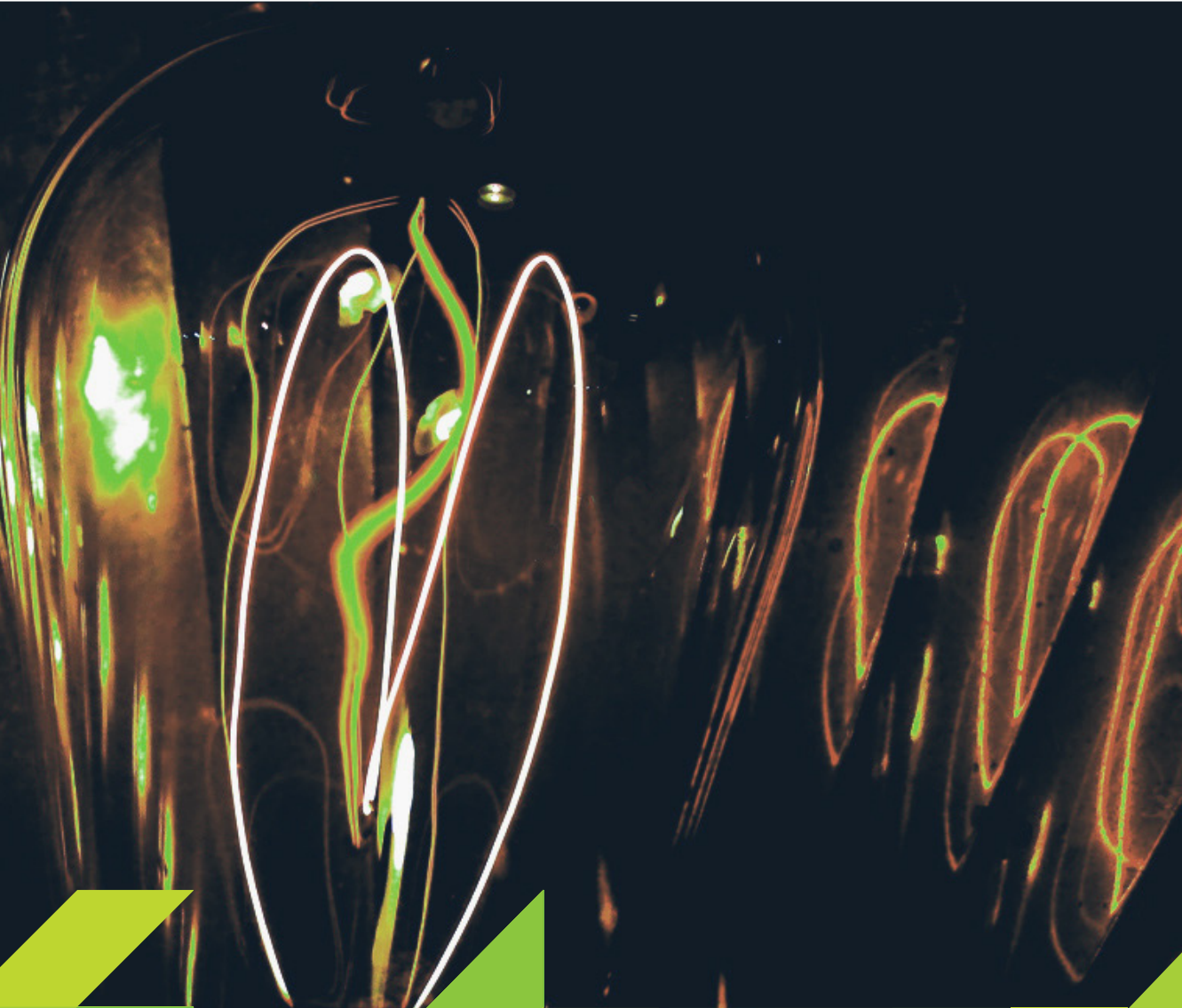




Tarmo Makkonen

Jännitekuoppien vaikutus oikosulkumoottorien käyttäytymiseen





Jännitekuoppien vaikutus oikosulkumoottorien käyttäytymiseen

Tarmo Makkonen

Julkaisusarja

C: Raportteja, 10

Vastaava toimittaja

Kari Tiainen

Sivuntaitto

Kaisa Varis

Kansikuva

Darwin Bell

© Tekijä ja Karelia-ammattikorkeakoulu

Tämän teoksen osittainenkin kopiointi on tekijänoikeuslain mukaisesti kielletty ilman nimenomaista lupaa.

ISBN 978-952-275-100-3

ISSN-L 2323-6914

ISSN 2323-6914

*Julkaisujen myynti
ja jakelu*

Karelia-ammattikorkeakoulu
julkaisut@karelia.fi
tahtijulkaisut.net

Joensuu 2014

Sisällys

1 Johdanto	7
2 Jännitekuopan määritelmä	8
2.1 Standardeja	8
2.2 Jännitekuoppien aiheuttajia	9
3 Jännitekuoppien luokittelu	11
3.1 Symmetriset kuopat	11
3.1.1 Tyyppi A	11
3.2 Epäsymmetriset kuopat	12
3.2.1 Tyypit B, C ja D	12
3.2.2 Tyypit E, F ja G	12
4 Vaikutukset oikosulkumoottoriin	13
4.1 Symmetriset kuopat	14
4.2 Epäsymmetriset kuopat	15
4.3 Virta- ja momenttihuiput	16
5 Jännitekuopilta suojautuminen	20
5.1 Virta- ja momenttihuiput	20
6 Johtopäätökset	25
Lähteet	26

Käytetyt merkit ja lyhenteet

ΔU	jännitteenmuutos
Δt	ajanmuutos
ψ_i	jännitekuopan alkamiskulma
α	vaihesiirtokulma
ω_m	mekaaninen kulmanopeus
ω_s	sähköinen kulmanopeus
EN	European Standard (Eurooppalainen standardi)
h	jännitekuopan suuruus ($0 \leq h \leq 1$) tehollisarvo (rms) prosentteina tai yksikköä kohti (per unit) järjestelmän nimellisjännitteestä
i_a, i_b, i_c	vaiheiden a, b ja c virrat
IEC	International Electrotechnical Commission (sähköalan kansainvälinen standardointijärjestö)
IEEE	Institute of Electrical and Electronic Engineers (amerikkalainen standardi)
IEC	International Electrotechnical Commission (sähköalan kansainvälinen standardointijärjestö)
IEEE	Institute of Electrical and Electronic Engineers (amerikkalainen standardi)
I_N	nimellisvirta
i_{peak}	virtahuippuarvo
$i_{peak, p.u}$	virtahuippuarvo yksikköä kohti
k	kokonaisluku
Nm	newtonmetri
p	napapariluku
pu	per unit (yksikköä kohti)
PWM	Pulse-Width Modulation (Pulssinleveysmodulointi)
rpm	kierrosta minuutissa
s	sekunti
s	jättämä
SFS	Suomen Standardisoimisliitto
S_{max}	jättämämaksimiarvo
$S_{max, p.u}$	jättämämaksimiarvo yksikköä kohti
S_N	nimellisjännite
sqrt (2)	$\sqrt{2}$
T	jaksonaika
t_i	jännitekuopan alkamishetki
T_{peak}	momenttihuippuarvo
$T_{peak, p.u}$	momenttihuippuarvo yksikköä kohti
U_n, U_N	nimellisjännite
U_2	jännitekuopan aikainen jännite
V_a	vaiheen a jännite
V_a, V_b, V_c	vaiheiden a, b ja c jännitteet

1 Johdanto

Jännitekuopan voi havaita esimerkiksi hehkulampun hetkellisenä himmentymisenä tai välkyntänä, tai moottorin pyörimisnopeuden hetkellisenä alentumisena. Jännitekuopat voidaan luokitella kolmivaiheisilla kuormilla seitsemään eri tyyppiin riippuen siitä, minkä tyyppinen vika on kuopan aiheuttanut.

Jännitekuopan vaikutus oikosulkumoottoriin riippuu monista seikoista, kuten jännitekuopan suuruudesta ja kestosta, jännitekuopan tyypistä, jännitekuopan alkamiskohdan sijainnista aallonmuodolla, moottorin sähköisistä parametreista sekä kuormasta ja mekaniikan hitausmomentista. Jännitekuoppien lukumäärään voidaan vaikuttaa mm. päämuuntajien lukumäärällä ja sähköaseman kiskostojärjestelyillä. Jännitekuoppien aiheuttamia haittoja vastaan voidaan suojautua tehoelektroniikkaan perustuvilla laitteistoilla.

2 Jännitekuopan määritelmä

Sähkönlaatustandardissa määritellään sähkönjakeluverkon jännitteen ominaisuudet pien- ja keskijänniteverkon normaaleissa käyttöolosuhteissa. Jännitteen laadun osatekijöihin luetaan mm. taajuus, jännitetasojen vaihtelu, nopeat jännitevaihtelut, harmoniset ja epäharmoniset yliaaltojännitteet, epäsymmetria, signaalijännitteet, jännitekuopat, käyttötaajuiset ylijännitteet ja transienttiylijännitteet. [1].

2.1 STANDARDEJA

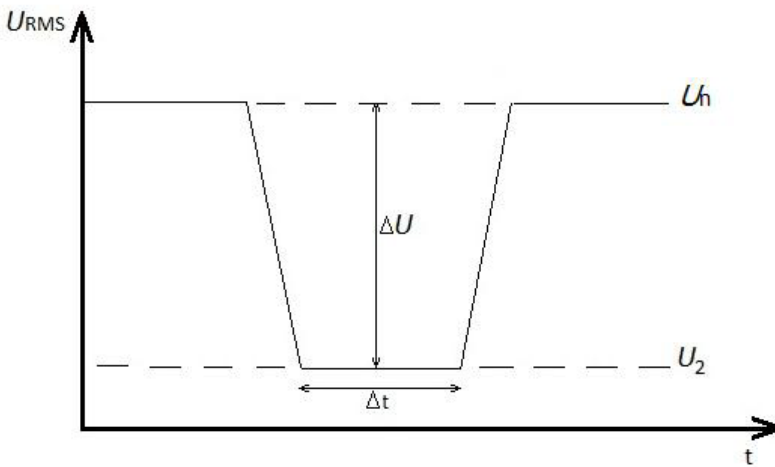
Standardissa EN 50160 Voltage characteristic of electricity supplied by public distribution systems (November 1999) esitetään jakelujännitteen pääominaisuudet (taajuus, suuruus, aaltomuoto, kolmivaiheisen jännitteen symmetria) asiakkaan liittämiskohdassa yleisissä pien- ja keskijännitteisissä sähkönjakeluverkoissa normaaleissa käyttöolosuhteissa. [1].

Standardin EN 50160 suomenkielisen käännöksen SFS-EN 50160 Yleisen jakeluverkon jakelujännitteen ominaisuudet (vahv. 2000-01-24) mukaan jännitekuoppa on jakelujännitteen äkillinen aleneminen $90\% \dots 1\% \cdot U_n$ ja jännitteen palautuminen lyhyen ajan kulluttua. Tyypilliseltä kestoaltaan jännitekuoppa on 10 ms ... 1 min. Jännitekuopan suuruus määritellään vertaamalla alentuneen jännitteen tehollisarvoa nimellisjännitteeseen U_n . Jännitemuutoksia, joiden vuoksi jännite ei laske alle $90\% \cdot U_n$, ei lueta jännitekuopiksi. [1].

Standardissa SFS-EN 50160 annetaan jännitekuoppien määrälle ainoastaan indikaatiivisia arvoja, ei tarkkoja raja-arvoja. Normaaleissa käyttöolosuhteissa odotettavissa oleva jännitekuoppien määrä tämän mukaan voi olla vuoden aikana muutamista kymmenistä tuhanteen. Suurin osa jännitekuopista on suuruudeltaan alle $60\% \cdot U_n$ ja kestoaltaan alle 1 sekunti. Satunnaisesti voi kuitenkin esiintyä suurempia ja pidempiä jännitekuoppia. [1].

Standardi IEEE 1159-1995 määrittelee jännitekuopan jännitteen tehollisarvon (RMS) alenemiseksi kestoltaan 0,5 jaksoa ... 1 minuutti välille 90 % ... 10 %* U_n . Standardi ilmoittaa jäljelle jäävän jännitteen tehollisarvon suhteessa nimellisjännitteeseen U_n prosentteina. [1].

Standardin IEC 61000-4-30 mukaan jännitekuoppa on hetkellinen jännitteen aleneminen sähköverkon liittymispisteessä, jonka jälkeen jännite palautuu nopeasti normaalille tasolle (0,5 jaksoa ... muutama sekunti). Standardi ilmoittaa jännite-eron nimellisjännitteen U_n ja kuopan jännitteen välillä eli kuopan syvyyden. [1].



Kuva 1. Jännitekuopan määrittäminen. U_n järjestelmän nimellisjännite, ΔU =jännite-ero nimellisjännitteen ja kuopan jännitteen välillä, Δt =kuopan kestoaika ja U_2 = jännite kuopan aikana. [1].

2.2 JÄNNITEKUOPPIEN AIHEUTTAJIA

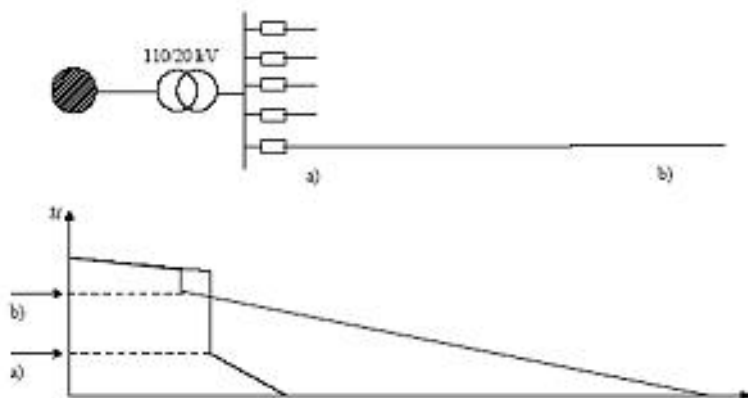
Jännitekuoppia aiheuttavat oikosulkuviat siirto-, jakelu- ja pienjänniteverkoissa sekä suurten muuntajien ja suurten kuormien päälle kytkentä. Tyypillisesti oikosulkuvikoja aiheuttavat mm. salama, tuuli, lumi, linnut, oravat, majavat, inhimilliset erehdykset sekä komponentti- ja laiteviat. Tyypillisiä suuria kuormituksia ovat mm. suuret moottorit, hitsauslaitteet, valokaariunit ja sulatot. [2, 3].

Maasulut aiheuttavat siirtoverkon jännitekuopista keskimäärin 82 %, näkyen pienjännitepuolella lähinnä viallisessa vaiheessa ja ovat vikapaikan lähellä 110 kV verkon maadoitustavan ansiosta keskimäärin alle 20 % vaihejännitteestä. Syvempiä jännitekuoppia joiden vaikutus ulottuu laajemmalle alueelle, aiheuttavat 220 kV:n ja 400 kV:n verkon puolella olevat viat sekä monivaiheiset 110 kV:n viat. [4].

Jännitekuopan kesto määräytyy ensisijaisesti suojauksen toiminta-ajan mukaan. Vian sijainnin ollessa suotuisa ja suojauksen oletetaan toimivan ensimmäisessä vyöhykkeessä, kuopan kesto on yleensä alle 100 ms. Vian sijaitessa toisessa vyöhykkeessä tai varasuojauk-

sen toimiessa, kesto voi olla huomattavasti pidempi. Jännitekuopan syvyyteen vaikuttaa vian resistanssi ja etäisyys havaintopisteestä sekä verkon alueellinen rakenne. Lisäksi on huomioitava jännitekuopan siirtyminen muuntajien lävitse. 110 kV verkon puoleisesta jännitekuopasta vain osa näkyy pienjännitepuolella johtuen jännitteen nollakomponentista joka ei siirry tavallisimpien muuntajien lävitse. [4].

Haitallisimpia sähkönkäyttäjien kannalta ovat kolmivaiheiset oikosulut, jotka tapahtuvat lähellä 110/20 kV sähköasemaa. Tällöin aiheutuva syvä jännitekuoppa ulottuu kaikkiin sähköaseman alueen sähkönkäyttäjiin jännitteen pudotessa nolnaan. Kuva 2 esittää jännitekuopan syntymistä säteittäisesti syötetyssä keskijänniteverkossa kolmivaiheisen vian seurauksena ja vikapaikan etäisyyden vaikutusta sähköaseman jännitteeseen. [5].



Kuva 2. Keskijännitelähdöllä syntyvän kolmivaiheisen vian sijaintipaikan etäisyyden vaikutus sähköaseman jännitteeseen. a) vikapaikka lähellä sähköasemaa ja b) vikapaikka kauempana verkossa. [5].

Kuvasta on havaittavissa se, että mitä lähempänä sähköasemaa vikapaikka sijaitsee, sitä alhaisempi on sähköaseman jännite vian aikana ja sitä syvempi on alueen sähkönkäyttäjien kokema jännitekuoppa. [5].

3 Jännitekuoppien luokittelu

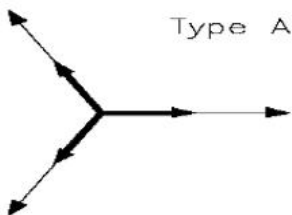
Jännitekuoppa voi olla joko symmetrinen tai epäsymmetrinen, vian tyypistä riippuen. Jännitekuoppa on **symmetrinen** silloin kun vaihejännitteet ovat yhtä suuret ja niiden välinen vaihesiirto on 120° . Muissa tapauksissa jännitekuoppa on **epäsymmetrinen**. [3].

Jännitekuopat voidaan kolmivaiheisilla kuormilla luokitella seitsemään eri tyyppiin: A, B, C, D, E, F ja G tyyppiin. Tyypin A jännitekuopat ovat symmetrisiä ja tyyppien B-G jännitekuopat epäsymmetrisiä. [3].

3.1 SYMMETRISET KUOPAT

3.1.1 Tyyppi A

Tyypin A jännitekuoppia aiheuttavat kolmivaiheiset oikosulut, ylikuormitus ja suurten moottorien käynnistykset. Seuraavassa kuvassa esitetystä vaihediagrammista voidaan havaita jännitteen putoaminen symmetrisesti kaikissa vaiheissa vian aikana. [3].



$$\underline{V}_a = hV$$

$$\underline{V}_b = -\frac{1}{2}hV - j\frac{\sqrt{3}}{2}hV$$

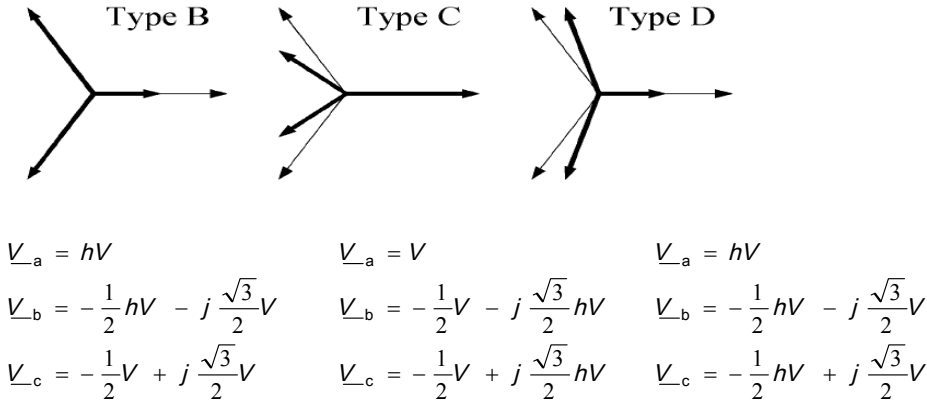
$$\underline{V}_c = -\frac{1}{2}hV + j\frac{\sqrt{3}}{2}hV$$

Kuva 3. Tyypin A jännitekuopan vaihediagrammi ja vastaavat jänniteyhtälöt. Kuopan suuruus $h=0,5$ (50 %). [3].

3.2 EPÄSYMMETRISET KUOPAT

3.2.1 Tyypit B, C ja D

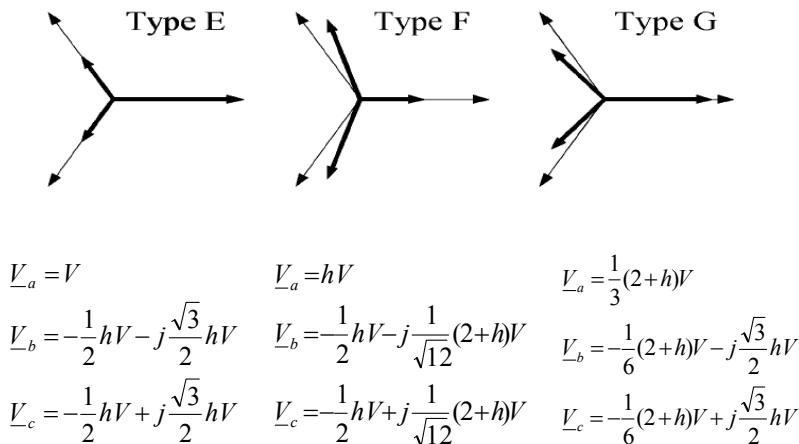
Tyyppin B, C ja D jännitekuoppia aiheuttavat maasulut sekä vaiheiden väliset oikosulut. Seuraavassa kuvassa 4 esitetyistä vaihediagrammeista voidaan havaita viallisen vaiheen jännitteen putoaminen tyyppin B kuopassa, kahden viallisen vaiheen jännitteen putoaminen ja niiden vaihekulmien siirtyminen tyyppin C kuopassa sekä kahden viallisen vaiheen vaihekulmien siirtyminen ja ehjän vaiheen jännitteen putoaminen tyyppin D kuopassa. [3].



Kuva 4. Tyyppin B, C ja D jännitekuopan vaihediagrammit ja niitä vastaavat jänniteyhtälöt. Kuopan suuruus $h=0,5$ (50 %). [3].

3.2.1 Tyypit E, F ja G

Tyyppin E, F ja G jännitekuoppia aiheuttavat kahden vaiheen ja maan välille syntyvät oikosulut. Seuraavassa kuvassa 5 esitetyistä vaihediagrammeista voidaan havaita tyyppin E kuopassa kahden viallisen vaiheen jännitteen putoaminen, tyyppin F kuopassa kahden viallisen vaiheen vaihekulmien siirtyminen ja ehjän vaiheen jännitteen putoaminen ja tyyppin G kuopassa kahden viallisen vaiheen jännitteen putoaminen ja vaihekulmien siirtyminen ja ehjän vaiheen jännitteen putoaminen. [3].



Kuva 5. Tyyppin E, F ja G jännitekuopan vaihediagrammit ja niitä vastaavat jänniteyhtälöt. Kuopan suuruus $h=0,5$ (50 %). [3].

4 Vaikutukset oikosulku- moottoriin

Jännitekuopan tyypistä riippumatta oikosulkumoottorissa havaittavia haittoja ovat virta- ja momenttihuiput (transientit) sekä pyörimisnopeuden alentuminen. Transienttien vaikutukset riippuvat monista tekijöistä kuten jännitekuopan suuruudesta ja kestosta, jännitekuopan tyypistä, jännitekuopan alkamiskohdasta aallonmuodolla, moottorin sähköisistä parametreista, kuormasta ja mekaniikan hitausmomentista. Transientit saattavat aiheuttaa esimerkiksi sen, että moottorin suojausjärjestelmä laukaisee moottorin tai moottorikäytön irti sähköverkosta. [3].

Seuraavissa kohdissa on vertailtu eri jännitekuoppatyypien vaikutusta oikosulkumoottorin vaihevirtaan, vääntömomenttiin ja pyörimisnopeuteen. Simuloinnissa käytetyn oikosulkumoottorin arvot ovat: 4 MW, 6300 V (eristetty tähtipiste), 50 Hz, 25,8 kNm, 1483 r/min, 420 A. Moottori toimii lähellä nimellispistettä ja se on mallinnettu lineaarisella yksivaiheisella dynamiikkamallilla. [3].

Jännitekuopan alkamiskohta saadaan kaavasta

$$\psi_i = \omega t_i + \alpha \quad (1)$$

jossa

ω = kulmataajuus

t_i = jännitekuopan alkamishetki

α = vaihesiirtokulma

Kun vaiheen a jännite on

$$v_a(t) = \sqrt{2} V \cos(\omega t + \alpha) \quad (2)$$

Jos jännitekuoppa alkaa hetkellä $t_i = 0$ s, saadaan vaiheen a jännitteellä kuopan alkamiskohdaksi $\psi_i = \alpha$.

Kuvissa 6 ja 7 esitetyissä nopeuden alenemisissa on käytetty jättämälle yhtälöä

$$s = 1 - \frac{p\omega_m}{\omega_s} \quad (3)$$

jossa

p = napapariluku

ω_m = mekaaninen kulmanopeus

ω_s = sähkökulmanopeus

sekä jättämämaksimiarvoa yksikköä kohti, joka saadaan yhtälöstä

$$s_{\max, \text{p.u.}} = \frac{s_{\max}}{s_N} = \frac{\max\{s(t)\}}{s_N} \quad (4)$$

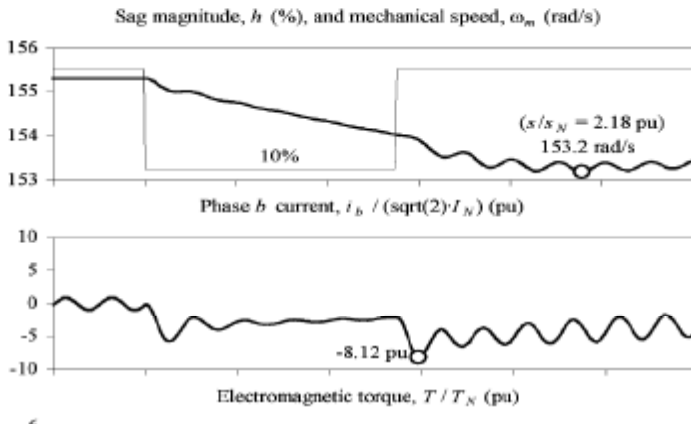
jossa

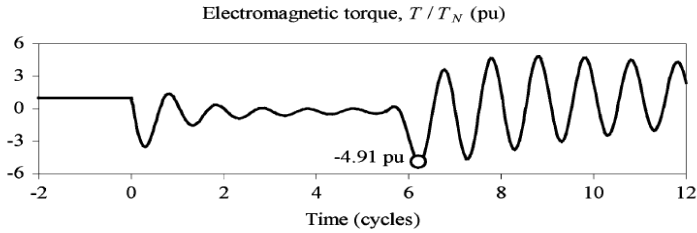
s_{\max} = jättämämaksimiarvo

s_N = nimellisjättämä. [3].

4.1 SYMMETRISET KUOPAT

Tyyppin A jännitekuopan aiheuttaman transientin muoto riippuu jännitekuopan suuruudesta ja kestosta (jaksollisesti). Oikosulkumoottorin virta- ja momenttihuiput voivat ilmetä joko jännitekuopan aikana tai jännitteen palaututtua kuopan jälkeen. [3]. Seuraava kuva havainnollistaa tyyppin A jännitekuopan vaikutusta oikosulkumoottorin pyörimisnopeuteen, vaihevirtaan ja sähkömagneettiseen vääntömomenttiin. [3].

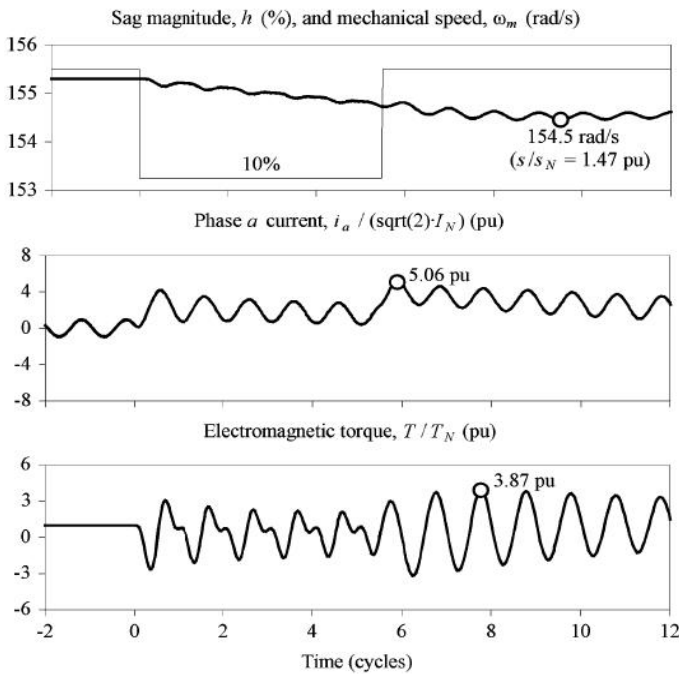




Kuva 6. Tyypin A jännitekuopan vaikutus oikosulkumoottorin pyörimisnopeuteen, vaihevirtaan ja sähkömagneettiseen vääntömomenttiin. α_1 (10%), kesto $\Delta t=110$ ms ja alkamiskohdasta $\psi_{i,A} = 45^\circ$, $t_{i,A} = 0$ s. [3].

4.2 EPÄSYMMETRISET KUOPAT

Epäsymmetristen jännitekuoppien (B-G) oikosulkumoottoriin aiheuttaman transientin muoto riippuu kuopan suuruudesta ja kestosta (jaksollisesti) sekä jännitekuopan alkamiskohdasta. Lisäksi vastajärjestelmän jännite aiheuttaa vaimenemattoman värähtelyn nopeuteen ja vääntömomenttiin. Samansuuruisesta vastajärjestelmän jännitteestä johtuen tyypin E ja G kuoppien vaikutukset ovat samanlaiset koneen ollessa maadoittamaton. Seuraava kuva havainnollistaa tyypin B jännitekuopan vaikutusta oikosulkumoottorin pyörimisnopeuteen, vaihevirtaan ja sähkömagneettiseen vääntömomenttiin. [3].



Kuva 7. Tyypin B jännitekuopan vaikutus oikosulkumoottorin pyörimisnopeuteen, vaihevirtaan ja sähkömagneettiseen vääntömomenttiin. $\alpha=0,1$ (10 %), $\Delta t=110$ ms ja $\psi_{i,B} = 90^\circ$, $t_{i,B} = 0$ s. [3].

4.3 VIRTA- JA MOMENTTIHUIPUT

Kuvissa 8 ja 9 esitetyt virtahuippuarvot yksikköä kohti saadaan yhtälöstä

$$i_{\text{peak, p.u.}} = \frac{i_{\text{peak}}}{\sqrt{2}I_N} = \frac{\max\{|i_a(t)|, |i_b(t)|, |i_c(t)|\}}{\sqrt{2}I_N} \quad (5)$$

jossa

$$i_a(t), i_b(t), i_c(t) = \text{vaiheiden a, b ja c virrat}$$
$$I_N = \text{nimellisvirta}$$

Kuvissa 10 ja 11 esitetyt momenttihuippuarvot yksikköä kohti saadaan yhtälöstä

$$T_{\text{peak, p.u.}} = \frac{T_{\text{peak}}}{T_N} = \frac{\max\{T(t)\}}{T_N}$$

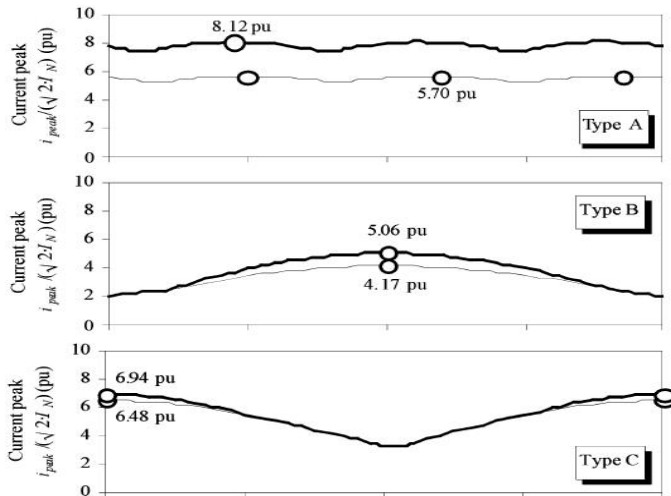
jossa

$$T_{\text{peak}} = \text{huippumomentti}$$
$$T_N = \text{nimellismomentti. [3]}$$

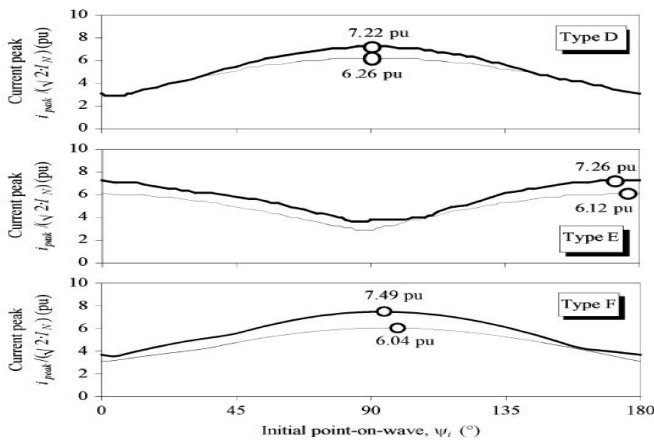
Kuvista 8 ja 10 voidaan havaita, että tyyppin A jännitekuopan alkamiskohdalla ei ole vaikutusta oikosulkumoottorin nopeuden alenemiseen eikä vääntömomenttihuippujen suuruuteen ja virtahuippujenkin suuruuteen vaikutus on vähäinen. [3].

Tyyppien B-G jännitekuopilla (kuvat 8 ja 11) alkamiskohdan vaikutus on merkittävä virta- ja momenttihuippujen suuruuteen, mutta vain vähäinen nopeuden alenemiseen. B, D ja F-tyypin jännitekuopilla virta- ja momenttihuiput voidaan havaita alkamiskohdan ollessa noin 90° $\mathbf{v}_a(t) = 0$ ja pienenee edelleen). Vastaavasti tyyppien C ja E jännitekuopilla, virta- ja momenttihuiput voidaan havaita alkamiskohdan ollessa likimäärin 0° $\mathbf{v}_a(t) = \text{maksimi.}$ Tyyppin B jännitekuopan osalta voidaan havaita, että se aiheuttaa pienimmän virta- ja momenttihuipun. [3].

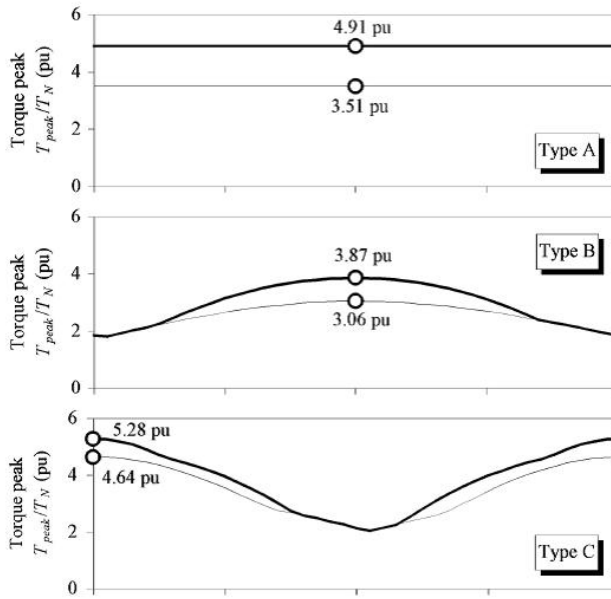
Tyyppien C ja D jännitekuoppien voidaan havaita aiheuttavan samansuuruiset virta- ja momenttihuiput kuoppien ollessa suuruudeltaan ja kestoaltaan samanlaiset. Suuruudeltaan ja kestoaltaan samanlaisen symmetrisen kuopan voidaan havaita aiheuttavan suuremman virtahuipun kuin epäsymmetrisen kuopan. Momenttihuippuja verrattaessa voidaan havaita, että symmetrisen kuoppa aiheuttaa suuremman momenttihuipun kuin epäsymmetrisen kuoppa. [3].



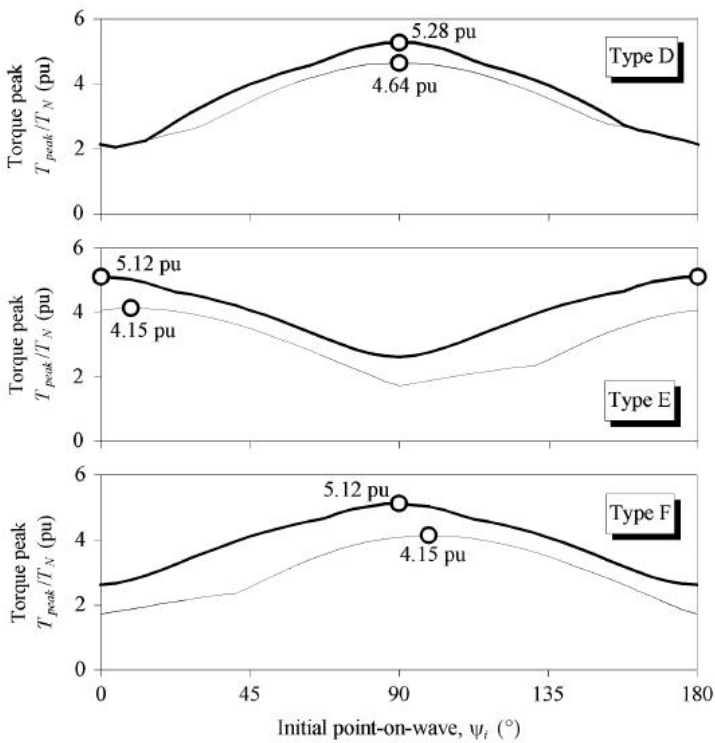
Kuva 8. Tyyppin A, B ja C jännitekuopan vaikutus oikosulkumoottorin virtahuippuihin. $h=0,1(10\%)$, $\Delta t=100$ ms (ohuempi viiva) ja $\Delta t=110$ ms (paksumpi viiva), $\psi_{i,A} = 45^\circ$, $\psi_{i,B}=90^\circ$, $\psi_{i,C}=0$, $t_{i,A,B,C} = 0$ s. [3].



Kuva 9. Tyyppin D, E ja F jännitekuopan vaikutus oikosulkumoottorin virtahuippuihin. $h=0,1(10\%)$, $\Delta t=100$ ms (ohuempi viiva) ja $\Delta t=110$ ms (paksumpi viiva), $\psi_{i,D} = 90^\circ$, $\psi_{i,E} = 0^\circ$, $\psi_{i,F} = 90^\circ$, $t_{i,D,E,F} = 0$ s. [3].



Kuva 10. Tyypin A, B ja C jännitekuopan vaikutus oikosulkumoottorin momenttihuippuihin. $h=0,1(10\%)$, $\Delta t=100\text{ ms}$ (ohuempi viiva) ja $\Delta t=110\text{ ms}$ (paksumpi viiva), $\psi_{i,A} = 45^\circ$, $\psi_{i,B}=90^\circ$, $\psi_{i,C}=0$, $t_{i,A,B,C} = 0\text{ s}$. [3].



Kuva 11. Tyypin D, E ja F jännitekuopan vaikutus oikosulkumoottorin momenttihuippuihin. $h=0,1(10\%)$, $\Delta t=100\text{ ms}$ (ohuempi viiva) ja $\Delta t=110\text{ ms}$ (paksumpi viiva), $\psi_{i,D} = 90^\circ$, $\psi_{i,E} = 0^\circ$, $\psi_{i,F} = 90^\circ$, $t_{i,D,E,F} = 0\text{ s}$. [3].

Kuvaajista voidaan havaita, että suurimmat virta- ja momenttihuiput aiheutuvat, kun kuopan keston on puoli jaksoa + kokonaisluku kerrottuna jakson ajalla. Tällöin saadaan kuopan kestoksi

$$\Delta t = \frac{T}{2} + kT \quad (7)$$

missä $k = 0, 1, 2, \dots$

Seuraavassa taulukossa on esitetty eri kuoppatyyppien haitallisimmat alkamiskohdat.

Taulukko 1. Haitallisimmat jännitekuoppien alkamiskohdat ja kestot. [3].

Kuopan tyyppi	ψ_j	Δt
A	-	$\frac{T}{2} + kT$
B, D, F	90°	$\frac{T}{2} + kT$
C, E	0°	$\frac{T}{2} + kT$

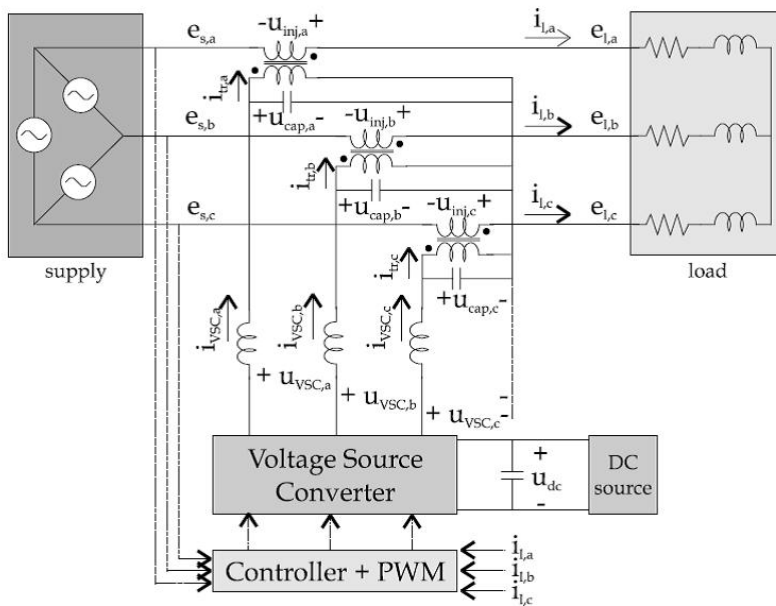
5 Jännitekuopilta suojautuminen

Jännitekuoppien lukumäärään voidaan vaikuttaa mm. päämuuntajien lukumäärällä ja sähköaseman kiskostojärjestelyillä. Jakamalla sähköaseman syöttö eri päämuuntajille ja jakamalla sähköaseman lähdöt eri päämuuntajien syöttämiksi, voidaan jännitekuoppien lukumäärää pienentää. [6].

Jännitekuoppien haitallisia vaikutuksia vastaan voidaan suojautua tehoelektronikan komponenteilla toteutettujen laitteistojen avulla, kuten Staattinen sarjakompensaattori. [7].

5.1 STAATTINEN SARJAKOMPENSAATTORI

Staattinen sarjakompensaattori (SSC, Static Series Compensator) sisältää tasajännitelähteen (akuston) sekä kolmivaiheinvertterin (VSC, Voltage Source Converter), joka on kytketty sarjaan kuorman kanssa sarjasyöttömuuntajan avulla (kuva 12). [7].

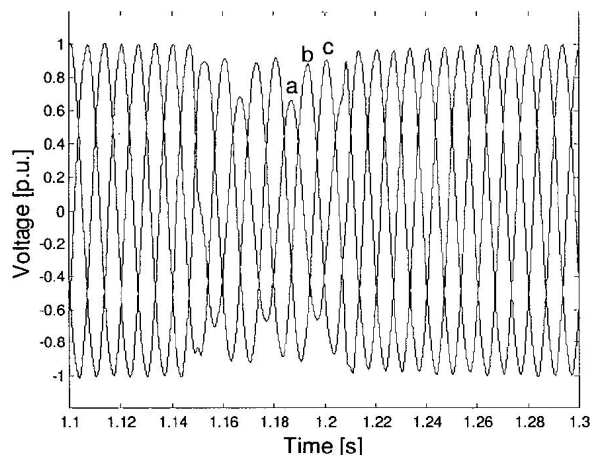


Kuva 12. Periaatekaavio kuorman suojaamisesta jännitekuoppia vastaan Staattisen sarjakompensaattorin avulla. [7].

Kuvassa 12 esitetty laitteisto mittaa syöttävän verkon jännitettä ja tunnustelee kuorman virran muutoksia. Näiden perusteella muodostetaan tasajännitelähteestä invertterin avulla kolmivaihejännite, jolla on haluttu taajuus, suuruus ja vaihekulma. [7].

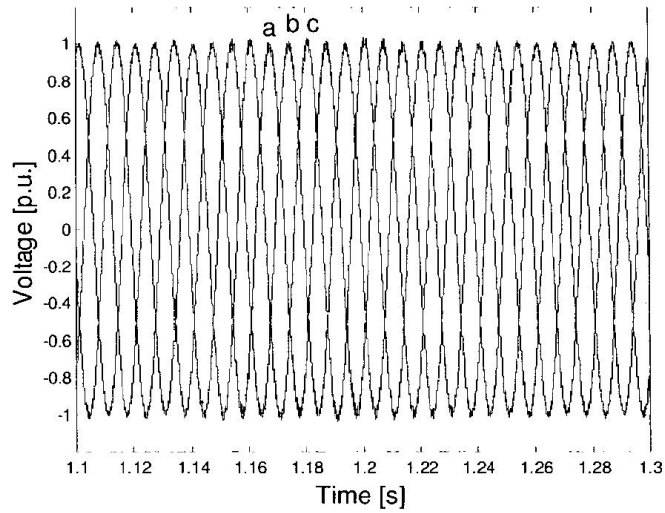
Laitteisto pystyy kompensoimaan epäsymmetrisen jännitekuopan (ja siihen liittyvän vaihesiirtokulman) aiheuttaman jännite-epäsymmetrian kuorman jännitteeseen kuormituksen ollessa symmetrinen tai epäsymmetrinen. Käyttämällä pulssinleveysmoduloinnissa (PWM, Pulse-Width Modulation) melko korkeaa kytkentätaajuutta, saadaan parempi aallonmuoto särökomponenttien siirtyessä korkeammille taajuuksille. Harmonisten yliaaltojen suodatus on toteutettu sijoittamalla invertterin ja muuntajan väliin pieni passiivisuodin. [7].

Seuraavassa esitetään simuloinneista saatuja tuloksia. Simuloinnissa käytetyn oikosulkumoottorin arvot ovat: 22 kW, 380 V, 50 Hz, 1430 r/min, 0,785 kgm² ja kuormituksen momentti moottorin akselilla on vakio 200 Nm. Kuva 13 esittää simuloinnissa käytettyä aitoa epäsymmetrisen jännitekuopan sisältävää aallonmuotoa. [7].



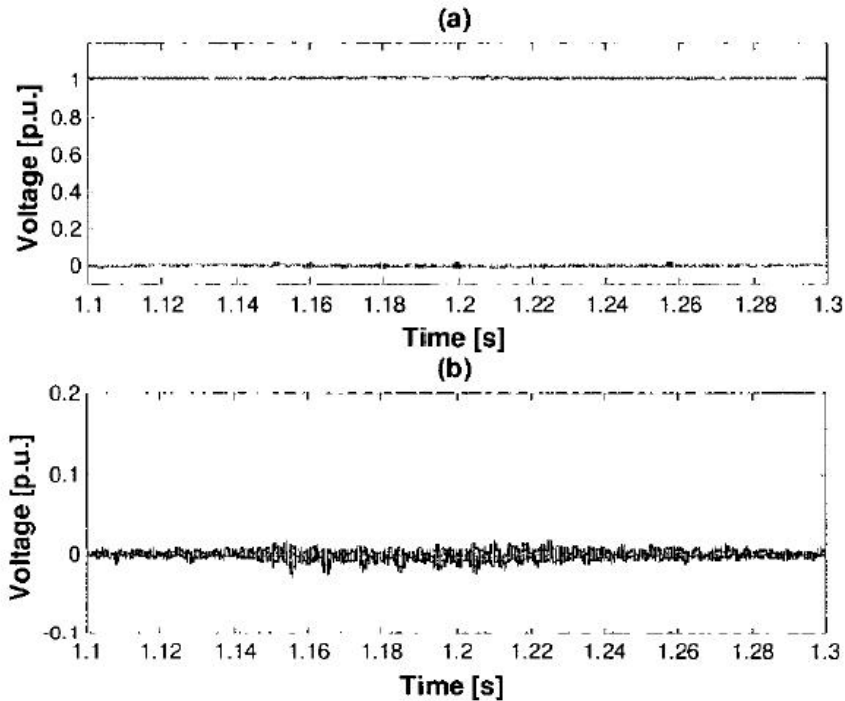
Kuva 13. Simuloinnissa käytetty epäsymmetrisen jännitekuopan ($\Delta t \approx 60$ ms) sisältävä aallonmuoto. [7].

Kuvassa 14 esitetystä kompensoidusta moottorin jännitteestä on vaikea havaita jännitekuopan vaikutusta.



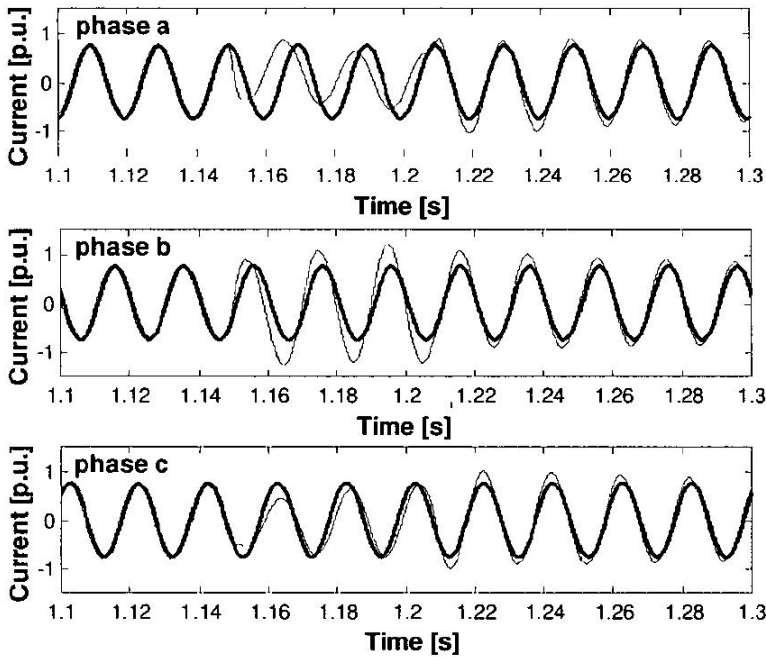
Kuva 14. Kompensoitu moottorin vaihejännite. [7].

Kuva 15 esittää kompensoinnin vaikutusta moottorin dq-komponenttien jännitteeseen. Epäsymmetrisen jännitekuopan voidaan havaita aiheuttavan värähtelyä vastajärjestelmän jännitteeseen.



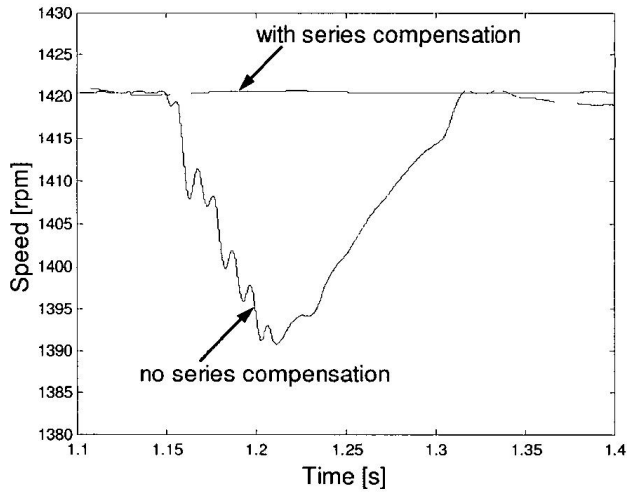
Kuva 15. Moottorin jännitteen dq-komponentit kompensoinnin kanssa. a) myötäjärjestelmän jännite b) vastajärjestelmän jännite. [7].

Kuvasta 16 on vaikea havaita jännitekuopan olemassaoloa moottorin vaihevirroista kompensoinnin ollessa toiminnassa.

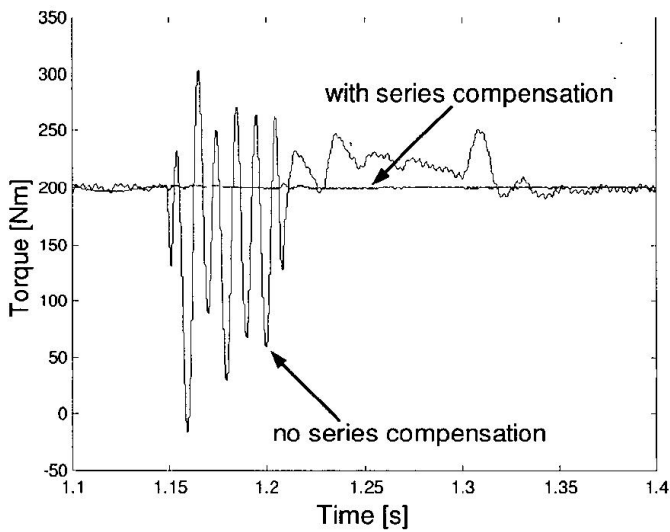


Kuva 16. Moottorin vaihevirrat ilman kompensointia (ohut viiva) ja kompensoinnin kanssa (paksu viiva). [7].

Kuvissa 17 ja 18 esitetään kompensoinnin vaikutusta moottorin pyörimisnopeuteen ja vääntömomenttiin. Kuvista on havaittavissa kompensoinnin korjaava vaikutus pyörimisnopeuteen ja vääntömomenttiin. Kompensoinnin kanssa moottorin jännite säilyy lähes muuttumattomana jännitekuopan aikana verrattuna kuoppaa edeltävään jännitteeseen. Lisäksi voidaan havaita, että kuinka ilman kompensointia vastajärjestelmän jännite epäsymmetrisellä kuopalla aiheuttaa transienttia molempiin, sekä pyörimisnopeuteen että vääntömomenttiin. [7].



Kuva 17. Oikosulkumoottorin pyörimisnopeus ilman kompensointia ja kompensoinnin kanssa. [7].



Kuva 18. Oikosulkumoottorin vääntömomentti ilman kompensointia ja kompensoinnin kanssa. [7].

6 Johtopäätökset

Jännitekuoppia aiheuttavat oikosulkuviat siirto-, jakelu- ja pienjänniteverkoissa sekä suurten kuormitusten päällekytkentä.

Jännitekuopat voidaan luokitella kolmivaiheisten kuormitusten tapauksessa seitsemään eri luokkaan: A, B, C, D, E, F ja G. Tyypin A jännitekuoppia eli symmetrisiä kuoppia aiheuttavat kolmivaiheiset oikosulut, ylikuormitus ja suurten moottorien käynnistykset. Tyypin B, C ja D jännitekuoppia aiheuttavat maasulut sekä vaiheiden väliset oikosulut. Tyypin E, F ja G jännitekuoppia aiheuttavat oikosulut kahden vaiheen ja maan välillä.

Jännitekuopat aiheuttavat oikosulkumoottoreissa transientteja joihin vaikuttaa mm. jännitekuopan suuruus ja kesto, jännitekuopan tyyppi ja alkamiskohta sekä moottorin ja kuorman parametrit. Tyypin A jännitekuopalla transientin muoto riippuu jännitekuopan suuruudesta ja kestosta. Virrassa ja vääntömomentissa on havaittavissa transientteja joko jännitekuopan aikana tai jännitteen palauduttua jännitekuopan jälkeen. Jännitekuopan alkamiskohdalla ei havaita olevan vaikutusta nopeuden alenemiseen tai vääntömomenttihiippujen suuruuteen eikä juurikaan virtahiippujen suuruuteen.

Tyypin B-G jännitekuopilla myös alkamiskohdalla on havaittavissa merkittävää vaikutusta lähinnä virta- ja vääntömomenttihiippuihin. Virrassa ja vääntömomentissa transientteja on havaittavissa sekä jännitekuopan aikana että sen jälkeen jännitteen palauduttua. Tyypin B, D ja F jännitekuopilla virta- ja vääntömomenttihiippuja voidaan havaita esiintyvän alkamiskohdan ollessa noin 0° . Lisäksi on havaittavissa vastajärjestelmän jännitteen aiheuttama vaimenematon värähtely vääntömomentissa ja virrassa.

Tehoelektroniikalla toteutetuilla laitteilla kuten staattisella sarjakompensaattorilla, voidaan tehokkaasti vähentää myös epäsymmetristen jännitekuoppien oikosulkumoottoreihin aiheuttamia haittoja.

Lähteet

- [1] Mäkinen, A., Rissanen, J., Järventausta, P. Sähkönjakeluverkon jännitekuoppien seuranta osana sähkönlaadun hallintaa. TESLA-raportti nro x/2001. Tampere. 2001. 39 s.
- [2] Pohjanheimo, P. A probabilistic method for comprehensive voltage sag management in power distribution systems. Helsinki University of Technology. Power Systems Laboratory. ISBN. 2003. <http://lib.tkk.fi/Diss/2003/isbn9512263998/index.html>. 07.12.2013.
- [3] Guasch, L., Córcoles, F., Pedra, J. Effects of Symmetrical and Unsymmetrical Voltage Sags on Induction Machines. IEEE Transactions on Power Delivery. vol. 19. no. 2. April 2004. <http://ieeexplore.ieee.org.libproxy.aalto.fi/stamp/stamp.jsp?tp=&arnumber=1278439>. 07.12.2013.
- [4] Fingrid. 110 kV verkon sähkönlaatu. Raportti. 10 s. 2007. http://www.fingrid.fi/fi/asiakkaat/asiakasliitteet/Liittyminen/110%20kV_verkon_sahkonlaatu.pdf. 08.12.2013.
- [5] Lakervi, E., Partanen, J. Sähkönjakelutekniikka. 2. uudistettu painos. Ota-tieto Oy julk. 609. Helsinki. 2009.
- [6] Järventausta, P., Mäkinen, A., Nikander, A., Kivikko, K., Partanen, J., Lassila, J., Viljainen, S., Honkapuro, S. Sähkön laatu jakeluverkkotoiminnan arvioinnissa. Energiamarkkinaviraston julkaisu 1/2003. TTY ja LTY. 2003. 163 s. http://www.energiamarkkinavirasto.fi/files/Sahkon_laatu_TTY-LTY_1-2003.pdf. 08.12.2013.
- [7] Sannino, A., Svensson, J. Application of converter-based series device for voltage sag mitigation to induction motor load. Power Tech Proceedings. 2001 IEEE Porto. Volume: 2. 10-13 Sept. 2001. Pages: 6 pp. vol. 2. <http://ieeexplore.ieee.org.libproxy.aalto.fi/stamp/stamp.jsp?tp=&arnumber=964723>. 07.12.2012.

Jännitekuopaksi kutsutaan tilannetta, jossa jännite äkillisesti alenee yli 10 % kuoppaa edeltävästä jännitetasosta ja palautuu ennalleen lyhyen ajan kuluttua. Jännitekuoppia aiheuttavat mm. viat siirto-, jakelu- ja pienjänniteverkoissa sekä suurten moottorien verkkoon kytkeminen. Tyypillisimmin jännitekuoppa on havaittavissa hehkulampun hetkellisenä himmentymisenä. Jännitekuopat luokitellaan kolmivaiheisilla kuormituksilla seitsemään eri tyyppiin vian tyyppiin mukaan.

Jännitekuoppien vaikutuksille herkkiä laitteita ovat monet mm. teollisuudessa käytetyt laitteet, kuten moottorit ja moottorikäytöt, tietyn tyyppiset tehoelektronikkalaitteet, purkauslamput, tietokoneet, ohjelmoitavat logiikat sekä kontaktorit. Jännitekuopat aiheuttavat moottoreissa mm. virta- ja jännitehuippuja sekä pyörimisnopeuden alentumista. Näiden vaikutusten seurauksena saattaa moottorin suojausjärjestelmä laukaista moottorin irti verkosta. Jännitekuoppien haitallisia vaikutuksia voidaan vähentää erilaisten verkko- ja laitteistoratkaisujen avulla.

KARELIA-AMMATTIKORKEAKOULUN JULKAISUJA C:10

ISBN 978-952-275-100-3 | ISSN 2323-6914