



VAASAN AMMATTIKORKEAKOULU
VASA YRKESHÖGSKOLA
UNIVERSITY OF APPLIED SCIENCES

Jarno Peltoniemi

TAAJUUSMUUTTAJAN YLIJÄNNI-
TESUOJAN VAATIMUKSET JA SUUN-
NITTELU

Tekniikka ja liikenne
2012

ALKUSANAT

Opinnäytetyö on tehty Vaconin Vaasan pieni- ja keskitehoisten taajuusmuuttajien tuotekehityksessä keväällä 2012, Vaasan ammattikorkeakoulun tekniikan ja liikenteen yksikön koulutusohjelman mukaisesti.

Opinnäytetyön valvojina toimivat Tekniikan ja liikenteen yksiköstä lehtori Timo Männistö sekä Vaconilta elektroniikan pääsuunnittelija Janne Pakkala.

Kiitän kaikkia opinnäytetyössä auttaneita henkilöitä. Erityisesti haluan kiittää Timo Männistön ja Janne Pakkalan lisäksi Nicklas Södöä, Ari Ristimäkeä sekä Petri Korria tarpeellisen avun annosta.

Vaasassa 15.5.2012

Jarno Peltoniemi

VAASAN AMMATTIKORKEAKOULU
Sähkötekniikan koulutusohjelma

TIIVISTELMÄ

Tekijä	Jarno Peltoniemi
Opinnäytetyön nimi	Taajuusmuuttajan ylijännitesuojauksen vaatimukset ja suunnittelu
Vuosi	2012
Kieli	suomi
Sivumäärä	63+6 liitettä
Ohjaaja	Timo Männistö

Opinnäytetyön lähtökohtana toimi taajuusmuuttajavalmistaja Vaconin tuotekehitysprojekti. Projektin tarkoituksena oli selvittää taajuusmuuttajaan kohdistuvien transienttiylijännitteiden suuruudet sekä suunnitella kolmivaihettaajuusmuuttajalle esimerkkisuojaustapa. Ongelmaksi työn aikana kehittyi transienttiylijännitteiden yleisesti vähäinen tutkimusmäärä pienjännitteellä.

Taajuusmuuttajan ylijännitekesto tulee testata standardin 61000-4-5 asettamalla metodilla. Todellista ylijännitekeston tarvetta lähdettiin tutkimaan, koska standardin vaatimukset ovat hyvin matalat. Kokemuksen perusteella oli oletettavissa, että verkossa esiintyy standardin vaatimuksia suurempia ylijännitetransientteja. Työssä mitoitettut suojauskytkennät testattiin haafelyn transienttiylijännite testauslaitteistolla sekä erillisellä testilaudalla standardia 61000-4-5 noudattaen. Työssä tutkittavat suojaustasoon ja suojakomponenttien elinikään vaikuttavat tekijät sekä suojauksessa käytettävät suojausesimerkit ja komponentit ovat mitoitettu 690 voltin verkolle.

Tutkimuksista on analysoitavissa, että verkossa esiintyy ylijännitetransientteja 1 kV:sta aina 6 kV:iin. Transienttiylijännitteiden määrää verkossa on mahdoton arvioida, sillä se on hyvin riippuvainen muista verkon laitteista sekä ilmastollisten ylijännitteiden määrästä.

VAASAN AMMATTIKORKEAKOULU
UNIVERSITY OF APPLIED SCIENCES
Electrical engineering

ABSTRACT

Author	Jarno Peltoniemi
Title	The frequency converter surge protection requirements and design
Year	2012
Language	Finnish
Pages	63 + 6 Appendices
Name of Supervisor	Timo Männistö

The subject of this thesis was a development project for Vacon. The objective of this thesis was to find out the tolerance of overvoltage transients of a frequency converter and to design a surge protection device, for example, for a three phase frequency converter. Problem in this test turned out small amount of investigation of overvoltage transients in low voltage network

The overvoltage tolerance of a frequency converter must be tested in accordance with the standard 61000-4-5. It is known that the network includes higher overvoltage transients than standard defines. Therefore, there was a need to research how high overvoltage transients occur in the network. The problem turned out to be a small number of studies on overvoltage transients in low voltage network. All the designed surge protection couplings were tested with the Haefely surge tester and the separate test board in accordance with the standard 61000-4-5. In this thesis all examples, test and surge protective devices were defined to a 690 voltage network.

Based on the thesis it is almost possible to say that overvoltage transients between 1 kV- 6 kV can occur in the network. The number of overvoltage transients is not possible to define because it depends on other equipment in the network and number of climatic overvoltages.

Keywords overvoltage protection, frequency converter, IEC 61000-4-5

SISÄLLYS LUETTELO

TIIVISTELMÄ	3
ABSTRACT	4
KUVA JA TAULUKKOLUETTELO	7
LIITELUETTELO	9
1 JOHDANTO.....	12
2 YRITYSESITTELY	13
3 TAAJUUSMUUTTAJAN PÄÄPIIRI	14
3.1.1 Tasasuuntaaja	14
3.1.2 Välipiiri	15
3.1.3 Vaihtosuuntaaja.....	15
4 YLIJÄNNITTEET	17
4.1 Ylijänniteiden syyt ja luokittelu.....	17
4.2 Pienitaajuiset ylijännitteet.....	19
4.2.1 Maasulkujännitteet	20
4.2.2 Kuormituksen irtikykytyminen ja ferranti-ilmiö.....	21
4.3 Loivat transienttiylijännitteet	22
4.3.1 Katkaisija kapasitiivista virtaa katkaistaessa.	23
4.3.2 Transienttiylijännite oiko- sekä maasulkutilanteessa.....	23
4.4 Jyrkät ylijännitetransientit.....	24
4.4.1 Suoraan johtimeen kohdistuvat salamaniskut	24
4.4.2 Johtimeen indusoituvat ylijännitteet.	25
4.4.3 Maapotentiaalin nousu	25
4.4.4 Johtuminen siirtoverkosta	26
5 SUOJAUS.....	27
5.1 Standardi IEC 61800-3	27
5.2 Standardi IEC 61000-4-5	27
5.3 Miksi suojakomponentteja tarvitaan	28
5.3.1 Esimerkki tasasuuntauskomponenttiin kohdistuvasta ylijännitteestä	28

6	SUOJAKOMPONENTIT	30
6.1	Kaasupurkausputki.....	30
6.2	Varistori	31
6.3	Purkausdiodi	31
7	SUOJAUSTASON MÄÄRITYS	33
7.1	Kytkentätilanteen tarkastelu.....	34
7.2	Erikoistapaukset.....	36
7.3	Sulakkeen palamisesta aiheutuvat ylijännitteet	37
7.4	Ilmastollisen ylijännitteen aiheuttamat ylijännitetransientit	40
7.5	UNIPEDA:n ilmoittamat ylijännitteet verkossa.....	41
7.6	Aseteltavan suojaustason vaatimuksien yhteenveto	41
8	ESIMERKKI YLIJÄNNITESUOJAUKSESTA.....	43
8.1	Suojauskomponenttien määrittely	43
8.2	Varistoreiden kolmioonkytkentä.....	44
8.3	Varistoreiden tähteenkytkentä	45
8.4	Varistorit tasajännitepuolella	46
8.5	Varistoreiden mitoitus vaiheiden välille	46
8.6	Varistorin mitoitus vaiheiden ja maan välille	49
8.7	Varistoreiden eliniän lisäys.....	50
8.7.1	Eliniän vertailu laskujen perusteella	51
8.7.2	Varistorin mitoitukseen vaikuttavat ympäristömuutokset	52
8.8	Varistoreiden mittaus	53
8.8.1	Vaiheiden välisten ylijännitteiden suojaustason mittaus	54
8.8.2	Vaiheen ja maan välisten ylijännitteiden suojaustason mittaus ..	55
8.8.3	Varistoreiden eliniät mitatuilla arvoilla	56
8.8.4	Induktanssin vaikutus suojaustasoon	59
9	YHTEENVETO	61
	LÄHDELUETTELO.....	63

Kuva ja taulukkoluetelo

Kuva 1. Taajuusmuuttajan pääpiiri	14
Kuva 2. Sini-kolmiovertailu. /9/	16
Kuva 3. Ylijännitteiden tyypilliset aaltomuodot /2, 244/	19
Kuva 4 Jännitteen nousu alku- ja loppupäissä /2, 251/	22
Kuva 5. Moduulin SKIIP 23NAB125V1 sisältämät komponentit. /16/	28
Kuva 6. Kaasupurkausputken piirrosmerkki	30
Kuva 7. Varistorin piirrosmerkki.	31
Kuva 8. Purkausdiodin piirrosmerkki.....	31
Kuva 9. Suojauskomponenttien leikkausmuodot	32
Kuva 10. Tyypillinen kytkentäylijännitteen muoto /8, 33/	33
Kuva 11. Ylijännitteen nousuaikojen jakautuminen /8, 34/	34
Kuva 12. Kytkentäylijännitteiden keston jakaantuminen /8, 35/	34
Kuva 13. Katkaisijan aiheuttamat ylijännitepiikit 230/400V verkossa /8, 36/.....	35
Kuva 14. Todellisten mittausten tulokset käyrästä. /8, 88/	36
Kuva 15. Erikoistilanteissa kokoojakiskossa havaitut ylijännitteet. /8, 86/	37
Kuva 16. Transienttiylijännite kun 100 ampeerin sulake hajoaa /8, 92/	38
Kuva 17. Sulakkeiden aiheuttamat ylijännitteet. /8, 93/	39
Kuva 18. Puolijohdesulakkeiden aiheuttamien ylijännitteiden suuruudet /6/	40
Kuva 19. UNIPED:n arvio sähköverkon transienttien määrästä /19/	41
Kuva 20. Ylijännitesuojalta vaadittavat arvot eri järjestelmissä /13, 15/	43
Kuva 21. Littelfusen suunnittelusääntö kolmioon kytketyille varistoreille. /10/ .	44
Kuva 22. Littelfusen suunnittelusääntö tähteenkytketyille varistoreille /11/	45
Kuva 23. Varistorin toimintakyky lämpötilan suhteen /15/	53
Kuva 24. Testeissä käytetty testilevy	54
Kuva 25. Varistoreiden suojaustasot suhteessa transienttiylijännitteisiin.....	55
Kuva 26. Transienttiylijännite kohdistuessa välille L1-PE	56
Kuva 27. Varistorin läpikulkeva virta transienttiylijännitteen suhteen	57
Kuva 28. Epcosin arvio varistoreiden vanhenemisaika virran suhteen /14/.....	58
Kuva 29. Induktanssin vaikutus suojaustasoon.....	60

Taulukko 1. Varistorin mitoitusarvot vaiheiden välille	47
Taulukko 2. Varistorin mitoitusarvot vaiheiden ja maan välille	49
Taulukko 3. Varistoreiden kestot transienttiylijännitteen suhteen	59

LIITELUETTELO

Liite 1 Standardin 61000-4-5 mukaiset aaltomuodot /20/.....	64
Liite 2 Ote Semikron SKIIP23NAB126V1 datalehdestä /14/.....	65
Liite 3 Virtajännite taulukko Epcos S25 kokoluokan varistoreille /7/.....	66
Liite 4 Virtajännite taulukko Epcos S20 kokoluokan varistoreille /6/.....	67
Liite 5 S20K440 Varistorin kuormitustaulukko /6/.....	68
Liite 6 S25K440 Varistorin kuormitustaulukko /7/.....	69

LYHENTEET

A	Pinta-ala, alueen koon mitta
d	Etäisyys
h	Korkeus, pystysuuntainen mitta
Hz	Hertsi, taajuuden yksikkö
I	Virta, sähkön varauksen määrä
IGBT	Suuritehoinen bipolaaritransistori, tehokuoli johde
k	Maasulkukerroin
kA	Kiloampeeri, virran yksikkö
kV	Kilovoltti, jännitteen yksikkö
l	Pituus, etäisyyden mitta
m	Metri, pituuden yksikkö
m ²	Neliömetri, pinta-alan johdannaisyksikkö
mm ²	Neliömillimetri, pinta-alan yksikkö
ms	Millisekunti, ajan yksikkö
Mvar	Mega var, loistehon yksikkö
Ng	Salamoiden tiheys (kpl/km ² /a)
p.u.	Per unit-suhteellisarvo
PWM	Pulssinleveysmodulaatio
U	Jännite
û	Jännitteen huippuarvo
U _{LL}	Moduloitu pääjännite
U _m	Highest voltage for equipment, suurin sallittu jännite
U _{RMS}	Jännitteen tehollisarvo
U _S	Syöttöjännite

U_{UN}	Vaiheeseen U moduloitu jännite
U_{VN}	Vaiheeseen V moduloitu jännite
V	Voltti, jännitteen yksikkö
V/s	Voltia per sekunti, jännitteen nousuajan yksikkö
VAC	Alternating current voltage, jännitteen yksikkö
VDC	Direct current voltage, tasajännitteen yksikkö
V_{DC}	Varistorin tasajännitteen kynnysjännite
V_{RMS}	Varistorin vaihtojännitteen kynnysjännite
V_{RRM}	Diodin hetkellinen maksimi jännitekestoisuus
V_S	Transienttijännitteen suuruus
V_{SIOV}	Varistorin suojausmarginaali
X_d	Pitkittäisreaktanssi
X_q	Poikittäisreaktanssi
Z_0	Johtimen impedanssi
Z_k	Oikosulkuteho
$Z_{Lähde}$	Johtimen impedanssi
α	Vaihekulma
Ω	Ohmi, resistanssin, reaktanssin ja impedanssin yksikkö

1 JOHDANTO

Tässä insinööriyössä käsitellään taajuusmuuttajan transienttiylijännite kestoisuuden tarvetta, sekä mahdollista suojausmenetelmää. Taajuusmuuttajaa käytetään yleisesti sähkömoottoreiden ohjauksessa sekä uusiutuvanenergian tuotannossa.

Taajuusmuuttajan käyttökohde sijoittuu useimmiten teollisuuteen, jonka sähköverkossa ylijännitetransientteja esiintyy muuta verkkoa enemmän, koska saman muuttajan takana on usein monia katkaisijoita ja kontaktoreita.

Insinööriyön tavoite oli selvittää verkossa esiintyvien transienttiylijännitteiden suuruudet ja kehittää niiden pohjalta ylijännitesuojauksen rajat, jotka tahdottiin täyttää, jotta voitaisiin tarjota laitteen käyttäjälle käyttövarmuutta sekä kehittää taajuusmuuttajalle transienttiylijännitesuojaus.

Ylijännitesuojauksen tarve syntyi, kun uuden sukupolven taajuusmuuttajassa kuristin siirrettiin tasasuuntausmoduulin tasajännitepuolelle.

Transienttiylijännite testaamiseen on olemassa standardit, mutta niissä varmenneetaan laitteen transienttiylijännite kestoisuus melko pienellä jännitteellä.

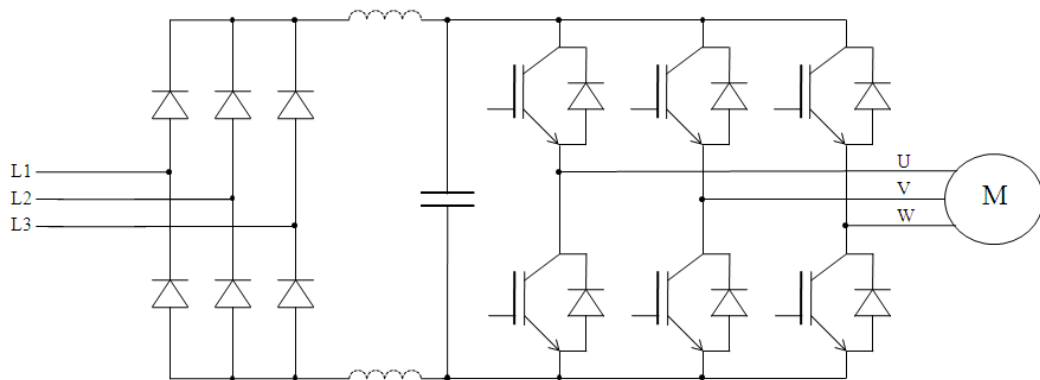
2 YRITYSESITTELY

Vacon perustettiin vuonna 1993 kolmentoista ihmisen toimesta. Vaconin tavoite oli heti alusta pitäen tulla yhdeksi suurimmista taajuusmuuttajatoimittajista. Vaconin valttina taajuusmuuttajamarkkinoilla on sen keskittyminen ydinosamiseen, Vaconin toiminta keskittyy pelkästään taajuusmuuttajien suunnitteluun ja valmistukseen.

Vuonna 1995 Vaconin tehdas avattiin Runsorintie 5:een jolloin tuotiin markkinoille ensimmäinen CX-tuoteperhe. Vuonna 1998 avatiin uudet toimisto- ja tuotantotilat Runsorintie 7:ään. Vuonna 2000 Vacon listautui Helsingin pörssiin sekä toi markkinoille toisen sukupolven NX-tuotesarjan. Vuonna 2007 Vacon julkisti ensimmäisen kolmannen sukupolven Vacon 10 tuotteen. 2010 Vacon päätti panostaa aurinkoenergiaan ja hankkii alan osaamista ostamalla pienen espanjalaisen aurinkoenergiainverttereitä suunnittelevan yrityksen, sekä julkaisi kolmannen sukupolven Vacon 100 tuotteen.

Nykyisin Vacon työllistää noin 1500 henkilöä ympärimaailmaa. Vaconilla on tuotantoyksiköjä Suomessa, Kiinassa, Yhdysvalloissa sekä Italiassa. Tuotekehitys Vaconilla toteutetaan pääosin Vaasan tehtaalla. Myyntitoimistoja on 27 maassa. /20/

3 TAAJUUSMUUTTAJAN PÄÄPIIRI



Kuva 1. Taajuusmuuttajan pääpiiri

3.1.1 Tasasuuntaaja

Taajuusmuuttajan syöttöjännite on yleensä kiinteätaajuinen kolmivaiheinen vaihtojännite, esimerkiksi 400 voltia ja 50 Hz. Vaihtovirralla virransuunta vaihtelee taajuuden mukaan. Taajuus kertoo kuinka usein virran suunta vaihtuu sekunnissa. Esimerkiksi taajuus 50 Hz tarkoittaa, että virran suunta vaihtuu sekunnissa 50 kertaa, joten yhden jakson pituus on 20 ms.

Taajuusmuuttajassa on tasasuuntaajana yleisesti joko diodit tai tyristorit. Tasasuuntaajaa, jossa tasasuuntaus toteutettu diodeilla kutsutaan ohjaamattomaksi tasasuuntaajaksi. Jos tasasuuntaus on toteutettu tyristoreilla, kutsutaan sitä ohjatuksi tasasuuntaajaksi.

Tasasuuntaajan tehtävä jännitevälipiirillisessä taajuusmuuttajassa on muokata syöttävän verkon vaihtojännitteestä tasajännitettä. Tasasuunnatun jännitteen tehollisarvoa voidaan säätää hilaohjatuilla tyristoreilla muuttamalla ohjauskulmaa α , jolloin tehollisarvo saadaan laskettua kaavalla 1.

$$U_{RMS} = 3 * \frac{\sqrt{2}}{\pi} * U_S * \cos \alpha \quad (1)$$

Diodi tasasuuntaajilla toteutetun tasasuunnatun jännitteen tehollisarvo on aina kaavan 2 suuruinen. /5, 13/

$$U_{RMS} = 3 * \frac{\sqrt{2}}{\pi} * U_S \quad (2)$$

3.1.2 Välipiiri

Vaikka puhutaan tasajännitteestä, välipiiriin kuusipulssitasasuuntaajalta tuleva jännite on kuusinkertaisella verkon eli noin 300 Hz taajuudella sykkivää jännitettä. Jännitettä suodatetaan kondensaattoreilla. Kondensaattori toimii energiavarastona, jonka avulla tasajännite saadaan pidettyä mahdollisimman tasaisena.

Joissain tapauksissa välipiirin rinnalle liitetään jarrukatkoja, jolla estetään välipiirin liiallinen latautuminen, esimerkiksi moottoria jarrutettaessa. /10, 12-13/

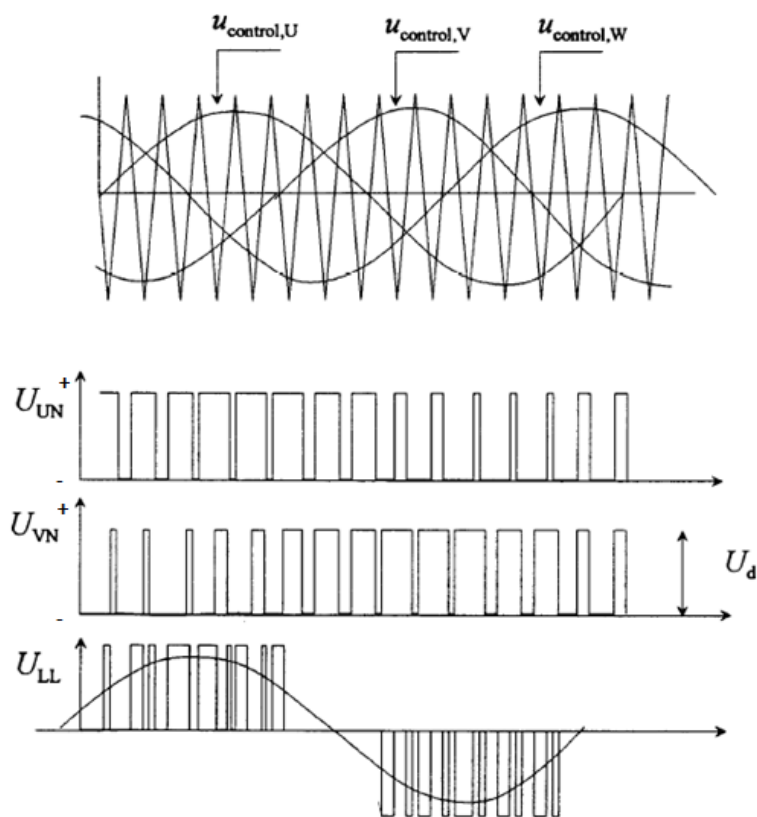
3.1.3 Vaihtosuuntaaja

Vaihtosuuntaajan tehtävä taajuusmuuttajassa on muuttaa välipiirissä oleva tasajännite halutun suuruiseksi ja taajuisiksi sinimuotoiseksi vaihtojännitteeksi. Taajuusmuuttajassa vaihtosuuntaus on toteutettu IGBT-transistoreilla. Transistoreiden rinnalla on vastasuuntaan asetetut diodit, joiden avulla energia kulkee välipiiriin, mikäli virran suunta muuttuu ohjatun moottorin muuttuessa generaattoriksi.

Moottorin jännitettä ohjataan johtamalla moottorin käämityksiin kantiaaltomaisesti lyhyempiä ja pidempiä pulsseja siten, että lähtösignaalin keskiarvo on yhtä suuri kuin modulointisignaalin arvo. Tällä periaatteella jännitteen keskiarvoa muutetaan pulssien leveyttä muuttamalla ja periaatetta nimitetäänkin pulssinleveysmoduloinniksi (PWM).

Moottorin taajuutta ohjataan vaihtamalla jännitepulssin napaisuutta, yhden puolijakson ajan positiiviselle puolelle ja toisen puolijakson ajan negatiiviselle puolelle. Esimerkiksi 50Hz taajuudella positiivisen puolijakson pituus on 10ms. /7, 18-27/

Perinteisesti PWM-ohjauspiirin modulointimenetelmä perustuu sini-kolmiovertailuun (**Kuva 2**), jonka kolmioaalto määrittää myös puolijohdekomponenttien kytkentätaajuuden, joka nykyisillä komponenteilla on tavallisesti 2-3kHz. Sinimuotoinen jänniteohje määrytyy halutusta taajuudesta sekä amplitudista. Kun jännite ohje on suurempi kuin kolmion vertailujännite, kytketty positiivinen puolijohde johtavaksi. Eri vaiheiden jänniteohjeiden täytyy olla 120asteen vaihe-siirrossa toisiinsa nähden. Mikäli vertailuarvo on pienempi, kytketty positiivinen puolijohde negatiiviseen napaan.



Kuva 2. Sini-kolmiovertailu. /9/

Kuvassa 2 U_{UN} on vaiheeseen U moduloitu jännite, U_{VN} vaiheeseen V moduloitu jännite ja U_{LL} on U ja V vaiheiden välinen pääjännite. /9/

4 YLIJÄNNITTEET

Sähköverkon osien sekä siinä käytettävien sähkökoneiden ja –laitteiden eristysrakenteita rasittavat käyttöjännitteen ohella eri syistä aiheutuvat ylijännitteet. Ylijännitteeksi kutsutaan jännitettä, joka ylittää eristysrakenteelle määritellyn referenssiarvon. Esimerkiksi vaihe-maa-eristyksen referenssiarvona voidaan pitää jänniteportaan suurimmasta käyttöjännitteestä (U_m) laskettua vaihejännitteen huippuarvoa, joka saadaan kaavalla 3. Vaihevälin ylijännitteiden referenssin arvona pidetään vastaavan pääjännitteen huippuarvoa $U_m \sqrt{2} / 2, 243/$

$$\hat{u} = U_m * \frac{\sqrt{2}}{3} \quad (3)$$

4.1 Ylijännitteiden syyt ja luokittelu

Tärkein luokittelutapa ylijännitteille perustuu ylijännitteiden käyrämuotoon. Nykyisin suositellaan käytettäväksi nimityksiä, jotka kuvaavat ylijännitteen muotoa. Aikaisemmin käytössä olleet nimitykset viittasivat ylijännitteen alkuperään.

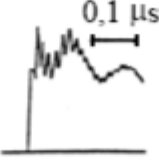
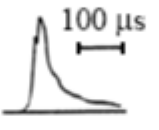
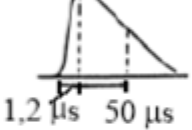
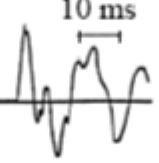
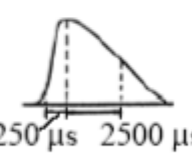
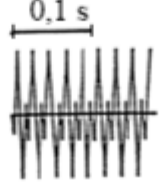
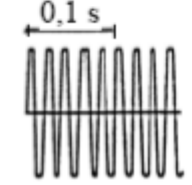
- Pientaajuiset ylijännitteet (temporary overvoltages, aiemmin käyttötaajuiset ylijännitteet)
- Loivat transienttiylijiännitteet (slow-front overvoltages, aiemmin kytkentäylijiännitteet)
- Jyrkät transienttiylijiännitteet (fast-front overvoltages, aiemmin ilmastolliset ylijännitteet)
- Erittäin jyrkät transienttiylijiännitteet (very-fast-front overvoltages, ei aikaisempaa nimitystä).

Ylijännitteiden luonteenomaiset piirteitä havainnollistetaan kuvassa 3.

Vain pienitaajuiset ylijännitteet ovat pitkäaikaisia ja jaksollisia ylijännitteitä. Tavallisten jännitenousujen lisäksi saattaa olla kyse ylijännitteistä, joissa perustaa-juiseen jännitteeseen on summautunut harmonisia jännitekomponentteja. Muut ylijännitelajit ovat transienttimuotoisia nopeasti vaimenevia. Tasasähköjärjestelmissä esiintyy kaikkia edellä kuvattuja ylijännitelajeja.

Koska jännitelujuus on riippuvainen rasituksen muodosta, on ollut tarpeellista määritellä eri ylijännitteitä vastaavat koestusjännitteet. Kuvassa 3 on eri ylijännitetyypeille tyypillisiä koejännitemuotoja. Erittäin jyrkkien ylijännitteiden tapauksessa ei ole vielä määritelty testaustarvetta ja mahdollista testausjännitteen muotoa. On myös muistettava, että koejännitelajit eivät pysty tyhjentävästi kuvaamaan kaikkia verkossa tapahtuvia ylijänniteilmiöitä.

Transienttiylijännite aiheutuu hyvin monenlaisista eri syistä. Kyseessä saattaa olla salamanisku, kytkentätoimenpide, verkkoon syntyvä vika, kuorman äkillinen kytketyminen pois verkosta, resonanssin syntymiseen johtava kytkentätilan muutos, jne. Koska tietyn tapahtuman seurauksena saattaa aiheutua monenlaisia ylijännitemuotoja, on perusteltua tarkastella ylijännitteitä aiheuttajittain. /2, 243-245/

Nimi		Ylijännitteen muoto	Koejännitteen muoto
transientti- ylijännite	erittäin jyrkkä		sovitaan laitekohtaisesti
	jyrkkä		
	loiva		
pientaajuinen ylijännite			

Kuva 3. Ylijännitteiden tyypilliset aaltomuodot /2, 244/

4.2 Pientaajuiset ylijännitteet

Pientaajuiset ylijännitteet aiheutuvat usein nopeista verkon tilan muutoksista, kuten vian syntymisestä tai katkaisijan toimiessa. Pientaajuisen ylijännitteen ohessa esiintyy lähes aina myös loiva transienttiylijännite. Joskus resonansseilla ja verkossa epälinearisesti toimivilla laitteilla, kuten magneettiirejä sisältävillä laitteilla on keskeinen merkitys pientaajuisen ylijännitteen syntyyn. Yleisesti kaikkien jännitteen säätöön osallistuvien laitteiden säätöominaisuudet vaikuttavat merkittävästi pientaajuiseen ylijännitteeseen.

Pientaajuisten ylijännitteiden aiheutumissyitä ovat

- verkon maasulku
- kuorman erottaminen verkosta
- resonanssit sekä ferresonanssit
- katkaisijan vajaanapainen toiminta tai katkos
- generaattorin itseherätys.

Johdon kapasitiivisen virran reaktanssin aiheuttamajännitehäviö (ferranti-ilmiö) suurentaa pientaajuisia ylijännitteitä. Suurimmillaan ferranti-ilmiö on pitkillä johdoilla. Ilmiön kompensoimisen vuoksi verkkoon on rakennettava riittävästi rinnakkaisreaktoritehoa. Esimerkiksi Suomessa on 420 kV verkossa noin 1 Mvar 100 km avojohtoa kohti. /2, 243-245/

4.2.1 Maasulkujännitteet

Yleisin käyttötaajuisia ylijännitteitä aiheuttava syy on maasulku. Yksivaiheinen maasulku aiheuttaa kahden kunnossa olevan vaiheen jännitteen nousun. Yksivaiheisesta maasulusta aiheutuva ylijännite on perustaajuinen ja esiintyy normaalisti vain vaihe-maa-eristysvälissä.

Ylijännitteen suuruus on riippuvainen verkon tähtipisteen maadoitustavasta sekä vikapaikasta.

Maasulussa terveeseen vaiheeseen aiheutuva ylijännitteen suuruus ilmoitetaan maasulkukertoimella k , jolla tarkoitetaan vian aikana terveeseen vaiheeseen aiheutuvaa vaihejännitteen huippuarvon suhdetta samassa vaiheessa ja paikassa ennen vikaa vaikuttaneeseen huippuarvoon. Maasta erotettujen ja sammutettujen verkkojen maasulkukerroin on suurimmillaan noin 1,8 p.u.. Jäykästi maadoitetuissa tai pienehköimpedanssisissa verkoissa maasulkukerroin on pienempi. Pienjänniteverkot ovat yleisesti jäykästi maadoitettuja tai maastaerotettuja. /2, 245/

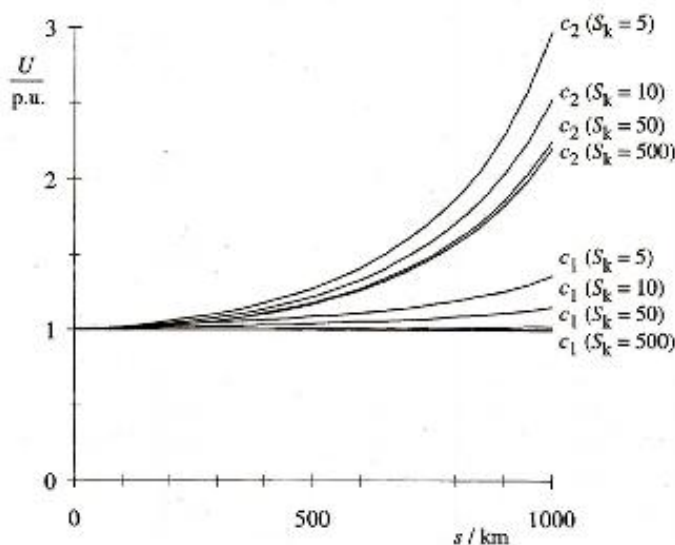
4.2.2 Kuormituksen irtikykytyminen ja ferranti-ilmiö

Kuormituksen irtikykytyymisen aiheuttama pienitaajuinen ylijännite on symmetrinen, kolmivaiheinen ylijännite, joka esiintyy saman suhteellisarvon omaavana sekä vaiheiden, että maan välissä. Jännitteen nousu on suuri tilanteessa, jossa kuorma on induktiivinen ja verkon oikosulkuteho on pieni, eli z_k on suuri (heikko verkko). Kuorman erottamisesta aiheutunut jännitteen nousu onkin erityisesti ongelmana uusilla siirtoverkoilla. Kuvassa 4 havainnollistetaan jännitteen nousua 420kV johdolla, johdon pituuden ja oikosulkutehon vaihdellessa. Johdon alku- ja loppupäiden erot kuvaavat ferranti-ilmiön vaikutusta.

Mikäli kuorman erottaminen tapahtuu lähellä sähköntuotantoa, generaattorin napajännite nousee, koska pitkätaajaisreaktanssissa x_d ylijännite voi saada 35% normaalia jännitettä suuremman arvon, muissa tapauksissa ylijännitteen suuruudeksi voidaan arvioida 15-20 %. Ylijännitteen kestoksi voidaan olettaa generaattori-standardien mukainen 5 sekuntia.

Suuremmat jännitteen nousut ovat mahdollisia, mikäli generaattori joutuu itseherätystilaan. Tämä tapahtuu silloin kun varsinaisen kuorman laukaisun jälkeen generaattorin napoihin jää niin suuri kapasitiivinen kuorma, että se kompensoi generaattorin poikittaisreaktanssin x_q . Ylijännitekertoimet 1,5-1,7 p.u. ovat mahdollisia, koska raudan kyllästyminen ei rajoita täysin jännitteen nousua.

Jos kyseessä ei ole heikon verkon syöttämä pitkä johto tai itseherätystilanne, kuorman erottamisen yhteydessä esiintyvät ylijännitteet ovat samaa suuruusluokkaa kuormituksen aiheuttaman jännite aleneman kanssa. Laajoissa paljon tuotantoa sisältävissä silmukkaverkoissa ylijännite ei yleensä ylitä arvoa 1,2 p.u.. /2, 249-251/



Kuva 4 Jännitteen nousu alku- ja loppupäissä /2, 251/

4.3 Loivat transienttilylijännitteet

Loivilla transienttilylijännitteillä tarkoitetaan verkon nopeassa tilanmuutoksessa syntyviä ylijännitteitä. Tällaisia muutoksia ovat muun muassa erilaisten vikatilanteiden syntyminen sekä niiden vuoksi tai muusta syystä verkossa suoritettujen kytkentätoimenpiteet, kuten virtapiirin avaaminen tai sulkeminen. Samat tekijät aiheuttavat siis usein sekä loivia transienttilylijännitteitä, että pientaajuisia ylijännitteitä. Loivan transienttilylijännitteen vaimennuttua verkkoon saattaa jäädä pienitaajuinen ylijännite.

Loivien transienttilylijännitteiden muoto sekä suuruus määräytyvät verkon että katkaisijan ominaisuuksista. Katkaisijan molemmin puolin olevien verkkojen induktanssit ja kapasitanssit määräävät tasoitusvärähtelytaajuuden. Värähtelyn amplitudi on riippuvainen virran ja jännitteen hetkellisarvosta kytkentähetkellä, verkon vaimennusominaisuuksista sekä itse katkaisijan ominaisuuksista.

Loivien transienttilylijännitteiden arvo ilmoitetaan yleensä absoluuttisten arvojen sijaan suhteellisarvoina. On huomioitava, että tietyt tapahtumat aiheuttavat tran-

sienttiylijännitteitä, jotka eivät ole riippuvaisia verkon käyttöjännitteestä ja joiden p.u. ylijännitteenä ilmaistu suuruus kasvaa käyttöjännitteen kasvaessa. /2, 264/

4.3.1 Katkaisija kapasitiivista virtaa katkaistaessa.

Katkaisijan jälleensyttymistilanne syntyy erotettaessa pitkä kuormittamaton johto tai kytkettäessä kapasitanssia irti verkosta. Syöttävän verkon jännitteen ja kapasitiivisen virran välisestä vaihe-erosta aiheutuu ylijännite jos virta katkeaa nollakohdassaan, katkaisijan kuormanpuoleiseen napaan jää vaikuttamaan vakiona pysyvä vaihejännitteen huippuarvo. Huippuarvon napaisuus on vastakkainen sille napaisuudelle, jonka syöttävän verkon jännitteen huippuarvo seuraavaksi saa. Syöttävän verkon jännitteen lähestyessä vastakkaismerkkistä huippuarvoaan, saattaa se ylittää avausvälin jännitelujuuden jolloin tapahtuu jälleensyntyminen. Mikäli jälleensyntyminen ja syntyneen virtapulssin sammuminen tapahtuvat epäedullisella hetkellä, kuorman puoleinen napajännite saattaa nousta arvoon 3 p.u. ja mahdollisuus uuteen jälleensyttymiseen on olemassa. Mikäli jälleen syttymisiä tapahtuu useita, on mahdollisuus suurempiinkin ylijännitteisiin. Jälleensyntymisellä tarkoitetaan tilannetta, jossa avausväli syttyy uudelleen vähintään 5millisekuntia virran nollakohdan jälkeen. Tällöin syöttävän jännitteen polariteetti on jo eri kuin kapasitiivisen kuorman jääneen varauksen edustama jännite. Kun avausväli syttyy uudelleen alle viiden millisekunnin kuluessa virran katkeamisesta, syöttävän virran napaisuus ei ole vielä ehtinyt vaihtua, tätä kutsutaan jälleensyttymiseksi.

/3, 19-23/

4.3.2 Transienttiylijännite oiko- sekä maasulkutilanteessa

Oikosulkutilanteessa verkosta poistuu oikosulun aiheuttama suuri jännitehäviö, joka saattaa aiheuttaa ylijännitteen, joka on suuruusluokkaa. 2,0-2,3 p.u..

Maasulkutilanteessa ylijännitteen suuruus on riippuvainen syöttävän verkon maadoitustavasta. Riippuen onko verkko maadoitettu tai maasta erotettu ylijännitteen suuruus vaihtelee välillä 1,5-3 p.u.. /3, 23/

4.4 Jyrkät ylijännitetransientit

Jyrkät ylijännitetransientit syntyvät yleensä salamaniskujen seurauksena. Salamanisku aiheuttaa ylijännitteen sähköverkkoon pääasiassa kolmella eritavalla: induktion kautta, johdon maadoitettuun osaan osuneen iskun kautta tai osumalla suoraan jännitteiseen johtimeen. /2, 277/

4.4.1 Suoraan johtimeen kohdistuvat salamaniskut

Suorissa salamaniskuissa salamaa voidaan pitää ideaalisena virtalähteenä, jolloin syntyneen ylijännitteen suuruuden määrittää salaman näkemät johdon ominaisimpedanssit. Impedanssi on yleisesti yhdellä johdolla noin neljästäsadasta viiteensataan ohmiin. Salaman aiheuttamaa transienttiylijännitettä laskettaessa on salaman aiheuttama virta jaettava kahdella, koska ylijännitetransientin virta jakaantuu johdon molempiin suuntiin Kirchoffin virtalain mukaan. /2, 277/

$$U = \frac{Z_0 \times I}{2} \quad (4)$$

U= Ylijännitteen suuruus (kV), Z_0 = Johdon impedanssi (Ω), I= Salamanvirta (kA)

Esimerkiksi 20 kiloampeerin virtatransientti aiheuttaa 400 ohmin impedanssin kanssa ylijännitetransientin, joka on suuruusluokaltaan 4 kilovoltia.

Suoraan johtimeen kohdistuneisiin salamaniskujen tiheyteen vaikuttaa paikan sijainnin lisäksi myös linjan tyyppi, etenkin linjan korkeus sekä pituus. Mikäli johdin sijaitsee avonaisella alueella, salamaniskujen tiheys saadaan arvioitua laskukaavalla viisi.

$$A = 6 * H * L \quad (5)$$

A= Vaikutus pinta-ala (m^2), H= Linjankorkeus (m), L= Linjanpituus (km)

Suoraan johtimeen kohdistuneiden salamaniskujen määrä vuodessa saadaan kertomalla edellisessä kaavassa laskettu vaikutusalue kyseisen alueen salamatiheydellä (6).

$$N = A * Ng * 10^{-6} \quad (6)$$

N = Salamoiden lukumäärä vuodessa (kpl), A = Vaikutus pinta-ala(m²),
 Ng =Paikallinen salamatiheys neliökilometrille vuodessa (kpl)

Esimerkiksi jos linja on 5metriä korkea, salamantiheys on 1 salama neliökilometriä kohden vuodessa, saadaan suoraan johtimeen kohdistuneeseen salamoiden määräksi 0,03 salamaa kilometriä kohden. Eli kolme salamaa 100 kilometrin johdolla.

4.4.2 Johtimeen indusoituvat ylijännitteet.

Salaman aiheuttaman sähkökentän muutokset saattavat aiheuttaa transienttiylijännitteitä suurenkin etäisyyden päähän. Yleisesti indusoitunut jännite vaikuttaa kaikkiin vaiheisiin samalla suuruudella. Johtimeen aiheutunutta ylijännitetransientin suuruutta voidaan arvioida kaavan 7 perusteella.

$$U = 30\Omega * \left(\frac{H}{d}\right) * I \quad (7)$$

H = Linjankorkeus (m), I = Salamanvirta (kA), d = Salamanetäisyyslinjaan (m)

Esimerkiksi jos salama iskee kymmenen kilometrin päähän johtimesta ja pienjännitelinjan korkeus on 5 metriä, salaman aiheuttama ylivirta on 100 ampeeria, indusoituu johtimeen 1,8 kV:n jännite. /8, 18-21/

4.4.3 Maapotentiaalin nousu

Salamanisku maahan lähelle rakennusta saattaa nostaa maapotentiaalin korkeaksi. Tämä ilmiö aiheuttaa ylijännitteitä verkossa, mikäli maapotentiaalia käytetään verkon referenssipisteenä.

Potentiaalin muutoksen suuruus määrittyy salamavirrasta sekä maapotentiaalin impedanssin mukaan.

Maapotentiaalin nousu tarkoittaa, että sähköisten laitteiden sekä maapotentiaalien ero kasvaa ja tämä saattaa johtaa läpilyöntiin. Ylijännite vaikuttaa samanaikaisesti kaikkiin vaiheisiin. /8, 19-20/

4.4.4 Johtuminen siirtoverkosta

Useimmiten ukkosylijännitteet siirtyvät pienjänniteverkkoon siirto johdoista, jotka ovat paljon pidempiä ja sijaitsevat korkeammalla, kuin pienjännitejohdot.

Siirtoverkosta johtuvat ylijännitteet siirtyvät jakeluverkosta muuntajien induktanssien ja kapasitanssien kautta sekä maapotentiaalin kautta.

Johtuneen ylijännitteen suuruus on riippuvainen pienjänniteverkon maadoitustavasta, pienjänniteverkon kuormasta, muuntajan ensiö- ja toisiopuolen maadoituksesta, muuntajan tyypistä sekä pienjänniteverkon ylijännitesuojauksesta. /8, 21/

5 SUOJAUS

Taajuusmuuttajavalmistajan on nopeussäädettyjen PDS-käyttöjen EMC-standardin IEC 61800-3 mukaan pystyttävä ilmoittamaan laitteen vähimmäis-transienttiylijännitekestoisuus. Mikäli taajuusmuuttajan laatua sekä varmuutta tahdotaan parantaa, voi valmistaja asettaa omat vaatimustasonsa ylijännitekestoisuuden suhteen.

5.1 Standardi IEC 61800-3

EMC-standardi IEC 61800-3 käsittelee taajuusmuuttajia koskevia vaatimuksia, joista yksi koskettaa taajuusmuuttajan transienttiylijännitekestoisuutta. Standardissa määritetään testissä käytettävän transienttiylijännitteen amplitudin suuruus, vaadittu hyväksyntäkriteeri sekä vaadittava testausstandardi IEC 61000-4-5.

Standardin IEC 61800-3 taulukko 11 määrittää taajuusmuuttajalle transienttien amplitudien suuruudeksi 1 kV vaiheiden välille ja 2 kV vaiheen ja maan välille.

Vaadittu hyväksymiskriteeri laitteen ylijännitekestoisuudelle on määritetty siten, että laitteen tulee jatkaa toimimistaan testin aikana sekä testin jälkeen. Laitteen suorituskyky ei saa laskea valmistajan ilmoittaman rajan alle, kun laitetta käytetään käyttötarkoituksen mukaisesti. Mikäli valmistaja on ilmoittanut selkeästi mahdollisista muutoksista, voidaan suorituskyvyn muutokset sallia testin aikana. Tiedonkeruuseen tai toimintatilaan muutosta ei kuitenkaan sallita testin aikana.

/18/

5.2 Standardi IEC 61000-4-5

Syöksyaallon siedon testaus on määritelty standardissa IEC 61000-4-5. Standardissa on määritetty testausgeneraattorin avoimeen piiriin antamaksi jännitteen pulssimuodoksi 1,2/50 μ s (LIITE 1) ja oikosulkuun antamaksi virtapulssiksi 8/20 μ s. Testattavan amplitudin suuruus määräytyy taajuusmuuttajissa standardin IEC 61800-3 mukaan. Testi tulee suorittaa vähintään 5 kertaa, maksimissaan minuutin

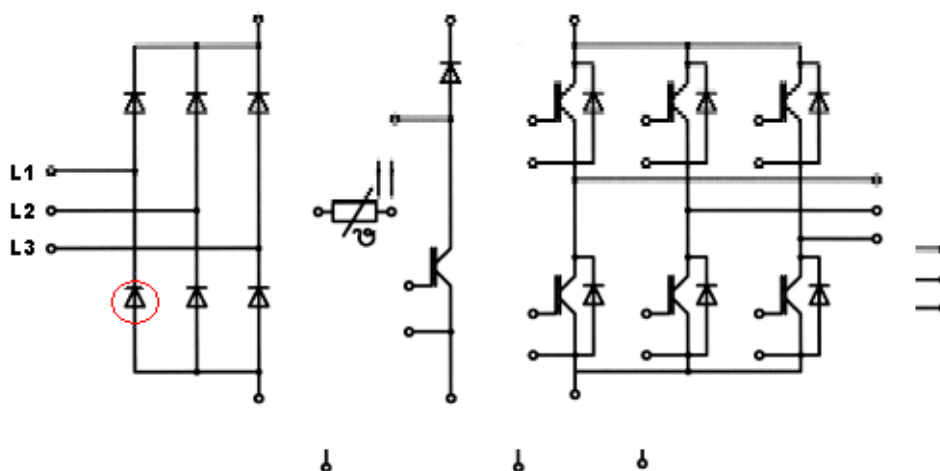
välein positiivisella sekä negatiivisella amplitudilla. Ylijännitetransientti tulee kytkeä jännitteen nollakohtaan sekä jännitteen molempiin huippukohtiin (positiiviseen sekä negatiiviseen). Transienttiylijännite generaattorin lähtöimpedanssin suuruus vaihtelee testistä riippuen välillä 2Ω - 12Ω . Impedanssin kanssa sarjaan asetettavan kapasitanssin suuruus on vaiheiden välille testattaessa $18 \mu\text{F}$ tai vaiheesta maahan välille testattaessa $9 \mu\text{F}$. /17/

5.3 Miksi suojakomponentteja tarvitaan

Tärkein funktion taajuusmuuttajan ylijännitesuojalla on suojata taajuusmuuttajan tasasuuntausmoduulia, joka on ensimmäinen taajuusmuuttajan tulopuolen komponentti. Valmistaja ilmoittaa tasasuuntausmoduulille V_{RRM} arvon, mikä ilmoittaa valmistajan lupaaman hetkellisen jännitekestoisuuden. Tasasuuntausmoduulin toimimisen varmistamiseksi tätä arvoa ei tulisi ylittää.

Liitteessä 2 on ote tehopuolijohteita valmistavan Semikronin SKIIP 23NAB125V1 moduulista. Kyseisessä moduulissa on integroitu tasa- ja vaihtosuuntaus saman moduulin sisään. Kyseisessä moduulissa tasasuuntausosan V_{RRM} arvo on $1,6 \text{ kV}$.

5.3.1 Esimerkki tasasuuntauskomponenttiin kohdistuvasta ylijännitteestä



Kuva 5. Moduulin SKIIP 23NAB125V1 sisältämät komponentit. /16/

Kuvassa 5 on punaisella ympyröity ylijännitetransientille altistuva L1 vaiheen alahaaran diodi, jonka estosuuntaista jännitettä L1-L2 vaiheen kauttakulkeva positiivinen transienttiylijännite nostaa.

6 SUOJAKOMPONENTIT

Transienttisuojan tehtävä on rajoittaa transientin syöksyjännite laitteelle turvalliselle tasolle sekä samalla oikosulkea transientin syöksyvirta suojattavan laitteen ohi.

Transienttisuojissa voidaan käyttää erilaisia komponentteja. Komponenteilla on omat hyvät ja huonot ominaisuutensa.

Transienttisuojauksen kannalta komponenttien tärkeitä ominaisuuksia ovat:

- syöksyvirran purkauskkyky
- toimintanopeus
- jännitteenrajoitusominaisuudet edellisten funktiona. /4, 94/

6.1 Kaasupurkausputki



Kuva 6. Kaasupurkausputken piirrosmerkki

Karkeasuojakomponentteina käytetään jalokaasulla täytettyjä kaasupurkausputkia, jotka voivat purkaa perusmuodossaan jopa 10 kA:n lyhytkestoisia virtoja.

Kaasupurkausputkien havahtumisajat ovat 500 nanosekunnin vaiheilla. Ongelmana kaasupurkausputkessa on niiden aikasidonnainen syttyminen. Esimerkiksi, jos transientin nousuaika on pitkä saattaa suojaustaso jäädä nimellisen suojaustason suuruiseksi. Mikäli kyseessä on nopea transienttiylijännite, saattaa suojaustasoksi asettua kymmenenkertaa nimellistasoa suurempi taso. /12, 9/

6.2 Varistori



Kuva 7. Varistorin piirrosmerkki.

Varistori on jännitteestä riippuvainen vastus. Materiaalina varistoreissa käytetään pääosin sinkkioksidia, jossa on pieniä määriä muita metallioksideja. Varistori toimii samalla tavalla kuin kaksi vastakkain kytkettyä zener-diodia. Jännitteen ylitettyä kynnsjännitteen arvon varistorin virta kasvaa jännitteen funktiona. Varistori katkaisee itse piirin oikosulkuvirran, jännitteen pudottua kynnsjännitteen alapuolelle.

Varistorin vanhetessa, sen vuotovirta kasvaa, mikä saattaa lopulta aiheuttaa varistorin liiallisen lämpenemisen ja sitä kautta rikkoontumiseen.

Varistoria ei suositella käytettäväksi suuritaajuisissa signaaliverkoissa, sillä se aiheuttaa rakenteensa johdosta kapasitanssin ja induktanssin kanssa alipäästösuotimen. /4, 94/

Varistorit reagoivat nopeammin kuin kaasupurkausputket, eli alle 500 nanosekunnin alueella. /12, 9/

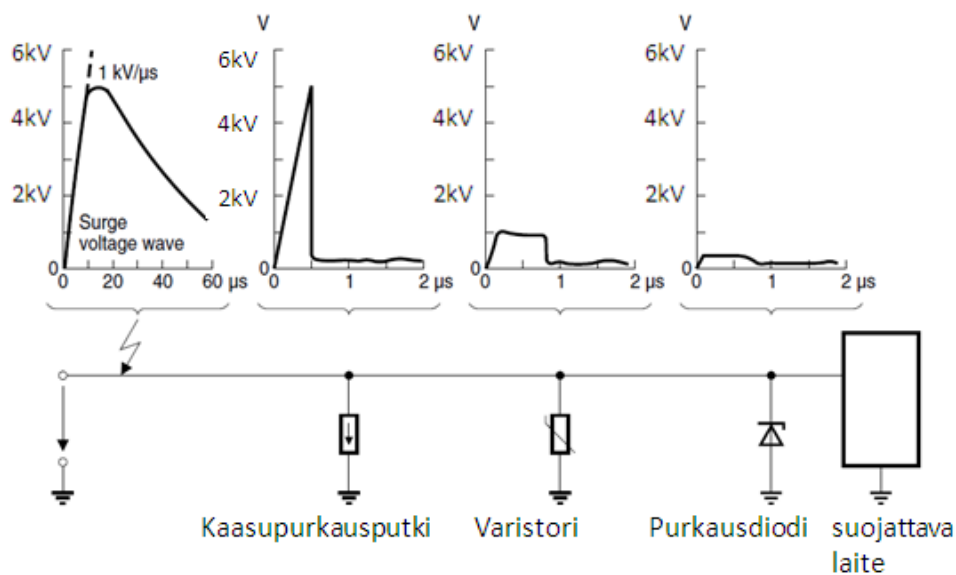
6.3 Purkausdiodi



Kuva 8. Purkausdiodin piirrosmerkki.

Purkausdiodi on transienttisuojaukseen suunniteltu diodityyppi. Purkausdiodi toimii varistorin tavoin kuin zener-diodi. Purkausdiodilla on suuren kapasitanssin takia samat haitat kuin varistorillakin.

Purkausdiodin ominaispiirteitä ovat suuri toimintanopeus sekä tarkka jännitteen rajoitusominaisuus. Purkausdiodin haittana on kaasupurkausputkea ja varistoria pienempi syöksyvirran purkauskkyky, joten sen käyttö ei ole suositeltavaa ukkos-suojauksessa. /4, 95/



Kuva 9. Suojauskomponenttien leikkausmuodot

Taajuusmuuttajan transienttiylijännite suojauksessa on käytettävä varistoria tai purkausdiodia, koska kaasupurkausputken ominaisuuksien johdosta sen rajoittama jännite jää nopeilla ylijännitetransienteilla liian korkeaksi.

Suuritehoisia purkausdiodeja on markkinoilla hyvin vähän ja niiden hinnat ovat korkeita. Hinta-laatu-suhteeltaan varistori on tässä tapauksessa paras ratkaisu taajuusmuuttajan transienttiylijännitesuojaukseen.

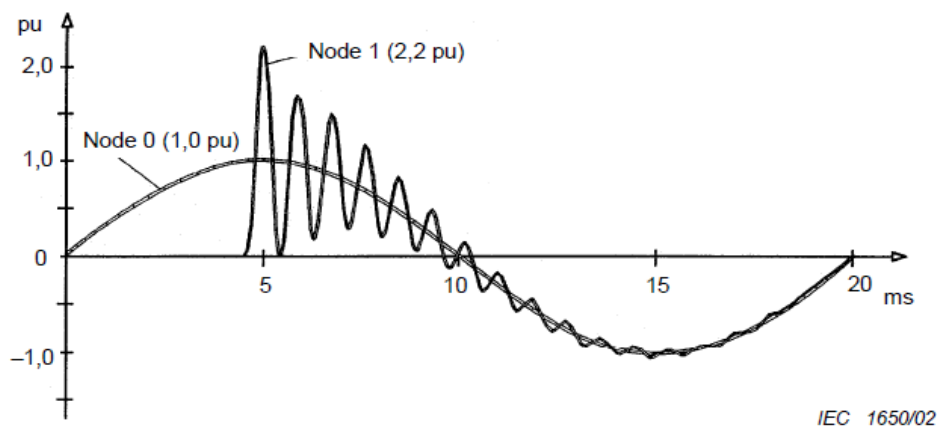
7 SUOJAUSTASON MÄÄRITYS

Pienjänniteverkossa esiintyvistä ylijännitteistä on vähän tietoa. Standardista IEC 62066 oli saatavissa esimerkkisuuruusluokkia sekä joitain mittaustuloksia.

Yleisesti kytkentätilasta johtuva ylijännite saa arvon 2 kertaa p.u., mutta suurempiakin ylijännitteitä voi syntyä. Kuvassa 9 on esitetty tyypillinen kytkentäylijännitteen aaltomuoto

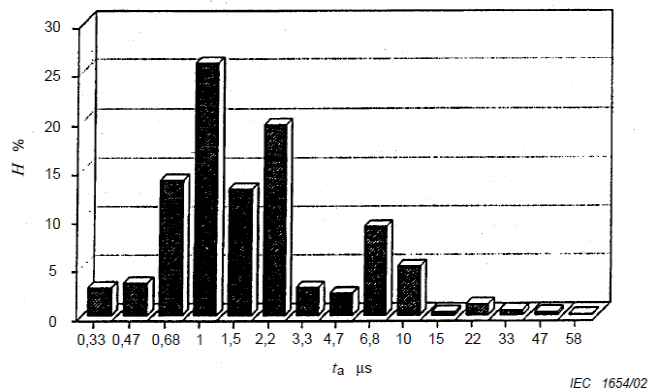
Katkaisijoita käytetään yleensä laitteen suojaamisessa vikatilanteessa tai sitä voidaan käyttää myös laitteiden päälle/pois-ohjaamiseen.

Katkaisijan äkillinen avaaminen tai sulkeminen aiheuttaa verkkoon ylijännitteitä. Pienjänniteverkossa oletetaan ylijännitteiden olevan pienempiä kuin 4 kV, koska eristevälit on mitoitettu tämän suuruisille jännitteille. Mutta resonanssitilanteissa saattaa ylijännite nousta suuremmaksikin.



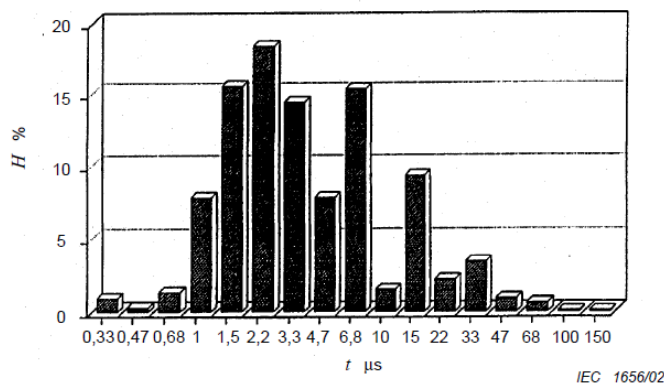
Kuva 10. Tyypillinen kytkentäylijännitteen muoto /8, 33/

Ylijännitteiden nousuajat saattavat vaihdella 0,5 mikrosekunnista 2 mikrosekuntiin. Nousuaikojen jakautuminen (**Kuva 11.**) vastaa enemmän tai vähemmän standardin asettamaa 1,2/50 mikrosekunnin ylijännitepiikkiä.



Kuva 11. Ylijännitteen nousuaikojen jakautuminen /8, 34/

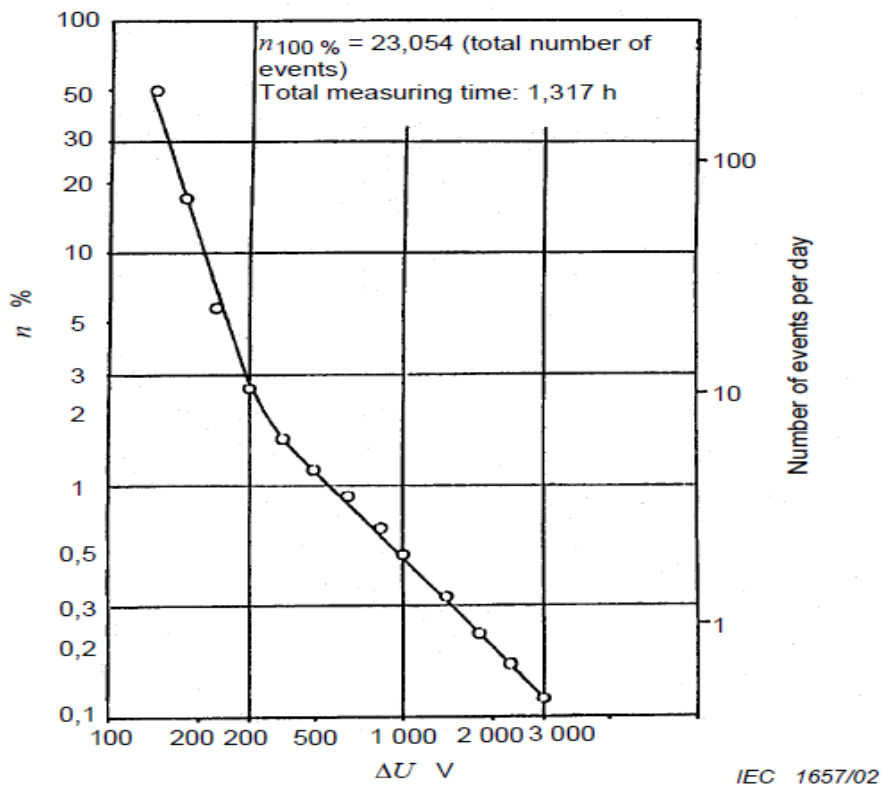
Nousuaikoihin verrattuna ylijännitteiden kestoajat ovat jakaantuneet paljon pidemmälle aikavälille. Aikavaihtelu on riippuvainen ylijännitteen syntymistilanteesta. Tyypillinen kesto aika amplitudin puoliintumiseen on yhdestä 50 mikrosekuntiin. Jakautuminen on esitetty kuvassa 12. /8, 33-35/



Kuva 12. KytKentäylijännitteiden keston jakaantuminen /8, 35/

7.1 KytKentätilanteen tarkastelu

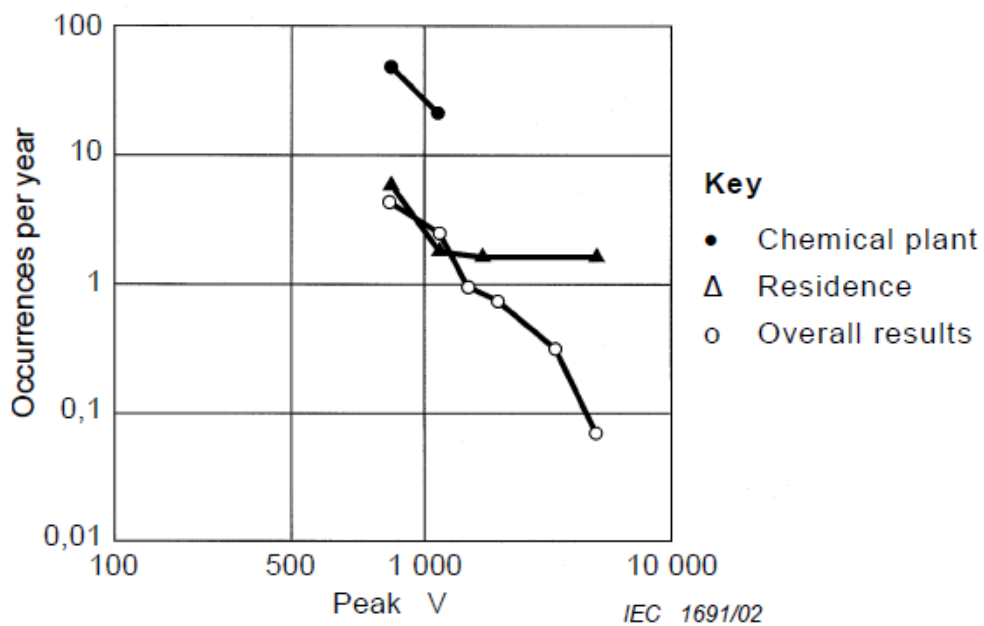
Kuvassa 13 on mitattu teollisuusverkossa simuloituja kytKentätilanteita. Taulukossa on esitetty tilastollinen kytKentäylijännitteiden jakauma simuloitussa kytKentätilanteessa.



Kuva 13. Katkaisijan aiheuttamat ylijännitepiikit 230/400V verkossa /8, 36/

Tilastollisen arvojen perusteella voidaan päätellä, 1-2 tuhannesta ylijännitepiikistä on suurempia kuin 2,5 kV. /8, 36/

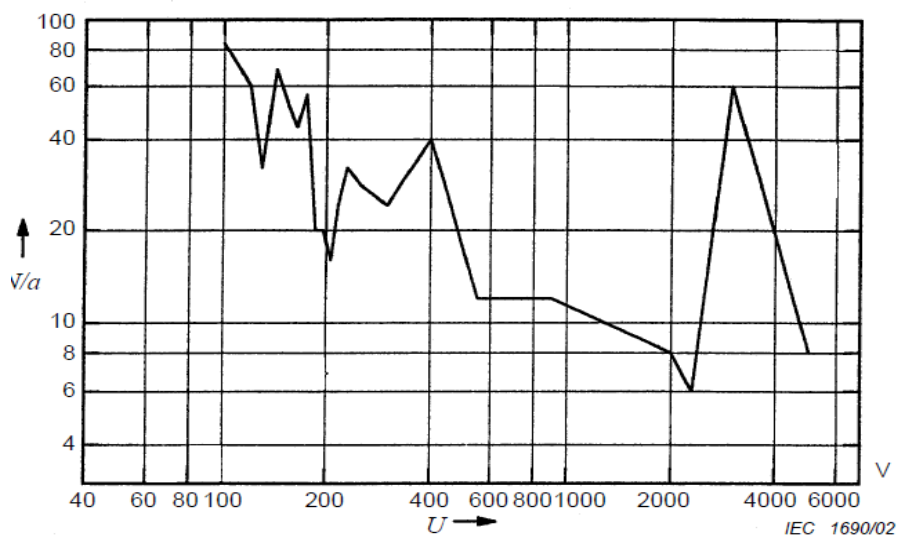
Verrattaessa simuloitua tilannetta oikeaan (**Kuva 14.**) tilanteeseen, missä on tarkasteltu 130:ntä eri kuluttajaa 1200 kuluttajakuukauden ajan, voidaan todeta simuloinnin olevan melko tarkka. Todellisissakin mittauksissa suurin osa ylijännitepiikeistä oli alle tuhat voltia ja suurin oli 6 kV. Tutkimuksissa ei mitattu ollenkaan alle 1 kV ylijännitepiikkejä, koska niillä ei ole käytännössä merkitystä. /8, 88/



Kuva 14. Todellisten mittausten tulokset käyrästönä. /8, 88/

7.2 Erikoistapaukset

Mikäli esimerkiksi jakelumuuntaja kytketään katkaisijalla päälle/pois useasti, täytyy tilanne huomioida myös erityisellä tavalla, esimerkiksi erään tehtaan jakelumuuntaja kytkettiin pois päältä joka viikonloppu. Muuntajan kokoojakiskoista mitattiin suuria ylijännitteitä huomattavasti normaalia enemmän (**Kuva 15**). /8, 86/

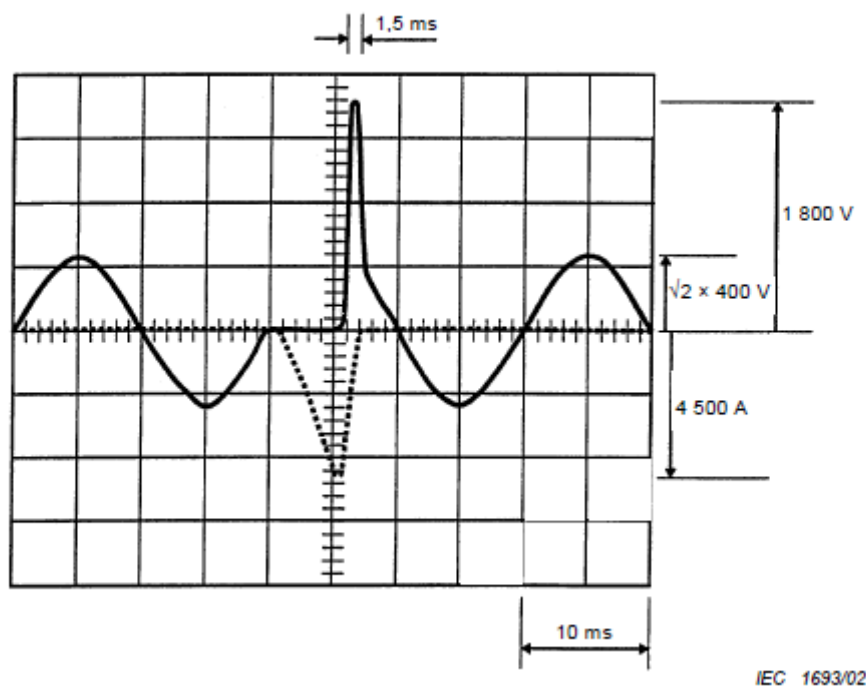


Kuva 15. Erikoistilanteissa kokoojakiskossa havaitut ylijännitteet. /8, 86/

7.3 Sulakkeen palamisesta aiheutuvat ylijännitteet

Oikosulkutilanteessa sulake katkaisee virran vikaantuneelta lähdöltä, mutta aiheuttaa myös nopeita ylijännitepiikkejä lähtöä syöttävän muuntajan toisiossa tai syöttävässä kokoojakiskossa. Sulakkeen palamisesta aiheutuvan ylijännitteen suuruuteen vaikuttaa käytettävän sulakkeen tyyppi. Mikäli sulake on valmistettu suojaamaan puolijohteita, sen katkaisu tapahtuu nopeasti ja melko pienellä ylivirralla.

Moottorin oikosulkusuojauksessa käytettävän aM-sulakkeen reagoiminen ylivirtaan on huomattavasti puolijohdesuojauksessa käytettäviä aR-sulakkeita hitaampaa, joten vikatilanteessa ylivirta pääsee kasvamaan huomattavasti suuremmaksi. Tämän seurauksena katkaisutilanteesta aiheutuva ylijännitteen amplitudi kasvaa huomattavasti suuremmaksi.



Kuva 16. Transienttiylijännite kun 100 ampeerin sulake hajoaa /8, 92/

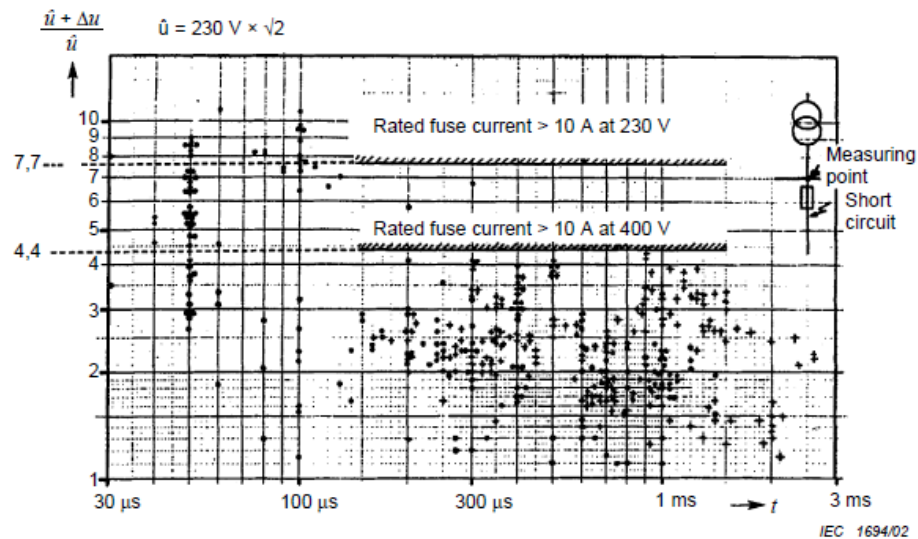
Kuvassa 17 on koottu eri tehtaissa mitattuja ylijännitearvoja sulakkeiden palamistilanteessa. Mittaus perustuu eri valmistajien sulakkeisiin. Käytettyjen sulakkeiden nimellisvirrat olivat 10 A, 35 A, 100 A sekä 355/400 A.

Tuloksista on huomattavissa sulakkeen koon vaikutus ylijännitteen suuruuteen sekä ylijännitteen kestoaikaan. Mitä pienempi sulake oli kyseessä, sitä suurempi transienttiylijännite piikki syntyi, mutta kestoajaksi oli huomattavasti pienempi kuin suuremmilla sulakkeilla.

Kuvassa ylijännitteet on kerrottu ylijännitekertoimen avulla, jolla kerrotaan syöttävän vaiheen nimellisjännitteen huippuarvo. Suurimmat ylijännitteet mitattiin yksivaiheisesta 230 voltin järjestelmästä. Ylijännitteitä, jotka vastasivat ylijännitekertoimia väliltä 7,7 p.u. ja 10,5 p.u. oli vain 3 % mittauksista.

Kolmivaiheisessa järjestelmässä havaittiin 4,4 p.u. suuruisia ylijännitteitä, joka vastaa noin 2,5 kilovoltin jännitettä. /8, 92/

Ylijännitteiden suuruudet vastaavat melko hyvin standardeissa sulakkeille annettuja arvoja.

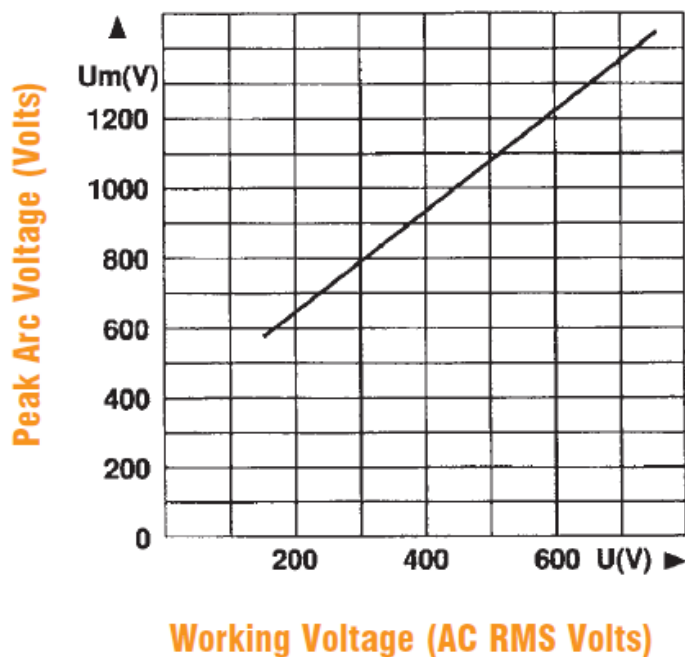


Key

- ////// Limit value of switching overvoltage by low-voltage fuses according to the standards for fuses
- 10 A-fuse
- + Fuses >10 A

Kuva 17. Sulakkeiden aiheuttamat ylijännitteet. /8, 93/

Vertaamalla testissä käytettyjen sulakkeiden aiheuttamia ylijännitteitä Ferrazfusen valmistamiin puolijohteiden suojauksessa käytettävien nopeiden sulakkeiden arvoihin, syntyy hitaiden sulakkeidenpalamistilanteessa suurempia ylijännitetransientteja verrattuna nopeisiin sulakkeisiin.



Kuva 18. Puolijohdesulakkeiden aiheuttamien ylijännitteiden suuruudet /6/

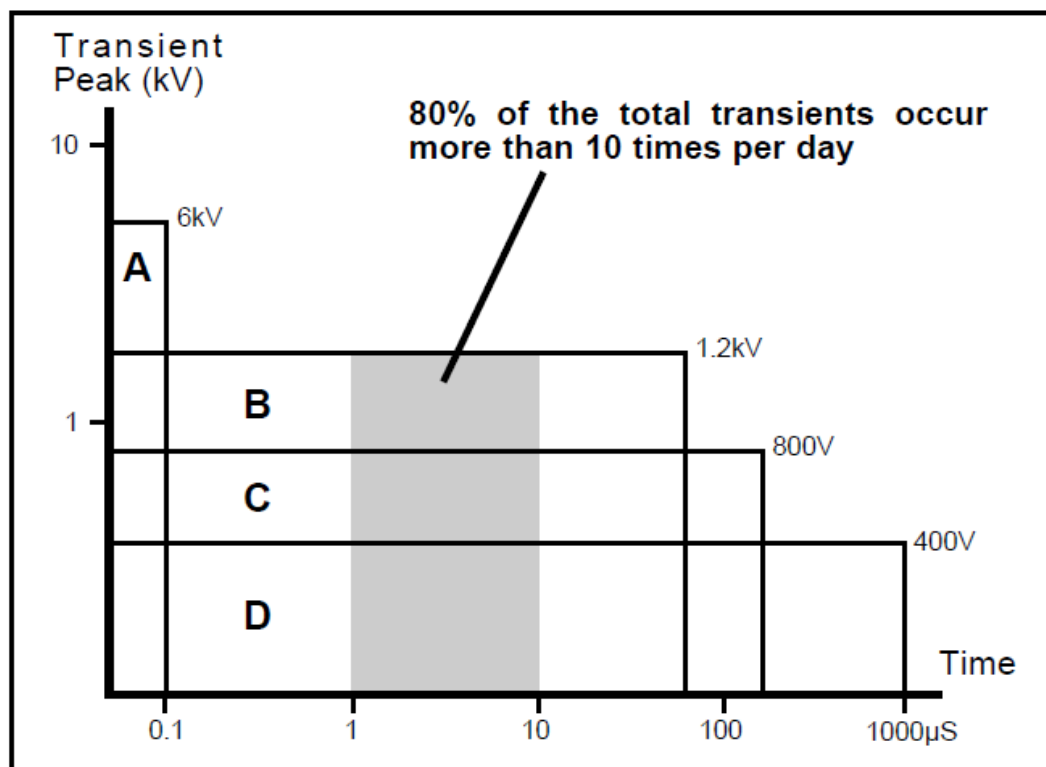
7.4 Ilmastollisen ylijännitteen aiheuttamat ylijännitetransientit

Ilmastollisia ylijännitteiden suuruuksia on hyvin vaikea arvioida, koska ilmastollisten ylijännitteiden syntymiseen ja sen suuruuteen vaikuttaa niin moni tekijä. Jos oletetaan ilmastollisten ylijännitteiden johtuvan sähköverkkoon siirtoverkon puolelta, pienjännitepuolelle syntyvän ylijännitteen suuruutta voidaan arvioida laskemalla muuntajan muuntosuhteella, muuntajien suojauksessa käytettävien ylijännitesuojien suojaustason perusteella.

Esimerkiksi 20 kV:n verkossa ABB:n muuntajille ja johdoille tarkoitetun POLIM D-ylijännitesuojan suojaustaso on 20 kA ukkosen aiheuttamalla virralla 79,5 kV. Suojaustaso jakamalla muuntosuhteella saadaan 690 voltin pienjänniteverkkoon siirtyvän ylijännite transientin suuruudeksi 2,76 kV. /1/

7.5 UNIPEDEn ilmoittamat ylijännitteet verkossa

Verkossa esiintyvien transientin määriä voidaan arvioida sähkötuottajien sekä sähköjakelijoiden järjestö UNIPEDEn antaman taulukon mukaan. UNIPEDEn antaman taulukon mukaan 80 % ylijännitetransienteista on suuruusluokaltaan maksimissaan 1,2 kV. Mikäli taajuusmuuttajan eliniän tulee olla vähintään kaksi vuotta, pitää ylijännitesuojan kestää noin 6000 kertaa alle 1,2 kV:n transienttiylijännitteitä sekä tutkimuksissa havaitut yksittäiset suuremmat ylijännitteet.



Kuva 19. UNIPEDEn arvio sähköverkon transienttien määrästä /19/

7.6 Aseteltavan suojaustason vaatimuksien yhteenveto

Tarkasteltaessa transienttiylijännitteiden amplitudien jakautumista katkaisijan katkaisutilanteessa voidaan todeta, että normaalitilanteessa vaiheiden välille syn-

tyy harvoin suurempia kuin 2,5 kV:n ylijännitteitä. Taajuusmuuttajaa käytetään kuitenkin usein teollisuudessa, jossa saman muuntajan toisiopuolella on huomattava määrä eri lähtöjä, jotka on suojattu sulakkeilla ja kuten kuvasta 16 oli huomattavissa, sulakkeen poikkipalaminen aiheuttaa noin 4,5 p.u. suuruisentransienttiylijännitteen. Kaavan avulla pystytään arvioimaan, että ylijännitesuojan tulisi suojata sulakkeiden toimiessa syntyvän 3,0 kV:n transienttiylijännite 690 voltin verkossa.

$$\hat{u} = 690V \times p.u \quad (8)$$

Taajuusmuuttajan ylijännitesuojauksessa on otettava huomioon myös kuvan 8 kaltaiset erikoistapaukset teollisuuskäytössä. Tutkimuksissa havaittiin 2 - 6 kV:n transienttiylijännitteitä, joten suojattavan laitteen pitää myös kestää yksittäisiä noin 6 kV:n transienttiylijännitteitä hajoamatta.

Ilmastollisista tapahtumista aiheutuvia ylijännitteitä on hankala arvioida, koska ylijännitteiden määrään vaikuttaa moni eri tekijä. Analysoimalla teknisen raportin IEC TR 62066 mukaisia Ranskassa mitattuja tuloksia [8, 26], voidaan todeta, että salamantiheyden ollessa 2-3 salamaa vuodessa per neliökilometri, verkossa on havaittavissa kymmenen 4 kV:n transienttiylijännitettä vuodessa. Mikäli salaman tiheys on poikkeuksellisen suuri, täytyy tilanne huomioida tilanteen vaatimalla tavalla sillä laitekohtaisen suojan ei ole tarkoitus toimia koko verkon ylijännitesuojana.

Vertaamalla laitoksen sisäisiä ja ilmastollisia ylijännitearvoja UNIPEDEn arvioon sähköverkossa esiintyvien transienttiylijännitteiden määrästä, voidaan todeta transienttiylijännitteen amplitudin huipun asettuvan kuuden kilovoltin kohdalle, mutta teollisuudessa on kiinnitettävä huomiota myös 2,5-4 kV:n transienttiylijännitteisiin.

8 ESIMERKKI YLIJÄNNITESUOJAUKSESTA

Transienttiylijännitteitä on mahdollista syntyä myös kaikkien johtimien välille, esimerkiksi ukkosylijännitteet aiheuttavat usein transienttiylijännitteen, joka kohdistuu jokaiseen vaiheeseen samansuuruisena. Sulakkeen palamisesta aiheutuva transienttiylijännite aiheuttaa usein potentiaalieron vaiheiden välille. Eri ylijännitetyyppien vuoksi laite täytyy suojata eritavoin. Kuvassa 20 on esimerkkejä eri kaapelointitapojen suojausmahdollisuuksista sekä käytettyjen toleranssien arvot.

Suojausmuoto (ylijännitesuoja välillä)	Sähkönjakelujärjestelmän maadoitustapa				
	TT	TN-C	TN-S	IT, jossa jaettu nollajohdin	IT ilman jaettua nollajohdinta
vaihe - nolla	1,1 U_0	-	1,1 U_0	1,1 U_0	-
vaihe - PE	1,1 U_0	-	1,1 U_0	U^{aj}	U^{aj}
nolla - PE	U_0^{aj}	-	U_0^{aj}	U_0^{aj}	-
vaihe - PEN	-	1,1 U_0	-	-	-
vaihe - vaihe	1,1 U	1,1 U	1,1 U	1,1 U	1,1 U

a) Nämä ovat pahimman tapauksen arvoja, joten 10 % toleranssia ei tarvita.

Kuva 20. Ylijännitesuojalta vaadittavat arvot eri järjestelmissä /13, 15/

Teollisuuslaitoksissa käytetään yleisesti myös 400/690V sähköverkkoa, jossa ei ole erillistä nollajohdinta, joten suojaaminen tapahtuu vaiheiden välillä sekä vaiheiden ja suojamaan välillä.

8.1 Suojauskomponenttien määrittäminen

690V taajuusmuuttajassa suojauskomponenttien arvoja täytyi muuttaa, koska 500V laitteessa vaihejännite sekä vaihejännitteen huippuarvo on huomattavasti pienempi kuin 690V verkossa. Varistoreilla on V_{RMS} sekä V_{DC} arvot, jotka tarkoittavat arvoja milloin varistori alkaa johtaa virtaa. Nämä arvot eivät saa ylittyä normaalitilanteessa. Arvojen ylittyessä varistori lämpenee ja ajan myötä hajoaa.

Vaiheiden välisiä ylijännitteitä suojaavat varistorit tulee mitoittaa pienimmillään siten, että pääjännitteen huippuarvo ei ylitä varistorin kynnysjännitteen U_{DC} arvoa eikä pääjännitteen tehollisarvo ylitä varistorille annettua U_{RMS} arvoa. U_{DC} sekä

U_{RMS} arvojen rajat saadaan laskettua 690 voltin verkolle kaavojen 8 ja 9 avulla. Kaavoissa on otettu huomioon verkolle sallittu 10 % toleranssi.

$$U_{RMS} > U_S \times 1,1 \quad (8)$$

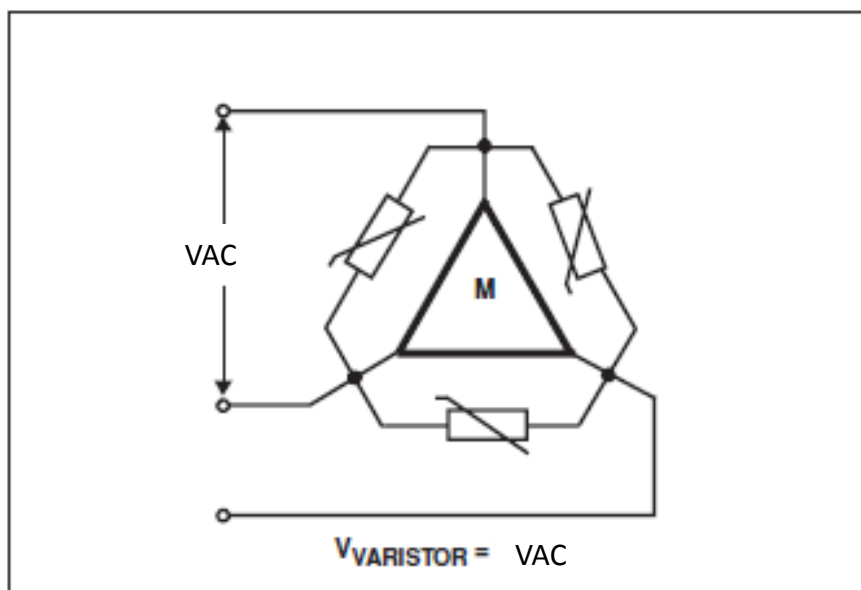
$$U_{DC} > U_S \times \sqrt{2} \times 1,1 \quad (9)$$

$$U_{RMS} > 690 \text{ V} \times 1,1 = 759 \text{ VAC}$$

$$U_{DC} > 690 \text{ V} \times \sqrt{2} \times 1,1 = 1073 \text{ VDC}$$

Mitoituksissa käytetyt esimerkkiarvot on laskettu Epcosin S20-kokoluokan varistoreille. Luku varistorin tyyppikoodissa K kirjaimen jälkeen tarkoittaa varistorin kynnyksjännitettä vaihtovirtapuolella. Esimerkiksi K440 ilmaisee varistorin kynnyksjännitteen olevan 440 VAC.

8.2 Varistoreiden kolmioonkytkentä



Kuva 21. Littelfusen suunnittelusääntö kolmioon kytketyille varistoreille. /10/

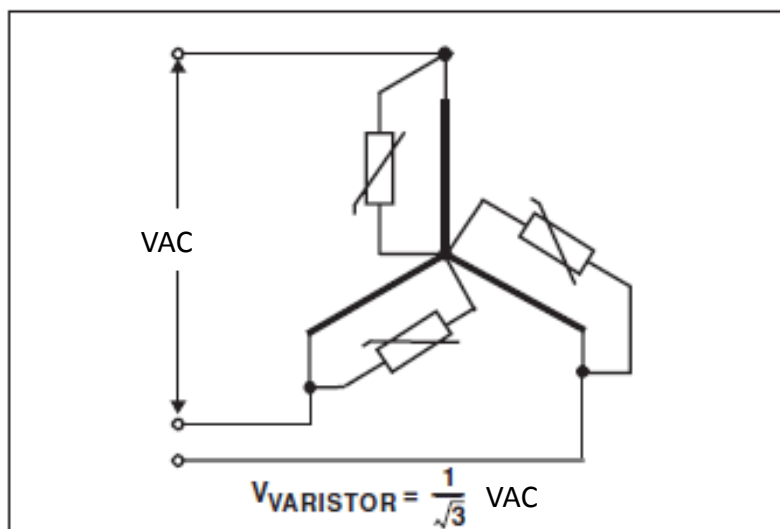
Mikäli käytössä on varistoreiden kolmionkytkentä, tulee Littelfusen suunnittelusäännön perusteella mitoittaa kaavojen 10 ja 11 mukaan

$$\text{varistorinkynnysjänniteAC} > U_{RMS} \quad (10)$$

$$\text{varistorinkynnysjänniteDC} > U_{DC} \quad (11)$$

Kaavojen 10 ja 11 tuloksista voidaan todeta, että pienin vaihtojännitteellä käytettävä varistorin jänniteluokka on 759. Tuloksista voidaan todeta, että kolmiokytkenässä pienin mahdollinen K1100 kokoluokan varistori. Lähemmäksi pääjännitteen arvoa päästään varistoreiden sarjaan kytkennällä. Varistoreiden sarjaan kytkennässä varistoreiden kynnysjännitteet lasketaan yhteen. Jolloin saadaan suurempi kynnysjännite. Sarjaan kytkennässä varistoreiden energiakestoisuus jakaantuu käytettyjen varistoreiden määrällä, mutta varistoreihin vaikuttava virta pysyy samana. Kytkemällä sarjaan kaksi kynnysjännitteeltään K420 olevaa varistoria, saadaan kynnysjännitteeksi 840 VAC ja 1120VDC. /14/

8.3 Varistoreiden tähteenkytkentä



Kuva 22. Littelfusen suunnittelusääntö tähteenkytketyille varistoreille /11/

Käytettäessä tähteenkytkettyjen varistoreiden topologiaa, tulee Littelfusen suunnittelusäännön perusteella yksittäisen varistorin koko mitoittaa kaavojen 12 ja 13 perusteella.

$$\text{varistorinkynnysjänniteAC} > \frac{1}{\sqrt{3}} V_{AC} \quad (12)$$

$$\text{varistorinkynnysjännite}_{DC} > \frac{1}{\sqrt{3}}VDC \quad (13)$$

Laskujen tuloksista voidaan todeta tähtikytkennässä, että pienin mahdollinen käytettävissä oleva varistori K440 kokoluokan varistori. /11/

Tähteenkytkentätopologia on yleisesti ottaen kolmiokytkentää parempi, sillä tähtipisteestä saadaan vaiheiden välillä olevia varistoreita hyödynnettyä myös vaiheen ja maan välisessä suojauksessa kytkemällä varistori maan ja vaiheiden välisen varistoreiden tähtipisteen välille.

8.4 Varistorit tasajännitepuolella

Varistorit on myös mahdollista asettaa tasajännitepuolelle jolloin vain varistorin tasajännite-ehdon täytyy täytyä, mutta koska taajuusmuuttajalla voidaan esimerkiksi jarruttaa moottoria, saattaa välipiirin tasajännite nousta suuremmaksi, kuin pääjännitteen huippuarvo, joten varistorit tulee mitoittaa korkeammalle tasajännitetasolle. Esimerkiksi, jos maksimi välipiirintaso on 1200 voltia, tulee suojauksessa käyttää vähintään kahta K460 kynnysjännitteellistä varistoria sarjaankytkytynä.

Suurempia varistoreita käytettäessä ongelmaksi syntyy varistorin ominaisuus, joka määrittää varistorin leikkaustason, mikä on riippuvainen käytettävän varistorin kynnysjännitteestä. Mitä matalampi kynnysjännite, sitä matalampi leikkaustaso.

8.5 Varistoreiden mitoitus vaiheiden välille

Varistorin suojaustaso voidaan arvioida laskemalla. Varistorin valmistaja ilmoittaa datalehdessä tarvittavat arvot varistorin suojaustason arvioimiseen laskukaa-voilla.

Taulukko 1. Varistorin mitoitusarvot vaiheiden välille

Varistorin mitoitus vaiheiden välille				
	S20K420		S20K440	
Ylijännitetransentin suuruus	4 kV	6 kV	4 kV	6 kV
Ylijännitteen oikosulkuvirta	2 kA	3 kA	2 kA	3 kA
Jännitetaso	1,6 kV	1,7 kV	1,65 kV	1,75 kV
Suojausmarginaali	1,35 kV	1,39 kV	1,35 kV	1,45kV
Syöksyvirran suuruus	0,690 kA	1,61 kA	0,65 kA	1,568 kA
Suojaustaso	2,75 kV	3 kV	2,8 kV	3,1 kV

Taulukossa 1 on yhteenveto vaiheiden välisten varistoreiden mitoituksien tulok-
sista.

Laskenta suoritettiin varistoreille, joita oli mahdollisuus käyttää kolmio- tai tähti-
kytkentäperiaatteella. Laskennassa käytetyt varistorit olivat Epcosin S20K420 se-
kä S20K440.

Syöksyjännitteen (V_s) tasoksi valittiin 4 kV ja 6 kV sekä syöksyjännitteen impe-
danssiarvoksi ($Z_{LÄHDE}$) valittiin IEC 61000-4-5 mukainen 2Ω .

Ylijännitteen generoima oikosulkuvirta saadaan laskettua jännitteen ja resistanssin
suhteen kaavan 14 avulla.

$$I = \frac{U}{R} \quad (14)$$

Sijoittamalla vertailuarvot kaavaan saadaan oikosulkuvirroiksi 4 kV:lla 2 kA ja 6
kV:lla 3 kA.

Vertaamalla oikosulkuvirtojen arvoja virtajännitetaulukkoon (LIITE 3, 4), jossa
jännitetaso saadaan vertaamalla varistorin käyrää virta-asteikkoon. Saadaan
S20K420 varistorille arvot 4 kV:lla 1,6 kV ja 6 kV:lla 1,7 kV. S20K440 varistoril-
le arvot olivat 4 kV:lla 1,65 kV ja 6 kV:lla 1,75 kV.

Huomioidaan 10 % toleranssi, jonka jälkeen suojausmarginaali lasketaan kaavalla
15. Esimerkissä suojausmarginaali on laskettu S20K420 varistorille ja 4 kV:n yli-
jännitetransientille.

$$V_{SIOV} = 1650 * \frac{0,9}{1,1} = 1350 V \quad (15)$$

Muiden varistoreiden suojausmarginaalit ovat S20K420 varistorilla 6 kV:lla 1,39 kV. Varistolla S20K440 arvot ovat 4 kV:lla 1,35 kV ja 6 kV:lla 1,45 kV.

690 voltin verkossa tulee kolmiokytkennässä käyttää K420-varistoreita kaksi kappaletta sarjassa vaiheiden välillä, jotta kynnyksen jännite nousee riittävän korkealle. Myös jänniteluokan K440 varistoria tulee käyttää 690 voltin verkossa tähtikytkennässä, joten vaiheiden välille tulee 2 varistoria sarjaan. Tästä syystä täytyy varistoreiden suojausmarginaalit kertoa kahdella.

Syöksyvirran suuruus saadaan laskettua kaavalla 16. Esimerkissä syöksyvirran suuruus on laskettu S20K420 varistorille ja 4 kV:n ylijännitetransientille.

$$i^* = V_S - \frac{V_{SIOV}}{Z_{L\dot{A}HDE}} \quad (16)$$

$$i^* = (4000 V - 1309 V) * \frac{2}{2\Omega} = 691 A$$

6 kV:n transienttiylijännitteellä varistorilla S20K420 syöksyvirransuuruus on 1,61 kA. Varistorin S20K440 syöksyvirtojen suuruudet ovat 4 kV:lla 650 A ja 6 kV:lla 1,568 kA.

Kyseisillä varistoreilla saavutettu suojaustaso saadaan arvioitua vertaamalla varistoreiden syöksyvirran suuruuksia varistoreiden jännitevirtataulukossa oleviin käyriin (LIITE 3,4).

Jännitevirtataulukosta saadut arvot tulee kertoa kahdella, koska tähtikytkennässä vaiheiden väliset varistorit ovat sarjaan kytkettynä. Suojaustasoksi saadaan S20K420 varistorilla 4 kV:lle 2,75 kV ja 6 kV:lle suojaustasoksi saadaan 3 kV. S20K440 varistorin suojaustasoksi saatiin 4 kV:lla 2,8 kV ja 6 kV:lla suojaustasoksi saadaan 3,1 kV. /5/

Suojaustasot asettuvat hyvin lähelle toisiaan, joten on järkevämpää käyttää tähtikytkentää vaiheiden välisessä suojauksessa. Tähtikytkennässä varistoreiden määrä jää kolmeen kun kolmiokytkennässä varistoreita tulisi käyttää kuusi kappaletta.

8.6 Varistorin mitoitus vaiheiden ja maan välille

Taulukko 2. Varistorin mitoitusarvot vaiheiden ja maan välille

Varistorin mitoitus vaiheiden ja maan välille		
	S20K385+S20K440	2 X S20K440
Ylijännitetransentin suuruus	7,4 kV	7,4 kV
Ylijännitteen oikosulkuvirta	0,617 kA	0,617 kA
Suojausmarginaali	1 kV	1,23 kV
Syöksyvirran suuruus	0,429 kA	0,412 kA
Suojaustaso	2,5 kV	2,6 kV

Taulukossa 2 on yhteenveto vaiheiden ja maan välisten varistoreiden mitoituksien tuloksista.

Vaiheen ja maanpotentiaalinvälille mitoittavat varistorit tulee mitoittaa siten, että vaihejännite ei ylitä missään kohdassa varistoreille annettuja kynnysjännitteitä. Taajuusmuuttajaa voidaan käyttää kulmamaadoitetussa verkossa, jossa yksivaihe on maadoitettu, nousee toisen vaiheen jännite maata vasten pääjännitteen suuruiseksi. Näin ollen varistoreiden kynnysjännitteet voivat olla pienimmillään 690 voltin verkossa 759 VAC ja 1073 VDC. Vertaamalla VDC arvoa Epcosin S20 ja S25 (LIITE 3 ja 4) kokoluokkien varistoreihin, vaiheesta maahan on mahdollista käyttää K1100 jänniteluokan varistoria tai sarjassa kahta pienempää varistoria. Vaiheiden välisten varistoreiden tähtikytkentä mahdollistaa helposti varistoreiden sarjaan kytkennän. Kytkemällä varistori vaiheiden välisten varistoreiden nollakohtaan, saadaan toteutettua sarjaankytkentä jokaisen vaiheen ja maan välille vain lisäämällä yksi komponentti.

690 voltin verkossa pienin mahdollinen varistori sarjaankytkettynä jänniteluokaltaan K440 olevan varistorin kanssa on K385 jänniteluokkaa oleva varistori. Sillä

varistoreiden yhteenlaskettu jännitetaso on pienin mahdollinen, mitä voidaan 690 voltin verkossa käyttää.

Varistoreiden laskenta suoritetaan jänniteluokaltaan K385 olevalle varistorille ja tähtikytkennässä käytettävälle K440 jänniteluokan varistorille. Laskut suoritetaan samalla kaavalla kuin vaiheiden välisessä mitoituksessa, mutta maata vasten mitoitettaessa laskuissa käytetään impedanssin ($Z_{LÄHDE}$) arvona 12 Ω .

Syöksyjännitteen vaatimustasoksi asetetaan 7,4 kV (V_S) joka aiheuttaa 12 Ω impedanssilla 617 ampeerin oikosulkuvirran.

Oikosulkuvirran perusteella virtajännitetaulukosta (LIITE 4) saadaan suojaustasoksi toleranssi huomioon ottaen S20K385 varistorille 1,0 kV ja varistorille S20K440 1,23 kV.

Syöksyvirran laskukaava poikkeaa S20K385 varistorilla vaiheidenvälisessä mitoituksessa käytetystä kaavasta impedanssimuutoksen lisäksi, koska kytkennässä on kaksi erilaista varistoria.

$$i^* = \frac{7400 \text{ V} - (1023 \text{ V} + 1230 \text{ V})}{12 \Omega} = 429 \text{ A}$$

Varistorilla S20K440 syöksyvirran suuruus 7,4 kV:lla ja 12 Ω impedanssilla on 412 ampeeria.

Varistoreilla saavutetut suojaustasot saadaan vertaamalla syöksyvirran suuruutta virtajännitetaulukkoon. Kytkemällä vaiheiden välisten varistoreiden tähtipisteeseen S20K385 jänniteluokkaisen varistorin saavutetaan maata vasten suojaustaso 2,5 kV ja S20K440 varistorilla saavutetaan taso 2,6 kV. /5/

8.7 Varistoreiden eliniän lisäys

Ylijännitesuojan elinikää voidaan lisätä käyttämällä varistoreita rinnakkain kytkettyinä. Mikäli rinnankytketyt varistorit ovat samanarvoisia, pysyy varistoreiden

suojaustaso samana, mutta virta jakaantuu suurilla virroilla kahden rinnankytketyn varistorin välillä pahimmassa tapauksessa suhteessa 25/75 %, pienillä virroilla virran jakoa ei tapahdu. /5/

Toinen mahdollisuus eliniän pidentämisen on valita eri mallisarjaa oleva varistori. Epcos tarjoaa ominaisuuksiltaan samankaltaisia, mutta fyysisesti suurempia varistoreita. Mahdollisesti käytettävissä olevat sarjat ovat S25 sekä Q20 joiden virran sieto on hieman parempi. Fyysisesti suuremmilla varistoreiden leikkaustaso on myös S20 kokoluokkaa parempi.

8.7.1 Eliniän vertailu laskujen perusteella

Varistoreiden transienttiylijännite kertojen elinikää voidaan arvioida laskemalla. Laskujen tuloksia vertaamalla mitattuihin arvoihin voidaan arvioida varistorityyppejä muuttamalla saavutetut edut.

Laskentavertailu suoritettiin jänniteluokaltaan 440 VAC olevalle varistorille, joiden kokoluokat ovat S20 ja S25.

Syöksyjännitteen (V_S) tasoksi valittiin 4 kV ja 6 kV, sekä syöksyjännitteen impedanssiarvoksi ($Z_{LÄHDE}$) valittiin vaiheiden välisessä ylijännitetestauksessa käytettävä 2Ω .

Varistoreiden elinikä lasketaan kohdan 9.5 kaavoilla

Ylijännitteen generoima oikosulkuvirta 4 kV:lla on 2 kA ja 6 kV:lla 3 kA.

Varistoreiden suojausmarginaalit saadaan vertaamalla oikosulkuvirran arvoja virtajännitetaulukkaan (LIITE 3, 4). 10 % toleranssi mukaan lukien varistoreiden suojausmarginaalit ovat S20K420 varistorilla 4 kV:lla 1,35 kV ja 6 kV:lla 1,43 kV. Varistorin S25K440 arvot ovat 4 kV:lla 1,35 kV ja 6 kV:lla 1,4 kV.

K440 jänniteluokan varistoria tulee käyttää 690 voltin verkossa tähtikytkennässä, joten vaiheiden välille tulee kaksi varistoria sarjaan. Tästä syystä täytyy varistoreiden suojausmarginaalit kertoa kahdella.

Varistoreiden syöksyvirtojen suuruudet ovat S20K440 varistorilla 4 kV:lla 650 A ja 6 kV:lla 1,568 kA. Varistorin S25K440 vastaavat arvot ovat 4 kV:lla 650 A ja 6 kV:lla 1,568 kA.

Vertaamalla syöksyjännitearvoja varistoreiden kuormituskäyriin (LIITE 3, 4), pystytään arvioimaan varistoreiden elinikä. Varistori S20K440 kestää valmistajan ilmoittaman kuormituskäyrän perusteella 4 kV:n ylijännitetransientteja noin 900 kertaa ja 6 kV:n ylijännitetransientteja noin 65 kertaa. S25K440 Varistori kestää laskujen perusteella 4 kV:n ylijännitetransientteja noin 8000 kertaa ja 6 kV:n ylijännitetransientteja noin 800 kertaa. /9/

Elinikävertailussa ei laskettu Q-mallisarjan varistorin ikääntymistä, koska kyseisessä mallisarjassa ei ole jänniteluokaltaan 440 VAC olevaa varistoria.

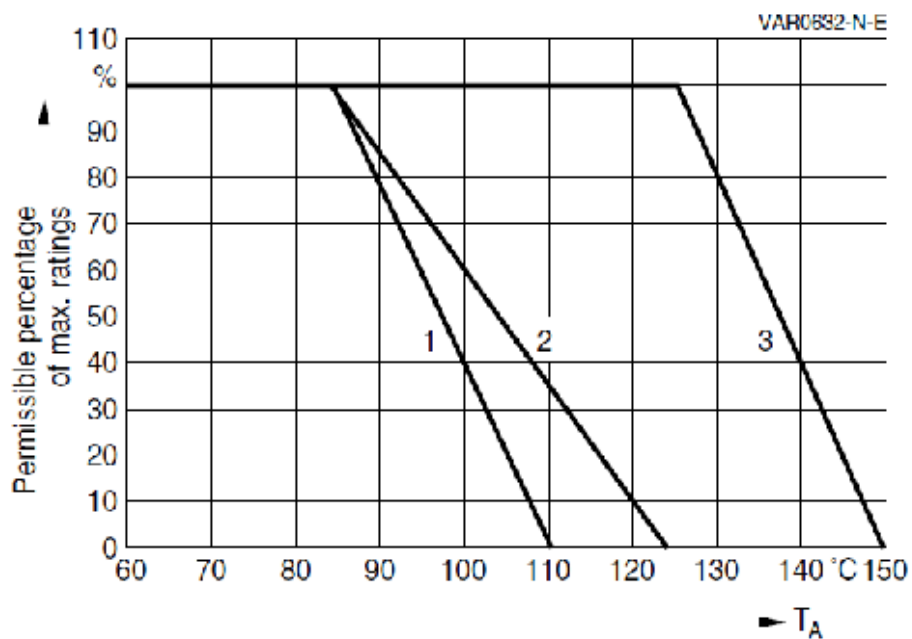
8.7.2 Varistorin mitoitukseen vaikuttavat ympäristömuutokset

Laitekohtaista suojausta varten oleva varistori sijoitetaan lähes aina suojaavan laitteen sisälle. Ympäristön lämmön vaikutukset on otettava huomioon suunnittelussa, mikäli komponentin ympäristölämpötila on yli valmistajan antaman arvon.

Lämpötilan mukaan alennettavia arvoja ovat:

- jännitetaso
- virran kestoisuus
- energiankestoisuus
- keskimääräinen tehohäviö.

/5/

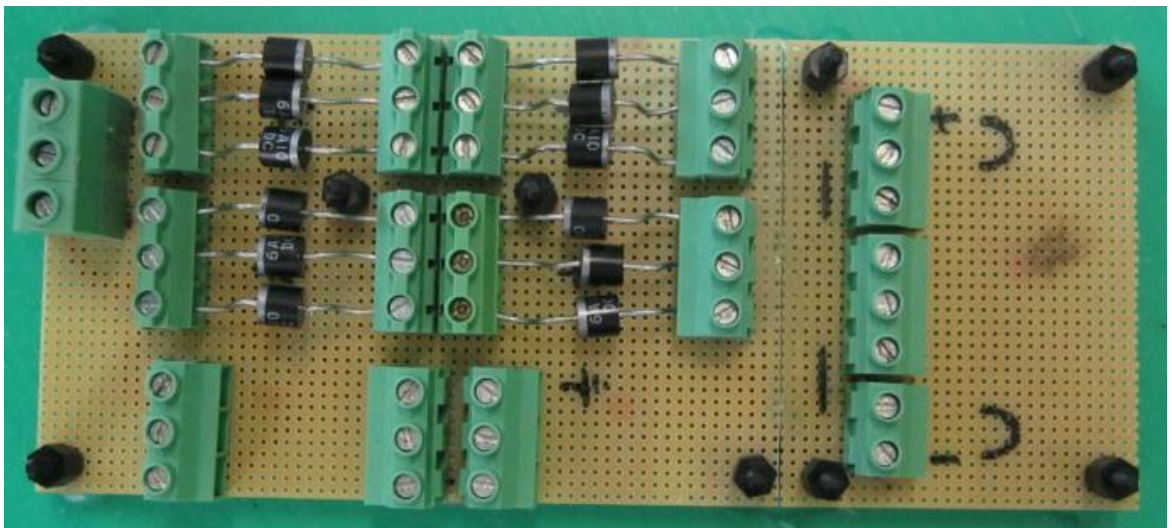


Derating curve 1	Derating curve 2	Derating curve 3
SIOV- B LS	SIOV- S...(AUTO)(E2)(E3) Q ETFV types SFS types	SIOV- S...AUTOD1

Kuva 23. Varistorin toimintakyky lämpötilan suhteen /15/

8.8 Varistoreiden mittaus

Suojauskomponenttien vertailu suoritettiin erillisellä testauslevyllä. Testipöydän tavoitteena oli suojauskomponenttien helppo vaihdettavuus sekä mahdollisimman monipuolisten suojaustekniikoiden simulointi. Testilevyllä oli mahdollisuus asentaa suojakomponentteja vaihto- sekä tasajännitepuolelle. Myös suojakomponenttien ja verkkoliittimen välistä induktanssia saatiin muutettua. Testilevyllä oli käytetty jännitekestoisuuden varmistamiseksi kahta diodia sarjaankytkettynä sekä yläettä alahaaran diodien puolella.



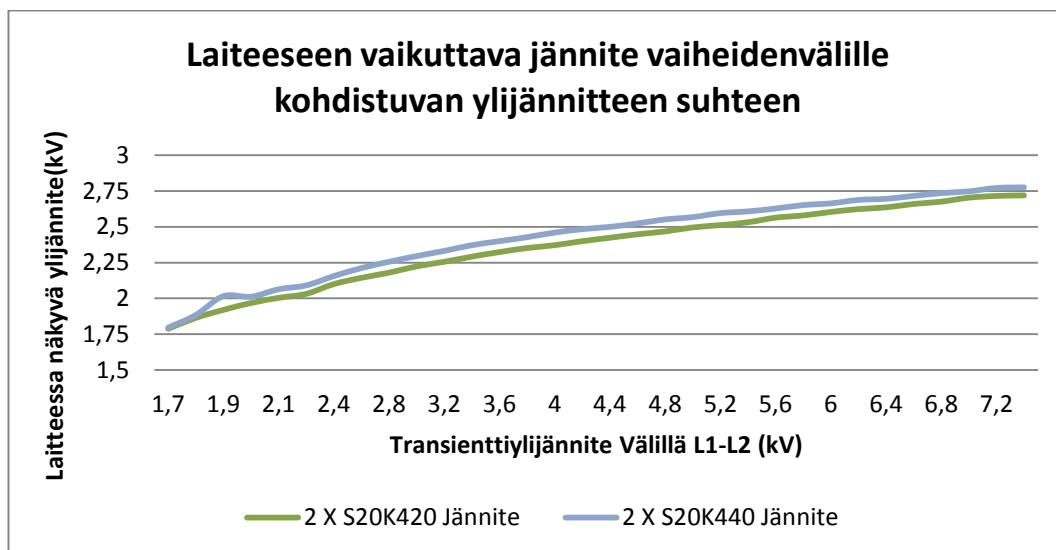
Kuva 24. Testeissä käytetty testilevy

Testilaitteistona tutkimuksessa käytettiin Tektronix DPO 5054-oskilloskooppia, Testekin korkeajännite differentiaalimittapäätä sekä Haefelyn PSurge8000-transienttiylijännitegeneraattoria.

Tutkimuksissa käytetty Haefelyn P surge 8000-laitteistolla voidaan testata transienttiylijännitteen kestävyyttä aina 7,4 kV:iin asti. P surge mahdollistaa ylijännite transientin kytkemisen mihin tahansa vaihejännitteen kohtaan. Pahimmat transienttiylijännitteet diodisilloille asettuvat pääjännitteen vaihekulmaan 90 ja 270. Tällöin pääjännite on joko negatiivisessa huipussaan tai positiivisessa huipussaan, joka 690 voltin verkkojännitteellä on normaali tilanteessa 975 voltia.

8.8.1 Vaiheiden välisten ylijännitteiden suojaustason mittaus

Kuvassa 25 on esitetty kynnyksjännitteeltään pienimmät mahdolliset vaihtoehdot vaiheiden välillä esiintyvien ylijännitteiden suojaamiseksi sekä tähti- että kolmiokytkennässä. Kuvassa jännitettä tarkoittaa arvo, johon on laskettu yhteen pääjännitteen arvo sekä ylijännitteen suuruus.



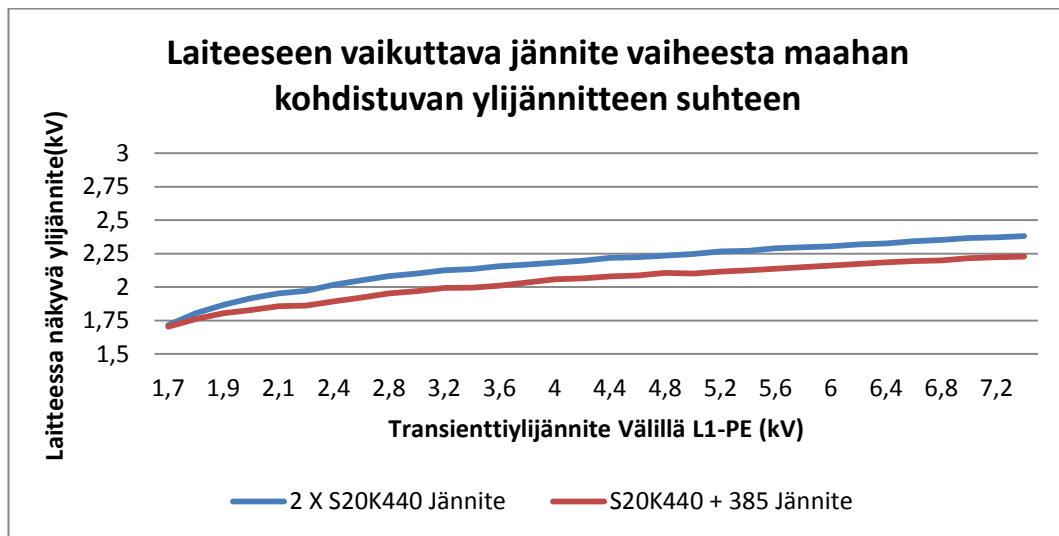
Kuva 25. Varistoreiden suojaustasot suhteessa transienttiylijännitteisiin.

Tuloksista on analysoitavissa, että mikäli suojattavana komponenttina on Semikronin SKIIP23NAB126V1, ylittyy suojattavan komponentin eli tasasuuntausdiodin hetkellinen ylijännitekestoisuus ylittyy huomattavasti verkossa tutkimuksissa havaituilla ylijännitteillä.

8.8.2 Vaiheen ja maan välisten ylijännitteiden suojaustason mittaus

Koska suojaustaso asettui molempien kytkentävaihtoehtojen tapauksessa hyvin lähelle toisiaan, on suojaus järkevintä toteuttaa tähtikytkennällä. Tähtikytkentää käytettäessä, voidaan hyödyntää vaiheesta maahan kohdistuvan transienttiylijännitteen suojauksessa jo vaiheiden välisiä suojakomponentteja, lisäämällä vain vaiheiden välisessä suojauksessa käytettyjen varistoreiden tähtipisteestä maahan yksi varistori. Mikäli vaiheiden välisessä suojauksessa käytetään kolmiokytkentää, tulee varistoreita kytkentään moninkertainen määrä. Jos 690 voltin taajuusmuuttajaa käytettäisiin kulmamaadoitetussa verkossa, jossa yksivaihe on maadoitettu, nousee toisen vaiheen jännite maata vasten pääjännitteen suuruiseksi.

Kuvassa 26 on esitetty kahdella eri varistorivaihtoehdolla toteutettu suojaus ja laitteessa näkyvät ylijännitteet transienttiylijännitteen suhteen vaiheesta maahan kohdistuvassa transienttiylijännitteessä.

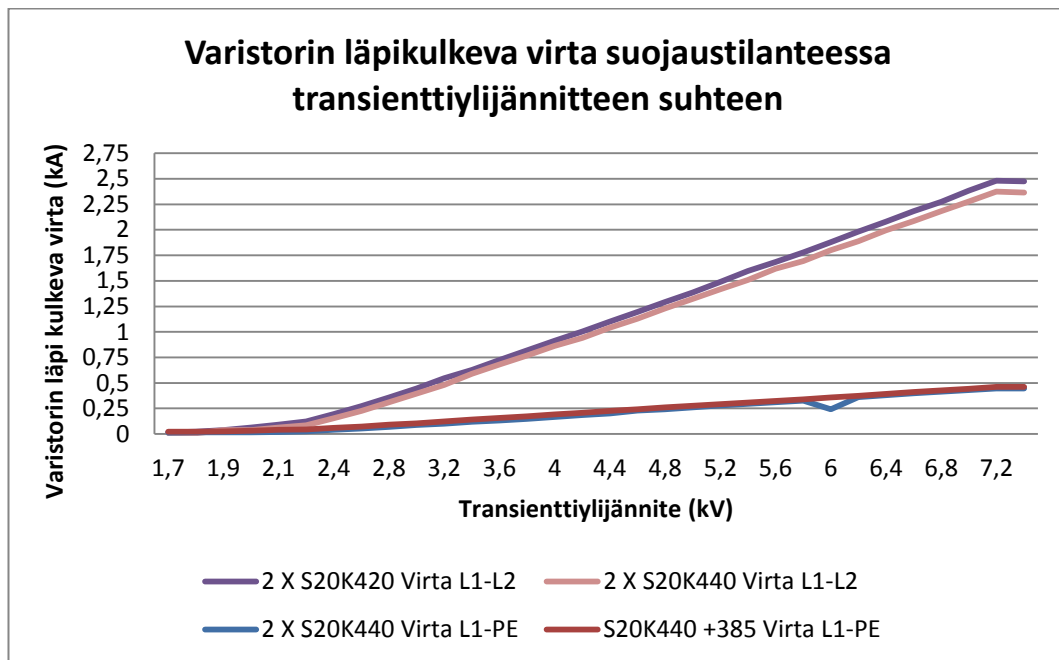


Kuva 26. Transienttiylijännite kohdistuessa välille L1-PE

Mittauksista on analysoitavissa, ettei laitteen tasasuuntauskomponentin jännitteenkesto maata vasten V_{ISOL} ylitä edes 7,4 kV:n transienttiylijännitteellä.

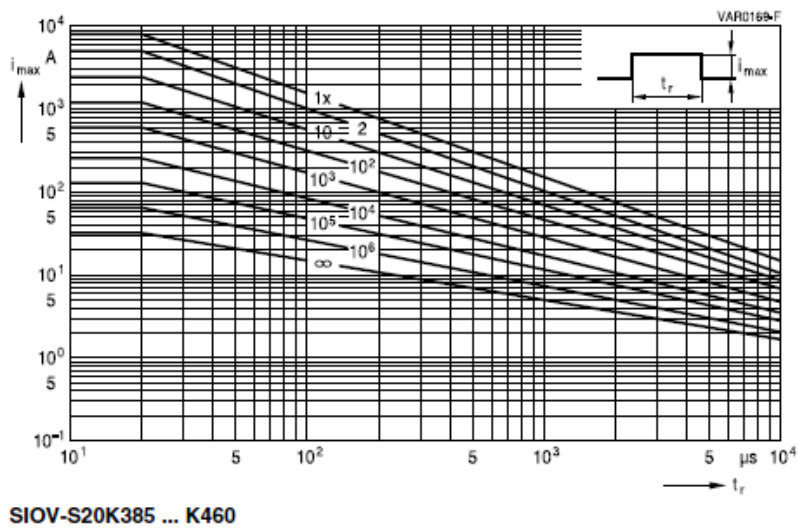
8.8.3 Varistoreiden eliniät mitatuilla arvoilla

Varistorin elinikään normaaliolosuhteissa vaikuttaa kuinka suuri virta niiden lävitse on kulkenut. Valmistaja ilmoittaa datalehdessä varistoreille taulukon, jonka perusteella pystytään arvioimaan varistoreiden elinikää läpikulkevan virran suhteen. Kuvassa 26 on vaihtoehtoina käytettyjen varistoreiden virrat transienttiylijännitteen suhteen.



Kuva 27. Varistorin läpikulkeva virta transienttiylijännitteen suhteen

Verrattaessa kuvan 27 mitattuja arvoja käytettyjen Epcosin S20 kokoluokan varistorien datalehden arvoihin (**Kuva 28.**), voidaan nähdä kuinka monta tietyn suurista transienttiylijännitettä varistorit kestävät.



Kuva 28. Epcosin arvio varistoreiden vanhenemisaika virran suhteen /14/

Taulukossa 3 on esitetty varistorin kohdistuva transienttivirta sekä suojauskestokerrat transienttiylijännitteen suhteen.

Taulukko 3. Varistoreiden kestot transienttiylijännitteen suhteen

Transientti ylijännite	Vaiheiden välinen suojaus				Vaiheen ja maan välinen suojaus	
	Varistorin virta (A)		Varistorin kesto		Varistorin virta(A)	Varistorin kesto
	S20K420	S20K440	S20K420	S20K440		
2	63,2	38,16	1000000	∞	16	∞
2,4	193,6	154,3	50000	90000	40	∞
2,8	357,2	311,9	7500	8500	69,28	1000000
3,2	547,2	481	4000	6000	101,3	500000
3,6	723,2	679,2	700	800	133,1	80000
4	912	861,6	550	650	166,6	60000
4,4	1101	1042	200	250	201,8	50000
4,8	1293	1229	80	85	242,4	15000
5,2	1490	1418	70	75	278,4	9500
5,6	1685	1620	55	60	310	8500
6	1879	1802	40	45	341,6	8000
6,4	2081	1994	30	35	380	7000
6,8	2275	2184	25	30	414,8	5500
7,2	2480	2374	15	20	444,4	4000
7,4	2476	2364	15	20	444,8	4000

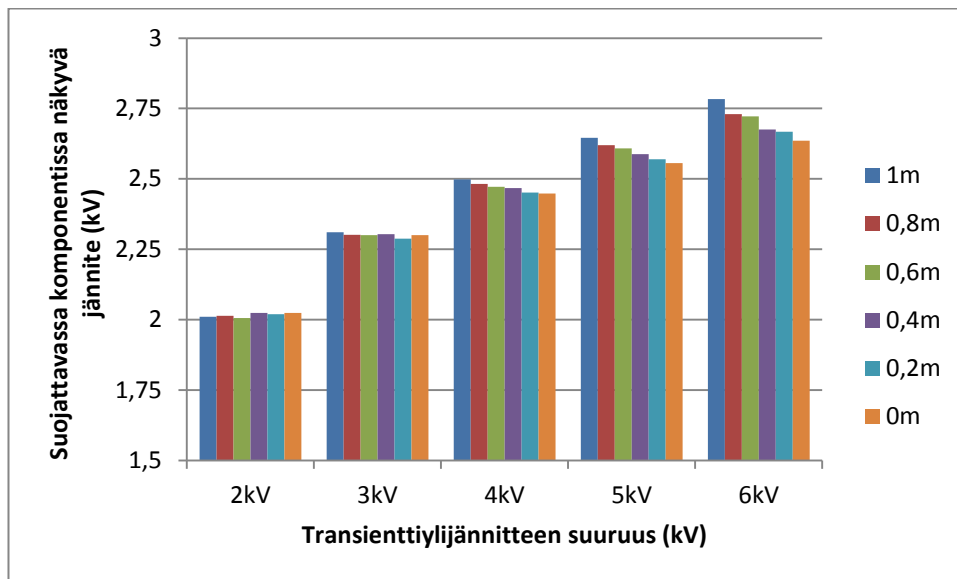
Verrattaessa kohdan 9.5 ja 9.6 laskettuja arvoja ja mitattuihin arvoihin, voidaan huomata eroavaisuutta arvojen välillä. Ero selittyy sillä, että testatut varistorit ovat toleranssien keskivaiheilla kun taulukkoarvot ovat toleranssien alapäästä.

8.8.4 Induktanssin vaikutus suojaustasoon

Mikäli suojauskomponenttia ei pystytä asentamaan heti tuloliittimen läheisyyteen, syntyy johtimen ja suojauskomponentin väliin induktanssia.

Suuri virran suhteellinen muutosnopeus saa aikaiseksi jännitehäviön induktanssissa. Jännitehäviö hidastaa suojauksen toimivuutta, joten jännite suojattavan komponentin ylitse pääsee nousemaan suuremmaksi. Suojaustason huononemisen lisäksi johtimessa kulkeva virta indusoituu jännitteeksi ja tämä sekoittaa esimerkiksi laitteen elektroniikkaa.

Induktanssin vertailu suoritettiin käyttämällä 1,5 mm² johdinta ennen suojakomponentteja. Johdinta lyhennettiin kerralla 20 senttimetriä. Suojakomponentteina testissä käytettiin kahta S20K440 varistoria sarjaankytkettynä.



Kuva 29. Induktanssin vaikutus suojaustasoon

Tuloksista on huomattavissa induktanssin vaikutus suojaustasoon. Suuremmilla jännitteillä induktanssi aiheuttaa huomattavaa suojaustason heikkenemistä.

9 YHTEENVETO

Taajuusmuuttajalle standardin asettamat rajat ovat varsin matalat, mutta valmistaja voi parantaa taajuusmuuttajan transienttiylijännitekestoja lisäämällä taajuusmuuttajaan ylijännitesuojakomponentteja. Näin taataan parempi toimintavarmuuden taajuusmuuttajalle.

Tässä työssä selvitimme miten suuria ylijännitetransientteja sähköverkossa esiintyy sekä esitimme suojauskomponentin valintaesimerkin. Transienttiylijännitteiden määrää on hyvin vaikea arvioida, sillä se on hyvin riippuvainen taajuusmuuttajan käyttöympäristöstä. Esimerkiksi jos keskuksessa on paljon kontaktoriohjat-
tuja lähtöjä saattaa transienttiylijännitteitä esiintyä huomattavasti enemmän kuin esimerkiksi jos lähdöt ovat taajuusmuuttaja käyttöjä tai jos rinnakkaisia lähtöjä on hyvin vähän.

Lopputyön avulla voidaan määrittää ylijännitetasot, joita taajuusmuuttajan tulee kestää, jotta asiakkaalle voidaan taata parantunut toimintavarmuus

Tässä työssä valinta esimerkkinä käytimme varistoria, koska sen tarjoama suojaustaso oli hintaan nähden ylivoimainen. Mikäli on mahdollista, kannattaa valita käytettäväksi suuremman kokoluokan varistori. Suuremmalla varistorilla saavutetaan hieman parempi suojaustaso sekä sen kestoikä on huomattavasti pidempi kuin pienemmällä kokoluokalla.

Koska induktanssilla on suojaustasoa heikentävä vaikutus, tulee suojakomponentti sijoittaa mahdollisimman lähelle suojattavaa komponenttia induktanssin minimoimiseksi.

Taajuusmuuttajan pääpiiriä suunniteltaessa on syytä huomioida myös komponenttien ylijännitekestoisuus, koska näin ollen valmistaja pystyy takaamaan laitteen ylijännitekestoisuuden taajuusmuuttajalle huomattavasti helpommin. Mikäli komponenttien ylijännitekestoisuus on pieni, ei suurien transienttiylijännitesuojauksessa pystytä käyttämään varistoria. Mikäli jännitetaso on mitoitettu matalalle,

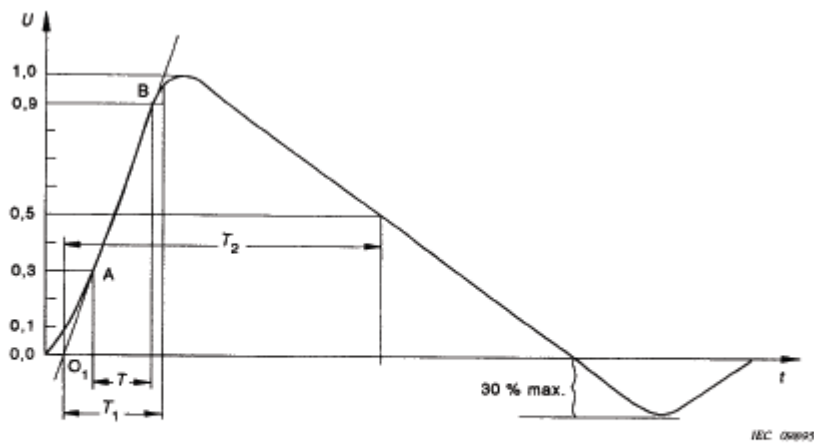
saattaa taajuusmuuttaja toimia verkon ylijännitesuojana ja tällöin hajota ensimmäisenä suojauksen vanhenemisen johdosta.

LÄHDELUETTELO

- /1/ ABB keskijänniteverkon ylijännitesuojan datalehti. Viitattu 28.4.2012.
[http://www05.abb.com/global/scot/scot245.nsf/veritydisplay/b3f4b409d5feac50c12576f800448408/\\$file/POLIM-D%20CHABB%20103%20EN%2031.03.2010.pdf](http://www05.abb.com/global/scot/scot245.nsf/veritydisplay/b3f4b409d5feac50c12576f800448408/$file/POLIM-D%20CHABB%20103%20EN%2031.03.2010.pdf)
- /2/ Aro, M., Elovaara, J., Karttunen, M., Nousiainen, K. & Palva, V. 2003. Suurjännitetekniikka 568. Jyväskylä: Otatieto / Yliopistokustannus.
- /3/ Elovaara, J. & Haarla, L. 2011. Sähköverkot II. Helsinki, Otatieto.
- /4/ Elovaara, J. & Metsikkö, A. 1994. Ylijännitesuojaus. Sähköurakoitsijaliiton koulutus ja kustannus.
- /5/ Epcosin suunnitteluopas varistoreille. Viitattu 23.2.2012. <http://www.schmid-multitech.sk/images/SIOVMetalOxideVaristors.pdf>
- /6/ Ferrazfusen puolijohteiden suojauksessa käytettävien sulakkeiden datalehti. Viitattu 26.3.2012.
http://www.ferrazfuses.com/cms_admin/fckeditor/editor/filemanager/connectors/php/bin/Semiconductor%20European%20%20690V.pdf
- /7/ Hieta-Wikman, S., Erkinheimo, H. & Suomen sähkö- ja teleurakoitsijaliitto. 1997. Taajuusmuuttajat: Käyttö, asennus ja häiriöt. Sähköinfo.
- /8/ IEC TR 62066.
- /9/ Jokinen K. Moottorikäyttöjen säätö. 2006
- /10/ Lehto E. Diplomityö 2012.
- /11/ Littelfusen suunnitteluopas varistoreille. Viitattu 22.2.2012.
http://www.littelfuse.com/data/en/Application_Notes/EC638.pdf

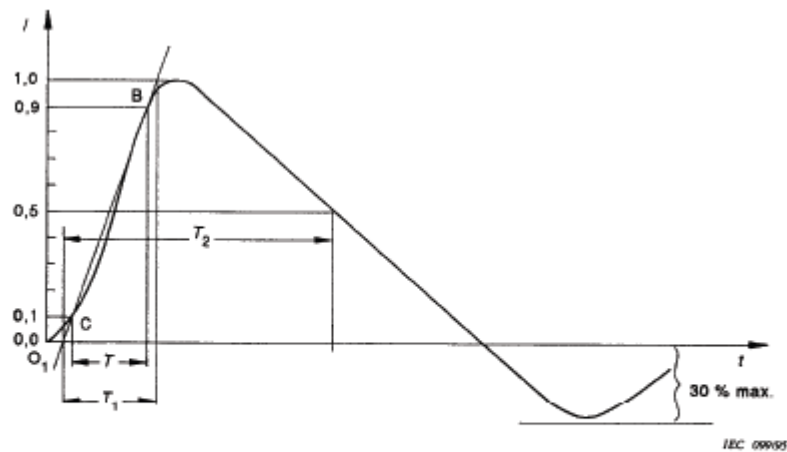
- /12/ Phoenix contact. Perustietoa ylijännittesuojauksesta. Viitattu 4.5.2012.
http://www.phoenixcontact.fi/local_content_pdf/pdf_fin/Trabtech_basics_52002039_LR.pdf
- /13/ Rakennussähköistys kortit ST 53.16.
- /14/ S20-mallisarjan varistorin datalehti. Viitattu 20.2.2012.
http://www.epcos.com/inf/70/db/var_08/SIOV_Leaded_StandarD.pdf
- /15/ S25-mallisarjan varistorin datalehti. Viitattu 20.2.2012.
http://www.epcos.com/inf/70/db/var_08/SIOV_Leaded_SuperioR_S25.pdf
- /16/ SemikroninSKIIP23NAB126V1 moduulin datalehti. Viitattu 15.2.2012.
http://www.semikron.com/products/data/cur/assets/SKiiP_23NAB126V1_25230060.pdf
- /17/ Standardi IEC 61000-4-5.
- /18/ Standardi IEC 61800-3.
- /19/ UNIPEDEN arvio verkon transienttiylijännitteistä. Viitattu 4.4.2012.
http://www.seered.co.uk/sunvic_capacitor_information.pdf
- /20/ Vaconin historia. Viitattu 2.5.2012.
<http://www.vacon.fi/Default.aspx?id=473322>

LIITE 1. Standardin 61000-4-5 mukaiset aaltomuodot /17/



Front time: $T_1 = 1,67 \times T = 1,2 \mu\text{s} \pm 30 \%$
 Time to half-value: $T_2 = 50 \mu\text{s} \pm 20 \%$

**Figure 2 – Waveform of open-circuit voltage (1,2/50 μs)
 (waveform definition according to IEC 60060-1)**



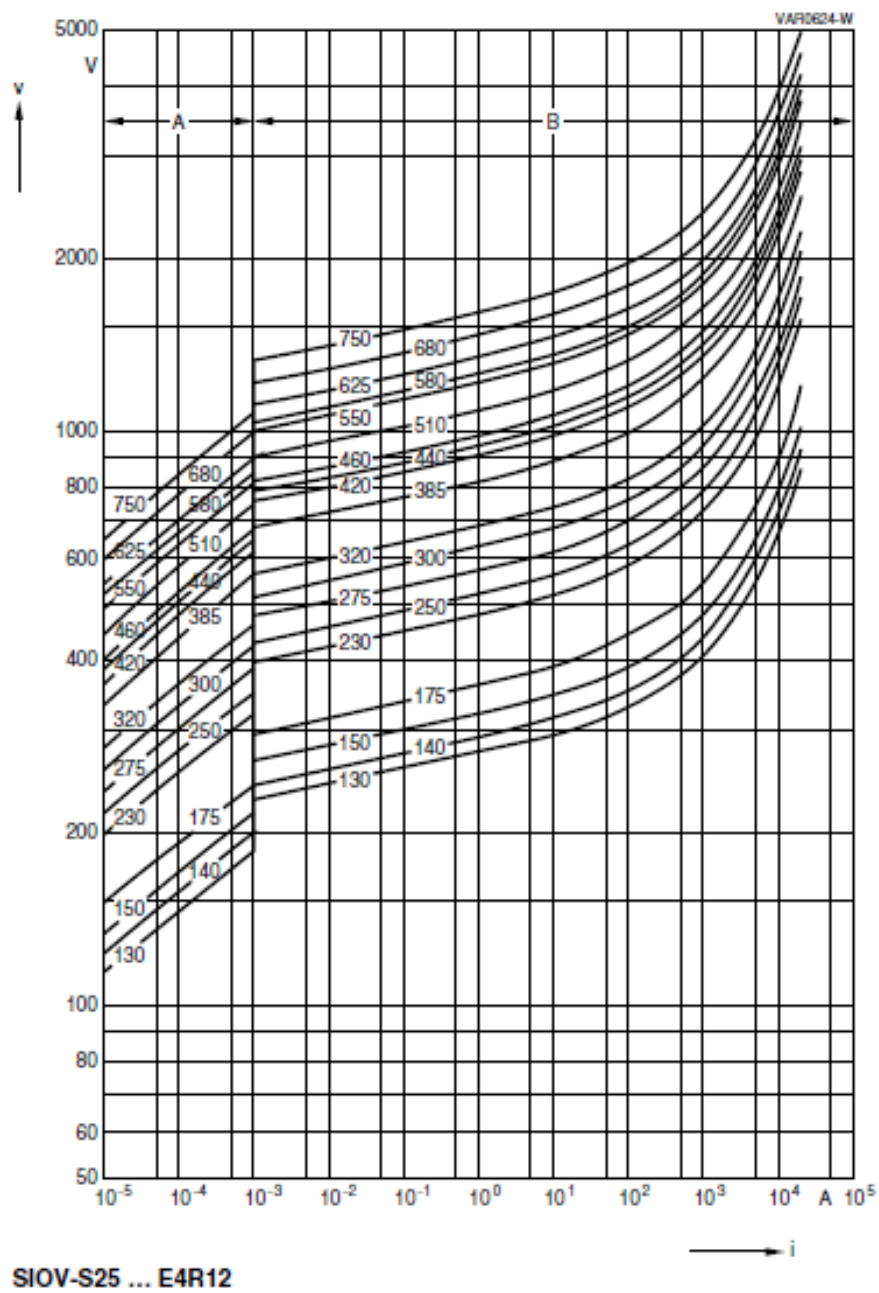
Front time: $T_1 = 1,25 \times T = 8 \mu\text{s} \pm 20 \%$
 Time to half-value: $T_2 = 20 \mu\text{s} \pm 20 \%$

**Figure 3 – Waveform of short-circuit current (8/20 μs)
 (waveform definition according to IEC 60060-1)**

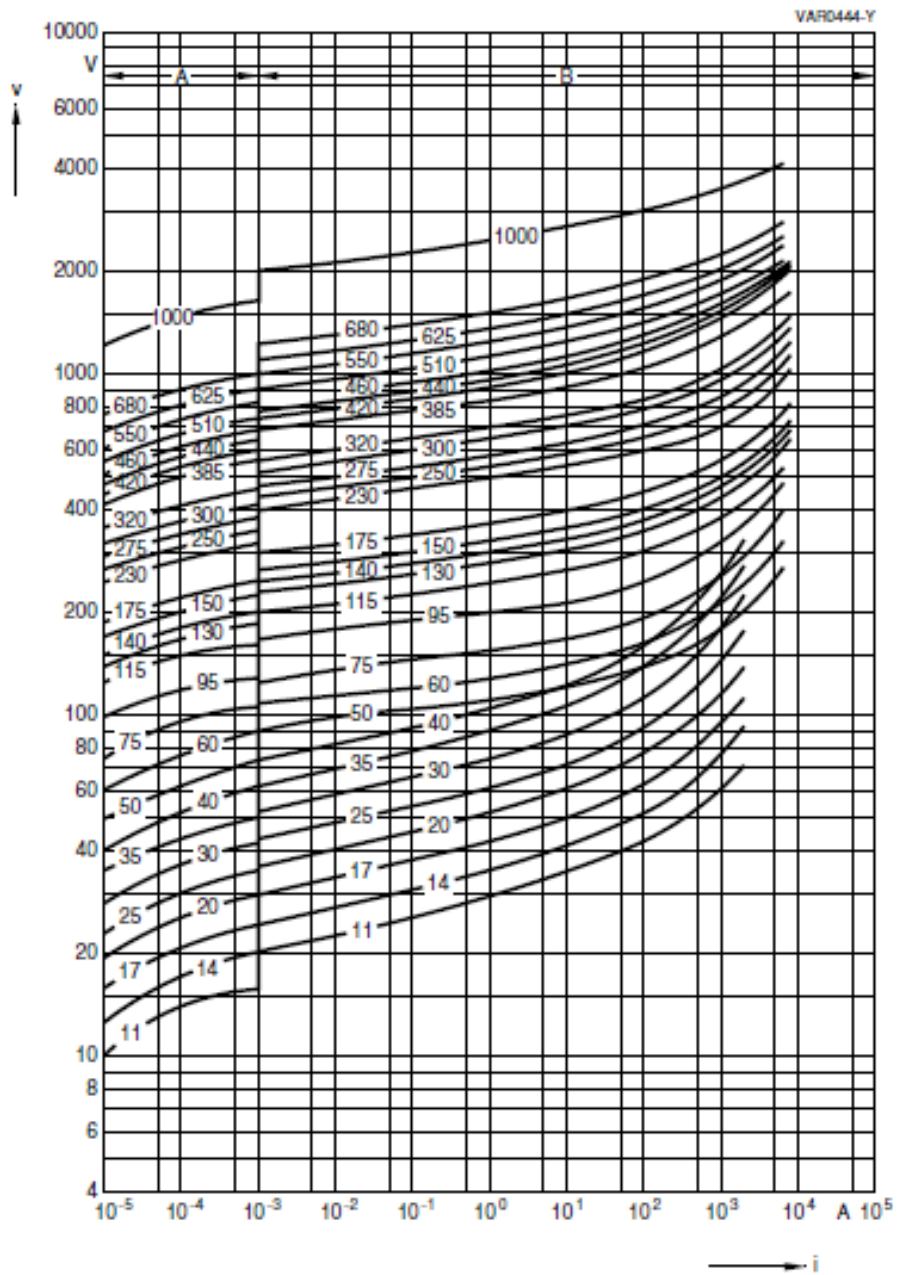
LIITE 2. Ote Semikron SKIIP23NAB126V1 datalehdessä /16/

Absolute Maximum Ratings		$T_s = 25\text{ °C}$, unless otherwise specified		
Symbol	Conditions	Values	Units	
IGBT - Inverter, Chopper				
V_{CES}	$T_s = 25\text{ (70) °C}$	1200	V	
I_C		41 (31)	A	
I_{CRM}		50	A	
V_{GES}		± 20	V	
T_j		- 40 ... + 150	°C	
Diode - Inverter, Chopper				
I_F	$T_s = 25\text{ (70) °C}$	30 (22)	A	
I_{FRM}		50	A	
T_j		- 40 ... + 150	°C	
Diode - Rectifier				
V_{RRM}	$T_s = 70\text{ °C}$	1600	V	
I_F		46	A	
I_{FSM}		$t_p = 10\text{ ms, sin } 180^\circ, T_j = 25\text{ °C}$	370	A
i^2t		$t_p = 10\text{ ms, sin } 180^\circ, T_j = 25\text{ °C}$	680	A ² s
T_j		- 40 ... + 150	°C	
Module				
I_{tRMS}	per power terminal (20 A / spring)	40	A	
T_{stg}		- 40 ... + 125	°C	
V_{isol}	AC, 1 min.	2500	V	

LIITE 3. Virtajännite taulukko Epcos S25 kokoluokan varistoreille /15/

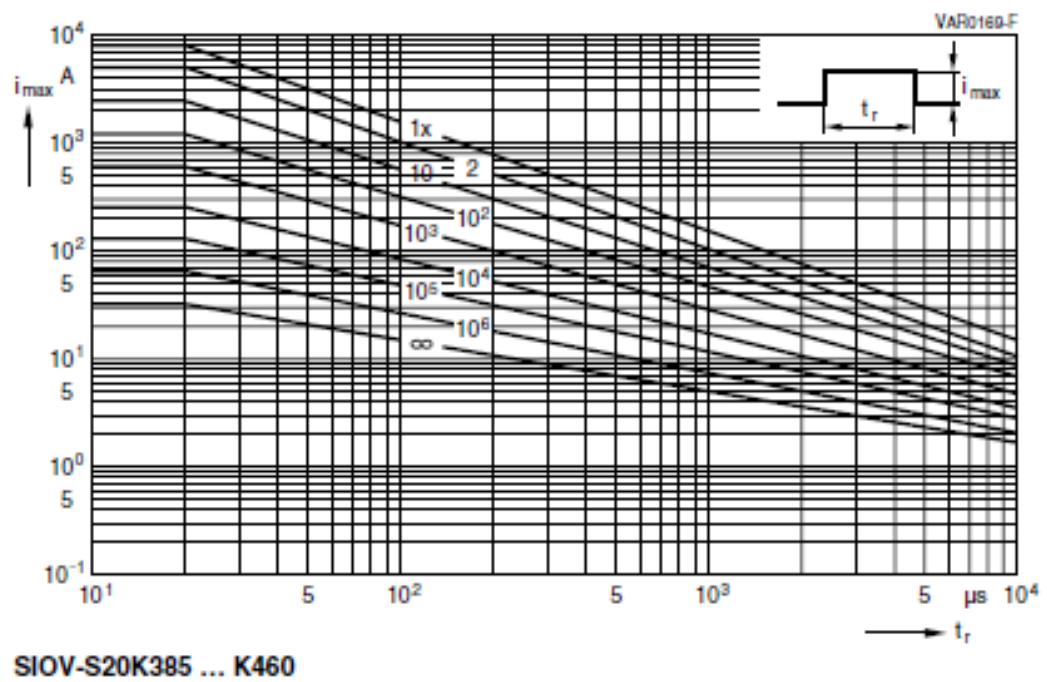


LIITE 4. Virtajännitetaulukko Epcos S20 kokoluokan varistoreille /14/



SIOV-S20 ...

LIITE 5. S20K440 Varistorin kuormitustaulukko /14/



LIITE 6. S25K440 Varistorin kuormitustaulukko /15/

