

Eero Paavilainen

KUPARIVALIMON VALU-UUNIN LOISTEHON KOMPENSOINTI
ERI VIRTALÄHDEKÄYTÖSSÄ

Sähkötekniikan koulutusohjelma
2016

KUPARIVALIMON VALU-UUNIN LOISTEHON KOMPENSOINTI ERI VIRTALÄHDEKÄYTÖSSÄ

Paavilainen, Eero
Satakunnan ammattikorkeakoulu
Sähkötekniikan koulutusohjelma
Huhtikuu 2016
Ohjaaja: Nieminen, Esko
Sivumäärä: 56
Liitteitä: 4

Asiasanat: sähköteho, loistehon kompensointi, induktiokuumennus, induktiouuni, kaksikouruinduktiouuni

TIIVISTELMÄ

Tämän insinöörityön tavoitteena oli analysoida Aurubis Finland Oy:n kuparivalimon valu-uunin eli kaksikouruinduktiouunin kulumista ja kulumisen vaikutuksia uunin sijaiskytkentään sekä laskea siihen liittyviä kompensointilaskuja kahdessa eri virtalähdekäytössä. Valu-uunin kuluminen muuttaa sen sähköisiä arvoja ja näin pienentää uunista saatavilla olevaa tehoa.

Opinnäytetyön tietoperustassa perehdyttiin aluksi sähkötekniikan eri käsitteisiin ja teoriaan, kuten sähkötehoon, loistehon kompensointiin, kompensointilaitteisiin, induktiokuumennukseen, induktiouuneihin sekä valimotekniikkaan. Tietoperustan jälkeen käytiin läpi toimeksiantajan toimintaympäristö ja laitteisto. Lopuksi analysoitiin uunin kulumista sekä kompensointia molemmissa sähkökäytöissä ja annettiin kehitysehdotukset laskelmineen molempiin tapauksiin.

Opinnäytetyö onnistui hyvin. Kehittämistehtävää pystyttiin analysoimaan kokonaisvaltaisesti ja kaikki annetut tavoitteet saavutettiin. Opinnäytetyön kehitysehdotuksia ja tuloksia tullaan hyödyntämään toimeksiantajalla sekä niiden perusteella tehdään muutoksia järjestelmiin. Kehitysehdotuksissa suunniteltiin ja laskettiin valu-uunin kulumisen mukaan säädettävä kompensointi molempiin sähkökäyttöihin. Pääsähkökäyttönä normaalituotannossa käytettävälle IGBT-muuttajalle suunniteltiin kolmiportainen lisäkompensointi ja sen häiriötilanteiden varalta olevalle varamuuntajakäytölle neliportainen kompensointi. Tuloksissa ilmeni, että IGBT-muuttajakäytössä virtakiskokosto ei kestä lisäkompensoinnin tuomaa lisävirtaa, joten tuloksissa ehdotettiin kompensointiportaiden lisäksi vahvistuksia virtakiskostoihin. Varamuuntajakäytössä kompensointi suunniteltiin niin, että uuni- ja kompensointipiiri on aina parhaimmassa mahdollisessa tehokertoimessa olemassa olevilla kahdeksalla kondensaattoriparistolla. Tämän lisäksi ehdotettiin parannuksia varamuuntajakäyttöön muun muassa sähköturvalisuuden, mittaroinnin, sähkönlaadun ja käyttövarmuuden osalta.

COMPENSATION OF HOLDING FURNACE'S REACTIVE POWER IN DIFFERENT POWER SUPPLY USAGE IN COPPER FOUNDRY

Paavilainen, Eero
Satakunta University of Applied Sciences
Degree Programme in Electrical Engineering
April 2016
Supervisor: Nieminen, Esko
Number of pages: 56
Appendices: 4

Keywords: electric power, reactive power compensation, induction heating, induction furnace, 2-channel induction furnace

ABSTRACT

The purpose of this thesis was to analyse the wearing of holding furnace, i.e., 2-channel induction furnace and the wearing effects on the furnace's equivalent circuit and to make compensation calculations in two different power supply cases in Aurubis Finland Oy's copper foundry. The wearing of holding furnace changes its electrical values and thus reduces the available power from the furnace.

First different electrical engineering concepts, including electric power, compensation of reactive power, compensation equipment, induction heating, induction furnaces and foundry engineering were studied. After the inspection of these basic concepts, the client's operational environment and equipment were observed. Finally, the furnace's wearing and compensation on both power supply usages were analysed, alongside with end results with suggestions for both cases.

The thesis succeeded well. The target of development could be analysed comprehensively and all the set goals were achieved. The end results included compensation design and calculus for both holding furnace's power supply usages; the IGBT-converter main usage and the backup emergency operation transformer. The IGBT-converter usage included additional 3-step compensation design. However, the main bus bar turned out to be insufficient for additional current that the additional compensation presents in IGBT-converter usage. Thus, the end results had beside the design, a suggestion for bus bar strengthening. The end results for the direct-drive emergency operation transformer included 4-step compensation design for best possible power factor available in the use of existing 8-capacitor batteries. In addition to this, suggestions were made to improve electrical safety, measuring capability and operating reliability.

SISÄLLYS

1	JOHDANTO.....	6
2	OPINNÄYTETYÖN MÄÄRITTELY	7
2.1	Toimeksiantajan esittely	7
2.2	Kehittämistehtävän tarkempi kuvaus	7
2.3	Tavoitteet ja rajaus	9
2.4	Teoreettiset sekä muut lähtökohdat	9
3	SÄHKÖTEKNIIKAN PERUSKÄSITTEITÄ	10
3.1	Johdanto	10
3.2	Sähköstatiikka	10
3.2.1	Kapasitanssi ja kondensaattori	10
3.2.2	Kapasitiivinen reaktanssi	12
3.3	Sähkömagneettinen induktio.....	13
3.3.1	Itseinduktio ja kela	14
3.3.2	Keskinäisinduktio ja muuntaja	15
3.3.3	Induktiivinen reaktanssi.....	17
3.4	Yhteenveto	18
4	SÄHKÖTEHO TASA- JA VAIHTOSÄHKÖPIIREISSÄ.....	19
4.1	Sähköteho tasasähköpiirissä.....	19
4.2	Sähköteho vaihtosähköpiirissä.....	19
4.2.1	Pätöteho	20
4.2.2	Loisteho	21
4.2.3	Näennäisteho	21
5	LOISTEHON KOMPENSOINTI.....	22
5.1	Yleistä loistehon kompensoinnin tarpeesta.....	22
5.2	Kompensoinnin laskenta ja mitoitus.....	22
5.3	Kompensoinnin laiteratkaisut	25
5.3.1	Kondensaattoriparistot.....	25
5.3.2	Estokelaparistot	27
5.3.3	Yliaaltosuodattimet.....	28
5.3.4	Reaktori ja kuristin	28
5.3.5	Aktiiviset laiteratkaisut.....	29
5.4	Kompensoinnin suunnittelu sekä huomioon otettavat asiat.....	30
6	INDUKTIOUUNIT	31
6.1	Induktiokuumennuksen toimintaperiaate.....	31
6.2	Induktiokuumennuksen sovellukset.....	34
6.3	Induktiouunit metalliteollisuudessa	34

6.3.1	Kouruinduktiouunit	35
6.3.2	Induktioupokasuunit	38
7	AURUBIS FINLAND OY:N KUPARIVALIMO	39
7.1	Yleistä valimotekniikasta	39
7.2	Kuparivalimo	40
7.3	Valutekniikka	41
8	KUPARIVALIMON VALU-UUNI SEKÄ VIRTALÄHTEET	42
8.1	Valu-uuni	42
8.2	Käytettävät virtalähteet	43
8.2.1	IGBT-Muuttaja	44
8.2.2	Varamuuntaja	45
9	KEHITTÄMISTEHTÄVÄN ANALYSOINTI	46
9.1	Valu-uunin kuluminen	46
9.2	Kompensointi IGBT-muuttajakäytössä	47
9.3	Kompensointi varamuuntajakäytössä	48
10	KEHITYSEHDOTUKSET JA TULOKSET	49
10.1	Kaksikouruinduktiouunin nimellisarvolaskelmat	49
10.2	Kehitysehdotus kompensointiin IGBT-muuttajakäytössä	49
10.2.1	Tulokset	50
10.2.2	Johtopäätökset	50
10.3	Kehitysehdotus kompensointiin varamuuntajakäytössä	51
10.3.1	Tulokset	52
10.3.2	Johtopäätökset	52
11	POHDINTA JA YHTEENVETO	54
	LÄHTEET	56
	LIITTEET	

1 JOHDANTO

Tämän opinnäytetyön toimeksiantaja on Aurubis Finland Oy, joka on Porissa sijaitseva kuparin valmistukseen keskittyvä yritys. Suoritin yrityksessä tutkintoon kuuluvaa työharjoittelua sähköautomaation kunnossapitotehtävissä, minkä kautta päädyin tekemään opinnäytetyöni heille.

Opinnäytetyön tarkoituksena on pyrkiä parantamaan Aurubis Finland Oy:n kuparivalimon valu-uunin eli kaksikouruinduktiouunin aiheuttamaa loisteho-ongelmaa eri virtalähdekäytössä. Kouruinduktiouunia käytetään sulan kuparin lämpötilan tarkempaan säätelyyn sekä itse valamiseen. Kouruinduktiouunin kanava kuitenkin kuluu, kun uunia käytetään valamiseen, ja kourun kulumisen vaikutus sen sähköiseen sijaiskytkentään. Sähköisten ominaisuuksien muuttumisen myötä valu-uunin tuotannon aikaisena virtalähteenä toimiva IGBT-muuttaja ei pysty aina vakiokompensoinnilla syöttämään täyttä tehoa uunille. Myöskään normaalin sähkökäytön häiriötilanteiden varalle olevan varamuuntajan riittävyttä ei tiedetä, eikä sitä, miten induktiouunin kulumisen vaikutus varamuuntajan riittävyteen.

Tämän opinnäytetyön tarkoituksena on analysoida valu-uunin kulumista ja selvittää mahdollisuutta säätää kompensointia valu-uunin kulumisen mukaisesti molemmissa sähkökäytöissä. Tarkoituksena on myös selvittää varamuuntajan riittävyttä mahdollisessa IGBT-muuttajan häiriötilanteessa sekä virtakiskoston kestävyyttä mahdollisessa lisäkompensoinnissa. Näiden tavoitteiden saavuttamiseksi tarkoituksena on ymmärtää sähkötekniikan eri käsitteitä, kuten sähkötehoa, loistehon kompensointia, induktiokuumennusta ja induktiouunien toimintaperiaatetta sekä valimotekniikkaa.

Selvitettyjen tietojen pohjalta tehdään kirjalliset johtopäätökset nykyisten järjestelmien riittävydestä ja muutostarpeesta, joiden perusteella Aurubis Finland Oy päättää omista jatkotoimenpiteistä.

2 OPINNÄYTETYÖN MÄÄRITTELY

2.1 Toimeksiantajan esittely

Aurubis Finland Oy on Porin kupariteollisuuspuiston alueella sijaitseva yhtiö, jossa sen tuotantoyksiköt kuparivalimo ja valssaamo sijaitsevat. Aurubiksella työskentelee noin 200 henkilöä, ja sen päätuote on valssatut kuparituotteet. Sen pääasialliset asiakkaat ovat sähkö- ja rakennusteollisuus. Yhtiön tuotteista 90 % menee vientiin. Aurubis Finland Oy:n liikevaihto vuonna 2014 oli 246 milj. euroa. (Aurubis Finland Oy:n kotisivut 2016; Talouselämän kotisivut 2016.)

Aurubis Finland Oy kuuluu monikansalliseen Aurubis AG konserniin, joka on johtava integroitu kuparintuottaja ja maailman suurin kuparin kierrätykseen keskittynyt saksalainen pörssi-yhtiö. Yhtiö valmistaa vuositasolla noin miljoona tonnia kuparikatodia ja erilaisia kuparituotteita. Konserni työllistää noin 6300 työntekijää 16 tuotantotoimipaikalla, 11 eri maassa Euroopassa, Aasiassa sekä Pohjois-Amerikassa. (Aurubis Finland Oy:n kotisivut 2016.)

2.2 Kehittämistehtävän tarkempi kuvaus

Opinnäytetyön tarkoituksena on pyrkiä selvittämään kuparivalimon valu-uunin eli kaksikouruinduktiouunin loistehon kompensointia. Kouruinduktiouuni on toimintaperiaatteeltaan muuntaja, jonka toisiokäämissä on yksi oikosuljettu kierros. Tänä oikosuljettuna kierroksena toimii tulenkestävän massan sisään tehdyn kourun täyttämä sulametalli. Kourun muoto ja malli vaikuttavat kouruinduktiouunin sähköisiin ominaisuuksiin. Valu-uunin käyttö kuluttaa kourua ja täten sen muotoa. Kourun laajenemisen seurauksena kourun etäisyys (ilmaväli) muuntajan rautasydämeen muuttuu, mikä vaikuttaa uunin sijaiskytkennän induktanssiin sekä resistanssiin. Näiden muutosten seurauksena induktiouunin tehokerroin muuttuu käytön aikana. Induktiouunin kompensoinnissa on käytössä vakiokondensaattoriparistot, joten muutoksiin ei pystytä tällä hetkellä vastaamaan kapasitanssia muuttamalla. Muuttuneella kuormalla ei pystytä syöttämään nimellistä tehoa uunille, mikä ei kuitenkaan aiheuta tuotannon aikana normaalisti ongelmia, mutta eräiden raaka-aineiden ja valanteiden kanssa teho voi jäädä

liian pieneksi. Pienikokoinen raaka-aine, kuten kuparisilppu, vaatii enemmän tehoa pysyäkseen sulana pienen massansa vuoksi.

Ongelmasta tekevät monitahoisen valu-uunin muut vaatimukset. Kouruinduktiouunit on suunniteltu jatkuvaan käyttöön niiden toimintaperiaatteen vuoksi. Ne vaativat jatkuvan sulan toimiakseen, joten ne vaativat myös jatkuvan sähkönsyötön. Uunissa olevaa sulakuparia ei saa päästää jähmettymään paikoilleen, muutoin uunin jähmettynyt kupari jouduttaisiin piikkaamaan irti uunista, mikä johtaisi mittaviin kustannuksiin. Tämän vuoksi valu-uunissa on mahdollisuus sulan hätätyhjennykseen täydellisen sähkökatkoksen varalle. Uunin vuoraukset on kuitenkin valmistettu jatkuvaa kuumanapitoa varten, joten hätätyhjennyksen yhteydessä lämpötilan lasku pilaisi vuoraukset, joka taas johtaisi vuorausten uusimiseen.

Edellä mainitun vuoksi valu-uunilla on kaksi mahdollisuutta sähkönsyöttöön. Valu-uunin virtalähteinä toimivat normaalituotannossa käytettävä IGBT-muuttaja ja sen häiriötilanteiden varalta oleva varamuuntaja. Normaalikäytössä valu-uunin nimellistehona on 500 kW ja varakäytössä noin 100 kW.

Ylläpitoteho, jolla uuni voidaan pitää sulana, on noin 100 kW. Tässä kohtaa induktio-uunin kulumisen aiheuttama ongelma astuu mukaan. IGBT-muuttajalla tehoa voidaan säätää tarpeen mukaan, varamuuntajalla ei. Varamuuntaja on ominaisuuksiltaan 6.3kV/400V, 50 Hz oleva suorakäyttömuuntaja, jossa ei ole säätömahdollisuutta. Tämä aiheuttaa sen, että jos poikkeustilanteessa varamuuntaja joudutaan ottamaan käyttöön, uunin kulumisesta syntyvän tehovajeen vuoksi kuparia ei välttämättä pysytäkään sulana. Tämän vuoksi jouduttaisiin ennen pitkään tekemään uunin hätätyhjennys. Tällä hetkellä ei tiedetä, kuinka kauan valu-uunia pystyttäisiin pitämään varakäytössä sulana.

Ongelmat voidaan siis summata kahteen osaan: uunin kulumisesta aiheutuva tehovaje tietyissä tilanteissa normaalituotannon aikana ja mahdollisen poikkeustilanteen aikana syntyvä tehovaje, joka voi johtaa valu-uunin hätätyhjennykseen. Myöskään kiskostojen virrankestoisuutta ei tiedetä mahdollisen lisäkompensoinnin tuoman lisävirran vuoksi. Työssä selvitettyjen tulosten ja johtopäätösten ensisijaisena tarkoituksena on parantaa varamuuntajan kompensointia. IGBT-muuttajakäytössä tehon pieneminen ei aiheuta

isoja ongelmia tällä hetkellä, joten siitä saadut tulokset jätetään mahdollista myöhemmä tarvetta varten. Näitä ovat esim. käytettävän raaka-aineen tai valamisen muutokset, joissa tehon pieneminen aiheuttaa ongelmia.

2.3 Tavoitteet ja rajaus

Opinnäytetyön tavoitteena on pyrkiä parantamaan induktiuunin kulumisesta aiheutuvaa kuorman eli tehokertoimen muutosta kompensoinnilla, ja tämän tavoitteen saavuttamiseksi ymmärtää siihen liittyviä sähkötekniikan ja valimotekniikan käsitteitä.

Selvitettyjen tietojen pohjalta tullaan tekemään kirjalliset johtopäätökset nykyisten järjestelmien riittävydestä ja kompensoinnin mahdollisista muutostarpeista laskelmineen, joiden perusteella Aurubis Finland Oy päättää omista jatkotoimenpiteistä.

Opinnäytetyön aiheeseen sisältyvät sähkötekniikka ja valimotekniikka ovat aihealueiltaan niin laajoja, että työn rajaamiseksi syvennyttään vain Aurubis Finland Oy:lla oleviin laitteistoihin sekä loistehon kompensointiin. Työssä ei tarkastella sähkönlaatua ja siihen liittyviä aiheita. Työssä ei myöskään tehdä talouslaskentaa mahdollisista investoinneista tai niihin liittyviä kannattavuuslaskelmia.

2.4 Teoreettiset sekä muut lähtökohdat

Työn teoreettisina lähtökohtina käytetään järjestelmien laitevalmistajien ilmoittamia nimellisarvoja, Aurubis Finland Oy:ltä saatavia dokumentteja, mahdollisia mittauksia sekä omakohtaisia kokemuksia työskentelystä yrityksessä. Työkaluina käytetään Microsoft Word ja Excel-ohjelmistoja sekä Texas Instrumentsin Nspire CX-laskinta ja sen PC-ohjelmistoa.

Käytetyt termit ja lyhenteet on pyritty selvittämään tekstin edetessä, joten erillistä listaa näiden selittämiseen ei ole. Teoreettisen tarkastelun puolesta asiat on pyritty selvittämään sillä laajuudella, että eri käsitteitä ja syy-seuraussuhteita voidaan tarkastella tarpeeksi hyvin.

3 SÄHKÖTEKNIIKAN PERUSKÄSITTEITÄ

3.1 Johdanto

Tässä opinnäytetyössä tutkittavia asioita, kuten sähköteho ja loistehon kompensointi, sekä induktiolämmitystä ja sen eri sovelluksia ei pystytä selittämään ilman sähkötekniikan peruskäsitteitä. Huomataan, että monet sähkötekniset sovellukset nojaavatkin näihin samoihin fysiikan voimavaikutuksiin, kuten sähkömagneettisen induktion, ja ne ovat siten peruseriaatteeltaan samanlaisia. Tässä kappaleessa käydään nämä käsitteet melko pintapuolisesti läpi, mutta siten, että työssä olevia asioita voidaan käsitellä.

3.2 Sähköstatiikka

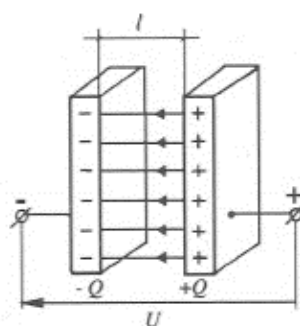
Sähköstatiikasta tiedämme seuraavan fysiikan perusilmiön: kahden sähkövarauksen välillä on vuorovaikutus. Jos sähkövaraukset ovat saman merkkiset, ne hylkivät toisistaan, ja jos ne ovat erimerkkiset, ne vetävät toisiansa puoleen. (Inkinen, Manninen & Tuohi 2011, 11.)

Ilmiön tarkastelun helpottamiseksi on luotu sähkökentän käsite. Tämän ilmiön positiivisten ja negatiivisten varausten välille osoitti ranskalainen fyysikko Coloumb vuonna 1785. Vuorovaikutus aiheuttaa eri kappaleiden välille sähköistä erottumista eli staattista sähköisyyttä. Kun eri materiaaleista koostuvat kappaleet ovat kosketuksissa toisiinsa, kulkeutuvat elektronit kappaleiden välillä niin, että kosketuskohdan elektronien energiatilat tasoittuvat. Jos kappaleet irrotetaan toisistaan, sähköinen varaus voi jäädä niiden pinnoille. Tunnettu esimerkki on ilmapallon hankaaminen villakankaalla, jonka jälkeen pallo tarttuu kiinni esimerkiksi seinään. (Inkinen ym. 2011, 11 – 16.)

3.2.1 Kapasitanssi ja kondensaattori

Sähkökentän yleisin sovellus on sähkövarausten varastointi, joka on hyvin yleistä. Komponenttia, joka varastoi lyhytaikaisesti energiaa sähkökenttäänsä, kutsutaan kon-

densaattoriksi. Kondensaattori muodostuu kahdesta toisistaan eristetystä johdinlevystä, jotka sijaitsevat etäisyydellä l toisistaan. Kun johdinlevyt kytketään jännitelähteeseen, johtuu jännitelähteestä johdinlevyjen pinnoille vastakkaismerkkiset varaukset. Tätä kutsutaan kondensaattorin varaamiseksi. Tällöin johdinlevyissä on yhtä suuret vastakkaismerkkiset varaukset. Kun kondensaattoria varataan, niin sähkökenttä muodostuu lähes kokonaan johdinlevyjen väliin kuvan 1 mukaisesti. Jos syöttävä jännite katkaistaan, purkautuu kondensaattorin sähkökenttään varautunut energia piirin resistansseihin. Tätä kutsutaan kondensaattorin purkamiseksi. Jos vaikuttava jännite sykkii, kondensaattori vuoroin varautuu ja purkaantuu. (Aura & Tonteri 1996, 25.)



Kuva 1. Kondensaattorin periaate (Aura & Tonteri 1996, 25)

Johdinlevyjen välisen kentänvoimakkuuden E perusteella saadaan johtimien välisen jännitteen U yhtälö 0.1, missä levyjen etäisyys l , eristeen permittiivisyys ϵ , levyjen pinta-ala A sekä sähkövaraus Q

$$U = El = \frac{Q}{\epsilon A} l \quad (0.1)$$

Yhtälön 0.1 perusteella saadaan kondensaattorin johdinlevyissä olevan sähkövarauksen Q :n yhtälö

$$Q = \frac{\epsilon A}{l} U = CU \quad (0.2)$$

Yhtälön 0.2 perusteella nähdään, että kondensaattorissa oleva sähkövaraus on suoraan verrannollinen siihen vaikuttavasta jännitteestä U ja sen verrannollisuuskertoimesta C . Tätä fyysistä ominaisuudesta muodostuvaa verrannollisuuskertoimta C kutsutaan kondensaattorin varautumiskyvyksi eli kapasitanssiksi. Kondensaattorin kapasitanssin yhtälöksi saadaan yhtälön 0.2 perusteella

$$C = \frac{Q}{U} \approx \frac{\epsilon A}{l} \quad (0.3)$$

Todellisessa kondensaattorissa sähkökenttä ei ole homogeeninen, ts. tasainen, joten kapasitanssi on yhtälöä 0.3 hieman suurempi. Todellisessa kondensaattorissa ilmenee myös tehohäviöitä ja vuotovirtoja. Kondensaattorin kapasitanssi ilmoittaa, kuinka suuren sähkövarauksen se varastoi per jänniteyksikkö. Kapasitanssin yksiköksi saadaan yhtälön 0.3 perusteella faradi F .

$$[C] = \frac{[Q]}{[U]} = \frac{As}{V} = F \quad (0.4)$$

Faradi on hyvin suuri yksikkö, joten todellisten kondensaattoreiden yksiköissä käytetäänkin usein millifaradi, sekä sitä pienempiä kerrannaisia. Kondensaattoria tarvitaan useissa sovelluksissa, kuten muun muassa jännitteen tasauksessa, häiriönpoistossa ja kompensoinnissa. Sähköenergian lyhytaikaisella varastoinnilla onkin tärkeä merkitys sähkötekniikassa. Kapasitanssilla on myös haitallisia ominaisuuksia, koska kondensaattori voi muodostua kaikkien johtimien välille. Esimerkiksi piirilevyssä kahden johtimen välille muodostuva kondensaattori voi hidastaa mikropiirin nopeutta. (Aura & Tonteri 1996, 13 – 25; Inkinen ym. 2011, 51 – 54.)

3.2.2 Kapasitiivinen reaktanssi

Kuvitellaan vaihtosähköpiirissä olevan ideaalinen kondensaattori, jossa ei ole vuotovirtaa eikä tehohäviöitä. Tämän piirin sisältää vain puhdasta kapasitanssia. Kun hetkellinen sinimuotoinen jännite

$$u = \hat{u} \sin(\omega t) = \hat{u} \sin(\alpha) \quad (0.5)$$

vaikuttaa kondensaattorin kapasitanssiin C , muodostuu yhtälön 0.2 perusteella kondensaattorin sähkökenttään hetkellinen varaus $q = Cu$, josta saadaan hetkellisen sähkövarauksen yhtälö

$$q = C\hat{u} \sin(\alpha) = \hat{q} \sin(\alpha) \quad (0.6)$$

Havaitaan, että kondensaattorin jännite ja sähkövaraus ovat saman vaiheisia, eli ne vaihtelevat samanaikaisesti. Tällöin kondensaattori vuoroin varautuu ja vuoroin purkautuu jännitteen vaihtelun mukana. Kondensaattorin kapasitanssi on yhtälön 0.3 mukaan

$$C = \frac{q}{u} = \frac{dq}{du} \quad (0.7)$$

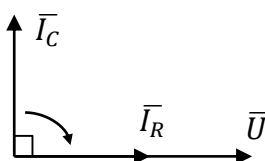
Kun otetaan huomioon, että $dq = idt$, niin kondensaattorin virralle saadaan yhtälö

$$i = C \frac{du}{dt} = C \frac{d(\hat{u} \sin(\alpha))}{dt} \quad (0.8)$$

joka saadaan derivoimalla johdettua muotoon.

$$i = \omega C \hat{u} \sin(\alpha + 90^\circ) \quad (0.9)$$

Jännitteen ja virran yhtälöiden 0.5 ja 0.9 avulla saadaan näin tärkeä päätelmä ja todistus: ”Kondensaattorin jännitteen vaihdella sinimuotoisesti syntyy virtapiiriin sinimuotoinen virta, joka on 90 astetta edellä jännitteestä” (Aura & Tonteri 1996, 173). Kuvasta 2 nähdään virran ja jännitteen välinen vaihe-ero tässä tapauksessa.



Kuva 2. Virta- ja jänniteosoittimen välinen vaihe-ero kapasitiivisella kuormalla

Vaihtosähköpiirin kapasitiivinen vastus on Ohmin lain mukaan kapasitiivinen reaktanssi X_C . Merkitään kapasitiivista reaktanssia seuraavasti, missä taajuus f

$$X_C = \frac{1}{2\pi f C} \quad (1.0)$$

Kapasitiivisen reaktanssin yksiköksi saadaan

$$[X_C] = \frac{1}{[\omega] * [C]} = \frac{1}{\frac{1}{s} * \frac{As}{V}} = \frac{V}{A} = \Omega \quad (1.1)$$

Eli vastuksen yksikkö ohmi. Kun kuormitusimpedanssina on puhdas kapasitiivinen reaktanssi $Z = X_C$, vaihesiirtokulmana φ on -90 astetta ja tehokerroin $\cos(\varphi) = 0$. (Aura & Tonteri 1996, 174.)

3.3 Sähkömagneettinen induktio

Sähkömagnetismista tiedämme seuraavan fysiikan perusilmiön: liikkeessä oleva sähkövaraus synnyttää sähkökentän lisäksi ympärilleen myös magneettikentän. Sähkövirran ja magneettikentän välinen voimavaikutus havaittiin ilmiöksi, jolla sähköenergiaa voidaan muuttaa mekaaniseksi työksi. Käänteisen ilmiön eli mekaanisen energian muuttaminen sähköenergiaksi huomasi englantilainen fyysikko Faraday vuonna 1831.

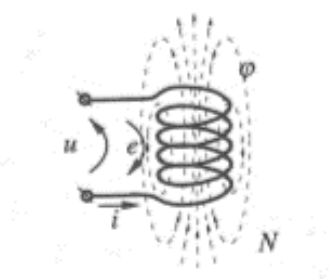
Kun johdinta liikutetaan magneettikentässä, syntyy siihen sähkömotorinen voima. Jos piiri suljetaan, syntyy suljettuun sähköpiiriin virta. Syntyneen virran ja magneettikentän välinen voimavaikutus vastustaa liikettä, joten on tehtävä työtä. Tämän ilmiön perusteella mekaaninen energia voidaan muuttaa sähköenergiaksi. Tätä ilmiötä kutsutaan sähkömagneettiseksi induktioksi sekä syntyvää sähkömotorista voimaa indusoituneeksi smv:ksi eli induktiojännitteeksi. (Aura & Tonteri 1996, 127; Inkinen ym. 2011, 119.)

3.3.1 Itseinduktio ja kela

Kun suljetusta johtimesta tehtyyn piiriin syötetään sinimuotoista vaihtovirtaa kuvan 3 mukaisesti, niin sähkövirran vaihtelun myötä vaihtelee myös virran synnyttämä magneettivuo Φ , joka indusoi käämiin sähkömotorisen voiman e :n eli induktiojännitteen. Tämä induktiojännite voidaan laskea seuraavasti, missä aika t , käämin kierrosluku N ja virta I .

$$e = N \frac{d\Phi}{dt} = -L \frac{dI}{dt} \quad (1.2)$$

Induktiojännite e voi olla sekä negatiivinen että positiivinen riippuen virran suunnasta. Nähdään, että mitä suurempi virran muutos lyhemmissä ajassa, sitä suurempi indusoitunut smv. Tällaista sähkötekniikan komponenttia, joka koostuu useammasta käämitetystä johtimesta, kutsutaan kelaksi tai käämiksi.



Kuva 3. Ilmasydäminen käämi ja itseinduktio (Aura & Tonteri 1996, 143)

Kuvan 3 käämiin indusoitunut jännite e on vastakkainen käämiin vaikuttavaa jännitettä u :ta kohden. Tämän johdosta se pyrkii aina estämään vuon vaihtelua. Tästä on seurauksena, että jos käämiin vaikuttavaa jännitettä muutetaan, siihen syntyy smv,

joka pyrkii estämään syntyvän vuon muutoksen. Tätä ilmiötä kutsutaan itseinduktioksi. Käämin itseinduktiokerrointa nimitetään induktanssiksi, joka kertoo käämin kyvystä vastustaa virran muutosta. Kela onkin siis komponentti, joka vastustaa virran muutosta. Induktanssi L määritellään seuraavasti, missä magneettinen vastus R_m eli reluktanssi.

$$L = \frac{N^2}{R_m} = \frac{N\Phi}{I} \quad (1.3)$$

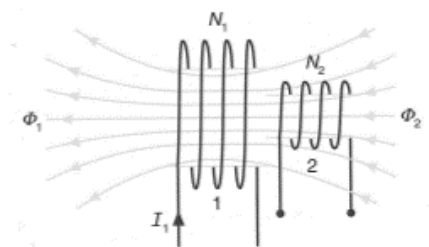
Nähdään, että käämin induktanssi on suoraan verrannollinen kelan kierrosluvun neliöön sekä kääntäen verrannollinen reluktanssiin. Reluktanssi R_m kuvaa magneettipiireissä magneettivuon kohtaamaa vastusta ja sen analogia sähköpiireistä on resistanssi R . Yhtälön 1.3 perusteella induktanssin yksiköksi saadaan henry H .

$$[L] = \frac{[E] * [\Delta t]}{[\Delta I]} = \frac{Vs}{A} = H \quad (1.4)$$

Induktanssia ilmenee kaikilla vaihtosähköpiirin johtimilla, mutta käämissä se ilmenee parhaiten tämän tiheän magneettikentän takia. Tasasähköpiirissä induktanssia ei varsinaisesti esiinny, koska virran eli magneettivuon muutosta ei esiinny muulloin kuin sähköä kytkentähetkillä ja muilla tehon muutoshetkillä. (Aura & Tonteri 1996, 134 – 135.)

3.3.2 Keskinäisinduktio ja muuntaja

Kun kaksi käämiä on asetettu lähekkäin, synnyttää käämissä 1 kulkeva virta I_1 magneettivuon. Tästä syntyneestä magneettivuosta kulkeutuu osa käämin 2 läpi kuvan 4 mukaisesti.



Kuva 4. Keskinäisinduktio (Inkinen ym. 2011, 179)

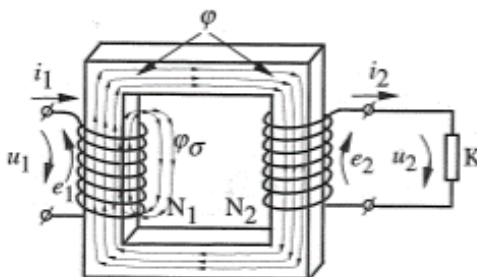
Koska magneettivuo läpäisee myös käämin 2, läpäisevän vuon muutos indusoi käämiin 2 määritelmän mukaan jännitteen e_2

$$e_2 = N_2 \frac{d\Phi_2}{dt} = M \frac{dI_1}{dt} \quad (1.5)$$

Missä suure M on käämien 1 ja 2 välinen keskinäisinduktanssi, jonka yksikkönä myös henry H. Yhtälöstä 1.5 nähdään, että käämiin 2 indusoitunut jännite e_2 riippuu sen lävistävän vuon suuruuden lisäksi käämin kierroslukumäärästä. Käämien välinen keskinäisinduktanssi M saadaan seuraavasta yhtälöstä.

$$M = \frac{N_1 N_2}{R_m} \quad (1.6)$$

Jos käämit yhdistetään ferromagneettisella aineella eli aineella, joka magneitoituu voimakkaasti esim. raudalla, saadaan magneettivuo lävistämään käämi lähes kokonaan. Tämän kaltaista laitetta kutsutaan muuntajaksi. Muuntajan periaate nähdään kuvasta 4. Muuntajan rautasydäntä eli sen magneettipiiriä kutsutaan iekseksi.



Kuva 4. Muuntajan periaate (Aura & Tonteri 1996, 136)

Ensiökäämiin tuotu vaihtojännite u_1 indusoi siihen smv e_1 :n. Magneettivuon muutos indusoi myös toisiokäämiin lähdejännitteen e_2 . Molemmat indusoituneet jännitteet muodostuvat yhtälön 1.2 mukaan, ja nämä puolittain jakamalla saadaan niiden suhdetta kuvaava yhtälö.

$$\frac{e_1}{e_2} = \frac{N_1}{N_2} \quad (1.7)$$

Koska induktiojännitteillä on sama vaihe yhteisen magneettivuon vuoksi, voidaan hetkellisarvot korvata tehollisarvoilla ja näin saaden muuntajan muuntosuhde

$$\frac{U_1}{U_2} = \frac{N_1}{N_2} \quad (1.8)$$

Toisiopuoli sulkemalla saadaan siihen syntymään virtapiiri, jossa kulkee indusoitunut virta I_2 . Häviöttömässä eli ideaalisessa muuntajassa saadaan toision tehoksi ensiön teho.

$$U_1 I_1 = U_2 I_2 \quad (1.9)$$

Yhdistämällä yhtälöt 1.8 ja 1.9 saadaan muuntajalle yhtälö

$$\frac{I_2}{I_1} = \frac{U_1}{U_2} = \frac{N_1}{N_2} \quad (2.0)$$

Todellisessa muuntajassa ilmenee kuitenkin hajavuota sekä sydänmateriaalissa hystereesi- ja pyörrevirtahäviöitä. Tämän vuoksi yhtälö 1.8 ei pidä täysin paikkaansa, vaan on likimääräinen. (Aura & Tonteri 1996, 136 - 137; Inkinen ym. 2011, 178 – 180.)

3.3.3 Induktiivinen reaktanssi

Kuvitellaan vaihtosähköpiirissä olevan ideaalinen käämi. Tämä piiri sisältää vain puhdasta induktanssia. Kun piiriin syötetään generaattorista sinimuotoista virtaa hetkellisarvolla

$$i = \hat{i} \sin(\omega t) = \hat{i} \sin(\alpha) \quad (2.1)$$

indusoituu käämiin määritelmän mukaan itseinduktion sähkömotorinen voima eli vastasähkömotorinen voima.

$$e = -L \frac{di}{dt} = -L \frac{d(\hat{i} \sin(\omega t))}{dt} \quad (2.2)$$

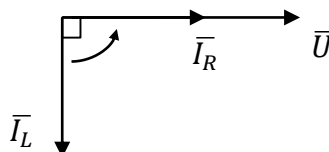
Josta johtamalla yhtälö saadaan muotoon

$$e = \omega L \hat{i} \cos(\omega t) = \hat{e} \cos(\alpha) \quad (2.3)$$

Johtamalla ja Kirchhoffin jännitelakia soveltamalla yhtälö saadaan muotoon

$$u = e = \hat{e} \cos(\alpha) = \hat{e} \sin(\alpha + 90^\circ) \quad (2.4)$$

Virran ja jännitteen yhtälöistä 2.1 ja 2.4 saadaan näin tärkeä päätelmä ja todistus ”Sinimuotoisen virran kulkiessa ihanteellisen käämin läpi indusoituu vyyhteen smv, joka jää virrasta 90° jälkeen. Käämiin vaikuttava jännite on virrasta 90 astetta edellä. Vaihesiirtokulma φ , joka lasketaan virtaosoittimesta jänniteosoittimeen, on siis $\varphi = +90^\circ$ ” (Aura & Tonteri 1996, 168). Ts. jännitteen ja virran välinen vaihesiirtokulma φ on 90 astetta puhtaasti induktiivisella kuormalla. Kuvasta 5 nähdään virran ja jännitteen välinen vaihe-ero tässä tapauksessa.



Kuva 5. Virran ja jännitteen välinen vaihe-ero induktiivisella kuormalla

Vaihtosähköpiirin induktiivinen vastus on Ohmin lain mukaan induktiivinen reaktanssi X_L . Merkitään induktiivista reaktanssia seuraavasti, missä taajuus f .

$$X_L = 2\pi fL \quad (2.5)$$

Induktiivisen reaktanssin yksiköksi saadaan

$$[X_L] = [\omega] * [L] = \frac{1}{s} * \frac{Vs}{A} = \frac{V}{A} = \Omega \quad (2.6)$$

eli vastuksen yksikkö ohmi. Kun kuormitusimpedanssina on puhdas induktiivinen reaktanssi $Z = X_L$, vaihesiirtokulma φ on $+90^\circ$ ja tehokerroin $\cos(\varphi) = 0$. (Aura & Tonteri 1996, 167 – 170.)

3.4 Yhteenveto

Sähköstatiikasta huomattiin, että sähkökenttien tärkein sovellus on kondensaattori, jolla voidaan lyhytaikaisesti varastoida energiaa kondensaattorin sähkökenttään. Tätä ominaisuutta käytetään hyödyksi useissa sovelluksissa, mutta koska kondensaattori voi syntyä myös minkä tahansa johteiden välille, se saattaa aiheuttaa myös ongelmia.

Sähkömagnetismista huomattiin, että vaihtosähkö aiheuttaa kaikilla johtimilla itseinduktanssia, josta sinällänsä ei ole hyötyä, mutta sitä hyväksikäytetään tärkeässä sähkötekniikan komponentissa käämissä. Huomattiin myös, että vaihtosähköpiirit voivat liittyä toisiinsa suoraan sähköisellä johdinyhteydellä eli galvaaniyhteydellä, mutta myös keskinäisinduktanssin kautta. Tämä onkin vaihtosähkön suurin etu verrattuna tasasähköön. Sähkömagneettista induktiota hyväksikäyttäen muuntajalla voidaan muuttaa jännitetasoa suuremmaksi ja täten siirtoyhteyksissä saada aikaan pienempiä tehohäviöitä. Myös vaihtosähköllä toimivat oikosulkumoottorit ovat yksinkertaisempia sekä halvempia toteuttaa verrattuna tasakäyttömooottoreihin. Oikosulkumoottori perustuu samaan keskinäisinduktioon, ja sen sähköinen sijaiskytkentä onkin sama kuin muuntajalla. Myös monet muut vaihtosähkön sovellukset, kuten langaton lataus ja induktiokuumennus perustuvat samaan sähkömagneettiseen induktioon ja nojaavat muuntajan periaatteisiin.

4 SÄHKÖTEHO TASA- JA VAIHTOSÄHKÖPIIREISSÄ

4.1 Sähköteho tasasähköpiirissä

Fysiikan mukaan sähköteho, kuten mekaaninen teho, määritellään aikayksikössä tehtynä työnä. Joulen lain mukaan sähkövirta lämmittää vastusta, koska varaukset törmäilevät johdeaineen atomeihin. Tällöin varausten keskimääräinen nopeus hidastuu ja sitä vastaava liike-energia muuttuu lämmöksi. Johdin on lämmennyt eli sähkövirta on suorittanut työtä. Sähkötehon P yhtälöksi saadaan.

$$P = \frac{W}{t} = UI \quad (2.7)$$

Tehon yhtälön perusteella yksiköksi saadaan Watti.

$$[P] = [U] * [I] = \frac{J}{s} = VA = W \quad (2.8)$$

Tehona on yksi watti, kun sähkökone kuluttaa tai tuottaa joulen energiaa sekunnissa. Tasasähköpiiriin vaikuttavan jännitteen ja sen synnyttämän virran ollessa vakio ei piirissä ilmene sähkömagnetismin ja sähköstatiikan voimavaikutuksia, joten kaikki piiriin virtaavaa sähkö muuttuu sen resistansseissa lämmöksi tai muuksi energian muodoksi. Piiriin virran kytkeytyessä päälle tai pois ilmenee näitä efektejä, mutta ne ovat tavallisesti niin pieniä, että ne voidaan jättää huomioimatta. (Aura & Tonteri 1996, 76 – 77.)

4.2 Sähköteho vaihtosähköpiirissä

Aikaisemmasta tiedetään, että vaihtosähköpiirissä jännitteen- ja virranvaihtelut aiheuttavat piiriin kapasitanssia ja induktanssia eri voimavaikutusten vuoksi. Kondensaattoreiden sähkökenttien ja käämien magneettikenttien varaaminen vaatii energiaa eli työtä. Sähkötekniikassa käytetään kolmea eri suuretta helpottamaan näiden töiden erottelua. Vaihtosähköpiirin teho on jaettu pätötehoon P , loistehoon Q ja näennäistehoon S . Pätöteho P edustaa hyödyksi tulevaa tehoa, loisteho Q piirin kapasitanssien ja induktanssien vaatimaa tehoa, sekä näennäisteho S näiden geometrista summaa eli piirin kokonaistehoa.

4.2.1 Pätöteho

Vaihtosähköpiirin resistanssien ja reaktanssien kompleksiseen summaan eli impedanssiin virtaavan sinimuotoisen vaihtovirran hetkellisarvo on

$$i = \hat{i} \sin(\alpha) \quad (2.9)$$

ja tähän impedanssiin vaikuttavan jännitteen hetkellisarvo on

$$u = \hat{u} \sin(\alpha + \varphi) \quad (3.0)$$

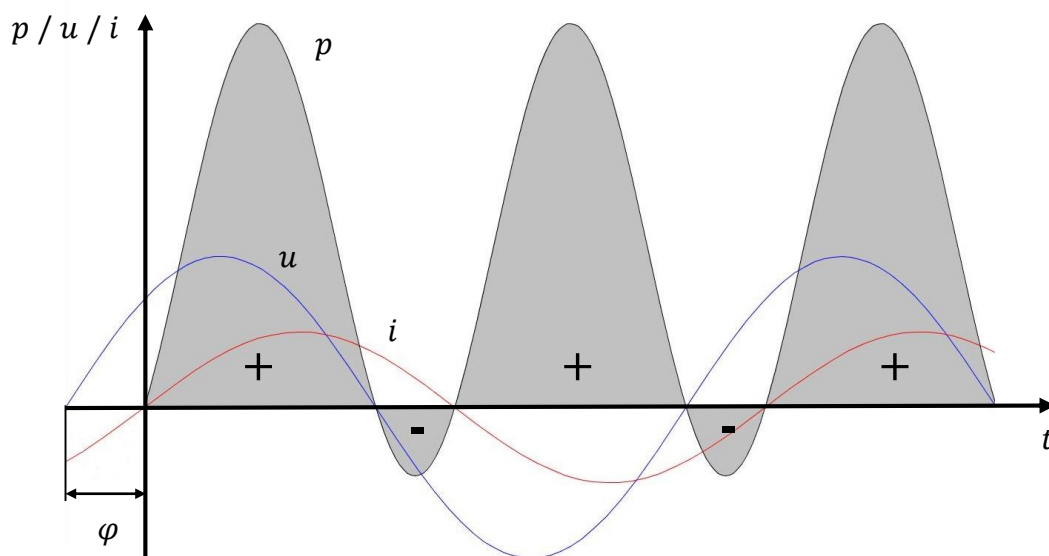
Jos piiri on kapasitiivinen, vaihesiirtokulma φ on negatiivinen, eli virta on jännitettä edellä, ja jos piiri on induktiivinen, vaihesiirtokulma φ on positiivinen, eli virta on jännitettä jäljessä. Tähän impedanssiin vaikuttavan tehon hetkellisarvo on

$$p = ui = \hat{i} \sin(\alpha) * \hat{u} \sin(\alpha + \varphi) \quad (3.1)$$

Hetkellisen tehon yhtälö voidaan johdattaa trigonometrian avulla seuraavaan muotoon

$$p = UI \cos(\varphi) - UI \cos(2\omega t + \varphi) \quad (3.2)$$

Kuvasta 6 nähdään nämä edellä mainitut vaihtosähköpiirin hetkellisarvot.



Kuva 6. Tehon-, jännitteen- ja virran hetkellisarvot vaihtosähköpiirissä

Kuvasta 6 nähdään, että virta on jännitettä edellä, joten piiri on kapasitiivinen. Kun tehon pinta-ala on positiivisena kuvassa, energia virtaa generaattorista kuormaan päin. Integroimalla hetkellisen tehon yhtälö 3.2 saadaan vaihtosähköpiiriin keskimääräinen teho.

$$P = \frac{1}{T} \int_0^T p dt = UI \cos(\varphi) \quad (3.3)$$

Sekä symmetrinen kolmivaiheinen pätöteho, missä jännite U on vaiheiden välinen jännite eli pääjännite

$$P = \sqrt{3}UI \cos(\varphi) \quad (3.4)$$

Tätä vaihtosähköpiirin tehoa, joka tasavirtapiirin tehon tavoin muuttuu piirin resistansseissa lämmöksi, kutsutaan pätötehoksi. Pätöteho on vaihtosähkötehon osa, joka tulee kuluttajan hyödyksi. Määritelmän mukaan kulma φ on virran- ja jännitteen välinen vaihe-ero ja tämän vaihe-eron kosini $\cos(\varphi)$ on nimeltään vaihtosähkön tehokerroin. (Aura & Tonteri 1996, 197 – 202.)

4.2.2 Loisteho

Loisteho on sähkökoneen kuluttamaa tai tuottamaa sähkötehoa, joka ei tee varsinaista työtä vaan värähtelee generaattorin ja kuorman induktanssien sekä kapasitanssien välillä. Kuvassa 6 negatiivisella maalattu tehon pinta-ala kuvaa kuormassa värähtelevää tehoa eli loistehoa. Loisteho siis sykkii piiriä syöttävän generaattorin sekä piirin magneettikenttien ja sähkökenttien välillä. Loistehon tunnuksena on Q ja yksikkönä vari VAr . Loistehon yhtälöksi saadaan

$$Q = UI \sin(\varphi) \quad (3.5)$$

Pätötehon kaavassa oleva $\cos(\varphi)$ kuvasi virran ja jännitteen välillä olevaa vaihe-eroa. Sinifunktio $\sin(\varphi)$ on kosinifunktiota 90 astetta jäljessä, joten se kuvaa loistehon määrää. Yhtälöstä 3.5 nähdään, että kulman fiin ollessa ± 90 astetta, sinifunktio saa arvon yksi ja piiri sisältää pelkkää loistehoa, sekä kulman φ ollessa 0 pelkkää loistehoa.

4.2.3 Näennäisteho

Tehon yhtälössä oleva lauseke $U * I$ on vaihtojännitteen ja -virran tehollisarvojen tulo, jota nimitetään näennäistehoksi. Näennäistehon tunnusta merkitään kirjaimella S , ja sen yksikkö on voltiampeeri VA (Aura & Tonteri 1996, 198).

$$S = UI \quad (3.6)$$

Näennäisteho sisältää kaiken tehon mitä generaattorista virtaa kuormaan pysyvästi, ja tehon, joka värähtelee generaattorin ja kuorman välillä. Näennäisteho on kuvan 6 pinta-alojen summa.

5 LOISTEHON KOMPENSOINTI

5.1 Yleistä loistehon kompensoinnin tarpeesta

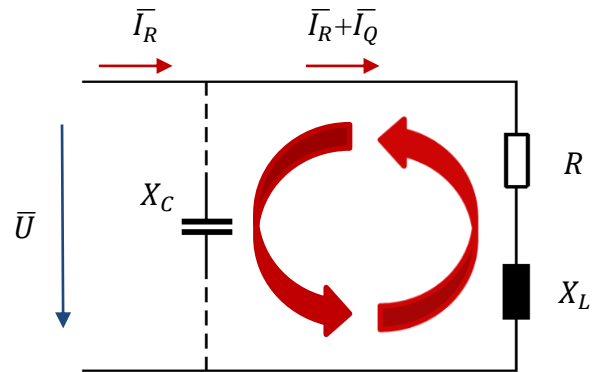
Sähkötehon tarkastelussa nähtiin, että verkon tehokerroin ja sen loistehopitoisuus eivät varsinaisesti liity sähkönlaatuun. Loistehon vaatima loisvirta kuitenkin kasvattaa verkkojen kokonaisvirtaa ja tuottaa näin haasteita verkon käytölle.

Sähkönjakeluyhtiöiden siirtoverkon osalta loistehon siirto pienentää päätötehon siirto-kykyä ja muuntajien, jännite-, teho- ja energiahäviöitä. Tämä johtaa verkon vahvistus- ja lisäinvestointeihin sekä suurempiin häviökustannuksiin. Myös verkon ollessa pienellä kuormalla tyhjäkäyvien kaapeleiden kapasitanssit jäävät verkkoon, mikä voi aiheuttaa liiallista loistehon kompensointia. Sähkönkuluttaja kohtaa samantyyppisiä ongelmia omassa verkossaan sekä joutuu maksamaan loistehomaksua loistehon kulutuksen mukaan. Loistehomaksu on verrattain suuri muihin energiamaksuihin nähden ja voi täten aiheuttaa merkittäviä kustannuksia. Loisteho onkin järkevintä tuottaa mahdollisimman lähellä sen kulutusta. (Männistö, Hietalahti, Seesvuori, Seesvuori & Wilén 2006, 20.)

Huolimatta edellä mainitusta, kompensointi on vahvasti mukana sähkönlaadun parantamisessa. Kompensointilaitteita ei voida nykypäivänä käsitellä yksinään loistehon kompensoijina, sillä samoilla laitteilla vaikutetaan myös sähkönlaatuun, muun muassa yliaaltoihin. (Männistö ym. 2006, 20 – 21.)

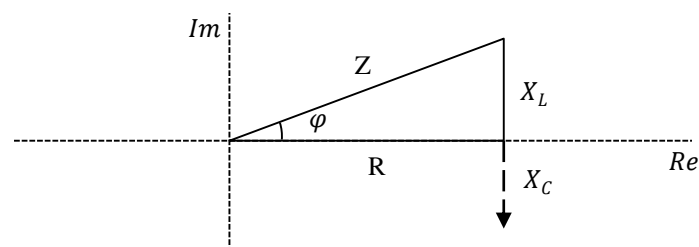
5.2 Kompensoinnin laskenta ja mitoitus

Kuvan 7 vaihtosähköpiirissä on sähkökone, jonka resistanssissa R tapahtuu työ ja joka vaatii toimiakseen induktanssin L . Tiedetään että induktanssi L tuottaa piiriin induktiivisen vastuksen eli reaktanssin X_L , sekä se vaatii loistehon Q :n. Jos piiriin lisätään rinnakkaiskondensaattori C , jonka kapasitiivinen reaktanssi on $X_C = X_L$, on piiri ns. rinnakkaisresonanssissa. Tällöin generaattori syöttää piirin pelkästään pätövirran I_R ja loisvirta I_Q jää värähtelemään kapasitanssien sekä induktanssien välille kuvan 7 mukaisesti.



Kuva 7. Loistehon kompensoinnin periaate rinnakkaiskondensaattorilla

Helpottamaan laskuja sekä havainnointia piiristä voidaan muodostaa kuvan 8 mukainen impedanssikolmion. Kolmio on osoitinpiirros kuvan 7 komponenteista, jossa resistanssi kuvaa kuorman reaalista osaa, induktiivinen reaktanssi sen imaginaarista osaa ja impedanssi näiden summaa eli virran kohtaamaa kokonaisvastusta piirissä. Määritelmän mukaan induktiivinen reaktanssi on resistanssiin nähden $+90$ asteen kulmassa ja kapasitiivinen reaktanssi on -90 astetta resistanssiin nähden eli vastakkaisuuntainen induktiiviseen reaktanssiin nähden.



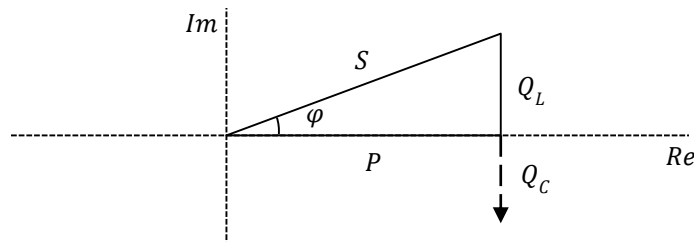
Kuva 8. Impedanssikolmio

Piirin kokonaisimpedanssi saadaan yhtälöstä $Z = \sqrt{R^2 + (X_L - X_C)^2}$. Jos piirin induktiivinen reaktanssin X_L tiedetään, ja sen tuottama loisteho halutaan kompensoida, täytyy kapasitiivisen reaktanssin olla yhtä suuri, eli $X_L = X_C$. Tämä osoitin näkyy kuvassa 8 katkoviivoin. Tässä tapauksessa X_C osoitin on yhtä suuri kuin X_L osoitin eli ne kumoavat toisensa, ts. niiden summa on nolla. Tällöin piirin impedanssiksi jää puhtaasta resistanssia eli $Z = R$. Tätä tilannetta kutsutaan resonanssiksi, voimme johdattaa resonanssitaajuuden yhtälön reaktanssien kaavoista.

$$f = \frac{1}{2\pi\sqrt{LC}} \quad (3.7)$$

Jos verkon taajuus sekä piirin induktanssi tiedetään, voidaan laskea resonanssitaajuuden yhtälöstä kompensointikondensaattorin vaatima kapasitanssi. Resonanssitaajuuden kaava on sama molemmille rinnakkais- ja sarjaresonanssille. Sarjaresonanssissa resonanssitilanne saattaa muodostua myös vaaralliseksi käämille sekä kondensaattoreille, koska niiden jännite voi muodostua liitinjännitettä paljon suuremmaksi. Piirin kokonaisvastus saavuttaa miniarvonsa, ja virta voi kasvaa huomattavan suureksi rikkeen verkon osia. Rinnakkaisresonanssissa vaaratilannetta ei synny, koska tällöin reaktanssien X_L ja X_C kumotessa toisensa piirin virta on pienimmillään, eli $I = I_R$. (Aura & Tonteri 1996, 184 – 186.)

Kuvaa 8 vastaava kolmio voidaan myös muodostaa sähköpiirin virroista, jännitteistä ja tehoista, joissa osoittimien välinen kulma φ pysyy samana. Resonanssitaajuuden yhtälön lisäksi, vaadittava kapasitiivisen loisteho määrä voidaan laskea tehojen avulla kuvan 9 mukaisesti. Huomataan että φ ollessa nolla, S osoitin on yhtä P osoittimen kanssa eli piiri sisältää pelkkää pätötehoa. Piiriin joudutaan tuottamaan katkoviivalla kuvattu kapasitiivinen loisteho, jolloin loistehojen summaksi tulee nolla.



Kuva 9. Tehokolmio

Vaadittavan kapasitiivisen loistehon määrä on sama kuin piirissä oleva induktiivinen loisteho. Kuvan 9 kolmiosta pysytään laskemaan arvoja trigonometrian opein.

$$\tan(\varphi) = \frac{Q}{P} \rightarrow Q = \tan(\varphi) * P \quad (3.8)$$

tai

$$S = \sqrt{P^2 + Q^2} \rightarrow Q = \sqrt{S^2 - P^2} \quad (3.9)$$

Sähköpiireihin ja kompensointiin liittyviä laskuja voidaan laskea useilla eri menetelmillä ja tässä esitetyt ratkaisut ovat vain yksi vaihtoehto monista. Laskeminen osoitin- ja kompleksimuodossa on hankalampaa ja laskuja ei pysty laskemaan tavallisella kämmenlaskimella. Tässä esitetty trigonometrinen muoto onkin yksinkertaisin laskea.

Kompensointiin liittyy myös muita laskuja, esimerkiksi silloin jos verkko sisältää muita kuin perustajuisia virtoja ja jännitteitä eli yliaaltoja. Yliaallot syntyvät epälineaarista kuormista, ja ne aiheuttavat jännitteen ja virran säröytymistä. Koska verkon sähkölaitteet on suunniteltu toimimaan sinimuotoisella jännitteellä, aiheuttavat ne odottamattomia ongelmia. Tällöin joudutaan ottamaan niiden aiheuttamat tehot perustajuisien tehojen lisäksi mukaan laskuihin, mikä voi monimutkaistaa laskentaa huomattavasti. Tässä esitetty induktiivinen kuorma on yleisin, koska monet sähkökoneet tarvitsevat toimiakseen induktanssia, mutta myöskään kapasitiivisen loistehon kompensointi ei ole ennenkuulumatonta.

5.3 Kompensoinnin laiteratkaisut

Kompensoinnin laiteratkaisut vaihtelevat muun muassa loisteholähteiden ja verkon yliaaltopitoisuuden mukaan. Ratkaisut voidaan ryhmittää eri tapoihin:

- Kompensointi paikkakohtaisesti, esim. laite- tai ryhmäkohtaisesti.
- Verkon eri tasojen kompensointi pienjännite-, keskijännite- ja suurjännitetasoilla.
- Induktiivinen vai kapasitiivinen kompensointi
- Puhdas kompensointi vai kompensointilaitteisto yhdistettynä sähkönlaadun parannukseen (Estokelaparistot ja imupiirit).
- Passiivi- vai aktiivilaitteet. (Männistö ym. 2006, 48.)

Eri laiteratkaisuissa joudutaan ottamaan myös huomioon laitteiston suojaus erilaisilla kytkin- ja suojalaitteilla. Näitä ovat muun muassa nollakohta-kytkimet sekä suojareleet. (Männistö ym. 2006, 64.)

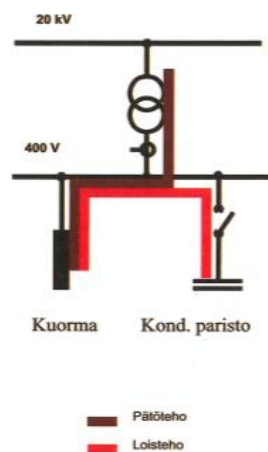
5.3.1 Kondensaattoriparistot

Kondensaattorielementit pienjännite-tasossa valmistetaan nykyään pääosin itseparan-
tuvasta metalloidusta polypropyleenikalvoista, missä läpilyönti elementissä aiheuttaa
metallointi-kerroksessa höyrystymisen ja elementti jää oikosulkuun. Rakenteeltaan
elementit ovat kuivia, eli ne eivät sisällä mitään kyllästysnestettä ja ne on yleensä va-

rustettu sisäisellä ylivirta-, yllämpö- ja ylipainesuojalla. Pienjänniteyksiköissä käytetään yleensä varauksen purkuun ulkoista purkausvastusta. Purkausvastusta tarvitaan sähköturvallisuuden takia. Paristoihin jäävä jännite voi olla vaarallinen ja täten purettava. Suurjänniteyksiköt ovat joko kuiva- tai öljyeristeisiä, ja ne sisältävät sisäisen sulakkeen ja purkausvastuksen. (Männistö ym. 2006, 48 – 49.)

Kondensaattoriparistoja voidaan käyttää joko rinnakkain tai sarjassa. Sarjakondensaattoriparistoja käytetään pääasiassa siirtoverkoissa johdon siirtokyvyn lisäämiseksi, eikä niinkään loistehon kompensoinnin vuoksi. Kantaverkon kaapeleiden induktanssi pienentää pätötehon siirtokykyä, jota lisätään sarjakondensaattoreilla. (Männistö ym. 2006, 49 – 52.)

Rinnakkaiskondensaattoriparistot jaetaan kiinteisiin ja säädettäviin paristoihin. Kiinteät kondensaattoriparistot on liitetty sähköverkkoon ilman säätöä, ja säädettävät paristot eli automatiikkaparistot voidaan kytkeä verkkoon portaittain. Säädettäviä paristoja ohjataan yleensä halutuilla havahtumisrajoilla sekä induktiivisella että kapasitiivisella puolella. Normaalisti ohjaus tehdään virtamuuntimilla, joilla mitataan verkon kuormituksen loistehon tarvetta. Ohjaussignaalin mukaan eri portaita kytetään verkkoon tai verkosta pois. Rinnakkaiskondensaattoreita käytetään pienjännitteellä ryhmä- tai pääkeskuksissa sekä laitekohtaisessa kompensoinnissa. Keski- ja alijännitteellä kompensointi on taas usein keskitetty. Rinnakkaiskondensaattorit sopivat verkkoihin, joissa ei ilmene merkittävästi yliaaltoja. Kuvasta 10 näemme rinnakkaiskondensaattoripariston periaatteen jakeluverkkoon liittyneen kuluttajan 400 V:n verkossa. (Männistö ym. 2006, 48 – 52.)

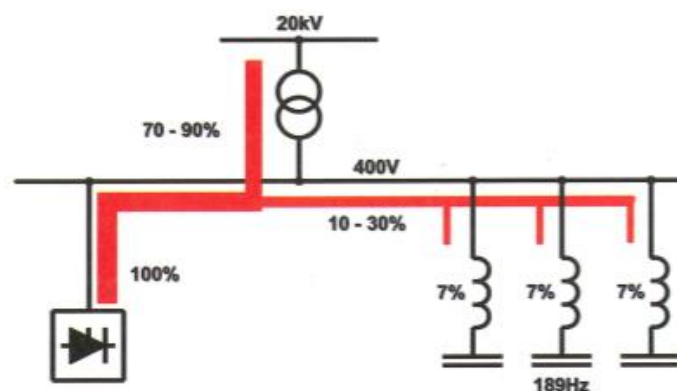


Kuva 10. Rinnakkaiskompensoinnin periaate (Männistö ym. 2006, 50)

5.3.2 Estokelaparistot

Jos verkko on yliaaltopitoinen, tulee tarkastella, onko kompensointi syytä toteuttaa normaalin kompensoinnin sijaan joko estokelalla varustetulla rinnakkaiskondensaattoriparistoilla tai yliaaltosuodattimella. Estokelaparistoilla pystytään välttämään haittallisten resonanssien syntyminen kompensoinnin ja verkon induktanssin välille. Kondensaattoriparistot sekä verkko voivat muodostaa resonanssipiirin, jonka viritystaajuuden osuessa jonkin olemassa olevan yliaaltotaajuuden kohdalle, yliaalto voi vahvistua jopa 20-kertaiseksi. Tämä aiheuttaa myös jännitesärön nousua. Perinteisillä kondensaattoriparistoilla ei voida tämän takia toteuttaa kompensointia yliaaltoisessa verkossa. Estokelaparistoja suositellaan käytettäväksi, kun jännitteen harmoninen kokonaissärö on yli 3 %. (Männistö ym. 2006, 52 – 54.)

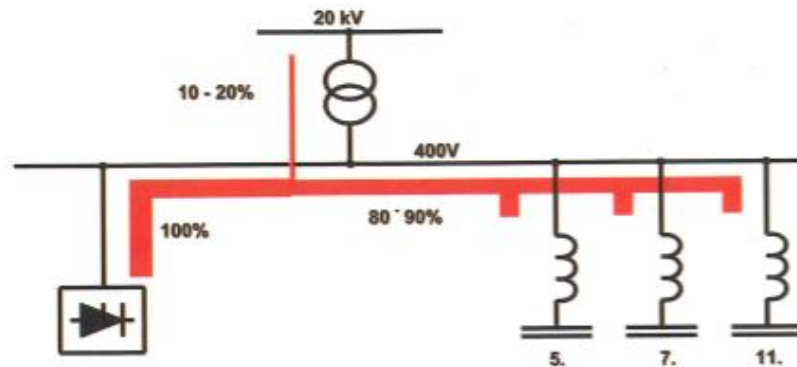
Estokelaparistot sisältävät jokaisella portaalla kondensaattorin lisäksi sarjankytketyn kuristimen, mitkä yhdessä muodostavat sarjaresonanssipiirin. Tämän piirin avulla sarjaresonanssitaajuus viritetään alemmalle taajuudelle kuin verkon harmoniset yliaallot. Näin vältetään haitalliset resonanssit. Estokelaparistolla voidaan myös suodattaa yliaaltoja, johon voidaan vaikuttaa estokelan viritystaajuudella. Tyypillisesti suodattava vaikutus on viidennen yliaaltovirran määrästä 10 - 30 %. Estokelaparisto tulee virittää verkossa merkittävimmin esiintyvien yliaaltojen mukaan. (Männistö ym. 2006, 52 – 54.)



Kuva 11. Estokelaparistopariston suodatinvaikutus (Männistö ym. 2006, 54)

5.3.3 Yliaaltosuodattimet

Verkoissa, joissa yliaaltopitoisuus on suuri, käytetään yliaaltosuodattimia estokelapari-ristojen tapaan. Yliaaltosuodatin tuottaa tarvittavan loistehon ja poistaa verkon yliaal-
tovirtoja, ja näin jännitesäröä pienentämällä nostaa verkon laatua. Yliaaltosuodatin
koostuu kondensaattorin ja kuristimen sarjankytkennästä. Kondensaattori mitoitetaan
niin, että se tuottaa perustaaajuudella halutun loistehon kompensointiasteen ja kuristi-
men induktanssi mitoitetaan niin, että se muodostaa kondensaattoreiden kanssa yliaal-
totaajuudella pieni impedanssien sarjaresonanssiin. Kuvasta 12 nähdään yliaalto-
suodattimen toimintaperiaate. (Männistö ym. 2006, 55 – 56.)



Kuva 12. Yliaaltosuodattimen toimintaperiaate (Männistö, 2006, 56)

Kuvasta nähdään esimerkki tyypillisen yliaaltosuodattimen toiminnasta, missä viritys-
taajuus on asetettu viidennen, seitsemännen ja yhdennentoista yliaallon kohdalle. Lois-
tehon kompensoinnin lisäksi jokaisessa suotimessa syntyy näillä yliaaltotaajuuksilla
sarjaresonanssi, jolloin imupiiri muodostaa yliaalloille pieni impedanssien sulkeutu-
misreitit. Yliaaltosuodattimet toimivat yleensä pien- ja keskijänniteverkossa keskitet-
tynä kompensointina. Suodattimia käytettäessä tulee tuntee verkon tila, joissa niitä
käytetään (Männistö ym. 2006, 55).

5.3.4 Reaktori ja kuristin

Reaktorilla tarkoitetaan ilmasydämistä kelaa, jota käytetään kompensointiin, ja kuris-
timella kelaa, joka on jonkin laitteen komponentti. Reaktoreita käytetään pääasiassa

keskijänniteverkossa rajoittamaan oikosulkuvirtoja ja kytkentäjänniteitä. Lisäksi niitä käytetään yhtenä komponenttina estokela- ja suodatinratkaisuissa. Reaktorilla saadaan vastakkainen vaikutus kuin kondensaattoreilla, eli niillä kompensoidaan kapasitiivista loistehoa. Reaktoreita käytetään yleensä kompensoimaan kapasitiivista loistehoa siirtoverkoissa pienen kuormituksen aikana. (Männistö ym. 2006, 58 – 59.)

5.3.5 Aktiiviset laiteratkaisut

Verkoissa, joissa tapahtuu nopeaa kuormituksen muutosta (esim. hitsauskoneet, valokaariuunit ja nosturit), ei kompensoinnin ja suodatuksen ohjausta voida toteuttaa mekaanisilla kytkimillä, kuten kontaktoreilla. Tämän vuoksi passiivisten kompensointi- ja suodatin ratkaisujen rinnalle on tullut tehoelektroniikalla toteutetut laiteratkaisut, joilla pystytään vastaamaan verkon muutoksiin nopeasti. Puolijohteilla saavutetaan äänen, lähes transientti vapaa ja ilman mekaanista kulumista oleva ohjaus. (Männistö ym. 2006, 50 – 52.)

Kompensointi pienjännitteellä on yleensä toteutettu tyristorikytketyillä kondensaattoriparistoilla (TSC). Suurjännitteellä oleva laitteisto eli kompensattori sisältää yleensä yliaaltosuodattimen ja tyristoriohjatun reaktorin (TCR), jonka virtaa säätämällä saadaan verkkoon portaaton kompensointiteho. Staattista kompensattoria (SVC) käytetään jakeluverkoissa ja teollisuudessa nopeasti muuttuvan loistehon kompensoinnissa. Vaativimpiin ympäristöihin, kuten terästehtaiden valokaariuunien aiheuttamiin häiriöihin, SVC on ainoa ratkaisu. Muita kohteita ovat myös muun muassa valssikäytöt ja kaivoshissit. Staattinen kompensattori suodattaa halutut yliaallot ja tuottaa halutun kompensointitehon. Kompensattori myös stabiloi verkkojännitteen, joka vaihtelee kuormituksen mukaan. (Männistö ym. 2006, 50 – 52.)

Aktiiviset yliaaltosuodattimet, ts. aktiivisuodattimet tuottavat yliaaltovirroille vastakaisvaiheisen virran, joka kumoaa alkuperäisen yliaaltovirran. Aktiivisuodatin ei voi ylikuormittua, jos yliaaltovirrat ylittävät laitteen kapasiteetin, jatkaa suodatin toimintaansa jättäen kapasiteetin ylittävän osan huomioimatta. Aktiivisuodatin onkin periaatteeltaan ohjattu virtalähde. Se toimii kuten taajuusmuuttaja. Käytettävän verkon lataamat tasajännitekondensaattorit toimivat energian lähteinä ja invertteri syöttää halutun

virran PWM-modulaatiolla verkkoon. Yleensä inverttereissä käytetään IGBT-transistoreita, mutta myös muita puolijohteita voidaan käyttää. Aktiivisuotimella pystytään poistamaan useampia taajuuksia, suodattamaan ilman kompensointia sekä välttämään rinnakkaisresonanssi. Se voidaan asentaa mihin verkon osaan tahansa, ja se on riippumaton virran suunnasta, muodosta ja muutoksen dynamiikasta. Yleistymisen tiellä onkin ollut toistaiseksi puolijohteiden suorituskyky sekä passiivisiin suotimiin verrattain korkeampi hinta. (Männistö ym. 2006, 60 – 62.)

5.4 Kompensoinnin suunnittelu sekä huomioon otettavat asiat

Kompensoinnin vaatimusten määrittely on osa sähkösuunnittelua. Suunnitelmissa on yleensä otettava huomioon koko kiinteistön tai jakelumuuntajan käsittämät jakelualueet. Yleisperiaatteena loistehon kompensointi on tarkoituksenmukaisinta toteuttaa lähellä sen kulutusta, mutta näin joudutaan yleensä taloudellisesti kestävämpiin ratkaisuihin. Useimmiten kompensointi toteutetaan kuitenkin kuluttajan pääkeskuksessa tai yhdellä suurella yksiköllä. (Männistö ym. 2006, 82.)

Yliaaltopitoisten verkkojen kompensointia suunniteltaessa tulee myös harkita, onko kompensointi syytä toteuttaa estokelaparistoilla tai yliaaltosuodattimilla. Myös kompensoinnin suojaus vaatii huomiota. Pj-verkossa laitteisto tulee kytkeä minimissään varokkeilla verkkoon. Huoltojen kannalta suositeltavaa olisi käyttää kytkinvarokkeita. Kj-verkossa kompensoinnin liitännässä käytetään erottimia ja katkaisijoita kuorman kytkentätarpeen mukaan. Kondensaattoriparistojen kytkennästä aiheutuvia jännite- ja virtapiikkejä, eli transientteja voidaan pienentää erilaisilla vaimentimilla tai nolla-kohdakytkimillä. Vaimennusvastuksilla kompensointi kytketään ensin vastuksen kautta verkkoon ja lyhyen ajan kuluttua toisella katkaisijalla suoraan verkkoon. Nolla-kohtakatkaisija pyrkii kytkemään paristot jännitteen nolla-kohdassa, jolloin haitallisia transientteja ei synny. (Männistö ym. 2006, 64, 81 – 86).

Kuluttajalle jääkin harkittavaksi, millä tasolla kompensointi on taloudellisesti järkevintä toteuttaa, huomioon ottaen verkon laatu sekä muut vaatimukset. Jakeluverkko-yhtiöt hoitavat oman verkoston kompensoinnin yleensä omien teknis-taloudellisten intressiensä mukaan. (Männistö ym. 2006, 81 – 86.)

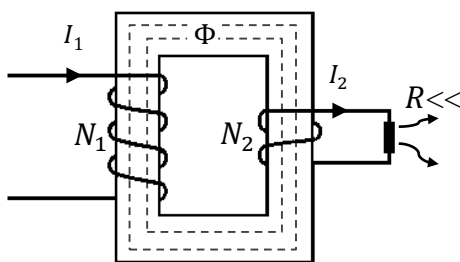
6 INDUKTIOUUNIT

6.1 Induktiokuumennuksen toimintaperiaate

Lämmön siirtymiseen on kolme perusmekanismia: johtuminen, konvektio ja säteily. Tapauksen mukaan kaikkia kolmea mekanismia voidaan käyttää lämmön siirtämiseen yhdessä tai erikseen. Kaikkia mekanismeja voidaan käyttää yhtä aikaa lämmön siirtämiseen esimerkiksi lämpökäsittelyuunissa. Tyhjiössä lämpöä voidaan taas siirtää vain säteilemällä. Säteily on lämmön eli energian siirtymistä sähkömagneettisten aaltojen avulla, eikä se tarvitse johtumisen ja konvektion tapaan väliainetta siirtymiseen. Induktiokuumennuksessa magneettikenttä indusoi kappaleeseen virran, joka taas muuttuu kappaleen resistansseissa lämpöenergiaksi. Induktiokuumennuksessa lämpö siis syntyy kappaleessa itsessään. (Rajagopalan 1995, 19.)

Induktiokuumennus perustuu keskinäisinduktioon. Aikaisemmasta tiedetään, että johtimessa kulkeva vaihtovirta synnyttää ympärilleen muuttuvan magneettivuon ja jos tämän magneettivuon kohtaa toinen johdin, indusoituu johtimeen sähkömotorinen voima. Kappaleeseen indusoitunut sähkömotorinen voima synnyttää siihen pyörrivertoja, jotka Joulen lain mukaan muuttuvat lämmöksi. Myös hystereesihäviöt aiheuttavat lämpenemistä ferromagneettisilla aineilla. (Lammi, Kara & Leszczyński 1986, 6 – 7.)

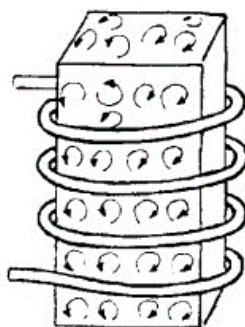
Induktiokuumennuksen periaate onkin sama kuin muuntajalla, ja se nähdään kuvasta 13. Muuntajan ensiössä eli induktorissa kulkeva vaihtovirta indusoi yhden kierroksen oikosuljettuun toisioon eli kuumennettavaan kappaleeseen virran. Kappaleen 3 yhtälöstä 2.0 nähdään, että toisioon virta on ensiön virta kertaa käämien kierroslukusuhte. Toisin sanoen, jos ensiössä on 100 kierrosta ja toisiossa yksi, indusoituu toisioon 100-kertainen virta. Teollisuussovelluksissa induktiokuumennuksessa virrat ovatkin yleensä kiloampeerien luokkaa. Induktorien käämitysten täytyy johtaa sähköä mahdollisimman hyvin, joten niissä käytetään yleensä erittäin puhdasta vesijäähdytettyä kupariputkea (Lammi, Kara & Leszczyński 1986, 6 – 7.)



Kuva 13. Induktiokuumennuksen toimintaperiaate

Kuvasta 13 nähdään, että lävistääkseen magneettivuon kuumennettavan kappaleen täytyy aina muodostaa ympyrä tai sormus ieksen ympärille. Ies helpottaa magneettivuon siirtymistä pienillä taajuuksilla, mutta suurilla taajuuksilla sen merkitys häviää. Kuvan 13 sähköiseksi sijaiskytkennäksi saadaan muuntajaa vastaava sijaiskytkentä. Piirin resistanssit muodostuvat käämi- ja rautahäviöistä sekä kuorman resistanssista. Reaktanssit muodostuvat magnetoinnista, ieksen ja toision eli lämmitettävän kappaleen välisestä etäisyydestä eli ilmapälistä sekä lämmitettävän kappaleen ominaisuuksista. (Paschkins & Persson 1960, 469 – 488.)

Jos kuumennuksessa ei pystytä käyttämään rautasydäntä magneettitienä, voidaan sitä hyödyntää osittain tai kuumentaa kappale kokonaan ilman iestä, silti säilyttäen muuntajan periaate. Kuvasta 14 nähdään, että ensiökäämi ympäröi suoraan kuumennettavan kappaleen, eikä erillistä rautasydäntä ole. Englannin kielessä nämä induktiokuumennuksen kaksi eri esimerkkiä (kuva 13 ja 14) jaotellaankin ”core-type” ja ”coreless” termeillä. (Paschkis & Persson 1960, 469 – 473.)



Kuva 14. Metallitankoon indusoituneita pyörrevirtoja (Keskinen & Niemi 2011)

Induktiokuumennuksessa oleellinen suure on virran tunkeutumissyvyys. Kuvan 14 tangon tapauksessa suurella taajuudella pyörrevirrat keskittyvät kappaleen pintakerrokseen (virranahto ilmiö). Virrantiheys on syvyyteen d asti sama kuin kappaleen pinnalla ja tämän jälkeen nolla. Tunkeutumissyvyys metreinä saadaan yhtälöstä 4.0, jossa δ aineen ominaisvastus, μ aineen permeabiliteetti ja f virran taajuus.

$$d = \sqrt{\frac{\delta}{\pi\mu f}} \quad (4.0)$$

Induktiokuumennuksen yhteydessä ollaan yleensä kiinnostuneita pyörrevirtojen jakautumasta sekä lämmöksi muuttuvasta tehosta. Nämä voidaan selvittää lämmönsiirron ja kenttäteorian yhtälöistä lähtien. Tangon kokonaisvirrantiheys voidaan laskea integroimalla kuvan 14 tangon kaikki virrat yhteen. Kokonaisvirrantiheyden ja aineen resistiivisyyden avulla voidaan taas laskea kappaleen kokonaistehontiheys. Korkeilla taajuuksilla rautametalleja kuumennettaessa tehontiheys on noin $2 - 3 \text{ kW/cm}^2$. Täytyy kuitenkin muistaa, että lämpöteho ja virtajakautuma kappaleessa muuttuvat jatkuvasti, koska lähes kaikki kappaleen ominaisuudet riippuvat vahvasti kappaleen lämpötilasta. Tämän vuoksi eri arvojen tarkempi tarkastelu on työlästä ja nykyään käytetäänkin tietokoneohjelmia sekä mallinnusta niiden ratkomiseen. (Lammi ym. 1986, 6 – 11; Davies 1990, 75 – 84.)

Jos kuumennettava kappale on ferromagneettista materiaalia, esimerkiksi rautaa tai kobolttia, lisää hystereesin vaikutus magneettisen induktion vaikutusta. Hystereesin johdosta aiheutuva lämpeneminen on normaalisti huomattavasti pienempi, (yleensä vähemmän kuin 10 %) kuin indusoituneiden virtojen aiheuttama lämpeneminen. Ferromagneettisten aineiden permeabiliteetti on lähellä arvoa yksi, mutta materiaalien saavuttaessa Curie-pisteen ne tulevat epämagneettisiksi. Tämän lämpötilan yläpuolella indusoituneet virrat vaihtelevat huomattavasti. Myös kappaleen geometria ja poikkileikkaus (umpiaine vai putki) vaikuttavat induktioon. Induktiokuumennuksessa tapahtuu siis seuraavat peräkkäiset fyysiset ilmiöt:

- Sähköenergian indusoituminen kappaleeseen magneetikentän avulla.
- Sähköenergian muuntuminen kuormassa Joulen lain mukaan lämmöksi.
- Lämmön siirtyminen johtumalla kappaleen sisällä. (Rajagopalan 1995, 59 - 61.)

Oleellisin ero verrattuna perinteisiin kuumennusmenetelmiin, jossa lämmönlähteen lämpötilan on oltava isompi kuin kuumennettavan kappaleen, on lämmön syntyminen kappaleessa itsessään. Tämä mahdollistaa suurten tehotiheyksien käyttämisen sekä hyvän hyötysuhteen. Induktiouunien sähköinen hyötysuhde on Curie-pisteen ylittäneellä raudalla 80 %, alumiinilla 70 % ja kuparilla 60 %. (Lammi, ym. 1986, 11 – 12.)

6.2 Induktiokuumennuksen sovellukset

Induktiokuumennuksella voidaan lämmittää vain pienen ominaisresistanssin omaavia materiaaleja. Tämän vuoksi lähes kaikki induktiokuumennuslaitteet ovatkin metalliteollisuudessa, muualla käytettäessä kuumennus on yleensä välillistä. (Lammi ym. 1982, 14.)

Induktiokuumennuksen sovelluksia ovat metallien hitsaus, juottaminen, lämpökäsittely, sulatus ja kuumanapito. Muita kuin metalliteollisuudessa käytettäviä sovelluksia ovat esim. eri aineiden liimaus ja kuivaus, lasivillan valmistus sekä erikoistarkoituksiin tehdyt laitteet. Kotitalouksissa induktiokuumennusta käytetään muun muassa induktioliesissä. Kuitenkin metalliteollisuuteen verrattuna muiden alojen osuus kokonaisliitäntätehosta on hyvin pieni. (Lammi ym. 1982, 14.)

Tämän opinnäytetyön tarkoituksena on pyrkiä kompensoimaan induktiouunin loistehoa eri tehölähdekäytössä, joten induktiokuumennuksen sovelluksista keskitytään vain induktiouuneihin.

6.3 Induktiouunit metalliteollisuudessa

Ei ole eroa käytetäänkö vaihtelevan magneettikentän periaatetta metallikappaleen kuumentamiseen tai sulattamiseen. Molempiin pätevät samat induktiokuumennuksen periaatteet. Isoin ero näiden kahden välille syntyy sulatuksen suuremmissa lämpötiloissa, jossa metallien ylittäessä Curie-pisteensä niiden permeabiliteetti muuttuu. (Davies 1990, 311.)

Metalliteollisuudessa käytettävät induktiouunit soveltuvat hyvin kuumanapitoon sekä sulatukseen. Mitään mellotusta, ts. metallin muokkausominaisuuksien parantamista ei suoriteta. Uunien lämpötilaa voidaan säätää hyvin tarkasti ja pyörrevirtojen aiheuttamat pyörteet sulassa tekevät sen lämpötilasta sekä koostumuksesta hyvin tasaisia. Menetelmä sopii hyvin runsasseosteisille metalleille, joilla on korkeat raaka-aine vaatimukset. Muita induktiosulatuksen etuja ovat muun muassa:

- Raaka-aineena voidaan käyttää halvempaa romumetallia.
- Metallin kemiallista koostumusta voidaan säätää tarkasti.
- Vähemmän haitallisia kaasuja ja palamistuotteita.
- Pienemmät käyttökustannukset.
- Erikoismenetelmät, kuten alipainevalaminen, jota ei pysytä tekemään muilla menetelmillä. (Davies 1990, 311; Autere, Ingman & Tennilä 1982, 73 – 74.)

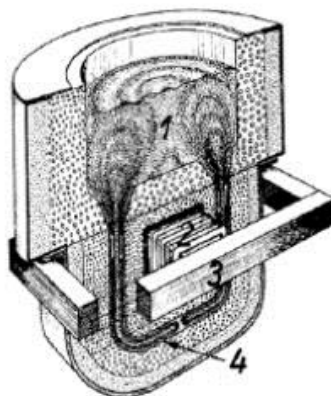
Induktiouunien varjopuolia perinteiseen kupoliuunisulatukseen verrattuna ovat:

- Suuret investointikustannukset.
- Sopii huonosti ainoaksi sulatusuuniksi rautavalimoon, jossa raudan tarve on jatkuvasti suuri. (Autere ym. 1982, 73 – 74.)

Induktiouuneja on useita eri tyyppisiä, jotka eroavat rakenteeltaan ja toimintaperiaatteeltaan. Yleisimmät uunityypit ovat kouruinduktiouuni ja induktioupokasuuni, joista ensimmäistä käytetään kuumanapitoon ja jälkimmäistä sulatukseen.

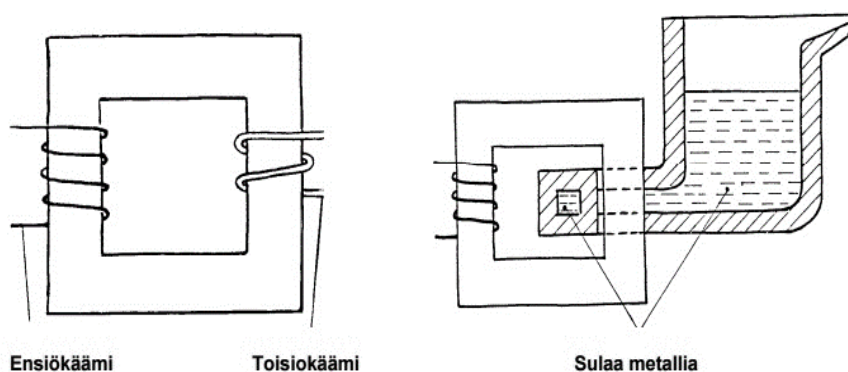
6.3.1 Kouruinduktiouunit

Kouruinduktiouuneja (eng. channel furnace, core-type furnace) käytetään pääasiassa kuparin, messingin, nikkelin, hopean, alumiinin ja sinkin sulatukseen sekä kuumanapitoon. Sitä käytetään myös rautavalimoissa kuumanapitoon. Kouruinduktiouunin rakenne nähdään kuvasta 15. Kouruinduktiouuni koostuu varsinaisesta uunisäiliöstä (1) ja sen alapuolella olevasta induktorista. Induktori koostuu ieksestä, (3) sen päälle käämitystä ensiökäämistä (2) ja sulan metallin täyttämästä kanavasta eli toisiokäämistä (4). Kouruinduktiouuneista puhuttaessa tarkoitetaan koko uunia ja tässä työssä valuuunilla viitataan myös koko uuniin. Induktorista puhuttaessa tarkoitetaan nimenomaan uunin alaosa eli sen muuntajaa. (Davies 1990, 315 – 316.)



Kuva 15. Kouruinduktiouunin rakenne (Autere ym. 1982, 75)

Kuvasta 15 nähdään hyvin, mistä kouruinduktiouuni on saanut nimensä. Sulametalli muodostaa kourussa kanavan uunisäiliön molempiin päihin ja näin tehden yhtenäisen virtapiirin. Tämä virtapiiri toimii teorian mukaan muuntajan oikosuljettuna toisiona. Induktorin toimintaperiaatetta voidaan tarkastella tarkemmin kuvasta 16.



Kuva 16. Kouruinduktiouunin toimintaperiaate (Keskinen & Niemi 2011)

Induktiokouruunintyyppäjä on olemassa useita. Uunit voidaan luokitella eri ryhmiin, joissa kouru on joko pystysuorassa, kallistettu tai vaakasuorassa. Kourujen lukumäärä voi olla uunissa yhdestä kolmeen. Yhdellä kourulla maksimiteho on ollut n. 700 kW, mutta uusilla uunityypeillä voidaan käyttää kourua kohdin jopa 3000 kW tehoja. Kouru-uunit toimivat yleensä verkon taajuudella, koska niissä on laminoitu rautasydän ja lyhyempi etäisyys kuormaan. Uunien tehokerroin ferromagneettisilla materiaaleilla on 0.5 – 0.7 ja ei ferromagneettisilla 0.25 – 0.5. Kouru-uunien sähköinen hyötysuhde

on hyvä, noin 90 – 95 %, josta lämpö ja jäädytyshäviöt poistettuna kokonaishyötysuhteen ollen 85 – 90 %. (Davies 1990, 316; Lammi ym. 1982, 38.)

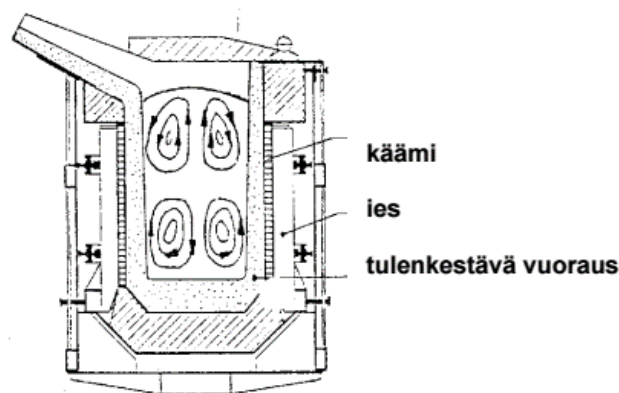
Kun virta kulkee sulassa, ilmenee siinä myös pinch-efekti. Virran ja magneettivuon vuorovaikutus aiheuttaa sulaan voimavaikutuksen, joka supistaa kanavassa olevaa sulametallia. Ennen pitkään tämä supistuminen aiheuttaa katkoksen sulaan ja näin virtapiirin katkeamisen. Jos kanava olisi ohut ja vaakamallinen, pinch-efekti aiheuttaisi virtapiiriin jatkuvia katkoksia. Tämän vuoksi kouruinduktiouuneissa induktori on sijoitettu uunisäiliön alapuolelle, jolloin säiliössä olevan sulametallin hydrostaattinen paine kanavassa estää pinch-efektin ja täten virtapiiri pysyy jatkuvasti yhtenäisenä. (Davies 1990, 315-316.)

Kouruinduktiouuni toimii vain metallin ollessa kanavassa, minkä takia käyttö aloitetaan yleensä kanavaan kaadettavan sulan alkumetallin avulla. Aloittaminen voidaan tehdä myös muilla tavoin, mutta ilman sulan painoa uunisäiliössä pinch-efekti voi aiheuttaa ongelmia. Kouru-uunit vaativat jatkuvan sulan kanavaan, joten ne soveltuvat vain jatkuvaan käyttöön. Sulametalli ei saa päästä jähmettymään kourun sisään, koska kutistuessaan se vahingoittaisi uunin vuorausta. Tuotannon pysähtyessä uuniin jätetäänkin ylläpitoteho pitämään uuni lämpimänä. Uunien elinikä voi olla useita vuosia, joten vuorauksille asetetaan suuret vaatimukset jatkuvan sulan kuumanapidon vuoksi. Tulenkestävissä vuorauksissa käytetään tyypillisesti alumiinioksidi- tai magnesiumoksidipohjaisia vuorausmateriaaleja (tiilet ja valumassat). (Davies 1990, 315 – 316.)

Pystymallisissa uuneissa uunisäiliön aiheuttama korkea hydrostaattinen paine voi myös rasittaa kourun vuorausta. Kourun vuorauksen (induktorin) kuluessa tavallisesti nopeammin kuin itse uunisäiliö, on uuni tehty rakenteeltaan sellaiseksi, että induktori voidaan vaihtaa särkevästi uunin vuorausta tai eräissä tapauksissa jopa tarvitsematta tyhjentää uunia sulasta. Induktorin vaihdossa uuni käännetään sellaiseen asentoon, jossa induktori on uunisäiliössä olevan sulan metallipinnan yläpuolella, ja josta se pystytään vaihtamaan. (Autere ym. 1982, 75 – 76; Davies 1990, 315 – 316.)

6.3.2 Induktiupokasuunit

Induktiupokasuunin (eng, coreless induction furnace) rakenne nähdään kuvasta 5. Uuni koostuu tulenkestävästä rakenteesta eli upokkaasta, jota ympäröi vesijäähdytetty ensiökäämi. Upokkaan sisällä oleva metalli toimii toisiokääminä, johon indusoituneet pyörrevirrat lämmittävät metallia sulattaen sen. Ensiökäämin ulkopuolella oleva ies tarjoaa magneettivuolle paluureitin, parantaen tehokerrointa ja vähentäen riskiä uunin ulkopuolisten metallien tahattomaan lämpenemiseen. Koko uuni on kiinnitetty mekaanisesti niin, että sitä voidaan kallistaa kaatoa varten. (Davies 1990, 312.)



Kuva 17. Induktiupokasuunin rakenne ja toimintaperiaate (Keskinen & Niemi 2011)

Induktiupokasuuneja käytetään pääasiassa valimoissa uudelleensulatuksessa. Upokasuunilla pystytään sulattamaan laaja skaala eri panostusmateriaaleja sekä sulattamaan materiaalit haluttuun lämpötilaan oikealla koostumuksella. Induktiupokasuuneissa indusoituneiden virtojen ja magneettivuon aiheuttamat voimat tulevat erityisen hyvin hyödyksi. Sulametalli alkaa näiden voimien ansioista liikehtiä, sekoittaen koko uunin sulan homogeeniseksi. Ilmiön ansioista valamisessa voidaan käyttää useita eri materiaaleja ilman kalliita sekoitusjärjestelmiä. Mahdollisuus tyhjentää uuni kokonaan sallii uunin käytön useiden eri metallien kanssa samassa valimossa. Jokaisen sulatuksen jälkeen uuni voidaan tyhjentää sulasta kokonaan, joten seuraavassa valussa voidaan käyttää uutta metalliseosta. Kouru-uunilla tämä ei ole mahdollista, koska uuni vaatii toimiakseen jatkuvan sulan. Tämän vuoksi kouru-uuneilla tehdään ns. pesuvaluja, jossa uutta seosta käytetään niin pitkään, että vanhan seoksen rippeet on kadonnut kokonaan

uuden mukana ja uuni sisältää vain uutta metalliseosta. Induktioupokasuunit voidaan taajuuden mukaan jakaa seuraaviin ryhmiin:

- Verkkotaajuusuunit (50/60 Hz)
- ”Kolminkerta” keskitaajuusuunit (150/180 Hz)
- Keskitaajuusuunit (250 – 5000 Hz)
- Korkeataajuusuunit pienille kappaleille ja erikoissovelluksille (>25 kHz). (Davies, 1990, 312 – 313.)

Käyttötaajuus vaikuttaa uunin käytettävään kokoon, maksimitehoon, raaka-aineen minimikokoon ja sulan liikkeeseen. Yhtälöstä 4.0 nähdään, että tunkeutumissyvyys on pienillä taajuuksilla suuri ja täten pinta-alaa kohden syntyvä teho pieni. Verkkotaajuusuuneilla tämä aiheuttaa sulatuksen aloituksessa ongelmia pienen tehotehokkuuden vuoksi, joten niiden jatkuvassa käytössä uuniin jätetäänkin pohjasula. Keskitaajuusuuneilla tätä ongelmaa ei ilmene. Nykyään voidaan myös puolijohdetekniikan kehittymisen myötä käyttää taajuutta sääteleviä sähkökäyttöjä, jolloin valun alussa käytetään suurta taajuutta sulamisen helpottamiseksi. Verrattuna rautasydämellisiin kouruinduktiouuneihin induktioupokasuunien tehokerroin on 0.15 – 0.25. Molemmilla induktio-uunityypeillä on omat heikkoutensa ja vahvuutensa, mutta nykytrendinä on ollut kouru-uunien merkityksen väheneminen. (Davies 1990, 312 – 315.)

7 AURUBIS FINLAND OY:N KUPARIVALIMO

7.1 Yleistä valimotekniikasta

”Valaminen on muodonantomenetelmä, jossa haluttu tuotteen muoto saadaan aikaan sulattamalla käytetty raaka-aine, viemällä sula muottiin ja antamalla sen jähmettyä muotissa. Valaminen on niin sanottu NNS (Near Net Shape) – valmistusmenetelmä.” (Keskinen & Niemi 2011).

Valamisen tiedetään olevan vanhin menetelmä muotoilla metallia. Vanhin löydetty valukappale on Mesopotamiasta löydetty kuparinen sammakkoa esittävä lampunjalka.

Sen valmistus on ajoitettu tapahtuneeksi jo n. 3200 e.Kr. Laajempaa merkitystä valaminen alkoi saamaan 1600-luvulla, jolloin nykyistä kupoliuunia vastaava sulatusuuni kehitettiin. Nykyisin valimoteollisuus on perusteollisuuden ala, joka tuottaa eri koneiden ja laitteiden osia. (Autere ym. 1982, 7.)

Valaminen on lyhyin ja energiataloudellisesti edullisin valmistustapa sulasta metallista valmiiksi kappaleeksi, koska valamisen jälkeen ei tarvita energiaa uuteen muodon muuttamiseen, kuten metalliosien valmistuksessa hitsaamalla. Valaminen perustuu lähes täysin kierrätykseen, joka merkitsee raaka-aineiden sekä energian säästöä. Nykyaikana valamisella on tiettyjä ominaispiirteitä, jotka varmistavat sen vankan aseman valmistusmenetelmänä. Näitä ovat muun muassa:

- Nopein ja vähiten energiaa vaativa tapa valmistaa metallituotteita.
- Vähäiset muotorajoitukset.
- Kappaleen paino voi olla yhdestä grammasta satoihin tonneihin.
- Valamalla voidaan saavuttaa erinomaiset mitta- ja muototarkkuusvaatimukset.
- Lähes kaikkia metalleja ja metalliseoksia on mahdollista valaa, myös sellaisia joita muilla menetelmillä on vaikea muotoilla.
- Hyvä kierrätettävyys. (Keskinen & Niemi 2011.)

Valamiseen liittyy myös tiettyjä rajoituksia, tietyt rakenteet syntyvät edullisemmin esimerkiksi hitsaamalla. Yhdistelemällä eri valmistus- ja liittämismenetelmiä voidaankin päästä edullisimpaan lopputulokseen. (Keskinen & Niemi 2011.)

7.2 Kuparivalimo

Aurubis Finland Oy:n kuparivalimon valulinjalla valettavat tuotteet ovat kuparilaatat (deoksidoidut ja happipitoiset) ja kuparipötkyt (deoksidoidut) sekä harvemmin valettavat hopeaseosteiset laatat. Raaka-aineena valuissa käytetään tehdasalueen sisäistä kiertoromua, ulkoa tulevaa ostoromua ja erilaisia kuparikatodeja.

Valamisessa käytettävän sulan kuparin lämpötila on tuotteesta tai valunopeudesta riippumatta melko sama, noin 1140 °C – 1170 °C, kuparin sulamispisteen ollessa 1084 asteessa. Tehoa eli lämpötilaa säädellään raaka-aineen mukaan, pienijakoinen raaka-

aine vaatii massansa takia suurempaa lämpötilaa pysyäkseen sulana. Taulukosta 1 nähdään kuparivalimon yleisimmät valutuotteet, niiden mitat ja valunopeudet.

Taulukko 1. Yleisimmät kuparivalimossa valettavat laattakoot (Aurubis Finland Oy 2016)

Tuote	Koko [mm]	Valunopeus [mm/min]	Valunopeus [t/h]
Kapea laatta	180x730x3600	180 -200	12.8 - 15.7
Välikoko	200x850x3600	135 - 140	12.4 - 12.6
Leveä laatta	190x1025x3150	155	16.2
Ylileveä laatta	190x1150x2800	130	15.8
Pötkyt	330x3820	180 - 195	16.3 - 17.7

7.3 Valutekniikka

Aurubis Finland Oy:n kuparivalimon tuotanto toimii liukuvalulla eli jatkuvavaluprosessilla, joka tarkoittaa keskeytymätöntä tuotantoa. Kuparivalimon laitteisto koostuu sulatusuunista eli kuilu-uunista, valu-uunista, jäähdetytystä kokillista, vetorullista, juoksevasta sahasta sekä kääntökorista. Liitteestä 1 nähdään kuparivalimon prosessikaavio laitteineen kokonaisuudessaan.

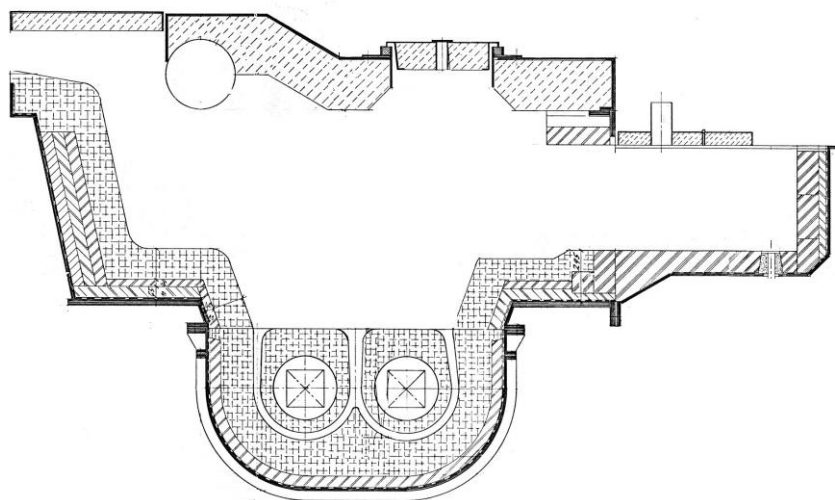
Prosessi tapahtuu panostamalla kuilu-uuniin raakakupari, joka sulatetaan kaasuliekillä sulaksi. Kuilusta sulakupari ohjataan lämmitettyä ränniä pitkin valu-uunille, jonka tehtävänä on säädellä sulan lämpötilaa tarkemmin. Valu-uunin edessä olevalta nokalta sula ohjataan jäähdetyttyyn kokilliin, jonka malli määrää valanteen muodon. Kokillin alapuolelta tuleva kiinteäksi jäähdetytty kuparivalanne on kiinni vetorullissa, jotka vetävät valannetta alaspäin. Valunopeutta ohjataan vetorullien vetonopeudella, ja niille asetettu nopeus säätelee nokalla sijaitsevien säätimien päästämän sulan määrän kokilliin. Vetorullien alapuolella sijaitsee juokseva saha, joka liikkuu valanteen mukana sahaten valanteen haluttuun mittaansa. Valmis sahattu valanne on kiinni kääntökorissa, josta se käännetään pystyasennosta vaakatasoon ja siirretään eteenpäin jatkomuokattavaksi.

8 KUPARIVALIMON VALU-UUNI SEKÄ VIRTALÄHTEET

8.1 Valu-uuni

Tämän opinnäytetyön tarkoituksena on pyrkiä kompensoimaan Aurubis Finland Oy:n kuparin valamisessa käytettävän valu-uunin eli kaksikouruinduktiouunin loistehoa sen kulumisen mukaan. Valu-uuni koostuu itse uunisäiliöstä ja sen alapuolella olevasta induktorista.

Valu-uunin on valmistanut saksalainen Russ-Elektroofen GmbH & Co. KG, ja se on otettu käyttöön vuonna 1977. Valu-uunin malli on pysynyt samana, mutta vuosien varrella vuorausmassat sekä valu-uunin sähkökäyttö ovat muuttuneet. Myös induktorin kanavamalliin on tehtyä pieniä muutoksia. Valu-uunin poikkileikkaus nähdään kuvasta 18.



Kuva 18. Kuparivalimon valu-uuni (Aurubis Finland Oy 2016)

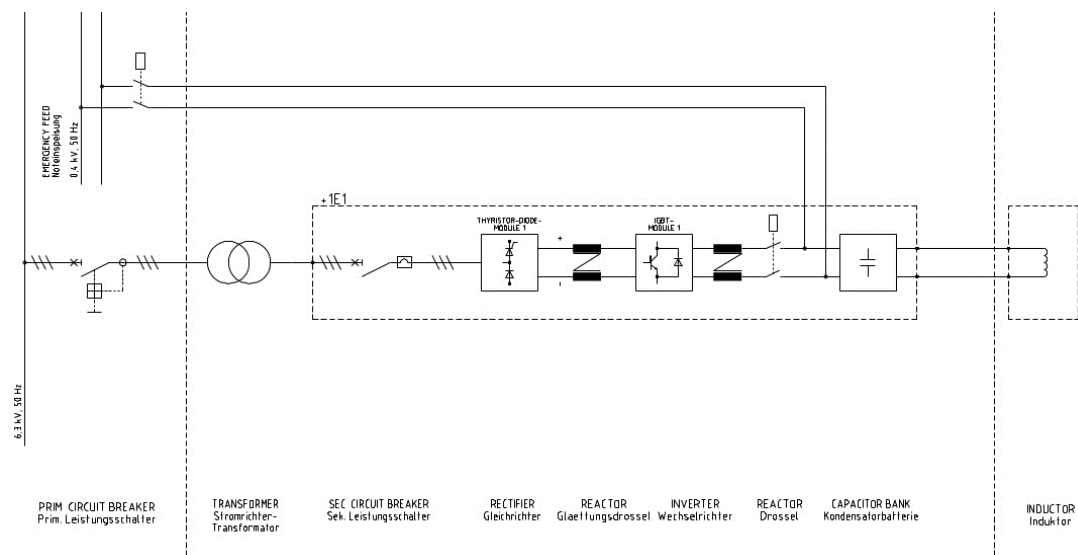
Luvun 7.3 selityksen mukaisesti kuilu-uunilta sula ohjataan ränniä pitkin valu-uuniin. Sula otetaan valu-uunin sisälle kuvan 18 vasemman ylänurkan kohdalta olevalta aukolta. Kuvan pohjalla nähdään kaksikanavainen induktori ja sen päällä itse uunisäiliö. Valu-uuni on siis kaksikanavainen kouruinduktiouuni. Kuvan oikeassa reunassa näkyy valu-uunin nokka, jolta sula ohjataan kokilliin. Vasemmalla puolella on nokka hätätyhjennystä varten. Valu-uuni lepää hydraulisten nostimien päällä, joiden avulla uunia

voidaan kallistaa induktorin vaihtoa tai uunin tyhjennystä varten. Valu-uunin käyttöikä on tällä hetkellä 2 vuotta, jonka jälkeen induktori sekä uunisäiliön vuoraukset uusitaan. Uuden induktorin nimellisarvot ovat 500 kW, 1780 A, 700 V ja 42 Hz:a. Induktori valmistetaan aina saman mallin mukaisesti, joten sen nimellisarvot pysyvät samoina. Valmistus tapahtuu sijoittamalla kuparista sorvattu kanavamalli raudasta tehtyyn kuluhoon, jonka ympärille vibrataan tulenkestävä massa. Näin induktorin vaihdon yhteydessä induktorin malli pysyy tismalleen samana. Tämä on tärkeää, koska kanavan malli vaikuttaa uuniin sähköisiin arvoihin.

Kuitenkin valu-uunin käytön mukana induktorin kanava kuluu ja täten muuttaen sijaiskytkennän sähköisiä arvoja. Kanava suurenee kuluessaan ja sen sijainti iekseen muuttuu hieman, nämä muutokset aiheuttavan uunin resistanssin ja induktanssin muutoksia.

8.2 Käytettävät virtalähteet

Valu-uunilla on kappaleen 2.2 mukaisesti kaksi eri virtalähdettä: IGBT-muuttaja normaaliin tuotantoon ja suorakäyttöinen varamuuntaja IGBT-muuttajan häiriötilanteiden varalle. Virtalähteet ja niiden kytkennät nähdään kuvasta 19.



Kuva 19. Induktorin sähkösyöttö (ABP-Induction 2008)

IGBT-muuttaja ja varamuuttaja sijaitsevat samassa kojeistossa, joka sijaitsee valimossa kerrosta alempana valu-uunia. Kojelistosta lähtee 2x80x10 päävirtakiskosto, jonka jälkeen tulee ylösnousu seuraavaan kerrokseen eri kiskoin. Koska valu-uuni on hydraulisten nostimien päällä, ja sitä tulee pystyä liikuttamaan, on viimeinen virtatie valu-uunille tehty vesijäähdytetyillä johdoilla. Johdot roikkuvat vapaasti ja pystyvät näin elämään uunin liikkeiden mukana. Johdot on vesijäähdytetty, jotta niiden koko saadaan pidettyä mielekkäänä.

8.2.1 IGBT-Muuttaja

Valu-uunin sähkökäyttönä toimii vuodelta 2008 oleva ABP-Induction:in valmistama IGBT-muuttaja (eng, IGBT-Converter). IGBT-muuttajan rakenne nähdään kuvasta 19. Sen pääkomponentit ovat 6-pulssityristoritasasuuntaaja, DC-välipiiri, IGBT-invertteri, kytkentäkuristin (sarjakuristin) ja kompensointi kondensaattorit.

IGBT transistorit (Insulated Gate Bipolar Transistor) ovat suhteellisen uusia tehopuolijohdekytkimiä, joita valmistetaan noin 1000 V:n jännitekestoisuuteen saakka. Ne ovat virta- ja jännitearvoiltaan vastaavia kuin tavalliset tehotransistorit, mutta ovat kytkentäominaisuuksiltaan paljon parempia. IGBT:n rakenne muistuttaa MOSFET:a, mutta niiden johtamishäviöt ovat huomattavasti pienempiä sekä ne ovat myös nopeudeltaan huomattavasti parempia. (Aura & Tonteri 1990, 389.)

IGBT-muuttajan toimintaperiaate on seuraava: Muuttajassa on 2 erillistä IGBT moduulia, joissa välipiiri ja transistorit ovat integroituna yhteen. Yksi moduuli sisältää vastakkaisten vaihtosuuntausdiagonaalien transistorit. Yhdessä moduulit muodostavan vaihtosuuntaajan (invertterin). Isomman tehon saavuttamiseksi moduuleita on kaksi kappaletta ja niiden tehoa säädelään transistoreiden sulkeutumiskulman avulla. (ABP-induction 2008; Pirttikoski sähköposti 26.3.2016.)

Invertteriltä jännite ohjataan sarjakuristimeen läpi uuni- ja kompensointipiiriin. Kuristimen tehtävänä on hidastaa jännitteen nousunopeutta kompensointi-uunipiirissä, ts. jännitteen kulma pyöristyy sen ansioista. Kun transistorit sulkeutuvat, sarjakuristimen magneettipiirissä oleva energia (loisenergia) virtaa vaihtosuuntaimen transistoreissa

olevien diodien (free wheeling diodes) läpi välipiiriin. Tällöin kuristimen yli oleva jännite muuttuu vastakkaiseksi. Kun kuristimen energia on nollassa, piirissä vaikuttava jännitteen merkki vaihtuu jälleen. Tämä johtuu uuni- ja kompensointipiirissä olevasta energiasta. Kun tämänkin energia on nollassa, avataan vastakkaisen vaihtosuuntausdiagonaalin transistorit (zero crossing detection). Seuraa vastaavanlainen ketju, mutta jännite ja virta ovat vastakkaiset kuin edellä. (ABP-induction 2008; Pirttikoski sähköposti 26.3.2016.)

Uunipiiriin syötettävä virta ja jännite ovat kuristimen avulla lähes sinimuotoista. Vaihtosuuntaimen kytkentätaajuus on sama kuin kompensointi-uunipiirin resonanssitaajuus. IGBT-muuttaja siis pitää kompensointi-uunipiirin aina resonanssissa ($\cos \varphi = 1$). Tässä syntyy selvä ero verrattuna esim. moottorikäyttöisiin taajuusmuuttajiin, joissa kytkentätaajuus on kilohertsejä. Verrattuna perinteiseen taajuusmuuttajaan IGBT-muuttajan toimintaperiaate onkin yksinkertaisempi. Kompensointiparistot ovat IGBT-muuttajan kojeistossa, mutta samoja kondensaattoriparistoja käytetään varamuuntaja käytössä.

8.2.2 Varamuuntaja

IGBT-muuttajan häiriötilanteita varten oleva suorakäyttöinen varamuuntaja on Y-kytketty 200 kVA:n 6.3 kV/400 V:n kahdella väliulosotolla oleva kolmivaihemuuntaja. Muuntaja on AN-jäähdytteinen ja sen lämpötilannousuluokka on F.

Muuntaja on kytketty erottimen kautta uuni- ja kompensointipiirin pääkiskostoihin kuvan 19 mukaisesti yhdellä vaiheella. Mahdollisessa poikkeustilanteessa varamuuntaja otetaan käyttöön irrottamalla ensin IGBT-muuttaja piiristä katkaisijan ja erottimen avulla. Tämän jälkeen muutetaan piirissä olevien kondensaattoriparistojen määrää niin, että ne tuottavat mahdollisimman hyvän kompensointitehon verkontaajuudella. Tämän jälkeen varamuuntaja kytketään sähköpiiriin kiinni.

9 KEHITTÄMISTEHTÄVÄN ANALYSOINTI

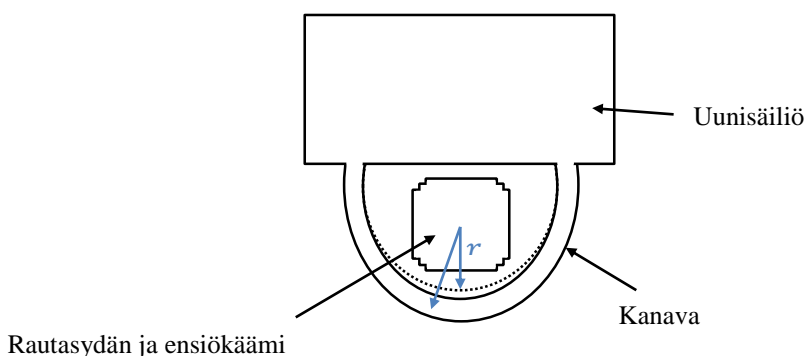
9.1 Valu-uunin kuluminen

Valu-uunin kuluminen aiheuttaa kourun kanavan laajenemista ja täten sen sähköisten arvojen muutosta. Tiedetään, että IGBT-muuttaja pitää uuni- ja kompensointipiirin aina resonanssissa eli tehokertoimen 1:nä. Kokemuksesta tiedetään, että kulumisen mukana taajuus on nousut uuni- ja kompensointipiirissä. Tämän ja resonanssitaajuuden yhtälön avulla voidaan päätellä, että kuluminen pienentää piirin induktanssia koska kapasitanssi on pysynyt samana. Nimellisestä 42 Hz:stä taajuus on noussut kahden vuoden eliniän aikana n. 48 Hz asti.

Induktorin kanavan laajeneminen aiheuttaa siis induktanssin pienentymistä. Inkinen, Manninen ja Tuohi (2002, 180 – 181) totesivat, että rengaskäämin eli toroidin itseinduktanssi saadaan seuraavasta yhtälöstä, missä μ_0 on permeabiliteetti, N kelan kierroslukumäärä, l kelan pituus ja A kelan pinta-ala.

$$L = \frac{\mu_0 N^2 A}{l} = \frac{\mu_0 N^2 (\pi r^2)}{l} \quad (4.1)$$

Tarkastellaan kuvaa 20. Kuvassa sininen viiva kuvaa toisiokäämin eli kanavan etäisyyttä iekseen. Tämän etäisyyden r muodostama pinta-ala on sama kuin yhtälössä 4.1 oleva pinta-ala A . Kun kanava suurenee kuluessaan, se lähestyy iestä ja näin niiden välinen ilmapäli pienenee. Induktorin kuluminen siis vähentää kanavan keskimääräistä etäisyyttä rautasydämeen sekä kelaan ja näin pienentää kanavan induktanssia. Kanavan induktanssin pieneminen pienentää koko sijaiskytkennän induktanssia.



Kuva 20. Induktorin poikkileikkaus

Todellisuudessa kouruinduktiouunin ilmvälistä syntyvä induktanssi on vaikea laskea, ja se riippuu monesta tekijästä. Rautasydämen ja kanavan välissä olevalla vuorausmassalla on eri permeabiliteetti kuin raudalla ja laitteen geometria on monimutkainen. Yhtälö 4.1 kuvaa toroidin induktanssia ja sitä käytetäänkin usein esimerkeissä sen yksinkertaisen geometrian ja pienen hajavuon vuoksi. Molemmista tapauksista on kuitenkin samat lainalaisuudet ja toroidin mallia voidaan käyttää tässä osoittamaan induktanssin muodostumista.

Myös induktorin vaihdon yhteydessä on huomattu, että kanavan malli on kuluessaan suurentunut ja lähentynyt induktiokelaa, joten teoria ja käytännön kokemukset tukevat toisiaan. Liitteestä 3 nähdään, että induktanssin muutos on ollut noin 30 % koko induktorin eliniän aikana. Induktorin kanavan suureneminen myös pienentää induktorin resistanssia, mutta sen muutosta ei pysytä näkemään taajuuden avulla.

Induktorin sijaiskytkennästä pystyttäisiin laskemaan kaikkia arvoja tarkasti, mutta sulan lämpötilan vaihdellessa jatkuvasti on arvojen arviointi hankalaa. Induktorin sähköinen sijaiskytkentä voidaan yksinkertaistaa sen tarkastelussa resistanssin ja induktanssin sarjankytkennäksi Thevenin menetelmän tapaan vastaamaan kuvaa 7.

9.2 Kompensointi IGBT-muuttajakäytössä

IGBT-muuttajan monimutkaisesta toiminnasta ja moduloinnin takia piirin kuormaa ei välttämättä voida muuttaa äkillisesti. Jos piirin kuormaa (kapasitanssia) muutetaan äkillisesti, saattaa se sekoittaa IGBT-muuttajan toiminnan. Tämä mahdollinen sekoaminen liittyy IGBT-muuttajan zero crossing detection modulaation, jossa muuttaja mittaa piirin jännitettä ja sen nollakohtia. Piiriin äkillisesti lisättävä kapasitanssi voi edukkaimmillaan sekoittaa jännitteen syötön vain puolijakson – jakson ajaksi, mutta pahimmillaan siitä syntyvä virtapiikki ja resonanssi piirin muutos voi mahdollisesti aiheuttaa laitteen toimintahäiriön.

Kompensoinnin lisäystä voitaisiin pyrkiä tekemään nolla-kohtakytkimellä, jolla kapasitanssin lisäys pyrittäisiin tekemään jännitteen nollakohdissa ja näin pyrkiä eliminoidaan haitalliset kytkentähäiriöt. Tässä tapauksessa nolla-kohtakytkimen toimintaan ja

sen kytkemishetkeen pitäisi pystyä luottamaan täydellisesti. Tuntematta tarkemmin koko IGBT-muuttajan toimintaa, kompensointi olisi turvallisinta suorittaa muuttaja hetkellisesti sammutettuna.

Kuitenkaan kuorman muutoksesta eli kulumisesta aiheutuva tehovaje ei aiheuta tällä hetkellä ongelmia tuotannossa kuin satunnaisesti tietyillä raaka-aineilla. Tämän ja edellä mainitun vuoksi voidaan tehdä seuraavat johtopäätökset: laitteen ulkopuolinen automaattikompensointi on IGBT-muuttajalle mahdollisesti vaarallista, ja tällä hetkellä olevan pienen tehovajeen takia se olisi joka tapauksessa turhaa. Kompensointi olisikin tarkoituksenmukaisinta toteuttaa manuaalisesti kulumisen mukaan eri portain.

9.3 Kompensointi varamuuntajakäytössä

Varamuuntajakäytössä sähkönsyöttö tulee uuni- ja kompensointipiirin suoraan verkosta muuttajan kautta. Ero IGBT-muuttajakäyttöön on vakio verkontaajuus sekä vapaus tehoelektronikasta. Kompensointipiiri ei sisällä siis mitään ”älyä” ja se näkyy muille verkon osille, toisin kuin IGBT-muuttajakäytössä, jossa uuni- ja kompensointipiiri on erotettu muusta verkosta välipiirillä.

Edellisen luvun perusteella aihetta automaattiseen kompensointiin ei ole. Nykyinen kompensointi on kuitenkin mitoitettu vain uudelle induktorille, jossa varamuuttajan käyttönoton yhteydessä tietty määrä kondensaattoriparistoja irrotetaan piiristä. Tästä syntyy seuraava ongelma: jos induktori ei ole uudehko, vaan kulunut, ottaa se verkosta enemmän loistehoa ja näin kuormittaa muuttajaa turhaan. Muuttajan ylimääräinen kuormitus aiheuttaa ylimääräistä lämpö- ja tehohäviöitä, ja nykyisen 200 kVA:n muuttajalla se saattaa aiheuttaa ylikuormitusta. Tarkoituksenmukaisinta olisi saada uuni- ja kompensointipiiri aina mahdollisimman lähelle sen resonanssitaajuutta, jolloin verkosta otetaan mahdollisimman vähän loistehoa. Tämän vuoksi varamuuttajan käyttönoton yhteydessä tulisi ottaa huomioon induktorin kuluneisuus ja säätää kompensointi sen mukaisesti.

10 KEHITYSEHDOTUKSET JA TULOKSET

10.1 Kaksikouruinduktiounin nimellisarvolaskelmat

Jotta kompensointilaskut pystyttiin tekemään, täytyi pohjalla olla induktiounin nimellisarvot. Nämä laskettiin IGBT-muuttajan kilpiarvojen perusteella, tulokset nähdään taulukosta 3 ja varsinaiset laskelmat liitteestä 2.

Taulukko 3. Induktorin kaikki nimellisarvot

Suure	Arvo
Teho P	500 kW
Näennäisteho S	1.371 MVA
Loisteho Q	1.276 MVAr
Tehokerroin $\cos(\varphi)$	0.365
Kulma φ	68.65 °
Jännite U	770 V
Virta I	1780 A
Taajuus f	42 Hz
Resistanssi R	0.1578 Ω
Induktanssi L	1.52 mH
Induktiivinen Reaktanssi	0.4014 Ω
Kapasitanssi	9.44 mF
Kapasiivinen reaktanssi	0.4014 Ω

10.2 Kehitysehdotus kompensointiin IGBT-muuttajakäytössä

Kehitysehdotus on suunniteltu manuaalisella kolmiportaisella kompensoinnilla. Kompensointia lisätään kulumisen mukaan. Induktorin kulumista tarkkaillaan piiriin taajuuden avulla, ja kulumisen mittariksi otetaan 2 Hz:n porras. Aina kun uuni- ja kompensointipiirin taajuus on noussut kahdella hertsillä, lisätään siihen tarvittava määrä kapasitanssia, jotta resonanssitaajuudeksi saadaan sama 42 Hz:n nimellinen taajuus. Uunin eliniän ollessa 2 vuotta kompensoinnin lisäys tasaisella kulumisella tulisi olemaan kolmella portaalla n. 8,5 kuukauden välein. Tällöin uunista tulisi pystyä ottamaan tehoa irti aina riittävästi.

10.2.1 Tulokset

Piirin vaatima lisäkompensointi jokaisella kolmella portaalla nähdään taulukosta 4 ja varsinaiset laskelmat liitteestä 3.

Taulukko 4. Kompensointi IGBT-muuttajakäytössä

Porras	Nim. Kapasitanssi 9.44 mF	Nimellinen virta 1780 A	
	Kapasitanssin lisäys	Virran lisäys vrt. nimelliseen	Kokonaisvirta
1.	0.92 mF	423 A	2203 A
2.	1.01 mF	619 A	2399 A
3.	1.1 mF	835 A	2615 A

Viimeisellä portaalla virta on yhteensä 2615 ampeeria. Taulukosta 5 nähdään käytössä olevan kirkkaan 2x80x10 mm päävirtakiskoston virrankestävyys.

Taulukko 5. Kuparilattakiskojen (E-Cu F30) kuormitettavuus (ABB 2000, 526)

Mitta [mm]	Poikkipinta [mm ²]	Nimellisvirta/A 50Hz					
		Maalatut kiskot			Kirkkaat kiskot		
		Kiskojen lukumäärä			Kiskojen lukumäärä		
		1	2	3	1	2	3
80x100	799	1500	2410	3170	1240	2110	2790
100x10	999	1810	2850	3720	1490	2480	3260
120x10	1200	2110	3280	4270	1740	2860	3740

10.2.2 Johtopäätökset

Liitteestä 3 nähdään, että induktorin induktanssi kuluu kahden vuoden käytöllä n. 30 %. Tätä kulumista kompensoimaan jokaisella portaalla joudutaan lisäämään kapasitanssia n.1 mF. Jos jännitteen oletetaan pysyvän 770 V:ssa, on viimeisellä portaalla kokonaisvirta noussut n. 2617 ampeeriin. Käytössä olevan kirkkaan 2x80x10 mm kiskoston virrankestoisuus ei riitä laskettuun lisäkompensointiin. Maalattuina kiskojen virrankestoisuus saataisiin isommaksi, mutta se olisi riittämätön joka tapauksessa lasketuille kolmelle portaalle. Maalattuina kiskoston virrankestoisuus nousee noin 300 ampeeria, jolloin kompensointia pysyttäisiin lisäämään jo kohtuullisesti, mutta tulee pohtia, onko vain osittainen kompensointi järkevää vai tulisiko kompensoinnin yhteydessä investoida myös virtateiden vahvuuteen.

Työssä ei huomioitu muita uuni- ja kompensointipiirin virtateitä, muun muassa läpivientejä, liittimiä ja vesijäähdytettyjä johtoja. Näiden kaikkien virtajohtimien virrankestoisuus tulee tarkistaa mahdollisessa lisäkompensoinnissa.

Jos tulevaisuudessa valamisessa käytettävä raaka-materiaali vaihtuu pienempään tai valamisessa tapahtuu muita muutoksia, joiden vuoksi kulumisesta johtuvaa tehon pienenemistä halutaan kompensoida IGBT-muuttajakäytössä normaalituotannon aikana, tulee kiinnittää huomiota näihin kaikkiin virtateihin. Huolimatta kehitysehdotuksen mallista, jossa tietyin aikaväleihin kompensointia lisätään laite hetkellisesti sammutettuna, tulee ottaa huomioon laitteen monimutkaisesta toiminnasta syntyvä toimintaepävarmuus ulkopuolisen kompensoinnin kanssa. Tämän vuoksi yhteydenotto ja konsultointi asiasta laitteen toimittajalta ABP-Inductionilta on suositeltavaa.

10.3 Kehitysehdotus kompensointiin varamuuntajakäytössä

Kompensointi varamuuntajalla suunniteltiin vastaavasti kuin IGBT-muuttajakäytössä. Koska sähkösyöttö tulee nyt suoraan muuntajalta verkontaajuudella, ei minkäänlaista tehonsäätöä ole käytettävissä. Ylimääräinen loisteho joudutaan ottamaan verkosta, mikä kuormittaa muuntajaa turhaan. Tämän vuoksi kompensointia tulisi pystyä säätämään varamuuntajalla induktorin kulumisen mukaan mahdollisimman tarkasti.

Koska käytössä ei ole monimutkaista tehoelektroniikkaa tai lineaarista kompensointia, vaan kahdeksan kiinteää kondensaattoriparistoa, ei kompensointia voida saada tarkalleen arvoon $\cos(\varphi) = 1$. Laskelmissa laskettiin tarkka kompensoinnin vaatima kapasitanssi ja sitä lähimpänä saatavilla oleva kapasitanssi kahdeksalla kondensaattoriparistolla.

Kompensointi on suunniteltu neljällä portaalla. Ensimmäisessä portaassa käytetään nimellisen eli uuden induktorin induktanssia ja seuraavissa kolmessa portaassa 44, 46 ja 48 Hz:n taajuudella saatuja induktansseja. Induktanssien avulla on laskettu jokaisen portaan resonanssitaajuuden vaatima kapasitanssi. Varamuuntajan käyttöönotossa katsotaan, mikä taajuus IGBT-muuttajakäytössä on viimeksi uunipiirissä ollut, ja mikä

porras on lähimpänä kyseistä taajuutta. Tämän jälkeen sopiva määrä kondensaattoreita poistetaan piiristä, jotta tehokerroin saadaan mahdollisimman lähelle yhtä.

10.3.1 Tulokset

Liitteestä 4 nähdään laskelmat kompensointiin liittyen ja taulukosta 5 itse tulokset. Kahdeksalla kondensaattoriparistolla ei päästä tarkkaan lukuun, vaan lähin mahdollinen on ilmoitettu.

Taulukko 5. Kompensointi varamuuntajakäytössä

Porras	Resonanssitaajuuden vaatima kapasitanssi [mF]	Lähin mahdollinen kapasitanssi [mF]	Pois kytkettävien kondensaattoriparistojen määrä [kpl]
Nim.	6.665	7.08	2
1.	7.31	7.08	2
2.	7.991	8.26	1
3.	8.697	8.26	1

10.3.2 Johtopäätökset

Liitteestä 4 nähdään, että uudella induktorilla varamuuntajan 400 V:n jännitteellä saatava teho on noin 136 kW. Ottamatta huomioon valu-uunin häviöitä ja todellista teho vaatimusta, jolla uuni pysyy sulana, tulisi tämän tehon olla riittävä. (Välimäki henkilökohtainen tiedonanto 26.1.2016.)

Jos varamuuntajakäytössä on uusi tai hieman kulunut induktori, päästään kompensoinnissa lähimmäksi resonanssitilannetta poistamalla kahdeksasta kondensaattoriparistosta kaksi paristoa pois uuni- ja kompensointipiiristä. Jos induktori on kuluneempi ja se on kolmannen tai viimeisen portaan alueella, päästään parhaimpaan tulokseen irrottamalla yksi paristo pois uunipiiristä. Uunipiirin todellista tehokertoimen arvoa ei pysytä laskemaan portaille nimellistä lukuun ottamatta, koska kuluneen uunin resistanssi ei ole tiedossa. Portaissa 1 ja 3 uunin tehokerroin saadaan lähimmäksi arvoa $\cos(\varphi) = 1$ kapasitiivisella puolella, joten annetussa kehitysehdotuksessa näissä por-

taissa uunipiiri on kapasitiivisella puolella. Koska varamuuntajaa käytetään vain poikkeustilanteissa sekä tarkoituksenmukaisinta on kuormittaa muuntajaa mahdollisimman vähän, on perusteltua ottaa pienempi määrä kapasitiivista loistehoa verkosta kuin suurempi määrä induktiivista loistehoa verkosta.

Kompensoinnin säädön helpottamista nykyisestä tilanteesta, jossa paristot joudutaan irrottamaan käsin, olisi ohjauksen siirtäminen kontaktoriohjaukseen. Tällöin poikkeustilanteessa säästettäisiin aikaa ja ennen kaikkea lisättäisiin sähköturvallisuutta kun paljaiden johtimien kosketuksesta päästäisiin eroon. Virta- ja jännitemuuntimien sekä mittareiden lisäämistä voidaan myös pitää suositeltavana. Niiden avulla pystyttäisiin analysoimaan kompensointipiiriä varamuuntaja käytössä paremmin. Tällöin päästäisiin nykyisestä ”sokeasta” tilanteesta pois, missä mittaukset joudutaan tekemään käsimittarein.

Koska uuni- ja kompensointipiiri on varamuuntajan kautta suoraan kiinni verkossa, saattaa se muodostaa verkon muiden osien kanssa resonanssipiiriin. Resonanssitilanne voi aiheuttaa verkon osien hajoamista ja keskeyttää sähkönsyötön valu-uunille. Myöskin mahdolliset verkon yliaallot voivat aiheuttaa varamuuntajan kuormitusta sekä muita odottamattomia ongelmia. Edellä mainitun vuoksi olisi suositeltavaa testata sähkönsyöttö uuni- ja kompensointipiirille varamuuntajalla, sekä mitata ja analysoida verkon laatu samassa yhteydessä. Toimenpiteellä pysyttäisiin estämään ennalta odottamattomat ongelmat ja virhetoiminnat todellisen hätätilanteen kohdalla ja taattaisiin näin ongelmaton sähkönsyöttö valu-uunille.

11 POHDINTA JA YHTEENVETO

Tämän insinööriyön päätavoitteena oli analysoida kuparivalimon valu-uunin kulumista ja sen vaikutuksia uunin sijaiskytkentään sekä laskea siihen liittyviä kompensointilaskuja kahdessa eri virtalähdekäytössä. Opinnäytetyö onnistui hyvin, kehittämistehtävää pystyttiin analysoimaan kokonaisvaltaisesti ja kaikki annetut tavoitteet saavutettiin.

Tuloksissa suunniteltiin ja laskettiin pääsähkökäyttönä olevaan IGBT-muuttajaan kolmiportainen lisäkompensointi ja sen häiriötilanteiden varalle olevalle varamuuntajakäytölle neliportainen kompensointi valu-uunin kulumisen mukaan. IGBT-muuttajakäytössä olemassa oleva virtakiskosto ei kuitenkaan kestä lisäkompensoinnin tuomaa lisävirtaa, joten kehitysehdotuksessa ehdotettiin kompensointiportaiden lisäksi vahvistuksia virtakiskostoihin. Varamuuntajakäytössä kompensointi suunniteltiin niin, että uuni- ja kompensointipiiri olisi aina parhaimmassa mahdollisessa tehokertoimessa olemassa olevilla kahdeksalla kondensaattoriparistolla. Tämän lisäksi ehdotettiin parannuksia ja mittauksia varamuuntajakäyttöön, muun muassa sähköturvallisuuden, mittaroinnin ja sähkönlaadun sekä käyttövarmuuden osalta.

Kehittämistehtävän analysointi ja kehitysehdotukset laskelmiseen on argumentoitu ja näin kaikkien kommentoijien seurattavissa sekä arvioitavissa. Insinööriyössä pyrittiin ottamaan kaikki näkökulmat ja tekniset asiat huomioon kehitysehdotuksissa, ja näin pyrkiä estämään mahdolliset vika- ja häiriötilanteet mahdollisissa parannuksissa. Työn laajuuden ja monimutkaisuuden vuoksi on kuitenkin mahdollista, että kaikkia asioita ei ole otettu huomioon tai periaatteita ja suhteita on nähty virheellisesti.

Työskentely oli todella itseohjautuvaa sekä itsenäistä, mutta silti sopivan haastavaa ja palkitsevaa itselleni. Pidin työtä todella mielenkiintoisena, ja se vahvisti omaa ammatillista osaamistani, niin tietotaidon kuin ulosannin osalta paljon. Alussa kokonaisuuden hahmottaminen ja eri asioiden ymmärtäminen veivät hieman aikaa, enkä usko, että olisin pystynyt suoriutumaan työstä samalla aikataululla ilman aikaisempaa työskentelykokemusta toimeksiantajalla.

Huomioitava asiana ja pienenä ongelmana oli löytää induktiokuumennukseen, induktiouuneihin ja valimotekniikkaan liittyvää kirjallisuutta. Suomenkielistä kirjallisuutta, jossa tarkastellaan ensimmäisinä mainittuja syvällisemmin, sekä niiden nykypäivän sovelluksia ei löydy paljoakaan. Myöskin valimoalan eläessä hitailla sykleillä oli siihen liittyvän kirjallisuuden löytyminen haastavaa. Tämä on ymmärrettävää, koska Suomesta ei löydy isoja valimo-alan yrityksiä montaa. Englanninkielistä kirjallisuutta näihin aiheisiin ja niiden nykypäivän sovelluksiin sekä trendeihin löytyi helpommin. Joka tapauksessa käytetyn vanhemman kirjallisuuden pohjalla oleva kova teoria ei ole muuttunut, joten vanhemmatkin kirjat olivat täysin käyttökelpoisia eri periaatteiden tarkastelussa.

Haluan lopuksi kiittää Aurubis Finland Oy:n Tarmo Välimäkeä, Rauno Peltosta, opin-
näytetyöohjaajaani Esko Niemistä ja Satmatic Oy:n Riku Pirttikoskea avusta työhön.

LÄHTEET

Aura, L. & Tonteri, J. A. 1996. Teoreettinen sähkötekniikka ja sähkökoneiden perusteet. 2 uud. p. Porvoo: WSOY.

Aurubis Finland Oy. 2016. Teknisiä dokumentteja.

Aurubis Finland Oy:n www-sivut. Viitattu 20.1.2016. <http://finland.aurubis.com/>

Autere, E., Ingman, Y. & Tennilä, P. 1982. Valimotekniikka 2. Insinööritieto Oy.

Davies, E. J. 1990. Conduction and induction heating. Lontoo: Peter Peregrinus Ltd.

Inkinen, P., Manninen, R. & Tuohi, J. 2002. Momentti 2 Insinöörifysiikka. 2 - 4 uud. p. Helsinki: Kustannusosakeyhtiö Otava.

Keskinen, R. & Niemi, P. 2011. Valumetallien sulatus. Viitattu 14.3.2016. http://www.valuatlas.fi/tietomat/koosteet/sulatus_tao/sulatuspn_01.html

Lammi, K., Kara, M. & Leszczyński, K. 1986. Induktiivinen kuumennus metalliteollisuudessa. Helsinki: Imatran Voima Oy. Tutkimusraportteja 1/86.

Männistö, M., Hietalahti, L., Seesvuori, R. & Seesvuori, V. & Wilén, T. 2006. STULry: Yliaallot ja kompensointi. Espoo: Sähköinfo Oy.

Paschkis, V. & Persson, J. 1960. Industrial electric furnaces and appliances. 2 uud. p. New York: Interscience publishers Inc.

Pirttikoski, R. Tekninen tiedonanto. Vastaanottaja: eero.paavilainen@student.samk.fi. Lähetetty 24.3.2016 klo 9.42. Viitattu 25.3.2016.

Rajagopalan, V. 1995. Sähkölämpötekniikat periaatteet ja sovellukset. Helsinki: Ota-tieto Oy.

Välimäki, T. 2016. Huoltoteknikko, Aurubis Finland Oy. Pori. Henkilökohtainen haastattelu 26.1.2016. Haastattelijana Eero Paavilainen. Muistiinpanot haastattelijan hallussa.

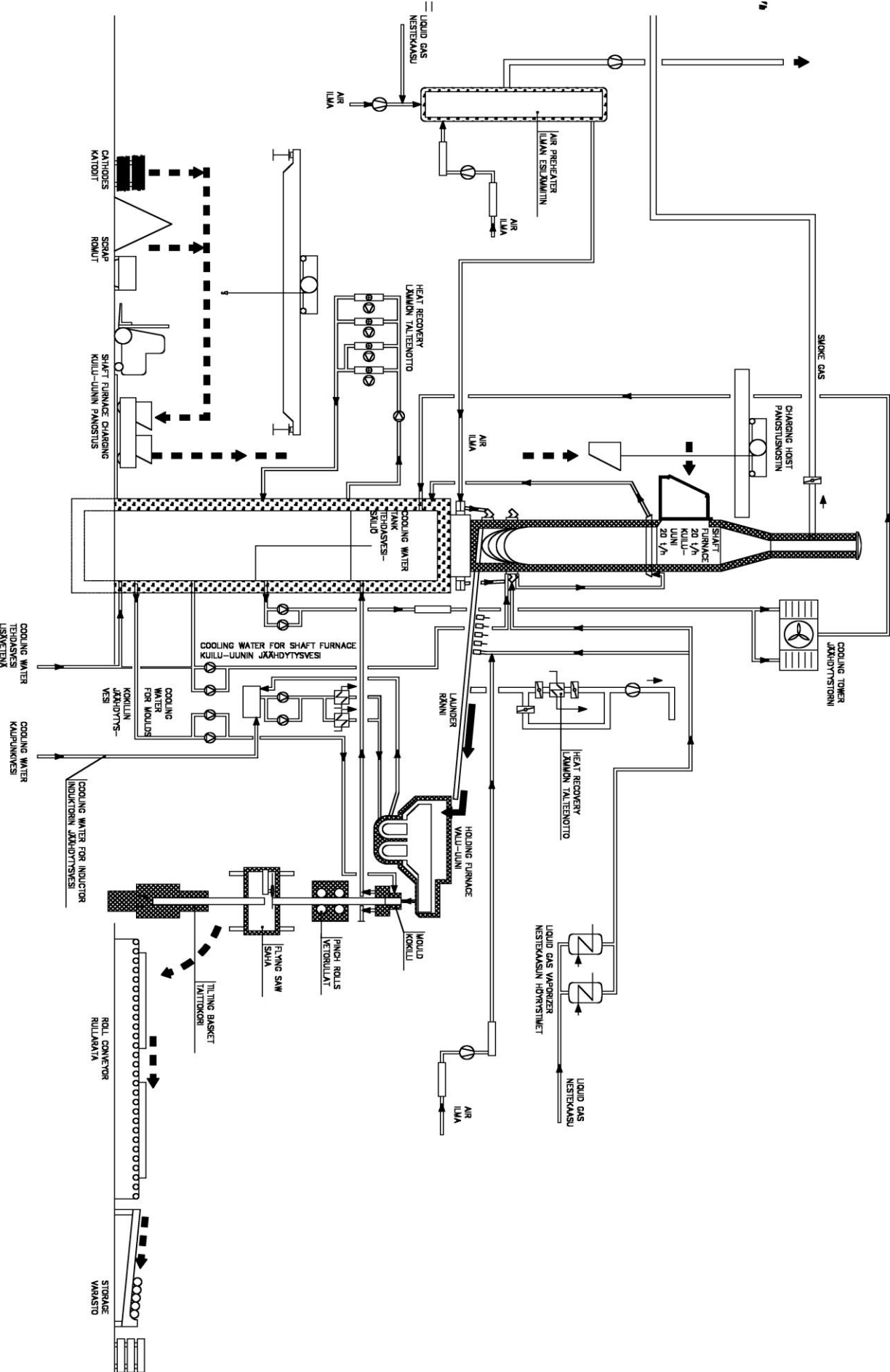
Talouselämän www-sivut. Viitattu 20.1.2016. http://www.taloussanommat.fi/sivu.php?page_id=1?

Technical description IGBT based transistor converter for SmartFS induction furnace. 2008. ABP-Induction.

Teknisiä tietoja ja taulukoita. 9 uud. p. 2000. Vaasa: ABB.

KUPARIVALIMON PROSESSIKAAVIO

COPPER FOUNDRY
PROCESS FLOW SHEET



AURUBIS FINLAND OY:N KUPARIVALIMON VALU-UUNIN
NIMELLISARVO LASKELMAT.

ABP-Induction:in ilmoittamat kilpiarvot IGBT-muuttajalle heidän testaaman induktorin kanssa, ja heidän ilmoittama kapasitanssi kahdeksalle kompensointikondensaattoreille.

Taulukko 6. Induktorin kilpiarvot

Suure	Arvo
Teho	500 kW
Jännite	770 V
Virta	1780 A
Taajuus	42 Hz
Kapasitanssi	8x1.18 mF=9.44 mF

Lasketaan induktorin loput nimellisarvot annettujen arvojen perusteella.

Lasketaan näennäisteho S

$$S = UI = 770 \text{ V} * 1780 \text{ A} = 1370600 \text{ VA} \quad (4.2)$$

$$S = 1.371 \text{ MVA}$$

Lasketaan tehokerroin $\cos(\varphi)$

$$\cos(\varphi) = \frac{P}{S} = \frac{500 \text{ kW}}{1.3705 \text{ MVA}} = 0.3648 \quad (4.3)$$

Ratkaistaan ja lasketaan kulma φ sen kosinin avulla

$$\varphi = \cos^{-1}(0.364) = 68.65^\circ \quad (4.4)$$

Ratkaistaan ja lasketaan loisteho Q näennäistehon kaavasta

$$S = \sqrt{P^2 + Q^2} \quad (4.5)$$

$$\rightarrow Q = \sqrt{S^2 - P^2} = 1276144 \text{ VAr} \quad (4.6)$$

$$Q = 1.276 \text{ MVar}$$

Ratkaistaan ja lasketaan resistanssi R pätötehon kaavasta

$$P = UI = (IR) * I = I^2R \quad (4.7)$$

$$\rightarrow R = \frac{P}{I^2} = \frac{500 \text{ kW}}{1780 \text{ A}^2} = 0.1578 \Omega \quad (4.8)$$

Ratkaistaan ja lasketaan induktanssi L resonanssitaajuuden kaavasta.

$$f = \frac{1}{2\pi\sqrt{LC}} \quad (4.9)$$

$$\rightarrow L = \frac{1}{4\pi^2 * C * f^2} = \frac{1}{4\pi^2 * 9.44 \text{ mF} * 42 \text{ Hz}^2} = 0.001521 \text{ H} \quad (5.0)$$

Lasketaan induktiivinen reaktanssi X_L

$$X_L = 2\pi fL = 2\pi * 42 \text{ Hz} * 1.52 \text{ mH} = 0.4014 \Omega \quad (5.1)$$

Lasketaan kondensaattoriparistojen kapasitiivinen reaktanssi X_C

$$X_C = \frac{1}{2\pi fC} = \frac{1}{2\pi * 42 \text{ Hz} * 9.44 \text{ mF}} = 0.4014 \Omega \quad (5.2)$$

AURUBIS FINLAND OY:N KUPARIVALIMON VALU-UUNIN
KOMPENSOINTI LASKELMAT IGBT-MUUTTAJAKÄYTÖSSÄ.

Kompensoinnin toteuttaminen IGBT-muuttaja käytössä kolmen portaan menetelmällä. Portaat 2 Hz:n väleillä.

Arvioidaan ensin induktorin kulumista nykyisen kahden vuoden aikana. Tiedämme että taajuus uuni-kompensointipiirissä on noussut uunin eliniän loppuvaiheessa noin 48 Hz:n tienoille.

$$L = \frac{1}{4\pi^2 * C * f^2} = \frac{1}{4\pi^2 * 9.44 \text{ mF} * 48 \text{ Hz}^2} = 0.001165 \text{ H} \quad (5.3)$$

$$L = 1.165 \text{ mH}$$

Nimellisen induktanssin ollessa 1.521 mH, on kuluneen induktorin induktanssi n 73.37 % alkuperäisestä.

1. Porras.

Lasketaan nimellisarvoista muuttunut induktanssi kahden hertsin portaalla.

$$L = \frac{1}{4\pi^2 * C * f^2} = \frac{1}{4\pi^2 * 9.44 \text{ mF} * 44 \text{ Hz}^2} = 0.001386 \text{ H} \quad (5.4)$$

$$L = 1.386 \text{ mH}$$

Jos nyt halutaan palauttaa piirin resonanssitaajuudeksi sama nimellinen 42 Hz muuttuneella induktanssilla, täytyy kapasitanssia muuttaa. Lasketaan kapasitanssin (kompensoinnin) muutos tarve.

$$C = \frac{1}{4\pi^2 * L * f^2} = \frac{1}{4\pi^2 * 1.386 \text{ mH} * 42 \text{ Hz}^2} = 0.01036 \text{ F} \quad (5.5)$$

$$C = 10.36 \text{ mF}$$

Nimellisen kapasitanssin ja ensimmäisen portaan vaatiman kapasitanssin erotus

$$C = C_1 - C_n = 10.36 \text{ mF} - 9.44 \text{ mF} = 0.92 \text{ mF} \quad (5.6)$$

Ensimmäisessä portaassa kapasitanssia lisätään **0.92 mF**

Kompensoinnin tuoma virranlisäys. Lasketaan uuden kapasitanssin kapasitiivinen reaktanssi ja sen avulla loisteho, kokonaisteho sekä kokonaisvirta piirissä.

$$X_c = \frac{1}{2\pi f C} = \frac{1}{2\pi * 42 \text{ Hz} * 10.36 \text{ mF}} = 0.3658 \Omega \quad (5.7)$$

$$Q = \frac{U^2}{X_c} = \frac{770 \text{ V}^2}{0.3658 \Omega} = 1620831 \text{ VAr} \quad (5.8)$$

$$Q = 1.621 \text{ MVAr}$$

$$S = \sqrt{P^2 + Q^2} = \sqrt{500 \text{ kW}^2 + 1.621 \text{ MVAr}^2} = 1696199 \text{ VA} \quad (5.9)$$

$$S = 1.696 \text{ MVA}$$

$$I = \frac{S}{U} = \frac{1.696 \text{ MVA}}{770 \text{ V}} = 2203 \text{ A} \quad (6.0)$$

Nimellisvirran ja ensimmäisen portaan kokonaisvirran erotus

$$I = I_1 - I_n = 2203 \text{ A} - 1780 \text{ A} = 423 \text{ A} \quad (6.1)$$

Virran lisäys ensimmäisellä portaalla kapasitanssin lisääntyessä **423 A**

2. Porras

Lasketaan ensimmäisen portaan kapasitanssin avulla muuttunut induktanssi ja sen jälkeen kapasitanssin lisäys, jotta saavutetaan sama 42 Hz:n resonanssitaajuus.

$$L = \frac{1}{4\pi^2 * 10.36 \text{ mF} * 44 \text{ Hz}^2} = 0.001263 \text{ H} \quad (6.2)$$

$$L = 1.263 \text{ mH}$$

$$C = \frac{1}{4\pi^2 * 1.2629 \text{ mH} * 42^2} = 0.01137 \text{ F} \quad (6.3)$$

$$C = 11.37 \text{ mF}$$

Ensimmäisen portaan ja vaadittavan kapasitanssin erotus

$$C = C_2 - C_1 = 11.37 \text{ mF} - 10.36 \text{ mF} \quad (6.4)$$

$$C = 1.01 \text{ mF}$$

Toisessa portaassa kapasitanssia lisätään **1.01 mF**

Virranlisäys. Lasketaan toisen portaan kapasitanssin kapasitiivinen reaktanssi ja sen avulla loisteho, kokonaisteho sekä kokonaisvirta piirissä.

$$X_c = \frac{1}{2\pi * 42 \text{ Hz} * 11.37 \text{ mF}} = 0.3333 \Omega \quad (6.5)$$

$$Q = \frac{770 V^2}{0.3333 \Omega} = 1778877 \text{ VAr} \quad (6.6)$$

$$Q = 1.779 \text{ MVAr}$$

$$S = \sqrt{500 \text{ kW}^2 + 1.779 \text{ MVAr}^2} = 1847810 \text{ VA} \quad (6.7)$$

$$S = 1.848 \text{ MVA}$$

$$I = \frac{1.848 \text{ MVA}}{770 \text{ V}} = 2399 \text{ A} \quad (6.8)$$

Nimellisvirran ja toisen portaan kokonaisvirran erotus

$$I = I_2 - I_n = 2399 \text{ A} - 1780 \text{ A} = 619 \text{ A} \quad (6.9)$$

Virran lisäys toisella portaalla kapasitanssin lisääntyessä **619 A**

3. Porras

Lasketaan toisen portaan kapasitanssin avulla muuttunut induktanssi ja sen jälkeen kapasitanssin lisäys, jotta saavutetaan sama 42 Hz:n resonanssitaajuus.

$$L = \frac{1}{4\pi^2 * 11.37 \text{ mF} * 44 \text{ Hz}^2} = 0.001151 \text{ H} \quad (7.0)$$

$$L = 1.151 \text{ mH}$$

$$C = \frac{1}{4\pi^2 * 1.1151 \text{ mH} * 42^2} = 0.01247 \text{ F} \quad (7.1)$$

$$C = 12.47 \text{ mF}$$

Kolmannen portaan ja vaadittavan kapasitanssin erotus

$$C = C_3 - C_2 = 12.47 \text{ mF} - 11.37 \text{ mF} \quad (7.2)$$

$$C = 1.1 \text{ mF}$$

Kolmannessa portaassa kapasitanssia lisätään **1.1 mF**.

Kompensoinnin tuoma virranlisäys. Lasketaan kolmannen portaan kapasitanssin kapasitiivinen reaktanssi ja sen avulla loisteho, kokonaisteho sekä kokonaisvirta piirissä.

$$X_C = \frac{1}{2\pi * 42 \text{ Hz} * 12.47 \text{ mF}} = 0.3039 \Omega \quad (7.3)$$

$$Q = \frac{770 V^2}{0.3039 \Omega} = 1950970 \text{ VAr} \quad (7.4)$$

$$Q = 1.951 \text{ MVAr}$$

$$S = \sqrt{500 \text{ kW}^2 + 1.951 \text{ MVAr}^2} = 2014021 \text{ VA} \quad (7.5)$$

$$S = 2.014 \text{ MVA}$$

$$I = \frac{2.014 \text{ MVA}}{770 \text{ V}} = 2615 \text{ A} \quad (7.6)$$

Nimellisvirran ja kolmannen portaan kokonaisvirran erotus

$$I = I_3 - I_n = 2617 \text{ A} - 1780 \text{ A} = 835 \text{ A} \quad (7.7)$$

Virran lisäys kolmannella portaalla kapasitanssin lisääntyessä **835 A**.

AURUBIS FINLAND OY:N KUPARIVALIMON VALU-UUNIN
KOMPENSOINTI LASKELMAT VARAMUUNTAJA KÄYTÖSSÄ

Kompensoinnin toteuttaminen varamuuntajalla verkontaajuudella. Lasketaan ensiksi uunin- ja kompensointipiirin vaatima kapasitanssi uudella induktorilla (nimellisarvoilla) ja tämän jälkeen vastaavasti kolmella eri portaalla kahden hertsin välein.

Arvioidaan ensin varamuuntajan 400 V:n jännitteellä saatavaa tehoa uuni- ja kompensointipiiristä uudella induktorilla. Ratkaistaan pätötehon kaavasta seuraava muoto, josta pystymme tehon laskemaan.

$$P = UI \cos \varphi = \frac{U^2}{\sqrt{R^2 + X^2}} * \cos \varphi = \frac{U^2}{\sqrt{R^2 + X^2}} * \frac{R}{\sqrt{R^2 + X^2}} = \frac{U^2 R}{\sqrt{R^2 + X^2}^2} \quad (7.8)$$

$$\rightarrow P = \frac{U^2 R}{R^2 + X^2}$$

Käytetään uuden induktorin resistanssia ja reaktanssia tehon laskemisessa

$$P = \frac{U^2 R}{R^2 + X^2} = \frac{400 V^2 * 0.1578 \Omega}{0.1578 \Omega^2 + 0.4014 \Omega^2} = 135726 W \quad (7.9)$$

$$P = 135.7 kW$$

Uudella induktorilla varamuuntajakäytössä saatu teho on siis noin 136 kW.

Nimellinen porras

Lasketaan uudella induktorilla vaadittava kompensoinnin määrä.

$$C = \frac{1}{4\pi^2 * L * f^2} = \frac{1}{4\pi^2 * 1.52 \text{ mH} * 50 \text{ Hz}^2} = 0.006665 F \quad (8.0)$$

$$C = 6.665 mF$$

Uuden induktorin vaatima kapasitanssi verkontaajuudella.

$$C = C - C_n = 6.665 mF - 9.44 mF = -2.775 mF \quad (8.1)$$

Uudella induktorilla kapasitanssia joudutaan poistamaan nimellisestä 2.775 mF. Kahden kondensaattoripariston poistolla päästään lähimpään tulokseen, 9.44 mF - 2 * 1.18 mF = **7.08 mF** kapasitanssiin, kun haluttu määrä oli **6.665 mF**

1. Porras

Ensimmäisen portaan induktanssi

$$L = \frac{1}{4\pi^2 * 9.44 \text{ mF} * 44 \text{ Hz}^2} = 0.001386 \text{ H} \quad (8.2)$$

$$L = 1.386 \text{ mH}$$

Ensimmäisen portaan vaatima kapasitanssi

$$C = \frac{1}{4\pi^2 * 1.386 \text{ mH} * 50 \text{ Hz}^2} = 0.007310 \text{ F} \quad (8.3)$$

$$C = 7.31 \text{ mF}$$

Vaadittavan ensimmäisen portaan kapasitanssin ja nimellisen kapasitanssin erotus

$$C = C_1 - C_n = 7.31 \text{ mF} - 9.44 \text{ mF} = -2.13 \text{ mF} \quad (8.4)$$

Ensimmäisellä portaalla kapasitanssia joudutaan poistamaan nimellisestä 2.13 mF.

Kahden kondensaattoripariston poistolla päästään lähimpään tulokseen eli $9.44 \text{ mF} - 2 * 1,18 \text{ mF} = \mathbf{7.08 \text{ mF}}$ kapasitanssiin, kun haluttu määrä oli **7.310 mF**

2. Porras

Toisen portaan induktanssi

$$L = \frac{1}{4\pi^2 * 9.440 \text{ mF} * 46 \text{ Hz}^2} = 0.001268 \text{ H} \quad (8.5)$$

$$L = 1.268 \text{ mH}$$

Toisen portaan vaatima kapasitanssi

$$C = \frac{1}{4\pi^2 * 1.268 \text{ mH} * 50 \text{ Hz}^2} = 0.007991 \text{ F} \quad (8.6)$$

$$C = 7.991 \text{ mF}$$

Vaadittavan toisen portaan kapasitanssin ja nimellisen kapasitanssin erotus

$$C = C_2 - C_n = 7.991 \text{ mF} - 9.44 \text{ mF} = -1.449 \text{ mF} \quad (8.7)$$

Toisella portaalla kapasitanssia joudutaan poistamaan piiristä 1.449 mF. Yhden kondensaattoripariston poistolla päästään lähimpään tulokseen eli $9.44 \text{ mF} - 1 * 1,18 \text{ mF} = \mathbf{8.26 \text{ mF}}$ kapasitanssiin, kun haluttu määrä oli **7.991 mF**

3. Porras

Kolmannen portaan induktanssi

$$L = \frac{1}{4\pi^2 * 9.440 \text{ mF} * 48 \text{ Hz}^2} = 0.001165 \text{ H} \quad (8.8)$$

$$L = 1.165 \text{ H}$$

Kolmannen portaan vaatima kapasitanssi

$$C = \frac{1}{4\pi^2 * 1.165 \text{ mH} * 50 \text{ Hz}^2} = 0.008697 \text{ F} \quad (8.9)$$

$$C = 8.697 \text{ mF}$$

Vaadittavan kolmannen portaan kapasitanssin ja nimellisen kapasitanssin erotus

$$C = C_3 - C_n = 8.697 \text{ mF} - 9.440 \text{ mF} = -0.743 \text{ mF} \quad (9.0)$$

Kolmannella portaalla kapasitanssia joudutaan poistamaan piiristä 0.743 mF. Yhden kondensaattoripariston poistolla päästään lähimpään tulokseen eli $9.44 \text{ mF} - 1 * 1,18 \text{ mF} = \mathbf{8.26 \text{ mF}}$ kapasitanssiin, kun haluttu määrä oli **8.697 mF**