

■ OPINNÄYTETYÖ - AMMATTIKORKEAKOULUTUTKINTO
TEKNIIKAN JA LIIKENTEEN ALA

KOMPENSOINNIN VIANET- SINTÄ JA SÄHKÖNLAATU- MITTAUKSET TALVIVAA- RAN KAIVOKSELLA

TEKIJÄ: Jani Moilanen

Koulutusala Tekniikan ja liikenteen ala			
Koulutusohjelma Sähkötekniikan koulutusohjelma			
Työn tekijä(t) Jani Moilanen			
Työn nimi Sähkönlaatututkimus ja kompensoinnin tarkastus Talvivaaran kaivokselle			
Päiväys	17.5.2013	Sivumäärä/Liitteet	48/1
Ohjaaja(t) lehtori Jari Ijäs ja yliopettaja Ari Suopelto			
Toimeksiantaja/Yhteistyökumppani(t) Talvivaara Sotkamo Oy			
<p>Tiivistelmä</p> <p>Työssä etsittiin syytä kompensointilaitteistojen sulakepaloihin sekä mitattiin sähkönlaatua tehdasalueella. Talvivaarassa kompensointilaitteina toimivat estokelaparistot. Estokelaparistojen porrassulakkeet olivat palaneet lähes kaikista kompensointiparistoista, joten ongelma ei ollut paikallinen. Työ sisälsi lähinnä tehdasalueen 20 kompensointiparistoa. Koko alueella paristoja on 50 kappaletta.</p> <p>Laitteiston pääkomponenttien kunto mitattiin Agilent U1733C -kapasitanssimittarilla. Muutamalle paristolle tehtiin käynnistysvirtamittaus Fluke 435 -analysointilaitteella Inrush- sekä Transients-toiminnolla. Myös sähkönlaatumittaus tehtiin kyseisellä analysointilaitteella, Monitor- sekä Logger-toiminnolla. Keskuksista mitattiin 7 kpl. Kohteiksi valittiin vain ne, joissa loistehon säätimen mittausarvojen perusteella oli eniten ongelmia. Keskuksia mitattiin ilman kompensointia ja kompensoinnin kanssa, jotta nähtiin kompensoinnin vaikutukset eri suureisiin.</p> <p>Sähkönlaatumittauksissa tuli esille lähes kaikissa keskuksissa esiintyvä suuri 5. harmoninen yliaaltopitoisuus, joka aiheuttaa myös jännitesärön kasvua yli standardin raja-arvon. Joissain keskuksissa ilmeni myös muutamia jännitekuoppia ja suuria loistehohuippuja, jotka johtuivat suuren laitteen käynnistämisen aiheuttamasta. Kompensointiparistojen sulakepalot aiheutuivat pariston suuresta käynnistysvirtapiikistä. Käynnistysvirtapiikki aiheutti kelan induktanssin ajautumisen arvoon, jolla kompensointiportaan resonanssitaajuus on lähes 250 Hz. Tällöin virta jää suureksi ja sulakkeet palavat.</p> <p>Sulakepalojen välttämiseksi kompensointiparistot on varustettava vaimennusvastuksilla varustetuilla kytkentäkontaktoreilla. Lisäksi yliaaltopitoisiin kohteisiin tulee hankkia yliaaltosuodattimet, joilla sähkönlaatu saadaan standardin mukaiseksi eivätkä kompensointiportaat ylikuormitu.</p>			
Avainsanat loisteho, loistehon kompensointi, sähkönlaatu			

Field of Study Technology, Communication and Transport			
Degree Programme Degree Programme in Electrical Engineering			
Author(s) Jani Moilanen			
Title of Thesis The Compensation System Repair Suggestion and Power Quality Measurements in Talvivaaras Sotkamo Oy.			
Date	May 13, 2013	Pages/Appendices	48/1
Supervisor(s) Mr Jari Ijäs Lecturer and Mr Ari Suopelto Principal Lecturer			
Client Organisation /Partners Talvivaara Sotkamo Ltd/ Mr Ari Jämsä Electrical Operating Manager			
<p>Abstract</p> <p>The main purpose of this thesis was to search for solutions to blowing fuses in capacitor banks with a blocking reactor. Capacitor banks with a blocking reactor are used for compensation at Talvivaara. The second purpose was to measure power quality in the factory area. Power quality is also involved in blowing fuses in compensation, because power quality influences the operation of capacitor banks with a blocking reactor.</p> <p>Power quality was measured continuously throughout the work. Measurements were done using the Fluke 435 three-phase power quality analyzer. Compensation was mainly off, because fuses had blown. Compensation condition checks were done using the Agilent U1733C capacitance meter. Load current and inrush current measurements were used in this investigation.</p> <p>Load current measurements showed that the current is only a little bigger than the nominal current and this is not the reason for blowing fuses. Inrush current measurements showed that the problem is at the start, when the current sometimes grows very high and then fuses blow. Power quality measurements showed that the harmonic distortion THD(U) of voltage is too high because 5th harmonic voltage is high. This same thing affects the inrush current in capacitor banks with a blocking reactor too directly in the network.</p> <p>The answer to the high start current are usually contactors with damping resistors. These were tested in places where THD(U) was biggest and they worked fine. Furthermore, in places like this, it is necessary to use a individual harmonic filter, which filtrates 5th harmonic current and consequently reduces THD(U).</p> <p>With the help of power quality measurement results a purchase proposal of equipment for a different substation was made. The results were saved in the information system for other users.</p>			
Keywords Power Quality, reactive power, reactive power compensation			

ESIPUHE

Opinnäytetyö tehtiin Talvivaaran nikkeli-kaivokselle Sotkamoon keväällä 2013. Työstä saatiin hyvä kokemus estokelaparistoilla toteutettuun keskitettyyn kompensointiin yliaaltopitoisessa verkossa sekä opettavainen esimerkki siitä, kuinka yliaallot vaikuttavat estokelapariston toimintaan.

Haluan osoittaa kiitokseni Talvivaaran sähkökäytön johtaja Ari Jämsälle ja kunnossapitopäällikkö Matti Rautiaiselle, jotka mahdollistivat työn toteutuksen. Haluan kiittää myös ohjaavia opettajiani lehtori Jari Ijästä sekä yliopettaja Ari Suopeltoa hyvästä työn ohjaamisesta ja vinkeistä työn eri vaiheissa.

Lisäksi haluan osoittaa kiitokset avopuolisolleni työn aikaisesta tuesta ja kärsivällisyydestä.

Paltamossa 29.4.2013

Jani Moilanen

SISÄLTÖ

1	LYHENTEET JA MÄÄRITELMÄT	7
2	JOHDANTO	8
3	STANDARDIT	9
4	MITTAUSTYÖT JA NIIDEN TURVALLISUUSNÄKÖKOHDAT	10
5	SÄHKÖVERKON TEHOT JA ENERGIAT	11
5.1	Pätöteho	12
5.2	Loisteho	13
5.3	Näennäisteho	14
6	LOISTEHON KOMPENSOINTI.....	15
6.1	Kompensointilaitteet	16
6.1.1	Kondensaattoriparisto.....	17
6.1.2	Estokelaparisto	17
6.1.3	Yliaaltosuodatin.....	18
6.1.4	Reaktori.....	18
6.1.5	Aktiivisuodatin	18
6.1.6	Staattinen kompensointilaitte	19
6.1.7	Pyörivät kompensointilaitteet	19
7	SÄHKÖNLAATU.....	20
7.1	Taajuus.....	20
7.2	Jännitetaso.....	22
7.3	Jännitteen aaltomuoto.....	22
7.3.1	Yliaallot	23
7.3.2	Jännitesärö.....	24
7.4	Jännitteen epäsymmetria.....	25
7.5	Jännitekuopat ja kohoumat	25
7.6	Toimitusvarmuus ja katkokset	25
7.7	Käyttötaajuiset ylijännitteet ja transienttilylijännitteet	26
8	SÄHKÖNLAATUMITTAUKSET	27
9	ESTOKELAPARISTOJEN KUNTOTARKASTUKSET	30
9.1	Estokelaportaan viritystaajuuden laskenta	30
9.2	Estokelan kyllästyminen	33

9.3 Käynnistysvirran matemaattinen tarkastelu.....	37
9.4 Estokelan induktanssin todellisen arvon selvittäminen analysaattorilla	39
10 ESTOKELAPARISTOJEN KÄYTTÖÖNOTTO NYKYISELLÄ LAITTEISTOLLA	42
10.1 Estokelan toiminta uusien kontaktorien avulla.....	43
10.2 Käynnistysvirtamittaus uusilla kontaktoreilla	44
11 YHTEENVETO.....	46
LÄHTEET	47
LIITTEET	48
Liite 1	48
Valitsemani mittaussuureet sähkönlaatumittauksiin Logger –toiminnolla.	48

1 LYHENTEET JA MÄÄRITELMÄT

PJ = Pienjännite (<1000V vaihtosähköllä ja <1500V tasasähköllä)

KJ = Keskijännite (Sähkönjakelussa 1kV-35kV)

U_N = Järjestelmän nimellisjännite

U_f = Perusaallon jännite

U_{hn} = Harmonisen taajuuden jännite. (n = harmonisen järjestysluku)

U_{RMS} = Kokonaisjännite (sisältää yliaallot)

I_N = Järjestelmän nimellisvirta

I_f = Perusaallon virta

I_{hn} = Harmonisen taajuuden virta. (n = harmonisen järjestysluku)

f = Taajuus

f_1 = Perustaajuus (yleensä 50Hz)

f_r = resonanssitaajuus

THD(U) = Jännitteensärökerroin

THD(I) = Virran särökerroin

PF = Kokonais tehokerroin (yliaallot mukana).(Power Factor).

DPF = $\cos\varphi$ = Perustaajuuden tehokerroin. (Displacement Power Factor)

CF = Aallon huippukerroin. (Crest Factor)

P = Kokonais pätöteho

P_f = Perustaajuinen pätöteho

P_{hn} = Harmoninen pätöteho. (n = harmonisen järjestysluku)

Q = Kokonais loisteho

Q_f = Perustaajuinen loisteho

Q_{hn} = Harmoninen loisteho. (n = harmonisen järjestysluku)

S = Kokonais näennäisteho

S_f = Perustaajuinen näennäisteho

S_{hn} = Harmoninen näennäisteho. (n = harmonisen järjestysluku)

D = Säröteho

μ = Permeabiliteetti kertoo kuinka väliaine vaikuttaa magneettikenttään. Kerroin joka koostuu tyhjiön permeabiliteetin ja väliaineen suhteellisen permeabiliteetin tulosta.

μ_0 = Tyhjiön permeabiliteetti $4\pi \times 10^{-7}$ H/m

μ_r = Aineen suhteellinen permeabiliteetti, joka kertoo aineen permeabiliteetin suhteessa tyhjiön permeabiliteettiin.

2 JOHDANTO

Pääaiheena työssä on kompensointilaitteisiin liittyvä ongelma. Laitteistossa palaa sulakkeita, mutta syytä siihen ei tiedetä. Toisena aiheena on sähkönlaatu, joka voi olla syynä myös sulakepaloihin.

Työssä tutkitaan syytä Talvivaaran nikkeli-kaivoksella esiintyviin kompensointilaitteistojen sulakepaloihin sekä mitataan yleisesti tehdasalueen sähkönlaatua. Kaivoksella kompensointi on toteutettu estokelaparistoilla. Sulakepaloja on ilmennyt koko kaivosalueella, lähes jokaisessa paristossa. Sulakepaloista seurauksena on tullut kantaverkkoyhtiöltä huomautus loistehon liian suuresta käytöstä kantaverkonpuolelta. Tavoitteena työssä on löytää syy sulakepaloihin ja tehdä mahdollinen korjaus-ehdotus.

Kaivoksella on myös ilmennyt jonkin verran taajuusmuuttajarikkoja, joihin syyksi epäillään sähkönlaatua. Toisena tavoitteena on tarkastaa sähkönlaatu eriosissa verkkoa.

Talvivaaran nikkeli-kaivos sijaitsee Sotkamossa. Kaivoksella tuotetaan päätuotteena nikkeliä, sivutuotteina jalostetaan sinkkiä, kuparia ja kobolttia. Talvivaarassa louhinta tehdään avolouhoksesta, sillä maan pinnan peite on ohut ja esiintymä on avolouhinnalle sopiva. Malmin rikastustekniikkana käytetään biokasaliuotusta. Biokasaliuotuksessa hienoksi murskattu kiviaines kasataan suureksi kassaksi (pituus 1 200 m, leveys 400 m ja korkeus 8 m. Kasoja on 4 kpl), jota kastellaan rikkihappoliuoksella ja hapetetaan kasan läpi puhallettavalla ilmalla. Kasassa toimivat bakteerit irrottavat malmin kivistä. Malmi valuu liuoksen mukana kasan alla olevaa tiettyyn suuntaan viettävää pintaa pitkin keräilyaltaisiin, osa liuoksesta pumpataan uudestaan kiertoon ja osa tehdasalueelle rikastettavaksi.

3 STANDARDIT

Sähkönlaatustandardi SFS EN50160 määrittelee sähkön laatutekijät. Standardi määrittelee sähkönlaadun osatekijöiden raja-arvot, joiden sisällä arvojen on pysyttävä. Standardin lisäksi on tarkempia SENER:n määrittelemiä suosituksia, joiden avulla pystytään määrittelemään sähkönlaadun taso kolmella tasolla: standardi laatu, normaali laatu ja korkea laatu. Standardilaadussa raja-arvot ovat edellä mainitun standardin mukaiset ja helpoin saavuttaa. Tiukimmat raja-arvot on tasolla "korkea laatu".

Sähkönlaadun vertailutasoina käytettiin standardin SFS EN 50160 määrittämiä raja-arvoja. Raja-arvot ja tietoa sähkönlaadun osatekijöistä on ST korteissa. Sähkönlaatuun ja kompensointiin liittyviä kortteja ovat ST 52.50 - 52.51.04. ST-korteissa on myös mittauskortti ST 97.21, jota on helppo käyttää sähkönlaatumittauksien dokumentointiin. (Valtanen 2010.)

4 MITTAUSTYÖT JA NIIDEN TURVALLISUUSNÄKÖKOHDAT

Mittaustyöt luetaan laajempaan kokonaisuuteen, toiminnan tarkastuksiin. Mittaustöitä tekevän tulee yleensä olla joko ammattihenkilö tai opastettu henkilö. Maallikot saavat suorittaa mittauksia vain ammattihenkilön ohjauksessa ja valvonnassa. (Sähköinfo Oy 2010)

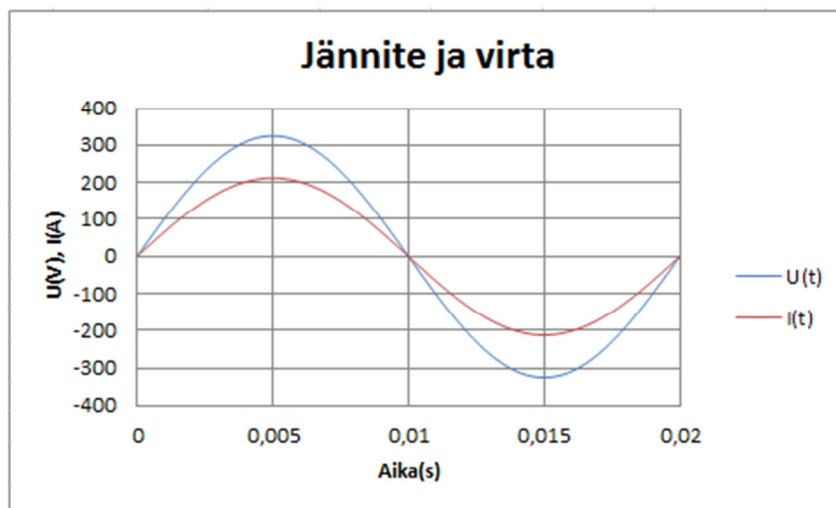
Jos mittauksessa on vaara koskettaa lähellä olevia paljaita jännitteisiä osia, on mittaajan käytettävä jännitetyökäsineitä tai suojattava jännitteiset osat eristeaineisella suojalla. Kun mittaustöitä tehdään kohteessa, jossa oikosulkuvirta on suuri, on mittaajan käytettävä seuraavia suojarusteita:

- jännitetyökäsineet
- kasvosuojus
- ylävartaloa valokaarelta suojaava vaatetus, jossa leima SFS-EN ISO 11612. Joissain tapauksissa vaaditaan koko vartaloa suojaava suojavaatetus ja mahdollisesti myös lämmöltä suojaavia alusvaatteita.

Mittauksia suorittavan henkilön on tutustuttava mittauksia koskevaan ohjeistoon sekä tehtäväkoh-
tisiin tekijöihin (Sähköinfo Oy 2010).

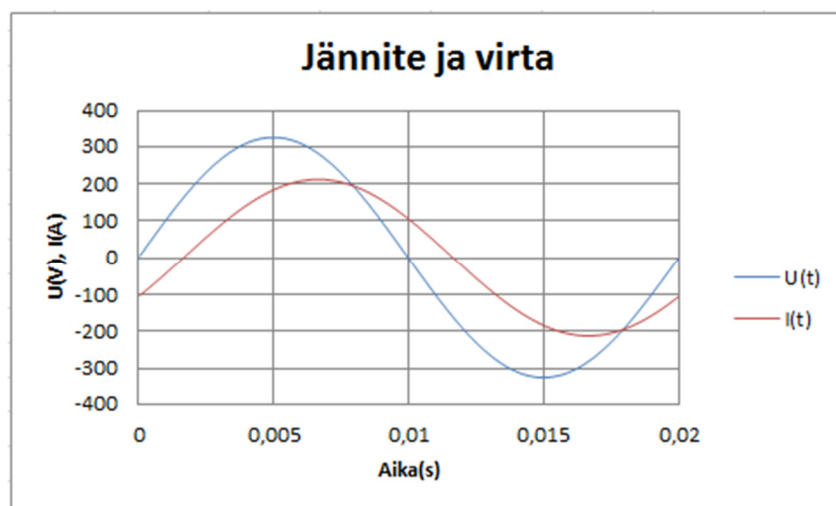
5 SÄHKÖVERKON TEHOT JA ENERGIAT

Sähköverkosta hyödyksi saatava teho ja energia riippuu hyvin paljon siitä, ovatko jännite- ja virta-aalto samanvaiheisia eli kulkevatko ne yhtä matkaa vai onko niissä vaihe-eroa eli tietynlaista viivettä. Mikäli jännite ja virta ovat samanvaiheisia, saadaan koko teho ja energia hyödyksi. Jos taas jännitteen ja virran välissä on 90° vaihe-ero ei tehoa eikä energiaa saada yhtään hyödyksi, vaan ne kulkevat verkon ja kuorman välillä edestakaisin. Samanvaiheiset jännite- ja virta-aallot näyttävät kuvion 1 kaltaisilta.



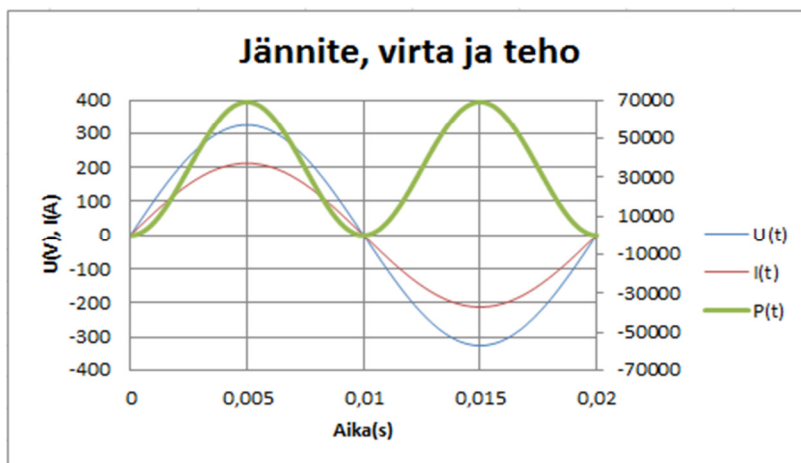
KUVIO 1. Jännite ja virta samanvaiheisina

Jos taas jännite- ja virta-aalto ovat erivaiheisia, ne näyttävät kuvion 2 kaltaisilta.

KUVIO 2. Jännitteellä ja virralla 30° :n vaihe-ero

Kun lasketaan hetkellistä tehoa (jännitteen ja virran hetkellisarvon tulo) näistä kuvaajista, huomataan vaihe-eron vaikutus tehon käyttäytymiseen.

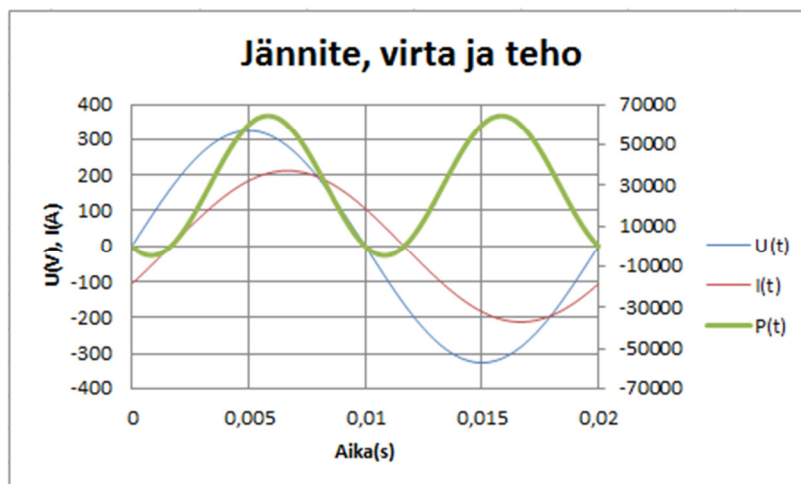
Kuviosta 3 nähdään tilanne, kun vaihe-eroa ei ole.



KUVIO 3. Tehon kuvaaja kun jännite ja virta samanvaiheisia

Kuvaajasta nähdään, että teho pysyy koko ajan positiivisella puolella eli teho virtaa koko ajan samaan suuntaan. Lisäksi nähdään, että tehon taajuus on kaksinkertainen virran ja jännitteen taajuuteen verrattuna. Tämä johtuu siitä, että tehoa syntyy samalla tavalla silloinkin, kun aallot ovat negatiivisella puolijaksolla.

Seuraava kuvio esittää tilannetta, jolloin jännitteen ja virran väliin syntyy 30° :n vaihe-ero.



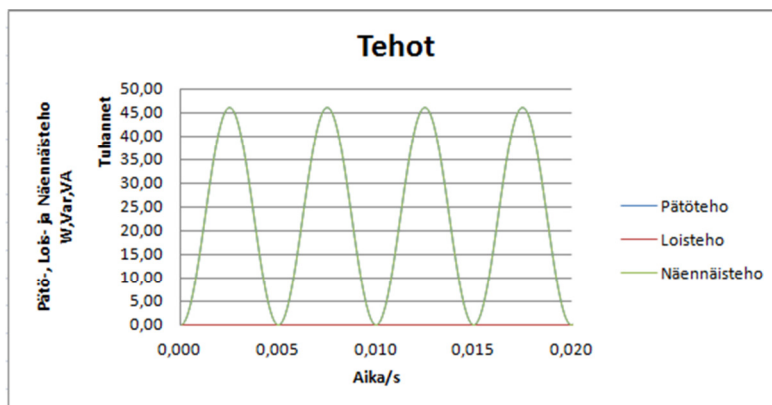
KUVIO 4. Tehon kuvaaja kun jännite ja virta erivaiheiset

Kuvasta nähdään, että tehon käyrä laskeutuu suhteessa nolatasoon, kun vaihe-ero kasvaa. Aallon amplitudi pysyy kuitenkin samana. Teho menee siis välillä negatiiviselle puolelle, eli sen suunta muuttuu. Lisäksi positiivisen puolen tehohuippu pienenee samassa suhteessa. Tämä tarkoittaa sitä, että tehoa kulkeekin välillä kuormasta verkkoon päin. Energian kannalta ajateltuna osa positiiviseen suuntaan virranneesta energiasta palaakin takaisin verkkoon eli sitä ei saada hyödynnettyä kuormassa. Tämän asian vuoksi teho ja energia jaetaan kolmeen osaan, pätö-, lois- ja näennäissuureeseen.

5.1 Pätöteho

Pätöteho kertoo, kuinka paljon sähköenergiaa muuttuu pysyväksi työsuoritukseksi eli esimerkiksi lämpöenergiaksi. Pätöteho on siis tehoa, joka muuttaa muotoaan. Jos verkon kuorma on kokonaan

resistiivistä eli esimerkiksi lämmitysvastuksia tai kehkulamppuvalaistusta, pysyy jännite ja virta samansuuntaisina jolloin saadaan koko teho hyödyksi. Silloin tehon kuvaaja näyttää kuvion 5 kaltaiselta. Kuvassa pätöteho näkyy sinisellä. Kun jännite ja virta ovat kokoajan samalla puolella eli negatiivisella tai positiivisella puolella, voidaan sanoa, että energia siirtyy koko ajan samaan suuntaan ja energia on silloin kokonaan pätöenergiaa.



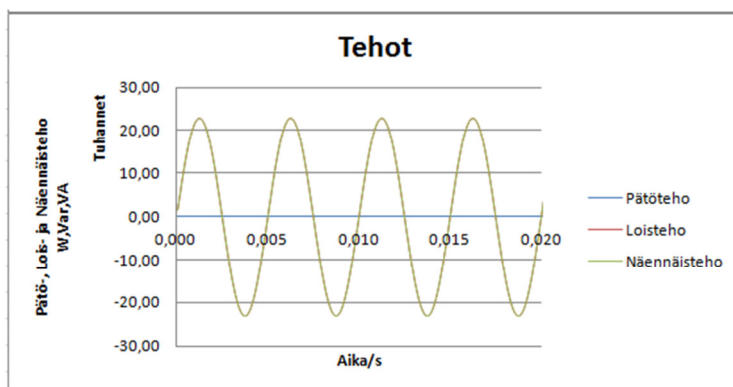
KUVIO 5. Tehot, kun jännitteen ja virran välinen vaihe-ero on 0° eli kuorma on täysin resistiivistä.

Pätöteho määrää generaattorin voimakoneen tehon. Generaattoria pyörittävän voimakoneen antama mekaaninen teho muuttuu siis generaattorin antamaksi sähköiseksi pätötehoksi, joka taas käytössä muuttuu joksikin muuksi energiamuodoksi.

5.2 Loisteho

Kun jännitteen ja virran väliin tulee vaihe-eroa eli jännitte- ja virta-aallon huiput ovat eri kohdilla aika-akselia, muuttuu energian virtaussuunta siinä vaiheessa, kun jännite ja virta ovat eri puolilla nolapistettä eli toisen hetkellisarvo on positiivinen ja toisen negatiivinen. Loisteho on käytännössä joko induktanssiin varautunutta magneettikentän energiaa tai kapasitanssiin varautunutta sähkökentän energiaa, joka vuoron perään latautuu ja purkautuu. Loisteho on siis joko kapasitiivinen tai induktiivinen sen mukaan, onko virta edellä vai jäljessä jännitteestä. Jos virta on jäljessä jännitteestä eli sen huippuarvo esiintyy myöhemmin kuin jännitteen huippuarvo, seuraa niistä induktiivista loistehoa. Jos taas virta on edellä jännitettä, seuraa siitä kapasitiivista loistehoa. Nimitykset tulevat siitä, että induktiivinen loisteho seuraa induktiivisesta kuormasta eli kuormasta, joka sisältää suurimmaksi osaksi induktansseja eli keloja. Kapasitiivinen loisteho seuraa kapasitiivisesta kuormasta eli kuormasta, joka sisältää suurimmaksi osaksi kapasitansseja eli kondensaattoreita.

Loistehoa esittää punainen käyrä kuviossa 6.



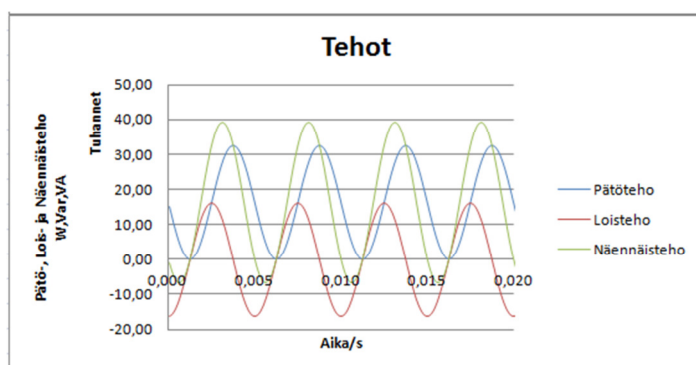
KUVIO 6. Tehot, kun jännitteen ja virran välinen vaihe-ero on 90° .

Induktiivinen loisteho tarkoittaa myös sitä, että loistehoa kulutetaan, ja kapasitiivinen loisteho tarkoittaa sitä, että loistehoa tuotetaan. Induktiivinen loisteho laskee muuntajan ja sitä myötä myös verkon jännitettä, koska induktiivisen loisvirran suunta on vastakkaisuuntainen kuin muuntajan magnetointivirta. Eli induktiivinen loisvirta kumoaa muuntajan magnetointivirtaa.

Kun verkossa esiintyy induktiivista kuormaa, kuten sähkömoottoreita, enemmän kuin kapasitiivista kuormaa, kuten kondensaattoreita, muuttuu virta-aallon paikka jänniteaaltoon verrattuna siten, että virta-aalto on jänniteaallon huippua ajallisesti jäljessä. Tämä ilmiö aiheuttaa sen, että pätötehon lisäksi tarvitaan loistehoa. Loisteho otetaan joko verkosta tai tuotetaan kondensaattoreilla tai pyörivillä tahtikoneilla, joita magnetoidaan sähköisesti.

5.3 Näennäisteho

Näennäisteho on teho, joka voidaan näennäisesti saavuttaa tietyllä jännitteellä ja virralla. Se on siis kokonaisteho, joka sisältää pätö- ja loistehon. Laskennallisesti näennäisteho näyttää kuvion 7. kaltaiselta. Oikeasti teho ei käytäydä aivan tällä tavalla, mutta tämä auttaa tehojen laskennassa. Pääasia on kuitenkin se, että kun jännite ja virta ovat erivaiheisia, jää osa tehosta ja energiasta hyödynnettämättä, sillä se kulkee edestakaisin sähköverkon ja kuorman välillä. Se pysyy siis koko ajan sähköisessä muodossa. Todellisuudessa on olemassa vain yhdenlaista tehoa, joka on hetkellisesti jännitteen hetkellisarvo ja virran hetkellisarvon tulo. Muita tehoja käytetään vain apuna laskennassa, kun halutaan jakaa teho ja energia hyödynnettävään ja hyödyntämättömään komponenttiin.



KUVIO 7. Tehot, kun jännitteen ja virran vaihe-ero on 45° .

6 LOISTEHON KOMPENSOINTI

Loistehon kompensoinnilla tarkoitetaan sitä, että pyritään rajaamaan loistehon kulkureitti mahdollisimman lyhyeksi, jotta siirtoverkossa syntyisi mahdollisimman vähän häviöitä. Loisteho kuluttaa verkon siirtokapasiteettia turhaan, koska tarvittavan loistehon voi tuottaa lähellä kulutusta. Loisteho vaikuttaa myös verkon jännitteeseen, sillä induktiivinen loisteho laskee ja kapasitiivinen loisteho vastaavasti nostaa muuntajan napajännitettä. Yleensä loisteho on induktiivista eli loistehon kulutusta, sillä suurin osa laitteista nimenomaan kuluttaa loistehoa. Tällöin kompensointi hoidetaan kapasitansseilla eli kondensaattoreilla kytkemällä niitä joko laitekohtaisesti induktiivisiin laitteisiin tai keskitetysti keskusten läheisyyteen. Kapasitiivisilla laitteilla ei yleensä pysty muuta hyödyllistä tekemään, kuin kompensoimaan loistehoa.

Joskus voi olla myös sellaisia tilanteita, että verkon tehokerroin menee kapasitiiviseksi, eli kuorma on kapasitiivinen. Tämä ei kuitenkaan yleensä johdu itse kuormista, vaan siirtolinjoista ja tarkemmin ottaen maakaapeloidusta linjasta. Tällainen tilanne voi siis syntyä jos jakeluverkossa on paljon maakaapelia ja vähän induktiivista kuormitusta. Maakaapelissa on paljon kapasitanssia verrattuna ilmalinjaan. Kapasitanssi syntyy kaapeliin sen vuoksi, koska erilliset johtimet ovat niin lähellä toisiaan ja niin samansuuntaisesti. Toinen mahdollisuus kapasitiiviselle tehokertoimelle on se, että jonkun kuluttajan loistehon kompensointilaitteisto on säädetty väärin ja sen vuoksi kompensointi tuottaa enemmän loistehoa, kuin kuluttaja tarvitsee.

Loistehon ylituotannosta seuraa verkon jännitteen nousu, koska kapasitiivinen loisteho pyrkii magnetoimaan muuntajia ja generaattoreita lisää. Ylimääräistä loistehoa voidaan kompensoida joko kytkemällä verkkoon reaktoreita eli keloja, tai pienentämällä generaattoreiden magnetointia, jolloin generaattori ottaa puuttuvan magnetointitehonsa verkon loistehosta. Tässä on kuitenkin se huono puoli, ettei alimagnetoidulla generaattorilla pystytä tuottamaan niin paljon pätötehoa, kuin normaalisti magnetoiduilla. (Männistö;ym., 2006)

Pääasiassa kuitenkin loistehoa joudutaan kompensoimaan sen vuoksi, koska verkkoyhtiöt vaativat, ettei jakeluverkosta oteta liikaa, eikä sinne syötetä liikaa loistehoa. Loistehorajat määritellään yleensä prosentteina liittymän pätötehoaiipusta.

Esim. EON:lla on seuraavanlaiset rajat:

Käyttöpaikkakohtainen loistehon ilmaisikkuna on -4 – +16 % pätötehohuipusta. Loistehon otossa (induktiivinen) ilmaisosuus on siis 16 % ja loistehon annossa (kapasitiivinen) ilmaisosuus on 4%. Liittymän pätötehohuippuna käytetään liukuvan 12 kuukauden kahden suurimman laskutuskuukauden tuntitehon keskiarvoa. Tehotuotteilla tämä on sama kuin tehomaksun perusteena oleva pätöteho. (<http://www.eon.fi/SiteCollectionDocuments/Loistehon-kompensointi.pdf>. Sivu 2.)

Loistehon kompensointiin on useita erilaisia vaihtoehtoja, mutta kaikilla niillä on yhteistä se että ne tuottavat tai kuluttavat loistehoa sen mukaan onko vaihe-ero positiivinen vai negatiivinen.

Verkon loistehotilannetta kuvataan usein perusaallon tehokertoimella eli $\cos\varphi$ arvolla tai yliaaltopitoisessa verkossa ja jakeluverkkojen keskuudessa kokonaistehollisarvon tehokertoimella PF (Power factor). Tehokerroin kuvaa pätötehon suhdetta näennäistehoon. Perusaallon tehokerroin lasketaan kaavalla 1 ja kokonaistehollisarvon tehokerroin kaavalla 2.

$$\cos\varphi = \frac{P_f}{S_f} \quad (1)$$

$$PF = \frac{P}{S} \quad (2)$$

Tehokerroin pyritään saamaan mahdollisimman lähelle arvoa 1. Silloin tehosta saadaan mahdollisimman paljon hyötykäyttöön. Tehokerrointa ei kannata kuitenkaan yleensä säätää aivan arvoon 1, sillä silloin jännite voi nousta liian korkeaksi. Tehokertoimen liian korkea arvo voi saada aikaan myös oikosulkumoottoreiden muuttuminen generaattoreiksi. Näin voi tapahtua jos laitteen kompensointi ei irtoa laitteen navoista sammutettaessa laite. Moottorin toimiminen generaattorina vaatii kuitenkin sen, että kuormitus pyörittää vielä moottoria. Tällainen tilanne voi tuottaa vaaratilanteita joissain tapauksissa.

6.1 Kompensointilaitteet

Kompensointilaitteet jaetaan kahteen pääryhmään, aktiivisiin ja passiivisiin. Passiiviset kompensointilaitteet säätävät kompensointitehoa ainoastaan kytkemällä kiinteitä kondensaattori- tai induktanssiportaita päälle ja pois päältä. Aktiiviset kompensointilaitteet pystyvät säätämään kompensointia yleensä portaattomasti. Lisäksi aktiivisilla kompensointilaitteilla saadaan usein korjattua muitakin ongelmia, kuten yliaallot, epäsymmetria, jännitetaso yms.

6.1.1 Kondensaattoriparisto

Kondensaattoriparistot jaetaan kahteen pääryhmään. Kiinteisiin ja säädettäviin paristoihin. Lisäksi ne jaetaan sarja- ja rinnakkaisparistoihin. Sarjaparistoja käytetään lähinnä pitkällä kantaverkon siirtolinjoilla pienentämään johdon induktanssin vaikutuksia. Rinnakkaisparistoja käytetään yleisemmin pien- ja keskijänniteverkkojen kompensointiin. Kiinteät paristot kytketään kompensoitavan laitteen tai laiteryhmän rinnalle ja säädettävät paristot ovat ns. automatiikkaparistoja, joita käytetään keskitettyyn kompensointiin pää- ja nousukeskuksilla.

Keskitettyyn kompensointiin tarkoitettuja paristoja ohjataan yleensä erillisellä loistehonsäätimellä. Säädin kytkee portaita verkkoon kytkentälaitteen, kuten kontaktorin avulla tarvittavan loistehoa mukaan. Säädin tekee säädön yleensä perusaallon tehokertoimen eli $\cos\phi$:n mukaan. Säädin saa yleensä keskuksen virtatiedot keskuksen syötöstä virtamuuntajien kautta. Kondensaattoriparistoja on usein helppo laajentaa lisäämällä uusi paristokaappi vanhan rinnalle. Loistehon säädin pystyy usein ohjaamaan jopa 12 porrasta. Lisäksi kompensointiportaita voi kytkeä rinnakkain, jolloin ne kytkeytyy yhtä aikaa yhden ohjauskanavan ohjaamana.

Kondensaattoriparistoja käytetään kompensoinnissa silloin, kun verkko ei ole kovin yliaaltopitoinen. Pelkillä kondensaattoreilla kompensoitaessa käy usein niin, että kompensointilaitteisto ajautuu resonanssiin syöttävän verkon tai kuormituksen kanssa sopivan kuormitustilanteen löytyessä. Usein kytkentävariaatioita on hyvin paljon, kun kompensointiyksikkö sisältää useita kompensointiportaita ja varsinkin teollisuudessa kuormat vaihtelevat hyvin paljon. Kondensaattoreilla kompensoitaessa yliaaltopitoisissa verkoissa yliaaltojännitteet saattavat voimistua, jolloin jännitesärön nousee ja usein myös syntyy laiterikkoja. Nykyisin kompensointiin ei enää käytetä juurikaan kondensaattoriparistoja lisääntyneen yliaaltokuormituksen vuoksi. (Männistö;ym., 2006)

6.1.2 Estokelaparisto

Estokelaparisto on muuten samanlainen laite kuin kondensaattoriparisto. Erona on kondensaattoreiden kanssa sarjaan kytketty kela. Kela auttaa ehkäisemään yliaaltojännitteiden kasvua, resonanssitilanteita, sekä rajoittamaan käynnistysvirtasysäystä.

Estokelaparistoa käytetään verkoissa, joissa esiintyy yliaaltoja. Paristo viritetään alimman esiintyvän yliaaltotaajuuden alapuolelle, jolloin estokelaporras on kapasitiivinen viritystaajuutensa alapuolella tuottaen kompensointiin tarvittavaa loistehoa ja induktiivinen viritystaajuutensa yläpuolella, jolloin se ehkäisee yliaaltojen voimistumista. Yleisimpiä viritystaajuuksia ovat 189 Hz ja 204 Hz. Estokelaparistoa suositellaan käytettäväksi kun jännitteen harmoninen kokonaissärö THD(U) ylittää 3 %.

Estokelaparisto myös suodattaa osan yliaalloista. Suodatusvaikutus on yleensä 10 – 30 % viidennen yliaallon määrästä. Estokelaparistoa määriteltäessä tulee ottaa huomioon se, ettei paristo vaimenna verkkokäskyohjaus signaaleja liiaksi.

Estokelaparistoja voidaan käyttää kuten kondensaattoriparistojakin, joko keskitettyyn tai laitekohtaiseen kompensointiin pien- ja keskijänniteverkoissa. Keskitetyssä kompensoinnissa paristoa ohjataan yleensä loistehonsäätimellä ja laitekohtaisessa kompensoinnissa laitteen ohjauslaitteilla.

(Männistö;ym., 2006)

6.1.3 Yliaaltosuodatin

Yliaaltosuodatinta käytetään verkoissa, joissa on suuri yliaaltopitoisuus. Yliaaltosuodatin on tarkoitettu lähinnä yliaaltojen imupiireiksi eli poistamaan verkosta yliaaltoja. Lisäksi ne tuottavat jonkin verran loistehoa kompensointiin. Yliaaltosuodatin on rakenteeltaan estokelapariston kaltainen, mutta portaat on viritetty yleisimmille verkossa esiintyvillä yliaalloilla, kuten 5., 7. ja 11. yliaalto. Lisäksi pariston ohjaus toteutetaan hieman eri tavalla, sillä säätimen täytyy toimia yliaaltopitoisuuksien mukaan, eikä niinkään tarvittavan loistehon mukaan. Laite ei siis ole pääasiallinen loistehon kompensointilaitte, mutta se yleensä toimii sekä yliaaltosuodattimena, että kompensointilaitteena. Laitteen kompensointitehoa ei yleensä pysty säätämään, vaan kompensoinnin tarve otetaan huomioon laitetta mitoitettaessa. Yliaaltosuodatinta käytetään pien- ja keskijänniteverkoissa keskitetysti. (Männistö;ym., 2006)

6.1.4 Reaktori

Reaktori on ilmasydäminen kela jota käytetään, kun verkon tehokerroin on kapasitiivinen. Tällainen tilanne on harvinainen, sillä yleensä sähköverkossa esiintyvät kuormat ovat induktiivisia ja ne kuluttavat loistehoa. Tällainen tilanne voi kuitenkin tulla esimerkiksi silloin kun jakeluverkon kuormitus on vähäistä ja jakeluverkko on rakennettu pääasiassa maakaapelilla. Maakaapeli on itsessään kapasitiivinen kuorma verkolle.

Reaktori voi sisältää useita rinnakkaisia portaita, joilla kompensointitehoa voidaan säätää. On myös olemassa tyristoriohjattuja reaktoreita, joilla kompensointitehoa pystytään ohjaamaan portaattomasti. Tällaista laitetta kutsutaan TCR-kuristimeksi (Thyristor Controlled Reactor). Tällaisia käytetään staattisissa kompensointilaitteissa. (Männistö;ym., 2006)

6.1.5 Aktiivisuodatin

Aktiivisuodatin on laite jolla tuotetaan virran särökomponenteille vastakkainen komponentti joka kumoaa särön ja saa aallon taas sinimuotoiseksi. Laite siis tuottaa yliaalloille 180 °:n vaihesiirrossa olevan virran joka kumoaa särövirran. Aktiivisuodatin on ylikuormittumaton laite. Jos särövirta ylittää suodattimen kapasiteetin, se jättää automaattisesti suodattamatta kapasiteetin ylittävän osuuden.

Aktiivisuodattimella pystytään suodattamaan hyvin laaja taajuusalue. Laite tuottaa sopivan vastavirran pulssileveysmoduloinnilla (PWM-modulaatio) kondensaattoreiden lataamasta tasajännitteestä. Aallon muotoilu tehdään yleensä IGBT-transistoreilla. Myös muita komponentteja käytetään, kuten GTO- tai Mosfet transistoreja. Laite toimii siis hyvin pitkälle samalla tavalla kuin taajuusmuuttaja.

Aktiivisuodatin toimii riippumatta virran käyrämuodosta, suunnasta tai virtamuutoksen dynamiikasta. Tehokerroin voi olla induktiivinen tai kapasitiivinen. Jännitteen laatu tai epäsymmetria eivät vaikuta laitteen toimintaan. Laitteen voi sijoittaa mihin vain verkon pisteeseen, mutta suurimman hyödyn saa kun asentaa sen mahdollisimman lähellä yliaaltoja aiheuttavia laitteita. Silloin yliaallot eivät kulje pitkiä matkoja verkossa, vaan ne saadaan pysäytettyä hyvin aikaisessa vaiheessa.

Aktiivisuodattimia löytyy teholuokaltaan 17-100 kVA ja paristoja rinnakkain kytkemällä pystytään tehoa lisäämään. (Männistö;ym., 2006)

6.1.6 Staattinen kompensattori

Staattinen kompensattori (SVC eli Static VAR Compensator) on yliaaltosuodattimen ja tyristoriohjatun reaktorin yhdistelmä. Laitetta käytetään kohteissa, joissa kuormitus muuttuu erittäin nopeasti. Tyypillisiä kohteita ovat terästehtaat, joissa käytetään mm. valssikoneita ja valokaariuuneja. Staattinen kompensattori sisältää suodatusportaan jokaiselle merkittävälle yliaallolle, laajakaistasuodattimen korkeimmille yliaalloille, sekä tyristoriohjatun reaktoriportaan. Laitteella saadaan erittäin lyhyt kompensoinnin ja yliaaltosuodatuksen vasteaika. Se on maksimissaan 10 ms eli puoli verkkojaksoa 50 Hz verkossa. Laitteella pystytään myös tasaamaan verkon jännitetasoa ja korjaamaan jännitteen epäsymmetria. Laite voi korjata induktiivisen ja kapasitiivisen tehokertoimen tyristoriohjatun reaktorin avulla. (Männistö ym. 2006.)

6.1.7 Pyörivät kompensointilaitteet

Pyörivä kompensointilaite on yleensä tyhjäkäynnillä verkossa pyörivä säädettävä tahtikone. Tahtikoneen magnetointia säädetään sen mukaan, tarvitaanko loistehoa tuottaa vai kuluttaa. Jos loistehoa täytyy tuottaa, ylimagnetoidaan konetta. Vastaavasti konetta alimagnetoidaan, jos loistehoa täytyy kuluttaa.

Magnetoinnin säätö on yleensä tyristoriohjattu, jolloin saadaan aikaan nopea magnetoinnin säätö. Magnetointikään suuri induktanssi tuo hitautta kompensoinnin säätöön, joka hidastaa virran muutoksia. Toinen haitta tällaisessa kompensoinnissa on se, ettei sillä pysty kompensoimaan jokaista vaihetta erikseen tarpeen mukaan, vaan kompensointiteho on sama joka vaiheelle. Tällainen kompensointilaite on kannattavin silloin, kun moottoria pystyy käyttämään muutenkin hyödyksi tarpeen mukaan, kuten teollisuudessa usein tehdään. (Männistö;ym., 2006)

7 SÄHKÖNLAATU

Sähkönlaatu vaikuttaa suuresti sähkölaitteiden toimintaan. Laitteet on suunniteltu toimimaan tietynlaisissa olosuhteissa, joten ne eivät kestä liian suuria poikkeamia näistä olosuhteista. Sähkönlaadulla on erittäin suuri merkitys varsinkin teollisuudessa, jossa tuotanto on suurta ja laitteet ovat käynnissä lähes jatkuvasti. Usein tuotannon pysähtyminen on kallista tällaisissa kohteissa. Joskus sähkönlaatu vaikuttaa jopa ihmishenkien säilymiseen, kuten esimerkiksi sairaaloissa käy helposti.

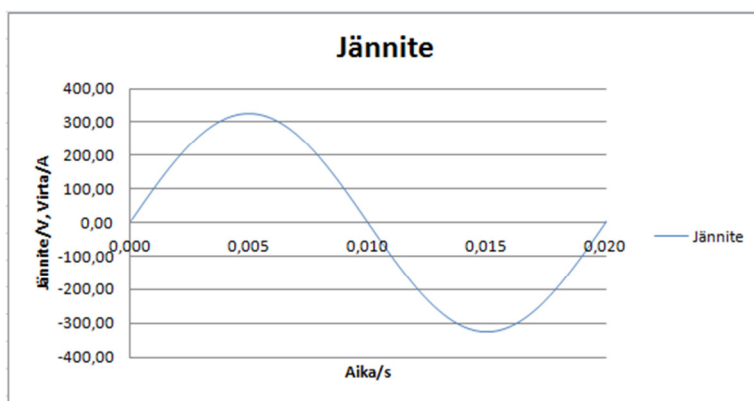
Tämän vuoksi on täytynyt tehdä sähkönlaatustandardi, jolla saadaan kaikki sähköntuotantoa ja sähkönsiirtoverkko toimintaa tekevien yritysten toiminta pysymään tiettyjen laatuvaatimuksien rajoissa. Sama standardi velvoittaa osaltaan myös yksityisiä sähkökäyttäjiä, sillä heidän verkkoon kytkemänsä laitteet saattavat joissain tilanteissa aiheuttaa liiaksi häiriötä heidän oman ja naapureiden, sekä valtakunnan sähköverkon sähkönlaatuun. (Männistö ym. 2006.)

Sähkönlaatutekijät voidaan jakaa karkeasti kolmeen päätekijään. Sähköntuotantoon, siirtoon ja kulutukseen liittyviin tekijöihin. Tuotanto vaikuttaa lähinnä jännitetasoon ja taajuuteen. Siirto vaikuttaa lähinnä katkoksiin. Kuluttajan oma verkko ja laitteet vaikuttavat jännitetasoon, yliaaltoihin, välkkyntään, epäsymmetriaan ja jännitekuoppiin ja kohoumiin.

Sähkönlaadun merkitys nykyisissä sähköjakeluverkoissa lisääntyy jatkuvasti, sillä sähköntoimitusvarmuudelle asetetaan jatkuvasti yhä suurempia vaatimuksia.

7.1 Taajuus

Sähköverkon taajuus tarkoittaa sitä, kuinka nopeasti verkon sinimuotoinen jännite vaihtelee. Taajuus lasketaan verkon jännitejaksojen lukumääränä sekunnissa. Yksi jännitejakso tarkoittaa sitä, että kun verkon jännite muuttuu jaksollisesti, niin sama jännitteen kuvio toistuu yhä uudestaan ja uudestaan. Jakso on koko jännitekuvion se pääosa, josta kuvio koostuu. Yksi jännitejakso on esitetty kuviossa 9.



KUVIO 9. Jännitteen jakso 50 Hz:n taajuudella

Taajuuden yksikkö on Hertsi ($\text{Hz}=1/\text{s}$). Taajuuden täytyy olla juuri oikea, sillä esimerkiksi oikosulkumoottoreiden virrat alkavat nousta, jos taajuus laskee. Samoin käy kaikille induktiivisille laitteille, koska niiden impedanssi muuttuu suoraan verrannollisesti taajuuteen kaavan 3 mukaisesti.

$$X_L = \omega L \quad (3)$$

jossa X_L = induktiivinen reaktanssi
 ω = jännitteen kulmataajuus
 L = induktanssi.

Kapasitiivisten kuormien virta käyttäytyy päinvastoin, koska kapasitiivinen reaktanssi on kääntäen verrannollinen taajuuteen kaavan 4 mukaisesti.

$$X_C = \frac{1}{\omega C} \quad (4)$$

jossa X_C = kapasitiivinen reaktanssi
 ω = jännitteen kulmataajuus
 C = kapasitanssi.

Taajuuteen vaikuttaa lähinnä sähköä tuottavien generaattoreiden pyörimisnopeus. Generaattorin pyörimisnopeus on suoraan verrannollinen pyörittävän voimakoneen pyörimisnopeudesta. Taajuus muuttuu, jos verkkoa syöttävien generaattoreiden tehotasapaino muuttuu eli jos kuormien tarvitsema teho on eri suuri kuin generaattoreiden tuottama teho. Sähköverkkoa syöttää yleensä useita generaattoreita yhtä aikaa, jolloin teho jakaantuu generaattoreille. Jos jokin generaattori pyrkii tuottamaan enemmän tehoa, muut generaattorit pienentävät tehontuotantoa, jolloin kiihtymään pyrkivälle generaattorille muodostuu suurempi pyörimistä vastustava voima ja näin tämän generaattorin pyörimisnopeus pysyy vakiona. Jos taas kyseinen generaattori pyrkii hidastumaan, muut generaattorit alkavat tuottaa enemmän tehoa, jotta verkon taajuus ja tehotasapaino säilyisi.

Standardissa SFS-EN 50160 määritellään taajuudelle tietyt rajat, joissa sen on pysyttävä. Taajuudelle, kuten muillekin sähkönlaatusuureille SENER määrittelee kolme laatutasoa. Laatutasot ovat: Standardilaatu, Normaali laatu ja Korkea laatu. (ST-kortti 52.50)

Taajuuden mittauksessa tulee käyttää 1 viikon mittausaikaa ja 10 s:n keskiarvoistamisaikaa (keskeytyksiä ei lueta mukaan). Taajuuden raja-arvot eri laatutasoille ovat seuraavanlaiset:

Standardilaatu:

50 Hz \pm 1 % on 99,5 % vuodesta (eli 49,5 - 50,5 Hz) ja
 50 Hz + 4 % /- 6 % on 100 % ajasta (eli 47 - 52 Hz).

Normaali laatu:

50 Hz \pm 1 % on 100 % ajasta (eli 49,5 - 50,5 Hz).

Korkea laatu:

50 Hz \pm 0,5 % on 100 % ajasta (eli 49,75 - 50,25 Hz).

7.2 Jännitetaso

Jännitetaso tarkoittaa jännitteen tehollisarvoa. Jännitetason täytyy pysyä tiettyjen rajojen sisällä, sillä sähkölaitteet ja sähköjohtojen eristykset on mitoitettu tietyille jännitetasolle. Lisäksi jännitetaso vaikuttaa voimakkaasti myös valaistuksen luminanssiin (pintakirkkauteen). Jännitetasoon vaikuttaa suurimmaksi osaksi muuntajan napajännite sekä verkon siirtojohdoissa esiintyvät jännitehäviöt, jotka riippuvat pääasiassa kuormitusvirrasta, johtopituudesta, johdon poikkipinta-alasta ja materiaalisista. Loistehon siirto verkossa kasvattaa jännitehäviöitä kasvaneen kuormitusvirran vuoksi.

Verkon jännitettä voi nostaa ylikompensointi, joka vaikuttaa muuntajan magnetointiin kasvattaen sitä. Jännite voi nousta myös ilmastollisten ylijännitteiden vuoksi, kuten sähkölinjaan osuneen salamman iskun seurauksena. Jännitteelle ei aseteta yhtä tiukkoja rajoja kuin taajuudelle, sillä jännite on vaikeampi pitää vakiona eikä jännitteen pienillä muutoksilla ole suurta vaikutusta laitteiden toimintaan. (Viitala.)

Jännitemittauksissa mittausaika on 1 viikko. Keskiarvoistamisaika on 10 min (keskeytyksiä ei lueta mukaan). Jännitetason raja-arvot ovat seuraavanlaiset:

Standardilaatu:

\pm 10 % nimellijännitteestä 95 % 10 min keskiarvoista (eli vaihejännite 207 – 253 V). Ja -15 %/+10 % nimellijännitteestä 100 % 10 min keskiarvoista (eli vaihejännite 195,5 - 253 V).

Normaali laatu:

Vaihejännite 207 - 244 V 100 % 10 min keskiarvoista.

Korkea laatu:

10 min keskiarvot 220 - 240 V ja keskiarvojen keskiarvo 225 - 235 V.

7.3 Jännitteen aaltomuoto

Jännitteen aaltomuotoon vaikuttaa generaattorin lisäksi verkossa tapahtuvat kytkentä- ja häiriötilanteet sekä epälineaaristen kuormien aiheuttamat yliaallot. Kytkentätilanteessa verkkoon kytketään tai siitä katkaistaan sähköinen kuorma, jolloin verkko ja generaattori hakeutuvat uuteen tasapainotilaan. Häiriötilanteita ovat esimerkiksi sulakepalot, puun kaatuminen sähkölinjalle tai kosketushäiriö jossain verkon liitoksessa. Epälineaarinen kuorma on kuormaa, joka ei pysy sähköverkon kannalta tasaisena vaan vaihtelee voimakkaasti. Tällainen kuorma on esimerkiksi taajuusmuuttaja, joka kytkee ja katkaisee kuormaa verkossa koko ajan. Tällainen kuorma aiheuttaa verkkoon yliaaltoja, jotka muuttavat verkon jännitteen ja virran aaltomuotoa. (Viitala.)

7.3.1 Yliaallot

Kun verkossa esiintyy kuorman kytkentöjä ja katkaisuja, muuttuu jännitteen aaltomuoto hetkellisesti. Kun on kyseessä taajuusmuuttaja, tapahtuu kytkentätilanteita jatkuvasti. Tällöin aaltomuoto vääristyy niin pitkäksi aikaa kun taajuusmuuttaja on käynnissä. Aaltomuoto siis poikkeaa siniaallosta.

Aaltomuodon analysointimielessä on tärkeää, että vääristynyt aaltomuoto voidaan mallintaa jotenkin. Yksi tärkeä menetelmä mallinnukseen on Fourier`n sarjakehitelmä. Sen avulla erilainen aaltomuoto muodostetaan eritaajuisista sini- ja kosiniaalloista. Näitä eritaajuisia aaltoja kutsutaan yliaalloiksi. Verkkoon ei oikeasti syötetä eritaajuisia aaltoja, mutta niitä käytetään hyväksi säröytyneen siniaallon esittämisessä, laskemisessa ja mittaamisessa. Fourier`n sarjakehitelmän avulla pystytään muodostamaan mikä tahansa jaksollisesti muuttuva funktio sinimuotoisten eritaajuisien signaalien avulla.

Fourier`n sarja voidaan esittää kaavan 5 muodossa.

$$u_{(t)} = U_0 + \sum_{n=1}^{\infty} A_n \cos(n\omega t) + \sum_{n=1}^{\infty} B_n \sin(n\omega t) \quad (5)$$

jonka termit U_0 eli tasakomponentti sekä termit A_n ja B_n voidaan laskea seuraavasti:

$$U_0 = \frac{1}{T} \int_0^T u_{(t)} dt \quad (6)$$

$$A_n = \frac{2}{T} \int_0^T u_{(t)} \cos(n\omega t) dt \quad (7)$$

$$B_n = \frac{2}{T} \int_0^T u_{(t)} \sin(n\omega t) dt \quad (8)$$

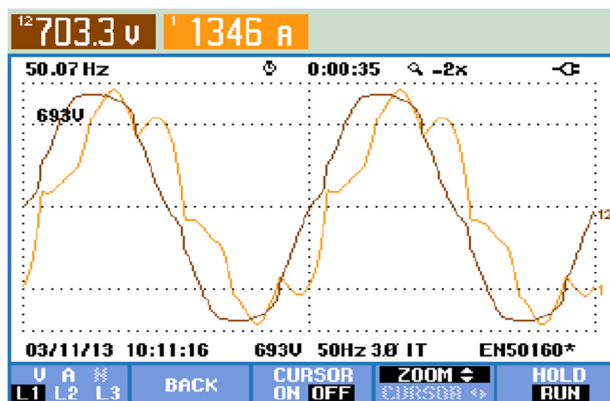
Jos funktio on parillinen, siihen tulee pelkästään kosinitermejä. Jos taas funktio on pariton, se sisältää pelkästään sinitermejä. Funktio voi sisältää myös molempia termejä. Parillisuus määritellään seuraavasti.

Parillinen kun, $f_{(-x)} = f_{(x)}$

Pariton kun, $f_{(-x)} = -f_{(x)}$

(Mäkelä, Soininen, Tuomola, Öistämö 2008).

Yhden mitatun keskuksen jännitteen ja virran käyrämuodot ovat kuvion 10 mukaiset.



KUVIO 10. Analysaattorilla mitatut jännitteen ja virran käyrämuodot

Kuviosta nähdään, että jännite ei ole vääristynyt niin paljon kuin virta. Virta sisältää paljon yliaaltoja. Tässä mittauksessa virran merkittävimmät virtayliaaltomäärät (5., 7., 11. ja 13.) ovat seuraavan suuruiset:

$$I_{H1-f\%} = 100 \% = 1\,376\text{ A}$$

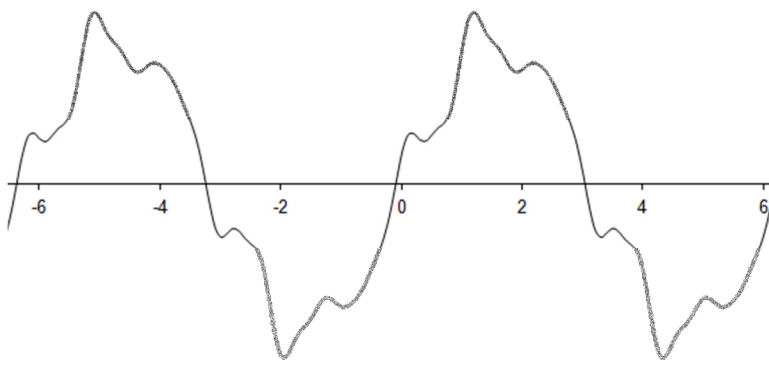
$$I_{H5-f\%} = 18,7 \% = 257\text{ A}$$

$$I_{H7-f\%} = 6,5 \% = 89\text{ A}$$

$$I_{H11-f\%} = 3,8 \% = 52\text{ A}$$

$$I_{H13-f\%} = 2,5 \% = 34\text{ A}$$

Kun kyseiset mittauksiedot syötettiin Exelin Fourier`n sarjaan perustuvaan laskentataulukkoon, saatiin kuvion 11. mukainen kuvaaja.



KUVIO 11. Fourier`n sarjaan perustuvan Exel-laskentataulukon antama virran käyrämuoto

Kuvasta nähdään, että laskettu funktio muistuttaa selvästi analysaattorin virran kuvaajaa. Kun termien määrää lisätään, saadaan tarkempi vastaavuus kuvaajille.

7.3.2 Jännitesäro

Kun verkossa esiintyy yliaaltojännitteitä, alkaa jännitteen käyrämuoto säröytyä. Säröytymisen suuruutta kuvataan jännitesärokertoimella THD(U). Jännitesärokerroin kertoo, kuinka paljon jännite sisältää yliaaltojännitettä. Yliaaltojännitteet eivät vaikuta suoraan perusaallon jännitteeseen vaan neliöllisesti. Jännitesärokertoimen laskentaan on useita eri laskutapoja sen mukaan verrataanko yliaaltojännitteitä perusaallon jännitteeseen U_f vai kokonaisjännitteeseen U_{RMS} . Jännitteen perusaaltoon verrattaessa jännitesäron tunnus on THD-F ja jännitteen kokonaisaaltoon verrattaessa tunnus on THD-R.

7.4 Jännitteen epäsymmetria

Jännitteen epäsymmetria syntyy, jos kuormitus ei ole tasaista joka vaiheella. Tällainen tilanne tulee silloin, jos yksivaiheiset kuormat kytketään epätasaisesti eri vaiheille tai jos kolmivaiheiset kuormat vioittuvat tai yhdestä tai kahdesta vaiheesta palaa sulake, jolloin kuorma jää toimimaan epäsymmetrisesti. Epäsymmetrisessä tilanteessa vaihejännitteiden tehollisarvot tai vaihejännitteiden väliset kulmat ovat eri suuret. Epäsymmetrian raja-arvot ovat seuraavanlaiset: (Viitala)

Mittausaika 1 viikko, 10 minuutin jaksoissa (keskeytyksiä ei oteta huomioon).

Standardilaatu:

95 % jakelujännitteen U_{ush} -arvoista ≤ 2 %.

(U_{ush} on jännitteen vastakomponentti)

Normaali laatu:

100 % jakelujännitteen U_{ush} -arvoista $\leq 1,5$ %.

Korkea laatu:

100 % jakelujännitteen U_{ush} -arvoista ≤ 1 %.

7.5 Jännitekuopat ja kohoumat

Jännitekuopiksi ja kohoumiksi kutsutaan tilannetta, kun jännite nousee tai laskee vähintään 10 % nimellijännitteestä. Jännitekuopassa jännite laskee ja kohoumassa jännite nousee. Standardi SFS EN 50160 ei määrittele raja-arvoja kuopille ja kohoumille, mutta SENER:n suosituksissa on näille laskennallinen raja-arvo, 20 kpl/vko. (Viitala)

7.6 Toimitusvarmuus ja katkokset

Sähkön jakelun keskeytykseksi luetaan tilanne, jolloin jännitteen tehollisarvo laskee alle 1 % nimellijännitteestä.

Sähkönjakelun keskeytyksiä on kahdenlaisia: suunniteltuja ja häiriökeskeytyksiä. Suunnitellut keskeytykset ovat sähköverkon korjauksesta, huollosta ja rakentamisesta johtuvia keskeytyksiä, jotka on suunniteltu etukäteen ja niistä ilmoitetaan etukäteen asiakkaille, joita keskeytys koskee.

Häiriökeskeytyksiä ovat keskeytykset, jotka johtuvat sähköverkossa tapahtuneesta häiriöstä, kuten salaman lyönnistä linjaan. Häiriökeskeytykset jaetaan ohimeneviin keskeytyksiin, jotka kestävät alle 3 minuuttia, ja pysyviin keskeytyksiin, jotka kestävät yli 3 minuuttia. (Viitala)

7.7 Käyttöaajuiset ylijännitteet ja transienttiylijännitteet

Käyttöaajuiset ylijännitteet johtuvat usein kuorman nopeasta alenemisesta, sähköverkossa tapahtuvasta maasulusta tai ylikompensoinnista. Myös vaiheiden epätasainen kuormittaminen aiheuttaa jännitteen nousua. Jännite nousee vaiheissa, joissa on vähemmän kuormaa. (Viitala)

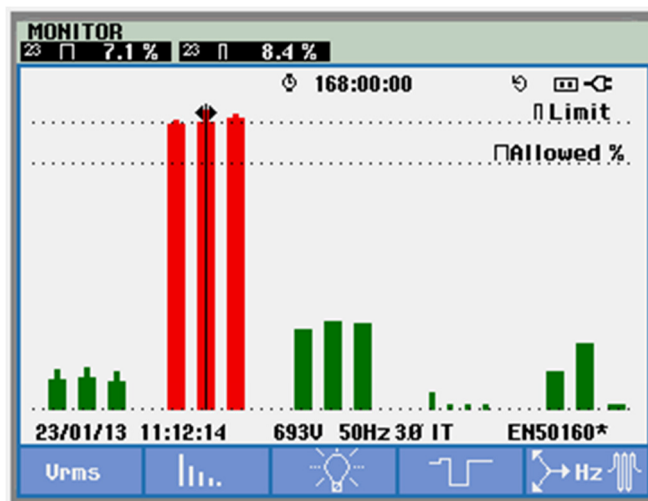
8 SÄHKÖNLAATUMITTAUKSET

Sähkönlaatumittaukset rajattiin tietylle alueelle, sillä koko kaivosalue on niin laaja, ettei kaikkia keskuksia olisi kerennyt mittaamaan työn aikana. Alueeksi valittiin tehdasalue ja sieltä ne keskuksat, joissa kompensointi oli pudonnut pois käytöstä kokonaan. Alueella sijaitti tällaisia keskuksia 12 kappaletta, mutta osa keskuksista ei ollut käytössä seisakin vuoksi, joten alueella oli käytössä 7 keskuksat. Keskuksille tehtiin tiedonkeruumittaukset ilman kompensointia ja kompensoinnin kanssa. Tiedonkeruumittaukset suoritettiin Fluke 435 –analysointilaitteen Logger-toiminnolla, jotta sain mitattua haluamiani suureita. Sähkönlaatumittaustoiminnossa (Monitor-toiminnossa) mitattavia suureita on hyvin rajallisesti. Näin saatuja mittaustuloksia voitaisiin käyttää muihinkin tarkoituksiin mahdollisimman monipuolisesti tulevaisuudessa.

Mittaukseen valittiin hyvin kattavan joukko mittaussuureita, jotta niiden avulla saisi mahdollisimman laajan kuvan verkon eri sähkönlaatuus suureiden tilasta. Valitut mittaussuureet on esitetty liitteessä 1.

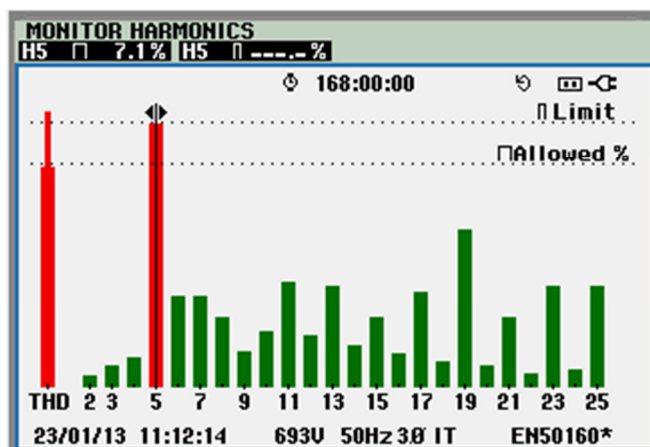
Ensimmäinen mittaus tehtiin selvyyden vuoksi MONITOR-toiminnolla, jotta raja-arvojen ylitykset tulisivat selvimmin esille. Mittaus tehtiin kohteessa, jossa kompensointia oli enää käytössä yksi porras ja sekin toimi enää kahdella vaiheella.

Mittauksen päänäyttö muodostui kuvan 12 mukaiseksi.



KUVA 12. Keskuksen 11P päänäyttö

Kuvasta nähdään, että raja-arvojen ylityksiä on ainoastaan yliaaltojen osiossa. Näytössä näkyy jännitesärön tasot. Vaiheen L2 jännitesärö on ollut suurin; se oli 95 % ajasta korkeintaan 7,1 % ja 100 % ajasta korkeintaan 8,4 % jännitteen perusaallon tehollisarvosta. Katsotaan seuraavaksi mistä yliaalloista korkea särökerroin koostuu. Yliaaltotasot näkyvät kuvassa 13.



KUVA 13. Yliaaltotasot keskuksella 11P vähäisellä kompensoinilla

Kuvasta nähdään että jännitesäro koostuu suurimmaksi osaksi 5. yliaallosta, joka ylittää myös raja-arvon (6 %) se oli 100 % ajasta alle 7,1 %. Jännitesäro menee raja-arvon yli 5. yliaallon vuoksi. Jännitesäroprosentti lasketaan kaavan 8 mukaisesti. (Männistö 2006)

$$THD - F(U)\% = \frac{\sqrt{\sum_{h=2}^{\infty} U_h^2}}{U_f} * 100\% \quad (9)$$

Kaavasta voidaan ratkaista muiden yliaaltojen, kuin 5. yliaallon osuus johtamalla kaava 9 seuraavaan muotoon. Lasketaan edellä mainitun keskuksen tilanne.

$$U_{hmuut\%} = \sqrt{THD(U)\%^2 - U_{H5\%}^2} = \sqrt{7,9\%^2 - 7,1\%^2} = 3,46\% \quad (10)$$

Jos 5. yliaalto olisi juuri sallitussa 6 %:n rajassa, niin särökerroin olisi kaavan 11 mukaan.

$$THD - F(U)\% = \sqrt{6\%^2 + 3,46\%^2} = 6,93\% \quad (11)$$

Tuloksesta nähdään, että jos 5.yliaaltojännitteen saisi raja-arvon mukaiseksi, korjaantuisi särökerroinkin sallittuun arvoon.

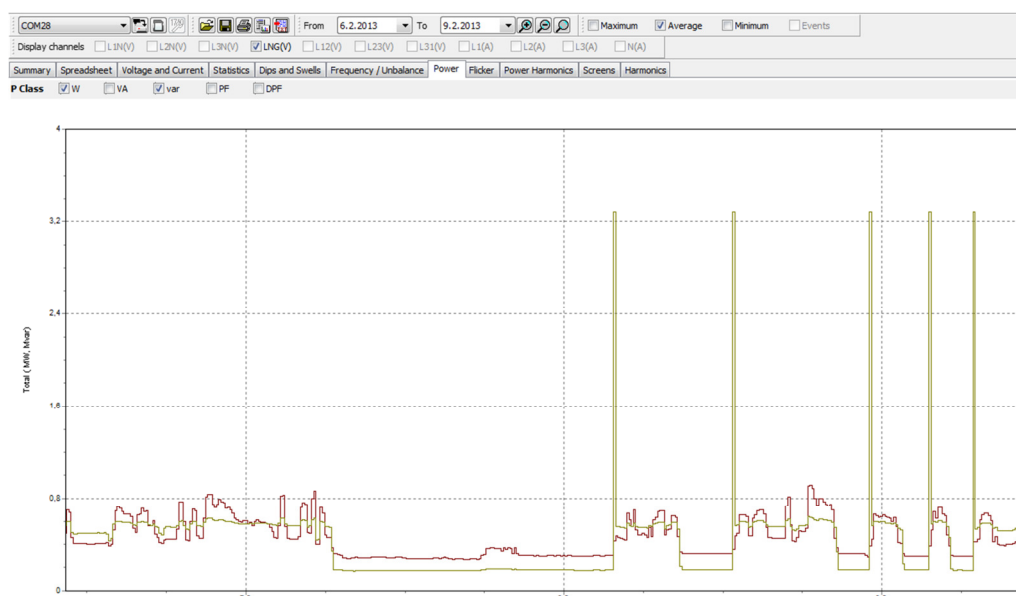
Keskuksen muut suureet olivatkin sallituissa rajoissa, joten keskuksen ainut ongelma on 5. yliaaltojännite.

Seuraavat keskuksset mitattiin LOGGER-toiminnolla. Muissakin keskuksissa ongelma oli sama eli 5. yliaaltopitoisuus oli korkea. Lisäksi useimmissa keskuksissa esiintyi muutama jännitekuoppa viikon mittaisen mittausjakson aikana. Yliaaltojen osalta pahin tilanne oli keskuksessa 12P, jossa yliaaltotasot olivat taulukon 1 mukaiset.

TAULUKKO 1. Yliaaltotasot pahimmassa keskuksessa.

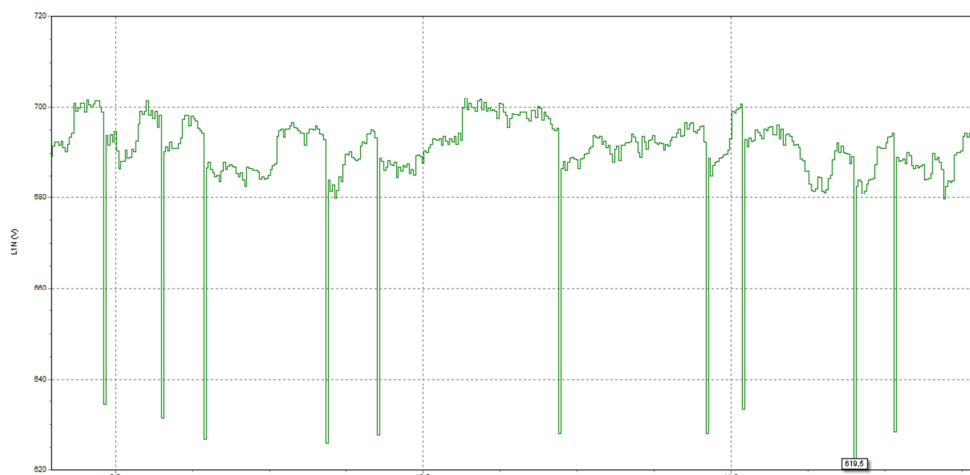
	Jännite %	Jännite	Virta %	Virta
THD-F%	12,3%	84,1 V	20,4 %	299,5 A
Perusaalto	100 %	684 V	100 %	1468 A
H5	10,8 %	73,9 V	19,3 %	283,3 A
H7	5,4 %	36,9 V	5,7 %	83,7 A
H11	1,9 %	13,0 V	1,9 %	27,9 A
H13	1,3 %	8,9 V	1,9 %	27,9 A

Suurimmat jännitekuopat ja loistehohuiput esiintyvät keskuksessa 23P. Ajalliset tehon vaihtelut näkyvät kuvassa 14.



KUVA 14. Tehojen ajallinen vaihtelu keskuksella 23P

Kuvasta näkyy, että loisteho huiput ovat hyvin korkeita. Huiput johtuvat suuritehoisen moottorin käynnistyksestä tai nopeasta moottorin kuorman lisäyksestä. Juuri näissä tilanteissa jännitekuopat esiintyvät, sillä induktiivinen loiskuorma laskee voimakkaasti muuntajan napajännitettä. Jännitteen kuvaaja kyseiseltä ajanjaksolta on kuvan 15 mukainen.



KUVA 15. Jännitekuopat keskuksella 23P.

9 ESTOKELAPARISTOJEN KUNTOTARKASTUKSET

Koska laitteistossa oli ilmennyt paljon sulakepaloja joista osa oli hyvin voimakkaita, tein estokelapari-
ristoilte kuntotarkastuksen. Tein tarkastuksen mittaamalla estokelapariston pääkomponenttien arvot
Agilent U1733C-kapasitanssimittarilla. Kapasitanssimittarilla pystyy mittaamaan myös induktanssit ja
impedanssit. Mittari näyttää myös komponenttien hyvyyslunun, häviökertoimen ja vaihekulman. Mit-
taustaaajuutta pystyi myös muuttamaan tietyin portain (100Hz, 1kHz, 10kHz ja 100kHz). Mittaustaa-
juus vaikuttaa kuitenkin mittaustarkkuuteen joten se kannattaa valita huolellisesti jos käyttää manu-
aalista mittaussuureiden säätöä. Laitteessa on myös automaattimittaustoiminto, jolla laite valitsee it-
se mittaustaaajuuden ja sisäisen mittauskytkenän aina optimaaliseksi parhaan mittaustarkkuuden
mukaan.

Mittauksessa selvisi että komponentit ovat ehjiä sulakepaloista huolimatta. Tämä kertoo siitä että
sulakesuojaus toimii ainakin tämän tyyppisessä viassa riittävän nopeasti laitesuojauksen kannalta.
Sulakesuojaus ei myöskään toimi liian nopeasti, sillä epäonnistuneen käynnistyksen aikana sulakkeet
kestävät useita sekunteja, jona aikana normaalit induktanssimuutokset ehtii tapahtumaan hyvin.

Yksi merkillinen asia kuitenkin tuli esille. Kelan induktanssi oli 50 kVar:n portaassa mittarin mukaan
1,25 mH, vaikka laitteen spesifikaatioissa ja komponentin arvokilvessä lukee 2,281 mH.

9.1 Estokelaportaan viritystaajuuden laskenta

Kelan arvon muutos vaikuttaa laitteen viritystaajuuteen. Portaan viritystaajuus lasketaan sarjareso-
nanssikaavalla 12.

$$f_r = \frac{1}{2\pi\sqrt{LC}} \quad (12)$$

jossa: f_r = resonanssitaajuus (Hz)
L = kelan induktanssi (H)
C = kondensaattorin kapasitanssi (F)

Estokelapariston resonanssitaajuuden arvo lasketaan 1-vaiheisen sijaiskytkennän avulla, joten kon-
densaattorin kapasitanssi pitää muuttaa yksivaiheisen sijaiskytkennän arvoksi. Portaan vaihevälika-
pasitanssin pystyy laskemaan valmistajan antamalla kaavalla 13.

$$C_{vv} = 1519500 * \frac{Q}{U^2} = 1519500 * \frac{50kVar}{(690V)^2} = 159,6\mu F \quad (13)$$

jossa: C_{vv} = Kondensaattoripaketin vaihevälikapasitanssi (F)
Q = portaan kompensointiteho (kVar)
U = portaan pääjännite (V)

Vaihevälikapasitanssista täytyy ratkaista yhden kondensaattorin kapasitanssiarvo. Portaen kondensaattoripaketissa kondensaattorit on kytketty kolmioon, jolloin Vaihevälikapasitanssi muodostuu kahdesta rinnankytketystä kapasitanssihaarasta, joista toisessa on yksi kondensaattori ja toisessa kaksi kondensaattoria sarjassa. Kun kondensaattorit ovat sarjassa, niiden yhteinen kapasitanssi pienenee ja se lasketaan kaavalla 14.

$$C = \frac{1}{\frac{1}{C_1} + \frac{1}{C_2}} \quad (14)$$

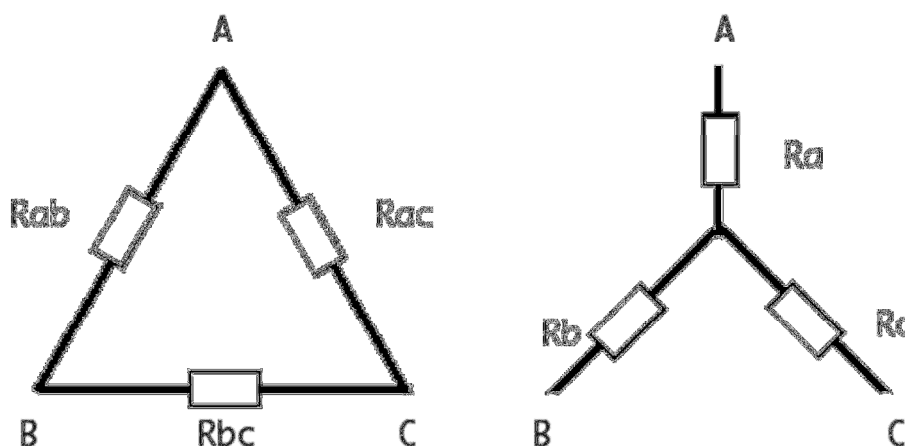
jossa: C = kokonaiskapasitanssi
 C_1 = kondensaattorin 1 kapasitanssi
 C_2 = kondensaattorin 2 kapasitanssi

Kaavasta nähdään että kun kondensaattorit ovat yhtäsuuria ja kaksi kondensaattoria on sarjassa, niin kokonaiskapasitanssi puolittuu. Kahden kondensaattorin sarjaankytkentä voidaan siis esittää yhdellä kondensaattorilla, jonka kapasitanssi on puolet yhden kondensaattorin kapasitanssista.

Sitten kun kaksi kondensaattorihaaraa on rinnankytkettynä, niiden kokonaiskapasitanssi on kaikkien rinnankytkettyjen kapasitanssien summa. Tässä tapauksessa siis kolmioon kytkettyjen kondensaattorien vaihevälikapasitanssi on 1,5 kertaa yhden kondensaattorin kapasitanssi. Näin ollen kolmioon kytketyn kondensaattoripaketin yhden kondensaattorin kapasitanssi saadaan vaihevälikapasitanssista kaavalla 15.

$$C = \frac{C_{vv}}{1,5} = \frac{159,6\mu F}{1,5} = 106,4\mu F \quad (15)$$

Kun halutaan tehdä yksivaiheinen sijaiskytkentä, täytyy kolmiokytkentä muuttaa tähtikytkennäksi kuvan 16. mukaisesti. Resistivisten vastusten (R) tilalla käytetään vain kondensaattoreiden vaihtovirtavastusta eli kapasitiivista reaktanssia (X_c).



KUVA 16. Vastuksien kolmio/tähti muunnos. (http://fi.wikipedia.org/wiki/T%C3%A4hti_kolmiomuunnos)

Kolmioonkytketyn kondensaattoripaketin yhden kondensaattorin kapasitiivinen reaktanssi lasketaan kaavalla 16.

$$X_c = \frac{1}{\omega C} = \frac{1}{2\pi f C} = \frac{1}{2\pi * 50 \text{ Hz} * 106,4 \mu\text{F}} = 29,92 \Omega \quad (16)$$

Tähtikytketyn kondensaattoripaketin yhden kondensaattorin arvo saadaan, kun muunnetaan sen kapasitiivinen reaktanssi X_c kolmio/tähti-muunnoksella seuraavasti. (Valtanen, 2010)

$$X_{c(a)} = \frac{X_{c(ab)} * X_{c(ac)}}{X_{c(ab)} + X_{c(bc)} + X_{c(ac)}} \quad (17)$$

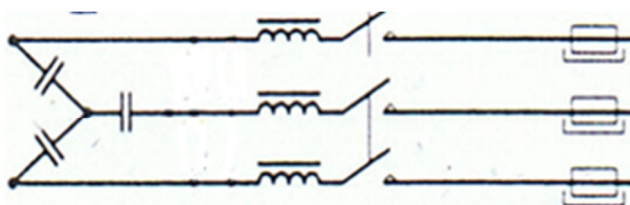
Kaikki kondensaattorit ovat yhtäsuuret joten kaava voidaan muuntaa helpompaan muotoon 18.

$$X_{c(a)} = \frac{X_c^2}{3 * X_c} = \frac{29,92 \Omega^2}{3 * 29,92 \Omega} = 9,97 \Omega \quad (18)$$

Saadusta kapasitiivisen reaktanssin arvosta lasketaan tähtikytkentäisen kondensaattoripaketin yhden kondensaattorin arvo kaavalla, joka on johdettu kaavasta 16.

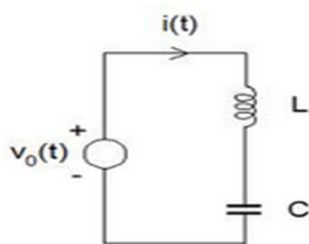
$$C_Y = \frac{1}{\omega X_c} = \frac{1}{2\pi f X_c} = \frac{1}{2\pi * 50 \text{ Hz} * 9,97 \Omega} = 319,16 \mu\text{F} \quad (19)$$

Kyseisen tilanteen yksivaiheinen sijaiskytkentä voidaan muodostaa kuvion 17 mukaisesta kolmivaiheisesta kytkennästä.



KUVIO 17. Estokelaportaan kolmivaiheinen sijaiskytkentä, jossa kondensaattorit on kytketty tähtikytkentään. (Nokian Capacitors 2007)

Kytkennästä saadaan yksivaiheinen sijaiskytkentä, kun tiedetään, että vaihejännite muodostuu kelan syöttöpisteen ja kondensaattoripaketin tähtipisteen väliin. Kondensaattoripaketin tähtipiste ei ole galvaanisessa yhteydessä muuntajan toisiokäämin tähtipisteeseen, mutta kyseessä on kuitenkin vastaava potentiaali, koska kondensaattorit ovat samankokoiset eli kuorma on symmetrinen. Kyseessä on siis keinotekoinen nollapiste. Tällöin täydellinen yksivaiheinen sijaiskytkentä on kuvion 18 mukainen.



Kuvio 18. Estokelapariston portaan yksivaiheinen sijaiskytkentä

Kuviosta nähdään hyvin, että kyseessä on kelan ja kondensaattorin sarjakytkentä, jolloin kytkennän viritystaajuus voidaan laskea aiemmin esitetyllä kaavalla 11.

$$f_r = \frac{1}{2\pi * \sqrt{1,25mH * 319,16\mu F}} = 251,98Hz$$

Tuloksesta nähdään, että viritystaajuus on lähes 5. yliaallon taajuus, joten jos mittaustulos pitää paikkaansa, estokela onkin oikeasti 5. yliaallon suodatin, joka imee lähes kaiken 5. yliaaltovirran sisään. Keskusten 5. yliaaltopitoisuus on niin suuri, että ei ole ihme, jos 63 A:n porrassulakkeet palavat. Keskuksissa kulki pääsääntöisesti 5. yliaaltovirtaa 250 – 600 A.

Mittarin antama induktanssiarvo ei kuitenkaan pidä paikkaansa, sillä induktanssiarvo muuttuu kuormitusvirran muuttuessa, koska kelan rautasydämen suhteellinen permeabiliteetti muuttuu kuormitusvirran muuttuessa. Ja kelan induktanssi muuttuu suoraan verrannollisesti suhteelliseen permeabiliteettiin. Kelan induktanssiarvo tulisi siis mitata nimellisvirran suuruisella mittausvirralla.

9.2 Estokelan kyllästyminen

Estokelan rautasydämellä on ominaisuus, joka muuttaa kelan induktanssia kuormitusvirran muuttuessa. Ominaisuus johtuu kelan rautasydämen magneitoitumisesta. Magneitoituminen ei etene lineaarisesti ulkoisen magneettikentän kasvaessa, vaan magneitoitumisella on rajansa. Tätä ominaisuutta kutsutaan sydämen kyllästymiseksi. Sydän kyllästyy, kun kaikki sen alkeismagneetit ovat kääntyneet kentän suuntaisiksi. (Silvonen 2007.)

Rautasydämen kyllästymisilmiötä ryhdyttiin selvittämään seuraavasti.

Induktanssin yleinen kaava on:

$$L = \frac{N\Phi}{I} \quad (20)$$

jossa

L=kelan induktanssi

N=käämin johdinkierrosten lukumäärä

Φ =magneettivuo

I=käämin läpi kulkeva virta.

Induktanssin kaavassa on kaksi muuttuvaa tekijää, magneettivuo ja virta. Kaava 21 kertoo magneettivuohon vaikuttavat tekijät.

$$\Phi = \frac{NI}{R_m} \quad (21)$$

jossa Φ =magneettivuo
 N =kelan johdinkierrosten lukumäärä
 I =kelan läpi kulkeva virta
 R_m =magneetti­piirin reluktanssi.

Magneetti­piirin reluktanssi kuvaa magneettikentän magneettista vastusta. Magneetti­piirin ollessa poikkipinnaltaan, materiaaliltaan koko matkalta sama voidaan reluktanssi laskea kaavalla 22. (Laajalehto 2005.)

$$R_m = \frac{l}{\mu_r \mu_0 A} \quad (22)$$

jossa l =magneetti­piirin pituus
 μ_r =rautasydämen suhteellinen permeabiliteetti
 μ_0 =tyhjän permeabiliteetti
 A =rautasydämen poikkipinta-ala.

Rautasydän magnetoituu, kun sen ympärillä olevan käämin läpi kulkee virtaa. Magnetoituminen ei ole lineaarista suhteessa magnetoivaan kentän voimakkuuteen, koska rautasydän on täysin magnetoitunut, kun sen kaikki alkeismagneetit eli dipolimagneetit kääntyvät magneettikentän suuntaisiksi. Tämä kääntyminen ei etene lineaarisesti vaan kääntymisen loppuvaiheeseen tarvitaan hyvin suuri magneettikentän muutos verrattuna kääntymisen alkutilanteeseen.

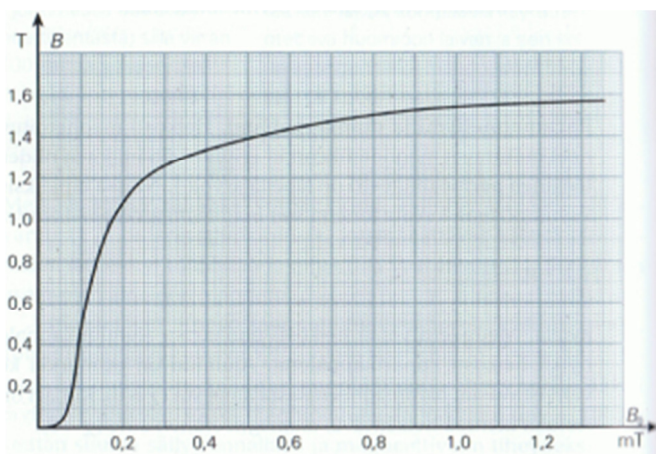
Rautasydämen mahneettikenttä koostuu kahdesta magneettikentästä, kelan virran aiheuttamasta kentästä sekä rautasydämen magnetoitumisesta johtuvasta kentästä. Kun rautasydän magnetoituu loppuun asti eli se saavuttaa suurimman magneettisuutensa, kutsutaan ilmiötä rautasydämen kyllästymiseksi. Kyllästymisen siis tarkoittaa sitä, että rautasydän ei pysty kasvattamaan kokonaismagneettikenttää enempää, vaan magneettikentän voimistumiseen vaikuttaa enää kelan käämin läpi kulkeva virta. Tällöin magneettikenttä kasvaa suoraan verrannollisesti kelan virtaan.

Kun aiemmat kaavat yhdistetään yhdeksi, saadaan induktanssin kaava muotoon 23.

$$L = \frac{N^2 \mu A}{l} \quad (23)$$

jossa N = kelan johdinkierrosten lukumäärä
 μ = rautasydämen permeabiliteetti
 A = rautasydämen poikkipinta-ala
 l = rautasydämen magneetti­piirin pituus.

Kaavasta nähdään, että kaikki muut suureet paitsi permeabiliteetti ovat vakioita. Rautasydämen poikkipinta-ala muuttuu hieman magnetoitumisen seurauksena, mutta muutos on mitättömän pieni, joten sen voi olettaa vakioksi. Induktanssi on siis suoraan verrannollinen aineen permeabiliteettiin ja tarkemmin ottaen suhteelliseen permeabiliteettiin, sillä tyhjiön permeabiliteetti on vakio. Kokonaiskenttä eli sisäinen kenttä syntyy kelan läpi kulkevan virran aiheuttamasta ulkoisesta kentästä ja rautasydämen magnetoitumisesta johtuvasta magnetoitumiskentästä. Rautasydämen magnetoitumiskäyrä on kuvion 19 mukainen.



KUVIO 19. Rautasydämen magnetoitumiskäyrä. Ulkoinen kenttä on B_0 ja sisäinen kenttä on B . (Laajalehto 2005.)

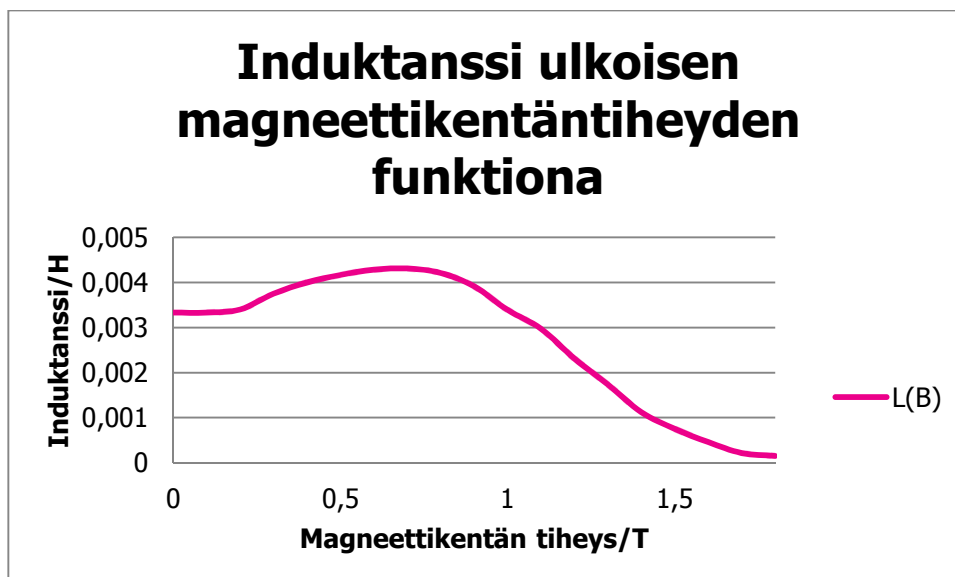
Ulkoinen kenttä tuottaa siis sisäisen kentän magnetoitumiskentän kanssa. Ulkoinen kenttä syntyy, kun kelan läpi kulkee virta. Suhteellinen permeabiliteetti on sisäisen magneettikentäntiheyden suhde vastaavaan magneettikentäntiheyteen tyhjiössä kaavan 24 mukaisesti.

$$\mu_r = \frac{\mu_0 \mu_r (H_u + H_s)}{\mu_0 (H_u + H_s)} = \frac{B}{B_t} \quad (24)$$

jossa

- μ_r = suhteellinen permeabiliteetti
- μ_0 = tyhjiön permeabiliteetti
- H_u = kelan aiheuttama ulkoinen kentän voimakkuus
- H_s = magnetoitumisen aiheuttama sisäinen kentänvoimakkuus
- B = magneettikentäntiheys rautasydämessä
- B_t = vastaava magneettikentän tiheys tyhjiössä.

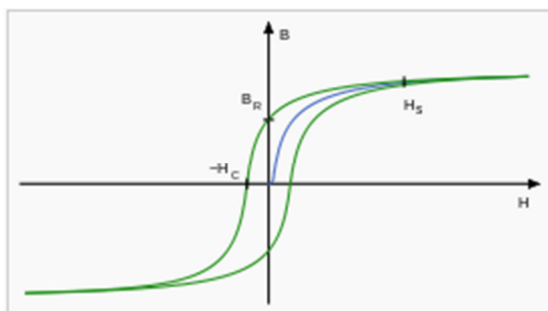
Suhteellinen permeabiliteetti käyttäytyy siis kuvion 20 mukaisesti.



KUVIO 20. Induktanssin muutos ulkoisen magneettikentän aiheuttaman magneettikentäntiheyden funktiona

Kuviosta nähdään, että kelan induktanssi muuttuu magneetoivan kentänvoimakkuuden mukaan. Kun virta nousee tarpeeksi korkeaksi, kelan induktanssi alkaa laskea.

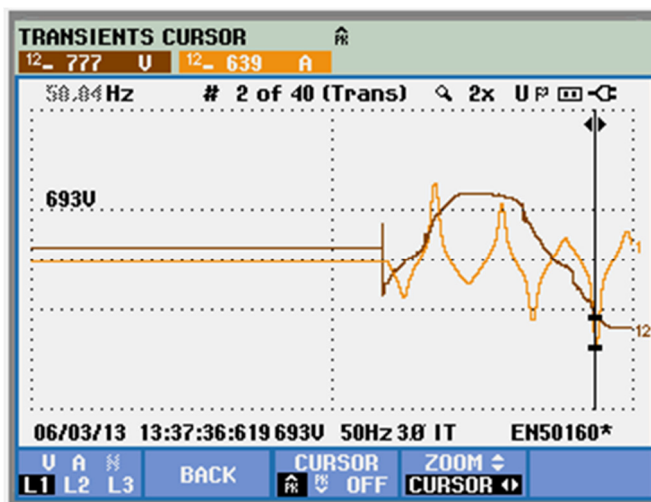
Kun kelaa syöttävänä lähteenä toimii vaihtosähkölähde, muuttuu magneetoivan kentän suunta jaksollisesti. Tällaisessa tapauksessa kelan sydämen magneitoituminen ei tapahdukaan toiseen suuntaan samaa käyrää pitkin, vaan magneitoitumisen purkamiseen tarvitaan myös tietyn suuruinen vastakkainen magneettikenttä. Asiaa kuvaa hystereesikäyrä joka on kuvion 21 mukainen.



KUVIO 21. Rautasydämen magneitoitumiskäyrä

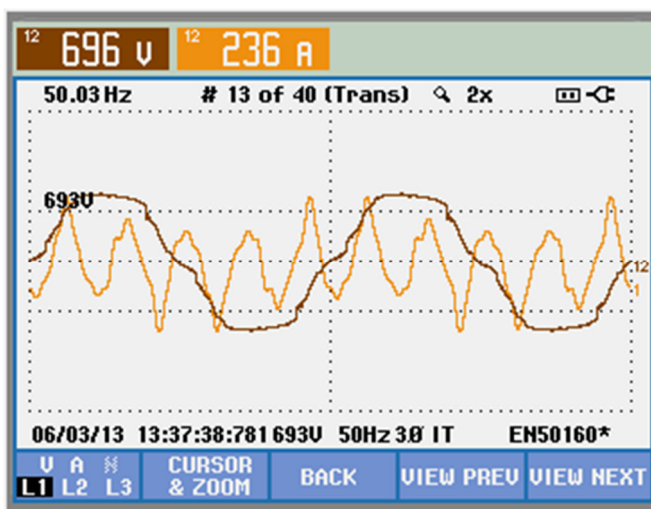
Jos hystereesikäyrän pinta-ala on suuri, tarvitaan paljon energiaa siihen, että saadaan purettua magneitoituminen ja magneitoitua kappale napaisuudeltaan toisinpäin. Olisi siis hyvä, että keloissa ja tehomuuntajissa käytettäisiin sellaista materiaalia, jonka hystereesikäyrä olisi mahdollisimman kapea, jolloin rautasydämen häviöt jäisivät mahdollisimman pieniksi.

Kun Talvivaaran estokelapariston kytkee verkkoon, jossa on suuri 5. yliaaltopitoisuus, tapahtuu joskus kuvion 20 mukainen tilanne, jolloin virta nousee niin korkeaksi, että induktanssi alkaa laskea. Tällöin 5. yliaaltovirta alkaa nousta paristossa. Virran kasvu ruokkii entisestään tilannetta, sillä kun virta nousee, induktanssi ja 5. yliaallon impedanssi laskevat. 5. yliaaltovirta pääsee nostamaan virtaa entisestään kun päästään lähemmäs ja lähemmäs 5. yliaallon resonanssitilannetta. Virran nousu lakkaa tilanteeseen, jossa lähes koko pariston virta on 5. yliaaltovirtaa. Tätä tilannetta esittää kuvio 22.



KUVIO 22. Estokelaportaan epäonnistunut käynnistys.

Estokelaportaan nimellisvirta on 42 A, jolloin huippuvirta on noin 60 A. Epäonnistuneen käynnistykseen aikana huippuvirta on jopa 639 A. Virta on yli kymmenkertainen nimelliseen virtaan verrattuna. Epäonnistuneen käynnistykseen virran ja jännitteen pysyvän tilan aaltomuodot ja tehollisarvot näkyvät kuviossa 23.

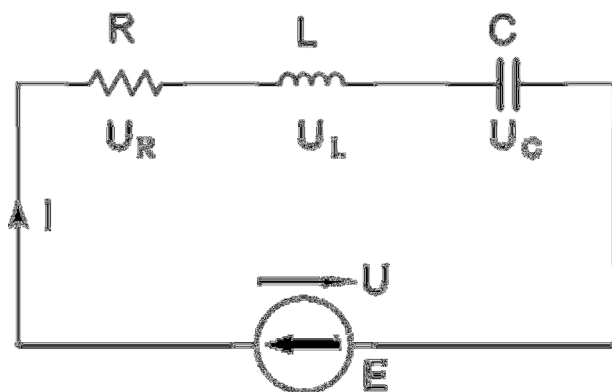


KUVIO 23. Epäonnistuneen käynnistykseen pysyvän tilan aaltomuodot ja tehollisarvot

Kuviosta nähdään, että virran aaltomuoto koostuu suurelta osin 5. yliaallosta. Virran tehollisarvo on jatkuvassa tilassa hyvin tasaisesti 236 A. Virran tehollisarvo on siis melkein 6 kertainen nimelliseen verrattuna. Käynnistysvirta on siis niin suuri, että portaan kela ja kondensaattori ajautuvat resonanssiin 250 Hz:n taajuudelle.

9.3 Käynnistysvirran matemaattinen tarkastelu

Kyseessä on kuvion 24 mukainen kytkentä.



KUVA 24. Kompensointiportaan yksivaiheinen sijaiskytkentä.

Portaan käynnistysvirtasäys riippuu käynnistysajankohdasta ja siinä esiintyvistä jänniteaskeleista. Kun otetaan tarkasteltavaksi tarpeeksi lyhyt ajanjakso, voidaan ajatella että portas käynnistetään tasajännitelähteellä. Käynnistysvirran ratkaiseminen tehdään toisen kertaluvun homogeenisen differentiaaliyhtälön avulla. Differentiaaliyhtälö muodostetaan lausumalla virtapiirin jänniteyhtälö virran avulla. Jänniteyhtälö on seuraavanlainen:

$$E = u_L + u_R + u_C = L \frac{di}{dt} + Ri_t + \frac{1}{C} \int_0^t i(t) dt + U_{c0} \quad (25)$$

Poistetaan integraali derivoimalla yhtälö puolittain.

$$0 = L \frac{d^2i}{dt^2} + R \frac{di}{dt} + \frac{1}{C} i_t \quad (26)$$

Saatetaan yhtälö toisen kertaluvun homogeenisen yhtälön perusmuotoon:

$$\boxed{y'' + ay' + by = 0} \quad (27)$$

Jaetaan siis yhtälö induktanssilla L.

$$\frac{d^2i}{dt^2} + \frac{R}{L} \frac{di}{dt} + \frac{1}{LC} i(t) = 0 \quad (28)$$

Yhtälön ratkaisu on muodoltaan:

$$i(t) = \frac{E}{\omega * L} e^{-\frac{t}{\tau}} \sin(\omega t) \quad (29)$$

jossa
$$\omega = \sqrt{\frac{1}{LC} - \left(\frac{R}{2L}\right)^2}, \quad (30)$$

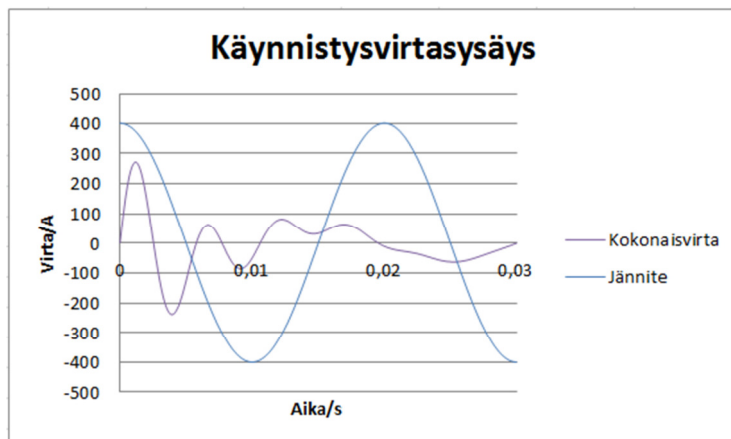
on RLC-piirin ominais kulmataajuus

$$\tau = L/(2R), \quad (31)$$

on värähtelypiirin aikavakio.

Kun käynnistetään estokelaportas jänniteen huippuarvon ($\hat{u}=975,8$ V) kohdalla niin käynnistysvirtasäys olisi jotakuinkin kuvan 25. mukainen. Varsinkin lähellä kytkentäpistettä virtakäyrä on lähellä

todellista. Kyseessä on siis pelkästään perusaallon jännite. Yliaalloilla virtahuippu nousee. Laskennassa ei ole otettu huomioon myöskään kelan induktanssin muuttumista virran suhteen.



KUVIO 25. Kompensointiportaan käynnistysvirtasysäys perusaallon huippujännitteellä.

Virran huippuarvo on 271 A eli tehollisarvo on noin 191 A. Mittauksissa onnistuneen käynnistyksen virran tehollisarvo oli noin 170 A. Käynnistysvirtaan vaikuttaa kuitenkin käynnistyshetki, yliaaltojännitteet, sekä induktanssin käynnistyksen aikainen muutos. (Silvonen, 2007)

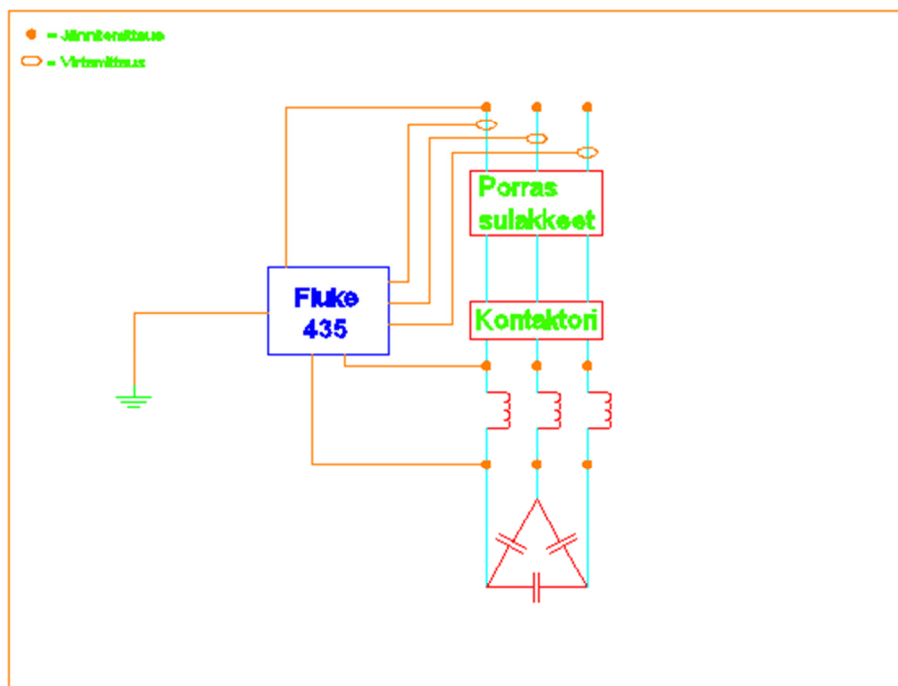
9.4 Estokelan induktanssin todellisen arvon selvittäminen analyysointilaiteilla

Todellinen induktanssiarvo selvitettiin myös analyysointilaiteilla toiminnassa olevasta pariston portaasta. Portaasta mitattiin jännitteen ja virrat komponentit portaan kelan ja kondensaattorin navoista, jotta pystyttäisiin laskemaan arvojen perusteella induktanssi ja kapasitanssi. Mitattavaksi kohteeksi valittiin estokela, joka oli ollut päällä jo useita viikkoja ja kävi normaalista. Keskuksen yliaaltopitoisuus oli suuri.

Mittaus tehtiin seuraavasti:

1. Analyysointilaite virtapihdit asennettiin portaan 1 vaiheisiin L1, L2 ja L3.
2. Jännitemittapääät asennettiin portaan 1 vaiheeseen L1 siten että mittaus L1 mittaa kelan syötön jännitettä, mittaus L2 mittaa kondensaattorin napajännitettä ja mittaus L3 mittaa pariston syötön L1 jännitettä.
3. Analyysointilaiteilla otettiin kuvat talteen jännitteistä ja virroista.
4. Jännitemittauksien tiedot siirrettiin vastaavalla tavalla vaiheeseen L2 ja otettiin kuvat talteen.
5. Jännitemittaus siirrettiin vastaavalla tavalla vaiheeseen L3 ja otettiin kuvat talteen.
6. Sen jälkeen tehtiin vastaavanlaiset mittaukset estokelan lopuille portaille 2-6 varmuuden vuoksi.

Mittauksella haluttiin saada selville kelan napajännite, virta, sekä virran ja jännitteen vaihe-erot, joista pystyttiin laskemaan kelan induktiivinen reaktanssi ja sitä kautta induktanssi. Mittauskytkentä portaan yhden vaiheen mittauksessa on kuvan 26. mukainen.

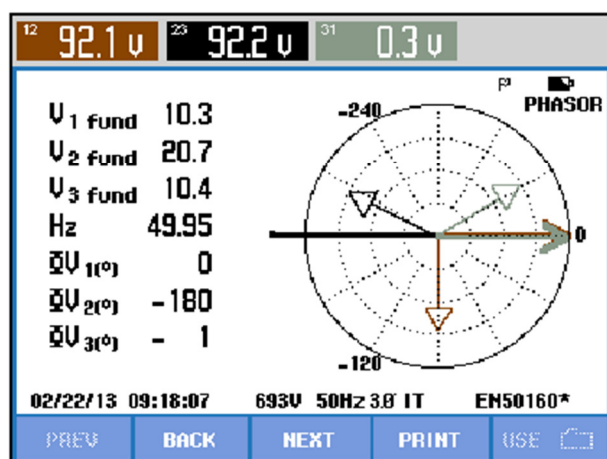


KUVA 26. Portaan yhden vaiheen mittauskytkentä induktanssin selvittämiseksi.

Mittauksessa saamani perusaallon mitaussuureet ovat seuraavanlaiset:

- Portaan 1 kelan syötön jännite vaiheessa L1. $\underline{U}_{L\text{syöt-L1}} = 10,3 \angle 0^\circ \text{V}$
- Portaan 1 kelan lähdön jännite vaiheessa L1. $\underline{U}_{L\text{läht-L1}} = 20,7 \angle 180^\circ \text{V}$
- Portaan 1 vaiheen L1 virta. $\underline{I}_{P1-L1} = 44 \angle -152^\circ \text{V}$

Portaan 1. Vaiheen L1 jännitteet ovat kuvan 27. mukaiset.

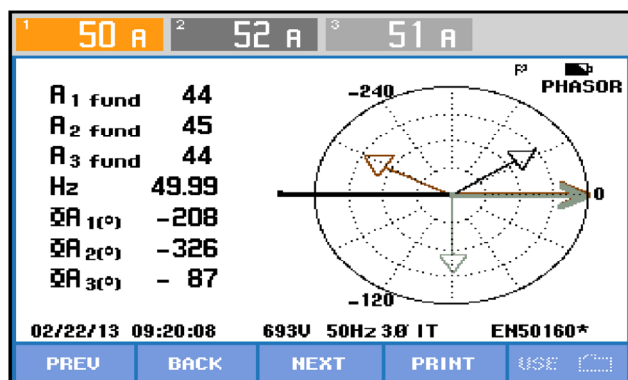


KUVA 27. Portaan 1 mittausarvot vaiheesta L1.

Kelan yli vaikuttava jännite saadaan laskettua kaavalla 32.

$$\vec{U}_L = \vec{U}_{L\text{lähtö}} - \vec{U}_{L\text{syöttö}} = 20,7 \angle 180^\circ \text{V} - 10,3 \angle 0^\circ \text{V} = 31 \angle 180^\circ \text{V} \quad (32)$$

Kelan läpi kulkeva virta nähdään kuvasta 28.



KUVA 28. Portaani 1 läpi kulkevat virrat.

Kelan impedanssi saadaan laskettua kaavalla 33.

$$\vec{Z}_{L1} = \frac{\vec{U}_{L1}}{\vec{I}_{L1}} = \frac{31 \angle 180^\circ \text{V}}{44 \angle -154^\circ \text{A}} = 0,704 \angle -26^\circ \Omega \quad (33)$$

Perusaallon tehollisarvot ovat vain lisänä taulukossa. Kelan impedanssista voidaan laskea kelan induktanssi kaavalla 34.

$$L = \frac{X_L}{\omega} = \frac{X_L}{2\pi f} = \frac{0,704 \Omega}{2\pi \cdot 50 \text{Hz}} = 2,243 \text{mH} \quad (34)$$

Kelan induktanssi arvokilvessä on 2,281mH joka on lähes sama kuin mittausten ja laskennan avulla saatu arvo. Kyseisen estokelan virta on nimellisvirtaa suurempi, sillä keskuksessa on hyvin paljon yliaaltoa jotka nostavat pariston virtaa. On mahdollista, että induktanssiarvo 2,281 mH saavutetaan juuri nimellisvirralla ja mittauksissa saatu hieman pienempi arvo johtuu induktanssin laskusta virran kasvun seurauksena. Jos näin on, niin kelan rautasydän on mitoitettu aivan liian tarkasti kyllästysrajalle. Asiaa ei pystytty testaamaan, sillä portaani virtaa on hyvin hankala säätää käyttötilanteessa.

10 ESTOKELAPARISTOJEN KÄYTTÖÖNOTTO NYKYISELLÄ LAITTEISTOLLA

Estokelapariston käyttöönotossa tulee usein ongelmia kun keskuksen 5. yliaaltojännite on suuri. Tällöin käynnistysvirtasäys nousee liian voimakkaaksi ja kelan induktanssi ajautuu tilaan jossa porras on resonanssissa 250 Hz:n yliaalloille. Käynnistykseen vaikuttaa voimakkaasti myös kytkennän ajan kohta. Kytkentä kannattaisi tehdä joka vaiheelle jännitteen nolлахetkellä jolloin kytkentäilmiö saadaan mahdollisimman pieneksi. Näin toimii tyristorikytkin.

Kyseisen tilanteen pystyy kuitenkin estämään useimmissa kohteissa sopivalla pariston ajotavalla ilman laitteistomuutoksia. Pahin tilanne on silloin, kun paristo kytkee verkkoon ensimmäisen portaan, jolloin verkon 5. yliaaltoa ei suodateta vielä ollenkaan. Lisäksi ongelmaa pahentaa se, jos säätimen tavoite $\cos\phi$ arvo on säädetty alhaiseksi jolloin ensimmäinen porras kytketään vasta siinä vaiheessa kun keskuksen loistehontarve on suuri. Tällöin myös 5. yliaaltojännite on suuri. Olisi siis hyvä että tällaiset tilanteet voitaisiin estää.

Kompensointiportaot suodattavat yliaaltoja jonkin verran (5. yliaaltoa 10-25 A/portas). Lähellä pariston viritystaajuutta olevia yliaaltoja portaot suodattavat parhaiten. Ratkaisuna käynnistysvirtasäyksen voi siis käyttää esimerkiksi yhden tai muutaman portaan suuruista kiinteää kompensointia eli ohjataan loistehonsäätimellä sopivasti kiinteitä portaita päälle. Sopiva kiinteiden portaiden määrä olisi sellainen, että 5. yliaaltojännite saataisiin laskettua alle 30V.

Rajoittavana tekijänä tässä tulee keskuksen pienin jatkuva loisteho. Kiinteitä portaita ei kannata kytkeä verkkoon enempää kuin on jatkuvaa loistehon tarvetta. Paristo ei siis saisi koskaan tuottaa enempää loistehoa kuin kuormat tarvitsevat. Ja koska keskuksien kuormat ovat suurelta osin taajuusmuuttajakuormia, ei ne paljon perustaaajuista loistehoa vaadikaan. Tilanteen korjaaminen kiinteillä portaila ei kuitenkaan aina onnistu. Viides yliaaltojännite on joskus niin suuri, ettei verkkoon voida kytkeä tarpeeksi kompensointiportaita jännitesärön laskemiseksi sopivalle tasolle. Tämä johtuu myös siitä, ettei estokelaportas vaikuta 5. yliaaltojännitteeseen tarpeeksi tehokkaasti, sillä impedenssi 250 Hz:n taajuudella on liian suuri kyseiseen tarkoitukseen.

Toinen ongelma tulee kohteissa, joissa keskuksen kuormitus vaihtelee suuresti ja kuorma käy välillä lähes nollassa. Tällöin ei kiinteitä portaita yleensä pysty käyttämään. Siinä tapauksessa kuitenkin on mahdollista käyttää kiinteitä portaita, jos kuorma putoaa kerralla $< 2,5\%$ virtamuuntajan nimellisvirrasta, sillä tällöin loistehonsäädin irroitaa kiinteätkin portaot verkosta. Virtamuuntajan nimellisvirta on usein 4000A eli $2,5\%$ on tällöin 100A.

Sopiva kiinteän kompensoinnin taso saadaan tietoon analysaattorilla tehtävällä tiedonkeruunmittauksella, jolla nähdään keskuksen kuormitusvaihtelut ja niiden jaksollisuus. Jaksollisuudella tarkoitetaan sitä, että keskuksen teho vaihtelee samalla tavalla esimerkiksi vuorokaudesta toiseen.

Jos kuormitus on keskuksessa jaksollista, nähdään mittaustiedoista helposti loistehon pohjakuorma jota alempana loisteho ei milloinkaan käy. Tämän pohjakuorman mukaan kiinteät portaot asetetaan.

Jos pohjakuormaa on niin paljon, ettei jännitesäröä saada laskemaan tarpeeksi alas, voidaan pariston loput portaat asettaa loistehonsäätimeen automaattiohjaukselle, jolloin säädin kytkee lisää portaita verkkoon kun loistehon tarve nousee.

Tällaisessa tilanteessa on otettava huomioon se että loistehonsäätimessä on tietynmittainen kytkentäviive, jonka jälkeen se tekee kytkennän muutoksen. Jos kuorma nousee keskuksessa liian nopeasti, on mahdollista että jännitesärö nousee liian korkeaksi ja sulakepalon vaara on taas mahdollinen. Sen vuoksi olisikin hyvä, että loistehon pohjakuorma olisi niin suuri, että 5. yliaaltojännitteeseen saadaan tarpeeksi varaa nopeiden kuormituspiikkien varalta.

Kompensointiportailla on kohtuullinen suodatusvaikutus keskuksen jännite- ja virtasäröön. Seuraavassa esimerkissä kerrotaan kuinka mitatussa keskuksessa 12P kompensoinnin kytkeminen vaikutti jännite- ja virtasäröön.

Taulukossa 2. näkyy, kuinka estokelaparistolla kompensointi vaikuttaa yliaaltojännitteisiin ja -virtoihin.

TAULUKKO 2. Kompensoinnin vaikutus keskuksen yliaaltoihin.

Kompensoinnin vaikutus särökertoimeen									
	Ilman kompensointia						Kompensoinnilla 300kVar		Vaikutus
Maksimi loisteho	1,75	Mvar				1,35	Mvar		-23 %
Minimi loisteho	272,2	kVar				-60	kVar		-122 %
Jännitesärökerroin	12,30	%	85	V		9,60	%	67	V -21 %
5. yliaaltojännite	10,80	%	75	V		8,40	%	59	V -21 %
7. yliaaltojännite	5,40	%	37	V		3,80	%	26	V -30 %
Virtasärökerroin	20,40	%	336	A		13,60	%	204	A -39 %
5. yliaaltovirta	19,30	%	313	A		11,80	%	185	A -41 %
7. yliaaltovirta	5,60	%	90	A		5,30	%	75	A -17 %

10.1 Estokelan toiminta uusien kontaktorien avulla

Paljon tehokkaampi tapa korjata sulakepalot on asentaa kompensointiparistoihin vaimennusvastuksilla varustetut kytkentäkontaktorit. Näin ei tarvitse tietää tehojen käyttäytymistä, eikä miettiä yli-kompensoinnin mahdollisuutta.

Vaimennusvastuksilla varustettuja kontaktoreja asennettiin 6 kpl tehdasalueen 5. yliaallon kannalta vaikeimpaan kohteeseen. Kontaktorit asennettiin siten että kyseisen keskuksen toinen kompensointikaappi varustettiin uusilla kontaktoreilla ja toinen kaappi säilyi ennellaan. Tämä siksi koska 12 uutta kontaktoria eivät tulleet kerralla, vaan ensin tuli 6 kappaletta. Kontaktoreja tilattiin kokeeksi 12 kpl kahta eri merkkiä. Toiset olivat merkiltään ABB UA50-30-00RA-80 ja toiset Siemens 3RT16.

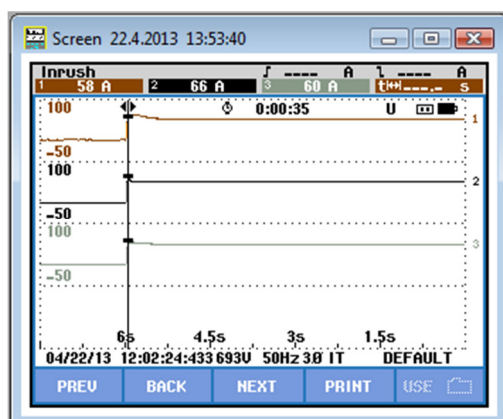
Kytkentää testattiin siten, että ajettiin kompensointi ensin kokonaan alas, minkä jälkeen uudet Siemensin kontaktorit (kuvasa 29) asennettiin toiseen kaappiin jonka jälkeen kokeiltiin yhtä porrasta kerrallaan. Tämä tilanne on testauksen kannalta paras, sillä tällöin 5. yliaaltopitoisuus on suurin, jolloin kytkentätilanne on vaikein. Normaalisti kontaktorilla kytkettäessä käynnistysvirtapiikki on onnistuneessa käynnistyksessä noin 170 A. Uuden kontaktorin kytkentävirtasäys näkyy kuvassa 30.



KUVA 29. Siemensin vaimennusvastuksilla varustettu kontaktori

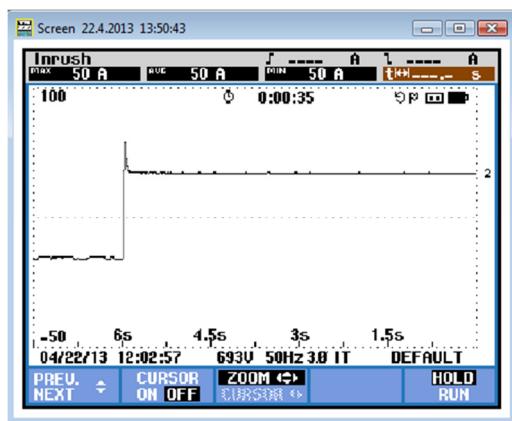
10.2 Käynnistysvirtamittaus uusilla kontaktoreilla

Käynnistysvirtamittaus tehtiin analysaattorin Inrush-toiminnolla, jolloin eron näkee kaikista selkeimmin, koska käyrä on selväpiirteinen.



KUVIO 30. Käynnistys vaimennusvastuksilla varustetulla kontaktorilla

Käynnistysvirta on korkein vaiheessa L2, jossa virta on 66 A. Käynnistysvirta laskee siis melkein kolmasosaan. Käynnistys tapahtuu pehmeästi eikä resonoinnista ole tietoaakaan. Kuvassa 31 näkyy käynnistysvirtapiikin muoto.



KUVIO 31. Käynnistysvirtasäyksen muoto vaimennusvastuksilla varustetulla kontaktorilla

Tällä kontaktorityypillä käynnistysvirta rajoittuu erittäin tehokkaasti vaikeassakin kohteessa. Tässä kyseisessä kohteessa kontaktorin lisäksi tarvitaan yliaaltosuodatin, sillä portaiden virrat ovat hieman liian korkeat yliaaltojen vuoksi. Portaat on mitoitettu kokonaisvirralle 48,9 A ja portaassa kulkee yleensä hieman yli 50 A. Uusien kontaktorien asennuksen jälkeen portaat voidaan asettaa automaattiohjaukselle. Kun ohjaustavaksi valitaan kiertosäntö, ei yksi porras rasitu enemmän kuin muut, mikäli keskuksen kuorma vaihtelee sen verran, että portaiden ohjauksia tulee tasaisesti. Toisessa kaapissa on vielä muutama porras kiinteästi käytössä, jotta paristoissa riittää kapasiteetti tehokkaaseen kompensointiin.

11 YHTEENVETO

Kompensointi on tärkeä osa teollisuuden sähköverkon laitteistoa, vaikka se ei suoranaisesti vaikutaan tuotantoon, eikä muiden laitteiden toimintaan. Kompensointilaitteisto pikemminkin tukee sähköverkkoa kestämaan todellisen kuormituksen aiheuttamat rasitukset.

Sähkönlaatu kosrostuu nykypäivänä entistä enemmän suurissa teollisuuslaitoksissa. Nykyaikainen moottoreiden ohjaustekniikka tuo paljon sähkönlaatuun vaikuttavia sivuvaikutuksia, kuten jännitteen aaltomuodon muutoksia.

Työn tavoitteena oli löytää syy kompensointilaitteiden sulakepaloihin ja saada aikaan ratkaisu, jolla sulakepalot saadaan estettyä. Lisäksi sähkönlaatu haluttiin saada selville eri osissa sähköverkkoa. Kompensoinnin sulakepalojen syyksi löytyi 5. yliaallosta johtuva käynnistysvirran kasvu, joka sai sulakkeet palamaan. Ratkaisu käynnistysvirran pienentämiseksi on vaimennusvastuksilla varustetut kontaktori, joilla kompensointiportaat saadaan käynnistymään pehmeästi. Sähkönlaatu on korkealaa-
tuista muuten, mutta 5. yliaaltopitoisuus on monessa pisteessä liian korkea. Yliaaltoja olisi tarve suodattaa yliaaltosuodattimilla siellä, missä ne syntyvät, jotta ne eivät pääse leviämään muualle verkkoon.

Kompensoinnin vian löytyminen oli erittäin tärkeää Talvivaaran kaivokselle, sillä kompensoinnin puuttuessa noin suuressa tehtaassa voi seurauksena olla suuret loistehomaksut verkkoyhtiölle. Sulakepalojen suuri määrä aiheuttaa turhaan tuntuvaan kustannuksen.

Työssä löydettiin suhteellisen helppo ratkaisu sulakepalojen ehkäisyyn. Ratkaisu on vaimennusvastuksilla varustetut kontaktorit. Lisäksi tarvitaan yliaaltosuodattimia joihinkin keskuksiin, joissa jännitesärö jää korkeaksi. Näillä ratkaisuilla saadaan korjattua kompensointi sekä parannettua sähkönlaatu standardilaatuiseksi.

Työ antoi hyvän esimerkin siitä, kuinka merkittäviä laitteiden kytkentäilmiöt voivat olla toiminnan kannalta ja kuinka sähköverkon sähkönlaatu vaikuttaa kytkentäilmiöihin. On siis erittäin tärkeää tietää järjestelmää suunniteltaessa, millaiseen sähköverkkoon laitteet asennetaan. On tärkeää selvittää myös sähköverkon laitekannan tulevaisuuden kehitystä, sillä verkkoon myöhemmin tulevat laitteet, kuten taajuusmuuttajat, voivat oleellisesti rasittaa muiden laitteiden toimintaa.

LÄHTEET

- Laajalehto, K. ja Suvanto, K. 2005. *Tekniikan fysiikka 2*. Helsinki : EDITA, 2005.
- Lakervi, E. ja Partanen, J. 2009. *Sähkönjakelutekniikka*. Helsinki : Gaudeamus Helsinki University Press, 2009
- Mäkelä, M., Soininen, L., Tuomola, S., Öistämö, J. 2008. *Tekniikan Kaavasto*. Hämeenlinna : Tammertekniikka, 2008.
- Männistö, M. 2006. *Yliaallot ja kompensointi*. Espoo : Sähkö- ja teleurakoitsijaliitto STUL ry.
- Nokian Capacitors. 2007. *Estokelapariston käyttöohje* . Tampere.
- Silvonen, Kimmo. 2007. *Sähkötekniikka ja Elektroniikka*. Helsinki : Otatieto, 2007.
- Sähköinfo Oy 2010. *SFS 6002 Käytännössä*. Espoo : Sähkö- ja teleurakointiliitto STUL ry, 2010.
- Valtanen, E. 2010. *Tekniikan Taulukkokirja*. Mikkeli : Genesis-Kirjat Oy.
- Viitala, Jaakko. ST-kortti 52.50. Jyväskylä

LIITTEET

LIITE 1

Valitsemani mittaussuureet sähkölaatumittauksiin Logger –toiminnolla.

Logger -toiminnon mittaussuureet	
Tunnus	Suure
Vrms	Jännitteen tehollisarvo
Vfund	Perusaallon jännite
Vpk	Jännitteen huippuarvo
V1/2 cycle	Puolen jakson jännitteen tehollisarvo
CF(V)	Jännitteen huippukerroin
Unbal Vn%	Jännitteen epäsymmetriaprocentti
Unbal Vpos	Jännitteen myötäkomponentin arvo
Unbal Vneg	Jännitteen vastakomponentin arvo
Uh1-15	Jännitteen harmoniset yliaallot 1.-15.
V(*)h5., 7., 11. ja 13.	Jännitteen harmonisen yliaallon vaihekulma harmonisille 5., 7.,11. ja 13.
Arms	Virran tehollisarvo
Afund	Perusaallon virta
Apk	Virran huippuarvo
A1/2 cycle	Puolen jakson virran tehollisarvo
CF(A)	Virran huippukerroin
Unbal An%	Virran epäsymmetriaprocentti
Unbal Apos	Virran myötäkomponentin arvo
Unbal Aneg	Virran vastakomponentin arvo
Ah1-15	Virran harmoniset yliaallot 1.-15.
A(*)h5., 7., 11. ja 13.	Virran harmonisen yliaallon vaihekulma harmonisille 5., 7.,11. ja 13.
K-factor A	Virran K-arvo
f	Taajuus
W	Pätöteho
VA	Näennäisteho
Var	Loisteho
PF	Kokonaistehokerroin
DPF	Perusaallon tehokerroin (Cosφ)
Pst	Pitkäaikainen häiritsevyyssindeksi
Pit	Lyhytaikainen häiritsevyyssindeksi
Wh5..7..11	Tehon 5. ja 7. yliaalto
THD(W)	Tehon särökerroin
K-factor W	Tehon K-arvo