

Andrei Luukka

Sähköverkon häiriöiden vaikutukset AC-kuristimella varustettuun pienitehoiseen taajuusmuuttajaan

Sähkötekniikan korkeakoulu

Diplomityö, joka on jätetty opinnäytteenä tarkastettavaksi
diplomi-insinöörin tutkintoa varten Espoossa 14.7.2014.

Työn valvoja:

Prof. Matti Lehtonen

Työn ohjaaja:

DI Ari Turunen

Tekijä: Andrei Luukka		
Työn nimi: Sähköverkon häiriöiden vaikutukset AC-kuristimella varustettuun pienitehoiseen taajuusmuuttajaan		
Päivämäärä: 14.7.2014	Kieli: Suomi	Sivumäärä:10+74
Sähkötekniikan ja automaation laitos		
Professori: Sähköjärjestelmät		Koodi: S-18
Valvoja: Prof. Matti Lehtonen		
Ohjaaja: DI Ari Turunen		
<p>Pienitehoista jännitevälipiirillistä taajuusmuuttajaa voidaan suojata kolmi-vaiheisella AC-tulokuristimella. Tässä diplomityössä tutkittiin sähköverkon transienttiylijännitteiden, kytkentätransienttien, jännitekuoppien, jännitteen kohoumien ja sähköverkon jännite-epäsymmetrian vaikutuksia pienitehoiseen jännitevälipiirilliseen taajuusmuuttajaan.</p> <p>Työn tarkoituksena oli selvittää, voivatko työssä käsitellyt sähköverkon häiriöt aiheuttaa vahinkoa taajuusmuuttajan tasasuuntaussillassa, ja kuinka tehokkaasti työssä mitoitettu AC-kuristin suojaaa taajuusmuuttajaa sähköverkon häiriöiltä. Tutkimusmenetelminä työssä olivat erilaiset simulointimallit, joiden tukena olivat myös työn aikana tehdyt laboratoriomittaukset.</p> <p>Simulointi- ja laboratoriotutkimusten tuloksista todettiin, että tässä työssä käsiteltävät sähköverkon häiriöt eivät aiheuta vahinkoa taajuusmuuttajan tasasuuntaussillassa tietyssä sähköverkon käyttöympäristössä. Sähköverkon jännite-epäsymmetrian aiheuttama virtaepäsymmetria saattaa kuitenkin pitkällä aikavälillä aiheuttaa taajuusmuuttajan tasasuuntaussillassa termisiä rasituksia, kun diodien myötäsuuntaisten maksimivirtojen arvot ylittyvät.</p> <p>Tässä työssä mitoitettu taajuusmuuttajaa suojaava AC-kuristin suojaasi tehokkaimmin nopeilta salaman aiheuttamilta transienttiylijännitteiltä. Kuristimen alhainen saturaatiopiste transienttiylijännitteitä vastaan riitti suojaamaan taajuusmuuttajan tehopuolikomponentteja.</p>		
Avainsanat: Taajuusmuuttaja, kuristin, ylijännite, jännitekuoppa, epäsymmetria		

Author: Andrei Luukka		
Title: Effects of Power System Failures on Low Power Variable Speed Drive Equipped with AC Line Reactor		
Date: 14.7.2014	Language: Finnish	Number of pages:10+74
Department of Electrical Engineering and Automation		
Professorship: Electrical Systems		Code: S-18
Supervisor: Prof. Matti Lehtonen		
Advisor: M.Sc. (Tech.) Ari Turunen		
<p>Low power voltage source variable speed drive can be protected against power system failures with three phase AC line reactor. In this thesis was examined how transient overvoltages, switching transients, voltage dips, voltage swells and asymmetrical voltage supply affect the components of the variable speed drive.</p> <p>The purpose of this thesis was to clarify if the disturbances of the mains supply can cause damage to the rectifier of the variable speed drive. The objective also was to clarify how effectively the AC line reactor protects the drive against the power system failures. The research methods which are used in this thesis were the simulations and the laboratory measurements.</p> <p>In the simulation results and laboratory test results it was stated that the disturbances of the mains supply that have been processed in this thesis do not cause damage in the rectifier in a certain power system environment. However the long term asymmetrical voltage supply can cause thermal stress in rectifier diodes when the magnitudes of the asymmetrical currents in the input of the variable speed drive are higher than the rated forward currents of the diodes.</p> <p>The protection effects of the AC line reactor were the most efficient against the fast transient overvoltages caused by lightning strokes. The low saturation point of the AC line reactor was sufficient to protect the power semiconductors of the variable speed drive.</p>		
Keywords: Variable speed drive, line reactor, overvoltage, voltage dip, asymmetry		

Esipuhe

Tämä diplomityö on tehty ABB Oy Drivesin Low Power AC -tulosityksikölle. Ensimmäisestään haluan kiittää DI Janne Davidsaista mahdollisuudesta tehdä tämä diplomityö ABB Oy Drivesille. Työni valvojaa, Professori Matti Lehtosta, haluan kiittää hänen antamastaan tuesta ja tärkeistä neuvoista lopputyössäni. Työni ohjaajaa, DI Ari Turusta, kiitän kehittävästä ammattitaitoisista keskusteluista ja teknisestä tuesta. Suuri kiitos myös ABB Solar -yksikön laboratorioinsinööreille, jotka auttoivat UHE-laboratorion mittalaitteiden käytössä, sekä Henrik Riikolalle ja Paulius Pieterikselle heidän antamastaan tuesta simulointimalleihin ja kuristimeen liittyvissä kysymyksissä. Haluan kiittää myös työkavereitani mukavista ja rentouttavista kahvihetkestä, jotka toivat uutta energiaa kirjoitusprosessiin. Kiitos myös Emilialle.

Otaniemi, 14.7.2014

Andrei Luukka

Sisällysluettelo

Tiivistelmä	ii
Tiivistelmä (englanniksi)	iii
Esipuhe	iv
Sisällysluettelo	v
Symbolit ja lyhenteet	vii
1 Johdanto	1
1.1 Tutkimuskysymys ja työn tavoitteet	2
1.2 Työn rakenne	2
2 Teoreettinen tausta ja aiempi tutkimustieto	3
2.1 Jännitevälipiirillisen taajuusmuuttajan toimintaperiaate	3
2.1.1 Tasasuuntaus	4
2.1.2 DC-välipiiri	5
2.1.3 Vaihtosuuntaus pulssinleveysmodulaatiolla	6
2.2 Sähköverkon häiriöt	7
2.2.1 Pientaajuiset yli- ja alijännitteet	7
2.2.2 Transienttiylijännitteet	8
2.2.3 Sähköverkon jännite-epäsymmetria	11
2.2.4 Jännitteen kohouma	14
2.2.5 Jännitekuopat	15
2.3 Taajuusmuuttajan suojaus	18
2.3.1 Sulakkeet ja johdonsuojakatkaisijat	18
2.3.2 Varistorit	19
2.3.3 Venttiilisuojat	21
2.3.4 AC- ja DC-kuristimet	23
3 Simulointimallit	29
3.1 Jännitevälipiirillinen taajuusmuuttaja	29
3.2 Sähköverkon mallinnus	30
3.3 Kuristimen mallinnus	31
3.4 Salaman aiheuttamat transienttiylijännitteet	33
3.5 KytKentätransienttien simulointimalli	37
3.6 Taajuusmuuttajan toiminta epäsymmetrisessä sähköverkossa	38
3.7 Jännitekuopat ja jännitteen kohouma	39
4 Simulointitulokset	42
4.1 Salaman aiheuttamat transienttiylijännitteet vaihe- ja pääjännitteessä	42
4.2 KytKentätransientit	48
4.3 Jännitekuopat ja jännitteen kohouma	51
4.4 Taajuusmuuttajan syöttöpuolen jännite-epäsymmetria	57

	vi
5 Yhteenveto	64
Viitteet	67
Liitteet	
A Työssä käytetyt mittalaitteet ja laitteistot	74

Symbolit ja lyhenteet

Symbolit

$\underline{a}, \underline{a}^2$	a-operaattori
B	Magneettivuon tiheys
C	Kapasitanssi
C_c	Transienttiylijännitesimulaattorin latauskondensaattori
C_{cap}	Kondensaattorin kapasitanssi
$C_{capacitor}$	Kompensointikondensaattoripatteriston kapasitanssi
C_t	Sähköverkon siirtokaapelin kapasitanssi
C_{Δ}	Kompensointikondensaattoripatteriston kondensaattorien kapasitanssi
$D1 \dots D6$	Tasasuuntaussillan diodit D1:stä D6:een
E	Sähkökentän voimakkuus
E_{cap}	Kondensaattorin energia
f	Taajuus
H	Magneettikentän voimakkuus
h	Jännitekuopan syvyyskerroin
I	Virta
$\underline{I}_{A0}, \underline{I}_{B0}, \underline{I}_{C0}$	Sähköverkon nollajärjestelmän virtavektorit
$\underline{I}_{A1}, \underline{I}_{B1}, \underline{I}_{C1}$	Sähköverkon myötäjärjestelmän virtavektorit
$\underline{I}_{A2}, \underline{I}_{B2}, \underline{I}_{C2}$	Sähköverkon vastajärjestelmän virtavektorit
I_{coil}	Kuristimen käämin läpi kulkeva virta
I_d	Taajuusmuuttajan välipiirin virta
I_F	Diodin myötäsuuntainen virta
I_{FSM}	10 millisekunnin sinimuotoisen virtapiikin huippuarvo
i_i	Kulkuaallon virta
\hat{i}_{LI}	Salamavirta
I_{load}	Sähköverkon kuorman sähköverkosta ottama virta
I_{RMS}	AC-kuristimen läpi kulkevan jatkuva-aikaisen virran RMS-arvo
I_v	Varistorin virta
I_0	Salamavirran huippuarvo
J	Virrantiheys
k	Varistorin keraaminen vakio
L	Induktanssi
L_r	Transienttiylijännitteen nousuajan säätökela
L_t	Sähköverkon siirtokaapelin induktanssi
L_1, L_2	DC-kuristimet
M	Matriisi
P	Pätöteho
P_{coil}	Kuristimen lämpöhäviöt
P_m	Sähkömoottorin akseliteho
$Q_{capacitor}$	Kompensointikondensaattoripatteriston teho
R	Resistanssi
R_c	Transienttiylijännitesimulaattorin latausvastus
R_{DC}	Kuristimen DC-resistanssi
R_m	Käyttöympäristöön perustuva vakioimpedanssi
R_{s1}, R_{s2}	Transienttiylijännitteen pulssimuodon säätövastukset

T	Jaksonaika
t	aika
$t_1 - t_6$	Pulssinleveysmodulaation pulssien ajalliset kestot
T_J	Diodin pn-liitoksen lämpötila
$TS1 \dots TS6$	Simulointimallin ideaaliset kytkimet TS1:stä TS6:een
U_A, U_B, U_C	Sähköverkon vaihejännitteet
U_{AVG}	Sähköverkon keskimääräinen jännite
U_{BR}	Diodin läpilyöntijännite
U_{cap}	Kondensaattorin jännite
$U_{capacitor}$	Kompensointikondensaattoripatteriston yli oleva jännite
U_d	Välipiirin jännite
U_F	Diodin myötäsuuntainen jännite
U_k	Diodin kynnysjännite
U_L	Sähköverkon pääjännite
u_i	Kulkuaallon jännite
\hat{u}_{LI}	Salaman aiheuttama ylijännite
U_{load}	Sähköverkon kuorman yli oleva jännite
U_p	Pulssinleveysmodulaation ulostulojännitteen suuruus
U_{phase}	Sähköverkon vaihejännitteen RMS-arvo
u_r	Venttiilisuojan jäännösjännite
U_{RMS}	Pulssinleveysmodulaation ulostulojännitteen RMS-arvo
$\underline{U}_{r0}, \underline{U}_{r1}, \underline{U}_{r2}$	Sähköverkon nolla-, myötä- ja vastajärjestelmä
u_s	Venttiilisuojan syttymisjännite
U_{source}	Jännitelähde
U_v	Varistorin jännite
U_{zs}	Sähköverkon jännitehäviö
$U_1, I_1; U_2, I_2$	Varistorin toiminta-alueen mittauspisteet
U_ψ	Normaalista poikkeavan sähköverkon vaihejännitteen RMS-arvo
V_{RRM}	Diodin maksimi jatkuva estosuuntainen jännite
X	Reaktanssi
X_C	Välipiirin kondensaattorien reaktanssi
$x_{C,N}$	Taajuusmuuttajan välipiirin kondensaattorien suhteellinen reaktanssi
$x_{L,N}$	Taajuusmuuttajan AC-puoleisen kuristimen suhteellinen reaktanssi
X_L	Kuristimen reaktanssi
X_1, X_2	DC-kuristimen + kiskon liityntäpisteet
Y_1, Y_2	DC-kuristimen - kiskon liityntäpisteet
Z	Impedanssi
ZnO	Sinkkioksidi
$Z_{b,N}$	Taajuusmuuttajan AC-puoleisen sähköverkon referenssi-impedanssi
Z_{line}	Sähköverkon impedanssi
Z_{load}	Sähköverkon kuorman impedanssi
Z_s	Aaltoimpedanssi
Z_{source}	Sähköverkon impedanssi
$Z\%$	Sähköverkon prosentuaalinen impedanssi

Kerrannaisyksiköt

M	Mega
k	Kilo
m	Milli
μ	Mikro
n	Nano
p	Piko

Kreikkalaiset symbolit

α_h	Varistorin hyvyyskerroin
α_{sic}	Piikarbidivaristorin hyvyyskerroin
α_t, β_t	Salamavirran vaimennuskertoimet
β_{zno}	Sinkkioksidivaristorin hyvyyskerroin
ϵ	Neperin luku
η_{motor}	Sähkömoottorin hyötysuhde
μ	Permeabiliteetti
μ_c	Sydänmateriaalin permeabiliteetti
π	Pii
Φ	Magneettivuo
ψ_i	Jännitekuopan ajanhetki
ω	Kulmataajuus

Lyhenteet

ABB	Asea Brown Boveri
AC	Alternating Current
ANSI	American National Standards Institute
CDF	Cyclic Duration Factor
DC	Direct Current
EUT	Equipment Under Test
gG	Yleiskäyttöön tarkoitettu sulaketyyppi
IEC	International Electrotechnical Commission
IEEE	Institute of Electrical and Electronics Engineers
IGBT	Insulated Gate Bipolar Transistor
MCMK	Kuparijohtiminen PVC-eristeinen kaapelityyppi
OTD	Optical Transient Detector
pu	Per Unit
PWM	Pulse Width Modulation
rad	Radiaani
RMS	Root Mean Square
RPM	Rounds Per Minute
SFS-EN	Suomessa voimassa oleva eurooppalainen standardi

SiC	Piikarbidi
Std	Standard
UDC	Välipiirin jännite
UL	Underwriters Laboratories Inc.
VSI	Voltage Source Inverter
ZnO	Sinkkioksidi

1 Johdanto

Sähköverkon toiminnalla on hyvin keskeinen osa teollisuuden infrastruktuurissa. Sähköverkkoon liitetään yhä enemmän kulutuselektroniikkaa, jonka normaalin toiminnan kannalta sähköverkon luotettavuudella ja sähkön laadulla on merkittävä rooli. Muun muassa teollisuudessa sähkömoottorien ohjauksessa käytettävien taajuusmuuttajien toiminta perustuu vahvasti häiriöttömän sähköverkon kykyyn toimittaa taajuusmuuttajien tarvitsema energia. Esimerkiksi sähköverkossa ilmaantuvat erilaiset ylijännitteet voivat aiheuttaa pysyviä vaurioita teollisuuden prosesseissa käytettäviin taajuusmuuttajakäyttöihin, ja aiheuttaa merkittäviä taloudellisia menetyksiä.

ABB:n valmistamien taajuusmuuttajien markkina-alue kattaa koko maailman. Näin ollen taajuusmuuttajien sähköverkon puoleinen käyttöympäristö on erilainen riippuen siitä, missä maanosassa taajuusmuuttajia käytetään. Sähköverkon laaduntarkkailu ja regulaatio parantavat sähköverkon luotettavuutta, jonka vaikutukset näkyvät sähköverkon loppukäyttäjien sähkökäytöissä. Eurooppalainen sähköverkon laatua käsittelevä standardi SFS-EN 50160 määrittelee konkreettiset raja-arvot jännitteen ominaisuuksista taajuudelle, jänniterajoille, yliaaltopitoisuuksille, nopeille jännitemuutoksille, jännite-epäsymmetrialle ja ohjausjännitetasoille [1]. Tarkan sähköverkon regulaation ansiosta esimerkiksi Euroopassa nähtävät taajuusmuuttajien vikatyypin tilastolliset jakaumat poikkeavat muiden maanosien vikaantumistilastojen jakaumasta.

Intiassa lisääntyvä epälineaaristen laitteiden käyttö sähköverkossa on johtanut sähkön laadun heikkenemiseen. Eräässä Intian sähkön laatuun liittyvässä tutkimuksessa on selvinnyt, että mitään konkreettisia toimenpiteitä ei ole tehty sähkön laadun parantamiseksi, eikä mitään sähkön laatuun kantaa ottavaa standardia ole pakotettu käyttämään [2]. Yhdysvalloissa käytettäviä sähkön laatuun liittyviä standardeja puolestaan on kattava määrä, joista esimerkkinä voidaan mainita sähköverkon yliaaltoja käsittelevä standardi IEEE 519-1992 [3]. Yhdysvalloissa kolmivaiheisen pienjänniteverkon pääjännitetasot ovat kuitenkin korkeammat kuin Euroopassa, joten taajuusmuuttajien jänniterasitukset ovat Yhdysvalloissa toisenlaisia.

Sähköverkon häiriötilanteissa ilmajohdon maasulku on yleinen johtovika. Johdon maasulkuvikoja aiheuttavat pääsääntöisesti salamankätköt [4, s. 272], jotka aiheuttavat myös sähköverkkoon liitettyjen laitteiden kannalta haitallisia ylijännitteitä. Suurten sähkömoottorikuormien käynnistystilanteissa tai moottorikäyttöjen häiriötilanteissa sähköverkon jännite saattaa pudota hetkellisesti nimellisarvostaan [5, s. 25]. Nämä hetkelliset jännitteenalenemat, niin kutsutut jännitekuopat vaikuttavat taajuusmuuttajan syöttöjännitteeseen ja sitä kautta taajuusmuuttajan DC-välipiirin toimintaan ja taajuusmuuttajan moottorin ohjaukseen. Hetkelliset jännitteen kohoumat nostavat vastakohtaisesti verkkojännitteen nimellistä arvoa, kun sähköverkosta kytkeytyy suuri induktiivinen kuorma irti tai sähköverkon häiriötila aiheuttaa terveiden vaiheiden hetkellisen jännitteen nousun. Muun muassa Intiassa

kasvava sähkönkysyntä aiheuttaa stabiiliusongelmia Intian sähkönjakelujärjestelmälle, minkä seurauksena herkkiin elektronisiin laitteisiin voi kohdistua sähkökatkojen, jännitekuoppien ja jännite-epäsymmetrian aiheuttamia rasitteita [2].

Taajuusmuuttajien rakenteellisten erojen takia laitteissa nähdään tyyppikohtaisesti hyvin erilaisia vikaantumisia. Tyypillisesti taajuusmuuttajissa käytetään kuristimia, joilla suodatetaan taajuusmuuttajan verkkoon aiheuttamia harmonisia yliaaltoja. Kuristimen ominaisuuksilla on myös vaikutusta taajuusmuuttajan toimintaan nopeissa sähköisissä muutostiloissa. Tässä työssä tutkittavissa taajuusmuuttajaperheen laitteissa kuristin on erillinen yksikkö, joka on saatavana optiona laitteeseen.

1.1 Tutkimuskysymys ja työn tavoitteet

Taajuusmuuttajan ylijännitesuojauksesta on aiempaa tutkimustietoa tehty muun muassa taajuusmuuttajan ylijännitesuojauksessa toimivista metallioksidivaristoreista. Aiempina vuosina on myös simuloitu kuristimen induktanssin ja taajuusmuuttajaa suojaavien metallioksidivaristorien yhteistä suojausvaikutusta transienttiylijännitteitä vastaan. Simuloinneissa on mitattu kuristimen, tasasuuntausdioidien sekä DC-välipiirin jännite- ja virtatasoja.

Tässä diplomityössä tutkitaan sähköverkossa esiintyvien eri tyyppisten häiriöiden vaikutuksia AC-kuristimella varustetun jännitevälipiirillisen taajuusmuuttajan toimintaan. Simulointimallien ja laboratoriotutkimusten avulla tutkitaan, voivatko työssä käsitellyt sähköverkon häiriötilat aiheuttaa vaurioita taajuusmuuttajan tasasuuntaussillassa. Työssä selvitetään myös taajuusmuuttajan suojauksessa käytettävän rautasydämisen 3 %:n AC-kuristimen suojaavien ominaisuuksien vaikutuksia sähköverkon transienttiylijännitteitä, kytkentätransientteja, jännitekuoppia, jännitteen kohoumia ja jännite-epäsymmetriaa vastaan.

1.2 Työn rakenne

Työn alussa käsitellään jännitevälipiirillisen taajuusmuuttajan toimintaperiaate ja käydään läpi sähköverkon häiriöiden teoreettinen tausta. Työssä tutkittavat sähköverkon häiriöt taajuusmuuttajakäytössä ovat transienttiylijännitteet, kytkentätransientit, jännitekuopat ja jännitteen kohoumat sekä kolmivaihesähköverkon jännite-epäsymmetria. Tämän jälkeen esitellään tutkimuksessa käytettävät sähköverkon häiriöiden sekä taajuusmuuttajan toimintaan perustuvat simulointimallit, joiden avulla simuloidaan sähköverkon häiriöiden vaikutuksia kolmivaiheisella saturoituvalla AC-kuristimella varustettuun taajuusmuuttajaan. Työn lopussa käsitellään simulointitulokset ja tehdään johtopäätökset taajuusmuuttajaa suojaavan kuristimen suojausvaikutuksista sähköverkon häiriötilanteissa.

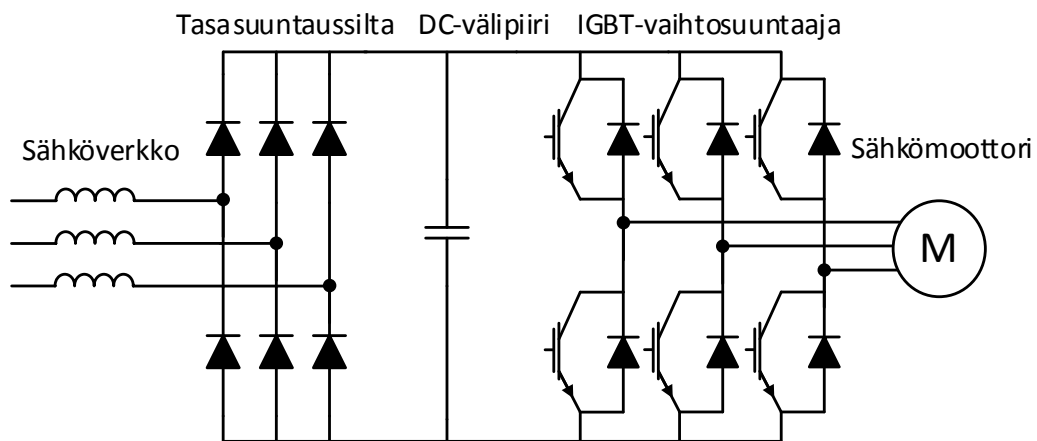
2 Teoreettinen tausta ja aiempi tutkimustieto

Tässä luvussa esitetään jännitevälipiirillisen taajuusmuuttajan toimintaperiaate, käydään läpi sähköverkossa ilmenevät taajuusmuuttajan kannalta olennaiset sähköverkon häiriöt ja esitetään taajuusmuuttajan suojaukseen käytettäviä suojalaitteita. Luvun lopussa käsitellään taajuusmuuttajan AC- ja DC-kuristinratkaisuja.

2.1 Jännitevälipiirillisen taajuusmuuttajan toimintaperiaate

AC-sähkömoottorien ohjauksessa käytettävien taajuusmuuttajien käyttö on kasvanut merkittävästi viime vuosina. kolmivaiheisella dioditasasuuntaajalla varustetut jännitevälipiirilliset invertterit (*VSI, Voltage Source Inverter*) ovat suosituimmat pieni- ja keskitehoisten taajuusmuuttajien käyttömuodot. [6]

Taajuusmuuttaja on sähkötekniinen laite, jonka tehtävänä on ohjata muun muassa sähkömoottorilla toimivia pumppusovelluksia, liukuhihnakuuljettimia ja nostureita [7, s. 197]. Kuvassa 1 on esitetty tavallisen kolmivaiheista AC-sähkömoottoria ohjaavan jännitevälipiirillisen taajuusmuuttajan topologia.



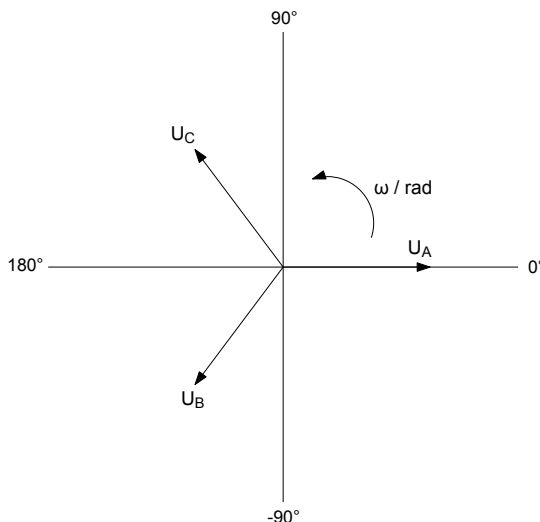
Kuva 1: Jännitevälipiirillisen taajuusmuuttajan topologia.

Kolmivaihesyötetyn taajuusmuuttajan symmetrisen sähköverkon kolmivaihejärjestelmä voidaan kuvata napakulmam muodossa

$$U_A = U_{phase} \angle 0^\circ, U_B = U_{phase} \angle -120^\circ, U_C = U_{phase} \angle -240^\circ \quad (1)$$

jossa U_{phase} on vaihejännitteen RMS-arvo. Vaihejännite A on oletettu olevan referenssi-jännitteenä 0 kulmassa. [8, luku 2, s. 11]

Kuvassa 2 on esitetty symmetrisen kolmivaihejärjestelmän jännitteet osoitinmuodossa kompleksitasossa.



Kuva 2: Symmetrisen kolmivaihejärjestelmän osoittimet.

Kolmivaiheinen sähköteho syötetään sähköverkon puolelta taajuusmuuttajan dioditasasuuntaussiltaan, joka muuttaa sähköverkon vaihtojännitteen tasajännitteeksi. DC-välipiirissä tasasuunnattu vaihtojännite suodatetaan, minkä jälkeen suodatetusta tasajännitteestä tehdään vaihtosuuntauksessa halutun taajuista vaihtojännitettä sähkömoottorin ohjaukseen. [9, s. 26]

2.1.1 Tasasuuntaus

Hyvin yleinen tapa toteuttaa AC-jännitteellä toimivan taajuusmuuttajan tasasuuntaus on käyttää kolmivaiheista verkkokommutoivaa 6-pulssista tasasuuntaussiltaa [9, s. 81–82]. Kommutointi tarkoittaa tasasuuntaussillassa olevan diodin virran siirtymistä toiselle samassa piirissä olevalle diodille [10, s. 128]. Verkkokommutoinnissa syöttävästä sähköverkosta saadaan kommutoinnissa tarvittava kommutointijännite [11, s. 35].

Tasasuuntauksessa käytettävät diodit ovat puolijohteita, jotka rakentuvat p- ja n-tyypin materiaaleista. Materiaalina käytetään tyypillisesti piitä. Kun diodin anodi-katodi-jännite on positiivinen, diodin sanotaan olevan päästösuunnassa. Päästösuunnassa diodin läpi kulkee myötäsuuntainen virta I_F (*forward current*), jonka arvo määräytyy diodin myötäsuuntaisen jännitteen arvosta U_F (*forward voltage*). Myötäsuuntaisen jännitteen noustessa myötäsuuntainen virta kasvaa asteittaisesti. Kun myötäsuuntaisen jännitteen arvo ylittää diodin kynnysjännitteen arvon U_k (*knee voltage*), diodin läpi kulkeva virta kasvaa nopeasti. Virran ollessa suurempi kuin diodin nimellinen virta määrättyssä lämpötilassa, myötäsuuntainen virta aiheuttaa pn-liitoksessa ylimääräistä lämpenemistä. Virran kasvaessa edelleen pn-liitos lämpee ja lopulta korkea lämpötila tuhoaa diodin [12, s. 92, 93, 98].

Diodi ei johda virtaa sen ollessa estosuunnassa. Normaalisti diodin estosuuntainen virta on hyvin pieni. Estosuuntaista virtaa kutsutaan myös diodin vuotovirraksi. Diodin vuotovirta pysyy lähes vakiona estosuuntaisen jännitteen kasvaessa. Estosuuntaisen jännitteen ylittäessä diodin läpilyöntijännitteen rajan U_{BR} (*voltage breakdown*), diodin läpi kulkeva estosuuntainen virta kasvaa nopeasti. [12, s. 99]

2.1.2 DC-välipiiri

Tasajännitevälipiirin tehtävänä on tuottaa mahdollisimman tasaista DC-jännitettä IGBT-vaihtosuuntausta varten. Välipiirin tasajännitteen tasoittamiseen käytettäviä komponentteja ovat tyypillisesti kondensaattorit ja kuristin. Kondensaattorit ovat matalaimpedanssisia komponentteja välipiirin virran aaltoilulle. Ne varastoivat energiaa ja tasoittavat DC-jännitteen pulssimuotoa välipiirin jännitteen pudotessa [13]. Taajuusmuuttajan välipiirissä toimivan kelan avulla on mahdollista myös rajoittaa kondensaattorien ottamaa latausvirtaa [14, s. 172], mikäli taajuusmuuttajan välipiirissä käytetään kelaa. DC-välipiirissä jännitteen tasoittamiseen osallistuvaa kelaa kutsutaan myös DC-kuristimeksi. Välipiirissä käytettävät kondensaattorit ovat hyvin usein elektrolyyttikondensaattoreita, joiden kapasitanssiarvot ovat suuria ja itse kondensaattorin fyysinen koko on pieni. Kondensaattorien sisältämä energia voidaan lausua yhtälöllä

$$E_{cap} = \frac{1}{2} C_{cap} U_{cap}^2 \quad (2)$$

jossa C_{cap} on kondensaattorin kapasitanssi ja U_{cap} on kondensaattorin yli oleva jännite. Elektrolyyttikondensaattori muodostaa sähkökemiallisen reaktion tuloksena ohuen oksidikerroksen kondensaattorin sisällä olevan metallin pinnalle. Kondensaattorin elektrolyytit voivat olla alumiinia tai tantaalia [15, s. 515–516]. DC-välipiirin kondensaattorien koko tulisi olla mahdollisimman suuri, mikäli laite halutaan suunnitella kestäväksi sähköverkon häiriöiden ja kytkentätapahtumien aiheuttamia transienttiylijännitteitä. Kondensaattorien koko vaikuttaa myös välipiirin jännitteen aaltoisuuteen, joten suuremmilla kondensaattoreilla välipiirin jännitteen aaltoisuutta on mahdollista vähentää. Suurilla kondensaattorien kapasitanssien arvoilla voidaan myös parantaa laitteen kykyä toimia hetkittäisissä sähkökatkoksissa tai sähköverkon jännitekuopissa. Tyypillisesti taajuusmuuttajat on varustettu DC-kondensaattoreilla, joiden kapasitanssien arvot vaihtelevat 75–367 pF kilowattia kohden. Yli 136 pF:n kondensaattorit kilowattia kohden ovat tyypillisimmät kondensaattorien kokoluokat taajuusmuuttajakäytöissä [16, s. 492].

Taajuusmuuttajan käynnistyessä kondensaattorien latausvirtaa rajoittaa mahdollisen kuristimen lisäksi välipiirin kondensaattorien latausvastus [17], joka ohitetaan releen avulla kondensaattorien latauduttua [18, s. 95]. Välipiirin kuristimen vaikutuksesta myös tasasuuntaussillan aiheuttamaa yliaaltopitoisuutta on mahdollista

vähentää [14, s. 172]. DC-välipiirin jännite ei ole tasaista, sillä tasasuuntauksen jälkeen välipiirissä esiintyy syöttöpuolen vaihtojännitteen aaltomuotoja.

Jokaisella 50 Hz:n vaihtojännitteen syklillä DC-jännitteessä on nähtävissä kuusi jännitepulssia. Keskimääräinen DC-jännitteen suuruus voidaan laskea yhtälön 3 mukaisesti

$$U_d = \frac{3\pi\sqrt{2}}{\pi}U_L \approx 1,35U_L \quad (3)$$

jossa U_d on välipiirin jännite ja U_L on syöttöpuolen pääjännite. [19]

2.1.3 Vaihtosuuntaus pulssinleveysmodulaatiolla

Taajuusmuuttajan vaihtosuuntauksessa kolmivaihesähkömoottorille generoidaan sen tarvitsema halutun taajuinen vaihtojännite. Ohjaamalla vaihtosuuntaajan transistorien kytkentäsekvenssejä päälle ja pois päältä, voidaan kehittää halutun taajuista sinimuotoista vaihtojännitettä [20, s. 180]. Sähkömoottorin ohjaus voidaan toteuttaa muun muassa IGBT (*Insulated Gate Bipolar Transistor*) -komponenteilla [21, s. 32], jossa IGBT-kytkimiä ohjataan pulssinleveysmodulaatiolla (*PWM, Pulse Width Modulation*) [22, s. 123]. Pulssinleveysmodulaatiossa vaihtosuuntaajan ulostulojännitteen pulssien hyötyaikaa (*duty cycle*) tai nollakohtia muutetaan. Ulostulojännitteiden pulssien CDF-kerroin (*Cyclic Duration Factor*) on yhden puolijakson sisältämien pulssien johtoaikojen suhde puolijakson pituuteen. Tämä voidaan määrittellä yhtälöllä

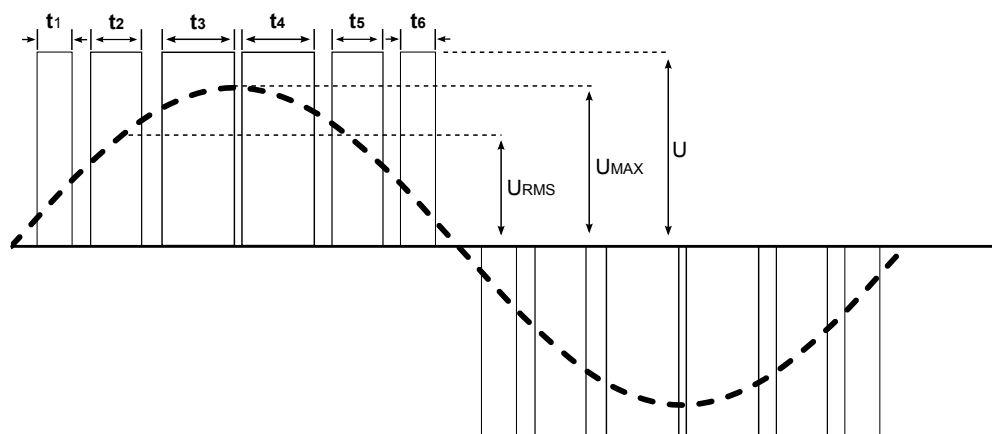
$$CDF = \frac{t_1 + t_2 + t_3 + t_4 + t_5 + t_6}{T} \quad (4)$$

jossa t_1, t_2, \dots, t_6 ovat pulssien leveyksien ajalliset kestot yhdessä puolijaksossa. Jos U_p on ulostulojännitteen pulssien jännitteen suuruus, niin AC-muotoisen ulostulojännitteen RMS-arvon suuruus on

$$(U_{RMS})^2 = CDF \times U_p^2 \quad (5)$$

$$U_{RMS} = U_p \times \sqrt{CDF} \quad (6)$$

Muuttamalla CDF-kerrointa (esimerkiksi muuttamalla AC-ulostulojännitteen pulssinleveyksiä), voidaan ulostulojännitteen U_{RMS} arvoa muuttaa. [22, s. 123]



Kuva 3: Pulssinleveysmodulaation periaate.

2.2 Sähköverkon häiriöt

Sähköverkossa tapahtuva häiriö aiheuttaa tilapäisen poikkeaman sähköverkon normaaliin toimintaan. Häiriöt ovat tyypillisesti lyhytaikaisia ja äkillisiä muutoksia sähköjärjestelmässä [23, s. 333]. Sähköverkon alueellisella sijainnilla, ympäristötekijöillä, kuormitustasolla, rakenteella ja inhimillisillä osatekijöillä on vaikutus sähköverkon häiriöalttiuteen [24, s. 8–10]. Pahimmassa tapauksessa sähköverkossa tapahtuva häiriö aiheuttaa sähkökatkon tai pidempiaikaisen poikkeaman sähköverkon kuluttajapisteiden jännite- ja taajuussymmetriassa [24, s. 7].

2.2.1 Pientaajuiset yli- ja alijännitteet

Pientaajuiset ylijännitteet syntyvät yleensä sähköverkossa tapahtuvien kytkentäoperaatioiden yhteydessä tai sähköverkon tilan muutoksista. Pientaajuisia ylijännitteitä aiheuttavat verkossa tapahtuvat maasulut, verkkoon kytketyn kuorman äkillinen poiskytkeminen, johdon kapasitiivisen virran aiheuttama jännitteen nousu johdossa sekä resonanssi ja epälineaaristen verkkokomponenttien vaikutukset. Sähköverkon tähtipisteen maadoitustapa vaikuttaa ylijännitteiden suuruuteen, kun ylijännitteen aiheuttajana on maasulku. Maasta erotetuissa ja sammutetuissa verkoissa saattaa terveiden vaiheiden ja maan välinen jännite kohota maasulun aikana suuremmaksi kuin vaiheiden välinen jännite sähköverkon normaalitilassa [25, s. 13–14]. Alijännitteitä puolestaan aiheuttavat verkosta irti kytketyt johdot, sähköverkkoon kytketyn kuorman äkillinen päällekytkentä ja sähköverkon ylikuormittaminen. Alijännitteet saattavat aiheuttaa muun muassa vakionopeudella toimivien sähkömoottorien ylikuormenemista virrantiheyden kasvaessa ja sähköverkossa toimivien laitteiden toimintahäiriöitä [26, s. 127].

2.2.2 Transienttiylijännitteet

Transienttiylijännitteet ovat voimakkaasti vaimenevia ja lyhytaikaisia ylijännitteitä. Ne voidaan jakaa loiviin, jyrkkiin ja erittäin jyrkkiin ylijännitelajeihin. Jyrkät transienttiylijännitteet saavuttavat huippuarvonsa muutamassa mikrosekunnissa ja vaimenevat sitten muutaman kymmen mikrosekunnin kuluessa. Loivat transienttiylijännitteet ovat kestoltaan huomattavasti pidempiä. Niissä huippuarvo saavutetaan yleensä satojen mikrosekuntien kuluessa ja vaimeneminen tapahtuu millisekunneissa. Erittäin jyrkissä transienttiylijännitteissä pulssin rintaosan nousuaika on nanosekuntien luokkaa. [25, s. 11–12]

Loivilla transienttiylijännitteillä tarkoitetaan verkon äkillisissä tilanmuutoksissa taasoitusilmiönä syntyviä ylijännitteitä. Tällaisia tilanmuutoksia ovat muun muassa erilaisten vikatapausten syntyminen sekä niiden vuoksi tai muusta syystä verkossa suoritettavat kytkentätoimenpiteet, kuten virtapiirin avaaminen tai sulkeminen katkaisijalla [25, s. 19]. Sähköverkossa hyvin yleinen kytkentätapahtuma on kompensointikondensaattorien kytkeminen päälle tai pois päältä. Kompensointikondensaattoreita käytetään sähköverkossa tuottamaan reaktiivista tehoa, jolla pyritään tukemaan verkon jännitettä ja pienentämään verkon tehohäviöitä [27, s. 111].

Värähteleviä transienttiylijännitteitä syntyy, kun verkossa käytettävät kompensointikondensaattorit kytkeytyvät päälle [27, s. 111–112]. Usein kompensointikondensaattorien kytkentätransientit eivät aiheuta ongelmia sähkönjakelujärjestelmässä, mutta tietyn tyyppiset sähköverkon rakenteet voivat johtaa paikallisiin ylijänniterezonansseihin [28]. Mikäli sähköverkon kompensointikondensaattoreita on sijoitettu lähelle loppukäyttäjiä pienjänniteverkkoon, voivat nämä pienjänniteverkon kompensointikondensaattorit suurentaa jakelumuuntajan läpi kulkevia transienttiylijännitteitä. Keskijänniteverkossa kytkettyjen kompensointikondensaattorien aiheuttamat transienttiylijännitteet voivat aiheuttaa pienjännitesähköverkossa korkeita ylijännitteitä, jotka ovat haitallisia pienjänniteverkkoon kytketyille laitteille [27, s. 113–114], [28], [29]. Värähtelevien transienttiylijännitteiden suuruus voi olla kaksinkertainen nimelliseen käyttöjännitteeseen verrattuna, kun kompensointikondensaattorit kytkeytyvät päälle vaihtojännitteen huippuarvossa. Ylijännitteiden suuruuteen vaikuttaa myös muun muassa kompensointikondensaattorien koko [28]. Kompensointikondensaattorien aiheuttaman teoreettisen ylijännitteen huippuarvoa rajoittaa kuitenkin sähköjärjestelmän impedanssi [30].

Taajuusmuuttajat, joiden välipiirin kondensaattorien koko on suuri, ovat herkimpiä kompensointikondensaattorien aiheuttamille kytkentätransienteille. Taajuusmuuttajan välipiirin kondensaattorit ovat osana LC-piiriä, jossa induktanssi muodostuu taajuusmuuttajan ja kytketyn kompensointikondensaattorin välisestä induktanssista. LC-piirin resonanssi voi saada herätteen kompensointikondensaattorien kytkeytyessä päälle. Kytkentätapahtuman seurauksena taajuusmuuttajan DC-välipiirin kondensaattoreihin kulkee suuri syöksyvirta, joka suurentaa taajuusmuuttajan välipiirin DC-jännitettä. DC-välipiirin jännitteen nousu aiheuttaa tietyn rajan ylittäes-

sä taajuusmuuttajan vikaantumisen DC-ylijännitteeseen, joka on taajuusmuuttajan suojaustoiminto DC-välipiirin ylijännitetilanteessa [28]. Kompensointikondensaattorien kytkentätapahtumien aiheuttamien transienttiylijännitteiden intensiteetti on muihin transienttiylijännitteisiin verrattaessa pienempi, mutta niiden kesto on vastaavasti pidempi [31].

Kolmivaiheisen sähköverkon kompensointikondensaattorit voidaan kytkeä joko tähteen tai kolmioon. Pienjänniteverkossa on tyypillistä, että kompensointikondensaattorit kytketään kolmioon, sillä kolmivaiheisen pienjänniteverkon tähtikytkentäisten kompensointikondensaattorien tuottama reaktiivinen teho on vain kolmannes kolmiokytketyn kompensointikondensaattorien tuottamasta reaktiivisesta tehosta [32, s. 68].

Jyrkkien transienttiylijännitteiden aiheuttajia ovat tyypillisesti ukkosen synnyttämät salamapurkaukset. Salamapurkaukset voivat johtua joko suoraan sähkön siirrossa ja jakelussa käytettäviin avojohtoihin tai niiden välittömään läheisyyteen osuneesta salamaniskusta. Mikäli salamapurkaus osuu avojohdon läheisyyteen, puhutaan normaalisti indusoituneista ylijännitteistä. Suoraan avojohtoon osuva salamanisku aiheuttaa salamavirran suuruuden takia lähes aina ylilyönnin tai jopa useampivaiheisen ylilyönnin vaiheen ja maan välisessä eristyksessä. [25, s. 23]

Mikäli salama päättyy suoraan vaihejohtimeen, ylijännitteen suuruus määräytyy salamavirran \hat{i}_{LI} ja johdon aaltoimpedanssin Z_s perusteella yhtälöstä 7. Yhtälön kerroin $\frac{1}{2}$ aiheuttaa se, että puolet sähköjohtoon osuneesta salamavirrasta etenee kumpaankin suuntaan johtoa pitkin. [25, s. 23–25]

$$u_{li} = \frac{1}{2} \times Z_s \hat{i}_{LI} \quad (7)$$

Salamaiskun aiheuttama kulkuaalto etenee avojohdoilla lähes valonnopeudella. Kulkuaallon edetessä siirtojohdolla, johdon lämpöhäviöt RI^2 ja koronahäviöt vaimentavat asteittain salamaiskun aiheuttamaa kulkuaaltoa, jonka jännitteen huippuarvo lopulta pienenee kulkuaallon alkuarvosta [33, s. 713–714]. Kulkuaallon vaimennus on pientä, mikäli sähkönsiirtojohdolla on pieni resistanssi tai suuri ominaisimpedanssi. Sähköä siirtävän johdon ominaisimpedanssi voidaan lausua kulkuaallon virran ja jännitteen suhteena

$$\frac{u_{li}}{i_{li}} = \sqrt{\frac{L_t}{C_t}} \quad (8)$$

jossa u_{li} on kulkuaallon jännite, i_{li} on kulkuaallon virta ja L_t sekä C_t ovat kaapelin tai johdon induktanssi ja kapasitanssi [34, s. 34, 37]. Esimerkiksi jakeluverkon siirto-

johdon ominaisimpedanssin $Z = 375 \Omega$:n arvolla 100 kV:n jännitteen huippuarvon kulkuaallon teho voi olla 26,7 MW. Vaikka kulkuaallon ajallinen kesto on yleensä lyhyt (mikrosekunneista millisekunteihin), voi kulkuaallon energiasisältö ylittää muutamisiin megajoulen arvoihin. Tämän kaltainen tilanne saattaa aiheuttaa merkittäviä vaurioita sähköverkkoon liitettyissä laitteissa [34, s. 35, 36].

Sähköverkon epäjatkuvuuskohtissa, kuten auki olevissa virtapiireissä tai oikosulkukohtissa, osa kulkuaallon sisältämästä energiasta siirtyy epäjatkuvuuskohdan läpi ja osa heijastuu takaisin kulkuaallon tulosuuntaan [34, s. 43]. Kapasitiivisissa ja induktiivisissa sähkönjakelujärjestelmissä ylijännitteitä voivat aiheuttaa myös siirtoverkossa käytettävien sulakkeiden avautuminen sähköverkon oikosulkuvikojen aikana [35].

Suorissa salamaiskuissa esimerkiksi 5 kA:n salamavirta aiheuttaa yli 500 kV:n ylijännitteen. Salamaiskuissa vain 0,5 % tapauksissa salamavirta on alle 5 kA [36, s. 488]. Ukkosen aiheuttamat salamavirrat voivat olla kiloampeereista useisiin kymmeniin kiloampeereihin [37]. Maadoitettuihin johtopylväisiin osuvan salaman virta etenee osittain maahan pienentäen salamoinnista syntyneitä ylijännitteitä. Mitä pienempi johtopylvään maadoitusimpedanssi on, sitä pienempi on salamoinnista syntyvät ylijännitteet. Sähkönsiirrossa käytettävien johtopylväiden matalaimpedanssiset maadoitukset ovat tehokas tapa pienentää salamoinnista aiheutuvia riskejä [36, s. 488].

Suorien salamaiskujen salamavirtojen suuruuteen ja virran aaltomuotoon vaikuttavia tekijöitä ovat salamaiskun paikka, suurjännitejohdon ympäristö, vuodenaika ja ilmastolliset olosuhteet. Erilaisten ympäristöolosuhteiden vuoksi salamaiskujen virtojen suuruus ja käyrämuodot vaihtelevat suuresti. Vaikka salamaiskujen virtojen aaltomuodot vaihtelevat, ovat ne kuitenkin pääsääntöisesti jokainen pulssimaisia yksinapaisia aaltomuotoja. Salamavirtojen aaltomuoto on näin ollen lähellä eksponentaalisen käyrämuodon muotoa

$$i_{li} = I_0(e^{-\alpha t} - e^{-\beta t}) \quad (9)$$

jossa I_0 on salamavirran huippuarvo, α_t ja β_t ovat vaimennuskertoimia. [38]

Suurjännitepuolella tapahtuvat avojohtoihin kohdistuvat salamaiskut voivat siirtyä jakelumuuntajan ensiöpuolelta toisiopuolelle. Normaalisti pienjänniteverkkoa syöttävä muuntaja on suojattu ylijännitteiltä muun muassa metallioksidisuojuilla. Muuntajan rakenteella on osittainen vaikutus siihen, miten muuntajan läpi kulkeva ylijännitepiikki lopulta etenee. Osa salaman aiheuttamasta ylijännitepiikistä vaimenee muuntajan suojauksessa käytettävässä metallioksidisuojuissa ja muuntajan sisältämässä induktanssissa.

Muuntaajan alijännitepuolella ylijännitepiikki vaimenee edelleen verkossa käytettävissä johtojen induktansseissa ja liityntäpisteiden laitteissa [22, s. 599–601]. Vaikka salaman aiheuttama ylijännitepiikki vaimenee pienjänniteverkon sähköjohdoissa, pienjänniteverkkoon liitetty sähkökäyttäjä voi kokea korkeitakin ylijännitteitä sähkökojeissaan ylijännitepulssin edetessä keskijänniteverkosta jakelumuuntaajan läpi pienjänniteverkkoon [39].

Salamaiskujen maailmanlaajuisia iskutiheyksiä voidaan tarkkailla maan alemmalle kiertoradalle sijoitetulla optisella transientti-ilmaisimella OTD (*Optical Transient Detector*), jonka tuottaman tiedon perusteella on pystytty laatimaan maailmanlaajuisia salamatiheyskarttoja. Taulukossa 1 on listattuna salamaiskujen korkeimmat esiintymistiheydet Aasiassa, Pohjois-Amerikassa, Etelä-Amerikassa ja Euroopassa. Paikallisten salamaniskujen mittana on käytetty keskimääräistä vuosittaista salamaniskujen tiheyttä. [40]

Taulukko 1: Salamaniskutiheydet.

Sija	Aasia	Salamaniskutiheys $\text{km}^{-2}\text{a}^{-1}$
1	Kuala Lumpur, Malesia	48,3
2	Aranyaprathet, Thaimaa	36,3
3	Murree, Pakistan	33,3
	Pohjois-Amerikka	
1	Tampa-Orlando, Florida	35,4
2	Texarkana, Alaska	33,5
3	Palestine, Texas	33,3
	Etelä-Amerikka	
1	Posadas, Argentiina	42,7
2	Ocana, Kolumbia	39,9
3	Concepcion, Paraguay	37
	Eurooppa	
1	Tiranas Rinas, Albania	9,4
2	Piacenza, Italia	9,1
3	Napoli, Italia	9

2.2.3 Sähköverkon jännite-epäsymmetria

Mikäli sähköverkon kolmivaihejärjestelmässä käytettävät yksi- ja kaksivaiheiset kuormat on jaettu epätasaisesti eri vaiheille, syntyy sähköverkon jännitejärjestelmään jännite-epäsymmetria [4, s. 442]. Muun muassa ANSI C84.1 määräyksessä suositellaan, että sähköjärjestelmän jännite-epäsymmetria on korkeintaan 3 % sähköverkon ollessa kuormittamattomana. IEC standardin suosittelema vastaava jännite-epäsymmetriataso on 2 %. Kolmivaiheisille taajuusmuuttajille 3 %:n epäsymmetri-

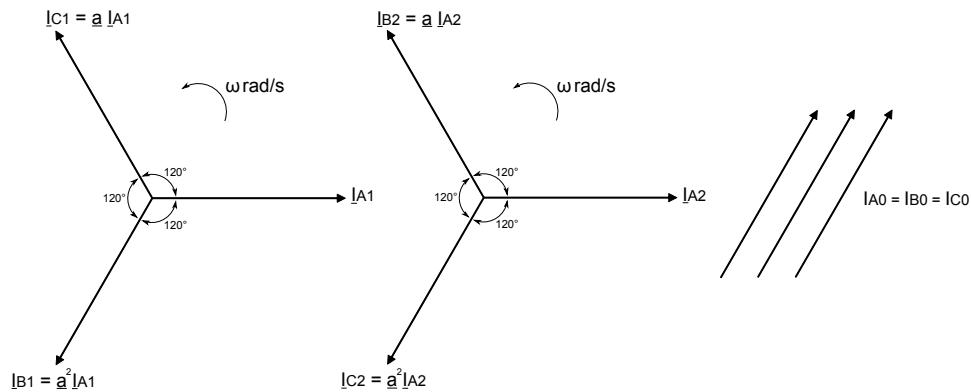
syys pääjännitteessä saattaa aiheuttaa suuria virtoja yhdessä tai kahdessa kolmi-vaihesyötetyn taajuusmuuttajan syöttövaiheessa, minkä seurauksena taajuusmuuttajan suojaustoiminnot kytkeytyvät päälle [41, s. 33].

Taajuusmuuttajan AC-tulopuolen virtaepäsymmetriaan vaikuttaa herkästi sähköverkon jännite-epäsymmetria. Esimerkiksi sähköverkon jännite-epäsymmetrian ollessa määräysten rajoissa 3 %:ssa, voi taajuusmuuttajan syöttöpuolen virtaepäsymmetria olla jopa yli 50 %. Taajuusmuuttajat tuottavat myös enemmän harmonisia virtoja epäsymmetrisessä sähköverkossa. Varsinkin taajuusmuuttajan tuottaman kolmannen yliaallon pitoisuus kasvaa merkittävästi epäsymmetrisessä sähköverkon käyttöympäristössä. [41, s. 33]

Taajuusmuuttajan AC-tulopuolen virtaepäsymmetriaan vaikuttavat taajuusmuuttajan kuormituksen taso, taajuusmuuttajan välipiirin kondensaattorien koko ja taajuusmuuttajan AC-tulopuolen impedanssi. Kyseisten parametrien optimoinnilla voidaan vaikuttaa taajuusmuuttajan herkkyyteen jännite-epäsymmetrisessä sähköverkossa. [41, s. 33]

Yksivaiheisen maasulun aiheuttamassa jännite-epäsymmetrisessä verkossa taajuusmuuttajan syöttövaiheen yhden tai useamman vaiheen jännite voi olla alhaisempi kuin välipiirin jännite. Tällöin taajuusmuuttajan tasasuuntaussillan diodit ovat estosuunnassa, eikä välipiiriin kulje virtaa vaihtosähköverkon suunnalta. Tämän kaltaisessa tilanteessa välipiirin kondensaattorit purkavat varaustaan niin kauan, kunnes syöttöverkon puoleiset vaihejännitteet nousevat ja tasasuuntaussillan diodit muuttuvat takaisin myötäsuuntaisiksi. Kondensaattorin ottaman latausvirran RMS-arvo voi nousta yli 200 % nimellisestä virrasta jollakin taajuusmuuttajan syöttövaiheella. Tässä tapauksessa latausvirran huippuarvo saattaa olla jopa neljä kertaa suurempi kuin taajuusmuuttajan nimellisen tulopuolen virran huippuarvo [41, s. 37]. Jännite-epäsymmetrisessä tilanteessa on myös mahdollista, että taajuusmuuttajan syöttöpuolelta puuttuu yksi syöttövaihe. Tämä aiheuttaa DC-jännitteen putoamisen taajuusmuuttajan välipiirissä ja siten rasittaa taajuusmuuttajan tasasuuntaussiltaa ja IGBT-puolijohteita [42].

Sähköverkon häiriötilassa kolmivaihejärjestelmää ei voida laskea yksivaiheisella sijaiskytkennällä sen epäsymmetrisyyden vuoksi. Sähköverkon matemaattisessa tarkastelussa käytetään symmetrisiä komponentteja, joiden avulla saadaan epäsymmetrinen järjestelmä kuvatuksi yksivaihejärjestelmällä. Epäsymmetrisen kolmivaihesuureen ilmaisemiseen tarvitaan kolme symmetristä komponenttia U_{r0} , U_{r1} ja U_{r2} [43, s. 76], jossa jännite-epäsymmetrian käsite perustuu kolmivaihejärjestelmän symmetristen komponenttien muotoon [44, s. 124]. Kolmivaihejärjestelmä muodostuu myötä-, vasta- ja nollajärjestelmästä, missä myötäjärjestelmän vaihekomponenttien kierto-suuntajärjestys kompleksitasossa on suuntaan A-B-C ja vastajärjestelmän A-C-B. Nollajärjestelmä on joka vaiheessa samansuuntainen [45, s. 228–231].



Kuva 4: Myötä-, vasta-, ja nollajärjestelmä.

Nollajärjestelmän, myötäjärjestelmän ja vastajärjestelmän jännitteet voidaan muodostaa symmetristen komponenttien a-operaattorin avulla seuraavasti [45, s. 219]:

$$\underline{a} = 1 \angle 120^\circ = -\frac{1}{2} + j\frac{\sqrt{3}}{2} \quad (10)$$

$$\underline{a}^2 = 1 \angle -120^\circ = -\frac{1}{2} - j\frac{\sqrt{3}}{2} \quad (11)$$

Symmetristen komponenttien suhde vaihejännitteisiin voidaan esittää matriisimuodossa. Matriisimuotoisten komponenttien esitystapa on kuvattu yhtälöissä 12 ja 13

$$M = \begin{bmatrix} \underline{U}_A \\ \underline{U}_B \\ \underline{U}_C \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} 1 & 1 & 1 \\ 1 & \underline{a}^2 & \underline{a} \\ 1 & \underline{a} & \underline{a}^2 \end{bmatrix} \begin{bmatrix} \underline{U}_{A0} \\ \underline{U}_{A1} \\ \underline{U}_{A2} \end{bmatrix} \quad (12)$$

$$M = \begin{bmatrix} \underline{U}_{A0} \\ \underline{U}_{A1} \\ \underline{U}_{A2} \end{bmatrix} = \frac{1}{3} \begin{bmatrix} 1 & 1 & 1 \\ 1 & \underline{a} & \underline{a}^2 \\ 1 & \underline{a}^2 & \underline{a} \end{bmatrix} \begin{bmatrix} \underline{U}_A \\ \underline{U}_B \\ \underline{U}_C \end{bmatrix} \quad (13)$$

jossa U_A , U_B ja U_C ovat kolmivaihejärjestelmän vaihejännitteitä ja U_{A0} on nollakomponentti, U_{A1} myötäkomponentti ja U_{A2} vastakomponentti. [45, s. 220]

Sähköverkon jännite-epäsymmetriassa kolmivaihejärjestelmän jännitteiden huippuarvot ovat erisuuruisia [5, s. 40–41], mikä aiheuttaa verkkoon kytketyissä sähkökoneissa lämpöhäviöitä ja tehoelektronisissa laitteissa, kuten taajuusmuuttajissa, välipiirin DC-jännitteen aaltomuodon lisääntymistä [44, s. 125].

Jännite-epäsymmetrian määrä voidaan määrittellä prosenttiyksiköiden avulla. IEEE-standardissa (*IEEE Recommended Practice for Electric Power Distribution for Industrial Plants, IEEE std. 141-1993*) on esitetty kolmivaihejärjestelmän vaihejännite-epäsymmetria yhtälöiden 14 ja 15 mukaisesti

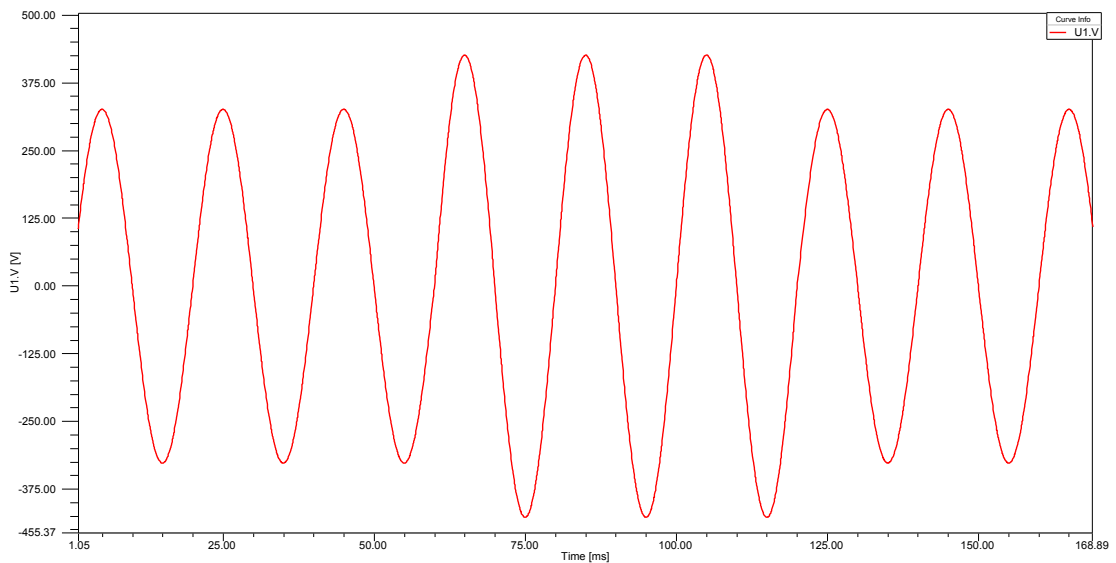
$$epäsymmetria(\%) = \frac{|U_{AVG} - U_{\phi}|}{U_{AVG}} \quad (14)$$

$$U_{AVG} = \frac{U_a + U_b + U_c}{3} \quad (15)$$

jossa U_{ϕ} on yhden kolmivaihejärjestelmän jännitteen RMS-arvon huippuarvo, joka aiheuttaa suurimman poikkeaman keskimääräisen jännitteen arvosta. [13]

2.2.4 Jännitteen kohouma

Jännitteen kohoumassa jännitteen arvo kasvaa 10–80 % nimellisarvostaan ja on kestoltaan puolikkaasta vaihtojännitteen syklistä yhteen minuuttiin. [46, s. 276]



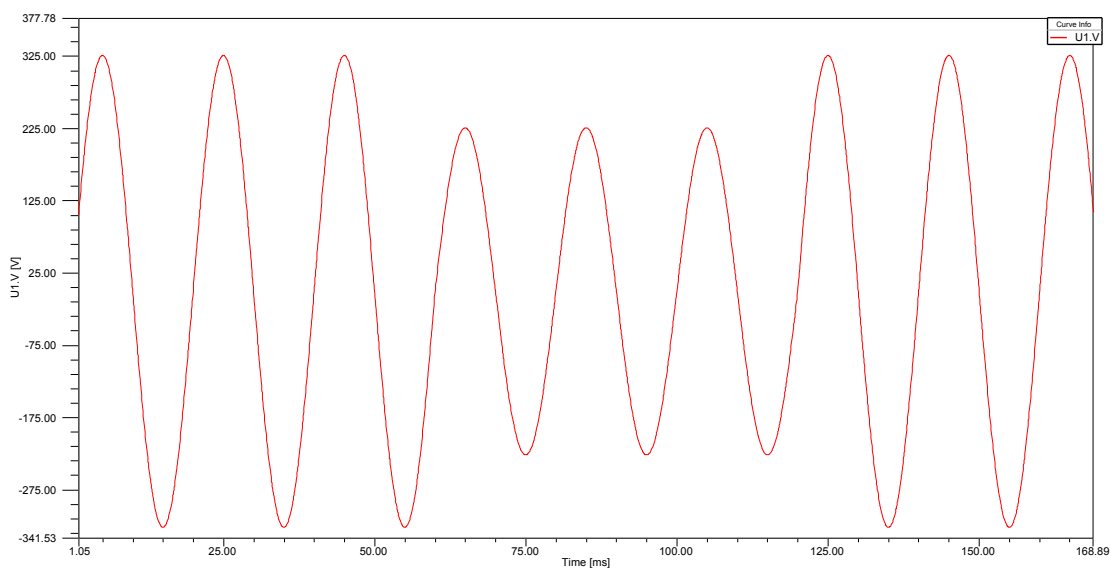
Kuva 5: Hetkellinen jännitteen kohouma.

Jännitteen kohouman aiheuttajina ovat tyypillisesti yksivaiheiset maasulkuviat, joiden seurauksena muiden terveiden vaiheiden jännitteiden arvot kasvavat hetkellisesti. Muita jännitteen kohouman aiheuttajia ovat esimerkiksi verkkoon kytkettyjen raskaiden kuormien tai sähköverkon kompensointikondensaattorien kytkeytyminen irti. Jännitteen kohoumat voivat aiheuttaa pysyviä vaurioita verkkoon kytketyille laitteille [26, s. 127]. Jännitteen kohouman suuruus riippuu täysin sen vikapaikasta,

sähköverkon impedanssista ja sähköverkon maadoitustavoista. Sähköasemalla sijaitsevan kolmio-tähti-kytketyn muuntajan tähtipisteen matalaimpedanssisen maadoituksen vuoksi jännitteenkohoumasta aiheutuneet terveiden vaiheiden jännitteiden nousut jäävät kuitenkin vähäisiksi [47, luku 43, s. 3].

2.2.5 Jännitekuopat

Sähköverkon häiriötilanteissa ilmenevissä jännitekuopissa jännitteen RMS-arvo vähenee nimellisarvostaan 10–90 %. Jännitekuopassa jännitteen aleneman kesto on puolikkaasta vaihtojännitteen syklistä yhteen minuuttiin. Jännitekuopan syvyyteen vaikuttaa sähköjakelujärjestelmän rakenne ja etäisyys vikapaikkaan. [19]

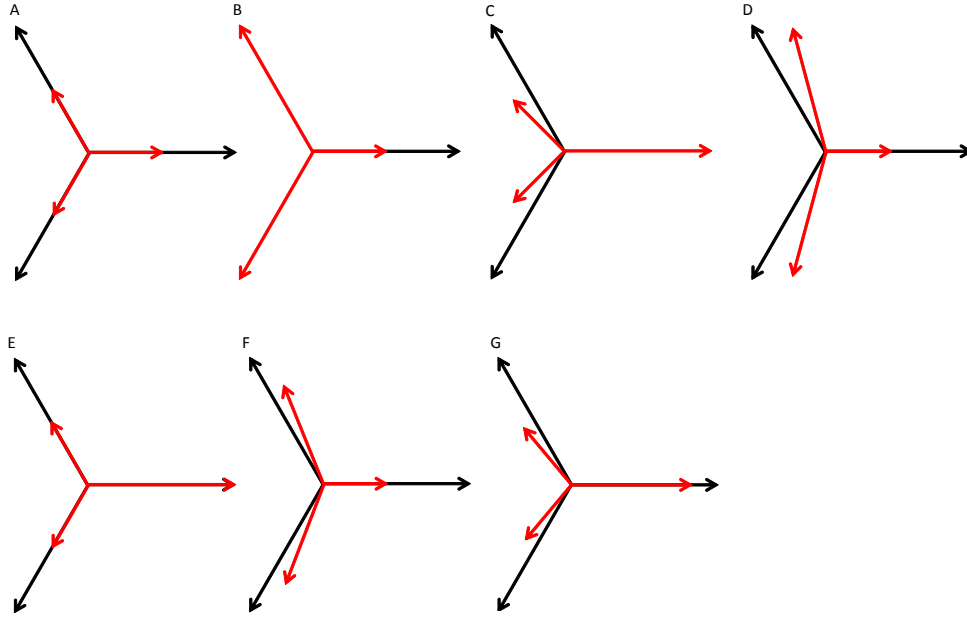


Kuva 6: Hetkellinen jännitekuoppa.

Jännitekuoppia aiheuttavat sähköverkossa tapahtuvat oikosulut ja sähköverkkoon kytkettyjen suurten kuormien, kuten induktiomoottorien, käynnistystilanteet. Induktiomoottorien ottama käynnistysvirta on hyvin suuri, minkä seurauksena johtoimpedansseissa syntyvä jännitehäviö on merkittävä [5, s. 25–26]. Varsinkin heikossa verkossa tehtävät suurten induktiivisten moottorikuormien päällekytkennät voivat aiheuttaa pidempikestoisia jännitekuoppia [48].

Jännitekuoppia aiheuttavat häiriöt pyritään poistamaan sähköverkosta katkaisijoiden avulla tehdyissä pikajälleenkytkennöissä. Niiden seurauksena väliaikaiset jännitetytön keskeytykset voivat olla pituudeltaan noin 2–5 sekuntia [27, s. 43]. Jännitekuopat voivat olla symmetrisiä tai epäsymmetrisiä, mihin pääsääntöisesti vaikuttaa jännitekuopan vian aiheuttaja.

Jännitekuopat luokitellaan tyypillisesti seitsemään luokkaan [19], jotka on esitetty kuvassa 7.



Kuva 7: Jännitekuoppatyypit.

Sähköverkon yksivaiheiset viat voivat aiheuttaa tyypin B-, C*- ja D*- jännitekuoppia. C*- ja D*-tyypin jännitekuopat ovat samankaltaisia C- ja D-tyyppisten jännitekuoppien kanssa, mutta niiden syvyyskerroin h on tyypillisesti 0,33. C- ja D-tyypin jännitekuoppia ($h = 0 \dots 1$) aiheuttavat sähköverkon kaksivaiheiset viat. Hyvin usein jännitekuopan aiheuttaa kuitenkin yksivaihevika, sillä kaksivaiheiset viat, kaksivaiheiset maasulkuviat ja kolmivaiheiset viat ovat harvinaisempia sähköverkossa ilmeneviä vikatyyppejä. Tästä syystä yleisimmät sähköverkossa ilmenevät jännitekuopat ovat tyyppiä B, C* ja D*. Simuloinneissa jännitekuopan muotoa voidaan pitää suorakaiteen muotoisena. Vaikka jännitekuoppaa havainnollisesta normaalisti vain sen syvyyden (h) ja keston (Δt) perusteella, myös jännitekuopan alkamisajankohta (ψ_i) vaihtojännitteen ajanjaksolla on merkittävä tekijä. [19]

B-tyypin jännitekuopassa ($h = 0$) toimivan taajuusmuuttajan vaihevirran huippuarvo saattaa nousta korkeaksi, sillä taajuusmuuttaja toimii kyseisessä tilanteessa yksivaiheisena. AC-virran huippuarvoon vaikuttavat syvyyskerroin h , jännitekuopan kesto Δt , jännitekuopan alkamisajankohta ψ_i , taajuusmuuttajan induktanssi L ja välipiirin kapasitanssi C . Kun syvyyskerroimen arvo h on vakio, muuttujat Δt ja ψ_i tuottavat haitallisimmat vaikutukset jännitekuopassa, jossa taajuusmuuttajan syötöpuolella voidaan havaita suurin mahdollinen AC-virran huippuarvo. [19]

Taajuusmuuttajan suhteelliset parametrit $x_{L,N}$ ja $x_{C,N}$ ovat taajuusmuuttajan induktiivinen ja kapasitiivinen reaktanssi taajuusmuuttajan tulopuolen kuristimen induktanssista L ja taajuusmuuttajan välipiirin kapasitanssista C. Suhteelliset parametrit voidaan lausua yhtälöillä

$$x_{L,N} = \frac{X_L}{Z_{b,N}} = \frac{L\omega}{1,35U_L/I_d} \quad (16)$$

$$x_{C,N} = \frac{X_C}{Z_{b,N}} = \frac{1/C\omega}{1,35U_L/I_d} \quad (17)$$

joissa L on taajuusmuuttajan AC-puoleinen induktanssi, C on välipiirin kapasitanssi, I_d on välipiirin virta ja $1,35U_L$ on välipiirin DC-jännite. Epäsuotuisimmat Δt :n ja ψ_i :n parametrit taajuusmuuttajan toimiessa jännitekuopassa on esitetty taulukossa 2. Ainoastaan tyyppin B jännitekuopassa haitallisimmat vaikutukset nähdään, kun ψ_i on 135° & 315° millä tahansa Δt :n arvolla. Taulukon arvoissa taajuusmuuttajan tulopuolen reaktanssi $X_{L,N}$ on 0,02 pu ja välipiirin reaktanssi $X_{C,N}$ on 0,07 pu, kun esimerkin mukaisen taajuusmuuttajan käyttöjännite on 400 V ja teho on 10 kW. [19]

Taulukko 2: Δt :n ja ψ_i :n arvot maksimivirtapiikeille sähköverkon jännitekuopassa.

Tyyppi	Relaatio $\omega\Delta t + \psi_i$	Esimerkki
A	$\frac{T}{12} + \frac{nT}{6}$	$\Delta t = 8T; 8,5T \rightarrow \psi_i = 30^\circ, 90^\circ, 150^\circ, 210^\circ, 270^\circ, 330^\circ$ $\Delta t = 8,25T; 8,75T \rightarrow \psi_i = 0^\circ, 60^\circ, 120^\circ, 180^\circ, 240^\circ, 300^\circ$
B	$\psi_i \approx 135^\circ, \psi_i \approx 315^\circ$ (mikä tahansa Δt :n arvo)	
C*	$\frac{T}{4} + \frac{nT}{2}$	$\Delta t = 8T; 8,5T \rightarrow \psi_i = 90^\circ, 270^\circ$ $\Delta t = 8,25T; 8,75T \rightarrow \psi_i = 0^\circ, 180^\circ$
E	$\frac{T}{4} + \frac{nT}{2}$	$\Delta t = 8T; 8,5T \rightarrow \psi_i = 90^\circ, 270^\circ$ $\Delta t = 8,25T; 8,75T \rightarrow \psi_i = 0^\circ, 180^\circ$
F	$\frac{nT}{2}$	$\Delta t = 8T; 8,5T \rightarrow \psi_i = 0^\circ, 180^\circ$ $\Delta t = 8,25T; 8,75T \rightarrow \psi_i = 90^\circ, 270^\circ$

Tyyppin A jännitekuoppa on ainoa symmetrinen ja kaikista haitallisista jännitekuoppa. Se aiheuttaa DC-välipiirin jännitteen alenemisen, ja kun syöttöjännite palautuu ennalleen, suuri välipiirin kondensaattorien latausvirta otetaan verkosta. A-tyypin jännitekuopan aiheuttaa tyypillisesti sähköverkossa tapahtuva kolmivaiheinen maasulkuvika. Tyyppien E, F ja G jännitekuoppien aiheuttajana on tyypillisesti kaksivaiheinen maasulkuvika. [19]

Sähköverkkoon kytketyt taajuusmuuttajakäytöt reagoivat herkästi syöttöjännitteiden vaihteluihin, joissa syöttöjännitteen alenema vaikuttaa taajuusmuuttajan jännitevälipiirin jännitetasoon. Mikäli välipiirin jännite putoaa taajuusmuuttajalle annetulle alijänniterajalle, laite normaalisti vikaantuu DC-alijännitevikaan ja taajuusmuuttajan ohjaaman sähkömoottorin ohjaus pysäytetään [19]. Jännitekuoppien sekä yksi- ja kaksivaiheisten syöttökeskeytysten aikana taajuusmuuttajan dioditasasuuntaussillassa voi olla havaittavissa ylivirtoja ja sähkökäytön moottoripuolella saattaa esiintyä momenttiheilahteluja. Taajuusmuuttajan ylivirtasuojaus kuitenkin havaitsee moottorin ottaman ylivirran, joten moottorikäyttö pysäytetään aina ylivirtojen ilmaantuessa [49].

2.3 Taajuusmuuttajan suojaus

Sähköverkon häiriötön toiminta takaa teollisuudessa käytettävien taajuusmuuttajien normaalin toiminnan. Teollisuuden prosessien sähkömoottorien ohjauksessa käytettävien taajuusmuuttajakäyttöjen sisältämä tehoelektronikka reagoi herkästi sähköverkon häiriötiloihin, jolloin taajuusmuuttajan ohjaaman sähkömoottorin toiminta pysähtyy taajuusmuuttajan vikaantuessa. Varsinkin sähköverkon häiriöiden aiheuttamat ylijännitteet, jännitekuopat ja jännite-epäsymmetria aiheuttavat haitallisia poikkeamia taajuusmuuttajan normaalissa toiminnassa. Taajuusmuuttajien suojaus sähköverkon häiriöiltä voidaan toteuttaa sulakkeilla, johdonsuojakatkaisijoilla, ylijännitesuojilla ja kuristimilla [18, s. 93].

2.3.1 Sulakkeet ja johdonsuojakatkaisijat

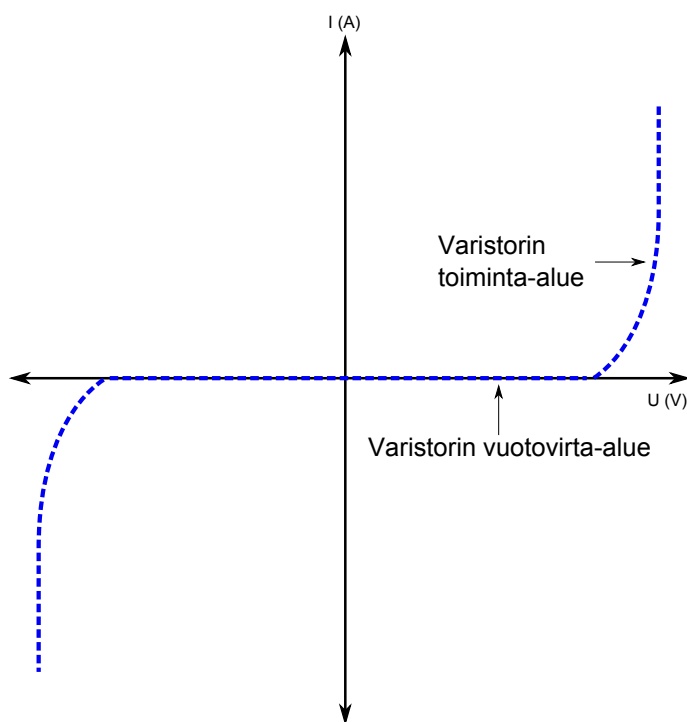
Sulakkeet ovat yleisimmät sähkölaitteiden suojauksessa käytettävät kojeet. Taajuusmuuttajien suojauksessa sulakkeita käytetään tyypillisesti suojaamaan taajuusmuuttajaa ja sitä syöttävää kaapelia. Taajuusmuuttajan suojauksessa käytettävät sulakkeet ovat normaalisti yleiskäyttöön tarkoitettuja gG-tyypin sulakkeita [50, s. 231]. Sulakkeiden käytöllä rajoitetaan taajuusmuuttajaan vikatapauksessa kulkevaa virtaa ja sitä kautta suojataan taajuusmuuttajan sisältämää elektroniikkaa. Vaihtojännitteellä toimivien taajuusmuuttajien tasasuuntaussilloissa tapahtuvat viat aiheutuvat tyypillisesti korkeista transienttiylijännitteistä, jatkuvasta korkeasta syöttöjännitteestä tai taajuusmuuttajan sisällä tapahtuvasta viasta. Sulakkeet eivät suojaa laitetta tämän kaltaisilta häiriöiltä [51, s. 233].

Kolmivaihejärjestelmässä saattaa esiintyä käyttötilanteita, joissa yhden syöttövaiheen sulakkeen palaessa kolmivaihesyötetyn laitteen sähkönsyöttö jatkuu kaksivaiheisena. Varsinkin suorissa kolmivaihemoottorikäytöissä kaksivaihesyöttö aiheuttaa sähkömoottorin yllämpenemistä [53, s. 289] ja taajuusmuuttajakäytöissä taajuusmuuttajan DC-välipiirin jännitteen putoamisen 33 %:lla [52].

Johdonsuojakatkaisijoita käytetään suojaamaan syöttökaapeleita ja laitteita ylivirtojen aiheuttamilta vaurioilta. Kolmivaihejärjestelmässä käytettävät johdonsuojakatkaisijat katkaisevat laitteen sähkönsyötön kokonaan [53, s. 289], joten laitteen operointi yksi- tai kaksivaiheisena ei ole mahdollista. Johdonsuojakatkaisijoiden hitauteista johtuen sulakkeiden käyttö on taajuusmuuttajien suojauksessa yleisin suojausmenetelmä.

2.3.2 Varistorit

Varistorit ovat epälineaarisia puolijohdekomponentteja, joiden resistanssin arvo pienenee jännitteen kasvaessa. Tyypillisimmät varistorit ovat metallioksidivaristoreja, joiden pääasiallinen valmistusaine on sinkkioksidi. Tyypillisen metallioksidivaristorin U–I-käyrä on esitetty kuvassa 8. [54, s. 285]



Kuva 8: Varistorin U–I-kuvaaja.

Normaalin käyttöjännitteen aikana varistorin läpi kulkee pieni vuotovirta ($< 0,1$ mA) ja varistori toimii kuin suuriresistanssinen vastus. Ylijännitetilanteessa varistorin läpi kulkeva virta kasvaa ja varistorin yli oleva jännite rajoittuu lähelle varistorin normaalia käyttöjännitettä.

Varistorin toiminta-alueessa jännite-virta-suhde voidaan esittää yhtälöllä

$$I_v = kU_v^{\alpha_h} \quad (18)$$

jossa I_v on varistorin läpi kulkeva virta, k on metallioksidivaristorin keraaminen vakio, U_v on varistorin jännite ja α_h on hyvyyskerroin, joka kuvaa varistorin epälineaarisuutta [55]. Tyypillisesti hyvyyskerroin α_h on noin 25–60 ja vakio k on hyvin pieni ($< 10^{-100}$), joten varistorin läpi kulkeva virta voidaan esittää logaritmisesti yhtälöllä 19.

$$\log|I_v| = \log(k) + \alpha_h \log|U_v| \quad (19)$$

Mikäli (U_1, I_1) ja (U_2, I_2) ovat varistorin toiminta-alueen kaksi mittauspistettä, voidaan varistorin hyvyyskerroin määrittää yhtälön 20 perusteella [54, s. 285–286].

$$\alpha_h = \frac{\log(I_1/I_2)}{\log(U_1/U_2)} \quad (20)$$

Varistorit ovat nopeita komponentteja, joiden vasteaika on pienempi kuin 0,5 ns, mikäli komponentin jalkojen loisinduktanssi jätetään huomioimatta. Varistorin toimintaan vaikuttaa myös lämpötila. Korkeissa lämpötiloissa varistorin läpi kulkeva vuotovirta nousee. Varistorin liiallinen vuotovirta saattaa aiheuttaa komponentin lämpenemisen, mikä puolestaan lisää vuotovirran suuruutta. Tämä johtaa varistorin lämpöryntäykseen. [54, s. 286]

Varistoreja käytetään normaalisti suojaamaan sähkötekniisiä laitteita transienttiylijännitteiltä. Varistorit kestävät kertaluontoisia transienttiylijännitteitä, joiden arvo on 150 % varistorien nimellisestä virrasta. Varistorit eivät kestä kuitenkaan useampia perättäisiä transienttipulsseja, vaikka transienttipulssit olisivat 75 % varistorin nimellisvirrasta. Kun varistorit herätetään sähköjärjestelmän jännitteillä, ne kestävät ainoastaan 40 %:n virran nimellisarvostaan useammassa perättäisissä transienttijännitetilanteissa. [54, s. 286]

Piirikorttien suojauksessa käytettävät metallioksidivaristorit katkovat ainoastaan ylijännitepiikkien jännitteitä useista sadoista huipusta huippuun -arvoista, joten suojauksesta huolimatta ylijännitteet saattavat aiheuttaa vaurioita metallioksidisuojuilla varustettuihin laitteisiin [56, s. 310].

Varistorien suojaustehokkuus laitteen ylijännitesuojauksessa on hyvin pieni, joten ne eivät tarjoa kovinkaan tehokasta suojaa transienttiylijännitteitä vastaan [57].

Aiemmissa taajuusmuuttajan ylijännitesuojaukseen liittyvissä mittauksissa ja simuloinneissa on selvinnyt taajuusmuuttajissa käytettävien varistorien suojausvaikutusten puutteellisuus sähköverkon ylijännitetilanteissa. Varistorien tarpeellisuus ABB:n myymissä laitteissa perustuu osittain U.L-turvallisuusstandardeihin, joiden noudattaminen laitteiden myynnissä oikeuttaa taajuusmuuttajien markkinointiin Yhdysvalloissa [58]. Asiakkaiden antamien tietojen perusteella taajuusmuuttajissa käytettävien tasasuuntaussiltojen ja varistorien vaurioituminen on aiheutunut sähköverkossa ilmenevistä ylijännitetilanteista. Tutkimusten perusteella transienttiylijännitteen sisältämä energia purkautuu välipiirin kondensaattorien kautta. Tehokkaiseen ylijännitteiltä suojautumiseen tarvitaan taajuusmuuttajan syöttöpuolelle tai DC-välipiiriin induktanssia, joka voidaan toteuttaa taajuusmuuttajaan asennettavan kuristimen avulla [59].

2.3.3 Venttiilisuoijat

Ylijännitesuojaukseen käytettävät venttiilisuoijat tarjoavat tehokkaimman tavan suojautua sähköverkon ylijännitteiltä. Venttiilisuoijatyyppinä ovat kipinäväliventtiilisuoijat, magneettipuhallussuoijat ja metallioksidisuoijat. Kaikissa suojatyypeissä ilmatiiviiseen tyypitäytteiseen posliinikuoreen on sijoitettu epälineaarinen vastus. [43, s. 197, 198]

Ideaalitapauksessa venttiilisuoja tulee välittömästi johtavaksi ylijännitetilanteissa, ja purkaa jännitepiikin sisältämän energian suoraan maahan ilman, että venttiilisuojan suojaaman laitteen käyttöjännite kasvaa. Kun ylijännitteen sisältämä energia on purettu venttiilisuojan kautta maahan, venttiilisuoja palautuu välittömästi eristystilaan. Todellisuudessa venttiilisuojoilla on rajallinen ylijännitteiden sisältämän energian purkaukseen kapasiteetti. Venttiilisuoja ei todellisissa tilanteissa toimi välittömästi ja sen läpi kulkee aina vuotovirta jopa suojan ollessa eristystilassa. [60, s. 335]

Kipinäväliventtiilisuojan rakenteessa levykipinäväli on asennettu sarjaan piikarbidivastuksen (SiC) kanssa posliinikuoren sisään. Kipinäväliventtiilisuojan toiminta perustuu siinä käytettävän piikarbidivastuksen epälinearisuuteen. Kun venttiilisuojan läpi kulkee suuri virta, piikarbidivastuksen arvo pienenee ja vastaavasti pienillä virran arvoilla piikarbidivastuksen arvo on suurempi. Ylijännitetilanteessa jännitteen arvo ylittää suojan syttymisjännitteen u_s (*sparkover voltage*) ja levykipinäväli syttyy. Suojan purkausvirta kasvaa syöksyjännitteen määräämään arvoon ja suojan yli vaikuttaa jäännösjännite u_r (*residual voltage*). Jäännösjännite u_r (venttiilisuojan yli oleva maksimijännite venttiilisuojan toiminnan aikana) määräytyy purkausvirran ja ylijännitesuojan epälineaarisen vastuksen suuruudesta. Ylijännitteen mentyä ohi venttiilisuoja jää johtavaan tilaan ja jälkivirta kulkee suojan läpi siihen asti, kunnes levykipinäväli sammuvat hieman ennen käyttöjännitteen seuraavaa nolli-kohtaa. [60, s. 334, 336]

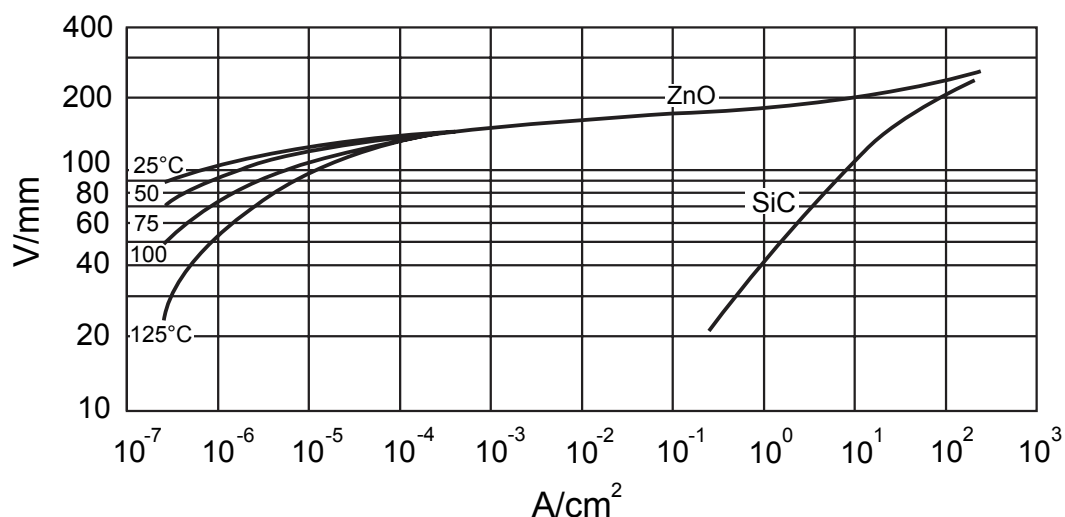
Magneettipuhallussuojissa korkeataajuinen ylijännitteen aiheuttama virta kulkee käämien rinnakkaisresistanssien läpi sytyttäen magneettipuhallussuojassa olevat kipinävälit. Kipinävälin sytyttyä käämien läpi kulkee normaali suojan toiminnan aikainen virta, jonka aikaansaaman magneettikentän vaikutuksesta kipinävälissä kulkeva valokaari laajenee. Valokaarijännite kasvaa valokaaren pidentyessä, minkä seurauksena magneettipuhallussuojan jälkivirta pienenee siten, että suojan läpi kulkeva purkausvirta sammuu jo huomattavasti ennen AC-muotoisen verkkojännitteen nolakohtaa. [60, s. 335]

Metallioksidisuojiin kehittäminen edusti läpimurtoa ylijännitesuojauksessa. Niissä käytettävät välttämättömät kipinävälit oli mahdollista jättää kokonaan pois [61, s. 500]. Kipinävälien poisjättämisen etuina metallioksidisuojiin vasteajat ovat lyhyemmät ja näin ollen suoja toimii ylijännitetilanteissa nopeammin [62, s. 545]. Metallioksidisuojiin materiaalina käytetään sinkkioksidia (ZnO) ja muita metallioksiedeja, joilla parannetaan metallioksidisuojan jännite-virta-epälineaarisuutta. Kuvassa 9 on esitetty sinkkioksidisuojan ja piikarbidisuojan jännite-virta-suhde, jossa

SiC materiaalille: $I_s = kU_s^{\alpha_{sic}}$, missä $\alpha_{sic} = 4-6$

ZnO materiaalille: $I_s = kU_s^{\beta_{zno}}$, missä $\beta_{zno} = 25-30$ [61, s. 501].

Sinkkioksidi- ja piikarbidimateriaalien jännite-virta-ominaiskäyrää on kuvattu kentänvoimakkuuden ja virrantiheyden muodostamalla ominaiskäyrällä kuvan 9 mukaisesti. [60, s. 337]



Kuva 9: Metallioksidivastusmateriaalin ominaiskäyrä.

Ylijännitesuojina käytettävät venttiilisuojat pyritään sijoittamaan lähelle suojattavaa kohdetta. Useimmiten suojattava kohde on tehomuuntaja [60, s. 345, 348], mut-

ta myös pienjänniteverkossa voidaan käyttää venttiilisuoja elektronisten laitteiden suoja. Metallioksidisuojien käyttö sekä jakeluverkon suurjännite- että pienjännitepuolella ei välttämättä tarjoa parhainta mahdollista suojaustasoa kaikille pienjänniteverkkoon liitetyille laitteille ja tästä syystä useampia ylijännitesuojia olisi syytä asentaa pienjänniteverkon puolelle. Varsinkin pienjänniteverkossa toimiville laitteille paras suoja ylijännitteitä vastaan saadaan, kun ylijännitesuoja sijoitetaan johdon loppupäähän lähelle sähkön loppukäyttäjää [39].

2.3.4 AC- ja DC-kuristimet

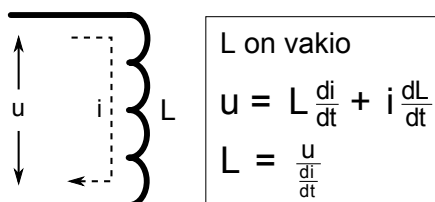
Kuristin on sähkömagneettinen elementti, joka koostuu rautasydäimestä ja rautasydämen ympärille käämitystä kupari- tai alumiinijohtimesta. Käämityksessä kupari- tai alumiinijohtimessa kulkeva virta indusoi kuristimen rautasydänelementtiin magneettivuon Φ [63, luku 4, s. 15].

Rautasydämessä kulkeva magneettivuon tiheys voidaan esittää yhtälöllä

$$B = \mu H \quad (21)$$

jossa B on magneettivuontiheys, μ on sydänmateriaalin permeabiliteetti ja H on magneettikentän voimakkuus [64, s. 472]. Termin μ suuruus on verrannollinen sydänmateriaaliin siten, että ilmasydämisen materiaalin permeabiliteetin arvo on hyvin pieni ja vastaavasti rautasydämisen permeabiliteetti on suuri [65, s. 269–270]. Magneettiipiirissä olevalla ilmapälillä saadaan magneettiipiiriin enemmän magneettista reluktanssia, jolla estetään kuristimen magneettinen kyllästyminen [66, s. 230]. Kuristimen käämit voidaan käämiä magneettiipiirissä olevan ilmapälän päälle, jolloin magneettista hajakenttää saadaan pienennettyä [67, s. 96].

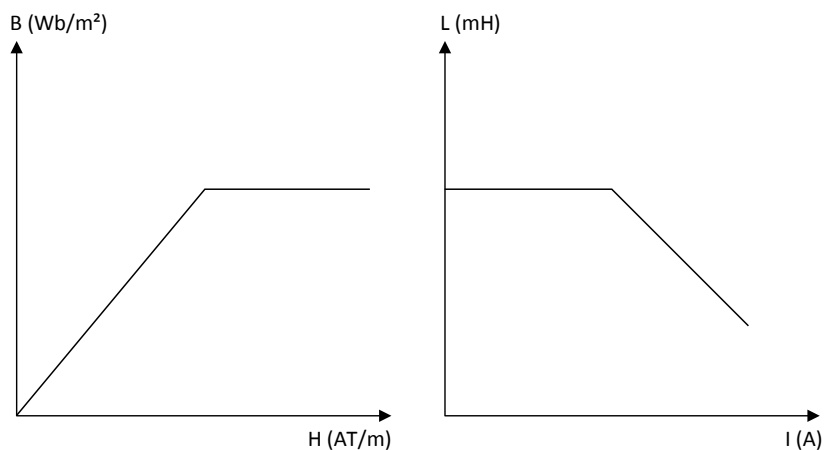
Kuristimen induktiivinen piiri voidaan kuvata kuvan 10 mukaisesti. Kelan yli oleva jännite muutostilassa on kelan induktanssin ja virran tulon derivaatta. Mikäli piirin induktanssi on vakio, kelan yli oleva jännite $u = L \, di/dt$. [67, s. 94]



Kuva 10: Induktanssi.

Kun kuristimen läpi kulkeva virta kasvaa, myös kuristimen sydänmateriaalissa kulkevan magneettivuon sidoksen määrä kasvaa lineaarisesti tiettyyn kuristimen toimintapisteeseen saakka. Kun kuristimen läpi kulkeva virta kasvaa tietyn kriittisen

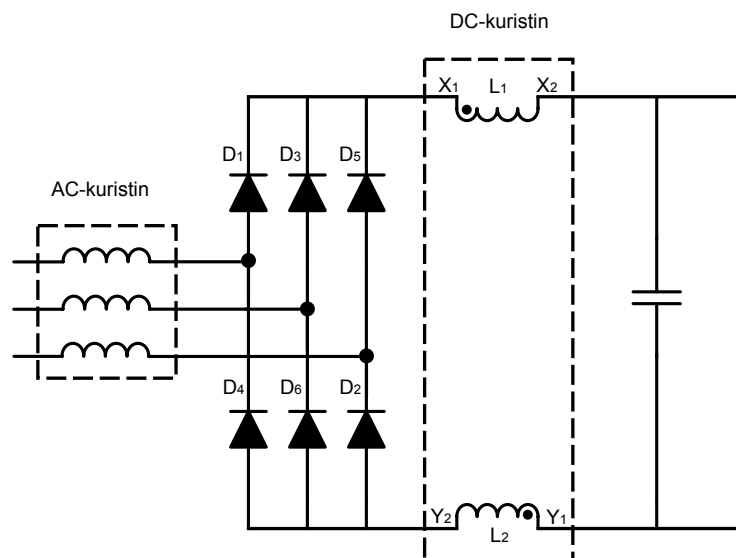
rajan yli, sydänmateriaalin magneettivuon sidos pysyy samana riippumatta siitä, kuinka suuri kuristimen läpi kulkeva virta on. Kyseistä ilmiötä kutsutaan saturaatioksi (kyllästyminen). Saturaatioalueella kuristimen sydänmateriaalin reluktanssi kasvaa ja kuristimen kokonaisinduktanssi pienenee. Kuristimesta tulee epälineaarinen sen sydänmateriaalin saturaatiotilan vuoksi [68, s. 301]. Mikäli virta kasvaa edelleen, kuristimen induktanssin arvo pienenee kohti nolla-arvoa [70, s. 82]. Kuvassa 11 on esitetty kuristimen magneettista saturaatiota esittävät kuvaajat [68, s. 225], [71, s. 196].



Kuva 11: Kuristimen saturaatio.

Kuristin sijoitetaan tyypillisesti joko taajuusmuuttajan DC-välipiiriin heti tasasuuntaussillan jälkeen tai vaihtoehtoisesti taajuusmuuttajan AC-syöttöpuolelle ennen tasasuuntaussiltaa. Taajuusmuuttajaan rakennetulla kuristimella pyritään ensisijaisesti pienentämään taajuusmuuttajan aiheuttamia harmonisia yliaaltoja. Toinen merkittävä etu kuristimella on sen suojaavat vaikutukset sähköverkon transienttiylijännitteitä vastaan. Jos DC-kuristinta ei ole laitteessa vakiona, AC-tulopuolen kuristinta suositellaan erityisesti käytettäväksi, mikäli taajuusmuuttajaa syöttävän muuntajan toisiopuolella käytetään sähköverkon tehokerrointa parantavia kompensointikondensaattoreita. Kompensointikondensaattorien toiminta saattaa aiheuttaa resonanssi-ilmiöitä, joiden taajuudet ovat lähellä taajuusmuuttajan tuottamien yliaaltojen taajuuksia. Kuristimen käyttöä suositellaan myös tilanteissa, joissa syöttävän sähköverkon impedanssi on pieni [51, s. 243]. Taajuusmuuttajan syöttöpuolen pieni impedanssi tarkoittaa sitä, että mikäli taajuusmuuttajan kolmivaihesyöttöpuolen kaksi syöttövaihetta oikosuljetaan, oikosulkuvirtaa rajoittaa syöttöpuolen impedanssi. Pienellä syöttöpuolen impedanssilla oikosulkuvirta on suuri ja tämä saattaa aiheuttaa ongelmia dioditasasuuntaussillan toiminnassa [69, s. 201]. Suurella taajuusmuuttajan syöttöpuolen impedanssilla on puolestaan vaikutus taajuusmuuttajan ulostulojännitteen suuruuteen. Suuresta impedanssista aiheutuvan jännitehäviön vaikutuksesta taajuusmuuttajan tuottaman ulostulojännitteen arvo on nimellisarvoa pienempi [51, s. 243].

Taajuusmuuttajakäytöissä saattaa esiintyä ongelmia tilanteissa, joissa taajuusmuuttaja on asennettu lähelle syöttävän verkon teholähdettä tai sähköverkossa käytettäviä kompensointikondensaattoreita. Nämä molemmat käyttöympäristöt edustavat pientä syöttöpuolen impedanssia taajuusmuuttajalle. AC-taajuusmuuttajat, joissa käytetään DC-kuristinta, ovat vähiten haavoittuvaisia pienelle syöttöpuolen verkon impedanssille [51, s. 243]. Välipiirin DC-kuristin sijoitetaan normaalisti taajuusmuuttajan välipiiriin kuvan 12 mukaisesti [17].

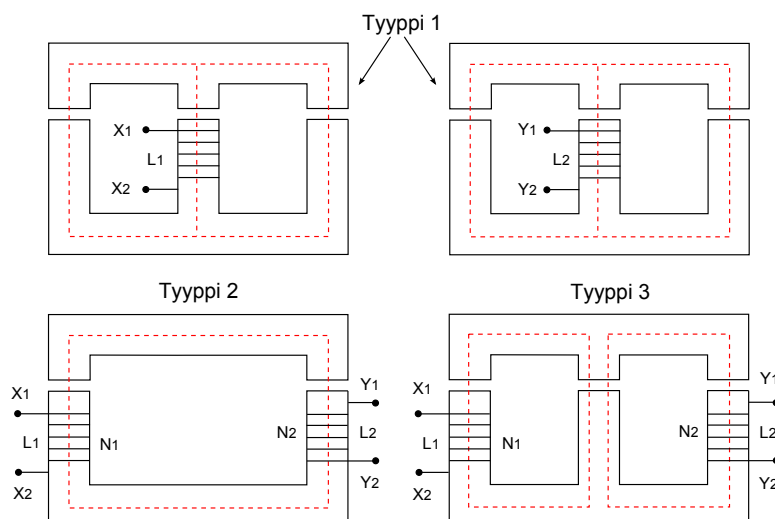


Kuva 12: AC- ja DC-kuristimien sijoitustavat.

Välipiirin DC-kuristin voidaan toteuttaa kolmella eri tavalla kuvan 13 (ks. seuraava sivu) mukaisesti. Tyypin 1 mukaisessa kuristinratkaisussa käämien L1 ja L2 kytkennät on erotettu ja käämien keskinäisinduktanssi on 0. Tyypin 2 kuristimessa käämitykset on kytketty positiivisesti ja tyypin 3 kaltaisessa kuristinratkaisussa käämitykset on kytketty negatiivisesti. Tasasuuntaussillan jänniterasitus ylijännitetilanteissa on suoraan verrannollinen kuristinrakenteen käämien keskinäiseen kytkentään. [17]

Tyypin 1 kuristinratkaisu tarjoaa tehokkaimman suojan sähköverkon transienttiylijännitteitä vastaan. Tyypin 2 mukainen positiivisesti kytketty kuristinratkaisu indusoi noin 10–12 kertaa korkeamman virran di/dt arvon kuin muut kuristinratkaisut. Tämän kaltainen kuristinrakenne altistaa suuremmalla todennäköisyydellä ylijännitetilanteissa tasasuuntaussillan vaurioitumiseen. [17]

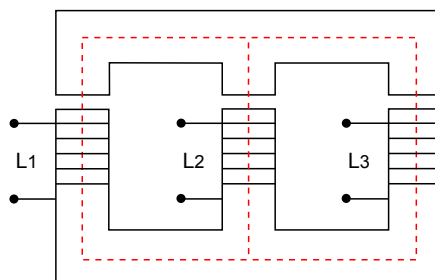
Koska tasasuuntauksessa käytettävät diodit johtavat vain silloin, kun taajuusmuuttajan AC-puolen jännite on suurempi kuin DC-välipiirin jännite, kolmivaiheinen AC-tulopuolen kuristin vähentää tulopuolenvirran käyrämuodon pulssimaisuutta. Tämä johtuu siitä, että kuristin hidastaa syöttöpuolen virran nopeaa di/dt nousunopeutta. AC-kuristin myös erottaa sähköisesti DC-välipiirin jännitteen AC-tulopuolen jännit-



Kuva 13: DC-kuristintyytit.

teestä, joten AC-puolen jännite ei ole yhdistettynä DC-välipiirin jännitteeseen tasasuuntaussillan diodien johtaessa. Tämä ominaisuus käytännössä poistaa taajuusmuuttajan aiheuttaman AC-jännitteen käyrämuodon huipun tasoittumisen (*flat top-ping*), kun taajuusmuuttajakäytöt operoivat heikossa verkossa. [72, luku 4, s. 19]

Ylijännitesuojauksessa sekä AC- että DC-kuristimet rajoittavat transienttiylijännitteiden aiheuttamien virtasysäyksien jyrkkyyttä, millä voi olla haitallisia vaikutuksia taajuusmuuttajan välipiirissä käytettäviin kondensaattoreihin [16, s. 493]. Kuristimen kela on ihanteellinen suoja ylijännitteitä vastaan, koska sen yli oleva jännitehäviö on verrannollinen sen läpi kulkevan virran muutosnopeuteen [73, s. 175].



Kuva 14: Taajuusmuuttajan kolmivaiheinen AC-kuristin muodostuu yhteisestä E-ydinsydänmateriaalista, jossa vaihekäämitykset on käämitty omille pylvälle. Ilmaväli voidaan sijoittaa käämitysten alle tai niiden yläpuolelle.

DC-kuristimen suojausvaikutukset ovat hyvin lähellä AC-kuristimen suojausvaikutuksia. Kuusipulssisuuntaajissa DC-kuristin joutuu käsittelemään kuusi kertaa enemmän DC-välipiirin jännitteen aaltoilun taajuuksia kuin AC-kuristin. Kuitenkin välipiirin aaltomuotoisen virran suuruus on pienempi. DC-kuristimen impedanssi on noin puolet AC-kuristimen impedanssista.

Toisin sanoen, kuristimen impedanssin näkökulmasta 6 %:n DC-välipiirin kuristin on samanarvoinen kuin 3 %:n AC-kuristin [72, luku 4, s. 19].

DC-välipiirin kuristin on AC-kuristimeen verrattuna halvempi ja pienempi ja se on hyvin usein asennettuna taajuusmuuttajakäyttöihin. Kuitenkin DC-kuristimen numeerisen impedanssin arvo on puolet AC-kuristimen impedanssin arvosta. DC-kuristimet ovat heti tasasuuntaussillan jälkeen asennettuina, joten ne eivät tarjoa erityistä suojaa tasasuuntaussillalle transienttiylijännitteitä vastaan. Parhaimpaan mahdolliseen suojaukseen ylijännitteitä vastaan on käyttäjä sekä kolmivaiheisia AC-kuristimia että DC-kuristimia. [72, luku 4, s. 20]

Taajuusmuuttajan AC-kuristimen induktanssi mitoitetaan usein 3-5 %:iin. 5 %:n kuristimen ensisijainen tarkoitus on vähentää taajuusmuuttajan tuottamia harmonisia yliaaltoja. 3 %:n kuristin on usein riittävä suojaamaan taajuusmuuttajaa sähköverkon häiriöiltä. [75, s. 113]

Sähköverkon puoleisen impedanssin $Z_{\%}$ 3 %:n AC-kuristimen induktanssi voidaan mitoitaa yhtälöiden 22 ja 23 mukaisesti

$$Z_{\%} = \frac{I_{RMS} \times 2\pi \times f \times L \times \sqrt{3}}{U_L} \quad (22)$$

$$L = \frac{Z_{\%} \times U_L}{I_{RMS} \times 2\pi \times f \times \sqrt{3}} \quad (23)$$

joissa I_{RMS} on kuristimen läpi kulkeva jatkuva-aikaisen virran RMS-arvo (A), f on sähköverkon taajuus (Hz), L on kuristimen induktanssi (H) ja U_L on sähköverkon pääjännite (V). [76]

On kuitenkin muistettava, että sähköverkon häiriötilanteissa AC-kuristimen käyttö voi helposti johtaa taajuusmuuttajan toimintaan yksivaiheisena epäsymmetristen jännitekuoppien aikana. [74]

Monesti DC-kuristin on suunniteltu suodattamaan 360 Hz:n jännitteen harmonisia komponentteja, kun taajuusmuuttajan tulopuolen jännitteet ovat symmetriset. Jännite-epäsymmetrisissä tilanteissa esimerkiksi 60 Hz:n sähköverkossa muun muassa 120 Hz:n ja 240 Hz:n matalataajuiset harmoniset jännitekomponentit aiheuttavat merkittävän määrän AC-magneettivuota kuristinpiiriin, mikä rasittaa kuristimen sydänmateriaalia. Tämän kaltainen kuristimen käyttöympäristö aiheuttaa sydänmateriaaliin häviöitä ja rautasydänmateriaalin magneettisen kyllästymisen, mikä johtaa kuristimen tehollisen induktanssin pienenemiseen. [13]

Jännite-epäsymmetrisissä tilanteissa on mahdollista, että taajuusmuuttajan tulopuolen virrassa on korkeita virtapiikkejä, jotka voivat rasittaa dioditasasuuntaussiltaa ja tämän seurauksena johtaa pysyviin vaurioihin. [13]

Kustannussyistä DC-välipiirin kuristin suunnitellaan tyypillisesti suodattamaan vain 360 Hz:n rippelikomponentteja syöttöpuolen jännitesymmetrisessä tilanteessa. 60 Hz:n symmetrisen sähköverkon jännitesyötössä ei esiinny 120 Hz:n komponenttia, kun 360 Hz:n komponentti säilyy ennallaan sekä epäsymmetrisessä että symmetrisessä tilanteessa. Huomattavaa on, että jännitekuoppien ja epäsymmetrisen jännitesyötön aikana syntyvän 120 Hz:n vuokomponentin suuruus on suurempi kuin 360 Hz:n vuokomponentti symmetrisessä tilanteessa 60 Hz:n sähköverkossa. [13]

Magneettivuon sisältämän tietyn harmonisen komponentin vaikutus kuristimen magneettiseen kyllästymiseen on vaikea todeta ilman tarkkoja tietoja kuristimen rakenteesta. Kustannussyistä kuristin suunnitellaan vain jännitesymmetrisiin käyttötilanteisiin. Tämä johtaa kuristimen ennenaikaiseen magneettiseen kyllästymiseen jännite-epäsymmetrisissä tilanteissa. Ylimääräisen harmonisen vuokomponentin olemassaoloon voidaan vaikuttaa kuristimen suunnitteluvaiheessa sydänmateriaalin valinnalla. Koska permeabiliteetti on määritelty vuontiheyden B ja magneettikentän voimakkuuden H suhteena ($\mu_c = B/H$), μ_c pienenee magneettikentän voimakkuuden kasvaessa magneettisen kyllästymisen alueella. Tämän seurauksena kuristimen induktanssi pienenee. [13]

Sekä AC- että DC-kuristimen käyttö taajuusmuuttajassa tarjoaa parhaimman suojausvaikutuksen taajuusmuuttajan tulopuolen virtaepäsymmetrialle. Vaikka pelkkä AC-kuristimen käyttö ei vähennä taajuusmuuttajan tulopuolen virtaepäsymmetriatasoa, se pienentää kuitenkin tarpeeksi tehokkaasti AC-puolen virran säröä ja virran RMS-arvoa. Virran RMS-arvon pieneminen vähentää taajuusmuuttajan tulopuolen ylikuormituksen riskiä jännite-epäsymmetrisessä sähköverkossa. [41, s. 34]

3 Simulointimallit

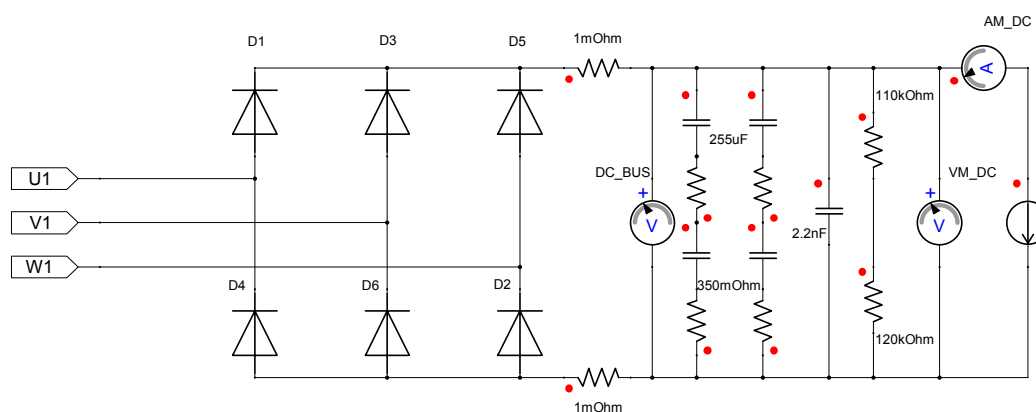
Tässä luvussa esitetään simulointimallit, joiden avulla tutkitaan sähköverkon häiriöiden vaikutuksia jännitevälipiirillisen taajuusmuuttajan toimintaan. Luvun alussa esitetään Simplorer-ohjelmalla laadittu malli taajuusmuuttajalle, taajuusmuuttajaa syöttävälle sähköverkolle ja taajuusmuuttajaa suojaavalle AC-kuristimelle. Tämän jälkeen esitetään sähköverkon häiriöiden mallinnus ylijännitteille, sähköverkon jännite-epäsymmetrialle, jännitekuopille ja jännitteen kohoumalle.

3.1 Jännitevälipiirillinen taajuusmuuttaja

Tämän työn taajuusmuuttajan simulointimallina käytetään 2,2 kW:n taajuusmuuttajaa, jonka nimellinen kuormitusvirta on 5,6 A. Välipiirin elektrolyyttikondenssaattorien kapasitanssien arvot ovat 255 μF . Kuvassa 15 on esitetty taajuusmuuttajan Simplorer-ohjelmalla laadittu mallinnus. Taajuusmuuttajan välipiirin tasavirta I_d on mahdollista määrittellä yhtälöllä 24, kun tiedetään taajuusmuuttajan ohjaaman sähkömoottorin parametrit.

$$I_d = \frac{P_m}{1,35 \times U_L \times \eta_{motor}} \quad (24)$$

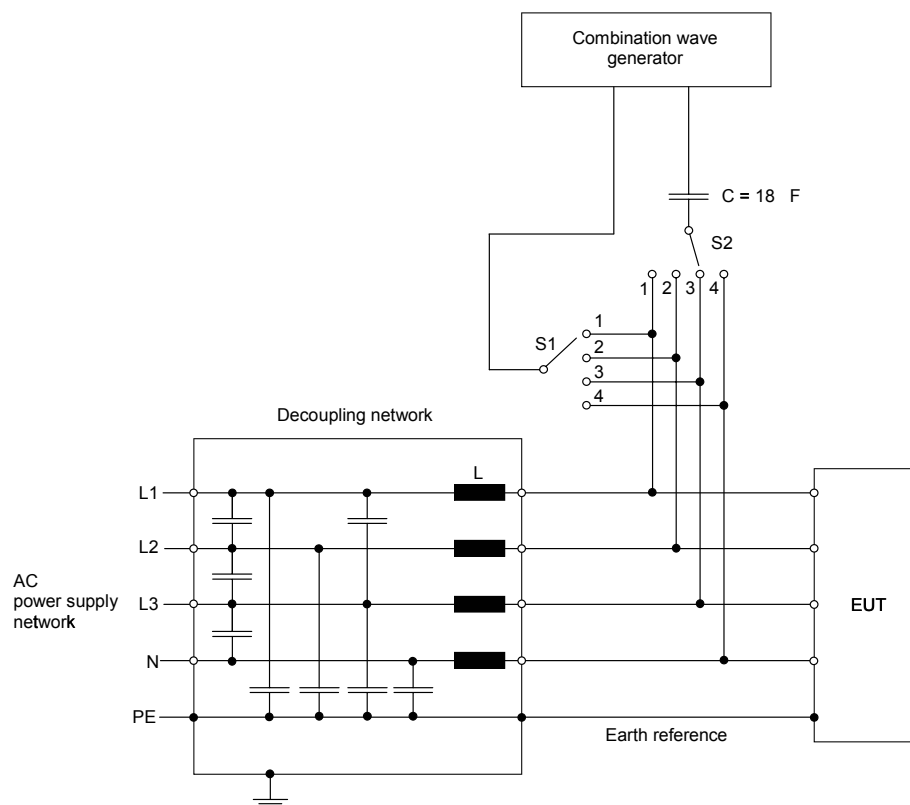
Yhtälössä 24 P_m on moottorin kilpiarvoista saatava nimellinen akseliteho, U_L on sähköverkon pääjännite ja η_{motor} on sähkömoottorin hyötysuhde. Tässä työssä taajuusmuuttajan DC-välipiirin tasavirran nimellisenä arvona on 5 A [77, s. 32–33].



Kuva 15: 2,2 kW:n taajuusmuuttaja, jonka nimellinen kuormitusvirta on 5,6 A.

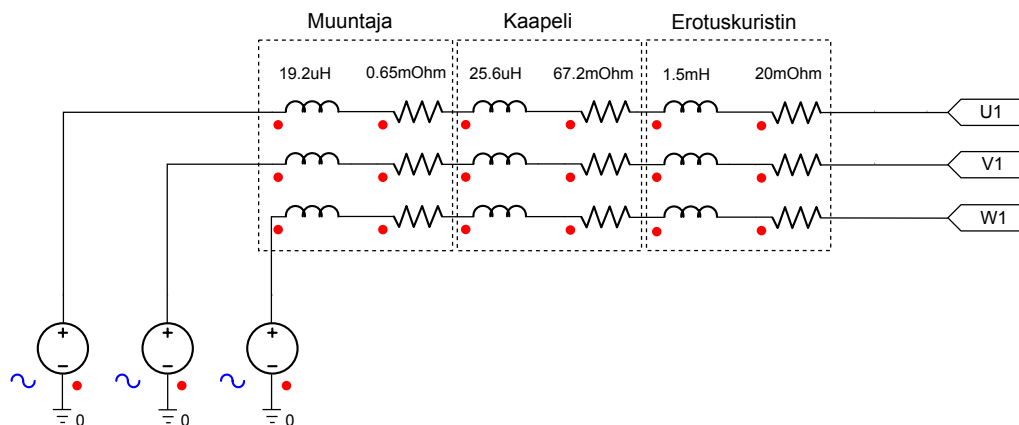
3.2 Sähköverkon mallinnus

Standardissa IEC 61000-4-5 [81, s. 41] on esitetty testausmenetelmä testattavalle laitteelle ylijännitteitä tutkittaessa. Tässä työssä tutkittava simulointimalli taajuusmuuttajan ylijännitteille on rakennettu kyseisen standardin määrittelemän testausasettelun mukaisesti. Standardin määrittelemä testausasettelu on esitetty kuvassa 16.



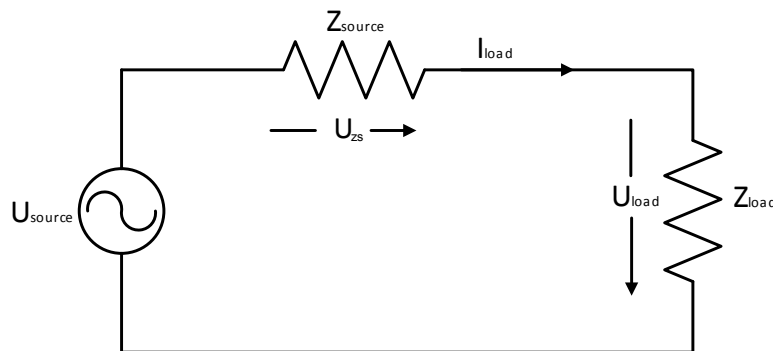
Kuva 16: Standardin IEC 61000-4-5 mukainen testausasettelu ylijännitteille. [81, s. 41]

Ylijännitesimuloinneissa taajuusmuuttajaa syöttävä sähköverkko on mallinnettu seuraavalla sivulla nähtävän kuvan 17 mukaisesti. Pienjänniteverkon impedanssi muodostuu syöttävän muuntajan, syöttökaapelin ja erotuskuristimen induktanssista ja resistanssista. Simulointimallia on käytetty myös lähteessä [58], jossa tutkittiin sähköverkon ylijännitteiden vaikutuksia taajuusmuuttajaan.



Kuva 17: Sähköverkon puoleinen simulointimalli ylijännitesimuloinneissa.

Taajuusmuuttajan välipiirin kondensaattorien verkosta ottamaa latausvirtaa rajoittaa sähköverkon impedanssi. Sähköverkon impedanssi ilmaistaan usein prosenttiyksikköinä tietyn kuormituksen aiheuttaman jännitehäviön perusteella [78]. Tämän työn simulointimallissa sähköverkon impedanssi mitoitetaan 0,5 %:iin, jolloin kuristimen käyttö on suositeltavaa.



Kuva 18: Sähköverkon impedanssin määrittely jännitteenaleneman avulla.

3.3 Kuristimen mallinnus

Simulointimallin nimellisellä kuormituksella toimivan taajuusmuuttajan sähköverkosta ottama RMS-virta on noin 5,5 A, kun sähköverkon impedanssi on mitoitettu simulointimallissa 0,5 %:iin. Suojaavan kuristimen induktanssi mitoitetaan yhtälön 23 (ks. sivu 27) mukaisesti 3 %:iin. Kuristimen käämien DC-resistanssi vaikuttaa myös merkittävästi kuristimen aiheuttamaan jännitteenalenemaan. Oletetaan, että täydellä kuormituksella kuristimen lämpöhäviöt ovat 20 W. Lämpöhäviöille referenssinä voidaan käyttää muun muassa Baldorin 3 %:n AC-kuristinta, jossa kyseisen kuristintyyppin lämpöhäviöt 8 A:n nimellisellä virralla ovat noin 30 W [79].

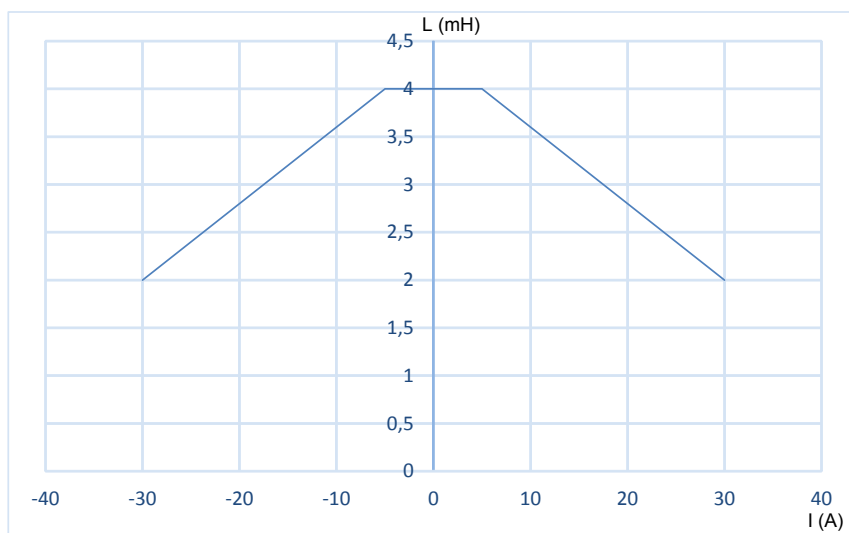
Kuristimen lämpöhäviöt voidaan laskea yhtälöllä 25.

$$P_{coil} = I_{coil}^2 \times R_{DC} \quad (25)$$

Yhtälössä P_{coil} on kuristimen lämpöhäviöt, I_{coil} on kuristimen käämin läpi kulkeva virta ja R_{DC} on kuristimen DC-resistanssi. Yhtälön avulla määritetään DC-resistanssin suuruus, kun lämpöhäviöt ja kuristimen läpi kulkeva virta tiedetään [80]. Taajuusmuuttajan toimiessa täydellä nimellisellä kuormalla, DC-resistanssin arvoksi saadaan

$$R_{DC} = \frac{P_{coil}}{I_{coil}^2} = \frac{20 \text{ W}}{(5,5 \text{ A})^2} \approx 0,7 \Omega \quad (26)$$

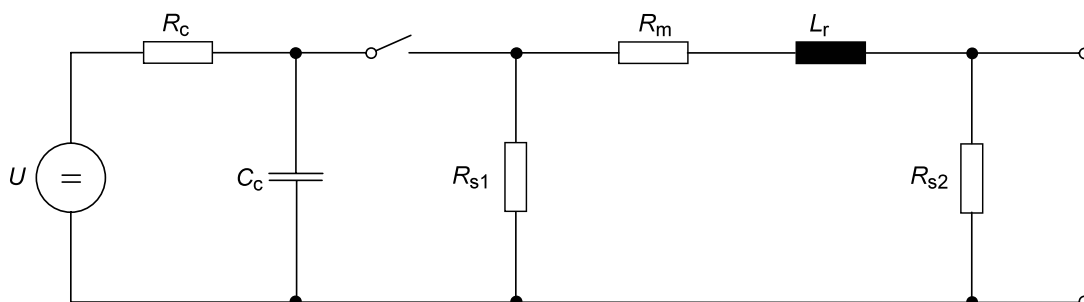
Kuristimen induktanssin arvoksi saadaan 400 V / 50 Hz sähköverkossa 0,5 %:n impedanssilla ja 20 W:n tehohäviöllä noin 4 mH. Simuloinneissa käytettävä AC-kuristimen induktanssi mallinnetaan epälineaarisenä kuvan 19 mukaisesti, jossa kuristimen kyllästyspiste (saturaatiopiste) asetetaan tässä työssä 30 A:iin. Kuristimen ollessa saturaatiossa, induktanssin arvo saturaatiopisteen 30 A:n virralla on 50 % nimellisestä induktanssista. Saturaatiopisteessä kuristimen induktanssi on tässä tapauksessa 2 mH. Suojaavan kuristimen suojaavat ominaisuudet heikkenevät siten kyllästysalueella, mikä vastaa rautasydämisen kuristimen ominaisuuksia todellisudessa.



Kuva 19: Taajuusmuuttajan suojauksessa käytettävän 3 %:n kuristimen ominaisuuksia esittävä kuvaaja.

3.4 Salaman aiheuttamat transienttilylijännitteet

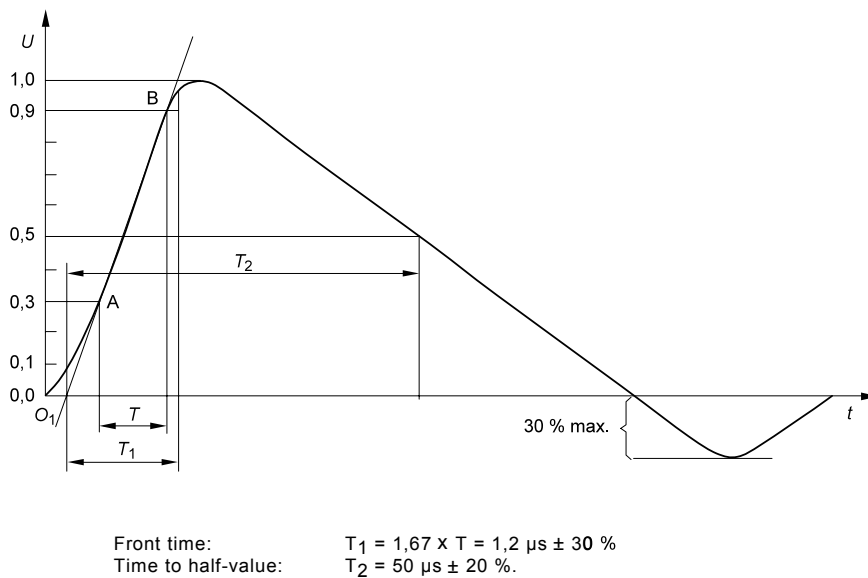
Tässä työssä tutkittavat sähköverkossa ilmenevät salaman aiheuttamat ylijännitteet perustuvat standardin IEC 61000-4-5 [81] määrittelemään ylijännitemalliin. Standardissa on määritelty salamaiskujen ylijännitteitä mallintava kytkentä [81, s. 25], joka on esitetty kuvassa 20.



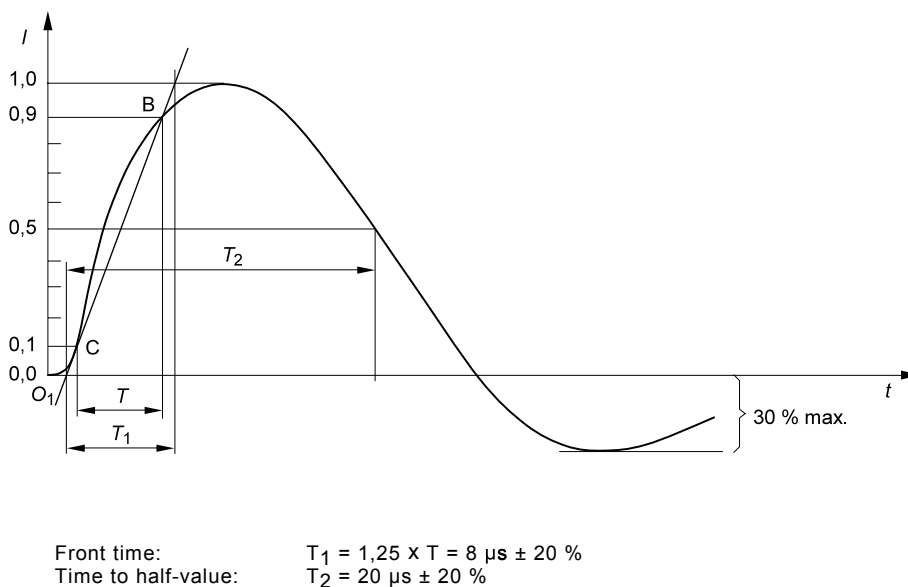
U	High-voltage source
R_c	Charging resistor
C_c	Energy storage capacitor
R_s	Pulse duration shaping resistors
R_m	Impedance matching resistor
L_r	Rise time shaping inductor

Kuva 20: IEC 61000-4-5 standardin mukainen ylijännitepulsseja tuottava kytkentä. [81, s. 25]

Kytkenällä mallinnetaan avoimen piirin salamaiskujen aiheuttamia $1,2/50 \mu\text{s}$:n pulssimuotoisia transienttilylijännitteitä, joissa jännitepulssin rintaman nousuaika on $1,2 \mu\text{s}$ ja aika jännitepulssin puolittumiseen on $50 \mu\text{s}$. Oikosulussa kytkentä tuottaa $8/20 \mu\text{s}$:n ylivirtapulssin [81, s. 29]. Seuraavalla sivulla esitetyssä kuvassa 21 on standardin määrittelemä salamaniskun aiheuttama transienttilylijännitepulssi ja kuvassa 22 kytkennän aiheuttama ylivirtapulssi.

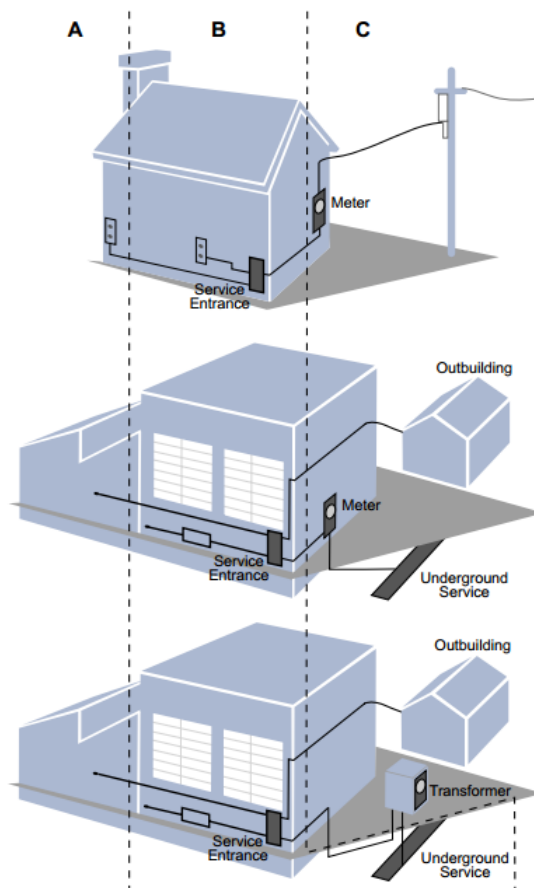


Kuva 21: Standardin IEC 61000-4-5 transienttgeneraattorin tuottama $1,2/50 \mu\text{s}$:n avoimen piirin transienttiylijännitepulssi. [81, s. 29]



Kuva 22: Standardin IEC 61000-4-5 transienttgeneraattorin tuottama $8/20 \mu\text{s}$:n oikosuljetun piirin ylivirtapulssi. [81, s. 29]

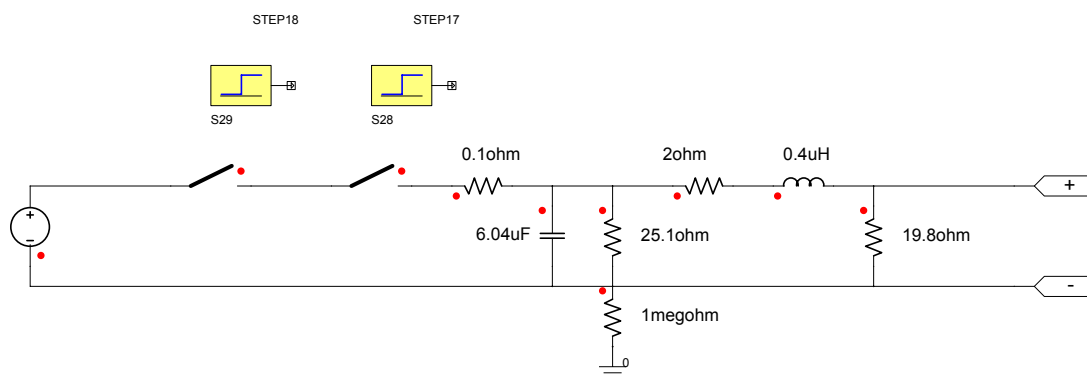
Standardissa IEC 61000-4-5 on määritelty transienttiylijännitteiden suuruudet, jotka perustuvat tutkittavan laitteen asennusluokituksiin [81, s. 87]. Suurin transienttiylijännite standardin määrittelemässä nelosluokan asennusympäristössä on 4 kV. IEEE:n standardissa C62.41.2 [83, s. 10] on puolestaan esitetty toimintaympäristöt, jossa suurin transienttiylijännite nelosluokkaa vastaavassa toimintaympäristössä B on 6 kV. Kuvassa 23 on esitetty standardin IEEE C62.41.2 määrittelemät toimintaympäristöt.



Kuva 23: Standardin IEEE C62.41.2 mukaiset ympäristöluokat tutkittavalle laitteelle.

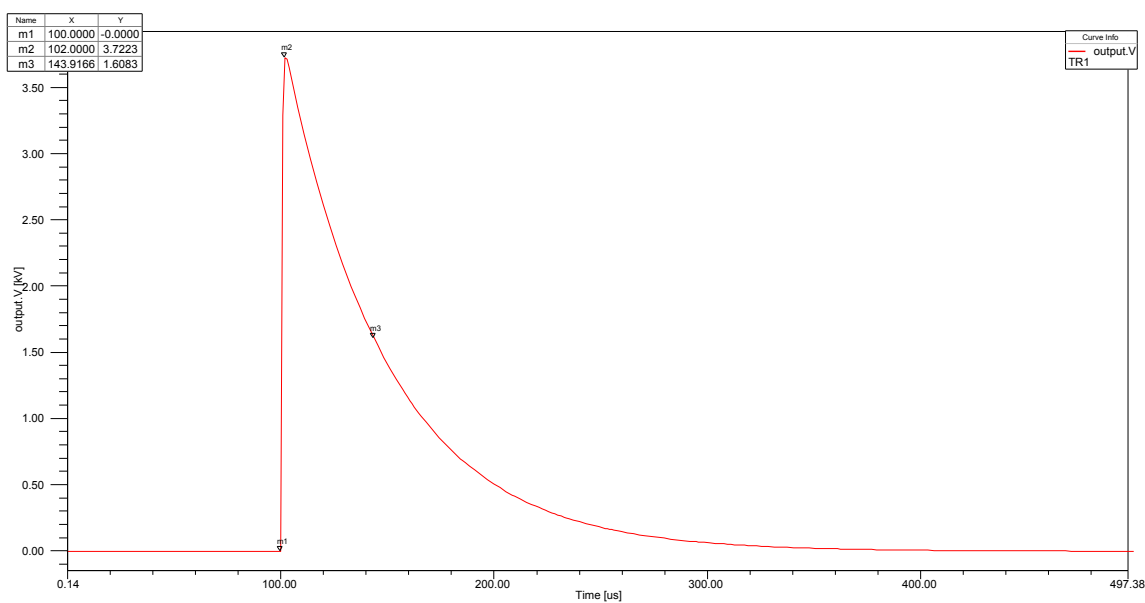
1,2/50 μ s:n transienttiylijännitteiden suuruudet ovat tässä työssä 2, 4 ja 6 kV toimintaympäristöluokka B:n mukaisesti. Työn aikana tehdyissä laboratoriomittauksissa testattiin taaajuusmuuttajan immunitettia 2 kV:n transienttiylijännitettä vastaan. Laboratoriotestien tarkoituksena oli tukea työn simulointimalleja.

Simplorer-ohjelmalla mallinnetaan standardin IEC 61000-4-5 määrittelemä transienttiylijännitteen simulointipiiri. Kuvassa 24 nähdään Simplorer-ohjelmalla laadittu kytkentä.



Kuva 24: Simplorer-ohjelmalla laadittu simulointimalli $1,2/50 \mu\text{s}$:n salaman aiheuttamalle transienttiylijännitteelle.

Simulointimallilla tuotettu standardin mukainen $1,2/50 \mu\text{s}$:n transienttiylijännitteen muoto on esitetty kuvassa 25.

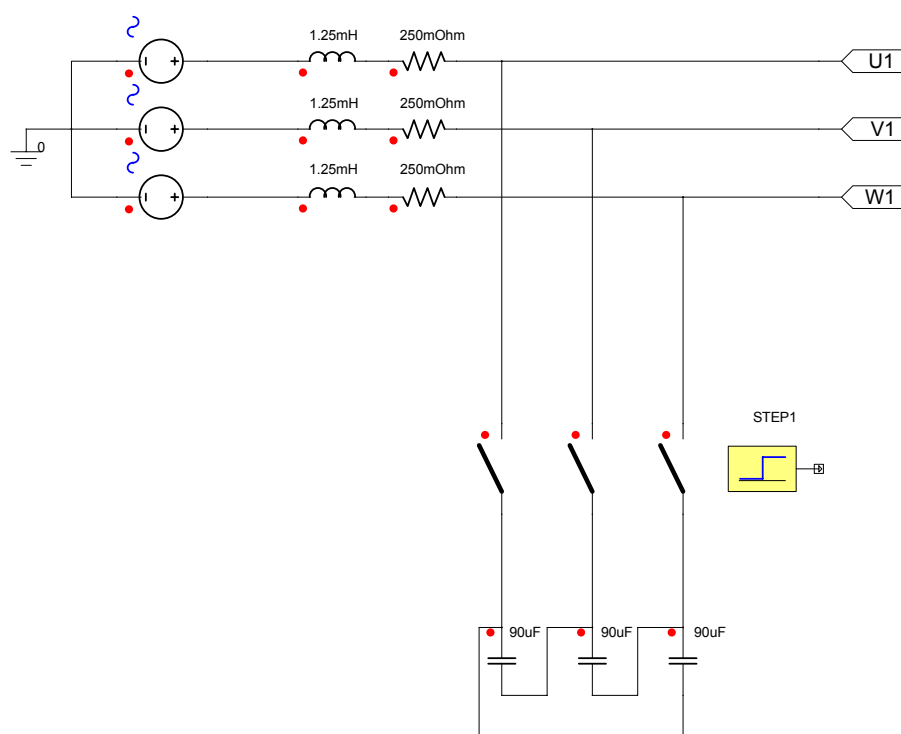


Kuva 25: Simulointimallin tuottama $1,2/50 \mu\text{s}$:n transienttiylijännitepulssi.

3.5 Kytkentätransienttien simulointimalli

Sähköverkon kompensointikondensaattorien aiheuttamia kytkentätransientteja simuloidaan kuvan 26 mukaisen piirin avulla, jonka induktanssista L ja resistanssista R muodostunut syöttöverkon impedanssi edustaa 0,5 %:n sähköverkon impedanssia. Simulointimallissa ei oteta huomioon keskijänniteverkossa käytettäviä kompensointikondensaattoreita.

Simulointien tarkoituksena on tutkia pienjänniteverkossa sijaitsevien kolmioon kytkettyjen kompensointikondensaattorien aiheuttamia kytkentätransientteja ja niiden vaikutuksia jännitevälipiirilliseen taajuusmuuttajaan. Pienjänniteverkon kolmiokytkentäisen kompensointikondensaattoripatteriston aiheuttamien kytkentätransienttien vaikutuksia taajuusmuuttajaan on tutkittu myös lähteessä [84]. Lähteen tutkimuksessa käytettävää simulointimallia on sovellettu tässä työssä.



Kuva 26: Kompensointikondensaattorien aiheuttamien kytkentätransienttien simulointimalli.

Työssä pienjännitealueella toimivan kolmivaiheisen kolmioon kytketyn kompensointikondensaattoripatteriston teho on 13,5 kVAr.

Kompensointikondensaattorin tehosta voidaan laskea kompensointikondensaattoripatteriston kapasitanssin arvo yhtälön 27 mukaisesti.

$$C_{\text{capacitor}} = \frac{Q_{\text{capacitor}}}{2 \times \pi \times f \times U_{\text{capacitor}}^2} \quad (27)$$

Kolmiokytkennässä olevien kondensaattorien kapasitanssi simulointimalliin laskeaan yhtälöllä 28.

$$C_{\Delta} = \frac{C_{\text{capacitor}}}{3} \quad (28)$$

Yhtälössä 27 $C_{\text{capacitor}}$ on kompensointikondensaattoripatteriston kapasitanssin arvo, $Q_{\text{capacitor}}$ on kompensointikondensaattorin teho ja $U_{\text{capacitor}}$ on kondensaattorin jännite. Kolmioon kytketyn kompensointikondensaattorin yli oleva jännite pienjänniteverkossa on 400 V. Yhtälöiden 27 ja 28 avulla määritelty 13,5 kVAr:n kompensointikondensaattorin kolmioon kytkettyjen kondensaattorien kapasitanssien arvot ovat 90 μF .

3.6 Taajuusmuuttajan toiminta epäsymmetrisessä sähköverkossa

Tutkittavan taajuusmuuttajan syöttöpuolen hyväksyttävä jännite-epäsymmetria saa olla enintään $\pm 3\%$ nimellisestä pääjännitteestä. Laitteen toimiessa kolmevaiheisessa 400 V:n sähköverkossa, saa jännite-epäsymmetria pääjännitteessä olla korkeintaan ± 12 V. Taajuusmuuttajan välipiirin DC-jännitteen AC-komponentin avulla pystytään seuraamaan tehokkaasti taajuusmuuttajan syöttöpuolen jännitesymmetriaa. Mikäli DC-välipiirin tasajännitteen aaltoisuus on 14 % nimellisestä välipiirin tasajännitteestä tai tämän rajan yli, taajuusmuuttaja oletusarvoisesti vikaantuu ja pysäyttää moottorihjauksen. Taajuusmuuttajan vikaantuminen voidaan kuitenkin ohittaa parametreilla, jolloin moottorihjaus on mahdollista sallia jännite-epäsymmetriasta huolimatta.

Etenkin Intiassa on hyvin yleistä, että taajuusmuuttajan sähköverkon puoleinen käyttöympäristö on epäsymmetrinen. Pahimmassa tapauksessa taajuusmuuttajan syöttöpuolelta puuttuu kokonaan yksi syöttövaihe. Mikäli taajuusmuuttaja ohjaa sähkömoottoria tämän kaltaisessa epäsymmetrisessä tilanteessa, jakautuu kuormavirta epäsymmetrisesti taajuusmuuttajan tasasuuntaussillassa.

Simulointimallien avulla tutkitaan sähköverkon jännite-epäsymmetrian aiheuttamia virtaepäsymmetrioita ja niiden aiheuttamia rasitteita. Tavoitteena on selvittää, kuinka tehokkaasti taajuusmuuttajan AC-kuristin vaimentaa tulopuolen virtoja epäsym-

metrisessä käyttötilanteessa. Simulointimallien avulla tutkitaan myös, miten DC-välipiirin jännitteen aaltomuoto muuttuu kuristinta käytettäessä. DC-välipiirin jännitteen spektriä tutkimalla voidaan selvittää mahdollinen sähköverkon puoleinen jännite-epäsymmetria taajuusalueella, kun välipiirin tasajännitteen 100 Hz:n komponentin huippuarvo kasvaa 50 Hz:n sähköverkossa.

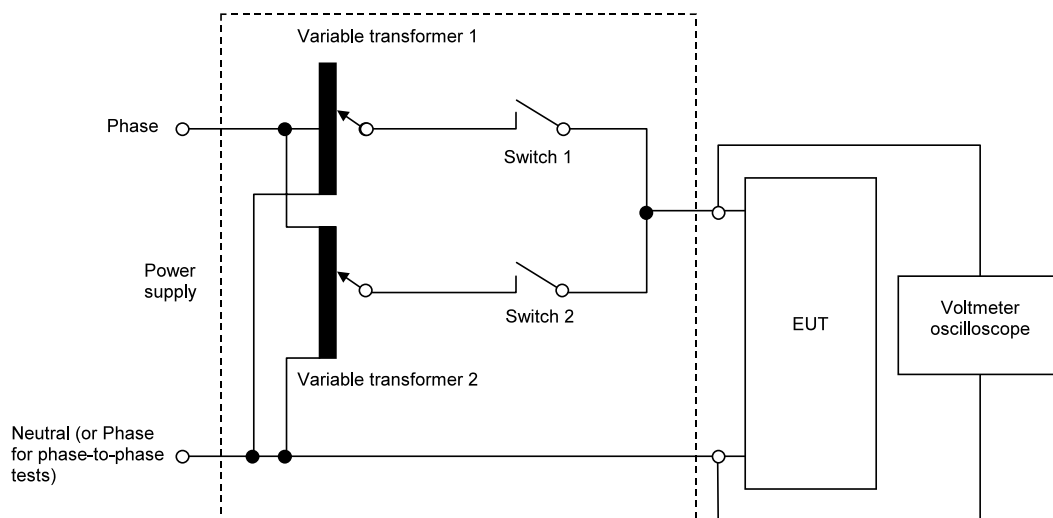
Taulukossa 3 on esitetty taajuusmuuttajan sähköverkon jännitteiden arvot simulointitutkimuksissa, joissa yhden syöttövaiheen jännite poikkeaa symmetrisestä arvosta.

Taulukko 3: L1-syöttövaihe epäsymmetrinen, L2- ja L3 -syöttövaiheet normaalit.

	Vaihejännite U (pu)	Vaihejännite U (V)
1	0,75	172,5
2	0,5	115
3	0,25	57,5
4	0	0

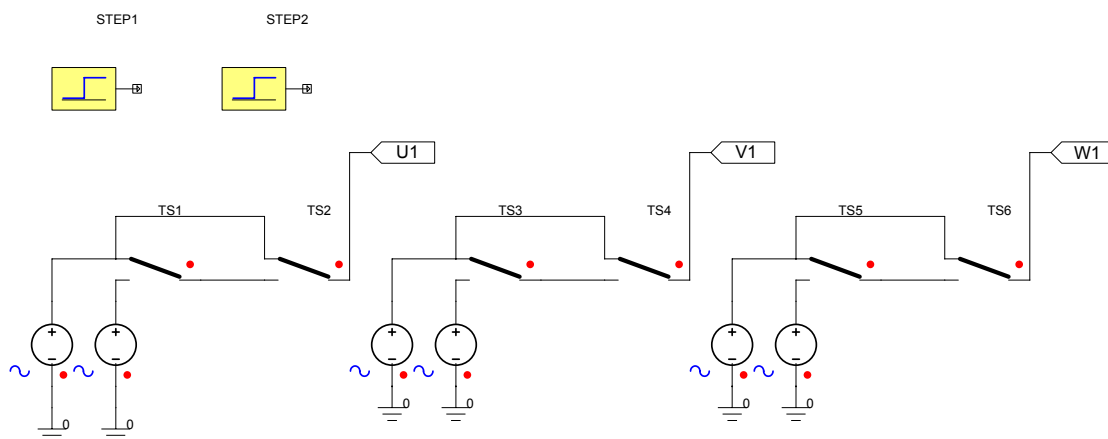
3.7 Jännitekuopat ja jännitteen kohouma

Standardissa IEC 61000-4-11 on määritelty jännitekuoppien testausmenetelmät tutkittavalle laitteelle. Standardin esittämä testausmenetelmä on kuvattu yksivaiheisena, mutta menetelmää on mahdollista soveltaa myös kolmivaihesyötetyille laitteille. Kuvassa 27 nähdään standardissa esitetty jännitekuoppien testausmenetelmä [85, s. 45].



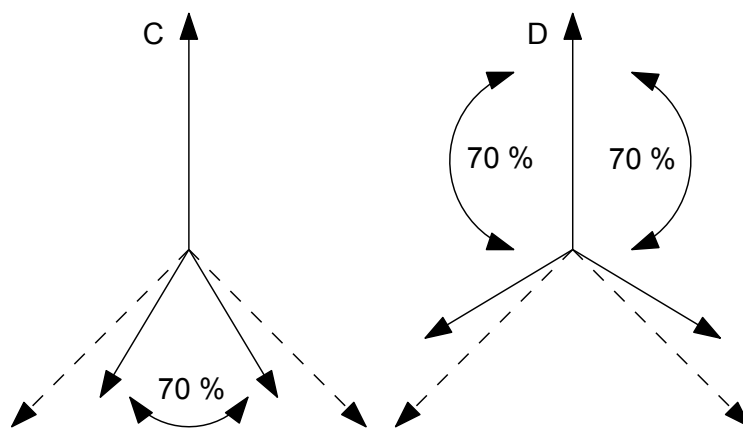
Kuva 27: Standardissa IEC 61000-4-11 määritelty jännitekuoppien testausmenetelmä. [85, s. 45]

Hetkellisiä jännitekuoppia simuloidaan kuvan 28 mukaisella Simplorer-ohjelmalla kehitetyllä piirillä. Kyseisellä piirillä simuloidaan myös hetkittäisiä symmetrisiä jännitteen kohoumia. Kuvan kytkimillä TS1–TS6 vaihdetaan hetkellisesti taajuusmuuttajaa syöttävien jännitelähteiden RMS-arvoja. Askelfunktiolla säädetään jännitekuoppien ja jännitteen kohouman kestoja ja niiden syttymishetkeä. Tässä työssä simuloitavat jännitekuopat ovat tyyppiä A, C ja D.



Kuva 28: Simplorer-ohjelmalla rakennettu jännitekuoppia ja jännitteen kohoumia tuottava simulointimalli.

Tyyppien C ja D jännitekuoppien aikana jännitteiden vaihekulmat ovat epäsymmetriset. Epäsymmetristen vaiheiden välinen vaihekulma on 70 % nimellisestä arvosta standardin IEC 61000-4-11 mukaisesti.



Kuva 29: C- ja D-tyypin jännitekuoppien epäsymmetriset vaihekulmat.

Jännitteen kohoumien vaikutuksia taajuusmuuttajan toimintaan tutkitaan kohoumien arvoilla 1,2–1,8 pu, jotka on määritelty standardissa IEEE Std 1159-2009 [86, s. 6]. Jännitteen kohouman ajankohta simuloidaan vaihtojännitteen kulmalla $\pi/2$, joka vastaa epäsuotuisinta tilannetta jännitteen kohouman alkamiselle.

Sähköverkon häiriöiden seurauksena taajuusmuuttajan tasasuuntaussilta altistuu suurille jännitteille ja tasasuuntaussillan läpi kulkeville virroille. Ylivirtapiikin aikana diodin häviöihin vaikuttavat diodin myötäsuuntainen jännite, myötäsuuntainen virta ja lämpötila. Koska todellisuudessa diodin myötäsuuntaista jännitettä ei ole aina mahdollista mitata, voidaan diodin i^2t -arvon avulla tarkastella transienttilylijännitteen aiheuttaman ylivirtapiikin aiheuttamia vahinkoja. Ylivirtapiikin integraali i^2t puolikkaan sinimuotoisen virran amplitudilla I_{FSM} lasketaan yhtälön 29 mukaisesti, joka on esitetty standardissa IEC 60747.

$$\int_0^{tp} I^2(t) \times dt = \frac{1}{2} \times I_{FSM}^2 \times tp \quad (29)$$

Mikäli sähköverkon häiriöiden aikana tasasuuntaussillan diodeissa havaitaan liian suuria virtoja, tutkitaan diodien i^2t -arvon avulla mahdollisia tasasuuntaussillan diodien rasitteita. Jännitteen kohouman aikana tutkitaan, ylittääkö sähköverkon ylijännite diodien estosuuntaisen jännitekestoisuuden.

Taajuusmuuttajassa käytettävä tasasuuntaussiltayksikkö kuuluu SKiiP 11NAB126V1 tehomoduliin, jonka datalehden arvot tasasuuntaussillalle on esitetty kuvassa 30.

Absolute Maximum Ratings		$T_s = 25 \text{ }^\circ\text{C}$, unless otherwise specified	
Symbol	Conditions	Values	Units
V_{RRM}		1600	V
I_F	$T_s = 70 \text{ }^\circ\text{C}$	35	A
I_{FSM}	$t_p = 10 \text{ ms}$, sin 180° , $T_J = 25 \text{ }^\circ\text{C}$	220	A
i^2t	$t_p = 10 \text{ ms}$, sin 180° , $T_J = 25 \text{ }^\circ\text{C}$	240	A^2s
T_J		- 40 ... + 150	$^\circ\text{C}$

Kuva 30: Tehomoduli SKiiP 11NAB126V1 datalehden arvot. [87]

Datalehden arvoissa V_{RRM} on diodin maksimi jatkuva estosuuntainen jännite, I_F on diodin maksimi myötäsuuntainen virta määrättyssä lämpötilassa, I_{FSM} on 10 ms:n sinimuotoisen virtapiikin huippuarvo ja T_J on diodin pn-liitoksen minimi- ja maksimilämpötilat.

4 Simulointitulokset

Tässä luvussa esitetään simulointimalleista saadut simulointitulokset taajuusmuuttajan altistuessa sähköverkon häiriöille. Luvun alussa esitetään tulokset salaman aiheuttamille transienttiylijännitteille ja kompensointikondensaattorien aiheuttamille kytkentätransienteille. Seuraavaksi esitetään jännitekuoppien ja jännitteen kohoumien simulointitulokset. Luvun lopussa esitetään simulointitulokset taajuusmuuttajan toimiessa epäsymmetrisessä sähköverkossa.

4.1 Salaman aiheuttamat transienttiylijännitteet vaihe- ja pääjännitteessä

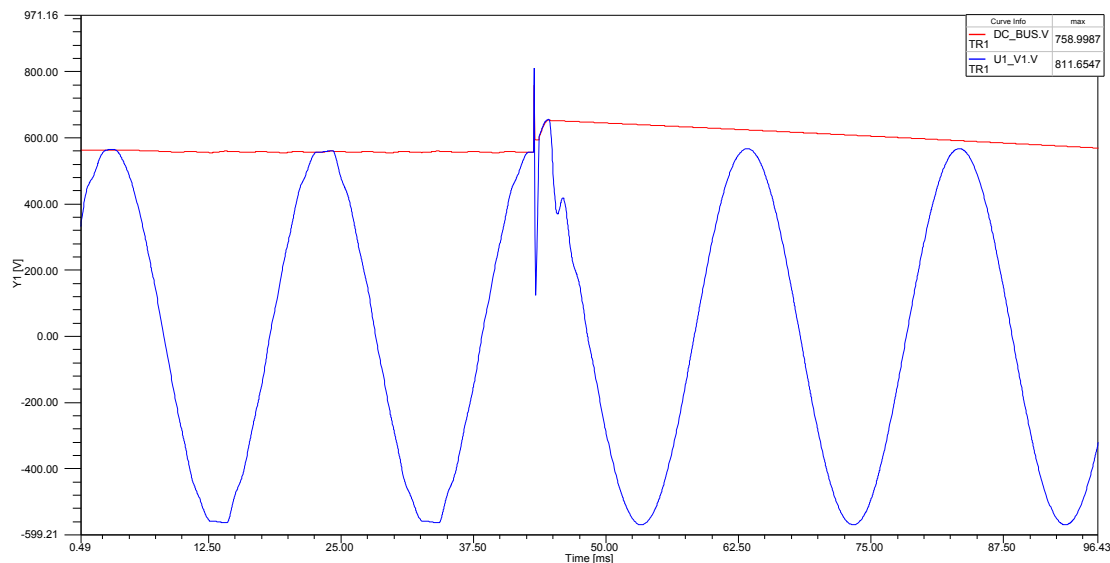
Ensimmäinen simulointi tehtiin ilman suojaavaa AC-kuristinta. Standardien mukaiset 1,2/50 μ s:n salaman aiheuttamat 2, 4 ja 6 kV:n transienttiylijännitteet syötettiin taajuusmuuttajan tulopuolen liittimiin vaiheen ja maan välille sekä vaiheen ja vaiheen välille AC-jännitteen positiivisella polariteetilla ajanhetkellä $\pi/2$. Kyseisellä pääjännitteen kulmalla saatiin simulointien perusteella suurimmat rasitearvot taajuusmuuttajan tasasuuntaussillassa.

Taulukossa 4 on esitetty simulointitulokset, kun transienttiylijännite syötettiin vaihejännitteen kulmalla 90° taajuusmuuttajan liittimille ajanhetkellä 43,25 ms. Taajuusmuuttajan DC-välipiirin virta simuloinneissa oli 450 mA, joka vastaa hyvin pientä kuormitusta taajuusmuuttajan ulostulossa.

Taulukko 4: 2 kV:n suuruinen 1,2/50 μ s:n transienttiylijännite.

Ylijännite	Diodi I (A)	Diodi U (V)	UDC (V)	i^2t (A ² s)
Vaihe–Maa	56,47	617,93	617,31	-
Vaihe–Vaihe	550	785,86	759	3,38

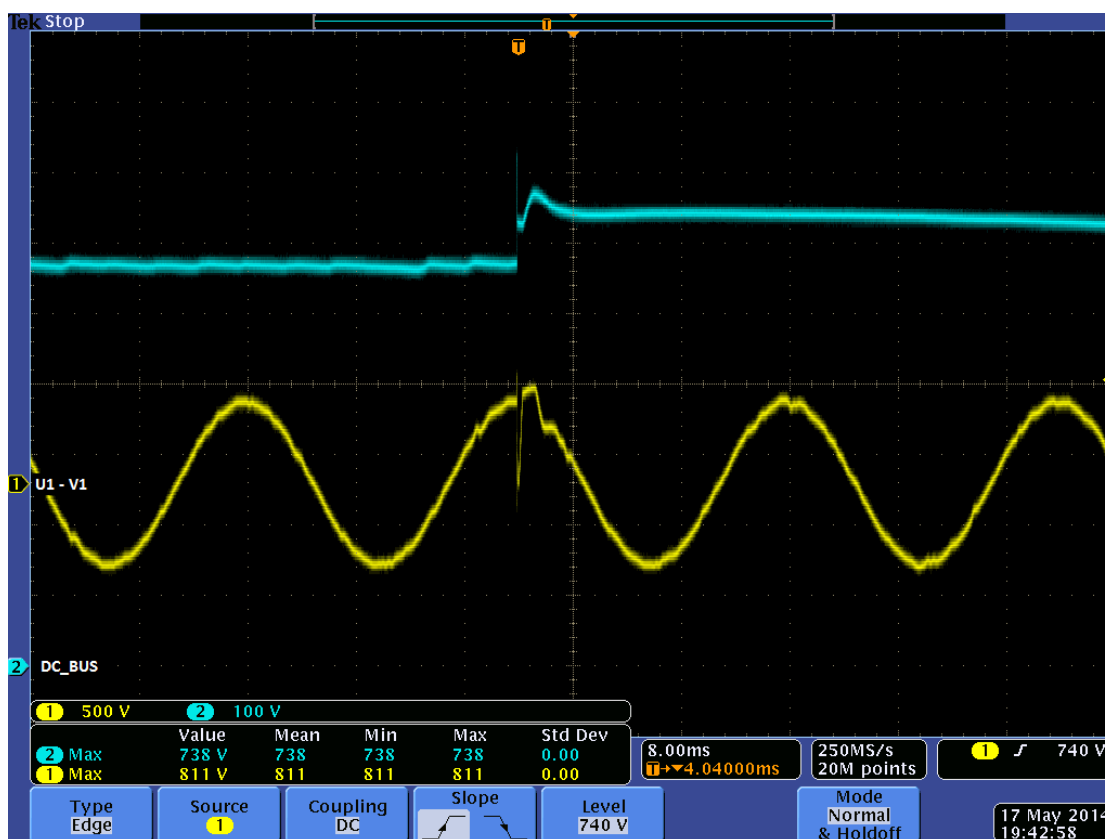
Salaman aiheuttaman transienttiylijännitteen vaikutukset taajuusmuuttajaan olivat suuremmat transienttiylijännitteen ollessa sähköverkon pääjännitteessä. Kuvassa 31 (ks. seuraava sivu) nähdään simuloidun 2 kV:n transienttiylijännitteen aiheuttama jännitteen nousu taajuusmuuttajan välipiirissä ja ylijännitepiikki taajuusmuuttajan tulopuolen pääjännitteessä U1–V1. Simulointien perusteella transienttiylijännitteen aiheuttama ylijännite taajuusmuuttajan tulopuolen pääjännitteessä oli noin 811,65 V ja välipiirin maksimijännite oli noin 759 V.



Kuva 31: Simuloitu 2 kV:n transienttiylijännite taajuusmuuttajan liittimien U1–V1 pääjännitteessä.

Laboratoriossa testattiin taajuusmuuttajan immunitettia 2 kV:n transienttiylijännitettä vastaan. Laboratoriotestissä taajuusmuuttaja ohjasi 3 kW:n kuormittamaton sähkömoottoria 23 Hz:n taajuudella. Seuraavalla sivulla kuvassa 32 nähdään laboratoriossa tehty mittausta, jossa keltainen väri kuvaa taajuusmuuttajan syöttöpuolen pääjännitettä ja sininen väri taajuusmuuttajan välipiirin DC-jännitettä.

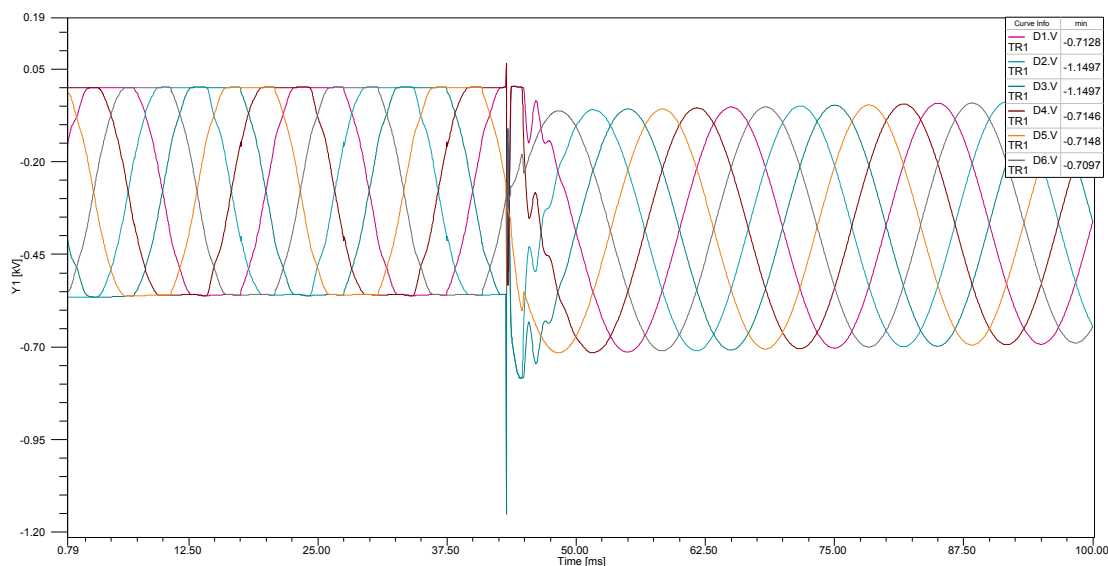
Laboratoriomittauksissa maksimi pääjännitteen suuruus oli 811 V ja välipiirin jännite 738 V, jotka vastaavat melko tarkasti simuloituja tuloksia. Laboratoriossa ylijännitegeneraattorin ja taajuusmuuttajan välissä oli lyhyt syöttökaapelointi, jota simuloinneissa ei otettu huomioon. Laboratoriomittausten aikana taajuusmuuttajan toiminnassa ei havaittu muutoksia.



Kuva 32: 2 kV:n transienttiylijännite taajuusmuuttajan liittimien U1–V1 pääjännitteessä laboratoriokokeessa.

Seuraavaksi simuloitiin B-ympäristökategoriaan sijoittuvan laitteen altistumista suurimmille standardien mukaisille transienttiylijännitteille. 4 kV:n transienttiylijännite syötettiin taajuusmuuttajan liittimiin pääjännitteen ajanhetkellä $\pi/2$. 4 kV:n transienttiylijännitteellä diodin D1 maksimivirta oli 1,45 kA. Diodin i^2t -arvoksi saatiin tässä tapauksessa 23,69 A²s.

Diodien D2 ja D3 yli oleva estosuuntaisen jännitteen maksimiarvo oli 1,14 kV. Taajuusmuuttajan toimiessa kuormittamattomana tasasuuntaussillassa havaittava maksimijännite oli noin 1,15 kV. Seuraavalla sivulla kuvassa 33 nähdään tasasuuntaussillan diodien estosuuntaiset jännitteet 4 kV:n transienttiylijännitteen aikana, kun taajuusmuuttaja toimii kuormittamattomana.



Kuva 33: Diodien estosuuntaiset jännitteet 4 kV:n transienttiylijännitteen aikana taajuusmuuttajan toimiessa kuormittamattomana.

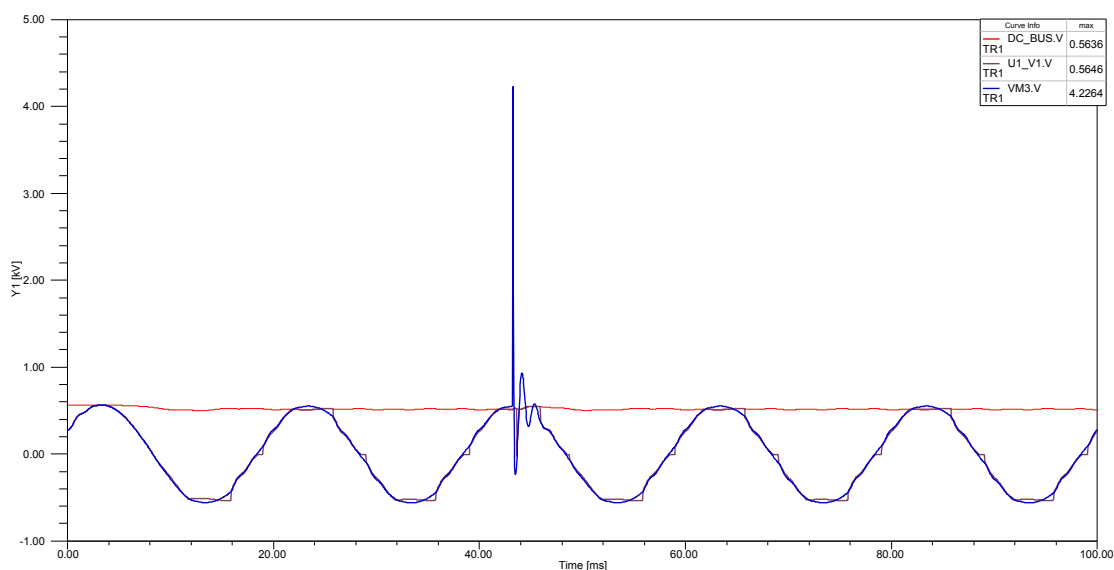
6 kV:n transienttiylijännitteellä tasasuuntaussillassa nähtävä suurin diodin estosuuntainen jännite oli 1,4 kV ja virta 2,1 kA. Diodin i^2t -arvoksi saatiin 50,65 A²s.

Tasasuuntaussillan diodien estosuuntainen jännite ei noussut simuloitien perusteella haitalliselle tasolle, sillä transienttiylijännitteen sisältämä energia purkautuu välipiirin kondensaattorien latausvirran kautta. Kondensaattorien lataushetken aikana sähköverkosta otetaan kondensaattorien latausvirta, joka kulkee tasasuuntaussillan johtavan diodin läpi. Johtavan diodin i^2t -arvo ei ylittynyt transienttiylijännitteestä aiheutuvasta korkeasta virtapiikistä.

Seuraavaksi arvioitiin työssä mitoitettun 3 %:n AC-kuristimen suojausvaikutuksia 4 kV:n transienttiylijännitettä vastaan, kun taajuusmuuttajan välipiirin virta on nimellisessä 5 A:n toimintapisteessä ja taajuusmuuttajaa syöttävän sähköverkon impedanssi on asetettu simulointimallissa 0,5 %:iin.

Simulointituloksista nähdään, että suojaavan kuristimen käyttö alentaa transienttiylijännitteestä aiheutuvan virta- ja jännitepiikin huippuarvoa taajuusmuuttajan tulopuolen liittimissä. Suurin virta tasasuuntaussillassa kuristinta käytettäessä oli noin 23,5 A.

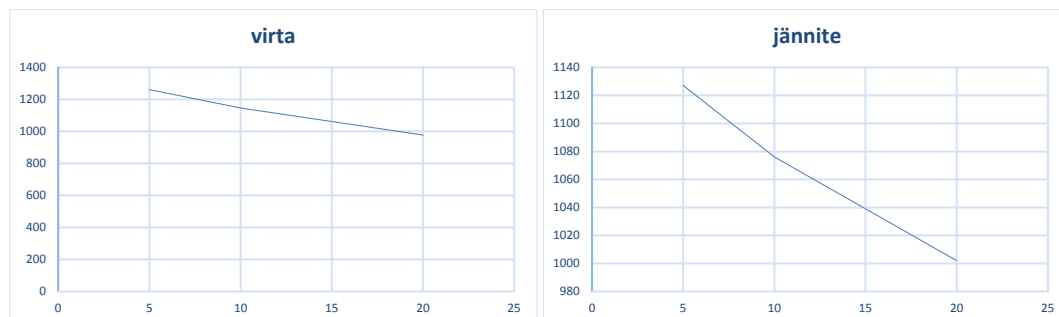
Kuvassa 34 on esitetty taajuusmuuttajan tulopuolen pääjännite ennen kuristinta, kuristimen jälkeen ja välipiirin jännite. Simulointitulosten perusteella huomioitavaa on, että vaikka taajuusmuuttajaa suojaavan kuristimen saturaatiopiste on transienttiyläjännitteen aiheuttamaan virtapiikkiin nähden alhainen, kykenee se silti suojaamaan taajuusmuuttajaa tehokkaasti suurelta sähköverkosta otetulta virralta. Mikäli kuristimen saturaatiopistettä siirretään 10 ampeeria alemmalle tasolle, on maksimivirta tasasuuntaussillan diodissa noin 50 % suurempi. Vielä tälläkään virran arvolla tasasuuntaussillassa ei havaita liian korkeita virran arvoja, joten kuristimen suojaus-taso on riittävä nopeita transienttiyläjännitteitä vastaan.



Kuva 34: 4 kV:n transienttiyläjännitteen vaikutus taajuusmuuttajan jännitetasoihin, kun taajuusmuuttaja on varustettu 3 %:n kuristimella. Kuvassa sinisellä taajuusmuuttajan tulopuolen pääjännite ennen kuristinta, violetilla pääjännite kuristimen jälkeen ja punaisella välipiirin tasajännite.

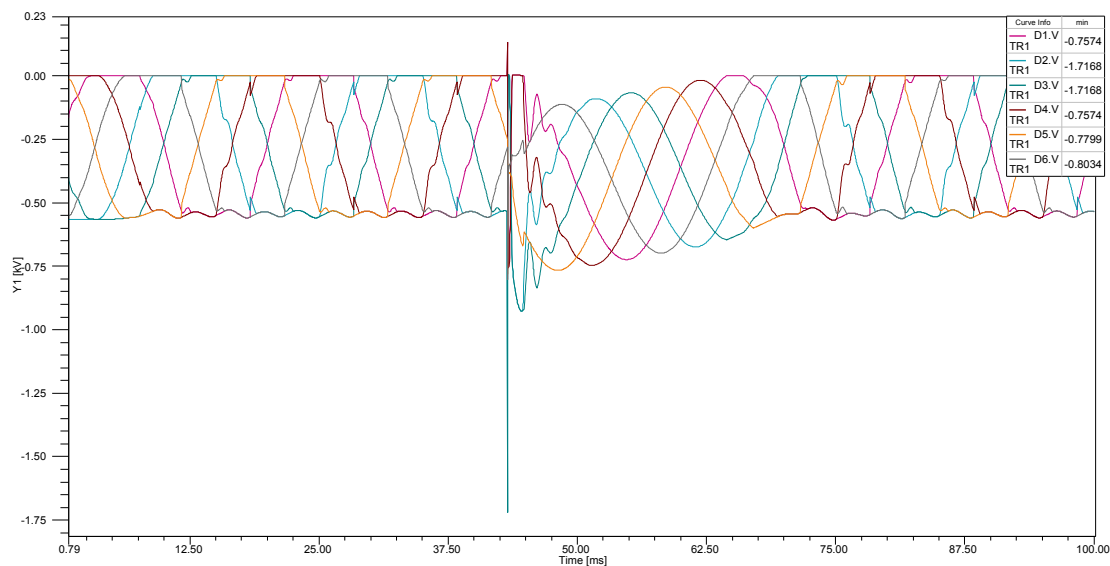
Simulointitulosten ja aiemman tutkimustiedon perusteella voidaan todeta, että standardin mukaiset salaman aiheuttamat transienttiyläjännitteet eivät aiheuta taajuusmuuttajan tasasuuntaussillassa vahinkoa, mikäli taajuusmuuttaja on asennettuna standardin IEEE C62.41.2 määrittelemän B-ympäristöluokituksen käyttöympäristössä. Koska todellisuudessa ei voida tarkalleen tietää transienttiyläjännitteiden huipparvojen suuruuksista, jodutaan turvautumaan standardin määrittelemiin maksimirajoihin. Tutkittavat transienttiyläjännitteet syötettiin suoraan taajuusmuuttajan liittimiin, jolloin muun muassa taajuusmuuttajaa syöttävän kaapelin vaimennusominaisuuksia ei otettu simuloinneissa huomioon. Todellisuudessa syöttävältä muuntajalta tulevan kaapelimateriaalin muodostama yhteinen impedanssi on suurempi ja siten myös vaimennustekijät ovat suurempia. Salaman iskeytyessä keskijänniteverkkoon, transienttiyläjännite vaimenee myös pienjänniteverkkoa syöttävässä jakelumuuntajassa ja muissa sähköverkkoon liitetyissä kojeissa.

Kuvassa 35 nähdään simuloinneissa käytettävän taajuusmuuttajan kokoluokan MCMK 3x2,5/2,5 syöttökaapelin vaikutus 4 kV:n transienttiylijännitteen vaimentumiselle. Kuvassa virta on verkossa kulkeva virta ja jännite taajuusmuuttajan liittimissä oleva jännite transienttiylijännitteen aikana.



Kuva 35: 4 kV:n transientin vaimennus MCMK 3x2,5/2,5 syöttökaapelin vaikutuksesta.

On kuitenkin selvää, että suuret transienttiylijännitteet aiheuttavat vahinkoa herkkiin elektroniin laitteisiin. Kuvassa 36 nähdään 8 kV:n transienttiylijännitteen aiheuttama jänniterasitus tasasuuntaussillan diodeissa taajuusmuuttajan toimiessa nimellisellä kuormituksella. Tasasuuntaussillassa nähtävä suurin virta oli nyt 2,83 kA. Laskettu i^2t -arvo suurimmalle virralle oli 89,86 A²s.

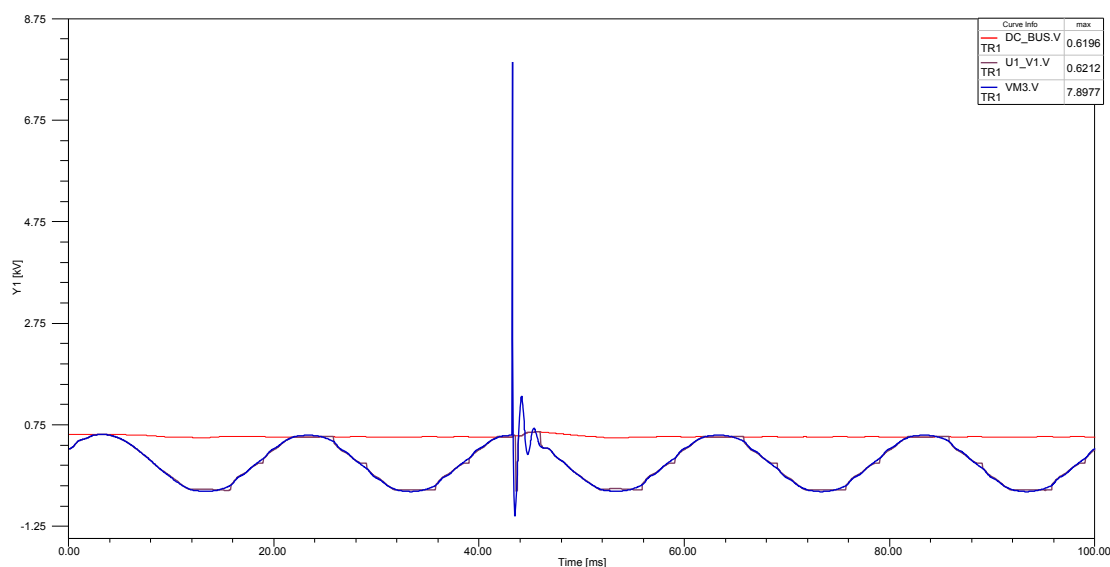


Kuva 36: Diodien estosuuntaiset jännitteet 8 kV:n transienttiylijännitteen aikana taajuusmuuttajan toimiessa nimellisellä teholla.

8 kV:n transienttiylijännitteen aiheuttama suurin ylijännite tasasuuntaussillan diodeissa oli noin 1,72 kV, joka on suurempi kuin datalehdien diodien suurin estosuunta-

nen jännite. Näin suuria ylijännitteitä ei standardin määrittelemässä käyttöympäristössä esiinny, mutta pienjänniteverkossa tämän kaltaisia ylijännitteitä voi kuitenkin esiintyä. Kuristimen vaikutuksesta ylijännite tasasuuntaussillassa rajoittui 620 V:iin ja sähköverkosta otettu virta 48,4 A:iin.

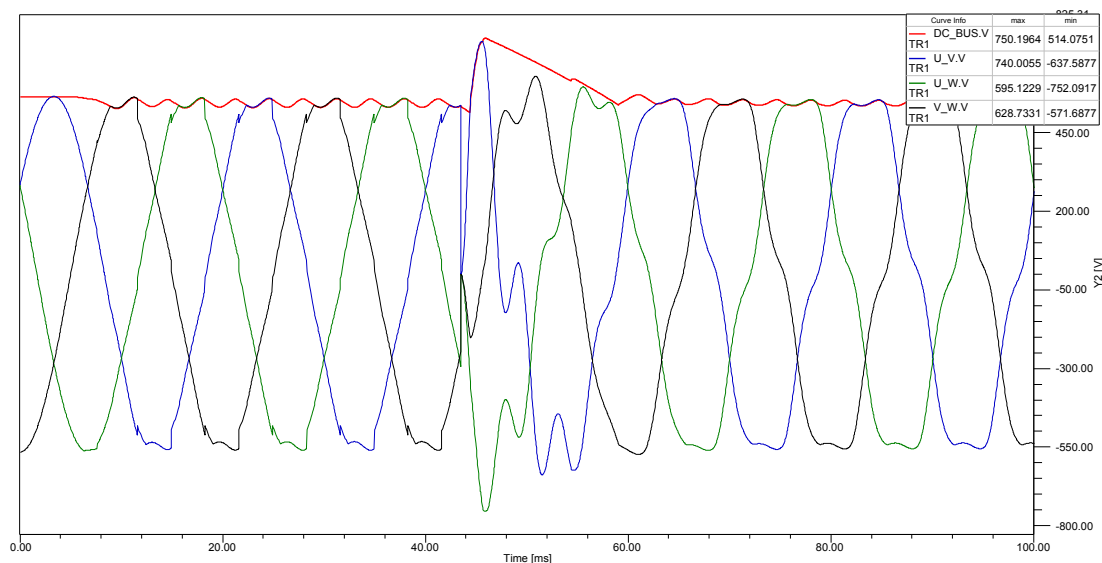
Kuvassa 37 nähdään 8 kV:n transienttiylijännite ennen suojaavaa kuristinta, jännite kuristimen jälkeen ja DC-välipiirin jännite.



Kuva 37: Kuristimen vaikutus taajuusmuuttajan suojaustasoon 8 kV:n transienttiylijännitteeltä. Kuvassa sinisellä taajuusmuuttajan tulopuolen pääjännite ennen kuristinta, violetilla pääjännite kuristimen jälkeen ja punaisella välipiirin tasajännite.

4.2 KytKentätransientit

Seuraavalla sivulla kuvassa 38 nähdään pienjännitepuolella toimivien $90 \mu\text{F}$:n kompensointikondensaattoripatteristojen aiheuttama kytkentätransientti ja sen vaikutukset taajuusmuuttajan välipiirin DC-jännitteeseen. Kondensaattorit kytkettyivät päälle U- ja V-vaiheiden väliltä mitatun pääjännitteen ajanhetkellä 43,5 ms, joka vastaa pääjännitteen kulmaa 90° . Simuloinneissa taajuusmuuttaja toimi nimellisellä kuormituksella ja sen välipiirin virta oli 5 A.



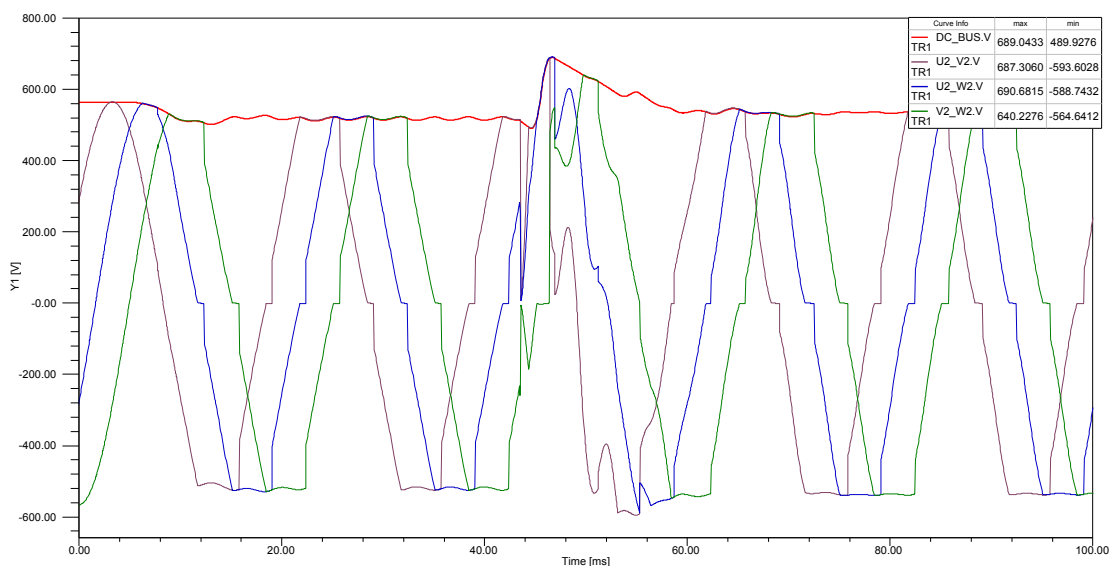
Kuva 38: Taajuusmuuttajan tulopuolen pääjännite ja välipiirin jännite 0,5 % sähköverkon impedanssilla, kun $90 \mu\text{F}$:n kompensointikondensaattorit kytkeytyvät päälle.

Kompensointikondensaattorien aiheuttama DC-välipiirin jännitteen maksimiarvo oli noin 750 V. Kytkentätransientin aikana taajuusmuuttajan välipiirin kondensaattorit ottivat sähköverkosta latausvirran, jonka seurauksena tasasuuntaussillan läpi kulki hetkellisesti maksimissaan noin 75 A:n virta. Taajuusmuuttajan tasasuuntaussillan datalehden maksimiarvoja ei kuitenkaan ylitetty simuloidun kytkentätransientin aikana. Kytkentätransienttien värähtelytaajuuteen ja transienttiyläjännitteen suuruuteen vaikuttaa vahvasti taajuusmuuttajan sähköverkon impedanssin ja taajuusmuuttajan välipiirin kondensaattorien koko. Pienitehoisten taajuusmuuttajien välipiirissä käytettävien kondensaattorien kapasitanssien arvot ovat pienempiä, jolloin kytkentätransientin aiheuttama jännitteen nousu taajuusmuuttajan välipiirissä on suurempi. Esimerkiksi DC-välipiirin kondensaattorien $185 \mu\text{F}$:n arvolla välipiirin jännite oli simulointitulosten perusteella maksimissaan noin 773 V. Suuremmalla välipiirin kapasitanssin arvolla verkosta otetun syökyvirran suuruus on suurempi ja DC-jännitteen nousu pienempi kytkentätransientin aikana. $350 \mu\text{F}$:n välipiirin kondensaattorien kapasitanssien arvoilla korkein sähköverkosta otettu virta oli nyt noin 81 A ja DC-jännitteen maksimiarvo 723 V.

Kuristimen kanssa DC-jännitteen maksimiarvo kytkentätransientin aikana oli noin 690 V. Sähköverkosta otettu kondensaattorien latausvirta rajoittui nyt noin 57 A:iin. Suuren latausvirran takia kuristimen suojaavia ominaisuuksia rajoittaa kuristimen satureituminen, jonka aikana kuristimen induktanssi pienenee. Kuristimen ominaisuudet käyttäytyvät kytkentätransienttien aikana hyvin eri tavoin kuin salaman aiheuttaman nopean transienttiyläjännitteen aikana. Nopeissa jännitteen muutostiloissa suojaava kuristin rajoitti tehokkaasti alhaisesta saturaatiopisteestä huolimatta transienttiyläjännitteen aiheuttamia virtapiikkejä. Kytkentätransienttien aikana

kuristimen saturaation aiheuttaman suojauksen heikkeneminen oli selvemmin esillä. Mikäli sähköverkon impedanssin ja taajuusmuuttajan välipiirin kondensaattorien parametrit ovat suuruudeltaan sitä luokkaa, että taajuusmuuttajan välipiirin jännite nousee kytkentätransientin aikana taajuusmuuttajan DC-välipiirin ylijänniterajalle, voidaan kuristimen avulla kuitenkin vähentää turhia taajuusmuuttajan vikalaukaisuja.

Kuvassa 39 nähdään suojaavan 3 %:n kuristimen vaikutus taajuusmuuttajan kytkentätransientin aiheuttamaan jännitteen nousuun taajuusmuuttajan liittimissä ja taajuusmuuttajan DC-välipiirin jännitetasoon, kun taajuusmuuttajan kuormitus piste on nimellisessä 5 A:n toimintapisteessä.



Kuva 39: Taajuusmuuttajan tulopuolen jännitteet ja DC-välipiirin jännite kytkentätransientin aikana.

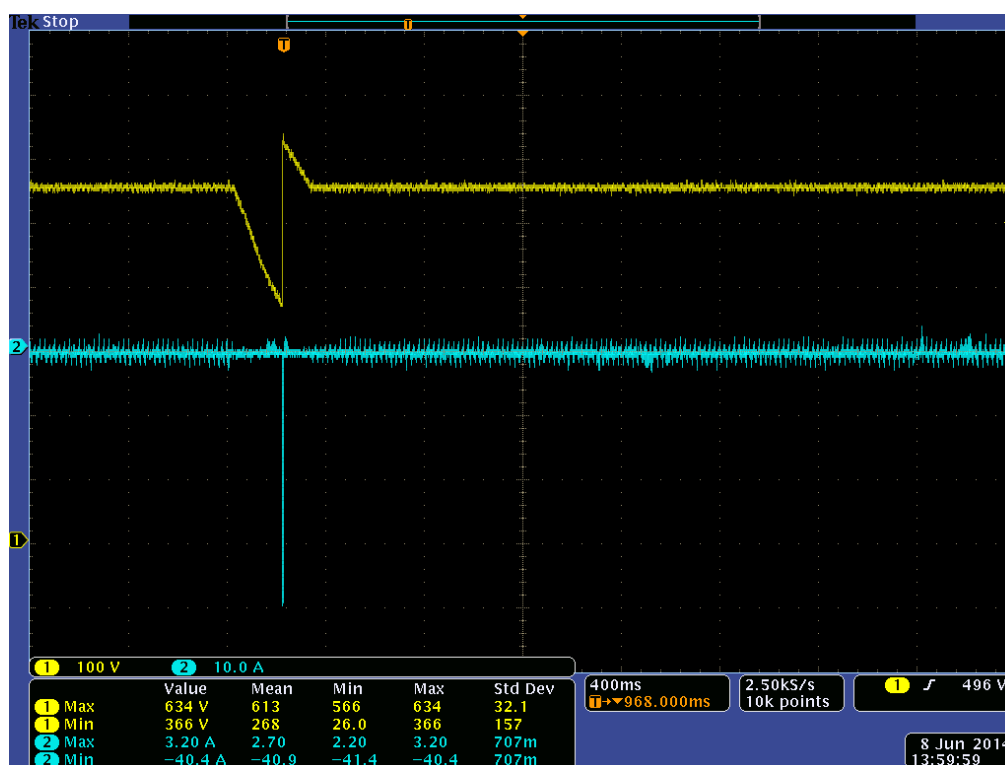
Simulointitulosten perusteella sähköverkon kompensointikondensaattorien aiheuttamat kytkentätransientit eivät aiheuta vaarallisia ylijännitteitä taajuusmuuttajassa. Teoriassa kytkentätransientin aiheuttama jännitteen nousu sähköverkon pääjännitteessä voi olla jopa 2 pu, mutta todellisuudessa sähköverkon impedanssi rajoittaa kytkentätransientin aiheuttamia jännitteiden huippuarvoja ja taajuusmuuttajan sähköverkosta ottamaa latausvirtaa. Kompensointikondensaattorien kytkentätapahutumien haitallisuutta on kuitenkin tutkittava tapauskohtaisesti, mikäli näiden epäillään aiheuttavan vahinkoa sähköverkkoon kytketyissä laitteissa. Suojaavan kuristimen mitoituksen kannalta oleellista olisi tietää tarkasti, millainen taajuusmuuttajan käyttöympäristö todellisuudessa on. Tarkemman käyttöympäristön tiedon perusteella on siten helpompi määritellä suojaavan kuristimen ominaisuudet muun muassa kuristimen saturaatiopisteelle ja sille, mistä materiaalista kuristimen sydän lopulta valmistetaan.

4.3 Jännitekuopat ja jännitteen kohouma

Standardin mukaisen symmetrisen A-tyypin 0,1 pu:n jännitekuopan vaikutukset taajuusmuuttajan toimintaan testattiin työn aikana laboratorioissa. Taajuusmuuttajan jännitelähteenä oli ohjelmoitava jännitelähde, jonka avulla oli mahdollista ohjelmoida hetkellinen symmetrisen jännitekuoppa. Laboratoriotestissä taajuusmuuttaja ohjasi kuormittamatonta sähkömoottoria 2 Hz:n taajuudella. Sähkömoottorin ottama magnetointivirta oli 4,4 A. Sähköverkosta otetun virran mitattu huippuarvo oli 2,5 A.

Taajuusmuuttajan suojaustoiminnot aktivoituvat alijänniterajalla nopeasti. Taajuusmuuttajan välipiirin jännitteen pudotessa alijänniterajalle, välipiirin kondensaattorien latausvastus aktivoituu noin 2 ms:n kuluessa laitteen vikaantuessa DC-välipiirin alijännitevikaan. Välipiirin kondensaattorien latausvastuksen aktivoituessa kondensaattorien verkosta ottamaa latausvirtaa rajoitetaan.

Kuvassa 40 nähdään laboratorioissa mitatun symmetrisen 200 ms:n 0,1 pu:n jännitekuopan vaikutus taajuusmuuttajan välipiirin jännitetasoon ja välipiirin kondensaattorien verkosta ottamaan latausvirtaan.



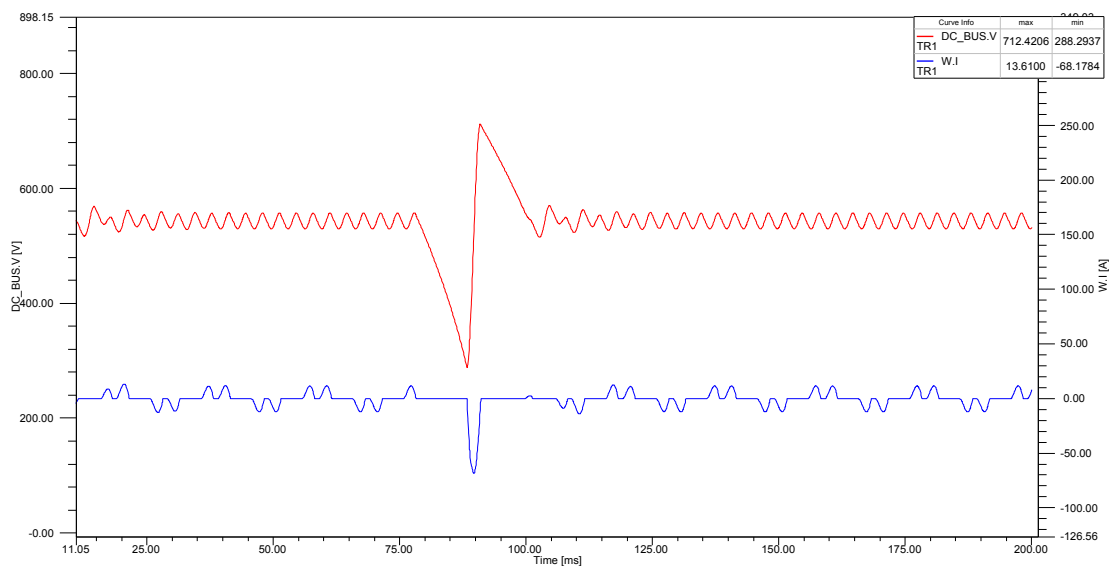
Kuva 40: Välipiirin jännite ja välipiirin kondensaattorien latausvirta A-tyypin 200 ms:n jännitekuopassa 0,1 pu:n arvolla. Välipiirin jännite on kuvattu keltaisella ja välipiirin kondensaattorien verkosta ottama virta sinisellä.

Laboratoriossa testatun jännitekuopan vaikutukset näkyivät syöttöjännitteen palautuessa taajuusmuuttajan välipiirissä DC-jännitteen hetkellisenä nousuna. Testin aikana jännitekuopan ajallinen kesto asetettiin siten, että taajuusmuuttaja ei vikaantunut DC-alijännitevikaan. Välipiirin kondensaattorien latausvastus ei siten aktivoitunut jännitekuopan aikana, jolloin sähköverkosta otettu kondensaattorien latausvirta ei kulkenut latausvastuksen kautta.

Koska taajuusmuuttajan ohjaama moottori ottaa tarvitsemansa tehon taajuusmuuttajan välipiiristä, välipiirin kondensaattorien varaus laskee. Kondensaattorien varaustaso laskee sitä nopeammin, mitä enemmän kuormaa välipiiristä otetaan. Jännitekuopan jälkeen sähköverkon jännite palautuu normaaliin käyttötasoon, jolloin välipiirin kondensaattorit ottavat latausvirran sähköverkosta. Latausvirta on suurempi silloin, kun kondensaattorien varausaste on lähellä nollassa, mutta tässä tapauksessa verkosta otettua latausvirtaa rajoittaa mahdollisesti taajuusmuuttajan latausreleen aktivoima latausvastus.

Seuraavaksi tutkittiin taajuusmuuttajan toimintaa sähköverkossa, jossa sähköverkon impedanssi oli mitoitettu 0,5 %:iin. Normaalitilanteessa sähköverkon kaapelointi muodostaa hyvin merkittävän osan impedanssin resistanssin suuruudesta, joka vaikuttaa vahvasti taajuusmuuttajan tulopuolen jännitehäviön suuruuteen ja välipiirin kondensaattorien sähköverkosta ottamaan latausvirran suuruuteen.

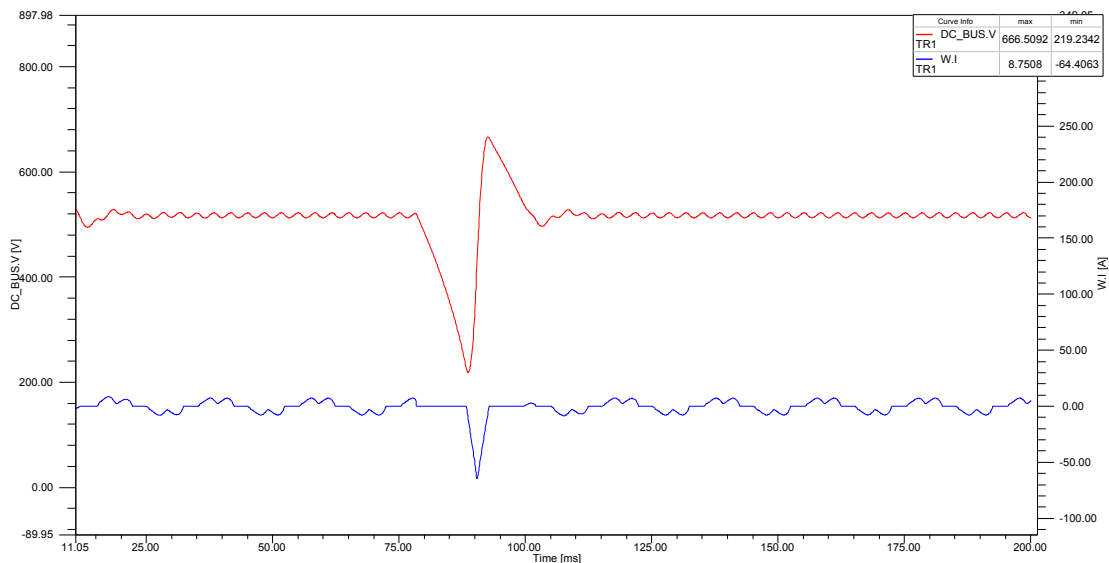
Taajuusmuuttajan välipiirin virta asetettiin nimelliseen 5 A:n kuormituspisteeseen. Kuvassa 41 (ks. seuraava sivu) nähdään simulointituloksia 0,1 pu:n symmetriselle A-tyypin jännitekuopalle. Jännitekuopan aikana välipiirin kondensaattorit ottivat sähköverkosta noin 70 A:n latausvirran. Simulointituloksissa huomattavaa oli, että 0,1 pu:n C- ja D-tyypin jännitekuoppien vaikutukset taajuusmuuttajan välipiirin jännite- ja virtatasoon olivat simulointien perusteella hyvin samankaltaisia kuin symmetrisen A-tyypin jännitekuopan vaikutukset. Jännitekuopan loppuhetkellä DC-välipiirin jännitetaso nousi hetkellisesti normaalia korkeampaan arvoon, mutta tämä ei aiheuttanut merkittäviä rasitteita taajuusmuuttajan käytössä.



Kuva 41: Välipiirin jännite ja välipiirin kondensaattorien verkosta ottama latausvirta A-tyyppin jännitekuopassa 0,1 pu:n arvolla. Välipiirin jännite on kuvattu punaisella ja välipiirin kondensaattorien verkosta ottama latausvirta sinisellä.

3 %:n kuristimella kondensaattorien sähköverkosta ottama latausvirta rajoittui simulointien perusteella noin 64 A:iin. Maksimi välipiirin jännite jännitekuopan aikana kuristinta käytettäessä oli noin 666 V. On kuitenkin mahdollista, että kuristimen käyttö jännitekuoppien aikana voi johtaa herkemmin laitteen vikaantumiseen DC-alijännitevikaan kuristimen aiheuttaman jännitteenaleneman takia. Tässä tapauksessa välipiirin kondensaattorien latausvirtaa rajoittaa alijännitevian aikana kytketty latausvastus.

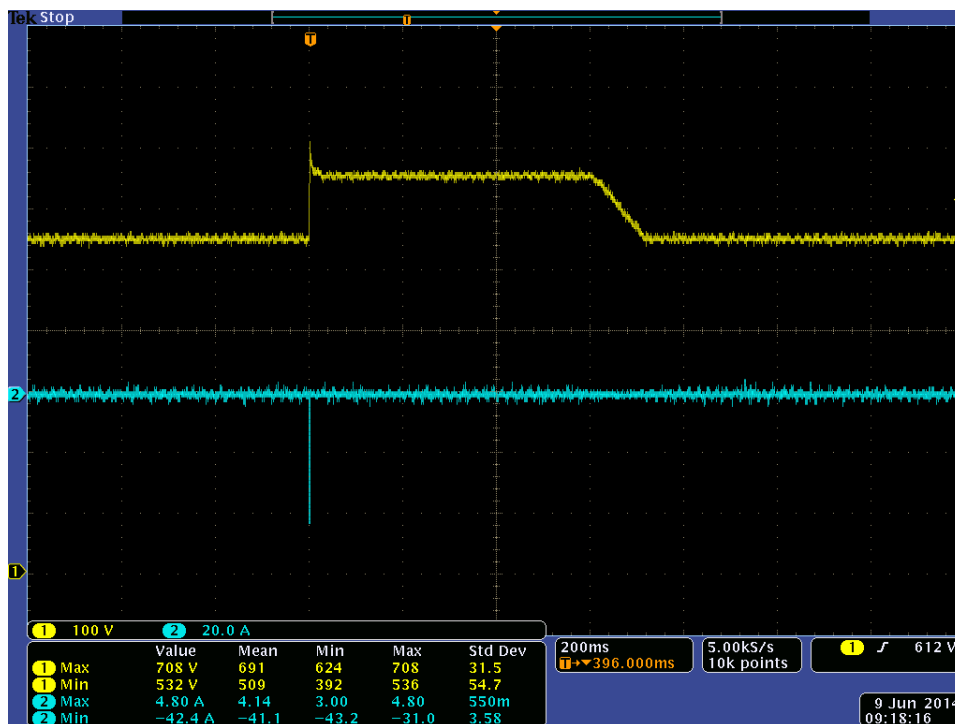
Kuvassa 42 (ks. seuraava sivu) nähdään DC-välipiirin jännite ja sähköverkosta otettu maksimivirta jännitekuopan aikana 3 %:n kuristimella. Jännitekuopat eivät kuitenkaan aiheuttaneet merkittäviä muutoksia taajuusmuuttajan toiminnassa. Ongelmana on aiemmin ollut relemateriaalin kestävyys latausvastuksen ohjauksessa, kun releen koskettimissa on kytkentähetkellä lyhytaikainen valokaari. Tasasuuntaussillan ongelmat ovat tässä tapauksessa johtuneet suuresta välipiirin kondensaattorien ottamasta latausvirrasta, kun kondensaattorien varausaste on laitteen herätyshetkellä ollut nollassa.



Kuva 42: 3 %:n kuristimen vaikutus DC-välipiirin jännitteeseen 0,1 pu:n jännitekuopan aikana.

Laboratoriossa testattiin työn aikana standardin mukaista hetkittäistä symmetristä 1,2 pu:n jännitteen kohoumaa, jossa jännitteen kohouman ajallinen kesto oli 30T. 50 Hz:n sähköverkossa tämä on ajallisesti 600 ms. Laboratoriossa taajuusmuuttaja ohjasi kuormittamatonta moottoria 20 Hz:n taajuudella. Ilman moottoriohjausta jännitteen kohouman aiheuttama DC-välipiirin ylijännite palautui hyvin hitaasti takaisin normaaliin arvoon.

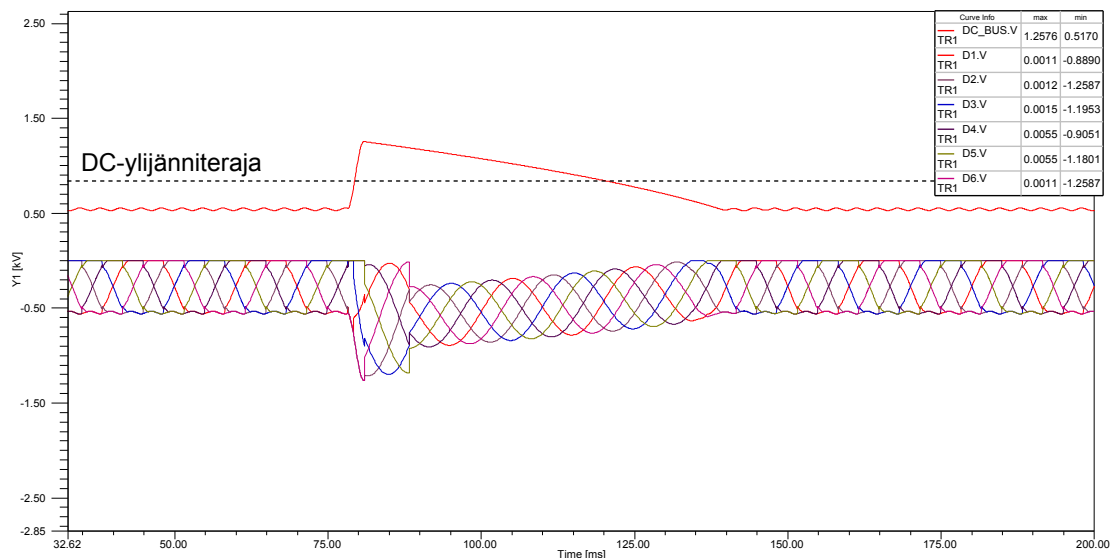
Taajuusmuuttajan ohjatessa moottoria, jännitteen kohouman aiheuttama DC-välipiirin jännitteen nousu nosti hetkellisesti myös taajuusmuuttajan ohjaaman sähkömoottorin pyörimisnopeutta. Laboratoriossa tehdyn kokeen aikana taajuusmuuttaja vikaantui ylivirtavikaan, jolloin taajuusmuuttaja oletusarvoisesti pysäytti moottoriohjauksen. Kuvassa 43 (ks. seuraava sivu) nähdään laboratoriossa testatun symmetrisen jännitteenkohouman vaikutuksia taajuusmuuttajan välipiirin jännitetasoon ja taajuusmuuttajan sähköverkosta ottamaan virtaan.



Kuva 43: Välipiirin jännite ja välipiirin kondensaattorien sähköverkosta ottama latausvirta symmetrisen 1,2 pu:n jännitteen kohouman aikana. Välipiirin jännite on kuvattu keltaisella ja välipiirin kondensaattorien verkosta ottama latausvirta sinisellä.

Koska laboratoriossa ei ollut mahdollista testata standardin mukaista 1,8 pu:n jännitteen kohoumaa, arvioitiin kyseisen jännitteen kohouman vaikutuksia simulointien perusteella. Standardissa IEEE 1159-2009 äkillisen 1,8 pu:n jännitteen kohouman ajallinen kesto on maksimissaan 30T ja minimissään 0,5T. Simuloinneissa testattiin symmetristä kolmivaiheista jännitteen kohoumaa, joka voi syntyä esimerkiksi suurten moottorikuormien kytkeytyessä irti verkosta.

Kuvassa 44 (ks. seuraava sivu) nähdään simuloidun äkillisen symmetrisen 20 ms:n kolmivaiheisen 1,8 pu:n jännitteen kohouman aiheuttama jännitteen nousu DC-välipiirissä ja jänniterasitus tasasuuntaussillan diodeissa, kun taajuusmuuttaja operoi 400 V pienjännitesähköverkossa nimellisellä kuormituksella. Taajuusmuuttaja otti kohouman aikana sähköverkosta taajuusmuuttajan välipiirin kondensaattorien latausvirran, jonka suuruus oli noin 106 A. Suurimman tasasuuntaussillassa kulkevan virran i^2t -arvoksi saatiin kyseisessä tilanteessa 16 A^2s . Korkein estosuuntaisen jännitteen arvo tasasuuntaussillassa oli noin 1,250 kV.



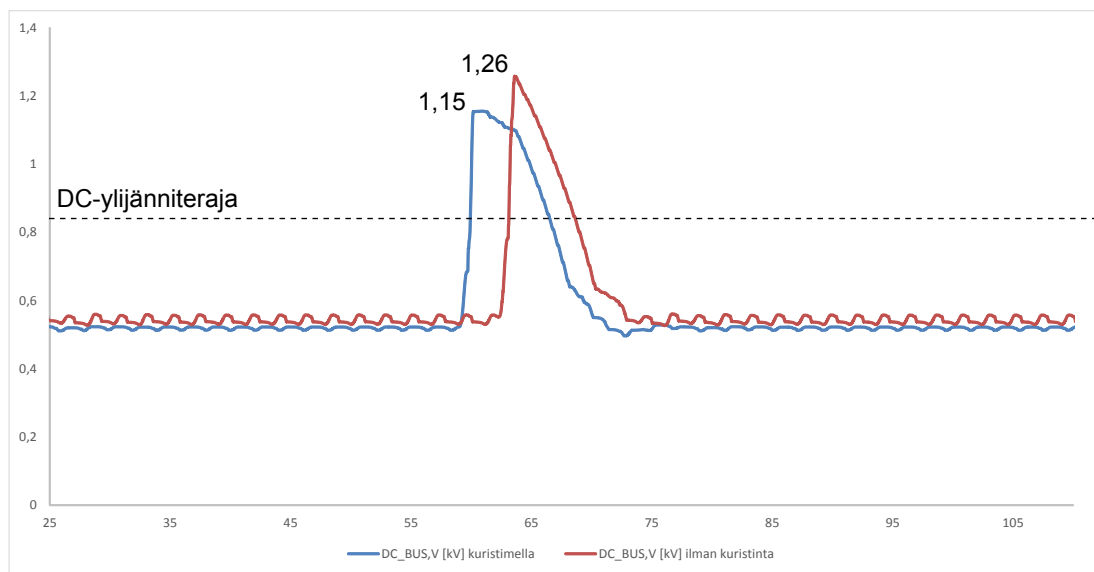
Kuva 44: 1,8 pu:n jännitteen kohouman vaikutus taajuusmuuttajan välipiirin jännitteeseen ja tasasuuntaussillan diodien estosuuntaisiin jännitteisiin.

Jännitteen kohouman aiheuttamat jänniterasitukset ovat luonnollisesti haitallisempia sähköjärjestelmässä, jossa sähköverkon jännitetaso on korkeampi. Muun muassa Yhdysvalloissa pienjänniteverkon pääjännite on 480 V. Siten korkean hetkellisen jännitteen kohouman aiheuttamat jänniterasitukset ovat suurempia. Jännitteen kohoumien aiheuttamat jänniterasitukset näkyvät välipiirin elektrolyyttikondensaattoreissa, joiden transienttiylijännitekestoisuus on noin 440 V.

Tämän työn aikana tehtyjen kyselyjen [88] tuloksena on selvinnyt, että tutkittujen tulosiltaongelmaisten taajuusmuuttajien välipiirin elektrolyyttikondensaattorit ovat olleet pääosin kunnossa. Tämän perusteella voidaan olettaa, että jännitteen kohouman aiheuttamat viat ovat hyvin harvinaisia. Korkeiden jännitteen kohoumien seurauksena taajuusmuuttajan välipiirin elektrolyyttikondensaattorit voivat vahingoittua joko jänniterasituksesta tai ylijännitteen aiheuttamasta kondensaattorien korkeasta vuotovirrasta.

Kuristin rajoittaa taajuusmuuttajan sähköverkosta otetun latausvirran arvoa. Ilman kuristinta virta oli symmetrisen jännitteen kohouman aikana noin 106 A ja kuristimen kanssa 72 A. Välipiirin jännitetaso oli noin 100 V pienempi kuristinta käytettäessä. Simulointituloksista todettiin, että jännitteen kohoumien aikana tasasuuntaussillan datalehden arvoja ei kuitenkaan ylitetty.

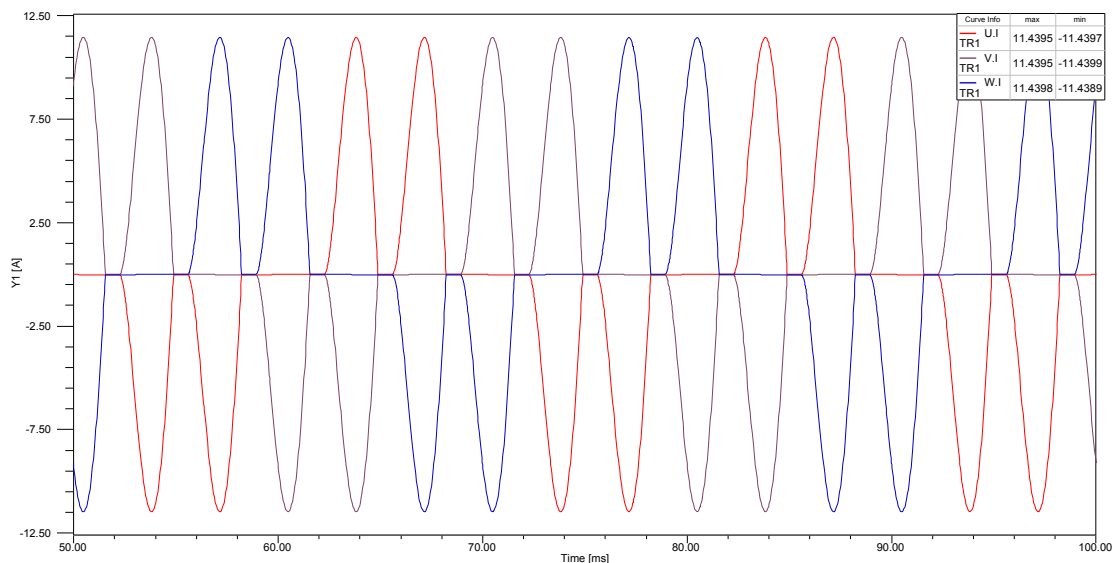
Kuvassa 45 nähdään kuristimen vaikutus taajuusmuuttajan välipiirin jännitteeseen symmetrisen 1,8 pu:n jännitteen kohouman aikana.



Kuva 45: 3 %:n kuristimen vaikutus taajuusmuuttajan välipiirin jännitetasoon symmetrisen 1,8 pu:n jännitteen kohouman aikana.

4.4 Taajuusmuuttajan syöttöpuolen jännite-epäsymmetria

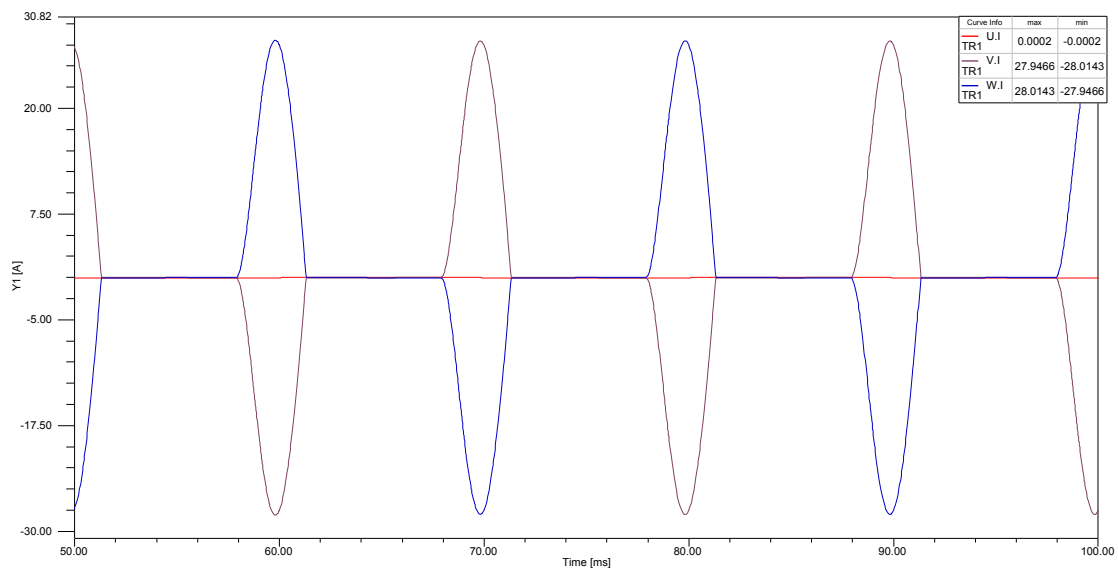
Kolmivaihesyötettyä taajuusmuuttajaa on mahdollista käyttää epäsymmetrisessä sähköverkossa, kun laite ei havaitse tulopuolen jännite-epäsymmetriaa tai epäsymmetriasta aiheutuva vikailmoitus on kytketty pois päältä. Pahin tilanne taajuusmuuttajan tasasuuntaussillan kannalta on silloin, kun tulopuolelta puuttuu kokonaan yksi syöttövaihe. Seuraavalla sivulla kuvassa 46 nähdään taajuusmuuttajan ottamat virrat sähköverkon symmetrisessä tilanteessa, kun sähköverkon impedanssi on 0,5 % ja taajuusmuuttaja toimii nimellisellä kuormalla. Tasasuuntaussillan diodien maksimivirta symmetrisessä käyttötilanteessa on noin 11,4 A.



Kuva 46: Sähköverkosta otettu virta symmetrisessä tilanteessa. Sähköverkon impedanssi 0,5 %, taajuusmuuttajan DC-virta 5 A.

Kuvassa 47 (ks. seuraava sivu) nähdään tasasuuntaussillan diodien sähköverkosta ottamat virrat, kun taajuusmuuttajan syöttöpuolelta puuttuu kokonaan yksi vaihe. Epäsymmetrisessä tilanteessa sähkömoottorin tarvitsema teho otetaan tasasuuntaussillan kautta sähköverkosta epäsymmetrisesti, jonka seurauksena tasasuuntaussillan diodien läpi kulkeva maksimivirta on noin 28 A. Epäsymmetrisessä tilanteessa tasasuuntaussillan diodit rasittuvat huomattavasti enemmän symmetriseen tilanteeseen verrattuna.

Sähköverkon impedanssin ollessa pienempi, diodien sähköverkosta ottama maksimivirta on vastaavasti suurempi. Pahimmillaan taajuusmuuttajan tasasuuntaussillassa kulkevan virran maksimiarvo on suurempi kuin tasasuuntaussillan datalehden antama maksimiarvo diodin myötäsuuntaiselle jatkuva-aikaiselle virralle. Tämän kaltainen pitkäaikainen taajuusmuuttajan käyttö epäsymmetrisessä sähköverkossa lyhentää taajuusmuuttajan tasasuuntaussillan elinikää tasasuuntaussillan virtaepäsymmetrian aiheuttaman termisen rasituksen takia.

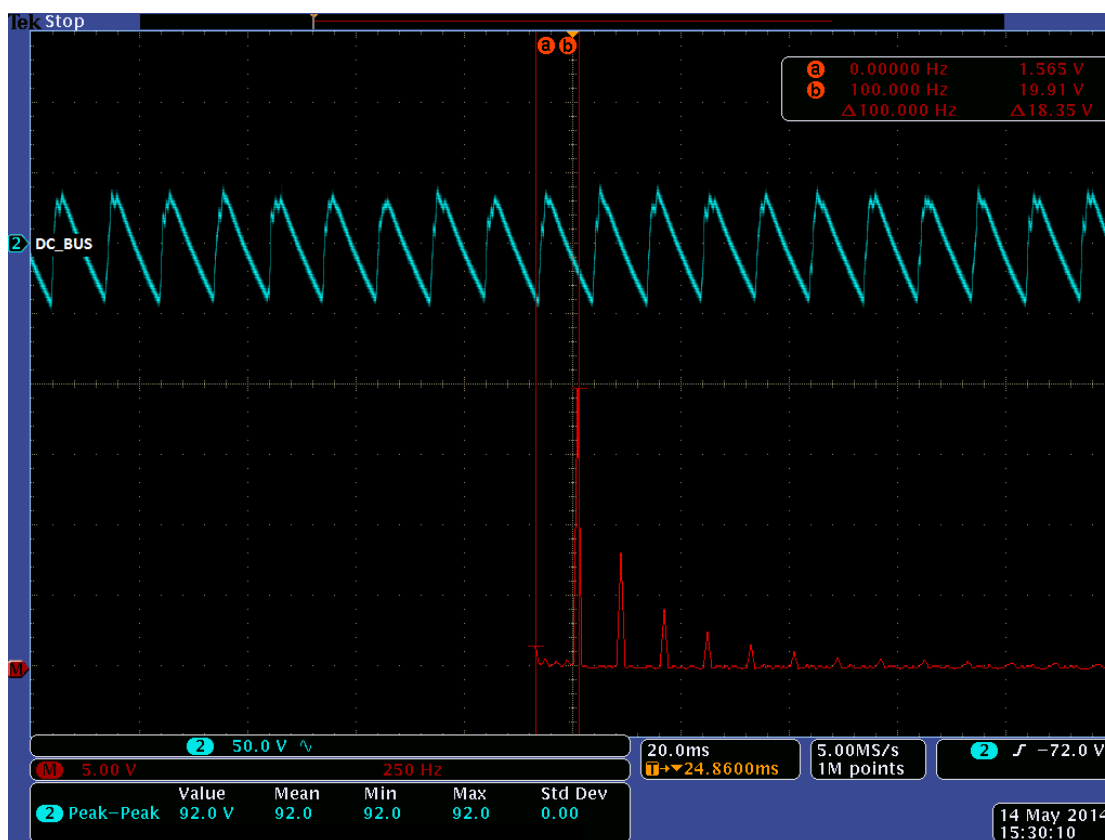


Kuva 47: Sähköverkosta otettu virta epäsymmetrisessä tilanteessa. Sähköverkon impedanssi 0,5 %, taajuusmuuttajan DC-virta 5 A.

Taajuusmuuttajan on mahdollista havaita syöttövaiheen puuttuminen joko DC-välipiirin jännitteen aaltomuodosta tai epäsymmetrian aiheuttamasta välipiirin jännitteen 100 Hz:n komponentista 50 Hz:n verkossa. 60 Hz:n sähköverkossa kyseinen taajuuskomponentti on 120 Hz.

Taajuusmuuttajan toimintaa epäsymmetrisessä sähköverkossa testattiin työn aikana laboratorio-olosuhteissa. Testissä 400 V:n taajuusmuuttajan tulopuolen kolmivaihesyötöstä puuttui yksi vaihe. Laboratoriokokeissa testattavana laitteena käytettiin 2,2 kW:n taajuusmuuttajaa, joka toimi osakuormalla 4 A:n virralla. Kuormakoneella taajuusmuuttajan ohjaaman 3 kW:n moottorin momentti asetettiin 81 %:iin. Moottorin pyörimisnopeus testissä oli 808 rpm. Välipiirin jännite oli pudonnut 513 V:iin kuormituksen ja sähköverkon jännite-epäsymmetrian vaikutuksesta.

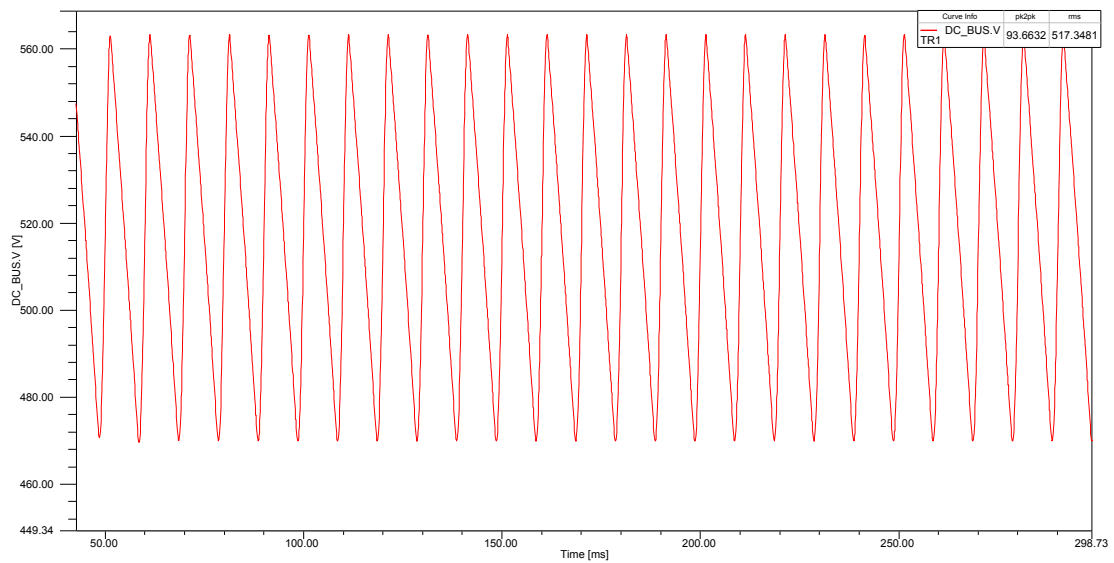
Kuvassa 48 nähdään laboratoriossa testatun taajuusmuuttajan välipiirin jännitteen aaltoisuus ja välipiirin jännitteen taajuusspektri Fourier-analyysillä, kun taajuusmuuttajan syöttöpuolelta puuttui yksi syöttövaihe.



Kuva 48: Laboratoriomittauksissa saadut tulokset. Sinisellä on kuvattu välipiirin jännite ja punaisella Fourier-analyysillä laskettu välipiirin taajuusspektri.

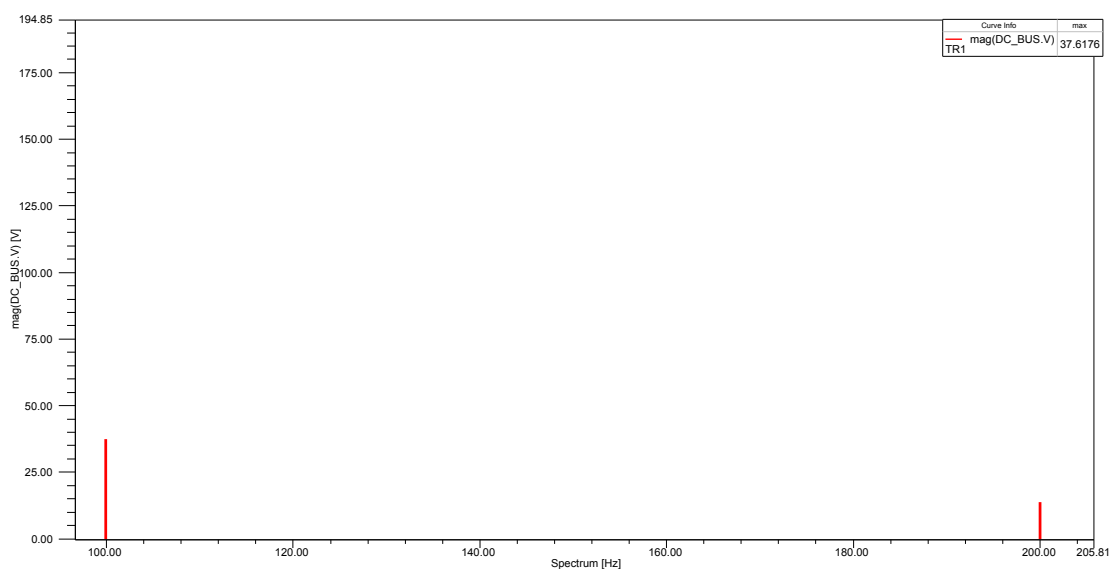
Taajuusmuuttajan välipiirin jännitteen aaltomuotoisuus kasvaa taajuusmuuttajan syöttöpuolen jännite-epäsymmetrian kasvaessa. Jännite-epäsymmetrialla on myös vaikutusta taajuusmuuttajan välipiirin elektrolyyttikondensaattoreihin. Tasasuuntaussillan jännitteen aaltoisuus lisää välipiirin virtarippeliä, jonka seurauksena välipiirin elektrolyyttikondensaattorit lämpenevät ja ikääntyvät nopeammin [90].

Kuvassa 49 on esitetty simuloineista saatu kuva taajuusmuuttajan DC-välipiirin jännitteen muodosta.



Kuva 49: Simuloitu taajuusmuuttajan välipiirin jännitteen aaltoisuus yhden vaiheen puuttuessa.

Kuvassa 50 nähdään Fourier-analyysin avulla simuloitua taajuusmuuttajan välipiirin taajuusspektriä. Epäsymmetrisessä tilanteessa 50 Hz:n sähköverkossa välipiirin jännitteessä esiintyy 100 Hz:n taajuuskomponentti ja sen kerrannaiset.



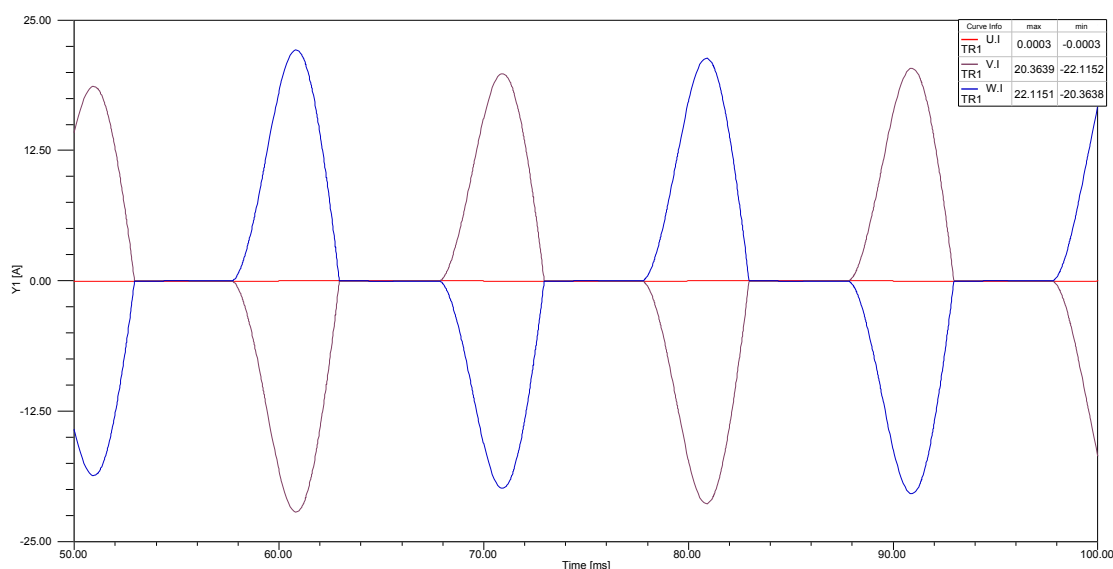
Kuva 50: Välipiirin DC-jännitteen spektri.

Taulukossa 5 on esitetty taajuusmuuttajan syöttöpuolen epäsymmetrian vaikutus tasasuuntaussillan diodien läpi kulkevaan maksimivirtaan, välipiirin jännitetasoon ja välipiirin jännitteestä laskettuun taajuusspektriin. Sähköverkon jännite-epäsymmetrian kasvaessa taajuusmuuttajan DC-välipiirin jännitteen 100 Hz:n komponentin suuruus kasvaa. Taulukossa maksimivirta on tasasuuntaussillan diodin läpi kulkeva maksimivirta ja UDC pk-pk kuvaa välipiirin tasajännitteen huipusta huippuun -arvoa.

Taulukko 5: L1-syöttövaihe epäsymmetrinen, L2- ja L3 -syöttövaiheet normaalit. Sähköverkon impedanssi 0,5 %. Taajuusmuuttajan DC-virta 5 A.

Jännite U (pu)	Maks. virta (A)	100 Hz:n komponentti (V)	UDC pk-pk (V)
0,75	21,92	48,31	112,39
0,5	28,41	59,69	151,48
0,25	28,58	59,77	151,65
0	28,59	59,78	151,66

Seuraavaksi arvioitiin tässä työssä mitoitettua taajuusmuuttajaa suojaavan kuristimen suojausvaikutuksia taajuusmuuttajan toimiessa epäsymmetrisessä sähköverkossa. Kuristimen avulla jännite-epäsymmetriasta aiheutuvaa virtarasisitusta oli mahdollista pienentää noin 25 %. Kuristinta käytettäessä maksimivirta tasasuuntaussillassa epäsymmetrian aikana oli nyt noin 21,54 A. Välipiirin DC-jännitteen huipusta huippuun -arvo oli noin 136 V ja 100 Hz:n taajuuskomponentin huippuarvo 57,87 V. Kuvassa 51 nähdään tasasuuntaussillan diodien virrat taajuusmuuttajan toimiessa nimellisellä kuormalla kahdella syöttövaiheella.



Kuva 51: Tasasuuntaussillan diodien virrat 3 %:n kuristinta käytettäessä.

3 %:n kuristimen avulla oli mahdollista pienentää selvästi sähköverkon jännite-epäsymmetriasta aiheutuvan virtaepäsymmetrian aiheuttamaa rasi- tusta tasasuun- taussillassa. Tasasuuntaussillan diodien virtojen suuruudet olivat kuitenkin noin kaksinkertaiset symmetriseen käyttötilanteeseen verrattuna. Tästä johtuen tässä työssä käytettävän kuristimen suojausvaikutukset olivat rajalliset. Vaikka kuristin osittain suojaa taajuusmuuttajan tasasuuntaussiltaa virta-epäsymmetrialta, on kui- tenkin muistettava taajuusmuuttajan syöttöpuolen impedanssin vaikutus taajuus- muuttajan virta-epäsymmetriaan. Mikäli taajuusmuuttajaa syöttävän sähköverkon impedanssi on 3 %, suurin tasasuuntaussillassa kulkeva virta yhden syöttövaiheen puuttuessa on noin 21 A. Kyseisessä tilanteessa olisi syytä tietää tarkemmin, kuinka kauan epäsymmetriset käyttötilanteet jatkuvat sähköverkon puolella. Siten taajuus- muuttajaa suojaavan kuristimen käyttöönottoa olisi mahdollista arvioida paremmin.

5 Yhteenveto

Sähköverkon tietyt häiriötilanteet voivat olla haitallisia sähköverkkoon kytketyille elektronisille laitteille. Varsinkin teollisuudessa toimivat taajuusmuuttajat reagoivat herkästi erilaisiin sähköverkon käyttöjännitteiden muutoksiin. Pahimmassa tapauksessa sähköverkon häiriöt, kuten ylijännitteet aiheuttavat pysyviä vahinkoja taajuusmuuttajakäyttöihin.

Sähköverkossa ilmeneviä ylijännitteitä aiheuttavat salamaniskut, muuntajien sekä muiden induktiivisten kuormien päällekytkennät ja etenkin sähköverkossa käytettävien kompensointikondensaattorien kytkentätapahtumat. Sähköverkkoon kytkettyjen kuormien päällekytkennät voivat aiheuttaa sähköverkossa hetkellisiä jännitekuoppia. Sähköverkossa tapahtuvien häiriöiden ja kuormien sähköverkosta tehdyt irtikytkennät tai sähköverkon yksivaiheinen maasulku voivat puolestaan aiheuttaa hetkellisiä jännitteen kohoumia. Jännitekuopissa jännitteen taso laskee hetkellisesti ja palautuu nopeasti normaaliin arvoon, kun vastakohtaisesti jännitteen kohoumissa jännitteen huippuarvo nousee hetkellisesti normaalia korkeammaksi. Muun muassa standardissa IEEE Std 1159-2009 on esitetty jännitekuopille ja jännitteen kohoumilta tyypillisiä raja-arvoja. Epäsymmetrisessä sähköjärjestelmässä sähköverkon jännitetasot poikkeavat toisistaan. Pahimmillaan yhden syöttövaiheen jännite voi olla lähellä nolla-arvoa. Etenkin yhden syöttövaiheen sulakkeen palaessa, taajuusmuuttaja operoi kahdella syöttövaiheella.

Sähköverkossa toimivien laitteiden ylijännitesuojauksessa voidaan käyttää muun muassa venttiilisuoja, varistoreja tai vaihtoehtoisesti AC-puolen tulokuristinta. Pienitehoisten taajuusmuuttajien jännitevälipiirin kondensaattorit reagoivat herkästi taajuusmuuttajan tulopuolen jännitteen vaihteluihin, joten varsinkin jännitekuopissa ja jännitteen kohoumissa välipiirin kondensaattorien sähköverkosta ottamaa latausvirtaa ja sähköverkon ylijännitteitä voidaan rajoittaa tulopuolen kuristimen avulla.

Tämän työn tarkoituksena oli selvittää, voivatko työssä tutkittavat sähköverkon häiriöt aiheuttaa vahinkoa taajuusmuuttajan tasasuuntaussillassa. Työssä tutkittiin myös, kuinka taajuusmuuttajaa suojaavan kolmivaiheisen AC-kuristimen ominaisuudet vaikuttavat taajuusmuuttajan suojaukseen sähköverkon häiriöitä vastaan. Työssä rakennettiin simulointimalli pienitehoiselle taajuusmuuttajalle ja tutkittiin erilaisten simulointimallien avulla sähköverkon häiriöiden vaikutuksia pienitehoiseen taajuusmuuttajaan. Simulointimallien tukena olivat työssä tehdyt laboratoriomitaukset. Työssä mitoitettiin taajuusmuuttajaa suojaava kolmivaiheinen 3 %:n rautasydäminen satureoituva AC-kuristin tietyille sähköverkon impedanssille, minkä jälkeen arvioitiin kuristimen suojausvaikutuksia sähköverkon häiriötilanteissa.

Transienttiylijännitteitä testattiin laboratoriossa transienttigeneraattorilla, jossa 2 kV:n transienttiylijännite syötettiin taajuusmuuttajan tulopuolelle. Laboratoriossa tehtyjen mittaustulosten perusteella arvioitiin työssä käytettävän simulointimal-

lin tarkkuutta. Simulointimallissa syötettiin taajuusmuuttajan liittimiin suurimmat standardien mukaiset transienttilylijännitteet ympäristökategoria B:n mukaisesti. Simulointituloksista selvisi, että 4 kV:n ja 6 kV:n transienttilylijännitteet eivät aiheuttaneet ongelmia taajuusmuuttajassa, eikä taajuusmuuttajan tasasuuntaussillan datalehden maksimiarvoja ylitetty. Ainoastaan B-ympäristökategoriaan kuulumattomalla 8 kV:n transienttilylijännitteellä taajuusmuuttajan tasasuuntaussillan diodien suurin estosuuntainen jännite ylitettiin.

Jännitekuoppia ja jännitteen kohoumia oli mahdollista testata laboratoriossa ohjelmoitavalla jännitelähteellä. Jännitelähteellä tutkittiin varsinkin symmetrisen jännitekuopan aiheuttamia rasitteita taajuusmuuttajassa. Jännitekuopan lopussa jännitteen palautuessa normaaliin tasoon, taajuusmuuttajan välipiirin kondensaattorit ottivat sähköverkosta latausvirran. Samalla välipiirin jännite nousi hetkellisesti normaalia käyttöarvoa korkeammaksi. Jännitteen kohoumaa oli mahdollista testata laboratoriossa rajoitetusti. Tyypillinen suuruus jännitteen kohoumalle on noin 1,2 pu, joka ei laboratoriossa aiheuttanut haitallisia muutoksia taajuusmuuttajassa. Myöskään symmetrisen 1,8 pu:n jännitteen kohouman aiheuttama ylijännite ei aiheuttanut merkittäviä muutoksia tasasuuntaussillassa. Simulointien ja laboratoriomittausten tulosten perusteella todettiin, että välipiirin kondensaattorien latausvirta ei yltänyt haitalliselle tasolle jännitekuopissa ja jännitteen kohoumissa. Tasasuuntaussillan datalehden maksimiarvoja ei ylitetty simulointien perusteella. Sähköverkon häiriötilanteissa taajuusmuuttajan sähköverkosta ottamaa latausvirtaa rajoittaa sähköverkon impedanssi, joka tässä työssä mitoitettiin 0,5 %:iin. Suuremmalla impedanssin arvolla sähköverkosta otettujen virtojen ja sähköverkon ylijännitteiden arvot ovat myös pienempiä taajuusmuuttajan liittimissä.

Myöskään kompensointikondensaattorien aiheuttamat kytkentätransientit eivät simulointien perusteella selitä taajuusmuuttajien tulosiltojen hajoamisia. Työn aikana tutkittiin pienjänniteverkkoon kytketyn 13,5 kVAr:n kompensointikondensaattorin aiheuttamia kytkentätransientteja työssä rakennetun simulointimallin avulla. Simulointituloksista todettiin, että kompensointikondensaattorien kytkeytyessä päälle, taajuusmuuttajan välipiirin jännite nousee hetkellisesti normaalia korkeammaksi. Kytkentätransientit voivat aiheuttaa DC-välipiirin nousun ylijänniterajalle, jolloin taajuusmuuttaja vikaantuu ylijännitevikaan. Suojaavan kuristimen avulla voidaan kuitenkin välttää turhia taajuusmuuttajan DC-ylijännitteeseen perustuvia vikalaukaisuja. Simulointitulosten perusteella tasasuuntaussillan maksimiarvoja ei ylitetty kompensointikondensaattorien kytkentätapahtumien aikana.

Taajuusmuuttajan toiminta epäsymmetrisessä sähköverkossa tarkoittaa sitä, että taajuusmuuttajan syöttövaiheiden jännitteet ovat epäsymmetriset. Taajuusmuuttajakäytössä sähköverkon jännite-epäsymmetria saa olla korkeintaan $\pm 3\%$ pääjännitteessä. Työn aikana laboratoriossa tutkittiin tapausta, jossa yksi syöttövaihe puuttuu. Taajuusmuuttaja ohjasi sähkömoottoria jännite-epäsymmetriasta huolimatta, eikä tietyllä sähkömoottorin kuormitustasolla taajuusmuuttaja huomannut yhden syöttövaiheen puuttumista. Tämän kaltainen tilanne aiheuttaa taajuusmuuttajan

tasasuuntaussillassa virtaepäsymmetrian, jonka seurauksena sähköverkosta otettu teho jakautuu epäsymmetrisesti tasasuuntaussillan johtavissa diodeissa. Simulointitulosten perusteella nähtiin, että epäsymmetrisessä tilanteessa tasasuuntaussillan johtavien diodien läpi voi kulkea diodien myötäsuuntaisen virran maksimiarvoa suurempi virta.

Suojaavan kuristimen ominaisuudet tulivat hyvin esille eri tyyppisten sähköverkon häiriöiden aikana. Varsinkin salaman aiheuttamien transienttiylijännitteiden ja virtapiikkien huippuarvot vaimenivat tehokkaasti, vaikka suojaavan kuristimen saturaatiopiste oli alhainen transienttiylijännitteen aiheuttamiin virtapiikkeihin nähden. Kytkenätransienttien, jännitekuoppien ja jännitteen kohoumien tapauksessa suojaava kuristin rajoitti lähinnä jännitteen nousua taajuusmuuttajan välipiirissä. Verkosta otettuun virtaan kuristimen suojausvaikutukset olivat rajalliset. Kuristin rajoitti impedanssillaan johtavien diodien maksimivirtoja taajuusmuuttajan toimiessa epäsymmetrisessä sähköverkossa.

Tämän työn aikana taajuusmuuttajan toimintaa epäsymmetrisessä tilanteessa ei ollut mahdollista testata pidemmällä aikavälillä. Tässä työssä tehtyjen mittausten perusteella suositellaan jatkossa taajuusmuuttajan pitkäaikaista kestotestausta epäsymmetrisessä käyttötilanteessa, jossa taajuusmuuttaja ohjaa sähkömoottoria osakuormalla yhden syöttövaiheen puuttuessa. Ennen mittauksia olisi syytä mitata symmetrisessä tilanteessa taajuusmuuttajan tulopuolen virran RMS-arvo, jotta voidaan arvioida syöttävän sähköverkon impedanssin suuruus. Tämän jälkeen simulointien perusteella voidaan arvioida paremmin tasasuuntaussillassa kulkevien maksimivirtojen suuruudet.

Mikäli korkeiden transienttiylijännitteiden epäillään olleen syynä taajuusmuuttajan tasasuuntaussiltavikoihin, tehokas suoja ylijännitteiltä suojautumiseen on 3 %:n kolmivaiheinen AC-kuristin. Työn aikana tehtyjen kuristimen kustannuksiin liittyvien kyselyjen [89] perusteella suojaava kuristin voitaisiin suunnitella siten, että käämitysten materiaali olisi kuparin sijasta alumiinia. Kuristimen saturaatiotasoon vaikuttaa muun muassa sydänmateriaali ja sydänmateriaalin pinta-ala. Kuristimen saturaatiopistettä tulisi tutkia tarkemmin, mikäli halutaan vähentää kuristimen kokoa ja siitä aiheutuvia kustannuksia. Kuristimen saturaatiopiste voidaan mitoittaa myös alemmalle tasolle, sillä tämän työn tehtyjen simulointien perusteella alhainen saturaatiopiste riitti suojaamaan taajuusmuuttajaa tehokkaasti nopeilta jännitteen nousuilta ja virtapiikeiltä.

Viitteet

- [1] Alanen, R. ja Hätönen, H. 2006. Sähkönlaadun ja jakelun luotettavuuden hallinta. Verkkodokumentti. Päivitetty 5/2006. Viitattu 15.1.2014. Saatavissa: <http://www.vtt.fi/inf/pdf/workingpapers/2006/W52.pdf>
- [2] Kushare, B. E., Ghatol, A. A. & Date, T. N. 2007. Power Quality Survey of 33 kV Indian Industrial Supply System: Results and Remedial Actions. *Power Engineering Conference, 2007.IPEC 2007. International*, Verkkolehti, s. 320. Viitattu 15.1.2014.
- [3] Sermon, R. C. 2005. An Overview of Power Quality Standards and Guidelines from the End-User's Point-of-View. *Rural Electric Power Conference*, verkkolehti, s. B1/1. Viitattu 15.1.2014. DOI: 10.1109/REPCON.2005.1436304.
- [4] Elovaara, J. ja Haarla, L. Sähköverkot 1: Järjestelmätekniikka ja sähköverkon laskenta. Helsinki, Otatieto, 2011.
- [5] Kusko, A. ja Thompson, M. T. Power Quality in Electrical Systems. New York, McGraw-Hill Companies, 2007.
- [6] Ferreira, F. J. T. E., de Almeida, A.T. & Ge Baoming. 2010. Impact of Voltage Sags and Continuous Unbalance on Variable-Speed Drives. *Electrical Machines (ICEM), 2010 XIX International Conference*, verkkolehti, s. 1. Viitattu 20.1.2014. DOI: 10.1109/ICELMACH.2010.5607961.
- [7] Thumann, A., Niehus, T. & Younger, W.J. Handbook of Energy Audits. 9. painos. Lilburn, Fairmont Press Inc. 2013.
- [8] Mohan, N. First Course on Power Systems. Minneapolis, Mnpere. 2006.
- [9] Barnes, M. Practical Variable Speed Drives and Power Electronics. Oxford, Newnes, 2003.
- [10] Kaplan, S. M. Wiley Electrical and Electronics Engineering Dictionary. Hoboken, Wiley - IEEE Press, 2004.
- [11] Kyyrä, J. Suuntaajatekniikka. Luentomoniste S-81.3110, 320 s. 2013.
- [12] Patrick, D. R. & Fardo, S. W. Electricity and Electronics Fundamentals. 2. painos, Lilburn, Fairmont Press, Inc. 2008.
- [13] Lee, K., Jahns, T. M., Lipo, T. A., Venkataramanan, G. & Berkopec, W. E. 2008. Impact of Input Voltage Sag and Unbalance on DC-Link Inductor and Capacitor Stress in Adjustable-Speed Drives. *IEEE Transactions on Industry Applications*, verkkolehti, vol. 44, nro 6, s. 1825–1833. Viitattu 27.1.2014. Lehti ilmestyy myös painettuna. DOI: 10.1109/TIA.2008.2006308.
- [14] Takacs, G. Electrical Submersible Pumps Manual - Design, Operations, and Maintenance. Burlington, Elsevier, 2009.

- [15] Hobbs, P. C. D. *Building Electro-Optical Systems - Making It All Work*. 2. painos. New York, John Wiley & Sons, 2009.
- [16] Baghini, A. *Handbook of Power Quality*. New York, John Wiley & Sons, 2008.
- [17] Vrankovic, Z., Lixiang Wei, Winterhalter, C. & Bok Young Hong 2009. The Influence of the DC-Link Inductor Design on the Rectifier Voltage Stress in an Adjustable Speed Drive During a Mains Voltage Surge.”*Energy Conversion Congress and Exposition*, verkkolehti, s. 3653–3659. Viitattu 28.1.2014. Lehti ilmestyy myös painettuna. DOI: 10.1109/ECCE.2009.5316165.
- [18] Phipps, C. A. *Variable Speed Drive Fundamentals*. 3. painos. Lilburn, Fairmont Press Inc, 1999.
- [19] Pedra, J., Córcoles, F. & Suelves, F. J. 2005. Effects of Balanced and Unbalanced Voltage Sags on VSI-Fed Adjustable-Speed drives. *IEEE Transactions on Power Delivery*, verkkolehti, vol. 20, nro 1, s. 224–233. Viitattu 28.1.2014. Lehti ilmestyy myös painettuna. DOI: 10.1109/TPWRD.2004.837832.
- [20] Bartelt, T. *Industrial Control Electronics: Devices, Systems & Applications*. 3. painos. Stamford, Cengage Learning, 2005.
- [21] Goldberg, L. H. & Middleton, W. *Green Electronics/Green Bottom Line - Environmentally Responsible Engineering*, Amsterdam, Elsevier, 2000.
- [22] Agrawal, K. C. *Industrial Power Engineering Handbook*, Amsterdam, Elsevier, 2001.
- [23] Lai, L. L. *Power System Restructuring and Deregulation - Trading, Performance and Information Technology*. New York, John Wiley & Sons, 2001.
- [24] Knight, U. G. *Power Systems in Emergencies - From Contingency Planning to Crisis Management*. New York, John Wiley & Sons, 2001.
- [25] Elovaara, J., Haarla, L. *Sähköverkot 2: Verkon suunnittelu, järjestelmät ja laitteet*. Helsinki, Otatieto, 2011.
- [26] Chowdhury, S., Chowdhury, S.P. & Crossley, P. *Microgrids and Active Distribution Networks*, Lontoo, Institution of Engineering and Technology, 2009.
- [27] Dugan, R. C., McGranaghan, M. F., Santoso, S., Beaty, H. W. *Electrical Power Systems Quality*. 2. painos. New York, McGraw-Hill Companies, 2002.
- [28] McGranaghan, M. F., Grebe, T. E., Hensley, G., Singh, T. & Samotyj, M. Impact of Utility Switched Capacitors on Customer Systems. II. Adjustable-Speed Drive Concerns, *IEEE Transactions on Power Delivery*, verkkolehti, vol. 6, nro 4, s. 1623–1628. Viitattu 28.1.2014. DOI: 10.1109/61.97701.

- [29] Grebe, T. E. 1996. Application of Distribution System Capacitor Banks and Their Impact on Power Quality. *IEEE Transactions on Industry Applications*, verkkolehti, vol. 32, nro 3, s. 714–719. Viitattu 3.2.2014. Lehti ilmestyy myös painettuna. DOI: 10.1109/28.502186.
- [30] Blooming, T.M., Carnovale, D.J. Capacitor Application Issues. *IEEE Transactions on Industry Applications*, verkkolehti, vol. 44, nro 4, s. 1013–1026. Viitattu 18.6.2014. DOI: 10.1109/TIA.2008.926301.
- [31] Samaras, K., Sandberg, C., Saimas, C. J. & Kouloxouzis, A. 2005. Electrical Surge Protection Devices for Industrial Facilities - A Tutorial Review. *Petroleum and Chemical Industry Conference. Industry Applications Society 52nd Annual*, verkkolehti, s. 165–175. Viitattu 4.2.2014. DOI: 10.1109/PCICON.2005.1524552.
- [32] Hofmann, W., Schlabbach, J., Just, W. Reactive Power Compensation: A Practical Guide. 1. painos. New York, John Wiley & Sons, 2012.
- [33] Wildi, T. Electrical Machines, Drives and Power Systems. 6. painos. New Jersey, Prentice Hall, 2005.
- [34] Van, d. S. Transients in Power Systems. New York, John Wiley & Sons, 2001.
- [35] Hashmi, M., Lehtonen, M., Hänninen, S. Modelling and Analysis of Switching Overvoltages Caused by Short Circuits in MV Cables Connected with Overhead Lines. Verkkodokumentti. Päivitetty 2011. Viitattu 5.2.2014. Saatavissa http://www.vtt.fi/inf/julkaisut/muut/2011/24_ISSN_1392-1215.pdf
- [36] Bollen, M. H. J. & Yu-Hua Gu, I. Signal Processing of Power Quality Disturbances. Hoboken, Wiley - IEEE Press, 2006.
- [37] Shareef, H., Mohamed, A., Khalid, S. N. & Mustafa, M. W. 2011. Impact of System Parameters on the Penetration of Lightning Surges into Low Voltage Systems. *International Conference on Electrical, Control and Computer Engineering (INECCE)*, verkkolehti, s. 361–366. Viitattu 6.2.2014. Lehti ilmestyy myös painettuna. DOI: 10.1109/INECCE.2011.5953907.
- [38] Zou, G., Gao, H., Su, W. & Wang, D. Identification of Lightning Stroke and Fault in the Travelling Wave Protection, *Journal of Electromagnetic Analysis and Applications*, verkkolehti, vol. 1, nro 1, s. 31–35. Viitattu 7.2.2014. DOI: 10.4236/jemaa.2009.11006.
- [39] Shareef, H., Khalid, S. N., Mustafa, M. W. & Mohamed, A. 2008. Modeling and Simulation of Overvoltage Surges in Low Voltage Systems. *Power and Energy Conference, 2008. PECon 2008. IEEE 2nd International*, verkkolehti, s. 357–361. Viitattu 10.2.2014. DOI: 10.1109/PECON.2008.4762497.

- [40] Christian, H. J., et al. Global Frequency and Distribution of Lightning as Observed from Space by the Optical Transient Detector. *Journal of Geophysical Research*, verkkolehti, vol. 108, julkaisu D1, s. ACL 4-1–ACL 4-15. Viitattu 11.2.2014. DOI:10.1029/2002JD002347.
- [41] Lee, K. Power Quality Analysis and New Harmonic and Unbalance Control of Modern Adjustable Speed Drives Or Uninterruptible Power Systems Under Nonideal Operating Conditions. Doctoral Dissertation, University of Wisconsin-Madison, Madison, Wisconsin, 2008.
- [42] Bhatia, C. M., Malhotra, S. & Soni, M. K. Knowledge Based Protection Circuits for Converter and Inverter Applications. *Indian International Conference on Power Electronics (IICPE), 2010*, verkkolehti, s. 1–5. Viitattu 13.2.2014. DOI: 10.1109/IICPE.2011.5728070.
- [43] Elovaara, J., Laiho, Y. Sähkölaitostekniikan perusteet. 5. painos. Helsinki, Otatieto, 2005.
- [44] Schlabbach, J., Blume, D. & Stephanblome, T. Voltage Quality in Electrical Power Systems, Lontoo, Institution of Engineering and Technology, 2000.
- [45] Murthy, P. S. R. Power System Analysis, Hyderabad, Global Media, 2007.
- [46] Kularatna, N. Electric Circuits, Hyderabad, Global Media, 2010.
- [47] Laughton, M. A. & Warne, D. F. Electrical Engineer's Reference Book. 16. painos. Amsterdam, Elsevier, 2003.
- [48] Goswami, A. K., Gupta, C. P. & Singh, G. K. Assessment of Financial Losses due to Voltage Sags in an Indian Distribution System. *IEEE Region 10 and the Third international Conference on Industrial and Information Systems, 2008. ICIIS 2008*, verkkolehti, s. 1–6. Viitattu 14.2.2014. DOI: 10.1109/ICIINFS.2008.4798350.
- [49] David, A., Lajoie-Mazenc, E. & Sol, C. Ride-through Capability of AC Adjustable Speed Drives in Regards to Voltage Dips on the Distribution Network. *Fifth European Conference on Power Electronics and Applications, 1993*, verkkolehti, nro 6, s. 139–144. Viitattu 17.2.2014.
- [50] Warne, D. F. Newnes Electrical Power Engineer's Handbook. 2. painos. Amsterdam, Elsevier, 2005.
- [51] Drury, B. Control Techniques Drives and Controls Handbook, Lontoo, Institution of Engineering and Technology, 2001.
- [52] Sharma, V. K., Murthy, S. S. & Singh, B. Analysis of Switched Reluctance Motor Drive Under Fault Conditions. *The 1998 IEEE Industry Applications Conference. Thirty-Third IAS Annual Meeting*, verkkolehti, vol. 1, s. 553–562. Viitattu 17.2.2014. DOI: 10.1109/IAS.1998.732372.

- [53] Patrick, D. R., Fardo, S. W., Richardson, R. E. & Patrick, S. R. Energy Conservation Guidebook. 2. painos. Lilburn, Fairmont Press, Inc., 2007.
- [54] Cooray, V. Lightning Protection. Lontoo, Institution of Engineering and Technology, 2010.
- [55] SIOV Metal Oxide Varistors. Verkkodokumentti. Viitattu 19.2.2014. Saatavissa: [https://te-epc-lpc.web.cern.ch/te-epc-lpc/components/datasheets/te-epc-lpc%20\(converters\)/Varistor%20\(SIEMENS\).PDF](https://te-epc-lpc.web.cern.ch/te-epc-lpc/components/datasheets/te-epc-lpc%20(converters)/Varistor%20(SIEMENS).PDF)
- [56] Thumann, A. & Franz, H. Efficient Electrical Systems Design Handbook, Lilburn, Fairmont Press, Inc., 2009.
- [57] Obreja, V. V. N. Transient Surge Voltage Suppressors and Their Performance in Circuit Over-Voltage Protection. *International Semiconductor Conference, 2008. CAS 2008*, verkkolehti, nro 2, s. 321–324. Viitattu 20.2.2014. DOI: 10.1109/SMICND.2008.4703414.
- [58] Timonen, S. Taajuusmuuttajan suojaaminen sähköverkon ylijännitteiltä. Diplomityö, Teknillinen korkeakoulu; Elektroniikan, tietoliikenteen ja automaation tiedekunta (ETA), Espoo, 2008.
- [59] Bäckström, P. Design of Overvoltage and Earth-Fault Protections for a Frequency Converter, Aalto-yliopisto, sähkötekniikan laitos, Espoo, 2012.
- [60] Aro, M., Elovaara, J., Karttunen, M., Nousiainen, K., Palva, V. Suurjänniteteekniikka. 3. painos. Helsinki, Otatieto, 2003.
- [61] Kuffel, E., Zaengl, W. S. & Kuffel, J. High Voltage Engineering Fundamentals. 2. Painos. Amsterdam, Elsevier, 2000.
- [62] Heathcote, M. J. J and P Transformer Book - A Practical Technology of the Power Transformer. 13. painos. Amsterdam, Elsevier, 2007.
- [63] Baksi, V. U., Bakshi, U. A. Basics Of Electrical Engineering. Pune, Technical Publications, 2008.
- [64] Sarma, M. S. Introduction to Electrical Engineering. Oxford, Oxford University Press, 2001.
- [65] Shull, P. J. Nondestructive Evaluation: Theory, Techniques, and Applications. Boca Raton, CRC Press, 2002.
- [66] Mehta, V. K., Mehta, R. Objective Electrical Technology. New Delhi, S. Chand Group, 2008.
- [67] Sueker, K. H. Power Electronics Design: A Practitioner's Guide. Burlington, Newnes, 2005.

- [68] Hurley, W. G. & Wölfle, W. H. Transformers and Inductors for Power Electronics : Theory, Design and Applications. Hoboken, John Wiley & Sons, 2013.
- [69] Hughes, A. Electric Motors and Drives: Fundamentals, Types and Applications. 3. painos. Burlington, Newnes, 2005.
- [70] Schmitt, R. Electromagnetics Explained - A Handbook for Wireless/RF, EMC, and High-Speed Electronics. Amsterdam, Elsevier, 2002.
- [71] Subramanyam, P. S. Basic Concepts of Electrical Engineering. Hyderabad, Global Media, 2008.
- [72] Skvarenina, T. L. The Power Electronics Handbook. Boca Raton, CRC Press, 2001.
- [73] Standler, R. B. Protection of Electronic Circuits from Overvoltages. New York, Courier Dover Publications, 2012.
- [74] Lee, K., Jahns, T. M., Novotny, D. W., Lipo, T. A., Berkopec, W. E. & Blasko, V. Impact of Inductor Placement on the Performance of Adjustable-Speed Drives Under Input Voltage Unbalance and Sag Conditions. *IEEE Transactions on Industry Applications*, verkkolehti, vol. 42, nro 5, s. 1230–1240. Viitattu 24.2.2014. DOI: 10.1109/TIA.2006.880878.
- [75] Monero-Muñoz, A. Power Quality: Mitigation Technologies in a Distributed Environment. New York, Springer, 2007.
- [76] Reactor %Z Impedance Derivation. Verkkodokumentti. Saatavissa: <http://www.mtecorp.com/pages/wp-content/uploads/SR-034.pdf>
- [77] ACS355 Common DC Application Guide. 2010.
- [78] The Impact of Mains Impedance on Power Quality. Verkkodokumentti. Päivitetty 2000. Saatavissa: <http://www.powerlines.com/pq2kdoc.pdf>
- [79] Baldor Line and Load Reactors. Datalehti. Saatavissa: http://attachments.temcoindustrialpower.com/product_info/Baldor_linereactor_Group2.pdf
- [80] Kantou, T., Yamamoto, S., Kato, M., Keishi, T., & Sawai, T. Electromagnetic and Thermal Design Technology for Reactor Development. *Sei Technical Review*, verkkolehti, 2010, huhtikuu, nro 70. Viitattu 17.6.2014. Saatavissa: <http://global-sei.com/tr/pdf/automotive/70-05.pdf>
- [81] IEC 61000-4-5. Testing and Measurement Techniques - Surge Immunity Test. 2. painos. Geneva, International Electrotechnical Commission, 2005. 54 s.
- [82] IEC 60060-1. High-Voltage Test Techniques - Part 1: General Definitions and Test Requirements. 3. painos. Geneva, International Electrotechnical Commission, 2010. 154 s.

- [83] IEEE C62.41.2. IEEE Recommended Practice on Characterizaion of Surges in Low-Voltage (1000 V and Less) AC Power Circuits. New York, The Institute of Electrical and Electronics Engineers Inc., 2002. 53 s.
- [84] Duran-Gomez, J.L., Enjeti, P.N. A New Approach to Mitigate Nuisance Tripping of PWM ASDs due to Utility Capacitor Switching Transients (CSTs). *IEEE Transactions on Power Electronics*, verkkolehti, vol. 17, nro 5, s. 799–806. Viitattu 24.4.2014. DOI: 10.1109/TPEL.2002.802198.
- [85] IEC 61000-4-11. Testing and Measurement Techniques - Voltage Dips, Short Interruptions and Voltage Variations Immunity Tests. 2. painos. Geneva, International Electrotechnical Commission, 2004. 59 s.
- [86] IEEE Std 1159-2009. IEEE Recommended Practice for Monitoring Electric Power Quality. New York, The Institute of Electrical and Electronics Engineers Inc., 2009. 81 s.
- [87] Semikron SKiiP 11NAB126V1 datalehti. Saatavissa: <http://www.semikron.com/products/product-classes/igbt-modules/detail/skiip-11nab126v1-25230010.html>
- [88] Ericsson, H. Team Leader, Reliability Engineering. ABB Oy New Berlin. 16250 W Glendale Drive, 53151 New Berlin. Sähköpostihaastattelu 16.4.2014.
- [89] Pieteris, P. Suunnitteluinsinööri. ABB Oy. Hiomotie 13, 00380 Helsinki. Haastattelu 19.6.2014.
- [90] Kamel, T., Biletskiy, Y., Diduh, C.P., Chang, L. Failure Detection of the Capacitor Bank of the Three Phase Diode Rectifier. *25th IEEE Canadian Conference on Electrical & Computer Engineering*, verkkolehti, s. 1–4. Viitattu 10.7.2014. DOI: 10.1109/CCECE.2012.6334967.

A Työssä käytetyt mittalaitteet ja laitteistot

Haefely P surge 4010 Combination Wave Surge Generator

Chroma Programmable AC Source 61512

Tektronix P5205 100 MHz High Voltage Differential Probe

Tektronix DP04104B Digital Phosphor Oscilloscope

Fluke Current Probe 80i-110s AC/DC

ACS355-03E-05A6-4 Taajuusmuuttaja

Al 230/400V - M2AA100LD-4 3 kW 1500 IE2 - ABB Sähkömoottori