

ALKULAUSE

Tämä työ on tehty ABB Oy:n Prosessiteollisuus yksikön Pulp&Paper Drives –osastolla Helsingin Pitäjänmäellä.

Työn valvojana on toiminut professori Juha Pyrhönen. Hänelle suuret kiitokset. Siitä, että diplomityön tekeminen oli mahdollista, haluan kiittää ABB Oy:tä. Suuret kiitokset työn onnistumisesta kuuluvat myös ohjaajilleni insinööri Timo Salmelalle ja diplomi-insinööri Vesa Kajanderille. Lisäksi haluan kiittää diplomi-insinööri Ilkka Erkkilää asiantuntevista neuvoista ja kokemuseräisestä tiedosta. Kiitoksen ansaitsevat myös kaikki muutkin Pulp&Paper Drives –osaston työntekijät, jotka ovat toivottaneet minut tervetulleeksi mukavaan työyhteisöönsä.

Ennen kaikkea kiitos kuuluu kuitenkin avovaimolleni Miialle, jonka tukemana olen diplomityötäni pystynyt tekemään kahdessa kaupungissa asuen.

Helsingissä 30.09.2004

Mika Talonpoika

TIIVISTELMÄ

LAPPEENRANNAN TEKNILLINEN YLIOPISTO

Sähkötekniikan osasto

Tekijä: Mika Talonpoika

Nimi: **SYÖTTÖJÄNNITTEEN JÄNNITEHÄIRIÖT PAPERIKONEEN
SÄHKÖKÄYTÖSSÄ**

Diplomityö

Vuosi: 2004

79 s, 22 kuvaa, 3 taulukkoa ja 5 liitettä

Tarkastaja: Professori Juha Pyrhönen

Hakusanat: Sähkökäyttö, linjakäyttö, syöttöyksikkö, jännitealenema, jännitekatko

Keywords: Electrical drive, sectional drive, supply unit, voltage dip, voltage sag, voltage interruption

Diplomityön tavoitteena oli selvittää paperikonelinjakäyttöjen toimintaa syöttöjännitteen alenemien ja –jännitekatkojen aikana. Työssä haluttiin selvittää, millaisista häiriöistä laitteistot selviävät pysähtymättä ja kuinka laitteistojen immunitettia häiriöille voitaisiin parantaa.

Standardien esittämien jännitehäiriöiden siedon vaatimuksien lisäksi haluttiin selvittää olosuhteet, joissa asiakkaiden sähkökäytöt tulisi toimia. Näiden ongelmien ratkaisemiseksi selvitettiin laboratoriomittauksin tyristori- ja ISU –syöttöyksiköillä varustettujen linjakäyttöjen testilaitteistojen ominaisuuksia jännitteen alenemien aikana. Lisäksi selvitettiin paperikoneen muiden laitteistojen toimintaa jännitehäiriöiden aikana.

Avain sähkökäyttöjen jännitehäiriöiden siedon parantamiseksi löytyy ulkoisista energiavarastoista ja paperikoneen linjakäyttöjen hallitusta ohjaamisesta häiriöiden aikana. Näiden hyödyntäminen edellyttää kuitenkin työssä selvitetyn paperiprosessin ohjauksen tuntemista ratakaton aikana.

ABSTRACT

LAPPEENRANTA UNIVERSITY OF TECHNOLOGY

Electrical engineering

Author: Mika Talonpoika

Title: **SUPPLY VOLTAGE DISTURBANCES AT PAPER MACHINE DRIVES**

Master's thesis

Year: 2004

79 pages, 22 figures, 3 tables ja 5 appendixes

Supervisor: Professor Juha Pyrhönen

Keywords: Electrical drive, sectional drive, supply unit, voltage dip, voltage sag, voltage interruption

The goal of this master's thesis was to find out the ability of paper machine drives to function correctly during supply voltage dips and interruptions. The meaning was to find out the disturbance levels, which would trip the electrical drives and how the immunity for these disturbances could be increased.

The demands of the electrical standards for the voltage disturbance immunity were noticed and furthermore the circumstances at the end-user were noticed. To solve the problems, which appeared during voltage disturbances, there were done some laboratory tests with thyristor- and ISU –supply sections equipped test-multi-drives. In addition, there was studied the function of other electrical equipment in the paper machine during voltage disturbances.

There were found two most important ways to improve the immunity of the paper machine drives for the supply voltage disturbances – external electrical storages and the control of the drives. The use of these methods requires good knowledge of the control of paper making process.

SISÄLLYSLUETTELO

SISÄLLYSLUETTELO	5
KÄYTETYT MERKINNÄT JA LYHENTEET	7
1. JOHDANTO	10
1.1 STANDARDIEN YHTEENSOPIVUUS JA TOISTENSA KATTAVUUS	11
1.2 STANDARDIT JÄNNITTEEN ALENEMISTA JA -KATKOISTA.....	12
1.2.1 STANDARDI VERKKOJÄNNITTEEN LAADULLE	12
1.2.2 STANDARDIT SÄHKÖLAITTEIDEN SYÖTTÖJÄNNITEHÄIRIÖIDEN SIEDOLLE	13
1.2.3 STANDARDIEN VAATIMUKSET SÄHKÖMOOTTORIKÄYTTÖJEN SYÖTTÖHÄIRIÖIDEN SIEDOLLE.....	15
1.3 JÄNNITTEEN ALENEMIEN JA JÄNNITEKATKOJEN SYITÄ	16
1.3.1 JÄNNITEHÄIRIÖT TEHTAAN SÄHKÖVERKOSSA.....	20
1.3.2 VERKKOVIAN VAIKUTUKSIEN RAJOITTAMINEN.....	20
1.3.3 VERKON SUOJALAITTEIDEN AIHEUTTAMAT JÄNNITEKATKOT	21
1.4 ENSIÖVIAN AIKAISET JÄNNITTEET	22
1.5 JÄNNITTEEN ALENEMIEN JA JÄNNITEKATKOJEN AIHEUTTAMAT KUSTANNUKSET	23
1.6 TYÖN SISÄLTÖ JA TAVOITTEET	25
2. SÄHKÖMOOTTORIKÄYTÖT PAPERIKONEISSA	26
2.1 SUORAAN VERKKOON KYTKETTY OIKOSULKUMOOTTORIKÄYTTÖ.....	26
2.1.1 LYHYEN JÄNNITTEEN ALENEMAN AIHEUTTAMAT YLIVIRTA- JA VÄÄNTÖMOMENTTIPIIKIT	28
2.2 SÄÄDETTÄVIEN KÄYTTÖJEN TASASUUNTAUSOSA.....	29
2.3 DIODISYÖTTÖYKSIKKÖ.....	31
2.3.1 RINNANKYTKETYT TASASUUNTAUSSILLAT	32
2.4 TYRISTORISYÖTTÖYKSIKKÖ	34
2.5 ISU-SYÖTTÖYKSIKKÖ	35
2.5.1 ISU:N OHJAUksen PERIAATTEITA.....	37
3. SYÖTTÖYKSIKÖIDEN TOIMINTA JA MAHDOLLISET ULKOISET	
ENERGIAVARASTOT	39
3.1 DIODISYÖTTÖYKSIKÖN OHJAUkseSTA	39
3.2 TYRISTORISYÖTTÖYKSIKÖN OHJAUkseSTA	40
3.2.1 TYRISTORISYÖTTÖYKSIKKÖ JARRUTUKSESSA	42
3.3 ISU –SYÖTTÖYKSIKÖN OHJAUkseSTA.....	44
3.3.1 ISU:N KUORMITETTAVUUS JÄNNITTEEN ALENEMAN AIKANA	45
3.3.2 VÄLIPiIRIJÄNNITTEEN SÄÄTÖ	47
3.3.3 OHJAUS VERKKOHÄIRIÖSSÄ.....	47

3.4	SÄHKÖKÄYTÖN ULKOINEN LISÄENERGIA	48
3.4.1	SÄHKÖENERGIAN VARASTOINNIN VAIHTOEHDOT	49
3.4.2	AKUT	49
3.4.3	POLTTOKENNOT.....	53
3.4.4	VAUHTIPYÖRÄT.....	55
3.4.5	SUPRAJOHTAVA MAGNEETTINEN ENERGIAVARASTO	58
3.4.6	SÄHKÖKEMIAALLISET KONDENSAATTORIT	60
4.	PAPERIKONE SÄHKÖHÄIRIÖN AIKANA	63
4.1	PAPERIKONEIDEN SUUNNITTELUPERIAATTEISTA SÄHKÖJÄRJESTELMIEN HÄIRIÖIDEN KANNALTA	63
4.2	PAPERIKONEEN TEHON TARPEESTA JÄNNITEHÄIRIÖN AIKANA.....	65
4.2.1	PAPERIKONEEN LINJAKÄYTÖN JAOTTELU	65
4.2.2	VIIRA- JA PURISTINOSAN OHJAUS RATAKATKOSSA	66
4.3	MITTAUKSET	67
4.3.1	TSU –SYÖTTÖYKSIKÖLLÄ VARUSTETTU LINJAKÄYTTÖ JÄNNITTEEN ALENEMAN AIKANA	69
4.3.2	ISU –SYÖTTÖYKSIKÖLLÄ VARUSTETTU LINJAKÄYTTÖ JÄNNITTEEN ALENEMAN AIKANA	73
4.4	KÄYTTÖJEN HALLITTU OHJAAMINEN JÄNNITTEEN ALENEMIEN AIKANA	75
5.	YHTEENVETO	77
	LÄHDELUETTELO	78
	LIITTEET	

KÄYTETYT MERKINNÄT JA LYHENTEET

roomalaiset aakkoset:

a	vuosi, integroinnin alaraja
b	integroinnin yläraja
C	kapasitanssi
D	kytkentäkerroin, juoksupyörän halkaisija
W_{\max}	suprajohtavaan käämiin varastoitunut maksimienergia
E_{v20}	roottorin vastasähkömotorinen voima
f	taajuus
h	putkiston vastapaine
I_s	suprajohtavan käämin virta
I_k	oikosulkuvirta
I_2	roottorivirta
I_d	jännite hakkurin syötön virta, pitkittäinen virran komponentti
I_{dc}	jännite hakkurin kuorman virta
I_q	poikittainen virran komponentti
$I_{10s/60s}$	Sallittu 10 s:n kuormitusvirtajakso, jonka jälkeen virta pakotetaan pienemmäksi 50 s:ksi.
L	induktanssi
L_s	suprajohtavan käämin induktanssi
n	pyörimisnopeus
P	teho
P_{δ}	ilmaväliteho
P_j	jarrutusteho
P_d	tasajännitelähteestä otettu teho
P_{dc}	jännitehakkurin kuorman teho
p	napapariluku
Q_{\max}	käämin maksimisähkövaraus
R_2	roottorin resistanssi

R_c	kondensaattorin sisäinen resistanssi
R_{mek}	sijaiskytkennän lisäresistanssi
R_s	sisäinen resistanssi
s	suhteellinen jättämä
T	jakson aika, vääntömomentti
T_{em}	sähköinen vääntömomentti
T_s	kytkentäjakson aika
t	aika
t_j	jarrutusaika
t_{on}	tehokytkimen kiinnioloaika
t_{off}	tehokytkimen aukioloaika
Δt_1	jännitteen aleneman kesto aika
Δt_2	jännitekatkon kesto aika
U	verkon pääjännitteen tehollisarvo
U_d	tasasuunnattu jännite
U_{dc}	välipiirijännite
U_{max}	käämin maksimijännite
U_n	nimellinen jännite
U_s	suprajohtavan käämin jännite käämiin varastoitunutta energiaa purettaessa
U_v	verkon vaihejännitteen tehollisarvo
U_{vvs}	verkkovaihtosuuntaajan jännite
U_{neg}	vaihtojännitteen negatiivinen puolijakso
U_{pos}	vaihtojännitteen positiivinen puolijakso
ΔU_1	jännitteen alenema
ΔU_2	jännitekatkon aikainen jännitteen alenema
u	vaihtojännite
u_d	piiriä syöttävä tasajännite
u_{dc}	kuorman tasajännite
W_j	jarrutusenergia
X	verkkovaihtosuuntaajan ja verkon välinen reaktiivinen impedanssi.
$X_{\sigma 20}$	roottorin hajareaktanssi

kreikkalaiset aakkoset:

a	jännitteiden välinen vaihesiirto
w	synkroninen kulmanopeus, kulmanopeus
y_s	staattorikäänivuo
y_d	pitkittäinen käänivuovektorin komponentti
y_q	poikittainen käänivuovektorin komponentti

lyhenteet:

AFC	Alkaline Fuel Cell
CENELEC	Comité Européen de Normalisation Electrotechnique
DMFC	Direct Methanol Fuel Cell
DSU	Diode Supply Unit
DTC	Direct Torque Control
Dy	Muuntajan kytkentä, KOLMIO-tähti
Dyd	Muuntajan kytkentä, KOLMIO-tähti-kolmio
Yy	Muuntajan kytkentä, TÄHTI-tähti
Yyd	Muuntajan kytkentä, TÄHTI-tähti-kolmio
EU	Euroopan Unioni
EFTA	European Free Trade Area
IEC	International Electrotechnical Commission
IEEE	Institute of Electrical and Electronics Engineers, Inc
IGB	Insulated Gate Bipolar
IGBT	Insulated Gate Bipolar Transistor
ISO	International Organization for Standardization
ISU	IGBT Supply Unit
GTO	Gate Turn Off
LCL	kela-kondensaattori-kela
MCFC	Molten Carbonate Fuel Cell
PAFC	Phosphoric Acid Fuel Cell
PEMFC	Proton Exchange Membrane Fuel Cell
RFC	Reversible Fuel Cell
SOFC	Solid Oxide Fuel Cell

1. JOHDANTO

Teollisuustuotannossa on aina pyritty parantamaan tuotantolaitteiden käyttöastetta kilpailukyvyn ylläpitämiseksi. Eväitä laitteistojen hyvään käytettävyyteen on etsitty kehittämällä kunnossapitoa, josta viime aikoina on käytetty myös tätä uudempaa käsitettä - käynnissäpito. Laitteistojen käytettävyyttä voidaan kuitenkin parantaa myös monilla muilla keinoin, ja yksi keino on ottaa huomioon käyttäjän mahdolliset ongelmat jo laitteistoja valmistettaessa. ABB Oy:n Pulp & Paper Drives –yksikkö onkin halunnut kiinnittää huomionsa entistä parempien laitteistokokonaisuuksien valmistamiseen. Kehityksen kohteena tällä erää on sähkökäyttöjen toiminta jännitteen alenemien ja lyhyiden jännitekatkojen aikana.

Maailman eri kolkissa sijaitsevat teollisuuslaitokset ovat melko eri-arvoisessa asemassa jännitehäiriöiden suhteen ilmaston, maantieteellisen sijainnin, kulttuurin ja valtioiden varallisuuden seurauksesta. Näin ollen sähkönverkojen siirtovarmuus vaihtelee suuresti niin maanosien kuin saman maanosan eri valtioidenkin kesken. ABB Oy haluaa kuitenkin valmistaa sähkölaitteistoja, joita voidaan käyttää kaikilla markkina-alueilla.

Sähköverkossa tapahtuvia jännitehäiriöitä on käsitelty eri standardoimisjärjestöjen standardeissa ja ne esittävät vaatimuksia niin tuotetulle sähkölle kuin sähköä kuluttaville sähkölaitteillekin. Vaatimukset sähkölaitteiden jännitehäiriöiden siedolle ovat valmistajan kannalta melko helposti täytettävissä, ja standardit eivät sinänsä ole avainkysymyksenä määritettäessä häiriösietoisuutta. Ongelmana ovatkin jännitehäiriöt, joiden kanssa asiakkaat joutuvat tekemisiin. Asiakkaiden tarpeisiin voidaan joissakin määrin vastata rakentamalla paperikoneen sähkökäyttölaitteisto sellaisista laitteista, jotka ominaisuuksillaan muodostavat jännitehäiriöitä hyvin sietävän kokonaisuuden.

1.1 Standardien yhteensopivuus ja toistensa kattavuus

Sähköverkkoon sähköä tuottaville laitoksille ja verkkoon liitetyille kulutuslaitteille esitetään eri standardisoimisjärjestöjen julkaisemia standardeja jännitehäiriöiden osalta. Eri järjestöjen standardit ovat maailmanlaajuisia, maanosia tai yksittäisen maan kattavia. Ne ovat usein yhteneviä keskenään, mutta esimerkiksi kansallisiin standardeihin tehdyt lisäykset on sähkökäyttäjien valmistajan otettava huomioon.

Maailmanlaajuisessa IEC-standardisoimisjärjestössä (International Electrotechnical Commission) on jäsenenä 64 maata. Kuitenkin järjestön standardit ovat pohjana yli sadan maan kansallisille standardeille ja määräyksille. IEC -standardisoimisjärjestön tehtävänä on julkaista kansainvälisiä sähkö- ja elektroniikka-alan standardeja. /1/

Eurooppalaisen standardisoimisjärjestön CENELEC:n (Comité Européen de Normalisation Electrotechnique) tehtävänä on luoda sähköalan EN -standardit. Nämä mahdollistavat EU- (Euroopan Unioni) ja EFTA -maiden (European Free Trade Area) sähköteollisuudelle yhtenäisen markkina-alueen. EN -standardeista noin 90 % on yhteneviä IEC -standardien kanssa, mutta käytettäessä EN -standardeja on niiden varsinainen tekninen osa luettava alkuperäisestä IEC -standardista. Tämän lisäksi on kuitenkin tarkistettava CENELEC:n tekemät muutokset EN -standardiin. /1/

Suomen standardeista vastaa Suomen standardisoimisliitto SFS ry, joka on jäsenenä kansainvälisessä standardointiliitossa ISO:ssa (International Organization for Standardization) ja eurooppalaisessa standardointijärjestössä CEN:ssä (Comité Européen de Normalisation). Suomessa sähkötekniikan alan standardien valmistelun hoitaa standardisoimisjärjestö SESKO ry, joka on Suomen standardisoimisliitto SFS ry:n jäsen. SESKO:n työn tuloksena Suomessa on standardikokoelma, joka vastaa maan tarpeita ja sisältää kansainvälisten ja eurooppalaisten sopimusten edellyttämät kansalliset standardit. Näistä standardeista käytetään nimitystä SFS -standardit. /1/

1.2 Standardit jännitteen alenemista ja -katkoista

Jännitealenemia ja -katkoja käsittelevien standardien sisällön voidaan ajatella jakaantuneen kahteen osaan. Toinen osa käsittelee vaatimuksia tuotetulle sähkön laadulle ja toinen niitä häiriöolosuhteita, joista sähkölaitteiden on selviydyttävä. Sähkölaitteiden toiminta erilaisissa häiriötiloissa jaetaan immunitetiluuksiin, ja nämä luokat ovat vaatimuksina riippuen jännitealeneman suuruudesta. Tuotetun sähkön laadulle esitetään vaatimuksia EN –standardissa 50160 ja sähkölaitteiden häiriösietoisuudelle on esitetty vaatimuksia IEC –standardissa 61800-3 ja IEC –standardissa 61000-2-4.

Jännitteen alenemista käytetään joissakin yhteyksissä sanaa ”jännitedippi”, joka on lähtöisin englanninkielestä ”voltage dip”. Tätä käytetään jännitealenemista IEC –standardien yhteydessä. Yhdysvaltalaiset IEEE -standardit (Institute of Electrical and Electronics Engineers, Inc) puolestaan käyttävät jännitteen alenemasta sanoja ”voltage sag”. /2/

1.2.1 Standardi verkkojännitteen laadulle

Sähköverkon jännitteen laatua voidaan mitata monilla keinoin. Yhtenä EN 50160 standardin laatuvaatimuksena jännitteen vaihtelulle on, että normaaleissa käyttöolosuhteissa, poislukien keskeytykset, jokaisen viikon aikana 95 % jakelujännitteen tehollisarvojen 10 minuutin keskiarvoista tulee olla välillä $U_n \pm 10\%$. /3/

Standardi ottaa huomioon myös jännitteen nopean vaihtelun sähköverkossa. Jännite voi nopeasti vaihdella normaalissakin verkon käytössä, jos verkkoon kytketään laitteita tai jo kytketyn sähkökäytön kuormitus vaihtelee. Jännitteen vaihtelu on yleensä vain noin 5 %:a nimellisestä jännitteestä, mutta jopa 10 %:n nimellisjännitteen vaihtelu on tavanomaista muutamia kertoja päivässä. Jos jännite kuitenkin vaihtelee siten, että se on pienempi kuin 90 %:a nimellisestä jännitteestä, ei kyse ole enää normaalista vaihtelusta. Tällöin jännitteen vaihtelusta käytetään nimitystä jännitteen alenema. /3/

Jännitteen alenema voi olla seurausta jakeluverkon tai verkkoon liitetyn laitteen viasta. Niitä on vaikea ennustaa ja alenemien määrään vuodessa vaikuttaa jakeluverkon rakenne sekä liityntäpisteen sijainti verkossa. Normaalisti alenemia on 10 – 1000 vuodessa ja suurin osa alenemista kestää alle sekunnin. Näiden yhteydessä ei jännite yleensä alene yli 60 %:a. Alenema voi kuitenkin olla satunnaisesti edellistäkin suurempi ja sen kesto voi olla pidempi. Kytettäessä sähköverkkoon laitteita voi 10 – 15 %:n jännitteen alenemia esiintyä useastikin. /3/

Jännitteen alenemien lisäksi sähköverkossa esiintyy jännitekatkoja. Katkoista 70 %:a kestää alle sekunnin, kun lyhyitä katkoja kaiken kaikkiaan voi vuodessa olla kymmenestä muutamiin satoihin. Standardeissa lyhyinä katkoina käsitellään yleensä alle minuutin kestäviä katkoja. /3/

Tässä diplomityössä keskitytään kuitenkin katkoihin, joilla on suurin taloudellinen vaikutus tuotannon menetyksiin. Näiden katkojen kesto ei ylitä 1,5 s:a. Tämä siksi, että puhuttaessa paperikonekäyttäjien jännitekatkoista tai jännitteen alenemista ovat ne tyypillisesti kestoiltaan 10 – 600 ms:a ja harvoin edes 1500 ms:a eikä koskaan yli 5000 ms:a. /4/

1.2.2 Standardit sähkölaitteiden syöttöjännitehäiriöiden siedolle

IEC –standardi 61800-3 käsittelee sähkömagneettisten häiriöiden aiheuttamia olosuhteita, joissa sähkömoottorikäyttöjen on toimittava. Toiminta jaetaan kolmeen immunitetilokkaan A, B ja C, jotka edellyttävät käyttäjiltä alla mainittua toimintaa tietyille häiriöolosuhteille.

Immunitetilokkien mukaiset toiminnot:

- Luokassa A ei käytössä ole havaittavissa toiminnan ominaispiirteiden muutoksia,
- luokassa B käytössä on havaittavissa toiminnan ominaispiirteiden muutoksia,

- luokassa C käytössä on muutoksia toiminnan ominaispiirteissä - esimerkiksi laitteen sammuminen.

Liitteestä 1 on luettavissa kokonaisuudessaan standardin IEC 61800-3 mukaiset sähkökäyttöjen hyväksymiskriteerit sähkömagneettisia häiriöitä vastaan.

Näitä samoja sähkömagneettisen häiriön siedon luokituksia on käytetty myös määrittämään sähkömoottorikäyttöjen toimintaa syöttöjännitehäiriöissä muun muassa ABB Oy:lle tehdyssä diplomityössä, joka tutkii verkkovaihtosuuntaajan häiriösietoisuutta. /5/

Sähkölaitteiden käyttöympäristöt, jossa laitteen on toimittava, on jaettu IEC –standardissa 61000-2-4 häiriöiden amplitudien perusteella kolmeen luokkaan. Tämä on nähtävissä liitteestä 2. Standardi luokittelee jännitteen vaihtelun aikaiset amplitudit suhteessa nimelliseen jännitteeseen, häiriön kestäessä alle minuutin. Sähkölaitteille standardi puolestaan määrittää käyttöympäristön niiden käyttökohteiden mukaan. Jos käyttökohteen kanssa samassa teollisuuslaitoksen verkossa on:

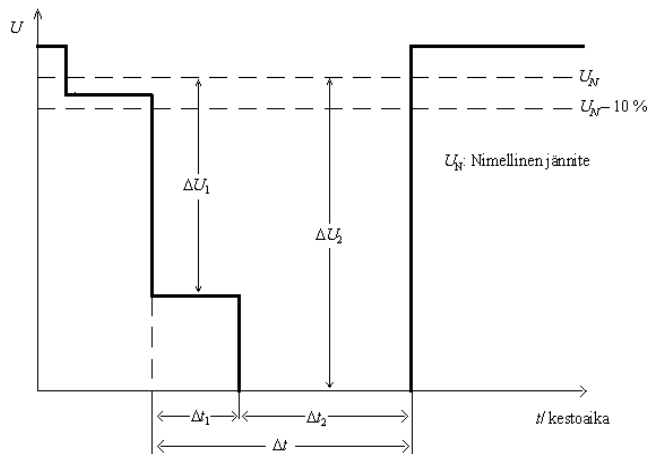
- kuormia, jotka on syötetty normaalisti tehoelektroniikan avulla,
- hitsauskoneita,
- suuria usein käynnistettäviä moottoreita tai
- nopeasti vaihtelevia kuormia,

kuuluvat ne luokkaan 3. Tämän perusteella sähkömoottorikäytöt kuuluisivat tähän luokkaan, mutta IEC –standardin 61800-3 mukaan näin on vain, jos asiasta on erikseen sovittu laitteiston valmistajan ja asiakkaan kesken. Muutoin sähkömoottorikäytöt kuuluvat luokkaan 2. Luokassa 2 jännite voi liitteen 2 mukaan olla ± 10 %:a nimellisestä jännitteestään, kun luokassa 3 se voi pienimmillään olla -15 % nimellisestä jännitteestä. /6/ Kyseinen jännitevaihtelu on siis otettava huomioon jo moottorikäyttöjen suunnittelu vaiheessa. ABB onkin näin tehnyt, mutta 15 %:n alenema on sen verran suuri, että asiakkaille on luvattu laitteiden toimivat normaalisti vain lyhytaikaisessa 0,5 – 1 s:a kestävässä alenemassa /7/. Tämä on kuitenkin pääsääntöisesti seurausta vain sähkömoottorikäyttöjen sähköisestä mitoittamisesta, eikä laitteiden huonoista

ominaisuuksista. Ylimoittaminen on kallista, mutta näin voidaan tehdä, jos asiakas on valmis siitä maksamaan.

Verkossa tapahtuvista tyypillisistä jännitteen amplitudin vaihteluista on kuvaajia IEC standardissa 61000-2-1.

Jännitevaihteluita pahempia häiriöitä ovat syöttöjännitteessä tapahtuvat alenemat ja lyhyet sähkökatkot. Jännitteen alenemaksi tai jännitekatkoksi määritellään häiriö, jonka aikana jännitteen amplitudi on 10 – 100 %:a pienempi kuin nimellisessä jännitteessä ja häiriö kestää alle yhden minuutin. Jännitteen aleneman aikaista amplitudia havainnollistaa kuva 1.



Kuva 1. Jännitteen aleneman ja jännitekatkon aikaiset jännitteen amplitudit, jossa ΔU_1 vastaa jännitteen alenemaa ja ΔU_2 vastaa jännitekatkon aikaista jännitteen alenemaa. Ajat Δt_1 ja Δt_2 ovat aikoja, joiden ajan jännitteet ovat alentuneet. /8/

1.2.3 Standardien vaatimukset sähkömoottorikäyttöjen syöttöhäiriöiden siedolle

Sähkömoottorikäyttöjen immuniteettiluokaksi jännitteen alenemia ja jännitekatkoja vastaan määritetään C eli liitteen 1 mukaisesti ei itsestään häiriöstä toipuva. Standardi kuitenkin edellyttää, että valmistaja tuo käyttäjän tietoisuuteen, kuinka laite käyttäytyy näissä olosuhteissa. /9/

Laitteistovalmistaja voi todeta sähkökäytön toiminnan syöttöjännitteen alenemissa ja jännitekatkoissa laskemalla, simuloimalla tai käytännön testein. Jännitekatkotesti normaalin ajon aikana voidaan suorittaa melko helposti. Tämä voidaan tehdä kytkemällä laitteiston pääkatkaisijalla lyhyt aikaisesti sähköt pois päältä ja takaisin. Laitteiston turvallisuus on kuitenkin taattava. Testiä tehtäessä on kuitenkin huomioitava, että jännitekatko paperikoneen sähkökäytölle voi rikkoa sähkökäytön lisäksi muitakin koneen laitteistoja. /9/

Sähkömoottorikäytöt voidaan ohjelmoida toimimaan monilla eri tavoin, jotta ne selviytyisivät lyhyistä jännitteen alenemista ja jännitekatkoista. Yksi menetelmä on käytön automaattinen käynnistäminen vauhtikäynnistyksenä. Tässä on kuitenkin otettava huomioon turvallisuus ja vaatimukset laitteiston käynnistämiseksi. Vastuu automaattisissa käynnistyksissä onkin käyttäjällä tai laitteiston asentajalla eivätkä standardit ota niihin kantaa /9/.

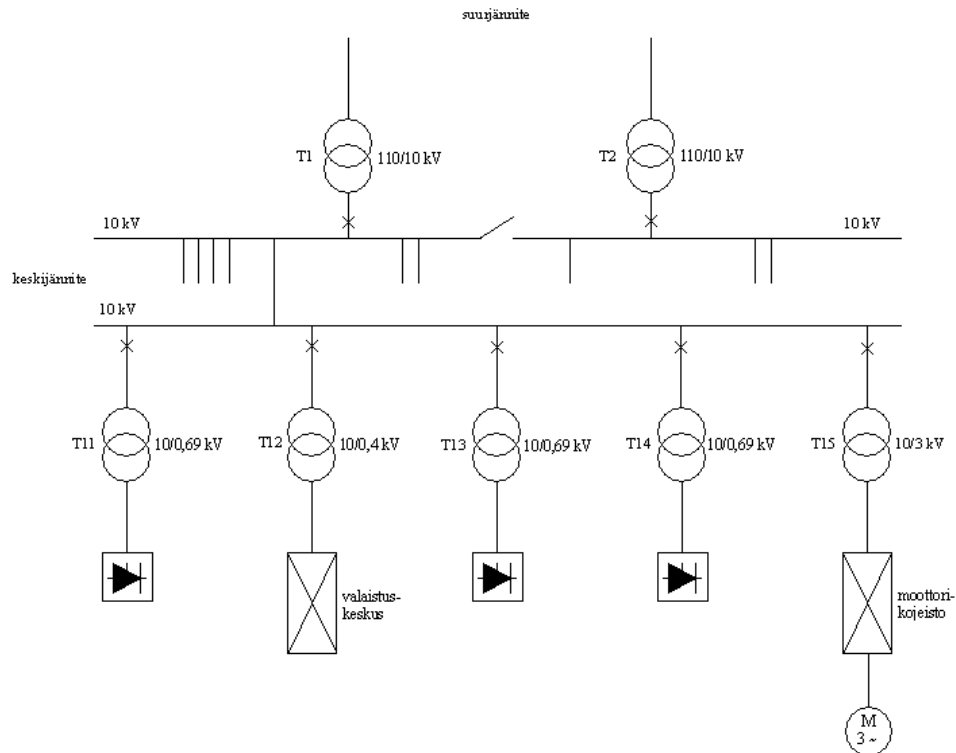
Sähkömoottorikäyttöille vaatimuksia asettava standardi IEC 61800-3 on uusiutunut vuoden 2004 elokuussa. Verrattaessa uuden standardin esittämiä vaatimuksia edeltäviin, eivät ne ole juurikaan muuttuneet. Uusi standardi selittää aiempaa tarkemmin jännitteen alenemien ja jännitekatkojen vaikutuksia sähkökäyttöihin. Standardissa on myös kerrottu, kuinka ohjatut ja ohjaamattomat tasasuuntaussillat eroavat toisistaan jännitteen alenemien osalta. Lisäksi standardi kertoo, kuinka sähkömoottorikäyttöjen immuniteettia syöttöjännitteen häiriöille voidaan parantaa.

Ainut konkreettinen muutos aiempiin standardeihin on, ettei uusi standardi vaadi sähkökäyttöiltä täyttä immuniteettia luokan 3 mukaisille häiriöille.

1.3 Jännitteen alenemien ja jännitekatkojen syitä

Jännitteen alenemia ja jännitekatkoja esiintyy sähköverkon kaikissa osissa. Osa häiriöistä on pienjännitepuolella kojeistokohtaisia ja ne ovat usein seurausta sulakkeilla suojatun vikaantuneen laitteen aiheuttamasta oikosulusta tai pienjännitekojeistoon liitetyn

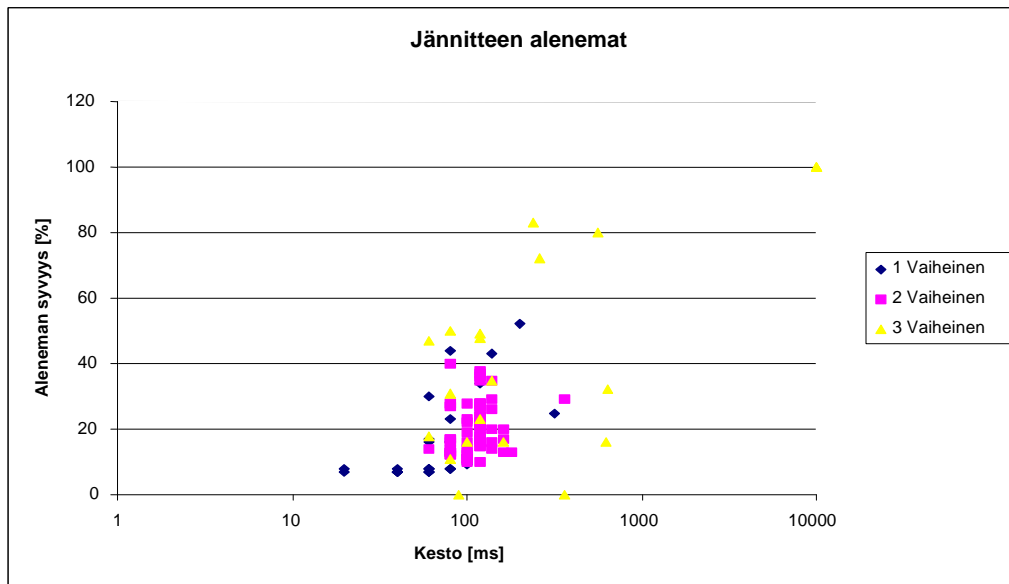
suuritehoisen oikosulkumoottorin käynnistyksestä. Tällaisilla häiriöillä on vain vähäinen vaikutus omalla muuntajalla keskijännitesyöttöön liitettyihin paperikoneen sähkökäyttöihin. Yleensä säädettävien sähkökäyttöjen ongelmaksi muodostuvat häiriöt, joita esiintyy kuvan 2 mukaisen tehtaan jakeluverkon keskijännitepuolella tai siirtoverkon suurjännitejakelussa.



Kuva 2. Paperikoneen linjakäytön syöttöryhmät on yleensä kytketty keskijännitteeseen kukin omalla 2 - 6 MVA:n jakelumuuntajalla.

Normaaliin sähköverkkoon jännitekatkoja ja jännitteen alenemia aiheuttavat muun muassa ympäristöolosuhteet, sää, verkkoon liitetyt laitteet ja verkon käyttötoimenpiteet. Yleensä häiriöt tapahtuvat sähkölaitoksen jakeluverkon alueella, mutta kantaverkon aiheuttamia häiriöitäkin esiintyy. Tyypillisiä kantaverkon häiriöitä ovat portaitaisen tehonmuutoksen aiheuttamat jännitteen ja taajuuden aleneminen, jotka ovat seurausta verkkoon liitetyn generaattorin eroon kytkeytymisestä /10/.

Vaikka pienjännitepuolen viat eivät yleensä vaikuta keskijännitepuolen jännitteeseen sulakesuojauksen ansiosta, voi keskijännitepuolelle jännitteen aleneman aiheuttaa pienjännitepuolen suurivirtainen kiskosto-oikosulku. Aleneman kesto riippuu vikaantunutta verkon haaraa syöttävän kuormakatkaisija aukeamisesta. Katkaisijan aukeaminen kestää yleensä 50 Hz:n taajuisessa sähköverkossa 100 – 120 ms:a, jonka jälkeen jännite palaa verkon muissa osissa normaaliksi. Keskijännitepuolella edellä mainitun pituisia jännitteen alenemia aiheuttavat salaman iskut sähköverkkoon ja niiden aiheuttamat viat. Jos vika poistuu itsestään, voidaan katkaisija yrittää sulkea pikajälleenkytkennällä 0,24 – 5 s:ssa /11/. Pikajälleenkytkennälle käytetään kuitenkin tyypillisesti 0,4 s:n jännitteetöntä aikaa, jonka aikana avojohtoverkon valokaari ehtii sammua /10/. Kuvassa 3 on esitetty erään eteläafrikkalaisen tehtaan sähköverkossa esiintyneet jännitteen alenemat lähes puolentoista vuoden ajalta. Vaikka jännitteen alenemat ovat seurausta harvinaisesta maanviljelyksen aiheuttamasta ongelmasta, vastaavat alenemien ominaisuudet ympäri maailmaa esiintyvien alenemien ominaisuuksia.



Jännitekatkoksia ja jännitteen alenemia tapahtuu Suomessa keskijänniteverkossa useita tuhansia vuodessa yhden jakeluyhtiön alueella. Nämä jakaantuvat vuoden kaikille kuukausille, vaikkakin kesäkuukausina häiriöitä esiintyy enemmän. Liitteessä 3 on taulukoituna Järvi-Suomen Energia Oy:n keskijänniteverkon keskeytykset ja niiden aiheuttajat vuosilta 1998 ja 1999. Liitteestä voidaan havaita, että pelkästään onnistuneita pikajälleenkytkentöjä oli vuoden 1999 aikana 5566. /10/

Jännitteen alenemien ja jännitekatkojen lisäksi yleisiä verkkohäiriöitä ovat yliaallot, joita pienjännitepuolelle kytketyt säädettävät moottorikäytöt, loistevalot ja muut tehoelektroniset laitteet aiheuttavat. Yliaallot voivat lämmittää jakelumuntajaa ja pienentävät näin ollen muuntajan kuormitettavuutta. Ylilämpenemisen seurauksesta voi muuntajan ylikuumentumissuoja toimia ja aiheuttaa näin ollen jännitekatkon. Moottorikäyttöjen aiheuttamia yliaalloja voidaan vähentää asentamalla verkkoon aktiivisia yliaaltosuotimia, estokelakompensointiyksiköitä tai imupiirejä.

Ympäristöolosuhteilla ja säällä on oma vaikutuksensa sähkön laatuun. Esimerkiksi Lapissa sopivien olosuhteiden vallitessa maaston huurtuminen ja kuuraantuminen on voimakasta ja tämä saattaa katkoa verkon johtimia tai kaataa puita johtimien päälle aiheuttaen sähkökatkoksia /10/. Sääolosuhteilla kuten myrskyillä on merkittävä vaikutus jännitekatkoihin ja jännitteen alenemiin, joita molempia esiintyy pikajälleenkytkentöjen yhteydessä. Tällöin pikajälleenkytkennät ovat seurausta johtimien päälle kaatuneista puista tai johtimia yhdistävistä tuulen irrottamista oksista ja niiden aiheuttamista maa- ja vaiheoikosuluista. Lisäksi pieneläimet kuten oravat ja linnut aiheuttavat jännitehäiriöitä liikkueensa sähköverkon johtimilla ja pylväissä.

Yli 80 %:a sähkönjakelun jännitekatkoista aiheutuu keskijänniteverkosta. Katkot ovat seurausta edellä mainitun tyyppisistä vioista tai suunnitelluista verkon kunnossapito- tai rakennustöistä. Näiden lisäksi vikoja aiheuttavat rakenne- ja materiaalivirheet, avojohtojen eristimien likaisuus sekä ulkopuoliset tekijät kuten maankaivu ja eläimet. /10/

1.3.1 Jännitehäiriöt tehtaan sähköverkossa

Edellä käsitellyt häiriöt ja niiden aiheuttajat ovat normaalin jännitejakelun ongelmia, mutta tehtaiden jännitejakeluverkon ongelmat ovat monelta osin yhteneviä. Jakeluverkon oikosulkujen ja maasulkujen lisäksi jännitehäiriöitä tehtaiden verkoissa aiheutuu keskijänniteverkkoon liitettyjen suuritehoisten moottoreiden käynnistämisestä. Lisäksi häiriöitä aiheuttavat pienjännitekojeistoissa tapahtuvat laiterikot kuten moottorikontaktorien ja kytkinvarokkeiden vikaantumisesta aiheutuneet valokaaret.

Vaikka suoraan verkkoon kytketyt oikosulkumoottorikäytöt ovat usein syynä jännitteen alenemiin, ovat ne itse samalla melko hyviä sietämään lyhytaikaisia jännitteen alenemia. Tällaisten moottorikäyttöjen ongelma on kontaktorin avautuminen, mutta niiden kestävä yhden jakson pituista jopa 50 %:n jännitteen alenemaa voidaan pitää hyvänä häiriönsieto-ominaisuutena /11/. ABB ilmoittaa vaihtosähköllä ohjattavien kontaktorien avautumisjännitteeksi 40 – 60 % nimellisestä ohjausjännitteestä /13/. Toisaalta säädettävät oikosulkumoottorimoottorikäytöt tehtaan jakeluverkossa ovat herkimpiä laitteita jännitehäiriöille. Näin ollen luotettavasti toimivien moottorikäyttöjen suunnittelun avuksi on jännitehäiriölle altistumisen todennäköisyyttä arvioimaan kehitetty menetelmä, joka laskee vikapaikasta etäisyyksiä sähköverkossa. Lasketun etäisyyden sisällä jännite voi mennä pienemmäksi kuin laitteen vaatima minimijännite /11/. Standardien vaatima minimijännite säädettäville käytöille on –15 %:a nimellisestä jännitteestä.

1.3.2 Verkkovian vaikutusten rajoittaminen

Verkkovian aiheuttaman jännitteen aleneman vaikutuksia voidaan rajoittaa sähköverkon suunnitteluvaiheessa. Suunnittelulla pyritään estämään vikojen vaikutusten leviäminen jakeluverkosta siirtoverkkoon eli keskijännitepuolelta suurjännitepuolelle. Vikojen vaikutukset voidaan minimoida mahdollisimman nopealla vian valvonnalla ja vikavirran katkaisulla. Jakeluverkon rengasmaisella rakenteella ja automaattisella kuormakytkimien ohjauksella voidaan vikapaikka erottaa muusta verkosta, jolloin vian vaikutus jää vähäisemmäksi. Myös pienjännitekojeistoissa käytettyjen sulakkeiden tyypeillä on oma vaikutuksensa keskijänniteverkon jännitteen alenemiin. Sulakkeissa oleva metallinen

johdin sulaa vikavirran vaikutuksesta ja erottaa näin ollen pysyvästi vikapaikan muusta sähköverkosta. Vikavirran kesto on kuitenkin riippuvainen sulakkeen tyypistä, joka on tyypillisesti virranrajoitussulake. Virranrajoitussulakkeessa valokaaren energialla sulatetaan sulakkeen sisällä olevaa hiekkaa, joka sammuttaa valokaaren hyvin nopeasti, jopa 5 ms:ssa. Oikosulkujen aiheuttamien jännitteen alenemien kannalta onkin hyvä, että teollisuudessa paljon käytetyt kahvasulakkeet ovat juuri virranrajoitussulakkeita. /11/

1.3.3 Verkon suojalaitteiden aiheuttamat jännitekatkot

Sähköverkossa esiintyvien lyhyiden jännitekatkojen määrään vaikuttavat verkoston suojauksessa käytetyt periaatteet. Suojaus voidaan toteuttaa sulakkeita säästävällä periaatteella tai sulakkeita kuluttavalla periaatteella. Sulakkeita kuluttavan periaatteen hyvänä puolena on, että vika rajoittuu hyvin pienelle alueelle jakeluverkossa. Huonona puolena kuitenkin on, että sulakkeet on käytävä manuaalisesti vaihtamassa, joten katkoajat muodostuvat pitkiksi. Sulakkeita säästävässä periaatteessa vikaantunutta verkon haaraa syöttävä kuormakatkaisija avataan jopa 1,5 jakson kuluttua vian alkamisesta. Näin ollen sulakkeita ei ehdi palaa. Katkaisijan annetaan olla auki 12 – 30 jaksoa, jonka jälkeen katkaisija ohjataan tyypillisesti kiinni 1 - 4 kertaa 1 – 2 s:n jaksoissa. Tavallisen kuluttajan kannalta katkot eivät ole häiritseviä, mutta teollisuuden sähköverkoissa sulakkeita säästävät lyhyet katkot vaikuttavat herkimpiin prosessilaitteisiin kuten sähkökäyttöihin./11/

Sähköverkon maasulun mittauksessa käytetyissä suojalaitteissa voi esiintyä ongelmia kolmannen yliaallon kanssa. Kolmatta yliaaltoa esiintyy muun muassa: epäsymmetrisesti kuormitetuissa verkoissa; verkoissa, joihin on liitetty tyristorikytkimillä ohjattuja laitteita kuten infrakuivaimia ja verkoissa, joihin on liitetty oikosulkumoottoreita. Näissä tilanteissa kolmas yliaalto summautuu nollajohtimeen ja voi aiheuttaa herkäksi säädetyn valvontalaitteen havahtumisen. Valvontalaite voi näin ollen ohjata verkon haaraa syöttävän katkaisijan auki ja aiheuttaa turhan jännitekatkon. Tämä on estettävissä nostamalla laukaisurajaa, mutta samalla suojauksen herkkyys kärsii. Kolmas yliaalto voidaan kuitenkin suodattaa mitattavasta johtimesta pois, jolloin maasulkusuojauksen taso voidaan säilyttää. /11/

1.4 Ensiövian aikaiset jännitteet

Jännitteen alenemat tai jännitekatkot voivat olla 1-, 2- tai 3-vaiheisia riippuen vian aiheuttajasta ja vikapaikan sijainnista sähköverkossa. Yksivaiheiset häiriöt ovat mahdollisia moottoria syöttävän keskuksen yhden vaiheen ja maan välisessä oikosulussa tai muussa yksivaiheisessa kuormitusilanteessa. Muutoin yksivaiheiset viat näkyvät vähintään kaksivaiheisina, vikapaikan ollessa muuntajan yläjännitepuolella. Yksivaiheisen vian vaikutus muuntajan toisiopuolen jännitteisiin on riippuvainen muuntajan kytkennästä ja sen maadoituksesta. Tämä on nähtävissä taulukosta 1, jossa on esitetty toisiopuolen jännitteet erilaisilla muuntajan kytkennöillä ensiön yksivaiheisen vian aikana.

Taulukko 1. Muuntajan toisiopuolen jännitteet ensiön yksivaiheisessa maan ja vaiheen välisessä oikosulussa erilaisilla kytkennöillä /11/. Linjakäyttäjien syötöissä ABB on käyttänyt ainakin Yy, Yyd, Dd, ja Dyd-kytkentäisiä muuntajia /14/.

muuntaja kytkentä (ensio/ toisio)	vaiheiden välinen			vaiheen ja maan välinen			osioita piirros
	U_{ab}	U_{bc}	U_{ca}	U_{a0}	U_{b0}	U_{c0}	
	0,58	1,00	0,58	0,00	1,00	1,00	
	0,58	1,00	0,58	0,33	0,88	0,88	
	0,33	0,88	0,88	—	—	—	
	0,88	0,88	0,33	0,58	1,00	0,58	

Kaksi- ja kolmivaiheisia alenemia ja katkoja aiheuttavat esimerkiksi vaiheiden väliset oikosulut keskijännitejakeleissa. Vaiheoikosulkuja aiheutuu edellisessä kappaleessa kerrotuista syistä.

1.5 Jännitteen alenemien ja jännitekatkojen aiheuttamat kustannukset

Suunnittelemattomat tuotantolaitteiden seisokit aiheuttavat aina ylimääräisiä kustannuksia. Näin ollen ei ole merkitystä onko seisokin syynä epäonnistunut kunnossapito eli tavanomaiset laiterikot vai tuotantolaitteiden pysähtyminen esimerkiksi jännitehäiriöön.

Kustannuksia aiheuttavat tekijät voidaan jakaa kolmeen luokkaan:

- Materiaalikustannukset: tuotannon menetykset seisokin ajalta, epäonnistuneeseen tuotteeseen käytetyistä materiaalit, epäonnistuneen tuotteen hävityskustannukset, ylimääräiset varastointikustannukset varmuusvarastoinnista.
- Työvoimakustannukset: laitteiston puhdistus- ja korjaustyöt.
- Välilliset lisäkustannukset: rikkoutuneiden laitteiden uusiminen, huonon toimitusvarmuuden seurauksesta menetetyt asiakassuhteet ja myöhästymissakot, joita laivojen lastauksen myöhästymisestä voi koitua. /11/

Jännitteen alenemien ja jännitekatkojen vaikutusta sähkökäyttöihin voidaan estää erilaisilla lisälaitteilla, jotka ovat eräänlaisia energiavarastoja. Näiden käyttäminen on kallista ja niiden rahallista hyötyä tulisi voida arvioida joillakin menetelmillä. Yksi hyödyn arviointimenetelmä on laskea erisuurten alenemien kustannukset verrattuna täydellisen jännitekatkon aiheuttamiin kustannuksiin ja antaa alenemille painokertoimia. Painokertoimet määräytyvät seuraavasti. Jos yli 50 %:a alentunut jännite, aiheuttaa 80 %:a täydellisen jännitekatkon aiheuttamasta kustannuksesta, on yli 50 %:n syvyisen aleneman painokerroin 0,8. Vastaavasti, jos 30 %:a alentunut jännite, aiheuttaa 10 %:a jännitekatkon aiheuttamasta kustannuksesta, on tämän aleneman painokerroin 0,1. Kun kaikille alenemille on painokertoimet määritetty, kartoitetaan erisuurten alenemien tapahtumatiheys. Tämän jälkeen tapahtumatiheydet kerrotaan vastaavalla painokertoimella

ja lasketaan tulot yhteen. Saatu summa kertoo, kuinka monen täydellisen katkon kustannukset kaikki jännitteen alenemat ja jännitekatkot aiheuttavat. Taulukko 2 selventää asiaa. /11/

Taulukko 2. Esimerkki painokertoimien avulla lasketusta jännitteen alenemien ja jännitekatkojen aiheuttamista kustannuksista verrattuna yhden katkon aiheuttamaan kustannukseen /11, dugan/.

Tapahtuma	Painokertoimet	Tapahtumia vuodessa	Vastaa katkojen lkm/ a
Jännitekatko	1	5	5
Jännitteen alenema > 50 %	0,8	3	2,4
Jännitteen alenema (50 – 30) %	0,4	15	6
Jännitteen alenema (30 – 10) %	0,1	35	3,5
Yhteensä			16,9

Taulukon esimerkkiä voitaisiin tarkentaa laskemalla yksivaiheisten ja kaksivaiheisten alenemien painokertoimet taulukossa olevien kolmivaiheisten alenemien lisäksi.

Valittaessa laitteistoratkaisua jännitehäiriöiden vaikutusten vähentämiseksi tulee määritettyjen painokertoimien avulla kartoittaa ratkaisun kustannustehokkuutta. Näin ollen laitteiston hankinnasta ja asennuksesta sekä kunnossapidosta aiheutuneita kustannuksia on verrattava vuositasolla saavutettaviin säästöihin. Näin ollen voidaan kartoittaa investoinnin takaisinmaksuaikaa. Säästöjä kartoitettaessa on kuitenkin huomattava, ettei mikään ratkaisu poista täysin kyseessä olevia ongelmia. /11/

1.6 Työn sisältö ja tavoitteet

Diplomityö keskittyy paperikoneen sähkökäyttöjen toimintaan jännitehäiriöiden aikana. Laitteistoja on tämän osalta kehitetty jo parin vuosikymmenen ajan ja tutkimus- ja kokemusperäistä tietoa on eri tahoilla runsaasti. Tieto on kuitenkin hajanaista ja sen hyödyntäminen on vaikeaa. Työn tarkoituksena on määrittää, kuinka suurista jännitehäiriöistä alenemien ja katkojen osalta erilaiset laitteistokokonaisuudet nykyisin selviävät ja mitä olisi tehtävissä ominaisuuksien parantamiseksi.

Työssä on tarkasteltu standardien sähkölaitteille ja sähköntuottajille asettamia vaatimuksia, jännitehäiriöitä ja niiden aiheuttajia, ABB:n paperikonelinjakäyttöjen laitteistojen ominaisuuksia ja eri toimintamahdollisuuksia sekä menetelmiä, joilla jännitehäiriösietoisuutta voidaan parantaa. Ominaisuuksia on testattu laboratoriomittauksin tyristori- ja ISU –syöttöyksiköllä varustetuilla linjakäyttöillä. Oletuksena on, että ohjaussähköt ovat varmennetut. Pääajatuksena laitteiden kehittämisessä on, että jännitehäiriöiden aiheuttamat tuotannon menetykset voitaisiin minimoida nykyistä lyhyemmällä seisokkiajoilla. Mahdollisia parannuskeinoja ovat linjakäyttöjen hallittu ohjaus ja ulkoisista energiavarastoista saatava lisäenergia häiriöiden aikana. Hallitulla ohjaamisella tarkoitetaan tilannetta, jossa jännitehäiriön sattuessa sallitaan paperiradan katkeaminen nykyistä lyhyemmällä tuotannon katkolla. Suurimmaksi ongelmaksi on osoittautunut paperikoneen viira- ja puristinosien sekä massapumppujen suuri tehon kulutus. Näille tulisi saada häiriöiden ajaksi normaalia toimintaa vastaava tehonsyöttö. Tätä tehoa vastaavan energian varastoinniseksi työssä on tutkittu nykyisiä sähköenergian varastoinnin vaihtoehtoja.

2. SÄHKÖMOOTTORIKÄYTÖT PAPERIKONEISSA

Paperitehtaat ovat sähkömoottoreiden suurkäyttäjiä. Keskikokoisessa tehtaassa on 3000 – 8000 sähkömoottoria, jotka pyörittävät pumppuja, puhaltimia, jauhimia, seuloja, hihnakuljettimia, itse paperikoneiden teloja ja monia muita laitteita. Moottorit ovat tavallisesti oikosulku- tai tasavirtamoottoreita, mutta yleensä joukossa on muutamia tahtikoneita suuritehoisissa käytöissä. Tahtikoneita esiintyy pienitehoisinakin nykyaikaisissa paperikoneiden linjakäytöissä, mutta tällöin moottorit ovat kestmagneettitahtikoneita ja niiden lukumäärä vaihtelee tehdaskohtaisesti muutamista kappaleista useisiin kymmeneen.

Käyttökohteesta riippuen ovat moottorit pyörineet sähköverkon taajuuden määräämällä vakionopeudella tai niiden nopeutta on voitu säätää. Pyörimisnopeussäätö on mahdollinen niin tasavirtakäytölle kuin vaihtovirtamoottorikäytöllekin. Molemmissa moottorikäyttötyypeissä on oltava erillinen ohjainlaite - tasavirtamoottoreille tasasuuntaussilta ja oikosulkumoottoreille taajuusmuuttaja. Molempien käyttötyyppien toiminta heikkenee jännitteen alenemien ja jännitekatkojen aikana, mutta tässä työssä keskitytään taajuusmuuttajakäyttöjen toimintaan jännitehäiriöiden aikana.

Tämä kappale käsittelee jännitteen alenemien ja jännitekatkojen vaikutusta suoraan verkkoon kytketyssä oikosulkumoottorikäytössä ja periaatteet taajuusmuuttajien erilaisista tasasuuntausosista.

2.1 Suoraan verkkoon kytketty oikosulkumoottorikäyttö

Suoraan verkkoon kytketty oikosulkumoottorikäyttö eli DOL –käyttö (Direct On Line) on kaikkein yleisin moottoreiden käyttötapa. Suosioon ovat vaikuttaneet käytön yksinkertaisuus, taloudellisuus ja oikosulkumoottorista saatava kohtalaisen suuri käynnistysvääntömomentti. Heikkona puolena on kuitenkin suuri käynnistysvirta, joka voi

aiheuttaa muita sähkölaitteita häiritsevän jännitteen aleneman konetta syöttävän sähköverkon osassa.

Vaikka oikosulkumoottori aiheuttaakin jännitteen alenemia, heikkenee sen omakin suorituskyky aleneman aikana. Tällöin suoraan verkkoon kytketyn kuormitetun oikosulkumoottorin nopeus laskee. Tämä on seurausta sähköisen vääntömomentin (T_{em}) pienentymisestä, mikä on suoraan verrannollinen jännitteen neliöön /15/.

$$T_{em} = \frac{pP_{\delta}}{w} = \frac{3pI_2^2 \cdot \frac{R_2}{s}}{w} = \frac{3p}{w} \cdot \frac{E_{v20}^2}{\left(\frac{R_2}{s}\right)^2 + X_{s20}^2} \cdot \frac{R_2}{s}, \quad (1)$$

missä	p	napapariluku
	P_{δ}	ilmaväliteho
	w	synkroninen kulmanopeus
	I_2	roottorivirta
	R_2	roottorin resistanssi
	s	suhteellinen jättämä

$$\frac{R_2}{s} = R_2 + R_{mek} \text{ mekaanista tehoa kuvaavan lisäresistanssin ja}$$

roottori-resistanssin summa epätahtikoneen sijaiskytkennässä

E_{v20} roottorin vastasähkömotorinen voima

X_{s20} roottorin hajareaktanssi.

Jännitteen pienentyessä moottorilta vaaditaan kuitenkin häiriötä edeltäneen tason tehoa, mikä näkyy virran kasvuna. Tällöin vaarana on moottorilähdön sulakkeiden palaminen. Jännitteen aleneman ollessa pieni mutta pitkäaikainen, on vaarana moottorin ylikuumentuminen ja tämän seurauksesta käämityksien palaminen. Käämityksien lämpeneminen on kasvaneen staattorivirran lisäksi seurausta roottorin lämpenemisestä. Roottori lämpenee jättämän kasvaessa. Lämpöä roottori luovuttaa säteilemällä ja johtumalla ilmavälin yli suoraan staattorikäämeihin. Ylikuumentamista edesauttaa moottorin rakenne. Tuulettajan siipi on suoraan kiinni moottorin akselissa ja näin ollen pyörimisnopeuden pienentyessä heikkenee moottorin jäähdytys.

Jännitteen palatessa normaalille tasolle kiihtyy moottori takaisin alkuperäiseen nopeuteensa. Nopeuden alentuminen ei ole kuitenkaan saanut alittaa kippivääntömomenttia vastaavaa pyörimisnopeutta, joka on tyypillisesti luokkaa 73 -95 %:a synkronisesta pyörimisnopeudesta.

Jännitteenaleneman sattuessa moottorin käynnistyshetkelle, on moottorin ottama käynnistysvirta normaalia pienempi. Samalla pienenee moottorin kehittämä vääntömomentti ja käynnistysaika pitenee /16/. Tämä on otettava huomioon, jos pitkäaikaisia alenemia on paljon, sillä yleensä jäähtynyt vakio moottori kestää 6 – 8 s:n pituisen käynnistysajan /16/. Oikosulkumoottorin käynnistämistä suoraan sähköverkkoon, kun jännite on alentunut, on kerrottu enemmän Auran ja Tonterin kirjoittamassa kirjassa Sähkömiehen käsikirja 3 /17/.

Oikosulkumoottorin roottorin sähköinen aikavakio on luokkaa 0,1 – 1,5 s. Nopean ja syvän jännitteen aleneman tai jännitekatkon aikana oikosulkumoottori syöttää kuorman mekaanisesta energiasta muunnettua sähkötehoa verkkoon roottorin aikavakion mukaan. Tämä voi aiheuttaa virran, joka vastaa käynnistysvirtoja suuruudeltaan, eli se voi olla 5 – 7 –kertainen moottorin nimelliseen kuormitusvirtaan verrattuna.

2.1.1 Lyhyen jännitteen aleneman aiheuttamat ylivirta- ja vääntömomenttipiikit

Vaikka jännitteen pitkäaikainen pienentyminen yleisesti ottaen pienentää oikosulkumoottorin vääntömomenttia, ei tilanne ole täysin sama lyhyissä, alle 100 ms:n kestävässä jännitteen alenemissa. Tällöin moottorin staattorikäänivuo (y_s) kasvaa jopa kolminkertaiseksi stabiilintilan käänivuohon nähden. Vuon kasvaminen on seurausta aleneman aikana pienentyneen jäännösvuon ja jännitteen palatessa normaaliksi muodostuvan käänivuon summautumisesta. Summavuon suuruus on riippuvainen oikosulkumoottorin avaruusvektorimallissa käytettyjen käänivuovektoreiden etäisyydestä. Etäisyys on pienimmillään aina jakson välein aleneman alkuhetkestä ja suurimmillaan puolenjakson välein. Vuo voi kasvaa epäedullisella hetkellä jännitteen kytkeytyessä niin

suureksi, että moottori kyllästyy. Myös aleneman syvyydellä on vaikutusta summavuon suuruuteen.

Aleneman vaikutuksesta muuttuneella käämivuolla on suuri vaikutus moottorin sähköiseen vääntömomenttiin (T_{em}), joka on riippuvainen virran ja käämivuovektorin välisestä kulmasta.

$$T_{em} = p(\mathcal{Y}_d I_q - \mathcal{Y}_q I_d) \quad (2)$$

missä	p	napapari-luku
	\mathcal{Y}_d	pitkittäinen käämivuovektorin komponentti
	\mathcal{Y}_q	poikittainen käämivuovektorin komponentti
	I_d	pitkittäinen virran komponentti
	I_q	poikittainen virran komponentti. /2/

Ruotsalaisen tutkijan väitöskirjassa esitettyjen simulointitulosten perusteella vääntömomenttipiikkien lisäksi myös virrat voivat olla hetkellisesti kymmenkertaisia nimellisiin virtoihin verrattuna jännitteen aleneman seurauksesta. /2/

2.2 Säädettyjen käyttöjen tasasuuntausosa

Paperiteollisuuden yleisimpiä säädettyjä moottorikäyttöjä ovat tasavirta- ja oikosulkumoottorikäytöt. Oikosulkumoottoreiden pyörimisnopeutta voidaan periaatteessa säätää monella eri tavalla, joita ovat muun muassa jättämäsäätö roottoriresistanssia muuttamalla, staattorijännitteen säätö, erilaiset jättämäenergian säädöt kaskadikytkennöillä ja moottorin syöttötaajuuden säätö. Käytännössä nykyaikaisissa tehdaslaitoksissa oikosulkumoottorin pyörimisnopeutta voi säätää ainoastaan taajuusmuuttajien avulla. Tässä tutkimuksessa keskitytäänkin- syöttötaajuuden säätöön taajuusmuuttajalla.

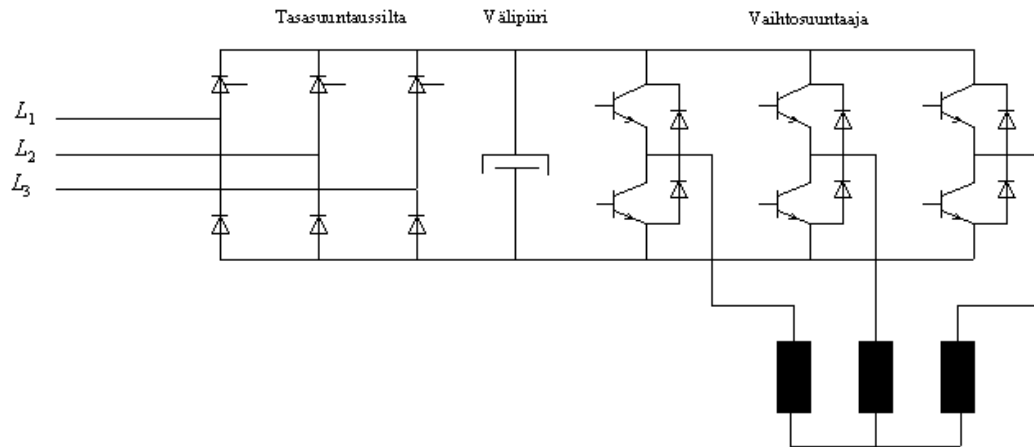
Oikosulkumoottoria ohjaava taajuusmuuttaja koostuu yleensä 6- tai 12-pulssisesta 3-vaiheisesta tasasuuntaussillasta, joka syöttää taajuudenmuuttajan välipiiriä. Tämän lisäksi taajuusmuuttajassa on kuvan 4 mukainen vaihtosuuntausosa, jolla haluttu pyörimisnopeutta

vastaavan taajuinen kolmivaihejännite muodostetaan moottorille. Tasasuuntaussillassa käytetään niin sanottuja sähköisiä venttiileitä ohjaamaan sähkön suuntaa. Venttiileinä on käytetty ohjaamattomia diodeja ja ohjattuja tyristereita sekä erityyppisiä transistoreita. Näin 3-vaiheisesta vaihtojännitteestä saadaan tasasuunnatun jännitteen keskiarvoksi U_d

$$U_d = \sqrt{2} \cdot \left(\frac{3}{p}\right) \cdot U_v = 1,35 \cdot U, \quad (3)$$

missä U_v verkon vaihejännitteen tehollisarvo
 U verkon pääjännitteen tehollisarvo. /15/

Ohjaamaton diodi tulee johtavaksi, kun sen anodilta katodille oleva jännite on positiivinen ja se sammuu jännitteen muuttuessa negatiiviseksi. Diodia sanotaan luonnollisesti kommutoivaksi. Tyristori ja transistori puolestaan voidaan ohjata johtavaksi millä hetkellä tahansa, jännitteen ollessa positiivinen anodilta katodille tai vastaavasti kollektorilta emitterille. Tyristori sammuu diodin tavoin jännitteen muuttuessa negatiiviseksi anodilta katodille. GTO –tyristori (Gate Turn Off) ja IGB –transistori (Insulated Gate Bibolar) voidaan lisäksi sammuttaa millä hetkellä tahansa. Näitä sanotaankin pakkokommutoiduiksi tehokytkimiksi. Tehokytkimien pakkokommunikointikyky onkin avain nykyisten verkkovaihtosuuntaajien hyviin ominaisuuksiin jännitteen alenemien siedossa.



Kuva 4. Kaksitasoisen taajuusmuuttajan periaatekuva, joka koostuu kuusipulssisesta tasasuuntaussillasta, välipiiristä ja vaihtosuuntaajasta. Tasasuuntaussillassa on käytetty tyristereja ja vaihtosuuntaajassa transistoreja. Vaihtosuuntausosa on toiminnaltaan nelikvadranttinen, joten moottori voitaisiin pysäyttää jarruttamalla sähköisesti, jos muuttajaan lisättäisiin jarrusilta tai välipiiriin jarrukatkoja.

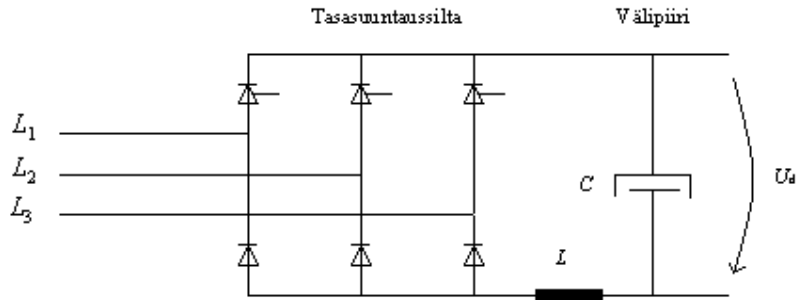
Tarkempia perusteita tasasuuntaussiltojen ja taajuusmuuttajien toiminnasta on kerrottu mm. Matti Mårdin kirjassa Sähkökäyttö ja tehoelektronikka /18/.

Kuvassa 4 on esitetty yksittäinen taajuusmuuttajakäyttö. Välipiiriin voidaan kuitenkin lisätä myös useampia vaihtosuuntaajia ja näin muodostuu niin sanottu linjakäyttö. Linjakäytön syöttöyksikkönä on käytetty diodi-, tyristori ja IGBT -syöttöyksiköitä (Insulated Gate Bipolar Transistor), joiden rakenteesta ja ominaisuuksista seuraavassa kappaleessa kerrotaan enemmän.

2.3 Diodisyöttöyksikkö

Yksinkertaisimmillaan taajuusmuuttajan tasasuuntausosana voidaan käyttää ohjaamatonta diodisiltaa. Tällöin verkkoon jarrutus ei ole mahdollista, sillä diodisiltoja ei ole mahdollista käyttää vastarinnankytkettyinä. ABB on käyttänyt linjakäytöissään ns. puoliksiohjattua diodisiltaa, jossa positiivisen tasasuuntauskiskon puoleiset diodit on korvattu tyristereilla. Tyristorien tehtävänä ei ole säätää normaalissa ajossa välipiirin jännitteen suuruutta, vaan

rajoittaa kytkentätilanteessa vaihtosuuntaajien kondensaattoreiden latausvirtaa. Tämä on latausvastusta parempi tapa toteuttaa virran rajoitus. Normaalissa ajossa tyristorit ohjataan täysin johtavaan tilaan, joten ne toimivat kuten diodit.



Kuva 5. Puoliksiohjatun diodisillan periaatekuva. ABB:n käyttämissä diodisilloissa tyristoreja ei voida sammuttaa ohjauspulsseilla.

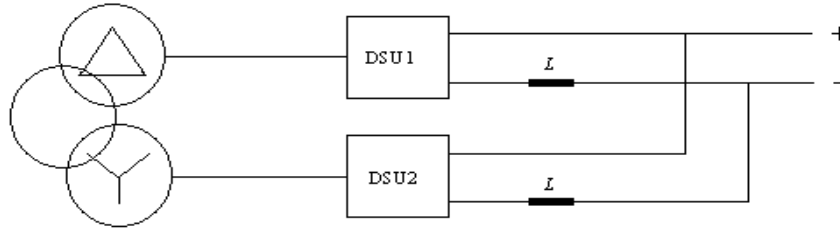
Puoliksiohjattuja diodisilloja on käytetty paperikoneiden viira- ja puristosilla, joissa käyttöjen verkkoon jarrutusta ei tarvita. Tämä johtuu siitä, että moottorikäytöt pysähtyvät muutenkin riittävän tehokkaasti nopeissa, imulaatikoissa ja teloissa syntyvien suurien kitkojen seurauksena.

ABB on käyttänyt syöttöyksiköidensä välipiireissä suodatuskuristinta estämään taajuusmuuttajien aiheuttamien suuritaajuisien harmonisten siirtymisen verkkoon. Harmonisia yliaaltoja suodattavat lisäksi vaihtosuuntaajiin sijoitetut välipiirin kondensaattorit, jotka toimivat myös energiavarastona.

2.3.1 Rinnankytketyt tasasuuntaussillat

Kuusipulssisen sillan asemesta voidaan käyttää 12-pulssista puoliksiohjattua siltaa. Näin ollen sillalla ei teoriassa tuoteta yleensä verkossa jo paljon esiintyviä 5.- ja 7.-yliaaltoja, vaan sillan tuottamien yliaaltojen alimmat järjestysluvut ovat 11. ja 13. /19/. Käytäntö on kuitenkin osoittanut, että 12-pulssista muuntaajaa käytettäessä 5.- ja 7.-yliaaltoja esiintyy yhteensä noin 4 % perusaallon kokonaistehollisarvosta /14/. Kaksitoistapulssisessa sillassa kytketään rinnan kahta kuusipulssisiltaa, mutta niiden syötöille järjestetään 30°:een

vaihesiirto muuntajalla, jolla on kaksi toisiokäämitystä. Toinen käämityksistä on kytketty kolmioon ja toinen tähteen. Kytkentää havainnollistaa kuva 6.



Kuva 6. 12-pulssinen puoliksiohjattu diodisyöttöyksikkö. /20/

Kaksitoistapulssista siltaa käytetään, kun tarvitaan suurta tehoa. Tämän lisäksi rinnankytketyt syöttöyksiköt parantavat laitteiston käyttövarmuutta. Siltoja voidaan käyttää itsenäisesti, jos toinen silloista vikaantuu. Tämä edellyttää kuitenkin, että sillat on mitoitettu riittävän suuri tehoiksi.

Kaksitoistapulssisen sillan rinnalle voidaan kytkeä toinen samanlainen silta, jolloin tasasuunnatun jännitteen pulssiluku on mahdollista nostaa jopa 24:ään erikoismuuntajia käyttäen. Näin ollen silta synnyttää 23:tta ja 25:tta yliaaltoa alimpina harmonisinaan /19/.

Pulssiluvun lisääminen kasvattaa sillasta saatavan tasajännitteen suuruutta. Esimerkiksi laskettaessa 12-pulssisen sillan tasajännite (U_{d12}),

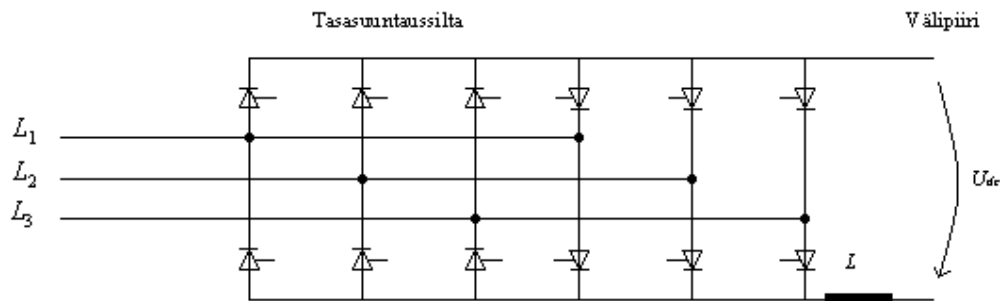
$$U_{d12} = \frac{1}{T} \int_a^b u \, dt = \frac{1}{T} \int_a^b \sqrt{2}U \sin wt \, dt = 1,40 \cdot U, \quad (4)$$

missä	T	jakson aika
	t	aika
	U	pääjännite
	u	vaihtojännite
	a	integroinnin alaraja
	b	integroinnin yläraja
	w	kulmanopeus,

voidaan huomata 12-pulssisillan tasajännitteen olevan 4 % suurempi kuin yhtälössä (3) esitetty 6-pulssisillan jännite. Näin ollen voidaan todeta pulssiluvun kasvattamisen parantavan syöttöyksikön häiriön sietokykyä jännitteen alenemissa.

2.4 Tyristorisyöttöyksikkö

Tyristorisyöttöyksikköä on pitkään käytetty vaativissa linjakäytöissä oikean välipiirijännitteen muodostamiseksi. Tyristoreja ohjataan sopivilla sytytyspulssilla, jotta välipiirijännite olisi haluttu. Ohjauskulmien pienentyessä saatava välipiirijännite U_{dc} kasvaa ja ohjauskulmien suurentuessa jännite pienenee. Diodisyöttöyksiköstä poiketen on tyristorisyöttöyksiköllä mahdollista suorittaa verkkoon jarrutus, sillä silta sisältää vastarinnankytketyt 6-pulssisillat. Näin ollen kuvan 7 mukainen yksikkö koostuu 12:sta tyristorista ja välipiirin suodatuskelasta.

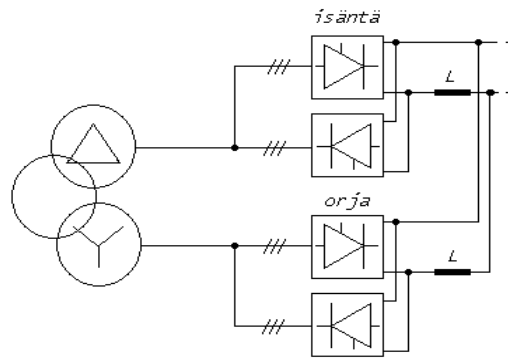


Kuva 7. Tyristorisyöttöyksikön periaatepiirros.

Syöttöyksikkö ei sisällä välipiirin kondensaattoreita, sillä ne sijoitetaan itse vaihtosuuntaajayksiköihin. Kondensaattorien liittymän taajuusmuuttajiin tulee olla mahdollisimman lyhyt, sillä suuritaajuisten virtapulssien modulointi välipiiristä aiheuttaa induktiivisia jännitepiikkejä kytkennässä käytetyissä johtimissa.

Tyristorisyöttöyksiköitä, joiden tasajännite on kuusipulssista, voidaan kytkeä kaksi rinnan. Näin saadaan aikaiseksi 12 –pulssinen tyristorisyöttöyksikkö. Lisäämällä yksikön rinnalle

vielä toinen samanlainen, mutta vastakkaiseen suuntaan kytketty 12 –pulssinen silta, saadaan kuvan 8 mukainen 12/12-pulssinen syöttöyksikkö, jonka jarrutusteho on yhtä suuri kuin moottoripuolen teho. Rinnankytketyillä yksiköillä on erilliset syöttökaapelit, pääkatkaisijat, erottimet ja käynnistuspainikkeet. Toinen yksiköistä toimii isäntäyksikkönä ja toinen orjana. Käytöissä, joissa vaadittava jarrutusteho $\leq 50\%$ moottoripuolen tehosta, voidaan käyttää jarrusiltana 6-pulssista siltaa. Tällöin on kuitenkin käytettävä jännitteen nostomuuntajaa jarrusillan yhteydessä mahdollisimman tehokkaan jarrutuksen aikaansaamiseksi. /21/ Jännitteenostomuuntajan käytöstä kuitenkin lisää kappaleessa 3.2.1.



Kuva 8. 12-pulssinen vastarinnan kytketty 12/12-tyristorisyöttöyksikön periaatepiirros /21/.

Harmonisia yliaaltoja tyristorisyöttöyksikkö tuottaa diodisyöttöyksikön tavoin.

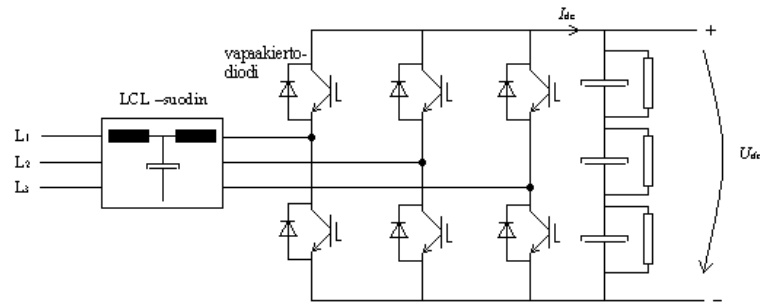
Tarkemmin tyristorisillan ohjausta käsittelee muun muassa Juhani Kärnän ja Pertti Saransaaren kirja Tehoelektroniikka, Tasa- ja vaihtovirtakoneiden tyristorikäytöt /19/.

2.5 ISU-syöttöyksikkö

ISU -syöttöyksikkö (IGBT Supply Unit) on kehittynein tasasuuntausosa, joka taajuusmuuttajakäyttöihin on saatavilla. Tasasuuntauksen lisäksi yksikkö voi toimia tyristorisyöttöyksikön tavoin verkkovaihtosuuntaajana mahdollistaen moottorikäytön hyötyjarrutuksen. Erinomaisten verkkovaihtosuuntausominaisuuksien ansiosta ISU -

syöttöyksikköä käytetään muun muassa muokkaamaan tuulivoimaloiden generaattoreiden tuottamaa sähköä verkkoon /5/.

Edellä esitellyistä syöttöyksiköistä ISU –syöttöyksikkö eroaa rakenteellisesti selvästi. Tämä on nähtävissä kuvasta 9. Se ei toimi perinteisen 6-pulssisen tasasuuntaussillan tavoin, vaan on täysin yhtenevä taajuusmuuttajissa käytetyn vaihtosuuntaajan kanssa.



Kuva 9. IGBT –syöttöyksikön periaatepiirros. Syöttöyksikkö koostuu kuudesta IGB –transistorista, kuudesta vapaakierrodiodista ja kondensaattoreista. Suuritehoisissa silloissa transistoreja on kytketty rinnan 3, 6 tai 9 jokaista vaihetta kohti. LCL –suotimen (kela-kondensaattori-kela) ansiosta verkosta otettavat virtapiikit eivät pilaa verkkovirran aaltomuotoa. Suodin toimii samalla jännitehakkurin energiavarastona. Välipiirin kondensaattorien rinnalle on kytketty purkausvastukset./22/

Tehokytkiminä toimivat IGB –transistorit, joita voidaan ohjata 25 μ s:n välien. Ohjaus on DTC –perusteinen (Direct Torque Control) ja sen ottaman sinimuotoisen virran perusaallon tehokerroin on yksi. Lähes sinimuotoisen virran ansiosta syöttöyksikkö ei tuota perinteisten tasasuuntaussiltojen tavoin 5.,7.,11. ja 13.-yliaaltoa, vaan sen tuottamat yliaallot ovat yleensä 20 – 30 kertaa perusaallon taajuisia. Yliaaltojen osuus jää kuitenkin 6 %:iin perusaallon kokonaistehollisarvosta ja ne ovat tavallisesti seurausta jännitteen modulointitaajuudesta, joka on keskimäärin 3 kHz /14,22/. DTC –ohjauksesta on kerrottu Juha Pyrhösen Lappeenrannan tekniselle yliopistolle tekemässä luentomateriaalissa Sähkökäytöt 2003 /23/.

ISU –syöttöyksiköllä tasasuunnatun jännitteen suuruus ei ole samalla tavoin riippuvainen syöttöjännitteen suuruudesta, kuten diodi- ja tyristorisyöttöyksiköillä. Sillä voidaan nostaa välipiirijännite syöttöjännitettä suuremmaksi step-up –hakkuriperiaatteella. Kuvasta 9

voidaan kuitenkin huomata, että ilman tehokytkimien ohjausta, kytkentä muodostaa kuusipulssisen diodisillan vapaakiertodiodien ansiosta. Näin ollen sillasta saadaan vähintään yhtälön (3) mukainen syöttöjännitteestä riippuva jännite. Perusoletuksena kuitenkin on, että välipiirijännite nostetaan 3-vaiheisella hakkurilla syöttöjännitteen huippuarvon suuruiseksi eli $\sqrt{2}$ kertaiseksi pääjännitteen tehollisarvoon verrattuna [20]. Jännitteennosto-ominaisuus onkin yksi ISU –syöttöyksikön parhaista ominaisuuksista käytön jännitteen alenemista selviytymisessä. Nostettaessa jännitettä voidaan jännitehakkuri toteuttaa esimerkiksi seuraavalla tavalla. Ohjataan positiiviseen kiskoon liitettuja transistoreja silloin, kun toisen vaiheen jännite on positiivisempi, jolloin virtapiiri sulkeutuu vapaakiertodiodin ja ohjatun transistorin avulla kahden vaiheen välille. Ohjattaessa transistori kiinni purkautuu verkon ja LCL-suotimen (kahdesta kelasta ja kondensaattorista tehty suodin) induktansseihin varastoitunut energia välipiirin kondensaattoreihin. Näin saatu jännite on riippuvainen vaiheiden välisen jännite-eron lisäksi kytkentäkertoimesta ja virtapiirin induktansseista. Hakkureista ja niiden toiminta periaatteista on kerrottu tarkemmin kirjassa Power Electronics, Converters, Applications and Design [24].

2.5.1 ISU:n ohjauksen periaatteita

Linjakäytön jarrituksen aikana ISU –syöttöyksikkö toimii verkkovaihtosuuntaajana, jolloin siirretään linjakäytön välipiiristä tehoa verkkoon. Tässä tehon-siirrossa pätevät samat lainalaisuudet kuin siirrettäessä tehoa jakelumuuntajillakin. Tällä tarkoitetaan sitä, että tehonsiirtoyhtälön on toteuduttava verkon impedanssin yli. Näin ollen verkon jännitteellä ja verkkovaihtosuuntaajan muodostamalla jännitteellä on oltava vaihesiirtoa, jonka suuruus ei kuitenkaan saa ylittää 90° . Tehonsiirron hallitsemiseksi on säädettävä tätä jännitteiden välistä vaihesiirtoa tehokulmayhtälön mukaisesti. [14].

$$P = \frac{U_v U_{vvs}}{X} \sin a, \quad (5)$$

missä U_v verkkojännite
 U_{vvs} verkkovaihtosuuntaajan jännite

a	jännitteiden välinen vaihesiirto
X	verkkovaihtosuuntaajan ja verkon välinen reaktiivinen impedanssi.

Tehonsiirtoa verkkoon ja tehokulmayhtälöä on käsitelty muun muassa kirjassa Sähkölaitostekniikan perusteet /25/.

Muutoin verkkovaihtosuuntaajan säätö perustuu kolmeen säädettävään suureeseen, jotka ovat tasajännitteen säätö, tehokertoimen säätö ja harmonisten virtojen sekä jännitteiden minimointi.

Tasajännitteen säädössä pidetään välipiirijännite vakiona riippumatta tehonsiirron suunnasta tai siirrettävän tehon suuruudesta. Vakiojännite savutetaan, kun välipiiriin tuotu energia on yhtä suuri kuin sieltä poistuva. Tämä tehonsäätö tehdään edellä mainitulla tehokulman hallinnalla. Jännitteen ollessa vakio, välipiiriin kytketyt vaihtosuuntaajat ja niiden ohjaamat moottorit toimivat parhaalla mahdollisella tavalla, riippumatta jarrutetaanko moottoreita vai ajetaanko niillä moottoripuolella. /14/

Tehokertoimen säätö toteutetaan minimoimalla ISU –syöttöyksikön ottama virta. Tämä tarkoittaa, että silta ottaa verkosta vain pätövirtaa, jolloin perusaallon tehokerroin on yksi. /14/ Se, että tehokerroin ohjataan ykköseksi, on vain yksi mahdollinen asetus tehokertoimen eli loistehon säädössä. ISU voidaan asettaa tuottamaan tai kuluttamaan loistehoa. Tämä tehdään muuttamalla ISU:n avaruusvektoriteorian mukaista käämivuovektorin pituutta. Jos käämivuovektori on pidempi kuin verkon käämivuovektori, ISU on verkon kannalta kapasitiivinen. Verkon käämivuovektoria lyhyempi käämivuovektori aikaansaa induktiivisen vaikutuksen. Tämä näkyy kapasitiivisessa tilassa verkkojännitettä suurempana ja induktiivisessa tilassa pienempänä ISU:n AC –jännitteenä. /22/

Verkkoon tuotettavien harmonisten minimointisäädön periaate on, että pyritään ottamaan verkosta mahdollisimman sinimuotoista virtaa. /14/

3. SYÖTTÖYKSIKÖIDEN TOIMINTA JA MAHDOLLISET ULKOISET ENERGIAVARASTOT

Ennen käytännön laboratoriotestejä linjakäytölle selvitettiin valmistajan toimintaselosteista ja käyttöohjeista eri syöttöyksiköiden yleinen toiminta. Näin saatiin selville, mitkä seikat voivat vaikuttaa laitteiden suorituskykyyn syöttöjännitteen alentuessa tai lyhyessä katkossa.

Diodi-, tyristori- ja ISU –syöttöyksiköiden toiminnan ohjauksessa on otettu syöttöjännitteen aleneminen eri tavoin huomioon. Tämä on yleensä seurausta syöttöyksiköiden erilaisista rakenteellisista ominaisuuksista. Suojaavien ohjaustoimintojen lisäksi syöttöyksiköissä on käytetty sulakkeita alentuneen jännitteen aiheuttamien kommutointiongelmien suojauksessa.

Välipiiriin liitettyjen vaihtosuuntaajien toiminta jännitteen alenemassa on riippuvainen tasasuuntausosan kyvystä muodostaa tasajännite. Diodi- ja tyristorisyöttöyksiköillä voidaan muodostaa tasajännitettä, jonka suuruus jää hieman pienemmäksi kuin syöttävän vaihtojännitteen huippuarvo. Toisaalta ISU –syöttöyksiköllä ei syöttävän jännitteen huippuarvo ole rajoittava tekijä, vaan välipiirijännite voidaan nostaa huomattavasti tämän yläpuolelle. Näin ollen ISU kykenee DSU:ta ja TSU:ta huomattavasti paremmin muodostamaan välipiirijännitettä syöttöjännitteen alenemien aikana. Jännitekatkojen kannalta ei ole merkitystä välipiirijännitteen muodostamisessa, mikä syöttöyksikkö on kyseessä. Välipiirijännitettä voidaan jännitekatkossa ylläpitää ainoastaan ulkoisen lisäenergiavaraston avulla tai jarruttamalla moottoreita vaihtosuuntaajien avulla välipiiriin. Mahdollisista lisäenergiavarastoista on kerrottu luvun lopussa.

3.1 Diodisyöttöyksikön ohjauksesta

ABB on käyttänyt periaatteeltaan kuvan 5 mukaisia puoliksiohjattuja diodisyöttöyksiköitä linjakäytöissään. Positiiviseen kiskoon liitettyjä tyristoreja ohjataan vain välipiiriin

latausvaiheessa, jonka jälkeen tyristorit lukitaan toimimaan diodien tavoin. Latauksesta siirrytään normaaliin toimintatilaan, kun välipiirijännite on saavuttanut 87 % asetellusta jännitteestä. Normaaliin toimintatilaan siirtymisen jänniteraja ei ole aseteltavissa käyttäjäparametreilla. Latauksen aikana tyristorien ohjauskulmaa muutetaan verkko- ja välipiirijännitteen suhteen muuttuessa. Jännitesuhdetta käytetään ohjauskulman määrittämiseen erillisen taulukon mukaisesti. Normaalisti toimintatilasta siirrytään takaisin lataukseen, jos syöttöjännite alittaa 60 % nimellisestä jännitteestä. Tällöin suurilla kuormilla taajuusmuuttajien suorituskyky heikkenee välipiirijännitteen pienentyessä. DSU ei sisällä DC-virran mittausta, sillä säätö ei sitä tarvitse. /20/

Diodisyöttöyksikkö on suojattu sulakkeilla ylivirralla, joko suoraan syötöissä olevilla sulakkeilla tai sitten jokainen tehokytin on suojattu omalla sulakkeellaan. Sulakesuojauksen toteutustapa on riippuvainen sillan tehosta.

Syöttöyksikössä käytettyjä tyristoreja ei voida sammuttaa ohjauspulssilla.

3.2 Tyristorisyöttöyksikön ohjauksesta

ABB:n tyristorisyöttöyksikkö on periaatteeltaan kuusipulssinen täysinohjattava tasasuuntaussilta. Kuvan 7 mukainen yksikkö sisältää moottori- ja jarrusillan eli niin sanotun vastarinnankytkennän. Tyristorien ohjauskulmien määrittämiseksi mitataan välipiirijännitettä ja syötön virtaa. Siltoja ohjataan eri aikaan. Moottorisilta vaihdetaan jarrusillaksi, kun syötön virta menee aseteltua minimirajaa pienemmäksi ja välipiirijännite saavuttaa asetellun ylärajan. Jarrusilta puolestaan vaihdetaan moottorisillaksi, kun verkkoon syötettävä virta menee pienemmäksi kuin aseteltu minimiraja ja välipiirijännite saavuttaa asetellun alarajan. Ilman jarrusillaa moottoria voitaisiin jarruttaa välipiiriin energian varastointikyvyn ja moottorin magnetointihäviön verran tai välipiiriin jarrutuksessa tuotava energia voitaisiin ohjata erilliseen jarrukatkojaan. Jarrukatkojalla toteutetulla jarrutuksella on paras säädettävyyden ja sillä voidaan näin ollen parhaiten estää välipiiriin ylijännite. Jarrukatkojen etuna olisi jarrutus myös tilanteissa, joissa syöttäväverkko häviää eikä näin ollen verkkoon jarrutusta voitaisi tehdä. Jarrukatkojaa

käytettäessä hukataan kuitenkin energiaa lämmöksi, joka vastarinnantyristorisillalla olisi muutettavissa takaisin sähköksi.

Ilman jarrukatkojaa tai vastarinnansiltaa välipiirijännite (U_{dc}) lähtee jarrutuksessa nousemaan nopeasti. Jännitteen nousunopeus on riippuvainen jarrutusenergiasta (W_j) ja välipiirin kondensaattoreiden kapasitanssista (C), joka on suhteellisen pieni.

$$W_j = P_j \cdot t_j = \frac{C \cdot U_{dc}^2}{2} \quad (6)$$

$$U_{dc} = \sqrt{\frac{2 \cdot W_j}{C}}, \quad (7)$$

missä	W_j	jarrutusenergia
	P_j	jarrutusteho
	t_j	jarrutusaika
	C	välipiirikondensaattorien kapasitanssi
	U_{dc}	välipiirijännite /14/.

Välipiirijännitteen nousu voidaan estää myös vaihtosuuntaajien toimesta jarrutuksen aikana. Tällöin vaihtosuuntaaja mittaa välipiirijännitettä ja pyrkii pitämään sen vakiona estämällä liian tehon siirtymisen moottorilta taajuusmuuttajaan. Tästä käytetään nimitystä ylijännitesäätö. Ylijännitesäädön seurauksesta jarrutus ei voi olla kovin tehokas ja jarrutusramppi jää loivaksi.

Yhtälöä (6) muokkaamalla voidaan laskea, kuinka pitkän ajan tehoa voidaan ajaa välipiiriin jarrutuksessa ilman, että välipiirijännite nousee liian suureksi.

$$t_j = \frac{C \cdot (U_{dc2}^2 - U_{dc1}^2)}{2 \cdot P_j}, \quad (8)$$

missä U_{dc1} on yhtälön (3) mukaan $1,35 \cdot 400 \text{ V} = 540 \text{ V}$ ja välipiirin kondensaattorien kestävä jännite U_{dc2} on tyypillisesti 735 V . Esimerkiksi 90 kW :n taajuusmuuttajan

välipiirikondensaattorien kapasitanssi on tyypillisesti 5 mF ja näin ollen tekemällä sijoitukset yhtälöön (8) saadaan jarrutusajaksi nimellisteholle 6 ms /14/.

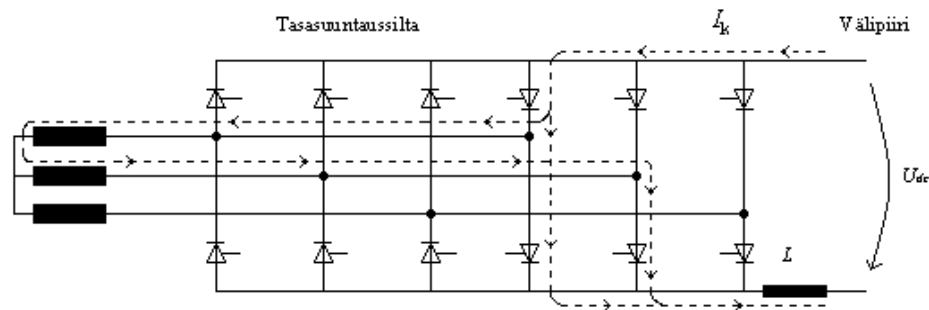
Yhtälöä (8) voidaan myös soveltaa määrittäessä kuinka pitkiä jännitekatkoja taajuusmuuttaja sietää. Tyristorisyöttöyksikö lopettaa sillan ohjauksen syöttöjännitteen jäädessä 60 % nimellisestä. Yhtä suuri jännitealenema voidaan asettaa myöskin välipiirijännitteen alarajaksi eli $1,35 \cdot 400V \cdot 0,6 = 324 V$ /21/. Näin ollen 90 kW:n taajuusmuuttaja sietäisi yhtälön (8) mukaan 5,2 ms jännitekatkon. Verrattaessa esimerkiksi pikajälleenkytkentöjen aiheuttamiin 300 - 400 ms jännitekatkoihin, voidaan todeta välipiirin energiavaraston olevan täysin riittämätön. Vaikka paperikoneen kuivausosalla voivat käytöt normaalissa ajossa olla vain 10 - 20 % kuormilla, ei vielä 5 - 10 kertainkaan katkonsieto aika ole riittävä.

3.2.1 Tyristorisyöttöyksikkö jarrutuksessa

Tyristorisyöttöyksikön käyttäminen sähkökäytön hyötyjarrutuksessa on teoriassa yleisesti hyvin tunnettu ratkaisu, joka on kuitenkin tuotteistettu lähinnä ABB:llä. Sillan käytössä on huomattava, että eräät vaatimukset tulevat aina täytetyksi. Perusominaisuuksiltaan tyristorisillasta on tiedettävä, että siltaa ohjattaessa $< 90^\circ$ ohjauskulmilla on sillan antama jännite positiivinen. Ohjauskulman α ollessa $90^\circ - 180^\circ$ on sillan antama jännite negatiivinen /24/. Kuitenkin, kun käytetään vastarinnankytkettyjä tyristorisilloja tulee ohjauskulman α olla $0^\circ - 170^\circ$. Tämä siksi, että tyristoreille jää kommutointivaraa eivätkä sillat aiheuta vaiheiden välistä oikosulkua niiden ollessa johtavana yhtäaikaan. Jännitteen alenemat pidentävät kommutointiaikaa ja tämä on otettava huomioon tyristorien maksimiohjauskulmaa määrittäessä. ABB:n tyristoriyksiköillä on maksimiohjauskulman perusoletuksena 167° syöttöjännitteen ollessa normaalissa vaihteluvälissä eli 100 – 90 % nimellisjännitteestä. Jos verkossa esiintyy jännitteen alenemia ja verkkojännite on 70 % nimellisestä, on maksimiohjauskulmaksi asetettava 155° /21/.

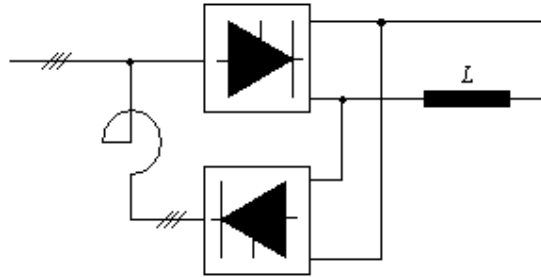
Yksi tyristorisyöttöyksikön vaatimuksista sen toiminnan kannalta on, että välipiirijännitteen U_d on oltava aina pienempi kuin verkkojännitteestä U tasasuunnattavissa oleva maksimijännite. Tämä siksi, että virran kommutointi ei onnistu, jos tyristorin yli

oleva jännite ei muuta suuntaansa. Kommutoinnin epäonnistuminen onkin suuri ongelma vastarinnankytketyissä käytöissä jarrutuksen aikana tapahtuvan jännitteen aleneman tai jännitekatkon seurauksesta. Tällöin vaarana on tyristorien läpisytyminen tai välipiirin oikosulkeutuminen muuntajan käämityksien kautta. Käämityksien kautta välipiirin oikosulkeutuminen on mahdollista tilanteissa, joissa muuntajan vastasähkömotorinen voima häviää. Kuva 10 selvittää oikosulkuvirran I_k vaihtoehtoisia kulkureittejä.



Kuva 10. Oikosulkuvirran I_k kulkutie kommutoinnin epäonnistuessa jarrutuksen-aikaisen jännitteen aleneman tai jännitekatkon aikana.

Verkoissa, joissa tiedetään tapahtuvan jännitteen alenemia, voidaan kommutoinnin onnistumista parantaa käyttämällä kuvan 11 mukaista jännitteennostomuuntajaa jarrusillalle. Muuntajalla nostetaan jännitettä 20 %, jolloin suurimmassa osassa jännitteen alenemia jarrusillalle saadaan vielä nimellisjännitteen suuruinen verkkojännite. On kuitenkin huomattava, että jarrusilta voidaan joutua mitoittamaan alkuperäistä korkeampaan jännitetasoon. Paperikoneen sähkökäytöissä ei yleensä ole käytetty jännitteen nostomuuntajaa jarrusillalle. Tähän on syynä se, ettei näissä käytöissä ole tarvetta moottoritehoa suurempaan jarrutehoon, jonka jännitteennostomuuntaja myös mahdollistaisi. /21/



Kuva 11. Vastarinnankytkettyyn tyristorisiltaan lisätty jännitteennostomuuntaja jarrusillalle.

Jarrusillan käyttö estetään tyristorisyöttöyksikön havahtuessa määrättyihin hälytyksiin. Näissä hälytyksissä on mukana välipiirijännitteen minimiraja ja syöttöjännitteen minimirajat, jotka voidaan asettaa erikseen. Molemmissa minimiraja voi olla 60 % nimellisestä arvosta. /21/

Välipiirijännite mitataan 3.3/ 2.8 ms (50/ 60 Hz) välein. Suhteutettuna näytteistysaika edellä laskettuun välipiirikondensaattorien energian varastointikykyyn, voidaan näytteistystä pitää riittävänä jännitteen alenemilta ja jännitekatkoilta suojauduttaessa. /21/

Koska kommunikointiongelmat voivat aiheuttaa oikosulun välipiirissä, on laitteiston ylivirtasuojana käytetty erikoisnopeita sulakkeita. Sulakkeet on sijoitettu välipiiriin tai jokaiseen tyristorihaaraan, riippuen syöttöyksikön tehosta. /21/

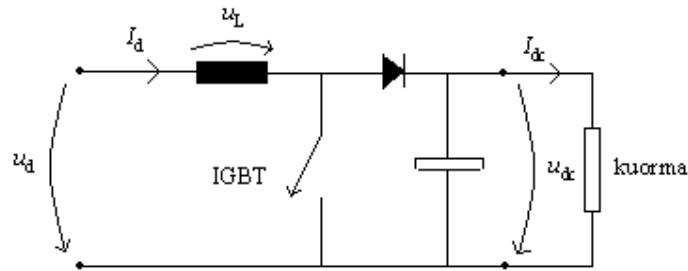
3.3 ISU –syöttöyksikön ohjauksesta

IGBT–syöttöyksikkö eli ISU on niin sanottu regeneratiivinen eli verkkoon jarruttava tasasuuntausosa taajuusmuuttajakäytöissä. Se on rakenteeltaan kuva 9 periaatteen mukainen eli yhtenevä normaalien vaihtosuuntaajien kanssa. Näin on myös käytännössä, sillä vaihtosuuntaajan tehoastetta voidaan käyttää ISU:n varaosana. Piiriratkaisultaan ISU on yksinkertaisempi kuin TSU, sillä siinä on vain kuusi ohjattua haaraa. Ohjaus on DTC – pohjainen ja sen etuina on pieni harmonisten yliaaltojen tuottaminen sekä niiden kompensointi, tehokertoimen säätö ja välipiirijännitteen säätö. Näistä välipiirijännitteen säätö on avain ISU:n hyviin ominaisuuksiin verkkojännitteen alenemia vastaan.

Välipiirijännitteen säätö suuremmaksi kuin verkkojännitteen huippuarvo on mahdollista ISU:n rakenteen vuoksi. Ohjaamattomana ISU tuottaa kuusipulssisillan mukaisen tasajännitteen ja tämä on huomattava laitetta käytettäessä. Määrätyt ohjaustoiminnot pysäyttävät tasajännitteen moduloinnin, mutta välipiiriin jää jännite niin kauaksi aikaa, kunnes ISU:a syöttävä pääkatkaisija avataan. Kuusipulssisillan jännitteen lisäksi tasajännitteen suuruutta on mahdollista nostaa käyttämällä ISU:a kolmivaiheisena hakkurina. Tasajännitteen suuruus on aseteltavissa, mutta se voi suurimmillaan olla 20 % suurempi kuin syöttävän verkon huippuarvo /22/. Tasajännitteen yläraja on kuitenkin enemmän riippuvainen käytettyjen komponenttien ja moottorikämmityksien jännitekestoisuudesta kuin ISU:n kyvystä nostaa tasajännitettä. Lisäksi on huomattava, että jarrutustilanteissa välipiirijännite nousee aseteltua ylärajaa suuremmaksi. Näin ollen tasajännitteen yläraja määräytyy laitteen parametroinnissa asetellusta syöttävän verkon nimellisjännitteestä eikä reaaliaikaisesta verkkojännitteen mittauksesta. Tämä mahdollistaakin jännitteen nostohakkuroinnin (step-up) hyväksikäytön syöttävän verkon jännitteen alenemien aikana.

3.3.1 ISU:n kuormitettavuus jännitteen aleneman aikana

Vaikka ISU:lla voidaankin nostaa välipiirijännite halutuksi lähestulkoon riippumatta syöttävän verkon jännitteestä, aiheuttavat jännitteen alenemat ongelmia suurilla kuormilla eli suurilla moottorivirroilla. Tämä voidaan todeta kuvan 12 yksivaiheisen step-up hakkurin jännite- ja virtayhtälöistä sekä hakkurin kytkentäkertoimesta.



Kuva 12. Yksivaiheinen step-up hakkuri. Ohjaamalla tehokytkintä voidaan induktanssiin varastoitunut energia purkaa diodin läpi kondensaattoriin. Kytkimen kiinni ja aukioloaikojen suhdetta sanotaan kytchentäkerroimeksi.

Jännite- ja virtayhtälöt voidaan muodostaa käyttämällä hyväksi hakkurin jatkuvan tilan jänniteintegraalia piirissä olevan induktanssin yli. Kelan käämivuon muutokset pidetään siis yhtä suurina energiaa varattaessa ja purettaessa. Jotta induktanssin läpi kulkeva virta ei kasvaisi äärettömästi häviöttömässä piirissä, tulee induktanssin yli olevan jänniteintegraalin olla nolla. Tehokytkimen ollessa johtavana induktanssin yli oleva jännite (u_L) on piiriä syöttävän jännitteen suuruinen. Tehokytkimen ollessa avoin u_L on syöttävän ja kuorman jännitteen erotus. Näillä tiedolla voidaan muodostaa yhtälö

$$u_d \cdot t_{\text{on}} + (u_d - u_{\text{dc}})t_{\text{off}} = 0, \quad (9)$$

missä	u_d	piiriä syöttävä tasajännite
	u_{dc}	kuorman tasajännite
	t_{on}	tehokytkimen kiinnioloaika
	t_{off}	tehokytkimen aukioloaika.

Jakamalla yhtälö kytchentäjäjakson ajalla (T_s) ja järjestelemällä termit uudelleen saadaan

$$\frac{u_{\text{dc}}}{u_d} = \frac{T_s}{t_{\text{off}}} = \frac{1}{1-D}, \quad (10)$$

missä	D	kytchentäkerroin.
-------	-----	-------------------

Piirin kuormitettavuus käy ilmi, kun oletetaan piiri häviöttömäksi, jolloin $P_d = P_{dc}$. Tällöin

$$u_d I_d = u_{dc} I_{dc} , \quad (11)$$

missä I_d syötön virta
 I_{dc} kuorman virta.

Muokkaamalla yhtälöitä (11) ja (12) saadaan kuorman ja syöttövirran maksimisuhteeksi

$$\frac{I_{dc}}{I_d} = (1 - D) / 24 . \quad (12)$$

Jännitteen noston lisäksi ISU:lla voidaan myöskin alentaa jännitettä 35 % verkkojännitteen huippuarvoa pienemmäksi /22/. Tähän voidaan käyttää jännitettä alentavan hakkuroinnin (step-down) periaatteita.

3.3.2 Välipiirijännitteen säätö

Kun ISU käynnistetään, ladataan välipiiri latausvastusten avulla. Välipiirijännitteen noustua alijänniterajaa suuremmaksi, avataan latauspiiri ja ISU:n pääkontaktori suljetaan. /22/

Varsinainen välipiirijännitteen säätö pohjautuu aseteltuun jännitteen vertailuarvoon ja jännitteen minimiarvoon, joka riippuu loistehon säädöstä. Vertailuarvo yritetään saavuttaa asetellun ajan kuluessa (perusasetus 1 s) niin jännitettä nostettaessa kuin laskettaessakin. /22/

3.3.3 Ohjaus verkkohäiriössä

ISU:ssa ei ole verkkojännitteen mittausta, vaan jännitteet lasketaan kahdesta vaihevirrasta ja välipiirijännitteestä. Tämä voi tuottaa ongelmia jännitteen alenemien ja jännitekatkojen

havaitsemisessa. Yhdessä vaiheessa olevaa häiriön nopea havaitseminen voi olla epävarmaa. Kuitenkin kappaleen 1.4 perusteella yksivaiheiset muuntajan toisiopuolen alenemat ovat harvinaisia, joten tämä ei sinänsä ole mitenkään merkittävä tekijä. On kuitenkin mahdollista, ettei esimerkiksi yhdessä vaiheessa olevaa muita suurempaa alenemaa havaita ja tämän vuoksi tehokytkimiä ohjataan väärin.

Verkkohäiriöiden havaitseminen ISU:ssa perustuu vaihevirran mittaukseen. Vertailukohtana käytetään 10 s:ksi sallittua ylikuormitusvirtaa ($I_{10s/60s}$). Jos vaihevirta jää tästä pienemmäksi kuin 0,64 %:a 1,5 ms ajaksi, tulkitaan se verkkokatkoksi. Verkkoon synkronointia yritetään 20 ms välein niin kauan, kun välipiirijännite on suurempi kuin aseteltu alijänniteraja. Jos verkkoon uudelleen synkronointi ei onnistu, aukaistaan syöttävä katkaisija. /22/

Verkkokatkon sattuessa ISU:lla ei verkkoon jarrutusta voida tehdä aivan kuten ei tyristorisyöttöyksikölläkään. Tähän on kuitenkin olemassa sama ratkaisu kuin TSU:llekin eli jarrukatkoja /22/.

3.4 Sähkökäytön ulkoinen lisäenergia

Mikäli halutaan turvata jatkuva häiriötön käyttö, paperikoneen sähkökäytöissä olisi syvien jännitteen alenemien ja lyhyiden jännitekatkojen aikana oltava käytettävissä ulkoista lisäenergiaa, joka ei ole riippuvainen tehtaan sähköverkosta. Toisin sanoen energiaa olisi saatava jännitehäiriöiden aikana jostakin energiavarastosta. Kyseen ollessa pyörivistä laitteistoista energiaa on varastoituneena paperikoneen huimamassoissa tai energiaa on varastoitava muihin ulkoisiin varastoihin.

Sähköiset varastot ovat aina tasasähkövarastoja, joista sähkö on muokattava sopivaksi vaihto- tai tasasähköksi tehoelektroniikan avulla. Muokkaaminen huonontaa aina hyötysuhdetta. Tästä syystä sähkökäytöissä ei sähköistä lisäenergiaa ole järkevää muuntaa tasasähkövarastosta vaihtosähköksi, joka kuitenkin muutetaan takaisin tasasähköksi taajuusmuuttajan tasasuuntausosassa. Näillä perusteilla tämä tutkimus keskittyy etsimään

ratkaisua, jolla voidaan tuottaa ulkoista lisäenergiaa taajuusmuuttajan välipiiriin jännitehäiriöiden aikana.

3.4.1 Sähköenergian varastoinnin vaihtoehdot

Yleensä energia on varastoituneena fossiilisiin polttoaineisiin, mutta niiden hyödyntäminen on keskittynyt sähköntuotantoon. Fossiilisista polttoaineista sähköksi muunnettu energia tulisikin voida varastoida sähkönä tai mekaanisena liikkeenä, jotta se olisi riittävän nopeasti käytettävissä sähkökäytöissä jännitehäiriöiden aikana. Nopealla käytettävyydellä on suuri merkitys, sillä taajuusmuuttajien oma energian varastointikapasiteetti riittää vain noin 10 millisekunniksi, moottorien kuorman ollessa nimellinen.

Taajuusmuuttajakäyttöjen toiminnan ollessa riippuvainen välipiirijännitteestä, voidaan jännitteen ylläpitämiseksi käyttää erilaisia sähkövarastoja. Sähkövarastoina voivat toimia akustot, superkondensaattorit, suprajohtavat kelat tai vauhtipyörät. Vauhtipyörissä sähkö varastoidaan mekaaniseksi energiaksi, joka on muunnettavissa nopeasti takaisin sähköksi tarpeen niin vaatiessa. Myös akustoissa ja osassa kondensaattoreita energia muuttaa muotoaan kemialliseksi energiaksi varastoinnin aikana.

Tutkimuksen keskittyessä sähkökäyttöjen syöttöjännitehäiriöiden sietoon ei työssä käsitellä energian varastoinnin vaihtoehtoja, joilla pyritään keskeytymättömän sähkön syötön varmistukseen. Tällaisia pidempi aikaisia häiriöitä kattavia energian varastointimuotoja olisivat erilaiset lämpö-, paineilma ja vesivarastot sekä energian varastointi synteettisenä polttoaineena /26/.

3.4.2 Akut

Uudelleenladattavat akut ovat vanhin ja laajasti käytetty energian varastointimuoto. Akkujen kehitys on ollut hidasta, sillä uusien akkutyyppeiden käyttöönototestit ovat hitaita ja kaupallistaminen riskialtista.

Eniten käytettyjä akkutyyppejä ovat:

- lyijyakut
- nikkeli-kadmium akut.

Muita viime vuosina kaupallistettuja akkutyyppejä ovat:

- nikkeli-metallihydridiakut
- litium-ioniakut
- alumiini-ilma-akut
- alumiini-rikki akut.

Kehittyviä ja osittain kaupallistettuja akkuja ovat:

- korkean lämpötilan akut, kuten natrium-sulfidi akut
- metalli-ilma-akut
- nikkeli-rauta-akut
- polymeeri-litiumakut
- redoksi- ja virtausakut (eli regeneroituvat polttokennot). /26/

Sähkökäyttöjen lisäenergiavarastoinnissa akkujen käytettävyyteen vaikuttavat energiatiheys (Wh/ kg), tehotiheys (W/ kg), lähtöjännite, lataus-purkaus kertojen lukumäärä, elinikä ja hinta. Lisäksi on huomattava turvallisuustekijät vikatilanteissa, ympäristöystävällisyys ja toimintaolosuhteet. Akkujen käyttöä energian varastoinnissa puoltaa niiden korkea energiahyötysuhde, joka on luokkaa 0,023 W/ Wh. Esimerkiksi SMES –laitteiden (Superconducting Magnetic Energy Storage) energiahyötysuhde, joka on luokkaa 35 W/ Wh, on merkittävästi huonompi (tuhat kertaa huonompi). Lyhytaikaisten häiriöiden vaikutusten kompensoinnissa energiaraston vasteaika on myös ratkaiseva, joka akuissa on mikrosekuntiluokkaa. Tämä on tärkeä ominaisuus. Vain superkondensaattoreilla on yhtä lyhyt vasteaika. Kuitenkin tarvittaessa suurta tehoa lyhyessä ajassa, on sitä paremmin saatavissa vauhtipyöristä, superkondensaattoreista ja SMES:stä.. /26/

Akut voidaan jakaa toimintansa puolesta tehoakkuihin ja energia-akkuihin. Sähkökäyttöjen lisäenergian tarpeen luonteen seurauksesta, tässä työssä keskitytään tehoakkuihin.

Lyijyakut

Lyijyakut ovat käytetyimpiä ja edullisimpia energian varastoinnissa käytettyjä laitteita. Niitä voidaan käyttää liikennevälineissä ja sähkön laadun- sekä keskeytymättömän sähkönjakelun sovelluksissa. Lisäksi lyijyakkuja on käytetty pyörivien energiareservien ohessa. /26/

Lyijyakun kennojännite on noin 2 V ja sillä on suhteellisen suuri tehotiheys (600 W/ kg). Sen energiatiheys on kuitenkin pieni (<100 Wh/ kg) lyijyn suuren tiheyden seurauksesta. Yhdessä lyijyakun käyttökohteessa - UPS-sovelluksessa (Uninterruptible Power Supply), voi nopea itsepurkautuminen nousta ongelmaksi. Lyijyakun elinikä on joitakin satoja latauskertoja. Elinikä suhteutettuna muutamiin kymmeneen vuotuisiin jännitehäiriöihin, jotka aiheuttavat nykyisin tuotannon pysähtymisen, voidaan lyijyakun eliniän todeta olevan riittävä. /26/

Lyijyakuista on tehty 3 – 10 MW:n energian varastointijärjestelmiä eri maanosissa. Näiden järjestelmien kustannuksiksi on laskettu 239 – 805 US\$/ kW vuoden 1995 kurssien mukaan. /26/

Nikkeli-kadmiumakut

Nikkeli-kadmiunakuilla (NiCd –akku) on lyijyakkua pidempi käyttöikä. Ne kestävät lataus-purkausjakson enemmän kuin 1000 kertaa. Lyijyakkua parempina ominaisuuksina NiCd –akuilla on vakio purkausjännite, suurempi purkausnopeus, parempi kylmän kestävyys sekä pienempi itsepurkautumisnopeus. Akkujen käyttöä rajoittaa kuitenkin lyijyakkua pienempi tehotiheys, hinta ja niin sanottu muistiefekti. Muistiefekti pienentää akun kapasiteettia, jos akkua ei ladata täyteen tai pureta tyhjäksi.

NiCd –akkuja on yleensä käytetty pienissä paristoissa, mutta niitä voidaan käyttää myös suuritehoisissa akkujärjestelmissä. Alaskaan on rakennettu maailman suurin akkujärjestelmä, jonka teho on 40 MW. /26/

Sinkki-mangaaniakut

Kadmiumin ympäristöongelmien vuoksi on kehitetty sinkki-mangaanioksidiakku (ZnMn – akku), jonka kennojännite on 1,7 V. Latauksessa on käytettävä laturia, joka ei lataa akkua liian suurella jännitteellä kaasun muodostuksen estämiseksi. ZnMn –akun heikkoutena on sen lyhyt elinikä, mutta NiCd –akkuun verrattuna, sillä on moninkertainen kapasiteetti ja se on myös halvempi /26/.

Nikkeli-metallihydridiakut

Toinen nikkeli-kadmiumakkuja korvaamaan kehitetty akkutyyppe on nikkeli-metallihydridiakku (NiMH-akku). Sen kennojännite on lähes sama kuin NiCd –akulla eli 1,2 – 1,3 V, mutta sen energiatiheys on kaksinkertainen NiCd –akkuun verrattuna. /26/

Litiumioni ja litium-polymeeriakut

Litium on kevyin metalli ja soveltuu näin ollen hyvin akkujen ja paristojen materiaaliksi. Keveytensä ansiosta litium –akkujen energiatiheys on suuri 300 – 400 kWh/ m³. Lisäksi niiden hyötysuhde on lähes 100 % ja elinikä, lataus-purkausjaksojen lukumäärällä ilmastuna, on 3000 80 % kapasiteetilla. Lataamisessa on käytettävä tarkoitukseen suunniteltua laturia, joka kontrolloi jännitettä ja lämpötilaa räjähdysvaaran minimoimiseksi. /26/

Litiumioniakkujen käyttö on keskittynyt kannettaviin laitteisiin ja vaikka kehitystyötä on tehty akkujen hinnan alentamiseksi, on ne liian kalliita suuren teholuokan sovelluksiin. /26/

Natrium-sulfidiakut

Natrium-sulfidiakun (NaS –akku) kennojännite on 2 V ja kennon toiminta edellyttää noin 300 °C lämpötilan. NaS –akut voivat tuottaa noin 30 s ajan jopa 5 – 6 –kertaisen tehon nimelliseen tehoon verrattuna. Akustoja onkin käytetty sähköverkoissa huippukuormien leikkaamiseen sekä sähkön laadun hallinnassa. NaS –akustoja on kokeiltu Japanissa yli 40

kohteessa ja suurimman akuston teho on 6 MW. Toiminta-varmuudeltaan akkua voidaan pitää jo valmiina kaupallisena tuotteena. /26/

Metalli-ilma-akut

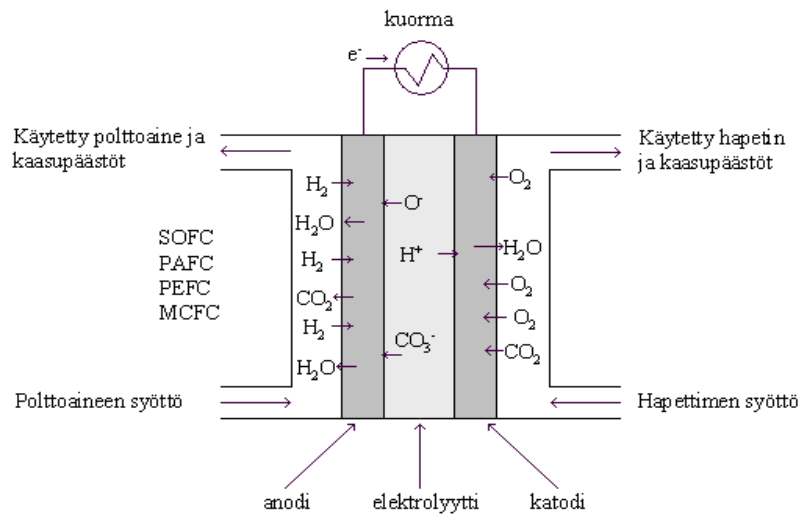
Metalli-ilma-akkujen latausominaisuudet ovat heikot, mutta ne ovat nykyisin kehityksen kohteena. Nykyisellään akun hyötysuhde on vain 50 % ja elinikä on vain muutamia satoja lataus-purkausjaksoja. Metallililma-akut ovat halpoja. /26/

3.4.3 Polttokennot

Polttokennoja on kehitetty ratkaisuksi energian jakelun ongelmiin ja hybridiautojen teholähteeksi. Polttokennot luokitellaan tavallisesti polttoaineen tai elektrolyytin mukaan. Polttoaineena voidaan käyttää muun muassa vetyä, metanolia, dieseliä, propaania tai butaania. Elektrolyytin mukaan luokiteltuna polttokennoista käytetään nimityksiä: fosforihappopolttokenno eli PAFC (Phosphoric Acid Fuel Cell), sulakarbonaattipolttokenno eli MCFC (Molten Carbonate Fuel Cell), kiinteäoksidipolttokenno eli SOFC (Solid Oxide Fuel Cell), alkaalipolttokenno eli AFC (Alkaline Fuel Cell), protoninvaihtokalvopolttokenno eli PEMFC (Proton Exchange Membrane Fuel Cell), suora metanolipolttokenno eli DMFC (Direct Methanol Fuel Cell) ja reversiibeli polttokenno eli RFC (Reversible Fuel Cell). /26/

Edellä lueteltujen kemiallisten polttokennojen lisäksi on olemassa biologisia polttokennoja, joita käytetään mikroelektroniikan tehollähteenä. /26/

Tavallisesti polttokennosta saadaan sähköä vedyn ja hapen välisestä reaktiosta. Reaktio voi olla samanlainen kuin akuissa, vaikkakin polttokennosta saadaan sähköä niin kauan kuin polttoainetta riittää. Akku puolestaan pitää varata sähköisesti, jonka jälkeen varaus voidaan hyödyntää. Jos polttokennossa käytetään fossiilista polttoainetta, irrotetaan siitä vety kemiallisella reaktiolla reformerissa. Polttoaineen ollessa metanolia tai etanolia, ei reformeria tarvita. Polttokennon periaate on nähtävissä kuvasta 13. /26/



Kuva 13. Erityyppisten polttokennojen toimintaperiaate, sähkökemialliset reaktiot ja syntyvät päästöt /26/.

Polttokennojen ominaisuuksia

Polttokenno tuottaa tavallisesti melko korkean lämpötilan toimiessaan. Yleensä polttokennojen toiminta-alueella lämpötila on noin 200 – 1000 °C, mutta polymeerielektrolyytillä varustettu polttokenno voi toimia jopa –70 °C:een lämpötilassa. Tehoa polttokennoista saadaan muutamasta sadasta watista aina 100 MW:iin asti. Hyötysuhde polttokennoissa on tavallisesti 40 – 60 %, mutta alkaalipolttokennon hyötysuhde voi olla 89 %.

Regeneroituvat polttokennot ja virtausakut

Regeneroituva polttokenno voi tuottaa sähköä polttokennona tai käänteisessä reaktiossa vetyä elektrolysaattorina. Yhdistämällä kaksi rinnakkaista kennoa, voi toinen kennoista toimia polttokennona ja toinen elektrolysaattorina. Regeneroivan polttokennon hyötysuhde on parempi kuin polttokennon (energian varastoinnin kokonaishyötysuhde 81 %), sillä elektrolyysivaiheessa voidaan hyödyntää sähköntuotannossa syntynyt hukkalämpö. Tämän lisäksi elektrolyysi tuottaa polttoainetta (vetyä ja happea) polttokennolle sähkön tuotantoa varten. Regeneroivia polttokennoja on PEMFC ja SOFC tyyppisinä.

Kuten jo edellä mainittiin, ovat polttokennossa ja akussa tapahtuvat kemialliset reaktiot hyvin samankaltaisia. Näin ollen akku ja polttokenno on usein vaikea erottaa toisistaan. Selkeimpänä erona on, että akuissa elektrodit osallistuvat kemialliseen reaktioon, kun polttokennossa reagoivat elektrolyytit. Lyijyakku on kuitenkin poikkeus, sillä siinä elektrolyyttiliuoksena toimiva happo osallistuu kemialliseen reaktioon. Vaikeimmin erotettavissa toisistaan ovat virtausakut (redoksiakut) ja uudelleen varattavat regeneroitavat, elektrolyyttiliuoksella varustetut polttokennot. /26/

Virtausakuissa ja regeneroituvissa polttokennoissa, energia on varastoituneena elektrolyyttiliuokseen, mutta varsinainen tehollähde on akkuyksikkö tai polttokenno. Nimensä mukaisesti virtausakussa kierrätetään elektrolyyttiliuosta kennon ja varastosäiliön välillä. Varastosäiliössä liuos voidaan vaihtaa tai regeneroida. Tavallisesti useita kennoja on liitetty toisiinsa, suuremman tehon aikaansaamiseksi, mutta kennoissa kiertää sama elektrolyyttiliuos. Elektronien luovutus elektrolyyttien välillä, tapahtuu kennossa ioninvaihtokalvon läpi. /26/

Virtausakkujen tehoalue on megawatti-luokkaa (5 - 500 MW) ja sen varastointiaika voi olla sekunneista useisiin kymmeneen tuntiin. Virtausakkutyyppejä ovat muun muassa vanadium-redoksivirtausakku, sinkki-bromidivirtausakku ja polysulfaatti-bromidivirtausakku. /26/

3.4.4 Vauhtipyörät

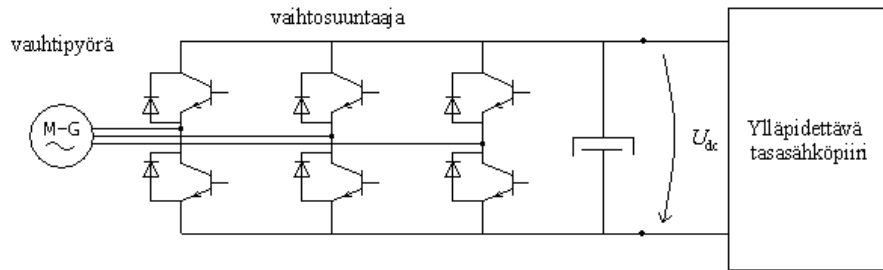
Vauhtipyörä on yksi vanhimmista energian varastointimuodoista. Sähkön laadun varmennuksessa, vauhtipyöriin on varastoitu sähkömoottorin avulla mekaanista energiaa, joka on muutettavissa generaattorilla takaisin sähköksi. Nykyisissä vauhtipyörissä sama sähkökone toimii niin moottorina kuin generaattorinakin. Vauhtipyörään varastoitunut energia on riippuvainen roottorin hitausmomentista ja kulmanopeuden neliöstä. Teho puolestaan on riippuvainen käytetystä moottori-generaattorista.

Vauhtipyörä on perinteisesti ollut metallinen kiekko, mutta nykyisin ne on usein tehty muotoilluista komposiittimateriaaleista. Muotoilulla saavutetaan suuri hitausmomentti. Komposiittiroottoreita on käytetty suurnopeus sovelluksissa, joissa roottorin keveys on etuna. Suurnopeusvauhtipyörien pyörimisnopeudet ovat nykyisin 10000 – 100000 1/min. Suuret nopeudet ovat vaatineet materiaalikehityksen lisäksi kehitystä myös laakeroinnin ja tehoelektroniikan parissa.

Laakeroinnilla on suuri vaikutus vauhtipyörän hyötysuhteeseen. Nykyisin laakeroinnissa on käytetty magneettisia tai suprajohtavia laakereita. Vauhtipyörällä, jossa on suprajohtavuutta käytetty magneettisen laakerin aikaan saamiseen, päästään jopa SMES - laitteistoa korkeampaan energiatiheyteen. Laakeroinnin parantamisen lisäksi hyötysuhdetta on saatu korkeammaksi järjestämällä roottorille tyhjä. Näin ollen ilmanvastus ei ole jarruttamassa pyörivää roottoria. /26/

Vauhtipyörästä otettavalla teholla ja sen purkausajalla on vaikutus systeemin rakenteeseen. Tehon tarpeen ollessa muutamasta sekunnista kymmeneen sekunteihin, on moottori-generaattori suuritehoinen ja vauhtipyörällä pieni massa. Toisaalta pitkäkestoisessa energian tarpeessa mitoitus on päinvastainen.

Hyödynnettäessä vauhtipyörään varastoitunutta energiaa, on moottori-generaattoria ohjattava taajuusmuuttajalla. Tämä siksi, että purettaessa energiavarastoa, vauhtipyörän pyörimisnopeus laskee. Taajuusmuuttajan avulla vauhtipyörän energiaa voidaan hyödyntää aina nolla-nopeuteen asti. Toisaalta taajuusmuuttajaa voidaan käyttää vauhtipyörän uudelleen kiihdyttämiseen. Käytettäessä taajuusmuuttajaa saatu sähkö on usein tasasähköä ja se voidaan liittää ylläpidettävän järjestelmän tasasähköpiiriin kuvan 14 mukaisesti.



Kuva 14. Vauhtipyörän ohjaukseen käytetty taajuusmuuttajakytkentä, jolla voidaan hyödyntää pyörään varastoitunutta energiaa ja kiihdyttää pyörää.

Energian varastoinnin kannalta on tärkeitä ominaisuuksia eli ominaisteho- ja ominaisenergia, ovat riippuvaisia vauhtipyörässä käytetystä tekniikasta. Perinteisellä tekniikalla toteutettujen vauhtipyörien ominaisuudet ovat lyijyakkujen luokkaa. Kehittyneempien vauhtipyörien ominaisteho on verrattavissa superkondensaattoreiden ominaistehoon ja ominaisenergia kehittyneempien akkujen ominaisenergiaan. Taulukkoon 3 on listattu vauhtipyöräsovelluksia, joiden tehoalue on verrattavissa paperikoneiden tehontarpeeseen lyhyissä jännitekatkoissa. /26/

Taulukko 3. Vauhtipyöräsovellukset, joiden teho on verrattavissa paperikoneiden tehon tarpeeseen sähkökatkossa /26/.

	Huippu- teho	Varastoitu- energia MJ (kWh)	Purkaus- aika	Max. pyör.nop. 1/min	Kehä- nopeus, m/s	Roottorin materiaali	Roottorin massa, kg
Sähkön laatu	400 kW	4,7 (1,3)	12 s	10000	400	teräs	1400
Hybridi- bussi	150 kW	7 (2)	48 s	40000	900	komposiitti	60
Hybridi- panssari- vaunu	11 MW:n pulssi, 350 kW jatkuva	25 (14)	2,6 min	18000	540	komposiitti/ metalli	280
Juna	2 MW	470 (130)	4 min	15000	950	komposiitti	2500

Vauhtipyöriä sovellettaessa on muistettava sen käyttöön liittyvät vaarat, joita on koko energiavaraston purkaantuminen sekunnin murto-osassa ja pyörän sinkoutuminen ulos suojakotelosta. Tämän seurauksesta suuri vauhtipyörä tulisi sijoittaa maanalaiseen

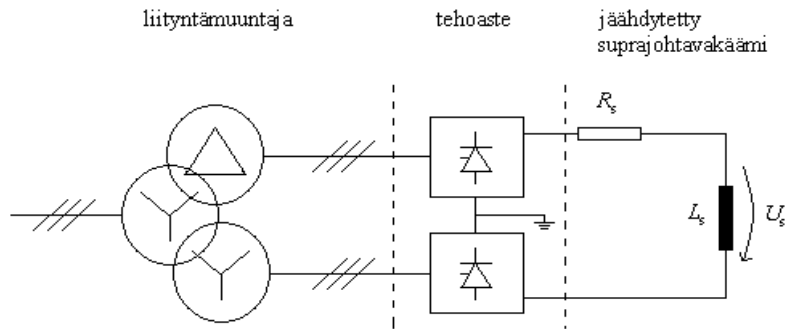
koteloonsa. Toisaalta vauhtipyörät ovat akkuja ympäristöystävällisempiä ja 10 – 100 kertaa akkuja pitkäikäisempiä.

3.4.5 Suprajohtava magneettinen energiavarasto

Suprajohtava magneettinen energiavarasto eli SMES (Superconducting Magnetic Energy Storage) on 1970 –luvulla kehitetty suprajohtavan käämin sovellutus, jossa käämissä kiertää virta lähes häviöttömästi. Virta synnyttää ympärilleen magneettikentän, johon käämiin johdettu energia varastoituu. SMES –laitteiden parantaminen on kuitenkin vaatinut jäähdystekniikoiden, materiaalien ja tehoelektroniikan kehittämistä.

1900 –luvun alkupuolella materiaalin suprajohtava tila saavutettiin lähellä absoluuttista nollapistettä ($0 \text{ K} = -273,15 \text{ }^\circ\text{C}$). Myöhemmin 1980 –luvulta alkaen on löydetty materiaaleja, jotka saavuttavat suprajohtavan tilan jopa 108 K:n lämpötilassa. Eri lämpötiloissa suprajohtavaksi muuttuvista materiaaleista käytetäänkin nimitystä matalan ja korkean lämpötilan suprajohtavamateriaali. Nykyisin kaupalliset SMES –laitteistot ovat matalan lämpötilan suprajohteiden sovelluksia, mutta korkean lämpötilan kaupallisia laitteita on kehitteillä. SMES –laitteiden tehoalue on ollut viime vuosiin 10 – 100 MW, mutta pienempitehoisista 1 – 10 MW laitteistoista on jo olemassa (muun muassa afrikkalaisessa paperitehtaassa). /26/

SMES –laitteiden hyviä ominaisuuksia ovat suuri virtatiheys, lyhyt vasteaika (1/4 sykliä), korkea hyötysuhde (>95 %) ja pitkä käyttöikä (odotusarvo 30 vuotta). Vastaavasti heikkoina ominaisuuksina ovat jäähdytysjärjestelmä ja pieni energiatiheys, joka on akkuja pienempi. Heikkojen ominaisuuksiensa seurauksesta pienempitehoisten SMES –laitteiden hankinta-kustannukset ovat korkeat (72000 \$/ kWh, 300 \$/ kW). Laitteiston turvallisuuteen vaikuttaa käämin ympärilleen aiheuttama magneettikenttä. Kuvasta 15 on nähtävissä SMES –laitteiston rakenne pääpiirteittäin. /26/



Kuva 15. SMES –laitteiston pääosat ovat liityntämuuntaja sähköverkkoon, kahdesta tyristorisillasta koostuva AC/DC -tehoaste ja jäähdytetty suprajohtava käämi. Näiden lisäksi tarvitaan ohjauselektroniikkaa tehoasteelle ja jäähdytyslaitteistolle. Kuvassa R_s on sisäinen resistanssi, L_s on suprajohtavan käämin induktanssi ja U_s on käämin yli oleva jännite käämiin varastoitunutta energiaa purettaessa. /26/

Suprajohtavaan käämiin varastoitunut maksimienergia (W_{\max}) on

$$W_{\max} = \frac{1}{2} L_s I_s^2, \quad (13)$$

ja käämistä saatava teho (P) on

$$P = U_s I = L_s \frac{dI_s}{dt} I_s = U_{\max} \sqrt{Q_{\max} \frac{2}{L_s}}, \quad (14)$$

joissa	L_s	suprajohtavan käämin induktanssi
	I_s	suprajohtavan käämin virta
	U_s	suprajohtavan käämin jännite käämiin varastoitunutta energiaa purettaessa
	I	virta
	U_{\max}	käämin maksimijännite
	Q_{\max}	käämin maksimisähkövaraus. /26/

3.4.6 Sähkökemialliset kondensaattorit

Sähkökemialliset kondensaattorit, joita ovat super-, ultra- ja pseudokondensaattorit, ovat olleet tunnettuja jo 1950 –luvulta lähtien. Energian varastointitekniikoiden ja sähköautojen kehittyminen on edesauttanut myös superkondensaattoreiden kehittymistä. Energian varauskyky sähkökemiallisissa kondensaattoreissa perustuu 2-kerroskondensaattoreissa varaukseen elektrodi-/elektrolyyttirajapinnalla ja pseudokondensaattorissa nopeaan palautuvaan sähkökemialliseen reaktioon lähellä kiinteän elektrodin pintaa. Sähkökemialliset kondensaattorit jaetaan käytetyn elektrodimateriaalin mukaan hiili- ja metalliperusteisiin kondensaattoreihin. Tehoa vaativissa sovelluksissa käytetään hiiliperusteisia kondensaattoreita ja telekommunikaation sovelluksissa käytetään metalliperusteisia. /26/

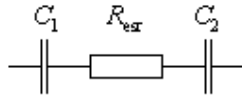
Superkondensaattorin kapasitanssin (C) lisäksi, kondensaattorin käytettävyyden kannalta merkittävä ominaisuus on DC –aikavakio (t_c)

$$t_c = R_{\text{esr}} C \quad , \quad (15)$$

missä R_{esr} ekvivalenttinen sarjaresistanssi.

Aikavakiolla on vaikutus kondensaattorista saatuun vakiotehoon. Yhtä suuri teho saadaan sitä pidemmän aikaa, mitä pienempi aikavakio on. /26/

Hiiliperusteisissa sähkökemiallisissa kondensaattoreissa energia varastoituu kahden hiilielektrodin väliseen sähkökenttään. Kaksikerroskondensaattorissa on tavallisesti kaksi kemiallisesti inerttiä elektrodia elektrolyyttiliuoksessa. Kondensaattorin kapasitanssi muodostuu molempien elektrodien pintaan kaksoiskerroksien ansiosta. Rakennetta kuvataan kuvan 16 mukaisella ekvivalenttisella kytkennällä.



Kuva 16. 2-kerroksisen sähkökemiallisen kondensaattorin ekvivalenttinen kytkentä /26/.

Kuvan 16 kondensaattorit voivat olla yhtä- tai eri-suuret, jolloin puhutaan symmetrisistä ja epäsymmetrisistä kondensaattoreista. Epäsymmetristen kondensaattoreiden latausjännite voi olla 1,5 – 1,7 V eli suurempi kuin symmetristen kondensaattoreiden 0,9 V latausjännite. Suuremman latausjännitteensä ansiosta, epäsymmetristen kondensaattoreiden ominaisenergia on 4 – 5 kertaa symmetrisiä kondensaattoreita suurempi. /26/

Metalliperusteisten pseudokondensaattoreiden ominaisuudet ovat riippuvaisia käytetyistä elektrodimateriaaleista. Parhaimmillaan pseudokondensaattoreilla päästään suuriin energia tiheyksiin, mutta latausjännite rajoittuu niilläkin 2,7 V:iin. Edellistä huomattavasti suurempiin latausjännitteisiin voitaisiin kuitenkin päästä niin sanotulla epäsymmetrisellä hybridikondensaattorilla. Hybridikondensaattorissa on hyödynnetty elektrolyyttikondensaattorin anodimateriaalia ja pseudokondensaattorin katodimateriaalia korkean toimintajännitteen (n. 50 V) ja taajuusvasteen aikaan saamiseksi. Tällaisella kondensaattorilla olisi sähkökemiallisten kondensaattorien tapaan suuri kapasitanssi (esim. 24 mF). /26/

Superkondensaattorien hyvänä ominaisuutena on erittäin nopea lataus-/ purkausaika, joka on myös säädettävissä. Tavallisesti energian varastointitekniikoita vertaillaan tehotiheyden mukaan, mutta superkondensaattorien teho riippuu latausasteesta. Näin ollen tehotiheyttä ei voida käyttää hyvänä vertailukohtana. Suuren tehon lisäksi superkondensaattorit voivat omata myös suuren energian. /26/

Suuren kokonaisenergian aikaansaamiseksi, superkondensaattoreita on kytketty yhteen. Tällöin on saatu aikaan järjestelmiä, joiden teho on 50 – 100 kW. Jos yhteen kytketyissä järjestelmissä on sarjaan kytkettyjä superkondensaattoreita, on jokaiselle kondensaattorille oltava oma jännitteen säädin. Säätimellä varmistetaan kondensaattorien turvallinen ja luotettava toiminta. Tällaisten järjestelmien odotettu elinikä tulee olemaan noin 10 vuotta

ja latauspurkausjaksojen lukumäärä on lähes rajoittamaton. Nopeajaksoisissa toiminnoissa kondensaattorien käyttöä kuitenkin rajoittaa suuri energian läpivirtaus. /26/

Superkondensaattoreita voidaan käyttää sähkön laadun tasaajana taajuusmuuttajissa, UPS – laitteissa ja akkujen korvaajina eri sovellutuksissa. Näiden lisäksi niitä voidaan käyttää sähkönjakelun ja liikkuvien laitteiden energiavarastona. Varsinkin sähköisissä ja hybridikuljetusvälineissä superkondensaattoreille on monia sovelluskohteita huipputehontasaajina käynnistysakkujen rinnalla tai jarrutusenergian talteenotossa. Sovelluskohteita suunniteltaessa on mietittävä muiden vaihtoehtoisten energiavarastojen käytettävyyttä sovelluksessa. Superkondensaattoreiden eduksi voidaan kuitenkin katsoa esimerkiksi akkujen tehotiheyttä 20 – 50 kertaa suurempi tehotiheys, vaikkakin akkujen energiatiheys on 10 – 20 kertaa superkondensaattoreita suurempi. /26/

4. PAPERIKONE SÄHKÖHÄIRIÖN AIKANA

Paperikoneiden ohjausjärjestelmien kannalta laitteet voidaan jakaa kolmeen osa-alueeseen – prosessia ohjaavaan automaatiojärjestelmään, konelogiikkaan ja sähkökäyttöihin. Jotta paperikone on ajokunnossa, on näiden eri osa-alueiden oltava toimintakuntoisia. Toimintakunto edellyttää, että ohjausjärjestelmillä ja niiden toimilaitteilla on käytettävissään sähköä, paineilmaa ja hydraulipainetta myös sähköhäiriöiden aikana.

Tässä luvussa pyritään pääpiirteittäin kartoittamaan niitä sähkösuunnittelun lähtökohtia, joiden tiedetään vaikuttavan paperikoneen sähköhäiriöiden sietoon tai ovat rajoittavana tekijänä häiriöiden ylipääsemisessä. Luku käsittelee myös erään suomalaisen paperitehtaan paperikoneen ohjausta ja sen tehon tarvetta määrittämään prosessin kannalta sähköhäiriöiden aikana.

4.1 Paperikoneiden suunnitteluperiaatteista sähköjärjestelmien häiriöiden kannalta

Suunniteltaessa paperitehtaiden sähkölaitteistoja ja niiden ohjausjärjestelmiä on otettava huomioon sähköhäiriöiden vaikutus toimivaan laitteistoon. Tässä kappaleessa kerrotaan, joitakin peruseriaatteita, joita on noudatettu suunniteltaessa paperitehtaiden sähkölaitteistoja. Näin saadaan jonkinlainen käsitys, miten muut laitteet kuin paperikoneiden linjakäytöt sietävät sähkösyötön häiriöitä.

Jännitteen alenemia silmälläpitäen suunnitellaan laitteistot siten, että ne kestävät 30 %:n aleneman 300 ms:n ajaksi. Häiriöiden sietoajan oletetaan olevan lähtöisin pikajälleenkytkentöjen yhteydessä esiintyvistä jännitehäiriöistä. Isojen oikosulkumoottoreiden käynnistykset voivat myös aiheuttaa edellä mainitun tyyppisiä alenemia. /27/

Prosessia ohjaavan automaatiojärjestelmän tulee kestää hyvin jännitehäiriöitä – niin katkoja kuin alenemiäkin. Tästä syystä valvomoiden ja automaatiotilojen sekä

tehdassaleissa olevien prosessiasemien tietokoneet on liitetty UPS –varmennettuun (Uninterruptible Power Supply) sähkösyöttöön. Syötön varmennus on nykyisin pyritty tekemään keskitetysti, jotta UPS –laitteiden kunnossapito olisi aikaisempaa paremmin hallinnassa. Tietokoneiden lisäksi uudisasennuksissa keskeytymättömään jännitejakeluun on pyritty liittämään myös kenttälaitteiden teholähteet, jotka sijaitsevat tehdassaleissa kenttäkaapeissa. Vaikka kenttälaitteiden sähkösyöttö on usein varmennettu, voivat ongelmaksi muodostua automaatioventtiilien työilman katkokset. Paineilmaverkossa ei yleensä ole painevaraajia, joten tehdas sähköjakelussa esiintyvän häiriön pysäyttäessä paineilmakompressorit häiriintyy myös paineilmanjakelu. Todennäköistä kuitenkin on, että paineilmaverkkoon varastoituu ilmaa sen verran, että aivan lyhyiden jännitekatkojen aiheuttamat häiriöt suodattuvat pois. /27/

Ohjauksjärjestelmien lisäksi paperikoneen valmistaja voi vaatia varmennettua sähkösyöttöä yksittäisille laitteille. Tällaisia laitteita ovat esimerkiksi määrätty venttiilit hydraulikoneikoissa ja niin sanottujen kulmatelojen taajuusmuuttajakäytöt. Muutoin hydraulikoneikot ovat samalla tavoin alttiita sähköhäiriöille kuin paineilmaverkkokin, mutta joissain kohteissa on käytetty paineakkuja suurien laitevaurioiden ehkäisemiseksi. Tällaisia kohteita ovat mm. huovan kiristimet puristinosalla. /27/

Suunnittelulla pyritään myös suojaamaan prosessilaitteita sähköhäiriöiltä. Yksi käytetty tapa on lisätä moottorilähtöihin virranmittaus, joka toimii automaatiojärjestelmässä lukituksena muun prosessin ohjaamiselle. Kun virtaa ei kulje määrätyn ajan aikana, lukitus havahtuu. Keski-jänniteverkossa moottoreita suojataan jännitteen alenemilta ja jännitekatkoilta avaamalla moottoria syöttävä katkaisija, joko alijännite- tai ylivirtalaukaisulla. Jännitteen palatessa normaalille tasolle ei moottorilähdön katkaisijaa suljeta automaattisesti. Vastaavan katkaisijan toimiessa keski-jännitemuuntajan syötössä, ei alijännitelaukaisua käytetä turhien jännitekatkojen välttämiseksi. /27/

Jännitehäiriöltä voidaan myös suojautua tasapainottamalla sähkön tuotannon ja kulutuksen suhdetta. Tehdas kulutusta voidaan laskea ohjaamalla isojen moottorikäyttöjen kuten hiomakoneiden, jauhimien ja imupumppujen syötöt auki jännitteen alenemien tai taajuusvaihteluiden seurauksesta.

Prosessilaitteilla ei usein ole omaa alijännitelaukaisua, sillä laitteet voidaan ohjata pois päältä normaaleilla ohjaussignaaleilla alijännitteen sattuessa. Tästä on esimerkkinä erilaiset paperiradan kuivaimet, jotka ohjataan pois päältä ratakatkosignaalilla jännitteen aleneman sattuessa. Tämä on riittävä suojaustoiminto, sillä paperirata katkeaa poikkeuksetta jännitteen alenemasta. /27/

4.2 Paperikoneen tehon tarpeesta jännitehäiriön aikana

Jännitteen alenemien ja jännitekatkojen vaikutusten pienentämiseksi on usein mietitty, voitaisiinko linjakäyttöä ohjaamalla parantaa niiden häiriösietoisuutta. Ratkaisujen kehittämiseksi on kuitenkin kartoitettava prosessin ja laitteistojen rajoitukset, jotka vaikuttavat sähkökäyttöjen tarvitsemaan tehoon häiriöiden aikana. Lähtökohtana on ollut, ettei täydellistä immuniteettia häiriölle edes pyritä kehittämään, vaan häiriön vaikutuksia pyritään pienentämään. Tämä tarkoittaa käytännössä sitä, että jännitehäiriön seurauksesta paperirata saa katketa. Katkon aikana pyritään hallitusti ohjaamaan käyttöä esimerkiksi pudottamalla moottoreiden pyörimisnopeutta. Häiriön jälkeen moottorit voitaisiin kiihdyttää takaisin alkuperäiseen nopeuteensa.

Rajoitukseksi ja joissakin tapauksissa suoranaiseksi esteeksi, jännitehäiriön aikaiselle käyttöjen ohjaukselle, muodostuu linjakäytön jakautuminen eri syöttöryhmiksi. Näin ollen kuivatusosan ja kiinnirullauksen huimamassoihin varastoitunutta liike-energiaa ei voida hyödyntää nykyisillä laitteilla märkään syöttöryhmissä. Lisäksi kuivatusosan vaihdelaatikoiden mekaaninen mitoitus ei useinkaan salli nopeaa sylintereiden jarrutusta.

4.2.1 Paperikoneen linjakäytön jaottelu

Paperikoneen linjakäyttö ohjaa yleensä kymmeniä moottoreita. Paperin valmistusprosessin eri vaiheet vaativat sähkökäytöltä suurta tehoa. Tämän seurauksesta linjakäyttö on jaettu pienempiin osiin eli syöttöryhmiin, joilla on jokaisella oma muuntaja. Jako on yleensä tehty koneen prosessivaiheiden mukaan. Tyypillisesti ensimmäinen ja toinen syöttöryhmä ovat viira- ja puristinosien suuritehoisille moottoreille. Seuraavaan syöttöryhmään

kuuluvat kuivatusosan ja kalanterin sekä kiinnirullaimien moottorit. Neljännessä syöttöryhmässä ovat usein isot pumput kuten peränsyöttöpumppu tai –pumput, ensimmäisen portaan pumppu ja sekoituspumppu prosessista riippuen. Näin ollen paperikone voidaan karkeasti jakaa neljään yhtä suureen osaan tehon kulutuksen mukaan. Yhden syöttöryhmän teho on luokkaa 2 – 6 MVA. Suurten koneiden myötä tarvitaan syöttöryhmiä kuitenkin aiempaa enemmän.

4.2.2 Viira- ja puristinosan ohjaus ratakatkossa

Normaalissa ajotilanteessa viira- ja puristinosien tehon kulutus on suurimmaksi osaksi seurausta suurista kitkahäviöistä. Kitkahäviöitä syntyy viiran ja imulaatikoiden kosketuspinnolla, puristimilla ja telojen vyöhykesäädöissä. Tämän lisäksi tehoa kuluttavat massapumput ennen perälaatikkoa.

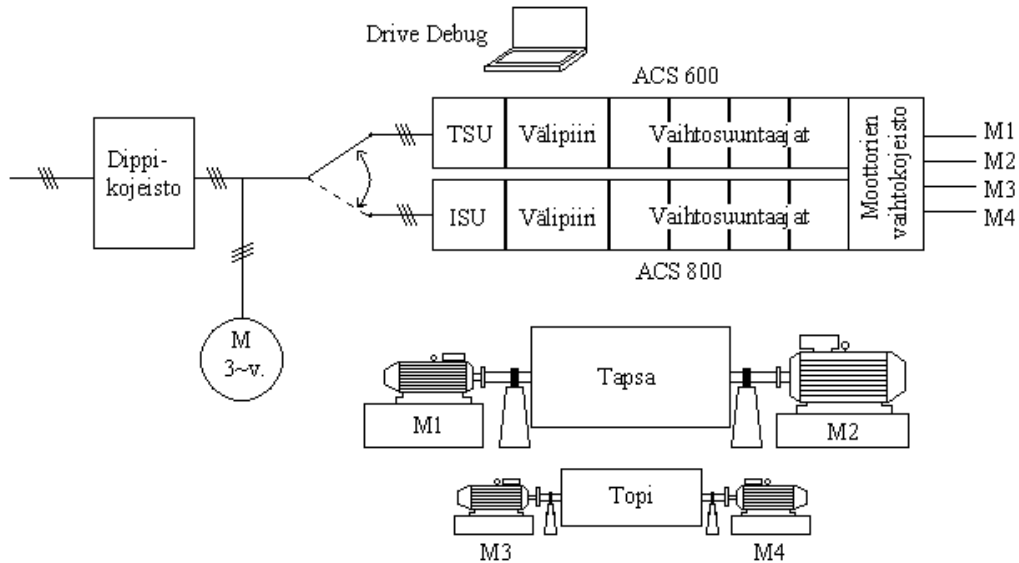
Paperin valmistus koneella aloitetaan vaihe vaiheelta. Massaa ajetaan konenopeudella pyörivälle viiralle ja tämän jälkeen suoraan pulpperiin niin kauan kunnes rainan muodostus viiralla on oikea. Tämän jälkeen voidaan siirtyä ajamaan rainaa puristinosalle. Myös puristin osalta raina ajetaan suoraan pulpperiin kunnes raina on oikeanlaista kuivatusta varten. Kuivatusosan ja konekalanterinkin jälkeen paperi ajetaan pulpperiin kunnes paperin laatu on hyvä. Valmis paperi rullataan tampo-urille kiinnirullaimessa. Tämän valmistusprosessin vaiheellisuuden seurauksesta prosessia ei tarvitse pysäyttää kokonaan paperiradan katketessa esimerkiksi konekalanterilla tai kuivatusosalla.

Katkon sattuessa kuivatusosalla voidaan viira- ja puristinosaa ajaa lähes normaalisti, mutta raina ajetaan puristimen jälkeen suoraan nokkakyypiin. Sen verran ajo poikkeaa normaalista, että yksi puristimista voidaan ohjata kevennykselle. Näin ollen tarvittava teho linjakäytöillä on lähestulkoon yhtä suuri kuin normaalissa tuotannossakin viira- ja puristinosalla. Ajettaessa massaa nokkakyypiin, on lisäksi käynnistettävä erillisillä taajuusmuuttajakäytöillä varustettuja pumppuja, joiden pumppausteho vastaa peränsyöttöpumpun tuottoa. Pumput pumppaavat nokkakyypistä massan hylkykyypiin ja sieltä edelleen sekoitussäiliöön uudelleen käyttöä varten. /28/

Jos raina katkeaa viira- tai puristinosalla, on niille suoritettava pesut roiskeiden ja kuivuneen massan poistamiseksi. Pesu vaatii yleensä koneen pysäyttämistä ja tuotantokatkon pituus on noin 45 minuuttia. Joissakin tilanteissa ja prosessihoitajista riippuen osittainen pesu voidaan tehdä myös rata päällä. Mainittakoon kuitenkin, että normaalissa ajossa viiraa ja huopaa puhdistetaan erilaisilla suihkuilla. /28/

4.3 Mittaukset

Koska paperikoneiden linjakäyttöjen päällä pysyminen jännitehäiriöiden aikana ja nopea palautuminen toimintakuntoon häiriöiden jälkeen ovat merkittävä tekijä tuotannon jatkumisen kannalta, pyritään ABB:llä kehittämään menetelmiä näiden varmistamiseksi. Tämän diplomityön yhteydessä tehtiin kahdelle erilaiselle linjakäyttötyypille jännitteen alenematestejä ABB:n laboratoriossa. Mittauksilla määritettiin, miten suuri jännitteen alenema saa olla, jotta laitteisto vielä pysyy päällä. Testatut laitteistot olivat tyristorisyöttöyksiköllä varustettu ABB:n ACS 600 -linjakäyttö ja ISU -syöttöyksiköllä varustettu ACS 800 -linjakäyttö. Molempiin linjakäyttöihin voitiin kytkeä vaihtokojeiston avulla neljä moottoria. Moottorit pyörittivät pareina kahta erisuurta huimamassaa, jotka kuvaavat esimerkiksi painavia paperirullia tai sylintereitä. Parien toinen moottori oli oikosulkumoottori ja toinen kestromagneettitahtimoottori. Kuvassa 17 on esitetty käytetyn laitteiston rakenne.



Kuva 17. ABB:n testilaboratoriossa olevan mittauslaitteiston periaatepiirros, jolla linjakäyttöjen jännitteen aleneman kestoisuutta testattiin. Sylinteriä ”Tapsa” pyöritettiin 400 kW:n oikosulkumoottorin ja 150 kW:n kestmagneettitahtimoottorin avulla. Toista sylinteriä ”Topi” puolestaan pyöritettiin oikosulku- ja kestmagneettitahtimoottorin avulla, joiden teho oli 37 kW. Jännitteen alenema saatiin aikaiseksi 200 kW:n tehoisella oikosulkumoottorilla käynnistämällä sitä.

Jännitteen alenemat toteutettiin kuvassa 17 esitetyn erillisen oikosulkumoottorin ja sitä syöttävän dippikojeiston avulla. Oikosulkumoottori oli kytketty rinnan linjakäyttöjen syötön kanssa. Dippikojeisto sisälsi kuristimia ja kontakteja. Valitsemalla kuristimia sarjaan oikosulkumoottorin syötön kanssa ja käyttämällä hyväksi oikosulkumoottorin suurta käynnistysvirtaa voitiin linjakäytön syötölle tehdä yksi-, kaksi- ja kolmivaiheisia jännitteen alenemia. Alenemien syvyys voitiin valita 5 – 76 %:iin nimellisestä jännitteestä. Vastaavien mittauksien perusteella jännite aleni pienimpään arvoonsa alle millisekunnissa. Alenema oli kestoaltaan noin 1,3 s. Aleneman kesto oli suoraan riippuvainen käynnistettävän oikosulkumoottorin käynnistysajasta eikä siihen voitu vaikuttaa.

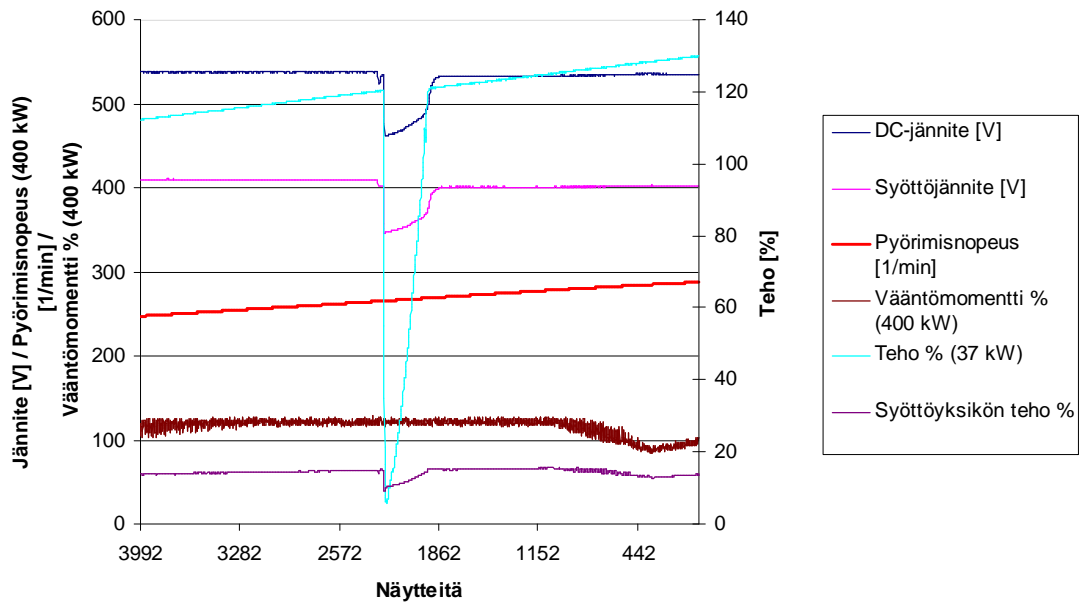
Tarkoituksena oli tehdä mittaukset, joilla voidaan verrata edellä mainituilla syöttöyksiköillä toteutettujen linjakäyttöjen ominaisuuksia jännitteen alenemien aikana. Alenemat tehtiin kaksi- ja kolmivaiheisina, sillä yksivaiheisia alenemia ei linjakäyttöjen syötöissä juurikaan esiinny. Perusajatuksena oli, että syöttöyksikön kuorma vaikuttaa

laitteiston jännitteen aleneman kestoisuuteen. Kuorman suuruuteen jännitteen aleneman tapahtuessa voitiin vaikuttaa kiihdyttämällä huimamassoja sopivasti. Kiihdytykset tehtiin TSU –mittauksissa, joko kiihdyttämällä huimamassoja erikseen pelkästään oikosulkumoottoreiden avulla tai käyttämällä isäntä-orja-ohjausta isomman telan kestmagneettitahti- ja oikosulkumoottorin välillä. ISU –syöttöyksikön mittauksissa teloille käytettiin yhteistä nopeusohjetta ns. konenopeutta. Mittauksien alkuvaiheessa kuitenkin huomattiin, ettei laitteistolla päästä kuin 20 %:iin syöttöyksikön nimellisestä kuormituksesta. Mittauksista tallennettiin ABB:n Drive Debug – käyttöjenohjausohjelmiston avulla tarvittavat signaalit 6 ms:n näytteistysajalla. Syöttöyksiköstä tallennettavia signaaleita olivat syöttöjännite, välipiirijännite ja syöttöyksikön teho. Vaihtosuuntaajista tallennettiin isompaa telaa pyörittävän 400 kW:n oikosulkumoottorin vääntömomentti ja nopeus. Pienemmästä telasta tallennettiin vain sitä pyörittävän 37 kW:n oikosulkumoottorin teho.

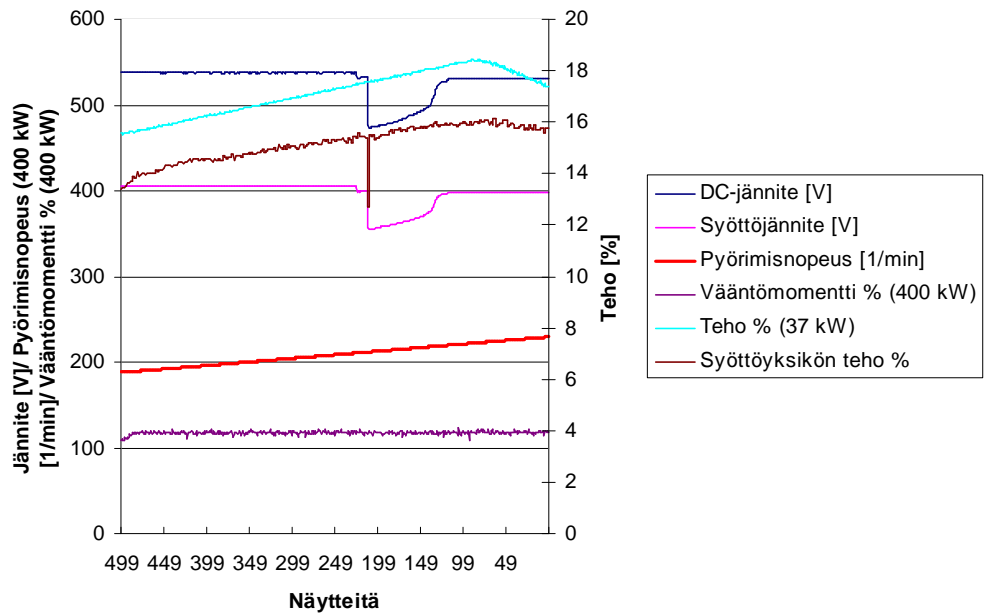
4.3.1 TSU –syöttöyksiköllä varustettu linjakäyttö jännitteen aleneman aikana

ACS 600 –linjakäytölle tehtiin mittauksia, joissa syöttöyksikön kuorma oli joko noin 15 %:a tai noin 20 %:a nimellisestä tehosta ja jännitteen alenema syötössä oli kaksi- tai kolmivaiheinen. Alenemien syvyys vaihteli 15 – 30 %:iin nimellisestä syöttöjännitteestä. Mittauksien aikana käyttöjä ajettiin moottoreina eli jarrutuksen aikaista jännitteen alenemakestoisuutta ei mitattu. Tämä siksi, että kyseisellä laitteistolla jarrutuksessa syntyisi oikosulkuja kappaleen 3.2.1 perusteella. Ennen mittauksia asetettiin syöttöyksikön syöttöjännitteen alarajaksi 60 %:a nimellisestä verkkojännitteestä, jota pienemmillä syöttöjännitteillä silta lopettaa tyristorien ohjauksen. Myös välipiirijännitteen säädön alaraja muutettiin 60 %:iin ohjearvojännitteestä. Näiden lisäksi välipiirijännitteen säädön asetukset muutettiin mahdollisimman hyvin jännitteen alenemia sietäviksi.

Näillä asetuksilla linjakäyttö pysyi päällä 15 %:n kuormalla, kun jännitteen alenema oli 15 %:a nimellisestä jännitteestä kaksi- ja kolmivaiheisina. Kuvissa 18 ja 19 on tallennettujen signaalien kuvaajat kyseisten alenemien aikana.



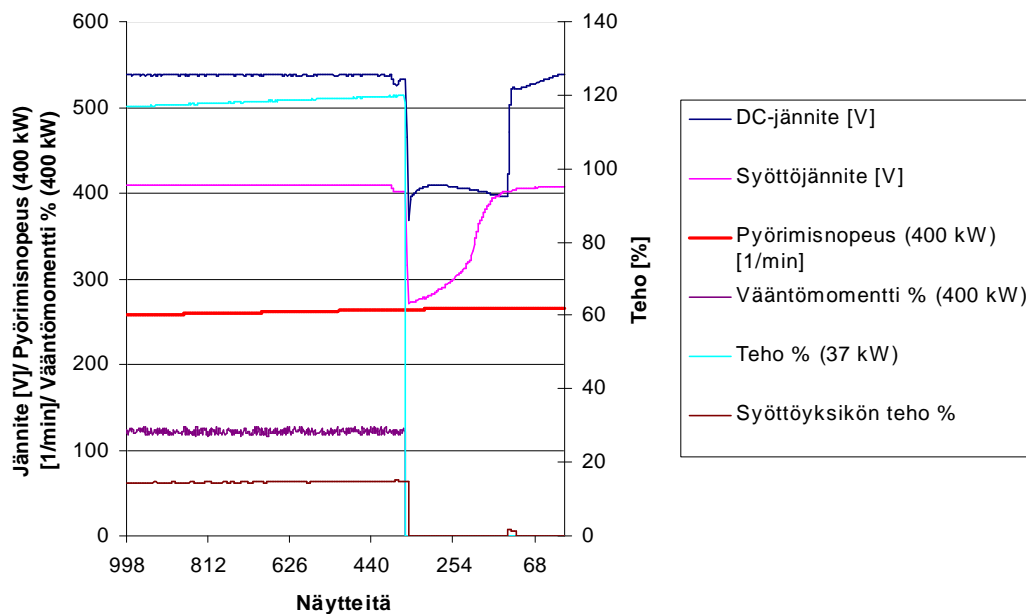
Kuva 18. TSU –syöttöyksiköllä varustettu ACS 600 –linjakäyttö jatkoi toimintaansa 15 %:n kolmivaiheisen jännitteen aleneman aikana.



Kuva 19. TSU –syöttöyksiköllä varustettu ACS 600 –linjakäyttö jatkoi toimintaansa 15 %:n kaksivaiheisen jännitteen aleneman aikana.

Tutkittaessa yllä olevista kuvaajista välipiirijännitteiden muutosta, voidaan huomata se tosi asia, ettei tyristorisyöttöyksiköllä juuri ole mahdollista kompensoida sillan ohjauksella syöttöjännitteen häiriöitä.

Jännitteen aleneman ollessa suurempi kuin 15 %:a nimellisestä jännitteestä, ei tyristorisyöttöyksiköllä varustettu linjakäyttö jatka enää toimintaansa. Tämä on nähtävissä kuvasta 20, jossa 33 %:a nimellisjännitteestä oleva alenema pysäyttää linjakäytön. Linjakäytön pysähtyessä vaihtosuuntaajat lopettavat moottorijännitteiden moduloinnin, välipiirijännitteen jäädessä liian pieneksi.



Kuva 20. TSU –syöttöyksiköllä varustettu ACS 600 –linjakäyttö pysähtyy jännitteen aleneman ollessa 33 %:a nimellisestä syöttöjännitteestä.

Kuvasta 18 voidaan huomata, että jännitteen alenemalla on vaikutusta pienempää telaa pyörittävän oikosulkumoottorin tuottamaan tehoon, mutta isompaa telaa pyörittävän oikosulkumoottorin teho ei muutu. Tämä selittyy sillä, että teloja pyörittävät moottorit on käämitty eri pyörimisnopeuksille, jolloin ajonopeuden ja moottorin nimellisen pyörimisnopeuden suhteissa on suuri ero. Isoa telaa pyörittävä 400 kW:n tehoinen

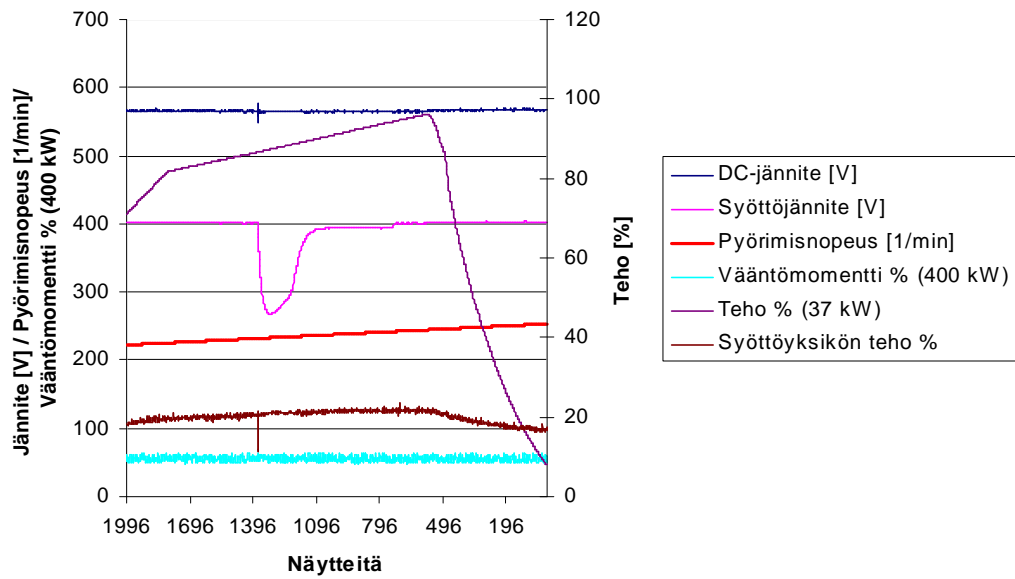
oikosulkumoottori on käämitty lähes 1500 kierrosta minuutissa pyöriväksi, kun taas pientä telaa pyörittävän 37 kW:n tehoisen oikosulkumoottorin nimellinen pyörimisnopeus on hieman alle 1000 kierrosta minuutissa. Aleneman tapahtuessa 400 kW:n moottorin pyörimisnopeus on noin 270 kierrosta minuutissa ja 37 kW:n oikosulkumoottorin pyörimisnopeus on noin 750 kierrosta minuutissa eri suurien telojen seurauksesta. Tästä voidaan päätellä miksei isomman ja hitaammin pyörivän moottorin teho aleneman seurauksesta muuttunut. Säädettyä taajuusmuuttajalla moottoreiden pyörimisnopeutta, muuttuu moottorin syöttöjännite jokseenkin vakiosuhteessa taajuuden mukaan. Näin ollen pyöritettäessä moottoria nopeudella, joka on puolet nimellisestä pyörimisnopeudesta, on moottorin liitinjännite myös noin puolet nimellisestä jännitteestä. Toisaalta nimellisellä pyörimisnopeudella on liitinjännite nimellinen. Näin ollen lähes 1500 kierroksen nimellisen pyörimisnopeuden omaavan oikosulkumoottorin pyörimisnopeuden ollessa 270 kierrosta minuutissa, on sille välipiiristä moduloitavan jännitteen suuruus hieman alle viidesosa nimellisestä jännitteestä. Toisaalta nopeudella 750 kierrosta minuutissa pyörivälle moottorille moduloidaan kolme neljäsosaa nimellisjännitteestä oleva jännite, sillä sen nimellinen pyörimisnopeus on 1000 kierrosta minuutissa. Jännitteen aleneman seurauksesta taajuusmuuttajan välipiirijännite pienenee. Jotta tästä jännitteestä saataisiin moottorille riittävän suuri jännite, voidaan modulointipulssin leveyttä kasvattaa. Tämä ei kuitenkaan auta tilanteissa, joissa ollaan lähellä moottorin nimellistä pyörimisnopeutta, sillä välipiirissä ei ole riittävästi jännitereserviä. Jännitteen jäädessä liian pieneksi, moottorin verkosta ottama teho ja siten myös vääntömomentti alenevat. Pienempää telaa pyörittävän oikosulkumoottorin tehon pudotus näkyy myös koko syöttöyksikön verkosta ottaman tehon pudotuksena kuvassa 18.

Havainnon perusteella voidaan todeta, että jännitteen alenemalla on suuri vaikutus, jos se tapahtuu paperikoneen normaalilla ratanopeudella. Ryömintänopeudella ja koneen kiihdytyksen alkuvaiheessa jännitteen alenemat eivät vaikuta niin paljon linjakäyttöjen toimintaan. Näin ollen voidaan myös todeta, että ylimitoittamalla taajuusmuuttajat ja moottorit jännitteen ja pyörimisnopeuden suhteen, voitaisiin linjakäyttöjen immunitettia jännitteen alenemille parantaa. Ylimitoitettut taajuusmuuttajat kestäisivät suuren jännitteen alenemien aikaisen virran.

4.3.2 ISU –syöttöyksiköllä varustettu linjakäyttö jännitteen aleneman aikana

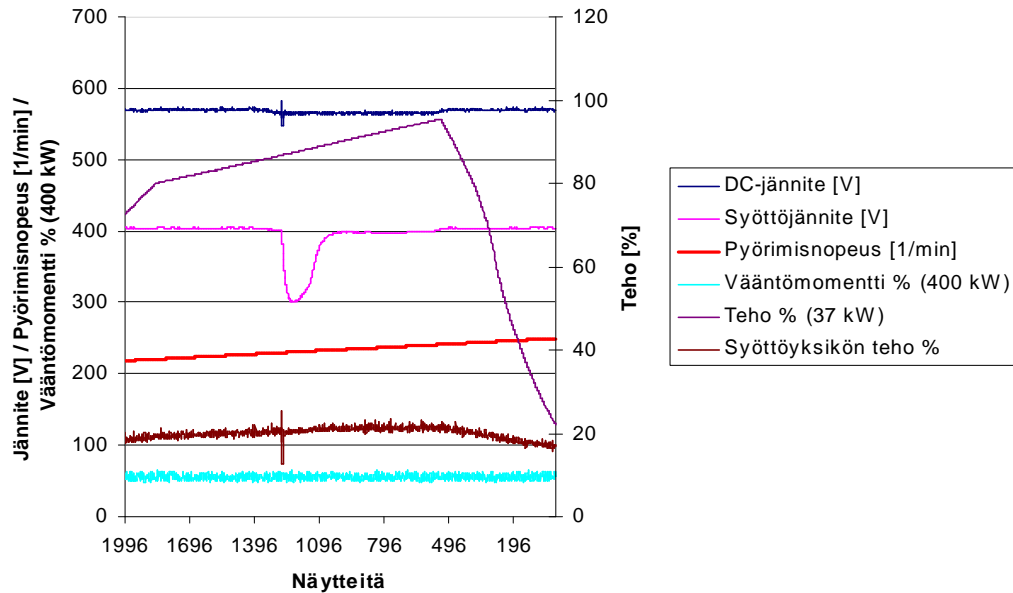
TSU –syöttöyksiköllä varustetulle linjakäytölle tehtyjen mittausten jälkeen tehtiin vertailevia mittauksia ISU –syöttöyksiköllä varustetulle ACS 800 linjakäytölle. Mittauksissa tehtiin edeltävään tapaan linjakäytön syötölle kaksi- ja kolmivaiheisia jännitteen alenemia, syöttöyksikön tehon ollessa noin 15 %:a ja noin 20 %:a nimellisestä tehosta. Jännitteen alenemien syvyydet vaihtelivat 15 – 51 %:iin nimellisestä syöttöjännitteestä. Ennen mittausten aloittamista aseteltiin välipiirijännitteen ohjearvoksi 565 V:a, joka vastaa tehollisarvoltaan 400 V:n vaihtojännitteen huippuarvoa. Joissakin mittauksissa välipiirijännitteen ohjearvo aseteltiin aina 670 V:iin. Suuremmalla välipiirijännitteellä ei kuitenkaan ollut näissä mittauksissa vaikutusta linjakäytön kykyyn sietää jännitteen alenemia, vaikka teoriassa suurempi välipiirijännite parantaa sähkökäytön immunitettia jännitteen alenemille.

ABB:n julkaisemien ISU –syöttöyksikön käyttäjäohjeiden perusteella, odotettiin laitteiston sietävän huomattavasti TSU –syöttöyksiköllä varustettua linjakäyttöä paremmin syöttöjännitteen alenemia. Näin olikin, sillä ISU –syöttöyksiköllä varustettu linjakäyttö selvisi hyvin kuvan 21 mukaisesta 33 %:n kolmivaiheisesta syöttöjännitteen alenemasta. Aleneman aikana syöttöyksikön teho oli noin 20 %:a sen nimellisestä tehosta.



Kuva 21. ISU -syöttöyksiköllä varustettu ACS 800 -linjakäyttö jatkoi hyvin toimintaansa 33 %:n kolmivaiheisen jännitteen aleneman aikana.

Kaksivaiheisten jännitteen alenemien osalta tilanne oli vastaava, sillä linjakäyttö toimi virheettömästi vielä 27 %:n jännitteen aleneman aikana. Tällöin syöttöyksikön teho oli 20 %:a nimellisestä tehosta. Tämä on nähtävissä kuvasta 22.



Kuva 22. ISU –syöttöyksiköllä varustettu ACS 800 –linjakäyttö jatkoi hyvin toimintaansa 27 %:n kaksivaiheisen jännitteen aleneman aikana.

Yllä olevista kuvaajista voi hyvin huomata, kuinka hyvin ISU –syöttöyksikkö pystyy pitämään välipiirijännitteen ohjearvossaan, syöttöjännitteen alenemasta huolimatta. Näin ollen alenemalla ei ole vaikutusta moottoreiden vääntömomenttiin. Linjakäytön toiminta aleneman aikana kattaa hyvin IEC –standardien 61800-3 ja 61000-2-4 vaatimukset. Standardien mukaan kyseisten suuruisten syöttöjännitteen alenemien aikana, linjakäytön moottoreiden vääntömomentti saisi hävitä /9/.

4.4 Käyttöjen hallittu ohjaaminen jännitteen alenemien aikana

Mietittäessä ratkaisuvaihtoehtoja jännitehäiriöiden aiheuttamiin ongelmiin paperikoneen linjakäytöissä, on asiaa käsiteltävä jännitteen alenemien tai jännitekatkojen kannalta. Näistä jännitekatkot ovat selkeästi ongelmallisimpia, sillä häiriöttömään tai ratakatkon sallivaan ajoon vaadittava energia olisi saatava kokonaisuudessaan jostakin ulkoisesta energiavarastosta. Tilannetta vaikeuttaa myös se tosiasia, ettei koneen huimamassoihin

varastoitunutta energiaa ole mahdollista jarruttaa pumppujen ja viira- sekä puristinosien telakäyttöjen käytettäväksi. Jarrutusenergian hyväksikäytön estää käyttöjen jakaantuminen eri syöttöryhmiin. Vaikka tehon siirto syöttöyksiköiden välillä olisikin mahdollista, ei tehoa ole riittävästi saatavilla. Näin ollen energiavarastoksi olisi valittava, jokin luvussa 3 esitellyistä vaihtoehdoista. Vaihtoehtojen kustannuksia on kartoitettu liitteessä 4. Liitteessä on laskettu lyijyakuilla ja SMES –laitteilla toteutettujen sähköenergian varastointilaitteistojen kustannuksia. Laskennassa käytetty teho on erään paperikoneen viira- ja puristinosien sekä massapumppujen tarvitsema teho lyhyen jännitekatkon aikana. Laskuesimerkeissä kustannukset nousevat kuitenkin muutamasta miljoonasta eurosta lähes kymmeneen miljoonaan euroon. Verrattaessa kustannuksia koko paperikoneen linjakäyttöjen hankintakustannuksiin, olisivat energiavarastojen kustannukset pahimmassa tapauksessa 3 – 5 –kertaiset.

Jännitteen alenemien aiheuttamat ongelmat voitaisiin ratkaista samoilla ulkoisilla energiavarastoilla kuin jännitekatkotkin. Toisaalta jännitteen alenemien aikana sähköverkosta on kuitenkin saatavissa vielä jonkin verran energiaa, joten ongelmaa voidaan yrittää ratkaista muillakin keinoin. Mittauksien perusteella TSU –syöttöyksiköllä varustetut linjakäytöt selviävät pysähtymättä nykyisin noin 15 %:n ja ISU –syöttöyksiköllä varustetut linjakäytöt huomattavasti syvemmästä jännitteen alenemasta. Jotta linjakäytöt selviäisivät tätä suuremmista jännitteen alenemista, voitaisiin ratkaisua etsiä käyttöjen hallitusta ohjaamisesta. Hallitun ohjaamisen lähtökohtana on paperin valmistusprosessin hyvä tuntemus. Tällöin voidaan jännitteen alenemien aikana ottaa verkosta kaikki saatavissa oleva teho ja samalla minimoida käyttöjen tehon tarve. Ohjauksen toteutus kuitenkin edellyttää, että paperirata saa katketa määrätyiltä osin. Tämä voidaan hyväksyä, kun tavoitteena on lyhyiden seisokkiaikojen saavuttaminen.

Jännitteen alenemien aiheuttamat tuotantoseisokit kestävät tyypillisesti 30 – 45 minuuttia tilanteissa, joissa paperirata katkeaa kuivatusosan lisäksi myös viira- ja puristinosalla. Tällöin koneen märkää on pysäytettävä ja pestävä massaroiskeet pois. Samalla kuivausryhmät puhalletaan puhtaaksi katkossa syntyneestä paperisilpusta, sylintereiden kuitenkin pyöriessä lähestulkoon ratanopeudella. Aikaa tällaisessa katkossa kuluu eniten juuri massaroiskeiden pesuun.

5. YHTEENVETO

Paperikoneiden sähkökäyttöjen syöttöjännitteissä esiintyy jännitteen alenemia ja jännitekatkoja. Jännitteen alenemat voivat olla kaksi- tai kolmivaiheisia ja tyypillisesti niiden syvyys vaihtelee 10 – 40 %:iin nimellisestä syöttöjännitteestä. Tyypillinen jännitteen alenema on kestoltaan noin 100 millisekuntia. Sähkökäyttöjä käsittelevät standardit vaativat, että laitteistot sietävät 10 %:n syvyisen jännitteen aleneman laitteiden toiminnan häiriintymättä. Tätä syvempien alenemien seurauksesta sähkökäytöt saavat pysähtyä. Nykyiset paperikoneiden sähkökäytöt täyttävät hyvin standardien vaatimukset, mutta asiakkailta käytännössä esiintyvistä jännitehäiriöistä selviytyminen onkin suurempi haaste. Parhaiten jännitteen alenemia sietävä nykytuotannossa oleva linjakäyttö toimii kuitenkin normaalisti laboratoriomittauksissa vielä 33 %:n jännitteen alenemien aikana. Liitteestä 5 on nähtävissä millaisista jännitteen alenemista ABB:n tyristori- ja IGBT – syöttöyksiköt laboratoriomittauksissa selviävät.

Jo puolen verkkojakson pituinen jännitekatko voi pysäyttää sähkökäytön. Suurilla investoinneilla tilannetta voitaisiin parantaa, lisäämällä sähkökäytön välipiiriin sähköistä lisäenergiaa. Lisäenergian varastoinnin kustannukset ovat nykyisin kuitenkin kaikilla vaihtoehdoilla vähintään 3 – 5-kertaiset verrattuna sähkökäyttöjen hankintakustannuksiin. Nykyisin tuotteistettuja vaihtoehtoja paperikoneiden sähkökäyttöjen sähköenergian varastoiksi olisivat suprajohtava käämi tai lyijyakusto. Lähivuosina muita tuotteistettavia sähkökäyttöjen energiavarastoja voisivat olla Nikkeli-kadmiun- ja Natrium-sulfidiakustot, epäsymmetriset hybridikondensaattorit ja suuritehoiset vauhtipyörät.

Jännitteen alenemien aiheuttamia negatiivisia vaikutuksia paperin valmistusprosessiin voitaisiin pienentää ratakaton hallitulla ohjaamisella. Tämä edellyttäisi kuitenkin aleneman aikaista sähkökäyttöjen hallittua ohjaamista. Tähän tarvittaisiin nykyistä nopeampia sähkökäyttöjen ohjainlaitteita ja nopeaa jännitteen valvontaa sekä mahdollisesti sähkökäyttöryhmien uudelleenjärjestelyä.

LÄHDELUETTELO

1. Sesko ry. [WWW-dokumentti]. Saatavissa: <http://www.sesko.fi>. [viitattu 19.7.2004]
2. Carlsson Fredrik. On Impacts and Ride-Through of Voltage Sags Exposing Line-Operated AC-machines and Metal Processes. Väitöskirja. Tukholma. KTH Electrical Engineering. 2003.
3. CENELEC. Voltage characteristics of electricity supplied by public distribution systems. Eurooppalainen standardijulkaisu EN 50160. 1999.
4. Erkkilä Ilkka. DC Drive at supply voltage incontinuity. ABB Oy:n sisäinen selvitys. Helsinki. Pulp&Paper. 2002.
5. Salminen Anttijuusi. Verkkovaihtosuuntaajan verkkohäiriösietoisuus. Diplomityö. Espoo. TKK. 2003.
6. IEC–standardoimisjärjestö. Electromagnetic compatibility (EMC) – Part 2-4: Environment – Compatibility levels in industrial plants for low-frequency conducted disturbances. Kansainvälinen standardijulkaisu IEC 61000-2-4. 2002.
7. Erkkilä Ilkka. Powerin jännitekatkon sieto. ABB Oy:n sisäinen selvitys. Helsinki. Pulp&Paper. 1998.
8. IEC–standardoimisjärjestö. Electromagnetic compatibility (EMC) – Part 2: Environment, Section 1: Description of environment for low-frequency conducted disturbances and signalling in public power supply systems. Kansainvälinen standardijulkaisu IEC 1000-2-1. 1990.
9. IEC–standardoimisjärjestö. Adjustable speed electrical power drive systems – Part 3: EMC requirements and specific test methods. Kansainvälinen standardijulkaisu IEC 61800-3. 2004.
10. Halonen Mikko. Sähkönjakeluverkon keskeytykset, keskeytystilastointi ja toimitustakuut. Sähkövoimatekniikan erikoiskysymyksiä. Lappeenranta. LTKK. 2000.
11. Dugan Roger C. et al. Electrical Power Systems Quality, second edition. Yhdysvallat. The McGraw Hill Companies. 2003.
12. ABB Oy:n arkisto.
13. ABB Oy. Low Voltage Apparatus. Block contactors, Motor protection, Accessories. Tekninen tuoteluettelo. Västerås.
14. ABB Oy. AC Drives Technical Guide Book. Drives. 2003.

15. Aura Lauri & Tonteri Antti J. Teoreettinen sähkötekniikka ja sähkökoneiden perusteet. Porvoo. WSOY:n graafiset laitokset. 1995.
16. Suomalaiset ABB –yhtiöt. Teknistä tietoa ja taulukoita. Käsikirjan yhdeksäs painos. Vaasa. 2000.
17. Aura Lauri & Tonteri Antti J. Sähkämiehen käsikirja 3, Tehoelektroniikka ja sähkökoneiden käyttö. Porvoo. WSOY:n graafiset laitokset. 1986.
18. Mård Matti. Sähkökäyttö ja tehoelektroniikka. Jyväskylä. Otatieto. Gummerus Kirjapaino Oy. 1993.
19. Kärnä Juhani & Saransaari Pertti. Tehoelektroniikka, Tasa- ja vaihtovirtakoneiden tyristorikäytöt. Espoo. Otapaino. 1979.
20. ABB Industry Oy. ACS 600 Diode Supply Sections 140 to 5200 kVA. Käyttäjän ohje. Suomi. Dark. 2001.
21. ABB Industry Oy. ACS 600 Thyristor Supply Sections 16 to 6500 kW. Käyttäjän ohje. Suomi. Dark. 1999.
22. ABB Oy. ACS 600, ACS 800 ACA 635 IGBT Supply Sections 260 to 4728 kVA, ACS 800-17 Line-side Converter 120 to 1385 kVA. Käyttäjän ohje. Suomi. Dark. 2003.
23. Juha Pyrhönen. Sähkökäytöt 2003. Luentomateriaalia. Lappeenranta. LTKK. 2003.
24. Mohan N. et al. Power Electronics, Converters, Applications and Design. New York: Wiley. 1995.
25. Elovaara Jarmo & Laiho Yrjö. Sähkölaitostekniikan perusteet. Hämeenlinna. Karisto Oy. 1988.
26. Raili Alanen et al. Energian varastoinnin nykytila. Projektiraportti. VTT Prosessit. 2003
27. Talonpoika Mika. Jännitekatkossa ja –alenemassa prosessin ohjauksen UPS – varmentaminen, kriittiset erilliskäytöt, hydrauliiikka, instrumentti-ilma, sähkönjakelu. ABB Oy:n muistio tapaamisesta Jaakko Pöyry Oy:n toimistolla. Helsinki. Prosessiteollisuus. 2004.
28. Talonpoika Mika. Kysymyksiä Kaukaalle määränpään tehoista rata-/ sähkökatkossa. ABB Oy:n muistio. Helsinki. Prosessiteollisuus. 2004.
29. Kunnossapitoyhdistys. Pumppujen energiansäästö- ja kunnonvalvontamenetelmien kehittäminen. Tutkimushankkeen loppuraportti. Kunnossapito –lehden erikoisliite 6/1995.

Taulukko 1. Standardin IEC 61800-3 mukaiset sähkökäytön hyväksymiskriteerit sähkömagneettisia häiriöitä vastaan /5, 9/.

Kohta	Hyväksymiskriteerit ^a		
	A	B	C
Yleinen järjestelmän toiminta	Ei huomattavia toiminnan ominaispiirteiden muutoksia Toimii tarkoituksenmukaisella tavalla määrättyjen toleranssien rajoissa	Huomattavia toiminnan ominaispiirteiden muutoksia (näkyviä tai kuuluvia) Itsestään toipuva	Sammuminen, muutoksia toiminnan ominaispiirteissä Suojaavien laitteiden liipaisu ^b Ei itsestään toipuva
Erikislaatuinen järjestelmän toiminta Vääntömomenttia kehittävä käyttäytyminen	Vääntömomentin hajonta määriteltyjen toleranssien rajoissa	Väliaikaista vääntömomentin hajontaa määriteltyjen toleranssien rajojen ulkopuolella Itsestään toipuva	Vääntömomentin häviäminen Ei itsestään toipuva
Alikomponenttien toiminta Tehoelektroniiikan ja ajopiirien toiminta	Ei puolijohdetehokytkimen virhetoimintaa	Väliaikaista virhetoimintaa, joka ei voi aiheuttaa sähkökäytön tahatonta sammumista	Sammuminen, suojaavien laitteiden liipaisu ^b Ei talletettujen ohjelmien, käyttäjäohjelmien tai asetusten menetystä Ei itsestään toipuva
Alikomponenttien toiminta Informaation käsittely ja anturitoiminnot	Häiritsemätöntä yhteydenpitoa ja datan vaihtoa ulkoisiin laitteisiin	Väliaikaista häiriytyntä yhteydenpitoa, mutta ei virheraportteja sisäisistä tai ulkoisista laitteista, mikä voisi aiheuttaa sammumisen	Virheitä yhteydenpidossa, tiedon ja informaation menetystä Ei talletettujen ohjelmien, käyttäjäohjelmien tai asetusten menetystä Ei itsestään toipuva
Alikomponenttien toiminta Näyttöjen ja ohjauspaneelien toiminta	Ei muutoksia näkyvässä näyttöinformaatiossa, ainoastaan heikkoa valon intensiteetin vaihtelua loistediodeissa tai vähäistä merkkien siirtymistä	Näkyviä väliaikaisia muutoksia informaatiiossa, epätoivottua loistediiodivalaistusta	Sammuminen, pysyvä informaation menettäminen tai luvaton toimintatila, selkeästi vääriä näyttöinformaatiota Ei talletettujen ohjelmien, käyttäjäohjelmien tai asetusten menetystä

^a Hyväksymiskriteerit A, B, C – Virhekäynnistykset eivät ole hyväksytyjä. Virhekäynnistys on tahaton muutos logiikkatilasta “SEIS”, joka voi käynnistää moottorin.
^b Hyväksymiskriteeri C – Toiminta voidaan palauttaa manuaalisella resetoinnilla. Sulakkeiden palaminen on sallittua verkkokommutoiville konverttereille, jotka toimivat invertoivassa tilassa.

Liite II

Taulukko 1. Jännitevaihtelun, -epätasapainon ja taajuusvaihtelun yhteensopivuustasot standardin IEC 61000-2-4 mukaan /6/.

Häiriö	Luokka 1	Luokka 2	Luokka 3
Jännitevaihtelun rajat suhteessa nimelliseen jännitteeseen $\Delta U/U_n$	$\pm 8 \%$	$\pm 10 \%$ ^a	+10 % to -15 % ^b
Jännite-epätasapaino U_{neg}/U_{pos}	2 %	2 %	2 %
Taajuusvaihtelu Δf	± 1 Hz	± 1 Hz	± 1 Hz
^a Arvoa ei määritelty IEC 61000-2-2:ssa. ^b Katso IEC 61000-2-4 lukua 5.2. ^c ± 2 Hz eristetyissä sähköverkoissa.			

Sähköenergian varastoinnin kustannusesimerkkejä:

Esimerkeissä on laskettu erään paperikoneen viira- ja puristinosien sekä massapumppujen tehon tarpeen kattavien laitteistojen kustannukset. Laitteistot varastoivat jännitekatkon aikana vaadittavan tehon (10,5 MW). Kustannusarviot (\$/ kW) ovat peräisin VTT Prosessit –tutkimuslaitoksen julkaisusta Energian varastoinnin nykytila ja eräältä vauhtipyöriä taajuusmuuttajien välipiirin sähköenergian varastoinnissa hyödyntävältä yhdysvaltalaiselta yritykseltä. Laitteistot voidaan sijoittaa tehdasrakennuksen ulkopuolella rekan perävaunuihin tai tehdasrakennuksen sisällä sähkökeskusten yhteydessä oleviin tiloihin.

Esimerkki 1:

Lyijyakuja hyödyntävällä laitteistolla kustannus on halvimmillaan 239 \$/ kW ja kalleimmillaan 805 \$/ kW vuoden 1995 kurssien mukaan /26/.

Laitteiston halvin hinta: $239 \text{ \$/kW} \cdot 10500 \text{ kW} = 2\,509\,500 \text{ \$}$

Laitteiston kallein hinta: $805 \text{ \$/kW} \cdot 10500 \text{ kW} = 8\,452\,500 \text{ \$}$

Esimerkki 2:

Suprajohtavaakäämiä hyödyntävän laitteiston kustannus on 300 \$/ kW /26/.

Laitteiston hinta: $300 \text{ \$/kW} \cdot 10500 \text{ kW} = 3\,150\,000 \text{ \$}$

Taulukko 1. TSU- ja ISU –syöttöyksiköillä varustettujen paperikoneen linjakäyttöjen selviytyminen jännitteen alenemista laboratorio-olosuhteissa. Alenemien aikana TSU –syöttöyksikön teho oli 15 %:a ja ISU –syöttöyksikön 20 %:a nimellisestä tehosta.

