta sekä -jännitereleet ja suunnatut maasulkureleet	34
6.2.7. Valokaarireleet	36
6.3. Toteuttamisperiaatteet	37
6.3.1. Aikaselektiivinen suojaus	37
6.3.2. Aika- ja virtaselektiivinen suojaus	40
6.3.3. Aika- ja suuntaselektiivinen suojaus	41
6.3.4. Lukitussuojaus	41
7. MITTAMUUNTAJAT	43

7.1.	Virtamuuntajat.....	43
7.2.	Jännitemuuntaja.....	46
8.	VERKKOYHTIÖN VAATIMUKSET VERKKOONLIITYNNÄLLE.....	52
8.1.	Tuulivoimalaitosten järjestelmätekniiset vaatimukset.....	52
8.2.	Päätötehon säätö.....	53
8.3.	Loistehokapasiteetti.....	53
8.4.	Loistehon ja jännitteensäätö.....	55
8.5.	Mitoitusjännite ja –taajuus.....	56
8.6.	Käyttöominaisuudet verkkohäiriöiden yhteydessä.....	57
9.	PUISTON KUORMITUS-, MAA- JA OIKOSULKULASKENTA.....	59
9.1.	Kuormitusvirran lasku ja kaapeleiden valinta.....	59
9.1.1.	Impedanssit.....	60
9.2.	3- ja 2-vaiheinen oikosulku.....	62
9.2.1.	KytKentättilanne1.....	62
9.2.2.	Oikosulkuvirrat.....	63
9.2.3.	Maasulkuvirrat.....	65
9.2.4.	Maakapasitanssit.....	65
9.3.	KytKentättilanne 2.....	67
9.3.1.	Oikosulkuvirrat.....	67
9.3.2.	Maasulkuvirrat.....	68
9.4.	KytKentättilanne 3.....	69
9.4.1.	Oikosulkuvirrat.....	70
9.4.2.	Maasulkuvirrat.....	70
10.	SUOJAUKSEN TOTEUTUS.....	71
10.1.	Muuntajansuojaus.....	72
10.1.1.	Komponentit.....	72
10.1.2.	Suojausasetukset.....	73
10.2.	Kiskosuojaus.....	74
10.2.1.	Komponentit.....	74
10.2.2.	Suojausasetukset.....	74
10.3.	Johtolähtösuojaus.....	75
10.3.1.	Komponentit.....	75
10.3.2.	Suojausasetukset.....	75
10.4.	Voimalaitoksen suojaus.....	76
10.4.1.	Komponentit.....	76
10.4.2.	Suojausasetukset.....	76
10.5.	Maasulkusuojaus.....	78
10.5.1.	Suojausasetukset.....	79
10.5.2.	Komponentit.....	81
11.	YHTEENVETO.....	82
12.	LÄHDELUETTELO.....	84
13.	LIITELUETTELO.....	87

KÄYTETYT MERKIT JA LYHENTEET

FRT	Fault Ride Through, taajuusmuuttajan testi verkkovikoihin
Grid Code	Verkkokoodi
Pjk	Pikajälleenkytkentä
Ajk	Aikajälleenkytkentä
FG	Finngrid Oy
WWD-1	Winwind Oy:n 1 MW tuulivoimalaitos
WWD-3	Winwind Oy:n 3 MW tuulivoimalaitos
IGBT	Insulated Gate Bipolar Transistor
SF ₆	SF ₆ kaasueristeinen katkaisija
VJV	Voimalaitoksen järjestelmätekniset vaatimukset
MV-kisko	Keskijännitekisko (Medium Voltage)

1. JOHDANTO

Perinteisesti jakeluverkossa tehoa syötetään yhteen suuntaan ja suojaus on ollut helppo toteuttaa. Vikatilanteissa voidaan vikapaikka erottaa muusta verkosta mahdollisimman pieneltä alueelta. Kun jakeluverkkoon sijoitetaan hajautettua tuotantoa, kuten tuuli- tai aurinkovoimaa, tilanne suojausten kannalta muuttuu. Tehon suunta vaihtelee vikatilanteen paikan mukaan. Tuotannon hajauttamisesta ei ole pelkästään haittaa. Vikatilanteessa vikavirtalähteitä on useita ja nykyaikaisilla tuulivoimalaitoksella pystytään tukemaan verkkoa loisivirran avulla.

Tämän työn lähtökohtana on selvittää tuulipuiston sähköaseman ja tuulivoimalan komponentteihin vaikuttavat oikosulkuvirrat sekä määrittellä suojaukset niille. Työssä on tutkittu myös FG:n joulukuussa 2011 tulleiden järjestelmätekniisten vaatimusten vaikutusta suojauksiin sekä samalla on sivuttu vaatimusten vaikutus taajuusmuuttajan käyttäytymiseen, erityisesti vikatilanteissa.

Komponenttien kannalta tärkein vikatyyppejä on 3-vaiheinen vikavirta, jolla määritetään laitteiden terminen ja dynaaminen kestävyys. Suojauksien kannalta tärkeimmät vikatyypit ovat maasta erotetussa tai sammutetussa verkossa 2-vaiheinen oikosulku pienimmällä mahdollisella oikosulkuteholla sekä maasulkuvirta. 2-vaiheinen oikosulku on pienin vikatyyppejä ja suojausten on toimittava luotettavasti myös tällaisen vian sattuessa.

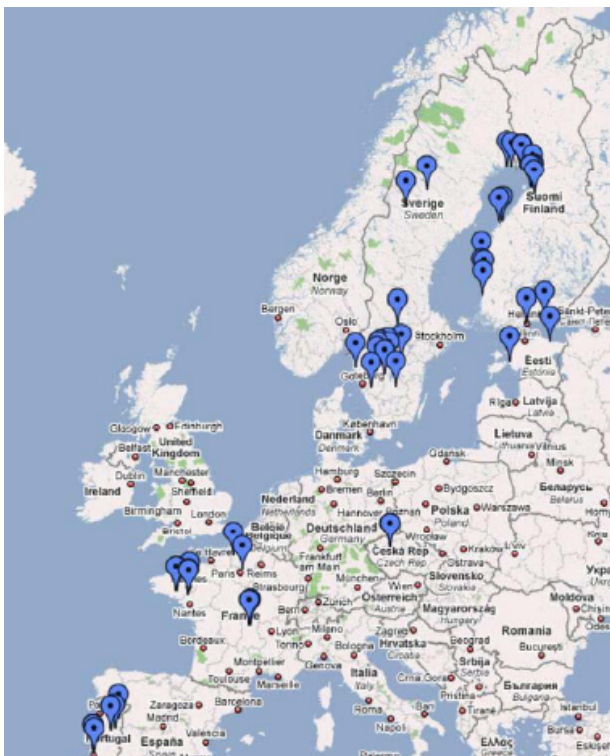
Maasulkuvirran rajoittaminen sekä kosketusjännitteen nousemisen vaaralliselle tasolle estetään hyvällä maasulkusuojauksella ja riittävällä maadoituksella. Tässä työssä perehdytään tuulipuiston kaapeliverkon maasulkuvirtoihin, -jännitteisiin sekä määritellään turvalliset ja selektiiviset asetukset maasulun suojaukselle.

Winwind Oy

Winwind Oy on kotimaisilla ja kansainvälisillä markkinoilla toimiva 1- ja 3 MW:n tuulivoimalaitoksia valmistava ja toimittava yritys. Yritys on perustettu vuonna 2000 Oulussa. Tällöin aloitettiin WWD-1:n kehitystyö, joka pystytettiin seuraavana vuonna Oulun Vihreäsaareen. Voimala on yrityksen ensimmäinen yhden megawatin tuulivoimala.

Voimalasta saatujen oppien innoittamana aloitettiin kolmen megawatin WWD-3 voimalan suunnittelu, jonka pilotti pystytettiin Oulun Vihreäsaareen vuonna 2004. Ensimmäinen sarjatuotantokone valmistettiin vuonna 2006, jonka aikana yritys kansainvälistyi voimakkaasti. Vuonna 2008 yritys rakensi yhden megawatin tehtaan Intiaan, jonne WWD-1 tuotanto siirrettiin Ii:stä. WWD-3 voimaloita valmistettiin Hollming Worksin tehtaalla Haminassa muutamia vuosia, kunnes yritys rakensi vuonna 2010 oman tehtaan Haminaan. Vuonna 2010 aloitettiin WinWinD3:n voimalan pilotin suunnittelu, joka pystytään vuonna 2012 Raaheen. Voimala suunniteltiin huomattavasti kevyemmäksi siirtämällä konehuoneessa sijainneet, muuntaja sekä taajuusmuuttajat, tornin alempiin kerroksiin. Myös korkean hyötysuhteen takaamiseksi voimalaan suunniteltiin uudet siivet 120m:n roottorihalkaisijalla, jolloin myös matalampituuliset alueet ovat paremmin hyödynnettävissä. /33/

Tuotekehitys on ollut alusta asti Oulussa ja yhtiön pääkonttori sijaitsee Espoossa. Winwind oy on toimittanut yli 120 voimalaa eripuolille Eurooppaa ja Suomea, joiden yhteenlaskettu kapasiteetti on 244 MW (vuonna 2010 alussa). Kuvassa 1 Winwind Oy:n tuulivoimaloita maailmalla. /33/



Kuva 1 Tuulivoimaloita maailmalla /33/

2. TUULIVOIMA

Tuulivoima on yksi kehittyvimpiä energiamuotoja. Tuulivoimaloiden kasvanut koko, valmistusmenetelmät, uudet materiaalit ja huolellinen suunnittelu on tehnyt tuulivoimasta kannattavampaa. /21/

Tuulivoimaa on käytetty ihmisen apuna satoja vuosia. Ensimmäisiä tuulimyllyjä käytettiin viljan jauhamiseen. Ensimmäiset (kuvassa 2) varsinaisesti sähköntuotantoon tarkoitettut voimalat rakennettiin 1900-luvun alussa, ja olivat teholtaan muutamia kilowatteja. Sähköä ei vielä siirretty verkkoon vaan sitä käytettiin vedyn valmistukseen. /21/



Kuva 2 Ensimmäisiä tuulimyllyjä /21/

Nykyiset voimalat ovat joko pieniä esimerkiksi mökkikäyttöön tarkoitettuja muutaman kilowatin tulovoimaloita tai useamman megawatin kokoisia tuulivoimaloita. Vanhoissa tuulimyllyissä siiven pyöriminen perustui tuulen paineeseen. /27/

Nykyisessä voimalassa siivet ovat aerodynaamisesti muotoiltuja siipiä pyörittää tuulen aiheuttama nostevoima. Tuulen liike-energia eli kineettinen energia voidaan laskea yhtälöllä 1. /27/

$$e = \frac{1}{2} \rho V^2 \quad (1)$$

missä

e on kineettinen energia

ρ on ilman tiheys (kg/m^3)

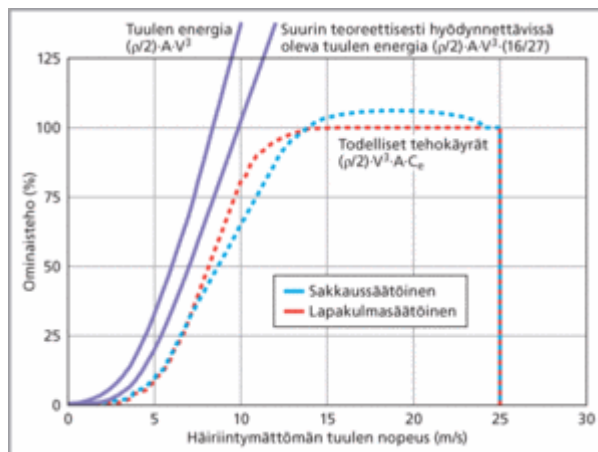
V on tuulen nopeus (m/s)

Roottorin läpi menevästä ilmavirtauksesta ei kuitenkaan ole mahdollista saada koko energiaa roottorille, mutta moderneilla tuulivoimaloilla, joissa on säädettävä lapakulma ja aerodynaaminen lapa, voidaan päästä lähelle maksimia. Maksimiteho voidaan laskea yhtälöllä 2. Kuvassa todellinen ja suurin teoreettinen hyödynnettävissä oleva tuulen energia. /27/

$$P_{\max} = \frac{16}{27} \frac{\rho}{2} AV^3 \quad (2)$$

missä

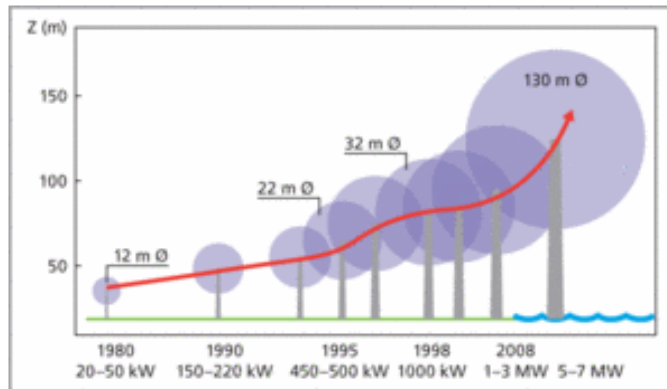
A on kohtisuorapinta tuulta vastaan



Kuva 3 Tuulivoimalan teoreettinen P_{\max} sekä nykyaikaisen voimalan tehokäyrät /27/

Tuulivoiman tehokäyrä laaditaan vastaamaan ns. standardin-ilmakehän oloja, eli ilman lämpötila $+15^{\circ}\text{C}$, ilmanpaine 1013 hPa ja ilman tiheys $1,225 \text{ kg/m}^3$. Tuulivoimalaitoksen tehokäyrä vaihtelee voimalakohtaisesti, sillä esimerkiksi paikan tuuliolosuhteilla on suuri merkitys siiven pituuteen, ja samalla pyyhkäisypinta-alaan. Matalatuulisilla alueilla käytetään yleensä pidempiä siipiä kuin tuulisilla alueilla. Voimaloille on voimalakohtainen tehokäyrä, josta on nähtävillä voimalan käynnistymis- ja pysäyttämistuulennopeus. Voimalan täysi teho saavutetaan noin 13 m/s tuulen nopeudella. Myös olosuhteilla on vaikutusta tehokäyrään. Mikäli siipiin kertyy jäätä, tuulesta saatava teho putoaa merkittävästi./27/

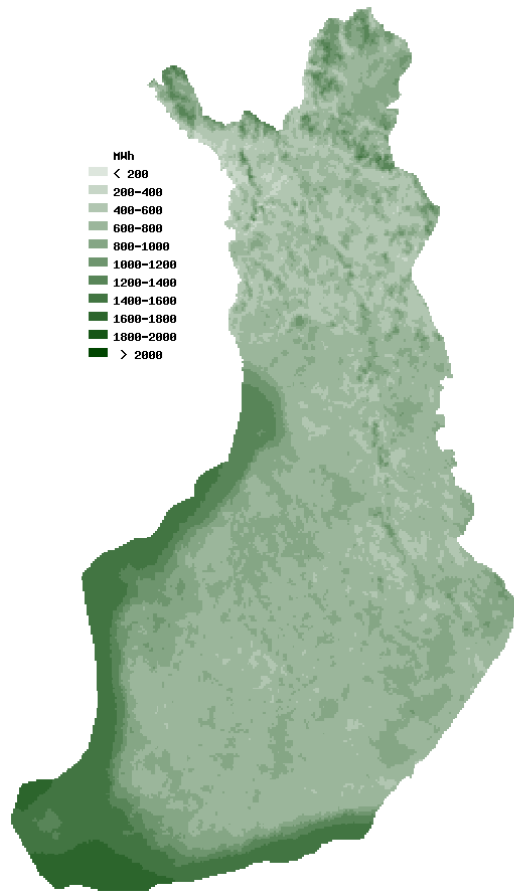
Tuulivoimaloiden koko on kasvanut huomattavasti parinkymmenen vuoden aikana ja tulevaisuudessa tullaan näkemään entistä suurempia voimaloita erityisesti merellä. Kuvassa 4 tuulivoimalan koon kehitys viimevuosilta./27/



Kuva 4 Tuulivoimaloiden napakorkeuden- ja tehonkehitys. /27/

2.1. Tuulisuus Suomessa

Suomen tuuliolosuhteisiin vaikuttaa sijaintimme ja Atlantilla maahamme tulevat matalapaineet. Karkeasti arvioituna keskimääräinen tuulennopeus kilometrin korkeudessa Suomessa on noin 9-9,5m/s, joka on suhteellisen suuri verrattuna esimerkiksi eteläisen Euroopan 7-8,5m/s keskituuliin. Mutta tuulisimmat alueet sijaitsevat lähempänä Atlanttia esimerkiksi Brittein saarilla, jossa keskituuli on noin 10-12m/s. Huomattavaa on, että talvikuukausina tuulee selvästi enemmän kuin kesäkuukausina. Kuvassa 5 on Atlaksen tuulivoimalan tuotantokartta Tammikuulta. Napakorkeudeksi on valittu 100m. /27/



Kuva 5 Tuulivoiman tuotantokartta Tammikuu, korkeus 100m. /27/

2.2. Tekniset tiedot

WinWinD3-tuuliturbiini /31/

Teho: 3000kW

Roottorin koko 100, 109 tai 120m (pyyhkäisyalat: 7867m², 9348m² ja 11366m²)

Pyörintänopeus: 5-16rpm

Käynnistystuulen nopeus: 3-4m/s (riippuu roottorin halkaisijasta)

Täysiteho: 11-12,5m/s

Pysäytystuulen nopeus: 20-25m/s

Suunniteltu elinikä: 20vuotta

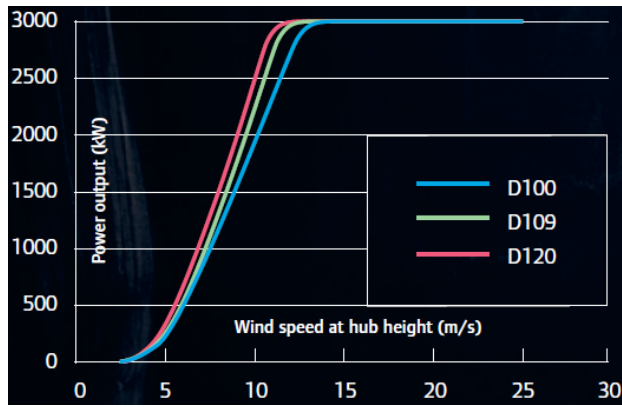
Generaattori: synkronisoitu kestopagneettigeneraattori

Vaihdelaatikko: planeettapyörästä

Taajuusmuuttaja: täysiteho IGBT

Torni: teräs- tai hybridi (betoni alaosa) torni, korkeus: 90-120m

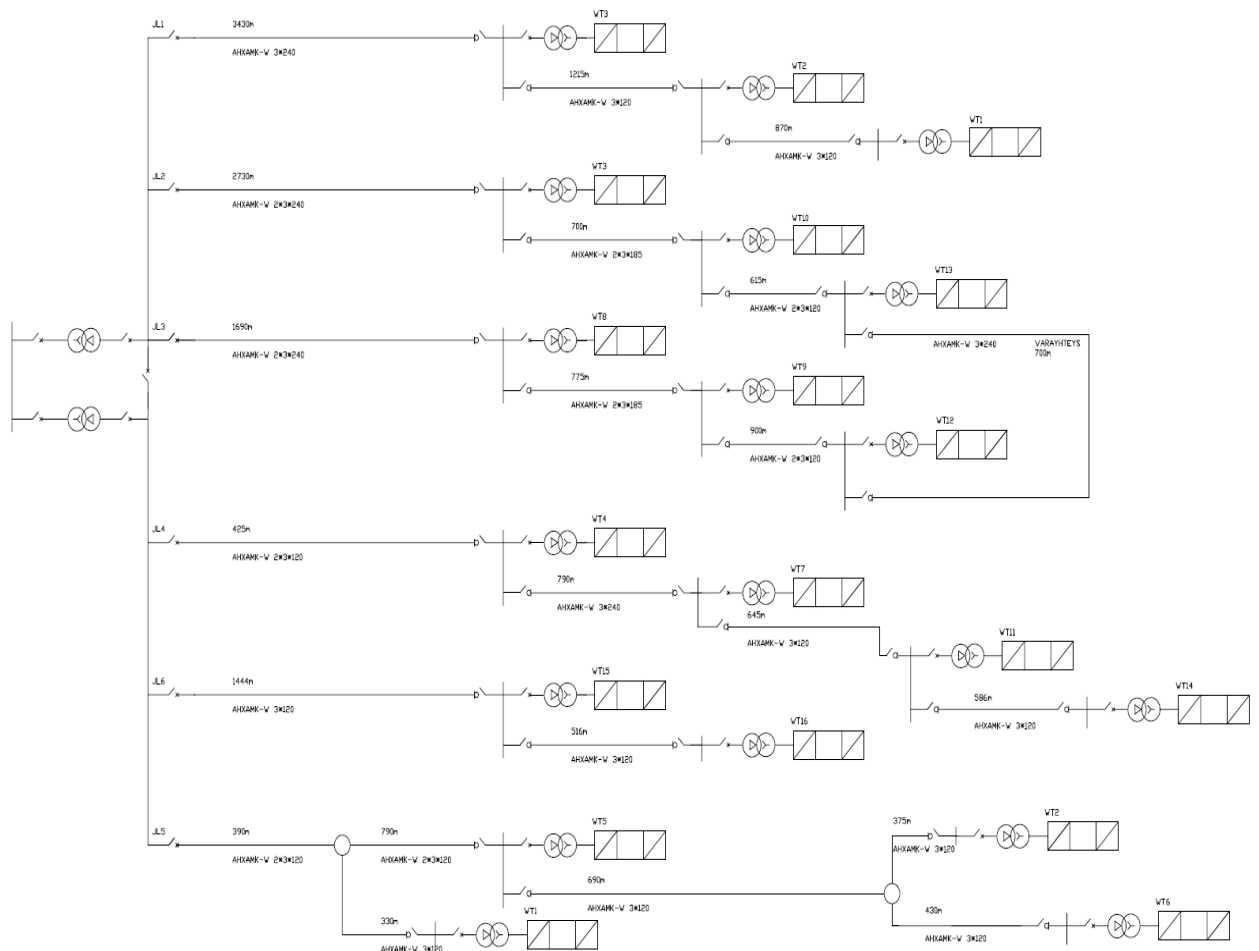
Kuvassa 6 Winwind Oy:n uuden WinWinD3-voimalan tehokäyrät 100m, 109m ja 120m roottorinhalkaisijalla.



Kuva 6 WinWinD3 tehokäyrät. /31/

3. TUULIPUISTON PÄÄKAAVIO

Kuvassa 7 on esitetty tuulipuiston pääkaavio. Esimerkkinä suunnitteluun on käytetty erään toimitusprojektin tuulipuistoa, joka on suunniteltu vastaamaan Fingridin uusia liittymisvaatimuksia. Puistossa on 19 voimalaa, ja se on teholtaan varsin mittava. Puistossa on kaksi 30MVA:n päämuuntajaa. Verkon kytkentätilanteesta riippuen oikosulkutehot vaihtelevat 209-587kVA:n välillä. Tuulipuisto on alun perin liitetty kohdemaan siirtoverkkoon (115kV), mutta tässä työssä suunnittelu on tehty Suomen liittymissäntöjen mukaan. Kohdemaassa ei käytetä samanlaista Grid Codea kuin suomessa, joten esimerkiksi loistehon tuotantoa ei käytetä verkon vikatilanteissa ollenkaan. Puistoon suunnitellaan kuormituksen kasvamisen myötä kokonaan uusi 20kV kaapelointi. Suojaus tulee myös olemaan erilainen kuin aikaisemmin. Esimerkiksi johtolähtö tullaan suojaamaan suunnatuilla maasulkusuojuilla selektiivisyyden varmistamiseksi.



Kuva 7 Esimerkkipuiston pääkaavio

4. TUULIPUISTON KOMPONENTIT

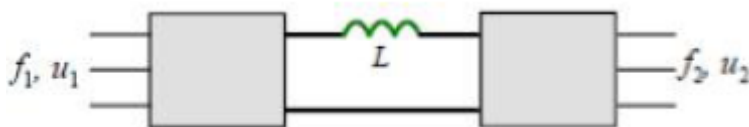
4.1. Generaattori

Tuulivoimalassa yleisesti käytetty generaattorityyppi on kestmagneettigeneraattori. Tämä generaattorityyppi on tahtigeneraattori, joten pyörimisnopeus vastaa tarkasti siihen liitetyn jännitteen taajuutta. Muuttuvanopeuksisessa tuulivoimalassa taajuus ei kuitenkaan vastaa verkon edellyttämää taajuutta, joten tarvitaan tehoelektroniikkalaite, joka huolehtii taajuuden muutoksesta verkolle sopivaksi. Muuttuvanopeuksisessa voimalassa pyörimisnopeutta säädetään lapakulman avulla siten, että se toimii mahdollisimman tehokkaasti. /26/

4.2. Taajuusmuuttaja

Taajuusmuuttajat voidaan jakaa kahteen eri tyyppiin, välipiirillisiin ja välipiirittömiin muuttajiin. Välipiirittömissä eli suorassa muuttajassa vaihtosähköstä muodostetaan suoraan uutta vaihtosähköä ilman tasasuuntausta. Välipiirittämiin muuttajiin kuuluvat syklo- ja matriisikonvertterit. Syklokonverttereita käytetään yli megawatin suuruisilla tehoilla, pienillä pyörimisnopeuksilla, oikosulku ja tahtikäytöissä. /11/

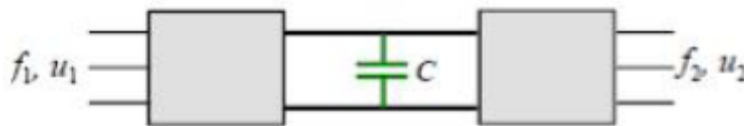
Välipiirillisissä taajuusmuuttajissa vaihtosähköstä tehdään ensin tasavirtaa tai jännitettä, joka sitten muutetaan halutun taajuiseksi ja suuriseksi vaihtojännitteeksi. Välipiirilliset taajuusmuuttajat jaetaan kahteen eri tyyppiin, virta- ja jännitevälipiirillisiin muuttajiin. Kuvassa 8 on virtavälipiirillinen taajuusmuuttaja, joka koostuu tasasuuntausyksiköstä ja välipiiristä, johon on liitetty kuristin. /11/



Kuva 8 Virtavälipiirillisen taajuusmuuttajan periaate. /11/

Kuristimen tarkoituksena on toimia energiavarastona, ja pitää virta välipiirissä mahdollisimman tasaisena. Jos kuristin mitoitetaan tarpeeksi suureksi, niin virtavälipiirillinen taajuusmuuttaja näkyy syöttävän verkon suunnasta vakiovirtalähteen tavoin. Sitä käytetään yleisesti nopeakäyntisten tahtimoottoreiden ohjaukseen./11/

Kuvassa 9 jännitevälipiirillinen taajuusmuuttaja, joka koostuu tasasuuntausyksiköstä ja välipiiristä, johon on liitetty kondensaattori. Kondensaattorin tehtävänä on toimia hetkellisenä energiavarastona ja pitää välipiirin jännite mahdollisimman tasaisena. Jos kondensaattori mitoitetaan tarpeeksi suureksi, niin jännitevälipiirillinen taajuusmuuttaja näkyy syöttävän verkon suunnasta vakiovirtalähteen tavoin./11/

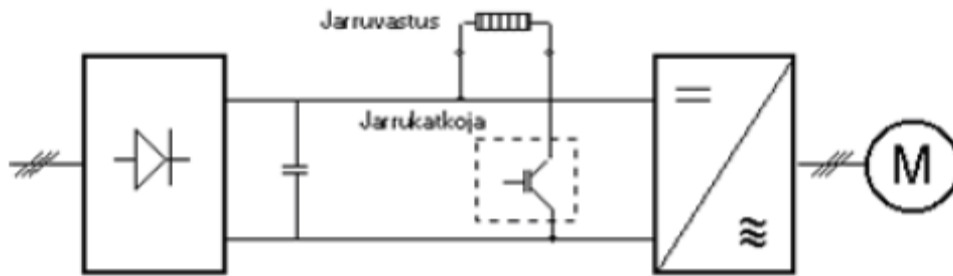


Kuva 9 Jännitevälipiirillisen taajuusmuuttajan periaate. /11/

Jännitevälipiirilliset taajuusmuuttajat jaetaan käytettyjen tasajännitteiden mukaan. Kaksitasoista topologiaa käytetään tyypillisesti pienjännitteellä ja se on yleinen ratkaisu täystehotaajuusmuuttajalla varustetussa tuulivoimalaitoksessa. Kytkiminä käytetään pääsääntöisesti IGBT-komponentteja (insulated gate bipolar transistor)./11/

4.2.1. Täystehotaajuusmuuttajalla varustettu tuulivoimala

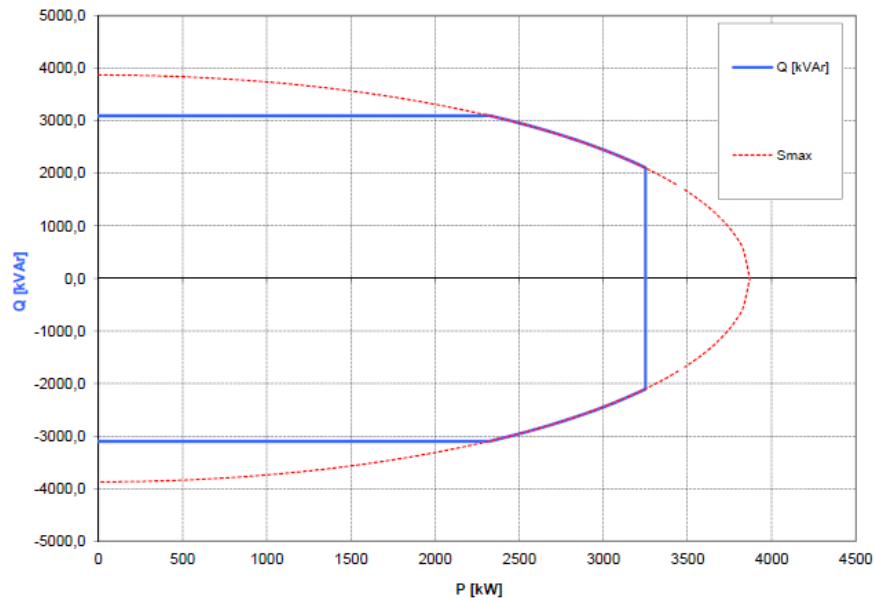
Generaattorin sillassa käytetään joko ohjaamattomia tai ohjattuja puolijohdekomponentteja. Verkkosuuntauksessa voidaan käyttää tyristoreja, mutta käytännössä käytetyin vaihtoehto on IGBT-komponentit. Teho syötetään kokonaisuudessaan taajuusmuuttajan läpi. Häviöttömässä tilanteessa välipiirin jännite nousee, jos verkon vaihtosuuntayksikkö syöttää verkkoon vähemmän energiaa kuin generaattorin tasajännitepuolen tuottaa. Jarrukatkojan toiminnalla voidaan estää välipiirin liian korkea jännite, ohjaamalla ylimääräinen teho välijännitepiirissä sijaitsevaan vastukseen, esimerkiksi verkon vikatilanteissa. Alla kuvassa 10 jarrukatkojan sijainti moottorikäytössä, generaattorikäytössä periaate on ihan sama./11/



Kuva 10 Jarrukatkojan sijainti moottorikäytössä. /11/

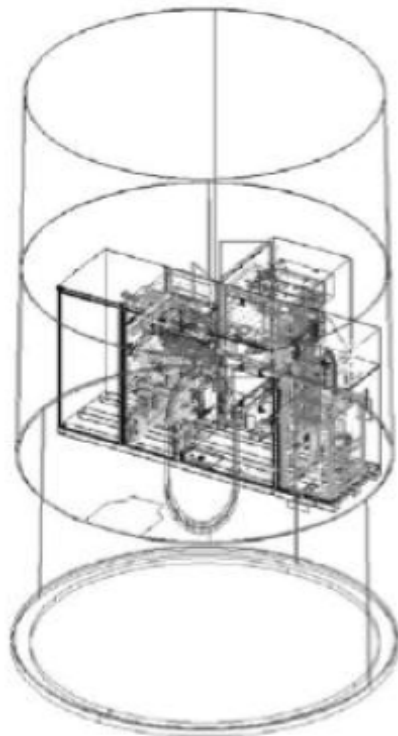
Loistehon suuntaa ja suuruutta voidaan ohjata, jolloin silta voi tuottaa sekä kapasitiivista että induktiivista loistehoa verkon suuntaan. Syötettävän loistehon suuruutta rajoittaa tasajännitteen suuruus välipiirissä verrattuna verkon puoleiseen jännitteeseen sekä kytkimien sallitut virtarajat tuotetun pätötehon kanssa. Rajoituksien pienentämiseksi loistehon tuotannolle voidaan lisätä jännitettä nostava hakkuri, mikäli generaattorin puolella on käytössä diodisilta. IGBT-komponenttien kytkentätila määräytyy hilalle annettavasta jännitepulssista. Pakko-ohjattuja komponentteja voidaan syyttää tai sammuttaa verkon vaihejännitteistä tai muista tiloista riippumatta, eli virran ja jännitteen vaihekulmaa sekä suuruutta ja suuntaa voidaan ohjata muuttamalla jännitepulssia. Esimerkiksi ABB:n taajuusmuuttajien nimellisen tehokertoimen arvo mitoitetaan taajuusmuuttajan tehosta ja tyypistä riippuen välille 0,7-0,9 ind/kap. /11/

Kuvassa 11 on taajuusmuuttajan tuottama pätö- ja loisteho. Kuva on viitteellinen eikä vastaa kaikilta osin uuden käyttöön tulevan taajuusmuuttajan arvoja.

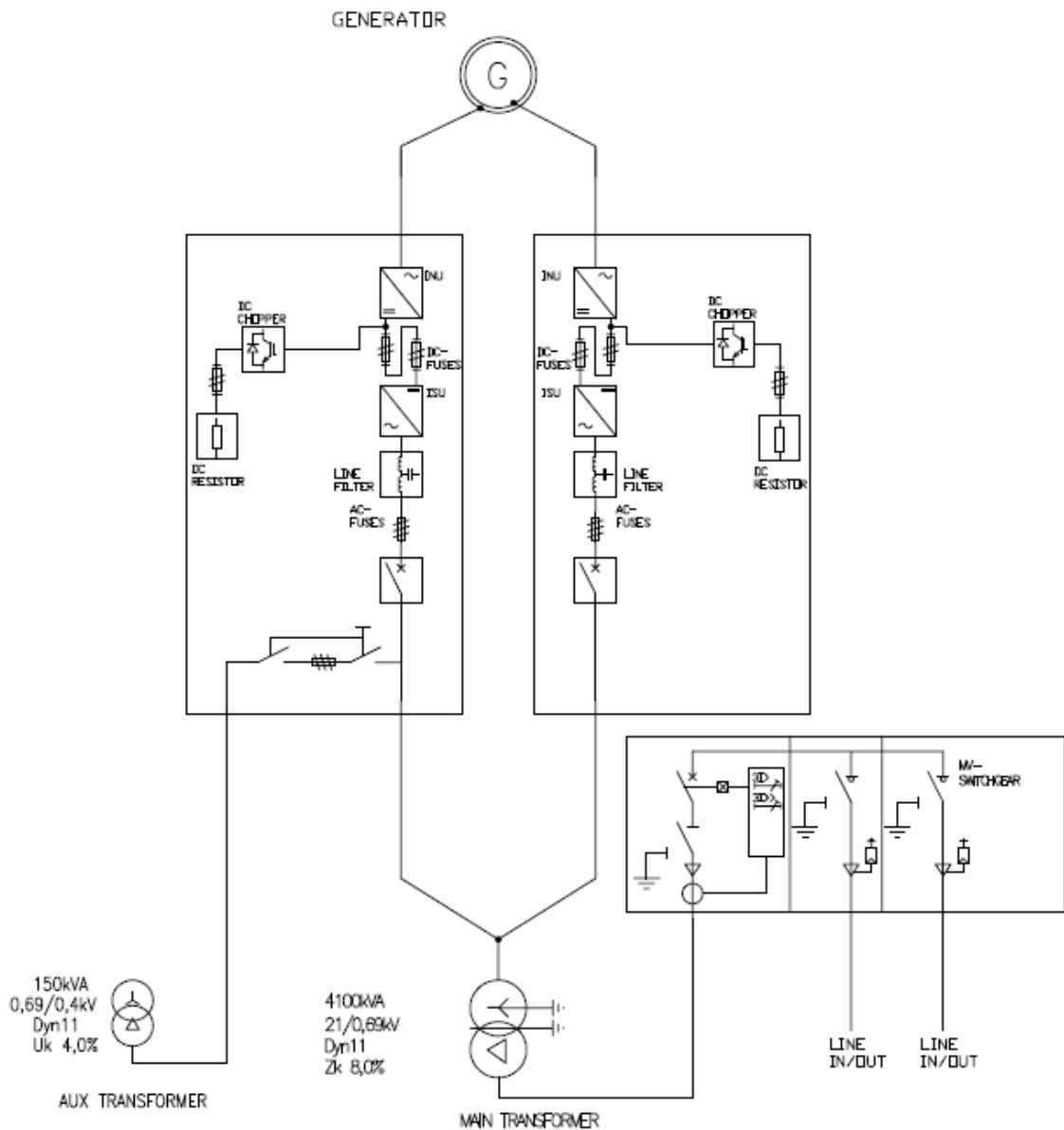


Kuva 11 Taajuusmuuttajan P/Q käyrä. /22/

Alla olevassa kuvassa 12 taajuusmuuttaja on sijoitettu tuulivoimalan torniin. Samaa ratkaisua myös Winwind Oy käyttää WinWinD3-tyypin tuulivoimalaitoksessa. Kuvassa 13 on tuuliturbiinin pääkaavio.



Kuva 12 Taajuusmuuttajayksikön sijainti tuulivoimalan tornissa./11/



Kuva 13 Tuuliturbiinin pääkaavio.

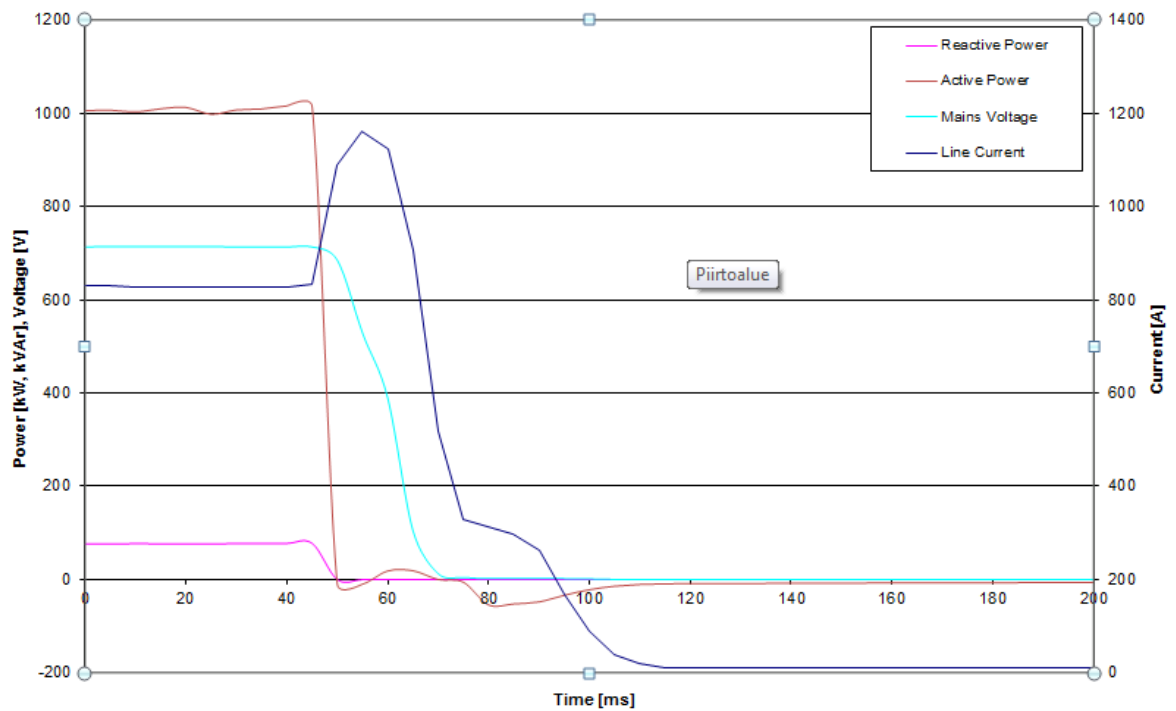
4.2.1.1. Tuulivoimalan säätö- ja ohjausmenetelmät

Tuulivoimalaitoksen taajuusmuuttajien ohjaukseen käytetään skalaari-, vektori- tai suoravääntömomenttisäätöä. Tyypillisesti skalaari- ja vektorikäytössä käytetään pulssinleveysmodulointitekniikkaa, johon tarvitaan modulaattoria. Nykyaikaisilla vektorisäädöillä päästään 10-20ms vasteaikoihin. Suoralla vääntömomenttisäädöllä päästään 1-2ms vasteaikoihin ja se perustuu hystereesisäätöön, jolloin muutostila on mahdollisimman nopea. /11/

4.2.2. Täystehotaajuusmuuttajan toiminta vikatilanteissa

Voimalaitoksen toiminta vikatilanteessa määritellään verkkoyhtiökohtaisesti. Pääsääntöisesti, mikäli verkostossa ei ole käytössä pika-jälleenkytkentä-automaatiota, voimalaitos säätää pätötehon tuotannon nolnaan 50ms:ssa ja pysyy verkossa kunnes irtikytkentä on sallittua. Irtikytkeminen tapahtuu voimalaitoksen turvallisen pysäyttämisen jälkeen. Mikäli verkkoyhtiö käyttää pjk:ää, voimala voidaan asetella tukemaan tätä toimintoa. Voimalaitos kykenee tukemaan verkon jännitettä loisivirralla, jonka amplitudi on korkeintaan voimalaitoksen nimellisvirran suuruinen. Mikäli verkkojännite palautuu asetullun ajan sisällä, voimala aloittaa energian tuotannon mahdollisimman nopeasti. /18/

Kuvassa 14 on erään voimalan 3-vaiheinen oikosulikutesti. Testilaitteistona on käytetty yrityksen omaa laitteistoa, jolla ns. FRT-testit voidaan suorittaa. FRT-testillä testataan voimalaitoksen ominaisuuksia, käyttäytymistä verkossa sekä vikatilanteissa, kuten esimerkiksi 3-vaiheinen oikosulku. Alla olevassa kuvassa verkon tukitoiminto ei ole ollut päällä, joten jännitettä ei tueta vian sattuessa. Kuva osoittaa hyvin voimalan säätönopeuden vian sattuessa. Virran osalta normaali ”piikki” on luokkaa 1,3kertainen, mutta testilaitteiston simuloidessa jännitekuoppaa suurilla reaktoreilla ja virtapiikki hivenen korostuu.



Kuva 14 Täystehotaajuusmuuttajan toiminta vikatilanteessa. /22/

4.3. Muuntajat

Muuntajan tarkoitus on muuttaa jännite ja virta sopivaksi. Yksi tehtävistä on myös jännitteen säätö, jonka tarkoituksena on tasata kuormituksen tai verkon kytkentätilan aiheuttamaa jännitemuutosta. Jännitteensäätäjänä käytetään väliotto- tai käämikytkintä. Väliottokytkimillä varustettuja muuntajia voidaan säätää ainoastaan jännitteettömänä, sen sijaan käämikytkimellä voidaan jännitettä säätää jännitteisenä ja kuormitettuna. Siirto- ja suurjänniteverkossa käytettävien muuntajien säätöalue on normaalisti $\pm 12\%$ esimerkiksi $\pm 9 \cdot 1,33\%$. /23/

Muuntajan oikosulkuimpedanssina käytetään verkostolaskelmissa Z_k :ta. Piirin mitoituksen kannalta tyhjäkäyntivirta on huomattavasti kuormitusvirtaa ja oikosulkuvirtaa pienempi, joten sitä ei oteta huomioon. Tyhjäkäyntivirta I_0 huomioidaan tavallisesti taloudellisessa vertailussa, jossa tyhjäkäyntienergian vuosikustannukset voivat nousta suuriksi. Muuntajan kilpiarvoissa ilmoitetaan tavallisesti:

- nimellisteho S_N

- nimellisjännitteet U_n
- suhteellinen oikosulkujännite u_k , jolle ilmoitetaan resistiivinen osa u_r (1-2%) ja reaktiivinen osa u_x (4-15%). Tavallisesti arvot ilmoitetaan suhteellisina arvoina tai prosentteina nimellisjännitteestä.
- oikosulkuresistanssi ilmoitetaan myös useasti oikosulkutehona P_k , joka samalla ilmoittaa muuntajan kupari- eli virtalämpöhäviöt nimellisvirralla. /6/

Kilpiarvojen perusteella voidaan laskea sijaiskytkennän arvot yhtälöillä 3-9

$$Z_k = z_k \% \frac{U_n^2}{S_n} \quad (3)$$

$$r_k = 100 \times \frac{P_k}{S_n} \quad (4)$$

$$R_k = \frac{r_k \%}{100} * \frac{U_n^2}{S_n}$$

$$X_k = \sqrt{Z_k^2 - R_k^2} \quad (5)$$

Jos muuntajan kilpiarvoista on ilmoitettu vain oikosulkujännite u_k ja oikosulkuteho P_{kn} normaaleiden nimellisarvojen lisäksi, oikosulkureaktanssi voidaan laskea yhtälöstä 6. /6/

$$X_k = \frac{\sqrt{u_k^2 - \left(\frac{P_{kn}}{S_n}\right)^2 U_n^2}}{S_n} \quad (6)$$

Laskettaessa vikapaikan oikosulkuimpedansseja voimansiirtojärjestelmässä voi olla useita jännitetasoja. Kun jännitetaso on valittu, voidaan muiden jänniteportaan suuret redusoida valittuun jänniteportaaseen. Jännitteet redusoidaan kertomalla ne muuntajan muuntosuhteella. /6/

$$U_2' = \left(\frac{U_{1n}}{U_{2n}} \right) U_2 \quad (7)$$

Vastaavasti virrat redusoidaan muuntosuhteen käänteisarvolla.

$$I_2' = \left(\frac{U_{2n}}{U_{1n}} \right) I_2 \quad (8)$$

Vastussuureet redusoidaan kertomalla vastukset muuntosuhteen neliöllä.

$$Z_2' = \left(\frac{U_{1n}}{U_{2n}} \right)^2 Z_2 \quad (9)$$

4.4. Kytkinlaitteet

Virtapiirin sulkemiseen ja avaamiseen on käytettävä kytkinlaitteita, joilla on tähän tarkoitukseen sopiva sulkemis- ja katkaisukyky ja sen sallittu kytkentätiheys on tarkoitukseen sopiva. Kytkinlaitteen on kestävä suljettuna suurimmat mahdolliset vikavirrat rikkoutumatta. Kytkinlaitteet jaotellaan kolmeen eri ryhmään virtapiirin sulkemis- ja katkaisuperiaatteen mukaan:

- katkaisijat
- erottimet
- kytkimet. /6/

Oikein mitoitetulla katkaisijalla kyetään katkaisemaan virtapiirin suurin mahdollinen vikavirta. Katkaisu on tapahduttava niin, että siitä aiheutuu mahdollisimman vähän häiriötä muulle verkolle. Erottimella on avattava virtapiiri kuormittamattomana ja siinä täytyy olla näkyvä avausväli tai erotin on varustettava luotettavalla mekaanisella asennonosoituksella. Kytkimellä on kyettävä katkaisemaan kuormitusvirta. Kytkin ei saa aueta esimerkiksi ylivirran vaikutuksesta. /6/

Kytkintä tässä työssä tarkastella tämän enempää, koska niiden käyttöalue on pienjännitepuolella.

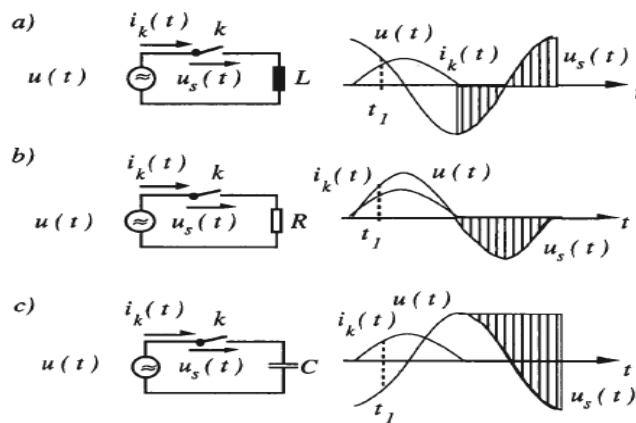
4.4.1. Katkaisija

Katkaisijan tärkein tehtävä on oikosulun katkaisu. Katkaisijan tulee kestää termisiä rasituksia määritellyn ajan, esimerkiksi pika- ja aikajälleenkytkennän ajan. /6/

Suurjännitteisten katkaisijoiden katkaisu tapahtuu aina virran nollakohdassa. Koskettimien välille syttyy valokaari, joka sammutetaan sammutusväliaineen esimerkiksi SF6 kaasun avulla. Sammutuskammiolla voidaan tehostaa sammutusta sammutuskaasun virtauksen avulla. /6/

Katkaisun aikana suurin rasitus katkaisijaan tulee virran suuruudesta ja vaihesiirrosta, sekä palaavan jännitteen jyrkkyydestä maksimiarvosta. Palaavalla jännitteellä tarkoitetaan koskettimien välistä jännitettä valokaaren sammuttua. Jännite koostuu kahdesta osasta, verkkotaajuisesta ja transienttiosasta. Transienttiosan aikana esiintyy vaimenevaa värähtelyä siirryttäessä verkkotaajuiseen jännitteeseen. Verkon tila ja katkaisutilanne vaikuttavat palaavan jännitteen jyrkkyyteen ja amplitudiin. /6/

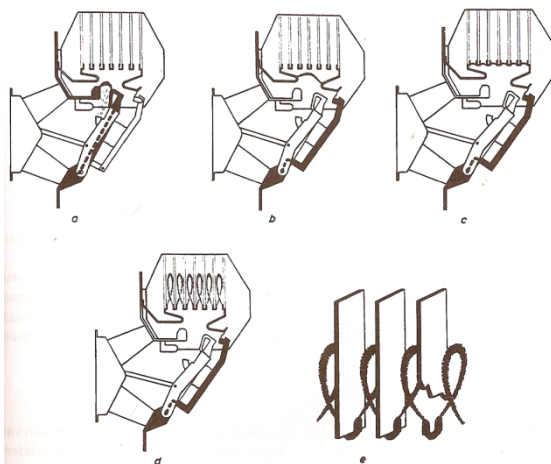
Kuvassa 15 on esitetty kolme teoreettista piiriä. Induktiivista (kuvassa a)) virtaa katkaistaessa on palaavalla jännitteellä katkaisuhetkellä huippuarvo, joten katkaisuvälin ilman johtavuutta on huononnettava nopeasti. Resisttiivistä (kuvassa b)) virtaa katkaistaessa katkaisuhetkellä palaavan jännitteen arvo on nolla ja sillä on pieni muutosnopeus. Kapasitiivisen (kuvassa c) virran katkaisu on vaativin tehtävä, koska palaavalla jännitteellä on huippuarvo, mutta kondensaattoriin jää varautuneeksi jännitteen huippuarvo, joka purkautuessaan aiheuttaa puolen jakson jälkeen jopa kaksinkertaisen huippuarvon. /6/



Kuva 15 Erilaisia katkaisutilanteita. /6/

4.4.2. Ilmakatkaisija

Ilmakatkaisijassa katkaisukärjet on suojattu tulenkestävällä ja eristävällä valokaarisuojuksella ja se ovat normaalipaineisessa ilmassa. Suojuksen sisällä on valokaaren sammumista tehostavat välilevyt. Katkaisijoissa on useimmiten kahdet koskettimet, pää- ja valokaarikoskettimet. Kuormavirralla virta kulkee pääkoskettimien kautta ja avattaessa katkaisijaa ne avautuvat ennen valokaarikoskettimia. Valokaari syttyy valokaarikoskettimien välille, eivätkä näin pääkoskettimet vaurioidu. Valokaari sammutetaan vetämällä valokaarikoskettimet nopeasti välilevylliseen sammutuskammioon. Kuvassa 16 katkaisuprosessi pääpiirteittäin, virran siirtyminen pääkoskettimilta valokaarikoskettimille, jossa valokaari pitenee ja jakaantuu magneettikentän avulla katkaisukammioihin. Käytetään tyypillisesti moottorikatkaisijana. /9/



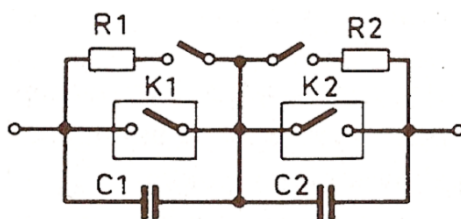
Kuvassa 16 Ilmakatkaisijan katkaisuprosessi /9/

4.4.3. Öljy- ja vähäöljykatkaisija

Öljykatkaisijassa sammutus perustuu siihen, että öljy valokaaren vaikutuksesta kaasuuntuu ja sammuttaa valokaaren. Suomessa öljykatkaisijoita on käytössä enää joissakin vanhoissa laitoksissa. Vanhat öljykatkaisijat on korvattu uusilla vähäöljykatkaisijoilla, joiden toimintaperiaate on melkein sama. Valokaaren sammutus perustuu tässäkin öljyn kaasuuntumiseen, mutta sammutusta tehostamaan on lisätty paineen vaikutuksesta syntyvä öljyn virtaus. Öljyn virtausta on voitu vielä tehostaa pumppauksen avulla, joka on suunnattu valokaarta kohti. Pumpatun öljyn merkitys on tärkeä pieniä virtoja katkaistaessa, koska valokaaren vaikutus yksinään öljyn kiertoon on vähäinen./9/

4.4.4. Paineilmakatkaisija

Paineilma- ja vähäöljykatkaisijat ovat olleet tärkeimmät katkaisijat jo pitkään. Paineilmakatkaisijassa paineilmaa käytetään sekä valokaaren sammutukseen, että katkaisijan ohjaamiseen. Paineilmakatkaisijat soveltuvat paikkaan, jossa katkaisutilanteita on paljon ja nimellis- ja oikosulkuvirrat ovat suuria. Haittana voidaan mainita tehokkaan paineilmajärjestelmän tarve. 75kV asti katkaisijassa käytetään ainoastaan yhtä katkaisupäätä, mutta korkeammilla jännitteillä joudutaan kytkemään sarjaan useita katkaisupäitä. Jännitettä jaetaan katkaisijoiden välille, joko kondensaattoreilla tai vastuksilla. Samalla ne toimivat vaimentajina palaavan jännitteen alkuvärähtelyssä. Kondensaattori loiventaa alkuvärähtelyn jyrkkyyttä ja vastus vaimentaa alkuvärähtelyn amplitudia. Kytkentäylijännitteitä voidaan haluttaessa rajoittaa avausvälin rinnalle kytkettävillä sulkemisvastuksilla. Kytkentä tapahtuu kaksiportaisesti. Ensimmäisessä vaiheessa suljetaan vastusten kanssa sarjassa olevat koskettimet ja toisessa vaiheessa oikosuljetaan pääkoskettimilla vastukset. Kuvassa 17 sulkemisvastusten käyttö katkaisijassa./9/



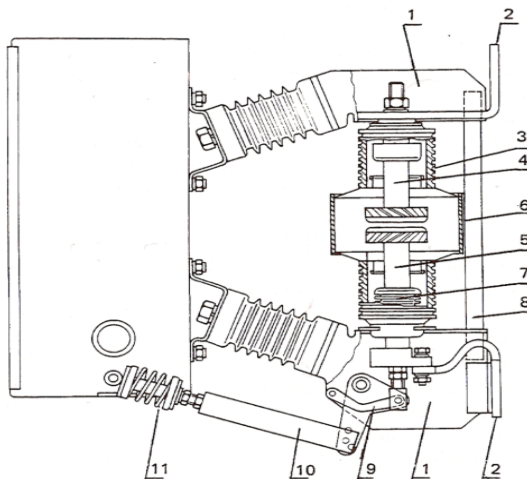
Kuvassa 17 Sulkemisvastusten käyttö katkaisijassa./9/

4.4.5. SF₆-katkaisija

SF₆-katkaisijalla on paljon etuja muihin katkaisijoihin nähden, esimerkiksi palamattomuus ja palaavan jännitteen kestävyys. Huollon tarve on varsin vähäinen, sillä mekaaninen elinikä on luokkaa 5000-1000 toimintakertaa ja katkaisuelimet kestävät täydellä oikosulkuvirralla katkaisua tyypillisesti 10-20 kertaa. Nimellisvirralla katkaistua virtaa katkaisija kestää useita tuhansia kertoja. Katkaisijan ongelmana on valokaaren aiheuttamat myrkylliset kaasut. /9/ Standardissa sanotaankin, että SF₆-katkaisijan alla olevissa kanavissa, kuiluissa, syvennyksissä tai vastaavissa on oltava riittävä tuuletus. Mekaanista tuuletusta ei tarvita jos kaasuosaston tilavuus ei ylitä 10 % huoneen tilavuudesta. /25/

4.4.6. Tyhjäkatkaisija

Tyhjäkatkaisija on periaatteeltaan hyvin yksinkertainen. Tarvitaan vain tyhjäkäiliöön sijoitetut katkaisijat. Katkaisutilanteessa valokaari palaa kosketinpinnoilta höyrystyneessä metallipilvessä. Nollakohdassa metallihöyryn ionisaatio katoaa, höyry tiivistyy ja valokaari sammuu. Avausväli on tyhjän hyvän jännitelujuuden vuoksi ainoastaan 5-15mm. Kuvassa 18 tyhjäkatkaisijan rakenne. /9/



Kuva 18 Tyhjäkatkaisijan rakenne. (Siemens) 1. Kannattimet 2. Liittimet 3. Eritin 4. kiinteä kosketin 5. Liikkuva kosketin 6. Sammutuskammio 7. Metallipalje 8. Eristävä tukitanko 9. Ohjaava vipu 10. Välitanko 11. Kosketusvoiman antava jousi /9/

4.5. Erottimet

Sähköturvallisuusmääräysten perusteella erottimien avausvälin tulee olla luotettava ja se on oltava näkyvä tai siinä on oltava luotettava mekaaninen asennonosoitus. Erottimella ei saa käyttää kuormitetun piirin avaamiseen, mutta esimerkiksi tyhjäkäyvän muuntajan kuormanerottimella voi erottaa. Erotin on voitava lukita auki- tai kiinniasentoon, että vaaraa aiheuttava käyttö saadaan estettyä. Erottimia käytetäänkin yleensä laitteiden saattamiseksi jännitteettömäksi esimerkiksi huoltotöiden ajaksi. /9/

Nykyiset erottimet ovat yleisesti kolmivapaisia. Valmistusmateriaalina käytetään keskijännitteillä posliinia tai valuhartsia ja suuremmilla jännitteillä pelkästään posliinia. Erottimen auki- ja kiinniohjaus voidaan toteuttaa käsi-, moottori- tai paineilmaohjauksella. Käsiohjauksen on tapahduttava mekaanisesti erottimen välittömässä läheisyydessä. Kauko-ohjausta voidaan käyttää moottori- ja paineilmatoimisiin erottimiin. Verkon vikatilanteiden hoito nopeutuu huomattavasti kauko-ohjauksen ansiosta. Yleensä asennosta on saatava sähköinen informaatio ja sen vuoksi erotin varustetaan apukoskettimilla. /9/

5. SÄHKÖVERKON VIAT

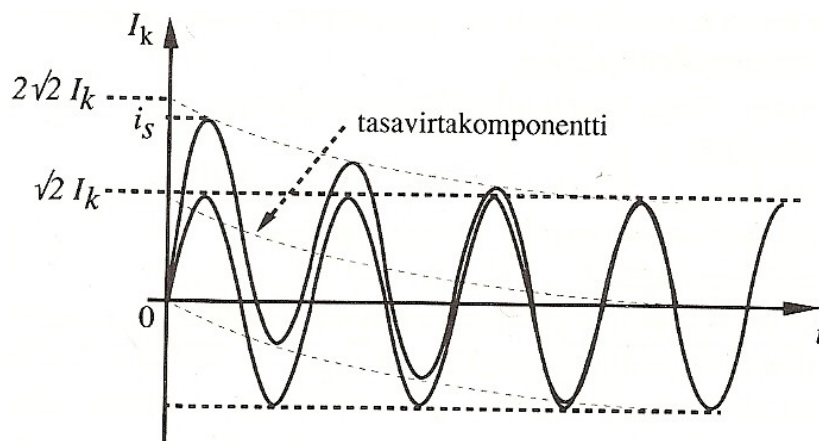
Vikatilanteiden arviointi on osa energiasiirtojärjestelmän suunnittelua. Tyypillisimpiä vikoja ovat oiko-, maa-, maaoskulosut tai johdonkatkot, lisäksi on muitakin vikoja, jotka vaikuttavat laitteiden toimintaan ja asetteluihin. Verkon viat riippuvat verkon maadoitustavasta, esimerkiksi maasta erotetussa tai käyttömaadoitetussa verkossa ei voi esiintyä maaoskulosuja, vaan ne ovat maasulkuja. Muita vian aiheuttajia voi olla esimerkiksi:

- ylijännitteet
- laitteiden vääränlainen toiminta
- eristyksen vikaantuminen. /7/

Vika voi olla myös johtua säästä, onnettomuudesta tai eläimistä, mutta voi johtaa sähköjakelun katkeamiseen. Tällaiset viat vaikuttavat huomattavasti esimerkiksi verkon jännitetasoon. /7/

Epäsymmetriset viat vaikuttavat eri lailla eri vaiheissa. Tyypillisiä epäsymmetrisiä vikoja ovat 2-vaiheinen oiko- ja maasulku. Toisinaan voi myös ilmetä epäsymmetrisiä yhdistelmävikoja, jolloin verkossa voi olla useita eri vikoja eri paikoissa. /7/

Kuvassa 19 symmetrisen ja epäsymmetrisen oikosulkuvirran muutos ajan funktiona.



Kuva 19 Oikosulkuvirta symmetrisessä ja epäsymmetrisessä oikosulussa. /6/

5.1. Symmetriset viat

5.1.1. 3-vaiheinen oikosulku

Suurimman vikavirran kolmivaihejärjestelmässä aiheuttaa 3-vaiheinen vastukseton oikosulku. Nimelliseen kuormitustilanteeseen verrattuna vikavirran suuruus voi olla jopa 10-40 -kertainen. Termisten vaurioiden minimoimiseksi tällainen vika on katkaistava tarpeeksi nopeasti./8/

Oikosulkupiirissä virta on lähes puhtaasti loisvirtaa, koska piirin impedanssi on induktiivinen. Vaihtovirtakomponentin lisäksi oikosulkuvirta sisältää tasavirtakomponentin I_t , mikä vaimenee verkon ominaisuuksien perusteella ja suuruus riippuu oikosulun syttymishetkestä. Vian katsotaan olevan symmetrinen, mikäli tasavirtakomponentti $I_t = 0$. /8/

Oikosulkuvirran laskemista varten tarvitaan vikapaikkaan kohdistuva jännite ja siitä näkyvän taustaverkon impedanssi. Pyörivien koneiden alkureaktanssi sekä jännitteen hetkellinen arvo vaikuttavat ensimmäisiin vikavirran jaksoihin. /20/

Kolmivaiheinen oikosulku lasketaan yksivaiheisesta sijaiskytkennästä jakamalla vaihejännite taustaverkon impedanssilla. Tausverkon impedanssi koostuu taustaverkon ja vikaimpedanssin summasta. /20/

$$I_{k3} = \frac{c * U_N}{\sqrt{3} * \sqrt{R_k^2 + X_k^2}} \quad (10)$$

c on jännitekerroin

U_N on pääjännite ennen vikaa

R_k on oikosulkupiirin resistanssi

X_k on oikosulkupiirin reaktanssi /17/

Kolmivaihejärjestelmän laskennasta käsitellään standardissa IEC-60909. Laskettaessa maksimi- ja minimoikosulkuvirtoja laskennoissa käytetään jännitekerrointa c . Alla olevassa taulukossa jännitetoimen arvot. /17/

Taulukko 1. Jännitekerroin. /17/

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 %.		

Syöttävästä verkosta ilmoitetaan yleensä maksimi ja minimi oikosulkuvirta I_k . Toisinaan voidaan myös ilmoittaa liittymispisteeseen kohdistuva maksimi- ja minimi oikosulkuteho S_k ./17/

$$Z_k = \frac{c * U_N}{\sqrt{3} * I_k} \quad (11)$$

$$Z_k = \frac{c * U_N^2}{S_k} \quad (12)$$

5.2. Epäsymmetriset viat

Epäsymmetrisiä vikoja voivat olla esimerkiksi 2-vaiheinen oikosulku tai maasulku. Epäsymmetriset viat voidaan laskea symmetristen komponenttien avulla, kuten 3-vaiheinen oikosulkukin. Tässä tapauksessa tyydytään tarkastelemaan suojauksen kannalta tärkeitä vikatapauksia käyttäen yksinkertaisia menetelmiä./6/

5.2.1. 2-vaiheinen oikosulku

Laskettaessa verkon minimioikosulkuvirtaa, valitaan kytkentätilanne vastaamaan verkon minimikuormitustilannetta. Jännitekerroin c valitaan vastaamaan jänniteportaan arvoa. /1/

Kaavalla 13 voidaan laskea 2-vaiheinen oikosulkuvirta, kun vika ilmenee kaukana pyörivistä koneista, kuten generaattoreista tai moottoreista

$$I_{k2} = \frac{c * U_N}{\sqrt{3} * (Z)} * \frac{\sqrt{3}}{2} \quad (13)$$

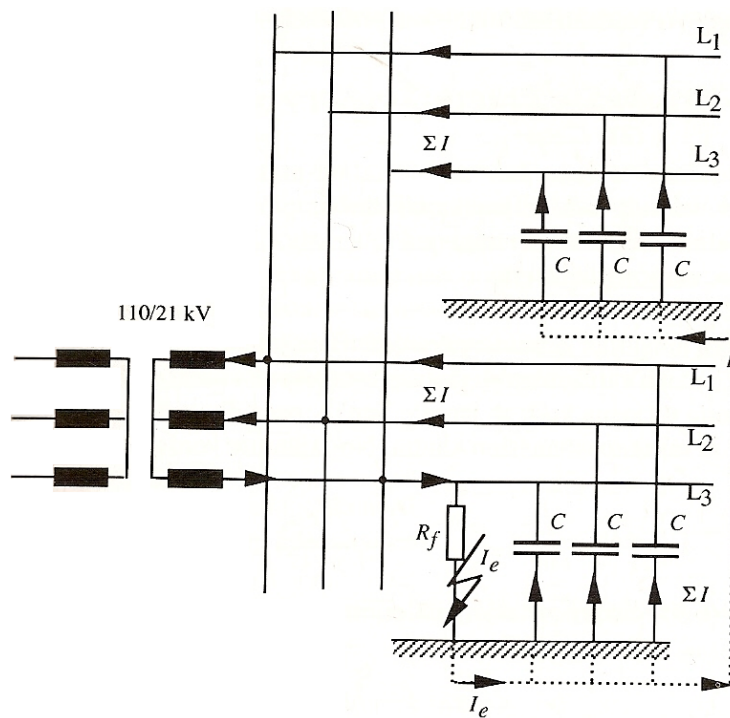
5.2.2. Maasulku

Suomessa keskijänniteverkon maadoitustapoina käytetään maasta erotettua verkkoa tai sammutettua verkkoa. Sammutetussa verkossa maakapasitanssia kompensoidaan tähtipisteeseen kytketyllä induktanssilla. Maasulun yleisimpiä aiheuttajia ovat vaihejohtimen valokaari tai koskettaminen johtavaan osaan. Kosketusjännitteeseen liittyvät ongelmat ovat yleisin syy käyttää maasta erotettua verkkoa. Kosketusjännitteen määrittämisellä pyritään sallittuun arvoon, jotta vältyttäisiin hengenvaarallisilta sähköiskuilta. /20/

Sallittua arvoa määritettäessä huomioidaan virta ja kesto aika. Näihin vaikuttavia tekijöitä ovat mm. laukaisun nopeuttaminen, maadoitusten parantaminen ja verkon maasulkuvirtaa pienentämällä. Maasulkuvirtaa voidaan pienentää sammutuskuristimella tai jakamalla verkko galvaanisesti eri osiin./20/

Maasulku aiheuttaa kosketus-, askel- ja maadoitusjännitteitä. Tämän vuoksi virtojen pienentäminen ja nopea katkaisu voivat olla tarpeellisia. /23/

Kuva 20 esittää yksivaiheista maasulkutilannetta maasta erotetussa verkossa. Verkon ollessa normaali tilanteessa vaihejännitteet ja maakapasitanssien kautta kulkevat virrat ovat symmetrisiä ja niiden summa on nolla. Jonkin vaiheen maakosketuksesta joko vikaresistanssin kanssa tai ilman, viallisen vaiheen jännite maahan nähden pienenee ja terveiden vaiheiden jännite nousee. Vikaresistanssin ollessa nolla, myös jännite viallisen vaiheen jännite laskee nolleen, ja terveiden vaiheiden jännite nousee pääjännitteen suuruiseksi. /6/



Kuva 20 Maasta erotetun verkon yksivaiheinen maasulku /6/

Maasulkuvirran I_e itseisarvo voidaan laskea yhtälöstä 14

$$I_e = \sqrt{3}\omega C_0 \quad (14)$$

U on verkon pääjännite

C_0 on yhden vaiheen maakapasitanssi

ω on $2\pi f$

Vikapaikan resistanssi vaikuttaa maasulkuvirtaan pienentävästi. Maasulkuvirran I_{ef} itseisarvo voidaan laskea lausekkeesta 15. /6/

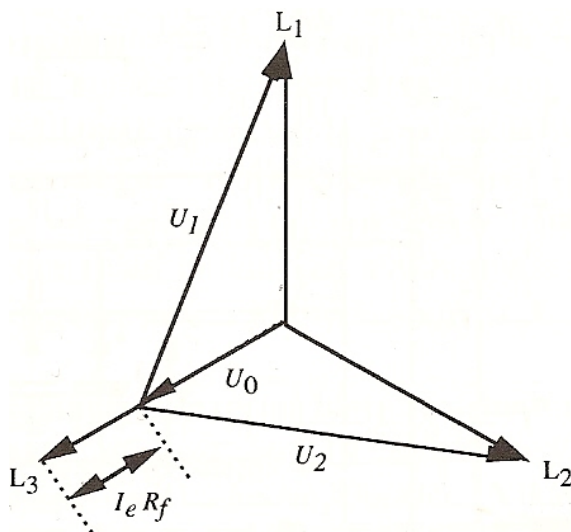
$$I_e = \frac{\sqrt{3}\omega C_0}{\sqrt{1+(3\omega C_0 R_f)^2}} * U \quad (15)$$

R_f on maasulun vikaresistanssi

Maasulun seurauksen aiheutuu epäsymmetria, jonka seurauksena maan ja verkon nollapisteen välille syntyy jännite-ero. Nollajännite vikaresistanssilla voidaan laskea yhtälöstä 16. /6/

$$\frac{U_0}{U_V} = \frac{1}{\sqrt{1+(3\omega C_0 R_f)^2}} \quad (16)$$

Kuvan 21 avulla on esitetty maasulun jännitteet osoitinpiirroksena. Jännite ($I_e R_f$) on vioittuneen johtimen jännite maahan nähden vikapaikassa ja jännitteet U_1 ja U_2 terveiden vaihejohtimien jännitteet maahan nähden. /6/



Kuva 21 Eristetyn järjestelmän nollajännite yksivaiheisessa maasulussa. /6/

Missä

U_0 on nollajännite

U_1 ja U_2 ovat terveiden vaiheiden jännitteet maasulkutilanteessa. /6/

Verkostossa voi syntyä myös tilanne, jolloin verkostossa on kahdessa eri paikassa maasulku samanaikaisesti. Tilanne voi syntyä, kun maasulkutilanteessa terveiden vaiheiden jännitteet nousevat, eivätkä kestäkään syntynyttä jännitteen nousua, puhutaan kaksoismaasulusta. Kaksoismaasulku on vaarallinen, koska siihen liittyy suuria maassa kulkevia virtoja, eikä voida tietää millaista reittiä virta palaa syöttölähteeseen. /7/

6. YLEISTÄ SUOJAUKSESTA

Hyvin suunniteltu relesuojaus toimii nopeasti, selektiivisesti ja oikein poikkeavassa käyttötilanteessa. Verkon selektiivisyydellä tarkoitetaan mahdollisimman pienen osan irrottamista energianjakelestä vian sattuessa. Relesuojaukselta kannalta olennaisia seikkoja ovat:

- suojauksen on oltava selektiivistä
- suojauksen on toimittava niin nopeasti kuin mahdollista että vaarat ja vauriot jäisivät mahdollisimman pieniksi
- suojauksen on toimittava niin nopeasti, että verkon stabilisuus ei vaarantuisi
- suojauksen on oltava aukoton
- käytettävyyden tulee olla hyvä ja se on voitava koestaa käyttöpaikalla
- hinnan tulee olla kohtuullinen. /7/

Rele ei yksin kykene suoriutumaan tehtävästä, vaan se tarvitsee muitakin komponentteja avukseen. Tällaisia ovat mm. katkaisijat, mittamuuntimet, apuenergianlähteet ja tiedonsiirtoyhteydet. Suojauskokonaisuudessa luonnollisesti tarvitaan komponenttien välistä kaapelointia. Ne eivät yleensä rajoitu pelkästään voimalaitoksen ja sähköaseman väliselle alueelle vaan käsittävät isomman kokonaisuuden, johon kuuluu esimerkiksi verkonhaltija./24/

Verkonhaltijalle voidaan toimittaa esimerkiksi mittaus-, kytkentätietoja tai siirtolaukaisukäskyjä.

6.1. Suojareleet

Rele on laite, jonka tehtävänä on muutoksen tapahtuessa toimia ja ohjata tai antaa merkki tapahtuneesta. Jos mitattu suure ylittää asettelun se havahtuu ja mikäli vika ei poistu asetellussa aikaviiveessä se toimii ja antaa kytkentävirikkeen.

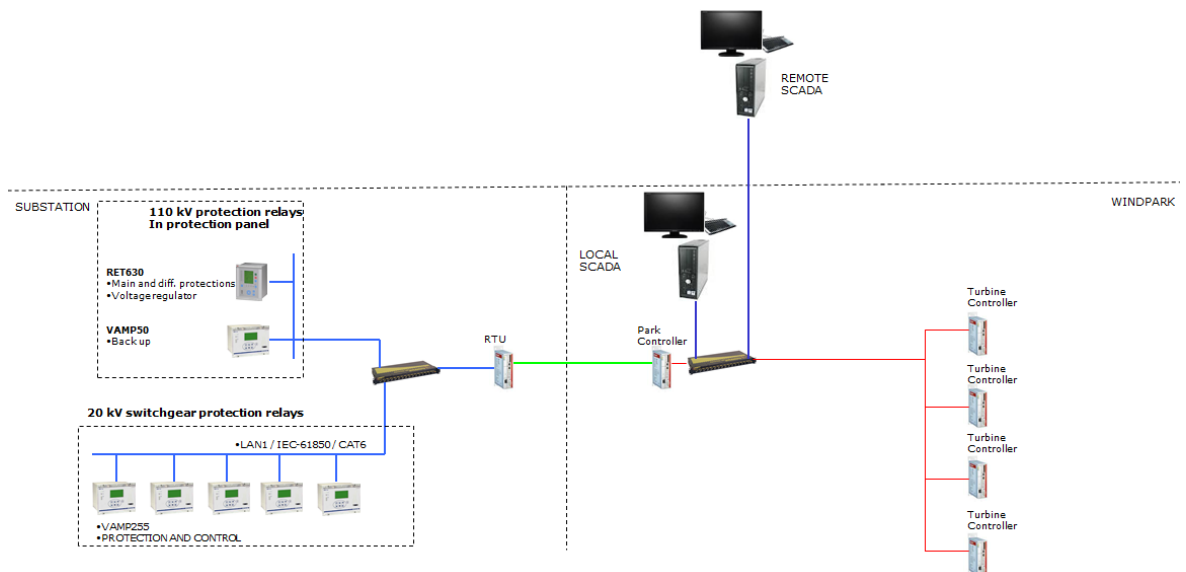
Releen valinnassa on kiinnitettävä huomiota:

- nimellisarvot yhdessä mittamuuntajien ja muiden toisilaitteiden kanssa
- asettelualueet
- toiminta-aika
- apusähkön tarve ja laatu
- ympäristöolosuhteet
- koestettavuus
- huolto
- hinta. /24/

6.1.1. Suojareleiden liityntä muihin järjestelmiin

Sähköaseman sekä voimalaitosten suojauskomponentit voidaan liittää samaan integroituun järjestelmään. Liityntä pääjärjestelmään voidaan tehdä erilaisia väyläratkaisuja hyödyntäen. Järjestelmällä voidaan siirtää esimerkiksi katkaisijoiden tilatietoja, myös eri releiden ala-asevilla mittaamia sähköisiä suureita voidaan siirtää puistokontrollerille./16/

Releiden kommunikoinnissa käytetään IEC 61850-protokollan mukaista liikennöintiä. Väyläyhteytenä käytetään valokuituyhteyttä tai kuparikaapelia, johon releet liitetään. Sähköaseman sekä voimalan kaikki releet liitetään kuvan 22 mukaan puistokontrollerille.



Kuva 22 Puistokommunikaatio./32/

6.2. Reletyypit

6.2.1. Ylijänniterele

Ylijännitteen ylittäessä asetellun, rele toimii. Relettä voidaan käyttää havaitsemaan maasulkuja, useimmiten hidastettuna, tai tahtigeneraattorin suojana jännitteenousua vastaan. Moottorisuojien yhteydessä relettä voidaan käyttää mittaamaan vastajännitettä, joka paljastaa vaihekatkoksen tai väärän vaihejärjestyksen. /24/

6.2.2. Alijänniterele

Alijänniterelettä käytetään yleisesti moottorin suojana erottamaan moottori verkosta, mikäli jännite putoaa niin alas, että sitä uhkaa pysähtyminen. Mikäli suuri moottori jää kytketyksi jännitteettömään verkkoon, niin jännitteen palatessa syntyy suuri oikosulkutilannetta muistuttava sysäysvirta. /24/

6.2.3. Taajuusreleet

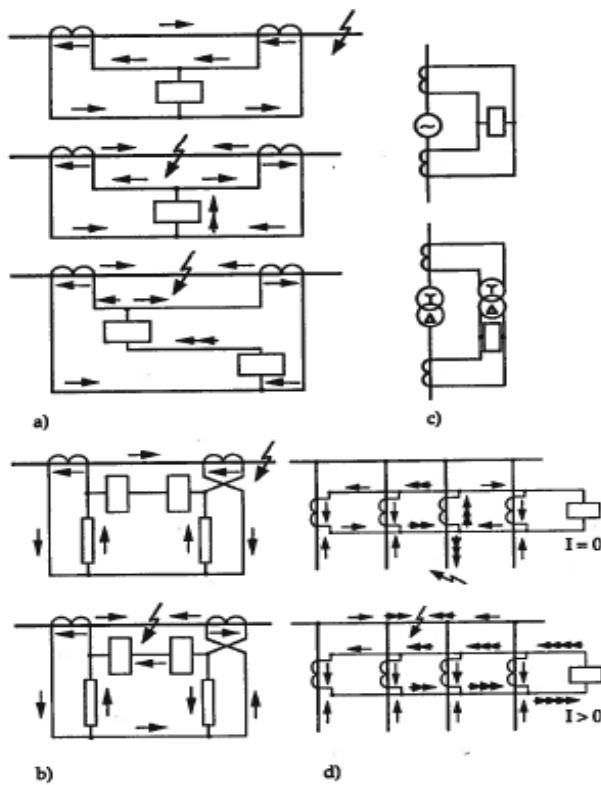
Taajuusrele mittaa vaihtojännitteen taajuutta ja toimii mikäli verkon taajuus poikkeaa asetellusta. Sitä voidaan käyttää generaattorin irrottamisessa verkosta tai tehonvajaussuojana johtimen vikaantuessa. Hidastamaton toiminta-aika noin 100ms. Rele irrottaa generaattorin verkosta pika- ja aikajälleenkytkennän jännitteettömänä aika./1/

6.2.4. Virtareleet

Ylivirtareleet toimivat oiko- ja ylikuormitussuojina. Releet voivat olla hetkellisiä-, vakioaika- tai käänteisaikaylivirtareleitä. Vakioaikaylivirtareleessä asetellaan virta, jolla havahtuminen tapahtuu ja sekä aikaviive jolloin laukaiseminen tapahtuu. Tämän lisäksi voidaan asettaa virta-arvo, jonka ylitys aiheuttaa pikalaukaisun. Käänteisaikaylivirtareleessä laukaisuaika määräytyy virran suuruuden perusteella. /6/

6.2.5. Differentiaalirele

Tyypillisesti differentiaalirelettä käytetään muuntajien, koneiden sekä johtojen suojaukseen. Differentiaalirele seuraa suojattavan kohteen siihen tulevien ja siitä lähtevien virtojen erotusta. Jos virtojen amplitudissa tai vaihekulmassa havaitaan aseteltua suurempi ero, seuraa laukaisu. Kuvassa 23 on esitetty yksivaiheisesti differentiaalireleen toimintaa. Esimerkiksi muuntaja suojauksessa vertaillaan kahden virtamuuntajan avulla vaiheen alkua ja loppupään virtoja. Suojaus on erittäin nopea, ainoastaan 20-40 ms. /24/ /1/



Kuva 23 Vertosuojauksen toteuttamisperiaate eräissä tyypillisistä suojauskohteesta.

a) kaapeliyhteys, sarjakytkentäratkaisu b) kaapeliyhteys, vastakytkentäratkaisu.

c) generaattori- ja muuntajasuojauks d) kiskosuojauksperiaate, jossa terveessä tilassa ja johtoviassa relevirta $I = 0$. /24/

Kuvassa 24 on muuntajan suojaus tähti-kolmio kytkennässä. Suojaus perustuu ylivirtaan ja koostuu kahdesta erikseen aseteltavasta portaasta, $I >$ ja $I >>$. Muuntajasovelluksessa asettelu riippuu kytkentäryhmästä. Esimerkiksi Dy11 kytkentäryhmässä käämin virrat lasketaan kolmiopuolelta kaavalla 17./30/

$$\overline{I_{L1W}} = \frac{(\overline{I_{L1}} - \overline{I_{L2}})}{3} \quad (17)$$

Käämin virrat tähtipuolella

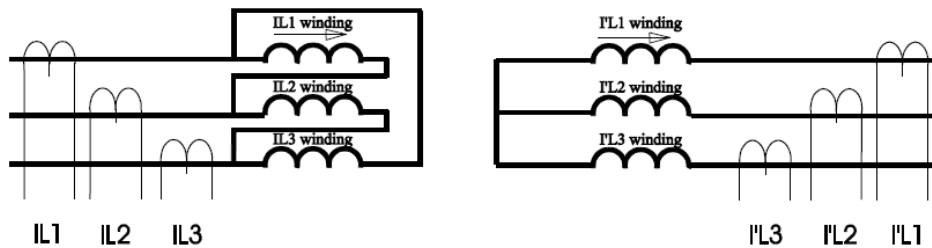
$$\overline{I'_{L1W}} = \overline{I'_{L1}}$$

$$\overline{I'_{L2W}} = \overline{I'_{L2}}$$

$$\overline{I'_{L3W}} = \overline{I'_{L3}}$$

Erovirta lasketaan kaavalla 18. /30/

$$I_b = \frac{\overline{I_W} - \overline{I'_W}}{2} \quad (18)$$



Kuva 24 VAMP 265 tähti-kolmio muuntaja suojana. /30/

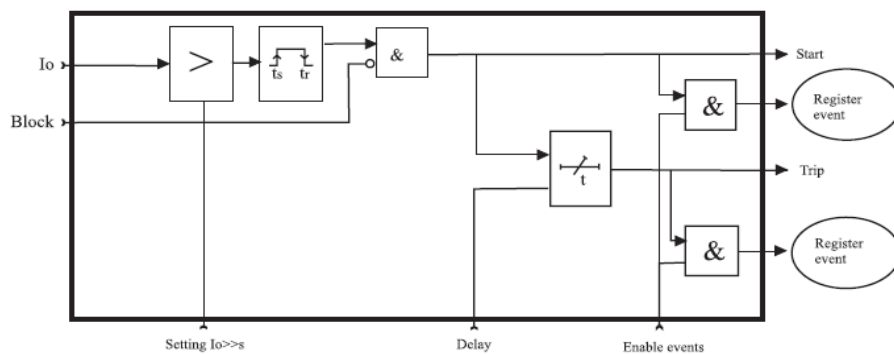
6.2.6. Nollavirta sekä -jännitereleet ja suunnatut maasulkureleet

Nollavirtarele (I_0 -rele) on ylivirtarele joka on kytketty virtamuuntajan toisiokäämeihin. Rele mittaa vaihevirtojen summaa ja toimii jos virta poikkeaa asetellusta. Virran suuntaa rele ei pysty tunnistamaan. Rele asetellaan yleensä kahdelle portaalle. Pienemmän portaan virta asettelu on pieni ja hidastus suuri, ja toisen portaan virta asettelu perustuu sähköturvallisuusmääräyksiin, joiden mukaan releen täytyy havaita sellaiset maasulut, jotka aiheuttavat kosketusjännitteen nousun liian suureksi. /7/

Nollavirtarelettä voidaan käyttää myös muuntajan maasulkusuojauksessa, samalla se toimii verkon varasuojana. Muuntajan tähtipisteen lähellä olevat viat on vaikea havaita differentiaalireleellä, koska epäsymmetria on niin pieni. /7/

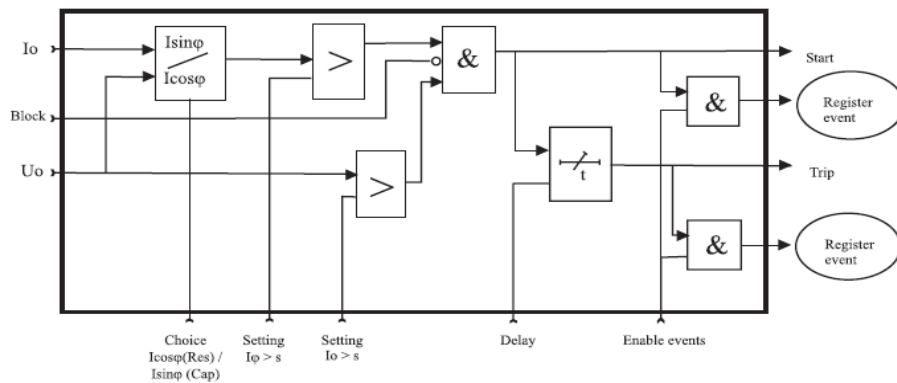
Nollajänniterele on toisiorele, joka on tarkoitettu maasta erotettujen ja maadoitettujen maasulkusuojojaksi. Nollajännite kehitetään avokolmiokytkennällä, joka on esitetty kuvassa 35. Nollajänniterelettä voidaan käyttää esimerkiksi kiskoston varasuojana tai suunnatun maasulkusuojauksen vaihekulman mittaamiseen. Mikäli nollajännite ylittää jommankumman suojausportaan toimintarajan, rele havahtuu ja kun aseteltu aika t kuluu loppuun, tapahtuu laukaisu. /4/

Suunnatussa maasulkusuojauksessa vian suunnan määrittämällä käyttämällä hyväksi nollavirran ja nollajännitteen vaihekulmaa. Paras selektiivisyys saavutetaan käänteisaika asettelulla. Kuvassa 25 suuntaamattoman maasulkusuojauksen lohkokaaavio. /7/

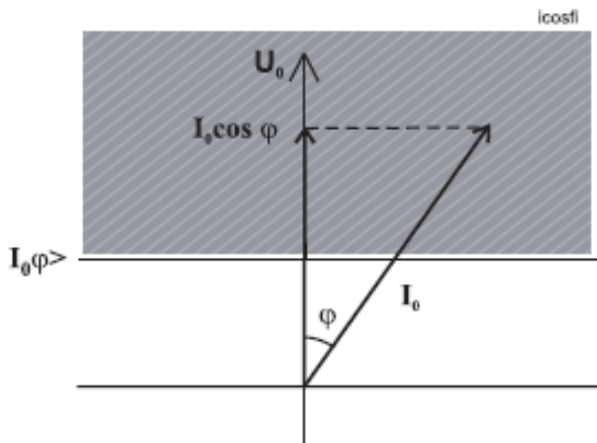


Kuva 25 Suuntaamattoman maasulkusuojan lohkokaaavio./29/

Suunnattua maasulkusuojausta käytetään verkoissa, joiden rakenne ja pituus vaihtelevat. Maasulkuvirtaa mitataan virtatuloilla I_0 ja I_{02} tai se voidaan sisäisesti laskea vaihevirroista. Nollajännite mitataan esimerkiksi avokolmio jännitteestä tai se voidaan laskea vaihejännitteistä sisäisesti. Kuvassa 26 suunnatun maasulkusuojauksen lohkokaaavio sekä kuvassa 27 $I_Q \cos\phi$. /29/



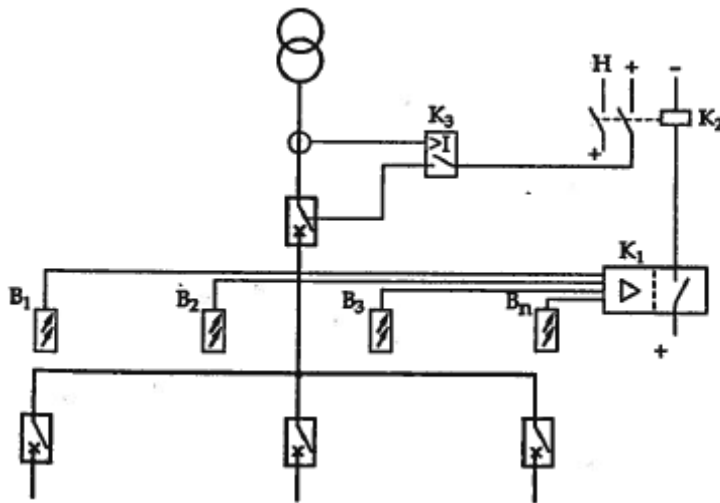
Kuva 26 Suunnatun maasulkusuojauksen lohkokaavio. /29/



Kuva 27 Suunnatun maasulkuportaant $I_0 \cos \varphi$ /29/

6.2.7. Valokaarireleet

Kuvassa 28 on valokaarisuojan toteuttamisperiaate. Suojalla valvotaan erityisesti sähköaseman laitteita. Valokennot valvovat esimerkiksi kiskotilaa ja kun molemmat, virta- sekä valoehto täyttyvät, seuraa laukaisu. Laukaisu on erittäin nopea, ainoastaan 10-50ms.



Kuva 28 Valokaarisuojan periaate. /29/

6.3. Toteuttamisperiaatteet

Suojauksen toimintanopeuteen voidaan vaikuttaa oleellisesti suojaustavan valinnalla. Pitkittynyt suojausaika vaikuttaa huomattavasti oikosulun aiheuttamiin vaurioihin. Mitä nopeammin suojaus toimii ja vikapaikka saadaan erotettua sitä pienemmiksi jäävät oikosulun aiheuttamat vauriot. Myös oikosulusta aiheutuva haitta verkostolle jää pienemmäksi. Selektiivinen suojaus voidaan toteuttaa seuraavilla tavoilla:

- aikaselektiivinen suojaus
- aika- ja virtaselektiivinen suojaus
- aika- ja suuntaselektiivinen suojaus
- lukitussuojaus
- differentiaalisuojaus
- distanssi- ja vertosuojaus. /1/

6.3.1. Aikaselektiivinen suojaus

Selektiivinen suojaus on yksinkertaisinta toteuttaa käyttämällä aikaselektiivistä suojausta. Suojauksen periaatteena on porrastaa toiminta-aika siten, että lähimpänä vikapaikkaa oleva rele ehtii toimia ensin. aikaselektiivinen suojaus toteutetaan ylivirtareille joko vakioaikaisena tai käänteisäikaisena. Vakioaikaisen suojauksen toimintanopeus ei ole

riippuvainen mitatun virran suuruudesta, kun taas käännteisaika suojausten toiminta on sitä nopeampaa mitä suurempi mitattu virta on. Vakioaikaselektiivinen suojaus toimii parhaiten säteittäisessä verkossa. Käännteisaika suojaus toimii parhaiten verkossa, jossa kytkentätilanteesta riippuen, oikosulkuvirrat vaihtelevat vähän tai oikosulkuvirtatasot vaihtelevat paljon johtojen päiden välillä. Käännteisaikasuojaus voidaan näin nopeuttaa suurella vikavirroilla tulevia suojaustoimenpiteitä. Käännteisaikasuojausten käyttö voi olla perusteltua liikuttaessa lähellä maksimi oikosulun kestoisuuksia. /1/

Standardit IEC 60255-3, IEC 60255-4 ja BS 142 määrittelevät neljä käännteisaikatoimintakäyrästä: /1/

- normal inverse
- long time inverse
- very inverse
- extremely inverse

Käännteisaikakäyrien mukainen laukaisuaika voidaan laskea lausekkeesta 19.

$$t = \frac{k * \beta}{\left(\frac{I}{I >}\right)^\alpha - 1} \quad (19)$$

k on aseteltava aikakerroin

I on vaihevirran arvo

I > on virta-asettelu

α , β on toimintakäyräkohtaiset vakiot

Käytettäessä normal, very tai extremely inverse toimintakäyriä suojausten tulee havahtua viimeistään, kun virta ylittää 1,3-kertaisesti asetellun. Käytettäessä long time inverse toimintakäyrää suojausten tulee havahtua 1,1-kertaisella asetelulla./1/

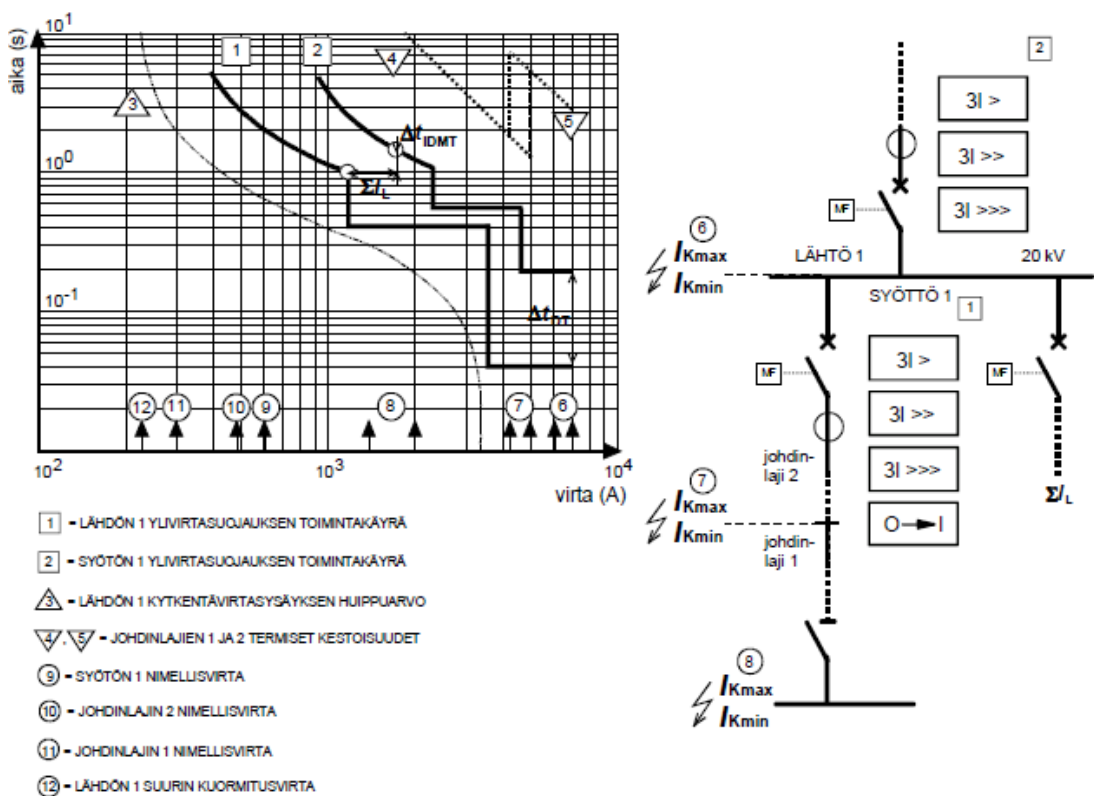
Käännteisaikakäyrän jyrkkyyden määrittelevät kertoimen α ja β seuraavasti:

Taulukko 2 Toimintakäyräkohtaiset kertoimet

α	β
----------	---------

Normal inverse	0,02	0,14
Very inverse	1,0	13,5
Extremely inverse	2,0	80,0
Long time inverse	1,0	120,0

Kuvassa 29 on esimerkiverkossa käytetty kolmiportaista suojausta, jonka alin porras ($3I>$) voi toimia joko vakio- tai käänteisaikaisena. Ylemmät portaat ($3I>>$ ja $3I>>>$) toimivat vakioaikaisina ja niiden on tarkoitus nopeuttaa suojauksen toimintaa suurilla virroilla. Suojauksen suunnittelu ja tarkastelu on helppoa selektiivisyyskäyrästä. Käyrästä esitetään kaikkien suojareleiden suojaustoiminnot, kuormitusvirrat, suurimmat vikavirtatasot sekä mahdolliset kytkentävirtasysäykset./1/



Kuva 29 Esimerkki selektiivisyyskäyrästä. /1/

Oikean porrasajan valinta on tärkeä seikka suojauksen kannalta. Porrasaika on peräkkäisten suojausportaiden erotus. Paikoissa jossa esiintyy suuria oikosulkuvirtoja, toiminta-aika ei saa kasvaa tarpeettoman pitkäksi, mutta selektiivisyyden säilymiseksi

marginaalia on oltava riittävästi esimerkiksi virran mittauksen epätarkkuuden vuoksi. Esimerkkikuvassa porrassaika käännteisaikaisten käyrien välissä on merkitty Δt_{IDTM} :llä ja vakioaikaportaiden välissä Δt_{DT} :llä. Porrassaikoja voidaan laskea lausekkeilla 20 ja 21. /1/

$$\Delta t_{DT} = 2 * t_E + t_R + t_{CB} + t_M \quad (20)$$

t_E on releen toiminta-ajan toleranssi

t_R on retardaatio- eli pyörtöaika

t_{CB} on katkaisijan toiminta-aika

t_M on varmuusmarginaali

Varmuusmarginaalilla huomioidaan vianaikaisen DC-komponentin aiheuttama viivästys.

Käännteisaikaisten suojiin välinen porrassaika Δt_{IDTM} lasketaan kaavalla 21.

$$\Delta t_{IDMT} = t_1 \left(\frac{(1 + E_1 / 100)}{(1 - E_2 / 100)} - 1 \right) + t_R + t_{CB} + t_M \quad (21)$$

E_1 = tekijä, jolla otetaan huomioon virranmittauksen epätarkkuuden aiheuttaman toiminta-aikavirheen ja toiminta-ajan toleranssin yhteisvaikutus lähempänä vikakohtaa olevassa releessä (%).

E_2 = tekijä, jolla otetaan huomioon virranmittauksen epätarkkuuden aiheuttaman toiminta-aikavirheen ja toiminta-ajan toleranssin yhteisvaikutus suojausketjussa seuraavana olevassa releessä (%).

t_{CB} = katkaisijan toiminta-aika

t_R = retardaatio- eli pyörtöaika

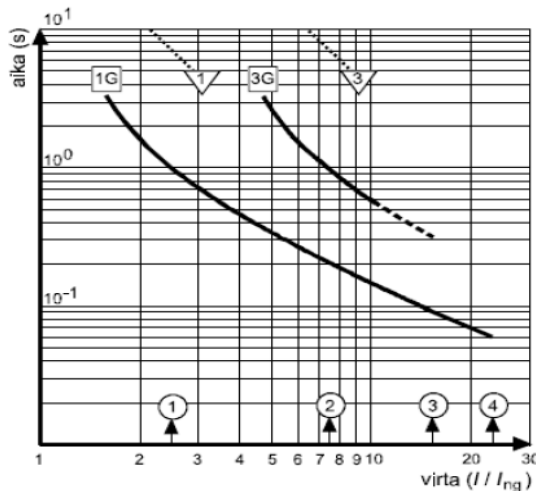
t_M = varmuusmarginaali

t_1 = vikakohtaa lähempänä olevan releen laskennallinen toiminta-aika

6.3.2. Aika- ja virtaselektiivinen suojaus

Aika- ja virtaselektiivistä suojausta voidaan käyttää tilanteissa, jossa vikavirran suuruus voi olla eri suojan edessä ja takana. Vikavirtojen erisuuruudesta johtuen tarvitaan

eripituiset toiminta-ajat eri suuntiin ja erityisesti käänteisajaisella suojauksella pystytään toteuttamaan tarvittava aikaselektiivisyys. Kuvassa 30 on esitetty aika- ja virtaselektiivinen ylivirtasuojaus. /1/



Kuva 30 Aika – ja virtaselektiivinen suojaus. /1/

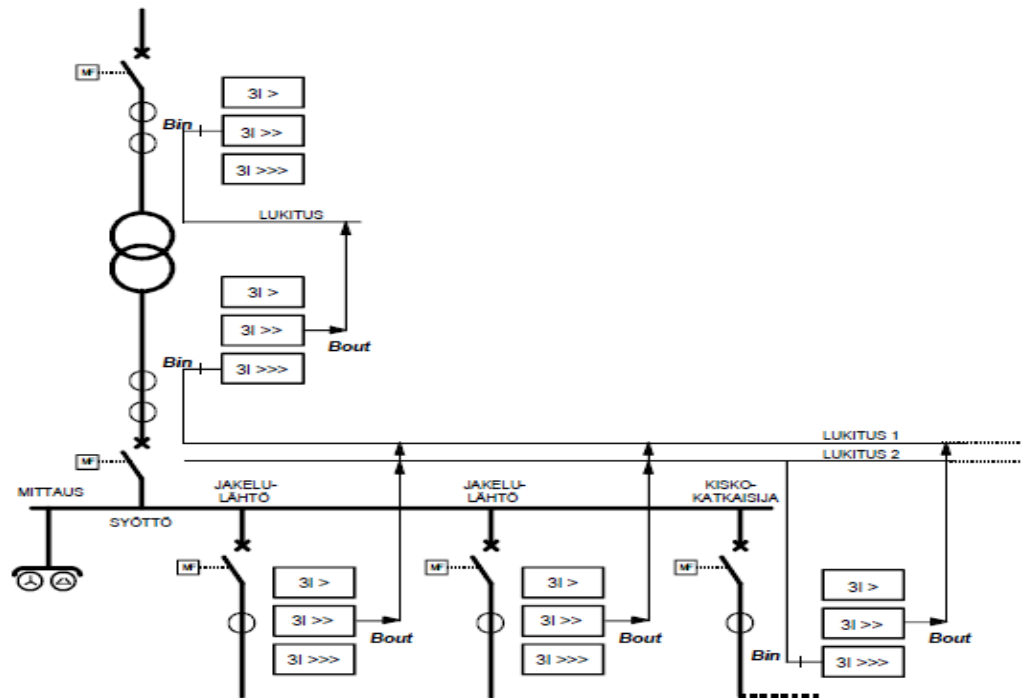
6.3.3. Aika- ja suuntaselektiivinen suojaus

Suunnattuja ylivirtasuojia käytetään normaalisti rengas- ja silmukkaverkoissa. Suojauksen suuntausta tarvitaan, kun peräkkäisiltä portailta vaaditaan erilaisia toiminta-aikoja riippuen onko vika edessä johdolla vai takana esimerkiksi kiskostossa. Releen toiminta riippuu virran suuruudesta ja suunnasta. Suunnattu ylivirtasuojia voi toimia joko käänteisajaisena tai vakioajaisena. Virran suuntaa voi määrittellä kahdella tavalla. Ensimmäisessä tavassa suunta määritetään vaihekohtaisesti vertailemalla yhtä vaiheosoitinta vastakkaisen pääjännitteen vaiheen osoittimeen. Toisessa tavassa verrataan havahtumisen perusteella viallisten vaiheiden erotusta ja verran niitä kahden muun pääjännitteen osoittimien erotukseen. /1/

6.3.4. Lukitussuojaus

Lukitussuojaus on tarkoitettu erityisesti kiskostosuojaukseen, mutta sopii hyvin myös lyhyehköjen johtojen ja kojeiston suojaukseen. Sen tavoitteena on nopeuttaa suojaustoimintaa. Kuvassa 31 on suojattava kiskosto. Vian sattuessa johdolla havahtuvat kiskosuoja sekä johtolähtö. Johtolähdön havahtumisesta suoja lukitsee kiskosuojan ja laukaisee johtolähdön katkaisijan asetellussa ajassa. Vian ollessa kiskostossa suoja toimii

normaalisti asetellussa ajassa, joka voi olla huomattavasti aikaselektiivisyysaikaa lyhyempi. Kiskosuojaan aseteltaessa on kuitenkin huomioitava virtamuuntajien epätarkkuus sekä releiden komnikointiviive. /1/



Kuva 31 Lukitussuojan käyttö kiskoston ja muuntajan suojaukseen /1/

Missä

- Bout on ulostuleva havahtumissignaali
- Bin on sisään menevä havahtumissignaali, joka lukitsee ko. suojausportaan toiminnan.

7. MITTAMUUNTAJAT

Mittamuuntajat muuntavat primäärisuureet, virran tai jännitteen, releelle sopivaan muotoon. /24/

Mittamuuntajan pääasialliset tehtävät:

- mittauspiirin erottaminen suurjännitteisestä päävirtapiiristä galvaanisesti
- muuttaa mitta-alaa ja samalla mahdollistaa mitta- ja suojalaitteiden standardointi tiettyihin mitoitusarvoihin
- suojella mittareita ylikuormitukselta
- tehdä mahdolliseksi mittareiden ja releiden sijoitus etäälle varsinaisesta mittauspaikasta (esim. keskitettymittaus)/7/

Mittamuuntajien on toistettava normaalilla toiminta-alueella mahdollisimman virheettömästi. Käytännössä kumminkin käämitysten hajaimpedanssi ja tyhjäkäyntivirta aiheuttavat kulma-, virta- ja jännitevirheitä. Suuriosa muuntimista perustuu sähkömagneettiseen induktioon, mutta jännitteen mittauksessa voidaan käyttää myös kapasitiivisia jännitteenjakajia. /7/

Standardin mukaan toisiopiirit on maadoitettava mahdollisimman lähelle mittamuuntajien toisioliittimiä. Mikäli mittamuuntajan maadoitusjohdin on mekaanisesti suojattu, sen poikkipinta-ala oltava vähintään $2,5\text{mm}^2$ kuparia, ja jos maadoitusjohdin on suojaamaton, on käytettävä vähintään 4mm^2 kuparia. /25/

7.1. Virtamuuntajat

IEC-standardi 60044-1 jakaa virtamuuntajat käyttötarkoituksen perusteella kahteen luokkaa, mittaus- ja suojaustarkoitukseen valmistettuihin virtamuuntajiin. Molemmille virtamuuntajille on määritelty virta- ja kulmavirhe. Virtavirhe tarkoittaa toisiovirran poikkeamista ensiövirrasta. Kulmavirhe määritetään ensiö- ja toisiovirtojen samanhetkisten tehollisarvojen avulla kaavalla 22. /9/

taakka. Virtamuuntaja pysyy taakan vaihtelualueella 25...100% S_N tarkkuusluokassaan ja tarkkuus on parhaimmillaan 75% S_N taakalla. Magnetoimiskäyrän muodosta johtuen virtamuuntajan virhe vaihtelee. /24/

Taulukko 3. Mittausmuuntajan virta- ja kulmavirheiden rajat. /24/

Tarkkuusluokka	Virtavirhe (%) virralla I/I_N						Kulmavirhe (°) virralla I/I_N				
	0,01	0,05	0,20	0,50	1,00	1,20	0,01	0,05	0,20	1,00	1,20
0,1		0,4	0,2		0,1	0,1	15	8	5	5	
0,2		0,75	0,35		0,2	0,2	30	15	10	10	
0,2S	0,75	0,35	0,2		0,2	0,2	30	15	10	10	
0,5		1,5	0,75		0,5	0,5	90	45	30	30	
0,5S	1,5	0,75	0,5		0,5	0,5	90	45	30	30	
1,0		3,0	1,5		1,0	1,0	180	90	60	60	
3,0				3,0		3,0					
5,0				5,0		5,0					

Virrat vikatilanteissa voivat nousta niin korkeille, siihen liitetty mittari voi vahingoittua. Mittarin rikkoutuminen pyritään estämään mittaussydämen mittarivarmuuskertoimella, tällä pyritään varmistumaan siitä, että virtamuuntaja kyllästyy ja toision virrat pysyvät kohtuullisina. /24/

Mikäli taakka poikkeaa muuntajan nimellisarvosta, voidaan taakkaa vastaava mittarivarmuuskero laskea kaavalla 23. /24/

$$n = n_N \left| \frac{S_i + S_N}{S_i + S_2} \right| \quad (23)$$

Sisätaakan S_i suuruus voidaan laskea kaavalla 24

$$S_i = Z_{\delta 2} * I_{2N}^2 \quad (24)$$

missä

$Z_{\delta 2}$ on muuntajan toision sisäinen impedanssi

I_{2N} on muuntajan toision nimellisvirta

n on todellinen mittari- ja tarkkuusrajakerroin

S_i on muuntajan toisioson sisätaakka

S_N on muuntajan toisioson nimellinen taakka

S_2 on muuntajaan toisioson kytketty todellinen taakka

n_N mittarivarmuus- tai tarkkuusrajakerroin /24/

Todellinen taakka S_2 lasketaan erilaitteiden kuormitukset ja toisiojohtimien häviöt yhteen. Valmistaja ei yleensä kerro sisätaakan arvoa, vaan se on kysyttävä valmistajalta erikseen. /24/

Mittarivarmuuskerrointa ei ole standardoitu, mutta tyypillinen arvo Suomessa on 5. Tarkkuusluokan yhteydessä ilmoitetaan yleensä myös mittarivarmuuskerroin, esimerkiksi 15VA Class 0,5 FS5. /24/

Suojausvirtamuuntajille on standardoitu tarkkuusluokat, jotka on merkitty taulukkoon 4.

Taulukko 4. Suojausvirtamuuntajan tarkkuusluokat /24/

Tarkkuusluokka	Virtavirhe %	Kulmavirhe minuuttia	Yhdistetty virhe %
5P	1	60	5
10P	3	-	10

7.2. Jännitemuuntaja

Jännitemuuntajien valinnassa on huomioitava, että toisioson tarkkuus ja nimellisjännite ovat riittäviä toisiin kytketyille johdoille ja laitteille. Jännitemuuntajan toisioson puoli on suojattava oikosululta ja on suositeltavaa, että suojalaitteella on valvonta. /24/

Jännitemuuntajat jaetaan standardissa virtamuuntajien tapaan kahteen ryhmään, mittaamuuntajiin ja suojaustarkoituksiin valmistettuihin jännitemuuntajiin. Jännitemuuntajille on määritelty kulmavirhe ja jännitevirhe. Jännitevirhe F_u lasketaan kaavalla 25. /9/

$$F_u = \frac{k_n U_s - U_p}{U_p} 100\% \quad (25)$$

missä

k_n on jännitemuuntajan nimellismuuntosuhde

U_s on toisiojännitteen tehollisarvo

U_p on ensiojännitteen tehollisarvo

Kulmavirhe määritellään analogisesti ensio- ja toisiojännitteiden osoittimien kulmaerosta. Näiden lisäksi jännitemuuntajalle määritetään ns. mitoitusjännitekerroin k_N . Mitoituskertoimella ilmoitetaan ensiojännitteen suuruuden, jonka se kestää termisesti tietyn ajan. Suojaustarkoitukseen valmistetulta muuntajalta edellytetään, että se pysyy tarkkuusluokassaan mitoituskerroimen edellyttämään jännitteeseen saakka. Verkon maadoitustapa ja miten ensiökäämi on kytketty verkkoon, vaikuttavat mitoituskerroimeen. Taulukossa 5 on esitetty mitoituskerroimen standardiarvot ja sallittu käyttöaika ko. jännitteellä./9/

Taulukko 5 Jännitemuuntajien mitoitusjännitekerroin./9/

Mitoitus- jännite- kerroin k_N	Aika	Ensiökäämin kytkentä ja verkon maadoitus
1,2	Jatkuva	Vaiheitten välissä kaikissa verkoissa Tehomuuntajan tähtipisteen ja maan välissä kaikissa verkoissa
1,2	Jatkuva	Vaiheen ja maan välissä tehollisesti maadoitetuissa verkoissa
1,5	30s	
1,2	Jatkuva	Vaiheen ja maan välissä ei-tehollisesti maadoitetussa verkossa, jossa on automaattinen maasulkulaukaisu
1,9	30s	
1,2	Jatkuva	Vaiheen ja maan välissä maasta erotetussa tai sammutetussa verkossa, joissa ei ole automaattista maasulkulaukaisua
1,9	8h	

Standardissa on määritelty virtamuuntajien tavoin jännitemuuntajien tarkkuusluokat. Tarkkuusluokat määritellään jännite- ja kulmavirheiden tavoin. Tarkkuusluokka on

ilmoitettu taulukossa 6 ja koskee kaikkia jännitemuuntajia avokolmiokäimejä lukuun ottamatta, lisäksi suojaustarkoitukseen käytetyn jännitemuuntajan tulee täyttää jommankumman taulukossa 7 mainitun luokan vaatimukset. /9/

Taulukko 6 Jännitemuuntajien tarkkuusvaatimukset./9/

Luokka	Jännitevirhe prosentteina ±	Kulmavirhe minuutteina ±
0,1	0,1	5
0,2	0,2	10
0,5	0,5	20
1,0	1	40
3,0	3	-

Taulukko 7 Suojaustarkoituksiin käytetyille jännitemuuntajille asetetut lisätarkkuusvaatimukset./9/

Luokka	Jännitevirhe prosentteina ±	Kulmavirhe minuutteina ±
3P	3	120
6P	6	240

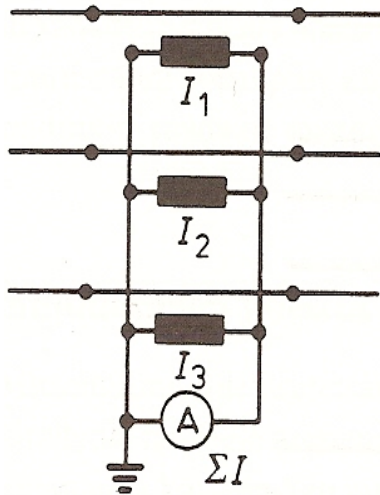
IEC:n mukaan jännitemuuntajan jännitteeksi on valittava nimellisjännitteen mukainen jännite. /9/

Suomessa käytettävät nimellistoisiojännitteet, kytkettäessä vaiheen ja maan väliin, ovat $100/\sqrt{3}$ ja $200/\sqrt{3}$. Avokolmioon kytkettävien käämien nimellisjännitteet ovat $100/3$ ja $200/3$. /24/

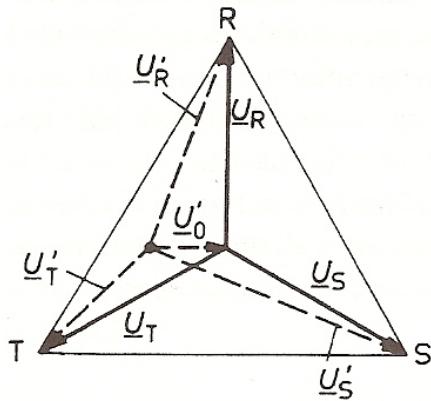
Jännitemuuntajan taakka nimellisjännitteellä on mittalaitteiden ja releiden niissä kuluvien tehojen summa. Jännitemuuntajan nimellistaakat vaihtelevat 10-500VA välillä. Nimellistaakkaa valitessa on huomioitavaa, että taakkaa ei kannata valita liian suureksi, koska mittamuuntaja on tarkimmillaan $0,6-0,65 * S_N$. Taakan ollessa liian pieni verrattuna

nimellistaakkaan, näkyy jännite liian suurena. Muuntajan toisioliittimiin voi myös lisätä vastuksen taakan lisäämiseksi. /24/

Maasulun ilmaiseminen jännitteen mittauksen avulla voidaan toteuttaa mittaamalla nollajännite. Mittaus voidaan suorittaa käyttämällä yksivaihemuuntajia kuvan 33 mukaisella kytkennällä. Kukin muuntaja on varustettu kolmella käämillä. /9/

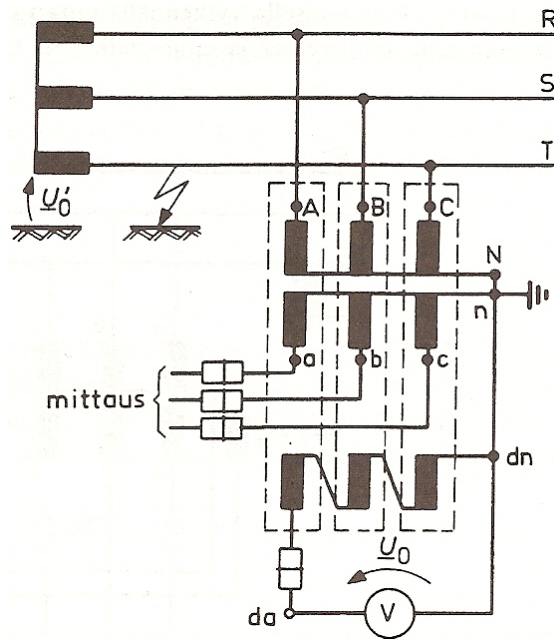


Kuva 33 Virtamuuntajien summakytkeä. /9/



Kuva 34 Jännitteet verkossa terveen tilan ja maasulun aikana. /24/

Maasulun ilmaisuun käytetään yleisesti myös avokolmioon kytkettyjä tertiäärikämejä. Kuvan 35 mukaisella kytkennällä mitattu U_0 jännite on suoraan verrannollinen ja samanvaiheinen kuin verkon nollapisteen jännite. /9/

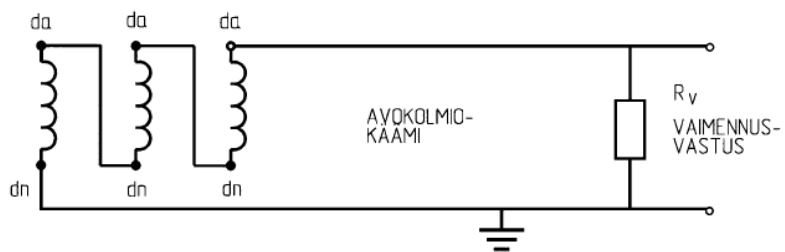


Kuva 35 Yksivaiheisista jännitemuuntajista muodostettu avokolmiokytkentä /9/

Jännitemuuntajaa valittaessa on huomioitava kippivärähtelyn mahdollisuus. Kippivärähtelyä esiintyy piirin kapasitanssin ja muuntajan induktanssin vaikutuksesta. Kun näiden suhde on sopiva, ilmiö saa alkunsa. Kippivärähtelylle ovat tyypillisiä mm. seuraavat seikat:

- Kippivärähtely alkaa äkillisesti jonkin tilamuutoksen tai kytkentätoimenpiteen seurauksena.
- Värähtely lakkaa, kun lisätään johtoja tai muita kapasitanssilähteitä.
- Pääjännite pysyy vakiona, mutta vaiheen ja maan välinen jännite voi olla hyvinkin vääristynyt.
- Värähtelyn aikana voi esiintyä jopa 150-kertaisia nimellisvirtoja, joka aiheuttaa ylilyöntejä ja jännitemuuntajan vaurioitumisen ylikuumentumisen takia./5/

Kippivärähtelyä voidaan vaimentaa kytkemällä vaimennusvastus avokolmioon. Kytkentä on esitetty kuvassa 36. Mitoitettaessa vaimennusvastusta on huomioitava, että jännitemuuntajan termistä kuormitettavuutta ei saa ylittää maasulkutilanteessa. Vastuksen koko riippuu jännitemuuntajatyypistä, esimerkiksi 24kV jännitemuuntajien kanssa käytetään 450W vaimennustehoa. Avokolmion jännitteellä 100/3V vaimennus on siis 22Ω ja 110/3V jännitteellä 27Ω . /2/



Kuva 36 Kippivärähtelyn vaimennusvastuksen kytkentä. /2/

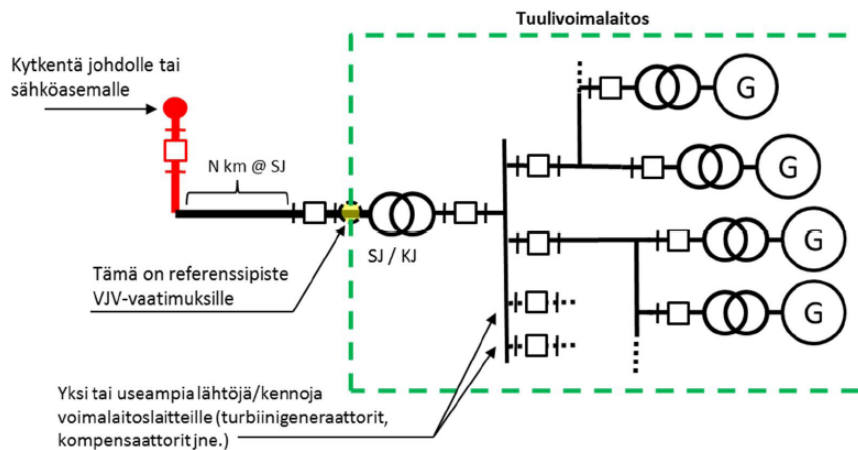
8. VERKKOYHTIÖN VAATIMUKSET VERKKOONLIITYNNÄLLE

Verkossa pyritään pitämään tasapaino tuotetulle ja kulutetulle pätö- ja loisteholle. Kun tasapaino pyrkii häiriintymään, kompensoidaan muutosta aluksi pyörivien koneiden liike-energialla. Muutokset voidaan havaita verkon taajuuden vaihteluna 50 Hz molemmin puolen. Verkon loistehotasapaino vaikuttaa verkon jännitteeseen. Suujännitejohdoilla reaktanssi on huomattavasti suurempi kuin resistanssi, joten loistehoa ei voida häviöiden takia siirtää pitkiä matkoja. Voidaankin todeta, että loisteho kannattaa tuottaa paikallisesti lähellä kulutuspistettä. /9/

Fingridin ylläpitämillä vaatimuksilla varmistetaan, että kaikissa siirtoverkot ja voimalaitokset toimivat kaikissa käyttötilanteissa. Verkkohäiriöiden sattuessa voimalaitosten on pysyttävä verkossa ja niiden on toimittava luotettavasti. Voimalaitoksen tulee kestää järjestelmän sille aiheuttamat jännite- ja taajuusvaihtelut. Voimalaitos ei saa aiheuttaa häiriötä muulle verkolle. /12/

8.1. Tuulivoimalaitosten järjestelmätekniset vaatimukset

Suomen voimajärjestelmään kytkettävien tuulivoimalaitosten järjestelmätekniset vaatimukset (VJV) perustuvat Nordig Grid Code säännöstyöhön, joka on yhteinen liittymissääntö Pohjoismaissa. Alueelliset verkostoyhtiöt noudattavat usein samoja säännöstyöjä. VJV2007 liitteinen määrittää referenssipisteen vaatimukset tuulivoimalaitoksille. Liitteissä määritellään tuulivoimalan toimintarajat sekä toiminta poikkeustilanteissa. Kuvassa 37 referenssipiste VJV-vaatimuksille. /14/



Kuva 37 Referenssipiste VJV-vaatimuksille./14/

8.2. Pätötehon säätö

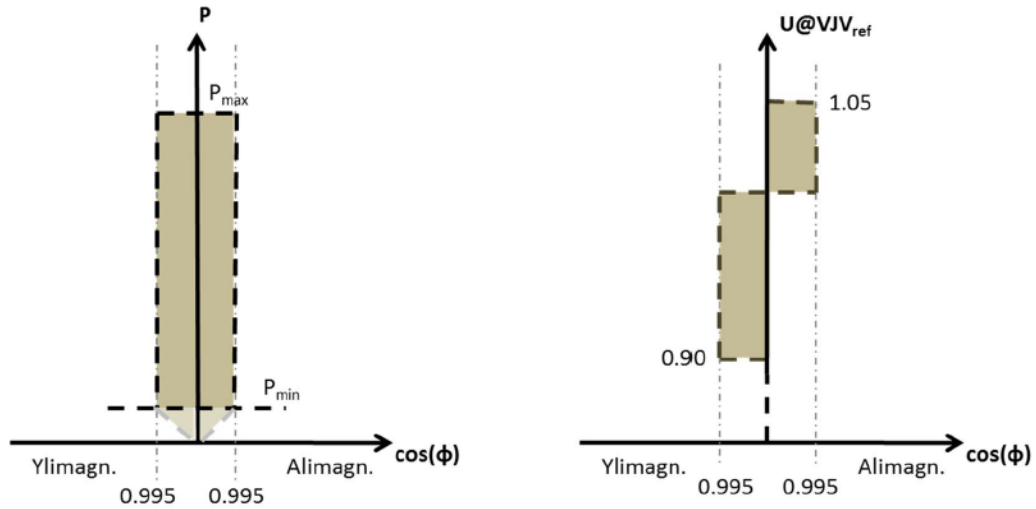
Tuulivoimalaitokset jaetaan vaatimuksiltaan kahteen teholuokkaan, yli ja alle 10MVA:a. Kokoluokassa $>10\text{MVA}$, on referenssipisteessä kyettävä toimimaan seuraavien vaatimusten mukaisesti. Tuulipuiston pättöteholle on voitava asettaa yläraja ja sitä on kyettävä muuttamaan kauko-ohjauksella. Tuotannon nostonopeutta on pystyttävä rajoittamaan, ainakin 10% nimellistehosta minuutissa. Pätötehoa on pystyttävä säätämään alaspäin 5 sekunnissa 100%:sta 20%:iin. Voimalaitoksen katkaisijan avausta ei voida käyttää tämän vaatimuksen täyttämiseen. /13/

8.3. Loistehokapasiteetti

Tuulivoimalaitoksessa tulee olla riittävän suuri loistehokapasiteetti. Loistehokapasiteetin tulee olla hyödynnettävissä ilman voimalaitoksen verkosta kytkeytymisen riskiä. Mikäli voimalaitoksessa ei luonnostaan ole kykyä tuottaa loistehokapasiteettia, on se tuotettava erillisellä kompensointilaitteistolla. Voimalaitoksen toimiessa minimituotantotehonsa alapuolella, sillä ei ole velvoitetta säätää jännitettä tai loistehoa. /13/

Kokoluokassa 0,5-10MVA tuuligeneraattorin tulee kyetä toimimaan kuvan 38 toiminta-alueella:

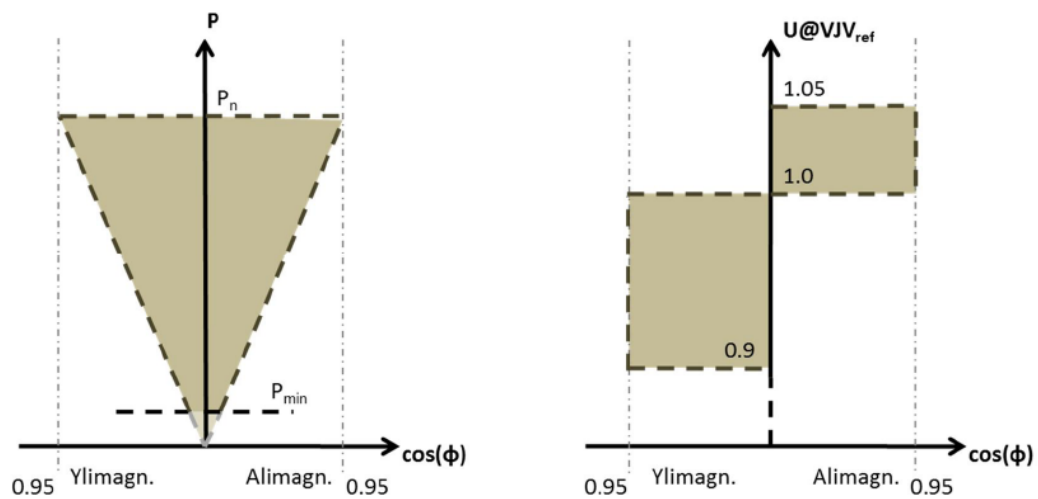
- 0,995ind, kun verkkojännite on alueella 90-100%
- 0,995kap, kun verkkojännite on alueella 100-105%. /6/



Kuva 38 Kokoluokan 0,5-10MVA vaadittava loistehokapasiteetti. /13/

Kokoluokassa 0,5-10MVA tuuligeneraattorin tulee kyetä toimimaan kuvan 39 toiminta-alueella:

- 0,95ind, kun verkkojännite on alueella 90-100%
- 0,95kap, kun verkkojännite on alueella 100-105%. /6/



Kuva 39 Kokoluokan yli 10MVA vaadittava loistehokapasiteetti. /13/

8.4. Loistehon ja jännitteensäätö

Tuulivoimalaitoksella on oltava VJV- referenssipisteessä automaattinen loistehon- ja jännitteensäätö, jolla ohjataan verkkoon syötettävää ja siitä otettavaa loistehoa. Säädön tulee olla toteutettu niin että, sitä voidaan ohjata portaattomasti. Tuulivoimalan ollessa minimiteholla sillä ei ole velvoitetta säätää jännitettä tai loistehoa. /13/

Voimalaitoksessa on käytettävä vakiojännitteensäätöä, jotta loisteho reservit tukisivat voimalaitoksen ja verkon vikojen aikana järjestelmän jännitettä. Säädön tulee toimia siten, että muutoksesta ei aiheudu merkittäviä äkillisiä muutoksia tai toistuvia heilahteluja laitoksen tehon tuotannossa. /13/

Kokoluokassa 0,5-10MVA pitää olla jommankumman loistehon säätöön liittyvistä toiminnallisuuksista:

- vakioloistehonsäätö
- vakiotehokerroinsäätö. /13/

Säätötoimintojen tulee varmistaa, kun loistehon tavoitearvo on 0kVar se ei saa heilahdella tavoitearvon ympärillä 5% enempää ja hetkellisesti yli 10%. (eli $\Delta Q = \pm 0.025/0.05 \cdot S_N$) Säädön toiminta varmistetaan toimintakokeilla käyttöönoton yhteydessä. /13/

Kokoluokassa yli 10MVA tulee olla loistehon- ja jännitesäätö seuraavilla toiminnallisuuksilla:

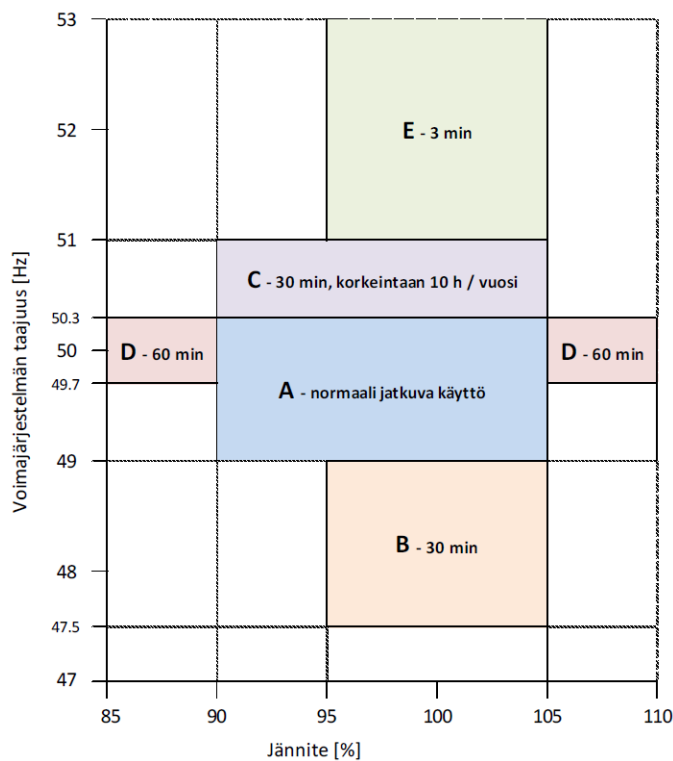
- vakioloistehosäätö
- vakiotehokerroinsäätö
- vakiojännitesäätö. /13/

Teholtaan yli 10MVA voimalaitoksissa tulee käyttää vakiojännitesäätöä, jotta loistehoreservit olisivat voimalaitoksen ja verkon vikojen aikana tukemassa järjestelmän jännitettä. Liityttäessä muuntajan kautta 400kV kantaverkkoon, generaattorin tuotanto- ja sisäänottokyky verkossa ollessa, tulee varata koko loistehoreservi lukuun ottamatta

muuntajan ja omakäytön tarvitsemaa loisteho tarvetta. Muissa yli 10MVA generaattoreissa loistehoreserviksi pitää varata puolet generaattorin loistehokapasiteetista mitattuna generaattorijännitetasolla. Loistehon tuotantokyky lasketaan nimellisteholla ja nimellisjännitteellä. Jos generaattorin $\cos\phi < 0,9$ ind, loissähkön tuotantokyky lasketaan $\cos\phi = 0,9$ mukaan. /15/

8.5. Mitoitusjännite ja -taajuus

Tuulivoimalaitoksen on pystyttävä toimimaan kuvan 40 määräämällä toiminta-alueella.



Kuva 40_Tuulivoimalan poikkeavat toiminta-alueet./13/

Kuvan 40 poikkeavien toiminta-alueiden selitykset.

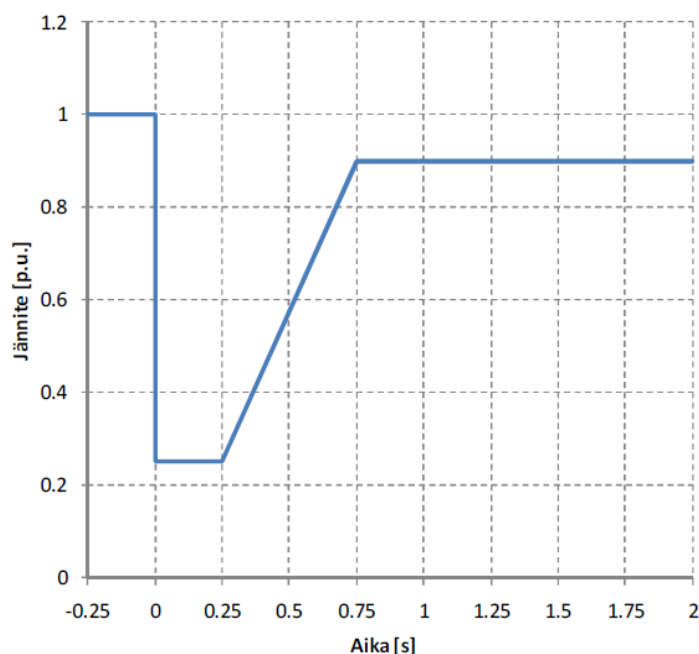
- A: Normaali jatkuva käyttö. Voimajärjestelmän jännitteestä ja/tai taajuudesta johtuvaa pätötehon tai loistehon tuotantokyvyn alentumista ei sallita
- B: 30 minuutin yhtäjaksoinen käyttö. Tehonalenema sallittu siten, että suurin sallittu alenema 49 Hz :n tasolla on 0% ja 47,5 Hz:n tasolla 15%.

- C: 30 minuutin yhtäjaksoinen käyttö yhteensä korkeintaan 10 tunnin ajan vuosittain. 10% tehonalenema sallitaan.
- D: 60 minuutin yhtäjaksoinen käyttö. Tehon sallitaan alenevan enentään 10% täydestä tehosta.
- E: 3 minuutin yhtäjaksoinen käyttö. Voimakas tehonalenema sallittu.

8.6. Käyttöominaisuudet verkkohäiriöiden yhteydessä

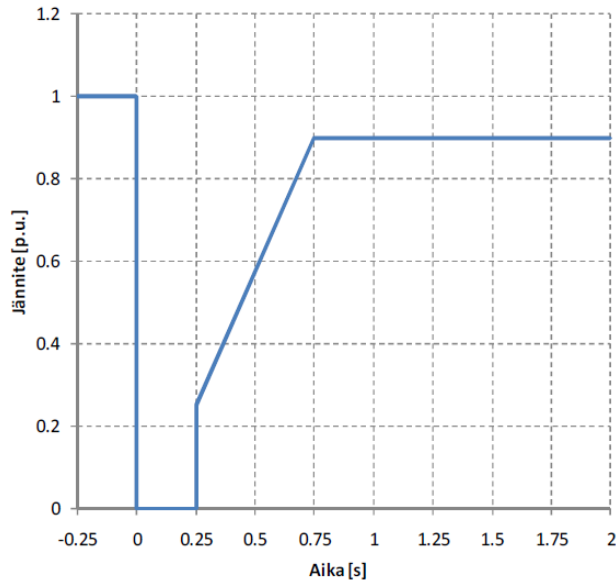
Tuuliturbiinigeneraattorin tulee pystyä jatkamaan tuotantoa verkkohäiriöistä huolimatta. Voimalaitos ei saa kytkeytyä irti viiveettä verkosta alijännitereleen toiminnan seurauksena, vaan sen on jatkettava teknologian sallimissa puitteissa. Voimalaitoksen tulee palata vikaa edeltävälle tasolle mahdollisimman nopeasti verkkovian jälkeen. /13/

Kokoluokassa 0,5-10MVA tuulivoimalaitoksen tulee pystyä jatkamaan toimintaansa, verkon matalimman jännitteen pysyessä kuvan 41 jännitteen tasolla tai sen yläpuolella.



Kuva 41 VJV-referenssipisteessä oleva jännitekuoppa, jonka aikana ja sen jälkeen voimalan tulee pystyä jatkamaan tuotantoa normaalisti./13/

Kokoluokassa $>10\text{MVA}$ tuulivoimalaitoksen tulee pystyä jatkaa toimintaansa, verkon matalimman jännitteen pysyessä kuvan 42 jännitteen tasolla tai sen yläpuolella./13/



Kuva 42 VJV-referenssipisteessä oleva jännitekuoppa, jonka aikana ja sen jälkeen voimalan tulee pystyä jatkamaan tuotantoa normaalisti./13/

9. PUISTON KUORMITUS-, MAA- JA OIKOSULKULASKENTA

9.1. Kuormitusvirran lasku ja kaapeleiden valinta

Taajuusmuuttaja on määritelty uusien liittymisvaatimusten perusteella tuottamaan referenssipisteeseen tietyn määrän loisivirtaa ja on arvioitu nimellisvirraltaan 3400A:n (I_s) suuruiseksi. Taajuusmuuttajan kasvaneen virrantuoton myötä myös aikaisemmin käytössä ollut muuntaja korvataan uudella isommalla muuntajalla. Periaatteessa voimalassa kestäisi pienempikin muuntaja, mutta tässä työssä se mitoitettiin tarkoituksella isoksi, mikäli asiakas haluaa käyttää puistoa verkoston kompensointiin, niin se on mahdollista.

Puiston 20kV kaapelointi mitoitetaan siirtämään referenssipisteeseen koko taajuusmuuttajan tuottama virta (I_s). Periaatteessa keskijännitekaapeloinnilla ei tarvitsisi siirtää voimalan muuntajan tarvitsemaa magnetoimisvirtaa, mikä on noin 10A, koska kaapelit mitoitetaan joka tapauksessa hivenen reiluksi, niin tätä ei tarvitse huomioida. Tämä on perusteltua jo pelkästään häviöitä ja jännitteen alenemaa ajatellen. Voimalan kuormitusvirta redusoidaan 21kV puolelle kaavalla 8.

$$I_2' = \left(\frac{0,69}{21} \right) * 3400A$$

$$I_{kuormitus} = 111,7A$$

Johtolähtö 1:llä on kolme voimalaa, eli kuormitus johtolähdöllä on 335A. Johtolähdöllä 2 ja 3 kaapelointi on mitoitettu kestäämään kuormitus, käytettiinpä kumpaa johtolähtöä tahansa. Kaapelina käytetään AHXAMK-W kaapelia ja taulukon 8 poikkipinta-alaa. Kaapelin ominaisuudet löytyvät liitteestä 1 ja puistokaapelointi johtolähdössä ja voimaloiden välillä taulukosta 8.

Taulukko 8 Puiston 20kV kaapelit

Johtolähtö 1	WT3	WT2	WT1	
	3*240	3*120	3*120	
Johtolähtö 2	WT3	WT10	WT13	
	2*3*240	2*3*185	2*3*120	
Johtolähtö 3	WT8	WT9	WT12	
	2*3*240	2*3*185	2*3*120	
Johtolähtö 4	WT4	WT7	WT11	WT14
	2*3*120	3*240	3*120	3*120
Johtolähtö 5	WT5	WT1	WT2	WT6
	2*3*120	3*120	3*120	3*120
Johtolähtö 6	WT15	WT16		
	3*120	3*120		

9.1.1. Impedanssit

Taustaverkon oikosulkuimpedanssi lasketaan kaavalla 12, redusoidaan kaavalla 9 sekä jännitekerroin valitaan taulukon 1 mukaan.

Taustaverkko

$$Z_{k \max} = \frac{1,1 * 115kV^2}{587kVA} \times \left(\frac{21}{115} \right)^2$$

$$Z_{k \max} = 0,826\Omega$$

$$Z_{k \min} = \frac{1,0 * 115kV^2}{209kVA} \times \left(\frac{21}{115} \right)^2$$

$$Z_{k \min} = 2,11 \Omega$$

Päämuuntajan (115/21) impedanssi lasketaan suoraan 21kV jännitetasoon kaavalla 3.

zk	10	%
Sn	30000	kVA
Pk	140	kW

$$Z_{T1} = 10\% \frac{21kV^2}{30MVA}$$

$$Z_{T1} = 1,47 \Omega$$

Voimalan muuntajan (21/0,69) impedanssit lasketaan kaavalla 3 sekä redusoidaan voimalan jännitetasoon kaavalla 9.

Zk	8	%
Sn	4100	kVA
Pk	50	kW

$$Z_{T2} = 8\% \frac{0,69kV^2}{4100kVA} \times \left(\frac{0,69}{21} \right)^2$$

$$Z_{T2} = 0,0093 \Omega$$

Alla olevissa taulukossa 9-12 on kaapeleiden resistanssit ja reaktanssit. Kaapeleiden ominaisuudet löytyvät liitteestä 1.

Taulukko 9 Muuntajanäljännitekisko - MV-kisto

Johdin1		Rv	Xv	Zj1
2*AHXAMK-W 3*300		0,0575 Ω/km	0,0565 Ω/km	
Pituus(km)	0,0044	0,000253 Ω	0,000249 Ω	0,00035Ω

Taulukko 10 Mv-kiskosto–WT3

Johdin 2		Rv	Xv	Zj2
AHXAMK-W 3*240		0,14 Ω/km	0,116 Ω/km	
Pituus(km)	3,34	0,468Ω	0,387Ω	0,607Ω

Taulukko 11 Voimalan WT3–WT2 välinen kaapeli

Johdin 3		Rv	Xv	Zj3
AHXAMK-W 3*120		0,277Ω/km	0,129 Ω/km	
pituus(km)	1,215	0,337Ω	0,157Ω	0,372Ω

Taulukko 12 Voimalan WT2-WT1 välinen kaapeli

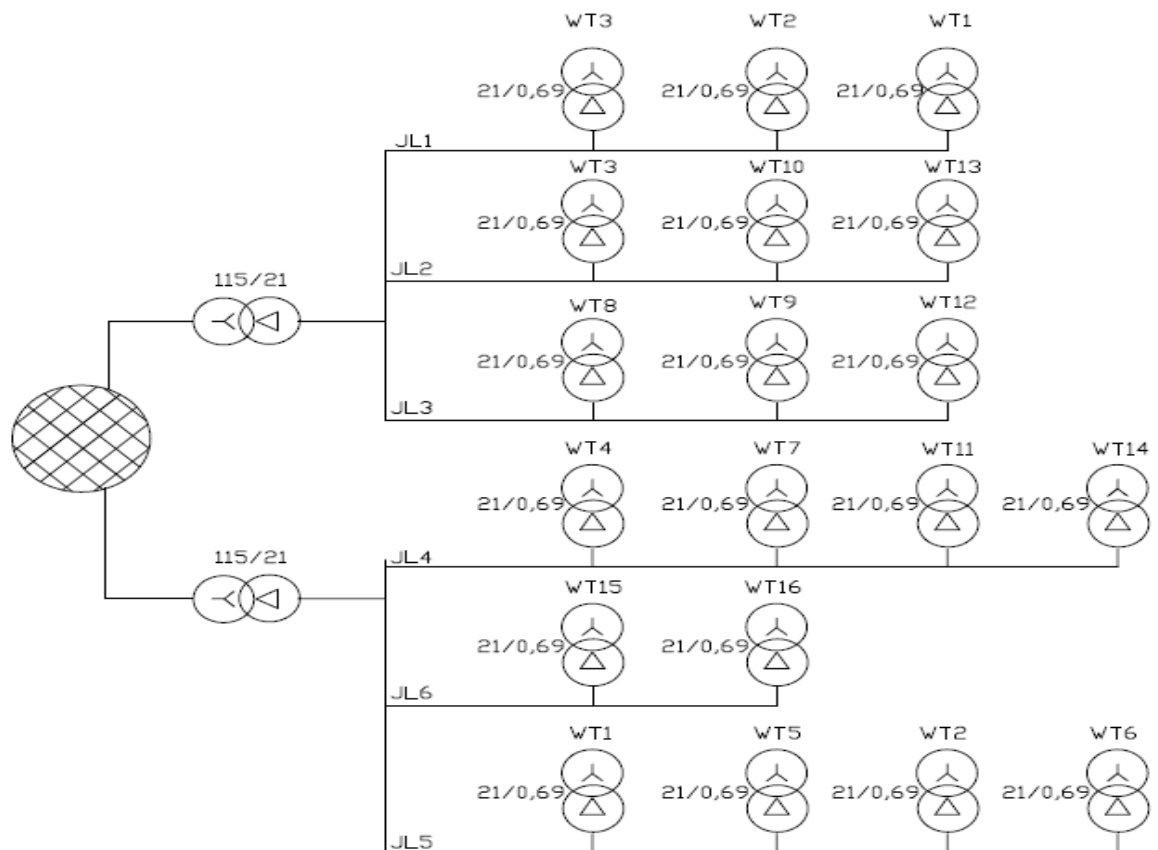
Johdin 4		Rv	Xv	Zj4
AHXAMK-W 3*120		0,277 Ω/km	0,129 Ω/km	
pituus(km)	0,87	0,24099 Ω	0,11223 Ω	0,266Ω

9.2. 3- ja 2-vaiheinen oikosulku

Laskennoissa käytettiin kolmea erilaista puiston kytkentämallia. Kyt kentät ilanteista riippuen taustaverkon oikosulkuteho vaihtelee välillä 587-209kVA:a. Johtolähtö 2 ja 3:n välille on rakennettu varayhteys, jota voidaan tarvittaessa käyttää esimerkiksi kaapelirikkojen aikana. Liitteestä 7 löytyy puiston pääkaavio.

9.2.1. Kyt kentät ilanne1.

Laskuesimerkissä on 1. johtolähtö, sekä ensimmäinen kytkentävaihtoehto, joista on laskettu suurimman ja pienimmät mahdolliset oikosulkuvirrat sekä maasulkuun liittyvät maasulkuvirta- sekä maasulkujännitelaskut. Tässä kytkentät ilanteessa kiskokytkin on auki, joten molemmat muuntajat syöttävät omaa mv-kiskostoa. Oikosulku- ja maasulkulaskentaesimerkit löytyvät liitteistä 8 ja 9. Muiden johtolähtöjen osalta tulokset on taulukoitu. Kuvassa 43 on ensimmäinen kytkentät ilanne.



Kuva 43 Ensimmäinen kytkentätilanne

9.2.2. Oikosulkuvirrat

Alla on laskettu 3- ja 2-vaiheiset oikosulkuvirrat päämuuntajan alajännitekiskossa, johtolähdön eri voimaloissa sekä voimalan muuntajan alajännitekiskossa lasketaan kaavoilla 10 ja 12. Jännitekerroin saadaan taulukosta 1. Esimerkkilaskut löytyvät liitteestä 8.

Taulukko 13 Ensimmäisen kytkentätilanteen oikosulkuvirrat johtolähdöllä 1

	MV-kisko	W3	W2	W1
3-v	5,8kA	4,6kA	4,1kA	3,8kA
2-v	2,9kA	2,5kA	2,3kA	2,2kA
Voimala				
3-v		35,3kA	34,2kA	33,4kA
2-v		25,0kA	24,3kA	23,8kA

Taulukko 14 Ensimmäisen kytkentätilanteen oikosulkuvirrat johtolähdöllä 2

	W3	W10	W13
3-v	5,2kA	5,1kA	4,9kA
2-v	2,7kA	2,7kA	2,6kA
Voimala			
3-v	36,4kA	36,2kA	35,9kA
2-v	25,7kA	25,5kA	25,4kA

Taulukko 15 Ensimmäisen kytkentätilanteen oikosulkuvirrat johtolähdöllä 3

	W8	W9	W12
3-v	5,4kA	5,3kA	5,0kA
2-v	2,8kA	2,7kA	2,7kA
Voimala			
3-v	36,7kA	36,4kA	36,1kA
2-v	25,9kA	25,7kA	25,5kA

Taulukko 16 Ensimmäisen kytkentätilanteen oikosulkuvirrat johtolähdöllä 4

	W4	W7	W11	W14
3-v	5,65kA	5,32kA	4,93kA	4,63kA
2-v	2,72kA	2,62kA	2,50kA	2,40kA
Voimala				
3-v	37,01kA	36,53kA	35,90kA	35,34kA
2-v	25,64kA	25,35kA	24,96kA	24,62kA

Taulukko 17 Ensimmäisen kytkentätilanteen oikosulkuvirrat johtolähdöllä 6

	W5	W1	W2	W6
3-v	5,40kA	5,43kA	4,86kA	4,75kA
2-v	2,65kA	2,66kA	2,48kA	2,44kA
Voimala				
3-v	36,65kA	36,70kA	35,76kA	35,57kA
2-v	29,36kA	29,39kA	28,73kA	28,59kA

Taulukko 18 Ensimmäisen kytkentätilanteen oikosulkuvirrat johtolähdöllä 5

	W15	W16
3-v	4,87kA	4,61kA
2-v	2,48kA	2,39kA
Voimala		
3-v	35,78kA	35,29kA
2-v	24,89kA	25,64kA

9.2.3. Maasulkuvirrat

Kaapeleiden ominaisuudet löytyvät liitteestä 1. Johtojen aiheuttamat maakapasitanssit on määritetty taulukkoon 19-23. Ensimmäisen johtolähdön kaapeleista maakapasitanssin esimerkkilasku liitteessä 9, muiden johtolähtöjen osalta tulokset on taulukoitu.

9.2.4. Maakapasitanssit

Taulukko19 Johtolähtö1 (Cm1)

MV-kisko-WT3	WT3-WT2	WT2-WT1	Σ
1 μ F	0,28 μ F	0,2 μ F	1,48 μ F

Taulukko 20 Johtolähtö2 (Cm2)

MV-kisko-WT3	WT3-WT10	WT10-WT13	Σ
1,64 μ F	0,36 μ F	0,28 μ F	2,28 μ F

Taulukko 21 Johtolähtö3 (Cm3)

MV-kisko-WT8	WT8-WT9	WT9-WT12	Σ
1 μ F	0,4 μ F	0,41 μ F	1,81 μ F

Taulukko 22 Johtolähtö4 (Cm4)

MV-kisko-WT4	WT4-WT7	WT7-WT11	WT11-WT14	Σ
0,2 μ F	0,24 μ F	0,15 μ F	0,13	0,72 μ F

Taulukko 23 Johtolähtö5 (Cm5)

MV-kisko-WT15	WT15-WT16	Σ
0,33 μ F	0,12 μ F	0,45 μ F

Taulukko 24 Johtolähtö6 (Cm6)

MV-kisko-WT1	WT5	WT2	WT6	Σ
0,18 μ F+0,076 μ F	0,34 μ F	0,2+0,086 μ F	0,1 μ F	0,98 μ F

Maasulkusuoja kiskostossa ”näkee” oman kiskoston johtolähtöjen maasulkuvirran. Maasulkuvirta kiskosuojassa lasketaan kaavalla 14 sekä maasulkujännite kaavalla 15. Tulokset ovat taulukoissa 25 ja 26. Vikaresistansseina (R_f) on käytetty 0 Ω , 200 Ω , 500 Ω , 1000 Ω , 2000 Ω ja 5000 Ω . Laskenta esimerkit löytyvät liitteestä 9.

Taulukossa 25 Kiskosuojan maasulkuvirrat vikaresistansseilla

le0	le200	le500	le1000	le2000	le5000
63,65A	43,90A	22,66A	11,91A	6,03A	2,42A

Taulukossa 26 Kiskosuojan maasulkujännitteet vikaresistansseilla

U0	U0200	U0500	U01000	U02000	U50000
12124,19V	8361,96V	4316,50V	2268,78V	1149,59V	461,58V

Maasulkuvirrat sekä maasulkujännitteet 1.johtolähdön osalta lasketaan kaavoilla 14 ja 15. Johtolähtö suojataan suunnatulla suojalla, joten se asetellaan näkemään vain omassa lähdössä tapahtuva maasulku. Tulokset ovat taulukoissa 27 ja 28. Vikaresistansseina on käytetty 0 Ω , 200 Ω , 500 Ω , 1000 Ω , 2000 Ω ja 5000 Ω

Taulukossa 27 Ensimmäisen johtolähdön maasulkuvirrat vikaresistansseilla

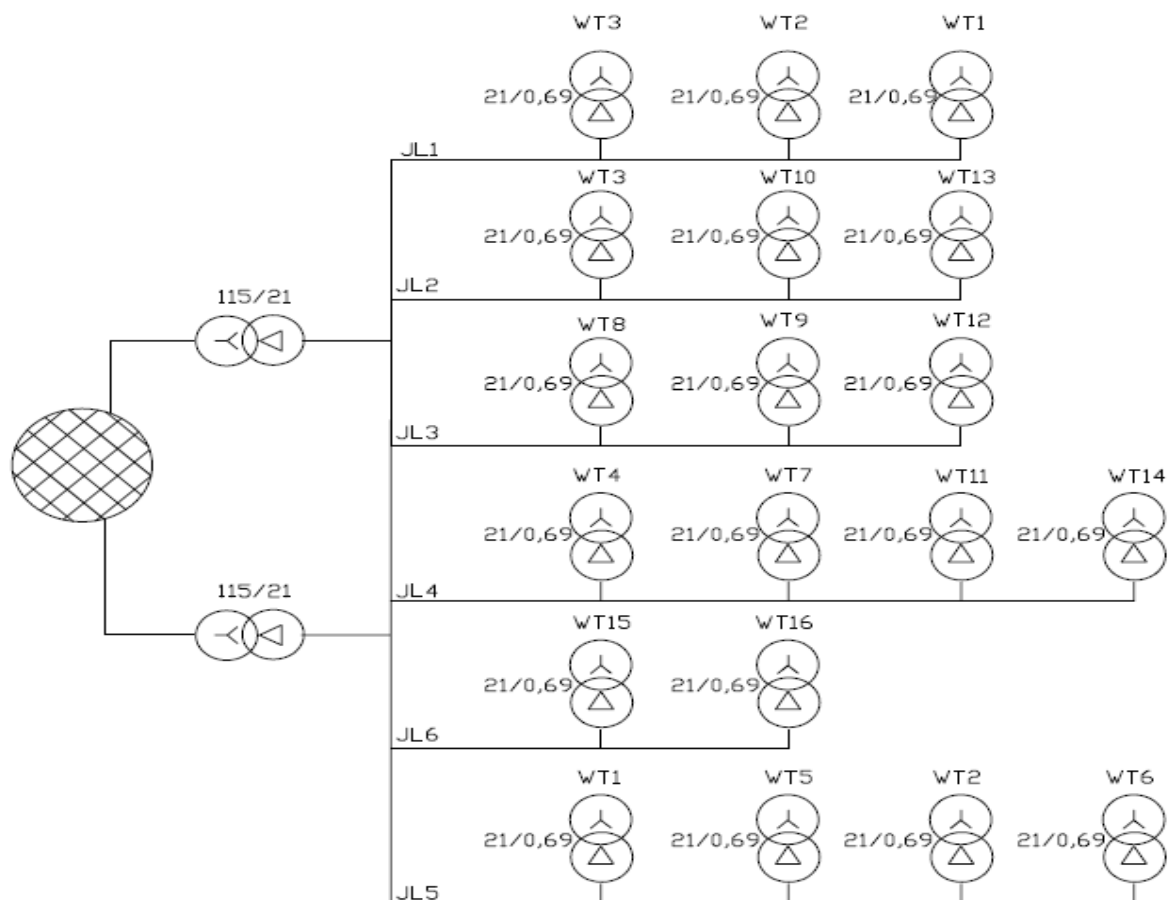
le0	le200	le500	le1000	le2000	le5000
46,74A	37,01A	21,52A	11,74A	6,01A	2,42A

Taulukossa 28 Ensimmäisen johtolähdön maasulkujännitteet vikaresistansseilla

U0	U0200	U0500	U01000	U02000	U50000
12124,27V	9602,09V	5583,80V	3044,54V	1559,59V	628,22V

9.3. Kytchentätilanne 2

Toisessa kytkentävaihtoehdossa kiskokytkin on kiinni, joten muuntajat ovat käytössä rinnan. Päämuuntajat ovat identtisiä, joten niiden muodostamat impedanssit ovat likimain yhtä suuret, joten niiden yhteinen impedanssi rinnankytkettynä on noin puolet yhden muuntajan impedanssista. Johtolähtöjen maasulkuvirrat pysyvät samalla tasolla, mutta molempien kiskosuojien maasulkusuoja näkee koko verkon maasulun. Liitteessä 7 on puiston pääkaavio. Kuvassa 44 on kuva toisesta kytkentätilanteesta.



Kuva 44 Toinen kytkentätilanne.

9.3.1. Oikosulkuvirrat

Taulukoissa 29-31 MV-kiskoston- sekä voimalan ylä- ja alajännitekiskon 3- ja 2-vaiheiset vikavirrat.

Taulukko 29 Johtolähdön 1 ja 2 oikosulkuvirrat.

	Kiskosto	WT3	WT2	WT1	WT3	WT10	WT13
3-v	8,17kA	5,94kA	5,10kA	4,63kA	7,07kA	6,79kA	6,53kA
2-v	3,22kA	2,71kA	2,71kA	2,32kA	2,43kA	2,92kA	2,86kA
Voimala							
3-v		38,66kA	37,72kA	37,02kA	38,99kA	38,61kA	38,27kA
2-v		26,42kA	25,94kA	25,59kA	26,60kA	26,39kA	26,21kA

Taulukko 30 Johtolähdön 3 ja 4 oikosulkuvirrat

	W8	W9	W12	W4	W7	W11	W14
3-v	7,44kA	7,11kA	6,69kA	7,83kA	7,22kA	6,52kA	6,00kA
2-v	3,07kA	2,99kA	2,89kA	3,15kA	3,02kA	2,85kA	2,72kA
Voimala							
3-v	39,56kA	39,14kA	38,64kA	40,24kA	39,82kA	39,47kA	39,05kA
2-v	26,91kA	26,68kA	26,41kA	27,28kA	27,05kA	26,86kA	26,64kA

Taulukko 31 Johtolähdön 5 ja 6 oikosulkuvirrat

	W15	W16	W5	W1	W2	W6
3-v	6,41kA	5,96kA	7,83kA	7,48kA	7,27kA	7,34kA
2-v	2,83kA	2,71kA	3,15kA	3,07kA	3,03kA	3,04kA
Voimala						
3-v	39,70kA	39,42kA	40,08kA	39,48kA	38,82kA	37,86kA
2-v	26,98kA	26,83kA	27,19kA	26,86kA	26,52kA	26,14kA

9.3.2. Maasulkuvirrat

Taulukoissa 32 ja 33 kiskosuojan näkemä maasulkuvirta sekä –jännite.

Taulukko 32 Kiskosuojan maasulkuvirrat vikaresistansseilla

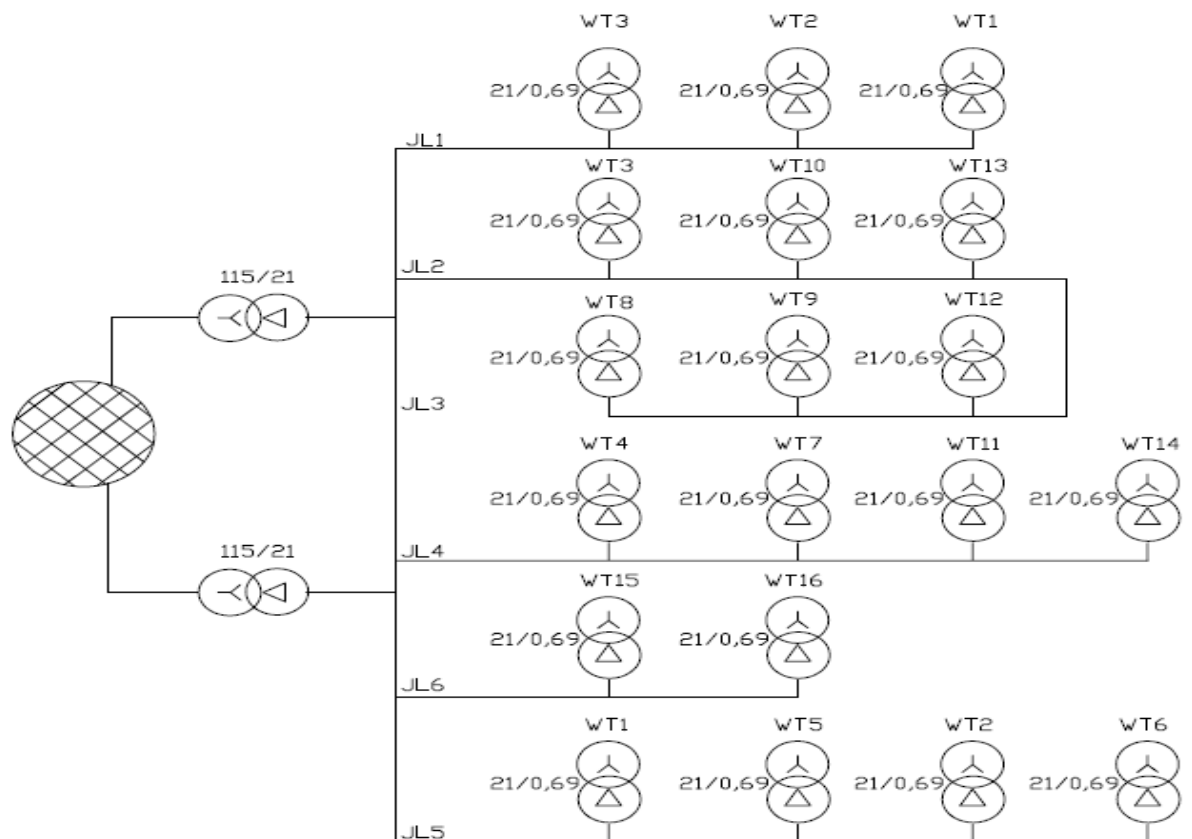
Ie0	Ie200	Ie500	Ie1000	Ie2000	Ie5000
88,21A	49,96A	23,38A	12,01A	6,05A	2,42A

Taulukossa 33 Kiskosuojan maasulkujännitteet vikaresistansseilla

U0	U0200	U0500	U01000	U02000	U50000
12124,03V	6866,74V	3213,54V	1650,85V	831,22V	333,15V

9.4. KytKentättilanne 3

Kolmannessa kytKentävaihtoehdossa käytetään muuntajia rinnan. Oikosulkuvirrat MV-kiskostossa pysyvät samana. Johtolähdöllä 3 oletetaan olevan vika ensimmäisessä johtovälissä ja varayhteys otetaan käyttöön. Johtolähdön 2 releelle määritetään tausta asetukset, eli toiset asetukset, jotka voidaan releen huoltoväylän kautta asetella päälle. Maasulkuvirrat pysyvät johtolähdöissä sekä kiskosuojassa samana johtolähtöä 2 lukuun ottamatta. Taulukossa 34 on voimaloiden 3- ja 2-vaiheiset vikavirrat. Johtolähdön 2 näkemä maasulkuvirta sekä maasulkujännite ovat taulukoissa 35 ja 36. Kuvassa 45 on kolmas kytKentättilanne.



Kuva 45. Kolmas kytKentättilanne.

9.4.1. Oikosulkuvirrat

Taulukko 34 Voimaloiden ylä- ja alajännitekiskon 3- ja 2-vaiheiset vikavirrat johtolähdöllä 2

	W3	W10	W13	WT12	WT9	WT8
3-v	6,42kA	6,19kA	5,87kA	5,55kA	5,18kA	5,02kA
2-v	2,94kA	2,88kA	2,79kA	2,69kA	2,58kA	2,53kA
Voimala						
3-v	37,99kA	37,72kA	37,32kA	36,87kA	36,31kA	36,04kA
2-v	26,24kA	26,08kA	25,83kA	25,56kA	25,22kA	25,05kA

9.4.2. Maasulkuvirrat

Taulukko 35 Maasulkuvirrat johtolähdöllä 2

le0	le200	le500	le1000	le2000	le5000
41,48A	34,23A	20,93A	11,64A	6,00A	2,42A

Taulukko 36 Maasulkujännitteet johtolähdöllä 2

U0	U0200	U0500	U01000	U02000	U50000
12124,28	10006,19V	6118,93V	3401,56V	1753,32V	707,57V

10. SUOJAUKSEN TOTEUTUS

Suojaus toteutetaan niin, että se toimii luotettavasti ja nopeasti. Tässä työssä on käsitelty erilaisia kytkentätilanteita ja tässä viimeisessä osiossa yhdelle johtolähdölle määritellään esimerkkiasetukset. Asetukset määriteltiin ylivirtasuojille muuntajan yläjännitepuolella, kiskosuojalle, johtolähdölle sekä voimalan muuntajan yläjännitepuolella olevalle suojalle. Myös maasulkusuojauksen asetukset määriteltiin samoille releille, pois lukien muuntajan yläjännitepuolella olevaa suojaa, koska puisto on kuvitteellinen ja tarvittavia verkostotietoja ei ollut käytettävissä.

Asetuksissa huomioidaan verkoston mahdollinen jälleenkytkentä, eli voimalan asetuksia tullaan hidastamaan, jotta tarvittavat vaatimukset täyttyvät. Taajuuslaukaisun asetukset määritellään kuvan 40 perusteella. Voimalan tulee myös kestää kuvan 41 mukainen jännitekuoppa, ja mikäli jälleenkytkentä epäonnistuu, voimalalle varataan turvallista pysäyttämisaikaa 30s.

Puiston suojaus prioriteetti menee niin sanotusti ylhäältä alas, eli jos esimerkiksi kiskosuoja aukeaa, kaikki johtolähdöt aukeavat. Suojauskaaviot ovat liitteessä 2. Voimalaitos sekä suojaukset havaitsevat saarekekäytön verkkojännitteen sekä taajuuden perusteella. Voimalaitos ei saa koskaan syöttää energiaa jännitteettömään verkkoon. Johtolähdöt varustetaan jännitemuuntajilla, joilla varmistetaan kytkeydyttäessä verkkoon, että voimalaitos on samenvaiheinen ja jännitteinen.

Lukitusuojausta tullaan käyttämään selektiivisyyden varmistamiseksi jokaisessa suojausportaassa. Tällä on saatu releille mahdollisimman pienet toiminta-ajat, joka vikatilanteessa pienentää komponenttien termisiä rasituksia.

Virtamuuntajat tarkkuusluokitus valitaan käyttötarkoituksen mukaan. Esimerkiksi liittymäpisteessä olevalle energiamittaukselle valitaan erittäin tarkka 0,2S luokka. Suojaustarkoitukseen tuleville virtamuuntajille valitaan luokka 5P. Suojausvirtamuuntajissa ilmoitetaan vielä tarkkuuskerroin, joka ilmaisee kuinka

monenkertaisena se kykenee toistamaan nimellisvirran. Ensiövirran arvo valitaan nimellisvirran perusteella ja toisiovirran arvo releen ominaisuuksien perusteella.

10.1. Muuntajansuojaus

Muuntajan suojaustaso vaihtelee suojattavan muuntajan koon mukaan. Suuret ja samalla myös kalliit muuntajat suojataan tarkimmin. Suojauksiin käytetään releiden lisäksi suoja, jotka seuraavat muuntajaöljyn kaasuuntumista tai käämin lämpötilaa. Vian seurauksena öljy kaasuuntuu ja kerääntyy kaasureleeseen. Pienestä kaasun määrästä tulee hälytys ja suuresta määrästä laukaisu. /7/

Käämikytkimen suojalaitteena voidaan käyttää öljytilan paisuntaputkeen asennettavasta virtausreleestä. Muuntaja kytketään irti verkosta jos käämikytkimellä syttyy valokaari, joka aiheuttaa öljyn paineen nousun ja virtauksen kohti paisuntasäiliötä. /7/

Käämin lämpötilaa mitataan käämin ympärillä olevan öljyn lämpötilalla. Käämin lämpötilaa matkitaan syöttämällä virtalähteellä virtaa lämmitysvastukseen, jota verrataan käämissä kulkevaan virtaan. Nykyaikaisissa muuntajissa lämpötilaa voidaan seurata optisella valokuidulla. Öljyn lämpötilaa seurataan myös muualta öljytilasta paikallisten kuumenemisien löytämiseksi. Differentiaalirele on muuntajan yleisin pääsuojarele. /7/

Muuntajan varasuojana käytetään ylivirtasuojasta, joka suojaa alajännitepuolella olevissa vioissa, kuten esimerkiksi kisko-oikosulku. Maadoitustavasta riippuen toisena varasuoja voidaan käyttää kaksiportaista nollavirtarelettä. /7/

10.1.1. Komponentit

Muuntajille valitaan useita eri virtamuuntajia, osa suojaustarkoitukseen ja osa mittaustarkoitukseen. Ylivirtareleelle tulevat virtamuuntajat yläjännitepuolelle 200/5A ja alajännitepuolelle 1000/5.

Muuntajan varasuojaus toteutetaan kaksiporraisella ylivirtareleellä. Ensimmäinen porras toimii käänteisaikaisena ja nopean portaan laukaisu vakioaikaisena Muuntajan pääsuojana toimii differentiaalirele. Differentiaalisuojauksessa on huomioitava muuntajan tyhjäkäyntivirta, jonka rele näkee käytännössä kokonaan erovirtana. Suoja pyritään asettelemaan niin, että parametreilla nähdään pienikin muuntajavika, mutta erovirta tai muu esimerkiksi kytkentävirtasysäys ei saa aiheuttaa tahatonta suojan toimintaa. Ensiökäämi ottaa verkosta I_0 virran, joka on noin 0,3-2,0 % nimellisvirrasta.

110kV pääkomponentit:

Jännitemuuntajat:

Muuntosuhde

- 110000: $\sqrt{3}$ /110: $\sqrt{3}$ /110: $\sqrt{3}$ /110/3V, 50VA, lk0,2 ja 50VA, 3P

Virtamuuntajat:

- 200/5A, 10VA, lk 0,2S (tehonmittaus)
- 2* 10VA, 5P30 (suojaus, I> ja dif)

21kV pääkomponentit:

Jännitemuuntaja:

- 20/01kV 3P 50VA (saarekekäytön esto)

Virtamuuntajat:

- 1000/5A 10VA, 5P30 (suojaus, dif)

10.1.2. Suojasetukset

Ylivirtasuojaus

- I> Käänteisaikainen, 1000A, extremely inverse: alpha 2, kerroin 80, käyrästä 0,05
- II> 2500A, 0,4s

Laukaisun viivästys kiskosuojalta.

Katso kuva 43 selektiivisyyskäyrästä.

10.2. Kiskosuojaus

Muuntajan ohella kiskon suojauksella on tuotannon kannalta suurin taloudellinen merkitys. Mikäli suoja toimii tahattomasti, tuotannolliset tappiot ovat aina kalliita. Suojaus täytyy rakentaa hyvin, mutta silti turvallisuusnäkökohdat huomioiden. Kiskostossa itsessään ilmenevät viat, suuresta oikosulkuvirrasta riippuen, ovat aina massiiviset, joten vika on katkaistava nopeasti. Kisko suojataan nopealla ylivirtasuojauksella ja varasuojana käytetään maasulkujännitettä. Maasulkujännite on käsitelty luvussa 10.5, maasulkusuojaus.

Johtolähtöjen ylivirtasuojaus on toteutettu kaksiportaisena, joista ensimmäinen porras käänteisaikaisena sekä toinen porras vakioaikaisena. Kiskosuojan toiminta estetään lukituksella, mikäli jokin johtolähdöistä havahtuu. Tällä estetään kiskosuojan turha toiminta ja varmistetaan suojauksen selektiivisyys.

10.2.1. Komponentit

Virtamuuntajat:

- 1000/5A 10VA, 5P10

Jännitemuuntajat:

- 20/01kV 3P 50VA (saarekekäytön esto)
- 24000/ $\sqrt{3}$:100/ $\sqrt{3}$:100/3 lk 1 (mittauskenttä)

10.2.2. Suojausasetukset

I> Käänteisaikainen, 950A, very inverse: kerroin 13,5, käyrästä 0,05

II> 2500A, 0,3s

Laukaisun viivästys johtolähdöiltä.

Katso kuva 43 selektiivisyyskäyrästä.

10.3. Johtolähtösuojaus

Johtolähtöä suojataan verkostossa esiintyviä vikoja vastaan, esimerkiksi oiko- ja maasulku. Yleensä johtoja ei suojata ylikuormituksen kannalta, koska kaapelit ovat yleensä lämpenemisen suhteen ylimitoitettuja ja kuormituskojeiden ylikuormitus tavallisesti suojaa myös johdinta. Oikosulun kannalta käytetään yleisesti ylivirta-, distanssi tai differentiaalirelettä. Maasulkuja ylivirtasuojauksella ei voi tavallisesti suojata, koska maasulkuvirrat ovat yleensä pieniä ja oikosulkusuoja ei korkeamman kuormitusvirran vuoksi erota niitä. /9/

Jälleenkytkentäautomaatiikalla on suuri merkitys valokaarivikojen häviämiseen. Sillä voidaan poistaa jopa 60 % vioista. Jälleenkytkennän onnistumisessa on tärkeää, että syöttöpiste on jännitteetön pikajälleenkytkennän jännitteettömänä aikana. /9/

Verkkovian sattuessa täystehotaajuusmuuttajalla varustettu voimalaitos kykenee katkaisemaan tuotannon alle 50ms. Pikajälleenkytkennän jännitteettömänä aikana teho ohjataan jarruvastuksiin ja mikäli verkkojännite palautuu, voimalaitos jatkaa mahdollisimman pian normaalia tuotantoa. Mikäli jälleenkytkentä epäonnistuu ja verkkojännite ei palaudu, voimalaitos ajetaan alas hallitusti. /18/

10.3.1. Komponentit

Virtamuuntajat:

- 500/1A 10VA, 5P10,

Jännitemuuntaja:

- 20/01kV 3P 50VA (saarekekäytön esto)

10.3.2. Suojausasetukset

I> Käänteisaikainen, 560A, very inverse: kerroin 13,5, käyrästä 0,05

II> 1800A, 0,3s

Laukaisun viivästys voimalaitoksen suojauksesta.

Katso kuva 43 selektiivisyyskäyrästä.

10.4. Voimalaitoksen suojaus

Voimalaitoksen suojaus käsittää monta eri suojausta. Tuulivoimalassa on useita eri suojausfunktioita, kuten epäsymmetria, ylivirta, maasulku, alijännite, joista taajuusmuuttajan sisäinen suojaus huolehtii. Taajuusmuuttajan suojauskäyrän arvot näkyvät selektiivisyysvertailukuvassa 46. Tässä työssä vertaillaan tuosta suojauksesta ainoastaan selektiivisyys, muuntajan ja alajännitekaapeleiden, suojaukseen nähden. Suojaus on aseteltava samalla periaatteella kuin ylemmän portaan suojaus, eli jälleenkytkentä ei saa epäonnistua suojan turhalla toiminnalla. Toiminta-aikoihin täytyy asetella viivettä, jotta vaatimusten täyttäminen olisi mahdollista.

Releen asetuksissa huomioidaan myös muuntajan käynnistysvirtasysäys. Rele tunnistaa ja lukitsee ylivirtaportaan, kun sekä 2. harmonisen komponentin osuus perustaajuisesta virrasta ja 80ms aika ylittyy. Lukitussignaali on käytettävissä myös lähtömatriiseissa, eli sillä voi lukita esimerkiksi johtolähdön./28/

Voimalaitoksen releen havahtuminen siirretään johtolähdölle, jota viivästetään ja samalla varmistetaan voimalaitoksen ja johtolähdön selektiivisyys.

10.4.1. Komponentit

Virtamuuntajat:

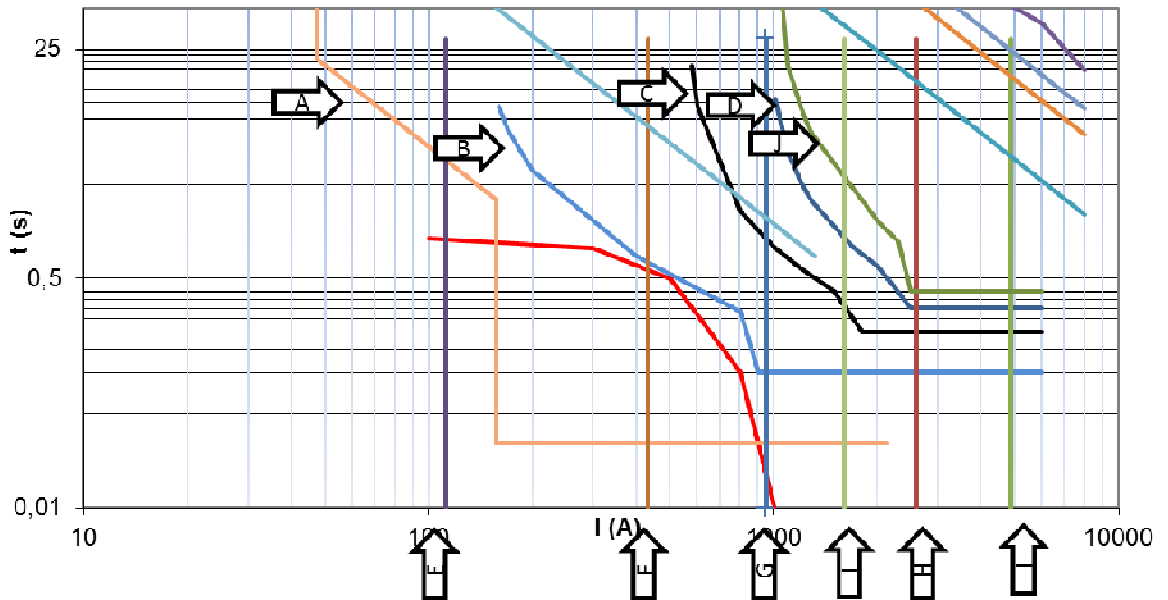
- 150/1 10VA, 5P30

10.4.2. Suojausasetukset

- I> Käänteisaikainen, 140A, very inverse: kerroin 13,5, käyrästä 0,1
- II> 900A, 0,1s

Kuvassa 46 on suojauksen selektiivisyyskäyrästä ja kuvassa 47 selektiivisyyskuvan selitteet. Käyrästä on merkattu suojaukseen vaikuttavat arvot, esimerkiksi 3- ja 2-

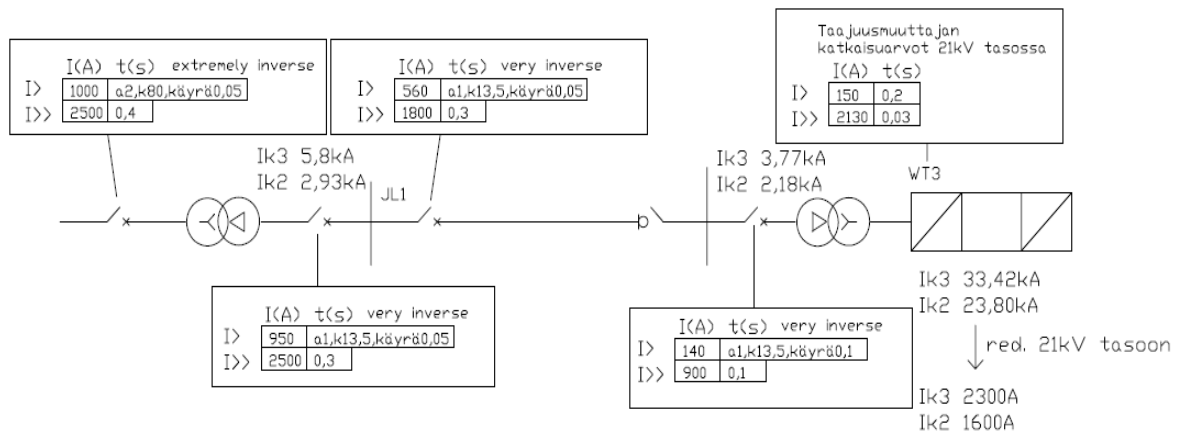
vaiheinen oikosulku sekä kuormitusvirrat. Voimalaitoksen 2-vaiheinen vikavirta on redusoitu kaavalla 8 21kV tasolle.



Kuva 46 Tärkeimpiä suojausarvoja sekä releiden laukaisukäyrät.



Kuva 47 Selektiivisyys vertailukuvan selitteet.

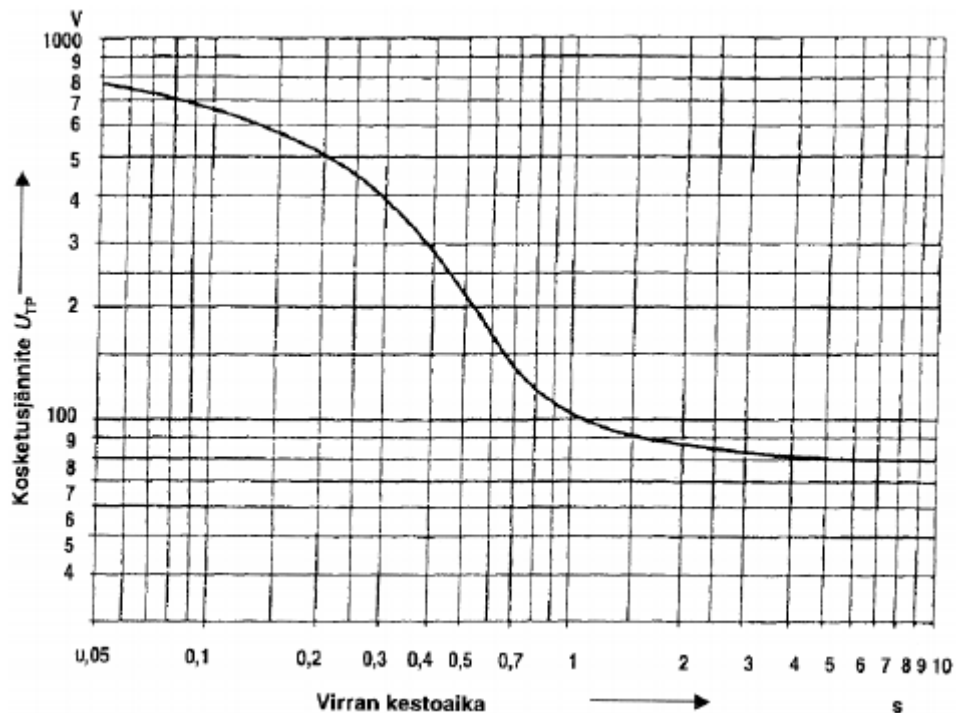


Kuva 48 Oikosulkuvirrat sekä laukaisuajat.

10.5. Maasulkusuojaus

Maasulkusuojaus on toimittava, joko hälyttävästi tai laukaisevana maasulussa, jonka vikaresistanssi on enintään 500Ω. Suositeltavaa on, että suojaus toimii vielä mainitun rajan yli niin suureen vikaresistanssiin, kuin se on teknisesti mahdollista. Maasulussa maadoitusjännite ei saa yli 1000V kytkinlaitoksissa, eikä paikoissa missä liikkuu ihmisiä tai eläimiä, aiheuttaa vaarallisen korkeita kosketusjännitteitä. /3/

Kuvassa 45 sallitut kosketusjännitteen arvot maasulun laukaisuajan suhteen.



Kuva 45 Sallitut kosketusjännitteet virran kestoajan funktiona. /25/

Tuulipuisto toteutetaan nollajännitettä ja nollavirtaa mittaavalla suunnatulla maasulkureleistyksellä. Näin suojaus saadaan selektiiviseksi toisiin johtolähtöihin nähden, koska suuntauksella ”nähdään” vain oman johtolähdön viat. Suojaus perustuu maasulkuvirran kulmamittausperiaatteeseen. Suojaus toteutetaan kaksiportaisena, jolloin alkavasta maasulusta, joka on yleensä suuriresistanssinen, saadaan alemmalle suojausportaalle hälytys. Ylemmänportaan laukaisu tapahtuu virran noustessa lähelle sallittua rajaa. /3/

Maadoituskaapeleita mitoitettaessa on huomioitava SFS 6001 standardin vaatimukset pitkälle maasulkujännitteen laukaisuajalle.

Maasulkusuojaus toteutetaan maasulkuvirran osalta 2-portaisena, josta hidas porras on hälyttävä ja nopea porras laukaisevana. Maasulkusuojauksen, kiskoston sekä muuntajan alajännitepuolen suojaus toteutetaan maasulkujännitteellä. Suojaus laukaisee viimeistään 500Ω vikaresistanssissa. Maadoitusresistanssi aikaisemman kokemuksen perusteella on luokkaa alle 10Ω , joten laskennoissa käytetään tätä arvoa.

10.5.1. Suojausasetukset

Suojausasetus esimerkki lasketaan 1. kytkentämallin mukaan.

Kiskosuojan maasulkusuojan näkemä maasulkuvirta ilman vikaresistanssia on 63,65A, 500Ω vikaresistanssilla 22,66A ja 2000Ω vikaresistanssilla 6A.

I> Vakioaikainen, 6A, hälyttävä

II> Vakioaikainen 20A, 0,6s

Johtolähdön maasulkusuojan näkemä maasulkuvirta ilman vikaresistanssia on 46,7A, 500Ω vikaresistanssilla 21,5A ja 2000Ω vikaresistanssilla 6A.

I> Vakioaikainen, 6A, hälyttävä

II> Vakioaikainen 15A, 0,3s

Sähköasemalla ja voimaloissa käytetään laajaa maadoitusta. Standardissa SFS 6001 maadoitusjännite U_{TP} voi olla kaksinkertainen verrattuna maadoitusjännitteeseen U_E . /25/

I>

$$U_{TP} = \frac{6A * 10\Omega}{2}$$

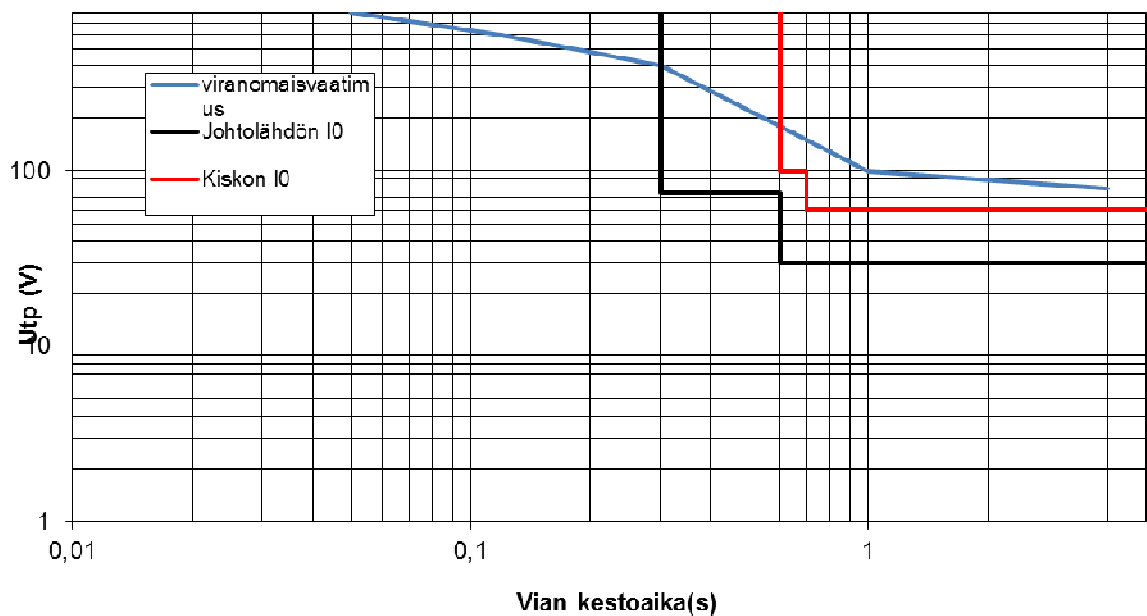
$$U_{TP} = 30V$$

II>

$$U_{TP} = \frac{20A * 10\Omega}{2}$$

$$U_{TP} = 100V$$

Kuvassa 46 on kiskosuojan ja johtolähdön selektiivisyysvertailu.



Kuva 46 Maasulkuvirtasuojauksen selektiivisyysvertailu

Kiskoston varasuojana käytetään nollijännitereleellä. Nollajännite kehitetään avokolmiomuuntajalla, jonka muuntosuhde on $20\text{kV}/\sqrt{3}:100/\sqrt{3}:100/3$. Rele asetellaan tunnistamaan 2000Ω sekä 500Ω vikaresistanssin kautta sattuvat maasulut. Suojaus asetellaan kaksiportaiseksi, joista ensimmäinen hidas porras on hälyttävä ja nopea porras laukaiseva. Maasulkujännite 2000Ω vikaresistanssilla on 1150V ja 500Ω :lla 4316V .

I>

$$U_A = \frac{\sqrt{3} * 100}{21\text{kV}} * 1,150\text{kV}$$

$$U_A = 9,5\text{V}$$

Asettelulle voidaan laittaa mittausepäätarkkuuden ja jännitevaihteluiden vuoksi 10 % varmuusmarginaali.

Releeseen asetellaan laukaisuarvoksi 8 % ja laukaisu hälyttäväksi.

II>

$$U_A = \frac{\sqrt{3} * 100}{21\text{kV}} * 4,326\text{kV}$$

$$U_A = 35,7\text{V}$$

Asettelulle voidaan laittaa mittausepäätarkkuuden ja jännitevaihteluiden vuoksi 10% varmuusmarginaali.

Releeseen asetellaan laukaisuarvoksi 32 % ja laukaisuviiveeksi 1,5s.

10.5.2. Komponentit

Maasulkuvirran mittaus toteutetaan kaapelivirtamuuntajalla, jonka muuntosuhde voi olla pienempi kuin ylivirtasuojauksen virtamuuntajilla, esimerkiksi 100/1.

Virtamuuntaja:

- 100/1 10VA, 5P10

11. YHTEENVETO

Työn olennaisin tarkoitus oli suunnitella tuulipuiston liittäminen Fingrid Oy siirtoverkkoon ja samalla tarkastella liittymisvaatimuksia liittymisen osalta. Verkostomääräyksistä johtuen taajuusmuuttajaa joudutaan kasvattamaan lähitulevaisuudessa jonkin verran ja se otettiin tulevaisuutta katsoen jo nyt huomioon, erityisesti 20kV kaapeleita mitoittaessa.

Suojaus suunniteltiin siten, että voimala ei irtoa verkossa häiriön sattuessa. Erityisesti alijännitesuojauksella ”annettiin” aikaa, jotta mahdollinen pjk onnistuisi. Lisäksi todettiin, että voimalan matalanjännitteen sietokyky on hyvä ja vikatilanteissa voimalan toiminta on hyvin määrätietoista ja nopeaa. Voidaankin todeta, että nykyaikaisella täystehotaajuusmuuttajan varustettu tuulivoimalaitos pystyy reagoimaan hyvin nopeasti verkon vikatilanteisiin ja toimimaan ennalta määrätysti.

Työssä on käyty läpi suojaukseen sekä komponentteihin vaikuttavat suureet sekä niiden laskentaan liittyvä teoria. Työn alkuvaiheessa kartoitettiin mahdollisia kytkentä tilanteita, mitä tällaisella puistolla on mahdollista toteuttaa, ja päädyttiin kolmeen erilaiseen kytkentätilanteeseen. Työssä määriteltiin yhden johtolähdön osalta asetukset ylivirtasuojauksiin sekä maasulkusuojauksiin, jossa otettiin huomioon verkkoliittymisvaatimukset sekä turvallisuusvaatimukset.

Lopputuloksena voidaan todeta, että oikosulkutehot ovat liittymispisteessä kohtuulliset ja ei näin tule aiheuttamaan ongelmia varsinkaan termisten kestävyyksien kannalta. Myöskään pienimmän vikavirran erottaminen suurimmasta kuormitusvirrasta ei pitäisi tuottaa ongelmia. Suojausportaiden lukumäärän ja selektiivisyyden vuoksi osassa portaista, esimerkiksi kisko- ja johtolähtösuojaus, käytetään lukitussuojausta selektiivisyyden varmistamiseksi. Maasulkuvirtojen osalta suojaus on haasteellinen, mutta suunnatulla suojauksella sekä virtaselektiivisyydellä tämä saadaan toimivaksi.

Työn loppuosassa on määritelty suojausasetukset ylivirta- sekä maasulkusuojaukselle. Selektiivisyys on tarkasteltu sekä aika- että virtaselektiivisyyden kannalta. Ylivirtasuojaus toteutetaan jokaisessa suojausportaassa kaksiportaisena sekä käänteisaikaisena. Ylivirtasuojaukselle sekä maasulkusuojaukselle laadittiin suojauskaavio, joka helpottaa huomattavasti selektiivisyysvertailua.

Tuulipuistossa on käytössä useita eri tarkoitukseen tarkoitettuja virta- ja jännitemuuntajia ja tässä työssä on käsitelty näiden käyttötarkoitus sekä niiden valintaperusteet.

12. LÄHDELUETTELO

- /1/ ABB:n TTT käsikirja luku7 (oikosulkusuojaus), 2000
- /2/ ABB:n TTT käsikirja luku10 (mittaus-, ohjaus- ja suojalaitteistot), 2000
- /3/ ABB:n TTT käsikirja luku8 (maasulkusuojaus), 2000
- /4/ ABB Oy, Nollajänniterele, käyttöohje ja tekninen selostus, SPAU 110C, versio B, 2002, hakupäivä 25.3.2012
[http://www05.abb.com/global/scot/scot229.nsf/veritydisplay/a9a799b7068a549ec2256c7e00529ead/\\$file/fm_spau110c_fi_baa.pdf](http://www05.abb.com/global/scot/scot229.nsf/veritydisplay/a9a799b7068a549ec2256c7e00529ead/$file/fm_spau110c_fi_baa.pdf)
- /5/ Aro, Martti & Elovaara, Jarmo & Karttunen, Matti & Nousiainen, Kirsi & Palva, Veikko. Suurjännitetekniikka, 2.painos, Helsinki: Otatieto 2003
- /6/ Aura, Lauri & Tonteri, Antti J. Sähkölaitostekniikka, 1.painos, WSOY 1993
- /7/ Elovaara, Jarmo & Liisa Haarla. Sähköverkot 2 : Verkon suunnittelu, järjestelmät ja laitteet, Helsinki : Otatieto, 2011.
- /8/ Elovaara, Jarmo & Liisa Haarla. Sähköverkot 1 : Järjestelmätekniikka ja sähköverkon laskenta , Helsinki : Otatieto, 2011.
- /9/ Elovaara, Jarmo & Yrjö, Laiho. Sähkölaitostekniikan perusteet, 6.painos, Helsinki : Otatieto, 2007.
- /10/ Energiateollisuus, Verkostosuositus YA9:09
- /11/ Farin, Juho & Peltonen, Lasse & Pykälä, Marja-Leena & Uski-Juotsenvuo, Sanna VTT tutkimusraportti VTT-R-03623-09, Espoo 2009
<http://www.vtt.fi/inf/julkaisut/muut/2009/TAMU-loppuraportti.pdf>
- /12/ Fingrid Oy, Voimalaitosten järjestelmätekniset vaatimukset (VJV 2007), hakupäivä 29.2.2012
http://www.fingrid.fi/attachments/fi/palvelut/kantaverkkopalvelut/liittyminen/vaatumukset_vjv_2007.pdf
- /13/ Voimalaitosten järjestelmätekniset vaatimukset (VJV 2007) Liite 2, Fingrid, Joulukuu 2011, hakupäivä 29.2.2012
http://www.fingrid.fi/attachments/fi/palvelut/kantaverkkopalvelut/liittyminen/uudet_liitteet/vjv2007_liite_2_-_tuulivoimalaitosten_jarjestelmatekniset_vaatimukset.pdf
- /14/ Voimalaitosten järjestelmätekniset vaatimukset (VJV 2007) Liite 3, Fingrid, Joulukuu 2011, hakupäivä 29.2.2012
http://www.fingrid.fi/attachments/fi/palvelut/kantaverkkopalvelut/liittyminen/uudet_liitteet/vjv2007_liite_3_-_vjv-referenssipisteen_maarittelyperiaatteet.pdf

- /15/ Fingrid Oy, Loistehon soveltamisohje, Liite 4, hakupäivä 29.2.2012
http://www.fingrid.fi/attachments/fi/palvelut/kantaverkkopalvelut/kantaverkkopalvelu_2012/liite_4_loissahkon_sovellusohje.pdf
- /16/ Häsä, Sanna, Generaattorisuojauksen uusinta, diplomityö, Helsingin yliopisto, 2009
- /17/ IEC 60909-0 Short-circuit currents in three-phase a.c. systems, 1.painos, 2001
- /18/ Kanerva Sami, Senior Specialist, Espoo, Winwind Oy, 3.4.2012
- /19/ Kauhaniemi, Kimmo & Haapalainen, Timo & Nyberg, Johan & Voima, Sampo, Tuuliverkko loppuraportti, Vaasan Yliopisto & VTT, 2008
http://trinity.siteadmin.fi/File.aspx?id=604682&ext=pdf&routing=301916&webid=494555&name=Tuuliverkko_Loppuraportti
- /20/ Lakervi, Erkki & Partanen, Jarmo. Sähkönjakelutekniikka, Otatiето 2008
- /21/ Lund, Peter & Paatero, Jukka, Kehittynyt tuulivoimatekniikka, luentomateriaali, syksy 2002, Helsinki University of Technology in Engineering Physics
http://tfy.tkk.fi/aes/AES/courses/crspages/Tfy-56.173_02/Tfy-56.173_02.pdf
- /22/ Miettinen Jouni, Technical Specialist, Oulu, Winwind Oy, 13.3.2012
- /23/ Mörsky, Jorma & Mörsky, Janne, Voimalaitosten yhteiskäytön tekniikka, Otatiето 1994
- /24/ Mörsky Jorma, Relesuojaustekniikka, Otatiето 1992
- /25/ SFS-käsikirja 6001 1. painos, Suomen Standardisoimisliitto, 2009.
- /26/ Tuulivoimakäytön mallentaminen ja simulointi, Tuominen Olli, diplomityö, Tampereen teknillinen yliopisto, 2006
http://webhotel2.tut.fi/units/set/raportteja/dg/eldig/diplomityo_OT.pdf
- /27/ Tuuliatlas, Internet dokumentti, hakupäivä hakupäivä 15.3.2012
<http://www.tuuliatlas.fi/tuulivoima/index.html>
- /28/ VAMP 50, Ylivirta- ja maasulkurele, käyttö ja konfiguraatio, ensimmäinen versio, Vamp Oy, hakupäivä 10.2.2012
<http://www.vamp.fi/Manuals/Finnish/VM50.FI007.pdf>
- /29/ VAMP 255/245/230 Johtolähtö- ja moottorisuojat, käyttö- ja konfigurointiohje, VAMP Oy, hakupäivä 10.2.2012
<http://www.vamp.fi/Manuals/Finnish/VM255.FI003.pdf>
- /30/ VAMP 265, Transformer, generator and motor differentia protection relay, Technical description, Vamp Oy, hakupäivä 10.2.2012

<http://www.vamp.fi/Manuals/English/VM265.EN011.pdf>

/31/ WinWinD3 data-lehti, Winwind Oy, 2011, hakupäivä 10.2.2012

http://www.winwind.com/Documents/Fact%20sheets/WinWinD%203_Fact%20sheet.pdf

/32/ WindParkSpecification, Julkaisematon materiaali, Winwind Oy 2012

/33/ Winwind Oy historia, Julkaisematon dokumentti, Winwind Oy 2012

13. LIITELUETTELO

Liite1	20kV kaapeleiden johtotietoa
Liite2	Laukaisukaaviot
Liite3	Päämuuntajan suojaus
Liite4	Kisko- ja johtolähtösuojaus
Liite5	Kisko- ja johtolähtösuojaus
Liite6	Voimalan suojaus
Liite7	Puiston pääkaavio
Liite8	Oikosulkuvirtojen laskuesimerkit
Liite9	Maasulkuvirtojen ja -jännitteiden laskuesimerkit