



Ilari Ristolainen

Voimalaitos- ja teollisuusrengasverkon
maasulun paikannus

Voimalaitos- ja teollisuusrengasverkon maasulun paikannus

Ilari Ristolainen

VTT Prosessit

ISBN 951-38-5945-2 (nid.)
ISSN 1235-0605 (nid.)
ISBN 951-38-5956-8 (URL: <http://www.inf.vtt.fi/pdf/>)
ISSN 1235-0865 (URL: <http://www.inf.vtt.fi/pdf/>)
Copyright © VTT 2002

JULKAISIJA – UTGIVARE – PUBLISHER

VTT, Vuorimiehentie 5, PL 2000, 02044 VTT
puh. vaihde (09) 4561, faksi (09) 456 4374

VTT, Bergsmansvägen 5, PB 2000, 02044 VTT
tel. växel (09) 4561, fax (09) 456 4374

VTT Technical Research Centre of Finland, Vuorimiehentie 5, P.O.Box 2000, FIN-02044 VTT, Finland
phone internat. + 358 9 4561, fax + 358 9 456 4374

VTT Prosessit, Tekniikantie 4 C, PL 1606, 02044 VTT
puh. vaihde (09) 4561, faksi (09) 456 6538

VTT Processer, Teknikvägen 4 C, PB 1606, 02044 VTT
tel. växel (09) 4561, fax (09) 456 6538

VTT Processes, Tekniikantie 4 C, P.O.Box 1606, FIN-02044 VTT, Finland
phone internat. + 358 9 4561, fax + 358 9 456 6538

Toimitus Maini Manninen

Otamedia Oy, Espoo 2002

Ristolainen, Ilari. Voimalaitos- ja teollisuusrengasverkon maasulun paikannus [Location of earthfault in ring networks of power plant and industry]. Espoo 2002. VTT Tiedotteita – Research Notes 2135. 19 s.

Avainsanat power plants, industrial plants, power distribution systems, distribution networks, decentralised networks, earth faults, detection, simulation, electric current, least squares method

Tiivistelmä

Rengasverkko on perinteisistä voimalaitos- ja teollisuusverkkojen ratkaisusta poikkeava tapa toteuttaa voimalaitosten ja teollisuuslaitosten sisäinen sähkönsyöttö. Rengasverkko on taloudellisempi ratkaisu kuin perinteinen säteittäinen verkko, eikä erillistä sähkötilaa enää tarvita. Tämä antaa uusia mahdollisuuksia rakennusten tilasuunnitteluun.

Maasulun sijainnin tarkka määrittäminen rengasverkossa on yksi haasteellinen ongelmakenttä. Yksi mahdollisuus toteuttaa maasulun paikannus on mitata verkon summavirta kolmesta kohdasta rengasverkkoa. Näiden summavirtojen itseisarvojen perusteella saadaan määrättyä maasulun sijainti. Summavirtojen mittaustietoa voidaan paikannuksen lisäksi hyödyntää renkaaseen kytkettyjen laitteiden, kuten moottoreiden ja muuntajien, selektiivisessä suojauksessa.

Tässä tutkimuksessa simuloitiin rengasverkon maasulkuja käyttäen mallin lähtökohtana Kirkniemen (Lohja) voimalaitoksen sisäistä jakeluverkkoa vastaavaa rengasverkkoa. Maasulun paikannus toteutettiin taulukkopohjaisena. Taulukkoon laskettiin teoreettiset summavirtojen arvot maasulun sattuessa verkon eri osiin. Teoreettisia arvoja verrattiin simuloimalla saatuihin arvoihin, joiden pohjalta määrättiin pienimmän virheen neliösumman avulla estimaatti sijainnille.

Toteutetulla ratkaisualgoritmilla päästiin noin yhden metrin tarkkuuteen paikannuksessa. Paikannuksen tarkkuuteen vaikuttaa oleellisesti renkaassa olevien pistemäisten maakapasitanssien suuruus. Käytännössä tarkkuuteen vaikuttaa oleellisesti myös virtojen mittaustarkkuus.

Ristolainen, Ilari. Location of earthfault in ring networks of power plant and industry [Voimalaitos- ja teollisuusrengasverkon maasulun paikannus]. Espoo 2002. VTT Tiedotteita – Research Notes 2135. 19 p.

Keywords power plants, industrial plants, power distribution systems, distribution networks, decentralised networks, earth faults, detection, simulation, electric current, least squares method

Abstract

A decentralised network is unconfirmed method to do an internal distribution of electricity in the industry and power plant networks. The decentralised network is more economical than a conventional model of the network and a separate switchgear building no needed. This enables to design difference and better layout than before.

Earth fault accurate location in the decentralised network is challenging problem. One potential method to earth fault location is measure sumcurrent from three difference points of the decentralised network. Earth fault location can define on account of measured sumcurrents magnitude. It is conceivable to use measured sumcurrents in a selective protection of devices in network, for instance motors and transformers.

In this study the earth fault of the decentralised network were simulated. The network of the Kirkniemi (Lohja, Finland) power plant was used as a model case. Earth fault location was carried out at a table format. The table has in advance calculated theoretical sumcurrent values when the earth faults happened anywhere on the network. Theoretical sumcurrent values and simulated values were compared. An estimation of the location was defined on account of least squares of error.

Accuracy of the location was around one meter with carried out solution algorithm. Value of point formed direct capacities to ground has an essentially bearing on accuracy of the location. Measuring accuracy of currents has an essentially bearing on accuracy in practice too.

Alkusanat

Teollisuuden ja voimalaitosten sisäinen jakeluverkko on perinteisesti toteutettu säteittäisellä verkkorakenteella. Kehittyneempi ja taloudellisempi tapa toteuttaa sisäinen jakeluverkko on käyttää rengasverkkorakennetta. Rengasverkkorakenne vaatii perinteistä poikkeavan tavan toteuttaa maasulkusuojaus, jossa vioittunut osuus irtikytketään verkosta muun osan jatkaessa keskeytyksettä toimintaansa. Tämä toiminto edellyttää maasulun paikannusta. Perusidea ja ajatus paikannuksen tutkimisesta on lähtöisin Fortum Engineeringistä.

Tämä tutkimus on osa TESLA – Information Technology and Electric Power System – tutkimusohjelmaa ja tehty selvittämään rengasverkon taloudellista hyötyä ja teknisiä mahdollisuuksia.

Kiitokset kirjoittajien puolesta kuuluvat seuraaville:

Heikki Viskari, Fortum Engineering

idea tutkimusaiheesta sekä hyödyllisiä neuvoja ja ajatuksia koskien tutkimusta,

Matti Lehtonen, VTT Energia

hyvistä ja käytännöllisistä vinkeistä ja tiedoista koskien maasulkuja yleensä,

Seppo Hänninen, VTT Energia

avusta maasulkusimuloinneissa,

Fortum Engineering, VTT Energia ja Teknologian kehittämiskeskus Tekes.

Vaasa 14.03.2002

Ilari Ristolainen

Sisällysluettelo

Tiivistelmä.....	3
Abstract.....	4
Alkusanat.....	5
Symboliluettelo.....	7
1. Johdanto.....	8
2. Rengasverkon maasulun simulointi.....	9
2.1 Verkkomalli.....	9
2.2 Rengasverkon rakenne.....	10
2.3 Maasulun paikannus.....	10
2.3.1 Sektoreihin jako.....	11
2.3.2 Summavirtojen yhtälöt.....	12
2.3.3 Taulukointi ja neliösumman minimi.....	14
3. Simulointien tulokset.....	16
3.1 Virheen neliösumman käyttäytyminen.....	16
3.2 Erilliskomponentein rakennetun mallin antamia tuloksia.....	16
4. Päätelmät.....	18
5. Yhteenveto.....	19

Symboliluettelo

C	kapasitanssi, yleensä
$C_{1,2}, C_{2,3}, C_{3,1}$	alaindeksien määräämien mittapisteiden väliin jäävien maakapasitanssien summa
$C_{1,x}$	syöttöpisteen ja etäisyydellä x olevan pisteen väliin jäävien maakapasitanssien summa
C_{tot}	koko renkaan maakapasitanssien summa
err_summ^2	virheen neliösumma
I_{01}, I_{02}, I_{03}	alaindeksin määräämän mittapisteen summavirta
$I_{01x}, I_{02x}, I_{03x}$	alaindeksin määräämän mittapisteen summavirta, kun maasulku sattuu etäisyydelle x syöttöpisteestä
$I_{01,\text{lask}}, I_{02,\text{lask}}, I_{03,\text{lask}}$	alaindeksin määräämän mittapisteen laskettu virta-arvo
$I_{01,\text{mit}}, I_{02,\text{mit}}, I_{03,\text{mit}}$	alaindeksin määräämän mittapisteen mitattu tai simuloitu virta-arvo
I_f	maasulkuvirta
L	induktanssi, yleensä
MP	mittapiste, numeroitu juoksevasti 1...3
MS	maasulkupiste, numeroitu juoksevasti 1...10
R	resistanssi, yleensä
R,S,T	kolmivaihejärjestelmän vaihemerkinnät
U_0	nollajärjestelmän jännite

1. Johdanto

Maasulun paikannusta rengasverkossa on lähestytty simulointien avulla. Simulointitulosten pohjalta on luotu menetelmä, jolla paikannus käytännössä on toteutettavissa.

Toteutus pohjautuu virheen neliösumman minimiin. Rengasverkosta on tehty aluksi teoreettinen malli, josta saadaan summavirtojen teoreettiset arvot mittapisteissä, kun maasulku sattuu missä osassa rengasta tahansa. Rengasverkko jaetaan mallissa sektoreihin, joissa kussakin on voimassa omat yhtälönsä. Näillä yhtälöillä ratkaistaan mittapisteiden summavirtojen teoreettiset arvot. Käytännössä mitattuja, mutta nyt simuloituja summavirtojen arvoja, verrataan mallin antamiin summavirtoihin. Kun löydetään piste, jossa todellisten ja mallin antamien summavirtojen erotuksen neliösumma saavuttaa miniminsä, pidetään tätä pistettä maasulun sijainnin estimaattina.

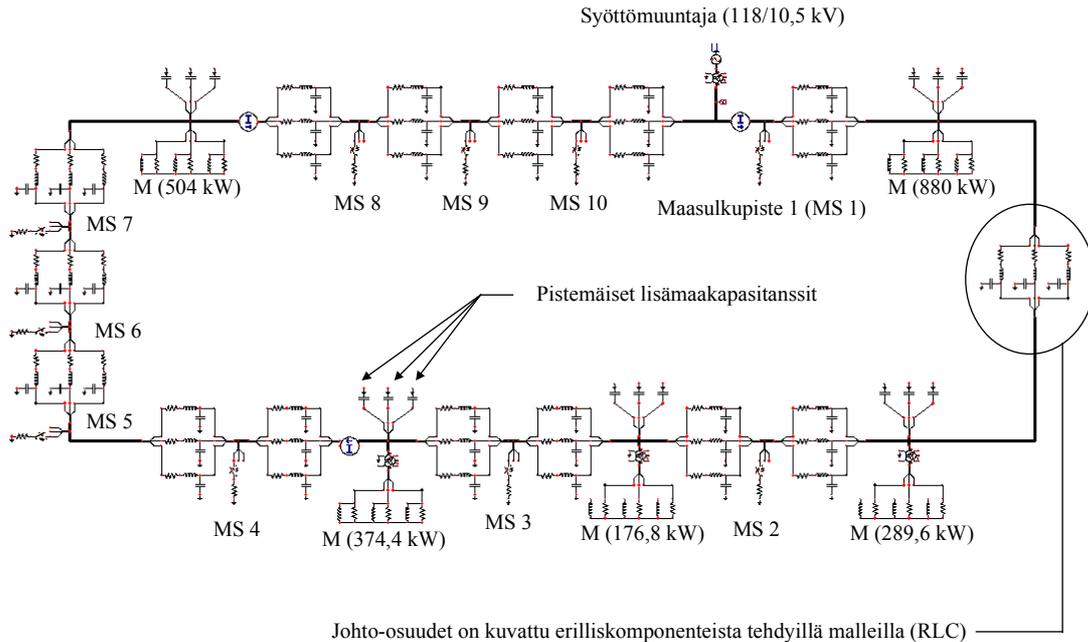
Koska rengasverkon teoreettiset maasulkujen tuottamat summavirrat on laskettu ainoastaan ennalta määrätyissä pisteissä esim. metrin jaotuksella, voidaan tulosta haluttaessa tarkentaa interpoloimalla kahden pienimmän neliösumman antavan pisteen välillä. Tuloksen tarkkuuteen vaikuttaa oleellisesti toki myös summavirran mittaustarkkuus. Toinen mahdollisuus, jolla tarkkuutta voidaan parantaa, onkin mittaustarkkuuden parantaminen.

Eräs mielenkiintoinen sovellus on, että pelkän paikannuksen avulla löydetty viallinen laite tai kaapeliosuus kytketään irti verkosta. Maasulkusuojaus toteutetaan siis pelkän paikannuksen perusteella. Tällöin tarvitaan siis pelkästään paikannus ja nollajärjestelmän jännitteen U_0 mittausta. Tämä antaa mahdollisuuden toteuttaa selektiivinen maasulkusuojaus ilman laitehaarakohtaista maasulkusuojausta. Tällöin toteutus on todella edullinen taloudellisestikin tarkasteltuna. Mahdollisesti juuri kyseessä olevaan tarkoitukseen spesifioitu paikannusreleen kehittäminen relevalmistajan toimesta parantaneekin tilannetta edelleen.

2. Rengasverkon maasulun simulointi

2.1 Verkkomalli

Rengasverkon maasulun simulointiin on käytetty ATP-EMTP-verkkomallia, joka on esitetty kuvassa 1.



MS on maasulkupiste
M on moottori (suluissa teho)

Kuva 1. Simuloinneissa käytetyn rengasverkon verkkomalli.

Kahden johdon renkaaksi kytkettyä verkkoa syötetään 118/10,5 kV muuntajan kautta. Johtorenkaassa, jonka pituus on 362 m, on kolme epäsymmetrisesti sijoitettua summa-
virran mittausta. Maasulkua on simuloitiin 10 eri pisteessä taulukon 1 mukaisesti.

Taulukko 1. Maasulkujen etäisyydet syöttöpisteestä.

Maasulun etäisyys syöttöpisteestä myötapäivään kiertäen	
MS 1	0 m
MS 2	36 m
MS 3	72 m
MS 4	108 m
MS 5	144 m
MS 6	180 m
MS 7	216 m
MS 8	252 m
MS 9	288 m
MS 10	324 m

Tämä tarkoittaa, että maasulkuja on tehty 36 m välein alkaen syöttöpisteestä kiertämällä verkkoa myötapäivään. Viimeisen maasulkupisteen ja syöttöpisteen lyhin etäisyys on 38 m.

2.2 Rengasverkon rakenne

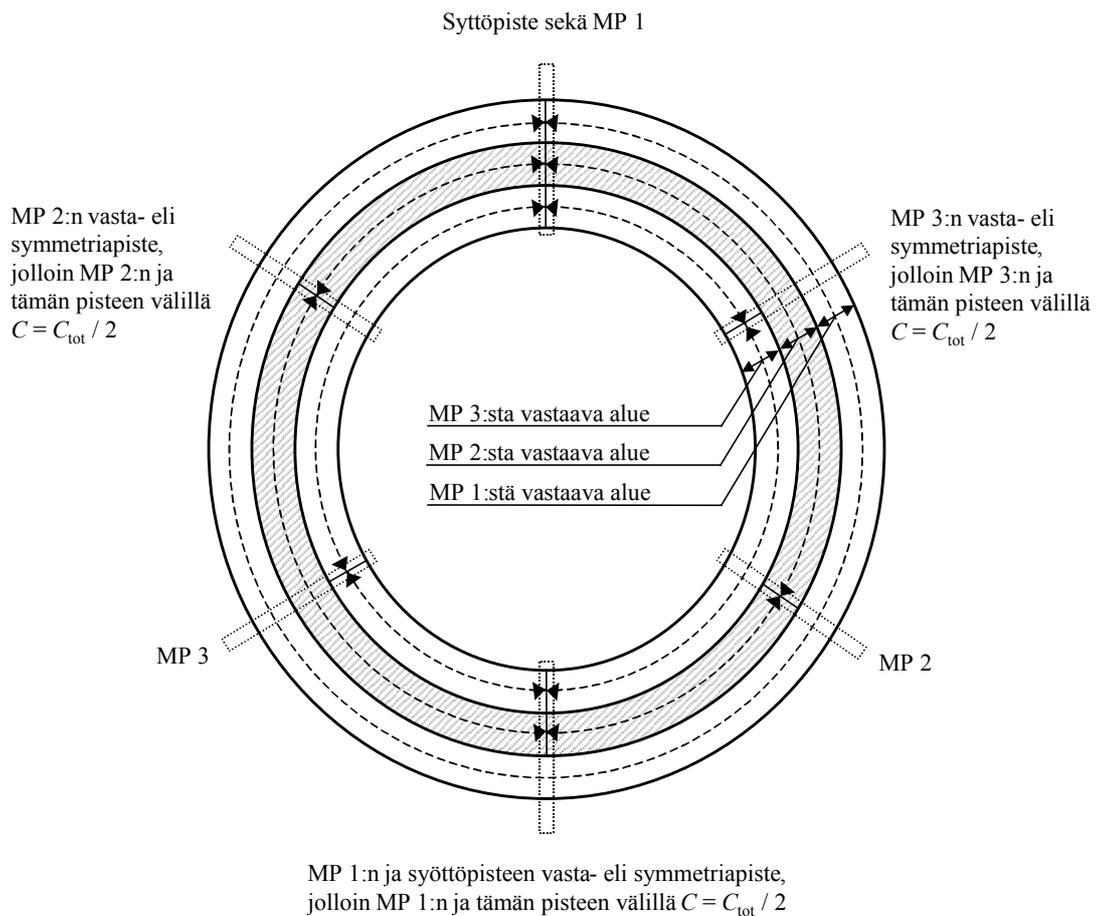
Johtolähtöjen on oletettu olevan APYAKMM 3 * 240 -tyyppistä kaapelia, jolloin maasulkuvirraksi saadaan maasta erotetussa verkossa noin 1 A. Verkkoa on kuormitettu kahdella moottorilla, joita on kuvattu LR-piireillä (tehot 504 kW ja 880 kW) sekä kolmella muuntajan kautta syötetyllä moottorilla, joita on myös kuvattu LR-piireillä (tehot 374,4 kW, 176,8 kW ja 289,6 kW). Simulointiohjelman epästabiiiliuden takia maasulut tehtiin 20 Ω vikavastuksen kautta, jolla voitiin vaimentaa vikavirran värähtelyä. Näytteenottotaajuus oli 2 kHz, kokonaissimulointiaika oli 0,4 s ja maasulku tapahtui 0,1 s kuluttua simuloinnin alusta. Maasulut tehtiin R-vaiheeseen ja virtojen laskennassa käytettiin referenssinä terveiden vaiheiden (S ja T) välistä pääjännitettä. Virta-arvot laskettiin kolmen verkkojakson ajalta tilanteessa, jossa alkutransientit olivat jo tasaantuneet (0,23 s simuloinnin alusta).

2.3 Maasulun paikannus

Maasulkupisteen paikan löytämisessä on käytetty menetelmää, jossa on muodostettu taulukko summavirroista mittapisteissä jokaiselle maasulun sijaintipaikalle, kun rengas on jaettu metrin mittaisiin osiin. Vertaamalla mitattuja summavirtoja taulukossa oleviin laskennallisiin virta-arvoihin valitaan pienimmän virheen neliösumman antava piste maasulun paikaksi. Näin päästään metrin jaolla oleviin maasulun sijaintipaikkoihin, joita voi tarkentaa interpoloimalla kahden pienimmän virheen antavan pisteen välillä.

2.3.1 Sektoreihin jako

Rengas on jaettava sektoreihin, joissa kussakin on voimassa tietty yhtälö kunkin mittapisteen osalta. Mittapisteen sektorit eivät välttämättä vaihdu samoissa pisteissä kuin muiden mittapisteiden sektorit. Rengasta ei kuvata ensisijaisesti todellisina metri-määräisinä etäisyyksinä, vaan lähinnä maakapasitanssien avulla. Sektorit määrätään mittapisteiden sijaintien ja maakapasitanssien jakautumien perusteella. Tilannetta selventävä piirros on kuvassa 2.



Kuva 2. Renkaan jako sektoreihin kunkin mittapisteen osalta erikseen.

Kuvassa 2 uloin 'kiekko' kuvaa mittapisteen 1 laskennassa tarvittavaa sektoreihin jakoa. Keskimmäinen harmaa 'kiekko' kuvaa mittapisteen 2 laskennassa tarvittavaa sektoreihin jakoa. Sisin 'kiekko' kuvaa mittapisteen 3 laskennassa tarvittavaa sektoreihin jakoa. Kiekkojen sisällä on katkoviivoitetuilla nuolilla erotettu eri sektorit toisistaan.

2.3.2 Summavirtojen yhtälöt

Mittapisteen 1 virtoja määrättäessä koko renkaalle käytetään samaa yhtälöä, eli todellista sektoreihin jakoa ei ole. Tämä on erikoistapaus ja johtuu mittapisteen 1 sijainnista (syöttöpisteen välitön läheisyys). Mikäli mittapisteen 1 sijainti poikkeaa tästä, vaaditaan sen osalta samankaltainen tarkastelu sektoreihin jaosta kuin on jäljempänä esitetty mittapisteille 2 ja 3. Mittapisteen 1 summavirta renkaan eri osissa tapahtuville maasuluille noudattaa

$$I_{01x} = \frac{\frac{C_{\text{tot}}}{2} - C_{1,x}}{C_{\text{tot}}} \quad (1)$$

jossa I_{01x} on mittapisteen 1 summavirta kun maasulku sattuu etäisyydelle x syöttöpisteestä, C_{tot} on renkaan kokonaiskapasitanssi ja $C_{1,x}$ on syöttöpisteen ja etäisyydellä x olevan pisteen väliin jäävien kapasitanssien summa. Laskettu summavirta on suhteellinen. Skaalaus on tehty niin, että maasulkuvirran arvoksi tulee yksi, jolloin summavirrat vaihtelevat välillä nolla ja puoli (0 ... 0,5). Tämä ei kuitenkaan edellytä maasulkuvirran mittaustietoa, koska se saadaan laskettua summavirtojen avulla. Esimerkiksi maasulun sattuessa mittapisteiden 1 ja 2 väliin, saadaan maasulkuvirraksi

$$I_f = \frac{C_{\text{tot}}}{C_{2,3} + C_{3,1}} (I_{01} + I_{02}) \quad (2)$$

jossa I_f on maasulkuvirta, $C_{2,3}$ ja $C_{3,1}$ ovat mittapisteiden 2 ja 3 sekä 3 ja 1 väliin jäävien maakapasitanssien summa, I_{01} ja I_{02} ovat mittapisteiden 1 ja 2 summavirrat. Se mille välille maasulku sattuu, voidaan määrätä summavirtojen suuruuksista. Maasulku on aina niiden kahden mittapisteen välillä, joiden summavirrat ovat suurimmat.

Mittapisteen 2 virtoja määrättäessä ensimmäinen sektori muodostuu syöttöpisteen ja mittapisteen 2 välille jäävästä renkaan osuudesta. Mittapisteen 2 summavirta tässä ensimmäisessä sektorissa tapahtuville maasuluille noudattaa

$$I_{02x} = \frac{\frac{C_{\text{tot}}}{2} - C_{1,2} + C_{1,x}}{C_{\text{tot}}} \quad (3)$$

jossa I_{02x} on mittapisteen 2 summavirta kun maasulku sattuu etäisyydelle x syöttöpisteestä, $C_{1,2}$ on mittapisteiden 1 ja 2 väliin jäävien maakapasitanssien summa.

Toinen sektori mittapisteen 2 osalta muodostuu mittapisteen 2 ja maakapasitanssien avulla määritellyn renkaan keskikohdan välille jäävästä renkaan osuudesta. Tässä sektorissa tapahtuvien maasulkujen tapauksessa mittapisteen 2 summavirraksi saadaan

$$I_{02x} = \frac{\frac{C_{\text{tot}}}{2} - C_{1,x} + C_{1,2}}{C_{\text{tot}}} \quad (4)$$

Kolmas sektori mittapisteen 2 osalta muodostuu maakapasitanssien avulla määritellyn renkaan keskikohdan ja pisteen, joka on kapasitanssein ilmoitettuna mittapisteen 2 vastakkaisella puolella, välille jäävästä renkaan osuudesta. Tässä sektorissa tapahtuvien maasulkujen tapauksessa mittapisteen 2 summavirraksi saadaan

$$I_{02x} = \frac{\frac{C_{\text{tot}}}{2} - C_{2,3} - C_{3,1} + C_{1,x}}{C_{\text{tot}}} \quad (5)$$

Viimeinen eli neljäs sektori muodostuu pisteen, joka on kapasitanssein ilmoitettuna mittapisteen 2 vastakkaisella puolella, ja syöttöpisteen välille jäävästä renkaan osuudesta. Tässä sektorissa tapahtuvien maasulkujen tapauksessa mittapisteen 2 summavirraksi saadaan

$$I_{02x} = \frac{\frac{C_{\text{tot}}}{2} - C_{1,2} - C_{1,x}}{C_{\text{tot}}} \quad (6)$$

Sektoreiden määrittämisessä huomionarvoista on se, että aina kahden perättäisen sektorin yhteenlasketut maakapasitanssit ovat puolet koko renkaan maakapasitanssien summasta. Tässä, kuten myös edellä, on ollut maakapasitanssien tapauksessa kyse aina yhden vaiheen ja maan välisestä kapasitanssista.

Mittapisteen 3 virrat määritetään aivan samalla tavalla kuin mittapisteen 2 virrat. Sektoreihin jako noudattaa samoja perusteita. Mittapisteiden 2 ja 3 sijaintien eroista johtuen sektoreiden sijainnit poikkeavat toisistaan.

Mittapisteen 3 virtoja määrättäessä ensimmäinen sektori muodostuu syöttöpisteen ja pisteen, joka on kapasitanssein ilmoitettuna mittapisteen 3 vastakkaisella puolella, välille jäävästä renkaan osuudesta. Tässä sektorissa tapahtuvien maasulkujen tapauksessa mittapisteen 3 summavirraksi saadaan

$$I_{03x} = \frac{\frac{C_{\text{tot}}}{2} - C_{3,1} - C_{1,x}}{C_{\text{tot}}} \quad (7)$$

jossa I_{03x} on mittapisteen 3 summavirta, kun maasulku sattuu etäisyydelle x syöttöpisteestä.

Toinen sektori mittapisteen 3 osalta muodostuu pisteen, joka on kapasitanssein ilmoitetuna mittapisteen 3 vastakkaisella puolella, ja maakapasitanssien avulla määritellyn renkaan keskikohdan välille jäävästä renkaan osuudesta. Tässä sektorissa tapahtuvien maasulkujen tapauksessa mittapisteen 3 summavirraksi saadaan

$$I_{03x} = \frac{\frac{C_{\text{tot}}}{2} - C_{1,2} - C_{2,3} + C_{1,x}}{C_{\text{tot}}} \quad (8)$$

Kolmas sektori mittapisteen 3 osalta muodostuu maakapasitanssien avulla määritellyn renkaan keskikohdan ja mittapisteen 3 välille jäävästä renkaan osuudesta. Tässä sektorissa tapahtuvien maasulkujen tapauksessa mittapisteen 3 summavirraksi saadaan

$$I_{03x} = \frac{\frac{C_{\text{tot}}}{2} - C_{1,x} + C_{3,1}}{C_{\text{tot}}} \quad (9)$$

Viimeinen eli neljäs sektori muodostuu mittapisteen 3 ja syöttöpisteen välille jäävästä renkaan osuudesta. Tässä sektorissa tapahtuvien maasulkujen tapauksessa mittapisteen 3 summavirraksi saadaan

$$I_{03x} = \frac{\frac{C_{\text{tot}}}{2} - C_{3,1} + C_{1,x}}{C_{\text{tot}}} \quad (10)$$

2.3.3 Taulukointi ja neliösumman minimi

Edellä kuvattuja yhtälöitä käyttäen on muodostettu taulukko summavirroille eri maasulun sijaintipaikoille. Taulukon alkuosa on esitetty taulukossa 2.

Taulukko 2. Summavirrat eri mittapisteille maasulun sijainnin mukaan renkaan alkuosalla.

Maasulun sijainti laskettuna syöttöpisteestä [m]	Eri mittapisteiden lasketut virrat		
	MP 1 p.u.	MP 2 p.u.	MP 3 p.u.
0	0,49731	0,28226	0,11559
1	0,49462	0,28495	0,11290
2	0,49194	0,28763	0,11022
3	0,48925	0,29032	0,10753
4	0,48656	0,29301	0,10484
5	0,48387	0,29570	0,10215
6	0,48118	0,29839	0,09946
7	0,47849	0,30108	0,09677
8	0,47581	0,30376	0,09409
9	0,47312	0,30645	0,09140
10	0,47043	0,30914	0,08871
11	0,46774	0,31183	0,08602
12	0,46505	0,31452	0,08333
13	0,46237	0,31720	0,08065
14	0,45968	0,31989	0,07796
15	0,45699	0,32258	0,07527
16	0,45430	0,32527	0,07258
17	0,45161	0,32796	0,06989
18	0,44892	0,33065	0,06720
19	0,44624	0,33333	0,06452
20	0,44355	0,33602	0,06183
21	0,44086	0,33871	0,05914
22	0,43280	0,34677	0,05108
23	0,43011	0,34946	0,04839
.	.	.	.
.	.	.	.
.	.	.	.

Menetelmän mukaisesti taulukossa 2 esitettyjä virta-arvoja verrataan mitattuihin virta-arvoihin. Virheen neliösumman minimin avulla etsitään maasulun sijainti, kun kaikki taulukon rivit on käyty läpi. Virheen neliösummaksi saadaan

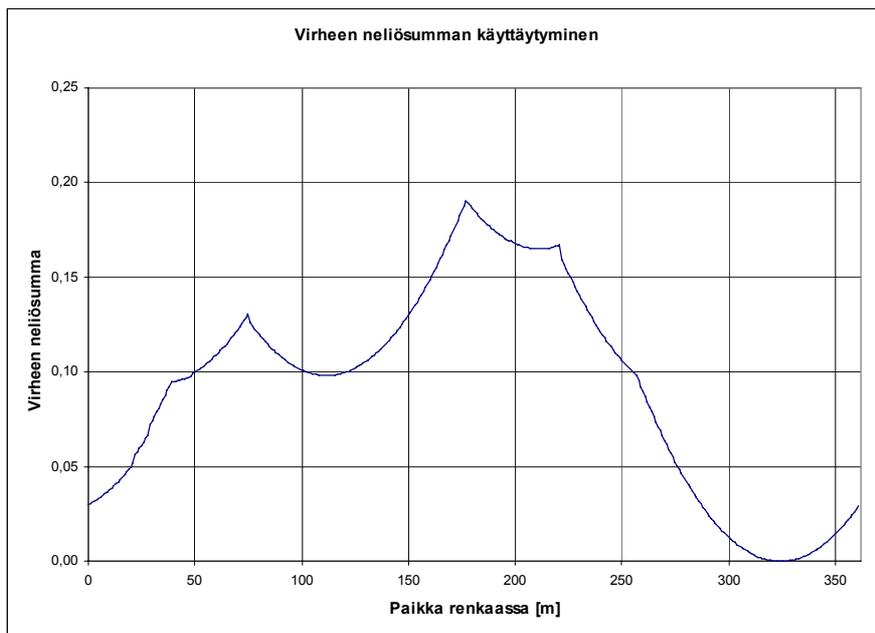
$$\text{err_sum}^2 = \left(I_{01,\text{lask}} - \frac{I_{01,\text{mit}}}{I_f} \right)^2 + \left(I_{02,\text{lask}} - \frac{I_{02,\text{mit}}}{I_f} \right)^2 + \left(I_{03,\text{lask}} - \frac{I_{03,\text{mit}}}{I_f} \right)^2 \quad (11)$$

jossa $I_{01,\text{lask}}$ on mittapisteen 1 laskettu virta-arvo, $I_{01,\text{mit}}$ on mittapisteen 1 mitattu virta-arvo ja samoin mittapisteiden 2 ja 3 osalta.

3. Simulointien tulokset

3.1 Virheen neliösumman käyttäytyminen

Kuvassa 3 on esimerkki virheen neliösumman käyttäytymisestä paikan suhteen, kun maasulkuvika on sattunut 324 m päähän syöttöpisteestä kierrettäessä rengasta myötäpäivään.



Kuva 3. Virheen neliösumman käyttäytyminen paikan funktiona, kun maasulkuvika on 324 m etäisyydellä syöttöpisteestä kierrettäessä rengasta myötäpäivään.

Kuvasta 3 nähdään, että erehtymisen vaaraa maasulun paikan määrittämisessä virheen neliösumman perusteella ei ole. Virheen neliösummalla on yksikäsitteinen minimi.

3.2 Erilliskomponentein rakennetun mallin antamia tuloksia

Taulukossa 3 on esitetty edellä kuvatulla menetelmällä saatuja maasulkusimulointien tuloksia. Taulukon 3 tulokset on saatu, kun pistemäisten maakapasitanssien arvot olivat 0,414 nF ja 0,828 nF.

Taulukko 3. Maasulkusimulointien tuloksia.

Johdon erilliskomponenteista rakennetun mallin mukaiset simulointitulokset sekä niistä lasketut maasulkujen sijainnit.

$$C_{tot} = 0,151938 \text{ uF}$$

$$C_{jisa} = 0,414 \text{ nF}$$

	$I_{01}/I_{02}/I_{03}$	L_{-1}	
MS 1	0,48823	0	tod.
	0,28621	1	est.
	0,10959	1	erotus
I_f	0,986873		

MS 2	0,39029	36	tod.
	0,38408	35	est.
	0,01117	-1	erotus
I_f	0,986784		

MS 3	0,29202	72	tod.
	0,48216	71	est.
	0,08717	-1	erotus
I_f	0,986542		

MS 4	0,19375	108	tod.
	0,40658	106	est.
	0,18522	-2	erotus
I_f	0,98723		

MS 5	0,09621	144	tod.
	0,30861	143	est.
	0,28338	-1	erotus
I_f	0,987547		

MS 6	0,00333	180	tod.
	0,21058	180	est.
	0,38137	0	erotus
I_f	0,98748		

MS 7	0,10099	216	tod.
	0,11226	216	est.
	0,47936	0	erotus
I_f	0,98693		

MS 8	0,19894	252	tod.
	0,0142	251	est.
	0,40942	-1	erotus
I_f	0,987912		

MS 9	0,29718	288	tod.
	0,08434	288	est.
	0,3114	0	erotus
I_f	0,988269		

MS 10	0,39512	324	tod.
	0,18258	324	est.
	0,21336	0	erotus
I_f	0,988107		

summa 7 m
keskiarvo 0,7 m
max virhe 2 m

Johdon erilliskomponenteista rakennetun mallin mukaiset simulointitulokset sekä niistä lasketut maasulkujen sijainnit.

$$C_{tot} = 0,154008 \text{ uF}$$

$$C_{jisa} = 0,828 \text{ nF}$$

	$I_{01}/I_{02}/I_{03}$	L_{-1}	
MS 1	0,4914	0	tod.
	0,28592	1	est.
	0,11246	1	erotus
I_f	0,997114		

MS 2	0,39202	36	tod.
	0,3853	35	est.
	0,01267	-1	erotus
I_f	0,997114		

MS 3	0,2929	72	tod.
	0,4846	70	est.
	0,08698	-2	erotus
I_f	0,997345		

MS 4	0,19344	108	tod.
	0,41636	105	est.
	0,18641	-3	erotus
I_f	1,001029		

MS 5	0,0937	144	tod.
	0,31705	142	est.
	0,2858	-2	erotus
I_f	1,001162		

MS 6	0,00604	180	tod.
	0,21762	179	est.
	0,38527	-1	erotus
I_f	1,001228		

MS 7	0,1053	216	tod.
	0,11797	215	est.
	0,48449	-1	erotus
I_f	1,000514		

MS 8	0,20505	252	tod.
	0,01855	251	est.
	0,4163	-1	erotus
I_f	1,004966		

MS 9	0,30411	288	tod.
	0,08135	287	est.
	0,31704	-1	erotus
I_f	1,004643		

MS 10	0,4043	324	tod.
	0,18092	324	est.
	0,21764	0	erotus
I_f	1,00592		

summa 13 m
keskiarvo 1,3 m
max virhe 3 m

4. Päätelmät

Tutkimuksessa päästiin kohtuulliseen tarkkuuteen maasulun paikannuksessa. Mallina olleen Kirkniemen verkon modifioidulla verkkorakenteella, joka sisälsi pistemäisiä maakapasitansseja, tarkkuus oli maakapasitanssien suuruudesta riippuen keskimäärin metrin luokkaa kun maksimivirhe oli 2 m tai 3 m. Tulosten tarkkuutta ei ole pyritty parantamaan interpoloimalla.

Paikannuksen pohjana käytettäville summavirtojen analyyttisille lausekkeille sekä summavirrat sisältävälle taulukolle on esitetty muodostamissäännöt. Myös lopullinen maasulun paikan määräämistapa on esitetty. Näin ollen käytännön soveltamiseksi tarvittavan rengasverkon paikannusmallin muodostaminen on varsin helppoa.

Paikannuksen käytettävyyttä rajoittaa suurten pistemäisten maakapasitanssien esiintyminen rengasverkossa. Simulointien perusteella pistemäisten maakapasitanssien kasvaessa kaksinkertaisiksi virhe paikannuksessa kasvoi keskimäärin myös kaksinkertaiseksi. Toisaalta voidaan todeta, että mittapisteiden epäsymmetrinen sijoittaminen renkaaseen ei heikennä tarkkuutta, mutta hiukan monimutkaistaa paikannusmallin muodostamista.

Maasuluissa aina esiintyvän maasulkuimpedanssin tai -resistanssin arvo on aina tapauskohtainen. Maasulkuvirran absoluuttisella arvolla, jonka maasulkuimpedanssi määrää, ei ole merkitystä. Tämä johtuu siitä, että paikannuksessa käytetään suhteellisia arvoja. Tässä menetelmässä on tehty valinta, jossa maasulkuvirran arvo on aina yksi ja summavirtojen arvot vaihtelevat välillä nolla ja puoli.

Menetelmän soveltaminen käytännön kohteissa on mahdollista nykyisilläkin laitteilla, mutta erityisen paikannusreleen kehittäminen relevalmistajan toimesta olisi eduksi menetelmän laajemmalle soveltamiselle.

5. Yhteenveto

Rengasverkon maasulun paikannuksen toteutus taulukkopohjaisena on varsin yksinkertainen ja helppo toteuttaa. Virheen neliösumman laskeminen on nopeaa eikä vaadi laskentalaitteistolta paljoa laskentakapasiteettia.

Laitteistopuolella selvittää myös pienemmin kustannuksin kuin perinteisellä säteittäisellä verkkorakenteella toteutetulla suojauksella.

Uuden paikannusreleen kehittäminen relevalmistajan toimesta lisännee ratkaisun saamaa positiivista mielenkiintoa ja alentaa kynnystä valita käytännön toteutukseksi rengasverkko. Toisaalta käytännön toteutukset lisäävät relevalmistajan halukkuutta ryhtyä kehittämään paikannusrelettä. Mahdollisesti tuleva voimalaitoksen sähkönsyötön käytännön toteutus rengasverkkona poistaa myös mahdollisia menetelmään kohdistuneita epäluuloja.



Tekijä(t) Ristolainen, Ilari			
Nimeke Voimalaitos- ja teollisuusrengasverkon maasulun paikannus			
Tiivistelmä <p>Rengasverkko on perinteisistä voimalaitos- ja teollisuusverkkojen ratkaisuista poikkeava tapa toteuttaa voimalaitosten ja teollisuuslaitosten sisäinen sähkönsyöttö. Rengasverkko on taloudellisempi ratkaisu kuin perinteinen säteittäinen verkko, eikä erillistä sähkötilaa enää tarvita. Tämä antaa uusia mahdollisuuksia rakennusten tilasuunnitteluun.</p> <p>Maasulun sijainnin tarkka määrittäminen rengasverkossa on yksi haasteellinen ongelmakenttä. Yksi mahdollisuus toteuttaa maasulun paikannus on mitata verkon summavirta kolmesta kohdasta rengasverkkoa. Näiden summavirtojen itseisarvojen perusteella saadaan määrättyä maasulun sijainti. Summavirtojen mittaustietoa voidaan paikannuksen lisäksi hyödyntää renkaaseen kytkettyjen laitteiden, kuten moottoreiden ja muuntajien, selektiivisessä suojauksessa.</p> <p>Tässä tutkimuksessa on simuloitu rengasverkon maasulkuja käyttäen mallin lähtökohtana Kirkniemen (Lohja) voimalaitoksen sisäistä jakeluverkkoa vastaavaa rengasverkkoa. Maasulun paikannus on toteutettu taulukkopohjaisena. Taulukossa on ennalta lasketut teoreettiset summavirtojen arvot maasulun sattuessa verkon eri osiin. Teoreettisia arvoja on verrattu simuloimalla saatuihin arvoihin, joiden pohjalta on määrätty pienimmän virheenneliösumman avulla estimaatti sijainnille.</p> <p>Toteutetulla ratkaisualgoritmilla päästään noin yhden metrin tarkkuuteen paikannuksessa. Paikannuksen tarkkuuteen vaikuttaa oleellisesti renkaassa olevien pistemäisten maakapasitanssien suuruus. Käytännössä tarkkuuteen vaikuttaa oleellisesti myös virtojen mittaustarkkuus.</p>			
Avainsanat power plants, industrial plants, power distribution systems, distribution networks, decentralised networks, earth faults, detection, simulation, electric current, least squares method			
Toimintayksikkö VTT Prosessit, Tekniikantie 4 C, PL 1606, 02044 VTT			
ISBN 951-38-5945-2 (nid.) 951-38-5956-8 (URL: http://www.inf.vtt.fi/pdf/)		Projektinnumero NISU00065	
Julkaisu-aika Huhtikuu 2002	Kieli suomi, engl. tiiv.	Sivuja 19 s.	Hinta A
Projektin nimi TESLA		Toimeksiantaja(t) Fortum Engineering, Teknologian kehittämiskeskus Tekes	
Avainnimeke ja ISSN VTT Tiedotteita – Meddelanden – Research Notes 1235-0605 (nid.) 1455-0865 (URL: http://www.inf.vtt.fi/pdf/)		Myynti: VTT Tietopalvelu PL 2000, 02044 VTT Puh. (09) 456 4404 Faksi (09) 456 4374	

Published by



Vuorimiehentie 5, P.O.Box 2000, FIN-02044 VTT, Finland
Phone internat. +358 9 4561
Fax +358 9 456 4374

Series title, number and
report code of publication

VTT Research Notes 2135
VTT-TIED-2135

Author(s) Ristolainen, Ilari			
Title Location of earthfault in ring networks of power plant and industry			
Abstract <p>A decentralised network is unconfirmed method to do an internal distribution of electricity in the industry and power plant networks. The decentralised network is more economical than a conventional model of the network and a separate switchgear building no needed. This enables to design difference and better layout than before.</p> <p>Earth fault accurate location in the decentralised network is challenging problem. One potential method to earth fault location is measure sumcurrent from three difference points of the decentralised network. Earth fault location can define on account of measured sumcurrents magnitude. It is conceivable to use measured sumcurrents in a selective protection of devices in network, for instance motors and transformers.</p> <p>In this study the earth fault of the decentralised network were simulated. The network of the Kirkniemi (Lohja, Finland) power plant was used as a model case. Earth fault location was carried out at a table format. The table has in advance calculated theoretical sumcurrent values when the earth faults happened anywhere on the network. Theoretical sumcurrent values and simulated values were compared. An estimation of the location was defined on account of least squares of error.</p> <p>Accuracy of the location was around one meter with carried out solution algorithm. Value of point formed direct capacities to ground has an essentially bearing on accuracy of the location. Measuring accuracy of currents has an essentially bearing on accuracy in practice too.</p>			
Keywords power plants, industrial plants, power distribution systems, distribution networks, decentralised networks, earth faults, detection, simulation, electric current, least squares method			
Activity unit VTT Processes, Tekniikantie 4 C, P.O.Box 1606, FIN-02044 VTT, Finland			
ISBN 951-38-5945-2 (soft back ed.) 951-38-5956-8 (URL: http://www.inf.vtt.fi/pdf/)		Project number NISU00065	
Date April 2002	Language Finnish, Engl. abstr.	Pages 19 p.	Price A
Name of project TESLA		Commissioned by Fortum Engineering, The National Technology Agency (Tekes)	
Series title and ISSN VTT Tiedotteita – Research Notes 1235-0605 (soft back ed.) 1455-0865 (URL: http://www.inf.vtt.fi/pdf/)		Sold by VTT Information Service P.O.Box 2000, FIN-02044 VTT, Finland Phone internat. +358 9 456 4404 Fax +358 9 456 4374	