

SATAKUNNAN AMMATTIKORKEAKOULU

Juha-Pekka Uus-Mäkelä

KUULAMYLLYN SÄHKÖKÄYTÖN UUSIMINEN

TEKNIikka PORI

SÄHKÖTEKNIIKAN KOULUTUSOHJELMA

Sähkö- ja automaatiotekniikan suuntautumisvaihtoehto

2007

## TIIVISTELMÄ

Työn nimi	Kuulamylyn sähkökäytön uusiminen
Tekijä	Juha-Pekka Uus-Mäkelä
Oppilaitos	Satakunnan Ammattikorkeakoulu Tekniikka Pori Tekniikantie 2 28600 PORI
Koulutusohjelma	Sähkötekniikan koulutusohjelma Sähkövoima- ja automaatiotekniikan suuntautumisvaihtoehto
Työnohjaaja	Kerkkänen Yrjö
Avainsanat	taajuusmuuttaja, muuntaja, yliaalto
UDK	621.31, 621.314.2
Sivut	40

---

Tämän opinnäytetyön tarkoituksena oli tutkia käytön vaihdon vaikutuksia muuntajan kuormitettavuuteen. Työn ensimmäisessä osassa on esitelty opinnäytetyö aihe yleisesti ja kuvattu lyhyesti OMG Harjavalta Nickel Oy sekä sen tuotteet. Vanhatekniikka on kuvattu lyhyesti ja kerrottu sen haittapuolet. Uudentekniikan tuomat parannukset on kuvattu tarkemmin. Opinnäytetyössä on suoritettu laskelmat syöttävästä muuntajasta ja arvioitu käytön vaihdon vaikutuksia.

## ABSTRACT

Title	Renewal electric drive of grinding mill
Name	Juha-Pekka Uus-Mäkelä
Polytechnic	Satakunta Polytechnic School of Technology Pori Tekniikantie 2 28600 PORI
Degree Program	Electrical Engineering Electrical Power Engineering and Automation Technology
Supervisor	Kerkkänen Yrjö
Keywords	frequency converter, transformer, harmonic
UDC	621.31, 621.314.2
Pages	40

---

The purpose of this final year project was examined how the drive exchange influence transformers load capacity. In the first part of final year project are proposed subject of thesis and described briefly OMG Harjavalta Nickel Inc and its products. The old technology is described briefly and tells its drawback. Improvements of new technology are described exact. In the final year project are performed calculations supply transformer and estimate influence of exchange the drive

.

## SISÄLLYS

TIIVISTELMÄ	2
ABSTRACTT	3
SYMBOLI- JA TERMILUETTELO	6
1 JOHDANTO	8
1.1 OMG Harjavalta Nickel Oy	8
1.2 Työn lähtökohta ja kuvaus	9
2 NYKYINEN TEKNIikka	11
3 UUSI TEKNIikka	12
3.1 Moottorin kuormitettavuus	14
3.2 Taajuusmuuttaja tekniikka	14
4 MUUNTAJA	15
5 YLIAALTOJEN VAIKUTUKSET	18
5.1 Resonanssi	18
5.2 Muuntaja ja moottorit	18
5.3 Muita haitta vaikutuksia	19
6 YLIAALTORAJOJA KOSKEVAT STANDARDIT	20
6.1 EMC-tuotestandardi ja erityiset testausmenetelmät	20
7 VIRTA- JA JÄNNITESÄRÖJEN MITTAUKSET	21
8 SÄRÖJEN LISÄÄNTYMISEN SIMULOINTI	23
9 MUUNTAJAN TODELLINEN KUORMITETTAVUUS	25

10 TAAJUUSMUUTTAJAN PARAMETROINTI	27
10.1 Suojaukset	27
11 MOOTTORIN LAAKERIVAURIOIDEN EHKÄISY	28
12 TULOKSET	29
13 LÄHDELUETTELO	30

## SYMBOLI JA TERMI LUETTELO

$n$	pyörimisnopeus
$f$	taajuus
$p$	tapapariluku
$\Delta n$	pyörimisnopeuden alenema
$U_{IVk}$	käämiin indusoitunut jännite
$U_V$	moottorin syöttöjännite
$N_s$	staattorin johdinkierrosluku
$k$	vakio
$\phi$	vuoto
$I_{thd}$	kokonaisvirtasärö
$I_1$	suuntajakäytön virranperusaalto
$n$	yliaallon järjestysluku
$I_n$	n:s yliaaltovirta
$a_1$	virranhautauman aiheuttama käämiresistanssin lisäys perusaallolla 50 Hz
$q$	virranhautauman aiheuttama käämiresistanssin lisäyksen taajuusriippuvuus
$S_n$	muuntajan nimellisteho
$U$	muuntajan toisiojännite
$e$	pyörrevirta häviöiden suhde (50 Hz) resistiivisiin häviöihin nähden
$U_1$	taajuusmuuttajan syöttöjännite
$I_1$	taajuusmuuttajan nimellisvirta
$U_{n1}$	muuntajan ensiojännite
$U_{n2}$	muuntajan toisiojännite
$I_{n1}$	muuntajan ensiövirta

$I_{n2}$  muuntajan toisiovirta  
 $Z_k$  muuntajan oikosulkusuhte

# 1 JOHDANTO

## 1.1 OMG Harjavalta Nickel Oy

OM Group, Inc. on maailman johtava pitkälle jalostettujen metallipohjaisten orgaanisten ja epäorgaanisten erikoiskemikaalien, pulvereiden sekä erilaisten nikkeli- ja koboltti- tuotteen valmistaja ja toimittaja. OMG on myös johtava perus- ja arvometallien jatkojalostaja. Konsernin tuotantoprosesseissa valmistetaan koboltti-, nikkeli- ja kupari- pitoisista raaka-aineista laadukkaita tuotteita noin 25 teollisuuden eri alueelle. OMG Oy:llä on 50 maassa yli 1700 asiakasta, joille toimitetaan yli 600 erilaista tuotetta

Tuotantoa OMG:llä on Pohjois- ja Etelä-Amerikassa, Aasiassa, Afrikassa, Australiassa ja Euroopassa. Pääkonttori sijaitsee USA:n Clevelandissa. Suomessa OMG:llä on tuotantoa Harjavallassa ja Kokkolassa

OMG Harjavalta Nickel Oy (HNO) on Harjavallan Suurteollisuuspuiston alueella toimiva yritys. Suurteollisuuspuiston alueella toimii yhteensä kaksitoista omalle alalleen erikoistunutta yritystä, jotka toimivat kiinteässä yhteistyössä keskenään. Nikkeliä suurteollisuuspuiston alueella on tuotettu jo vuodesta 1960 asti. Alunperin Outokumpu Oy:n omistuksessa ollut nikkeli- ja koboltti- tuotanto siirtyi vuonna 2000 OMG:lle jolloin OMG Harjavalta Nickel Oy perustettiin.

OMG Harjavalta Nickel Oy tuottaa erilaisia sekä erilaatuisia nikkeli- ja koboltti- tuotteita useille teollisuuden eri alueille. Nikkeli- ja koboltti- tuotannon raaka-aineina OMG käyttää rikasteseoksia sekä nikkeli- ja koboltti- romua ja muita kierrätysmateriaaleja. Itse kehitettyjen tuotantoprosessien ja tuotantomenetelmien sekä vuosikymmenien kokemuksen ansiosta OMG Oy:n tuotantotekniikka mahdollistaa lähes kaikkien nikkeliä sisältävien materiaalien käyttämisen raaka-aineena

Tuotantoprosessin ensimmäisessä vaiheessa raaka-aineet liuotetaan kahdessa eri liuotusvaiheessa (LSU- ja SU-liuottamo). Liuottamoilta saatu nikkeli- ja koboltti- liuos



johdetaan kobolttiuttoon, jossa siitä poistetaan merkittävänä epäpuhtautena oleva koboltti. Tämän jälkeen kobolttivapaa liuos pelkistetään nikkeliä elektrolyysissä puhtaksi nikkelikatodeiksi tai pelkistämöllä korkeapaineisen vetykaasun avulla nikkelpulveriksi. Osa kobolttiutosta tulleesta liuksesta johdetaan nikkeliuttoon, jonka jälkeen puhtaasta nikkeliäliuksesta valmistetaan nikkelikemikaaleja.

HNO<sub>3</sub>:n perustuotteita on nikkelpulverista puristamalla valmistetut nikkelibriketit. Niitä käyttävät pienet ja keskisuuret sulatot sekä valimot raaka-aineinaan. muunmu-assa teräksen valmistuksessa. Nikkelpulveria käytetään erilaisissa pulverimetallurgisissa sekä kemiallisissa sovelluksissa. Elektrolyyttisesti valmistetut nikkelikatodit on tarkoitettu pintakäsittelylaitoksille vaativiin pintakäsittelykohteisiin sekä korkea-puhtautta vaativien nikkeliä sisältävien metalliseosten valmistukseen. Erilaiset nikkelikemikaalit kuten nikkeli-sulfaatti on tarkoitettu myös vaativiin pinnoitus-tarkoituksiin. Näiden tuotteiden lisäksi nikkelpulverituotannon sivutuotteena syntyy ammoniumsulfaattia, jota käytetään lannoiteteollisuudessa erikoislannoitteiden raaka-aineena. /1/,/2/

## 1.2 Työn lähtökohta ja kuvaus

SU-liuottamoon tulevat sähköuunin kivi sekä ostokivet jauhetaan märkäjauhatuksena. Kivilietteelle ja muille raaka-aineille suoritetaan yksivaiheinen atmosfääriliuotus, jota tehostetaan paineliuotuksella. SU-liuottamolla on käytössä kuulamylyjä 2 kappaletta. Kuulamylyt on varustettu 315 kW oikosulkumoottoreilla. Raskaan käynnistyksen vuoksi nykyiset moottorit on varustettu pehmokäynnistimillä. Näin pienennetään oikosulkumoottorin antamaa kovaa käynnistysääntä raskaalle mekaniikalle, vaihteille ja hammaskehille. Pehmokäynnistin pienentää virtaa rajoittamalla samalla myös käynnistysmomenttia, josta on haitta raskaan myllyn liikkeelle saannissa.

Myllyjen käytön kriittisyys on tullut erityisesti esille RCM-tarkasteluissa, joiden loppuraportissa tullaan suosittelemaan myllyjen käyttöjen vaihtamista taajuus-muuttajapohjaisiksi. RCM on luotettavuus keskeistä kunnossapitoa ja lyhenne tulee sanoista Reliability Centred Maintenance. Tilanteen korjaamiseksi on päätetty asentaa yksi vapautunut 630kW, 690V taajuusmuuttaja toiseen myllyistä. Taajuusmuuttajan käynnistys voidaan ohjelmoida hitaaksi momentin pienenemättä. Taajuusmuuttajan haittapuolena on sähköverkkoon syntyvä jännite- ja virtasärö. Syynä säröjen syntyyn on taajuusmuuttajissa yleisesti käytetty 6-pulssitasasuuntaus.

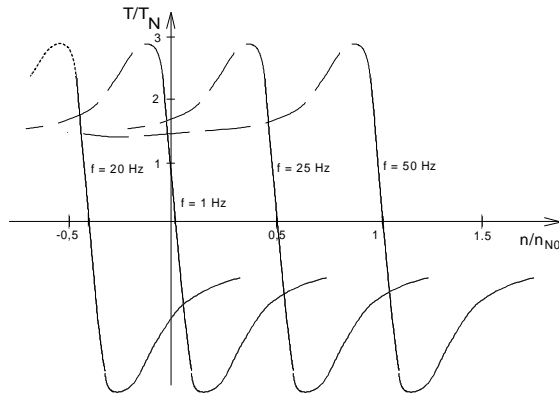
Särövaaran vuoksi tulee käytön vaihdon suunnittelussa suorittaa tarkistusmittauksia ja laskelmia tarvittavista toimenpiteistä. Samoin syöttävästä muuntajasta pitää suorittaa kuormitettavuus laskelmia, jotka tullaan toteuttamaan *Leonardo Energy:n K-Factor & Factor K calculation* ohjelmalla. Ohjelma ottaa huomioon verkon yliaallot ja suorittaa laskennan muuntajan kuormitettavuudelle. Lisäksi tullaan pohtimaan parametrintia koskevia ratkaisuja.

## 2 NYKYINEN TEKNIikka

Nykyinen käynnistystekniikka on toteutettu pehmokäynnistimen avulla. Pehmokäynnistin poikkeaa ominaisuuksiltaan muista käynnistystavoista. Pehmokäynnistimessä käytetään hyväksi sitä, että kun moottorin jännite on käynnistyksen aikana pieni, myös käynnistysvirta ja momentti ovat pieniä. Momentin pienenemisestä on haittaa raskaan myllyn liikkeelle saamisessa. Myllyn momenttikäyrä on täysin erilainen, kuin pehmokäynnistimellä ohjatun oikosulkumoottorin. Mylly tarvitsee täyden momentin heti alusta alkaen. Pehmokäynnistimessä käynnistyksen ensimmäisessä vaiheessa moottorille syötetään vain sen verran jännitettä, että vaihteiston rattaat tai ketjut kiristyvät. Toisin sanoen käynnistyksessä ei esiinny tarpeettomia nytkähdyksiä. Käytännössä tämä ei ole toteutunut, koska mylly ei lähde liikkeelle ilman heijaus liikettä. Heijaus liikkeessä myllyä pyöräytetään vähän väärään suuntaan ja vaihdetaan suunta heti toiseksi, niin käynnistys saattaa onnistua. Myllyyn jää useasti tavaraa, kun se pysäytetään ja tämä aiheuttaa käynnistysmomentin kasvun. Tavara valuu myllyn pohjalle ja käynnistyksessä se ei irtoa myllyn seinämältä heti käynnistyksessä. Kun tavara irtoaa, niin myllyn pyöriminen helpottuu. Tästä syystä pehmokäynnistin on huonoin mahdollinen vaihtoehto myllyn käytöksi.

### 3 UUSI TEKNIikka

Uusi käyttö tullaan toteuttamaan taajuusmuuttajalla. Taajuusmuuttaja sopii parhaiten raskaitten kuormien käynnistämiseen. Taajuusmuuttajan ominaisuudet mahdollistavat täyden momentin saavuttamisen heti käynnistyksestä lähtien.



Kuva 1. Oikosulkumoottorin vääntömomenttikäyriä eri taajuuksilla, kun moottorin vuo pidetään vakiona.

Kun oikosulkumoottoria ajetaan taajuusohjattuna, niin moottori toimii koko ajan momenttikäyrän pystysuoralla osalla. Tällöin moottorin pyörimisnopeus on

$$n = \frac{f}{p} - \Delta n \approx \frac{f}{p} \quad (1)$$

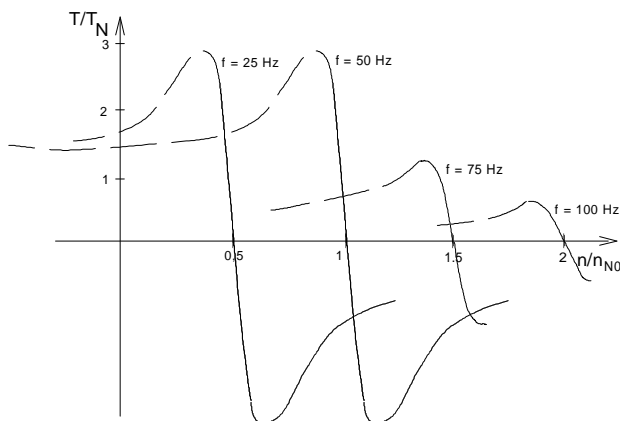
Kaavan muuttujista  $f$  on taajuus,  $p$  on napapariluku ja  $\Delta n$  on kuormituksesta johtuva pieni pyörimisnopeuden alenema, jonka määrää momenttikäyrän pystysuora osa. Moottorin käynnistäminen tapahtuu taajuutta nostamalla, nykyaikaisilla taajuusmuuttajilla ihan nolasta lähtien. Oikosulkumoottori toimii taajuusohjattuna koko ajan momenttikäyrän pystysuoralla osalla. Tällöin katkoviivalla piirretyllä momenttikäyrän osalla ei ole mitään merkitystä. Teoriasta tiedetään, että koneen staattori käämitykseen indusoitunut jännite noudattaa yksinkertaista induktio lakia

$$U_{iv} = 2\pi f N_s \Phi \quad (2)$$

Josta saadaan koneen vuolle lauseke

$$\Phi = k \frac{U_{iv}}{f} \approx k \frac{U_v}{f} \quad (3)$$

Kaavassa  $U_{iv}$  on käämiin indusoitunut jännite ja  $U_v$  moottorin syöttöjännite,  $f$  on taajuus,  $N_s$  staattorin tehollinen johdinkierrosluku ja  $k$  on vakio. Pienillä taajuuksilla  $U_{iv}$  ja  $U_v$  ovat erisuuruisia. Taajuuden noustessa  $U_{iv}$  ja  $U_v$  ovat lähes yhtä suuret. Tästä seuraa se, että vuon pitäminen vakiona kaavan 3 mukaan tarkoittaa sitä, että jännitettä on nostetta lineaarisesti, jotta vuo pysyy vakiona. Nimellispyörimisnopeudella, joka vastaa nimellistaajuutta saavutetaan nimellisjännite. Useimmiten jännite ei juurikaan kasva tästä arvosta. Mikäli taajuutta kasvatetaan yli nimellistaajuuden alkaa momentti pienetä, koska jännite ei voi enää kasvaa. Tätä aluetta kutsutaan kentänheikennysalueeksi. Kentänheikennysalueella koneen vuo siis pienenee.



Kuva 2. Toiminta vakiovuo- ja kentänheikennysalueella.

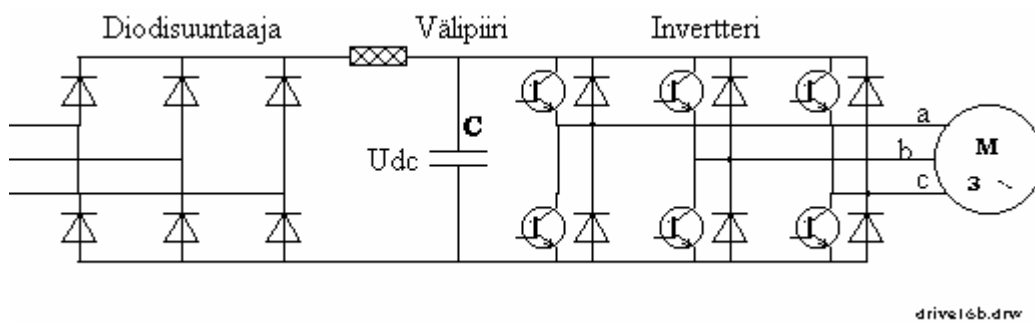
Oikosulkukoneen teoriasta tunnetaan, että maksimimomentin suuruus on verrannollinen koneen vuon neliöön. Tästä seuraa esimerkiksi, että taajuudella 100 Hz maksimimomentti on enää neljäsosa vakiovuoalueella saatavasta momentista.

### 3.1 Moottorin kuormitettavuus

Oikosulkumoottoria voidaan kuormittaa jatkuvasti vain nimellisvirralla, jolla moottorin käämitys saavuttaa suurimman mahdollisen lämpenemän. Moottoria voidaan hetkellisesti kuormittaa myös nimellisvirtaa suuremmalla virralla, kunhan huolehditaan, että kuormitusjakso ei ole liian pitkä.

### 3.2 Taajuusmuuttaja tekniikka

Taajuusmuuttaja tekniikka toteutetaan useimmiten 6-pulssi diodisillalla. Tällä tekniikalla toteutetussa taajuusmuuttajassa on kiinteä välijännite. Alla oleva piirikaavio kuvaa kiinteän välijännitteen taajuusmuuttajaa.



Kuva 3. Taajuusmuuttajan piirikaavio

Kuvan taajuus muuttaja koostuu tasasuuntaajasta, joka usein on kolmivaiheinen diodi-silta. Välipiiristä, jonka muodostaa kapasitanssi. Suodatuksesta, jota kuvaa dc välipiirissä oleva induktanssi. Ja invertteristä, joka on taajuusmuuttaja ydin. Esitetty piirikaavio kuvaa perusratkaisuja. Lisäksi taajuusmuuttajaan kuuluu nykyisin EMC-suodatin verkon puolelle ja eräissä tapauksissa du/dt suodin moottorin puolelle. Välipiirin jännite lasketaan kaavalla. /3/

$$U_{dc} = 1.35 * U \quad (4)$$

## 4 MUUNTAJA

Muuntajat, joita kuormitetaan paljon erilaisilla tehoelektronikkalaitteilla joutuvat useasti selviytymään lisääntyneistä yliaaltopitoisuuksista. Muuntajan kuormitettavuus nimellisarvoilla edellyttää, että jännite ja virta ovat sinimuotoiset. Verkon epä-lineaariset osa, joita nykypäivänä usein ovat taajuusmuuttajat, vääristävät sinikäyrän, jolloin muuntajan häviöt kasvavat ja kuormitettavuus pienenee. Erityisesti taajuus-muuttajakäytöissä tämä on otettava huomioon syöttömuuntajaa mitoittaessa. Jännitekäyrän yliaallot suurentavat muuntajan tyhjäkäyntihäviöitä. Tämä vaikutus yleensä niin pieni, ettei sitä tarvitse ottaa huomioon kuin silloin, kun muuntaja on taajuusmuuttajan ja moottorin välissä. Tällöin tarvitaan aina erikoismuuntaja.

Virtakäyrän yliaallot suurentavat muuntajan kuormitushäviöitä, koska taajuudesta riippuva pyörrevirtojen ja virranahdon aiheuttama osuus kuormitushäviöistä kasvaa. Tämä kasvu on suuntaajakäytössä niin suuri, että muuntajan kuormitettavuus laskee huomattavasti. Muuntaja on valittava siten, että kuormitushäviöt suuntaajakäytössä eivät ylitä kuormitushäviöitä muuntajan sinimuotoisella nimellisvirralla  $I_N$ . Tämä edellyttää, että kuormitusvirran perusaalto  $I_1$  täyttää ehdon

$$\frac{I_1}{I_n} \leq \sqrt{\frac{1 + a_1}{\left[ \sum_{n=1} \left( \frac{I_n}{I_1} \right)^2 + a_1 \sum_{n=1} n^q \left( \frac{I_n}{I_1} \right)^2 \right]}} \quad (5)$$

jossa	$I_1$	on suuntaajan virran perusaalto
	$n$	on yliaallon järjestysluku 1, 5, 7, 11, 13 jne.
	$I_n$	on n:s yliaaltovirta
	$a_1$	on virranahdauman aiheuttama käämiresistanssin lisäys perusaallolla 50 Hz
	$q$	on virranahdauman aiheuttama käämiresistanssin lisäyksen taajuusriippuvuus

Virranhahtauksen taajuusriippuvuus on muuntajan rakenteellinen muuttuja, jonka arvoon vaikuttaa, missä kohtaa muuntajaa lisähäviöt syntyvät. Foliokäämiselle jakelu-muuntajalle sen arvo on noin 1,5 ja lankakäämeihin varustetulle muuntajalle noin 1,7. Jos ei tiedetä muuntajan käämityyppiä, voidaan käyttää arvoa 1,7. Vaihtoehtoisesti voidaan kirjoittaa kuormitusvirran tehollisarvolle  $I$ , joka sisältää perusaallon ja yliaal-ot ehto

$$\frac{I}{I_n} \leq \sqrt{\frac{1 + a_1}{1 + \frac{a_1}{\sum_{n=1}^q \left(\frac{I_n}{I_1}\right)^2 * \sum_{n=1}^q n^q \left(\frac{I_n}{I_1}\right)^2}}} \quad (6)$$

Hakasulkulausekkeen arvo riippuu oleellisesti lisähäviökertoimen  $a_1$  arvosta. Jos yliaaltopitoisuus kuormitusvirrassa on suuri, on aiheellista käyttää eriloismuuntajaa, jonka  $a_1$  arvo on likimain

$$a_1 = 0,04 \frac{S_n}{U} \quad (7)$$

Kaavassa  $S_n$  on muuntajan nimellisteho (MVA) ja  $U$  on muuntajan toisiojännite (kV). Normaali-jakelumuuntajille  $a_1$  arvo 200kVA muuntajassa on noin 0,02 ja kasvaa suunnilleen muuntajan tehon suhteessa, ollen 2000kVA muuntajassa noin 0,19. Sama arvo saavutetaan 693V:lla ja 3150 kVA:n teholla.

Taajuusmuuttajakäytössä on esimerkiksi 6-pulssisilla yliaaltojen teoreettiset maksimi-arvot  $I_n = I_1/n$ . Käytännössä kommutoinnin vaikutuksesta ja piirin induktanssin ansiosta varsinkin korkeamman järjestysluvun yliaallot jäävät pienemmiksi. Tyypilliset hakasulkulausekkeen arvot tälle käytölle ovat luokkaa

$$\sum_{n=1}^q \left(\frac{I_n}{I_1}\right)^2 = 1,1 \dots 1,16 \quad (8)$$



ja

$$\sum n^q \left( \frac{I_n}{I_1} \right)^2 = 5 \dots 6 \quad (9)$$

Joten jos muuntajaa kuormitetaan vain taajuusmuuttajakuormalla perusaallon virta saa olla korkeintaan noin 73 % muuntajan nimellisvirrasta ja kokonaisvirran tehollisarvo noin 77 % muuntajan nimellisvirrasta. Tämä on esimerkki kaikista huonoimmasta tilanteesta, jota ei käytännössä koskaan ole. Jos kyseisiä arvoja ei ylitetä, niin teoriassa muuntaja ei ylikuormitu koskaan. Jos taajuusmuuttajakuorman rinnalla on myös lineaarista kuormaa alkaa muuntajan kuormitettavuus kasvaa. Käytännössä aina löytyy myös lineaarista kuormaa, joten muuntajaa voi kuormittaa enemmän. SU-liuottamalla on hyvin vähäinen määrä epälineaarista kuormaa ennen taajuusmuuttajan asentamista. joten käytännössä tässä tapauksessa taajuusmuuttaja kuorma muodostaa vain pienen osan kokonaiskuormasta. /4/

## 5 YLIAALTOJEN VAIKUTUKSET

### 5.1 Resonanssi

Yliaallot vaikuttavat monella haitallisella tavalla verkon komponentteihin. Yliaallot lisäävät häviöitä voimansiirrossa ja verkon komponenteissa aiheuttaen lisääntyntä lämpenemistä ja kiihdyttäen eristeiden vanhenemista. Jännitteen käyrämuodon vääristymät aiheuttavat virhetoimintoja. Kaikkein haitallisin yliaaltoihin liittyvä ilmiö on kuitenkin resonanssi. Tällöin yliaaltovirrattai jännitteet voivat kasvaa moninkertaisiksi normaaliin tilanteeseen verrattuna. Resonanssi syntyy jonkin verkon osan kapasitanssien ja induktanssien välille. Resonanssi voi olla joko sarja- tai rinnakkaisresonanssi.

### 5.2 Muuntajat ja moottorit

Muuntajaa kuormitettaessa syntyy sen sydämessä, käämityksissä ja muissa osissa häviöitä. Nämä häviöt voidaan jakaa kahteen eri häviöryhmään: tyhjäkäynti- ja kuormitushäviöihin. Yliaallot vaikuttavat häviöiden suuruuteen. Tyhjäkäyntihäviöt muodostuvat pääasiassa rautahäviöistä, jotka puolestaan voidaan jakaa hystereesihäviöihin ja pyörrevirtahäviöihin. Ne ovat riippumattomia kuormituksen suuruudesta. Suurin osa kuormitushäviöistä on resistanssissa syntyviä virtalämpöhäviöitä. Muuntajan häviöistä kuormitushäviöt muodostavat suurimman osan, sillä ne ovat muuntajan koosta riippuen moninkertaiset tyhjäkäyntihäviöihin verrattuna. Normaalista poikkeavat käyttöolosuhteet ja vikatilanteet saattavat kasvattaa molempia huomattavasti. Yliaallot aiheuttavat muuntajissa kasvaneita häviöitä ja lisälämpenemistä, joilla on merkitystä muuntajan ikään, varsinkin, jos yliaaltopitoisuus on suuri. Eniten kuormitusvirran sisältämät yliaallot vaikuttavat muuntajan resistansseissa syntyviin virtalämpöhäviöihin. Käämeissä syntyvä virranahto aiheuttaa resistanssien suurenemista korkeammilla taajuuksilla ja aiheuttaa virtalämpöhäviöiden kasvun. Valittaessa käytölle muuntaja on lähdettävä siitä, ettei muuntaja lämpene liikaa nimelliskuormallaan. Jos

tasavirtakäyttöjen syöttömuuntajaa kuormitetaan nimellisvirrallaan, kasvavat muuntajan häviöt 10–20% sinimuotoiseen virtaan verrattuna. Käämien lisälämpenemä on tällöin 4-10 astetta. Käytännössä on todettu, että jos järjestelmässä on paljon yliaaltoja, niin muuntajan kuormitusta pitäisi vähentää noin 20–30% nimellisestä, ettei muuntaja ylikuumentuisi. Yliaalloilla on myös haitallisia vaikutuksia moottoreihin. Oikosulkumoottoreissa virtalämpöhäviöt kasvavat merkittävästi, kun taas rautahäviöiden kasvulla ei ole suurta merkitystä. Kuormituksella ei ole juurikaan merkitystä häviöiden kasvuun, joten häviöiden suhteellinen osuus on suurimmillaan tyhjäkäynnissä. Lisääntyneet häviöt pienentävät hyötysuhdetta ja kasvattavat eristeiden vanhenemisnopeutta. Yliaaltojen vaikutukset käynti- ja käynnistysvääntömomenttiin ovat pienet.

### 5.3 Muita haittavaikutuksia

Yliaallot vaikuttavat elektronisiin laitteisiin monella eri tavalla. Jännitesärön aiheuttamat ylimääräiset nollakohdat tai muutokset nollakohtiin sekoittavat laitteita, jotka tarkkailevat jännitteen nollakohtaa. Tällaisia laitteita ovat mm. kellot, puolijohdekytkimet ja katkaisijat. Yliaallot heikentävät myös laitteiden ja järjestelmien tehokerrointa, sekä aiheuttavat häviöitä voimansiirrossa. Lisäksi kolmannet yliaallot aiheuttavat yllättäviä ongelmia pienjänniteverkoissa, jos niihin ei ole varauduttu. /10/

## 6 YLIAALTORAJOJA KOSKEVAT STANDARDIT

### 6.1 EMC-tuotestandardi ja erityiset testausmenetelmät

Euroopan talousalueen (ETA) jäsenmaat ovat sopineet yhteisistä vähimmäivaati-muksista, joiden avulla varmistetaan tuotteiden vapaa liikkuminen ETA-alueella. CE-merkintä osoittaa, että tuote on sitä koskevien direktiivien mukainen. Direktiivissä on luoteltu periaatteet, joita tuotteiden on noudatettava. Standardeissa on määritelty vaatimukset, jotka tuotteiden on täytettävä. SFS-EN 61800-3 on nopeus-säädettyjen PDS-käyttöjen EMC-tuotestandardi. PDS-käytöt on nopeussäädettyjä käyttöjä. Lyhenne tulee sanoista Power Drive System. Standardin täytyminen on vähimmäisedellytys PDS-käyttöjen vapaalle kaupalle ETA-alueella. Standardin SFS-EN mukaan valmistajan on ilmoitettava virran yliaaltotaso nimellisolosuhteissa, liityntapisteen nimellisestä perusvirrasta. Arvot lasketaan erikseen jokaiselle järjestysluvulle vähintään 25:n asti. Virran harmoninen kokonaissärö, THD (järjestys lukuun 40 asti) ja sen suurtaajuuskomponentti PHD arvioidaan. Näissä vakiolaskelmissa PDS-käyttö oletetaan kytketyksi PCC-pisteeseen, jossa  $R_{sc} = 250$  ja jonka lähtöjännitesärö on alle 1 %. PCC on yhteiskytkentäpiste, joka voi olla yhteinen käytettävälle laitteelle ja muille laitteille.

$R_{sc}$  oikosulkusuhte on syötön oikosulkuteho yhteiskytkentä pisteessä suhteessa laitteen nimelliseen näennäistehoon.  $R_{sc}$  voidaan laskea kaavalla  $R_{sc}=S_s/S_n$ . Verkon sisäisen impedanssin oletetaan olevan puhdasta reaktanssia. Julkisessa pienjänniteverkossa standardin IEC 1000-3-2-standardin rajoitukset ja vaatimukset koskevat laitetta, jonka nimellisvirta on  $< 16A$ . IEC 1000-3-4-standardin käyttöä suositellaan laitteissa, jonka nimellisvirta on  $>16 A$ . Jos PDS-käyttöä käytetään teollisuus-asennuksissa, voidaan tarkastella asennusta kokonaisuutena ottaen huomioon taloudelliset seikat. Tämä lähestymistapa perustuu tehoon, jonka verkko pystyy syöttämään kaikissa olosuhteissa. Asennuksen yliaaltolaskemismenetelmässä sekä jännitesärön tai yliaaltovirran kokonaishäiriön rajoista on sovittu. IEC1000-2-4-standardissa annettuja yhteensopivuusrajoja voidaan käyttää jännitesärön rajoina./6/

## 7 VIRTA- JA JÄNNITESÄRÖJEN MITTAUKSET

Taajuusmuuttaja synnyttää verkkoon suuren joukon virta- ja jänniteylialtoja. Nii-den haitallisuudesta sähkölaitteille on paljon tutkimustuloksia. Keskuksessa, jossa pehmokäynnistin korvataan taajuusmuuttajalla, ei tällä hetkellä ole juurikaan taajuusmuuttajakuormaa. Mittauksilla päätettiin varmistaa asia ja samalla selvittää keskuksen sähkönlaatu. Mittausraportti löytyy liitteestä 1. Saadut mittaus tulokset olivat hyvin linjassa oletusten kanssa. Keskuksen sähkönlaatu oli todella hyvä, säröjen ollessa luokkaa 1,5 %. Teollisuussähköverkoille ei ole varsinaisesti asetettu mitään rajaa kuinka paljon säröjä saisi olla. Yksityisellä puolella rajat on tarkkaan määritelty. Mittaukset suoritettiin Dranetz PP1 verkkoanalysointilaitteella. Suurimmat ongelmat tässä tapauksessa liittyvät syöttävään muuntajaan. Yliaalto pitoisissa verkoissa voi joutua laskemaan syöttävänmuuntajan kuormitusta jopa 20 %. Tässä kyseissä tapauksessa kun muuntaja on vielä kuivamuuntaja ongelmat voivat syntyä ratkaiseviksi. Vaihejännitteet olivat minimissään 389 V ja maksimissaan 397 V ja keskimäärin jännite oli 392 V. Jännitteen vaihtelu väli oli tällä mittausjaksolla siis 8 V. Kuormitusvirta mittausajanjaksolla vaihteli 4785 A:n ja 4854 A:n välillä, keskimäärin kuormitusvirta oli kuitenkin 4822A. Mittaus jakson lyhydestä johtuen ei pystytä arvioimaan todellista vaihtelu väliä, mutta tutkimusten perusteeksi voidaan ottaa tuo keskimääräinen virta 4922 A. Näennäisteho (S) oli noin 1777 kVA ja pätöteho (P) 1636 kW. Loistehontarvetta verkossa oli noin 694 kVAr. Keskuksen tehokerroin oli keskimäärin 0.92, loistehon kompensointi tarvetta olisi. Kompensoimalla tehokerroin mahdollisimman lähelle ykköstä saavutettaisiin energia säästöjä. Taajuusmuuttaja ottaa verkosta vain pätötehoa . Taajuusmuuttaja synnyttää tarvittavan loistehon. Suorat moottorikäytöt tarvitsevat siis magnetointiinsa verkosta otettua loistehoa. Teollisuudella ja muillakin suurkuluttajilla on velvollisuus kompensoida loistehoa. Siis toisin sanoen: loisteho maksaa todella paljon, joten sitä ei kannata jättää kompensoimatta. Jännitesäröä oli keskimäärin 1.6 %. 7. virtayliaalto oli vallitsevin, mutta sitä oli keskimäärin vain 1,5 %. Vähäinen virta- ja jännitesärö varmistaa hyvän pohjan

taajuusmuuttaja asennukselle. Näin pieniä säröarvoja esiintyy tavallisessa sähköverkossa useasti. Säröjen lisääntyminen ja niiden tarkka ennustaminen ja laskeminen tarkasti on useasti täysin mahdotonta. Säröjen lisääntymisen ja niiden verkkovaikutusten määrittämiseen on olemassa ohjelmia, jotka pyrkivät ottamaan mahdollisimman tarkkaan kaikki verkon komponentit huomioon. Esimerkiksi ABB:llä on tähän tarkoitukseen kehitetty ohjelma, joka laskee yliaaltosäröä. Ohjelman nimi on DriveSize. Virtayliaalloista vain 7. vähän kohollansa. Vähäinen virtayliaalto pitoisuus johtuu siitä, että verkossa ei ole tällä hetkellä juurikaan sellaista kuormaa, joka synnyttäisi virtayliaaltoja.

## 8 SÄRÖJEN LISÄÄNTYMISEN SIMULOINTI

Sähköverkoja on mahdollista simuloida siihen tarkoitetuilla ohjelmilla. Simulointi vaatii tiedon käytössä olevista laitteista. Simuloinnin kuvat löytyvät liitteestä 2. Suuritehoisen taajuusmuuttajan lisääminen sähköverkkoon aiheuttaa erityisesti virtasärön lisääntymistä. Virtasärön tekee ongelmalliseksi se, että se laskee muuntajan kuormitettavuutta. Simuloinnilla saadut tulokset paljastivat, että mikäli syöttävään 3150 kVA:n muuntajaan on kytketty 630 kW:n taajuusmuuttaja ja 315 kW:n moottori niin virtasärö nousee lukemaan 52,89 %. Kyseistä tilannetta ei tule koskaan käytännössä olemaan vaan aina on myös lineaarista kuormaa, joka ei synnytä virta- eikä jännitesäröä. Toinen simulointi suoritettiin siten, että kuormaksi asetettiin tarkistusmittauksissa oleva keskimääräinen teho 1636 kW. Näillä arvoilla simuloituna virtasäröksi tuli 10,75 %. Virtasärö pienenee vielä jos lineaarinen kuorma lisääntyy. Virtasärö voidaan määrittää alla olevalla kaavalla

$$I_{thd} = \frac{\sqrt{\sum_{n=2}^{\infty} I_n^2}}{I_{V1}} \quad (10)$$

Simuloinnissa tarvittavat lähtötiedot saadaan muuntajan kilpiarvoista ja moottorin ja taajuusmuuttajan tyyppien tiedoista. Virtasäröjen lisääntyminen aiheuttaa sen että muuntajan kuormitettavuus laskee.

Simuloinnin lähtö tiedot

Taajuusmuuttaja

Vacon 650 CX 6A0N0

sarja nro. 7193268

Nimellisteho 630 kW

$U_1 = 690 \text{ V}$

$I_n = 620/700 \text{ A}$

$U_n = 0...690 \text{ V}$

$$I_n = 620/700 \text{ A}$$

Muuntaja

Teho 3150 kVA

$$U_{n1} = 10500 \text{ V}$$

$$I_{n1} = 173.21 \text{ A}$$

$$U_{n2} = 690 \text{ V}$$

$$I_{n2} = 2635.7 \text{ A}$$

$$Z_k = 6\%$$

Muuntajan kuorma tällä hetkellä

Näennäisteho (S) 1777 kVA

Pätöteho (P) 1636 kW

Loisteho (Q) 694 kVAr

Muuntaja on kuiva muuntaja

Kytkentäryhmä Dyn11

Moottori 315 kW



## 9 MUUNTAJAN TODELLINEN KUORMITETTAVUUS

Virtayliaallot vaikuttavat muuntajan kuormitettavuuteen paljon. Lisääntyneet pyör-revirtahäviöt aiheuttavat tämän kuormitettavuuden laskun. Mikäli olisi vain taajuus-muuttaja kuormaa, asetuisi tämä arvo noin arvoon 85,50 % täydestä kuormitettavuudesta. Kun lineaarinen kuormitus lisääntyy, niin muuntajan kuormitettavuus nousee. *K factor calculator* käyttää hyödyksi kaavaa, joka antaa muuntajan kuormitettavuuden maksimiarvon K.

$$K = \left[ 1 + \frac{e}{1+e} \left( \frac{I_1}{I} \right)^2 \sum_{n=2}^{\infty} \left( n^q \left( \frac{I_n}{I_1} \right)^2 \right) \right]^{0,5} \quad (11)$$

Enter the harmonic number and harmonic current for each harmonic that is present and "Add" to the list. Remember to include the fundamental with a harmonic number of one. Currents may be absolute values or relative to the fundamental current as 1.

Calculation method:  
 K Factor  Factor K

Fundamental eddy current loss: 0,100  
Eddy current loss exponent: 1,7

Harmonic No.:   
Magnitude:  Add

RMS current: 1,006  
Factor K de-rate to: 94,86 % Calculate

Harmonic No.	Magnitude
1	1387,400
5	133,190
7	62,433
11	22,198
13	13,874
17	9,711
19	5,550
23	5,550
25	4,162
29	4,162
31	2,775
35	2,775
37	1,387
41	1,387
43	1,387
45	1,387
47	1,387
49	1,387

Kuva 14. Todellisen tilanteen varmuuskertoimen laskeminen /9/

K-kertoimen laskimella saatu todellinen arvo kun muuntajan kuormitusteho on  $P=1636\text{kW}$ . Maksimi kuormaksi on näin saatu noin 95%. Muuntaja siis on täysin kuormitettu 95 % kuormalla. Kuormitettavuus vielä kasvaa, kun lineaarinen kuorma lisääntyy. Joten todellinen kuormitettavuus on vielä suurempi. Tarkan arvon laskeminen on hankalaa, koska sähköverkko muuttuu jatkuvasti. Erilaiset kuormat muuttuvat ja lisäävät ja vähentävät verkon yliaalto pitoisuutta. /8/

Muuntajan keston ja parhaimman kuormitettavuuden saavuttamiseksi täytyisi verkosta poistaa yliaallot aktiivisella yliaaltosuodattimella. Uudemalla taajuusmuuttajatekniikalla päästäisiin myös sellaiseen lopputulokseen, että yliaallot eivät lisääntyisi verkossa. Tässäkin tapauksessa taajuusmuuttajan hinta on perinteiseen 6-pulssisillalla toteutettuun ratkaisuun nähden moninertainen. Kustannusten kannalta päästään kyseisessä SU-liuottamon myllyn käytön vaihdossa parhaaseen taloudelliseen tulokseen kun käytetään tuota vapautunutta Vacon CX 630 taajuusmuuttajaa. Muuntaja kestää kyseisen asennuksen ja ongelmia ei pitäisi syntyä. Jos verkkoon on tarkoitus tulevaisuudessa kytkeä vielä lisää taajuusmuuttajaa kuormaa tulee nyt jo tarkkaan miettiä taloudellisuuden kannalta paras-ta vaihtoehtoa. Nyt kun asennetaan vanhalla tekniikalla toteutettu taajuusmuuttaja, niin seuraavalla kerralla, jos asennettava laite on teholtaan yhtä suuri kuin tämän kertainen käyttö, voidaan joutua turvautumaan uudempaan tekniikan, tai muuntajan vaihtoon. Molemmat aiheuttavat lisäkustannuksia huomattavasti verrattuna tämän kertaiseen helppoon asennukseen. Jos saadut tulokset ovat hyviä ja myllyn käytön varmuus paranee, niin taloudellisesti on kannattavaa vaihtaa myös toisen myllyn käyttö taajuusmuuttaja käytöksi.

## 10 TAAJUUSMUUTTAJAN PARAMETROINTI

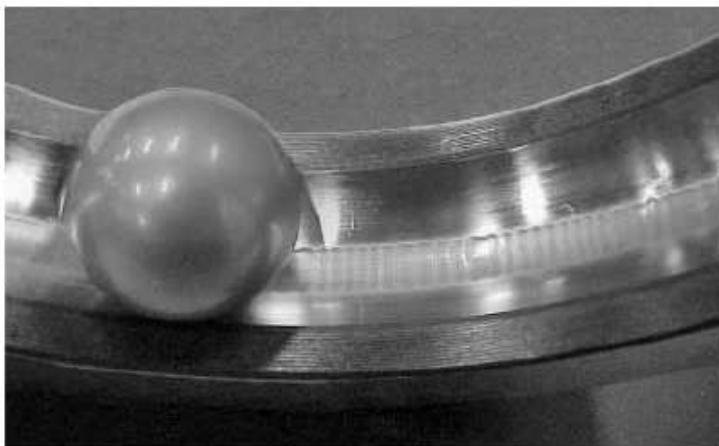
Taajuusmuuttajan parametrionnissa lähdetään liikkeelle perusparametrien asentamisella. Perusparametreja ovat moottorin tiedot ja syöttävänverkon tiedot. Perusparametrien syötössä lähdetään liikkeelle taajuuksien syötöllä. Nämä ovat parametrit 1.1 ja 1.2. Parametri 1.3 on kiihtyvyyssika, joka tullaan asettamaan sellaiseen arvoon, että mylly lähtee pehmeästi liikkeelle. Parametrissa 1.7 asetetaan virtaraja, joka määrittää taajuusmuuttajan antaman suurimman hetkellisen moottorivirran. Virran rajaksi tulee asettaa  $1,5 \cdot$  moottorin nimellisvirta. Parametrissa 1.9 asetetaan U/f-käyrän optimointi. Tämä mahdollistaa, että moottorijännite kasvaa raskaissa käynnistyksissä automaattisesti tuottamaan riittävästi momenttia kuorman irroitukseen ja moottorin pyörimiseen pienillä nopeuksilla. Automaattista käynnistysmomentin maksimointia voidaan käyttää sovelluksissa, joissa lähtökotka on suuri. Parametri 1.10 on moottorin nimellisjännite, joka löytyy moottorin arvokilvestä. Myös parametrit 1.11 moottorin nimellistaajuus, 1.12 moottorin nimellinopeus ja 1.13 moottorin nimellisvirta löytyvät moottorin arvokilvestä. Parametri 1.14 verkkojännite tulee asettaa arvoon 690V. //

### 10.1 Suojaukset

Koska taajuusmuuttaja on ylimitoitettu, aiheutti se pohdintaa siitä, että pystyvätkö taajuusmuuttajan valvonnat toimimaan pienemmillä arvoilla. Asia varmistettiin Va-con Oy:ltä, josta kerrottiin, että kaikki taajuusmuuttajan valvonnat toimivat täysin oikein.

## 11 MOOTTORIN LAAKERIVAURIOIDEN EHKÄISY

Laakerivirtoja synnyttää laakerin yli indusoitunut jännite. Suurtaajuisia laakerivirtoja aiheuttava jännite voi syntyä kolmella tavalla. Syntytapaan vaikuttaa erityisesti moottorin koko sekä moottorin rungon ja akselin maadoitustavat. Kaapeloinnin toteutustavalla, oikealla kaapelityypillä ja kytkennöillä on suuri merkitys laakerivirtojen ehkäisyssä. Vaihtovirtakäytön tehokomponenttien  $du/dt$ -arvo ja tasa-jännitevälipiirin jännite vaikuttavat myös laakerivirtojen määrään. Suurtaajuisiin laakerivirtoihin voidaan vaikuttaa monella tavalla. Menetelmiä ovat: laakerivirtapiirien katkaiseminen eristetyillä laakereilla, joka on paras ja tehokkain ratkaisu. Suurtaajuisen yhteismuotoisen virran vaimentamisella erilaisten suotimien avulla. Oikealla kaapelointi- ja maadoitusjärjestelmällä saadaan myös tuloksia. Menetelmien tavoitteena on alentaa laakerijännitteet sellaisiin arvoihin, jotka eivät indusoi suurtaajuisia laakerivirtapulsseja tai vaimentaa pulssien arvo tasolle, jotka eivät vaikuta laakereihin. Vacon cx taajuusmuuttajassa on  $du/dt$  suodin, joka poistaa häiriöitä. Lisäksi voidaan asentaa ferriittirenkaat lisäsuojaksi. Vacon Oy:ltä saa valmiita paketteja, jotka kannattaa asentaa taajuusmuuttajan asennusvaiheessa. Hankinta hinta on alhainen, joten kustannuksia ferriittirenkaiden asentamisesta ei paljoa synny. Maadoitus tulee toteuttaa hyvin. Kaapelista tulee kuoria pintaeriste pois vedonpoistajan kohdalta. Näin saadaan lähes 360 asteen maadoitus pinta, joka varmistaa ferriitti renkaiden toimivuuden. /5/



Kuva 15. Laakerivirtojen aiheuttama pyykkilautakuvio

12 TULOKSET

Työn alussa on kerrottu lyhyesti OMG:stä ja sen tuotteista ja esitelty lyhyesti opinnäytetyön aihe. Teoriaosan alussa on kuvattu vanhatekniikka ja sen heikkoudet. Loppuosassa on käyty läpi uusi tekniikka ja sen mukanaan tuomat parannukset käynnistämisen helpottamiseksi. Uusitekniikka asettaa muuntajalle rajoituksia, koska taajuusmuuttajatekniikka synnyttää sähköverkkoon yliaalloja. Yliaallot taas laskevat muuntajan kuormitettavuutta ja tämä kuormitettavuuden alenema on käyty läpi muuntaja osiossa teoreettisesti. Käytännössä muuntajan kuormitettavuuden alenema ei vastaa teoreettista pohjaa, koska teoreettinen tilanne ei ota huomioon muuta kuin taajuusmuuttajakuorman. Muuntajan todellinen kuormitettavuus on suurempi. Tämän asian todistaminen vaati sähköverkon tämän hetkisten yliaaltopitoisuuksien mittaamista. Mittauksissa todettiin verkko varsin puhtaaksi. Tämän jälkeen suoritettiin simulointi siitä, että kuinka paljon säröt lisääntyvät, kun pehmokäynnistin korvataan taajuusmuuttajalla. Virtasäröt nousivat lukemaan 10,75% ja jännitesäröt pysyivät merkityksettöminä. Simuloinnilla saadut tulokset on syötetty *Leonardo Energy:n K-Factor & Factor K calculation* ohjelmaan. Ohjelma antoi tulokseksi, että muuntajan kuormitettavuus laskee 1777 kVA:n kuormalla noin 5%. Muuntaja olisi siis täysin kuormitettu 95% kuormalla. Todellisuudessa kuormitettavuus vielä kasvaa, kun lineaarinen kuorma suurenee. Käytännössä näin pieni kuormituksen alenema ei vaikuta millään tavalla kyseiseen asennukseen. Taajuusmuuttaja voidaan turvallisesti asentaa pehmokäynnistimen tilalle.

- /1/           OMG Harjavalta Nickel Oy- esitelehtinen
  
- /2/           OMG Harjavalta Nickel Oy toimintajärjestelmä: tuotteiden valmistus ja toimitus, 2004
  
- /3/           Yrjö Kerkkänen, Luennot Satakunnan ammattikorkeakoulussa
  
- /4/           Teknisiä tietoja ja taulukoita ABB Strömberg. Vaasa: Vaasa Oy, 1990
  
- /5/           ABB Technical Guide No. 5. Bearing Currents in Modern AC Drive Systems, 1999
  
- /6/           ABB Technical Guide No. 6, ABB Guide to Harmonics with AC Drives, 2002
  
- /7/           Vacon Oy esitteet ja manuaalit
  
- /8/           Leonardo Energy, European Copper Institute: verkkomateriaalia
  
- /9/           Leonardo Energy, European Copper Institute: K-Factor & Factor K calculation, <http://www.leonardo-energy.org/drupal/node/456>
  
- /10/          Yliaalto-opus, <http://www.e-leeh.org/ylialto/3res.htm>

