



VAASAN AMMATTIKORKEAKOULU
UNIVERSITY OF APPLIED SCIENCES

Emil Kronman

ANALOGISEN VERKKOMALLIN SUUNNITTELU

Tekniikka
2022

TIIVISTELMÄ

Tekijä	Emil Kronman
Opinnäytetyön nimi	Analogisen verkkomallin suunnittelu
Vuosi	2022
Kieli	suomi
Sivumäärä	69
Ohjaaja	Mikko Västi + Tero Virtala

Opinnäytetyön aiheena oli suunnitella fyysinen verkkomalli, joka simuloi oikeaa sähköverkkoa. Verkkomallin tarkoituksena on toimia testilaitteistona suojarelekehitykselle.

Työhön liittyi tutkimusta muun muassa sähköverkon tyyppisimmistä vioista, verkon rakenteesta sekä johtojen mallintamisesta sijaiskytkennöin. Työssä tutustuttiin tarkemmin symmetristen komponenttien käsittelyyn johtomallien mallinnuksessa. Lisäksi työn yhtenä osana oli ottaa huomioon rakennettavan testilaitteiston turvallisuus ja sähköinen kesto vikatilanteita muodostettaessa.

Tutkimuksen tuloksena löydettiin oikeat sijaiskytkennät sekä kaapelille että suurjännitejohdolle. Nämä asiat varmistettiin käyttämällä simulointiohjelmaa, johon luotiin verkkomallia vastaava kytkentä. Työ osoittaa, että oikeaa sähköverkkoa on mahdollista mallintaa tavallisia sähkötekniisiä komponentteja käyttäen.

ABSTRACT

Author	Emil Kronman
Title	Design of Network Simulator
Year	2022
Language	Finnish
Pages	69
Name of Supervisor	Mikko Västi + Tero Virtala

The objective of this thesis was to design a network simulator that simulates an authentic power grid using analog components. The simulator was designed for the purpose of protection relay development and testing.

The study of the thesis focused on different fault types and electrical parameters of power transmission and distribution lines as well as on how to create equivalent circuits of these conditions. The modeling of overhead lines and cables was done using symmetrical components that played a crucial part in the study. The electrical safety of the simulator as well as the ratings of the components also had to be taken into consideration.

Finally the equivalent circuits of the lines were tested and simulated with a simulation software, PSCAD, to validate the design and calculations. This thesis shows that a network simulator based on analog components simulates a real network with sufficient accuracy for relay testing purposes.

SISÄLLYS

TIIVISTELMÄ

ABSTRACT

KUVA- JA TAULUKKOLUETTELO

1	JOHDANTO.....	8
1.1	Yritysesittely.....	8
1.2	Tutkimusongelma	8
2	SIIRTO- JA JAKELUVERKKO.....	10
2.1	Siirtoverkko	11
2.2	Jakeluverkko.....	14
2.3	Verkon vikatilanteet ja suojaus.....	16
2.4	Oikosulut	18
2.5	Maasulut	19
3	VERKKOMALLIN LUOMINEN JA MITOITTAMINEN.....	24
3.1	Pääkaavio	24
3.2	Perusmitoituseriaatteet.....	26
3.3	Johtomallin mitoitus	31
3.4	Mittamuuntajien mitoitus	38
3.5	Mallin ohjaus.....	39
4	VERKKOMALLIN SIMULOINTI PSCAD-OHJELMISTOLLA.....	41
4.1	Mallinnus.....	41
4.2	Mittauksien toteutukset	44
4.3	Testaus	47
5	VERKKOMALLIN TOTEUTUS.....	60
5.1	Mimiikka.....	60
5.2	Piirikaaviot ja layout.....	61
6	YHTEENVETO	66
	LÄHTEET	68

KUVA- JA TAULUKKOLUETTELO

Kuva 1. Suomen sähkösiirtoverkko.....	13
Kuva 2. Maasta erotetun verkon maasulku.....	20
Kuva 3. Kompensoidun verkon maasulku.....	21
Kuva 4. Tehollisesti maadoitetun verkon maasulku.....	22
Kuva 5. Verkkomallin pääkaavio	25
Kuva 6. Generaattorin teknisiä tietoja.....	28
Kuva 7. Kaapelimallin sijaiskytkentä.....	32
Kuva 8. Siirtojohtomallin sijaiskytkentä.....	32
Kuva 9. Nollaverkon kytkeytyminen.....	35
Kuva 10. Yksivaiheisen maasulun sijaiskytkentä.....	36
Kuva 11. Verkkomallin kytkentä PSCADissa.....	42
Kuva 12. Kuorman mallinnus PSCADissa.....	42
Kuva 13. Siirtojohdon sijaiskytkentä.....	43
Kuva 14. Maakaapelin sijaiskytkentä.....	43
Kuva 15. Jännitteiden FFT-muunnoskomponentti.....	44
Kuva 16. Virtojen symmetristen komponenttien erottelu FFT-komponentilla....	44
Kuva 17. Vaihe – vaihe -silmutkaimpedanssimittaus.....	45
Kuva 18. Vaihe – maa -silmutkaimpedanssimittaus.....	45
Kuva 19. PSCADin Pi Section -komponentti.....	46
Kuva 20. Pi Section -komponentin impedanssit.....	46
Kuva 21. Pi Section -komponentin sisäinen kytkentä.....	47
Kuva 22. Siirtojohdon (20 km) varausvirrat.....	48
Kuva 23. Pi section -komponentin varausvirrat.....	48
Kuva 24. A-vaiheen maasulkuvirta siirtojohdolla.....	49
Kuva 25. Maasulun aikaiset jännitteet.....	49
Kuva 26. Pi section -komponentin tuottama maasulkuvirta.....	49
Kuva 27. Maakaapelin (1,6 km) varausvirta.....	50
Kuva 28. Maasulun nollajännite ja -virta maasta erotettuna. Vihreä=nollajännite, sininen=nollavirta.....	50

Kuva 29. Maasulkuvirta kaapelilla (1,6 km) maasta erotetussa verkossa.	51
Kuva 30. Kaapelin maasulkuvirta, taustaverkko kytkettynä.....	52
Kuva 31. Kaksivaiheisen oikosulun linjan resistanssi ja reaktanssi (20 km linja)..	52
Kuva 32. Kaksi samanlaista sijaiskytkentää peräkkäin. Linjan kokonaispituus 40 km.	53
Kuva 33. Kaksivaiheisen oikosulun linjan resistanssi ja reaktanssi (40 km linja)..	53
Kuva 34. Maakaapelin kaksivaiheisen oikosulun linjan resistanssi ja reaktanssi (1,6 km).	53
Kuva 35. Yksivaiheisen maasulun resistanssi ja reaktanssi (20 km).	54
Kuva 36. Maasulkuvirran hetkellisarvokuvaaja.	54
Kuva 37. Sammutetun verkon maasulkuvirta (A-vaihe).	56
Kuva 38. Sammutetun verkon nollajännite ja -virta maasulun aikana.....	56
Kuva 39. Kaapelimallin varausvirta korjatuilla arvoilla.	57
Kuva 40. Kaapelimallin maasulkuvirta (A-vaihe) korjatuilla arvoilla.	57
Kuva 41. Jännitteet maasta erotetussa verkossa maasulun aikana.	57
Kuva 42. Maakaapelin maasulku kondensaattorin 20 %:n toleranssilla.	58
Kuva 43. Siirtojohtomallin oikosulun vikasilmukkamittauksen resistanssi ja reaktanssi korjatuilla arvoilla.	58
Kuva 44. Siirtojohtomallin maasulun vikasilmukkamittauksen resistanssi ja reaktanssi korjatuilla arvoilla.	59
Kuva 45. Siirtojohtomallin maasulun vikasilmukkamittauksen resistanssi ja reaktanssi korjatuilla arvoilla ja kelojen 20 %:n toleranssilla.	59
Kuva 46. Verkkomallin etupaneelin mimiikka.	61
Kuva 47. Verkkomallin liityntä.	62
Kuva 48. Verkkomallin päävirtapiiri.	63
Kuva 49. Vikakomponentti.....	64
Kuva 50. Kuormakomponentti.....	64
Kuva 51. Verkkomallin layout.	65
 Taulukko 1. Johtopituudet.....	26

Taulukko 2. Komponenttien korjauskertoimet.	30
Taulukko 3. Siirto johdon myötäverkon impedanssit.....	33
Taulukko 4. Siirto johdon nollaverkon impedanssit.	34
Taulukko 5. Siirto johdon maapiirin impedanssit.....	36
Taulukko 6. Maakaapelin impedanssit.	37
Taulukko 7. Siirtojohtomallin korjatut myötäimpedanssit.....	37
Taulukko 8. Siirtojohtomallin korjatut maapiirin impedanssit.....	38
Taulukko 9. Maakaapelimallin korjatut myötäimpedanssit.	38
Taulukko 10. Maakaapelimallin korjattu maapiirin resistanssi.	38

1 JOHDANTO

Tässä opinnäytetyössä tutkitaan, miten sähköverkkoa mallintava analoginen verkkomalli toteutetaan sijaiskytkentöjen komponenttien mitoittamisesta oikean mallin simulointiin. Työssä tutustutaan myös sähköverkkoihin, niiden ominaisuuksiin ja rakenteisiin sekä verkon vikatilanteisiin. Lisäksi kyseisiä asioita tutkitaan PSCAD-simulointiohjelmalla.

1.1 Yritysesittely

Työn toimeksiantajana oli vaasalainen Arcteq Relays Oy. Vuonna 2010 perustettu yritys valmistaa sähköverkon suojaareleitä ja valokaarisuojia globaaleille markkinoille. Arcteqin tuotteet soveltuvat lukuisiin erilaisiin kohteisiin, jotka vaativat nopeaa ja luotettavaa suojausta, sähköntuotannosta sähkönjakeluun sekä teollisuudesta koulutuslaitoksiin. Arcteqin tuotanto ja tuotekehitys tapahtuvat lähes täysin Vaasassa tukeutuen vankkaan paikalliseen tietotaitoon relesuojaukseen liittyen.

1.2 Tutkimusongelma

Työn tarkoituksena oli kehittää testauslaitteisto Arcteqille suojaareiden testaamiseen. Verkkomallin avulla Arcteq pystyisi kehittämään ja testaamaan tuotteitaan helppokäyttöisesti paikan päällä laboratoriossa luomalla todellisia sähköverkoja vastaavat olosuhteet.

Työ alkoi sähkönsiirto- ja jakeluverkon sähköisten parametrien selvittämisellä. Näiden selvittämistä varten lähetettiin siirtoverkkoyhtiö Fingridille sekä jakeluverkkoyhtiö Vaasan Sähköverkolle kyselyt, joiden myötä päästiin alkuun verkon mallintamisessa. Tämän jälkeen vuorossa oli sijaiskytkennän suunnittelu sekä parametrien laskenta ja mitoittaminen muun muassa symmetrisiä komponentteja käyttäen.

Lisäksi työssä suunniteltiin vikamallinnukset sekä niiden ohjaukset ja turvarajat. Vikamallinnuksia tehdessä otettiin huomioon myös suojafunktioiden toimintojen vaatimukset sekä erilaisten kuormitusten kytkeminen ja niiden muuttaminen.

Lopuksi suunniteltua verkkomallia tutkittiin PSCAD-simulointiohjelmalla, jolla myös varmistettiin mallin toimivuus sekä varmistuttiin komponenttimitoitusten onnistumisesta.

2 SIIRTO- JA JAKELUVERKKO

Suuren tehon siirtäminen kuluttajille pitkienkin etäisyyksien päähän on haastavaa. Ohmin lain mukaan teho- eli lämpöhäviö on suoraan verrannollinen johtimen resistanssiin ja siinä kulkevan virran neliöön. Virtaa pienentämällä pienennetään siis suoraan myös häviöitä. Virtaa saadaan pienennettyä Joulen lain mukaisesti kasvattamalla jännitettä samassa suhteessa. Tämän takia niissä verkon osissa, joissa siirretään suurta tehoa, käytetään korkeaa jännitettä. Tyypilliset jännitetasot Suomessa ovat 400 kV, 220 kV ja 110 kV siirtoverkossa ja 20 kV sekä 400 V jakeluverkossa.¹

Sähköverkko koostuu ilmajohdoista sekä maan alla olevista kaapeleista. Eri johdinlajeilla on erilaisia sähköisiä ominaisuuksia, jotka riippuvat esimerkiksi johtimen materiaalista, asennustavasta sekä vierekkäisistä piireistä. Edellä mainitut seikat vaikuttavat johdon resistanssiin ja reaktanssiin.²

Johtimen resistanssi riippuu sen valmistusmateriaalista ja poikkipinta-alasta. Esimerkiksi alumiinijohdinta käytettäessä täytyy valita noin kaksi kertaa suurempi johtimen poikkipinta-ala verrattuna kuparijohtimeen. 20 kV:n johtimien resistanssi on huomattavan paljon suurempi verrattuna 400 kV:n johtimeen pienemmästä pinta-alasta johtuen. Sähköverkon johdoilla on myös konduktanssia eli vuotohäviöitä, joita kuvataan poikittaisresistansseina. Konduktanssit ovat kuitenkin tyypillisesti niin suuria, ettei niitä oteta huomioon johtojen sijaiskytkennöissä.³

¹ Elovaara, Haarla 2011 a, 54

² Elovaara, Haarla 2011 a, 99

³ Elovaara, Haarla 2011 a, 98-100

Johtojen reaktansseihin vaikuttavat asennustapa sekä läheisten johtimien määrä ja etäisyys. Reaktanssit jaetaan edelleen induktansseihin ja kapasitansseihin. Johtimen induktanssi aiheutuu johtimen itse ympärilleen synnyttämästä magneettivuosta sekä viereisten johtimien vaikutuksesta siihen, eli puhutaan itseis- ja keskinäisinduktanssista. Viereisiin johtimiin lasketaan mukaan sekä muut vaihejohtimet että paluujohdin, eli ukkosjohdin tai maapiiri.⁴ Johtojen kapasitansseihin vaikuttaa ensisijaisesti asennustapa. Koska kapasitanssi kasvaa kääntäen verrannollisesti varausten etäisyyteen, tarkoittaa tämä, että esimerkiksi samalla tasolla kulkevien johtimien maakapasitanssit ovat yhtä suuret, mutta keskinäiskapasitanssit ovat epätasaiset. Kolmiomuotoon asentaminen sen sijaan tasaa keskinäiskapasitanssit, mutta aiheuttaa eriävät maakapasitanssit.⁵

2.1 Siirtoverkko

Siirtoverkolla tarkoitetaan sähköverkon osaa, jolla on korkeimmat jännitteet ja joissa siirretään suurta määrää tehoa. Sähkönsiirtoverkkoa kutsutaan myös kantaverkoksi, ja se kattaa 400 kV:n, 220 kV:n sekä 110 kV siirtoverkot. Suomessa kantaverkon 400 kV:n ja 220 kV:n osat omistaa Fingrid, joka vastaa sen toiminnasta ja käyttövarmuudesta. Lisäksi Fingrid omistaa osan 110 kV:n verkosta.⁶ Siirtoverkkoon liitytään esimerkiksi sähköä tuottavista voimalaitoksista, joiden generaattorien tuottama jännite nostetaan 400 kV:n tai 220 kV:n tasolle. Lisäksi kantaverkkoon liittyvät suoraan suuret teollisuuslaitokset. Siirtoverkossa johtojen pituudet

⁴ Elovaara, Haarla 2011 a, 104-105

⁵ Elovaara, Haarla 2011 a, 122-123

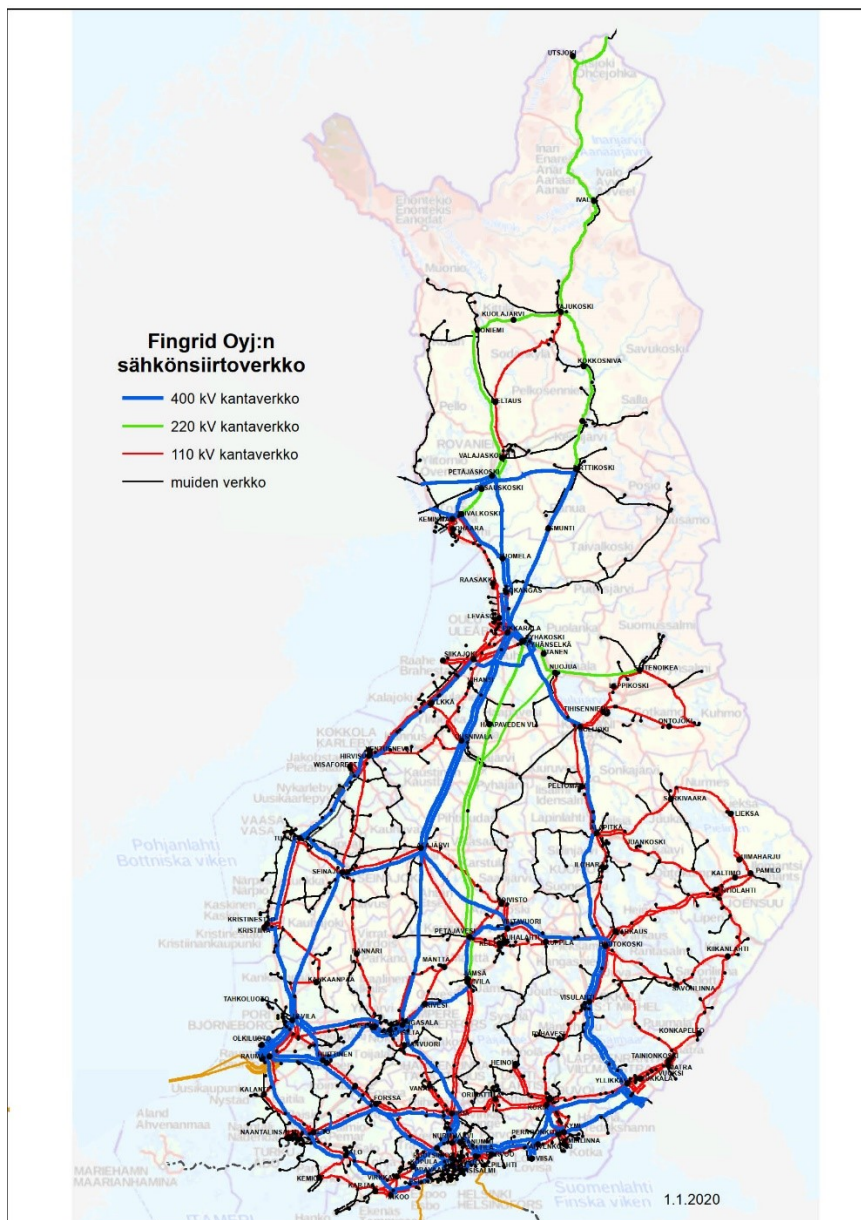
⁶ Fingrid 2020. Suomen sähköjärjestelmä

voivat olla jopa satoja kilometrejä. Tästä johtuen siirtoverkon johdintyypit ovat lähes yksinomaan ilmajohtoa. Suurjännitekaapeleita esiintyy kuitenkin joissakin kaupunkiympäristöissä, kuten Helsingissä.⁷

Sähkönsiirron luotettavuuden parantamiseksi siirtoverkon rakenne on useimmiten rengasmainen, eli tehoa voidaan syöttää renkaan molemmista suunnista. Tällöin sähkökatkon haittavaikutusalue on pienempi. Toisin kuin jakeluverkossa, siirtoverkossa verkkosilmukat ovat yleensä suljettuja häviöiden pienentämiseksi.⁸ Suomen siirtoverkko on esitetty kuvassa 1.

⁷ Elovaara, Haarla 2011 a, 55, 57

⁸ Elovaara, Haarla 2011 a, 57



Kuva 1. Suomen sähkösiirtoverkko⁹.

Mahdollisimman pienet teho- ja jännitehäviöt ovat sähkön laadun kannalta tärkeitä seikkoja. Häviöitä pyritään alentamaan aiemmin mainittujen asioiden lisäksi

⁹ Fingrid 2020. Fingridin sähkösiirtoverkko

myös johdinrakenteilla ja asennustavoilla. Siirtoverkoissa käytetään useimmiten kahta tai kolmea osajohdinta vaihetta kohden, jotta yksittäisten johtimien poikkipinta-alat eivät kasva mahdottoman suuriksi. Osajohtimia käyttämällä saadaan resistanssia alennettua puoleen, kun käytössä on kaksi osajohdinta, tai kolmasosaan kolmen osajohtimen tapauksessa.¹⁰

Resistanssi on kuitenkin häviävän pieni siirtojohdoissa verrattuna johtimien reaktanssiin. Kuten aiemmin todettua, johtojen reaktanssiin vaikuttavat viereiset johtimet. Sekä induktanssia että kapasitanssia pyritään avojohdoilla tasaamaan vuorottelun avulla. Vuorottelulla tarkoitetaan vaihejohtimien paikan vaihtumista sekä pysty- että sivuttaissuunnassa, jolloin esimerkiksi yhden vaiheen maakapasitanssi ei kasva muiden vaiheiden maakapasitanssia suuremmaksi.¹¹

Siirtoverkot ovat Suomessa tehollisesti maadoitettuja. Tämä tarkoittaa, että verkon tähtipiste on maadoitettu virtaa rajoittavien kuristimien kautta, millä alennetaan maasulkuvirtoja sekä pienennetään maasulun aikaista terveiden vaiheiden jännitteen kasvua.¹²

2.2 Jakeluverkko

Jakeluverkko on se verkon osa, johon tavallinen sähkönkuluttaja liittyy. Jakeluverkoilla yleisimmät jännitetasot Suomessa ovat alle 110 kV, tyypillisimmin 20 kV ja 400 V.¹³ Sähkönjakelusta kuluttajille vastaa suuri määrä eri sähkönjakeluyhtiöitä. Esimerkiksi Vaasan alueella Vaasan Sähköverkko omistaa jakeluverkon ja ylläpitää sen toimivuutta¹⁴.

¹⁰ Elovaara, Haarla 2011 a, 99

¹¹ Elovaara, Haarla 2011 a, 107

¹² Elovaara, Haarla 2011 b, 337

¹³ Lakervi, Partanen 2009, 11

¹⁴ Vaasan Sähköverkko 2020

Jakeluverkkoa on rakennettu sekä silmukkamaisesti että säteittäisesti. Silmukoita ei kuitenkaan tavallisesti pidetä kiinni, sillä rengaskäyttö vaatii huomattavasti monimutkaisemmat suojausasettelut ja on muutenkin vaikeampi käyttää. Silmukkaomainen rakenne mahdollistaa kuitenkin vikatilanteissa sähkön syötön vikaan nähdessä vastakkaisesta suunnasta, jolloin säteittäisverkkoon verrattuna mahdollistetaan lyhemmät sähkökatkokset. Taloudellisista syistä johtuen maaseudulla sijaitsevat jakeluverkot ovat pääosin säteittäin rakennettuja, kun taas suuremman asiakasmäärän taajamat ovat rengasmaisesti rakennettuja.¹⁵

Toisin kuin siirtoverkoissa, jakeluverkoilla esiintyy sekä ilmajohtoja että maakaapeleita. Johdintyyppit painottuvat vahvasti ympäristön mukaan: kaupungeissa lähestulkoon kaikki sähkönjakelu tapahtuu maakaapelein, mutta harvaan asutulla maaseudulla ilmajohtot ovat edelleen vahvassa asemassa ensisijaisesti taloudellisista syistä johtuen.¹⁶

Avojohtot ja maakaapelit ovat sähköisiltä ominaisuuksiltaan hyvin erilaisia. Suurin ero näillä kahdella liittyy kapasitanssiin. Maakaapeleiden kapasitanssiarvot ovat moninkertaiset avojohtoihin verrattuna. Kaapeleilla johtojen kapasitanssia kasvattaa niiden pieni etäisyys maahan. Tämä aiheuttaa sen, että maakaapeleiden tuottamat maasulkuvirrat voivat kasvaa pitkillä johtolähdöillä hyvin suuriksi. Kaapeleiden suuret maakapasitanssit aiheuttavat vaiheiden ja maan välille varausvirtoja, jotka voivat olla pitkillä kaapelipituuksilla hyvinkin suuria. Varausvirrat alentavat kaapelin kykyä siirtää pätötehoa, mikäli kapasitanssien tuottamaa loistehoa ei kompensoida. Kyseinen ilmiö on nimeltään Ferranti-ilmiö, ja se aiheuttaa lisäksi jännitteen kasvua kaapelin toisessa päässä.¹⁷

¹⁵ Elovaara, Haarla 2011 a, 57

¹⁶ Lakervi, Partanen 2009, 125

¹⁷ Elovaara, Haarla 2011 b, 18

Jakeluverkoissa esiintyy sekä maasta erotettua että niin sanottua sammutettua maadoitustapaa. Maasta erotettu verkko tarkoittaa sitä, että verkolla ei ole yhtään tähtipistettä yhdistettynä maahan suoraan tai impedanssin kautta. Maasta erotettuna verkon maasulkuvirta jää pieneksi, sillä maasulun virtapiiri kulkee tällöin johtojen maakapasitanssien kautta, mitkä esimerkiksi ilmajohdoilla ovat hyvin pienet. Edellä mainitulla maadoitustavalla avojohtoverkon normaalikäyttö on mahdollista myös maasulun aikana pienistä maasulkuvirroista johtuen. Valtaosa Suomessa sijaitsevista keskijännitejakeluverkoista on maasta erotettuja.¹⁸

Kuten aikaisemmin todettua, maakaapelit tuottavat avojohtoja huomattavasti suurempia maasulkuvirtoja, jotka voivat aiheuttaa vaarallisia jännitteitä vikapaikkaan. Maasulkuvirtoja pienennetään asentamalla verkon tähtipisteeseen kela, joka on mitoitettu vastaamaan galvaanisesti yhteen kytketyn verkon maakapasitanssia. Tällöin maakapasitanssien kautta kulkeva kapasitiivinen virta kumoutuu, jolloin maasulkutilanteissa jäljelle jää vain virran resistiivinen komponentti. Kyseinen virta jää usein niin pieneksi, että maasulku ikään kuin katkeaa itsestään. Verkkoa kutsutaan tällöin sammutetuksi. Kyseistä sammutuskuristinta kutsutaan nimellä Petersenin kela.¹⁹

2.3 Verkon vikatilanteet ja suojaus

Sähköverkkojen vikatilanteiden vaikutusten minimoimiseksi tehdään valtavasti töitä. Esimerkiksi maasulkutilanteiden todennäköisyyttä pienennetään paljon vaihtamalla ilmajohdot maakaapeliin²⁰. Toimivalla suojareleistyksellä taas minimoidaan mahdollisten vikojen haittavaikutukset ja tehdään sähköverkko mahdol-

¹⁸ Elovaara, Haarla 2011 a, 210

¹⁹ Elovaara, Haarla 2011 a, 210

²⁰ Elovaara, Haarla 2011 b, 304

lisimman turvalliseksi. Oiko- ja maasulut ovat yleisimpiä vikatyyppejä. Myös esimerkiksi salamaniskuista aiheutuvia ylijännitteitä ilmenee varsinkin kesäisin. Maasulut ovat huomattavasti yleisempiä vikatyyppejä kuin oikosulut, sillä oikosulun muodostuminen ilman maakosketusta on suhteellisen epätodennäköistä. Esimerkiksi 400 kV siirtoverkossa 78 % kaikista vioista oli yksivaiheisia maasulkuja. Oikosulkujen osuus oli yhteensä vain 4 %.²¹ Oikosulkuihin tulee kuitenkin varautua hyvin, sillä niissä kulkee paljon suuremmat virrat maasulkuihin verrattuna.

Suojareleillä pyritään takaamaan mahdollisimman hyvä sähkön käyttövarmuus sekä minimoimaan vikatilanteista aiheutuvat vahingot. Suojareleet on ohjelmoitu tarkkailemaan verkon tilaa jatkuvasti mittaamalla sen virtoja ja jännitteitä sekä tekemällä mittausten perusteella päätelmiä, toimiiko sähkönjakelu tarkoituksenmukaisella tavalla. Suojauksen täytyy olla selektiivinen eli suojareleiden tulee irrottaa verkosta mahdollisimman pieni osa vika-alueen ympäriltä. Lisäksi suojauksen täytyy olla tarpeeksi nopea toiminta-ajaltaan estääkseen pahimmassa tapauksessa henkilövahingot. Suojareleet eivät itsessään irrota verkkoa viasta, vaan ne vaativat katkaisijan, jota ohjaamalla sähkönsyöttö ja täten vika saadaan katkaistua.²²

Suojareleistä on runsaasti erilaisia malleja eri käyttötarkoituksiin. Lisäksi yhdessä suojareleessä on lukuisia eri suojafunktoita, jotka suojaavat erilaisilta vioilta. Yhdelle suojafunktiolle voidaan asetella yksi tai useampi aikaporras, jolloin suojauksesta saadaan selektiivistä. Esimerkiksi johtosuojauksessa ylemmällä portaalla on useimmiten lyhempi toiminta-aika sekä suurempi mittausraja-asetus. Suojausfunktoita asetellessa tulee olla tiedossa vähintään arviot verkon vikojen aiheuttamista suureista.²³

²¹ Elovaara, Haarla 2011 a, 168

²² Elovaara, Haarla 2011 b, 342-343

²³ Elovaara, Haarla 2011 b, 344

2.4 Oikosulut

Oikosulku on kahden tai kolmen vaihejohtimen välillä tapahtuva pieni-impedanssinen kytkeytyminen toistensa välille. Kytkös voi olla fyysinen tai valokaaren kautta syntyvä.²⁴ Kolmivaiheisessa ideaalisessa oikosulussa syntyy kolmivaihejärjestelmän suurin vikavirta. Kaksivaiheisessa oikosulussa on hieman pienempi vikavirta kolmivaiheiseen verrattuna, ja vikavastuksellisissa oikosuluissa taas eksponentiaalisesti pienenevä. Oikosulkutilanteessa syntyvä vikavirta vaimenee ajan kuluessa ja se voidaan jakaa kolmeen osaan: alkuoikosulkuvirta, muutosoikosulkuvirta sekä jatkuvan tilan virta. Näistä alkuoikosulkuvirta on suurin ja kestoltaan lyhin. Varsinkin suurjännitejohdoilla vika pyritään katkaisemaan alkuoikosulun aikana. Jakeluverkossakaan vain harvoin oikosulkuvirta ehtii saavuttamaan jatkuvan tilan arvon.²⁵

Oikosulut voivat aiheutua esimerkiksi eristyksen pettämisestä johtimien ympärillä, jolloin vaiheiden välille saattaa muodostua valokaari. Myös salamaniskut johtimeen voivat aiheuttaa oikosulun, sillä salama aiheuttaa suuren ylijännitteen, joka purkautuu valokaarena viereiseen vaiheeseen eristeen pettäessä.²⁶

Oikosuluilta suojaamiseen käytetään suojareleissä esimerkiksi ylivirtafunktioita, differentiaalifunktioita ja distanssifunktioita. Ylivirtafunktio mittaa johdossa kulkevaa virtaa ja laukaisee, kun mitattu virta kasvaa yli asetusarvon, joka on tyypillisesti hieman nimelliskuormavirtaa suurempi. Suuntaamaton ylivirtafunktio ei kuitenkaan toimi halutulla tavalla silmukoidussa verkossa, jossa vikavirta voi tulla kahdesta eri suunnasta. Suunnan havaitsemiseen tarvitaan myös jännitteen mittaus, joka on mukana esimerkiksi suunnatussa ylivirtafunktiossa sekä distanssisuojassa.

²⁴ Elovaara, Haarla 2011 b, 340

²⁵ Elovaara, Haarla 2011 a, 175-176

²⁶ Elovaara, Haarla 2011 b, 340

Distanssisuoja laskee vaiheiden välistä sekä vaiheen ja maan välistä impedanssia, ja vian sattuessa määrittää etäisyyden vikapaikkaan impedanssien suuruuksien perusteella. Differentiaalisuoja mittaa virrat kahdesta eri paikasta suojattavalla alueella ja laukaisee, mikäli mitattujen virtojen erotus on yli asetteluarvon.²⁷

2.5 Maasulut

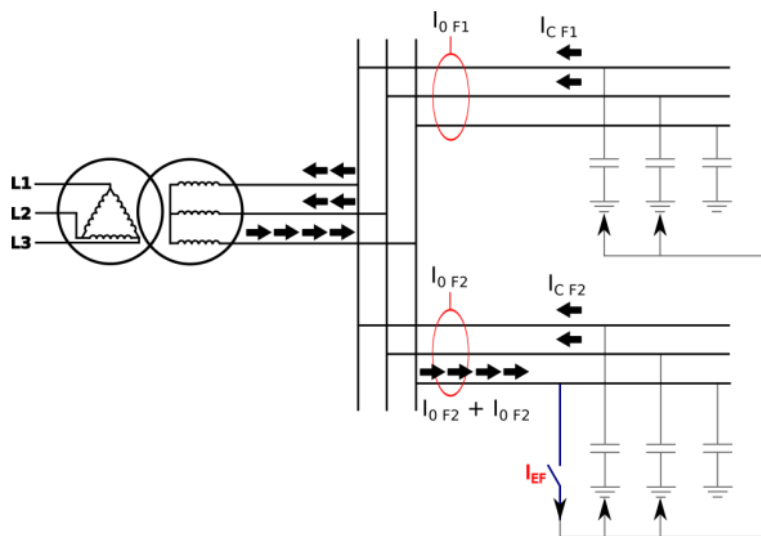
Maasulussa yksi tai useampi vaihejohdin koskettaa maapotentiaalia. Kosketus syntyy joko nolla- tai ukkosjohtimen kanssa tai ihan vain maaperän kanssa. Tällöin syntyy vikaantuneen vaihejohtimen ja maapiirin välille virtapiiri. Tyypillinen maasulun aiheuttaja avojohtoverkossa on linjan päälle kaatunut puu tai katkennut johdin, joka koskettaa maata. Yksi maasulku voi aiheuttaa myös uuden maasulun toisessa paikassa. Maasulku aiheuttaa terveissä vaiheissa ylijännitteitä, jotka eristeen pettäessä voivat aiheuttaa toisessa paikassa toisen maasulun. Kyseistä ilmiötä kutsutaan kaksoismaasuluksi. Kaksoismaasulut ovat vaarallisia, sillä vikojen aikana maaperässä kulkee suuria virtoja, jotka voivat aiheuttaa haitallisia jännitteitä.²⁸

Maasulussa vikavirran suuruus riippuu verkon maadoitustavasta. Verkossa, jonka tähtipiste ei ole maadoitettu, tai se on maadoitettu suuren resistanssin kautta, syntyy pieni maasulkuvirta. Maasta erotetussa verkossa vikavirta kiertää maan sekä terveiden vaiheiden kapasitanssien kautta verkon tähtipisteeseen. Ilman vikavastusta tapahtuvissa maasuluissa nollajännite on vaihejännitteen suuruinen.²⁹ Vikatapahtumaa maasta erotetussa verkossa on havainnollistettu kuvassa 2.

²⁷ Elovaara, Haarla 2011 b, 340

²⁸ Elovaara, Haarla 2011 b, 340

²⁹ Elovaara, Haarla 2011 a, 210

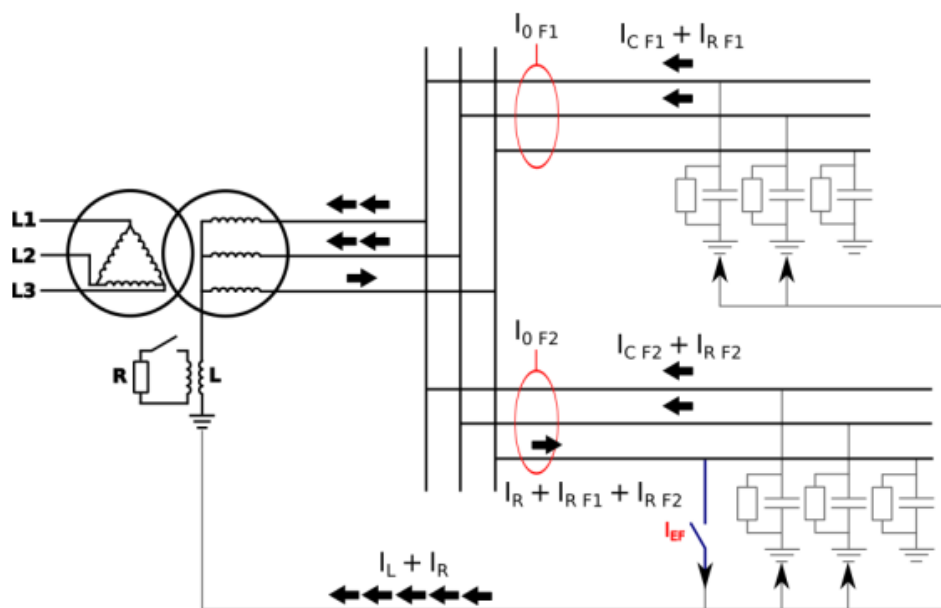


Kuva 2. Maasta erotetun verkon maasulku³⁰.

Petersenin kelalla varustetussa sammutetussa verkossa maasulku voi nimensä mukaisesti sammua itsellään, sillä vikavirta on hyvin pieni. Maasuluissa voi syntyä vaarallisia jännitteitä vikapaikkaan riippuen verkon maadoitustavasta. Syntyvä kosketusjännite on verrannollinen vikavirtaan ja maadoitusimpedanssiin, joten maasulkuvirran kompensoinnilla saavutetaan pienen vikavirran lisäksi alhainen maadoitusjännite.³¹ Kompensoidun verkon maasulun virtojen muodostuminen on esitetty kuvassa 3.

³⁰ Arcteq Relays Oy 2019. AQ-F255 User manual

³¹ Elovaara, Haarla 2011 a, 210



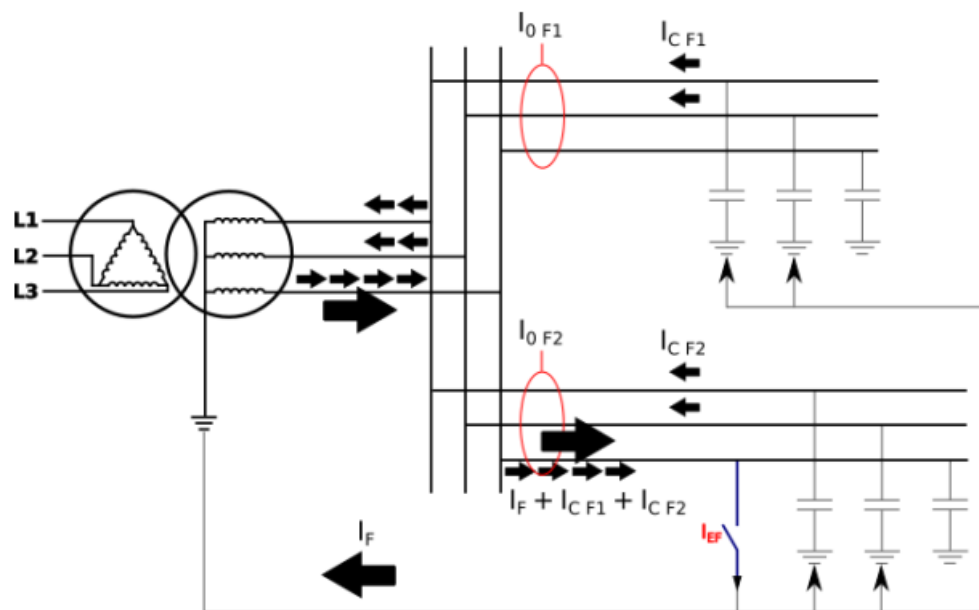
Kuva 3. Kompensoidun verkon maasulku³².

Maasulkuvirran kompensoinnilla voi olla eri asteita. Alikompensoidussa verkossa vain osa kapasitiivisesta maasulkuvirrasta kompensoidaan. Ylikompensoitu verkko taas tuottaa induktiivista virtaa, koska tällöin kompensointikela on säädetty tuottamaan enemmän induktiivista virtaa kuin kapasitiivisen virran kumoamiseen olisi tarvittu. Kompensointi voidaan toteuttaa joko keskitetysti, hajautetusti tai näiden yhdistelmänä. Keskitetyssä kompensoinnissa on yksi kompensointikela, joka hoitaa koko verkon kompensoinnin. Hajautetussa kompensoinnissa pienempiä keloja asennetaan useampi suuria maasulkuvirtoja tuottavien lähtöjen varrelle.

Tehollisesti maadoitettuja verkkoja esiintyy lähinnä siirtoverkoissa. Koska tehollisesti maadoitetut verkot ovat joko suoraan tai kuristimen kautta maadoitettuja, syntyy niissä suuri maasulkuvirta, joka vastaa kutakuinkin oikosulkuvirtaa suuruudeltaan.³³ Tehollisesti maadoitetun verkon maasulkutilanne on kuvattu kuvassa 4.

³² Arcteq Relays Oy 2019. AQ-F255 User manual

³³ Elovaara, Haarla 2011 a, 211



Kuva 4. Tehollisesti maadoitetun verkon maasulku³⁴.

Tyypillisesti maasulkua suojaamaan asetellaan nollavirtarele, joka mittaa vaiheiden summavirtaa. Nollavirtafunktio ei kuitenkaan kykene tunnistamaan virran suuntaa, eli rele laukaisee vain edesspäin tapahtuvat viat. Tarkempaan maasulkusuojaukseen käytetään suunnattua maasulkufunktiota, joka mittaa vaiheiden summavirtaa, nollajännitettä ja edellä mainittujen välistä kulmaa. Myös distanssisuoja voidaan käyttää maasulkusuojaukseen, mutta se on kelvoinen vain noin 20 Ω :n vikaresistanssiin asti, sillä resistanssin kasvaessa myös vikavirran resistiivinen osuus kasvaa. Distanssisuoja ei tällöin pysty erottamaan sitä normaalista kuormitusvirrasta.³⁵

Relesuojauksen kannalta kompensointi aiheuttaa haasteita. Releen voi olla vaikea tunnistaa vikaa, mikäli maasulkuvirta on hyvin pieni kompensoinnin ansiosta. Tä-

³⁴ Arcteq Relays Oy 2019. AQ-F255 User manual

³⁵ Elovaara, Haarla 2011 b, 349.

män takia Petersenin kelan rinnalle asennetaan vastus, joka kasvattaa virran resistiivistä komponenttia. Keskitetyt kompensoiduissa verkoissa suojausvian havaitseminen perustuu virran resistiivisen komponentin mittaukseen. Kyseinen toimintatapa on nimeltään $I_0 \cos \phi$. Hajautetussa kompensoinnissa sekä maasta erotetussa verkossa vikojen havaitsemiseen käytetään $I_0 \sin \phi$ -tilaa, joka monitoroi summavirran loiskomponenttia.³⁶

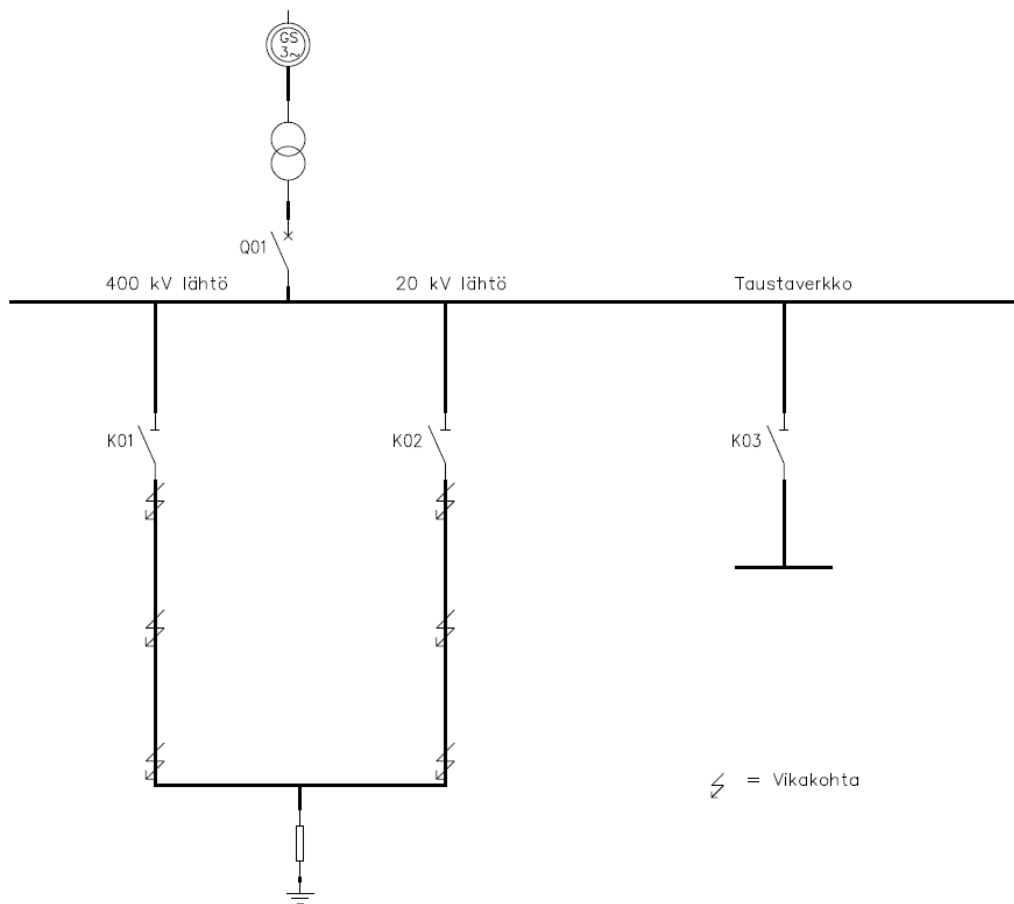
³⁶ Arcteq Relays Oy 2019. AQ-F255 User manual

3 VERKKOMALLIN LUOMINEN JA MITOITTAMINEN

Analogisen verkkomallin on tarkoitus mallintaa todellista, sähkönsiirrossa ja -jake- lussa käytettävää, sähköverkkoa. Siirto- ja jakeluverkkoa ei simuloida samanaikai- sesti. Verkkoa mallinnetaan sijaiskytkennöillä, jotka rakennetaan luomaan verkko- mallille samat sähköiset ominaisuudet kuin aidolla sähköverkolla on. Verkkomal- lilla pyritään toteuttamaan myös todellisuutta vastaavat vikatilanteet suojarlei- den testausta varten.

3.1 Pääkaavio

Verkkomallin pääkaavio on esitetty kuvassa 5. Pääkaaviossa mallia syöttävä gene- raattori on kytketty suojaerotusmuuntajan kautta malliin. DY-kytkentäisellä suoja- erotusmuuntajalla luodaan verkolle tähtipiste, joka mahdollistaa erilaisten verkon maadoitustapojen testauksen. Tämän jälkeen verkko jakautuu kahteen eri läh- töön, jotka ovat 400 kV:n siirtojohtoa mallintava sijaiskytkentä sekä 20 kV:n kaa- pelia mallintava kytkentä. Lisäksi näiden lähtöjen rinnalle kytketään taustaverkko maasulkuilmiöiden tarkastelua varten. Johtomallien varrella on mahdollista kytkeä vika päälle kolmeen eri kohtaan: lähdön alkuun, puoliväliin sekä loppuun. Viimei- senä lähtöjen perässä on kuormakomponentti, joka on säädettävissä. Huomioita- vaa on se, että lähtöjä ei ole tarkoitus syöttää yhtä aikaa, sillä niiden sijaiskytken- töjen arvot poikkeavat toisistaan runsaasti. Lisäksi suojarleasettelut tulee tehdä kummallekin johtolähdölle erikseen sopivaksi.



Kuva 5. Verkkomallin pääkaavio

Siirtoverkon suurjännitejohtona käytetään 2-Finch -johtoa, joka koostuu kahdesta Finch -nimisestä osajohtimesta, jotka on kytketty rinnakkain vaihekohtaisesti. Keski-jänniteverkon kaapelia simuloi taas AHXAMK-W 3x185 -kaapeli, joka on Vaasan Sähkön yleisin kaapelityyppi keskijänniteverkossa³⁷. Verkkomalli koostuu kummallakin jännitetasolla kahdesta eri sijaiskytkentäosuudesta. Simuloitavien johtopätkien pituudet määritettiin laskemalla ensin sijaiskytkennän komponenttien arvot

³⁷ Salo 2021, sähköposti

kilometriä kohden, minkä jälkeen pyrittiin löytämään sopivan kokoiset komponentit tietyn pituiselle johdolle. Maakaapelilähdön pituuden määräävänä tekijänä käytettiin kondensaattoreiden kapasitansseja ja siirtojohdolla puolestaan linjan induktanssia. Käytettyjen johto-osuuksien pituudet on esitetty alla olevassa taulukossa 1.

Taulukko 1. Johtopituudet.

	400 kV	20 kV
Pituus [km]	20	1,6

Verkkomallissa voidaan toteuttaa vika kolmessa eri paikassa: johtolähdön alussa, puolivälissä ja johdon lopussa ennen kuormaa. Viat ohjataan päälle vaihekohtaisesti ohjelmoitavalla logiikkaohjaimella, joten mallissa saadaan toteutettua kaikki mahdolliset viat: yksivaiheiset maasulut, kaksivaiheiset oikosulut sekä kolmivaiheiset oikosulut. Kaksi jälkimmäisenä mainittua vikatyyppeä saadaan myös haluttaessa ohjattua maata vasten.

Verkkomallin kolmivaiheinen kuorma kytketään malliin samalla tavalla kuin vika- paikka, eli verkkomallin johtomallinnukset voidaan myös ohittaa ja kytkeä generaattori syöttämään suoraan kuormaa. Kuorma voidaan kytkeä sekä tähteen että kolmioon riippuen siitä, kuinka paljon generaattoria haluaa kuormittaa. Kuorman ollessa kolmiokytkennässä sen teho on $\sqrt{3}$ -kertainen tähteen kytkettyyn kuormaan verrattuna. Lisäksi kuormitusvastusten rinnalle on mahdollista kytkeä toiset resistanssiarvoltaan yhtä suuret vastukset, jolloin kuorman kokonaisresistanssi puolittuu ja teho kasvaa.

3.2 Perusmitoituseriaatteet

Verkkomallia on tarkoitus syöttää generaattorilla, jonka nimellisteho on 6,5 kVA, jännite 400 V ja nimellisvirta 9,4 A. Nimellisvirtaa pidetään verkkomallin mitoitus- ten perustana. Koska verkkomallilla on kuitenkin tarkoitus simuloida vikatilanteita,

on tarkasteltava mallia syöttävän generaattorin ominaisuuksia. Generaattorin oikosulkuimpedanssit ovat suuria verkkomallin impedansseihin verrattuna. Tämä johtuu generaattorin suhteellisen pienestä nimellistehosta, joka on kääntäen verrannollinen generaattorin nimellisimpedanssiin ja suoraan verrannollinen nimellisjännitteen neliöön kaavan 1 mukaisesti³⁸.

$$X_d = \frac{x_{d\%}}{100} * \frac{U^2}{S}, \quad (1)$$

jossa $x_{d\%}$ on generaattorin pitkittäisimpedanssin suhteellinen arvo,

U on generaattorin nimellisjännite

ja S on generaattorin nimellisteho.

Generaattorivalmistaja on ilmoittanut generaattorille kuvan 6 oikeanpuoleisen sarakkeen mukaiset pitkittäiset alkuoikosulku- (X''_d), muutosoikosulkureaktanssin (X'_d) sekä jatkuvan tilan reaktanssin (X_d)³⁹. Alkutilan reaktanssin suuruus on näistä pienin ja jatkuvan tilan reaktanssi suurin. Jatkuvan tilan reaktanssi on generaattorissa mukana myös normaaliajossa. Tiedossa on myös generaattorin poikittaisreaktanssin (X_q) arvot, mutta ne voidaan jättää kuitenkin huomioimatta oikosulkulaskelmissa, sillä generaattorin oikosulkuvirta on miltei puhdasta loisvirtaa, eikä virralla täten ole poikittaiskomponenttia ($I_q = 0$).⁴⁰ Koska virran oletetaan olevan täyttä loisvirtaa, käämitysten resistanssit jätetään huomiotta.

³⁸ Elovaara, Haarla 2011 a, 137

³⁹ Mecc Alte SpA 2019. ET16F datalehti

⁴⁰ Elovaara, Haarla 2011 a, 172-173

Type		ET16F-130	ET16F-160
Rating "H" class	kVA 50 Hz	5,5	6,5
Direct - axis synchronous reactance	X _d %	303	249
Direct - axis transient reactance	X' _d %	40,8	38,1
Direct - axis subtransient reactance	X'' _d %	20	18,6
Quadrature - axis synchronous reactance	X _q %	100	96,2
Quadrature - axis transient reactance	X' _q %	100	96,2
Quadrature-axis subtransient reactance	X'' _q %	37,2	35,5
Negative - sequence reactance	X ₂ %	21,6	18,6
Zero sequence reactance	X ₀ %	8,2	7,1
Transient time constant	T' _d (ms)	41	38
Subtransient time constant	T'' _d (ms)	10	9
Armature time constant	T _α (ms)	5	6
Open circuit time constant	T' _{do} (s)	0,8	0,9
Short - circuit ratio	K _{cc}	0,82	0,85
Stator winding resistance	Ω	1,5	1,15

Kuva 6. Generaattorin teknisiä tietoja⁴¹.

Edellä mainittuihin tietoihin perustuen voidaan laskea suurin generaattorin tuottama oikosulkuvirta, jota pidetään pohjana vikavirtapiirien sekä komponenttien kestävyysmitoituksessa. Oikosulkuvirtojen laskelmiin voidaan käyttää Theveninin teoreemaa, jossa vikavirtapiiristä luodaan yksivaiheinen sijaiskytkentä helpottamaan laskemista. Kuten mainittua, alkuoikosulkuvirta on eri oikosulkuvirroista suurin. Alku- ja muutosoikosulkuvirtaa käytetään mitoituslaskuissa, koska varsinkin siirtoverkkojen releiden tulee oikosulkutilanteessa toimia niin nopeasti, että oikosulkuvirta ei ehdi saavuttaa pysyvän tilan arvoaan. Alku- ja muutosoikosulkuvirran laskentakaavat ovat täysin samanlaisia. Kaavan 2 Theveninin teoreeman mukaan virtojen laskeminen tapahtuu seuraavasti:⁴²

$$\underline{I''_k} = \frac{\underline{U}_v}{\underline{X''_d} + \underline{Z}_f'} \quad (2)$$

jossa \underline{U}_v on verkon vikakohdan vaihejännite ennen vikaa (230 V),

⁴¹ Mecc Alte SpA 2019. ET16F datalehti

⁴² Elovaara, Haarla 2011 a, 175

X_d'' tai X_d' on generaattorin pitkittäinen alku- tai muutosoikosulkureaktanssi eli verkon impedanssi vikakohtasta nähtynä (4,58 Ω tai 9,38 Ω)

ja Z_f on vikaimpedanssi, joka suurinta vikavirtaa haettaessa asetetaan nolllaksi.

Alkuoikosulkuvirran itseisarvoksi ilman vikavastusta saadaan 50,2 A. Muutosoikosulkuvirta on taas noin puolet alkuoikosulkuvirrasta eli 24,5 A. Koska generaattoria ei haluta rikkoa tekemällä sille liian kuormittavia oikosulkuja, täytyy verkkomallin vikakomponentille mitoittaa vikavastus, joka rajoittaa vikavirran suuruutta. Mitoituksessa täytyy huomioida myös johtoja simuloivien sijaiskytkentäkomponenttien tehonkesto. Esimerkiksi useimmat kelat ja kuristimet eivät kestä lasketujen oikosulkuvirtojen suuruisia virta-arvoja. Lisäksi on muistettava, että sijaiskytkennän komponentit alentavat myös oikosulkuvirtaa.

Komponenttien ja osien keston sekä yleisen sähköturvallisuuden kannalta suurin muutosoikosulkuvirta rajoitetaan noin 10 A tasolle, eli hieman suuremmaksi kuin generaattorin nimellisvirta. Vikaimpedanssin eli tässä tapauksessa vikavastuksen R_f suuruus vikavirran ollessa 10 A lasketaan kaavan 3 mukaisesti:

$$R_f = \frac{U_v}{I_k'} - X_d' \quad (3)$$

jossa U_v on jälleen vikakohtadan vaihejännite (230 V) ennen vikaa,

X_d' on generaattorin pitkittäismuutosoikosulkureaktanssi (9,38 Ω)

ja I_k' on haluttu muutosoikosulkuvirta (10 A).

Vikavastuksen R_f arvoksi saadaan kompleksisen yhtälön reaaliosta eli 23 Ω . Tämä pienentää myös huomattavasti lyhytkestoisen alkuoikosulkuvirran suuruutta, sillä kaavaa 3 käyttäen saadaan vikavastuksellisen alkuoikosulkuvirran arvoksi 12,7 A.

Sijaiskytkennän pitkittäisresistanssien tehokestoisuisuuden määrittäminen perustuu Joulen lain kaavaan 4, jonka mukaan tehohäviö komponentissa on verrannollinen virran neliöön⁴³.

$$P = I^2 R, \quad (4)$$

jossa I on virta

ja R on resistanssi.

Esimerkiksi 0,5 Ω vastus tulee mitoittaa kestämään 50 W tehoa. Pitkittäisten induktanssien virrankesto määräytyy käämilangan paksuuden ja rakenteen mukaan. Lisäksi erilaiset kytkinlaitteet, releet ja kontaktorit, tulee mitoittaa edellä mainitun virran perusteella.

Komponenttien mitoittamisessa 400 V:n tasolle käytetään perustana PSCAD-simuloinneissa käytettyjä tehoja. Simuloinneissa 400 kV:n siirtoverkolla jännitelähteiden tehona käytetään 650 MVA ja 20 kV:lla 6,5 MVA. Tehon tulee ylittää linjan nimellisteho, jotta maakapasitanssien tuottama varausloisteho ei ylitä linjan ja kuorman kuluttamaa loistehoa. Tällöin 400 kV:n jännitteellä mallin virta on 100-kertainen todelliseen virtaan nähden, ja 20 kV:n jännitetasolla virta on 20-kertainen. Jännitteiden suhde puolestaan 400 kV:lla on 1000-kertainen ja 20 kV:lla 50-kertainen. Tällöin saadaan seuraavan taulukon 2 mukaiset korjauskertoimet resistansseille ja reaktansseille (induktanssi ja kapasitanssi).

Taulukko 2. Komponenttien korjauskertoimet.

	20 kV	400 kV
R-kerroin	0,4	0,1
L-kerroin	0,4	0,1
C-kerroin	2,5	10,0

⁴³ Mäkelä, Soininen, Tuomola, Öistämö 2018, 120

Näitä korjauskertoimia tarvitaan, jotta verkkomalliin kytkettävälle suojareleelle saadaan mallinnettua impedanssit yhtä suurina kuin ne oikeassa verkossa olisivat. Releelle asetellaan virta- ja jännitemuuntajien arvot primäärijännitetason, 400 kV ja 20 kV, mukaan. Tällöin rele laskee verkon impedanssit kaavan 5 mukaisesti.⁴⁴

$$Z_{toisio} = \frac{\frac{I_{1N,CT}}{V_{1N,VT}}}{\frac{I_{2N,CT}}{V_{2N,VT}}} * Z_{ensiö}, \quad (5)$$

$I_{1N,CT}$ ja $I_{2N,CT}$ ovat virtamuuntajien ensiö- ja toisiovirrat

ja $V_{1N,VT}$ ja $V_{2N,VT}$ ovat jännitemuuntajien ensiö- ja toisiojännitteet.

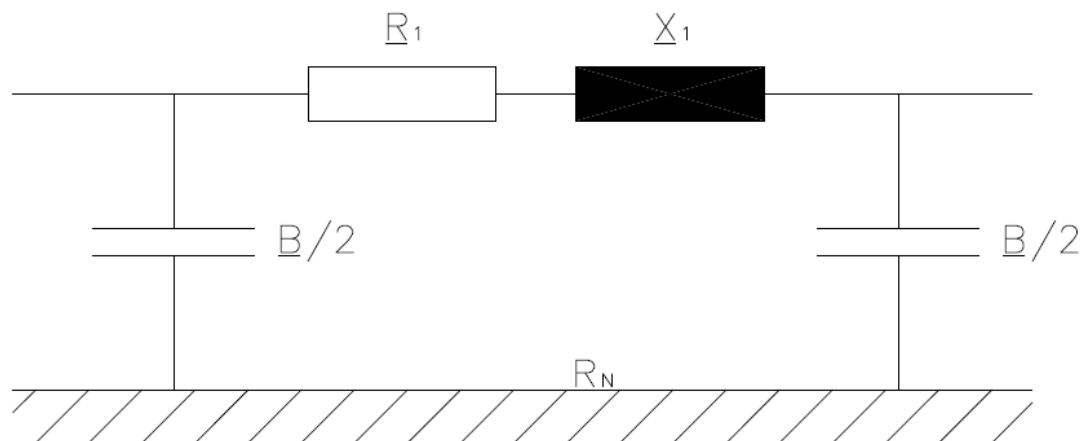
Verkon sijaiskytkennän komponenttien arvot täytyy kertoa taulukon 2 mukaisilla korjauskertoimilla, jotta releen näkemä, primääriverkon mittamuuntajien antama Z_{toisio} -arvo vastaa käytössä olevien mittamuuntajien Z_{toisio} -arvoa.

3.3 Johtomallin mitoitus

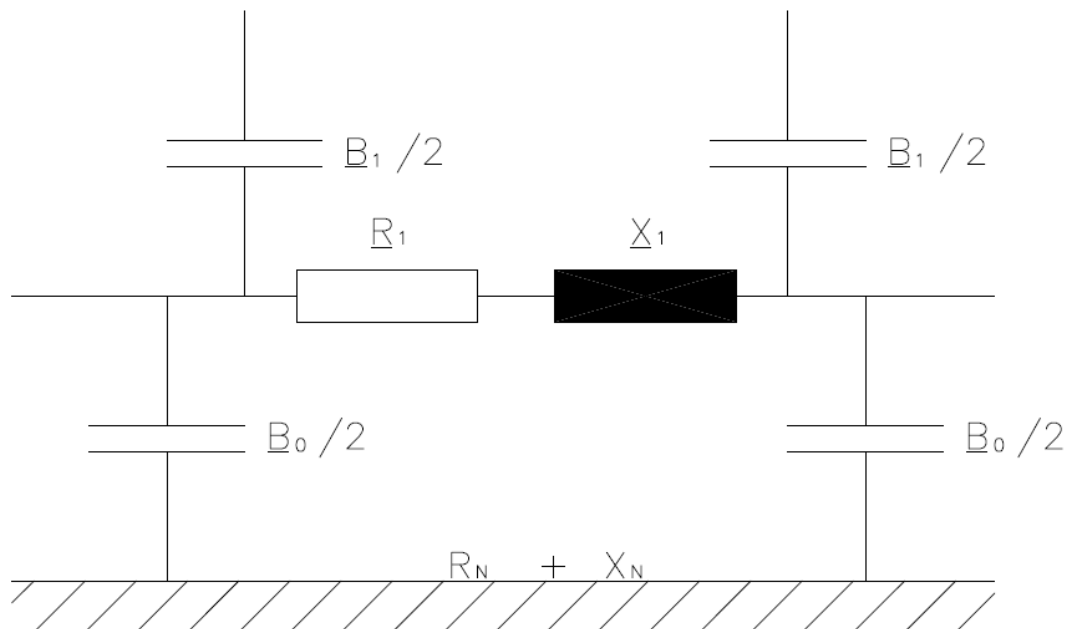
Kaapelia mallinnetaan kuvan 7 mukaisella yksivaiheisella π -sijaiskytkennällä ja puolestaan siirtoverkon avojohtoa kuvan 8 sijaiskytkennällä, jossa johdon sähköiset parametrit on jaettu pitkittäisiin eli myötäverkon resistansseihin R_1 ja induktiivisiin reaktansseihin X_1 . Johdoilla on myös poikittaissuunnassa maakapasitanssia, joka kytkeytyy johdon ja maan välille (B_0). Lisäksi kuvan 8 avojohdolla on vaihejohtimien välistä susceptanssia B_1 .⁴⁵ Tarkan mallinnuksen saavuttamiseksi täytyy määrittellä myös verkon maapiirin komponentit. Maapiiri kytkeytyy vaihejohtimien myötäkomponenttien rinnalle (R_N ja X_N).

⁴⁴ GEC ALSTHOM 1995, 201

⁴⁵ Elovaara, Haarla 2011 a, 124



Kuva 7. Kaapelimallin sijaiskytkentä.



Kuva 8. Siirtojohtomallin sijaiskytkentä.

Työhön liittyen tehtiin kyselyt Fingridille ja Vaasan Sähkölle niiden käyttämien joihtojen sähköisten parametrien suuruuksista. Fingridiltä saatiin 400 kV:n erilaisten 400 kV:n siirtojohtojen myötä- ja noloverkon impedanssiarvoja. Vaasan Sähkön

mukaan maakaapelivalmistajien ominaisarvotaulukot ovat tarpeeksi tarkkoja kaapelin mallintamiseen⁴⁶. Siirtoverkon avojohdoilla ei tällaisia taulukoita ole, sillä asennustapa vaikuttaa avojohtojen sähköisiin ominaisuuksiin hyvin paljon.

Fingridiltä saadut 400 kV:n 2-Finch suurjänniteavojohdon myötäverkon impedanssien arvot kilometriä kohden on esitetty taulukossa 3. R ja X ovat johdon pitkittäis-komponentteja ja B eli susceptanssi on sijaiskytkennän poikittaiskomponentti. Tiedossa on myös johdon vuotoresistanssi, mutta se jätetään tässä verkkomallissa huomioimatta, sillä sen vaikutus vikailmiöihin on pieni. Myötäverkolla tarkoitetaan verkon normaalia tilaa, eli verkossa ei ole vikaa ja vaihejärjestys on normaali R-S-T⁴⁷.

Taulukko 3. Siirtojohdon myötäverkon impedanssit.

	r_1/km [Ω/km]	x_1/km [Ω/km]	b_1/km [$\mu\text{S}/\text{km}$]	l_1/km [mH/km]	c_k/km [$\mu\text{F}/\text{km}$]
2-Finch	0,027	0,324	3,58	1,031	0,011

Arvoista voidaan suoraan nähdä, että johdon pitkittäinen reaktanssi x on moninkertainen verrattuna johtimen ominaisresistanssiin. Tämän takia esimerkiksi distanssisuojan impedanssimittaukset perustuvat lähes kokonaan johdon reaktanssin laskemiseen.⁴⁸ Mallinnettavalla siirtojohdolla on myös käytössä ukkosjohtimet, jotka pienentävät linjan reaktanssia ja vaiheiden välistä keskinäiskapasitanssia. Toisaalta johdon maakapasitanssi kasvaa.⁴⁹ Taulukossa oleva kapasitanssiarvo c_k

⁴⁶ Salo 2021, sähköposti

⁴⁷ Elovaara, Haarla 2011 a, 179

⁴⁸ Elovaara, Haarla 2011 b, 349

⁴⁹ Elovaara, Haarla 2011 a, 125

tarkoittaa vaiheiden välistä keskinäiskapasitanssia, joka on laskettu käyttäen myötaverkon kapasitanssia eli käyttökapasitanssia c_1 ja nollakapasitanssia c_0 kaavan 6 mukaisesti.⁵⁰

$$c_k = \frac{c_1 - c_0}{3}, \quad (6)$$

jossa c_1 on johdon myötaverkon kapasitanssi eli käyttökapasitanssi

ja c_0 on johdon nollakapasitanssi eli maakapasitanssi.

Kapasitanssit c_1 ja c_0 on sen sijaan laskettu myötä- ja nollaverkon susceptanssien b_1 ja b_0 avulla. Käytettävä keskinäiskapasitanssi täytyy jakaa kolmasosaan, sillä keskinäiskapasitanssit kytkeytyvät sijaiskytkennässään kolmioon vaiheiden välille⁵¹.

Taulukossa 4 on puolestaan esitetty Fingridiltä saadut nollaverkon arvot.

Taulukko 4. Siirtojohdon nollaverkon impedanssit.

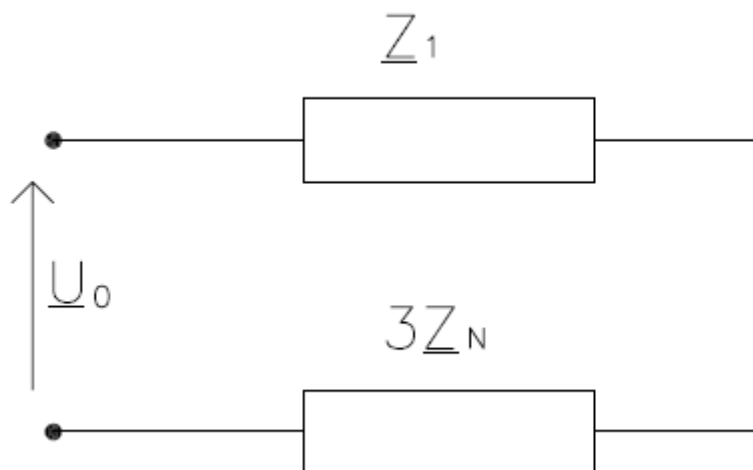
	r_0/km [Ω/km]	x_0/km	b_0/km
Nollaverkko (2-Finch)	0,211	0,782	2,675

Nollajärjestelmässä verkon osoittimet ovat suuruudeltaan yhtä suuria eikä niiden välillä ole lainkaan vaihesiirtoa. Nollaverkon impedanssi kytkeytyy esimerkiksi maasuluissa. Verrattaessa yllä olevan taulukon resistanssi- ja reaktanssiarvoja myötaverkon vastaaviin huomataan niiden olevan suurempia. Tämä johtuu siitä,

⁵⁰ Elovaara, Haarla 2011 a, 122

⁵¹ Elovaara, Haarla 2011 a, 122

että nollaverkon impedansseihin lasketaan mukaan sekä verkon myötäimpedanssit että tähtipisteen ja maan väliset impedanssit kolminkertaisena kuvan 9 mukaisesti⁵².

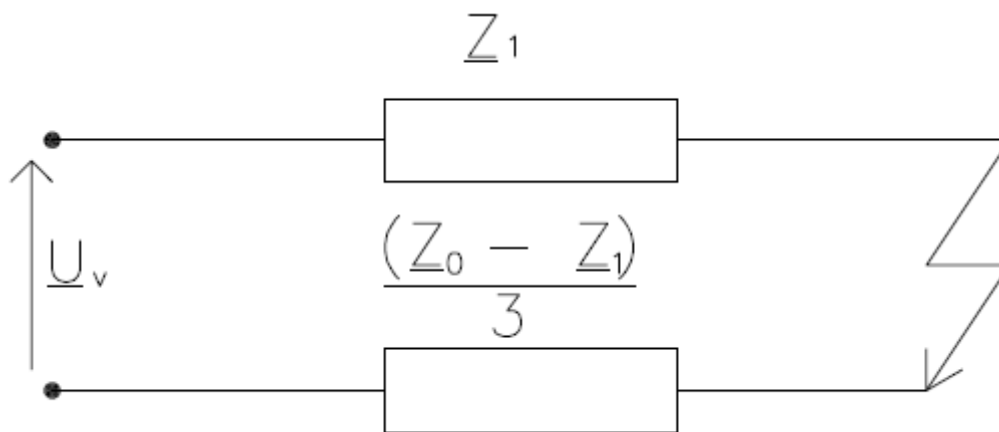


Kuva 9. Nollaverkon kytkeytyminen.

Yllä olevassa kuvassa impedanssikomponentti $3Z_N$ kuvaa siis tähtipisteen ja maan välistä impedanssia. Toisin sanoen Z_N on verkon maapiiri. Yksivaiheisessa maasulussa verkon impedanssit kytkeytyvät kuvan 10 sijaiskytkennän mukaisesti⁵³.

⁵² Elovaara, Haarla 2011 a, 184

⁵³ GEC ALSTHOM 1995, 51



Kuva 10. Yksivaiheisen maasulun sijaiskytkentä.

Tästä voidaan päätellä, että maapiirin pitkittäisimpedanssit voidaan laskea myötäjän nollaimpedansseista kaavan 7 mukaisesti.

$$Z_N = \frac{Z_0 - Z_1}{3}, \quad (7)$$

jossa Z_0 on johdon nollaimpedanssi

ja Z_1 on johdon myötäimpedanssi.

Vaihekohtaiset poikittaishäviökäytännöt eli maakapasitanssit puolestaan lasketaan puolestaan suoraan nollaverkon susceptanssista. Näin saadaan mitoitettua maapiirin impedanssien arvot, jotka ovat esitetty taulukossa 5.

Taulukko 5. Siirtojohdon maapiirin impedanssit.

	r_N/km [Ω/km]	x_N/km [Ω/km]	b_N/km [$\mu\text{S}/\text{km}$]	l_N/km [mH/km]	c_N/km [$\mu\text{F}/\text{km}$]
Maapiiri (2-F)	0,061	0,153	3,527	0,486	0,011

Keskijänniteverkon maakaapelin impedanssit saadaan Prysmianin datalehdeltä⁵⁴.

Arvot on esitetty taulukossa 6.

Taulukko 6. Maakaapelin impedanssit.

	r/km [Ω/km]	x/km [Ω/km]	b/km [uS/km]	l/km [mH/km]	c/km [uF/km]	rN/km [Ω/km]
AHXAMK-W 3x185	0,20	0,11	87,97	0,36	0,28	0,21

Arvoista huomataan, että resistanssin ja reaktanssin suhde kaapeleilla on täysin erilainen suurjänniteajohtoihin verrattuna. Lisäksi kaapeleiden maakapasitanssi on huomattavasti siirtoverkon johtoja suurempi. Huomattavaa on myös, että kaapelilla ei oteta johtimien välisiä kapasitansseja huomioon, vaan datalehdellä annettu käyttökapasitanssi on sama kuin kaapelin maakapasitanssi.

Maakaapeleiden nollaimpedanssia on huomattavasti vaikeampi määrittää kuin avojohtojen nollaimpedansseja. Lisäksi maakaapeleilla maapiirin vaikutus maasulkuvirtaan on pieni.⁵⁵ Tämän takia maakaapelin sijaiskytkennän maapiirinä käytetään pelkkää vastusta, joka kuvaa AHXAMK-W -kaapelin keskijohdinta, jonka resistanssin suuruus kilometriä kohden on esitetty taulukossa 6.

Impedanssit muunnetaan 400 V:n tasolle kertomalla sijaiskytkennän primääriarvot kappaleessa 3.2 esitetyillä kertoimilla. Näin saadaan ensinnäkin 400 kV:n siirtolinjalle korjatut myötäimpedanssiarvot, jotka on esitetty taulukossa 7.

Taulukko 7. Siirtojohtomallin korjatut myötäimpedanssit.

	r ₁ /km [ohm]	l ₁ /km [mH]	c ₁ /km [uF]
2-Finch (korjattu)	0,0027	0,1031	0,0096

⁵⁴ Prysmian Group 2018, AHXAMK-W 20 kV datalehti

⁵⁵ Nikander, Mäkinen 2017, 9

Vastaavalla tavalla saadaan siirtoverkon maapiirin impedanssit ja maakapasitanssi, mitkä on esitetty taulukossa 8.

Taulukko 8. Siirtojohtomallin korjatut maapiirin impedanssit.

	r_N/km [ohm]	l_N/km [mH]	c_N/km [μF]
Maapiiri (2-Finch korjattu)	0,0061	0,0486	0,0851

Keskijänniteverkon maakaapelin korjatut myötäimpedanssit sekä käyttökapasitanssit ovat taulukossa 9.

Taulukko 9. Maakaapelimallin korjatut myötäimpedanssit.

	r_1/km [ohm]	l_1/km [mH]	c_1/km [μF]
AHXAMK-W (korjattu)	0,08	0,14	0,35

Maakaapelin keskusköyden eli maapiirin korjattu vastusarvo on puolestaan esitetty taulukossa 10.

Taulukko 10. Maakaapelimallin korjattu maapiirin resistanssi.

	r_N/km [ohm]
Maapiiri (AHXAMK-W korjattu)	0,21

3.4 Mittamuuntajien mitoitus

Verkkomallia syöttävällä generaattorilla on käytössä jo valmiina 25 A / 5 A virtamuuntajat. Malliin jätetään kuitenkin mahdollisuus käyttää toisia virtamuuntajia asentamalla verkkomallin etupaneeliin mittauspisteet, joihin saa tarvittaessa kytettyä mittauksen käyttäen banaanijohtoja. Mittauspisteet sijaitsevat molempien johtolähtöjen alussa. Malliin ei tässä vaiheessa asenneta nollavirran mittausta, vaan se tehdään releessä laskennallisesti.

Verkkomallin komponenttien mitoitus perustuu kappaleen 3.2 mukaisesti siihen, että releelle asetellaan primääri verkossa käytettävän mittamuuntajan koko. Fyysisten virtamuuntajien arvoja muuttaessa tulisi siis korjata myös releen virtamuuntaja-asettelu. 400 kV:n verkossa virrat on asetettu 100-kertaisiksi ja 20 kV-verkossa 20-kertaisiksi oikeisiin muuntajiin nähden. Näin ollen käytettäessä 25 A / 5 A virtamuuntajia täytyy releelle asetella siirtoverkkoa käytettäessä 2500 A / 5 A ja keskijännitekaapelia käytettäessä 500 A / 5 A.

Jännitemuuntajat ovat kytketty generaattorille jo valmiiksi ja ne ovat mitoitettu generaattorin nimellisjännitteen mukaisesti, 400 V / 100 V. Verkkomalliin tehdään lisäksi mahdollisuus tarkastella johtolähtöjen jännitteitä varustamalla lähdöt mitausliittimin samoin kuin virtamittausten tapauksessa.

3.5 Mallin ohjaus

Viat ohjataan päälle käyttäen vaihekohtaisia puolijohdereleitä, joiden toimintanopeus voi olla jopa 10 ms eli ne ovat huomattavasti nopeampia tavallisiin releisiin verrattuna⁵⁶. Tämä mahdollistaa esimerkiksi vian päällekytkemishetken säätämisen tarkasti.

Verkkomallia ohjataan HMI-paneelilta, joka on yhteydessä ohjelmoitavaan logiikkaohjaimeen eli PLC:hen. Suurin osa verkkomallin ohjaustoiminnoista tehdään HMI-paneelilta mahdollisimman laajan ja kattavan muunneltavuuden vuoksi. HMI-paneelin voi ohjelmoida halutunlaiseksi. PLC ohjelmoidaan ohjaamaan johtolähtöjen, vikojen sekä kuormien kontaktoreita ja releitä. Vian ohjaus lopullisesti teh-

⁵⁶ Autonics 2020, SR1 Series datalehti

dään painonapista painettavaksi turvallisuussyistä. Verkkomallin paneeliin asennetaan indikaattorit, joista nähdään, kumpi johtolähtö on käytössä. Lisäksi vika-paikan osoittavat indikaattorit lisätään paneeliin.

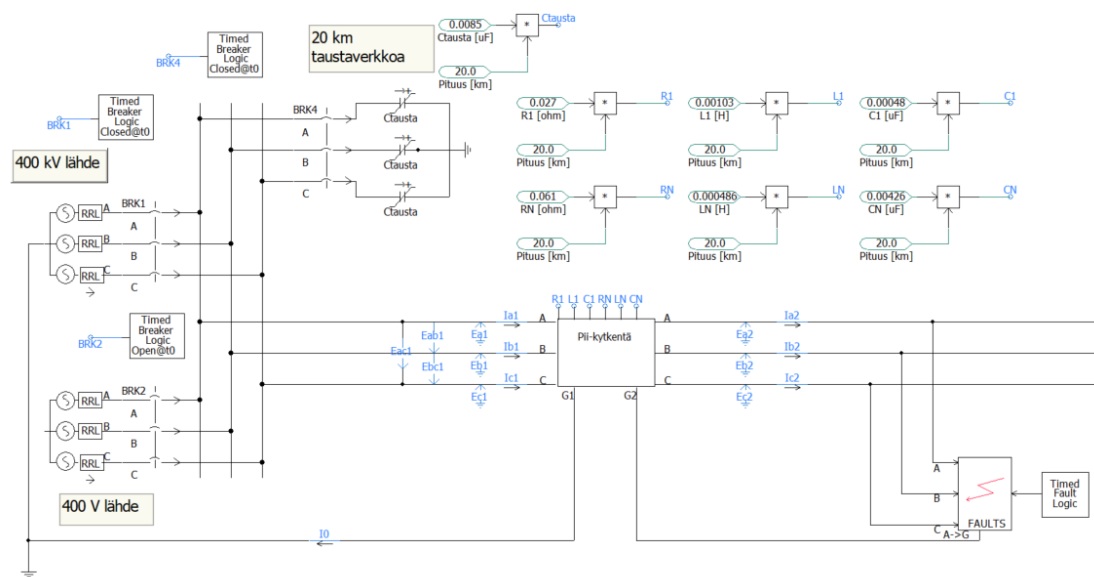
4 VERKKOMALLIN SIMULOINTI PSCAD-OHJELMISTOLLA

Simulointeihin käytetään PSCAD 4.6 -simulointiohjelmistoa, johon saadaan rakennettua oikeaa verkkoa vastaava kytkentä. PSCAD mahdollistaa tarkan simuloinnin hyvin muunneltavissa olevassa simulointiympäristössä.

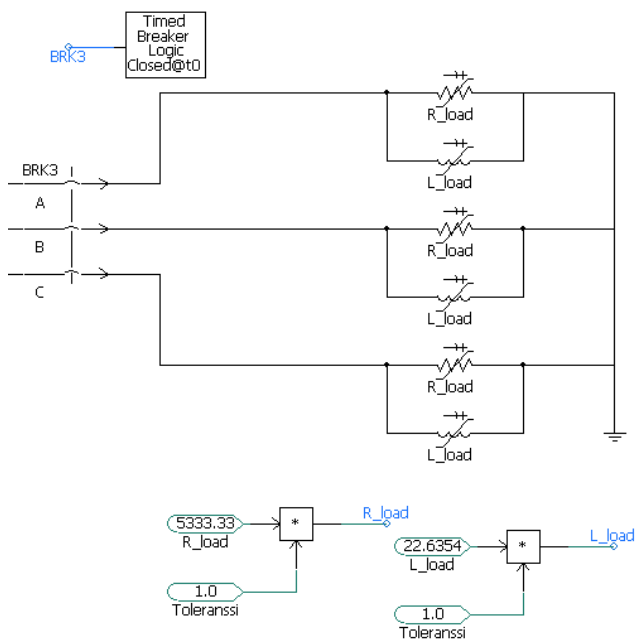
4.1 Mallinnus

Verkkomallin toimintaa simuloidaan PSCAD-simulointiohjelmalla, jolla varmistetaan mallin toimivuus sekä varmennetaan komponenttien mitoitusten onnistuminen. PSCADiin rakennetaan ensiksi kuvien 11 ja 12 mukainen verkkomallin pääkaaviota vastaava kytkentä, joka sisältää seuraavat komponentit:

- Jännitelähteet (400 kV, 20 kV ja 400 V)
- Avojohtoa ja kaapelia mallintavat sijaiskytkennät
- Verkon muita johtolähtöjä kuvaava taustaverkko
- Vikakomponentti, jolla voidaan tehdä oiko- ja maasulkuja eri vikavastuksilla
- Tähteen kytketty induktiivinen kuorma.



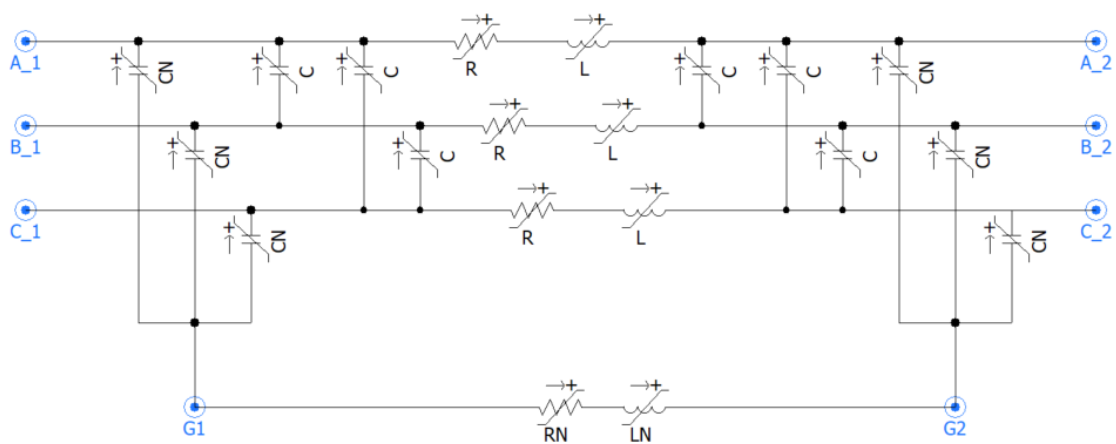
Kuva 11. Verkkomallin kytkentä PSCADissa.



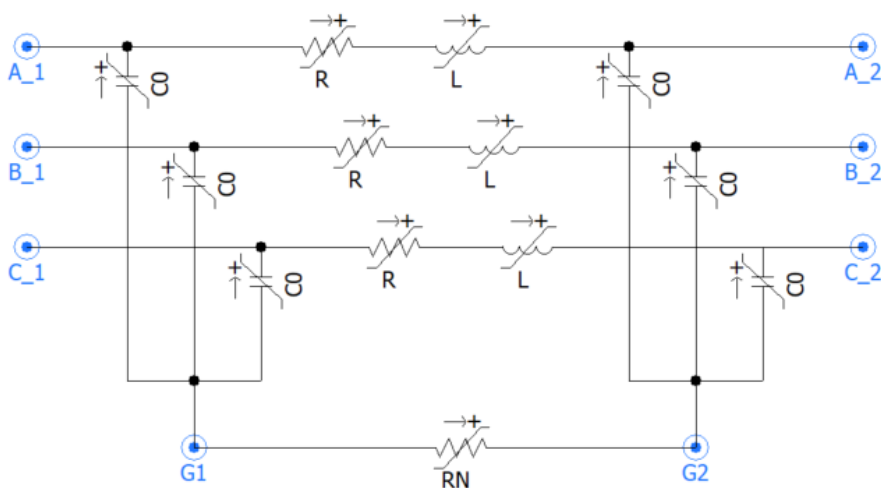
Kuva 12. Kuorman mallinnus PSCADissa.

Kuvassa 11 vikakomponentin maapiirihaaran täytyy kiertää sijaiskytkentäkomponentin kautta, jolloin maasulkupiiriin saadaan mukaan maapiirin vaikutus. Kuvassa verkkomallin jännitelähteen tähtipiste on kytketty suoraan maapotentiaaliin

eli se on tehollisesti maadoitettu. Verkon saa maasta erotetuksi lisäämällä yli megaohmin suuruisen vastuksen jännitelähteen ja maan väliin. Kytkemällä oikein mitoitettu sammutuskuristin tähtipisteen ja maan väliin saadaan verkko kompensoituksi. Siirtoverkon sijaiskytkentäkomponentti on kytketty kuvan 13 mukaisesti osaksi virtapiiriä. Vastaavasti maakaapelin sijaiskytkentä on kuvattu kuvassa 14. Kuvissa liittimet A, B ja C ovat vaiheiden liityntäkohtia ja G1 sekä G2 maapiirin liittimet.



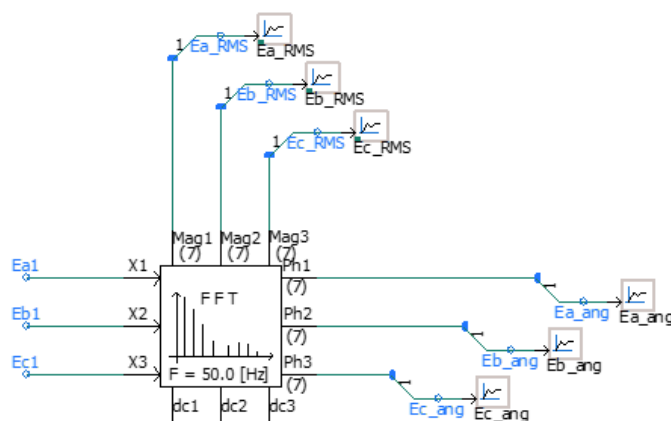
Kuva 13. Siirtojohtodon sijaiskytkentä.



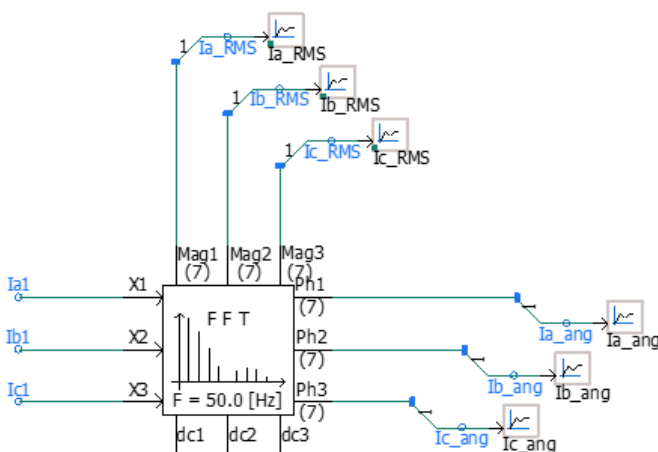
Kuva 14. Maakaapelin sijaiskytkentä.

4.2 Mittauksien toteutukset

Simulointimallissa mitataan virrat ja jännitteet sekä ennen että jälkeen johtopätkän. Mittaukset yhdistetään PSCADin Fast Fourier Transform (FFT) -komponenttiin, joka erottelee virtojen ja jännitteiden perus- ja yliaallot sekä niiden kulmat. Laskuissa otetaan huomioon vain perusaallot. Samalla komponentilla on mahdollista jakaa virrat ja jännitteet myös symmetrisiin komponentteihin. FFT-komponentin käyttöä on esitetty kuvissa 15 ja 16.



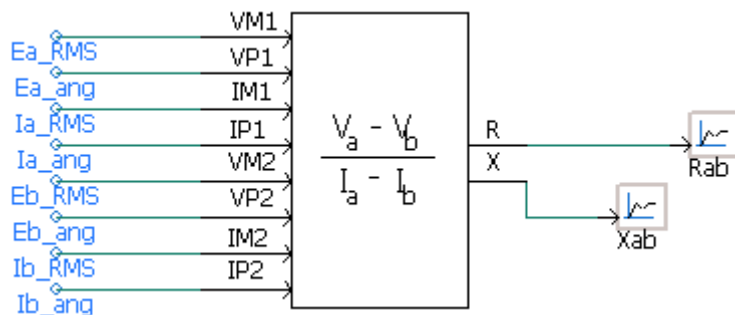
Kuva 15. Jännitteiden FFT-muunnoskomponentti.



Kuva 16. Virtojen symmetristen komponenttien erottelu FFT-komponentilla.

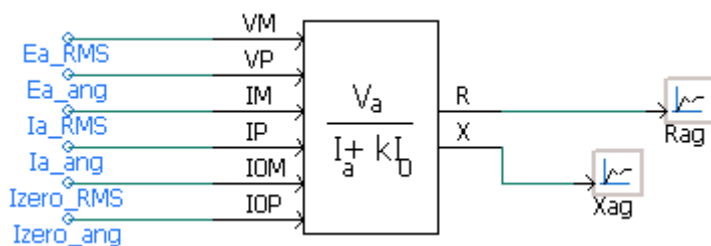
Jännitteiden ja virtojen perusaaltokomponentteja käytetään muun muassa impedanssisilmukoiden laskemiseen. Impedanssisilmukat ovat samoja kuin distanssireleen laskemat silmukat, joita rele käyttää määrittämään vian etäisyyden. Kuvan 17

mukainen silmukkaimpedanssimittauskomponentti jakaa impedanssin vaihekohtaiseen resistanssiin ja reaktanssiin. Laskennat toistetaan kullekin kolmelle vaiheiden väliselle silmukalle.



Kuva 17. Vaihe – vaihe -silmukkaimpedanssimittaus.

Lisäksi maasulkuvioissa määritetään vaiheen ja maan välisen silmukkaimpedanssi kuvan 18 mukaisella tavalla.



Kuva 18. Vaihe – maa -silmukkaimpedanssimittaus.

Yllä olevan laskukaavan nollavirran kerroin k tarkoittaa maapiirin kompensointikerrointa eli se eliminoi maapiirin vaikutuksen vikasilmutasta, jolloin mittaus näyttää resistanssin ja reaktanssin vaihekohtaiset arvot. Maapiirin kompensointikerroin k on kompleksiluku, ja se lasketaan seuraavalla kaavalla ⁸⁵⁷.

⁵⁷ PSCAD X4 (v4.6) 2018 a

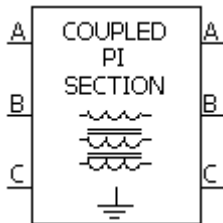
$$\underline{k} = \frac{Z_0 - Z_1}{Z_1}, \quad (8)$$

jossa \underline{Z}_0 on johdon nolлайmpedanssi, joka koostuu nolлайresistanssista (R_0) ja -reaktanssista (X_0)

ja \underline{Z}_1 on johdon myötäimpedanssi, joka koostuu myötäresistanssista (R_1) ja -reaktanssista (X_1).

Taulukoissa 3 ja 4 olevia resistanssi- ja reaktanssiarvoja käyttäen saadaan kertoimelle k itseisarvoksi 1,518 ja kulmaksi $-17,12^\circ$.

Osassa siirtoverkon sijaiskytkentämittauksista saatuja arvoja verrattiin PSCADin Master-kirjastosta löytyvään Pi Section -komponenttiin, joka on esitetty kuvassa 19 ja jolle annettiin verkon myötä- ja nolлайkomponenttien arvot kuvan 20 mukaisesti.

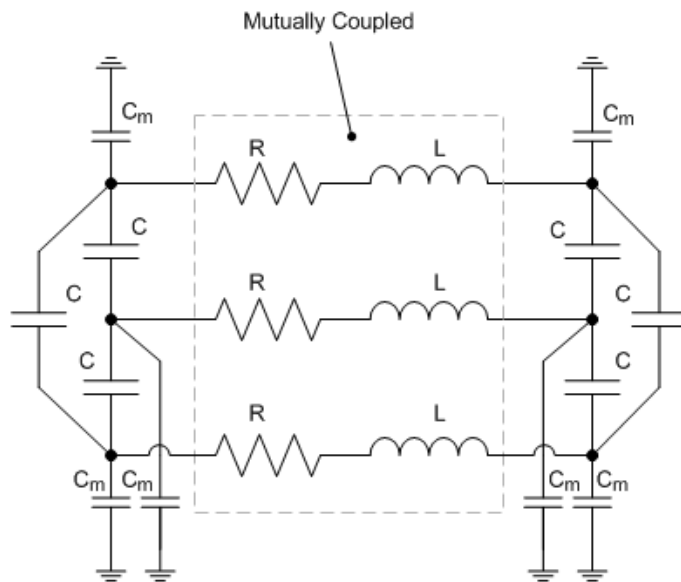


Kuva 19. PSCADin Pi Section -komponentti.

Coupled PI Section	
R, Xl, Xc Data [ohm]	
Positive Sequence	
+ve Sequence Resistance	0.000027 [ohm/m]
+ve Sequence Inductive Reactance	0.000324 [ohm/m]
+ve Sequence Capacitive Reactance	279.330 [Mohm*m]
Zero Sequence	
Zero Sequence Resistance	0.000211 [ohm/m]
Zero Sequence Inductive Reactance	0.000782 [ohm/m]
Zero Sequence Capacitive Reactance	373.831 [Mohm*m]

Kuva 20. Pi Section -komponentin impedanssit.

PSCADin Pi Section -komponentti (kuva 21) sisältää samanlaisen kytkennän kuin tässä työssä suunniteltu siirtoverkon sijaiskytkentä (kuva 13). Kytkennässä on kapasitanssit jaettu vaiheiden välisiin sekä maakapasitansseihin.

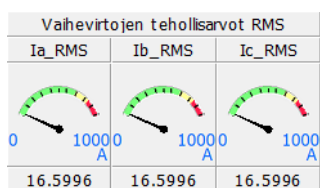


Kuva 21. Pi Section -komponentin sisäinen kytkentä⁵⁸.

4.3 Testaus

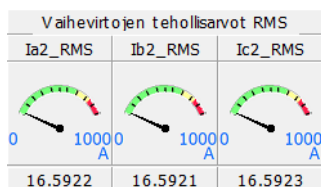
Ensiksi PSCADilla kokeillaan, ovatko sijaiskytkennän komponenttien mitoitukset onnistuneet. Maakapasitanssien suuruus voidaan tarkistaa mittaamalla linjan tyhjäkäyntivirta eli varausvirta. Tämä tarkoittaa, että johdolle on kytketty jännite, mutta ei kuormaa. Lisäksi verkon jännitelähteen tähtipiste on erotettu maasta suuren vastuksen myötä. Testit aloitetaan 400 kV siirtoverkon lähdöstä, joka simuloi 20 km suurjännitejohtoa. Linjan varausvirrat on esitetty kuvassa 22.

⁵⁸ PSCAD X4 (v4.6) 2018 b



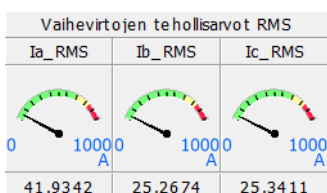
Kuva 22. Siirtojohdon (20 km) varausvirrat.

Koska siirtolinjan varausvirran arvoille ei ole olemassa taulukkoarvoa, verrataan varausvirtaa PSCADin omaan π -sijaiskytkentäkomponenttiin (kuva 19), jolle on syötetty linjan myötä- ja nolliaverkon impedanssit pituusyksikköä kohden kuvan 20 mukaisesti. Valmiin sijaiskytkentäkomponentin tuottamat varausvirrat on esitetty kuvassa 23.

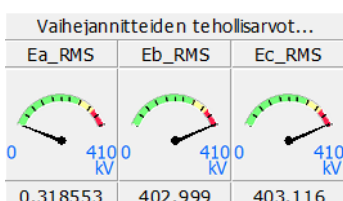


Kuva 23. Pi section -komponentin varausvirrat.

Virrat ovat sadasosan tarkkuudella samat, joten maakapasitanssien mitoituksen voidaan sanoa olevan tarpeeksi hyvä. Lisäksi linjalla voidaan testata vielä yksivaiheinen maasulku maasta erotettuna, jolloin kaikki maasulkuvirta kulkee maakapasitanssien kautta. Ilman vikavastusta tehtävän maasulkukokeen tulokset ovat kuvassa 24.

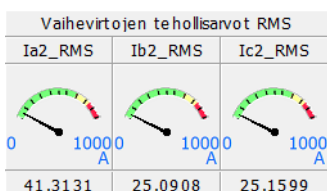


Kuva 24. A-vaiheen maasulkuvirta siirtojohdolla.






Kuva 25. Maasulun aikaiset jännitteet.

Kuvan 25 jännitteistä voidaan nähdä myös yksi maasulun ilmiöistä, eli vikaantuneen vaiheen jännite putoaa maasta erotetussa verkossa lähestulkoon noltaan ja terveiden vaiheiden jännitteet kasvavat verkon pääjännitteen suuruiseksi. Jäykän maasulun tuottamia virtoja verrataan jälleen PSCADin valmiin sijaiskytkentäkomponentin tuottamiin maasulkuvirtoihin (kuva 26). Huomataan, että virrat vastaavat toisiaan hyvin paljon.



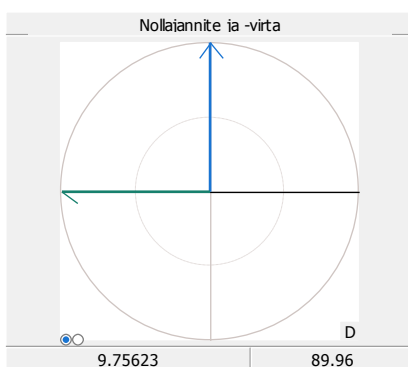
Kuva 26. Pi section -komponentin tuottama maasulkuvirta.

Samat testit toistetaan keskijännitemaakaapeliverkolle. Ensin mitataan varausvirta 1,6 km pituisen AHXAMK-W -kaapelilähdön osalta. Tyhjäkäyntitestistä saadaan kuvan 27 mukaiset arvot kaapelin varausvirralle.

Vaihevirrat		
Ia1_RMS	Ib1_RMS	Ic1_RMS
		
1.62787	1.62787	1.62787

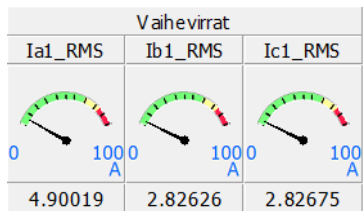
Kuva 27. Maakaapelin (1,6 km) varausvirta.

Varausvirran arvoa voidaan verrata kaapelivalmistajan taulukkoarvoon, jonka mukaan kaapelin kuluttama varausvirta on $1,0 \text{ A/km}^{59}$. Kaapeli kuluttaa 1,6 km matkalla laskelmien mukaan 1,6 A varausvirtaa. Kuvan 27 mitatut virrat pitävät paikkansa noin kymmenesosan tarkkuudella. Kaapelille tehdään lisäksi kuormittamattomana jäykkä maasulku ja mitataan virta tässä tapauksessa. Tulos on kuvan 29 mukainen. Lisäksi tarkastellaan, ovatko maasulun aikaiset nollajännitteen ja -virran vektorit toisiinsa nähden 90° kulmassa (kuva 28).



Kuva 28. Maasulun nollajännite ja -virta maasta erotettuna. Vihreä=nollajännite, sininen=nollavirta.

⁵⁹ Prysmian Group 2018, AHXAMK-W 20 kV datalehti

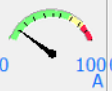
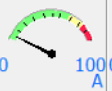
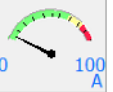


Kuva 29. Maasulkuvirta kaapelilla (1,6 km) maasta erotetussa verkossa.

Tulos vastaa kohtuullisen hyvin kaapelivalmistajan taulukkoarvoa, jonka mukaan kaapeli tuottaa kapasitiivista maasulkuvirtaa 3 A/km eli 1,6 km matkalla 4,8 A⁶⁰. Taulukkoarvoihin verrattaessa täytyy ottaa huomioon, että kyseiset arvot eivät ole tarkkoja.

Lisäksi tarkastellaan taustaverkon vaikutusta maasulkuvirtaan. Tällöin taustaverkkoa mallintavat maakapasitanssit kytketään vikaantuneen lähdön rinnalle. Taustaverkon kapasitanssit on yksinkertaisuuden nimissä mitoitettu yhtä suuriksi kuin vikaantuneen lähdön kapasitanssit. Teorian mukaan vikaantuneen lähdön vikavirta tulisi olla tällöin kaksinkertainen verrattuna tilanteeseen, jossa taustaverkkoa ei ole kytkettynä mukaan. Vikaantuneen lähdön vaihevirit maasulussa on esitetty kuvassa 30.

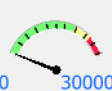
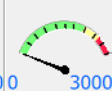
⁶⁰ Prysmian Group 2018, AHXAMK-W 20 kV datalehti

Vaihevirit		
Ia1_RMS	Ib1_RMS	Ic1_RMS
		
9.75611	2.81428	2.8179

Kuva 30. Kaapelin maasulkuvirta, taustaverkko kytkettynä.

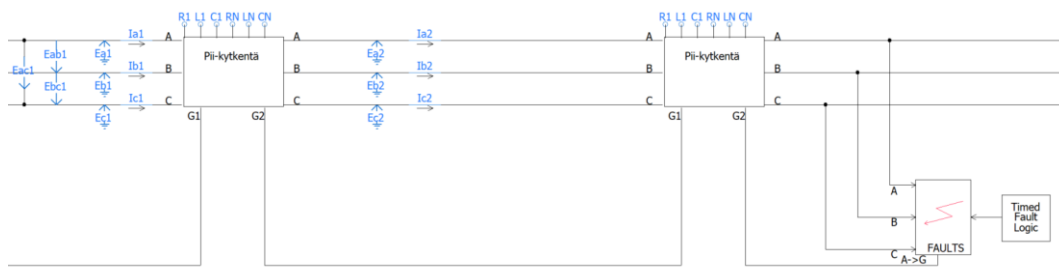
Verrattaessa vikaantuneen A-vaiheen virtaa aiempaan maasulkumittaukseen huomataan virran kaksinkertaistuneen.

Seuraavaksi tarkastellaan, vastaavatko distanssisuojauksessa käytetyt vikasilmuk-kaimpedanssimittaukset laskettuja arvoja, eli pystytäänkö vikapaikan sijainti to-dentamaan resistanssi- ja reaktanssimittauksilla. Aloitetaan tekemällä 400 kV suurjännitejohdon sijaiskytkennälle kaksivaiheinen oikosulku ilman vikavastusta. Tästä saadaan tulokseksi alla olevat resistanssin ja reaktanssin arvot (kuva 31), kun johdon pituus on 20 km.

L1 - L2 silmukka	
Rab	Xab
	
0.540253	6.4733

Kuva 31. Kaksivaiheisen oikosulun linjan resistanssi ja reaktanssi (20 km linja).

Linjan myötäresistanssi kilometriä kohden on $0,027 \Omega/\text{km}$, joten 20 km johtopätkä vastaa $0,54 \Omega$ vaihekohtaista resistanssia. Vastaavasti distanssisuojauksen kan-nalta oleellisempi tulos on linjan myötäreaktanssin arvo, jonka taulukkoarvo kilo-metriä kohden on $0,324 \Omega/\text{km}$ eli 20 km johtopituus vastaa $6,48 \Omega$. Verrattaessa näitä laskettuja arvoja kuvassa 31 esitettyihin voidaan siis sanoa, että impedanssi-mittaukset antavat tarkan tuloksen laskettuihin arvoihin vertailtaessa. Distanssi-rele kykenee siis mittaamaan vikapaikan etäisyyden oikein. Samalla tavalla voi-daan tutkia, saadaanko kaksinkertainen linjan pituus, kun kaksi sijaiskytkentä-osiota samoilla komponenttisuuruuksilla laitetaan peräkkäin (kuva 32). Tulokset ovat kuvassa 33.



Kuva 32. Kaksi samanlaista sijaiskytkentää peräkkäin. Linjan kokonaispituus 40 km.

L1 - L2 silmukka	
Rab	Xab
1.0815	12.9526

Kuva 33. Kaksivaiheisen oikosulun linjan resistanssi ja reaktanssi (40 km linja).

Linjan kilometrikohtaiset myötäresistanssit ja -reaktanssit kertomalla 40 km johdotopituudella saadaan resistanssiksi 1,08 Ω ja reaktanssiksi 12,96 Ω . Tämäkin silmukkaimpedanssimittaus näyttää siis tarkan linjapituuden.

Sama mittaus toistetaan keskijännitekaapelin 2-vaiheiselle oikosululle, mistä saadaan seuraavat tulokset (kuva 34).

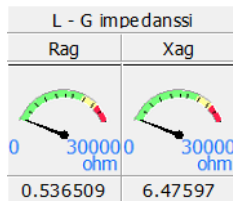
Main : Controls	
Rab	Xab
0.320008	0.180955

Kuva 34. Maakaapelin kaksivaiheisen oikosulun linjan resistanssi ja reaktanssi (1,6 km).

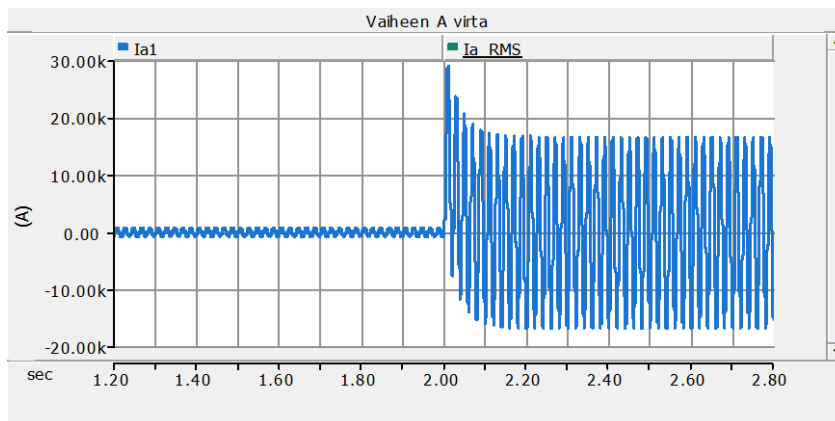
Vika tapahtuu tällöin 1,6 km linjan päässä. Laskettu arvo linjan pituudelle resistanssina on 0,32 Ω ja reaktanssina 0,18 Ω , eli myötäimpedanssimittaukset vastaavat kaapelillakin laskettua arvoa suorassa maasulussa.

Seuraavaksi testataan, toimiiko yksivaiheisen maasulun aikainen vaihe-maa -silmukkaimpedanssimittaus. Maasulku tehdään siirtoverkkolähdöllä jälleen 20 km

pitkän linjan päähän. Maapiirin silmukkaimpedanssimittauksen tulisi näyttää johdon myötaverkon resistanssit ja reaktanssit samalla tavalla kuin aiemmin läpikäyty vaiheiden välinen silmukka. Testi tehdään verkko jäykästi maadoitettuna sekä ilman vikavastusta. Tulokset ovat kuvassa 35. Samalla voidaan tutkia vikavastuasettoman maasulun virtaa, jonka hetkellisarvokuvaaja on kuvan 36 mukainen.



Kuva 35. Yksivaiheisen maasulun resistanssi ja reaktanssi (20 km).



Kuva 36. Maasulkuvirran hetkellisarvokuvaaja.

Tulokset ovat vastaavat pitkälti jo aiemmin laskettuja, linjan pituuden mukaisia resistanssin ja reaktanssin arvoja. Pieni epätarkkuus tuloksissa voi johtua esimerkiksi maapiirin kompensointikerroimen k aiheuttamasta virheestä. Reaktanssin arvo on kuitenkin tuloksista tarkempi, mikä on hyvä asia, sillä distanssirele käyttää nimenomaan linjan reaktanssia vikapaikan määrittämiseen. Kaapelille vastaava mittaus jätetään suorittamatta, sillä kaapelille ei ole tiedossa nollaimpedanssia eikä täten maapiirin kompensointikerrointa. Kaapeleille ei siis ole mielekää suorittaa distanssilaskentaa samalla lailla kuin avojohdoille.

Kaapeliverkolla puolestaan testataan, toimiiko sammutuskuristimen mitoitus sekä asennus oikealla tavalla. Sammutuskuristin asennetaan verkon tähtipisteen ja maan väliin niin, että maasulkuvirran paluupiiri kulkee kuristimen kautta. Kuristimen induktanssiarvo määritellään koko verkon yhteen laskettujen maakapasitanssien avulla kaavan 9 tavalla⁶¹. Sammutetun verkon vikavastuksettoman maasulkukokeen tulokset ovat kuvassa 37 ja 38.

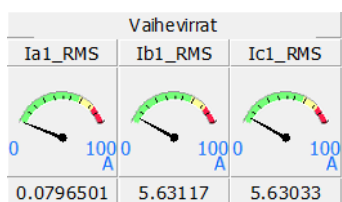
$$L = \frac{1}{3\omega^2(C_v+C_t)}, \quad (9)$$

jossa ω on verkon kulmataajuus

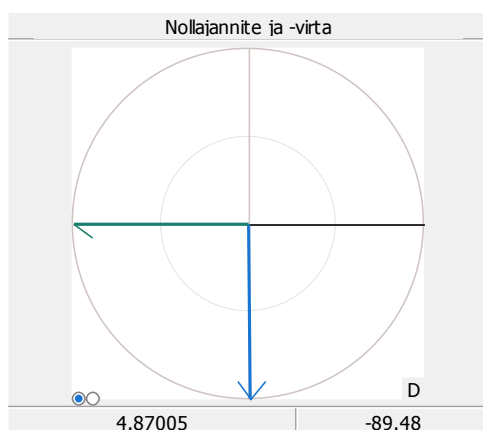
C_v on vikaantuneen lähdön maakapasitanssi. Käytössä 1,6 km kaapelia.

C_t on taustaverkon kapasitanssi

⁶¹ Elovaara, Haarla 2011 a, 210



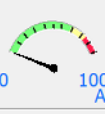
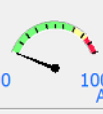
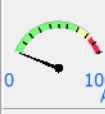
Kuva 37. Sammutetun verkon maasulkuvirta (A-vaihe).



Kuva 38. Sammutetun verkon nollajännite ja -virta maasulun aikana.

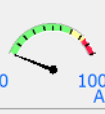
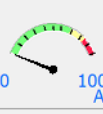
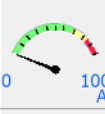
Tuloksista nähdään, että vikaantuneen A-vaiheen virta on pienentynyt aiemmasta reilusta 9 ampeerista yhden ampeerin sadasosiin. Lisäksi vektorinäytöstä huomataan, että nollajännitteen suunta on pysynyt paikallaan, mutta nollavirta (sininen vektori) on kääntynyt 180° maasta erotetun verkon maasulun nollavirtaan nähden.

Seuraavaksi tarkastellaan mallin toimintaa 400 V jännitetasolla sekä kyseiselle tasolle muunnetuilla impedanssiarvoilla. Toistetaan sekä siirto johdon että maakaapelin sijaiskytkennöille samat testit. Testien tulisi näyttää impedanssiarvot oikeassa suhteessa primääriverkon arvoilla tehtyihin mittauksiin. Aloitetaan testit jälleen kaapelin varausvirran mittauksesta maasta erotetussa verkossa. Kappaleen 3.2 mukaisesti virran tulisi olla 20 kertaa pienempi sekundääriarvoilla. Varausvirta 1,6 km pituisella kaapelilla 400 V tasolle korjatuilla impedanssi arvoilla on esitetty kuvassa 39.

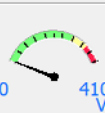
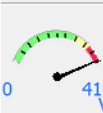
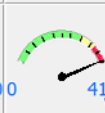
Vaihevirit		
Ia1_RMS	Ib1_RMS	Ic1_RMS
		
0.0813929	0.0813929	0.0813929

Kuva 39. Kaapelimallin varausvirta korjatuilla arvoilla.

Kun edellä esitetyt virrat kerrotaan virtojen suhdekertoimella 20, saadaan releen mittaamaksi varausvirraksi 1,63 A. Tulos siis vastaa primääriarvoilla suoritettua testiä. Testataan lisäksi, onko vikavastuksettomassa, maasta erotetussa maasulussa samansuhtainen virta. Tulos on nähtävissä kuvassa 40. Lisäksi kuvasta 41 nähdään, että vikaantuneen vaiheen jännite on tippunut noltaan ja terveiden vaiheiden jännite on noussut pääjännitteen suuruiseksi. Tämä tulee ottaa myös huomioon komponentteja valittaessa, erityisesti kondensaattoreiden jännitekestoisuutta mitoitettaessa.

Vaihevirit		
Ia1_RMS	Ib1_RMS	Ic1_RMS
		
0.244974	0.141274	0.141364

Kuva 40. Kaapelimallin maasulkuvirta (A-vaihe) korjatuilla arvoilla.

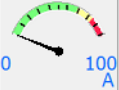
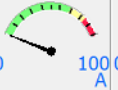
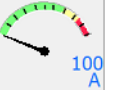
Vaihejännitteet		
Ea1_RMS	Eb1_RMS	Ec1_RMS
		
0.14669	402.402	402.871

Kuva 41. Jännitteet maasta erotetussa verkossa maasulun aikana.

Kun A-vaiheen vikavirta kerrotaan suhdeluvulla 20, saadaan sama tulos kuin primääriverkon maasulusta (4,9 A).

Tyypillisesti sähkötekniisillä komponenteilla on jonkinlainen toleranssi sähköisissä arvoissaan. Maakaapelimallin pituuden määrävänä tekijänä pidetään erityisesti maakapasitanssien suuruutta eli maasulkuvirran tuottoa. Tämän takia testataan,



kuinka suuren virheen aiheuttaa esimerkiksi 20 %:n valmistustoleranssi maakaapelin maakapasitansseissa. Vastaavalla tavalla tehty vikavastukseton maasulku 20 %:a suuremmalla maakapasitanssiarvolla on esitetty kuvassa 42.

Vaihevirit		
Ia1_RMS	Ib1_RMS	Ic1_RMS
		
0.434483	0.279282	0.282479

Kuva 42. Maakaapelin maasulku kondensaattorin 20 %:n toleranssilla.

Yllä oleva A-vaiheen vikavirta vastaa 20 kV tasolle muunnettuna 8,68 A. Kun ideaalisella kondensaattorilla kytkettynä maasulkuvirta oli 4,9 A eli 1,6 km, 20 %:n toleranssi kasvatti maakaapelin pituutta jopa 2,9 km:iin. Tämän takia tulisi löytää mahdollisimman pienellä toleranssilla varustetut kondensaattorit. Vaihtoehtoisesti kaapelimallin pituutta tulisi kasvattaa, jotta virheen suhteellinen osuus ei olisi niin suuri.

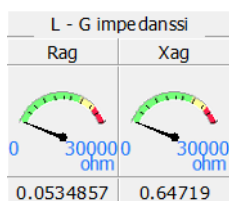
Toistetaan vikasilmutestit siirtoverkkoa simuloivalle mallille. Komponentit on mitoitettu 20 km pitkälle johdolle ja korjattuna 400 V jännitetasolle. Kaksivaiheisen vikavastuksettoman oikosulun silmukkaimpedanssimittaukset ovat kuvassa 43.

L1 - L2 silmukka	
Rab	Xab
	
0.054025	0.64733

Kuva 43. Siirtojohtomallin oikosulun vikasilmuttamittauksen resistanssi ja reaktanssi korjatuilla arvoilla.

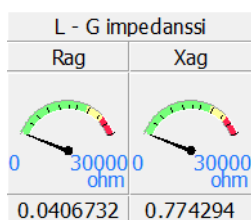
Tuloksia tarkastellessa täytyy muistaa korjata arvot 400 kV tasolle, jolloin pitkitäiskomponentit kerrotaan kymmenellä. Tällöin voidaan sanoa, että tulokset vastaavat primääriverkon arvoilla tehtyä testiä, jossa Xab arvoksi saatiin 6,47 Ω . Yhtä

lailla vikavastuksettoman maasulun tulisi näyttää vaiheiden myötäreaktanssi. Tulos testistä on kuvassa 44.



Kuva 44. Siirtojohtomallin maasulun vikasilmukkamittauksen resistanssi ja reaktanssi korjatuilla arvoilla.

Myös maasulkutesti antaa samat testit muunnetuilla komponenttiarvoilla sekä samalla maapiirin korjauskertoimella k . Samoin kuin maakaapelin tapauksessa, kokeillaan kasvattaa kelan induktanssin arvoa 20 %, joka vastaa tyypillistä valmistustoleranssia komponenteilla. Maasulkutesti toleranssin kanssa suoritetuilla arvoilla on kuvan 45 mukainen.



Kuva 45. Siirtojohtomallin maasulun vikasilmukkamittauksen resistanssi ja reaktanssi korjatuilla arvoilla ja kelojen 20 %:n toleranssilla.

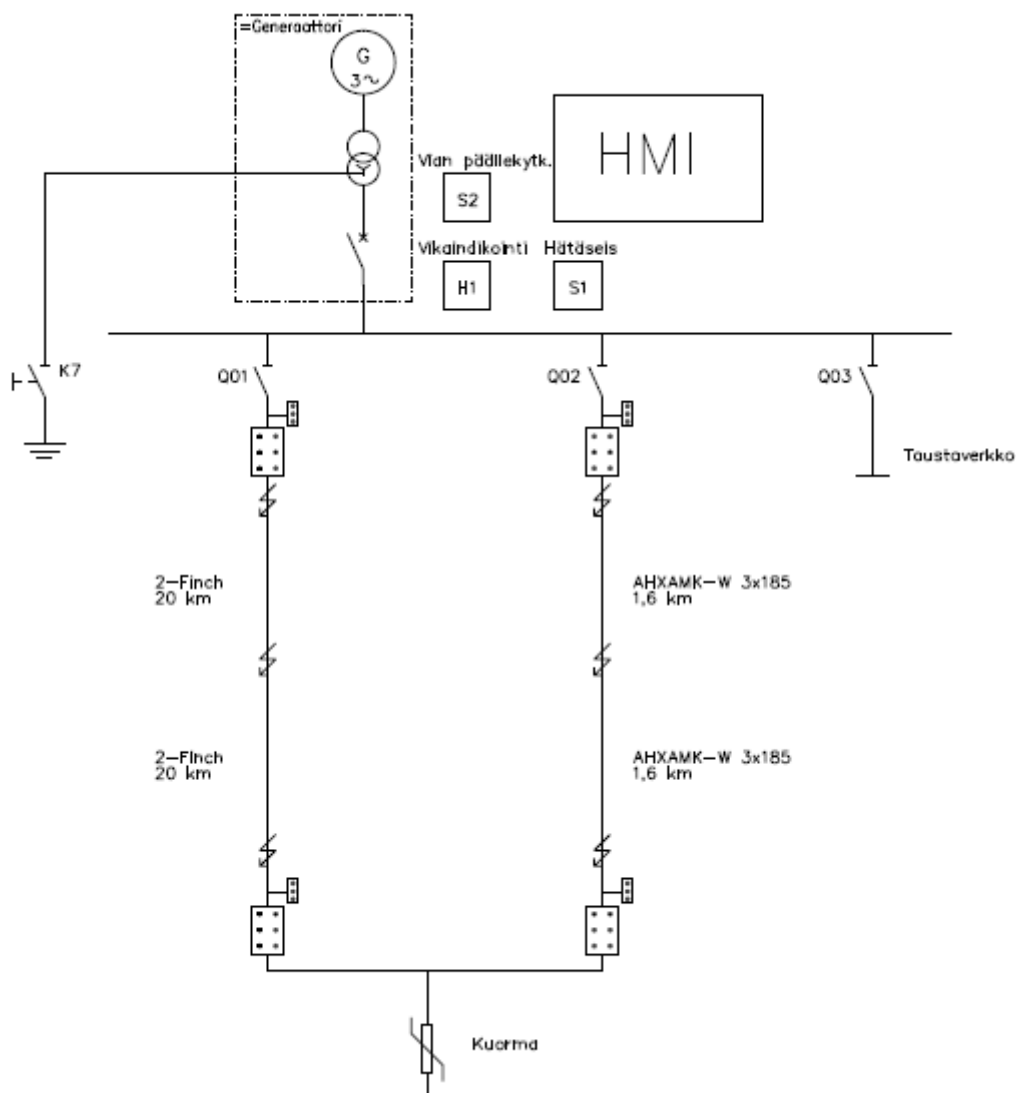
Kun oikealla induktanssin arvolla reaktanssimittaus antoi linjan pituudeksi 20,7 km, 20 %:n toleranssi kasvatti linjan pituutta 23,8 km:iin eli kelojen toleranssi kasvattaa tai lyhentää linjan pituutta noin 3 km. Toleranssin vaikutus johdinpituuden estimoinnin virheeseen ei ole yhtä voimakas kuin maakaapeleilla, jotka testattiin aiemmin.

5 VERKKOMALLIN TOTEUTUS

Tässä luvussa esitellään verkkomallin toteutusta kytkentäkuvin. Verkkomallin fyysinen toteutus vaatii runsaasti kontaktoreita sekä releitä, minkä vuoksi kytkentöjä sekä modulaarisuutta helpottamaan verkkomalliin asennetaan ohjelmoitava logiikkaohjain.

5.1 Mimiikka

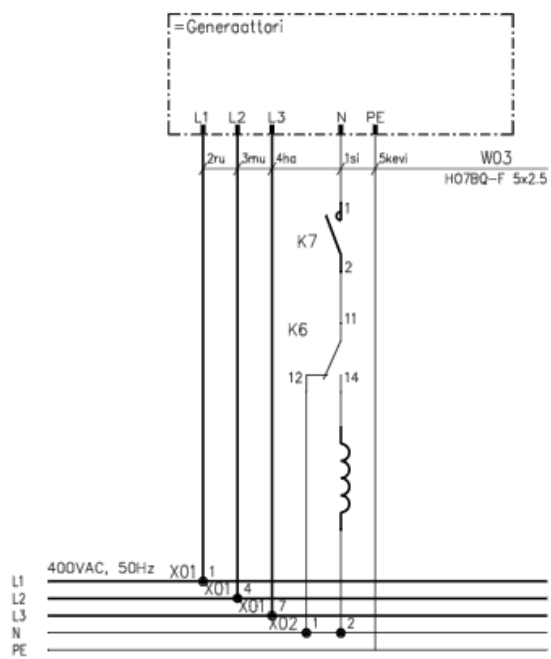
Verkkomallin mimiikka on kuvan 46 mukainen. Linjoilla on mittauspisteet sekä alussa että lopussa mittamuuntajakytkentöjä varten.



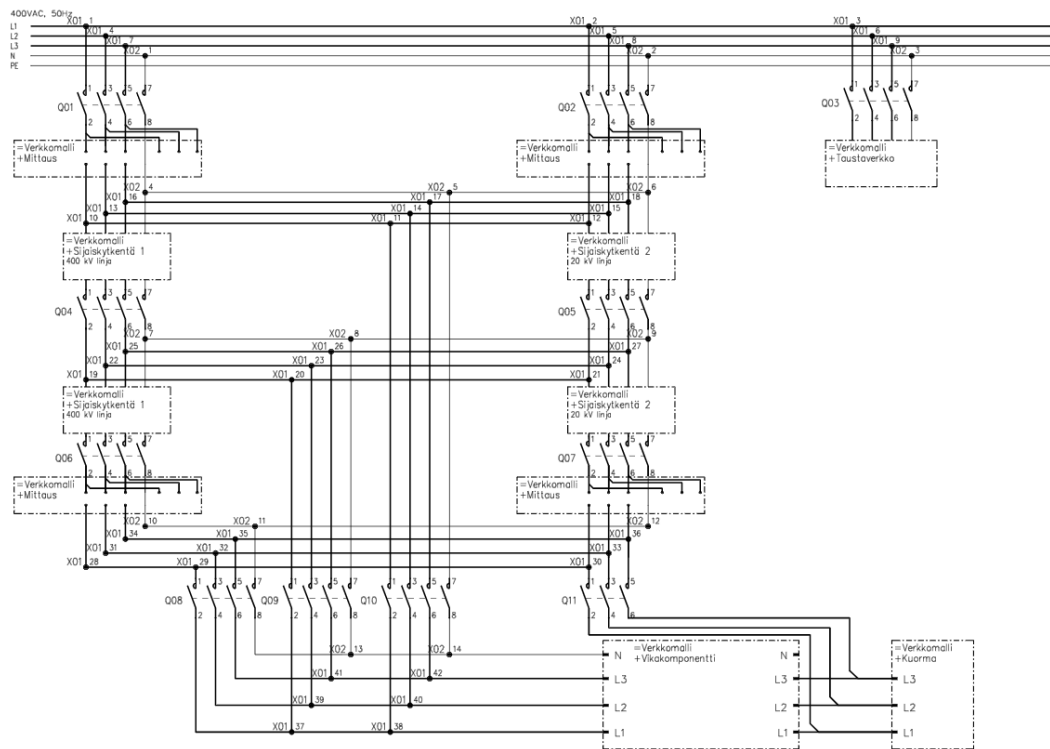
Kuva 46. Verkkomallin etupaneelin mimiikka.

5.2 Piirikaaviot ja layout

Verkkomallin liityntä on kuvan 47 mukainen. Liitynnässä on otettu huomioon verkon eri maadoitustavat. Verkko voidaan muuttaa suoraan maadoitetuksi sekä kompensoiduksi valintakytkintä K6 käyttämällä sekä maasta erotetuksi kontaktorilla K7. Kuvassa 48 on puolestaan esitetty verkkomallin päävirtapiiri.

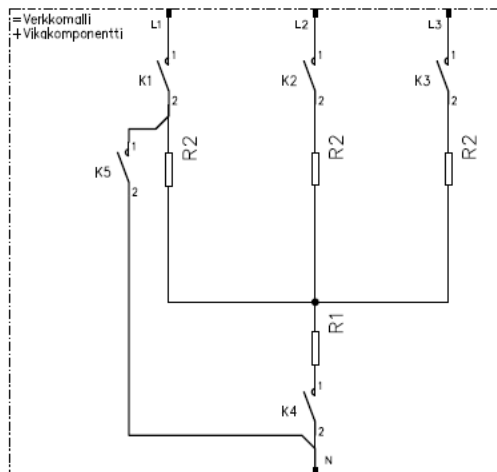


Kuva 47. Verkkomallin liityntä.

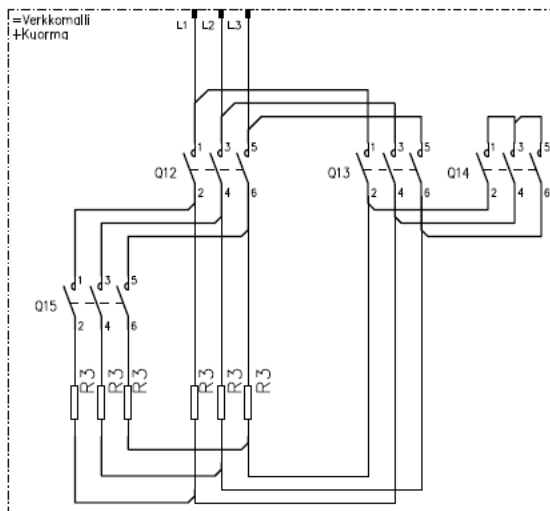


Kuva 48. Verkkomallin päävirtapiiri.

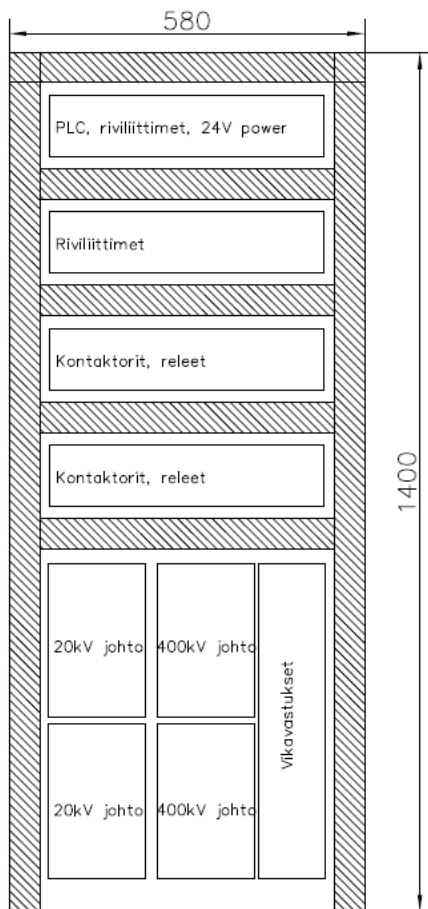
Kuvissa 49 ja 50 on esitelty vika- ja kuormakomponenttien kytkennät. Vikakomponentissa jokaisella vaiheella on oma puolijohdereleensä, jota ohjaamalla vikoja toteutetaan. Kuormakomponentissa puolestaan kytkentää voidaan muuttaa lisäksi tähdestä kolmioon sekä puolittaa kuorman resistanssi ja kaksinkertaistaa teho.



Kuva 49. Vikakomponentti.



Kuva 50. Kuormakomponentti.



Kuva 51. Verkkomallin layout.

Kuvassa 51 on esitetty verkkomallin fyysistä layoutia. Layout sisältää kaikki komponentit lukuun ottamatta kuormakomponentin vastuksia.

6 YHTEENVETO

Työssä selvitettiin sähköverkon rakennetta ja sen ominaisuuksia sekä niiden vaikutuksia vikatilanteisiin sekä relesuojaukseen. Olennainen osa työtä oli sekä avojohdon että kaapelin sijaiskytkentää ja sen eri osien parametreja koskevien seikkojen selvittäminen. Tämä osa työstä oli hyvin aikaa vievä, mutta onnistui lopulta hyvin. Mitoitusten onnistuminen saatiin todennettua PSCAD-simulointiympäristössä kattavasti.

Haasteita työssä aiheutti muun muassa se, että kirjallisuudessa esiintyi lukuisia erilaisia laskentatapoja johdon sijaiskytkennän komponenttien määrittämiselle. Lisäksi työssä suunniteltu siirtoverkon sijaiskytkentä, joka sisältää myös maapiirin, on suhteellisen harvinainen, eikä sille löytynyt vertailukohteita muusta kirjallisuudesta. Päänvaivaa aiheuttivat myös sopivien komponenttien löytäminen markkinoilta, jotta komponenttiarvot vastaisivat toisiaan. Edellä mainitun seikan takia työstä päätettiin rajata pois verkkomallin testaus käytännössä. Myös koko maailmaan vaikuttava komponenttipula vaikutti tähän päätökseen.

Verkkomallilla on kuitenkin vielä jatkotutkimuskohteita. Esimerkkinä on säädettävän sammutuskuristimen mitoitus, jotta erilaisia kaapeliverkon kytkentätilanteita saataisiin mallinnettua. Tämä vaatii kuitenkin yhteistyötä kuristinvalmistajan kanssa, sillä vakioinduktanssiarvot vain harvoin vastaavat vaadittua kokoa. Jotta verkkomallin kuorma vastaisi todellista kulutusta, vaaditaan lisäksi kuormavastusten rinnalle kytkettävää induktanssia. Induktanssiarvot kasvavat kuitenkin sekä sammutuskelassa että kuormainduktanssissa niin suuriksi, että niitä on hankala löytää valmistajien tuotevalikoimasta.

Jatkokehityskohde voisi olla myös uusien vikatyyppeiden kehitys. Esimerkkinä kehityskohteesta voisi olla katkeileva maasulku, joka tapahtuu paikoitellen kompensoidussa verkossa. Katkeileva maasulku aiheuttaa haasteita relesuojaukselle, sillä

maasulku saattaa kestää kerrallaan vain joitakin satoja mikrosekunteja. Myös kaksoismaasulku voisi olla hyvä lisä verkkomalliin, jolloin kahdessa eri paikassa johtoa tapahtuu maasulku eri vaihejohtimista.

LÄHTEET

- Elovaara, J. & Haarla, L. 2011 a. Sähköverkot I. Helsinki. Gaudeamus.
- Elovaara, J. & Haarla, L. 2011 b. Sähköverkot II. Helsinki. Gaudeamus.
- GEC ALSTHOM T&D, 1995. Protective Relays Application Guide. Manchester. ICA Advertising & Marketing Limited.
- Lakervi, E. & Partanen, J. 2009. Sähköjaketekniikka. Helsinki. Gaudeamus.
- Mäkelä, M., Soininen, L., Tuomola, S. & Öistämö, J. 2018. Tekniikan kaavasto. Porvoo. Tammertekniikka.
- Fingrid, 2020. Suomen sähköjärjestelmä. Viitattu 20.12.2021. <https://www.fingrid.fi/kantaverkko/sahkonsiirto/suomen-sahkojarjestelma/>
- Fingrid, 2020. Fingridin sähkösiirtoverkko. Viitattu 20.12.2021. <https://www.fingrid.fi/kantaverkko/sahkonsiirto/fingridin-sahkonsiirtoverkko/>
- Nikander, A. & Mäkinen, A. 2017. Laajan kaapeloidun keskijänniteverkon maasulkuilmiöiden vaikutukset – suojaushaasteet, yliaallot, vaarajännitteet. Viitattu 5.2.2022. https://energia.fi/files/2130%20/Laajan_kaapeloidun_keskijanniteverkon_maasulkuilmioiden_vaikutukset_TTY_2017.pdf
- Vaasan Sähköverkko, 2020. Sähköverkon kehittäminen. Viitattu 21.12.2021. <https://www.vaasansahkoverkko.fi/sahkoverkko/sahkoverkon-kehittaminen/>
- Arcteq Relays Oy, 2019. AQ-F255 User manual. Viitattu 2.2.2022. <https://www.arcteq.fi/wp-content/uploads/2019/11/AQ-F255-Instruction-manual-v2.01EN.pdf>
- Autonics, 2020. SR1 Series datalehti. Viitattu 20.2.2022. <https://www.tme.eu/Document/a08f6411c7c47da7ac5e5485b6d69504/SR1-series.pdf>
- Mecc Alte SpA, 2019. ET16F datalehti. Viitattu 16.1.2022. <https://www.meccalte.com/downloads/ET16F.pdf>
- Prysmian Group, 2018. AHXAMK-W 20 kV maakaapeli datalehti. Viitattu 15.12.2021. https://fi.prysmiangroup.com/sites/default/files/business_markets/markets/downloads/datasheets/AHXAMK-W%2020kV_170418.pdf
- PSCAD X4 (v4.6), 2018 a. Line to Ground Impedance. Viitattu 22.12.2021. https://www.pscad.com/webhelp/Master_Library_Models/Relays/Line_to_Ground_Impedance.htm

PSCAD X4 (v4.6), 2018 b. Pi-Sections (Single Circuit). Viitattu 22.12.2021.
https://www.pscad.com/webhelp/Master_Library_Models/Miscellaneous/pisec-tions.htm

Salo, A. 2021. Jakeluverkon perustietoja. Email ari.salo@vaasansahkoverkko.fi
10.11.2021. Tulostettu 10.11.2021.