

Jouko Savolainen

Lääkintätilojen IT-verkon vikakysymykset

Metropolia Ammattikorkeakoulu

Insinööri (AMK)

Talotekniikka

Insinöörityö

27.5.2018

Tekijä Otsikko	Jouko Savolainen Lääkintätilojen IT-verkon vikakysymykset
Sivumäärä Aika	50 sivua, 4 liitettä 27.5.2018
Tutkinto	insinööri (AMK)
Tutkinto-ohjelma	talotekniikka
Ammatillinen pääaine	sähköinen talotekniikka
Ohjaajat	lehtori Matti Sundgren insinööri Juha Långström
<p>Insinööriyössä tutkittiin sairaaloiden lääkintätiloissa käytettävän yksivaiheisen IT-sähkönjakeluverkon vikatilanteita. Tarkoituksena oli selvittää niin sanotun toisen vian tapauksessa vaadittava minimi oikosulkuvirta, jolla syötön automaattisen poiskytkennän kytkentäehto toteutuu. Insinööriyössä selvitetään myös UPS varmennetun IT-verkon oikosulkuvirtojen laskentaan olennaisesti vaikuttavia asioita.</p> <p>Työssä käydään läpi yksivaiheisen IT-sähkönjakeluverkon periaatteellinen rakenne, ja siinä esiintyvät vikatilanteet, ja niiden aikana esiintyvät kosketusjännitteet. Potentiaalintasaus on oleellinen osa lääkintätilojen kosketusjännitesuojausta, joten potentiaalintasausta ja sen vaikutusta kosketusjännitteeseen käsitellään myös laskuesimerkein</p> <p>Insinööriyö tehtiin perehtymällä IT-verkkoja käsittelevään kirjallisuuteen ja muuhun luotettavaan lähdeaineistoon, sekä haastatteleamalla useita aiheen asiantuntijoita. Työ tehtiin Granlund Oy:lle. Työn tuloksena voidaan sanoa, että kun IT-sähkönjakeluverkko tehdään suositusten mukaisesti, ei oikosulkuvirran riittävyys ole sairaalaverkoissa ongelma.</p> <p>Työn tuloksissa havaittiin, että IT-sähkönjakeluverkossa niin sanotun ensimmäisen vian aikana esiintyvä kosketusjännite on hyvin pieni, muutaman millivoltin suuruinen. Tuloksissa havaittiin myös, että potentiaalintasausta on ratkaiseva merkitys, jotta kosketusjännite voidaan rajoittaa lääkintätiloissa suurimpaan sallittuun 25 volttiin.</p>	
Avainsanat	maasulku, oikosulkuvirta, 1. ja 2. vika, potentiaalintasaus, impedanssi, kosketusjännite.

Author Title	Jouko Savolainen Fault Criteria in Medical IT Network
Number of Pages Date	50 pages, 4 appendices 27 May 2018
Degree	Bachelor of Engineering
Degree Programme	Building Services Engineering
Professional Major	Electrical Building Services
Instructors	Matti Sundgren, Senior Lecturer Juha Långström, Group Manager
<p>This final year project studied faults in a single-phase IT electricity distribution network used in hospitals. The purpose was to establish the minimum short-circuit current required for the so-called second fault to switch off the supply. The project also identified factors that affect the calculation of short circuits in a UPS-certified IT network.</p> <p>The study mapped a single-phase IT power grid, its possible faults, and the contact voltages during the faults. Since equipotential bonding is essential for contact space protection of medical spaces, equipotential bonding and its impact on the contact voltage were also discussed. The project included the study of literature on IT networks, and interviews with experts.</p> <p>The thesis showed that when an IT network meets the recommendations, the impedance of a fault circuit is small and the short circuit current is not a problem in hospital networks. It was established that the contact voltage in the IT distribution network during the so-called 1st fault is very small, a few millivolts. Furthermore, equipotential bonding is of crucial importance in order to limit the contact voltage in a medical space to the maximum allowed, 25 volts.</p> <p>This thesis, and its results, can be used to give deeper information and understanding about single phase IT networks to electrical engineers and students.</p>	
Keywords	earth fault, short circuit current, 1 st and 2 nd fault, equipotential bonding , impedance, contact voltage.

Sisällys

Lyhenteet

1	Johdanto	1
2	IT-sähkönjakeluverkko	2
2.1	IT-muuntajatyypit	2
2.2	Pakkamuuntaja	4
2.3	Toroidimuuntaja	5
3	Oikosulku ja vikatilanteet	6
3.1	Ensimmäinen vika eli maasulku	11
3.2	Toinen vika eli kaksoismaasulku	12
3.3	2. vian oikosulkuvirtavaatimus	14
4	Kosketusjännite	17
4.1	NELFO:n taulukot	19
4.2	Kosketusjännitteen määrittäminen	20
4.3	Maasulkuvirta	23
5	Potentiaalintasaus	23
5.1	Potentiaalintasauksen tehtävä	24
5.2	Potentiaalintasausverkon ja lisäpotentiaalintasauksen rakenne	25
6	Oikosulkuvirran laskeminen	27
6.1	Lämpötilakorjaus	27
6.2	Sulakkeiden toiminta ja virranrajoitus	29
6.3	Johdonsuojakatkaisijan toiminta	30
6.4	Oikosulkuvirran voimavaikutuksessa huomioitava	31
6.5	ITIC (CBEMA)	32
6.6	Oikosulkuvirtojen nimitykset	33
6.7	UPS oikosulkuvirta laskuissa	34
7	Esimerkkitarkastelu	36
7.1	Kaapelien impedanssit	37

7.2	Muuntaja	39
7.3	Kosketusjännitteen laskuesimerkki	42
8	Yhteenveto	47
	Lähteet ja viittaukset	48
	Haastattelut	50

Liitteet

Liite 1. IT-verkko kun UPS on normaalikäytöllä.

Liite 2. Laskenta esimerkin tilanne jossa UPS on normaalikäytöllä.

Liite 3. UPS staattisella ohituksella IT-verkon 2.vian vikatilanteessa.

Liite 4. UPS huolto-ohituksella IT-verkon 2.vian vikatilanteessa.

Lyhenteet

CTR 50840	European Committee For Electrotechnical Standardization. (CENELEC) Eurooppalainen sähköalan standardisoimisjärjestö, Tekninen raportti numero 50840
DRUPS	Diesel Rotary Uninterrupted Power Supply. Katkeamaton sähkönsyöttö, jossa huimamassa pyörittää generaattoria sen aikaa, kunnes dieselgeneraattori käynnistyy, ja on valmis ottamaan kuormituksen vastaan (n.15 s.)
EB	Earthing Busbar. Maadoituskisko
EN	European Standard. Eurooppalainen standardi
FRHF	Fire Resistant Halogen Free. Palonkestävä kaapelityyppi
G0	Lääkintätilaluokka, selitetty tarkemmin tekstin yhteydessä
G1	Lääkintätilaluokka, selitetty tarkemmin tekstin yhteydessä
G2	Lääkintätilaluokka, selitetty tarkemmin tekstin yhteydessä
IEC	International Electrotechnical Commission. Kansainvälinen sähköalan standardointiorganisaatio
IGBT	Insulated-Gate Bipolar Transistor. Tehoelektroniikan ohjattava puolijohde komponentti
IT	Isolated Terra. Maasta erotettu järjestelmä
IT UPS	Maasta erotettu järjestelmä, jota syötetään UPS-laitteella.
JSK	Johdonsuojakatkaisija
kevi	Keltavihreä peruseristetty suojamaadoitusjohdin

LSEM	Lääkintäsuojaerotusmuuntaja
MCMK	Kuparijohtiminen maakaapeli konsentrisella suojamaadoitusjohtimella
MEB	Main Earthing Busbar. Päämaadoituskisko
MMJ	Polyvinyylikloridi-muovieristeinen asennuskaapeli
MMJ-HF	Polyvinyylikloridi-muovieristeinen halogeeniton asennuskaapeli
NELFO	Nordisk Elförlaget. Norjalainen sähköalan urakoitsijaliitto
NK	Nousukeskus
PE	Protective Earth. Suojamaadoitus.
PEN	Protective Earth Neutral. Yhdistetty suojamaadoitus ja nollajohdin
PEX	Ristisilloitettu polyeteeni
PK	Pääkeskus
PVC	Polyvinyylikloridi
SEB	Secondary Earthing Busbar. Lisämaadoituskisko
SFS	Suomen Standardisoimisliitto
TN	Terra Neutral. Sähkön jakelujärjestelmä, jossa yksi piste on maadoitettu.
TN-C	Terra Neutral Combined. TN-C-järjestelmässä on yhdistetty nolla- ja suojamaadoitusjohdin.
TN-S	Terra Neutral Separated. TN-S-järjestelmässä suojajohdin ja nollajohdin ovat erillisiä johtimia
TT	Terra Terra. Sähkön jakelujärjestelmä, jossa yksi piste on maadoitettu, ja jännitteelle alttiit osat on maadoitettu erikseen maadoituselektrodin avulla.

UPS	Uninterrupted Power Supply. Katkeamaton sähkönsyöttö
VA	Voltiampeeri. Näennäistehon yksikkö
VAC	Volts Alternative Current. Volttia vaihtojännitettä (AC)
VDE	Verband der Elektrotechnik, Elektronik und Informationstechnik. Saksalainen sähkötekniikan standardointijärjestö

1 Johdanto

Tämä insinööri työ keskittyy käsittelemään sairaaloiden G2-tiloissa käytettävien yksivaiheisten lääkintäsuojaerotusmuuntajalla syötettyjen IT-sähkönjakeluverkkojen vikakysymyksiä. Aihe tähän työhön on syntynyt tarpeesta selvittää lääkintäsuojaerotusmuuntajalla syötetyn IT-verkon oikosulkuvirralle asetettava vaatimus, miten suuri sen on oltava, jotta kosketusjännitesuojaus toimii oikein. Insinööri työ on tehty Granlund Oy:lle, joka on Suomen johtava suunnittelutoimisto mm. sairaaloiden taloteknisessä suunnittelussa.

Työssä esitellään, mitä yksivaiheisessa IT-verkossa tapahtuu vikojen aikana ja millaisia virtoja ja jännitteitä siinä silloin on sekä millaisia kosketusjännitteitä vikojen aikana esiintyy. Työssä annetaan vastaus SFS 6000-asennusmääräyksistä mahdollisesti esille nousevaan kysymykseen yksivaiheisen IT-verkon oikosulkuvirran vaatimuksesta.

Teksti on asiasisällöltään tiivistä, eikä perustietoja esimerkiksi TN-verkoista tai UPS-laitteista esitetä, koska niistä on saatavana tietoa muutoinkin. Kuvista ja piirroksista on pyritty tekemään yksinkertaisia, niin että toiminnan ym. asioiden periaatteet olisivat selkeitä.

Sairaaloiden IT-verkkoja syötetään aina varmennetusta sähkönjakelusta. Sähkönjakelun varmennusta on kolmea eri tyyppiä: katkollinen dieselvarmennettu varavoima, katkoton DRUPS-varavoima, jota tässä työssä ei käsitellä, sekä katkoton UPS-varmennettu sähkönjakelu. Tekstissä ja esimerkkilaskuissa käsitellään UPS-syöttöisen IT-verkon tapusta, koska sen oikosulkuvirtojen riittävyys on joskus haastavinta.

Sairaaloiden G2-tiloilla tarkoitetaan lääkintätiloja, jossa lääkintälaitetta käytetään sydämenläheisiin toimintoihin ja/tai jossa lääkintälaitteen rikkoontuminen saattaa aiheuttaa potilaalle välittömän hengenvaaran, kuten leikkaussaleissa ja tehohoidon tiloissa ja heräämöissä. Tiloissa käytetään IT-sähkönjakelujärjestelmää, sekä niihin liittyviä eristystason ja suojaerotusmuuntajan valvontajärjestelmiä.

G2-tiloissa tehtävissä Ihonalaisissa operaatioissa ihon impedanssi ei ole vaientamassa virran kulkua. Esimerkiksi jos sydämen läpi menee 2 mA:n virta, se voi aiheuttaa sydänkammiovärinän, joka on tappava potilaalle.

G1-tila on lääkintätila, jossa käytetään sähkökäyttöisiä lääkintälaitteita. Tilassa käytettävien lääkintälaitteiden sähkönsyötön keskeytys, esimerkiksi syötön poiskytkentä vian takia, ei aiheuta välitöntä uhkaa potilaan turvallisuudelle. Tämänkaltaisia tiloja ovat esimerkiksi toimenpidehuoneet, vastaanottohuoneet, potilashuoneet ja potilas-WC:t.

Tilojen sähköryhmät suojataan vikavirtasuojakytkimillä ja lisäpotentiaalintasauksella. G1-tiloissa koko tila tulkitaan hoitoalueeksi, tai hoitoalue voidaan myös rajata.

Muut sairaalan tilat ovat tilaluokittelemattomia G0-tiloja. G0-tiloissa ei ole tarkoitus käyttää mitään sähkökäyttöisen lääkintälaitteen liityntäosia, ja tilassa käytettävien laitteiden sähkönsyötön keskeytys ei voi aiheuttaa välitöntä hengenvaaraa potilaalle. Lääkintätilojen sähköasennusmääräykset koskevat G0-tiloja vain joiltakin osin, silloin kun ne sijaitsevat sairaalarakennuksessa.

IT-sähkönjakelua käytetään sairaaloissa sen turvallisuuden ja vikasietoisuuden vuoksi. Jakeluverkon vikatapauksina tunnetaan käsitteet 1. vika sekä mahdollisesti 2. vika, joka ei kuitenkaan esiinny samassa virtapiirissä. Edellä mainittujen vikojen havaitsemiseen ja poiskytkentään on olemassa omat määräyksensä.

2 IT-sähkönjakeluverkko

IT-sähkönjakeluverkossa kolmevaiheisen muuntajan tähtipiste, tai yksivaiheisen muuntajan käämien keskipisteet eivät ole yhteydessä maan potentiaaliin, eli IT-verkko ei ole käyttömaadoitettu. Muuntajan kuorirakenteet on yhdistetty PE johtimeen, ja päämaadoituskiskoon. Tässä tekstissä ei käsitellä kolmevaiheisia IT-muuntajia, koska niitä käytetään vain suurille kuormille. Lääkintätilojen IT-muuntajat ovat useimmiten yksivaiheisia.

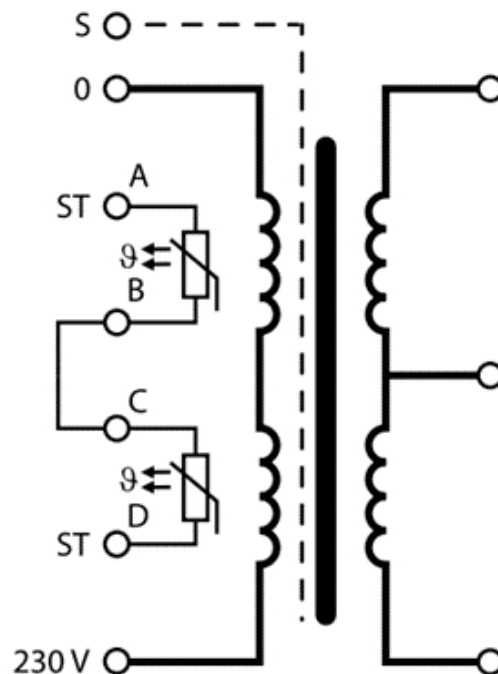
2.1 IT-muuntajatyypit

Lääkintäsuojaerotusmuuntaja on erilainen verrattuna tavalliseen suojaerotusmuuntajaan. Standardeissa EN 61558-1 ja 61552-2-15 on määritetty lääkintäsuojaerotusmuuntajalle asetettavat vaatimukset. Määräysten mukaan lääkintäsuojaerotusmuuntajissa on pienemmät vuotovirrat, maksimissaan 0,5 mA, tyhjäkäyvässä muuntajassa ja siten parempi eristystaso kuin tavallisissa muuntajissa.

Muuntajan tekninen toteutus riippuu valmistajasta, mutta peruseriaatteita on kahdenlaisia: perinteinen muuntajalevyistä tehty pakkamuuntaja sekä toroidimuuntaja. Suurin eroavaisuus näissä on käämirakenteessa. Vaikka muuntosuhde on 1:1, on lääkintäsuojaerotusmuuntajissa toisiopuolella kaksi käämiä, joiden päät on tuotu liittimiin, käämien välittömään läheisyyteen. Liittimissä käämit kytketään sarjaan, jolloin käämien ääripäistä saadaan käyttöjännite. Joissain toteutuksissa otetaan käämin keskeltä referenssinä 0 V, joka kytketään valvontalaitteeseen.

1-vaiheisten lääkintäsuojaerotusmuuntajien oikosulkuvirta-arvot voidaan määrittää kuten kaksikämmimuuntajilla, koska joka tapauksessa toisiopuolen käämit on kytketty keskeltä sarjaan.

Lääkintäsuojaerotusmuuntajana käytetään 1-vaiheisella 230 V:n jännitteellä syötettyä muuntajaa. Muuntajan toisiopuolelle muodostuu jännite samoin kuten kolmivaihemuuntajassa kahden vaiheen välille. Muuntajan keskipisteen ja äärijohtimen väliltä voidaan mitata 115 V, ja äärijohtimien välillä on jännite 230 V. Sähköteknisissä laskelmissa 1-vaihe lääkintäsuojaerotusmuuntajan toisiopuoli vastaa 1-vaihemuuntajaa, koska keskipiste on yhdistetty (käämin päät liitetty yhteen), eikä sitä käytetä asennuksessa nollajohtimena, vaan mahdollisesti referenssinä mittauksissa.



Kuva 1 Periaatekuva lääkintäsuojaerotusmuuntajan käämien kytkennästä [11].

Kuvassa 1 on yksivaiheisen lääkintäsuojaerotusmuuntajan kytkentäkaavio. Vasemmalla puolen on muuntajan ensiöpuoli, joka kytketään 1-vaiheisesti vaiheen ja nollan väliin. Oikealla puolen kuvassa on muuntajan toisiopuoli, jonka navoista saadaan jännitteet 0 V, 115 V ja 230 V. Keskellä oleva paksu viiva kuvaa maadoitettua metallilevyä tai -kalvoa käämien välissä, tai käämien ja rungon välissä, muuntajamallista riippuen. Maadoitetun metallikalvon tehtävänä on vähentää häiriöitä, ja johtaa pois mahdollisia vuotovirtoja.

Kuvassa näkyy ensiöpuolella myös muuntajan lämpötilan valvontaan käytettäviä komponentteja, koska SFS 6000: 710.411.6.3.101 kohdan mukaan IT-järjestelmän muuntajan ylikuormitusta tai korkeaa lämpötilaa on valvottava. Lääkintäsuojaerotus muuntajilla niiden lämpötilan valvonta on tärkeää, koska muuntajan syöttöpiirissä ei saa olla ylikuormitus suojaa ennen ja jälkeen lääkintäsuojaerotusmuuntajan. [14, 710.53.1.]

2.2 Pakkamuuntaja

Pakkamuuntaja on yleisin muuntajarakenne, jossa käämit sijaitsevat kidesuunnatusta muuntajalevystä tehtyjen teräsikeiden päällä (kuva 2). Yksivaiheiset pakkamuuntajat jotka valmistetaan lääkintäsuojaerotusmuuntaja käyttöön, tehdään UI-muotoon, jossa ensiö- ja toisiokäämit ovat erillisten ikeiden päällä. 3-vaihemuuntajissa ne ovat saman ikeen päällä sisäkkäin.

Pakkamuuntajien huonona puolena on suuri hajavuon määrä, joka lääkintätiloissa pitää ottaa huomioon muuntajan sijoittamisessa.



Kuva 2 Perinteinen 1-vaiheinen lääkitäsuojaerotusmuuntaja ilman suojakuorta [11].

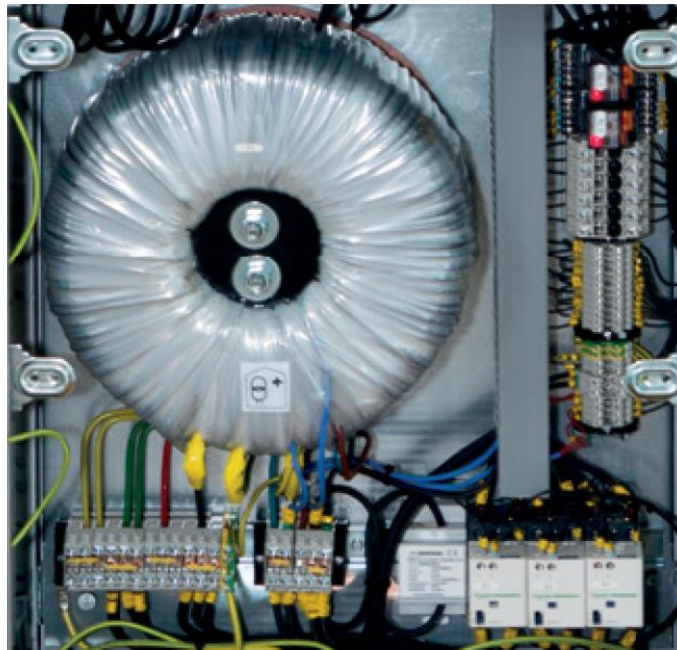
2.3 Toroidimuuntaja

Toroidimuuntaja toimii samalla periaatteella kuin perinteiset pakkamuuntajat. Erona on se, että käämit on kierretty renkaan muotoisen sydämen ympärille (kuva 3). Käämit voivat olla kierrettynä myös päällekkäin, jolloin alajännitekäämi on sydäntä vasten. Suurin hyöty tässä muuntajatyypissä lääkitätilakäytössä on se, että sen tuottama magneettikentän hajavuo on huomattavasti pienempi kuin pylväsmuuntajissa [28].

Sekä pakkamuuntajien että perinteisten toroidimuuntajien huono puoli on niiden suuri kytkentävirtasysäys. Muuntajien kanssa voidaan käyttää myös erityyppisiä kytkentävirtaa rajoittavia laitteita, joiden toteutusperiaate vaihtelee. Kuitenkin esimerkiksi tehoelektronikkaan (IGBT, tms.) perustuvan kytkentävirrän rajoituslaitteen käyttö ei ole sallittua lääkitäsuojaerotus muuntajissa. Tämä määräys on lääkitäsuojaerotusmuuntaja-stan-

dardissa IEC 61558-2-15, jossa kytkentävirran maksimiarvoksi annetaan 8 kertaa muuntajan nimellisvirta, ja tietyin rajoituksin se voi olla 12-kertainen. [10, s. 9] Lääkintätalokäyttöön on saatavana nykyään myös toroidimuuntajia, jossa kytkentävirran sysäys on erityisellä käämirakenteella voitu rajoittaa nimellisvirran tasolle [28].

Muuntajatyypistä riippumatta lääkitäsuojaerotusmuuntajissa vaaditaan vahvennettu eristys käämien välillä sekä käämien ja rungon välillä, ja käämien välissä vielä erillinen metallikalvo, joka on maadoitettu [10, s.13].



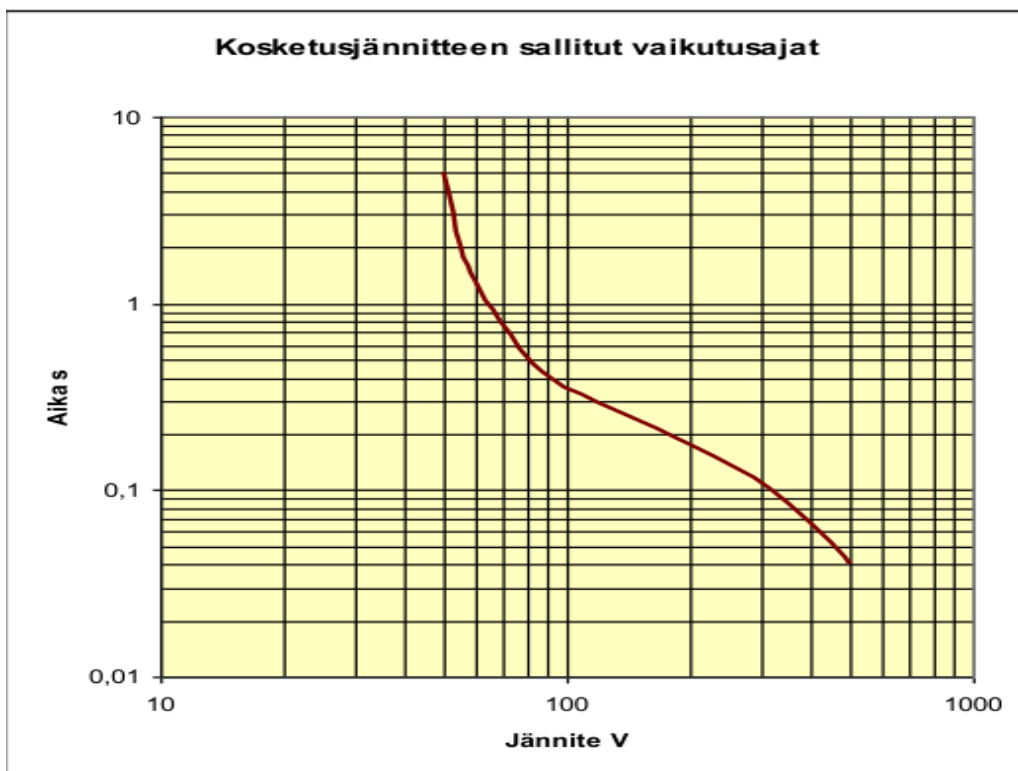
Kuva 3: Toroidimuuntaja [12].

3 Oikosulku ja vikatilanteet

1-vaiheisen lääkitäsuojaerotusmuuntajalla syötetyn verkon mahdolliset oikosulkutilanteet ovat kuten 3-vaihemuuntajalla, tietysti pois lukien 3-vaiheinen oikosulku. Lääkitäsuojaerotusmuuntajia asennuksissa on standardin EN 61557-8 mukaisesti oltava eristystilan valvontalaite, joka hälyttää viasta merkkivalolla ja äänihälytyksellä.

Lääkintätilojen sähköasennuksia koskevissa määräyksissä säädetään, että suurin sallittu jatkuva kosketusjännite ei saa olla yli 25 V, kun asennus ja kosketeltavat laitteet ovat lääkintätiloissa G1 ja G2. [17, 411.3.2.5.] Tällä tarkoitetaan siis kosketusjännitettä, joka on mahdollista esiintyä vikatilanteessa.

Suurin sallittu jännite on sen takia pieni, että näissä tiloissa lääkintälaitteet voivat olla kosketuksissa ihon alaisiin ihmiskehon osiin, jolloin ihon virtaa vaimentava impedanssi jää pois. Muissa tiloissa IEC 60479-1 standardin mukaan suurin sallittu kosketusjännite jatkuvassa kosketuksessa on 50 V:n vaihtojännitteellä (kuva 4). Raja 50 V tulee siitä, että sitä suuremmilla jännitteillä ihon impedanssi alkaa oikosulkeutua. Yli 200 V:n jännitteellä iho ei suojaa ollenkaan.

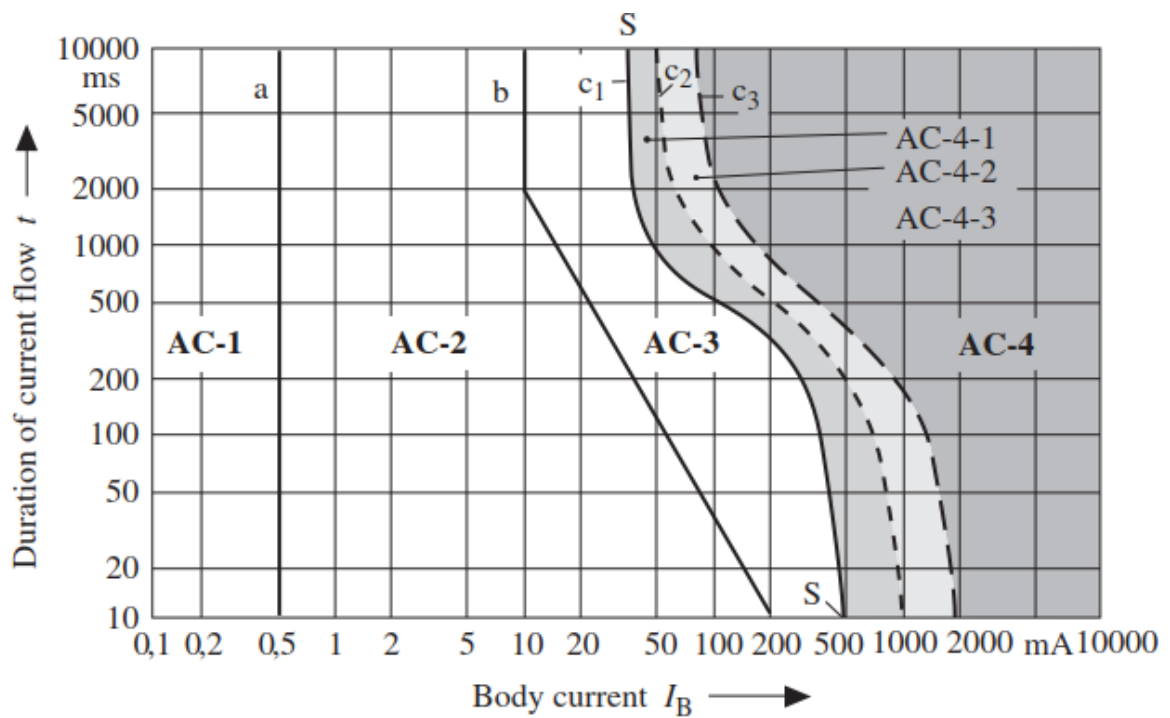


Kuva 4 Kosketusjännitteen sallitut vaikutusajat jännitteen mukaan [23].

Sähköasennusten virtapiirit ja suojajohtimet pitää mitoittaa siten, että virtapiirissä olevissa osissa vian aikana esiintyvä kosketusjännite ei ylitä sallittuja arvoja. Vialla tarkoitetaan käytännössä maasulkua, eli pieni impedanssista eristysvikaa vaihejohtimen ja suojavaadoitukseen kytketyn johtavan osan välillä. Kosketusjännitesuojauksen käytetyin tapa on syötön automaattinen poiskytkentä, eli nopea laukaisu riittävän lyhyessä

poiskytkentäajassa. Sallittu maksimiaika ryhmäjohtoilla 0,4 s ja nousujohtoilla 5 s. Suojauksen toiminta varmistetaan tarkastelemalla pienintä pisteessä esiintyvää oikosulkuvirtaa ja vertaamalla sitä suojalaitteiden toiminta-arvoihin. Johdonsuojakatkaisijoiden pitää silloin olla magneettisen pikalaukaisun alueella ja sulakkeiden toimia vaaditussa ajassa.

Kuvassa 5 on IEC 40479-1 standardin aika/virta vyöhykekäyrä vaihtovirralla, kun sen taajuus on 15–100 Hz. Taulukossa 1 on lueteltu vyöhykkeiden selitykset.



Kuva 5 Aika/virta vyöhykekäyrät vaihtovirralla [6, s. 60].

Taulukko 1. Kuvan 5 aika/virta-vyöhykekäyrien vyöhykkeiden selitykset [6, s. 59].

Vyöhyke	Virtarajat	Fyysiset vaikutukset
AC-1	0 – 0,5mA (linja a)	Tavallisesti ei reagointia
AC-2	0,5 – (linja b ¹)	Tavallisesti ei haitallisia fysiologisia vaikutuksia
AC-3	linja b–linja c ₁	Tavallisesti ei orgaanisia vaurioita. Yli 2 s kestävässä altistuksessa lihaskrampit ja hengitysvaikeudet todennäköisiä. Palautuvia häiriöitä sydämen impulssien muodostuksessa ja johtumisessa, mukaan lukien eteiskammiovärinä ja sydämen pysähdys ilman kammiovärinää, kun virran voimakkuus ja kesto kasvavat.
AC-4	linja c ₁ –	Kasvavalla virran voimakkuudella ja kestoajalla vaarallisia patologisia vaikutuksia kuten sydämenpysähdys, hengityksen pysähdys, ja vakavia palovammoja, sen lisäksi mitä on kerrottu vyöhykkeellä 3.
AC-4.1	linja c ₁ – linja c ₂	Mahdollisuus kammiovärinään lisääntyy 5 %:iin asti.
AC-4.2	linja c ₂ – linja c ₃	Mahdollisuus kammiovärinään 5 %:iin asti.
AC-4.3	Virta > linja c ₃	Mahdollisuus kammiovärinään yli 5 %.
b ¹ virran vaikutusajalla alle 10 ms ihmiskehon virta rajoittuu 200 mA:iin		

Vikavirran reaktioraja ihmisellä on vaihtovirralla 0,5 mA, jonka ei ole havaittu aiheuttavan reaktioita, vaikutusajasta riippumatta. Myöskään alle 10 mA:n virroilla ei tavallisesti ole havaittu olevan haitallisia fysiologisia vaikutuksia. Tässä yhteydessä voi mainita, että tasavirralla reaktioraja on nelinkertainen (2 mA), ja virralla jonka suuruus on vaikutusajasta riippuen, jopa 30–200 mA ei tavallisesti havaita haitallisia fysiologisia vaikutuksia. [6, s. 5-6]

Suunniteltaessa sähkönjakelua pitää vian aikana esiintyvistä vikavirroista määrittää suurimmat ja pienimmät oikosulkuvirran arvot, jotta jo suunnitteluvaiheessa voidaan varmistua asennusten turvallisuudesta. Lääkintä suojaerotusmuuntajien tapauksessa laskeaan muuntajaa syöttävältä puolelta 1-vaiheista oikosulkuvirtaa, ja muuntajan kuorman puolella 2-vaiheista oikosulkuvirtaa.

Oikosulkusuojuuksen toiminnan varmistamiseksi on tunnettava pienin vikavirta, joka ryhmässä esiintyy ja jolla oikosulkusuojaus toimii vaaditussa ajassa, ettei kaapeli ehdi kuumentua. Pienimmän oikosulkuvirran arvo määritetään kaapelin suurimmassa sallitussa

käyttölämpötilassa PVC eristeisillä +70 °C ja PEX-eristeisillä +90 °C, olevista johtimista. Taulukoissa kyseisen virran arvo ilmoitetaan kohdassa ”vaadittu mitattu arvo”, joka on 25 % suurempi kuin laskennallinen arvo. Tietävästi laskentastandardit ovat muuttumassa siten, että esimerkiksi PVC-eristeisillä kaapeleilla laskentalämpötilana aletaan käyttämään +80 °C:ta [23].

Varmuusvara +25 % ottaa huomioon sen, että mittaukset suoritetaan huoneenlämpöisillä, kuormittamattomilla johtimilla. Oikosulkutilanteessa johtimet lämpenevät, ennen kuin suojaus toimii, ja virtapiiri katkeaa. [3, s.92]

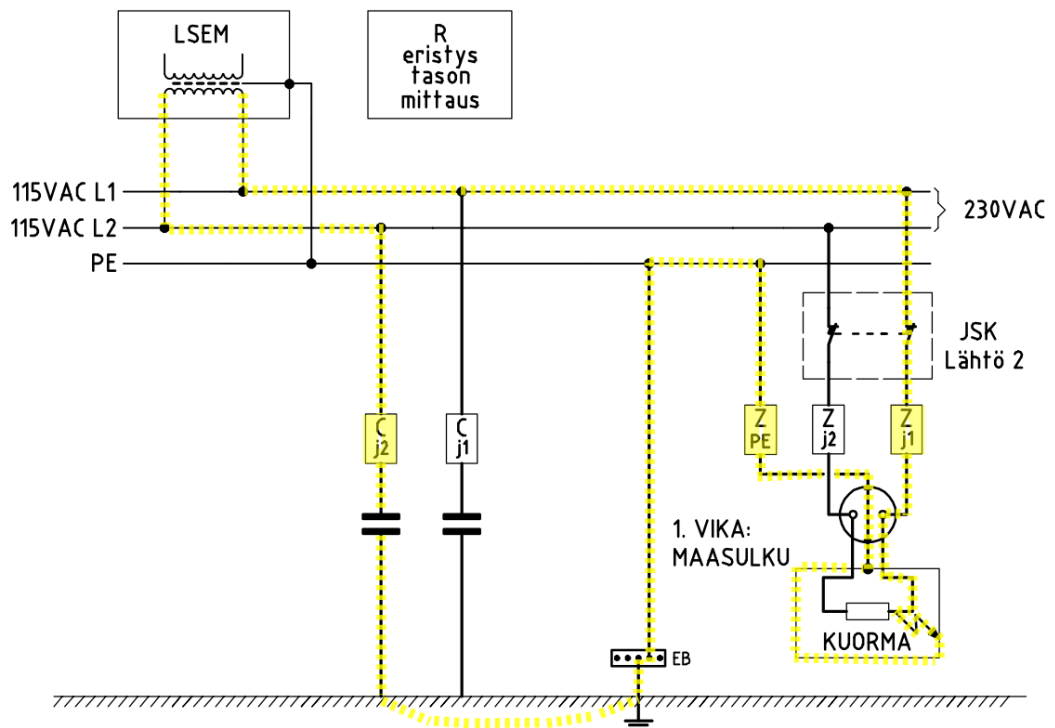
Eristysvikojen nopea havaitseminen ja niiden poistaminen on tärkeää myös palonehkäisyn takia. Jo 40–60 watin lämpöteho eristysviassa on riittävä aiheuttamaan paloriskin. [6, s. 44] Lääkintä IT-järjestelmässä sekä jännite että myös kaapelien maakapasitanssi ovat niin pieniä, että ensimmäisen vian aikana paloriskin muodostavaa virtaa (0,35–0,52 A) ei pääse syntymään. Lämpöteho jää yleensä alle 5 W:in tehon. [6, s.66]

Vertailun vuoksi voi mainita esimerkkinä teollisuuden IT-verkot, jossa tilanne on erilainen. Teollisuudessa käytettävissä IT-verkoissa jännite maahan nähden voi olla 400 V, jolloin 40–60 watin lämpötehoon tarvitaan vain 0,1–0,15 A:n virta. Joka tapauksessa tiedetään, että jos vikatilanne jatkuu, toisen vian riski alkaa kasvamaan.

Esimerkiksi G1- ja G2-tiloissa käytetään lääkkeellistä happea sekä herkästi syttyviä anestesiakaasuja. Tietenkin näiden kaasujen käyttökohteissa on myös tehokkaat kohdepoistot ylijäämäkaasuille, mutta riskit ovat aina suuremmat kuin muissa tiloissa.

3.1 Ensimmäinen vika eli maasulku

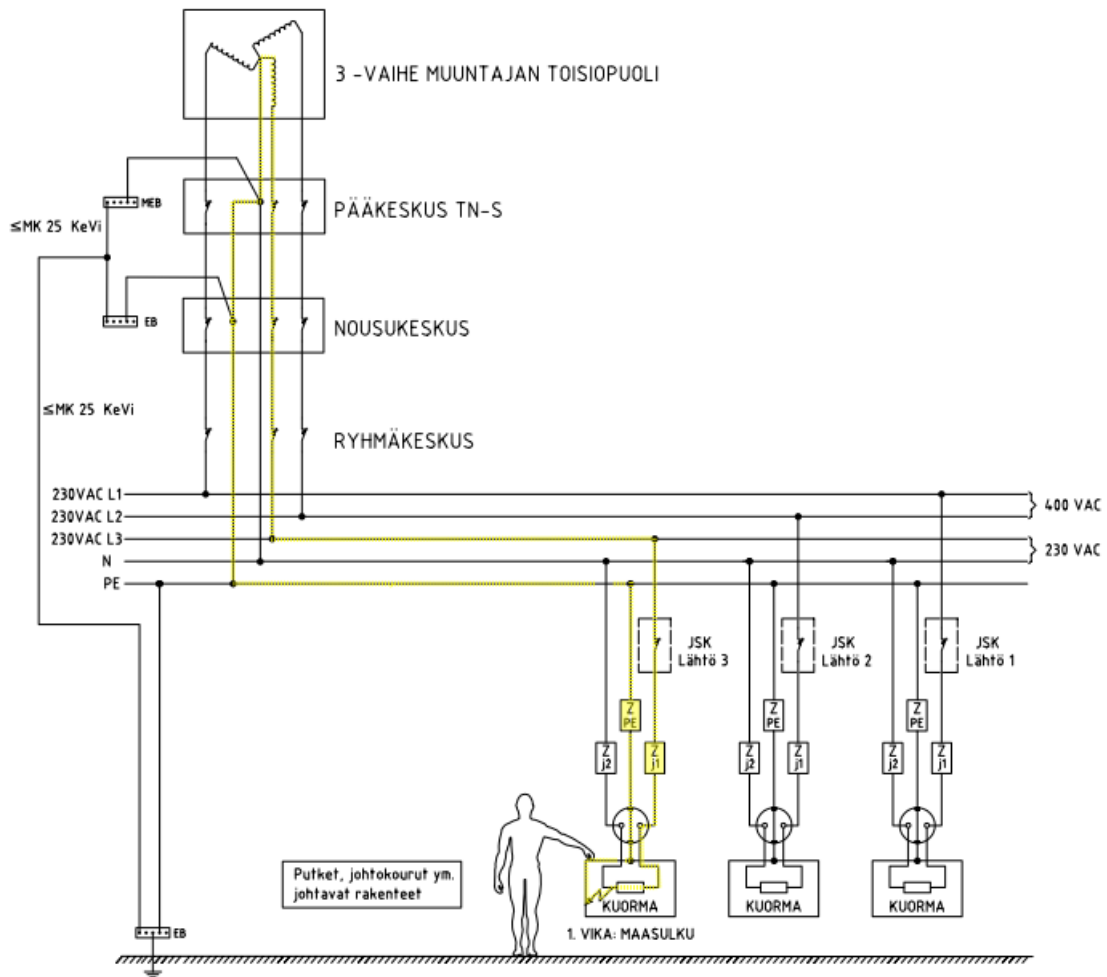
Ensimmäisellä vialla tarkoitetaan 1-vaiheista oikosulkuja, eli maasulkuja äärijohtimen ja suojamaan (kevi) välillä. Tätä vikaa ei saa automaattisesti kytkeä pois G2-tiloissa. 1. vika ei aiheuta virtapiiriin merkittävää jännitehäviötä ja siten käyttökatkosta, koska galvaanista yhteyttä muuntajan keskipisteeseen ei ole olemassa. Ensimmäisen vian aiheuttamassa maasulussa tapahtuu tilanne, jossa toinen äärijohtin kytkeytyy vian kautta maan potentiaaliin eli käyttömaadoittuu, jolloin koko asennus, jota sama lääkintäsuojaerotusmuuntaja syöttää, vastaa sen jälkeen TN-C-verkkoa. Tällöin siis ehjät samassa muuntajan äärijohtimessa kiinni olevat virtapiirit käyttömaadoittuvat viallisen virtapiiriin kautta. Sähköinen yhteys muuntajan toisiopuolen käämeihin muodostuu vain virtapiirin maakapasitanssin kautta, jolloin vikaantuneessa laitteessa esiintyvä vuotovirta ja siten myös



Kuva 6 Vikavirtapiiri 1.vian aikana IT-verkossa.

kosketusjännite jää hyvin pieneksi [2, s.9]. Tämä tilanne on esitetty kuvassa 6.

Saksalaisessa tutkimuksessa [8] on tutkittu kosketusjännitettä IT-verkossa ensimmäisen vian aikaan, kahdessa eri sairaalassa G2-tiloissa. Mittauksessa jännite vaiheiden välillä oli 230 V. Tutkimustuloksissa kosketusjännitteet vaihtelivat välillä 0,2–6 mV, ja virta joka syntyi mittauskohtaan, oli 1,34–6 mA.



Kuva 7 Eristysvika TN-S verkossa.

Havainnollisuuden vuoksi kuvassa 7 on esitetty maasulku TN-S-verkossa, jotta verkkojen eroavaisuudesta ja niiden toiminnasta vikatilanteessa saa helpommin käsityksen.

3.2 Toinen vika eli kaksoismaasulku

Kaksoismaasulku voi syntyä periaatteessa kolmella erilaisella tavalla. Mikäli kaksoismaasulku kaikesta epätodennäköisyydestään huolimatta tapahtuu, kaksoismaasulussa vikaantuneeseen virtapiiriin kytkeytyvien johtavien osien ja laitteiden kosketusjännite voi nousta puolikertaisesta aina täyden vaihejännitteen tasolle, jolloin se on nopeasti kytkettävä pois. SFS-standardissa 710.411.6.4 on määräys, joka poikkeaa standardin laadinnassa käytetystä esikuva standardista CENELEC HD 60364-7-710:

Jos lääkintä IT-järjestelmässä sattuu ensimmäisen vian jälkeen toinen vika, joka voi olla myös toisessa virtapiirissä, syötön automaattisen poiskytkennän vaatimukset pitää toteuttaa kuten TN-järjestelmässä SFS 6000-4-41 kohdan 411.6.4 mukaisesti. Vaatimusten toteutuminen pitää tarkastaa SFS 6000-6 kohdan 61.3.6.1 mukaisesti

SFS-käsikirjassa 600-1 kohdassa 411.6.4 on esitetty IT-verkon minimi oikosulkuvirralla epäyhtälö 1a [18, s. 98].

$$2 * I_a * Z_s \leq U. \quad (1a)$$

U on äärijohtimien välinen vaihto- tai tasajännite (V)

Z_s on piirin äärijohtimen ja suojamaadoitusjohtimen sisältämän vikapiirin impedanssi.

I_a on virta (A), joka aikaansaa suojalaitteen toimimisen TN-järjestelmille kohdassa 411.3.2.2 tai kohdassa 411.3.2.3 vaaditussa ajassa.

Vaadittu poiskytkentäaika on 0,4 s kun vaihejännite on 120 V-230 V, kuten 1-vaiheisessa TN-verkossa. Yhtälössä oleva kerroin 2 ottaa huomioon sen, että jos samaan aikaan sattuu kaksi vikaa, ne voivat olla eri virtapiireissä.

SFS-standardin kansallinen lisävaatimus 2. vian tapauksesta ja sen poiskytkennästä on määräys, jota ei yleensä esiinny kansainvälisissä standardeissa jotka käsittelevät pienjännitteisiä IT-verkkoja. Ainoa standardi, jossa se mainitaan, on standardi IEC 60364-4-41. Toisen vian samanaikaista esiintymistä ei pidetä todennäköisenä, vaan olettamuksena on, että sen esiintymisen mahdollisuus on niin pieni, että se on siedettävällä tasolla [7, s.169].

IEC:n oppaassa 104:2010 tämä asia ilmaistaan seuraavasti:

The simultaneous occurrence of two independent and non-related faults can under normal conditions be ignored, since the probability of such an event is so low that the risk can generally be tolerated. [8, s.1].

Siihen että 2. vian esiintymisriskiä pidetään niin pienenä, vaikuttaa tietysti se, että standardeissa vaaditaan IT-verkolle eristystasonvalvonta, joka hälyttää ensimmäisestä (eristys) viasta. NELFO:n laskentaoppaassa asia mainitaan siten, että IT- ja TT-verkoissa joissa on maavian valvonta, kahta vikaa ei esiinny samanaikaisesti. [5, s. 170] Kun vielä standardit suosittavat, että 1. vika pitäisi poistaa mahdollisimman pian, niin mitä nopeammin se poistetaan, sitä pienemmäksi 2. vian tulemisen todennäköisyys muodostuu.

3.3 2. vian oikosulkuvirtavaatimus

Epäyhtälössä 1a termillä Z_S tarkoitetaan virtapiirin suojalaitteen pienintä toiminta rajavirtaa, jolla suojalaite toimii ryhmäjohdoilla alle 0,4 sekunnissa. Silloin toteutuu syötön automaattisen poiskytkennän kytkentäehto. Johdonsuojakatkaisijoilla tämä tarkoittaa virtaa, jolla katkaisija toimii magneettisen pikalaukaisun alueella.

Epäyhtälö 1a voidaan esittää myös muodossa 1b,

$$2 \cdot I_a \cdot Z_S \leq U \quad (1a)$$

$$Z_S \leq \frac{U}{2 \cdot I_a} \quad (1b)$$

joka voitaisiin tulkita siten, että kun jännite on vakio, niin vikavirran pitää tuplaantua. Epäyhtälöt 1a ja 1b voidaan esittää myös muodossa 1c,

$$2 \cdot Z_S \leq \frac{U}{I_a} \quad (1c)$$

mikä tarkoittaa sitä, että kun jännite ja oikosulkuvirta pysyvät vakioina, vikapiirin impedanssin pitää olla $\frac{1}{2}$, eli puolet pienempi kuin TN verkkoon kytketyllä virtapiirillä, jonka syötön automaattisen poiskytkennän toteutumista ollaan tarkastelemassa (Z_S -termin edessä on kerroin 2).

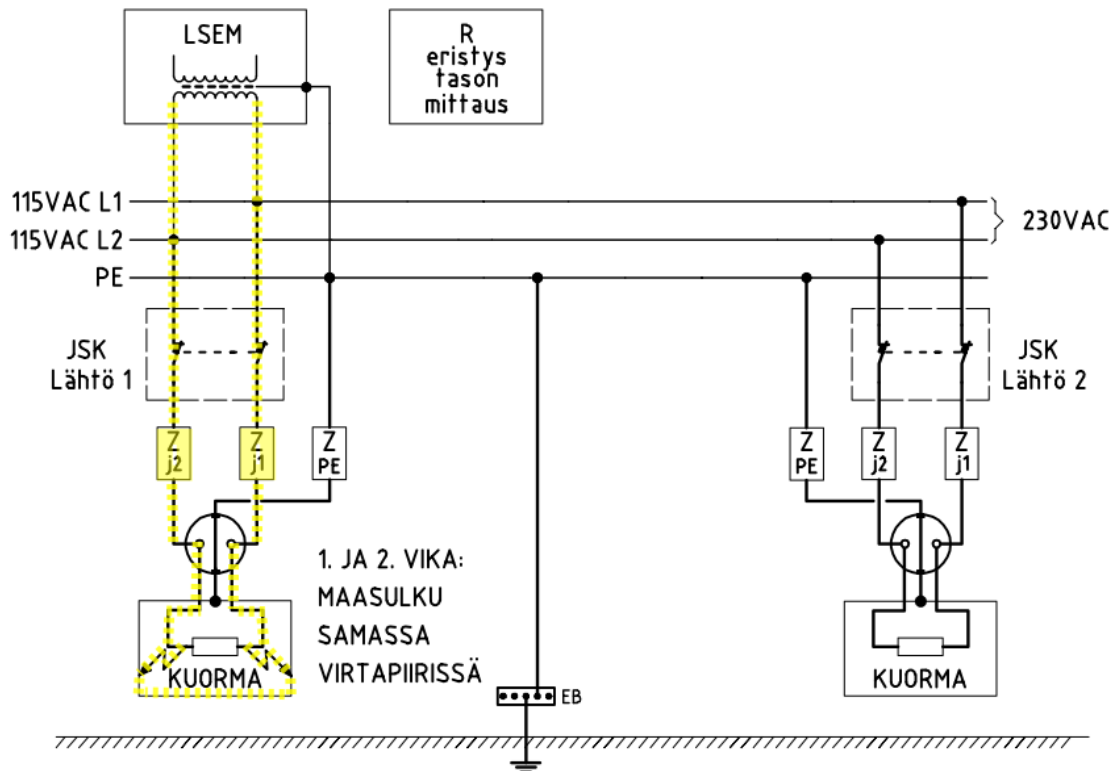
Kun jännite pidetään vakiona, se tarkoittaa, että vikavirran pitää kaksinkertaistua tai sitten impedanssin pitää puolittua, jotta päästään samaan lopputulokseen kuin TN-verkossa (yhtälö 2a tai 2b), johon tilannetta verrataan. [18, s.95]

$$Z_S \leq \frac{U}{I_a} \quad (2a)$$

$$Z_S \cdot I_a \leq U \quad (2b)$$

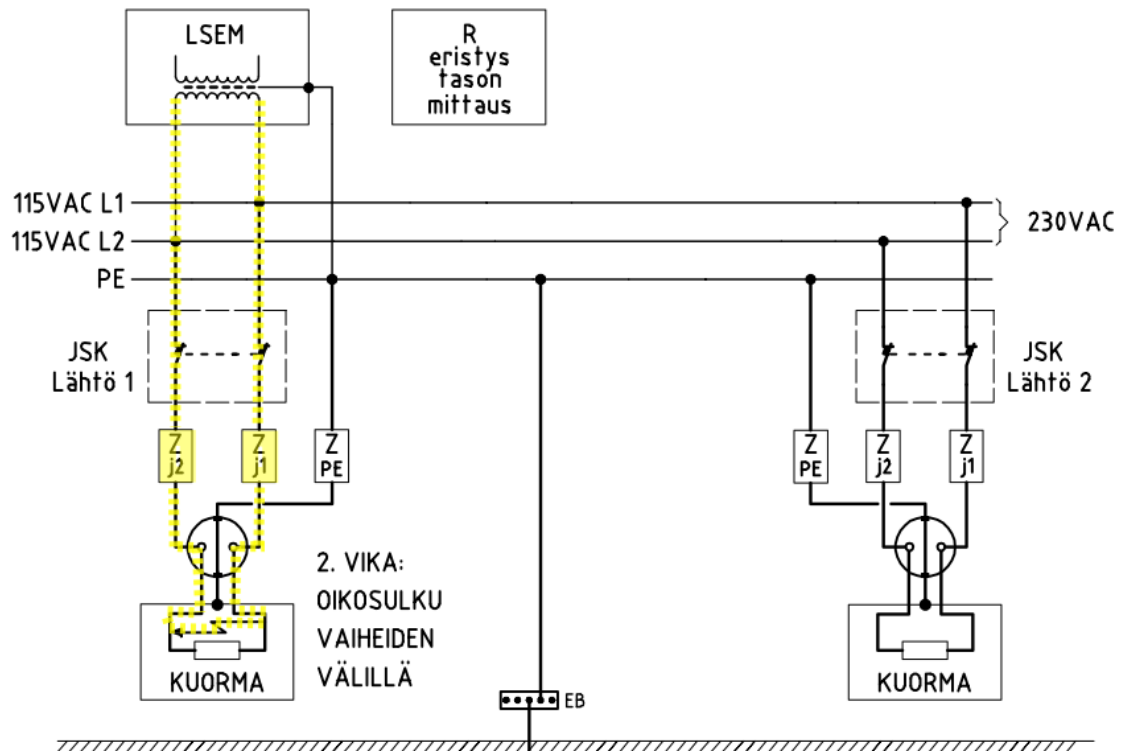
Tämä tarkoittaa käytännössä sitä, että lääkintäsuojaerotusmuuntajan jälkeen olevissa virtapiireissä pitää olla puolta pienempi impedanssi verrattuna TN-S-verkon ryhmiin, jotta suojauksen laukaisuehdot toteutuvat, koska IT-verkon kaksoisviassa on kaksi vikaa sarjaan kytkettynä [26]. TN-verkossa laukaisuehtoon vaadittavan minimioikosulkuvirran

saavuttaminen ei sairaalaverkoissa tuota yleensä ongelmia. Jos lääkintäsuojaerotusmuuntajien syöttämissä IT-verkoissa vaadittaisiin vikavirran kaksinkertaistamista, verrattuna vastaaviin TN-verkkoihin, tuon vaatimuksen toteuttaminen olisi haasteellista, tai se johtaisi ainakin kuormien kannalta huomattavan ylimitoitettuihin verkkoihin ja lääkintäsuojaerotusmuuntajiin.



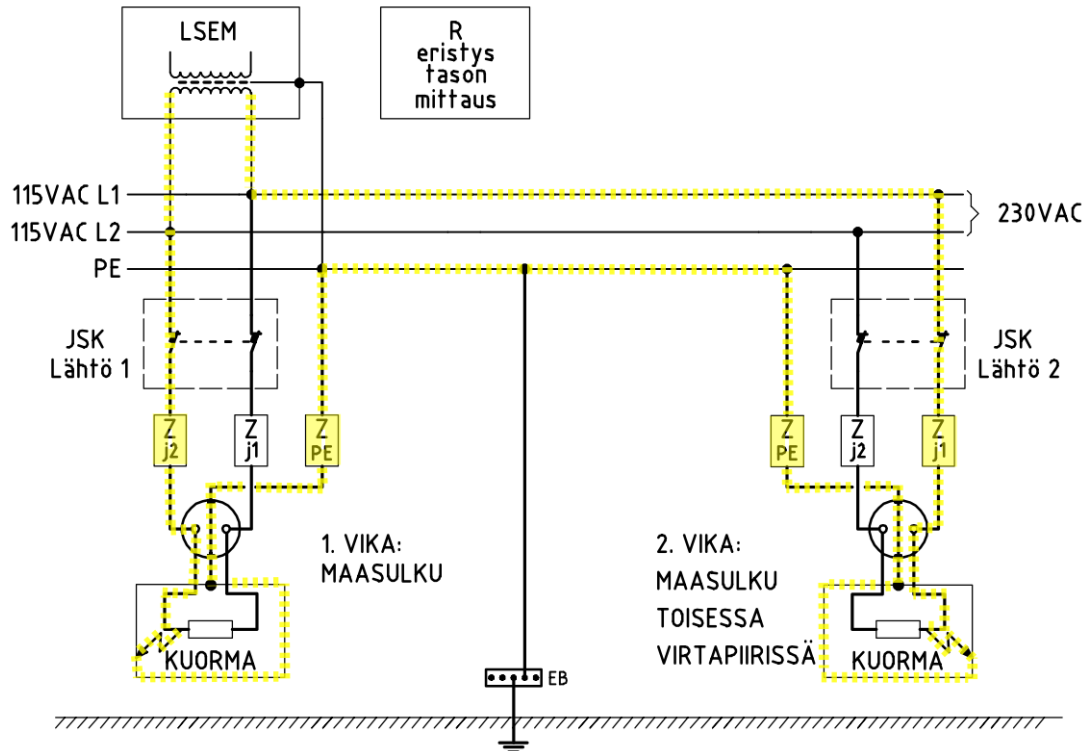
Kuva 8 Kaksi maasulku samassa virtapiirissä IT-verkossa.

Kaksoisvika voi tietysti sattua myös samassa virtapiirissä/ryhmässä, kun maasulku esiintyy molempien äärijohtimien ja suojamaan välillä samassa virtapiirissä (kuva 8). Mahdollista on myös tapahtua 2-vaiheinen suora oikosulku äärijohtimien välillä samassa virtapiirissä (kuva 9).



Kuva 9 Vaiheiden välinen oikosulku samassa virtapiirissä IT-verkossa.

Vikasuojuuksen ja oikosulkupiirin impedanssin kannalta nämä eivät ole samanarvoisia kuin SFS 411.6.4:n määrittelemä tapaus 2. viasta eli kaksoismaasulusta eri virtapiirissä/ryhmissä. Esikuvastandardissa IEC 60364-4-41, käsiteltäessä toisen vian tapusta, ei tarkoiteta äärijohtimien välistä oikosulkua tai kaksoismaasulkua samassa virtapiirissä. Mikäli näin tapahtuu kaikesta huolimatta, sen esiintymisen todennäköisyyttä pidetään yhtä pienenä riskinä kuin ensimmäisen vian esiintymistä. [7, s.170]



Kuva 10 IT-verkon kaksoismaasulku eri virtapiireissä. Tämä on standardissa SFS 6000: 411.6.4 mainittu toisen vian tapaus.

SFS 6000 411.6.4 -kohdan 2. vialla tarkoitetaan tilannetta, jolloin toisessa ryhmässä tapahtuu maasulku äärijohtimen ja suojamaan välillä, ja myös toisessa erillisessä virtapiirissä (ryhmässä) tapahtuu maasulku, mutta eri äärijohtimen ja suojamaan välillä (kuva 10).

Vikapiirin impedanssin kannalta tämä tapaus on vaativin, koska tilanne voi sattua muuntajasta kauimmaisissa virtapiireissä, jotka kuitenkin sijaitsevat esimerkiksi vierekkäin. Silloin vikapiirissä johdinpituudet tuplaantuvat (2x), kun vikavirta kiertää keskuksen kautta. Jännitteen suhteen 2. vian tapaus ei eroa TN-verkon 1-vaiheisesta oikosulusta: vikavirtapiiri on vaiheiden välillä, jännite on 230 V.

4 Kosketusjännite

SFS 6000 710.512.101 suositaa, että lääkintä-IT-ryhmissä kaapeloinnin pituus olisi max. 25 m, joka johdinimpedanssina vastaa pistorasiaryhmissä useimmiten käytetyllä 2,5mm² Cu-johtimella arvoa 0,18525 Ω. (7,41 mΩ/m * 25 m on 185,25 mΩ) Esimerkin johdinpoikkipinta-alalla johtimen impedanssiin vaikuttaa vain resistiivinen osuus.

Virtajohtimilla (ja kaapeleilla) virran kulkua vastustaa impedanssi (Z), joka koostuu johtimen tasavirta resistanssista sekä induktiivisesta ja kapasitiivisesta reaktanssista. Tarkassa verkoston laskennassa, silloin kun lasketaan johtoreitin kokonaisimpedanssia Z pitää osaresistanssit ja osareaktanssit laskea yhteen neliösummana yhtälöllä 2.

$$Z = \sqrt{\sum R^2 + \sum X^2} \quad (2)$$

Laskettaessa pienjänniteverkkoja ei pienipoikkipintaisien johtimien reaktanssin osuutta tarvitse aina huomioida, sillä sen osuus on vähäinen. Lisäksi esimerkiksi MCMK ja vastaavilla kaapeleilla, joissa PE- (tai PEN)-johdin on konsentrisesti vaihejohtimien tai virtajohtimien ympärillä, PE- tai PEN-johtimen reaktanssi on niin pieni, ettei sitä tarvitse huomioida [24].

Kaapeleissa kuten MMJ-, joissa PE-johdin on kerrattu yhteen vaihejohtimien kanssa, on PE-johtimen reaktanssi yhtä suuri kuin vaihejohtimilla [24]. Tarkassa laskennassa laskenta tehdään symmetrisillä komponenteilla, jolloin mukana on kaikki impedanssin osatekijät, kaapeli ja johdintyyppistä riippumatta.

Reaktanssin merkityksestä on alan kirjallisuudessa vaihteleva mielipide; alaraja reaktanssin vaikuttavuudesta vaihtelee 25–70 mm² johdinpoikkipinta-alojen välillä. Kaapelinvalmistajat eivät aina edes ilmoita kaapelin reaktanssia pienemmille poikkipinnoille, CTR 50840:n mukaan raja on 25 mm² [19]. Reaktanssin määrittäminen käsin laskennalla on tietysti mahdollista, mutta turhan aikaa vievää ja työlästä.

Laskentatuloksessa resistanssin ja jännitekertoimen c osuus on määräävä tekijä. Suuremmilla jännitteillä (yli 1 000 V) tilanne on aivan toinen, reaktanssin merkitys on dominoiva, ja resistanssin osuus on pieni. Samasta syystä suuremmilla jännitteillä ei lämpötilakorjauksella ole paljoa merkitystä, sillä se kasvattaa vain resistanssia, mutta ei reaktanssia. [25]

Mikäli laskentaan käytetään laskentaohjelmia (FebDok, Neplan, ABB DOC, Ols-ohjelmat), ne ottavat huomioon myös reaktanssit. NELFO, (joka on myös FebDok-ohjelman julkaisija) on julkaissut yleisimmille kolmejohtimisille kupari- ja alumiinikaapeleille resistanssi ja reaktanssiarvoja, mutta luettelo on rajallinen, eikä kata kuin osan asennuksissa käytettävistä kaapeleista.

Kun laaditaan verkoston laskentaohjelmia, luotettavin ja selvin laskentatapa niissä on se, että huomioidaan aina sekä resistanssi että reaktanssi normaalissa järjestyksessä. Sama koskee resistanssien muuntamista käyttölämpötilaan. Kaapelien reaktanssiarvot on esitetty kaapelistandardeissa. Näitä standardien arvoja käytetään myös laskentaohjelmissa. Standardeissa esitetään arvot maksimiraja-arvoina, jotka ilmoittavat suurimman sallitun arvon. [30]

4.1 NELFO:n taulukot

NELFO:n taulukot on esitetty arvoilla Ω/km . Jotta taulukon 2 käyttö olisi vaivattomampaa, arvot on muutettu Ω/m lukemiksi, ja luvuissa on käytetty tuhaterotinta, jos luvussa on etunollia 3 tai enemmän.

Taulukko 2. NELFO:n taulukot kupari- ja alumiinikaapeleille. [5, s. 172]

Kuparikaapelit Ω/m (+20 °C)				
Virtajohto/PE	$R'_{\text{vaihe johdin}}$	$X'_{\text{vaihe johdin}}$	R'_{PE}	X'_{PE}
1,5 / 1,5	0,0121	0,000 106	0,0121	0,000 15
2,5 / 2,5	0,00741	0,000 105	0,00741	0,000 14
4 / 5	0,00461	0,000 10	0,00461	0,000 13
6 / 6	0,00308	0,000 094	0,00308	0,000 13
10 / 10	0,00183	0,000 091	0,00183	0,000 12
16 / 16	0,00115	0,000 085	0,00115	0,000 105
25 / 16	0,000 727	0,000 081	0,0015	0,000 10
35 / 16	0,000 524	0,000 079	0,00115	0,000 099
50 / 25	0,000 387	0,000 079	0,000 727	0,000 098
70 / 35	0,000 268	0,000 075	0,000 524	0,000 098
95 / 50	0,000 193	0,000 075	0,000 387	0,000 097
120 / 70	0,000 153	0,000 072	0,000 268	0,000 095
150 / 70	0,000 124	0,000 069	0,000 268	0,000 094
185 / 95	0,000 099	0,000 069	0,000 193	0,000 095
240 / 120	0,000 075	0,000 069	0,000 153	0,000 097

Taulukko 2 jatkuu. NELFO:n taulukot kupari- ja alumiinikaapeleille. [5, s.172]

Alumiinikaapelit Ω/m (+20 °C)				
Virtajohto/PE	$R'_{vaihe\ johdin}$	$X'_{vaihe\ johdin}$	R'_{PE}	X'_{PE}
16 / 10	0,00191	0,000 085	0,00183	0,000 105
25 / 10	0,0012	0,000 082	0,00183	0,000 10
50 / 16	0,000 641	0,000 079	0,00115	0,000 098
95 / 35	0,000 32	0,000 075	0,000 524	0,000 097
150 / 50	0,000 206	0,000 072	0,000 387	0,000 094
240 / 70	0,000 125	0,000 072	0,000 268	0,000 097

Kaapeleilla, joiden PE tai PEN-johdin sijaitsee konsentrisen vaihejohtimien tai virtajohtimien ympärillä, konsentrisen johtimen reaktanssi on merkityksettömän pieni, ja siitä voi käyttää arvoa X on 0Ω . [24, s. 3]

Laskettaessa asennuksen pienintä oikosulkuvirtaa, voidaan menetellä kuten D1-käsikirjassa, eli että osaimpedanssit lasketaan suoraan yhteen ($Z = \sum R + \sum X$). Silloin todellinen impedanssiarvo on pienempi, ja siten asennuksessa esiintyvä todellinen oikosulkuvirta on suurempi kuin laskelmat osoittavat. Virhepoikkeama, suuruudeltaan n.10 % on suo-
jauksen toimivuutta ajatellen turvalliseen suuntaan. [3, s. 95]

4.2 Kosketusjännitteen määrittäminen

Kosketusjännite on yhtä suuri kuin se jännite joka syntyy vikavirtapiirin PE-johtimessa, johdinimpedanssin takia, vikavirran kulkiessa siinä. Kosketusjännitteen tarkka määrittäminen on toisaalta hyvin vaikeaa, ja toisaalta usein tarpeetonta, kunhan vain mitoitus-
sessa varmistutaan siitä, että syötön automaattisen poiskytkennän ehdot toteutuvat. [14]
Kosketusjännitteelle standardeissa asetetut rajat ovat sopimuskysymyksiä ja perustuvat lääketieteen tutkimuksiin siitä, kuinka jännite vaikuttaa ihmiseen. Esimerkiksi siitä, mikä on suurin sallittu jatkuva kosketusjännite, vallitsee eri näkemys eurooppalaisten ja amerikkalaisten alan toimijoiden kesken [27].

Käsikirjassa D1 (s.86–89) esitetään kaavoja, joilla kosketusjännitteen suuruutta voi laskea TN-verkoissa. Kuitenkin niitä ei voi käyttää IT-verkossa esiintyviin kosketusjännitteisiin [28].

Kosketusjännitteen laskentayhtälössä, (yhtälö 3) termit tarkoittavat seuraavasti:

U_t on kosketusjännite

U_0 on vaihejännite

c on sovittu kerroin, joka ottaa huomioon vikavirtapiirin jännitelähteen impedanssin osuuden kokonaisimpedanssista.

Kertoimella c kompensoidaan myös verkon tavanomaisia vaihteluita ja vikakohdan ylimenovastusta (esimerkiksi valokaaren vaikutusta) [25]. Kerroin c on 0,6–1, jolloin se on 1, kun virtapiiri syötetään suoraan jännitelähteestä, ja 0,6 kun virtapiiri on hyvin kaukana jännitelähteestä [30].

m on tarkasteltavan piirin vaihejohtimen ja suojajohtimen resistanssien suhde (jos samaa materiaalia, niin poikkipinta-alojen suhde).

Kosketusjännite (TN verkossa):

$$U_t = c \cdot U_0 \cdot \frac{m}{(1+m)} \quad (3)$$

josta seuraa että jos vaihe- ja suojajohtimen poikkipinta on sama, niin kosketusjännite on silloin

$$U_t = c \cdot \frac{U_0}{2} \quad (4)$$

Esimerkki suhteen m määrittämisestä: jos suojajohdin on 25 mm^2 ja vaihejohdin on 50 mm^2 niin $m = \frac{50 \text{ mm}^2}{25 \text{ mm}^2}$ jolloin m on 2.

Kun suojalaitteena käytetään johdonsuojakatkaisijaa ja suojattavan ryhmän pienin oikosulkuvirta on vähintään yhtä suuri kuin kyseinen johdonsuojakatkaisija vaatii toimiakseen magneettisella pikalaukaisulla, toteutuu vikasuojaus ehto ja syötön automaattinen poiskytkentä. Sairaaloikohteissa oikosulkuvirrat ovat usein sen verran suuria, että poiskytkentäajat ovat vaadittua 0,4 sekuntia huomattavasti nopeampia, suuruusluokaltaan 0,01–0,02 sekuntia. Nämä poiskytkentäajat ovat todellisen lääkintätilan suunnittelukohteen Febdok-laskelmista.

SFS 6000: 710.411.3.3:n mukaisesti lääkintätilojen IT-ryhmissä ei saa käyttää vikavirtasuojia. Tämä kohta puhuu vain lisäsuojauksesta, eli A-tyyppin vikavirtasuojasta nimelliset laukaisuherkkyydeltään 30 mA. Määräys johtuu siitä syystä, ettei voida olla varmoja siitä, etteivät ne laukea 1. vian aiheuttamasta maasulkuvirrasta. (710.411.6.3) Syötön automaattisen poiskytkennän (0,4 s) toteutumisessa 2. vian tapauksessa esimerkiksi 1 000 mA:n vikavirtasuojia voisi olla kokeilemisen arvoinen apu. [23] A-tyyppin vikavirtasuojia on yleisin käytettävä tyyppi, jota voidaan käyttää virtapiireissä, joissa esiintyy äkillisesti tai hitaasti kasvavaa vaihtovirtaa tai pulssimuotoista tasavirtaa. Ensimmäisen vian aikana esiintyvä kapasitiivinen maasulkuvirta kannattaa määrittää riittävällä tarkkuudella siksi, että voidaan harkita ryhmäkohtaisen vikavirtasuojan käyttöä siinä tapauksessa, että ryhmän oikosulkuvirta on niin pieni, ettei syötön automaattisen poiskytkennän laukaisuehto täyty. [28]

Standardin SFS 6000 mukaan muissa kuin lääkintä-IT-verkoissa pitää käyttää vikavirtasuojia lisäsuojaukseen. Tällöin käytettävän vikavirtasuojan on oltava soveltuvaa tyyppiä (tyyppi A-, B-, tai F). Standardissa SFS 6000: 531.2.3.4.3 on määritelmä:

Jos IT-järjestelmässä ei haluta ensimmäisen vian jälkeen poiskytkentää, vikavirtasuojia pitäisi valita siten, että $I_{\Delta n}$ on vähintään 2 kertaa virta, jonka odotetaan ensimmäisessä viassa kulkevan maahan.

Tässä tapauksessa pitäisi vikavirtasuojan laukaisuvirran ($I_{\Delta n}$) olla niin suuri, ettei se varmuudella laukea 1. vian takia. Markkinoilla on saatavana vikavirtasuojia laukaisuvirroille 500 mA ja 1 000 mA, ja näiden käyttömahdollisuutta myös lääkintä IT-ryhmissä voisi kyllä ainakin tutkia.

Vikavirtasuojan käytössä auttamaan syötön automaattisen poiskytkennän laukaisuehdon toteutumisessa on eräs hankaluus. Vikavirtasuojia on summavirtamuuntaja, joka laukaisee maavuotovirrasta. Jos ryhmäjohdossa sattuu vika samassa virtapiirissä kahden vaiheen välillä, ei vikavirtasuojia havaitse sitä.

4.3 Maasulkuvirta

Ensimmäisen vian tapauksessa esiintyvää kapasitanssia on hyvin vaikea määrittää, koska vikavirtapiiriin kytkeytyvät johtimet ovat kaapeleita ja sijaitsevat vielä muiden kaapeleiden kanssa samalla johtotiellä, jolloin niiden keskinäisvaikutuksia on vaikea arvioida [25]. ABB:n TTT-käsikirjassa olevan yhtälön mukaan voidaan laskea maasulkuvirta, jos tunnetaan verkon yhden vaiheen ja maan välinen kapasitanssi. [1, luku 8, s.1]

Maasulkuvirran laskentayhtälö ABB:n TTT-käsikirjan mukaan on

$$I_e = \sqrt{3} \cdot 2\pi \cdot 50\text{Hz} \cdot U_0 \cdot C_0 \quad (5)$$

Yhtälössä I_e on maasulkuvirta, U_0 on pääjännite (lääkintäsuojaerotusmuuntajan tapauksessa 230 V), ja C_0 on maakapasitanssi. Johdon maakapasitanssin ja sitä kautta syntyvän vuotovirran laskenta on esitetty myös esimerkiksi VDE Verlagin kirjassa *Protective Measures with Insulation Monitoring* sivuilla 157–160.

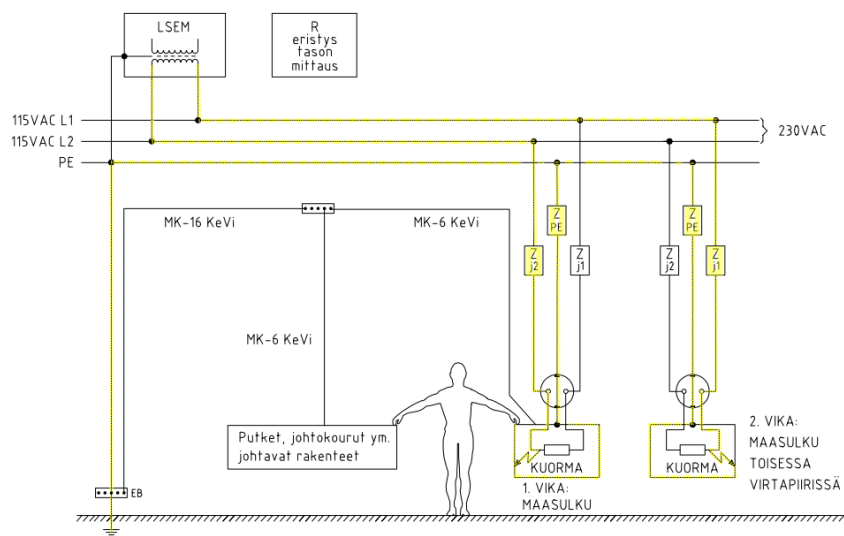
Kuten aiemmin tekstissä on mainittu, Saksassa tehdyn tutkimuksen tulokset osoittavat, että ensimmäisen vian aikana esiintyvä maasulkuvirta oli 1,34–6 mA [8]. Tätä asiaa kannattaisi tutkia lisää matemaattisesti sekä erilaisilla koejärjestelyillä, jotta voitaisiin varmistua vikavirtojen suuruudesta 1. vian aikana eri olosuhteissa ja soveltaa tuloksia esimerkiksi vikavirtasuojauksen käyttöön.

5 Potentiaalintasaus

Käsiteltäessä kosketusjännitettä pitää käsitellä myös potentiaalintasausta. Asennuksessa suojamaadoitus PE-johdon tarkoituksena on luoda pieni impedanssinen virtatie vikakohdasta jännitelähteen tähtipisteeseen, jotta suojalaitteet voisivat toimia [30]. Suojamaadoitus PE-johdin on normaalisti virraton ja jännitteetön, ja tulee osaksi virtapiiriä vain eristys yms. vikojen aikana.

5.1 Potentiaalintasauksen tehtävä

Potentiaalintasauksen tehtävänä on maadoittaa johtavat osat niin, että ne ovat keskenään mahdollisimman samassa potentiaalissa ja samassa potentiaalissa maan, päämaadoituskiskon, ja siis myös jännitelähteen tähtipisteen kanssa. Kuvassa 11 tilanne on esitetty IT-verkon 2. vian aikana. Potentiaalintasaus huolehtii siitä, että vikojen aikana jännite ei nouse vaaralliseksi, vaikka suojaus ei toimisikaan [30]. Potentiaalintasauksen olennainen idea on, että samanaikaisesti kosketeltavissa olevat johtavat osat ovat yhdistetty toisiinsa. Tällä ehkäistään näiden osien välisiä kosketusjännitteitä. [28]



Kuva 11 2. vian aikainen virtapiiri potentiaalintasatussa IT-verkossa.

Lisäpotentiaalintasaus ja potentiaalintasaus ovat rakenteellisesti sama asia, vaikka ne tehdään eri syystä. Joskus käsitteet saatetaan myös sekoittaa keskenään. Lisäpotentiaalintasaus tehdään siitä syystä, jos asennuksen oikosulkuvirta on niin pieni, ettei syötön automaattisen poiskytkennän vaatima laukaisuehto toteudu, tai jos vaatimuksena on pienempi (25 V) kosketusjännite, kuten G1- ja G2-tiloissa vaaditaan standardissa SFS 6000-7-710: 710.411.3.2.5. Lisäpotentiaalintasauksessa sananmukaisesti lisätään PE-johtimen poikkipinta-alaa lisäjohtimella, joka kytketään potentiaalintasausverkkoon ja sen puuttuessa syöttävän keskuksen PE-kiskoon.

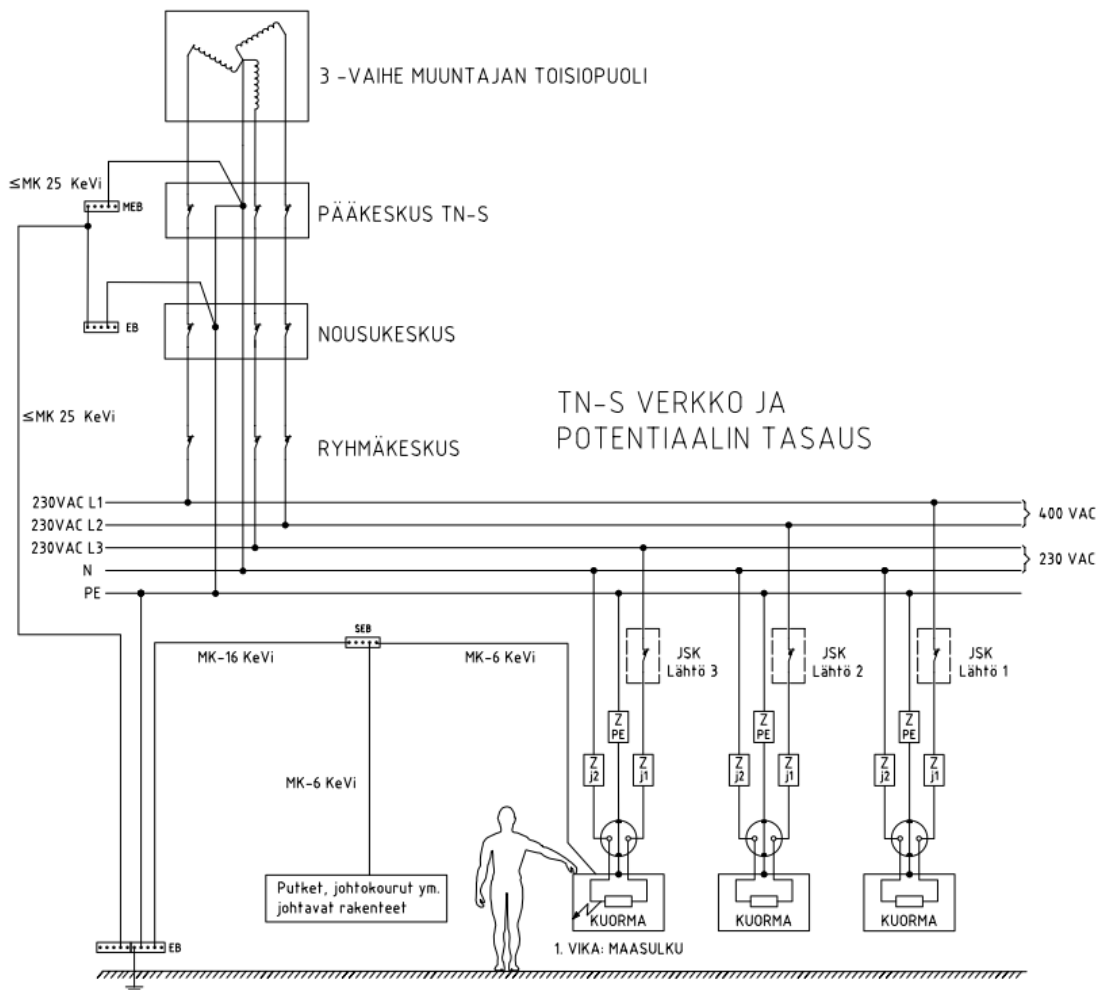
SFS 6000 411.3.2.6:n mukaan, mikäli kosketusjännitesuojauksen, siis syötön automaattisen poiskytkennän ehdot eivät täyty, pitää lisäsuojausmenetelmänä käyttää lisäpotentiaalintasausta. G2-tiloja koskevan erillisen määräyksen mukaan

Ryhmän 2 lääkintätiloissa suojajohtimien ja liitosten yhteenlaskettu resistanssi lisäpotentiaalintasauskiskon ja pistorasioiden tai kiinteästi asennettujen laitteiden suojaliittimien tai muiden johtavien osien välillä ei saa olla suurempi kuin $0,2 \Omega$. (SFS 6000; 710.415.2.2)

Sairaalan sähköistyksessä rakennetaan usein kokonaan erillinen, potentiaalintasausverkko, joka yhdistetään päämaadoituskiskoon. Tämän verkon rakentamista kritisoidaan joskus sillä perusteella että TN-S-verkossa nousujohtojen mukana oleva PE-johdin riittää vikasuojaukseen ja kosketusjännitesuojaukseen.

5.2 Potentiaalintasausverkon ja lisäpotentiaalintasauksen rakenne

Potentiaalintasausverkon rakenne on yksinkertaistettuna sellainen, että päämaadoituskiskolta (MEB) lähtevään potentiaalintasausjohtimeen yhdistetään nousu-, ja ryhmäkeskusten luona olevat potentiaalintasauskiskot (EB). Potentiaalintasauskiskoon yhdistetään keskuksen PE-kisko, ja sitä kautta myös keskuksen runko. Potentiaalintasausverkon rakenne on selväpiirteisyyden vuoksi esitetty TN-C-verkon yhteydessä kuvassa 12. Lääkintätiloissa, kuvassa 10, potentiaalintasaukseen liitetään kaikki ne johtavat osat, joihin on mahdollista kytkeytyä jännite. Kytettäviä kohteita on niin paljon, että ne kytketään Lisäpotentiaalintasauskiskoon (SEB) minimissään 6 mm^2 :n johtimella. Lisäpotentiaalintasauskisko (SEB) kytketään 16 mm^2 :n johtimella potentiaalintasauskiskoon (EB) keskuksen luona. Johdotuksiin käytetään eristettyä kelta-vihreää johdinta, esim. MK-KEVI.



Kuva12 Potentiaalintasausverkko TN-S jakeluverkossa.

Erillinen potentiaalintasausverkko on sairaalaympäristössä tarpeellinen useasta syystä. Esimerkiksi sen takia, että mikäli nousukeskuksessa tai ryhmäkeskuksessa tapahtuu maasulku, eli jännite kytkeytyy keskuksen runkoon ja siten myös keskusrungon kautta PE-johtimeen, kaikkien samaan pisteeseen johtavassa yhteydessä olevien osien jännite nousee vian ajaksi. Sama tilanne on myös, jos maasulku tapahtuu ryhmäjohtossa tai ryhmäjohtoon syöttämässä kuormassa, jännite kytkeytyy vikakohtasta sinne, mihin sillä on galvaaninen yhteys.

Kun potentiaalintasausverkko on käytettävissä ja tähän verkkoon on liitetty myös jakokeskusrungot, kaikki pisteet jotka potentiaalintasaukseen on kytketty, ovat samassa potentiaalissa, eikä niiden välillä voi siten esiintyä paikallisia potentiaalieroja, joka havai-

taan kosketusjännitteenä. Potentiaalintasausverkko toimii myöskin em. keskuksen maasulun tapauksessa suojaavana lisäpotentiaalintasauksena, kun ryhmäkeskusten rungot on yhdistetty potentiaalintasaukseen. Eli potentiaalintasausverkolla saavutetaan pienemmät maasulkujen aikaiset kosketusjännitteet, kuin jos maadoitukseen olisi käytettävissä vain nousujohtojen PE johtimet.

Edellä mainittuja asioita ei pidä sekoittaa rakennuksen nollan ja PE:n yhdistämiseen, joka harvoja poikkeuksia lukuun ottamatta tehdään vain yhdessä paikassa, pääkeskuskella tai UPS-pääkeskuskella. Päämaadoituskiskolla (MEB) yhdistyvät kaikki potentiaalintasaukset ja lisäpotentiaalintasaukset sekä mahdolliset toiminnalliset maadoitukset. Päämaadoituskiskolta on yhdistys pääkeskuksen PE-kiskoon, joka sitten yhdistetään rakennuksen nollakiskoon, yhdessä paikassa.

6 Oikosulkuvirran laskeminen

Muuntaja rajoittaa oikosulkuvirtaa oikosulkuimpedanssillaan (Z_k). Muuntajavalmistajat ilmoittavat yleensä muuntajien kilpiarvoissa vain oikosulkuimpedanssin Z_k %, josta saadaan laskettua oikosulkuresistanssin R_k ja oikosulkureaktanssin X_k arvot muuntajan valmistajan ilmoittamista häviötehon arvoista.

Jos tunnetaan oikosulkuvirta sekä virran kulma jossakin virtapiirin pisteessä, tämä oikosulkuvirran arvo muutetaan impedanssin komponenteiksi (R ja X) muunnosyhtälöllä. Oikosulkuvirtalaskelmissa muuntajan ensiöpuolella olevat arvot redusoidaan muuntajan toisiopuolelle samaan jänniteportaaseen ja laskelmat tehdään siellä.

Kun lasketaan lääkintäsuojaerotusmuuntajan jälkeisiä virtapiirejä, redusointi on yksinkertaista. Muuntosuhteen 1:1 takia muuntajan ensiöpuolen virrat ja jännitteet siirtyvät sellaisinaan toisiopuolelle. Koska kyseessä on 1- tai 2-vaiheinen oikosulku, ei ensiön ja toision välillä ole vaihesiirtoa [24].

6.1 Lämpötilakorjaus

Jos kaapelin resistanssi on ilmoitettu vain +20 °C:n lämpötilassa (θ_0), vikavirtojen laskenta standardien mukaisesti arvoihin tehdään lämpötilakorjauskertoimella (k_θ), jotta

ne saadaan vastaamaan sovittua laskentalämpötilaa. Laskennassa varaudutaan tilanteeseen, että oikosulku sattuu maksimikuormituksessaan olevassa kaapelissa. Lämpötilakorjaus tehdään vain resistanssiarvolle.

Lämpötilakorjauksen muunnosyhtälössä, [24] yhtälössä 6 tekijä ($\alpha_{Cu20^{\circ}C}$) on johtimen ominaisvastuksen lämpötilamuutoskerroin $0,004[1/^{\circ}C]$ lämpötilassa $+20^{\circ}C$. Tämä kerroin on sama alumiinille ja kuparille.

$$k_{\theta} = \frac{[1 + \alpha_{Cu20^{\circ}C} (\theta - 20^{\circ}C)]}{[1 + \alpha_{Cu20^{\circ}C} (\theta_0 - 20^{\circ}C)]} \quad (6)$$

PE-johtimessa ei normaalisti kulje virtaa lainkaan, joten se ei lämpene kuormitusvirran vaikutuksesta. Tämän takia sen resistanssiin voisi jättää tekemättä lämpötilakorjauksen. Kuitenkin laskentastandardeissa lämpötilat $+70^{\circ}C$ (PVC eriste) ja $+90^{\circ}C$ (PE eriste) ovat kaapelin suurimpia jatkuvan käytön lämpötiloja. Tästä syystä pienimmän oikosulkuvirran laskuissa varmintä on olettaa, että PE-johdin, joka on kuitenkin samassa kaapelissa, lämmön johtumisen takia on myös samassa lämpötilassa kuin virtajohtimet.

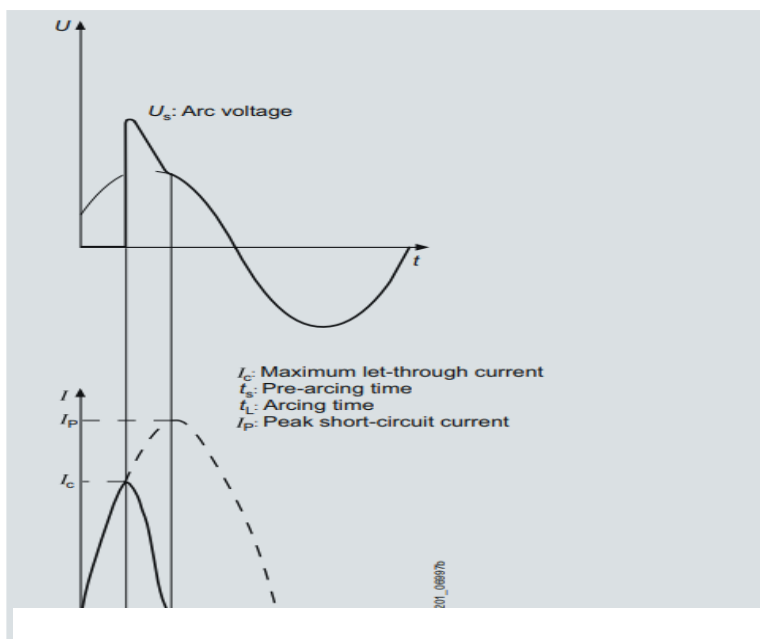
Oikosulkuvirtalaskelmissa lämpötilakorjauksilla tuleva resistanssin lisäys on joissain tapauksissa ehkä hieman turhan suuri. Kuitenkin kun lasketaan pääjakelun tai nousujohdosten suojausten mitoitusta, laskeminen on ehdottomasti syytä suorittaa suurimpaan käyttölämpötilaansa lämmenneellä kaapelilla, myös PE-johtimen osalta.

Kun ollaan laskemassa pienitehoisten ryhmäjohtojen oikosulkuvirtoja, ja kaapelien resistanssit muutetaan vastaamaan suurinta kaapelin käyttölämpötilaa muuntajalta aina nousukeskukseen asti, saatu laskentatulokset on ”varman päälle”. Tämä siitä syystä, että laskennan oletuksena on, että koko virtapiiri, myös kaikki nousukaapelit ovat oikosulun hetkellä maksimikäyttölämpötilassaan. Laskentatulokset on turvalliseen ja parempaan suuntaan ”virheellinen”, jos sitä nyt virheellisenä haluaa pitää.

Laskelmissa käytetään myös jännitekerrointa c , jolla otetaan huomioon jännitteen alenemat liitoksissa ja muut oikosulun aikaisessa virtapiirissä esiintyvät jännitteen alenemat. Kertoimen c arvo on CTR 50840:n mukaan $0,95$, kun vian impedanssi (ylimenovastus) on 0Ω . [19 s. 459] Jos halutaan huomioida ylimenovastus, jännitekerroimeksi käytetään arvoa $0,7-0,9$. Siinä tapauksessa on vain muistettava, että vikakohdan impedanssi (mukana kertoimessa c) on tuloksissa määräävä [30].

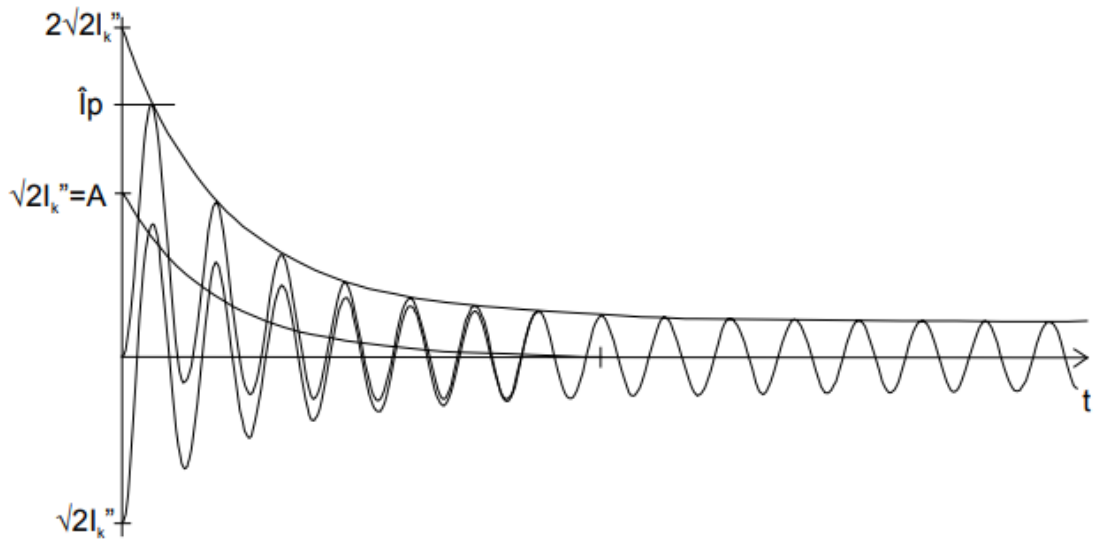
6.2 Sulakkeiden toiminta ja virranrajoitus

Oikosulkuvirralla on kaksi arvoa, jotka tulee mitoituksissa tuntea. Toinen on oikosulkuvirran huippuarvo I_p , eli sysäysoikosulkuvirta joka esiintyy ensimmäisen puolijakson huippuarvon kohdalla. Keskusten sekä katkaisijoiden eri komponenttien ja pitää kestää tämä mekaaninen voimavaikutus. Toinen arvo on oikosulkuvirran jatkuvuustilan arvo I_c , joka aiheuttaa oikosulkuvirran termiset lämpörasitukset.



Kuva 13 Sulakkeen virranrajoitus [21].

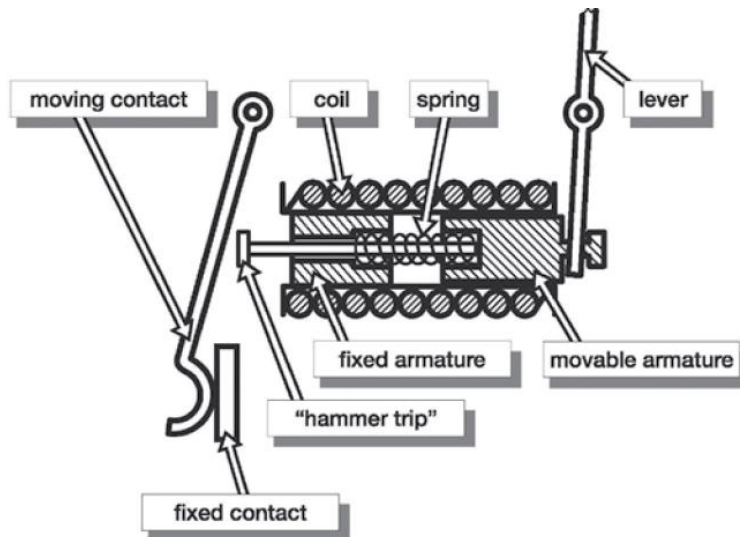
Sähköverkossa käytettävillä sulakkeilla on virranrajoitusominaisuus, jota hyödynnetään usein, kun oikosulkuvirrat ovat suuria, jolloin laitteistoista ei tarvitse tehdä kestäväksi niin suuria mekaanisia voimia. Sulakkeiden toiminta on nopeaa, sulaminen ja katkaisuvälokaaren sammuminen tapahtuu 1/4 jakson ajassa, kuten kuvassa 13 on esitetty. Tästä syystä niillä voidaan rajoittaa oikosulkuvirran huippuarvoa I_p . Sulakkeen toiminta aika on verrannollinen tämän oikosulkuvirran (I_p) suuruuteen. [1, luku 7, s. 1,16–19.] Sulakkeen toiminta perustuu valokaareen, joka sulattaa sulakkeen sisällä olevan johdinmetallin poikki. Suuremmalla virralla sekä sulakkeet että myös johdonsuojakatkaisijat toimivat nopeammin: mitä suurempi on ensimmäisen puolijakson huippuarvon virta I_p , sitä jyrkempi on sen kasvunopeus, kuten kuvasta 14 voi havaita, ja vastaavasti sitä nopeammin syntyy energiamäärä, joka tarvitaan.



Kuva 14 Oikosulkuvirta käyrä [1].

6.3 Johdonsuojakatkaisijan toiminta

Johdonsuojakatkaisija toimii kahdella tavalla. Ylikuormitustilanteessa kuormitusvirta lämmittää bi-metalli osaa, joka kuumetessaan vääntyy ja laukaisee jousivoiman, joka vetää koskettimet auki. Oikosulkutilanteessa johdonsuojakatkaisijan laukaisu toimii toisin. Kuvan 15 mukaisesti johdonsuojakatkaisijassa on solenoidi, eli käämi (coil), jonka sisällä on teräksinen sydänosa, ankkuri (hammer trip). Ankkuri pääsee liikkumaan magneettikentän vaikutuksesta. Oikosulkutilanteessa käämi synnyttää niin suuren magneettisen voiman, että se pakottaa ankkurin liikkeelle, jolloin ankkuri lyö koskettimen (moving contact) auki. [13, s.2] Tämän takia myös johdonsuojakatkaisija on oikosulkutilanteessa hyvin nopea, toiminta-aika on noin 10 millisekuntia. Kontaktin avautumiseen kuluu aikaa noin 5 millisekuntia [13, s. 4], ja loput ajasta kuluu valokaaren sammumiseen sammutuskenossa.



Kuva 15 Johdonsuojakatkaisijan käämi ja lyöntiankkuri [13].

6.4 Oikosulkuvirran voimavaikutuksessa huomioitava

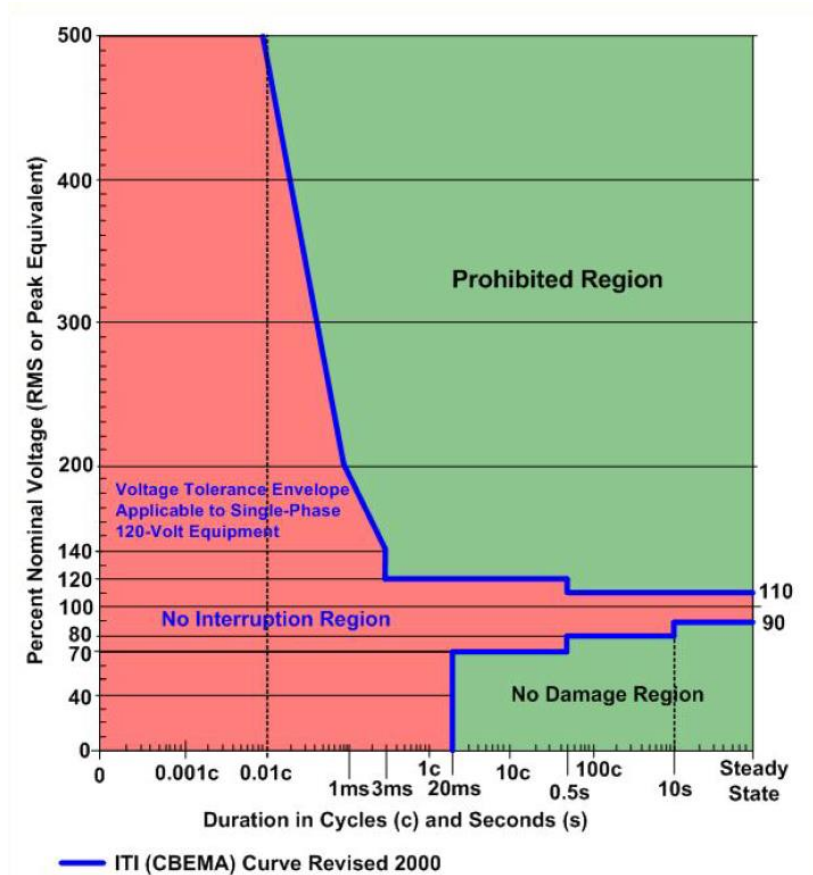
Oikosulkuvirran voimavaikutuksia käsiteltäessä on hyvä muistaa SFS 6000-5-52:n kohdan 522.8.4 huomautus. Sen mukaan oikosulkuvirran aiheuttamat dynaamiset voimavaikutukset pitää ottaa huomioon vain yli 50 mm^2 :n poikkipinta-aisilla yksinjohdinkaapeleilla.

Tähän voi sanoa olevan kaksi syytä. Ensinnäkin vasta kaapelikoolla $> 50 \text{ mm}^2$ virtojen suuruusluokka ja niiden voimavaikutukset alkavat olla kaapeleillakin merkittäviä. [25] Toisaalta monijohdinkaapelit on kerrattu, eli valmistus vaiheessa kierretty kaapelin keskilinjan ympärille. Kerrattu rakenne yhdistettynä kaapelissa mahdollisesti oleviin muihin tukirakenteisiin, kuten nauhoituksiin, antaa kaapelille oikosulkuvirran dynaamisen voiman kestoisuutta. Oikosulkuvirran kestoisuus riippuu tietysti kaapelin rakenteesta. [25;28]

6.5 ITIC (CBEMA)

Jos sähkönjakelussa syötetään herkkiä tietokonekuormia (jotka ovat useimmiten UPS jakelussa), suojalaitteiden valinnassa ja niiden laukaisuajoissa pitäisi huomioida tietokone laitteiden suurin sallittu jännitekatkoksen tai -kuopan kestoaika. Kansainvälisellä sopimuksella tietokone- ja palvelinvalmistajat ovat sopineet, että laitteet kestävät maksimissaan 20 ms:n jännitekatkon niiden toiminnan häiriintymättä. Sopimus tunnetaan myös Information Technology Industry Council, (ITIC), Computer and Business Equipment Manufactures Association (CBEMA), eli ITIC (CBEMA) -käyränä. Samassa sopimuksessa on määritetty rajat myös sallitulle ylijännitteelle.

Kuvassa 16 on pystyakselilla jännite (V) prosentteina normaalista käyttöjännitteestä, ja vaak-akselilla kesto aika sekunteina. Kuvan tekstien selitykset: Prohibited Region on kielletty alue, No Damage Region -alueella ei tapahdu rakenteellisia vaurioita, No Interruption Region -alueella laitteen toiminta ei häiriinny.



Kuva 16 ITIC (CBEMA) jännite-aikakäyrä IT-laitteiden sallimista jännitteen vaihtelusta [22].

6.6 Oikosulkuvirtojen nimitykset

Sulakekäyrissä käytetään prospektiiviselle oikosulkuvirralle ja oikosulkuvirran huippuarvolle eri lyhenteitä kuin keskusstandardit käyttävät [20].

Laskennassa esiintyy usein termi prospektiivinen oikosulkuvirta (I_{cp} tai I_p), jonka nimi tulee englannin sanasta *prospective* eli mahdollinen. Termillä tarkoitetaan virtaa, joka kulkisi pisteessä, jos siinä olisi olemattoman pieni-impedanssinen oikosulku eikä virtaa rajoitettaisi mitenkään.

Ehdollinen nimellisoikosulkuvirta on sen prospektiivisen oikosulkuvirran arvo laskentapisteessä, jota jokin sitä edeltävä komponentti rajoittaa. Jos rajoittavana komponenttina on katkaisija, termin lyhenne on I_{cc} . Jos oikosulkuvirtaa rajoittavana komponenttina on sulake, termin lyhenne on I_{cf} .

Rajoitetun oikosulkuvirran arvo riippuu oikosulkuvirran tehollisarvosta. Tämä siitä syystä, että suuremmalla tehollisarvolla oikosulkuvirran energia (I^2t) on suurempi, jolloin sulakkeen palamiseen tarvittava lämpöenergiamäärä vapautuu lyhyemmässä ajassa; sulake toimii nopeammin.

Merkinnällä I_{cw} tai I_k ”rated short-time current withstand” tarkoitetaan lyhytaikaista termistä nimelliskestovirtaa eli sitä virran määrää, jonka kohde kestää määrättyssä aikayksikössä vaurioitumatta. Se ilmoitetaan yleensä yhden sekunnin arvona.

Merkintä I^2t tarkoittaa energian määrää, joka läpäisee kohteen ja joka muuttuu lämmöksi esim. oikosulussa. Arvo lasketaan oikosulkuvirran I_{cw} tai I_k tehollisarvosta (r.m.s) ja vaikutus-ajasta (t). Arvoa käytetään vertailuarvona.

Merkintä I_{pk} tai I_p (joskus myös I_s) ”rated peak withstand current” tarkoittaa dynaamista nimelliskestovirtaa. Käytetään myös nimitystä sysäsoikosulkuvirta. Tällä tarkoitetaan virran ensimmäisen huipun hetkellisarvoa, jonka dynaaminen eli mekaaninen (”sysäävä”) voimavaikutus kohdistuu laskenta-pisteeseen ja joka sen on kestettävä. Tämä arvo on keskusten mitoituksen kannalta ratkaiseva. [20, s.12, 132; 1, luku 7, s.1]

6.7 UPS oikosulkuvirta laskuissa

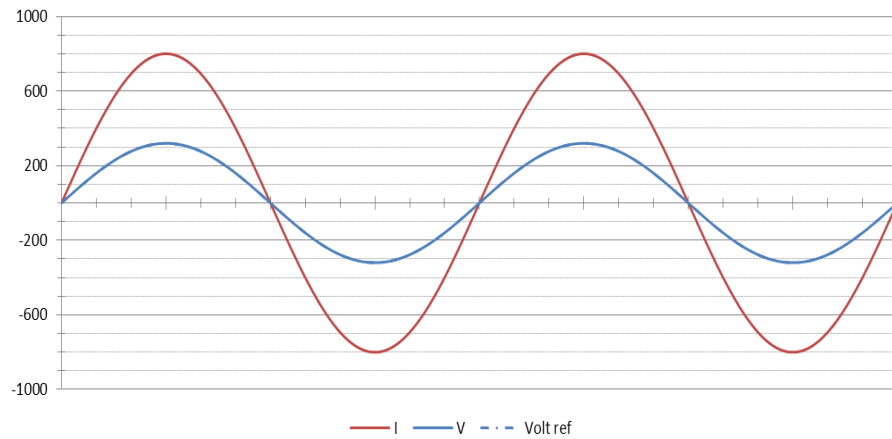
Laskettaessa UPS-verkon oikosulkuvirtoja UPS-laitetta ei voida käsitellä samoin kuin muuntajaa, koska sillä ei ole ”oikosulkuimpedanssia”, jota joskus kysytään. UPS on jänniteohjattu virtalähde, jonka impedanssi on kuormasta katsottuna 0Ω . [29]

Jotta oikosulkuimpedanssi muodostuisi, pitäisi olla virtaa johtava, jatkuva yhteys syöttävän muuntajan napoihin. UPS-laite muodostaa lähtöjännitteen itse elektronisissa komponenteissa, jolloin vaihejohdoissa ei ole katkeamatonta johtavaa yhteyttä UPS:ia syöttävään verkkoon normaalikäytöllä tai akkukäytöllä.

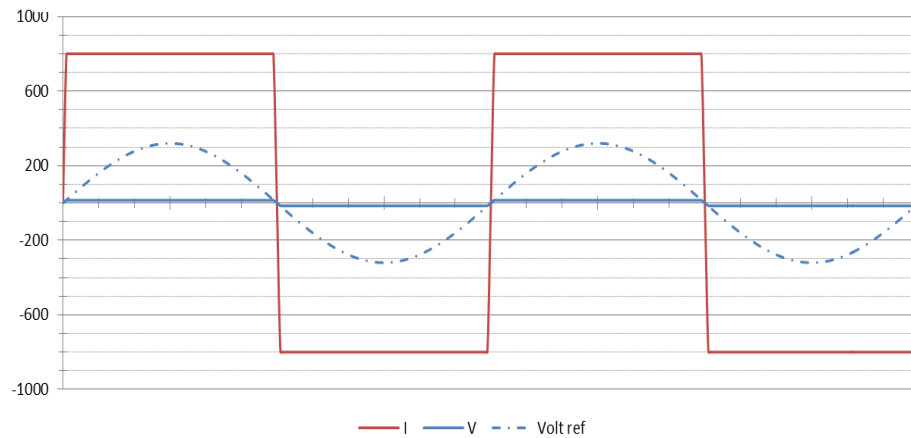
Kun UPS-laite siirtyy staattiselle ohitukselle (liitteen 2 kuva) tai jos se kytketään huolto-ohitukselle (liitteen 3 kuva), virtaa johtava yhteys muodostuu UPS:ia syöttävään verkkoon. [30] Sen takia ohitustilanteet on laskettava oikosulkuvirta laskuissa erikseen, koska niissä UPS:ia syöttävän verkon impedanssit on myös otettava huomioon. UPS syöttöisen 1-vaiheisen lääkintäsuojaerotusmuuntaja-IT-verkon periaatteellinen kytkentä, tilanteessa, kun UPS syöttää kuormia normaalikäytöllä, on esitetty liitteen 1 kuvassa.

Syöttävän verkon nollajohto, ja samalla UPS laitteen jälkeisen verkon käyttömaadoitus, jatkuu UPS laitteen läpi katkeamattomana. Tästä syystä UPS:ia syöttävässä verkossa ei saa käyttää 4-napaisia katkaisijoita. Teollisuudessa käytetään myös UPS-laitteita, joissa on oma lähtömuuntaja. Siinä tapauksessa syöttävän verkon nolla katkeaa UPS-laitteessa, ja lähtömuuntajan jälkeinen verkko vastaa IT-verkkoa. Näissä tapauksissa TN-S-verkko muodostetaan tarvittaessa uudelleen lähtömuuntajan jälkeen. [29]

Oikosulkutilanteessa UPS:in käyttäytyminen riippuu kokonaisvirrasta, eli siitä, mikä on sen syöttämän verkon kuormitusaste ja kuinka suuri on vikavirta, joka syntyy vikakohdassa. Jos vikavirta, joka syntyy vialliseen ryhmään, on pienempi kuin UPS:in virtaraja, josta on vähennetty terveiden piirien kuormitusvirrat, UPS-laite syöttää lisävirtaa, ja pitää lähtöjännitteen vakiona. [29; 30] Tämä oikosulkutilanne on esitetty kuvassa 17. Silloin voi sanoa, että UPS:in kannalta kyse on vain lisäkuormituksesta.



Kuva 17 UPS-laitteen oikosulkuvirta ja -jännite ennen virtarajalle menoa [4].



Kuva 18 UPS-laitteen oikosulkuvirta ja -jännite virtarajalla [4].

Jos oikosulkuvirta + terveiden kuormien virta on niin suuri, että UPS joutuu virtarajalle, kuten kuvassa 18, se syöttää verkkoa virtarajansa vakiovirralla, jolloin jännite alkaa laskea, koska virtarajan virta ei ylitä. Tässä tapauksessa terveet kuormat häiriintyvät, kun jännite alkaa putoamaan. [29;30] Oikosulkutilanteissa, joissa oikosulkuvirta on niin suuri, että UPS joutuu virtarajalle, pitää oikosulkusuojausten toiminta-ajat mitoittaa siten, että oikosulkusuojaus toimii nopeammin kuin 400 ms (0,4 s) Tämä on huomioitava myös nousujohtojen suojauksen mitoituksessa. Jos viallista virtapiiriä ei saada kytkettyä pois tässä ajassa, UPS-laite kytkeytyy irti ja sammuttaa itsensä. Tämän ominaisuuden takia UPS-laitteen jälkeen tulevien jakeluvirtapiirien suojauksen mitoittaminen on joskus haasteellista.

UPS-laitteet ohjelmoidaan usein niin, että oikosulkutilanteessa ne siirtyvät automaattisesti staattiselle ohitukselle, jolloin vikavirtaa on saatavilla enemmän. Tähän ei kuitenkaan voida suunnittelussa turvautua, koska suojauksen on toimittava myös akkukäytöllä. Kun UPS siirtyy staattiselle ohitukselle tai se siirretään huolto-ohitukselle, vikapiiriin tulee lisää impedanssia ohituspiiristä, eli siitä verkosta, joka syöttää UPS-laitetta. Siten suunnittelussa tulee laskea myös tilanne, jossa UPS on ohituskäytöllä, jolloin sieltä kautta tulee impedansseja lisää piiriin. On virheellinen käsitys, että akkupiiri olisi välttämättä ”heikoin lenkki”. [30]

Jos UPS-laitteen lähdössä on lähtömuuntaja, tämän impedanssi tulee myös ottaa mukaan kun vikavirtaa lasketaan [30]. Tässä tapauksessa suurin vikapiiriin kokonaisimpedanssi saadaan nimenomaan ohituskäytöllä, kun lähtömuuntaja on mukana virtapiirissä.

Edellä kerrotusta johtuen kun lasketaan oikosulkuvirtoja UPS verkossa, laitteesta käytetään yhtälössä arvoa 0Ω [30]. Tämä tarkoittaa sitä, että laitteen virtarajan oikosulkuvirta on käytettävissä laskentapisteessä, rajoittuen vain UPS-laitteen ja tarkastelukohdan väliseen vikapiiriin impedanssiin, tai virtapiirissä oleviin oikosulkuvirtaa rajoittaviin sulakkeisiin tai katkaisijoihin. UPS-laitteessa on myös omat sisäiset sulakkeet, jotka määräävät, paljonko oikosulkuvirta voi enintään olla.

Silloin kun UPS toimii ”normaalisti vaihtosuuntaajan syöttämänä”, kuormasta päin katsottuna sen impedanssi on nolla ohmia. UPS saattaa olla kytketty myös staattiselle- tai huolto-ohitukselle, kuten liitteiden 3 ja 4 kuvissa on esitetty, ja suojiin on toimittava myös silloin.

7 Esimerkkitarkastelu

Tarkastellaan virtoja ja kosketusjännitteitä todellisen suunnittelukohteen tiedoilla, jossa G2-luokan tilassa olevia laitteita syötetään lääkintäsuojaerotusmuuntajalla. Laskuissa ovat mukana myös kaapelien reaktanssiarvot havainnollisuuden takia. Esimerkin laskentatilanteessa 3-vaihemuuntaja on yhdistetty kiskosillalla sähköpääkeskukseen, joka syöttää viereisessä laitetilassa paloseinän takana olevaa UPS-laitetta. UPS-laite on UPS-pääkeskuksen vieressä. Laskentaesimerkissä jätetään huomiotta UPS-laitetta edeltävät virtatiet, eikä siinä lasketa tilanteita, joissa UPS on staattisella tai huolto-ohi-

tuksella. UPS:ia syöttävä verkko ja eri ohitustilanteet ovat mukana kuvissa ja selostuksissa sen tähden, että saadaan kokonaiskuva lääkintä IT-muuntajaa syöttävästä verkosta ja sen vikatilanteiden laskennassa huomioitavista asioista.

Havainnekuva laskentatilanteesta on liitteessä 2. UPS-laite syöttää UPS-pääkeskusta AMCMK 4x185/57 -kaapelilla (15m), ja UPS-pääkeskus syöttää FRHF 4x50/25 -kupari-kaapelilla (85 m) UPS-nousukeskusta. Kaapelissa on konsentrinen PE-johdin.

Liitteen 2 havainnekuvasessa ei ole määritetty gG-sulakkeen kokoa kahvasulakkeille, jotka UPS-pääkeskuksesta syöttävät UPS-nousukeskusta. Määritys on jätetty tekemättä tarkoituksella, jotta kaavioon ei tulisi virheellistä tietoa. Näiden sulakkeiden oikean koon määrittäminen on haastavaa, koska niiden pitää olla toisaalta selektiivisiä ja toisaalta niiden on oikosulkutilanteessa toimittava enintään 400 ms:n (0,4 s) ajassa, vaikka ne ovatkin nousujohtoja varten. UPS-laitteen jälkeisissä nousujohdoissa ei voi käyttää poiskytkentäaikaana 5:ttä sekuntia.

UPS nousukeskuksessa on 1x35 A gG-tulppasulakelähtö, joka syöttää FRHF 3x10 -kupari-kaapelilla 5,5 kVA:n lääkintäsuojaerotusmuuntajaa, jonka kaapelipituus on 30 m. Lääkintäsuojaerotusmuuntaja syöttää FRHF 3x10-kaapelilla IT-UPS-ryhmäkeskusta. Lääkintäsuojaerotusmuuntajan jälkeen kaapelipituus on 15 m ryhmäkeskukseen. IT-UPS-ryhmäkeskuksessa ei ole pääsulakkeita.

IT-UPS-ryhmäkeskus syöttää pistorasiaryhmiä, joissa pisimmät kaapelipituudet ovat 22,5 m. Ryhmäkeskuksen pistorasiaryhmä lähdöt on suojattu B16-tyypin johdonsuojakatkaisijoilla ja johdotuksessa on käytetty MMJ-HF 4x2,5 mm² -kaapelia. Kuvitellaan, että kaksoismaasulku tapahtuu vierekkäisissä ryhmissä.

7.1 Kaapelien impedanssit

UPS-laitteen ja UPS-pääkeskuksen välinen kaapeli

AMCMK 4x185/57: Vaihejohdin +20 °C:n lämpötilassa 0,000164 Ω/m ja +70 °C:n lämpötilassa R 0,0001968 Ω/m, ja vaihejohtimen reaktanssi 0,000072 Ω/m.

PE-johtimen resistanssi on +20 °C:n lämpötilassa 0,000387 Ω/m, ja reaktanssi 0,000094 Ω/m. Muutetaan PE-johtimen resistanssi laskentalämpötilaan +70 °C yhtälöstä 7 saatavalla kertoimella (1,2), jolloin $1,2 \cdot 0,000387 \text{ Ω/m}$ on 0,000464 Ω/m.

Kaapelin yhteispituus on 15 m. Resistanssi vaihejohtimella $15 \text{ m} \cdot 0,0001968 \text{ Ω/m}$ on 0,00295 Ω, Reaktanssi $15 \text{ m} \cdot 0,000094 \text{ Ω/m}$ on 0,00014 Ω. Resistanssi PE-johtimella $15 \text{ m} \cdot 0,000464 \text{ Ω/m}$ on 0,00696 Ω, Reaktanssi $15 \text{ m} \cdot 0,000094 \text{ Ω/m}$ on 0,00014 Ω.

50 mm² nousukaapeli: vaihejohdin +20 °C:n lämpötilassa 0,000387 Ω/m ja +70 °C lämpötilassa R on 0,00047 Ω/m.

Nousukaapeli UPS PK - NK:n vaihejohtimen resistanssi $0,00047 \text{ Ω/m} \cdot 85 \text{ m}$ on 0,3995 Ω ja vaihejohtimen reaktanssi $0,000076 \text{ Ω/m} \cdot 85 \text{ m}$ on 0,00646 Ω.

Muutetaan PE-johtimen resistanssi laskentalämpötilaan +70 °C yhtälöllä 7, josta saadaan lämpötilan muutoskerroin resistanssille.

$$\frac{[1 + 0,004 (70^\circ\text{C} - 20^\circ\text{C})]}{[1 + 0,004 (20 - 20^\circ\text{C})]} = \frac{[1 + 0,004 \cdot 50^\circ\text{C}]}{[1 + 0,004 \cdot 0^\circ\text{C}]} = 1,2. \quad (7)$$

Muuntajaa syöttävä 10 mm²:n kaapeli: PE-johdin +20 °C:n lämpötilassa 0,00183 Ω/m. Vaihejohtimen reaktanssi 0,000076 Ω/m, 25 mm² PE-johtimen tasavirtaresistanssi on +20 °C:n lämpötilassa 0,00183 Ω/m. Konsentrisen PE johtimen reaktanssi jätetään huomiotta.

PE-johtimen resistanssi $1,2 \cdot 0,00183 \text{ Ω/m}$ on 0,002196 Ω/m ja nousukaapelin PE johtimen resistanssi on $85 \text{ m} \cdot 0,002196 \text{ Ω/m}$ on 0,18666 Ω.

Lääkintäsuojaerotusmuuntajan ja IT-keskuksen syöttökaapeli FRHF 3x10 mm²: Vaihejohtimen +20 °C:n lämpötilassa sen resistanssi on 0,00183 Ω/m ja +70 °C:n lämpötilassa resistanssi on 0,00219 Ω/m. Vaihejohtimen reaktanssi on 0,000091 Ω/m. PE-johtimen resistanssit ja reaktanssit oletetaan yhtä suuriksi kuin vaihejohtimilla.

Kaapelin yhteispituus on 45 m. Resistanssi $45 \text{ m} \cdot 0,00219 \text{ Ω/m}$ on 0,09855 Ω, Reaktanssi $45 \text{ m} \cdot 0,0000910 \text{ Ω/m}$ on 0,004049 Ω.

Ryhmäjohdon $2,5\text{mm}^2$ kaapeli: Vaihejohtimen resistanssi $+20\text{ }^\circ\text{C}$:n lämpötilassa on $0,00741\ \Omega/\text{m}$ ja $+70\text{ }^\circ\text{C}$:n lämpötilassa se on $0,00887\ \Omega/\text{m}$. Reaktanssi on $0,000105\ \Omega/\text{m}$.

Ryhmäjohdolla kaksoismaasulun tapauksessa kaapelipituus tuplaantuu, joten kaapelin yhteispituus on 45 m . Ryhmäjohdon vikavirtapiirin pituus 2. vian tapauksessa on $2 \times$ vaihejohdin $+ 2 \times$ PE-johdin eli yhteensä 90 m . Resistanssiksi saadaan $90\text{ m} \cdot 0,00887\ \Omega/\text{m}$, joka on $0,7983\ \Omega$ sekä reaktanssiksi tulee $90\text{ m} \cdot 0,000105\ \Omega/\text{m}$, joka on $0,00945\ \Omega$.

7.2 Muuntaja

Kohteessa on käytetty $5\ 500\ \text{VA}$:n lääkintäsuojaerotusmuuntajaa, jonka kilpiarvot ovat tyhjäkäyntihäviöteho $37\ \text{W}$, kuormitushäviöteho nimellisvirralla $209\ \text{W}$, muuntajan suhteellinen oikosulkujännite $2,71\ \%$. Koska muuntaja on ensiön puolelta kytketty yhteen vaiheeseen, toision pääjännite on $230\ \text{V}$.

Muuntajan nimellisvirta I_n saadaan 1-vaihemuuntajalla IEC 60909-0 mukaisesti laskettua yhtälöllä 8.

$$I_n = \frac{S_n}{U_n} \quad (8)$$

Muuntajan oikosulkuarvot saadaan laskettua seuraavassa esitettävillä kaavoilla. CENELEC:in teknisen raportin mukaan nämä laskentayhtälöt soveltuvat myös muuntajille, joita käytetään muuttamaan järjestelmän maadoitustapaa, kuten IT-muuntajat. [19, s.460]

Yhtälössä termit ovat [9, s.98].

U_n on muuntajan nimellispääjännite

I_n on muuntajan nimellisvirta

S_n on muuntajan nimellinäennäisteho (VA)

Z_k on muuntajan oikosulkuimpedanssi

R_k on muuntajan oikosulkuresistanssi

X_k on muuntajan oikosulkureaktanssi

P_{kn} on muuntajan kokonaispätötehohäviöt nimellisvirralla

u_k on muuntajan oikosulkujännite prosentteina ($= Z_k$)

u_r on muuntajan resistanssin aiheuttama oikosulkujännite prosentteina ($= R_k$)

Muuntajan nimellisvirta I_n saadaan yhtälöstä 8:

$$I_n = \frac{S_n}{U_n} \text{ on } \frac{5500 \text{ VA}}{230 \text{ V}} = 23,9 \text{ A} \quad (8)$$

Muuntajan oikosulku impedanssi Z_k saadaan yhtälöstä 9:

$$Z_k = \frac{u_k}{100} * \frac{U_n^2}{S_n} \text{ eli } Z_k = \frac{2,71 \%}{100 \%} * \frac{230\text{V}^2}{5500\text{VA}} = 0,2606 \Omega \quad (9)$$

Muuntajan oikosulku resistanssi R_k saadaan yhtälöstä 10:

$$R_k = \frac{U_r}{100} * \frac{U_n^2}{S_n} = \frac{P_{kn}}{3 * I_n^2} = \frac{209 \text{ W}}{3 * 23,9 \text{ A}^2} = 0,1219 \Omega \quad (10)$$

Muuntajan oikosulku reaktanssi X_k saadaan yhtälöstä 11:

$$X_k = \sqrt{Z_k^2 - R_k^2} = \sqrt{0,2606^2 - 0,1219^2} = 0,230 \Omega \quad (11)$$

Asennusta syötetään nimellisteholtaan 150 kW:n UPS-laitteella, jonka nimellinen lähtövirta on 218 A ja oikosulkuvirta laitteen liitinnavoissa on 510 A / 400 ms. Mainittu 510 A on kyseisen laitteen virtaraja jonka UPS syöttää liittimiinsä 400 ms:n ajan, minkä jälkeen se normaalisti ohjelmoituna sammuttaa itsensä.

Sulaketaulukosta näemme, että UPS nousukeskuksella lääkintäsuojaerotusmuuntajaa syöttävä 35 A gG-sulake ei rajoita oikosulkuvirtaa tällä oikosulkuvirtatasolla, joka UPS-laitteen on mahdollista syöttää.

Esimerkkilaskussa on mukana myös UPS, Ω arvoilla 0_{R-UPS} ja 0_{X-UPS} vain havainnollisuuden vuoksi. Laskettaessa oikosulkuvirtaa, muutetaan lääkintäsuojaerotusmuuntajaa syöttävän UPS-laitteen jälkeinen verkko impedanssiksi.

IT UPS-keskusta syöttävän verkon, jossa on mukana lääkintäsuojaerotusmuuntaja, oikosulkuimpedanssi Z lasketaan yhtälöllä 12, jonka summalauseke on tilanpuutteen vuoksi kahdessa rivissä.

$$Z = \sqrt{\begin{array}{l} 0_{R-UPS}^2 + 0,00295_{R_{nj1}}^2 + 0,00014_{R_{PEnj1}}^2 + 0,3995_{R_{nj}}^2 + 0,18666_{R_{PEnj}}^2 + 0,09855_{R_{sj}}^2 + 0,09855_{R_{PEsj}}^2 + 0,1219_{R-IT}^2 \\ + 0_{X-UPS}^2 + 0,00696_{X_{nj1}}^2 + 0,00014_{X_{sj}}^2 + 0,00646_{X_{nj}}^2 + 0,004049_{X_{sj}}^2 + 0,230_{X-IT}^2 \end{array}} \quad (12)$$

Z on 0,53079 Ω, jolloin oikosulkuvirta IT keskuksen syöttöliittimissä on yhtälöllä 13

$$\frac{0,95 \cdot 230 \text{ V}}{0,53079 \Omega} = 411,65 \text{ A} \quad (13)$$

Ryhmäjohdon vikavirtapiirin pituus 2. vian tapauksessa on 2 x vaihejohto + 2 x PE-johto eli yhteensä 90 m. Resistanssi on 90 m * 0,00887 Ω/m = 0,7983 Ω sekä reaktanssi on 90 m * 0,000105 Ω/m = 0,00945 Ω. Lasketaan vikavirtapiirin oikosulkuvirta yhtälöllä 14, jonka summalauske on tilanpuutteen vuoksi kahdessa rivissä.

$$Z = \sqrt{\frac{0_{R-UPS}^2 + 0,00295_{Rnj1}^2 + 0,00014_{RPEnj1}^2 + 0,3995_{Rnj}^2 + 0,18666_{RPEnj}^2 + 0,09855_{Rsj}^2 + 0,09855_{RPEsj}^2 + 0,7982_{Rrj}^2}{+0,1219_{R-IT}^2 + 0_{X-UPS}^2 + 0,00696_{Xnj1}^2 + 0,00014_{Xsj}^2 + 0,00646_{Xnj}^2 + 0,004049_{Xsj}^2 + 0,00945_{Xrj}^2 + 0,230_{X-IT}^2}} \quad (14)$$

Z = 0,9587 Ω, jolloin oikosulkuvirta vikavirtapiirissä yhtälöllä 15 on

$$\frac{0,95 \cdot 230 \text{ V}}{0,9587 \Omega} = 227,9 \text{ A} \quad (15)$$

B16-tyypin johdonsuojakatkaisijan vaatima ylempi toimintaraja-virta, jotta syötön automaattisen poiskytkennän laukaisuehto toteutuu on 5 x I_n eli 5*16 A, virta on 80 A. Tällä virralla magneettinen pikalaukaisu toteutuu < 0,1 s. Kun tähän lisätään vielä aiemmin mainittu +25 % varmuusvara, eli ”vaadittu mitattu arvo”, virraksi saadaan 100 A (1,25*80 A), joten suojaus toimii.

Lasketaan yhtälöllä 16, toimiiko suojaus ryhmäjohdon pituudella 50 m. Myös yhtälössä 16 summalauske on tilanpuutteen vuoksi kahdessa rivissä. Ryhmäjohdon vikavirtapiirin pituus 2. vian tapauksessa on 2 x vaihejohto + 2 x PE johto eli yhteensä 200 m, joten resistanssi 200 m * 0,00887 Ω/m on 1,774 Ω sekä reaktanssi 200 m * 0,000105 Ω/m on 0,021 Ω

$$Z = \sqrt{\frac{0_{R-UPS}^2 + 0,00295_{Rnj1}^2 + 0,00014_{RPEnj1}^2 + 0,3995_{Rnj}^2 + 0,18666_{RPEnj}^2 + 0,09855_{Rsj}^2 + 0,09855_{RPEsj}^2 + 1,774_{Rrj}^2}{+0,1219_{R-IT}^2 + 0_{X-UPS}^2 + 0,00696_{Xnj1}^2 + 0,00014_{Xsj}^2 + 0,00646_{Xnj}^2 + 0,004049_{Xsj}^2 + 0,021_{Xrj}^2 + 0,230_{X-IT}^2}} \quad (16)$$

jossa Z on 1,851 Ω. Oikosulkuvirta vikavirtapiirissä lasketaan yhtälöllä 17.

$$\frac{0,95 \cdot 230 \text{ V}}{1,851 \Omega} = 117,99 \text{ A, eli } 118 \text{ A.} \quad (17)$$

Oikosulkuvirta vikavirtapiirissä on tässä tapauksessa 118 A, ja kun käytetään B16-johdonsuojakatkaisijoita, olisi mahdollista kasvattaa ryhmäjohdon kaapelipituutta aina 50 m asti.

Asennuksen poiskytkentäehto toimisi 22,5 metrin kaapelipituudella myös silloin, jos suojalaitteena olisi C16-käyrän johdonsuojakatkaisija. Sen ylempi toimintaraja-virta on $10 \times I_n$ eli 10×16 on 160 A. Varmuusvara huomioon otuna $1,25 \times 160$ on 200 A. Tässä vaihtoehdossa jos käytetään C16- käyrän johdonsuojakatkaisijoita, ryhmäjohdon kaapelipituutta ei juurikaan voisi enää kasvattaa, kun jokainen yhden virtapiirin kaapelipituuden lisämetri pitää ajatella 2 metrin johdinpituutena.

7.3 Kosketusjännitteen laskuesimerkki

Aiemmin on todettu laskelmissa, että esimerkkikohteen kosketusjännitesuojaus on kunnossa, koska syötön automaattisen poiskytkennän ehdot toteutuvat. Samoin on käsitelty kosketusjännitteen suuruutta 1. vian aikana. Tarkastellaan seuraavassa kosketusjännitteen muodostumista ja sen laskemista esimerkkikuvien avulla 2. vian aikana, joka IT-verkossakin on vaarallinen.

2. vian aikana IT-verkko on käyttömaadoitettu vikakohtaan kautta, kuten jo aiemmin on todettu. Jos laitteita ei ole liitetty potentiaalintasaukseen, lasketaan kosketusjännite yhtälöllä 18 kuten TN-verkossa. Yhtälön termit ovat

U_t on kosketusjännite

U_0 on vaihejännite

c on sovittu kerroin, joka ottaa huomioon vikavirtapiirin jännitelähteen impedanssin osuuden kokonaisimpedanssista. Kertoimella c kompensoidaan myös verkon tavanomaisia vaihteluita ja vikakohtaan ylimenovastusta (esimerkiksi valokaaren vaikutuksesta). [30]

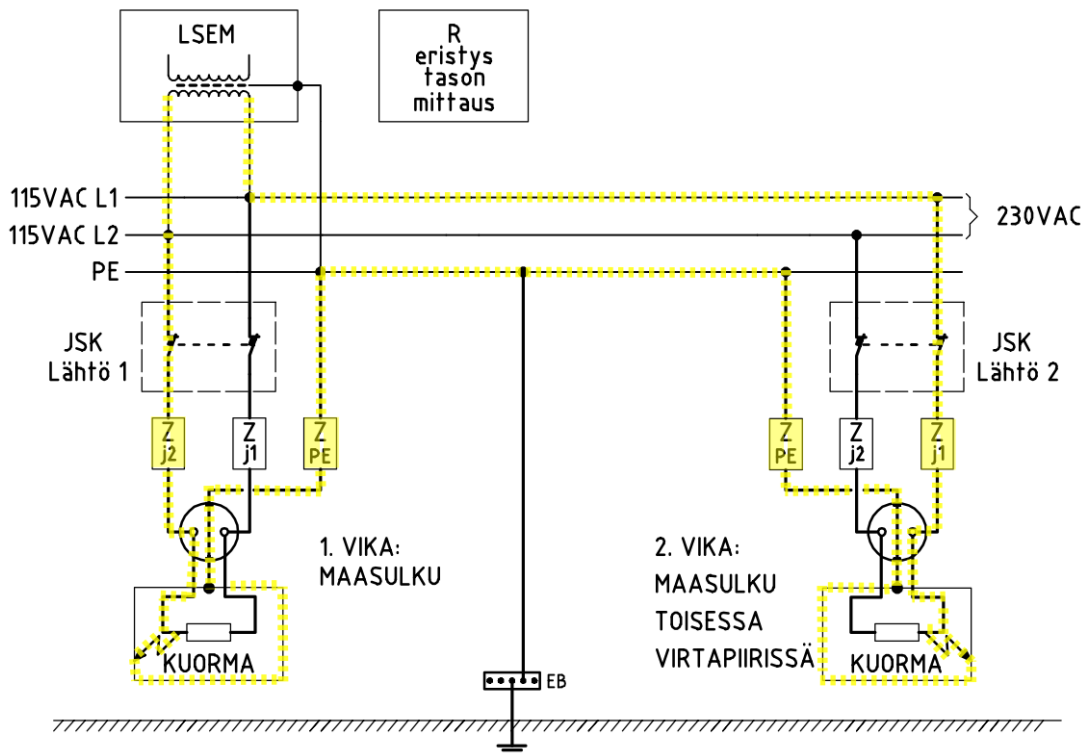
Kerroin on 0,6–1, jolloin se on 1, kun virtapiiri syötetään suoraan jännitelähteestä, ja 0,6 kun virtapiiri on hyvin kaukana jännitelähteestä. Termi m on tarkasteltavan piirin vaihejohtimen ja suojajohtimen resistanssien suhde (jos samaa materiaalia, niin poikkipinta-alojen suhde).

$$U_t = c \cdot U_0 \cdot \frac{m}{(1+m)} \quad (18)$$

Kosketusjännite 2. vian tapauksessa lasketaan yhtälöllä 19, esimerkkitapauksessa c on 1, koska LSEM-muuntaja on lähellä laskettavaa piiriä. Yhtälössä 20 arvot on sijoitettu yhtälöön 19, ja kosketusjännitteeksi tulee silloin 57,5 V. Tulos tarkoittaa, että asennuksessa on käytettävä lisäpotentiaalintasausta. Laskettava tilanne on esitetty kuvassa 19, joka on jo esiintynyt aiemmin tekstissä kuva numerolla 10.

$$U_t = c \cdot \frac{U_0}{2} \quad (19)$$

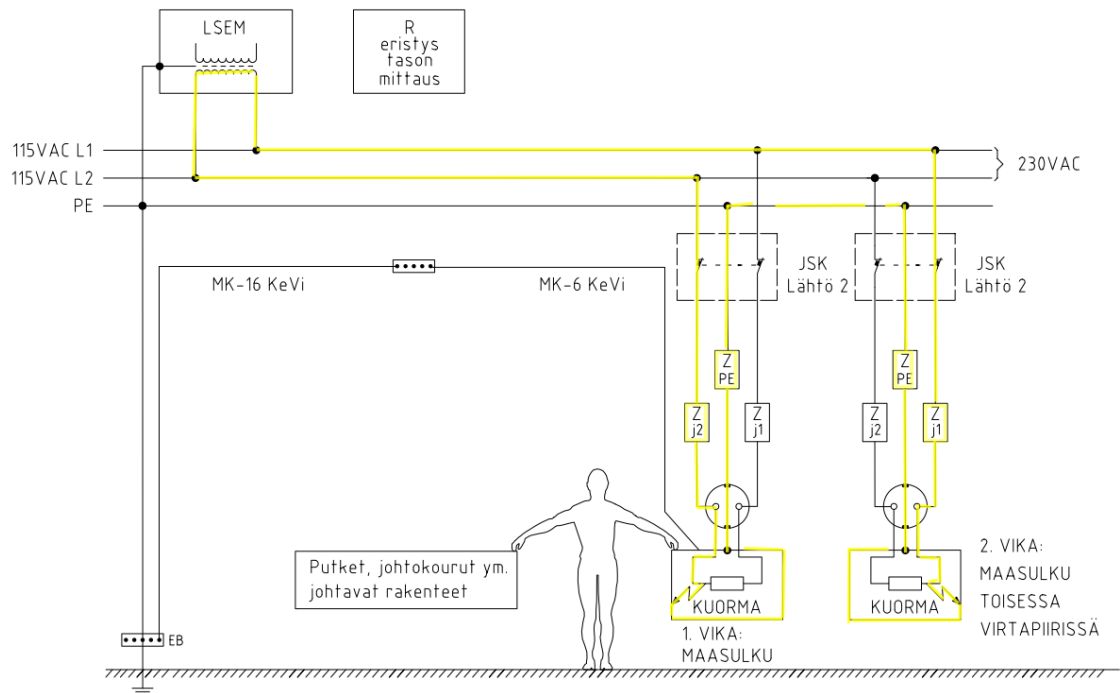
$$U_t = 1 \cdot \frac{115 \text{ V}}{2} = 57,5 \text{ V} \quad (20)$$



Kuva 19 IT-verkon kaksoismaasulku eri virtapiireissä, ilman potentiaalintasauksia.

Vertailun vuoksi voi laskea saman kosketusjännitteen lisäpotentiaalintasauksen kanssa. Laskelma on vain esimerkinomainen ja tarkoittaisi tilannetta, jolloin tilassa ei ole muita potentiaalintasaukseen kytkettyjä pisteitä, ja näinhän ei asia ole käytännössä milloinkaan. Tämä kuvitteellinen tilanne on esitetty kuvassa 20. Laskelma ei myöskään ole

tarkka, vaan suuntaa-antava, koska johtimen reaktanssi kasvaa, kun johtimien etäisyys toisistaan lisääntyy.



Kuva 20 Lisäpotentiaalintasaus lääkitä-IT-verkon 2. vian vikatilanteessa.

Oletetaan, että G2-tilan esimerkiasennuksessa, jota lasketaan, ryhmien kaapelit kulkevat ryhmäkeskukselta hyllyä pitkin lähelle alumiinista johtokourua, jossa ne menevät pistorasioille. Ryhmäkeskuksen luona on potentiaalintasauskisko EB, josta lähtee 16 mm^2 :n MK-kevi-kaapeli keskuksen PE-kiskoon. EB:stä lähtee myös 16 mm^2 :n MK-kevi kaapeli samaa johtoreittiä pitkin ryhmäjohtojen kanssa, ja päättyy potentiaalintasauskiskoon SEB. Potentiaalintasaukseen liitettävät kohteet on kytketty SEB-kiskoon 6 mm^2 MK-kevi johtimilla.

Oletetaan että SEB:n sijainti on keskellä huonetta, puolessa välissä potentiaalintasauksen liitettyjen kohteiden välistä etäisyyttä, joten SEB:stä lähtevät johtimet ovat suunnilleen yhtä pitkiä.

Lasketaan ensin yhtälön 21 muuttuja m, joka on tarkasteltavan piirin suojajohtimen ja vaihejohtimen resistanssien ja poikkipinta-alojen suhde, koska ne ovat samaa materiaalia.

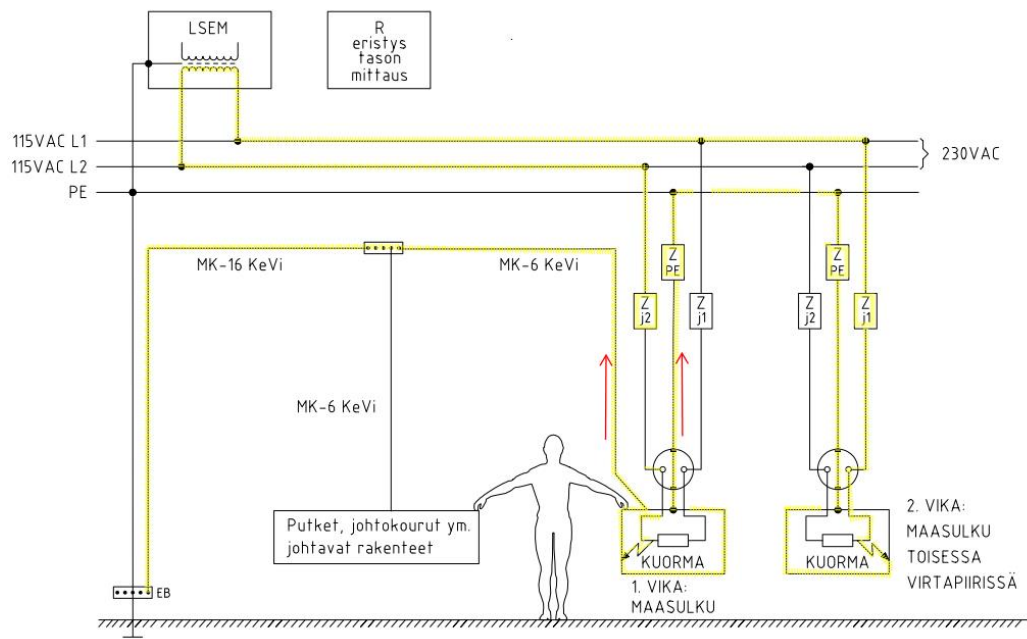
$$U_t = c \cdot U_0 \cdot \frac{m}{(1+m)} \quad (21)$$

Vaihejohdin on $2,5 \text{ mm}^2$. Suojajohtimen poikkipinta-ala, joka on käytävissä vikavirran johtamiseen on $2,5 \text{ mm}^2 +$ puolet matkasta 16 mm^2 :n kaapelilla ($0,5 \cdot 16 \text{ mm}^2$) ja puolet matkasta 6 mm^2 :n kaapelilla ($0,5 \cdot 6 \text{ mm}^2$).

$2,5 \text{ mm}^2 + (0,5 \cdot 16 \text{ mm}^2 + 0,5 \cdot 6 \text{ mm}^2)$ on $13,5$. Resistanssisuhde m on $\frac{2,5 \text{ mm}^2}{13,5 \text{ mm}^2}$ josta tulee $0,185$. Kosketusjännitteeksi yhtälöstä 22 saadaan $17,95 \text{ V}$.

$$U_t = 1 \cdot 115 \cdot \frac{0,185}{(1+0,185)} = 17,95 \text{ V} \quad (22)$$

G2- ja G1-tilassa käytännössä kaikki ne pisteet, joiden välille voi vikatilanteessa syntyä potentiaaliero, on kytketty potentiaalintasaukseen. Tämä tarkoittaa sitä, että ne on kytketty min. 6 mm^2 :n kuparijohtimella tilassa keskeisellä paikalla olevaan SEB:iin, ja joka sitten on kytketty aiemmin selostetulla tavalla muuhun potentiaalintasausverkkoon.



Kuva 21 Vikavirran jakautuminen PE-johtimen ja potentiaalintasausjohtimen välillä IT-verkon toisen vian tapauksessa.

Todellisessa vikatilanteessa vikavirta jakautuu suojajohtimen ja potentiaalintasausjohtimen johdanimpedanssien suhteessa (kuva 21).

Kosketusjännite pitää laskea siten, että lasketaan ensin se osa vikavirrasta, joka jakautuu potentiaalintasausjohtimeen. Kosketusjännite on sitten se jännitehäviö, joka esiintyy vikaantuneen laitteen ja SEB-kiskon välisessä potentiaalintasausjohtimessa sen resistanssin vaikutuksesta. Vikavirta tietysti jatkaa kulkuaan SEB-kiskosta eteenpäin, mutta referenssipisteet, joiden välille vikakohtasta voisi muodostua kosketusjännite, ovat samassa potentiaalissa kuin SEB, joten laskennassa huomioidaan vain potentiaalintasausjohdinpituudet referenssipisteen ja SEB:in välillä. Jos mainitun tilanteen, joka on kuvassa 21, kosketusjännitettä lasketaan, aiemman laskuesimerkin tapauksessa laskenta menee seuraavasti:

Vikavirran jakautuminen saadaan suoraan resistanssisuhteesta välillä vikakohta – EB, joten sen laskenta on kuin edellisessä esimerkissä. Suojajohdin on $2,5 \text{ mm}^2$. Potentiaalintasaus johtimen pinta-ala, joka on käytettävissä vikavirran johtamiseen on puolet matkasta 16 mm^2 :n kaapelilla ($0,5 \cdot 16 \text{ mm}^2$) ja puolet matkasta 6 mm^2 :n kaapelilla ($0,5 \cdot 6 \text{ mm}^2$).

$(0,5 \cdot 16 \text{ mm}^2 + 0,5 \cdot 6 \text{ mm}^2)$ on 12 mm^2 . Resistanssisuhde m on $\frac{2,5 \text{ mm}^2}{12 \text{ mm}^2}$ josta tulee 0,20.

Tulos tarkoittaa sitä, että vikavirrasta 20 % jakautuu ryhmäjohtodon suojamaadoitusjohtimeen ja 80 % jakautuu potentiaalintasausjohtimeen.

Potentiaalintasausjohtimen impedanssi $+20 \text{ }^\circ\text{C}$:n lämpötilassa on $0,0030814 \text{ } \Omega/\text{m}$ (yhtälö 23)

$$z = \sqrt{0,00308R^2 + 0,000094x^2} = 0,0030814 \text{ } \Omega/\text{m} \quad (23)$$

Oletetaan, että vikakohtan ja SEB kiskon välinen johdinpituus on 15 m. Kosketusjännitteeksi vikavirralla 228 A saadaan (yhtälöllä 24) 8,43 V, joka on 33,7 % sallitusta 25 V kosketusjännitteestä.

$$80 \% \cdot 228 \text{ A} \cdot 15 \text{ m} \cdot 0,0030814 \text{ } \Omega/\text{m} = 8,43 \text{ V} \quad (24)$$

Kosketusjännitteen suuruuteen vaikuttaa tietysti myös se, kuinka lähellä virtapiirin oikosulkuvirta on suojalaitteen pienintä toimintarajavirtaa. Esimerkiksi jos vaadittava oikosulkuvirta on 25 % lämpenemisvara mukaan lukien esim. 100 A (B16) ja todellinen oikosulkuvirta on vaikka 120 A, niin kosketusjännite on 4,43 V yhtälön 25 mukaisesti.

$$80 \% \cdot 120 \text{ A} \cdot 15 \text{ m} \cdot 0,0030814 \text{ } \Omega/\text{m} = 4,43 \text{ V} \quad (25)$$

Periaatteessa kun vikaantunut laite on samassa potentiaalissa kuin sen läheisyydessä sijaitseva johtava osa, ei näiden välille voi syntyä kosketusjännitettä, eli potentiaaliero. Kuitenkin edellä esitetty laskuesimerkki havainnollistaa, kuinka suuri merkitys potentiaalintasauksella on.

8 Yhteenveto

Tässä insinööriyössä on käsitelty lääkintätilojen IT-verkkojen vikatilanteita, vaadittavia oikosulkuvirtoja sekä vikatilanteiden aikaisia kosketusjännitteitä. Kosketusjännitesuojauksessa käytetyin menetelmä on syötön automaattinen poiskytkentä.

Jotta ryhmien oikosulku-, ja vikasuojaus toimii määräysten vaatimassa poiskytkentäajassa, täytyy lääkintäsuojaerotusmuuntajan jälkeen olevissa virtapiireissä olla puolta pienempi impedanssi verrattuna TN-S-verkon ryhmiin. Tämä johtuu siitä, että IT-verkon kaksoisviassa on kaksi vikaa sarjaan kytkettynä, jolloin johdinpituudet voivat kaksinkertaistua. Vikapiirin impedanssissa on mukana myös kaksi vikakohdan ylimenovastusta.

Edellä mainittu vaatimus puolta pienemmästä impedanssista vikapiirissä perustuu SFS 6 000:n kohdan 411.6.4 kansalliseen lisävaatimukseen automaattisesta poiskytkennästä 2. vian tapauksessa. Kuitenkin mainittu lisävaatimus 2. vian tapauksesta ja sen poiskytkennästä on määräys, jota ei yleensä esiinny kansainvälisissä standardeissa. Sen esiintymisen todennäköisyyttä pidetään niin pienenä, että se riski voidaan ottaa.

IT-verkoissa johtopituudet ovat pääsääntöisesti lyhyitä alle 25 m:n pituisia SFS 6000;710.512.101:n suosituksen mukaan. Tämän takia johdinimpedanssit ovat pieniä, ja siten oikosulkuvirtojen riittävyys ei ole ongelma myöskään UPS-verkoissa; sairaaloiden UPS-laitteet ovat kuormitusvirtaansa nähden tehokkaita. Varsinkin kun käytetään B-tyypin laukaisukäyrällä olevia johdonsuojakatkaisijoita, ei G2-tilojen johdinimpedansseissa tule ongelmia, kun suunnittelussa toimitaan määräysten ja suositusten mukaan.

Potentiaalintasaus on G1-tiloissa välttämättömyys, ja se on välttämättömyys myös G2-tiloissa vaikka siellä käytetään lääkintäsuojaerotusmuuntajia sähköjakeluun. Potentiaalintasauksella varmistetaan potilasturvallisuus sekä jakeluverkon että laitteiden vikatilanteissa, ja myös lääkintä-IT-verkon toisen vian tapauksessa.

Lähteet ja viittaukset

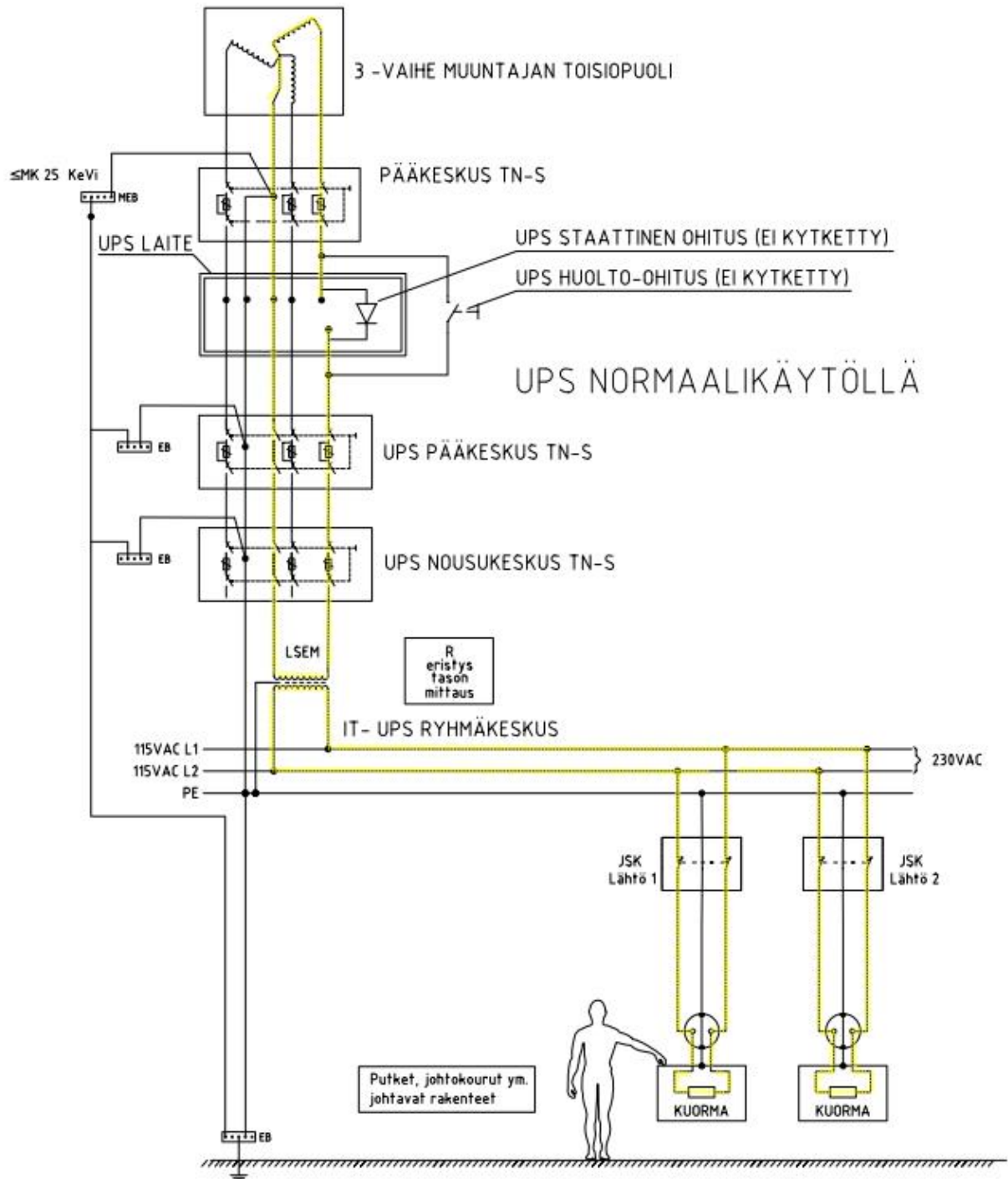
- 1 ABB:n TTT-käsikirja 2000-07. Teknisiä tietoja ja taulukoita. PDF-tiedosto, Suomalaiset ABB-yhtiöt.
- 2 Cahier no. 178, The IT earthing system (unearthed neutral) in LV .1999. Verkkoaineisto. Schneider Electric. <https://www.schneider-electric.com/en/download/document/ECT178/>. Luettu 3.2.2018.
- 3 D1 2012, Käsikirja rakennusten sähköasennuksista. 2012. Espoo. Sähköinfo Oy.
- 4 UPS energiatehokkuus ja oikosulkuvirran syöttö. Verkkoaineisto. Eaton Oy. Luettu 20.2.2018. <http://ssty.fi/sahkojaos/Eaton-UPS-energiatehokkuus-ja-oikosulkuvirta.pptx>.
- 5 Hanssen, Terje, Visnes, Gunnar. 2016. Kortslutningsberegninger. Oslo: Elforlaget NELFO.
- 6 Hofheinz, Wolfgang. 2015. Fault Current Monitoring in Electrical Installations. 3rd Edition. Berlin: VDE VERLAG GMBH.
- 7 Hofheinz, Wolfgang. 2015. Protective Measures with Insulation Monitoring. 3rd Edition. Berlin: VDE VERLAG GMBH.
- 8 Hofheinz, Wolfgang. 2017 "Mögliche Berührungsspannung in medizinisch genutzten Bereichen, etz – elektrotechnik & automation", S5/2007. VDE Verlag Berlin/Offenbach, www.etz.de (see attachment), revised and translated by Harald Sellner, Holger Potdevin, Monika Patterson, Bender GmbH & Co. KG, Gruenberg, Germany.
- 9 Hietalahti, Lauri. 2013. Sähkövoimatekniikan perusteet. Vantaa: Hansaprint Oy.
- 10 IEC 61558-2-5, International Standard. Particular requirements and tests for isolating transformers for the supply of medical locations. Edition 2.0. 2010. Helsinki. Suomen Standardoimisliitto SFS ry.
- 11 Isolating transformer ES710, Verkkoaineisto. Bender GmbH & Co. KG. Luettu 18.3.2018. http://www.bender.ro/fisa_tehnica/ES710_D00109_D_XXEN.pdf
- 12 IMED Secure Brochure Finnish. Verkkoaineisto. Noratel Finland Oy. Luettu 18.3.2018. http://www.noratel.com/fileadmin/content/downloads/medico/no/IMEDsecure_fi.pdf.
- 13 Application guide. Miniature circuit breaker. 888-385-1221. Verkkoaineisto. ABB inc. Luettu 2.2.2018. <https://library.e.abb.com/public/Applicationguide/miniaturecircuitbreakers.pdf>.

- 14 Orrberg, Matti. 2017. ST kortti 52.25, Ohjeita vikasuojauksesta enintään 1000 V:n TN-järjestelmässä. Sähköinfo Oy.
- 15 Paavola, Martti, Lehtinen, Pekka. 1989. Sähkötekniikan oppikirja. Porvoo: WSOY.
- 16 SFS-EN 60909-0:2016. Short-circuit currents in three-phase a.c. systems. Part 0: Calculation of currents (IEC 60909-0:2016) Helsinki. Suomen Standardoimisliitto SFS ry.
- 17 SFS-EN 6000-7-710:2017. Pienjännitesähköasennukset. Osa 7-710: Erikoistilojen ja -asennusten vaatimukset. Lääkintätilat. Helsinki. Suomen Standardoimisliitto SFS ry.
- 18 SFS-Käsikirja 600-1 Pienjännitesähköasennukset. 2012. Helsinki. Suomen Standardoimisliitto SFS ry.
- 19 SFS-Käsikirja 600-2 Sähköasennukset. Osa 2: Säädökset, sähkötyöturvallisuus, erityisasennukset ja liittyvät standardit. 2012. Helsinki. Suomen Standardoimisliitto SFS ry.
- 20 SFS-Käsikirja 640 Sähkökeskukset. 2013. Helsinki. Suomen Standardoimisliitto SFS ry.
- 21 Miniature Circuit Breakers, Configuration manual. 2010. Verkkoaineisto. Siemens AG. Luettu 2.2.2018. <http://www.siemens.fi/pool/products/industry/johdon-suojat.pdf>.
- 22 Stephens, Mark. Power Quality Standards: CBEMA, ITIC, SEMI F47, IEC 61000-4-11/34. 2009. Verkkoaineisto. Electric Power Research Institute. Luettu 12.2.2018. <https://www.sceg.com/docs/librariesprovider5/pdfs/powerqualitystandards.pdf>.
- 23 Sundberg, Olavi. 2013. Syötön automaattinen poiskytkentä. Verkkoaineisto. Ols-Consult Oy artikkelit. Luettu 10.2.2018. <http://ols-consult.fi/artikkelit.html>.
- 24 Viilo, Torsti. 2010. Rakennuksen sähköverkon oikosulkuvirtojen laskeminen. Lehtiartikkeli, Sähkö & Tele nro 5/2010.

Haastattelut

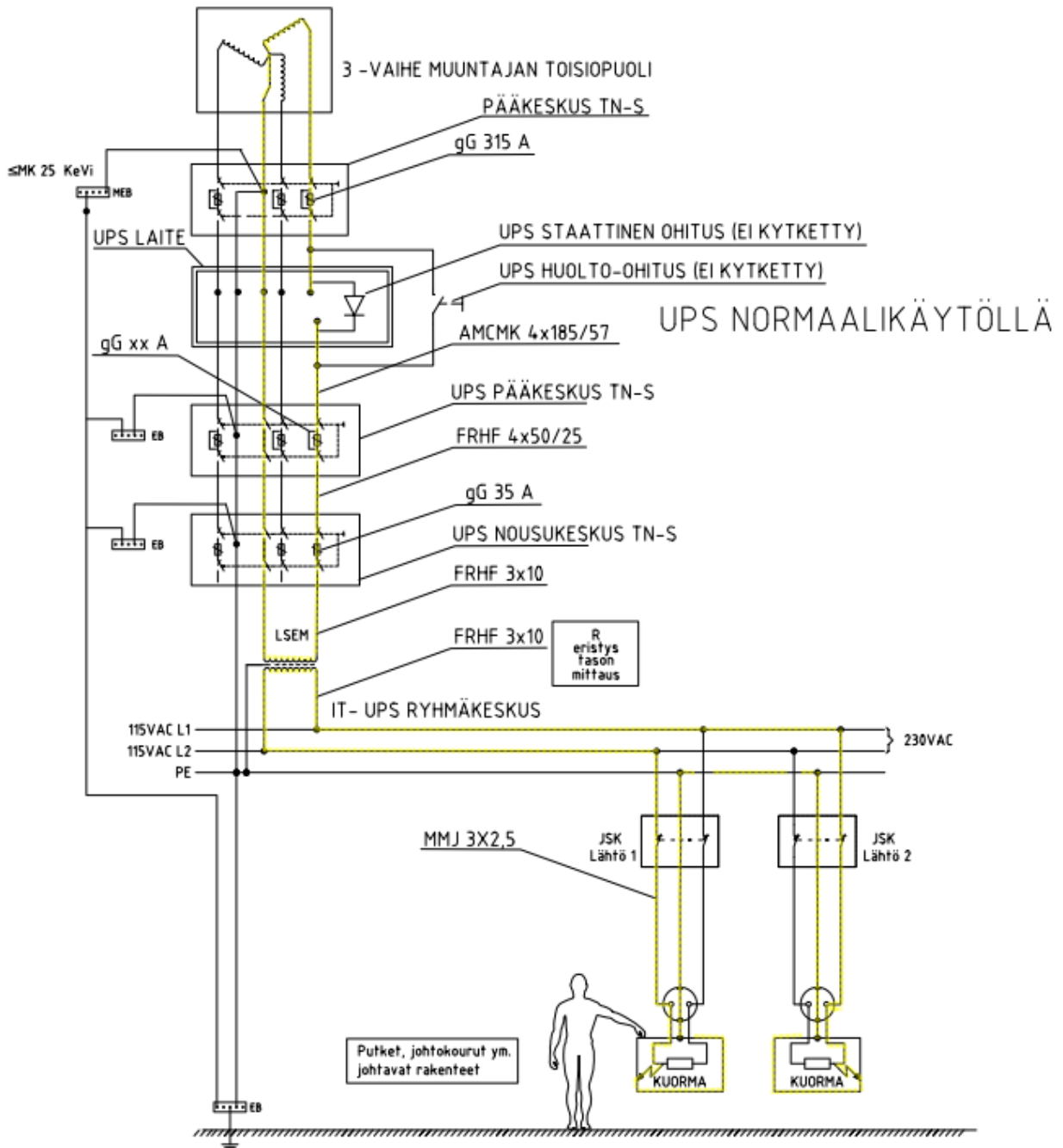
- 25 Koskinen, Jyri. 2018. Asiantuntija Reka Kaapeli Oy. Puhelinkeskustelu 20.3.2018.
- 26 Neumann, Heikki. 2018. Toimitusjohtaja. Agentuuri Neumann Oy. Haastattelu 15.3.2018.
- 27 Nurmi, Tapani. 2018. Tekninen johtaja, SESKO. Puhelinkeskustelu. 7.2.2018.
- 28 Orrberg, Matti. 2018. Sähköinfo Oy, Tekninen asiantuntija. Haastattelu 19.3.2018.
- 29 Paakkunainen, Teemu. 2018. Asiantuntija Eaton Oy, Haastattelut 19.3.2018 ja 23.4.2018.
- 30 Sundberg, Olavi. 2018. Ols Consult Oy, puhelinkeskustelut ja sähköpostiviestit 23.2 ja 5.3.2018.
- 31 Tiainen, Esa. 2018. Sähköinfo Oy, sähkötekniikkapuolen johtaja. Puhelinkeskustelu 1.3.2018.
- 32 Ärling, Timo. 2018. Myynti-insinööri, Noratel Oy. Haastattelu. 26.1.2018.

Liite 1. IT-verkko kun UPS on normaalikäytöllä



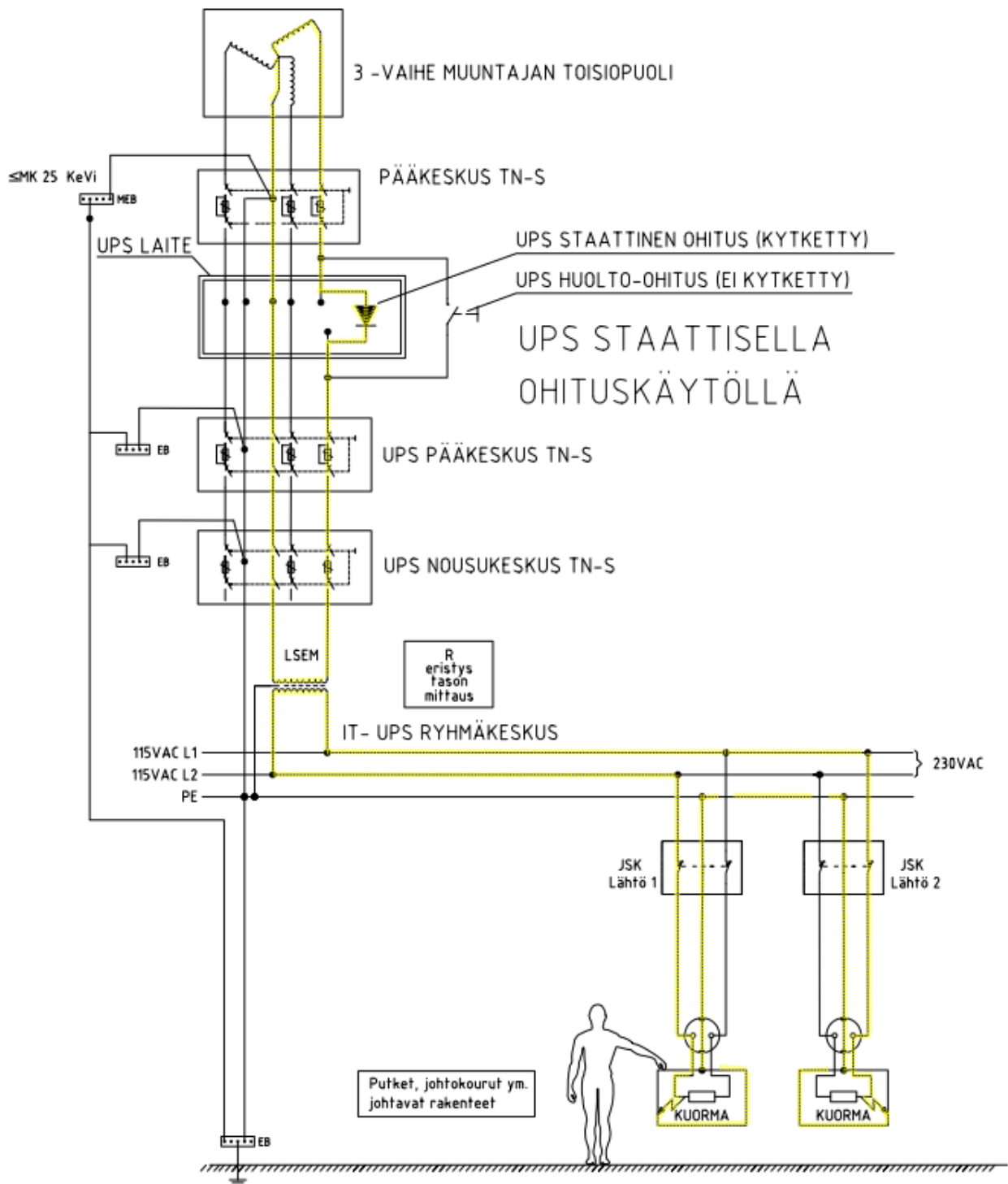
UPS syöttöinen lääkitä IT -verkko normaali syöttötilanteessa.

Liite 2. Laskenta esimerkin tilanne jossa UPS on normaalikäytöllä



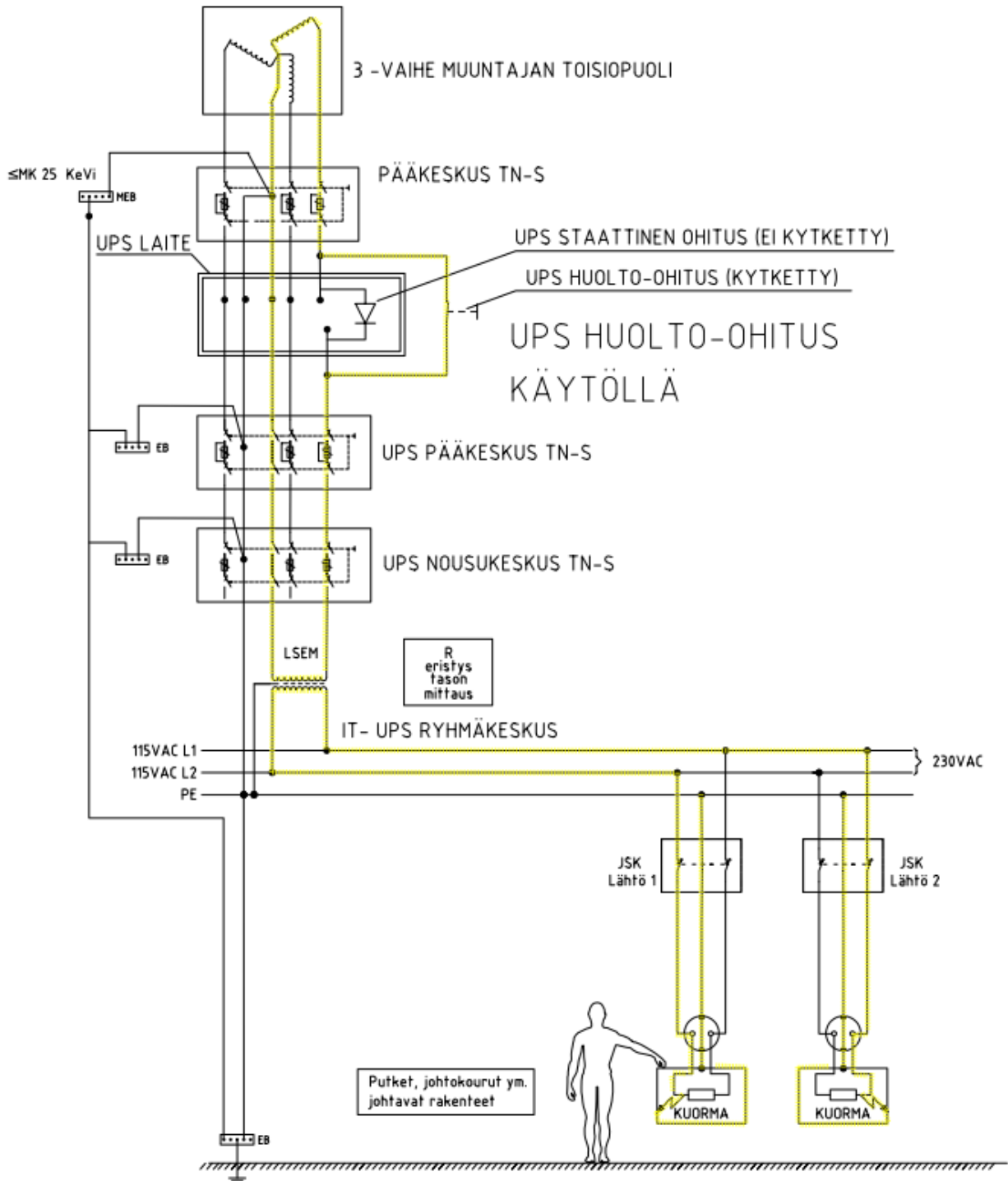
Laskentaesimerkin tilanne, jossa on UPS syöttää normaalikäytöllä lääkitä IT - verkkoa 2. vian vikatilanteessa.

Liite 3. UPS staattisella ohituksella IT-verkon 2.vian vikatilanteessa



UPS syöttöinen lääkintä IT -verkko 2. vian vikatilanteessa kun UPS laite syöttää kuormia staattisella ohituksella.

Liite 4. UPS huolto-ohituksella IT-verkon 2.vian vikatilanteessa



UPS syöttöinen lääkitä IT -verkko 2. vian vikatilanteessa kun UPS laite syöttää kuormia huolto-ohituksella.