



VAASAN AMMATTIKORKEAKOULU
VASA YRKESHÖGSKOLA
UNIVERSITY OF APPLIED SCIENCES

Juho Kontio

HAJAUTETUN SÄHKÖTUOTANNON VERKKOMALLI

Tekniikka ja liikenne
2013

TIIVISTELMÄ

Tekijä	Juho Kontio
Opinnäytetyön nimi	Hajautetun sähkötuotannon verkkomalli
Vuosi	2013
Kieli	suomi
Sivumäärä	34
Ohjaaja	Kari Jokinen

Tässä opinnäytetyössä tehdään esisuunnitelma hajautetun sähkötuotannon verkkomallista Vaasan ammattikorkeakoulun Technobothnia laboratorioympäristöön ja tutkitaan hajautetun verkon suojausta. Hajautetun sähkötuotannon mallissa mallinnetaan kolme johtolähtöä joihin on liitetty sähkötuotantolaitteita.

Opinnäytetyössä tehtävään esisuunnitelmaan kuului hajautetun sähkötuotannon verkkomallin paneelin layoutin suunnittelu. Johtolähtöjen pii-mallinnusten tekeminen, johtolähtöjen vikapaikkojen mallintaminen ja suojareleiden valinta.

Työn tutkimuksen perusteella hajautettu sähkötuotanto tuo uusia haasteita sähköverkon suojauksen suunnitteluun ja toteutukseen.

ABSTRACT

Author	Juho Kontio
Title	A Model for Distributed Energy Generation
Year	2013
Language	Finnish
Pages	34
Name of Supervisor	Kari Jokinen

The purpose of this thesis work was to make preliminary plan for the distributed energy generation model for Vaasan ammattikorkeakoulu University of Applied Sciences Technobothnia laboratory environment and research how to protect a distributed energy network. Altogether three feeders to which electricity production equipment is connected electric were modelled.

This thesis preliminary plan includes a layout for the distributed energy generation model, e.g modelling of equivalent circuits for feeder lines, modelling of the fault situations in feeder lines and selection of protection relays.

On the basis of the research the distributed energy generation will bring new challenges to the planning of the protection of the electricity network.

Keywords distributed, generation of electricity, network model, preliminary plan

SISÄLLYS

TIIVISTELMÄ

ABSTRACT

1	JOHDANTO	5
2	MALLINNETTAVA VERKKO.....	6
3	HAJAUTETUN VERKON SUOJAUS	7
3.1	Johtodifferentiaali	7
3.2	Suunnattu ylivirtarele ja maasulkurele.....	9
3.3	Eroon-kytkentätilanne.....	13
4	GENERAATTORIN MAGNETOIMISLAITTEISTO.....	14
4.1	Loistehon säätö	14
4.2	Magnetoinnin säätötavat	18
5	LOISTEHON SÄÄDÖN MERKITYS JÄNNITTEEN ALENEMAAN.....	19
6	JOHTOLÄHTÖJEN MALLINTAMINEN.....	21
6.1	Yleistä	21
6.2	Johtolähdön 1 mallintaminen	22
6.3	Johtolähdön 3 mallintaminen	24
6.4	Johtolähdön 4 mallintaminen	28
6.5	20 kV jännitteen, virran ja kuormien mallintaminen	29
7	PANEELIN OHJAUSPIIRIT	30
7.1	Vikapaikan valinta	30
7.2	Vikojen ja kuormien kytkentä.....	31
8	YHTEENVETO	32
	LÄHTEET.....	33

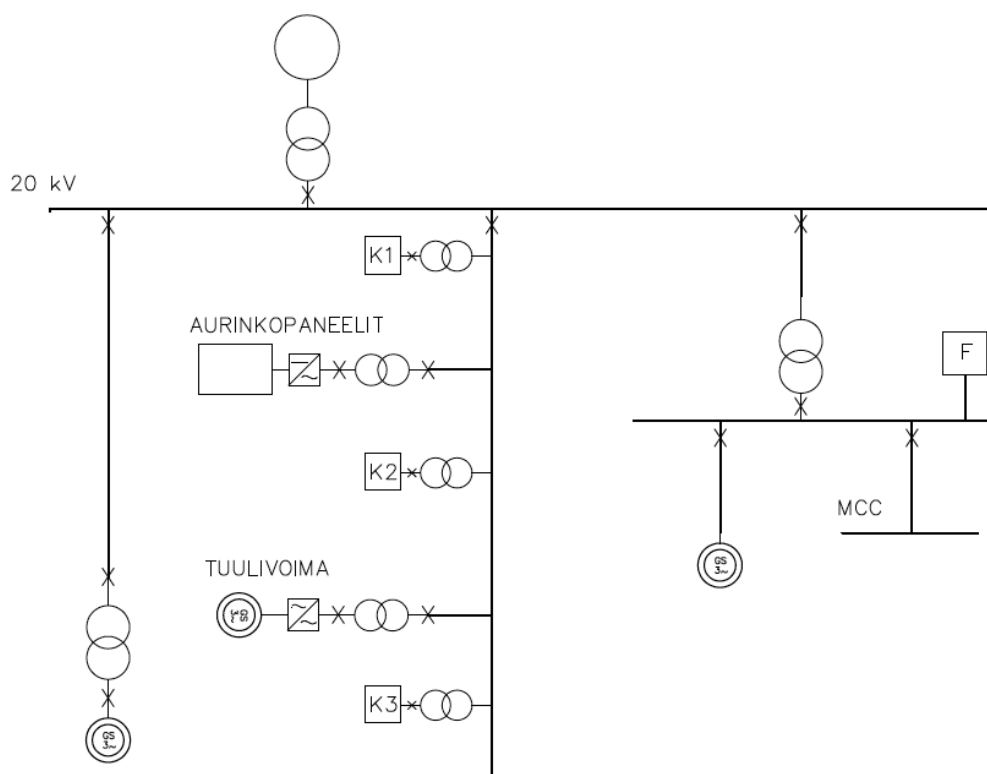
1 JOHDANTO

Opinnäytetyön tarkoituksena on tehdä esisuunnitelma hajautetun sähköntuotannon verkkomallista Vaasan ammattikorkeakoulun Technobothnia laboratorioympäristöön. Työssä suunnitellaan hajautetun sähköntuotannon verkkomallista paneelin layout-kuva, johtolähtöjen pii-mallinnukset, vikapaikat ja valitaan johtolähtöjen suoja-alueet. Johtolähdöt mallinnetaan 20 kV jännitetasolle järjestelmän todellisen jännitteen ollessa 400 V.

Hajautettuun sähköntuotannon malliin liitetään kolmelle eri johtolähdölle sähköntuotantolaitteiksi 6 kVA generaattori, 3,6 kW aurinkovoimajärjestelmä, tuulivoimamalli, joka on toteutettu kestopagneettigeneraattorilla ja 4 kW oikosulkumoottorilla. Johtolähtöjen kuormina toimii paneelin sisäiset vastuskuormat ja moottorinohjauskeskus.

2 MALLINNETTAVA VERKKO

Technobothnia laboratorioympäristöön tehtävä verkkomalli pyrkii mallintamaan hajautetun sähköntuotannon verkkoa ja teollisuusverkkoa. Verkkomallissa on kolme johtolähtöä ja yhdelle johtolähdölle on liitetty 6 kVA generaattori. Hajautetun verkon johtolähdölle on liitetty 3,6 kW aurinkovoimajärjestelmä ja tuulivoimamallami mikä on toteutettu kestopagneettigeneraattorilla ja 4 kW oikosulkumoottorilla. Jokainen sähköntuotantoyksikkö on liitetty verkkoon kuvitteellisen muuntajan kautta. Teollisuusverkkoon on kytketty generaattori, mcc moottorinohjauskeskus, loistehonkompensointilaitteisto ja yliaaltosuodatus. Johtolähdöt on suojattu johtodifferentiaalilla ja suunnatulla ylivirta- ja maasulkureleillä. Kuvio 1 esittää mallinnettavan verkon periaatteellisen kuvan.



Kuvio 1. Mallinnettavan verkon periaatteellinen kuva.

3 HAJAUTETUN VERKON SUOJAUS

3.1 Johtodifferentiaali

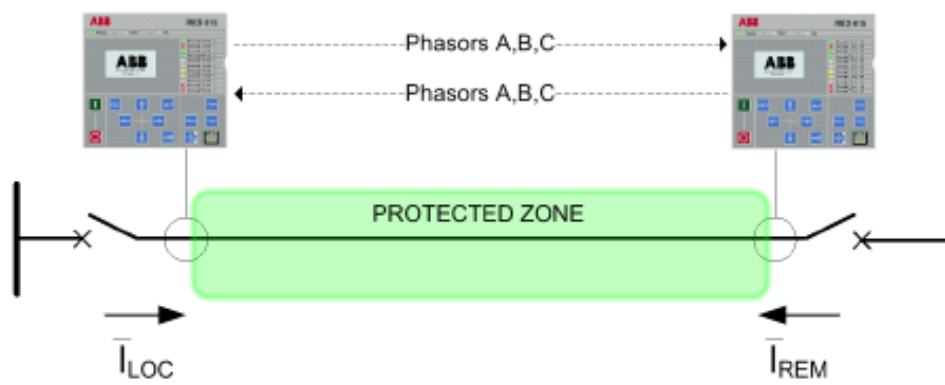
Johtodifferentiaalisuojaus perustuu johdon päiden vaihevirtojen mittaukseen. Jos tulevat vaihevirratt poikkeavat lähtevien virtojen mittauksesta ja ylittää suojaraleeseen asetetun arvon, suoja havahtuu ja rele laukeaa. Johtodifferentiaalirele on selektiivinen ja sillä voidaan rajata suojattava alue millä rele toimii. Suojaus ei toimi suojausalueen ulkopuolella. /1./

Johtodifferentiaalisuojaus tarvitsee toimiakseen tietoliikenneyhteyden suojaraleiden välille. Tietoliikenneyhteyttä pystytään hyödyntämään ettei yksittäinen voimalaitos jää syöttämään saarekkeeseen johtolähdön lauettua. Myös vikatilanteet saadaan estettyä, missä yksittäinen voimalaitos alkaa syöttämään vikapaikkaan vikavirtaa johtolähdön pääsyötön lauettua. Pääsyötön laukaisusta lähtee tieto johtolähdön toisessa päässä olevalle suojaraleelle. Suojareleiden välinen tietoliikenneyhteys kannattaa yleensä toteuttaa valokaapeliyhteydellä, koska valokuituyhteys ei ole yhtä häiriöherkkä kuin kuparikaapelilla toteutettu. Valokuituyhteydessä ei tarvitse huomioida vikatilanteissa aiheutuvaa potentiaaliero johdon päiden välillä. /1./

Tähän työhön valittu ABB:n RED615-suojarele käyttää suojaraleiden välisissä horisontaalisissa tietoliikenneyhteyksissä IEC 61850 –yhteyttä. Suojareleiden horisontaalisessa tietoliikenteessä releet lähettää ja vastaanottaa binaarisignaaleja muilta suojaraleilta. Yhteysmuotona käytetään IEC 61850-8-1 GOOSE-profiilia, jolla saadaan 3 ms siirtoaika yhteydelle. Tietoliikenneyhteyksissä voidaan käyttää valinnan mukaan RJ-45 100base-TX- tai optista LC 100base-FX –liitäntää. RED615-suojareleen kanssa on mahdollista käyttää yhtä aikaa viittä eri työasemaa. /1./ /2./



Kuvio 2. ABB RED615 johtodifferentiaali.



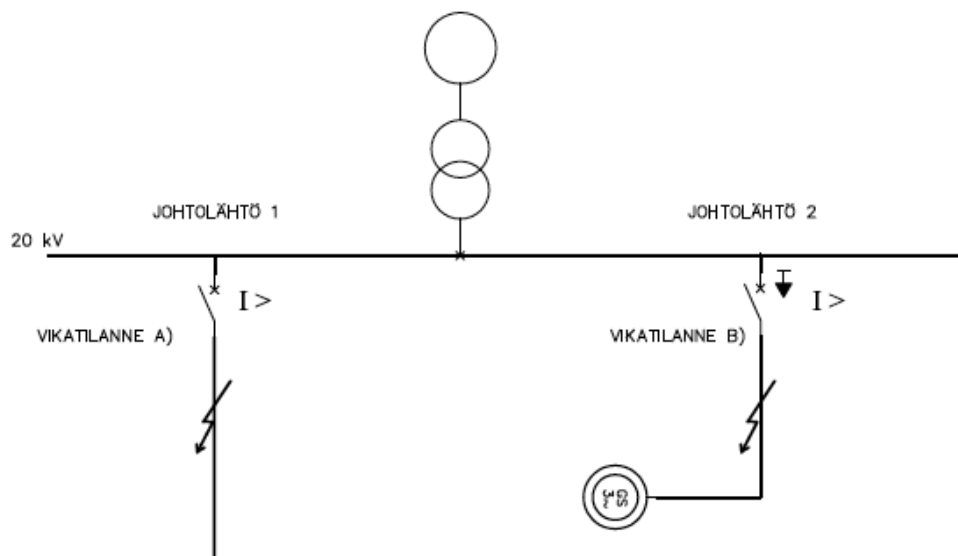
Kuvio 3. Johtodifferentiaalilin toimintaperiaate. /4./

3.2 Suunnattu ylivirtarele ja maasulkurele

Suuntareleet mittaavat johtolähdön jännitettä ja virtaa sekä laskevat läpi menevän tehon. Jännitteen ja virran mittauksessa mitataan lisäksi jännitteen ja virran välistä kulmaa. Suunnatulla suojauksella pystytään estämään viereisen johtolähdön viassa terveen johtolähdön virheellinen laukaisu. Vikatilanteessa laukaistaan vain viallinen johtolähtö. /5./

Suunnatun ylivirtareleen suojauksen toimintaperiaate perustuu vaihevirtojen arvoon ja vaihekulmaan. Rele havahtuu ja laukaisee, kun vaihevirtojen ja vaihekulman arvot saavat releelle asetetun arvon. /5./

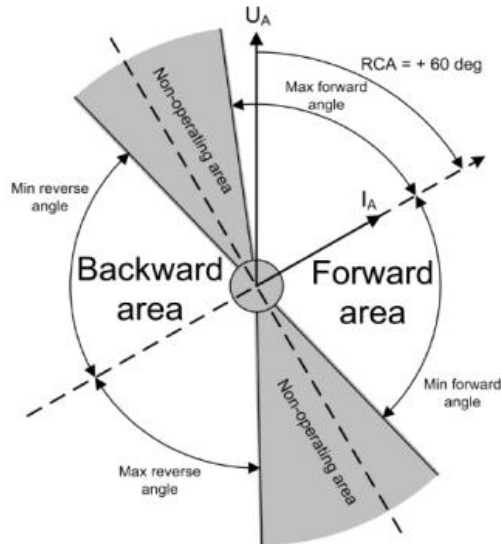
Kuviossa 4 on esitetty vikatilanteet A ja B. Vikatilanteessa A johtolähdöllä 1 on vikatilanne, mutta johtolähdön 2 suunnattu ylivirta rele ei laukea vian ollessa muualla verkossa kuin omalla johtolähdöllä. Vikatilanteessa B johtolähdön suunnattu ylivirtarele laukeaa, koska vika on ylivirtareleen johtolähdöllä.



Kuvio 4. Suunnatun ylivirtareleen toiminta vikatilanteessa.

Kuviossa 5 esitetty RCA (relay characteristic angle) tarkoittaa releen ominaiskulmaa suuntauksen asettelussa. Ominaiskulmalla asetellaan suuntauksen suunta ja leveys. Ominaiskulman arvo on positiivinen, kun virta I_A on jäljessä polarisaatiojännitteeseen U_A . Max forward angle ja min forward angle tarkoittavat maksimi- ja minimikulmaa. Maksimi- ja minimikulma-arvoista saadaan releen suuntauksessa tarvittava kulmatieto vaihevirran arvoon vertaamalla. Forward area tarkoittaa suuntausta samaan suuntaan kuin vaihevirta ja backward area tarkoittaa suuntaus-

ta vaihevirran vastakkaiseen suuntaan. Non-operating area on suojuksen toiminnan ulkopuolinen alue missä rele ei havahdu. /5./

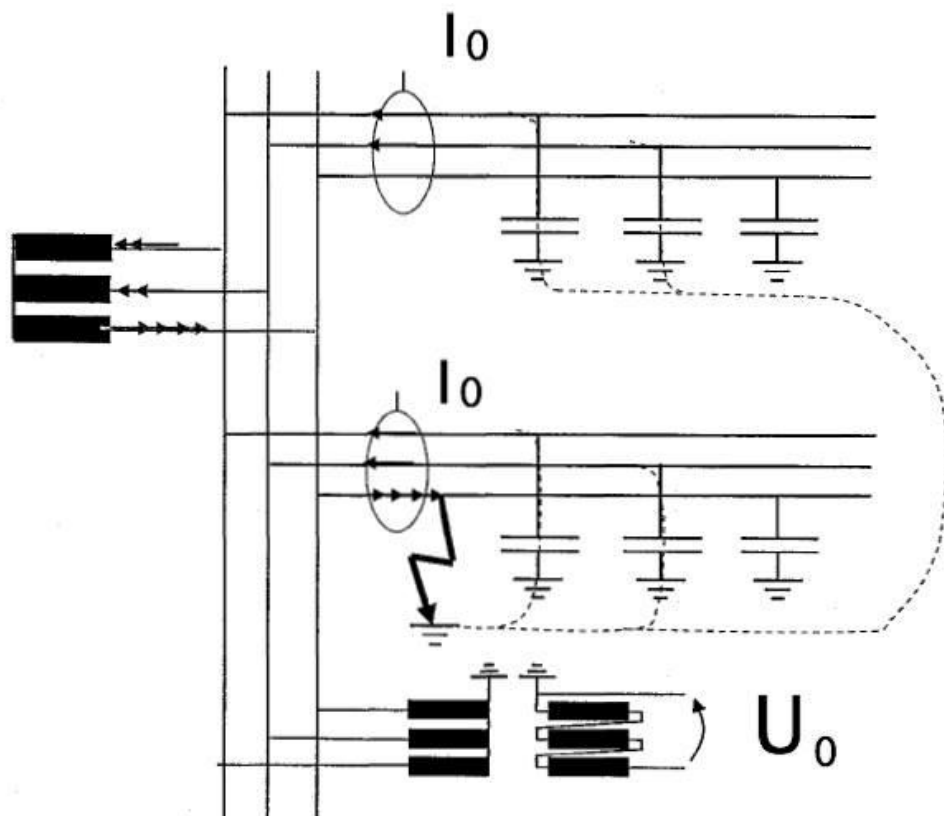


Kuvio 5. Suunnatun ylivirtareleen toimintasektorit. /3/

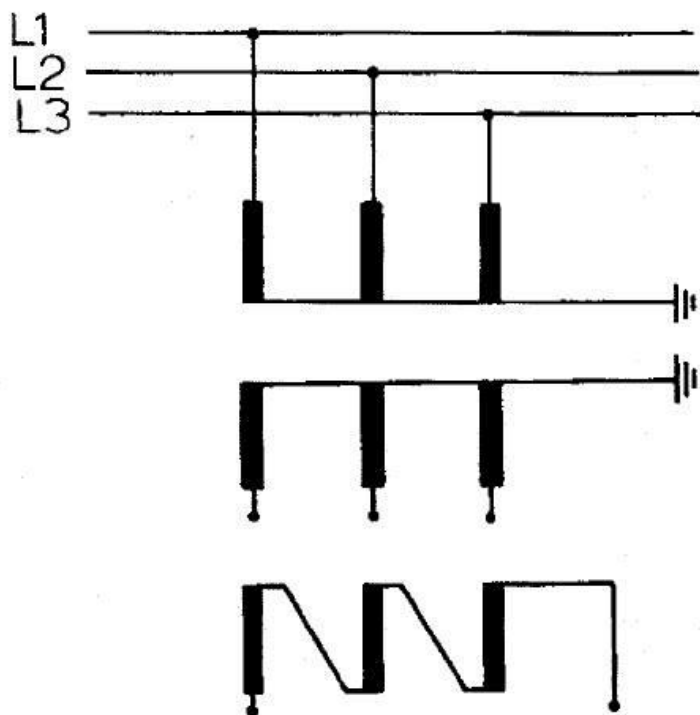
Maasta erotetussa tai kompensoidussa verkossa suojuksena käytetään suunnattua maasulkurelettä. Maasulkurele mittaa nollavirtaa ja nollajännitettä sekä niiden välistä vaihe-eroa. Rele suorittaa johtolähdön katkaisun, kun releeseen asetettu nollavirta, nollajännite ja vaihe-eroarvo saavutetaan. /5./

Maasta erotun verkon maasulkuviassa vikapaikan maadoitus vääristää maata vasten mitatut vaihejännitteet. Maasta erotetun verkon vikaresistanssittomassa maasulussa olevan vaiheen jännite on nolla voltia ja kahden muun vaiheen jännite nousee pääjännitteen suuruiseksi. Vikaresistanssin kautta tapahtuva maasulku rajoittaa hieman jännitteen nousua, mutta vaiheiden jännitteet eivät ole kuitenkaan symmetriset. Symmetristen vaihejännitteiden summamittauksen tulos on nolla. Avokolmiomittauksella mitataan summajännitteen arvo kytkemällä toisiopuolen jännitteenmuuntajat sarjaan. Sarjaan kytkennällä saadaan vaihejännitteiden summaan verrannollinen jännite. /11./

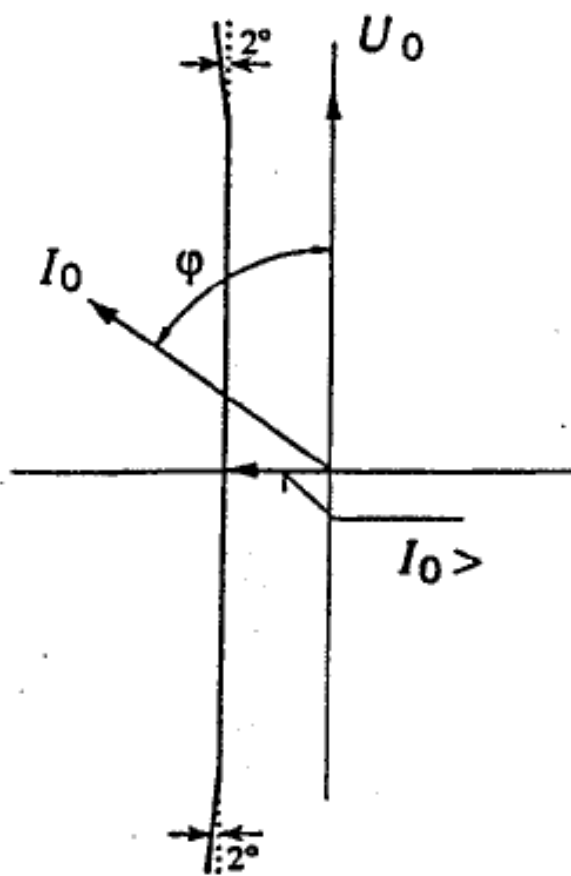
Verkon maasulkutilanne saadaan mitattua avokolmiokytkennällä, mutta maasulun vikapaikkaa ei kytkeä näytä. Maasulkuviassa johtolähdöillä oleva maasulkuvirta saadaan mitattua summavirtamittauksella. Tarkkaa vikapaikkaa ei saada selville summavirtamittauksella, jos johtolähtöjen pituuksissa on suuria eroja. Vikaantunut johtolähtö saadaan kuitenkin selville suunnatulla maasulkureleellä. Summavirran lisäksi suunnattu maasulkurele mittaa nollajännitettä. Suunnattu maasulku rele ei laukaise suojausta vian ollessa muualle verkossa kuin suojuksessa johtolähdössä, koska summavirran ja nollajännitteen vaihesiirto on pyörähtänyt 180° ja $I_0 \sin \phi$ arvo on vaihtanut merkkiä. /11./



Kuvio 6. Maasulku tilanne maasta erotetussa verkossa. /11./



Kuvio 7. Avokolmiomittauskytkentä. /11./



Kuvio 8. $I_0 \sin \phi$:tä mittaava suuntarele. /11./

3.3 Eroon-kytkentätilanne

Voimalaitoksella mitataan verkon jännitettä liittymispisteessä, jos jännitteen muutos ylittää suojaukselle asetetun arvon, voimalaitos erotetaan verkosta. Verkon taajuuden arvoa myös mitataan, jos taajuudessa tapahtuu asetuttua arvoa suurempi muutos, voimalaitos erotetaan verkosta. Tällä saadaan estettyä ettei voimalaitos jää yksin syöttämään saarekkeeseen. Voimalaitos kytketään takaisin verkkoon, kun verkon liitäntäpisteeseen on palannut jännite ja taajuus on sallitussa rajoissa. /6./

Ali- ja ylijännitesuojauksella pidetään verkkoon liitetyn voimalaitoksen jännite asetelluissa rajoissa. Ylijännitesuojauksessa johtolähdön päämuuntajan jännitteen säädön tulee toimia nopeammin kuin voimalaitoksen suojauksen eroon-kytkennän verkosta. Jos voimalaitoksen suojaus toimii nopeammin kuin muuntajan jännitteen säätö, voimalaitos irtikytetään verkosta. Tämä saattaa aiheuttaa turhia voimalaitoksen irtikytkemisiä verkosta. Suojauksen ongelmaksi voi tulla verkon liityntäpisteen korkea jännite eikä päämuuntajan jännitteen säätö pysty korjaamaan jännitteen nousua riittävän nopeasti. /6./

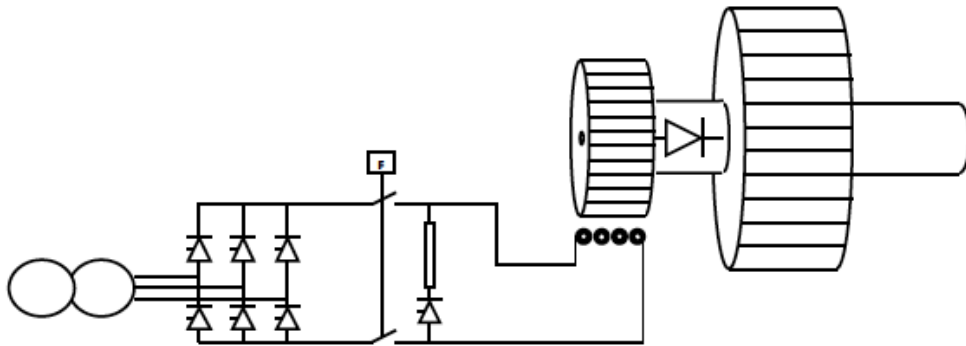
Oikosulkutilanteessa voimalaitoksen tulee havaita verkon jännitteen lasku ja kytkeytyä irti verkosta, että sähköaseman suojaus pääsee toimimaan. Oikosulkusuojauksessa käytetään ylivirtarelettä selektiivisyyden saamiseksi. Ali-impedanssirelettä käytetään generaattorin napaoikosulussa missä magnetointiteho laskee ja syötetty vikavirta pienenee. Ali-impedanssisuojaus toimii pienellä virralta ja toimii tämän takia generaattorin napaoikosulkutilanteessa. /13./

Ylivirtasuojauksessa voimalaitos irti kytketään verkosta oikosulkutilanteessa mahdollisimman nopeasti.

4 GENERAATTORIN MAGNETOIMISLAITTEISTO

4.1 Loistehon säätö

Harjattoman generaattorin magnetointiin tarvitsema tasavirta tehdään samalle akselille liitetyllä kolmivaihe magnetointigeneraattorilla. 6-pulssityristorisillalla säädetään magnetointikoneen roottorille syötettyä magnetointivirtaa. Roottorille syötetty tasavirta muodostaa staattorille indusoituvan sinimuotoisen vaihtosähköjännitteen. Sinimuotoinen vaihtosähköjännite tasasuunnataan staattorille kytketyllä diodisillalla ja johdetaan päägeneraattorin napapyörään. /7./



Kuvio 9. Harjaton magnetointi. /7./

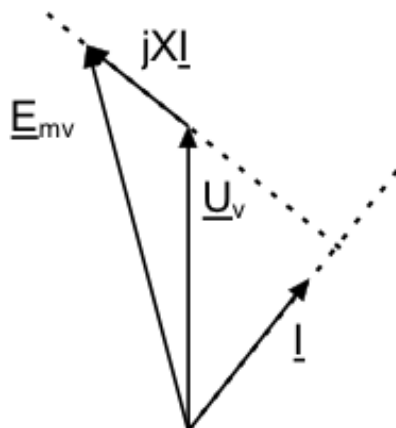
Harjallisessa magnetoinnissa generaattorin napapyörään kytketään tasavirta hiiliharjojen ja liukurenkaiden avulla. Hiiliharjat on kiinnitetty liukurenkasiin mistä on kytkentä roottorikäimitykseen. Magnetointivirta voidaan syöttää verkkomuuntajalla tai samalle akselille kytketyltä herätinkoneelta. Verkkomuuntajan syöttämä magnetointivirta tasasuunnataan ja johdetaan hiiliharjoilla päägeneraattorin roottorikäymiin ja roottorin pyöriessä staattorikäymiin indusoituu sinimuotoinen vaihtosähköjännite. Harjallisen magnetoinnin etuna on ettei magnetointikonetta tarvita, koska hiiliharjat korvaavat sen. Magnetoinnille saadaan myös nopea säätödynamiikka. Hiiliharjat ja liukurenkaat tarvitsevat kuitenkin huoltoa, koska ne ovat kuluvia komponentteja. Hiiliharjojen ja liukurenkaiden huoltoväli on kuitenkin useita vuosia. /7./

Tahtigeneraattoreita käytetään voimalaitoksissa, koska niillä pystytään tuottamaan tarkasti 50 Hz verkkovirtaa kierrosluvun nopeudella. Kun generaattori kytketään verkkoon, se pitää tahdistaa verkon kanssa samalle taajuudelle.

Sähkön tuotannossa kulutuksen ja tuotannon pitää olla tasapainossa. Voimalaitoksissa käytetään vierasmagnetoituja tahtigeneraattoreita joissa on automaattinen loistehon ja jännitteen säätö.

Tahtigeneraattorin magnetoimisvirran suurentamisella $\sin j E_{mv}$ kasvaa, tilannetta kuvataan kuviossa 11. Generaattori syöttää verkkoon induktiivista loisvirtaa. Loistehon suhteen ylimagnetoitu tahtikone toimii vastaavasti kuin kondensaattori. /14./

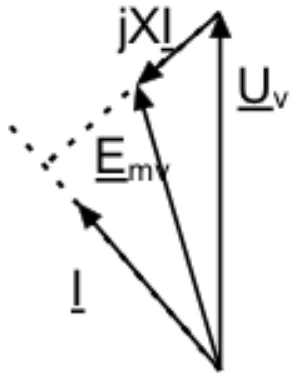
a) Ylimagnetoitu generaattori



Kuvio 10. Ylimagnetoidun generaattorin osoitinpiirros. /14./

Tahtikoneen alimagnetoinnilla generaattori ottaa verkosta induktiivista loisvirtaa. /14./

b) Alimagnetoitu generaattori



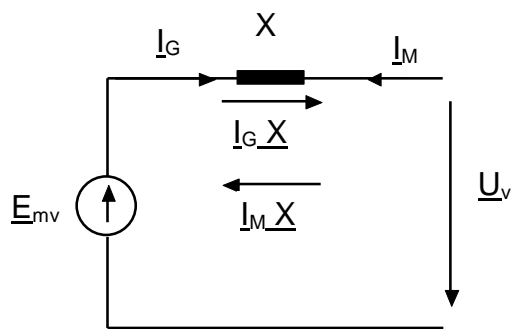
Kuvio 11. Alimagnetoitun generaattorin osoitinpiirros. /14./

Verkkoon kytkemättömän generaattorin jännitteen muodostaa magnetoimisvirta ja pyörimisnopeus. Saarekekäytössä \underline{E}_{mv} :tä säädetään magnetointivirralla siten, että U_v pysyy vakiona generaattorin kuormituksessa. Verkkoon kytketyssä tahtikooneessa voi säätää magnetoinnilla verkkoon syötettyä loistehoa ja U_v arvo pidetään vakiona. /14./

Kuviossa 13 on esitetty umpinapakoneen yksinkertaistettu sijaiskytkentä.

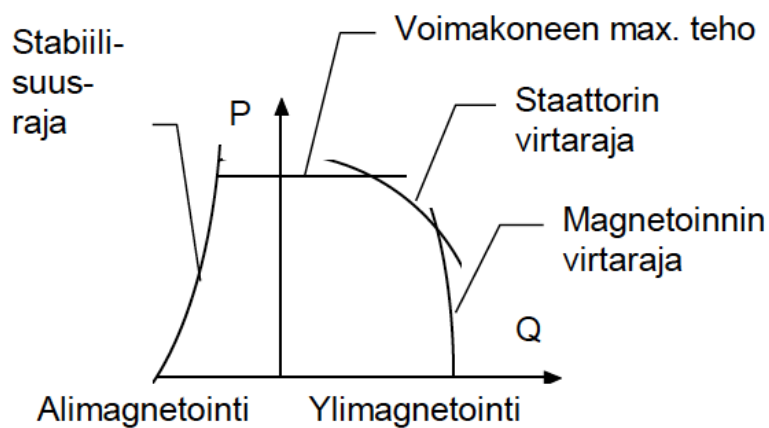
Ylimagnetoinnissa $|E_{mv}| > |U_v|$

Alimagnetoinnissa a $|E_{mv}| < |U_v|$



Kuvio 12. Umpinapageneraattorin sijaiskytkentä generaattorille ja moottorille.
/14./

Kuviossa 13 on esitetty stabiilisuus raja minkä alittamisen jälkeen generaattori ei pysy tahdissa. Kuviossa 16 on myös esitetty voimakoneen maksimi tehoraaja, staattorin virtaraja ja magnetoinnin virtaraja. Alimagnetoituna generaattori ottaa loistehoa verkosta ja ylimagnetoituna tuottaa loistehoa verkkoon. /14./



Kuvio 13. Generaattorin toimintarajat. /14./

4.2 Magnetoinnin säätötavat

AVR -säätö

AVR eli automaattinen jännitteensäätö pyrkii pitämään generaattorin liitäntäjännitteen vakiona saarekekäytössä. Jännitteen laskiessa alle asetellun arvon magnetoisvirtaa nostetaan ja jännitteen noustessa yli asetellun arvon magnetointivirtaa pienennetään. Verkkokäytössä kyseistä säätötapaa voi käyttää tukemaan verkon jännitettä hetkellisissä jännitteen alenemissa. /10./

Q-säätö

Q-säädöllä eli vakioloistehosäädöllä generaattori tuottaa tai kuluttaa loistehoa asetellun arvon perusteella akselitehosta riippumatta. /10./

Cos φ -säätö

Cos φ -säätö eli vakiotehokerroinsäädöllä generaattorille asetetun tehokertoimen perusteella loistehon tuotanto tai kulutus pidetään halutussa suhteessa kulutettuun pätötehoon. Generaattorin loistehokertoimen perusteella tuotetaan tai kulutetaan loistehoa kuormituspisteissä. /10./

5 LOISTEHON SÄÄDÖN MERKITYS JÄNNITTEEN ALENEMAAN

Jännitteenalenema resistanssia ja reaktanssia sisältävässä siirtoyhteydessä voidaan laskea oheisella likimääräisellä yhtälöllä.

$$\Delta U = R * I * \cos \varphi + X * I * \sin \varphi = R * I_p + X * I_q \quad (1)$$

$I_p = \text{pätövirta}, I_q = \text{loisvirta}$

Yhtälön mukaan loisvirta ja siis myös loisteho aiheuttaa erityisen suuren jännitteenaleneman jos siirtoyhteyden reaktanssi on paljon resistanssia suurempi. Näin on asianlaita erityisesti suurilla muuntajilla ja suurjännitejohdoilla.

Loistehonkompensoinnilla pyritään vähentämään muuntajan läpi otettavaa loistehoa ja vähentämään jännitteen alenemaa. Jännitteen alenema saadaan pienemmäksi kuormitusvirran loistehokomponentin pienentämisellä. Pätötehon siirtokyky verkossa kasvaa loistehokomponentin pienentyessä. Keskitetyssä loistehonkompensoinnissa kondensaattoriparistot asennetaan muuntajan pienjännitepuolelle sulakesuojauksella. Kompensointi voidaan toteuttaa kiinteästi määritellyillä kondensaattorin arvoilla tai säädettävillä kondensaattoriparistoilla. Kiinteästi toteutettu kompensointi voi aiheuttaa ylikompensointia muuntajan kuormituksen ollessa alhainen. Säädettävällä kondensaattoriparistolla pystytään säätämään kompensoitavaa loistehoa kuormituksen perusteella. Kompensointiin liitetään myös yliaaltosuodattimia ja estokeloja. Loistehoa voidaan kompensoida myös tahtikoneiden magnetoinnilla edellisessä kappaleessa läpikäydyn teorian mukaisesti, jos alajännitepuolella on käytettävissä tahtikoneita. /11./

Johdon impedanssi ja siirrettävä pätöteho ja loisteho vaikuttavat verkon jännitetasoon saman $\Delta U = R * I * \cos \varphi + X * I * \sin \varphi = R * I_p + X * I_q$ yhtälön mukaan. Pätötehon aiheuttamaa jännitteen alenemaa voidaan kompensoida loistehon

siirtämiselle päinvastaiseen suuntaan kuin pätöteho. Verkon resistanssi-/reaktanssiarvot vaikuttavat loistehon siirrossa jännitteenmuutokseen. Pienjännittejohdoilla resistanssiarvo on suurempi kuin reaktanssiarvo. Keskijännittejohdoilla avojohtojen resistanssi- ja reaktanssiarvot ovat lähellä toisiaan. Suurjännitepuolella avojohtojen resistanssi voidaan jättää huomioimatta, koska resistanssiarvo on pieni verrattuna reaktanssiarvoon.

Taulukko 1. Johtojen resistanssi-/reaktanssi taulukko. /12./

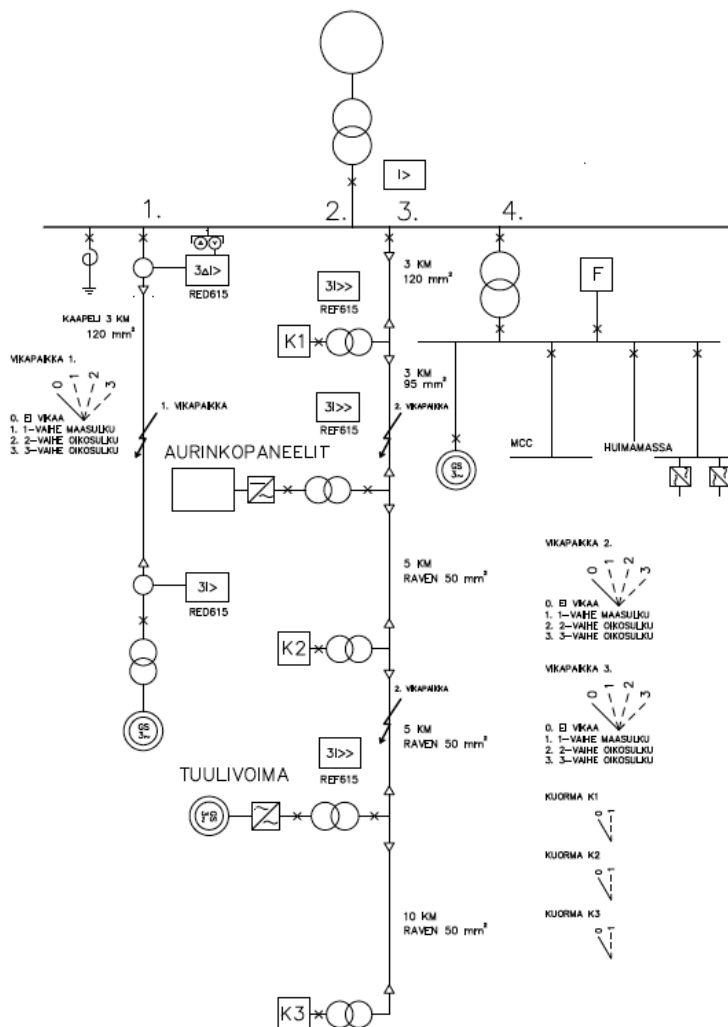
Johto	Jännitetaso kV	Resistanssi Ω/km	Reaktanssi Ω/km	Kuormitettavuus A	X/R
Amka 3×16+25	0,4	2,0	0,11	70	0,055
Amka 3×76+95	0,4	0,5	0,10	140	0,2
Swan (24/6)	0,4	1,5	0,4	155	0,26
Sparrow (34/6)	20	0,85	0,38	210	0,45
Raven (54/9)	20	0,54	0,4	280	0,74
A1132	20	0,22	0,35	495	1,6
AHXAMK-W 3×120	20	0,26	0,13	265	0,5
Duck	110	0,05	0,3	845	6

Jännitteenalenemaan pystytään vaikuttamaan mitoittamalla kaapeleiden poikkipinta-alat oikein ja loistehon kompensoinnilla muuntajan alajännitepuolella. Loistehon kompensoinnin vaikutus voidaan nähdä jännitteenalenemayhtälöstä. Resistanssi-/reaktanssiarvojen suhteen ollessa pieni, loisvirran tuottamat tehohäviöt ovat suuria ja jännitteenalenema pieni. Resistanssi/reaktanssi arvojen suhteen ollessa suuri, loisvirran tuottamat tehohäviöt ovat pieniä ja jännitteenalenema on suuri. /11./ /12./

6 JOHTOLÄHTÖJEN MALLINTAMINEN

6.1 Yleistä

Johtolähdöt mallinnetaan vaihekohtaisilla pii-sijaiskytkennällä, jossa lasketaan johdon resistanssi-, reaktanssi- ja kapasitanssiarvot. Kaapeleiden mallintamiseen laskennallisesti tarvittavat tiedot on haettu kaapelivalmistajan datalehdeltä. Johtolähdöille 1 ja 3 mallinnetaan 1-vaihe maasulku, 2-vaihe oikosulku ja 3-vaihe oikosulkuvikatilanteet. Vikatilanteet kytketään päälle ohjaamalla kontaktori vetävään tilaan. Mallin todellinen jännite on 400 V, mutta jännite mallinnetaan 20 kV tasolle jännitemuuntajalla. Virtamuuntajat 10/1 kuvataan mallissa 200/1 virtamuuntajina.



Kuvio 14. Verkkomallin johtolähdöt.

6.2 Johtolähdön 1 mallintaminen

Johtolähdön 1 pituus on 3 km ja johtolähdöllä käytetään 24 kV AHXAMK-W3 120 mm^2 kaapelia. Johtolähdölle on kytketty 6 kVA generaattori. Kaapelin mallintamisen laskennassa käytettiin Phrysmian kaapelivalmistajan datalehteä. Datalehdessä saadaan kaapelin resistanssiarvo $\frac{\Omega}{\text{km}}$ ja induktanssiarvo mH/km mistä lasketaan kaapelin reaktanssiarvo. Maasulkuvirran A/km taulukkoarvolla saadaan laskettua kapasitanssiarvo C_0 .

Taulukko 2. Phrysmian kaapelivalmistajan datalehti. /15./

<i>Tuotteen nimi</i>		AHXAMK-W 3x50AI+35Cu 20 kV	AHXAMK-W 3x95AI+35Cu 20 kV	AHXAMK-W 3x120AI+35Cu 20 kV	AHXAMK-W 3x150AI+35Cu 20 kV	AHXAMK-W 3x185AI+35Cu 20 kV	AHXAMK-W 3x240AI+70Cu 20 kV ^{*)}	AHXAMK-W 3x300AI+35Cu 20 kV ^{*)}
EAN-numero	(SSTL-numero) 64 100+	06 242 50-4	06 242 52-8	06 242 53-5	06 242 54-2	06 242 55-9	06 242 56-6	06 242 57-3

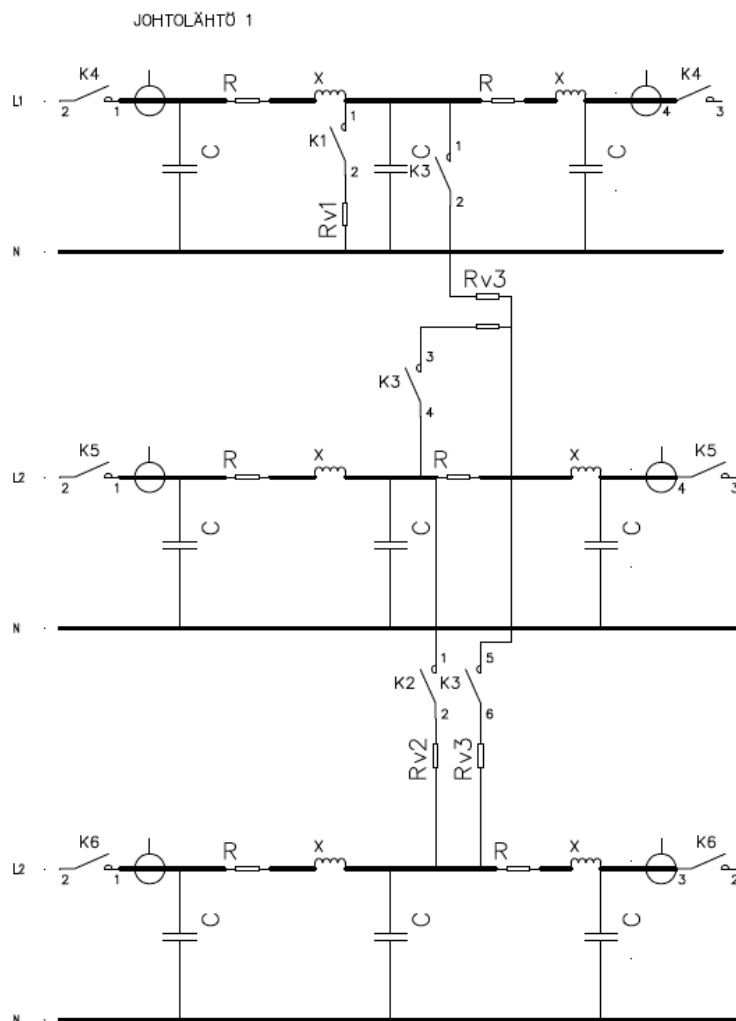
SÄHKÖISIÄ ARVOJA (2)									
Vaihejohtimen maks. tasavirtaresistanssi	johdin 20°C	Ω/km	0,641	0,320	0,253	0,206	0,164	0,125	0,100
Vaihejohtimen vaihtovirtaresistanssi (1) (4)	johdin 65°C	Ω/km	0,76	0,38	0,30	0,25	0,20	0,15	0,12
	johdin 90°C	Ω/km	0,82	0,41	0,33	0,27	0,21	0,16	0,13
Keskusköyden maks. tasavirtaresistanssi	johdin 20°C	Ω/km	0,524	0,524	0,524	0,524	0,524	0,268	0,268
Induktanssi vaihetta kohti (1)		mH/km	0,46	0,40	0,39	0,37	0,36	0,35	0,34
Käyttökapasitanssi (1)		μF/km	0,17	0,21	0,23	0,24	0,26	0,30	0,32
Varausvirta (1)		A/km	0,6	0,8	0,8	0,9	1,0	1,1	1,2
Maasulkuvirta (1)		A/km	1,8	2,3	2,5	2,6	2,9	3,2	3,5

3 km kaapeli 24 kV AHXAMK-W3 120 mm²

$$R = 0,30 \frac{\Omega}{km} * 3 km = 0,9 \Omega \quad (2)$$

$$X = 2\pi 50 * 0,39 * \frac{10^{-3}\Omega}{km} * 3 km = 0,368 \Omega \quad (3)$$

$$C_0 = \frac{2,5 \frac{a}{km}}{\sqrt{3} * 2\pi 50 * 20 kV} = (0,23 \frac{\mu F}{km} / \sqrt{3}) * 3 km = 0,398 \mu F \quad (4)$$



Kuvio 15. Johtolähdön 1 pii-sijaiskytkentä.

6.3 Johtolähdön 3 mallintaminen

Johtolähdön 3 pituus 26 km ja johtolähtö koostuu viidestä eri johto-osuudesta. 3 km 24 kV AHXAMK-W3 120 mm^2 , 3 km 24 kV AHXAMK-W3 120 mm^2 , 2x5 km ACSR 54/9 Raven ja 10 km ACSR 54/9 Raven avojohdosta. Johtolähdölle on liitetty 3,6 kW aurinkovoimajärjestelmä ja tuulivoimalamalli. Kaapeleiden mallintamisen laskennassa käytettiin Phrysmian kaapelivalmistajan datalehteä. Avojohtojen mallintamisen laskennassa käytettiin keskijänniteavojohdojen johtotietoja.

Taulukko 3. Keski­jännite­avojohtojen johtotietoja. /13./

Johdin	Resis tanssi Ω/km +40 °C	Reak tanssi Ω/km	Sallittu kuormit us ­ virta / A	$I_1\text{S}/\text{kA}$ T1 ­ liittimet	$I_1\text{S}/\text{kA}$ T2 ­ liittimet	Jäähtymis -aikavakio τ/min
Cu 16	1,23	0,412	145	2,2	2,3	3
Cu 25	0,774	0,398	195	3,5	3,7	4
Cu 35	0,567	0,387	240	4,8	5,1	5
Cu 50	0,394	0,377	305	6,9	7,3	7
Al 132	0,236	0,344	495	11,6	-	10
Al 201	0,155	0,331	645	17,7	-	15
Fersemal	1,68	0,398	145	1,9	2	3
Swan (21/4)	1,46	0,398	155	2	2,1	3
Sparrow(34/ 6)	0,915	0,383	210	3,2	3,3	4
Raven(54/9)	0,578	0,368	280	5,1	5,3	6
Pigeon(85/1 4)	0,364	0,354	360	8	8,4	9
PAS 35	1,065	0,324	200	-	3,2	7
PAS 50	0,778	0,312	245	-	4,3	8
PAS 70	0,533	0,302	310	-	6,4	10
PAS 120	0,311	0,284	430	-	11	15
PAS 185	0,203	0,270	560	-	17	20
SAMKA 3x70	0,482	0,140	180	5	5	42
SAMKA 3x120	0,277	0,130	250	8,5	8,5	60
SAMKA 3x185	0,182	0,120	310	13	13	65

3 km kaapeli 24 kV AHXAMK-W3 120 mm²

$$R = 0,30 \frac{\Omega}{\text{km}} * 3 \text{ km} = 0,9 \Omega \quad (5)$$

$$X = 2\pi 50 * 0,39 * \frac{10^{-3}\Omega}{\text{km}} * 3 \text{ km} = 0,368 \Omega \quad (6)$$

$$C_0 = = \frac{2,5 \frac{\mu\text{F}}{\text{km}}}{\sqrt{3} * 2\pi 50 * 20 \text{ kV}} = (0,23 \frac{\mu\text{F}}{\text{km}} / \sqrt{3}) * 3 \text{ km} = 0,398 \mu\text{F} \quad (7)$$

3 km kaapeli 24 kV AHXAMK-W3 95 mm²

$$R = 0,38 \frac{\Omega}{km} * 3 km = 1,14 \Omega \quad (8)$$

$$X = 2\pi 50 * 0,40 * \frac{10^{-3}\Omega}{km} * 3 km = 0,377 \Omega \quad (9)$$

$$C_0 = = \frac{2,3 \frac{\mu F}{km}}{\sqrt{3} * 2\pi 50 * 20 kV} = (0,211 \frac{\mu F}{km} / \sqrt{3}) * 3 km = 0,365 \mu F \quad (10)$$

5 km kaapeli ACSR 54/9 Raven

$$R = 0,578 \frac{\Omega}{km} * 5 km = 2,89 \Omega \quad (11)$$

$$X = 0,368 \frac{\Omega}{km} * 5 km = 1,84 \Omega \quad (12)$$

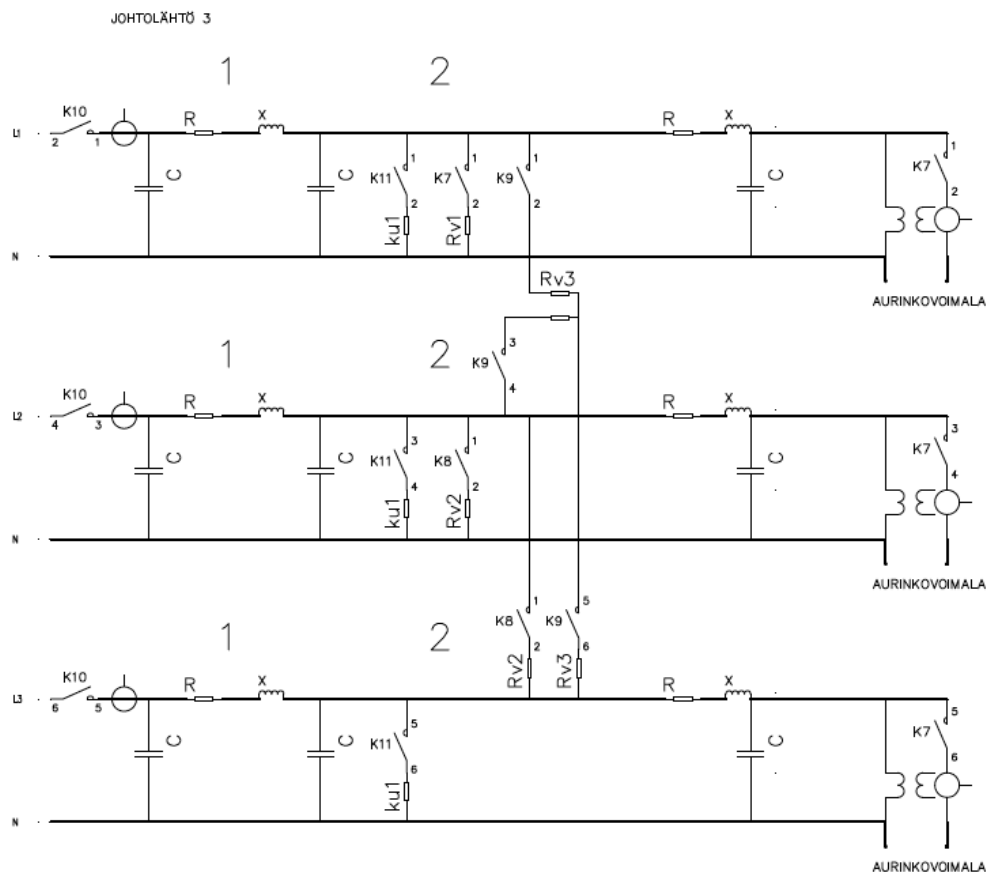
$$C_0 = 6,13 \frac{nF}{km} * 5 km = 30,65 nF \quad (13)$$

10 km kaapeli ACSR 54/9 Raven

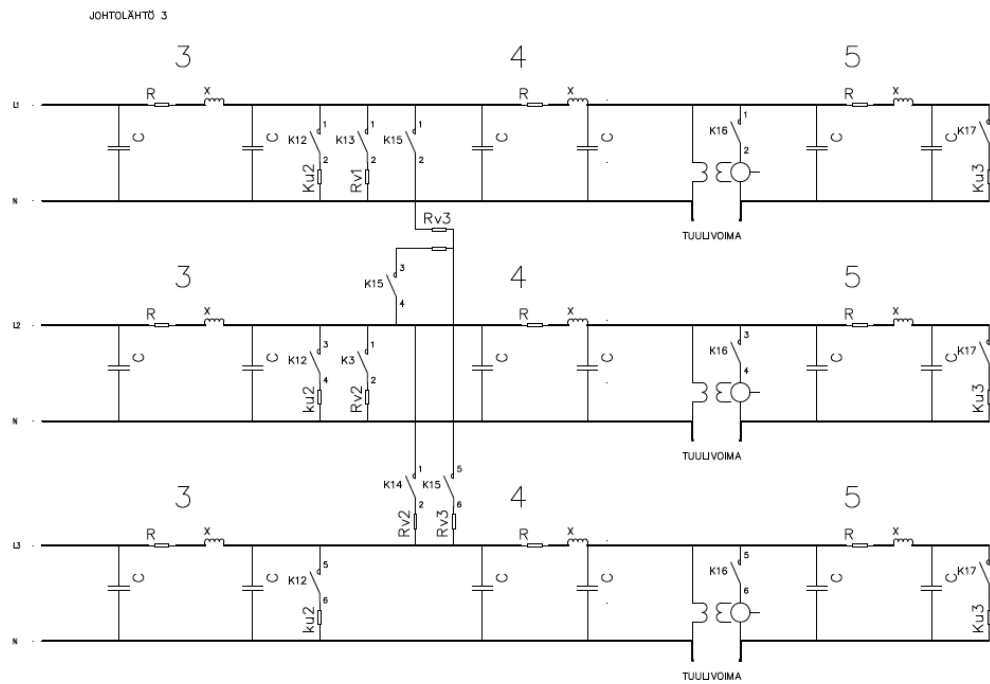
$$R = 0,54 \frac{\Omega}{km} * 10 km = 5,4 \Omega \quad (14)$$

$$X = 0,4 \frac{\Omega}{km} * 10 km = 4 \Omega \quad (15)$$

$$C_0 = 6,13 \frac{nF}{km} * 10 km = 61,3 nF \quad (16)$$



Kuvio 16. Johtolähtö 3 kaapeleiden 1 ja 2 pii-sijaiskytkentä.



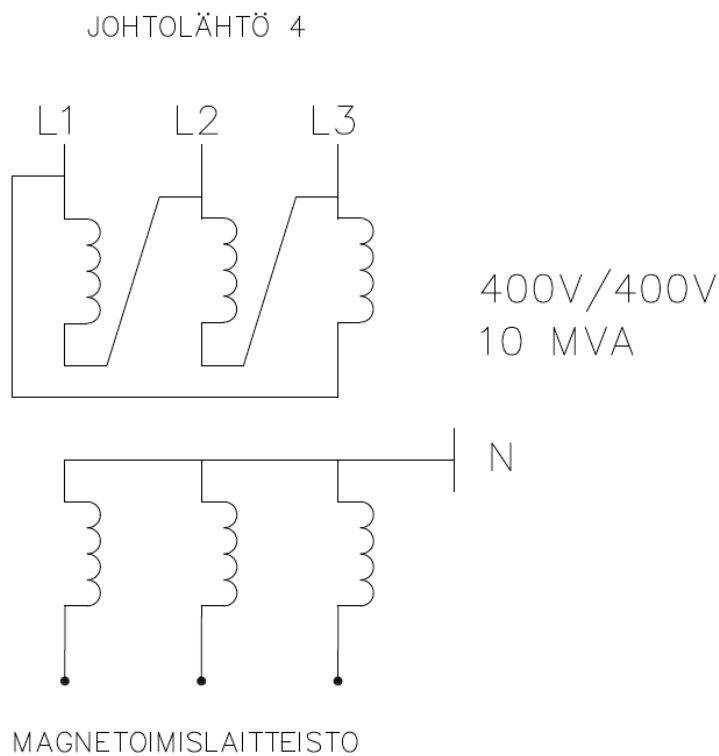
Kuvio 17. Johtolähtö 3 kaapeleiden 3,4 ja 5 pii-sijaiskytkentä.

6.4 Johtolähdön 4 mallintaminen

Johtolähtö 4 kuvaa teollisuusverkon ominaisuuksia, jossa pienjännitekojeistoa syötetään muuntajan kautta. Pienjännitekojeistoon on liitetty dieselgeneraattori, mcc-moottorin ohjauskeskus, yliaaltosuodatin, huimamassakone.

Teollisuusverkon mallilla pyritään havainnollistamaan jännitteenalenemaa sekä virta- ja jänniteyliaaltojen vaikutusta eri toimintatilanteissa. Jännitteenalenemaa pienennetään generaattorin loistehonsyötöllä eli magnetoinnin säädöllä.

Teollisuusverkon mallissa käytetään 400 V / 400 V, 10 MVA-muuntajaa. Muuntajan ensiöpuolen käämit on kytketty kolmioon ja toisiopuoli on kytketty tähteen.



Kuvio 18. Johtolähdön 4 muuntaja.

6.5 20 kV jännitteen, virran ja kuormien mallintaminen

Mallin todellinen jännite 400 V mallinnetaan 20 kV tasolle käyttämällä suojateleasetteluissa 20/0,1 kV jännitemuuntajia todellisen jännitemuuntajan ollessa 400/100 V.

Johtolähdöllä 3 käytettävät vastuskuormat ovat todellisuudessa 1 kW kuormia, mutta ne mallinnetaan 1 MW kuormiksi.

Mallin todellinen jännite 400 V \rightarrow kuvataan 20 kV jännitettä (1:50).

Mallin virtamuuntajat 10/1 A \rightarrow kuvataan 200/1 A (1:20).

Todellinen teho 1 kW \rightarrow kuvaa tehoa 1 MW.

Esimerkkilasku johtolähdöllä 1.

Todellinen virta 8,7 A ja jännite 400 V

Simuloitu virta

$$I = 20 * 8,7 A = 174 A \quad (17)$$

Simuloitu jännite

$$U = 50 * 400 V = 20000 V \quad (18)$$

Teho

$$S = \sqrt{3} * 20000 * 174 A = 6 MVA \quad (19)$$

Vastuskuorman malli

$$1 \text{ kW} \rightarrow R_{0,4} = \frac{(400 \text{ V})^2}{1000 \text{ W}} = 160 \Omega \quad (20)$$

$$\text{Vastaa } R_{20} = \frac{5}{2} * 160 \Omega = 400 \Omega \quad (21)$$

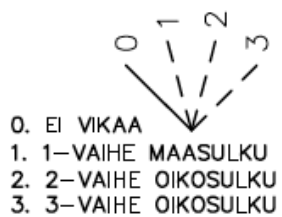
$$\text{Teho } P_{20} = \frac{(20 \text{ kV})^2}{400 \Omega} = 1 \text{ MW} \quad (22)$$

7 PANEELIN OHJAUSPIIRIT

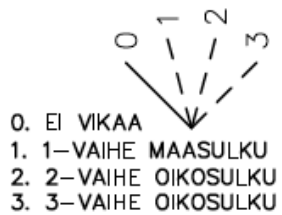
7.1 Vikapaikan valinta

Verkkomallissa voi kytkeä 1-vaihe maasulun, 2-vaihe oikosulun tai 3-vaihe oikosulun johtolähdöille 1 ja 3. Johtolähdöllä 1 on 1 vikapaikka ja johtolähdöllä 3 on 2 eri vikapaikkaa. Vikapaikka valitaan verkkomallin paneelissa olevilla 3:lla 4-napaisilla kytkimillä.

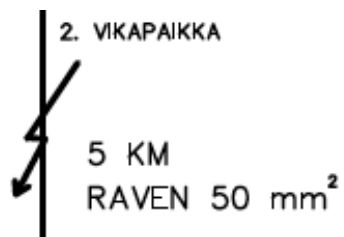
VIKAPAikka 2.



VIKAPAikka 3.



Kuvio 19. Johtolähdön 3 vikapaikan valintakytkin.

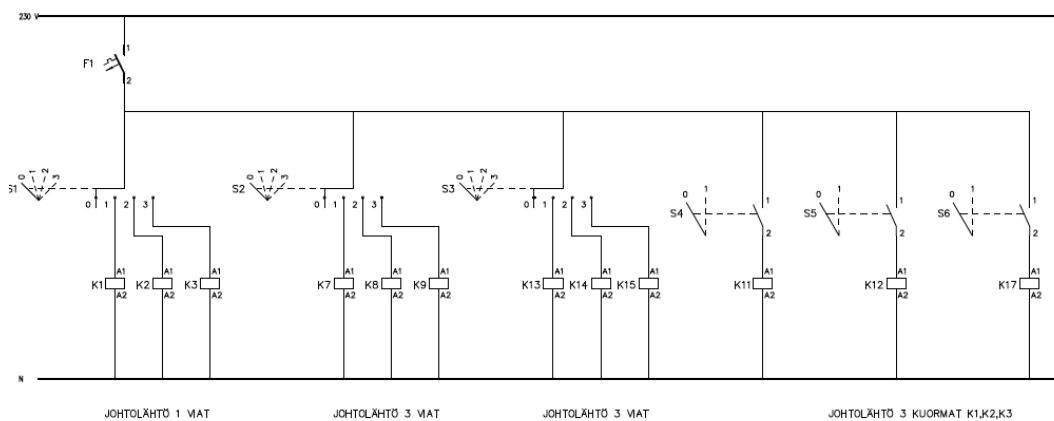


Kuvio 20. Vikapaikka kuvattuna johtolähdöllä.

7.2 Vikojen ja kuormien kytkentä

Johtolähdölle kytketään vika 4-napaisella valintakytkimellä valitsemalla 1-vaihe maasulku, 2-vaihe oikosulku tai 3-vaihe oikosulku. Johtolähdön 1 viat kytketään S1 valintakytkimellä ja johtolähdön 2 viat valintakytkimellä S2 ja S3. Valintakytkin ohjaa kontaktorin vetävään tilaan ja vika kytkeytyy johtolähdölle päälle. Esimerkiksi johtolähdön 1 3-vaihe oikosulku kytketään S1 valintakytkimen asennolla 3 mikä kytkee kontaktorin K3 vetävään tilaan. Kontaktori K3 kytkee L1, L2 ja L3 vaiheiden Rv3 vikavastukset tähtikytkentään.

Kuormat K1, K2 ja K3 kytketään johtolähdölle 3 valinta kytkimillä S4, S5 ja S6.



Kuvio 21. Kontaktorien ohjauksen piirikaavio.

8 YHTEENVETO

Työssä on tehty hajautetun sähköntuotannon verkkomallin esisuunnitelma, jossa on suunniteltu verkkomallin layoutkuva, johtolähtöjen pii-sijaiskytkennät, paneelin ohjauspiirin piirikavio, verkkomallin jännitteen ja kuormien mallintaminen 20 kV tasolle todellisen jännitteen ollessa 400 V. Työssä on selvitetty myös hajautetun verkon suojausta, verkosta eroon kytkentätilanteita ja loistehon säädön merkitystä jännitteen alenemaan.

Tehtäväksi jää vielä verkkomallin laitekaapin tarkemman layoutin suunnitelman tekeminen ja kaapin kytkentäkuvien suunnittelu riviliitintasolla. Suojareleiden suojauksen asetteluiden suunnittelu ja testaus.

LÄHTEET

- /1/ ABB sähkönjakelu monimuotoistuu. Viitattu 1.4.2013.
<http://www.abb.fi/cawp/seitp202/c28f93fc6a4838fac125755f0028a8fa.aspx>
- /2/ ABB johtodifferentiaalirele RED615 esite. Viitattu 1.4.2013.
[http://www05.abb.com/global/scot/scot229.nsf/veritydisplay/4a1ada2c6aaa2823c12576b8004ad8fc/\\$file/RED615_broch_756728_LRFIa.pdf](http://www05.abb.com/global/scot/scot229.nsf/veritydisplay/4a1ada2c6aaa2823c12576b8004ad8fc/$file/RED615_broch_756728_LRFIa.pdf)
- /3/ ABB 615-sarja käyttöohje. Viitattu 1.4.2013.
[http://www05.abb.com/global/scot/scot229.nsf/veritydisplay/63f24f53d4a84effc12577f20036a373/\\$file/RE_615_oper_756792_FIc.pdf](http://www05.abb.com/global/scot/scot229.nsf/veritydisplay/63f24f53d4a84effc12577f20036a373/$file/RE_615_oper_756792_FIc.pdf)
- /4/ ABB 615-series 4.0 FP1 IEC, Technical manual. Viitattu 1.4.2013.
[http://searchext.abb.com/LibraryDownloadManager/Default.aspx?resource=http://www05.abb.com/global/scot/scot229.nsf/veritydisplay/cee1794b84814681c1257b2f00402cba/\\$file/RE_615_tech_756887_ENg.pdf](http://searchext.abb.com/LibraryDownloadManager/Default.aspx?resource=http://www05.abb.com/global/scot/scot229.nsf/veritydisplay/cee1794b84814681c1257b2f00402cba/$file/RE_615_tech_756887_ENg.pdf)
- /5/ Koivunen, T. 2011. Tuulipuiston sähköverkon suojaus. Viitattu 15.4.2013. Tampereen teknillinen yliopisto, Helsinki. Diplomityö.
<http://dspace.cc.tut.fi/dpub/bitstream/handle/123456789/6887/koivunen.pdf?sequence=3>
- /6/ Kivinen, J. 2008. Hajautetun sähköntuotannon verkosto vaikutukset. Viitattu 16.4.2013. Lappeenrannan teknillinen yliopisto, Lappeenranta. Kandidityö.
https://www.doria.fi/bitstream/handle/10024/42055/Kandi_Kivinen_Jyri.pdf?sequence=1
- /7/ Pajulahti, J. 2009. Tahtigeneraattorin magnetointijärjestelmän nykyaikais-taminen. Tampereen Ammattikorkeakoulu, Tampere. Opinnäytetyö.
- /8/ Mäki, K. 2004. Keski-jänniteverkkoon liitetyn hajautetun tuotannon vaikutus oikosulkusuojaukseen. Tampereen teknillinen yliopisto. Raportti.
- /9/ Lana, A. 2008. Pienitehoisen CHP-laitoksen verkkoon liityntä. Lappeenrannan teknillinen yliopisto, Lappeenranta. Diplomityö.
<http://www.doria.fi/bitstream/handle/10024/36588/nbnfi-fe200802131083.pdf?sequence=3>
- /10/ Björkqvist, O. 2011. Pori energia oy Aittaluodon voimalaitoksen 20 kV:n verkon loistehon hallinta. Satakunnan ammattikorkeakoulu, Pori. Opinnäytetyö.
http://publications.theseus.fi/bitstream/handle/10024/29638/opinnaytetyo_olli_bjorkqvist_2011.pdf?sequence=1
- /11/ Jokinen, K. 2012. Teollisuuden sähköjärjestelmät. Vaasan ammattikorkeakoulu.
- /12/ Äijälä, I. 2008. Jännitteen säätö hajautetun tuotantoyksikön verkkovaihtouuntaajalla. Projektityö. Tampereen teknillinen yliopisto.

http://butler.cc.tut.fi/~repo/Opetus/Projektityot/Ilari_Aijala_Jannitteen%20saato%20hajautetun%20tuotantoyksikon%20verkkovaihtosuuntaajalla.pdf

/13/ Mäkinen, O. Relesuojaus. 2012. Vaasan ammattikorkeakoulu.

/14/ Verkkonen, V. 2007. Sähkömoottorikäytöt tahtikoneet. Vaasan ammattikorkeakoulu.

/15/ AHXAMK-W3 3-johtimen datalehti. Viitattu 20.5.2013.

http://www.prysmian.fi/export/sites/prysmianfiFI/attach/pdf/Powercables/ahxamkw20_fi.pdf