

Ville Oksanen

Maadoitusjärjestelmien vertailu rakennusten pienjännitejakelussa

Metropolia Ammattikorkeakoulu

Insinööri (AMK)

Sähkötekniikan koulutusohjelma

Insinöörityö

7.5.2014

Tekijä Otsikko Sivumäärä Aika	Ville Oksanen Maadoitusjärjestelmien vertailu rakennusten pienjännitejake- lussa 38 sivua + 1 liite 7.5.2014
Tutkinto	insinööri (AMK)
Koulutusohjelma	sähkötekniikka
Suuntautumisvaihtoehto	sähkövoimatekniikka
Ohjaajat	lehtori, dipl.ins. Sampsa Kupari ryhmäpäällikkö, dipl.ins. Matti Sinisalo
<p>Insinööriyössä vertailtiin maadoitusjärjestelmiä rakennusten pienjännitejakelussa, etenkin henkilösuojauksen kannalta. Kansainvälinen standardisarja tuntee kolme erilaista maadoitusjärjestelmää: TT-, TN- ja IT-järjestelmä.</p> <p>Eri maadoitusjärjestelmien suojaus sähköiskulta käytiin läpi havainnollistaen esimerkkilaskelmin. TT-järjestelmässä suojaus joudutaan käytännössä aina tekemään vikavirtasuojien avulla, mikä johtuu pienistä maasulkuvirroista. Toisaalta tämän takia verkon selektiivisyys ja toteutus on muita järjestelmiä helpompi. IT-järjestelmässä ensimmäinen vika pitää havaita, joten suojaukseen tarvitaan maasulkuvahti. Toinen vika taas vastaa TN-, tai TT-järjestelmän vikaa. TN-järjestelmässä suojaus toteutetaan johdonsuojakatkaisijoilla.</p> <p>Maadoitusjärjestelmän valinnassa on hyvä muistaa, että kaikkia maadoitusjärjestelmiä voidaan käyttää samassa asennuksessa. Tällöin saavutetaan paras turvallisuus ja saataavuus sähköverkossa. IT-järjestelmällä saavutetaan paras sähkönjatkuvuus. TT-järjestelmä sopii verkkoihin, joissa on pienet oikosulkuvirrat tai pitkät syötöt. TN-järjestelmä sopii herkkiin verkkoihin sähkömagneettisen yhteensopivuuden takia.</p>	
Avainsanat	maadoitus, TT-järjestelmä, TN-järjestelmä, IT-järjestelmä

Author Title	Ville Oksanen Comparison of Earthing Systems in Buildings LV distribution
Number of Pages Date	38 pages + 1 appendix 7 May 2014
Degree	Bachelor of Engineering
Degree Programme	Electrical Engineering
Specialisation option	Electrical Power Engineering
Instructors	Sampsa Kupari, M.Sc., Senior Lecturer Matti Sinisalo, M.Sc., Group Manager
<p>This thesis compares earthing systems in LV buildings distribution, especially in terms of the protection of person. The following types of system earthing are taken into account in the international standard: TT-, TN- and IT-system.</p> <p>The study focuses on protection against electric shock in various earthing systems by example calculations. The TT-system protection against electric shock is assured by residual current devices, because the magnitude of the earth fault current is generally too small to operate overcurrent devices. In practice, fault current on the first fault is low on IT-system, but a permanent monitoring of the insulation to earth must be provided. The second fault on IT-system is similar to TN- or TT-systems fault. The TN-system protection against electric shock is protection by circuit breakers.</p> <p>When choosing the system of earthing, it is important to take into account that the three earthing systems can all be included in the same electrical installation. This enables the best safety and availability to network. In practice, the IT-system offers the best continuous availability of electricity. The TT-system suits situations where there is low short circuit current or cable routes are long. The TN-system is the best solution in situations where there is electronic equipment.</p>	
Keywords	Earthing, TT-system, TN-system, IT-system

Sisällys

Tiivistelmä

Abstract

Sisällys

Lyhenteet

1	Johdanto	1
2	Maadoitusjärjestelmät	1
2.1	TT-järjestelmä	2
2.2	TN-järjestelmä	4
2.3	IT-järjestelmä	6
2.4	Maadoitusjärjestelmän valintakriteerit	8
2.5	Järjestelmien yhdistäminen	13
3	Suojaus sähköiskulta	15
3.1	Syötön automaattinen poiskytkentä TT-järjestelmässä	16
3.2	Syötön automaattinen poiskytkentä TN-järjestelmässä	22
3.3	Syötön automaattinen poiskytkentä IT-järjestelmässä	24
3.4	Maadoitusjärjestelmien suojauksen toteutus	27
4	Maadoitusjärjestelmän esimerkkilaskelmat	33
5	Yhteenveto	35
	Lähteet	37
	Liite	
	Liite 1. Esimerkkilaskelmat TN- ja TT-järjestelmillä	

Lyhenteet

IT	Isolated Terra; nollapisteestä ei yhdistystä suoraan maahan ja jännitteelle alttiit osat yhdistetty erilliseen/erillisiin maadoituselektrodiin
PEN	Protective Earth and Neutral; yhdistetty suojamaa ja nolla
TN	Terra Neutral; yksi piste maadoitettu suoraan; sähkölaitteiston jännitteelle alttiit osat yhdistetty tähän pisteeseen
TN-C	Terra Neutral-Combined; nolla- ja suojamaadoitusjohdin yhdistetty
TN-C-S	Terra Neutral-Combined-Separatated; nolla- ja suojamaadoitusjohdin yhdistetty järjestelmien liitoskohdassa
TN-S	Terra Neutral-Separated; erillinen nolla- ja suojamaadoitusjohdin
TT	Terra Terra; yksi piste maadoitettu suoraan; sähkölaitteiston jännitteelle alttiit osat yhdistetty erilliseen/erillisiin maadoituselektrodiin

1 Johdanto

Insinööriyössä vertaillaan eri maadoitusjärjestelmiä rakennusten pienjännitejakelussa sekä tutkitaan eri maadoitusjärjestelmiä henkilösuojauksen ja vikavirtojen osalta. Käytössä olevat maadoitusjärjestelmät ovat TT, TN ja IT. Suosituimmat maadoitusjärjestelmät ovat TT- ja TN-järjestelmät, mutta muutamissa maissa, esimerkiksi Norjassa on käytössä maasta erotettu IT-järjestelmä.

Insinööriyö on tehty Granlund Oy:lle. Granlund Oy:ssä työskentelee noin 500 talotekniikan sekä kiinteistö-, energia- ja ohjelmisto-alan ammattilaista. Yritys on Suomessa johtava toimija kaikilla toimintansa alueilla.

Vaikka Suomessa on lähes yksinomaan käytössä TN-järjestelmä, suomalaisten yritysten kansainvälinen toiminta edellyttää olosuhteiden tuntemusta muissa maissa. Myös kansainvälisten yritysten lisääntynyt toiminta Suomessa lisää tarvetta tuntea eri maadoitusjärjestelmät.

Työssä käydään aluksi läpi maadoitusjärjestelmien yleiset periaatteet. Lisäksi käydään läpi yleisimmät valintakriteerit, jotka saattavat vaikuttaa maadoitusjärjestelmän valintaan sekä tutkitaan yleisesti maadoitusjärjestelmiä. Maadoitusjärjestelmiä tutkitaan maasulkutilanteissa sekä käydään läpi yleisimmät periaatteet suojauksen toteutuksessa. Lopuksi TN- ja TT-järjestelmää vertaillaan esimerkkilaskelman avulla.

2 Maadoitusjärjestelmät

Pienjänniteverkot ja kuormat maadoitetaan turvallisuussyistä suojaamaan ihmisiä sähköltä. Maadoituksia käsitellään sähköalan standardeissa hyvin tarkasti [1, s. 9]. Rakennusten sähköasennuksia käsittelevän kansainvälisen standardisarjan (IEC 60364) osassa 1 määritellään kolme erilaista maadoitusjärjestelmää: TT-, TN- ja IT-järjestelmä. Lähes kaikki kansalliset standardit pohjautuvat kyseiseen standardisarjaan, mukaan lukien Suomen SFS-6000 standardisarja [2, s. 3]. IEC:n määritelmien mukaan maadoitusjärjestelmissä ensimmäinen kirjain tarkoittaa maan ja syöttölähteen välistä kytkentää. T-kirjain tarkoittaa, että syöttölähte on suoraan kytketty maahan ja vaihtoehtoisesti I-kirjain tarkoittaa, että syöttölähteen ja maan välillä ei ole yhdistystä (erotettu

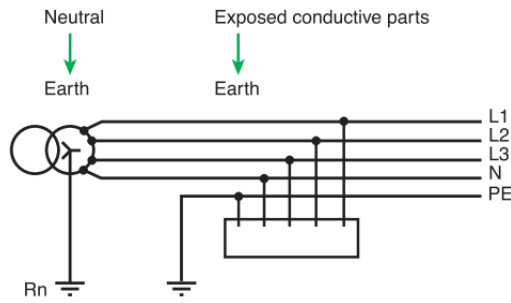
järjestelmä) tai yhdistys on tehty suuren impedanssin välityksellä. Toinen kirjain tarkoittaa maan ja sähkölaitteen välistä kytkentää. T-kirjain tarkoittaa laitteen suoraa kytkentää maahan ja N-kirjain tarkoittaa suoraa kytkentää nolnaan, joka on maadoitettu syöttölähteessä. [3, s. 37.]

Maadoitusjärjestelmien käyttö jakautuu pääasiassa maittain: TN-järjestelmä on käytössä muun muassa Saksassa, Venäjällä ja Suomessa. TT-järjestelmä on käytössä laajalti Etelä-Euroopassa. IT-järjestelmä on käytössä lähinnä Norjassa sekä kohteissa, joissa halutaan mahdollisimman hyvä luotettavuus sähkönsaannille, esimerkiksi leikkauslaitteissa ja teollisuuden kriittisissä verkon osissa. Toisin kuin Suomessa, jossa käytetään lähinnä vain yhtä maadoitusjärjestelmää, joissakin maissa käytetään jopa kaikkia kolmea maadoitusjärjestelmää. [1, s. 10.]

Maiden kansallisissa standardeissa voi olla suuria eroja, vaikka ne perustuisivat IEC:n standardeihin, esimerkiksi elektrodien impedanssien raja-arvoissa [1, s. 10]. Joissakin maissa on myös käytössä maadoitusjärjestelmiä, jotka poikkeavat IEC:n tuntemista maadoitusjärjestelmistä. Esimerkiksi Intiassa on TN-, TT- ja IT-järjestelmien kanssa käytössä myös Intian TN-S-, Intian TN-C- ja T-TN-S-järjestelmät. [4, s. 147.]

2.1 TT-järjestelmä

TT-järjestelmässä muuntajan nollapiste maadoitetaan maahan ja kaikki jännitteelle alttiit osat, joilla on yhteinen suojalaite, kytketään suojajohtimella niille yhteiseen maadoituselektrodiin (kuva 1 ks. seur. s.). TT-järjestelmässä on yleensä käytettävä vikavirtasuojaa, koska maasulun vikapiirin impedanssi muodostuu käytännössä aina liian suureksi vikasuojauksen kannalta. Tällöin oikosulkuvirta jää vianlaukaisua ajatellen liian pieneksi, jolloin ei saavuteta standardin (IEC 60364-4-41) edellyttämiä laukaisuaikoja. [5, s. 10.]



Kuva 1. TT-järjestelmä [6, s. E6]

TT-järjestelmää pidetään yksinkertaisimpana ratkaisuna suunnitella ja toteuttaa. Liittymän oikosulkuvirta ei vaikuta kaapelipituuksiin toisin kuin IT- ja TN-järjestelmissä. Selektiivisyys on helpommin toteutettavissa, koska kuorman teho ei vaikuta suuresti vikavirtasuojien toimintavirtoihin. Järjestelmä ei vaadi jatkuvaa valvontaa ja suojaus toteutetaan pääasiassa vikavirtasuojilla. [6, s. E6; 7, s. 38–39.]

TT-järjestelmän etuina voidaan pitää seuraavia seikkoja:

- TT-järjestelmä on yleisin käytössä oleva maadoitusjärjestelmä.
- Vika pien- tai keskijänniteverkossa ei vaikuta asiakkaan verkkoon.
- Järjestelmän turvallisuus on hyvä. Potentiaalinen nousu tulee rajoittaa 50 V:iin, kun vika on asennuksissa ja 0 V:iin, kun vika on verkossa.
- Järjestelmä on yksinkertainen asentaa ja helpoin toteuttaa.
- Verkon laajennus ei vaikuta maadoitukseen.
- Suuria kaapelikokoja käytettäessä materiaalia säästyy käyttämällä 4-johdinkaapelia, esimerkiksi syöttökaapeli. [8, s. 209.]

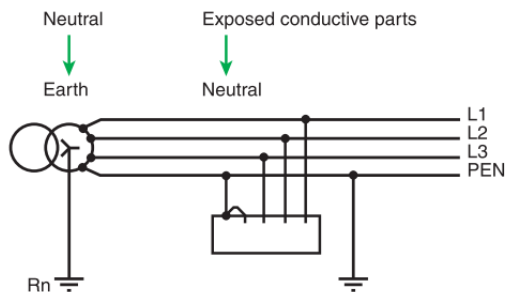
TT-järjestelmän huonoina puolina voidaan pitää seuraavia seikkoja:

- Maadoituselektrodeja voi olla useampi. Turvallisuus ja suojaus ovat asiakkaan vastuulla.
- Korkea ylijännite voi muodostua vaiheiden ja maan välille.
- Järjestelmässä voi muodostua ylijännitteitä laitteille. [8, s. 209.]

2.2 TN-järjestelmä

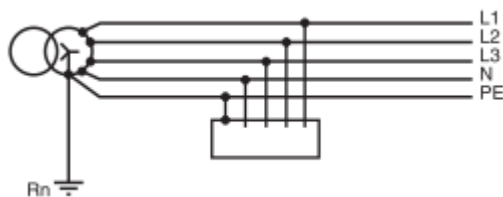
TN-järjestelmässä jännitteelle alttiit osat maadoitetaan suojamaadoitusjohtimella tai PEN-johtimella. TN-järjestelmä jaetaan kolmeen eri tyyppiin (TN-C, TN-S sekä TN-C-S) suoja- ja nollajohtimien mukaan. [9, s. 63.]

TN-C-järjestelmässä (4-johdinta, 3L+PEN) nollajohdin ja suojamaa on yhdistetty PEN-johtimeksi (kuva 2). Suomessa TN-C-järjestelmää voidaan käyttää johtimien poikkipinnan ollessa vähintään 10 mm²:n kuparia tai 16 mm²:n alumiinia [10, s. 8]. PEN-johdinta ei voi käyttää Suomessa uudiskohteissa liittymiskohdasta eteenpäin [11, s. 14].



Kuva 2. TN-C-järjestelmä [6, s. E4]

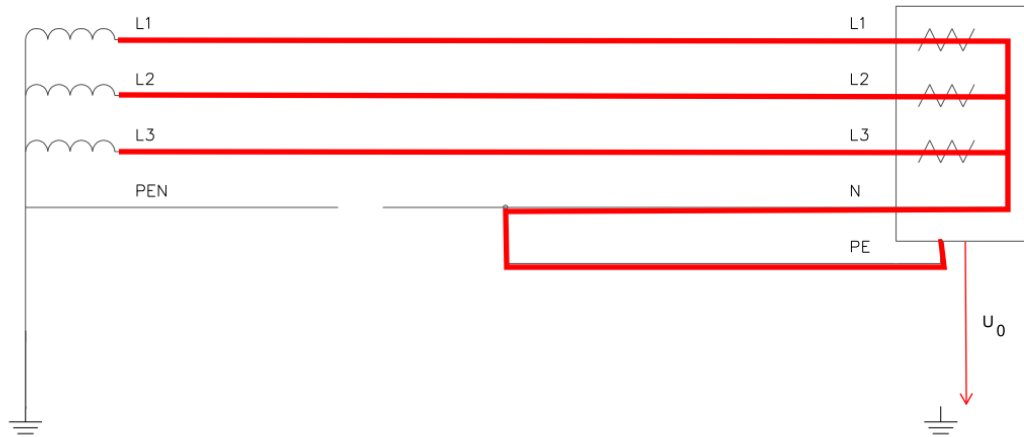
TN-S-järjestelmässä (5-johdinta, 3L+N+PE) on erillinen nolla- ja suojamaajohdin (kuva 3).



Kuva 3. TN-S-järjestelmä [6, s. E4]

TN-C-S-järjestelmä on TN-C- ja TN-S-järjestelmien yhdistelmä. TN-C-järjestelmä on aina syötön puolella TN-S-järjestelmään nähden. Järjestelmien rajapinnassa tehdään nollajohtimen yhdistäminen. TN-C-S-järjestelmässä PEN-johtimen katkeaminen aiheuttaa välittömän vaaratilanteen laitteissa ja esineissä, jotka ovat maadoitettu.

Vaihejännite pääsee nolla- ja suojamaayhdistyksen kautta kiertämään laitteen runkoon (kuva 4) tai maadoitettuun elementtiin, esimerkiksi vesiputkiin. [6, s. E4.]



Kuva 4. PEN-johdon katkeaminen TN-C-S-järjestelmässä

TN-järjestelmän etuina voidaan pitää seuraavia seikkoja:

- Järjestelmässä on aina vian paluureitti. Kaikille kuluttajille tuodaan maadoitus- tai PEN-johdin. Tällöin pienennetään riskiä huonosta maadoituksesta kuluttajalla.
- Vian aikainen kosketusjännite on mahdollisesti pienempi kuin TT-järjestelmässä (riippuu TT-järjestelmän maadoituselektrodien suhteesta toisiinsa).
- Ei ylijännitekuormitusta asennetuille laitteilla.
- TN-S-järjestelmä tarjoaa parhaan lähtökohdan toteuttaa elektromagneettisesti yhteensopivan järjestelmän.
- Järjestelmä voi toimia pelkästään yksinkertaisella ylivirtasuojauksella.
- Järjestelmässä katkaisu vikatilanteessa on varmatoiminen, edellyttäen tarpeeksi suuria vikavirtoja. [8, s. 208.]

TN-järjestelmän huonoina puolina voidaan pitää seuraavia seikkoja:

- Vika jakeluverkossa saattaa nostaa jännitteen tasoa asiakkaan verkossa.
- Vika pienjänniteverkossa saattaa aiheuttaa kosketusjännitteitä muille verkon asiakkaille.
- Nollajohdon katkeaminen aiheuttaa jännitteiden nousua, kuten myös verkon nolla- ja maaviat pien- ja keskijännitejakelussa.
- Jakeluverkkoyhtiö on vastuussa maadoituksen tuomisen lisäksi myös asiakkaan turvallisuudesta jakeluverkkovian aikana.
- Suojauksen tulee toimia myös verkon muutostöiden aikana.
- TN-C-järjestelmä ei ole elektromagneettisesti yhteensopiva. [8, s. 208; 11, s. 8.]

2.3 IT-järjestelmä

IT-järjestelmässä jännitteelle alttiilla osilla ei ole tarkoituksella yhteyttä nollaan. Jännitteelle alttiit osat kytketään maadoituselektrodiin (kuva 5). Järjestelmän nollapiste tai keinotekoinen nollapiste erotetaan maasta tai kytketään maahan riittävän suuren impedanssin kautta. [6, s E5.]

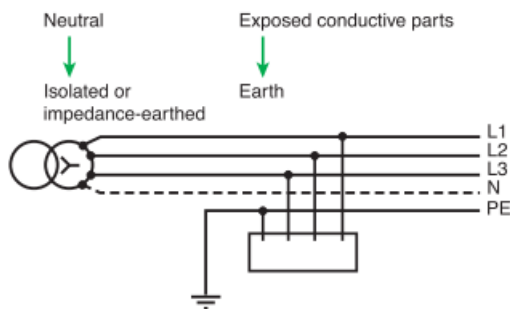
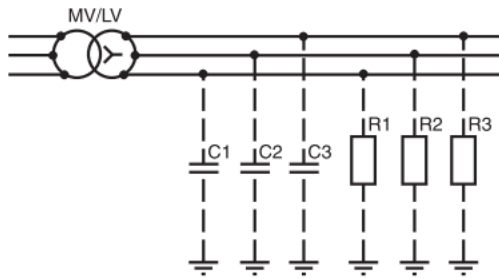


Fig. E8 : IT system (isolated neutral)

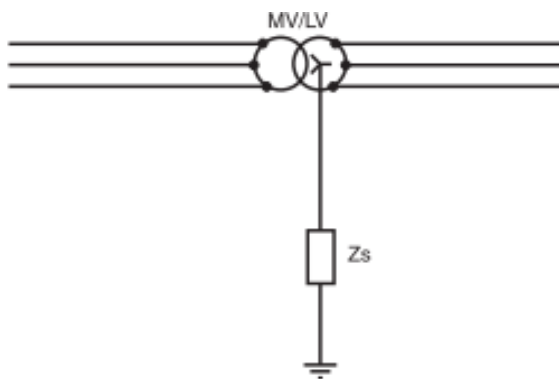
Kuva 5. Maasta erotettu IT-järjestelmä [6, s. E5]

Käytännössä kaikilla virtapiireillä (kaapeleilla) on vuotoimpedanssia maahan, koska eristykset eivät ole täydellisiä. Vaiheen ja maan välille muodostuva impedanssi koostuu resistiivisestä osasta R ja kapasitiivisestä osasta C (kuva 6 ks. seur. s.). [6, s. E5.]



Kuva 6. Kaapeleiden vuotoimpedanssi [6, s. E5]

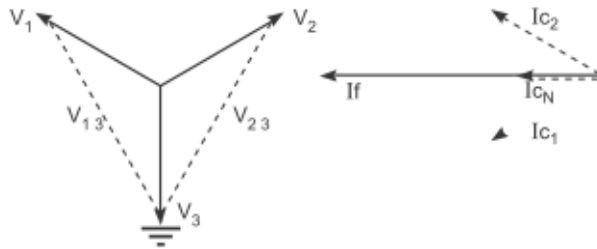
Impedanssilla maadoitetussa järjestelmässä muuntajan toision nolapiste maadoitetaan impedanssilla Z_s (impedanssi koostuu resistiivisestä ja induktiivisesta osasta, suhde riippuu valmistajasta, yleensä yli 1 000 Ω) suoraan maahan (kuva 7). Impedanssi on osittain induktiivista, joten se on suurempi korkeammille taajuuksille. Kaikki jännitteelle alttiit osat ovat maadoitettu maadoituselektrodiin. Impedanssi lisätään korjaamaan pienten järjestelmien maapotentiaalia ja pienentämään ylijännitteitä. [6, s. E5; 12, s. 21.]



Kuva 7. Impedanssilla maasta erotettu IT-järjestelmä [6, s. E5]

IT-järjestelmä tarjoaa parhaimman jatkuvuuden sähkösyötölle. Ensimmäinen vika ei katkaise sähkönsyöttöä, mutta se pitää paikantaa ja poistaa. Käytännössä vika poistetaan katkaisemalla vianalainen lähtö pois käytöstä. Vasta toinen samanaikainen vika katkaisee sähkönsyötön. IT-järjestelmä vaatii henkilökuntaa valvontaan ja toimenpiteisiin vian poistamiseksi tai vaihtoehtoisesti automaattisen vianpaikannuksen ja poiston. [6, s. E7.]

Ensimmäisen vian aikana terveissä vaiheissa jännite kasvaa vaihejännitteestä pääjännitteeksi, eli neliöjuuri kolmen verran. Jos vika tapahtuu kolmannessa vaiheessa, tällöin järjestelmän nollopiste vaihtuu tähtipisteestä kolmannen vaiheen (vaihe kolme maahan) päähän (kuva 8). Tällöin vaiheen 1 vaihejännite muuttuu V_1 :stä pääjännitteen suuruiseksi V_{13} :ksi. [11, s. 8; 12, s. 11; 13, s. 12.]



Kuva 8. Terveiden vaiheiden jännitteen muodostuminen vian aikana [13, s. 12]

Jos IT-järjestelmässä käytetään nollojohdinta, tulee jännitteen kasvu huomioida. Vaiheen ja nollian välille kytketyn laitteen tulee kestää vianaikainen jännite. Jos asennuksessa on eri poikkipintaisia johtimia, ja tulee kaksi vikaa, on estettävä tilanne, jossa poikkipinnaltaan pienempi johdin joutuisi siirtämään kuormitettavuuttaan suuremman virran. [9, s. 67.]

2.4 Maadoitusjärjestelmän valintakriteerit

Vikavirta on IT-järjestelmässä ensimmäisen vian aikana todella pieni, mutta muissa järjestelmissä vikavirta on vaarallisen suuri (TT-järjestelmässä kuitenkin pienempi kuin TN-järjestelmässä). Samalla vikajännite on IT-järjestelmän ensimmäisen vian aikana pieni johtuen pienestä vikavirrasta ($U_f = I_f \times Z_f$). Muissa järjestelmissä (mukaan lukien IT-järjestelmän toinen vika) vikajännite on huomattavasti suurempi. Kosketusjännite on TT-järjestelmässä pieni, jos järjestelmä on ekvipotentiaalinen (maadoituselektrodien impedanssien tulisi olla mahdollisimman lähellä toisiaan), muuten se on suuri (jännitteisten osien maadoituselektrodi huomattavasti suurempi kuin tähtipisteen elektrodi).

Kaikissa järjestelmissä (pois lukien TN-C) voidaan suojautua tulipalolta, 300 mA:n tai sitä pienemmillä vikavirtasuojilla (tulipalon riski on suuri yli 500 mA:n vikavirralla). Esimerkiksi Venäjällä vaaditaan korkeissa rakennuksissa palosuojaus vikavirtasuojilla alueittain toteutettuna. [6, s. E8.]

Elektromagneettinen yhteensopivuus on tärkeää huomioida paikoissa, joissa on riski suoralle tai epäsuoralle salamaniskulle. Myös jotkut sähkölaitteet ovat herkkiä elektromagneettisille kentille. Tällaisia tilanteita ovat esimerkiksi verkot, joissa on raskasta kuormaa, mutta myös herkkiä elektroniikkalaitteita. TN-C-järjestelmän käyttöä tulisi välttää esimerkiksi tilanteissa, joissa kuormana on tietotekniikan laitteistoja, jolloin tietotekniikkaa varten joudutaan rakentamaan oma muuntajasyöttö.

TT-järjestelmä vaatii käytännössä vikavirtasuojat ja IT-järjestelmä eristystason valvontalaitteet. TN-järjestelmässä riittää yksi maadoituselektrodi, IT-järjestelmässä yksi tai kaksi maadoituselektrodiä ja TT-järjestelmässä tarvitaan kaksi tai useampia maadoituselektrodeja.

Laitteille kohdistuvat termiset ja mekaaniset rasitukset korreloivat suoraan vikavirtojen suuruuteen. TT- ja IT-järjestelmissä on pienemmät vikavirrat verrattuna TN-järjestelmään.

TT-järjestelmä on investointikustannuksiltaan halvin ja IT-järjestelmä kallein. Investointikustannuksiin vaikuttavat johtimien määrä ja niiden poikkipinta, sekä suojalaitteiden hinnat. TT-järjestelmässä voidaan käyttää vain suojalaitteita, joissa on vikavirtasuojatoiminta. Muut järjestelmät eivät rajoita käytettävää suojalaitteen teknologiaa.

Jos maadoitusjärjestelmä voidaan valita vapaasti, voidaan käyttää apuna taulukoita (taulukko 1 ks. seur. s.). Kaikki maadoitukset säädösten mukaan toteutettuina ovat turvallisia ihmiselle, joten turvallisuus ei ole yksi valintakriteereistä. [6, s. E8: 9, s.157: 11, s. 8, 28: 14, s. 2/3.]

Taulukko 1. Taulukko maadoitusjärjestelmien valintakriteereistä [6, s. E8]

	TT	TN-S	TN-C	IT1 ^(a)	IT2 ^(b)	Comments
Electrical characteristics						
Fault current	-	--	--	+	--	Only the IT system offers virtually negligible first-fault currents
Fault voltage	-	-	-	+	-	In the IT system, the touch voltage is very low for the first fault, but is considerable for the second
Touch voltage	+/-	-	-	+	-	In the TT system, the touch voltage is very low if system is equipotential, otherwise it is high
Protection						
Protection of persons against indirect contact	+	+	+	+	+	All SEAs (system earthing arrangement) are equivalent, if the rules are followed
Protection of persons with emergency generating sets	+	-	-	+	-	Systems where protection is ensured by RCDs are not sensitive to a change in the internal impedance of the source
Protection against fire (with an RCD)	+	+	Not allowed	+	+	All SEAs in which RCDs can be used are equivalent. The TN-C system is forbidden on premises where there is a risk of fire
Overvoltages						
Continuous overvoltage	+	+	+	-	+	A phase-to-earth overvoltage is continuous in the IT system if there is a first insulation fault
Transient overvoltage	+	-	-	+	-	Systems with high fault currents may cause transient overvoltages
Overvoltage if transformer breakdown (primary/secondary)	-	+	+	+	+	In the TT system, there is a voltage imbalance between the different earth electrodes. The other systems are interconnected to a single earth electrode
Electromagnetic compatibility						
Immunity to nearby lightning strikes	-	+	+	+	+	In the TT system, there may be voltage imbalances between the earth electrodes. In the IT system, there is a significant current loop between the two separate earth electrodes
Immunity to lightning strikes on MV lines	-	-	-	-	-	All SEAs are equivalent when a MV line takes a direct lightning strike
Continuous emission of an electromagnetic field	+	+	-	+	+	Connection of the PEN to the metal structures of the building is conducive to the continuous generation of electromagnetic fields
Transient non-equipotentiality of the PE	+	-	-	+	-	The PE is no longer equipotential if there is a high fault current
Continuity of service						
Interruption for first fault	-	-	-	+	+	Only the IT system avoids tripping for the first insulation fault
Voltage dip during insulation fault	+	-	-	+	-	The TN-S, TNC and IT (2 nd fault) systems generate high fault currents which may cause phase voltage dips
Installation						
Special devices	-	+	+	-	-	The TT system requires the use of RCDs. The IT system requires the use of IMDs
Number of earth electrodes	-	+	+	-/+	-/+	The TT system requires two distinct earth electrodes. The IT system offers a choice between one or two earth electrodes
Number of cables	-	-	+	-	-	Only the TN-C system offers, in certain cases, a reduction in the number of cables
Maintenance						
Cost of repairs	-	--	--	-	--	The cost of repairs depends on the damage caused by the amplitude of the fault currents
Installation damage	+	-	-	++	-	Systems causing high fault currents require a check on the installation after clearing the fault

(a) IT-net when a first fault occurs.

(b) IT-net when a second fault occurs.

Kuorman tyyppi ja koko vaikuttavat paljon maadoitusjärjestelmän valintaan (taulukko 2 ks. seur. s.). Valintaan vaikuttavia asioita voivat olla; verkon tyyppi ja sijainti, kuorman koko ja luonne sekä erilaiset riski- ja erikoistapaukset.

Taulukko 2. Suositukset maadoitusjärjestelmästä erityyppisiin kuormiin [6, s. E9]

Type of network		Advised	Possible	Not advised
Very large network with high-quality earth electrodes for exposed conductive parts (10 Ω max.)			TT, TN, IT ⁽¹⁾ or mixed	
Very large network with low-quality earth electrodes for exposed conductive parts (> 30 Ω)		TN	TN-S	IT ⁽¹⁾ TN-C
Disturbed area (storms) (e.g. television or radio transmitter)		TN	TT	IT ⁽²⁾
Network with high leakage currents (> 500 mA)		TN ⁽⁴⁾	IT ⁽⁴⁾ TT ^{(3) (4)}	
Network with outdoor overhead lines		TT ⁽⁵⁾	TN ^{(5) (6)}	IT ⁽⁶⁾
Emergency standby generator set		IT	TT	TN ⁽⁷⁾
Type of loads				
Loads sensitive to high fault currents (motors, etc.)		IT	TT	TN ⁽⁸⁾
Loads with a low insulation level (electric furnaces, welding machines, heating elements, immersion heaters, equipment in large kitchens)		TN ⁽⁹⁾	TT ⁽⁹⁾	IT
Numerous phase-neutral single-phase loads (mobile, semi-fixed, portable)		TT ⁽¹⁰⁾ TN-S		IT ⁽¹⁰⁾ TN-C ⁽¹⁰⁾
Loads with sizeable risks (hoists, conveyers, etc.)		TN ⁽¹¹⁾	TT ⁽¹¹⁾	IT ⁽¹¹⁾
Numerous auxiliaries (machine tools)		TN-S	TN-C IT ^(12 bis)	TT ⁽¹²⁾
Miscellaneous				
Supply via star-star connected power transformer ⁽¹³⁾		TT	IT without neutral with neutral	IT ⁽¹³⁾ with neutral
Premises with risk of fire		IT ⁽¹⁵⁾	TN-S ⁽¹⁵⁾ TT ⁽¹⁵⁾	TN-C ⁽¹⁴⁾
Increase in power level of LV utility subscription, requiring a private substation		TT ⁽¹⁶⁾		
Installation with frequent modifications		TT ⁽¹⁷⁾		TN ⁽¹⁸⁾ IT ⁽¹⁸⁾
Installation where the continuity of earth circuits is uncertain (work sites, old installations)		TT ⁽¹⁹⁾	TN-S	TN-C IT ⁽¹⁹⁾
Electronic equipment (computers, PLCs)		TN-S	TT	TN-C
Machine control-monitoring network, PLC sensors and actuators		IT ⁽²⁰⁾	TN-S, TT	

Edellä olevan taulukon 2 selitykset ovat seuraavat:

- (1) Kun maadoitusjärjestelmä ei määräydy määräysten mukaan, valitaan maadoitusjärjestelmä kuorman ominaisuuksien mukaan, esimerkiksi jos halutaan tuotannossa mahdollisimman vähän keskeytyksiä turvallisuus tai tuotannollisista syistä.
- (2) Salamasta johtuva ylilyönninriski maadoitusimpedanssissa, erotetusta nollassa tulee maadoitettu nolla. Riski on olemassa korkeilla paikoilla sekä ilmajohdoilla ja niiden läheisyydessä.
- (3) Vikavirtasuojan aiheeton laukeamisen riski.
- (4) Riippumatta järjestelmästä, ihanneratkaisu on eristää ongelmakohta muusta verkosta, jolloin se on helppo tunnistaa.
- (5) Maasulun vaikutus jännitepotentiaaliin.
- (6) Kosteuden ja pölyn takia eristyksen toimivuus on epävarmaa.
- (7) TN-järjestelmää ei suositella, koska on vaarana, että generaattori vahingoittuu kun kyseessä on sisäinen vika. Tilanteessa, jossa generaatto-

ria käytetään turvalaitteena, olisi hyvä, ettei verkko kaadu ensimmäiseen vikaan.

- (8) Maasulun oikosulkuvirta voi olla paljon suurempi kuin moottorin nimelliskvirta. Tällöin on riski, että moottorin käämit tai magnetointipiiri tuhoutuvat.
- (9) Riippumatta maadoitustavasta on suositeltavaa erottaa nämä kuormat muusta verkosta, jolloin yhdistetään sähkön saannin jatkuvuus ja turvallisuus.
- (10) Kun kuorman laitteiden laatu on vaihtelevaa, on vaarana, että eristysvastus pienenee. TT-järjestelmä vikavirtasuojilla on paras ratkaisu.
- (11) Tämäntyyppiset kuormat aiheuttavat usein vikoja. Riippumatta maadoitusjärjestelmästä suositellaan erottamaan kuormat muusta verkosta.
- (12) Edellyttää muuntajia paikallisessa TN-järjestelmässä, välttääkseen toiminnan riskejä ja turhaa laukaisua ensimmäisestä viasta (TT) tai tupla viasta (IT).
- (13) Korkea nollan ja vaiheen välinen impedanssi (4–5 kertainen suoraan impedanssiin verrattuna) johtuu liiallisesta virran rajoittamisesta vaiheen ja nollan välillä. Tässä tilanteessa tilalle tulisi vaihtaa tähti-kolmio-muuntaja.
- (14) Korkea vikavirta tekee TN-järjestelmästä vaarallisen. TN-C-järjestelmä on kielletty.
- (15) Järjestelmästä riippumatta vikavirtasuojien toimintavirta on oltava alle 500 mA.
- (16) Asennetun syötön tulee myös käyttää TT-järjestelmää. Tämä tarkoittaa vähiten muutostöitä nykyiseen verkkoon (kaapeleita ei tarvitse vaihtaa, suojalaitteita ei tarvitse muuttaa).
- (17) Asennus on mahdollista ilman erittäin pätevää huoltohenkilöstöä.
- (18) Tämän tyylinen kuorma vaatii erityistä huomiota turvallisuuden ylläpitoon. Ennaltaehkäisevien toimien puuttuminen TN-järjestelmässä vaatii erittäin pätevää henkilöstöä turvallisuuden takaamiseksi työn ajaksi.
- (19) Mahdollisesti johtimissa olevat katkot (syötössä tai suojauksessa) voivat johtaa tasapainopotentiaalin katoamiseen. TT- tai TN-S järjestelmä 30 mA:n vikavirtasuojalla. IT-järjestelmää voidaan käyttää erikoistapauksissa.
- (20) Tällä vältetään odottamattomat maavuodot. [6, s. E9.]

Pienjännitejärjestelmän käyttötaajuiset rasitusjännitteet ja vikajännitteet (taulukko 3 ks. seur. s.) koskevat pienjänniteasennusten turvallisuutta, esimerkiksi kun nollajohdin katkeaa tai IT-järjestelmän äärijohdin maadoittuu vahingossa. [6, s. E8.]

Taulukko 3. Pienjännitejärjestelmän käyttötaajuiset rasitusjännitteet ja vikajännitteet [11, s. 6]

Maadoitus-tapa	Maadoitusten kytkentätapa	U_1	U_2	U_f
TT	R_E ja R_B on kytketty yhteen	U_0^*	$R_E X_{I_E} + U_0$	0^*
	R_E ja R_B ovat erillään	$R_E X_{I_E} + U_0$	U_0	0^*
TN	R_E ja R_B on kytketty yhteen	U_0^*	U_0^*	$R_E X_{I_E}^{**}$
	R_E ja R_B ovat erillään	$R_E X_{I_E} + U_0$	U_0^*	0^*
IT	R_E ja Z on kytketty yhteen	U_0^*	$R_E X_{I_E} + U_0$	0^*
	R_E ja R_A ovat erillään	$U_0 \sqrt{3}$	$R_E X_{I_E} + U_0 \sqrt{3}$	$R_A X_{I_d}$
	R_E ja Z on kytketty yhteen	U_0^*	U_0^*	$R_E X_{I_E}$
	R_E ja R_A on kytketty yhteen	$U_0 \sqrt{3}$	$U_0 \sqrt{3}$	$R_E X_{I_E}$
	R_E ja Z ovat erillään	$R_E X_{I_E} + U_0$	U_0^*	0^*
	R_E ja R_A ovat erillään	$R_E X_{I_E} + U_0 \sqrt{3}$	$U_0 \sqrt{3}$	$R_A X_{I_d}$
*	Vaativuudesta ei tarvitse tarkistaa			
**	Katso kohdan 442.2.1			
	IT-järjestelmässä on ensimmäinen vika			

HUOM. 1 Vaatimukset jännitteille U_1 ja U_2 on otettu pienjännitelaitteiden tilapäisen käyttötaajuisen eristystason vaatimuksista.

HUOM. 2 Järjestelmässä, jossa nolla on yhdistetty muuntamon maadoitusjärjestelmään, tällainen tilapäinen käyttötaajuinen ylijännite on odotettavissa myös rakennuksen ulkopuolella olevassa maadoittamattomassa kotelossa olevan laitteen eristyksen yli.

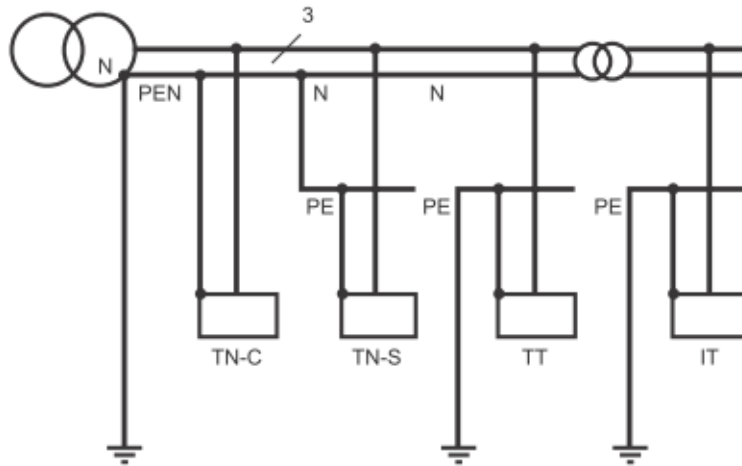
HUOM. 3 TT- ja TN-järjestelmissä nimitys on kytketty yhteen ja ovat erillään, tarkoittavat sähköistä liitintä maadoitusten R_E ja R_A välillä. IT-järjestelmissä se tarkoittaa sähköistä yhteyttä R_E ja Z:n välillä ja liitintä R_E ja R_A :n välillä.

HUOM. 4 Suomessa käytetään käytännössä pääasiassa TN-järjestelmää, jossa suurjännitejärjestelmän maadoitus R_E ja pienjännitejärjestelmän maadoitus R_B on kytketty yhteen. IT-järjestelmässä suurjännitejärjestelmän maadoitus R_E ja pienjännitejärjestelmän maadoitus R_B on kytketty yhteen. Impedanssia Z ei yleensä käytetä.

2.5 Järjestelmien yhdistäminen

Suomessa yleisin maadoitusjärjestelmien yhdistelmä on TN-C- ja TN-S-järjestelmien yhdistelmä, tällöin käytetään nimitystä TN-C-S-järjestelmä. Tällaisessa sekaverkossa TN-C-järjestelmä on aina syöttävän verkon puolella, koska toisistaan erotettua nolla- ja suojajohdinta ei saa kytkeä uudestaan PEN-johtimeksi. Yleiset jakeluverkot Suomessa ovat tavallisesti TN-C-järjestelmän mukaisia. Rakennusten sisäinen verkko on TN-S-järjestelmän mukainen. [9, s. 67.]

TT-järjestelmä voidaan yhdistää suoraan TN-järjestelmään (kuva 9 ks. seur. s.), tällöin TT-järjestelmää varten tarvitaan oma elektrodi. Tällaisia tapauksia voivat olla esimerkiksi pitkät kaapeliyhteydet pumpuille tai ulkovaloryhmät. [13, s. 8.]



Kuva 9. Esimerkki maadoitusjärjestelmien yhdistämisestä [13, s. 8]

IT- ja TN/TT-järjestelmä voidaan yhdistää samassa järjestelmässä erottamalla järjestelmät toisistaan galvaanisesti. Esimerkiksi syöttämällä omalla pienjännitemuuntajalla isoja moottoreita tai uuneja, joilla on vaikutusta verkon häiriöihin. Syötön laatu ja jatkuvuus paranevat koko verkossa. Termisiä ja mekaanisia rasituksia saadaan pienemmiksi oikosulkuvirtojen pienentyessä, joilla on suoraan vaikutusta kustannuksiin. Muuntajat voidaan valita tarkemmin tapauskohtaisesti. [6, s. E10.]

Kuvassa 10 (ks. seur. s.) on kaksi esimerkkiä saarekeratkaisusta. Ensimmäisessä esimerkissä IT-järjestelmään on liitetty saareke, jossa käytetään TN-S-järjestelmää. TN-S-järjestelmän tähtipiste on yhdistetty suoraan maahan ja IT-järjestelmän tähtipiste on yhdistetty samaan elektrodiin, mutta ylijännitesuojan kautta. Toinen esimerkki on hyvin yleinen sairaaloissa. Esimerkiksi leikkaussalin syöttö on tehty omaksi IT-järjestelmän saarekkeeksi, joissa on oma maadoitusimpedanssilla yhdistetty elektrodi. Maasulkuvahti (IMD; Insulation Monitoring Device) mittaa eristysvastusimpedanssia verkossa.

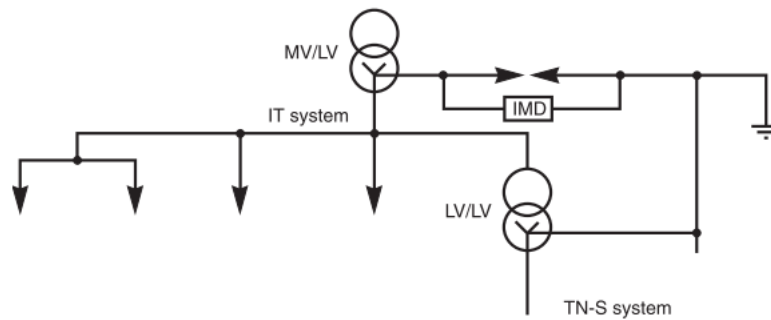


Fig. E18 : TN-S island within an IT system

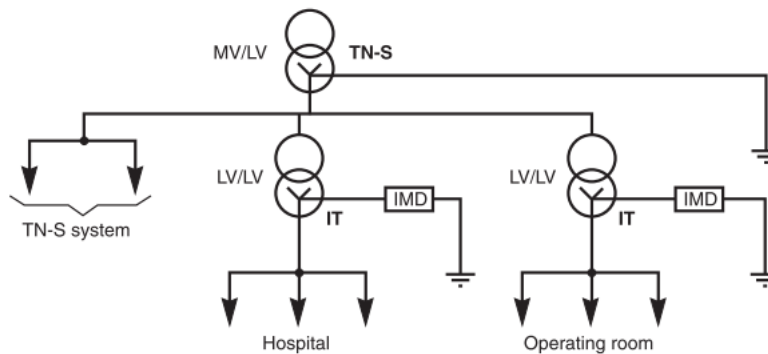


Fig. E19 : IT islands within a TN-S system

Kuva 10. Esimerkki saarekejakelusta [6, s. E10]

Samassa kohteessa voidaan käyttää kaikkia maadoitusjärjestelmiä tarpeen vaatiessa. Esimerkiksi erityistä laitetta tai kohdetta varten valittua maadoitusjärjestelmää ei tarvitse käyttää koko asennuksessa, vaan siinä osassa, jossa se on tarpeellinen. Optimoimalla järjestelmät asennuksessa saavutetaan kustannustehokas ratkaisu, tinkimättä turvallisuudesta ja sähkön jatkuvuudesta.

3 Suojaus sähköiskulta

Suojauksen tarkoituksena on estää vaarallista eristysvian aiheuttamaa kosketusjännitettä. Vikavirta ja kosketusjännite on poistettava niin nopeasti, ettei siitä synny vaaraa ihmiselle.

Laskettaessa oikosulkuvirtoja ja johtopituuksia, on syytä käyttää kyseisen maan standardin yhtälöitä, tai vaihtoehtoisesti IEC:n yhtälöitä. Taulukossa 4 esitetään lasketut

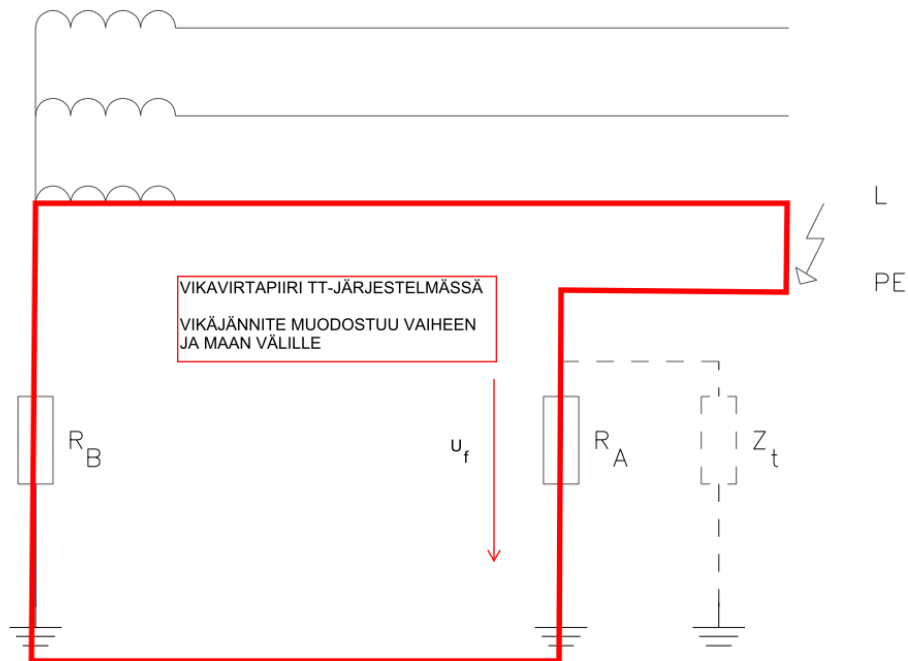
johtimien impedanssit eri poikkipinnoille yhden kilometrin matkalle standardin IEC60909 ja D1-2012 mukaan, kuparijohtimille 80 °C:n lämpötilassa. Taulukosta 4 huomataan, että joillakin johdinpoikkipinnoilla ero on jo merkittävä. [9, s. 96; 15, s. 154; 16, s.460–461.]

Taulukko 4. Johtimien impedanssi 1 km:n matkalla

	IEC 60909	D1-2012		
A	Z	Z	Ero Ω	Ero %
1,5	29,52424	29,24	0,284243	0,96 %
2,5	17,71501	17,54	0,175008	0,99 %
4	11,07258	10,96	0,112585	1,02 %
6	7,382686	7,32	0,062686	0,85 %
10	4,431461	4,492	-0,06054	-1,37 %
16	2,772478	2,836	-0,06352	-2,29 %
25	1,77864	1,804	-0,02536	-1,43 %
35	1,275382	1,314	-0,03862	-3,03 %
50	0,90005	0,978	-0,07795	-8,66 %
70	0,652572	0,692	-0,03943	-6,04 %
95	0,492859	0,514	-0,02114	-4,29 %
120	0,402239	0,422	-0,01976	-4,91 %
150	0,335806	0,348	-0,01219	-3,63 %
185	0,28793	0,296	-0,00807	-2,80 %
240	0,244232	0,248	-0,00377	-1,54 %
300	0,217696	0,222	-0,0043	-1,98 %

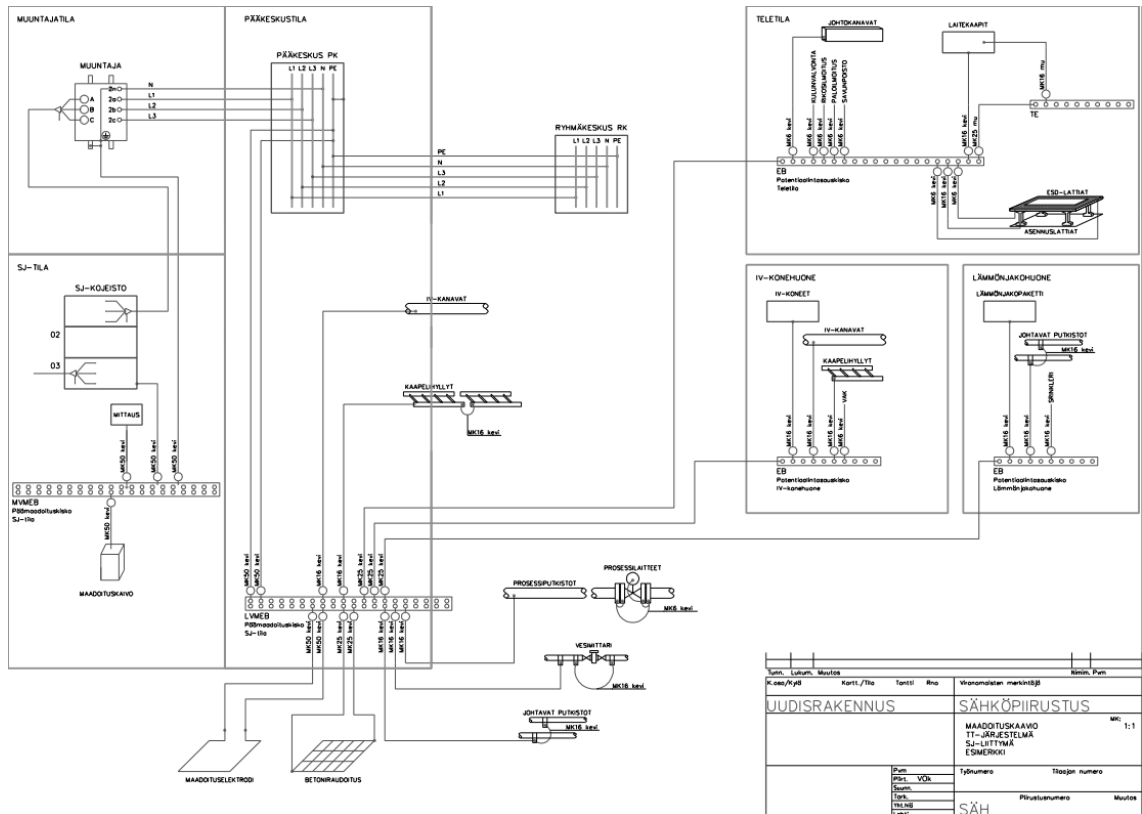
3.1 Syötön automaattinen poiskytkentä TT-järjestelmässä

TT-järjestelmän vikavirtapiiri (kuva 11 ks. seur. s.) koostuu vianalaisesta vaihejohtimesta, suojajohtimesta sekä kahdesta maadoituselektrodista, joista toiseen on yhdistetty asennuksen jännitteelle alttiit osat R_A ja toiseen järjestelmän keskipiste R_B . Käytännössä TT-järjestelmässä vikatilanteen impedanssi koostuu kahdesta maadoituselektrodista sarjassa suuruutensa takia. Vikajännite U_f muodostuu vaiheen ja maan välille. Ihmisen koskettaessa vianalaiseen laitteeseen ihmisen impedanssi Z_f kytkeytyy vikapiiriin maadoituselektrodin R_A kanssa rinnan. [6, s. F7.]



Kuva 11. Vikapiiri TT-järjestelmässä

Muuntajan ollessa kiinteistön ulkopuolella (pienjänniteliittymä), sillä on oma elektrodi muuntamon luona. Kiinteistössä jännitteelle alttiit osat maadoitetaan maadoituselektrodiin (kuten TN-S-järjestelmässäkin). Muuntajan sijaitessa samassa kiinteistössä (kuva 12 ks. seur. s.), jännitteelle alttiit osat maadoitetaan päämaadoituskiskoon, ja muuntaja maadoitetaan omaan elektrodiin, esimerkiksi pystymaadoituselektrodilla tai maadoituskaivolla. Tällaisessa tilanteessa tulee kuitenkin huomioida etäisyysmääräykset elektrodien etäisyys toisistaan ja muista johtavista osista, esimerkiksi vesiputkista. Erona TT-järjestelmään TN-järjestelmän nolla-, ja PE-kiskon yhdistystä ei käytetä. [13, s. 19.]



Kuva 12. Esimerkki TT-järjestelmän maadoituskaaviosta

Standardissa SFS 6000-4-41 esitetään suurimmat sallitut poiskytkentäajat korkeintaan 32 A suojalaitteille (kuva 13). 1 s poiskytkentäaika on sallittu yli 32 A pääjohdoille ja piireille [5, s. 7].

Järjestelmä	50 V < U ₀ ≤ 120 V		120 V < U ₀ ≤ 230 V		230 V < U ₀ ≤ 400 V		U ₀ > 400 V	
	s		s		s		s	
	a.c.	d.c.	a.c.	d.c.	a.c.	d.c.	a.c.	d.c.
TN	0,8	Huom. 1	0,4	5	0,2	0,4	0,1	0,1
TT	0,3	Huom. 1	0,2	0,4	0,07	0,2	0,04	0,1

Jos TT-järjestelmässä poiskytkentä saadaan aikaan ylivirtasuojilla ja suojaava potentiaalintasaus on kytketty kaikkiin asennuksen muihin johtaviin osiin, voidaan käyttää TN-järjestelmän poiskytkentäaikoja.

U₀ on nimellinen tasa- tai vaihtojännite äärijohtimesta maahan.

HUOM. 1 Poiskytkentää voidaan tarvita muusta syystä kuin sähköiskulta suojaamiseen.

HUOM. 2 Jos poiskytkentä toteutetaan vikavirtasuojan avulla, katso kohdan 411.4.4 huomautus, kohdan 411.5.3 huomautus 4 ja kohdan 411.6.4 b) huomautus 4.

Kuva 13. Standardin SFS 6000-4-41 mukaiset poiskytkentäajat [5, s. 7]

TT-järjestelmässä automaatti- tai sulakesuojauksella ei yleensä aliteta standardin poiskytkentäaikoja. Jotta poiskytkentäajat alitetaan, on suositeltavaa käyttää vikavirtasuojaa. Vikavirrat ovat yleensä huomattavasti suurempia kuin vikavirtasuojan nimelliset laukaisuvirrat $I_{\Delta n}$ (vähintään 5-kertainen). Tällöin saavutetaan standardin edellyttämät laukaisuajat. [5, s. 7.]

Vikavirtasuojan tulee täyttää yhtälön 1 ehto:

$$I_{\Delta n} \leq \frac{50}{R_A} \quad (1)$$

$I_{\Delta n}$ on vikavirtasuojan nimellinen laukaisuvirta

R_A on jännitteelle alttiiden osien kokonaismaadoitusresistanssi (Ω)

Edellä olevan yhtälön avulla voidaan laskea maksimi-impedanssit. Taulukosta 5 huomataan, että asennuksen kasvaessa (jakelutasoja lisää) tiukentuu myös maadoituselektrodin resistanssi. Esimerkiksi asennuksissa, joissa ylimmällä jakelutasolla käytetään 3 A vikavirran nimellistä laukaisuvirtaa, maadoituselektrodin tulisi olla alle 16 Ω .

Taulukko 5. Suurimmat maadoitusresistanssit

$I_{\Delta n}$	R_A
[A]	[Ω]
0,01	5000
0,03	1666
0,1	500
0,3	166
0,5	100
3	16
10	5
30	1,6

Käytännössä uudisasennuksissa maadoitusresistanssin tulisi olla alle puolet edellisen taulukon arvoista [6, s. Q3]. Esimerkiksi Iso-Britanniassa maksimiraja-arvo elektrodin impedanssille on 100 Ω [17, s. 17; 18, s. 28].

Uudisrakennukset maadoitetaan yleensä rakennuksen ympäröivällä perusmaadoituselektrodilla. Kuparisen johtimen minimi poikkipinta on 25 mm², mutta Suomessa

käytetään 16 mm², koska käytännössä mitoittava tekijä on korrosio ja Suomessa on todettu kokemukseräisesti riittäväksi 16 mm². Käytettäessä rakennuksen ympäröivää perusmaadoituselektrodiä, maadoituselektrodin resistanssi voidaan laskea likiarvoyhtälöllä 2. [10, s. 6.]

$$R = \frac{2\rho}{L} \quad (2)$$

R on maadoituselektrodin impedanssi (Ω)

ρ on aineen resistiivisyys (Ωm)

L on maadoituselektrodin pituus (m)

Seuraavassa olevassa taulukossa 6 on Suomessa käytetyt maan resistiivisyysarvot.

Taulukko 6. Maaperän, betonin ja veden resistiivisyydet Suomessa [19, s. 101]

Aine	Keskimäärin Ωm	Tavallisimmat vaihteluvälit Ωm
Savi	40	25...70
Saven sekainen hiekka	100	40...300
Lieju, turve, multa	150	50...250
Hiekka, hieta	2000	1000...3000
Moreenisora	3000	1000...10000
Harjusora	15000	3000...30000
Graniittikallio	20000	10000...50000
Betoni tuoreena tai maassa	100	50...500
Betoni kuivana	10000	2000...100000
Järvi- ja jokivesi	250	100...400
Pohja- kaivo- ja lähdevesi	50	10...150
Merivesi (Suomenlahti)	2,5	1...5

Seuraavassa taulukossa 7 (ks. seur. s.) on kansainvälisesti käytettyjä maan resistiivisyyden arvoja. Kuten taulukoista huomataan, voivat maan resistiivisyysarvot vaihdella todella paljon.

Taulukko 7. Maaperän, betonin ja veden resistiivisyydet Euroopassa [6, s. E12]

Type of soil	Mean value of resistivity in Ωm
Swampy soil, bogs	1 - 30
Silt alluvium	20 - 100
Humus, leaf mould	10 - 150
Peat, turf	5 - 100
Soft clay	50
Marl and compacted clay	100 - 200
Jurassic marl	30 - 40
Clayey sand	50 - 500
Siliceous sand	200 - 300
Stoney ground	1,500 - 3,000
Grass-covered-stoney sub-soil	300 - 500
Chalky soil	100 - 300
Limestone	1,000 - 5,000
Fissured limestone	500 - 1,000
Schist, shale	50 - 300
Mica schist	800
Granite and sandstone	1,500 - 10,000
Modified granite and sandstone	100 - 600

Fig. E23 : Resistivity (Ωm) for different types of soil

Type of soil	Average value of resistivity in Ωm
Fertile soil, compacted damp fill	50
Arid soil, gravel, uncompacted non-uniform fill	500
Stoney soil, bare, dry sand, fissured rocks	3,000

Fig. E24 : Average resistivity (Ωm) values for approximate earth-elect

Erillisten maadoituselektrodien ansiosta minimioikosulkuvirta I_{kmin} ei ole rajoittava tekijä TT-järjestelmässä, toisin kuin muissa järjestelmissä. Tämä mahdollistaa muita järjestelmiä pidemmät kaapeliyhteydet.

Esimerkki: Asennus TT-järjestelmässä, suojaus 300 mA:n vikavirtasuojalla.

- Äärijohtimen ja maan välinen jännite U_0 on 230 V
- Muuntajan ja maan välinen resistanssi R_B on 15 Ω
- Asennuksen maadoitusresistanssi R_A on 30 Ω

Vikavirraksi I_D saadaan 5,1 A, yhtälöllä 3.

$$I_D = \frac{U_0}{R_A + R_B} \quad (3)$$

I_D on vikavirta (A)

U_0 on vaihejännite (V)

R_A on jännitteelle alltiiden osien kokonaismaadoitusresistanssi (Ω)

R_B on tähtipisteen maadoituselektrodin impedanssi (Ω)

Vikajännitteeksi U_f saadaan 153 V yhtälöllä 4.

$$U_f = I_d \times R_A \quad (4)$$

U_f on vikajännite (V)

I_d on vikavirta (A)

R_A on jännitteelle alltiiden osien kokonaismaadoitusresistanssi (Ω)

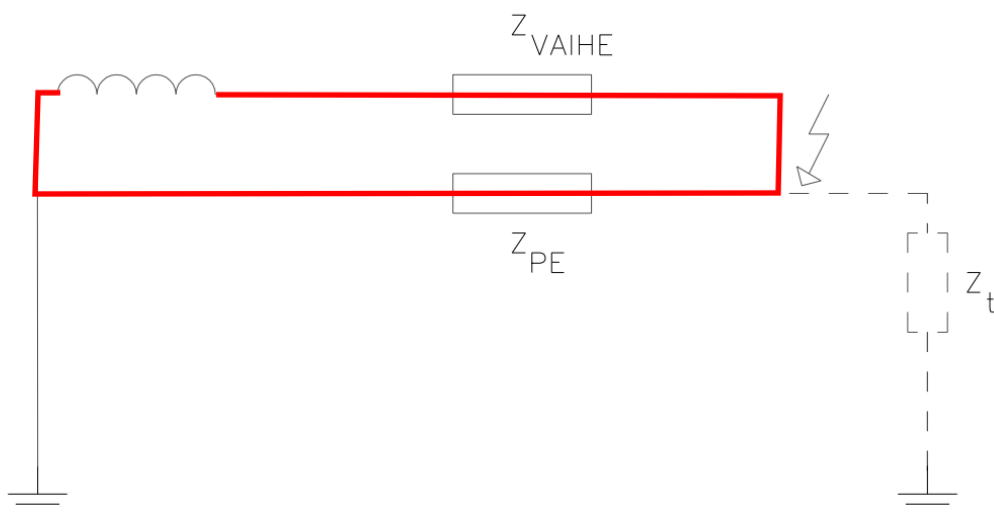
Vikavirtasuojan toimintavirraksi $I_{\Delta n}$:ksi saadaan 1,6 A yhtälöllä 1 ($300 \text{ mA} < 1,6 \text{ A}$). Taval-
linen 300 mA:n vikavirtasuoja toimii 5,1 A virralla alle 0,2 s ($> 5 \times I_{\Delta n}$), jolloin standardin
laukaisuaika 0,4 s alitetaan.

Jännitteelle alltiiden osien maadoituselektrodin suuruus vaikuttaa vikavirran ohella vi-
kajännitteeseen ja sen tulisi olla mahdollisimman lähellä tähtipisteen maadoituselektro-
din arvoa, jolloin vikajännite pysyisi pienenä.

Muuntajan ja maan väliselle maadoituselektrodille on annettu maksimiraja-arvot joissa-
kin maissa, mutta niissä on suuria maakohtaisia eroja. Esimerkiksi Saksassa maadoi-
tusimpedanssin yläraja on 2 Ω , Venäjällä ja Baltian maissa elektrodin impedanssi saa
olla enintään 4 Ω , ja Iso-Britanniassa 20 Ω . Suomessa maadoituselektrodille ei ole an-
nettu impedanssirajoja, mutta suositellaan mahdollisimman hyvää maadoitusta eli pien-
tä impedanssia. [1, s. 10; 9, s. 280; 18, s. 17; 20, s. 5; 21, s. 69.]

3.2 Syötön automaattinen poiskytkentä TN-järjestelmässä

TN-järjestelmässä vikavirtapiiri koostuu vaihejohtimesta sekä suojajohtimesta, joka
yhdistetään suoraan jännitelähteen keskipisteeseen (kuva 14 ks. seur. s.). Koskettaes-
sa vianalaiseen laitteeseen ihmisen impedanssi Z_t on rinnan maadoitusjohtimen impe-
danssin kanssa.



Kuva 14. Vikapiirin muodostuminen TN-S-järjestelmässä

Syötön automaattinen poiskytkentä perustuu riittävän nopeaan vian katkaisuun. Erilaisille suojille määritellään standardissa pienimmät oikosulkuvirrat, joilla suojat toimivat vaaditussa ajassa (0,4 tai 5 s 230 V jännitteellä ja 0,2 s 400 V:n jännitteellä). Vikavirran suuruuteen (tai pienenemiseen) vaikuttaa liittymän (sähkönsyötön) oikosulkuvirta, joka edelleen pienenee asennuskaapeleissa. TN-järjestelmässä maksimi johtopituuteen vaikuttaa nimellisjännite ja suojalaitteen vaatima oikosulkuvirta, liittymän oikosulkuvirta (muutettu impedanssiksi, sisältyy impedanssiin Z_v), sekä suojalaitteen jälkeiset vaihe- ja suojajohtimien impedanssit. [9, s. 86-104.]

Yksivaiheinen oikosulkuvirta voidaan laskea yhtälöllä 5.

$$I_k = \frac{c \times U}{\sqrt{3} \times Z} \quad (5)$$

I_k on yksivaiheinen oikosulkuvirta

c on jänniteenaleneman kerroin (0,95 pienjännitteellä)

U on pääjännite

Z on virtapiirin kokonaisimpedanssi, joka muodostuu verkon, muuntajan ja muuntajan jälkeisten johtimien impedansseista

Oikosulkuvirran yhtälön 6 avulla voidaan laskea sallittu johtopituus.

$$l = \frac{\left(\frac{c \times U}{\sqrt{3} \times I_k} - Z_v \right)}{(Z_L + Z_{PE})} \quad (6)$$

l on johtopituus (km)

c on jännitteenaleneman kerroin

U on pääjännite

I_k on oikosulkuvirta, joka aiheuttaa automaattisen poiskytkennän vaaditussa ajassa

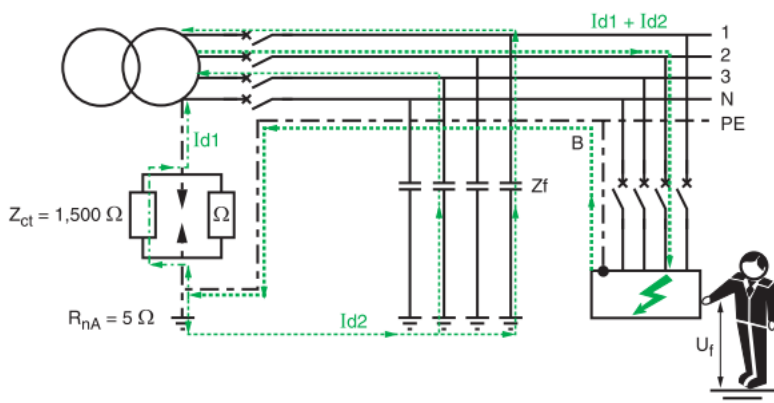
Z_v on impedanssi ennen suojalaitetta

Z_L on vaihejohtimen impedanssi (Ω/km)

Z_{PE} on suojajohtimen impedanssi (Ω/km)

3.3 Syötön automaattinen poiskytkentä IT-järjestelmässä

IT-järjestelmässä ensimmäisen vian aikana vikavirtapiiri koostuu vianalaisesta jännitteisestä johtimesta, suojajohtimesta, kaapelien kapasitanssista sekä mahdollisesta maadoitusimpedanssista (kuvat 15 ja 16 ks. seur. s.).



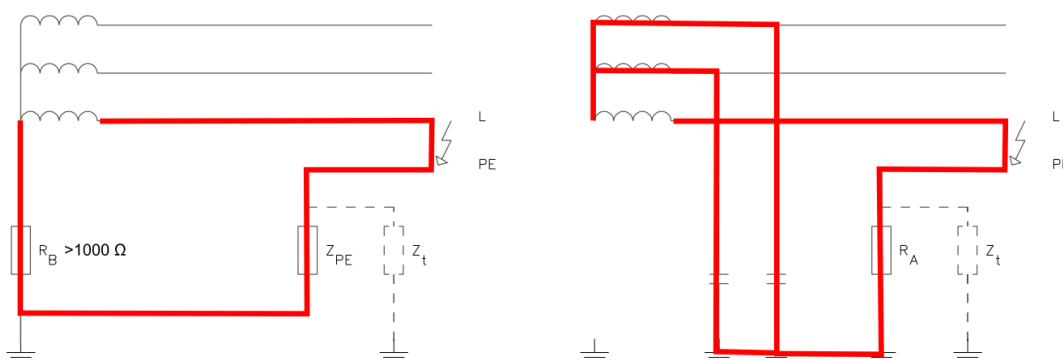
Kuva 15. Vikavirran muodostuminen IT-järjestelmässä ensimmäisen vian aikana [6, s. E3]

Ensimmäisen vian aikana vikavirta on käytännössä niin pieni, ettei siitä aiheudu vaaraa henkilöille tai materiaalille. Poiskytkentää ei välttämää tarvi jos seuraava ehto täyttyy. [5, s. 11.]

$$R_A \times I_d \leq 50 \text{ V} \quad (7)$$

R_A on jännitteelle alttiiden osien suojamaadoitusjohtimien ja maadoituselektrodin resistanssin summa (Ω)
 I_d on vikavirta (A)

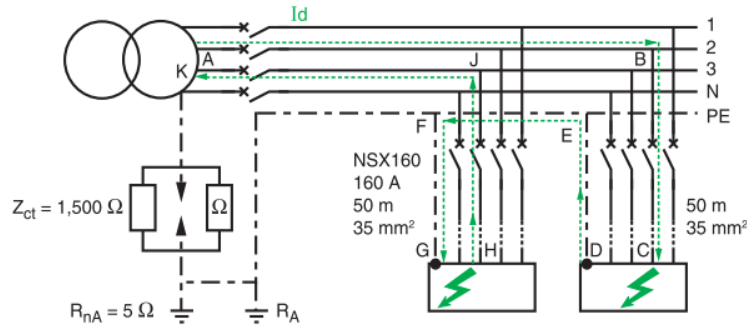
Ensimmäinen vika tulee kuitenkin havaita ja korjata tai poistaa. Tähän tarvitaan verkkoa valvova laite. Jos vika havaitaan ja poistetaan ennen seuraavaa vikaa, voidaan verkkoa pitää yllä ilman, että vika katkaisisi sähkön syötön. Käytännössä vian poistaminen toteutetaan vianalaisen laitteen erottamisella verkosta. [5, s. 11.]



Kuva 16. Vikapiirin muodostuminen maasta impedanssilla erotetussa ja maasta erotetussa verkossa

Esimerkiksi maasta erotettu verkko, jossa on 1 km uusia kaapeleita ja jonka kapasitiivinen vuotoimpedanssi Z_f on 3 500 Ω per vaihe. Ohminlain avulla vuotovirraksi saadaan 66 mA per vaihe. Vian takia terveissä johtimissa jännite kasvaa neliöjuuri kolmen verran, samalla kapasitiiviset virrat kasvavat saman verran. Kun virrat lasketaan vektoreina yhteen, saadaan 198 mA (3×66 mA). Vikajännitteeksi saadaan 1 V (198 mA \times 5 Ω), joka on selvästi turvallinen. Maadoitusimpedanssin läpikulkevaksi virraksi saadaan 153 mA, mutta tämä ei vaikuta kosketusjännitteeseen maata vasten, sillä vikavirta ei kulje elektrodin kautta.

Jos ensimmäistä vikaa ei poisteta ja tapahtuu toinen vika (eri vaiheessa), syntyy kaksoismaasulku (kuva 17 ks. seur. s.). Tällöin oikosulkuvirta on sama kuin vaiheiden välinen oikosulku TN- ja TT-järjestelmissä, mutta paljon pienempi, koska vikavirta kulkee kahden virtapiirin kautta.



Kuva 17. IT-järjestelmä toinen vika [6, s. F12]

Jos jännitteelle alltiit osat yhdistetään samaan elektrodiin, noudatetaan TN-järjestelmää vastaavia suojausjärjestelyä. Seuraavan ehdon tulee täytyä, jos ei käytetä nollajohdinta. [5, s. 12.]

$$2I_a Z_S \leq U \quad (8)$$

I_a on virta, joka aikaansaa suojalaitteen toimimisen säädetyssä ajassa
 Z_S on piirin äärijohtimen ja suojamaadoitusjohtimen sisältämän vikapiirin impedanssi
 U on äärijohtimien välinen jännite

Jos nolla- tai vastaavasti keskipistejohdin on käytössä, niin käytetään ehtoa [5, s. 12].

$$2I_a Z'_S \leq U_0 \quad (9)$$

I_a on virta, joka aikaansaa suojalaitteen toimimisen säädetyssä ajassa
 Z'_S on piirin nollajohtimen ja suojamaadoitusjohtimen sisältämän vikapiirin impedanssi
 U_0 on äärijohtimen ja nollajohtimen tai vastaavasti keskipistejohtimen välinen nimellinen jännite

Jos jännitteelle alltiit osat maadoitetaan ryhmissä tai yksittäin, noudatetaan TT-järjestelmää vastaavia suojausjärjestelyä. Seuraavan ehdon tulee täytyä [5, s. 12].

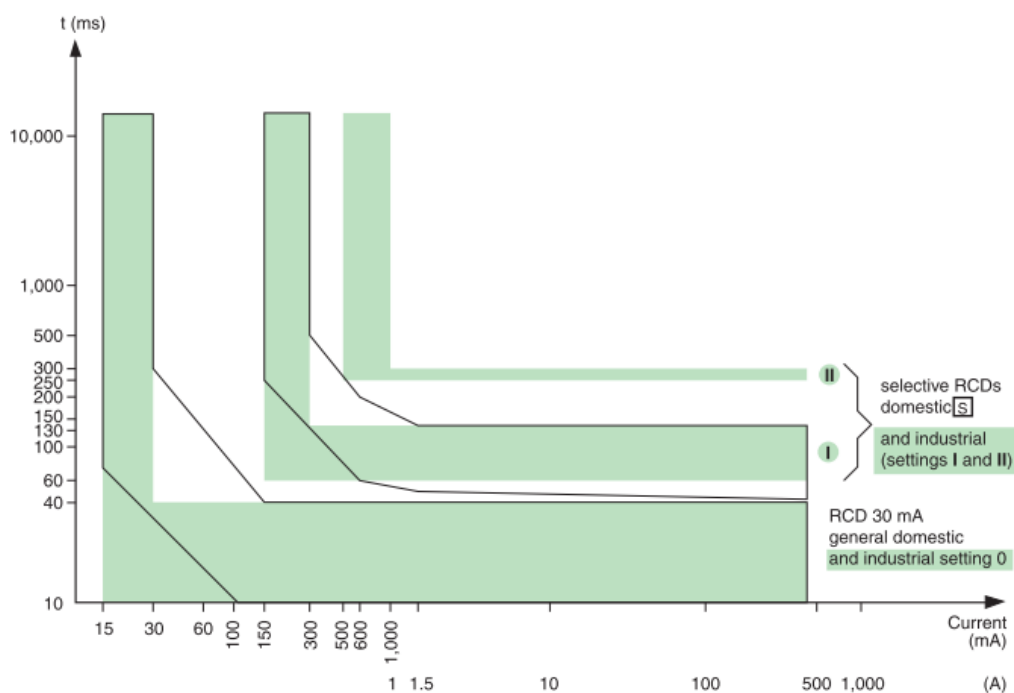
$$R_A \times I_a \leq 50 V \quad (10)$$

R_A on jännitteelle alltiiden osien kokonaismaadoitusresistanssi
 I_a on virta, joka aikaansaa suojalaitteen toimimisen TT-järjestelmissä vaaditussa ajassa

Vikatilanteessa (toinen vika) vikapiiri kulkee kahden virtapiirin kautta, joten minimoikosulkuvirta rajoittaa kaapelipituutta kaksi kertaa enemmän kuin TN-järjestelmässä.

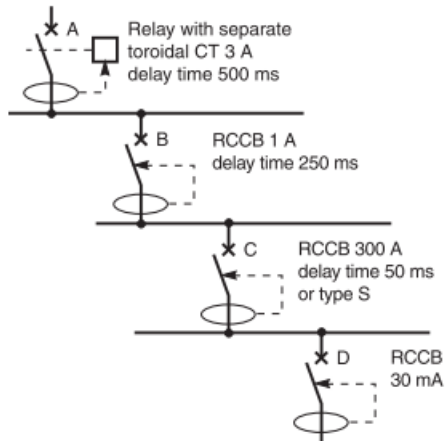
3.4 Maadoitusjärjestelmien suojauksen toteutus

TT-järjestelmän suojaus toteutetaan vikavirtasuojilla (ks. 2.1) tai vikavirtasuojan ja johdonsuojakatkaisijan yhdistelmällä. Jos asennuksessa käytetään useampaa maadoituselektrodia, tarvitaan vikavirtasuoja suojaamaan jokaista lähtöä erillistä elektrodia kohden. Vikavirtasuojien täytyy toimia keskenään selektiivisesti. Selektiivisyyteen vaikuttavat vikavirtasuojan toimintavirta sekä vikavirtasuojan tyyppi. Ylempänä jakelua voidaan käyttää aikahidastettuja vikavirtasuojakytkimiä. Esimerkiksi, jos käytetään neljää tasoa; pääkeskus, nousukeskus, jakokeskus ja ryhmäkeskus. Seuraavassa kuvassa (kuva 18) lähimpänä origoa näkyy tavallisen 30 mA:n vikavirtasuojan käyrä ilman hidastusta. Seuraavaksi tulee 300 mA:n S-tyyppin vikavirtasuoja. Hidastuksen avulla kyseiset vikavirtasuojat saadaan selektiivisiksi. [6, s. F19-F22.]



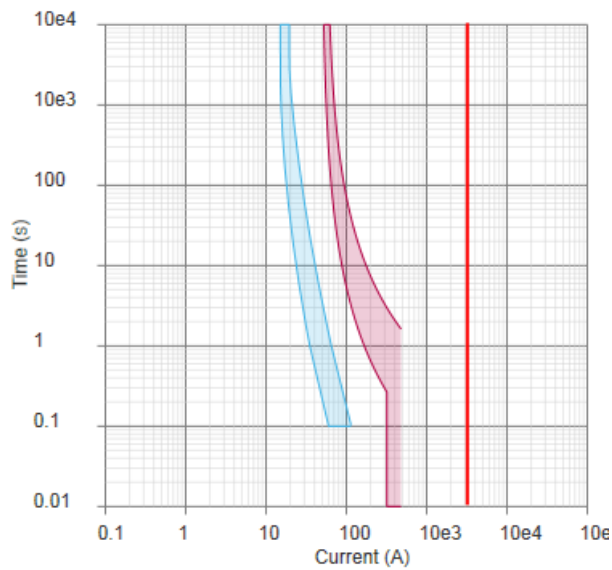
Kuva 18. Esimerkki vikavirtasuojien selektiivisyydestä [6, s. F21]

Seuraavassa kuvassa (kuva 19 ks. seur. s.) nähdään esimerkkitarkaisu vikavirtasuojien selektiivisyydestä (C-tasolla 300 mA).



Kuva 19. Esimerkki vikavirtasuojien selektiivisyydestä [6, s. F21]

TN-järjestelmässä suojaus toteutetaan johdonsuojakatkaisijoilla ja lisäsuojauksena voidaan käyttää vikavirtasuojia. Suojalaitteiden tulee olla virta- ja aikaselektiivisiä. Selektiivisyyden toteamiseen voidaan käyttää taulukoita ja virta-aika-toimintakäyriä (kuva 20) apuna. [6, s. F21.]



Kuva 20. 10 A gG sulakkeen ja 50 A johdonsuojan virta-aika-toimintakäyrä

IT-järjestelmässä voidaan käyttää valvonta- ja suojalaitteina

- eristystilan valvontalaitteita
- vikavirtavalvontalaitteita

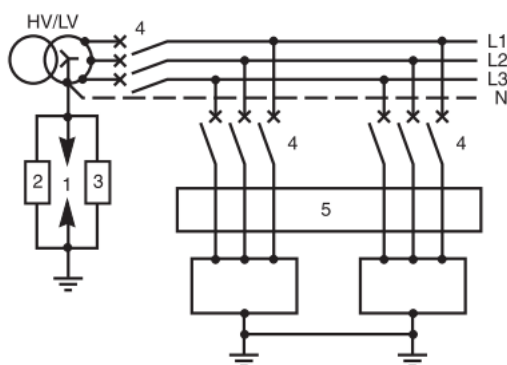
- eristysvian ilmaisujärjestelmiä
- ylivirtasuojia
- vikavirtasuojia. [5, s. 11.]

Vikavirtasuoja voi toimia jo ensimmäisessä viassa kapasitiivisten vuotovirtojen takia [5, s. 11].

IT-järjestelmän suojauksessa on, esimerkiksi

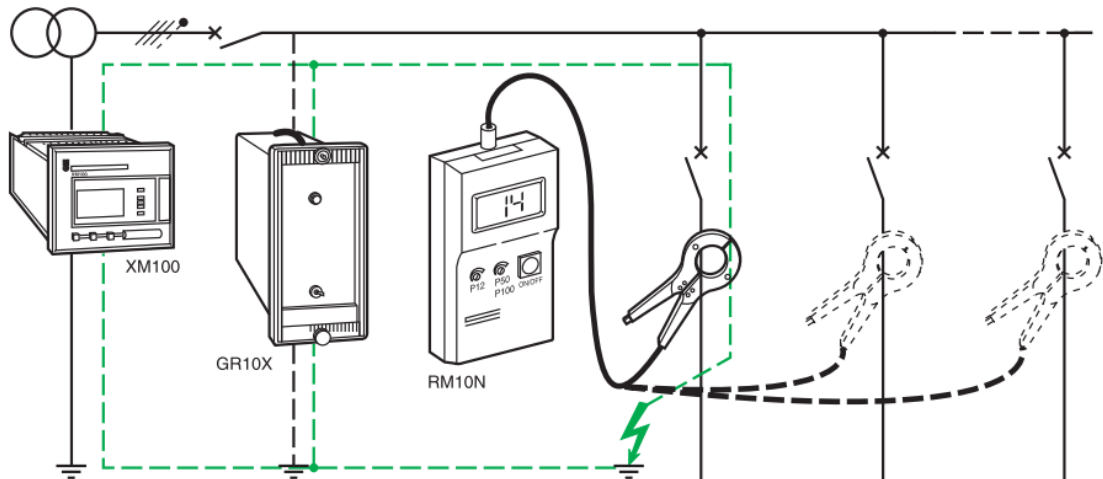
- jännitteenrajoitin (1)
- maadoitusimpedanssi (2)
- maasulkuvahti hälytyksellä (3)
- johdonsuojakatkaisija (4)
- antureista (5). (kuva 21) [6, s. F29.]

Jännitteenrajoittimen tehtävänä on suojata järjestelmää ylijännitteiltä, esimerkiksi ukkos-
sen aiheuttama. Maadoitusimpedanssin arvo määräytyy maasulkuvahdin ominaisuuksista. Impedanssin ollessa liian suuri, on vaarana, ettei maasulkuvahti huomaa vikaa. Verkossa, jonka laitteissa on paljon vuotoimpedanssia, on vaarana, ettei maasulkuvahti reagoi maasulkuun (jos maasulun virta on pieni). Vikatilanteessa anturien avulla paikallistetaan vianalainen lähtö. Maadoitusimpedanssia ei käytetä kokonaan maasta erotetussa verkossa. Johdonsuojakatkaisijat suojaavat järjestelmää toiselta vialta. [6, s. F29.]

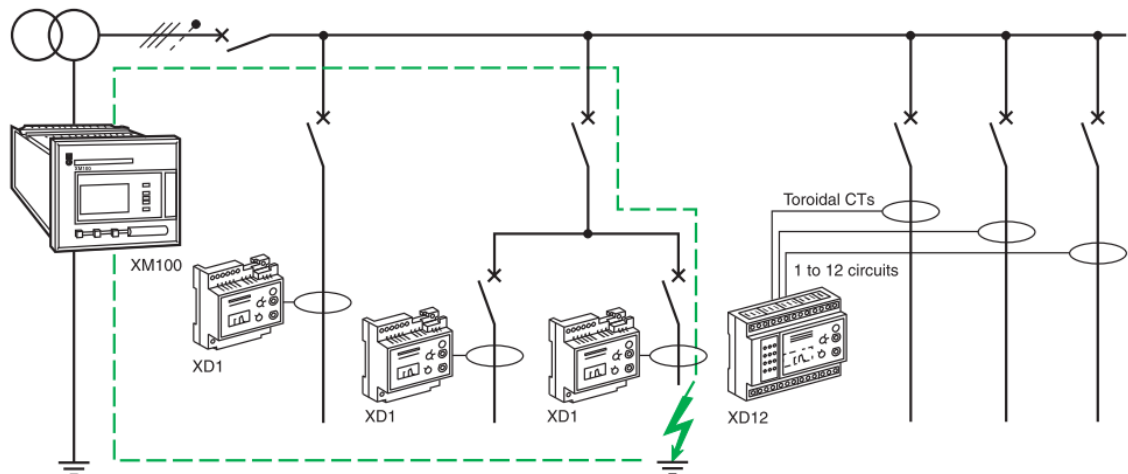


Kuva 21. IT-järjestelmän suojaus [6, s. 29].

IT-järjestelmässä ensimmäistä vikaa valvoo maasulkuvahti, joka hälyttää viasta ja/tai sulkee vianalaisen syötön pois. Tämä vaatii anturit jokaiseen lähtöön. Jos antureita ei ole tai järjestelmää ei ole automatisoitu, huoltohenkilökunnan on vian havaitsemisen jälkeen mittaamalla tai muuten selvittää vikapaikka (kuvat 22 ja 22). [6, s. F30].



Kuva 22. Esimerkki manuaalisesta vianpaikannuksesta maasta impedanssilla erotetussa verkossa [6, s. E9]

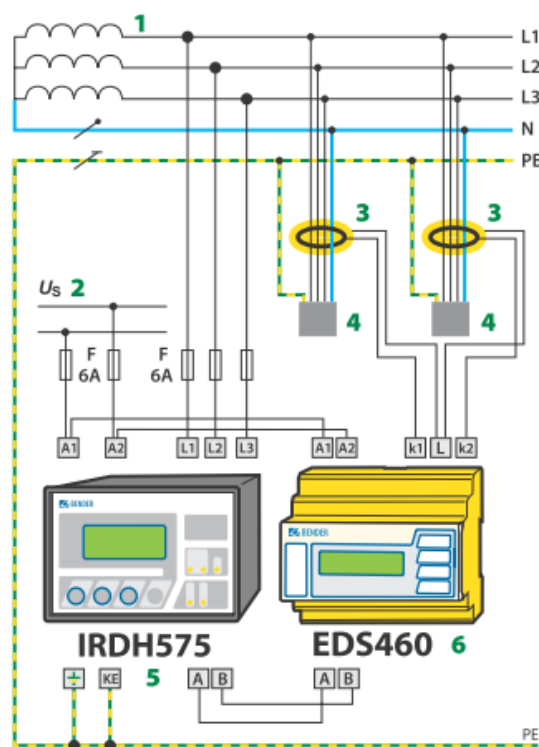


Kuva 23. Esimerkki automaattisesta vianpaikannuksesta maasta impedanssilla erotetussa verkossa [6, s. E9]

Maasulkuvahti mittaa järjestelmän eristysvastusta. Vian sattuessa impedanssi tippuu, joten maasulkuvahdin raja-arvon tulee olla aseteltu ylemmäs kuin mitä maasulkuimpedanssi tarvitsee toimiakseen. Maasulkuvahdin raja-arvot määritellään tapauskohtaisesti, sillä laitteiden vuotoimpedanssit voivat olla hyvinkin erilaisia laitteesta riippuen.

Käytännössä maasulkuvahdin raja-arvo määritellään testaamalla verkon maksimimaa-
vuotoimpedanssi ja asettamalla maasulkuvahti vähän tämän rajan yli. Tällöin saavute-
taan mahdollisimman tarkka suojaus, normaalin toiminnan häiriintymättä. Joillakin val-
mistajilla maasulkuvahti sisältää maadoitusimpedanssin. Käytännössä lähtöjä mittaavat
anturit ovat vikavirtasuojia ilman laukaisutoimintoa (summavirta). [6, s. F30].

Esimerkiksi Benderin IRDH575 (kuva 24) maasulkuvahdissa, valitaan kaksi hälytysar-
voa, ennakkohälytys ja hälytys impedanssilla erotetussa IT-järjestelmässä. Hälytystie-
dot voidaan ohjata eteenpäin hälyttimessä olevien releiden avulla. Maasulkuvahti mit-
taa maasulkuvahdin vaihejohtimien ja PE-johtimen välistä impedanssia. [22, s. 91.]

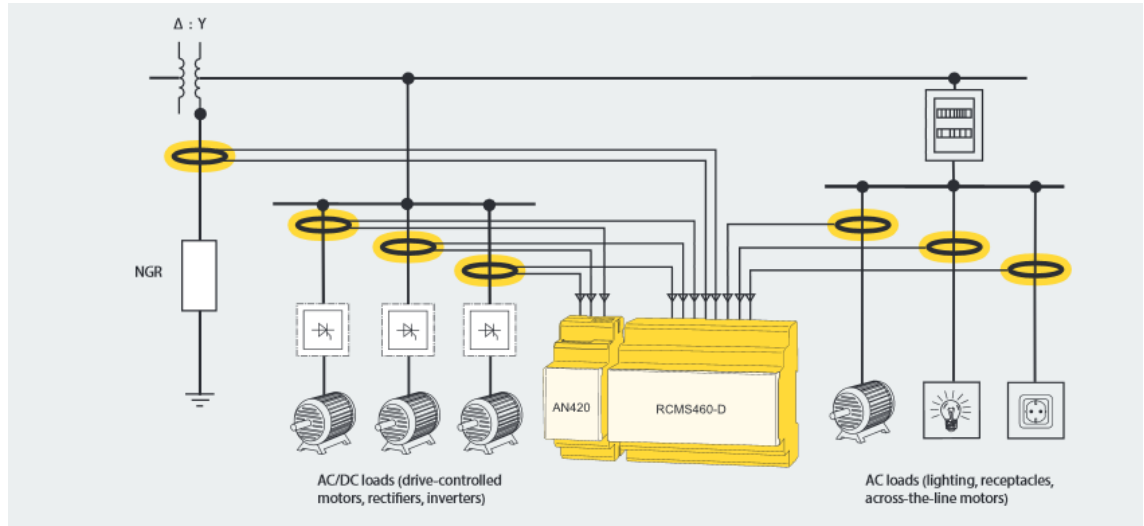


EDS system with IRDH575, EDS460 and measuring current transformers W... in a 3AC system

- 1 - 3AC, 3NAC, DC 20...575 V bzw. 3AC, 3NAC, DC 340...760 V
- 2 - U_s see ordering information, 6 A fuse recommended.
Note: Supply voltage U_s in the IT system requires two fuses.
- 3 - Measuring current transformers W...
- 4 - Outgoing circuits to the loads
- 5 - ISOMETER® IRDH575
- 6 - Insulation fault locator EDS460

Kuva 24. Maasulkuvahti ja vianpaikannin [22, s. 91]

Jos kyseessä on impedanssilla erotettu IT-järjestelmä, voidaan maadoitusvahdin yhdellä mittaussilmukalla mitata nollausjohdinta (kuva 25). Joillakin valmistajilla maadoitusvahtiin on integroitu impedanssivastus, tällöin ei kyseistä johdinta tarvitse mitata.



Kuva 25. Maasulkuvahti maasta impedanssilla erotetussa verkossa [22, s. 19]

Toinen vika IT-järjestelmässä vastaa TN-järjestelmän vikaa ja vian katkaisu hoidetaan johdonsuojakatkaisijoiden avulla. Vikapiiri kulkee kahden virtapiirin kautta ja siksi maksimijohtopituus on vain puolet TN-järjestelmän vastaavasta, kuten seuraavista yhtälöistä (yhtälöt 11 ja 12) nähdään. IT-järjestelmässä, jossa käytetään nollausjohdinta, johtopituus lasketaan seuraavalla yhtälöllä. [6, s. F33.]

$$l = \frac{\left(\frac{c \times U}{\sqrt{3} \times I_k} - Z_v\right)}{2(Z_L + z_{PE})} \quad (11)$$

l on johtopituus (km)

c on jännitteenaleneman kerroin

U on pääjännite

I_k on oikosulkuvirta, joka aiheuttaa automaattisen poiskytkennän vaaditussa ajassa

Z_v on impedanssi ennen suojalaitetta

Z_L on vaihejohtimen impedanssi (Ω/km)

z_{PE} on suojajohtimen impedanssi (Ω/km)

Järjestelmässä, jossa ei käytetä nollausjohdinta, lasketaan johtopituus seuraavalla yhtälöllä (yhtälö 12 ks. seur. s.).

$$l = \frac{\left(\frac{c \times U}{I_k} - Z_v\right)}{2(z_L + z_{PE})} \quad (12)$$

l on johtopituus (km)

c on jännitteenaleneman kerroin

U on pääjännite

I_k on oikosulkuvirta, joka aiheuttaa automaattisen poiskytkennän vaaditussa ajassa

Z_v on impedanssi ennen suojalaitetta

z_L on vaihejohtimen impedanssi (Ω/km)

z_{PE} on suojajohtimen impedanssi (Ω/km)

4 Maadoitusjärjestelmän esimerkkilaskelmat

Laskelmista huomataan, että TT-järjestelmässä kaikissa suojalaitteissa täytyy käyttää vikavirtasuojatoimintaa, koska maasulkuvirrat jäävät niin pieniksi, ettei katkaisijan suojaehdot toteudu.

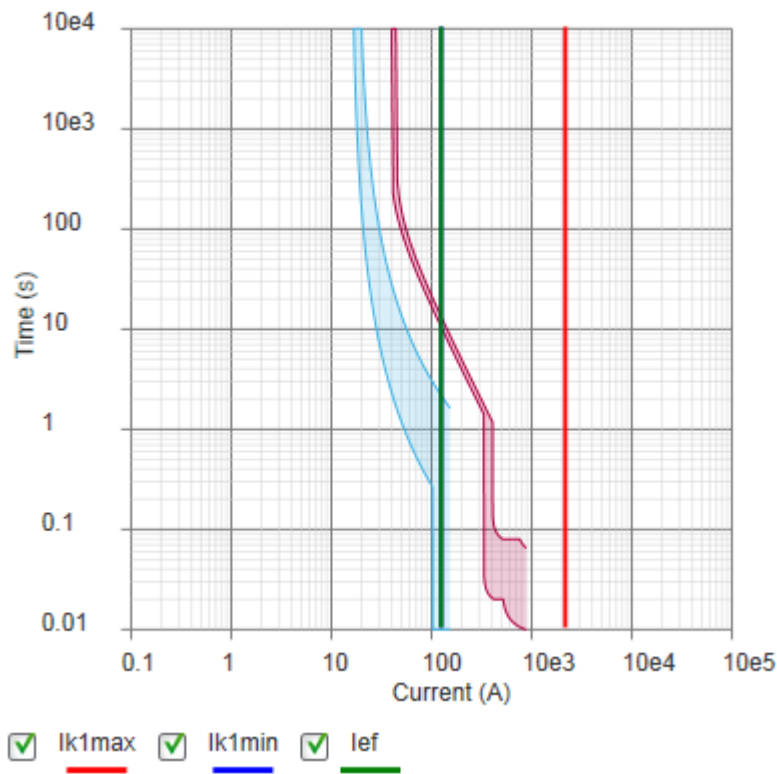
Esimerkkilaskelmassa vertaillaan TN-C-S- ja TT-järjestelmiä kuvitteellisessa verkossa (liite 1). Muuntaja TR1 syöttää muuntajakeskusta TSLV1:stä, jossa on varaus myös toiselle muuntajalle. Muuntaja ja TSLV1 sijaitsevat eri rakennuksessa kuin itse kuorma. Pääkeskus MDB1 sijaitsee kiinteistön kellarikerroksessa ja pääkeskuksen syötön pituus on 100 m. Keskuksen LDB2 kuvaa kiinteistön kaukaisinta pistorasia- ja valaistuskeskusta, esimerkiksi kiinteistön korkeimmassa kerroksessa sijaitseva keskus. Muita tarkasteltavia kohteita on moottorikeskus sekä lähimpänä oleva pistorasia- ja valaistuskeskus, esimerkiksi viereisessä huoneessa sijaitseva keskus.

Verkko on kytketty 10 kV verkkoon, jonka oikosulkuvirtana on 8 kA. Muuntaja TR1 on 2000 kVA muuntaja ja sen suhteellinen oikosulkujännite u_k on 6 %. Muuntaja on 60 % kuormituksessa, LDB1 200 kW kuorma, LDB2 28 kW kuorma sekä HDB1 100 kW kuorma.

Kolmivaiheoikosulkuvirta ja yksivaiheinen vaiheen ja nollan välinen oikosulkuvirta pysyy samana molemmissa järjestelmissä, koska vikapiirit eivät kulje suojamaata tai maata pitkin. Maasulkuvirta on huomattavasti pienempi TT-järjestelmässä kuin TN-järjestelmässä. Tämä onkin yksi TT-järjestelmän eduista TN-järjestelmään verrattuna.

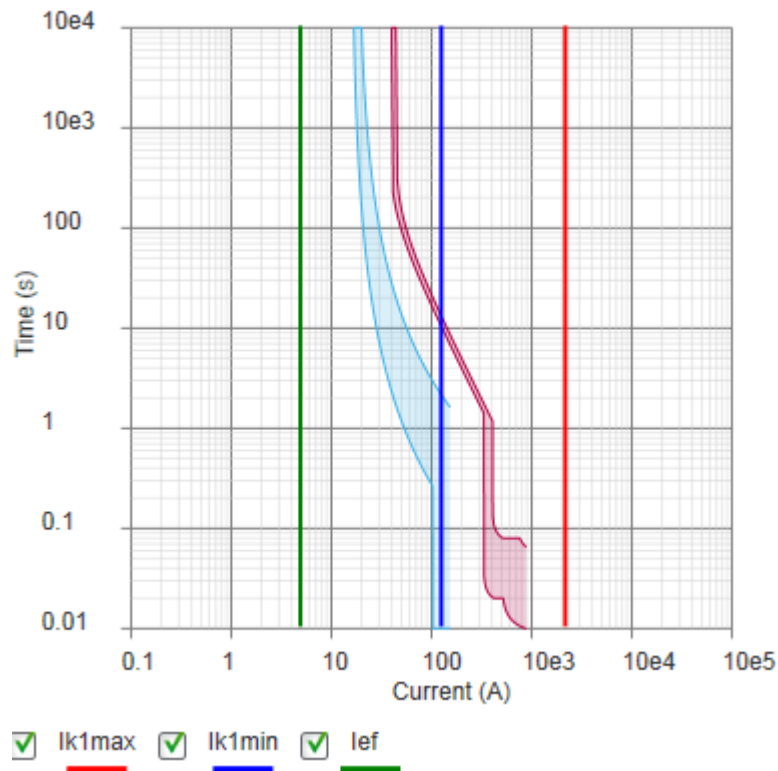
Suurilla kuormilla maadoitusjärjestelmien ero johtopituuksista vähenee, koska kuormituksen kasvaessa jännitteenalenema muodostuu hallitsevaksi mitoittavaksi tekijäksi kaapelipituuksille. Kun käytössä on pienemmät kuormat tai kuormitusta on jaettu eri muuntajille ja/tai maadoitusjärjestelmille, saavutetaan TT-järjestelmän toinen etu, mahdollisuus pidemmille kaapelimatkoille. Oikosulkusuojauksen ehtojen täytyminen on ongelmana varsinkin kohteissa, joissa TN-järjestelmässä on pitkiä kaapelivetoja pienillä kaapeleilla.

Pisimmän pistorasiakuorman toimintakäyriä tarkastellaan, kun johtimen pituudeksi asetetaan 100 m. TN-järjestelmässä (kuva 26) suojaus ei enää toteudu, koska maasulkuvirta (I_{ef} , vihreä viiva) ei täytä johdonsuojakatkaisijan (sininen viiva) vaatimaa oikosulkuvirtaa.



Kuva 26. Esimerkkitalanne TN-S-järjestelmässä

Tarkasteltaessa samaa tilannetta TT-järjestelmässä (kuva 27 ks. seur. s.), huomataan, ettei johtimen pituus vaikuta suojaukseen. Vikavirtasuojasuojaa kuormaa yhtä hyvin kuin pienemmälläkin johtopituudella.



Kuva 27. Esimerkkutilanne TT-järjestelmässä

Käyttäessä TT-järjestelmää TN-järjestelmän sijasta, voidaan joissain tapauksissa käyttää pienempiä poikkipintoja kaapeleissa, jos mitoitus on perustunut oikosulkuarvoon. Tällöin myös oikosulkuvirrat pienenevät.

5 Yhteenveto

Työssä selvitettiin eri maadoitusjärjestelmien yleinen periaate ja pääkohdat. Yleisempiä valintakriteereitä käytiin läpi varsinkin henkilösuojauksen kannalta. Tämän jälkeen tarkasteltiin eri maadoitusjärjestelmiä henkilösuojauksen kannalta ja toimintaa maasulku tilanteessa. Lopuksi TN- ja TT-järjestelmiä vertailtiin esimerkkilaskelmien avulla.

Maadoitusjärjestelmän valinnassa on hyvä muistaa, että kaikkia maadoitusjärjestelmiä voidaan käyttää samassa asennuksessa. Tällöin saavutetaan paras turvallisuus ja jännitteen saatavuus sähköverkossa.

Valittaessa maadoitustapaa tulee tarkistaa, ettei maadoitusjärjestelmää ole määritelty pois (esimerkiksi asiakkaan ohjeistuksella), tai ettei se ole kielletty paikallisissa

standardeissa tai lainsäädännössä. Tulee myös tarkistaa, mitä maadoitusjärjestelmää kyseisessä maassa käytetään.

Käyttäjän ja tilaajan kanssa tulee keskustella vaatimuksista ja resursseista. Kustannuksia kannattaa ajatella elinkaarimallin avulla. Investointikustannuksiltaan halpa ratkaisu saattaa tulla kalliiksi vikatilanteessa, sillä vahinkojen laajuus on yleensä suhteessa vikavirran suuruuteen. Kohteen ominaisuuksista tulisi pohtia ainakin seuraavia asioita.

- Onko tarvetta jatkuvalla sähkön syötölle?
- Onko huoltohenkilökuntaa (kohteessa) käytössä?
- Millainen on tulipaloriski?

Viimeisenä tarkistetaan verkon ja kuormien luonne. Valittiinpa, mikä maadoitusjärjestelmä tahansa, se on turvallinen ihmiselle standardien mukaan toteutettuna.

Eryteisesti verkoissa, joissa on pienet oikosulkuvirrat korostuu maadoitusjärjestelmän valinnassa käytettävät johtopituudet. IT-järjestelmässä oikosulkuvirran rajoittava tekijä on kaksinkertainen verrattuna TN-järjestelmään. TT-järjestelmässä oikosulkuvirran suuruus ei vaikuta käytettävään johtopituuteen. Suuremman oikosulkuvirran verkoissa vaikutus pienenee, koska tällöin vaikuttavaksi tekijäksi nousee jännitteen alenema.

IT-järjestelmä on yleensä muita järjestelmiä kalliimpi toteuttaa, mutta sillä saavutetaan paras sähkön jatkuvuus verkossa, sekä todella pieni oikosulkuvirta ensimmäisen vian aikana.

TN-järjestelmä ei vaadi ylivirtasuojauksen lisäksi erityisiä suojalaitteita toimiakseen, mutta asennusstandardeissa vaaditaan vikavirtasuojia moniin paikkoihin (esimerkiksi pistorasiaryhmiin). Suojausehtojen täytyessä TN-järjestelmä on varmatoiminen ja se soveltuu kohteisiin, joissa on esimerkiksi paljon vuotovirtaa tai tietoteknisiä laitteita.

Lähteet

- 1 Lacroix, Bernard & Calvas, Roland. 1995. n°173 earthing systems worldwide and evolutions. Grenoble: Merlin Gerin.
- 2 SFS 6000-1. Pienjännitesähkösennukset. 2012. Osa 1: Peruseriaatteet, yleisten ominaisuuksien määrittely ja määritelmät. Helsinki: Suomen Standardisoimiliitto.
- 3 IEC 60364-1. Low-voltage electrical installations. 2009. Part 1: Fundamental principles, assessment of general characteristics, definitions. Geneva: International Electrotechnical Commission.
- 4 SP 30:2011. National Electrical Code 2011. 2011. Bureau of Indian standards. New Delhi: Bureau of Indian Standards.
- 5 SFS 6000-4-41. Pienjännitesähkösennukset.2012. Osa 4-41: Suojausmenetelmät. Suojaus sähköiskulta. Helsinki: Suomen Standardisoimiliitto.
- 6 Tison, Etienne. 2013. Electrical installation guide 2013. Valence: Schneider Electric.
- 7 Willeke, Ralf. 2009. Application Manual – Part 1: Basic Data and Preliminary Planning. Nuremberg: Siemens.
- 8 Kamel, Rashad Mohammedeen & Chaouachi, Aymen & Nagasaka, Ken. 2011. Comparison the Performances of Three Earthing Systems for Micro-Grid Protection during the Grid Connected Mode: Scientific Research.
- 9 D1-2012. 2013. Espoo: STUL ry.
- 10 SFS 6000-5-54. Pienjännitesähkösennukset. 2012. Osa 5-54: Sähkölaitteiden valinta ja asentaminen. Maadoittaminen ja suojajohtimet. Helsinki: Suomen Standardisoimiliitto.
- 11 SFS 6000-4-44. Pienjännitesähkösennukset. 2012. Osa 4-44: Suojausmenetelmät. Suojaus jännitehäiriöiltä ja sähkömagneettisilta häiriöiltä. Helsinki: Suomen Standardisoimiliitto.
- 12 Jullien, François & Heritier, Isabelle. 1999. n°178 The IT earthing system (unearthed neutral) in LV. Grenoble: Schneider Electric.
- 13 Lacroix, Bernard & Calvas, Roland. 2004. n°172 System earthing in LV. Grenoble: Schneider Electric.

- 14 Willeke, Ralf. 2009. Application Manual – Part 2: Draft Planning. Nuremberg. Siemens.
- 15 Kasikci, Ismail. 2002. Short Circuits in Power Systems. Weinheim: Wiley.
- 16 ABB SACE. 2010. Electrical installation handbook Protection, control and electrical devices. Bergamo: ABB.
- 17 EDS 06-0017. 2012. Engineering design standard. Customer installation earthing design. London: UK power networks.
- 18 EDS 06-0016. 2012. Engineering design standard. LV network earthing design. London: UK power networks.
- 19 SFS 6001. 2009. Suurjännitesähköasennukset. Helsinki: Suomen Standardisointiliitto.
- 20 Delaballe, Jacques. 2002. n°177 Disturbances in electronic systems and earthing systems. Grenoble: Schneider Electric.
- 21 Правила устройства электроустановок. 2012. Все действующие разделы ПУЭ-6 и ПУЭ-7.
- 22 The Power in Electrical Safety. 2013. Grünberg: Bender GmbH & Co.KG.

Esimerkkilaskelmat TN- ja TT-järjestelmillä

