

Ville Pulkkinen

Selvitys suurjännitekäyttöjen modernisointi- mahdollisuuksista voimalaitoksella

Metropolia Ammattikorkeakoulu

Insinööri (AMK)

Sähkötekniikan koulutusohjelma

Insinöörityö

30.3.2015

Tekijä Otsikko Sivumäärä Aika	Ville Pulkkinen Selvitys suurjännitekäyttöjen modernisointimahdollisuuksista voimalaitoksella 51 sivua + 3 liitettä 30.3.2015
Tutkinto	Insinööri (AMK)
Koulutusohjelma	Sähkötekniikan koulutusohjelma
Suuntautumisvaihtoehto	Sähkövoimatekniikka
Ohjaajat	Sähkömestari Timo Tusa Lehtori Jukka Karppinen
<p>Insinööriyössä tarkasteltiin hiilivoimalaitoksella sijaitsevien suoraan voimalaitoksen 6 kV:n sähköverkkoon kytkettyjen ja mekaanisesti kahdella eri säätölaitteella kuristettujen kiertokaasupuhallinkäyttöjen modernisointimahdollisuuksia. Lähtökohtana työssä oli vain käyttöjen moottorien ja tilavuusvirtauksen säädön nykyaikaistaminen, eikä varsinaisiin keskipakopuhaltimiin ollut tarkoitus tehdä muutoksia.</p> <p>Puhaltimien alhaisten teho vaatimusten takia suurjännite ei ollut kannattava vaihtoehto, joten uudeksi jännitetasoksi valittiin 400 V, joka oli käytännön syistä ainoa vaihtoehto kolmivaiheisen pienjännitekuorman käyttöjännitteeksi voimalaitoksella. Vanhojen suurjännitemoottoreiden mitattua tehoa vertailtiin kiertokaasuprosessin tärkeimpien suureiden arvoihin, ja uudet moottorit sekä taajuusmuuttajat valittiin sillä oletuksella, että kiertokaasuprosessissa todennäköisesti esiintyvä virtaaman maksimi-arvo on lähellä alkuperäistä mitoitusarvoa.</p> <p>Uuden moottori- ja taajuusmuuttajayhdistelmän valintaprosessissa kiinnitettiin huomiota myös voimalaitokselle tulevaisuudessa tapahtuviin muutoksiin, kuten jatkuvaan pelletin seospolttoon, sekä palamisprosessissa aiheutuvien typpioksidipäästöjen pienentämiseen. Nämä muutokset aiheuttivat epävarmuutta valintaprosessiin, koska niiden aiheuttama vaikutusta kiertokaasun tarpeeseen ei voitu tietää täysin varmasti.</p> <p>Modernisointityön taloudellisia vaikutuksia tarkasteltiin investointikustannusten sekä nopeussäädetyt käytön tuoman säästön kannalta, ja uuden käytön kuluttaman sähköenergian arvioitiin olevan noin 30 % pienempi kuin vanhan, mikä tekee muutostyöstä taloudellisesti kannattavan. Taloudellisten säästöjen lisäksi myös vanhojen säätölaitteiden korvaaminen pelkällä puhaltimen nopeussäädöllä tuo myös luotettavuutta prosessiin laitteiden kokonaismäärän vähentyessä.</p>	
Avainsanat	suurjännitemoottori, taajuusmuuttaja, keskipakopuhallin

Author Title Number of Pages Date	Ville Pulkkinen Investigation on the Possibilities of Modernizing High Voltage Drives on a Power Plant 51 pages + 3 appendices 30 March 2015
Degree	Bachelor of Engineering
Degree Programme	Electrical Engineering
Specialisation option	Electrical Power Engineering
Instructors	Timo Tusa, Electrical Foreman Jukka Karppinen, Senior Lecturer
<p>The purpose of this thesis was to examine the possibilities of modernizing direct on line connected and mechanically, with two different devices throttled 6 kV flue gas recirculator fans, located in a coal fired power plant. The starting point for the modernization process was that only the motors and the way the volumetric flow was to be controlled were to be updated, and the centrifugal fans themselves would remain untouched.</p> <p>The low power requirements of the drives made new high voltage systems unfeasible and the new mains voltage was chosen to be 400 V, which was the only practical choice for driving 3-phase motors and other similar loads in the power plant. The power usage of the old high voltage motors were compared to the most important physical quantities that are involved in the flue gas process, and the new motors and variable frequency drives were chosen with the assumption that the maximum volumetric flow is going to be near the original operating point.</p> <p>While choosing the new motors and variable frequency drives, the upcoming changes to the power plant were also considered. These changes would include continuous burning of wood pellets alongside coal and the reduction of nitrogen oxides which are produced in the burning process. The total effect of the changes could not be known for certain and they caused some uncertainty to the process of selecting the new drive.</p> <p>The financial effects of the modernization were analyzed from the point of view of investment costs and the savings which are brought by the method of controlling speed of the fan instead of mechanically throttling the flow. The reduction in the usage of electrical energy was found to be approximately 30 %, which makes the modernization profitable from the economic point of view. Process-wise the modernization brings reliability because the number of needed devices is reduced and there are less parts that can break down during the operation of the flue gas recirculation fans.</p>	
Keywords	variable frequency drive, high voltage motor, centrifugal fan

Sisällys

Tiivistelmä

Abstract

Sisällys

Lyhenteet

1	Johdanto	1
2	Työhön liittyvä teoreettinen tausta	2
2.1	Aikaisemmat selvitykset	2
2.2	Oikosulkumoottori	3
2.3	Taajuusmuuttaja	6
2.3.1	Taajuusmuuttajan rakenne	6
2.3.2	Oikosulkumoottorin ohjaus ja säätö	8
2.4	Kuormatypit	10
2.5	Moottorin kuormitettavuus taajuusmuuttajakäytössä	12
2.6	Affiniteettisäännöt	14
3	Kiertokaasupuhallin ja siihen liittyvä vanha laitteisto	15
3.1	Kiertokaasupuhallin voimalaitosprosessissa	15
3.2	Käytön moottori	18
3.3	Puhallin	20
3.4	Sähkö- ja automaatioliityntä	22
3.5	Moottorilta todellisuudessa vaadittu teho	23
3.5.1	Päto-, lois- ja näennäisteho	23
3.5.2	Sähkövirta	26
3.5.3	Kulutettu sähköenergia	26
4	Uusi nopeussäädetty laitteisto	27
4.1	Tarvittava teho	27
4.2	Mekaaniset muutokset ja vaikutus prosessiin	28
4.3	Uusi moottori	29
4.4	Taajuusmuuttaja	33
4.5	Tehokaapelointi ja suojaus	35
4.6	Ohjauskaapelointi ja liityntä automaatiojärjestelmään	38
4.7	Muutokset 400 V:n kytkinlaitokselle	39
4.8	Vaikutukset voimalaitoksen pienjänniteverkkoon	40

5	Kustannukset, säästöt ja laitteiston lopullinen valinta	43
5.1	Investointi- ja purkukustannukset	43
5.2	Taajuusmuuttajakäytön tuoma säästö	45
5.3	Lopulliset laite- ja kaapelivalinnat	48
6	Yhteenveto	48
	Lähteet	50
	Liitteet	
	Liite 1. Voimalaitos- ja kiertokaasuprosessi	
	Liite 2. Voimalaitoksen sähköjärjestelmä	
	Liite 3. Kiertokaasupuhaltimen 1 (3NS11D01-M01) tehonmittaus	

Lyhenteet

DTC	Direct Torque Control. Suora momentinsäätö.
EMC	Electromagnetic Compability. Sähkömagneettinen yhteensopivuus.
FOC	Field Oriented Control. Magneettikenttäorientoitunut säätö.
HaB	Hanasaari B. Helen Oy:n voimalaitos.
I/O	Input/Output. Tiedonsiirto eri järjestelmän osien välillä.
IE	International Efficiency. Moottoreiden hyötysuhdeluokitus.
IGBT	Insulated Gate Bipolar Transistor. Puolijohdekomponentti.
IGCT	Insulated Gate Commutated Thyristor. Puolijohdekomponentti.
mmvp	Millimetri vesipatsasta. Paineen yksikkö.
NOx	Typhen oksideja kuvaava nimitys.
PWM	Pulse Width Modulation. Pulssinleveysmodulaatio.
THD	Total Harmonic Distortion. Harmoninen särö.
VSI	Voltage-Source Inverter. Jännitevälipiirillinen taajuusmuuttaja.

1 Johdanto

Tässä insinööriyössä selvitetään Helen Oy:n voimalaitoksella Hanasaari B (HaB) sijaitsevien kiertokaasupuhaltimien modernisointimahdollisuudet ja modernisoinnin kannattavuus. Kannattavuutta arvioidaan sekä taloudellisesti että voimalaitosprosessin kannalta, tarkastelemalla vanhaa sekä sille valittavaa korvaavaa laitteistoa ja muutoksen tuomaa säästöä.

Voimalaitos edustaa 70-luvun alun tekniikkaa ja tämän takia kyseessä olevat puhaltimet ovat kytketty suoraan voimalaitoksen 6 kV:n sähköverkkoon ja niiden tilavuusvirtausta rajoitetaan mekaanisesti kuristamalla. Ennen taajuusmuuttajien markkinoille tuloa oikosulkumoottorien tarkka nopeudensäätö oli käytännössä mahdotonta. Tämän vuoksi erilaisissa säätöä edellyttävissä käytöissä, kuten joissain pumppu- ja puhallinsovelluksissa, kuljetettavan aineen tilavuusvirtausta jouduttiin rajoittamaan mekaanisesti, esimerkiksi lisäämällä kanavaan tai putkeen virtausta rajoittava säätöventtiili tai pelti. Tapa on tehokas, mutta energiaa tuhlaava säätötapa moottorin pyöriessä jatkuvasti täydellä nopeudella. Tämän vuoksi uudet säätöä vaativat käytöt ovat useimmiten taajuusmuuttajaohjattuja.

Työssä käsiteltävien käyttöjen moottorit ovat olleet alusta asti ylimitoitettuja, ja muun muassa tämän takia ne ovat energiansäästön kannalta houkutteleva kohde. Ylimitoituksen ja säätötavan vuoksi modernisoinnin lähtökohtana on käyttöjen muuttaminen nopeussäädetyiksi. Siirtyminen nopeussäädettyyn laitteistoon helpottaa kunnossapitotöitä. Huoltoa vaativat laitteet, kuten puhaltimien tilavuusvirtauksen säädössä käytetyt mekaaniset säätölaitteet, on mahdollista jättää muutoksen yhteydessä pois mikä vähentää laitteiston huoltotarvetta.

Helen Oy ja Hanasaari B

Helen Oy kuulu Suomen suurimpien energiayhtiöiden joukkoon ja sen historia ulottuu 1900-luvun alkupuolelle. Hanasaari B on yksi Helen Oy:n omistamista voimalaitoksista, jonka pääpolttoaineena on kivihiili ja varapolttoaineena toimii raskas polttoöljy. Laitos on otettu käyttöön vuonna 1974, ja se toimii yhteistuotantoperiaatteella, eli voimalaitoksella tuotetaan samanaikaisesti sekä kaukolämpöä että sähköä, joiden nimellistehot ovat 420 MW sekä 240 MW. Tämän menetelmän avulla päästään huomattavasti

parempaan kokonaishyötysuhteeseen kuin pelkästään sähköä tuottavilla lauhdevoimailloilla, joita ovat esimerkiksi ydinvoimalat.

Voimalaitoksen rakenne muodostuu kahdesta kattilan ja turbogeneraattorin ympärille rakennetusta kokonaisuudesta, eli blokista, joiden tunnuksella ovat 3 ja 4. Blokit ovat pieniä poikkeavuuksia lukuun ottamatta identtisiä ja niitä pystytään ajamaan rinnan tai erikseen. Laitoksella on myös yhteinen osa, tunnukseltaan 8, johon kuuluu esimerkiksi hiilen kuljetukseen liittyvä laitteisto.

Kivihiihen lisäksi on laitoksella kokeiltu metsähakkeen ja pelletin polttamista. Hakkeen polttaminen jäi lyhyeksi kokeiluksi, mutta pelletin poltto alkoi hieman isommassa mittakaavassa vuonna 2012, kun voimalaitokselle asennettiin 100 m³ suuruinen pellettisiilo ja siihen liittyvä laitteisto. Tarkoituksena on kasvattaa pelletin osuutta käytetystä polttoaineesta lähitulevaisuudessa noin 5–7 % ja suunnitteilla onkin kahden huomattavasti suuremman lisäsiilon ja niihin liittyvän laitteiston rakentaminen entisen siilon lisäksi. Pellettilaitteiston rakennustyöt aloitetaan vuoden 2015 aikana ja koko projektin pitäisi olla valmis vuoden 2016 loppuun mennessä. Myös voimalaitoksen typpipäästöihin (NOx) tullaan kiinnittämään tulevaisuudessa huomiota ja päästöjen vähentämiseen suunniteltu laitteisto tullaan asentamaan niin ikään vuoden 2015 aikana.

2 Työhön liittyvä teoreettinen tausta

2.1 Aikaisemmat selvitykset

Hyötysuhteen ja energiatehokkuuden parantaminen on jatkuva prosessi Hanasaari B:ssä, kuten myös muissakin voima- ja teollisuuslaitoksissa. Eri laitteiden ja kokonaisuuksien energiatehokkuuden parantamisesta on tehty voimalaitoksella useita selvityksiä, joista yksi kattavimmista on kauppa- ja teollisuusministeriön tukema Hanasaaren B-voimalaitoksen energia-analyysiraportti vuodelta 2012. Raportti sisältää energiansäästöön liittyviä laskelmia useista voimalaitoksella sijaitsevista sähkökäyttöistä ja mekaanisista laitteista sekä lukuisia voimalaitosprosesseihin liittyviä parannusmahdollisuuksia.

Raportissa käsitellään myös tämän insinööriyön aiheena olevia kiertokaasupuhaltimia sekä niiden mahdollista muutosta taajuusmuuttajakäyttöiksi [1, s. 86]. Aihetta kuitenkin

käsitellään melko lyhyesti ja sillä olettamuksella, että uudistetut käytöt olisivat nimellisjännitteeltään 690 V [1, s. 87]. Raportissa ei myöskään oteta kantaa muutoksen aiheuttamiin sähkötekniisiin vaikutuksiin voimalaitoksella, joihin tässä työssä tutustutaan tarkemmin. Tätä työtä voidaankin pitää syventävänä tai jatkoselvityksenä aiheesta.

2.2 Oikosulkumoottori

Vaihtosähköllä toimiva oikosulkumoottori, josta käytetään myös nimitystä induktiomoottori ja epätahtikone, on teollisuuden yksi yleisimmistä moottorityypeistä. Se on rakenteeltaan hyvin yksinkertainen, luotettava sekä halpa valmistaa, muun muassa koska laitteessa on liikkuvia osia hyvin pieni määrä. Oikosulkumoottorin rakenne muodostuu kahdesta pääosasta, staattorista ja roottorista, joissa kummassakin on käämitys.

Roottorin käämitys on usein häkkikäämitys, jonka kummatkin päät ovat oikosuljettu kupari- tai alumiinirenkaalla. Tästä johtuu nimitys oikosulkumoottori. Staattori on koneen paikallaan pysyvä, yleensä valurautaisista levyistä tehty osa. Sen sisälle sijoitetaan koneen pyörivä osa, roottori, joka lepää kahden koneen etu- (D) ja takaosaan (N) sijoitetun laakerin varassa. Roottorin takaosaan on myös kiinnitetty koneen jäähdytyksestä vastaava puhallinsiipi. Moottorin toiminta perustuu sähkömagneettiseen induktioon, minkä vuoksi koneen koko vääntömomentin aiheuttava voima siirtyy staattorin ja roottorin ilmvälän kautta sen akselille, eikä roottorille tuoda erillisiä johtimia. [2, s. 34.]

Koska sähkömagneettinen induktio edellyttää magneettivuon muutosta ajan suhteen yhtälön (1) mukaisesti, vaatii oikosulkumoottorin toiminta vaihtosähköä:

$$e = -\frac{d\Psi}{dt} \quad (1)$$

e on indusoitunut lähdejännite

Ψ on kelan käämivuo.

Kun staattorikäämitys liitetään sähköverkkoon, siinä rupeaa kulkemaan virta, joka puolestaan aiheuttaa magneettikentän. Tämä sinimuotoisesti vaihteleva magneettikenttä indusoi lähdejännitteen oikosuljettuun roottorikäämitykseen. Lähdejännite aiheuttaa roottorivirran, joka aikaansaa magneettikentän. Staattori- ja roottorikenttien välinen vaikutus aiheuttaa moottorin akselille vääntömomentin, ja roottori rupeaa pyörimään.

Lähtötilanteessa, koneen ollessa pysähdyksissä, roottorikäymistä leikkaavan magneettivuon muutosnopeus on suuri. Tämän vuoksi siihen indusoituu suuri lähdejännite, joka puolestaan aiheuttaa suuren sähkövirran. Roottorin pyörimisnopeuden kasvaessa leikkausnopeus hidastuu, ja tämä puolestaan aiheuttaa indusoituneen lähdejännitteen sekä virran pienenemisen. Tämä tarkoittaa sitä, että jos roottori pyörisi samaa tahtia staattorikentän kanssa, ei siihen muodostuisi lähdejännitettä. Jos lähdejännitettä ei ole, niin ei ole virtaa eikä vääntömomenttia.

Staattorin käämyksen rakenne määrää oikosulkumoottorin staattorikentän pyörimisnopeuden n_s . Staattorikentän pyörimisnopeutta kutsutaan usein myös synkroninopeudeksi ja se voidaan laskea seuraavalla yhtälöllä:

$$n_s = \frac{f}{p} \quad (2)$$

f on syöttävän sähköverkon taajuus

p on moottorin napapariluku.

Moottorin navat ovat magneettisia napoja, joiden määrää lisäämällä saadaan staattorikentän pyörimisnopeutta hidastettua taulukon 1 mukaisesti. Siinä luetellaan yleisimmät napapariluvut ja staattorikentän pyörimisnopeudet nimellistaajuuden ollessa 50 Hz.

Taulukko 1. Yleisimmät napaparimäärät oikosulkumoottoreissa

p [kpl]	N_s [rpm]
1	3 000
2	1 500
3	1 000
4	750
5	600
6	500

Staattorikentän ja roottorin todellisen pyörimisnopeuden erotus muodostaa koneen jättämän. Jättämää käsitellään usein suhteellisena eli suhteellisena jättämänä s :

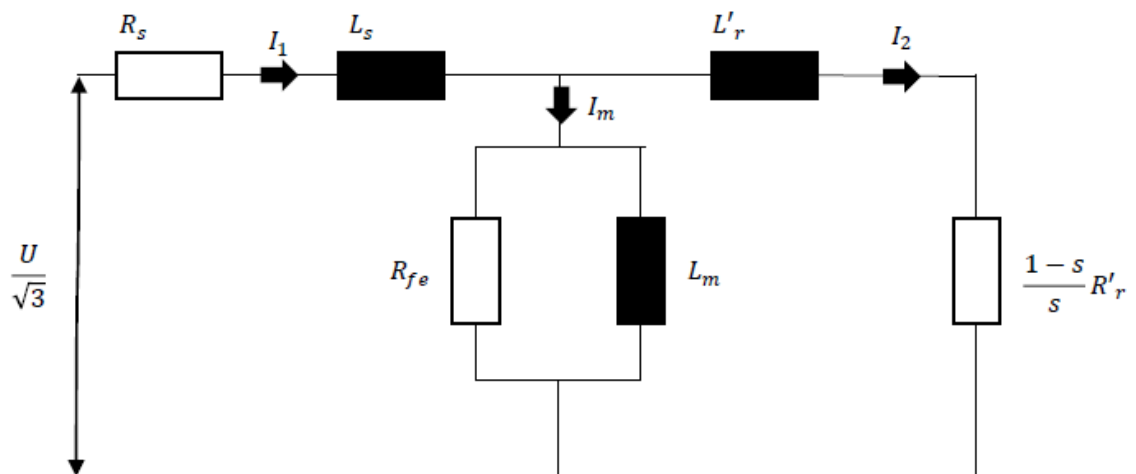
$$s = \frac{n_s - n_r}{n_s} * 100 \% \quad (3)$$

n_r on roottorin mekaaninen pyörimisnopeus.

Tyypillinen jättämä nimelliskuormalla vaihtelee moottorin tehon mukaan. Pienitehoisilla koneilla se saattaa olla jopa 5 %, kun taas suuritehoisilla moottoreilla jättämä jää usein alle yhden prosentin. [2, s. 35.]

Sijaiskytkentä

Oikosulkumoottorin ominaisuuksia ja varsinkin jättämän vaikutusta koneen käyttäytymiseen havainnollistaa kuvassa 1 esitettävä yksivaiheinen sijaiskytkentä. Sijaiskytkentää varten komponenttien arvot saadaan selville mittauksilla sekä suorittamalla koneelle tyhjäkäynti- ja oikosulkukoe. Komponentit ovat kuvattu staattorin jännitetasossa. Kuvassa R_s ja L_s ovat staattorin käämityksen resistanssi ja sen hajavuo. R_{fe} ja L_m kuvaavat rauta- ja magnetointihäviöitä. Roottoripiirin komponentteina ovat staattorin jännitetasoon redusoidut roottorin hajavuo L'_r , sekä koneen kuormaa kuvaava, jättämästä riippuvainen R'_r . [3, s. 63.]



Kuva 1. Oikosulkumoottorin yksivaiheinen sijaiskytkentä

Sijaiskytkennän avulla osa koneen tärkeimmistä suureista on helposti laskettavissa. Oletetaan, että moottorin kokonaisimpedanssi on selvitetty edellä mainituin kokein ja mittauksin, ja että moottorin kokonaisvirta I_1 on tiedossa. Tämän jälkeen, virranjakosääntöä noudattaen, voidaan laskea roottorivirta I_2 . Kun roottorivirta on tiedossa, voidaan edelleen laskea moottorin todellinen akseliteho P_{mek} sekä moottorin tuottama momentti T :

$$P_{mek} = 3RI^2 = 3 \frac{(1-s)}{s} R_r'^2 \quad (5)$$

$$T = \frac{P}{\omega} = \frac{P_{mek}}{2\pi n} \quad (6)$$

ω on mekaaninen kulmanopeus.

Kuten edellä esitetystä yhtälöistä voitiin huomata, on jättämisen merkitys oikosulkumootorin toiminnan kannalta suuri. Koneen teho ja sitä kautta momentti ovat riippuvaisia jättämisestä, ja tämä ominaisuus onkin yksi selkeimmistä eroista tahti- ja epätahtikoneiden välillä. [3, s. 68–69.]

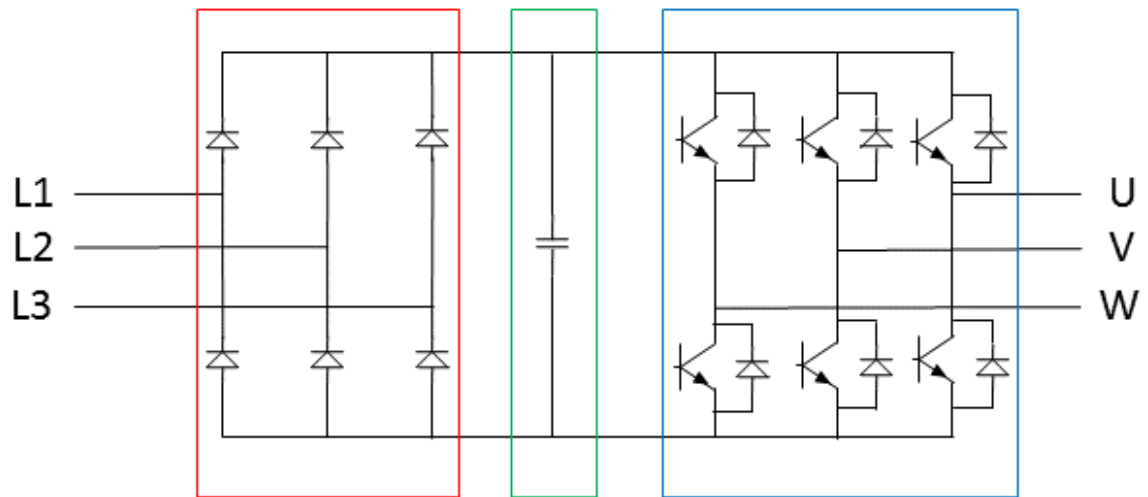
2.3 Taajuusmuuttaja

Taajuusmuuttaja on laite, jota käytetään erilaisten sähkömoottorityyppien pyörimisnopeuden säätöön. Koska taajuusmuuttajatyyppejä ja -rakenteita on hyvin monia erilaisia, käsitellään tässä luvussa tämän työn kannalta tärkeintä, eli 6-pulssista jännitevälipiirillistä (VSI) taajuusmuuttajaa.

2.3.1 Taajuusmuuttajan rakenne

Taajuusmuuttajan rakenne koostuu kolmesta pääosasta, joita ovat tasasuuntaaja, välipiiri ja vaihtosuuntaaja. Siihen liittyy myös runsaasti erilaista ohjaus- ja muuta elektronikkaa, mutta aihepiirin laajuuden vuoksi keskitytään tässä luvussa vain taajuusmuuttajan päärakenteeseen.

Tasasuuntaaja on taajuusmuuttajan suoraan syöttävään sähköverkkoon kytketty osa. Sen tehtävänä on muuttaa kolmivaiheinen vaihtojännite pulssimaiseksi tasajännitteeksi, joka siirtyy välipiiriin. 6-pulssisessa ohjaamattomassa tasasuuntaajassa on kuusi diodia ja sen nimitys tulee siitä, että yhden syöttöverkon vaihtosähkön jakson aikana tasasuunnatussa jännitteessä näkyy kuusi aaltoa, kun esimerkiksi perinteisessä yksivaiheisessa tasasuuntaussillassa pulsseja ja aaltoja on kaksi. Tasasuuntausosa esitetään kuvassa 2 (ks. seur. s.) punaisen suorakaiteen sisällä olevalla alueella.



Kuva 2. Taajuusmuuttajan yksinkertaistettu ja periaatteellinen rakenne

Kytkenän tasajännitteen keskiarvon suuruuden U_{dc} selvittämiseksi riittää, että integroidaan vain yksi kuudesta jakson aikana esiintyvistä pulssista: [4, s. 44–45.]

$$U_{dc} = \frac{1}{\frac{\pi}{3}} * \int_{-\frac{\pi}{6}}^{\frac{\pi}{6}} (\sqrt{2}U \cos \omega t) d\omega t = \frac{3}{\pi} \sqrt{2}U \approx 1,35U \quad (7)$$

U on syöttävän vaihtosähköverkon pääjännitteen tehollisarvo.

Taajuusmuuttajan yksinkertaistettu välipiiri esitettiin kuvassa 2 vihreän suorakaiteen sisällä. Se sisältää kondensaattoreita, jotka toimivat jännitteen varaajina. Ne myös tasoitavat tasasuuntaajasta tulevan pulssimaisen tasasähkön. Välipiirin kondensaattorit ovat yleensä elektrolyyttikondensaattoreita, koska niillä saavutetaan hyvä kapasitanssi C niiden kokoon nähden. Kapasitanssin laskentapa esitetään yhtälössä (8). Kondensaattori voidaan valmistaa esimerkiksi hyvin ohuesta alumiinifoliosta, jonka pinnalle muodostuu eristeenä ja katalyyttinä toimiva alumiinioksidikerros. [5, s. 1–2.]

$$C = \varepsilon \frac{A}{d} \quad (8)$$

ε on permittiivisyys

A on kondensaattorin johtavan osan pinta-ala

d on eristeineen halkaisija.

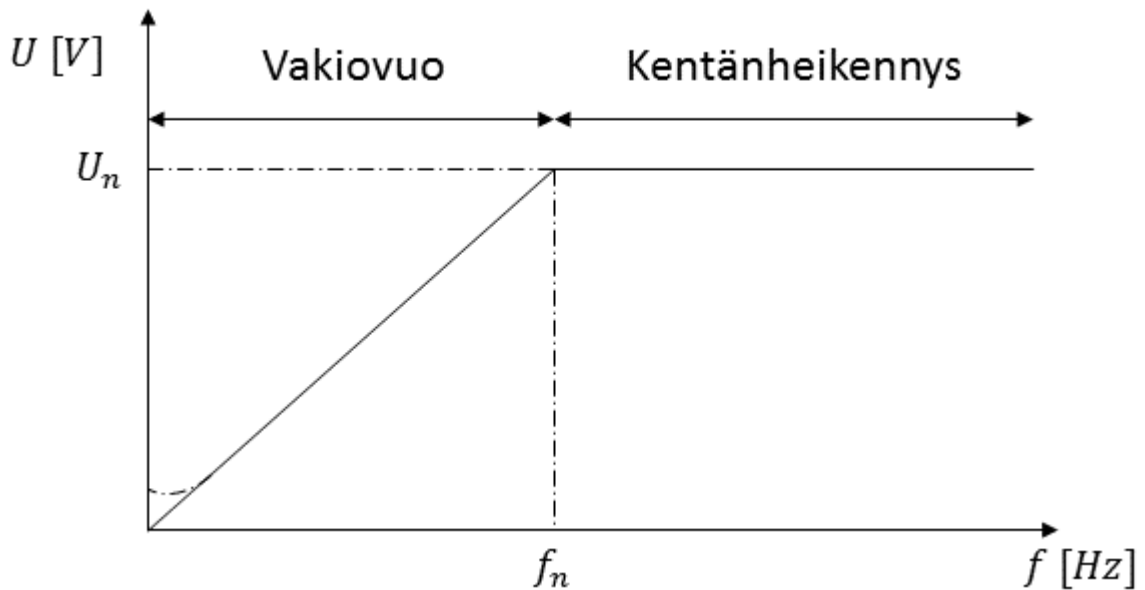
Elektrolyyttikondensaattoreiden huonona puolena mainittakoon niiden vaatima jatkuva jännite eristeen ylläpitämiseksi, jonka vuoksi taajuusmuuttajat eivät sovellu hyvin varastoitaviksi pitkiksi ajoiksi, vaan niiden välipiirien kondensaattorit vaativat pitkän varastointiajan jälkeen elvyttämistä.

Viimeisenä osana on kuvassa 2 (ks. ed. s.) esitetty sinisen suorakaiteen sisällä näkyvä alue, vaihtosuuntaaja. Se rakentuu tasasuuntaajan tapaan kuudesta puolijohdekomponentista, jotka poiketen tässä luvussa käsitellystä tasasuuntaajasta, ovat ohjattavia. Moderneissa taajuusmuuttajissa nämä ohjattavat puolijohdekytkimet, joita kutsutaan myös sähköisiksi venttiileiksi, ovat yleensä IGBT (*Insulated Gate Bipolar Transistor*) tai IGCT (*Integrated Gate Commutated Thyristor*) -tyyppisiä, joista IGBT on pienjännitesovelluksissa yleisin. Vaihtosuuntaajan tehtävänä on tehdä välipiirissä tasatusta ja suodatetusta tasajännitteestä vaihtojännitettä, joka viedään käytettävälle moottorille. Tämä tapahtuu ajoittamalla kytkimien asennonmuutokset tarkasti oikeille hetkille, jonka avulla saadaan tasasähköstä muodostettua sinimuotoista vaihtosähköä muistuttava signaali.

Jännitevälipiirillisissä taajuusmuuttajissa tämä tapahtuu yleensä käyttämällä PWM (*Pulse Width Modulation*) -menetelmää eli pulssinleveysmodulaatiota. Menetelmä perustuu jännitepulssien leveyden säätöön, mikä voidaan toteuttaa esimerkiksi käyttämällä sini-kolmioaaltovertailijaa, jossa on kolme 120 asteen vaihesiirrossa olevaa siniaaltoa sekä yksi kolmioaalto. Vertailija toimii seuraavanlaisesti: jos siniaallon arvo on suurempi kuin kolmioaallon, ohjataan vaihtosuuntaajassa tietty kytkinyhdistelmä kiinni, jotta moottorille saadaan halutunlainen jännitepulssi. Mitä suurempi on aaltomuotojen itseisarvojen erotus, sitä leveämpi on lähtevä pulssi. Jos taas kolmioaallon arvo on suurempi kuin siniaallon, asetetaan vaihtosuuntaajan kytkimet eri tilaan, joka vastaa haluttua vaihtosähkön jakson osaa. [4, s. 87–88.]

2.3.2 Oikosulkumoottorin ohjaus ja säätö

Moottorin ohjaus- ja säätötapoja on useita. Vanhin ja yksinkertaisin ohjaustapa on skaalariohjaus, joka perustuu jännitteen ja taajuuden suhteen pitämiseen vakiona, ilman mitään takaisinkytkentää moottorilta. Oikosulkumoottorin jännitteen ja taajuuden suhteen ollessa vakio, se tuottaa lähes koko vakiovuoalueella nimellismomenttinsa. Jos siis taajuutta lasketaan, joudutaan myös jännitettä laskemaan. Vastaavasti, kun taajuutta nostetaan, joudutaan myös jännitettä nostamaan.



Kuva 3. Taajuusmuuttajan skalaariohjauksen periaate

Menetelmä toimii aina moottorin nimellistaajuuteen asti, jonka jälkeen jännitettä ei pystytä enää nostamaan muun muassa eristeiden kestävyysden takia. Tämän vuoksi taajuuden ylittäessä sen nimellisarvon, staattorin magneettivuo rupeaa heikentymään, ja vastaavasti moottorin tuottama momentti heikkenee. Tätä nimellinopeuden ylittävää aluetta kutsutaan kentänheikennysalueeksi. Skalaariohjauksen periaate esitettiin kuvassa 3. Käytännössä lähes nolllataajuudella jännitteen täytyy olla staattorin resistanssin takia suurempi, kuin mitä kuvassa esiintyvän suoran mukaan se olisi, joten nopeudensäätö ei siis käyttyädy koko alueella täysin lineaarisesti. [6, s. 4-6.]

Muut taajuusmuuttajissa pääsääntöisesti käytetyt säätötavat ovat vektori- ja DTC (*Direct Torque Control*)-säätö. Kummatkin säätötavoista ovat skalaariohjausta huomattavasti kehittyneempiä, ja ne perustuvat moottorista tehtyyn matemaattiseen malliin. Tämä malli luodaan moottorin tunnistusajon (ID-ajo) yhteydessä, jossa voidaan määrittää suurin osa moottorin parametreista. Säätötavoista DTC toimii lähtökohtaisesti *open-loop*-periaatteella, eikä se siten välttämättä tarvitse moottorilta mitään takaisinkytkentää säilyttäen samalla hyvän dynaamisen ja staattisen säätötarkkuuden. Vektorisäädöstä on olemassa sekä *open-* että takaisinkytkennän sisältäviä *closed-loop*-tyylijä ratkaisuja.

Skalaariohjauksesta poiketen vektorisäädöllä voidaan säätää suoraan moottorin momenttia. Tämä tapahtuu tarkkailemalla moottorin ottamaa virtaa. Virta jaetaan kahteen

komponenttiin, joilla seurataan moottorin käämivuon arvoa sekä sen tuottamaa momenttia. Sääötapa siis mahdollistaa käämivuon ja momentinsäädön erikseen, kun skaarirohjauksessa pystyttiin vaikuttamaan ainoastaan moottorin jännitteen ja taajuuden suhteeseen. [7, s. 85–86]

DTC-säätö poikkeaa vektorisäädöstä siten, että siinä ohjataan suoraan moottorin käämivuota. Vuo jaetaan kahteen eri komponenttiin, jotka ovat roottori- (Ψ_r) ja staattori (Ψ_s) -komponentit. Käämivuon säätö perustuu yhtälössä (9) esitettävään tapaan laskea moottorin tuottama momentti T . Yhtälön muut osat pidetään vakiona ja vain roottori- ja staattorivuon välistä kulmaa γ säätämällä päästään vaikuttamaan sen tuottamaan momenttiin:

$$T = \frac{3}{2} p \frac{L_m}{L'_s L_r} |\Psi_r| |\Psi_s| \sin \gamma \quad (9)$$

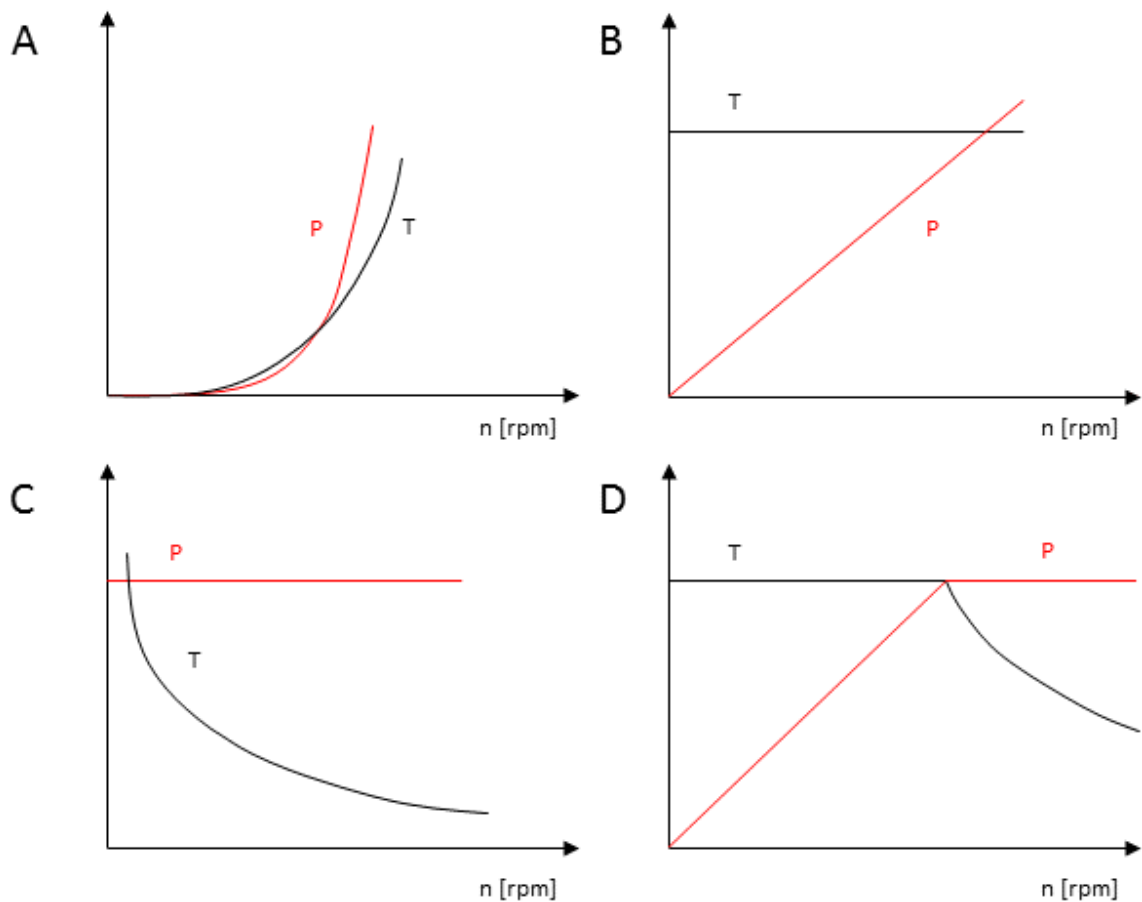
Oikosulkumoottorin roottorivuon pitkän aikavakion vuoksi säädössä ei tarvitse dynaamisissa tilanteissa säätää kuin staattorivuota, roottorivuon pysyessä lähes vakiona. Kuten vektorisäätökin, edellyttää DTC-säätö nopeaa mikroprosessoria taajuusmuuttajalta, jonka vuoksi edellä mainitut säätötavat ovatkin suhteellisen uusia verrattuna skaarirohjaukseen. [7, s. 87–88.]

2.4 Kuormatypit

Teollisuudessa esiintyy neljä tyypillistä kuormatyyppiä, joita ovat kuvassa 4 (ks. seur. s.) esitettävät neliöllinen momentti (A), vakiomomentti (B), vakiooteho (C) ja joistain käytöistä löytyvä kuormitustyyppi, jossa on sekä vakiooteho- että vakiomomenttikomponentti (D). Neliöllistä kuormitusta noudattavat teollisuuden yleisimmät kuormatypit eli pumput ja puhaltimet. Niissä momentti kasvaa nopeuden neliössä, kun taas teho kasvaa nopeuden kuutiossa. Vakiomomenttikuormia ovat esimerkiksi nosturit ja ruuvikompressorit. Momentti pysyy nopeuden kasvaessa vakiona, samaan aikaan, kun teho nousee lineaarisesti.

Vakiootehokuormissa, joita ovat muun muassa valssit ja aukirullaimet, teho pysyy vakiona momentin laskiessa pyörimisnopeuden neliössä. Viimeisenä on vakiomomentin ja tehon yhdistävä kuormatyyppi, tyypillisesti paperikone. Kuormassa momentti pysyy

vakiona, ja teho nousee lineaarisesti tiettyyn pisteeseen asti, minkä jälkeen momentti rupeaa laskemaan pyörimisnopeuden neliössä ja teho jää pysymään vakiona.



Kuva 4. Yleisimmät teollisuuden kuormatyypit

Edellä mainittujen kuormatyyppien lisäksi varsinkin teollisuudessa esiintyy paljon sellaisia kuormatyyppejä, jotka eivät käyttyä säännöllisesti, vaan vaihtelevat jatkuvasti. Tällaisia kuormia ovat esimerkiksi voimalaitosten hiilimyllyt, joissa saattaa esiintyä tietyissä tilanteissa varsin isoja käynnistysmomentin vaatimuksia sekä käytön aikana isohkoja momentin vaihteluita. [2, s. 95–97.]

2.5 Moottorin kuormitettavuus taajuusmuuttajakäytössä

Moottorin kuormitettavuuden alentuminen kentänheikennysalueella voidaan laskea seuraavan yhtälön mukaisesti:

$$T_2 = \frac{n_n}{n_2} * T_n \quad (10)$$

T_2 on uusi momentti

n_2 on nimellisnopeuden ylittävä arvo

n_n on moottorin nimellisnopeus

T_n on moottorin nimellismomentti.

Yhtälö kuvaa kuormitusmomentin alenemista kun nopeus ylittää pyörimisnopeuden nimellisarvon. Vastaavasti maksimimomentti T_{max} alenee kentänheikennysalueella pyörimisnopeuden neliössä seuraavan yhtälön mukaisesti:

$$T_{2max} = \left(\frac{n_n}{n_2}\right)^2 * T_{max} \quad (11)$$

Moottorin kentänheikennysalueella ottama virta I_{kh} voidaan laskea seuraavalla yhtälöllä:

$$I_{kh} = \frac{P_k}{P_n} I_n = \frac{T_k n_2}{T_n n_n} I_n \quad (12)$$

P_k on kuorman teho

P_n on moottorin nimellisteho

I_n on moottorin nimellisvirta

T_k on kuorman momentti.

Yhtälö edellyttää, että seuraavat ehdot ovat voimassa:

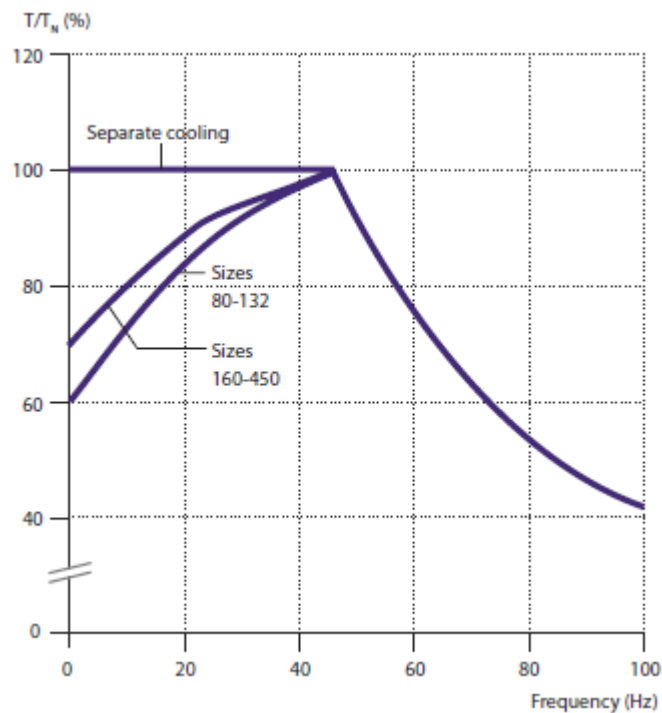
$$0,8 \frac{n_n}{n_2} T_n \leq T_k \leq 0,7 \left(\frac{n_n}{n_2}\right)^2 T_{max} \quad (13)$$

$$0,8P_n \leq P_k \leq 0,7 \frac{n_n}{n_2} P_{max} \quad (14)$$

P_{max} on moottorin maksimiteho

T_{max} on moottorin maksimimomentti.

Koska esimerkiksi neliöllisessä kuormassa tarvittava momentti kasvaa pyörimisnopeuden neliössä, maksimikuormitettavuuden raja tulee kyseisellä kuormatyyppillä kentänheikennysalueella melko nopeasti vastaan. Vastaavasti pyörimisnopeuden tiputtaminen nimellinopeutta alemmaksi rajoittaa käytön kuormitettavuutta termisistä syistä, jos erillistä tuuletusta ei käytetä. Kuvassa 5 esitetään ABB:n ilmoittama suuntaa antava moottorin kuormitettavuus, kun säätötapana on DTC ja moottorin lämpötilan nousuluokkana on B.



Kuva 5. Moottorin kuormitettavuus taajuuden funktiona [8, s. 17].

Moottorin alentuneella nopeudella ottama virta I voidaan laskea seuraavanlaisesti:

$$I = \frac{T_k}{T_n} I_n \quad (15)$$

Kuten kentänheikennysalueellakin, yhtälö edellyttää tiettyjen, seuraavaksi lueteltavien ehtojen täyttymistä: [2, s. 69–70.]

$$0,8T_n \leq T_k \leq 0,7T_{max} \quad (16)$$

2.6 Affiniteettisäännöt

Neliölliset kuormatyytit, eli pumput ja puhaltimet, noudattavat affiniteettisääntöjä. Ne ovat hyödyllisiä, jos tarkasteltavasta laitteesta ei ole saatavilla sen ominaiskäyrästä. Affiniteettisäännöt antavat kuitenkin vain suuntaa antavan arvion pumpun tai puhaltimen toiminnasta, koska ne muun muassa olettavat hyötysuhteen η pysyvän vakiona koko pyörimisnopeusalueella.

$$\frac{\dot{V}_1}{\dot{V}_2} = \frac{n_1}{n_2} \quad (17)$$

\dot{V} on virtaama

n on pumpun tai puhaltimen pyörimisnopeus.

Yhtälö (17) kuvaa, miten kuorman tilavuusvirtauksien suhde vastaa pyörimisnopeuden suhdetta.

$$\frac{H_1}{H_2} = \left(\frac{n_1}{n_2}\right)^2 \quad (18)$$

H on putkiston tai kanavan paine.

Vastaavasti yhtälössä (18) kuvataan, miten paineen suhde vastaa pyörimisnopeuksien suhteen neliötä.

$$\frac{P_1}{P_2} = \left(\frac{n_1}{n_2}\right)^3 \quad (19)$$

P on pumpun tai puhaltimen teho.

Viimeinen yhtälö kuvaa, miten puhaltimen tai pumpun tarvitsema teho käyttäytyy pyörimisnopeuden muuttuessa. Yhtälöstä voidaan huomata nopeussäädön kannattavuus, koska tarvittu teho muuttuu nopeuden kuutiossa. Kaikki yhtälöt edellyttävät, että laitteen siipipyörän koko pysyy vakiona. [9, s. 1-2.]

3 Kiertokaasupuhallin ja siihen liittyvä vanha laitteisto

Kaikki neljä tässä työssä käsiteltävää kiertokaasupuhallinta ovat samanlaisia. Tästä syystä luvussa esitellään tarkemmin vain yhteen kiertokaasupuhaltimeen liittyvä laitteisto.

3.1 Kiertokaasupuhallin voimalaitosprosessissa

Kiertokaasupuhaltimen tehtävänä on tarvittaessa nostaa kattilassa sijaitsevan välitulistimen lämpötilaa, käyttämällä palamisprosessissa muodostuneita savukaasuja hyödyksi. Kuvassa 6 näkyy kiertokaasupuhaltimen moottori, laakeripukki sekä osa kiertokaasukanavaa:

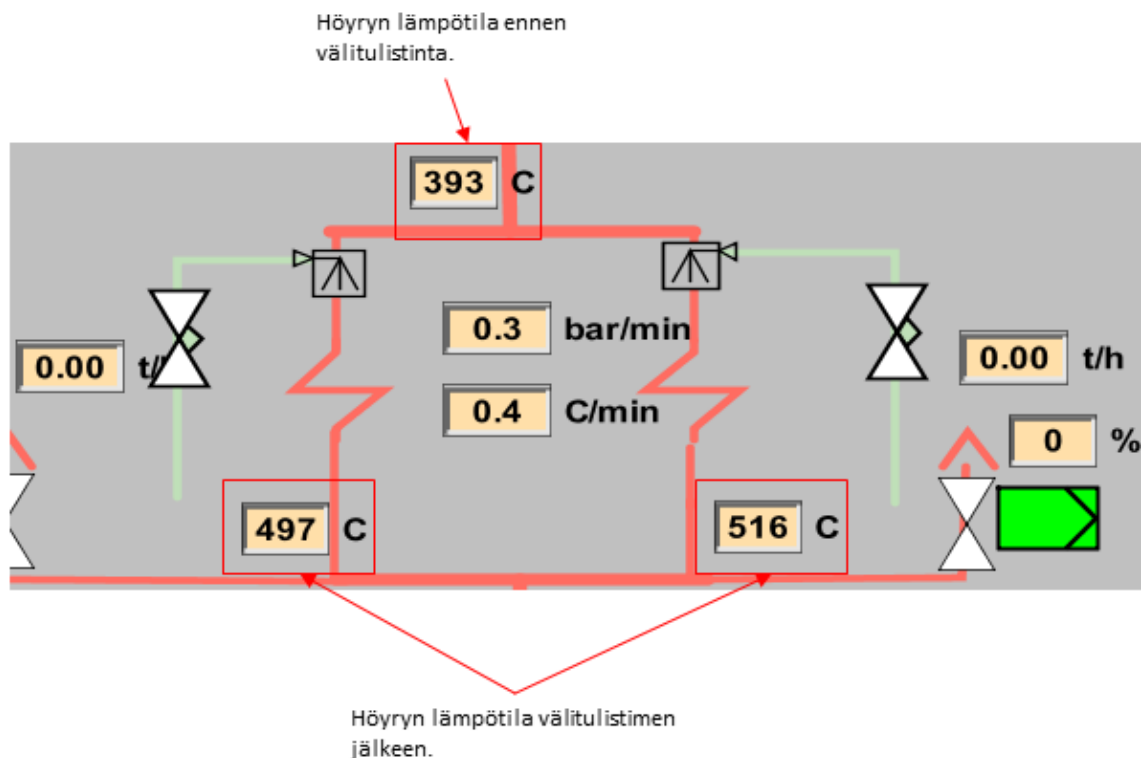


Kuva 6. Kiertokaasupuhallin

Kattilassa muodostunut ja kohti sähkösuodinta poistuva savukaasu ohjataan takaisin kattilan alaosaan, mikä aiheuttaa kierrätettävän kaasun lämpötilan nousun ja sen avulla myös välitulistimen lämpötilaa saadaan nostettua. Kierrätettävät savukaasut koostuvat lähinnä tpeestä, rikistä, hiilidioksidista sekä palamisprosessin jäännöshapesta. Kaasun lämpötila on noin 300 °C, ja se sisältää myös runsaasti pienhiukkasia palamisprosessista, mikä tekee siitä melko haastavan kaasutyyppin laitteiston kannalta.

Välitulistin sijoittuu voimalaitosprosessissa turbiinin korkea- ja matalapainepesän väliin. Kattilassa varsinaisilla tulistimilla kuumennettu höyry kulkee ensiksi turbiinin korkeapainepesän läpi, palaten takaisin kattilaan, jossa myös välitulistin sijaitsee. Välitulistimessa höyryä lämmitetään lisää ennen kuin se kuljetetaan turbiinin matalapainepesään (prosessikuvat, ks. liite 1).

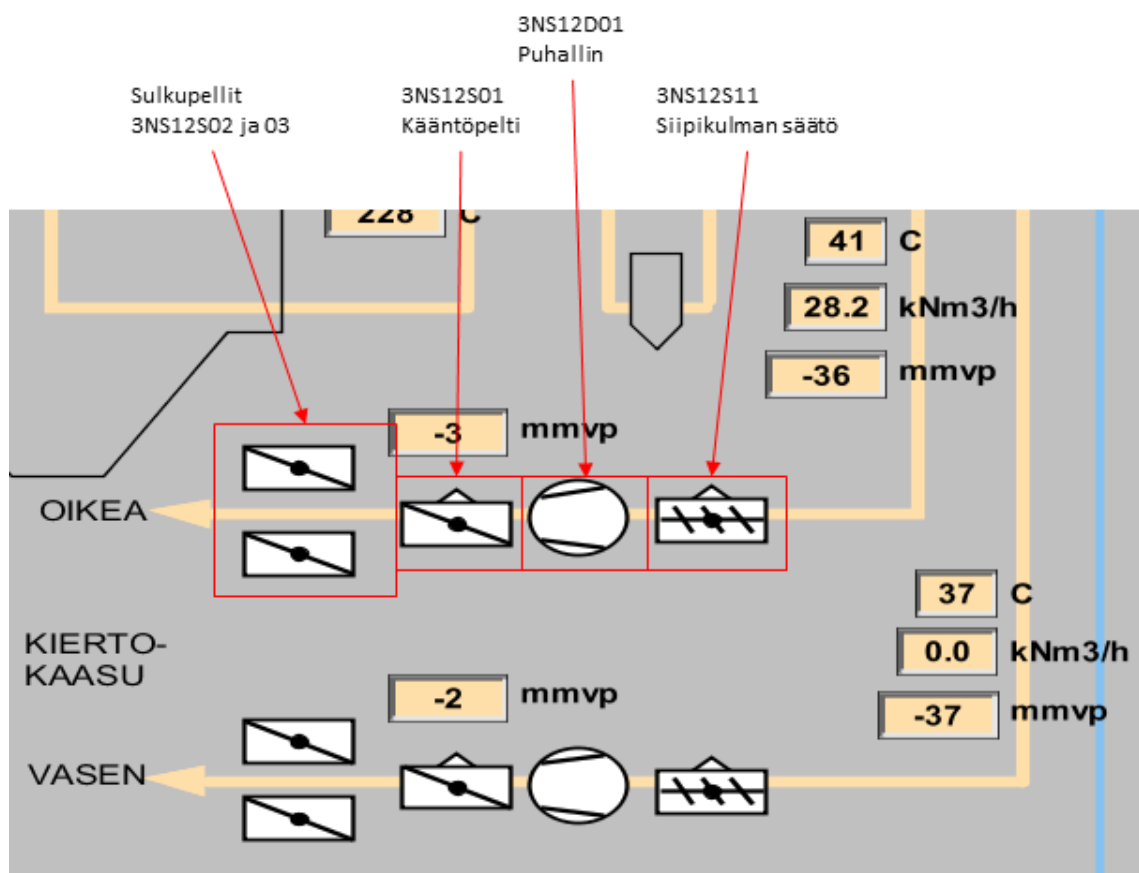
Kiertokaasupuhaltimia ei yleensä käytetä blokin ollessa täydellä teholla, vaan ne otetaan käyttöön, jos välitulistimen lämpötila alkaa jostain syystä laskemaan säädettyä arvoa alemmaksi, esimerkiksi kattilan ollessa likainen tai blokin tehon ollessa pieni. Kuvassa 7 näkyy välitulistimen vaikutus höyryn lämpötilaan:



Kuva 7. Välitulistin

Kiertokaasupuhallin 1 (3NS11D01) ohjaa savukaasua välitulistimen vasemmalle puolelle ja vastaavasti kiertokaasupuhallin 2 (3NS12D01) kohdistaa savukaasut välitulistimen oikealle puolelle. Kummallakin puhaltimella on oma kanava savukaasujen kierrättämistä varten.

Kiertokaasukanavan korkeus on 2,06 m, ja leveys on vastaavasti 1,6 m, joten kanavan poikkipinta-alaksi saadaan 3,3 m². Kanava sisältää venturi-ilmiötä hyödyntävän virtausmittauksen mahdollistavan kapeamman kohdan, jonka korkeus on 1,3 m, ja leveys on 1,01 metriä. Laitteiden periaatteellinen sijoitus kiertokaasukanavassa näkyy voimalaitoksen pääautomaatiojärjestelmästä otetusta kuvakaappauksesta kuvassa 8:



Kuva 8. Kiertokaasuprosessiin liittyviä laitteita

Savukaasuista poistetaan suurimmat hiukkaset karkeiden hiilisuodattimien avulla ennen niiden ohjaamista takaisin kattilaan. Kanavassa ennen kiertokaasupuhallinta sijaitseva säätötoimilaite (3NS12S11) vastaa puhaltimen johtosiipisäädöstä, ja sillä pidetään kääntöpellin (3NS12S01) paine-ero vakiona. Toimilaite on aseteltu pitämään paineeron arvo 140 millimetrissä vesipatsasta (mmvp) käytön aikana, ja se rajoittaa

tarvittaessa puhaltimelle tulevaa savukaasujen määrää. Tämän paine-eron avulla voidaan tarkkailla muun muassa, että virtaus kulkee kanavassa oikeaan suuntaan. Johtosiipisäätö yhdessä kääntöpellin kanssa mahdollistaa prosessin hienosäädön.

Kiertokaasukanavassa puhaltimen jälkeen sijaitsevalla kääntöpellillä rajoitetaan kattilaan menevää virtaamaa, joka toimii varsinaisena välitulistimen lämpötilan säätönä. Säätö toimii suoraan välitulistimen lämpötilan mukaan ja savukaasun tilavuusvirtausta ei prosessissa huomioida muuten kuin informaatiotietona. Prosessiin liittyy edellä mainittujen laitteiden lisäksi myös kaksi sulkupeltiä (3NS12S02 ja 03), jotka ovat sijoitettu kattilan alaosaan ja ne ohjaavat kanavan sulkevaa työntöpeltiä joko auki tai kiinni.

3.2 Käytön moottori

Käytön moottorina toimii Strömberg Oy:n valmistama HXUR/E 805G3 X B3-tyyppiä oleva suurjänniteoikosulkumoottori. Moottori on vaakasuoraan asennettu, ilmajäähdytteinen valurautamoottori, joka on liitetty kuormaan joustavan tappikytkimen avulla. Se on kytketty niin, että sen pyörimissuunta on D-päästä katsottuna myötäpäivään. Moottorin käämien lämpötilavalvonta on toteutettu kolmella PT-100-tyyppisellä anturilla.

Moottori kuuluu voimalaitoksen huolto-ohjelmaan ja sille suoritetaan kolmen vuoden sykleissä silmämääräinen kunnontarkistus tai perushuolto, johon kuuluu muun muassa laakereiden vaihto sekä virran ja värinän mittaus. Taulukossa 2 luetellaan moottorin käytön kannalta tärkeimmät nimellisarvot.

Taulukko 2. Kiertokaasupuhaltimen moottorin arvokilven arvoja

Akseliteho [kW]	250	Jännite [V]	6 000	Eristysluokka	B
Virta [A]	33	Tehokerroin	0,78	Käyttötapa	S1
Taajuus [Hz]	50	Pyörimisnopeus [rpm]	991		

Moottorin arvokilvessä ilmoitettu nimellisvirta on näennäisvirtaa. Se siis sisältää pätö- ja loiskomponentin. Näennäisvirran avulla voidaan laskea moottorin näennäisteho S :

$$S = \sqrt{3}UI = \sqrt{3} * 6\,000\text{ V} * 33\text{ A} = 342\,946\text{ VA} = 343,0\text{ kVA} \quad (20)$$

U on verkon pääjännite

I on moottorin virta.

Koska oikosulkumoottorin arvokilvessä ilmoitettu teho on moottorin oikea mekaaninen akseliteho, sen verkosta ottama sähköinen pätöteho P on häviöiden verran korkeampi:

$$P = \sqrt{3}UI \cos \varphi = \sqrt{3} * 6000 \text{ V} * 33 \text{ A} * 0,78 = 267\,498 \text{ W} = 267,5 \text{ kW} \quad (21)$$

$\cos \varphi$ on moottorin tehokerroin.

Moottorin verkosta ottama, sen lähinnä magnetointiin käyttämä, loisteho Q saadaan selvitettyä näennäis- ja pätötehon avulla:

$$S = \sqrt{P^2 + Q^2} \Rightarrow Q = \sqrt{S^2 - P^2} = \sqrt{343,0^2 \text{ kVA}^2 - 267,5^2 \text{ kW}^2} = 214,6 \text{ kVA} \quad (22)$$

Pätö- ja loistehon avulla moottorin näennäisteho voidaan esittää yleisesti sähkötekniikassa käytettynä kulmamuotoisena kompleksilukuna. Esitystapa on havainnollinen siinä suoraan näkyvän vaihesiirtokulman vuoksi:

$$S = P + jQ = 267,5 \text{ kW} + j214,6 \text{ kVA} = 343,0 \angle 38,7^\circ \text{ kVA} \quad (23)$$

j on imaginääriyksikkö.

Hyötysuhde η on moottorin akseli- sekä pätötehon suhde, joka kattaa mekaaniset häviöt, kuten moottorin puhaltimen sekä laakerien aiheuttamat häviöt. Hyötysuhde saadaan selville ratkaisemalla sitä kuvaava termi seuraavasta yhtälöstä:

$$P_{mek} = P\eta \Rightarrow \eta = \frac{P_{mek}}{P} = \frac{250\,000 \text{ W}}{267\,498 \text{ W}} = 0,93 \quad (24)$$

P_{mek} on moottorin tuottama akseliteho.

Moottorin pyörimisnopeudesta voidaan päätellä sen olevan kuusinapainen, eli siinä on kolme napaparia. Moottorin staattorikentän kiertonopeus n_s saadaan laskettua käyttämällä yhtälöä (2). Kertomalla sen tulos 60:llä, saadaan kentän pyörimisnopeus kierroksina minuuttia kohden:

$$n_s = \frac{f}{p} 60 = \frac{50 \text{ Hz}}{3} 60 = 1\,000 \text{ rpm} \quad (25)$$

f on syöttävän verkon taajuus

p on moottorin napaparien lukumäärä.

Kun tiedetään moottorin staattorin- ja roottorin pyörimisnopeus, pystytään laskemaan sen suhteellinen jättämä s :

$$s = \frac{n_s - n_r}{n_s} 100\% = \frac{1\,000 \text{ rpm} - 991 \text{ rpm}}{1\,000 \text{ rpm}} 100\% = 0,9\% \quad (26)$$

Teholtaan suurille moottoreille tyypillisesti tässä luvussa käsitelty moottori pyörii nimelliskuormallaan hyvin lähellä synkroninopeutta, ja tuottaa siten momentin T :

$$T = \frac{P_{mek}}{\omega} = \frac{250\,000 \text{ W}}{2\pi \left(\frac{991 \text{ rpm}}{60}\right)} = 2\,409 \text{ Nm} \quad (27)$$

ω on mekaaninen kulmanopeus.

3.3 Puhallin

Savukaasuja kierrättävä puhallin on Apparatebau Rothemühlen valmistama, tyypiltään D3-125/132,5-LK oleva keskipakopuhallin, jossa on taaksepäin kaartuvat siivet. Puhallintyyppi soveltuu hyvin ominaisuuksiltaan runsaasti pienhiukkasia sisältävien kaasujen, kuten savukaasujen kuljettamiseen. Keskipakopuhaltimen ominaisuuksiin kuulu sen kyky pitää kanavan tilavuusvirta vakiona, riippumatta kuljetettavan savukaasun tiheydestä [9, s. 1].

Taulukossa 3 (ks. seur. s.) luetellaan puhaltimen arvokilvestä löytyvät oleelliset tiedot, jotka kertovat puhaltimen nimellistoimintapisteen. Tilavuuspaino on ilmoitettu puhaltimen arvokilvessä listatussa 332 °C:een lämpötilassa ja tilavuuspainon yksikkö on muunnettu SI-järjestelmän mukaiseksi.

Taulukko 3. Kiertokaasupuhaltimen nimellisarvoja

Virtaama [m³/s]	51	Teho [kW]	162
Staattinen paine [mmvp]	240	Pyörimisnopeus [rpm]	980
Savukaasun lämpötila [°C]	332	Tilavuuspaino [N/m³]	5,84

Koska moottorin ja puhaltimen nimellispyörimisnopeudet ovat riittävän lähellä toisiaan, käytössä ei ole tarvetta vaihteelle. Nimellispyörimisnopeudella ja -teholla toimiessaan puhaltimen momentintarve T on:

$$T = \frac{162\,000\,W}{2\pi \left(\frac{980\,rpm}{60}\right)} = 1\,579\,Nm \quad (28)$$

Yhtälössä (29) ratkaistaan puhaltimen staattinen hyötysuhde η . Koska puhaltimen yli vaikuttava kokonaispaine ei ole tiedossa, todellista kokonaishyötysuhdetta ei voida laskea:

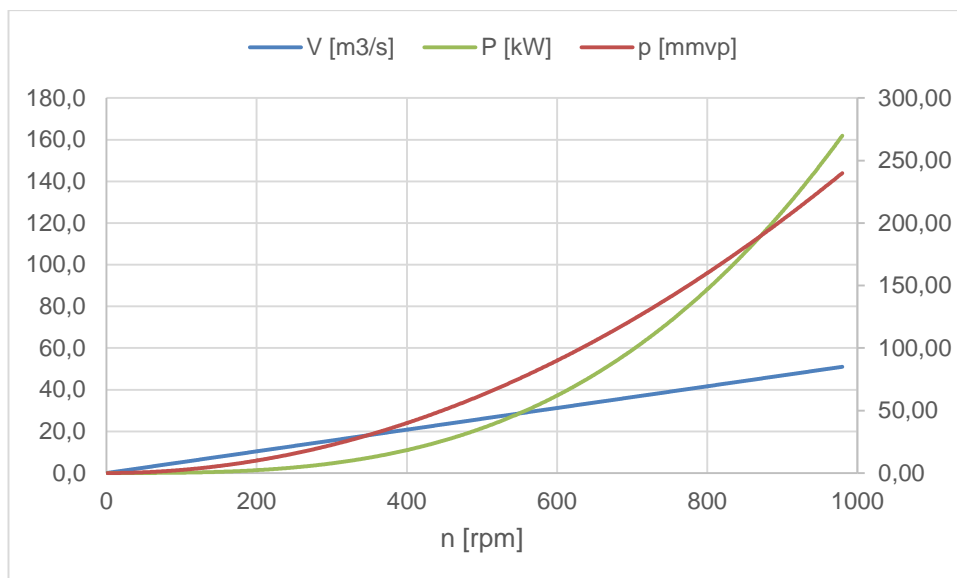
$$P = \frac{p\dot{V}}{\eta} \Rightarrow \eta = \frac{p\dot{V}}{P} = \frac{2\,354\,Pa * 51\,\frac{m^3}{s}}{162\,000\,W} = 0,74 \quad (29)$$

p on staattinen paine

\dot{V} on tilavuusvirtaus.

Laskussa arvokilvessä ilmoitettu paine on muunnettu SI-järjestelmän mukaiseksi yksiköksi. Puhaltimen ominaiskäyrästä ei ole saatavilla valmistajalta tai voimalaitoksen omista arkistoista, minkä vuoksi puhaltimen käyttäytymistä joudutaan arvioimaan laskennallisesti.

Kuvassa 9 (ks. seur. s.) esitetään affiniteettisääntöjä hyödyntäen lasketut puhaltimen tehon, virtaaman ja paineen kuvaajat koko sen kierrosalueella (ks. 2.6). Paineen kuvaaja noudattaa oikeanpuoleisen y-akselin arvoja. Paineen yksikkönä kuvassa käytetään arvokilvessäkin ilmoitettua yksikköä millimetri vesipatsasta. Vaikka yksikkö ei ole SI-järjestelmän mukainen, käytetään sitä yleisesti Hanasaaren B-voimalaitoksella.



Kuva 9. Kiertokaasupuhaltimen tehon, virtaaman ja paineen kuvaajat

Kuva 9 antaa vain karkean kuvan puhaltimen käyttäytymisestä affiniteettisääntöjen mukaan. Siinä ei ole huomioitu hyötysuhteen muuttumista kierrosnopeuden mukana ja savukaasun ominaisuuksien oletetaan pysyvän vakiona.

3.4 Sähkö- ja automaatioliityntä

Moottorit saavat syöttönsä suoraan voimalaitoksen 6 kV:n verkosta. Riippuen puhaltimesta, saa se syöttönsä joko kojeistoista 3BA tai 3BB. Vastaavasti 4. blokilla on käytössä kojeistot 4BA ja 4BB. Syöttö edellä mainituille kojeistoille otetaan tavallisesti blokkikohtaisilta omakäyttömuuntajilta 3BT10 ja 4BT10. Yhteisille laitteille, joiden tunnus alkaa numerolla 8, syöttö otetaan suoraan 110 kV:n jakeluverkosta omakäyttömuuntajalta 8BT10, joka pystyy myös tarvittaessa syöttämään kummankin blokin laitteistoa (voimalaitoksen sähköjärjestelmä, ks. liite 2).

Moottorilähdön suojana toimii Siemens SIPROTEC 7SJ531-tyyppinen suojarele, joka ohjaa vaunumallista vähäöljykatkaisijaa. Rele on suunniteltu pääasiassa johdon sekä moottoreiden suojaukseen, ja se sisältää tyypillisiä suojareleiden ominaisuuksia, kuten vakioaika- ja käänteisäilyvirtasuojauksen. Niiden lisäksi releellä on epätähtikoneiden suojaukseen tarkoitettuja ominaisuuksia, kuten jumisuoja, käynnistyksen esto ja staattorin ylikuormitussuoja.

Moottorin tehokaapelointi on toteutettu AHXCMK 3x70/16-tyyppistä kaapelia vastaavalla suurjännitekaapelilla, ja sen mukana sille on viety erillinen 50 mm² maadoitusjohdin. Käämien lämpötilamittauksen kaapelointi on tehty käyttäen parikierrettyä NOMAK-E 4x2x0,5+0,5-automaatiokaapelia, ja lämpötilatieto vietään alajakokotelon kautta mA-viestinä automaatiojärjestelmään.

Voimalaitoksella käytössä oleva pääautomaatiojärjestelmä on Siemensin TXP-3000-tyyppinen, voimalaitoskäyttöön suunniteltu automaatiojärjestelmä. Kiertokaasupuhaltimia, kuten suurinta osaa muistakin prosessiin liittyvistä laitteista, ohjataan suoraan voimalaitoksen pääautomaatiojärjestelmästä, eikä niillä ole normaalikäytössä paikallisohjausmahdollisuutta.

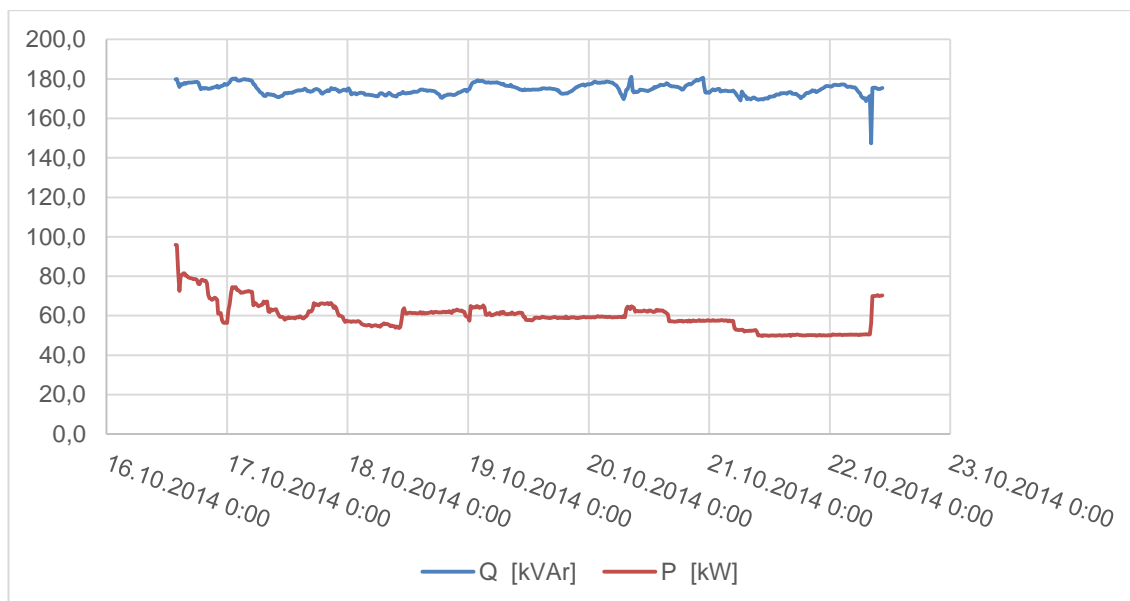
3.5 Moottorilta todellisuudessa vaadittu teho

3. blokin kiertokaasupuhaltimille suoritettiin syksyllä 2014 HelenServicen sähkölaboratorion toimesta tehomittaus, jossa selvitettiin moottorien todellisuudessa vaatima teho. Mittausarvot ovat 15 minuutin keskiarvoja ja mittalaitteena käytettiin Memobox 800b-sähkönlaatuanalysointilaitetta.

Ensimmäisenä suoritettiin kiertokaasupuhallin 2:n tehomittaus, joka ajoittui ajanjaksolle 16–22.10.2014. Tämän jälkeen suoritettiin kiertokaasupuhallin 1:n mittaus, joka kesti vain kaksi päivää, koska blokki jouduttiin ajamaan alas ajoittuen jaksolle 22–24.10.2014. Koska laitteiden mittaustulosten käsittely on hyvin samankaltaista ja koska kiertokaasupuhallin 2:n mittausjakso on pidempi, tässä luvussa käsitellään vain kiertokaasupuhallin 2:n mittaustuloksia (kiertokaasupuhallin 1:n tehomittauksen tulokset, ks. liite 3).

3.5.1 Pätö-, lois- ja näennäisteho

Mittalaitteesta saadut arvot ovat alun perin tekstimuodossa, josta ne on siirretty Excel-taulukon käsittelyn helpottamiseksi. Kuvassa 10 (ks. seur. s.) esitetään mittausjakson aikana tallennetut lois- ja pätötehon kuvaajat ajan funktiona.



Kuva 10. Kiertokaasupuhaltimen 2 (3NS12D01-M01) lois- ja pätöteho

Kuvaajista voidaan päätellä kuorman tehokertoimen olevan huono. Pätöteho pysyy koko mittausjakson ajan alle 100 kW:n. Vertaamalla mittaustuloksia laskettuihin nimellisarvoihin (ks. 3.2), on selvää, että moottorin kuormitus on melko kaukana sen nimelliskuormasta. Tästä johtuen moottorin verkosta ottama teho koostuu pääasiassa loistehosta.

Taulukossa 4 (ks. seur. s.) esitetään mittausjakson minimi-, maksimi- ja keskiarvot. Kaikki mittauspisteet ovat 15 minuutin keskiarvoja. Savukaasuihin liittyvien suureiden arvot ovat otettu voimalaitoksen pääautomaatiojärjestelmän lokista. Kaikkien suureiden arvot, paitsi keskiarvot, ovat listattu pätötehon perusteella, ja jokaisella rivillä oleva arvo vastaa sen hetkistä pätötehon arvoa. Taulukossa ei siis näy varsinaisesti lukuarvoltaan pienintä tai suurinta arvoa. Tehokerroin on laskettu taulukossa listattuja arvoja käyttäen.

Taulukossa olevat savukaasun paineet ovat kiertokaasukanavan staattinen paine p_s ja kiertokaasupellin 3NS12S01 yli oleva paine-ero p_d . Staattisen paineen mittauspiste sijaitsee puhaltimen imupuolella ja tämän vuoksi mittausarvo on negatiivinen. Peltien asennot on ilmaistu prosentteina, jossa 0 % tarkoittaa, että pelti on täysin kiinni, ja 100 % vastaavasti tarkoittaa pellin olevan täysin auki. Taulukossa lämpötila T on kiertokaasun lämpötila. Kiertokaasu lämpenee melko nopeasti prosessin käynnistyttyä, minkä

vuoksi minimi- ja maksimiarvojen erot olivat joissain mittauspisteissä huomattavasti suuremmat kuin taulukossa listatut arvot.

Taulukko 4. Kiertokaasupuhaltimen 2 (3NS12D01) minimi-, maksimi- ja keskiarvoja

	Sähkö			Savukaasu				Asento	
	Q [kVar]	P [kW]	Tehokerroin	V [kNm ³ /h]	p _s [mmvp]	p _d [mmvp]	T [°C]	S01 [%]	S11 [%]
Minimi	173,3	49,7	0,28	29,1	-121,4	138,5	294,6	10,7	34,6
Maksimi	179,8	95,9	0,47	47,2	-139,3	139,9	291,2	39,9	71,1
Keskiarvo	174,6	59,8	0,32	32,5	-138,9	140,2	297,2	16,6	46,3

Kuten kuvaajista pystyttiin päättelemään, kuorman tehokerroin jää jokaisessa mittauspisteessä selkeästi huonommaksi kuin koneen nimellinen tehokerroin. Parhaassakin tapauksessa sen arvo on vain 0,47.

Mitattu huipputeho esiintyy mittausjakson alussa noin puolen tunnin ajan. Tänä aikana välitulistimen lämpötilasäädöstä vastaava kääntöpelti 3NS12S01 oli noin 40 % auki ja paineensäädöstä vastaava pelti 3NS12S11 noin 71,1 % auki. Näiden yhdistelmä ja savukaasun suhteellisen kylmä lämpötila vaikutti selkeästi moottorilta vaadittuun tehoon. Mittausjakson aikana voimalaitoksen ajotilanne oli tyypillinen. Blokin pätöteho vaihteli jakson aikana 74,2 ja 118,5 MW välillä, keskiarvon ollessa 97,7 MW.

Laskettua pätötehon keskiarvoa voidaan siis pitää riittävän luotettavana arviona vanhalta käytöltä keskimääräisesti vaaditusta tehosta. Keskiarvoa hyödyntäen voidaan selvittää moottorin verkosta ottama keskimääräinen näennäisteho S seuraavalla yhtälöllä:

$$S = P + jQ = 59,8 \text{ kW} + j174,6 \text{ kVAr} = 184,6 \angle 70,1^\circ \text{ kVA} \quad (30)$$

P on kuorman pätöteho

Q on kuorman loisteho

j on imaginääriyksikkö.

Laskettu tulos on tämän työn tarkoitukseen riittävän tarkka, koska työn tarkkuus edellyttää lähinnä tehoon liittyvien suureiden suuruusluokan tuntemista. Mittausjakson alussa esiintyvä huipputeho S_{max} vaikuttaa oleellisesti käytön mitoittamiseen.

On kuitenkin huomioitava sekä mahdolliset erikoistilanteet, joita mittausjaksolla ei välttämättä esiintynyt että tulevaisuudessa kiertokaasun tarpeeseen vaikuttavat mahdolliset muutokset, jotka saattavat vaikuttaa huipputehon suuruuteen:

$$S_{max} = 95,9 \text{ kW} + j179,8 \text{ kVAr} = 203,8 \angle 62,0^\circ \text{ kVA} \quad (31)$$

3.5.2 Sähkövirta

Edellisen luvun tuloksia hyödyntämällä voidaan edelleen laskea kuorman ottama keskimääräinen virta I_{ka} . Laskussa (32) käytetty jännite on moottoria syöttävän kojeiston 3BB keskimääräinen jännite mittausjaksolla. Jännitteen vaihtelu kojeistossa oli suurimmillaan noin 2 %, joten sen vaikutus laskun lopputulokseen jää hyvin vähäiseksi:

$$S = \sqrt{3}UI^* \Rightarrow I_{ka} = \frac{S^*}{\sqrt{3}U^*} = \frac{184,6 \angle -71,1^\circ \text{ kVA}}{\sqrt{3} * 6,2 \angle -0^\circ \text{ kV}} = 17,1 \angle -71,1^\circ \text{ A} \quad (32)$$

S on kuorman keskimääräisen näennästehon osoitin

U on kuorman yli vaikuttavan pääjännitteen osoitin

* on kompleksinen konjugaatti.

Yhtälössä (33) vastaavasti lasketaan moottorin mittausjakson alussa ottama huippuvirta I_{max} :

$$I_{max} = \frac{203,8 \angle -62,0^\circ \text{ kVA}}{\sqrt{3} * 6,2 \angle -0^\circ \text{ kV}} = 19,0 \angle -62,0^\circ \text{ A} \quad (33)$$

Kuorman virta on loistehon osuudesta johtuen voimakkaasti induktiivista. Kokonaisvirta jää kuitenkin kauas moottorin nimellisestä virrasta, kuten tehokin.

3.5.3 Kulutettu sähköenergia

Mittausjakson aikana kulutettu sähköenergian määrä saadaan laskettua integroimalla mittausväli käyttäen trapetsisääntöä. Kuten edellisissäkin kohdissa, numeerisen integrointimenetelmän aiheuttama virhe ei haittaa työssä, vaan kulutetun energian suuruusluokka kiinnostaa. Kulutettu energia voidaan laskea seuraavan yhtälön mukaisesti:

$$\int_0^T P(t) dt \approx \sum_{i=1}^n \frac{P(i) + P(i+1)}{2} ((i+1) - i) \approx 8\,440 \text{ kWh} = 8,44 \text{ MWh} \quad (34)$$

P on kuorman teho ajan funktiona

n on mittauspisteiden kokonaismäärä

i on mittauspiste tunteina.

4 Uusi nopeussäädetty laitteisto

Kiertokaasupuhaltimen alhaisesta nimellistehosta johtuen, lähtökohtana on korvata se pienjännitteisellä laitteistolla. Suuret laitevalmistajat valmistavat suurjännitekäyttöjä lähinnä ≥ 250 kW:n teholuokassa, joka vastaa vanhaa ylimitoitettua puhaltimen 250 kW:n moottoria. Lisäksi kokemus voimalaitoksella on osoittanut, että suurjännitekäytöt ovat niiden korkeahkojen investointikustannusten lisäksi kunnossapitomielessä työlämpiä kuin pienjännitekäytöt ja vian ilmetessä ne vaativatkin yleensä ulkopuolisen, laitteeseen erikoistuneen asiantuntijan apua.

Voimalaitoksella on käytössä vain 400 V:n pienjänniteverkko kolmivaihekuormia varten. Tästä syystä myös 690 V:n laitteisto voidaan jättää pois laskuista, koska ei ole järkevää lähteä hankkimaan uusia muuntajia, sekä muita käyttöihin liittyviä komponentteja, kuten katkaisijoita, muutamalle tämän teholuokan laitteelle. Uuden jännitetason tuominen voimalaitokselle toisi myös muita, esimerkiksi laitteiden sijoitteluun ja tiloihin liittyviä ongelmia. Korvaavan laitteiston suunnittelu tehdään siis nimellisjännitteen ollessa 400 V, eikä edellä mainittujen syiden vuoksi muita jännitetasoja oteta työssä huomioon. Voimalaitoksen olemassa oleva taajuusmuuttajakanta koostuu ABB Oy:n laitteista ja laitekannan yhtenäisyyden säilyttämiseksi tässä luvussa käsitellään edellä mainitun yhtiön tuotteita.

4.1 Tarvittava teho

Kiertokaasupuhaltimen moottori on reilusti ylimitoitettu, kun otetaan huomioon puhaltimen todellinen käyttö voimalaitosprosessissa (ks. 3.5). Kiertokaasun jatkuva tilavuusvirtaus tulee tuskin koskaan ylittämään mitoitettua $51 \text{ m}^3/\text{s}$:n arvoa ja nimellistä 162 kW:n tehoa ei saavuteta. Tulevaisuuden muutokset, kuten pelletinpoltto, saattavat

vaikuttaa ja todennäköisesti vaikuttavatkin kiertokaasun tarpeeseen sekä määrään. Tämän vuoksi täytyy jättää tehoreservi, eikä käyttöä voida mitoittaa täsmälleen nykyisen kuormituksen mukaan. Arvioitaessa tarvittavaa tehoa, on otettava huomioon, että kuljetettavan savukaasun tiheys pienenee lämpötilan noustessa, mikä vaikuttaa tarvittavan tehon määrään. Tämän takia kiertokaasupuhallin vaatii yleensä enemmän tehoa käynnistysvaiheessa, koska kierrätettävä savukaasu on aluksi viileämpää.

Mitoituksen lähtökohtana voidaan pitää taulukossa 4 (ks. s. 25) lueteltuja maksimi arvoja ja varsinkin suurinta esiintynyttä pätötehoa, mutta myös alkuperäiset mitoitusarvot on otettava huomioon. Tehon ollessa suurimmillaan savukaasun normalisoitu tilavuusvirtaus oli noin 47 kNm³/h, joka on jo melko suuri arvo kiertokaasuprosessissa, mutta suurempiakin virtauksia voi esiintyä ja teoreettisesti suurin virtausmäärä on 200 kNm³/h. On kuitenkin todella vaikeaa arvioida, kuinka kauan kyseinen teoreettisesti suurin virtaama saattaisi prosessissa esiintyä, ja se olisi käytön kannalta poikkeuksellinen tilanne. [10.]

Kattilan virtauskaaviosta löytyvät alkuperäiset kuormitusarvot hiili- ja öljykäytössä luetellaan taulukossa 5, ja ne kuvastavat kiertokaasun tarvetta 250 t/h höyrymäärällä. Normalisoidut arvot ovat esitetty 304 °C:een lämpötilassa:

Taulukko 5. Alkuperäinen arvio kiertokaasun tarpeesta

	V [m ³ /s]	p [mmvp]	V _n [kNm ³ /h]
Hiili	36,2	228	65,8
Öljy	40,6	207	74,0
Mitoitus	51,0	222	92,8

4.2 Mekaaniset muutokset ja vaikutus prosessiin

Itse puhallin on edelleen sopiva käyttötarkoitukseensa, eikä sitä ole syytä modernisoida. Kiertokaasukanavassa oleva kääntöpelti voidaan joko poistaa käytöstä tai lukita tarpeen mukaan tiettyyn asentoon, jos virtauksen suuntaa halutaan tarkkailla pellen paine-eron avulla. Toimenpide kuitenkin vaikuttaa negatiivisesti prosessin hyötysuhteeseen, koska täysin avattunakin pelti muodostaa pienen esteen savukaasulle. Vastaavasti paine-eron säädöstä vastaava siipisäädin voidaan poistaa kanavasta tai sen siivet voidaan lukita niin, että ne ovat täysin auki. Ennen lopullisia toimenpiteitä on

kuitenkin parempi suorittaa useampia koekäyttöjaksoja, jotta varmistutaan säätöpeltien tarpeellisuudesta. [10.]

Kiertokaasuprosessin säätö vaatii runsaasti ohjelmallisia muutoksia laitteiden poistuttua, koska paineen- ja lämpötilan säätö perustuu kanavassa olevien peltien asentoon. Paineensäätö perustuu kääntöpellin paine-eron valvontaan ja lämpötilan säätö perustuu vastaavasti kyseisen pellin asentoon. Taajuusmuuttajakäytössä ohjataan vain moottorin pyörimisnopeutta. Erillistä paineen- ja lämpötilan säätöä ei ole. Tämä saattaa joissain tapauksissa johtaa ongelmiin, koska pyörimisnopeuden hidastuessa myös staattinen paine laskee kanavassa [11, s. 45–46]. Staattinen paine ei kuitenkaan ole tärkeässä asemassa prosessissa, koska kanavassa ei ole siitä riippuvaisia laitteita.

4.3 Uusi moottori

Uuden moottorin mitoittamisessa täytyy huomioida tarvittava teho, pyörimisnopeusalue sekä vaadittava momentti. Mitattu maksimipäteho oli mittaajaksolla noin 96 kW, ja minimiteho vastaavasti n. 50 kW. Koska niiden täytyy kattaa moottorin mekaanisten häviöiden lisäksi myös kytkimen aiheuttamat häviöt, jää todellinen puhaltimen akselille kohdistuva teho pienemmäksi. Tappiokytkimen aiheuttamia häviöitä ei tässä kuitenkaan huomioida niiden ollessa niin pieniä.

Oikosulkumoottorin hyötysuhteen voidaan olettaa pysyvän melko vakiona noin puoleen tehoon asti [11, s. 35]. Mitattu teho oli kuitenkin parhaimmillaankin vain 38,4 % moottorin nimellisestä, joten hyötysuhdetta on vaikea arvioida tarkasti. Laskuissa kuitenkin käytetään nimellisteholla olevaa hyötysuhdetta, koska suurten moottoreiden hyötysuhde pysyy parempana osakuormilla kuin pienien.

$$P_{max} = 96 \text{ kW} * 0,93 = 89,3 \text{ kW} \quad (35)$$

$$P_{min} = 50 \text{ kW} * 0,93 = 46,5 \text{ kW} \quad (36)$$

Yhtälöt (35) ja (36) kuvaavat siis maksimi- ja minimitehoa kun tilavuusvirtausta on rajoitettu mekaanisesti. Taajuusmuuttajakäytössä todellinen tarvittava teho on pienempi. Vaikka mittaajakso kuvasti tyypillistä voimalaitoksen ajotilannetta, ei voida kuitenkaan varmuudella sanoa, että kyseinen laskettu lukema olisi käytöltä vaadittu suurin

maksimiteho. Puhaltimen vaatimaan tehoon vaikuttaa siirrettävän kaasun tiheys, johon vuorostaan vaikuttaa lämpötila ja paine, jotka eivät ole aina vakioita. Myös puhaltimen tuottaman staattisen paineen tarve pienenee peltien poistuessa ja tämä laskee tarvittavaa tehoa.

Tulevaisuuden muutoksien vaikutusta kiertokaasun tarpeeseen on vaikea arvioida tarkasti, joten turvallisena moottorin mitoituksena voidaan tehon puolesta pitää 132 tai 160 kW:n konetta, joista jälkimmäisellä päästään tarvittaessa vielä puhaltimen nimellistoimintapisteeseen ilman merkittävää ylikuormitusta.

Puhaltimen ja moottorin pyörimisnopeuden arviointiin voidaan käyttää affiniteettisääntöjä, joiden avulla lasketut toimintakäyrät näkyvät kuvassa 9 (ks. s. 22). Kuten aikaisemmin on mainittu, antavat affiniteettisäännöt vain karkean kuvan puhaltimen toiminnasta, eivätkä ne huomioi esimerkiksi muuttuvaa hyötysuhdetta. Mittausjaksolla akseliteho oli alhaisimmillaan noin 46,5 kW, joka ilman kanavaa rajoittavia peltejä vastaisi affiniteettisääntöjen mukaan noin 645 kierrosta minuutissa ja staattinen paine olisi 104,0 mmvp. Vastaavasti 89,3 kW:n huipputehon aikaan saama pyörimisnopeus ja staattinen paine olisivat taajuusmuuttajakäytössä 804 rpm sekä 161,5 mmvp.

Tiheydestä riippumaton tilavuusvirtaus kyseisillä tehoilla on 33,6 ja 41,8 m³/s. Muunnetaan ne voimalaitoksella käytettyihin normaalikuutiometrihin yhdistetyn kaasulain avulla, joka kuvastaa kaasun paineen, tilavuusvirtauksen ja lämpötilan suhdetta. Yhtälössä verrataan kaasua vakiolämpötilassa 25 °C ja paineessa 101,325 kPa samaan kaasuun eri lämpötilassa ja paineessa suureiden alaindeksien ollessa vastaavasti 1 ja 2.

$$\frac{P_1 V_1}{T_1} = \frac{P_2 V_2}{T_2} \quad (37)$$

P on kaasun paine

V on kaasun tilavuus

T on kaasun lämpötila.

Selvitetään ensiksi normalisoitu savukaasun minimivirtaus, joka saadaan selville ratkaisemalla yhtälöstä V_2 , mikä kuvastaa normalisoitua kaasun määrää. Laskussa paineen ja lämpötilan arvot ovat muunnettu SI-järjestelmän mukaisiksi yksiköiksi. Haluttu

lämpötila T_2 on 294,6 °C ja paine P_2 on kanavan staattinen paine, 100,3 kPa. Näiden minimiarvojen avulla tulokseksi saadaan:

$$V_2 = V_1 \frac{P_1 T_2}{P_2 T_1} = 33,6 \frac{\text{m}^3}{\text{s}} * \frac{100,3 \text{ kPa} * 298,13 \text{ K}}{101,325 \text{ kPa} * 567,7 \text{ K}} = 62,9 \frac{\text{kNm}^3}{\text{h}} \quad (38)$$

Vastaavalla tavalla ja maksimivirtauksen arvoja käyttäen saatiin laskettua virtauksen maksimiarvoksi 78,3 kNm³/h. Saadut arvot esitetään taulukossa 6 ja niitä voidaan pitää suuntaa antavina arvoina moottorin mitoitusta varten. Luvut kertovat kuitenkin vain sen, mitä toimintapistettä lueteltu teho vastaisi laskennallisesti, jos kanavassa ei olisi mitään muita virtausta rajoittavia tekijöitä. Taulukon tarkoituksena on havainnollistaa pyörimisnopeussäädön tuomia etuja tehontarpeen näkökulmasta. Mittaustulosten perusteella voidaan melko luotettavasti sanoa, että taulukossa esiintyvää maksimitehoa tuskin tullaan normaalitilanteessa (kattilan ollessa suhteellisen puhdas) ylittämään taa-juusmuuttajakäytöllä. Moottorin täytyy kuitenkin selvittää myös poikkeustilanteista, jonka vuoksi ylikuormitusvaraa on oltava.

Taulukko 6. Lähtökohdat moottorivalintaan

	Mekaaninen		Affiniteettisääntöjen mukaiset			Normalisoitu
	P [kW]	T [Nm]	n [rpm]	p [mmvp]	V [m ³ /s]	V _n [kNm ³ /h]
Minimi	46,5	688,4	645	104,0	33,6	62,9
Maksimi	89,3	1 060,6	804	161,5	41,8	78,3

Moottorin nopeusalueen valinnassa on kaksi vaihtoehtoa, jotka ovat 3- ja 4-napapariset koneet. Neljä napaparista moottoria jouduttaisiin käyttämään kentänheikkensalueella maksiminopeudella ja se asettaisi rajoitteita käytön maksimikuormitukselle. Vastaavasti kolme napaparinen kone saattaisi käydä tilanteesta riippuen reilusti nimellinopeuttaan hitaammin, minkä vuoksi täytyy tarkastella ulkoisen jäähdytyksen tarvetta.

Valitaan valmistajan moottoriluettelosta kuusi vartenotettavaa prosessikäyttöön suunniteltua moottorivaihtoehtoa, joiden valinnan kannalta tärkeimmät ominaisuudet luetaan taulukossa 7 (ks. seur. s.). Kaikki moottorit kuuluvat hyötysuhteeltaan luokkaan IE2 ja niiden eristysluokka on F, mikä asettaa käämityksen maksimilämpötilaksi 155 °C. Taulukossa viimeisenä olevan moottorin lämmönousuluokka on F, kun muiden moottoreiden vastaava luokka on B.

Taulukko 7. Moottorivaihtoehdot

	n [rpm]	P _n [kW]	I _n [A]	T _n [Nm]	T _{max} [Nm]	Runkokoko
M3BP 315 MLA 6	991	132	240	1 271	3 813	315
M3BP 315 LKA 6	992	160	291	1 540	4 312	315
M3BP 315 LKB 6	992	180	328	1 732	4 850	315
M3BP 315 LKC 6	989	200	355	1 931	5 021	315
M3BP 315 LKA 8	740	132	243	1 703	4 428	315
M3BP 315 LKC 8	740	160	295	2 064	5 780	315

Kaikki moottorit ovat runkokooltaan kokoa 315. Jokainen moottori on akseliteholtaan suurempi, kuin mittauksen aikana esiintynyt maksimiteho. Myös moottoreiden tuottama momentti ylittää lasketun momentintarpeen ja oikosulkumoottoria voidaan ylikuormittaa reilusti tarpeen vaatiessa.

Kun otetaan huomioon tarvittavan tehon arvioinnissa olleet epävarmuustekijät, moottoreista on todennäköisesti järkevin vaihtoehto taulukossa toisena oleva M3BP 315 LKA 6. Moottoria ei tarvitse käyttää kentänheikennysalueella, ja sen tuottama momentti riittää käytännössä koko toiminta-alueella. Myös listattu 160 kW:n akseliteho on jokaisessa todennäköisesti esiintyvässä tilanteessa riittävä, varsinkin, kun otetaan huomioon alentunut vaadittu teho pienemmän staattisen paineen vuoksi. Moottorin nimellismomentti on 1 540 Nm, joka on hyvin lähellä puhaltimen nimellistoimintapisteen 1 578 Nm:n momenttia. Vastaavasti maksimimomentti on 4 312 Nm, joka on noin 270 % suurempi kuin puhaltimen nimellinen momentti.

Lasketaan moottorin virta I_{max} , jonka se ottaa puhaltimen nimelliskuormalla, sijoittamalla arvot yhtälöön (15):

$$I_{max} = \frac{1\,579\text{ Nm}}{1\,540\text{ Nm}} * 291\text{ A} = 298\text{ A} \quad (39)$$

Moottori siis ottaa vain lievän ylivirran tilanteessa, jossa puhallin olisi nimellisessä toimintapisteessään. Tällainen tilanne ei kuitenkaan ole todennäköinen mittaustulosten perusteella, joten mitoitusta voidaan pitää riittävänä ja moottori kestää tarvittaessa pienen ylikuormituksen. Vastaavasti alhaisilla kierroksilla moottorin kuormitus pysyy niin pienenä, että se ei aiheuta moottorille ylikuumentumisen vaaraa. Ulkoista jäähdytystä ei näin ollen vaadita. Kuvassa 5 (ks. s. 13) näkyvä moottorin kuormitettavuus taajuuden funktiona antaa tämän kokoluokan moottoreille alhaisillakin kierrosnopeuksilla

kuormitettavuuden maksimiarvoksi noin 70 % nimellismomentista, joka on varmasti riittävä kun otetaan huomioon, että kuorman vaatima momentti laskee nopeuden neliössä ja teho vastaavasti nopeuden kuutiossa.

Moottorin mekaanisten ominaisuuksien on myös kestettävä taajuusmuuttajakäyttö. Nimellistehon ollessa yli 100 kW valmistaja suosittelee, että koneen N-päähän asennetaan eristetty laakeri, jolla voidaan vähentää taajuusmuuttajan korkeasta kytkentätaajuudesta aiheutuvia laakerivirtoja. [12, s. 66–67.]

4.4 Taajuusmuuttaja

Taajuusmuuttajan kuormitettavuus on oleellisesti pienempi kuin oikosulkumoottorin, mikä täytyy ottaa huomioon laitteen valinnassa. Myös laitteen fyysinen koko on tärkeä seikka asennustilan vaatimusten kannalta, ja se myös vaikuttaa asennusystävällisyyteen. Vaikka tämän teholuokan moottoreille löytyy seinälle asennettavia taajuusmuuttajamalleja, on lattialle asennettava kaappimallinen parempi ratkaisu. Jokainen voimalaitokselle asennettu taajuusmuuttaja on liitetty automaatiojärjestelmään liityntäkotelon välityksellä. Kotelo sisältää mm. käynnistykseen, pysäytykseen ja vikatiedon välitykseen liittyvät releet sekä galvaaniset erottimet analogiaviesteille. Tämä kotelo vie tilaa ja kaappimallisessa taajuusmuuttajassa kaikki edellä mainitut komponentit voidaan asentaa taajuusmuuttajan sisälle. Erillistä koteloa ei tarvita, mikä vähentää samalla tarvittavan kaapeloinnin määrää.

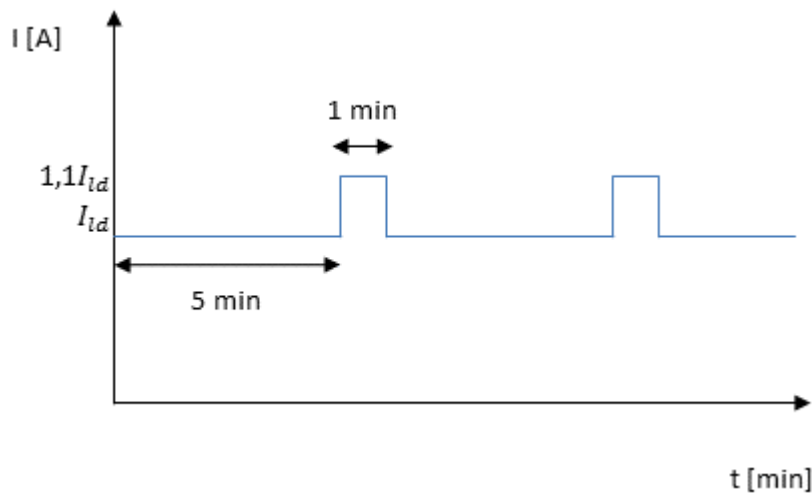
Kaappiin asennettava taajuusmuuttaja on myös syöttö- ja moottorikaapeleiden asennuksen kannalta parempi vaihtoehto. Voimalaitoksen 400 V:n sähkötilassa suurin osa pienjännitekaapeleista kulkee lattian alapuolella sijaitsevassa kaapelitilassa ja johtopi- tuudet pysyvät lyhyempinä taajuusmuuttajien kytkentäliittimien sijaitessa myös lähempänä lattian alapuolella kulkevia kaapelihyllyjä. Kaappimallisissa taajuusmuuttajissa on lisäksi yleensä enemmän kytkentätilaa kaapeleille, mikä puolestaan helpottaa ja nopeuttaa asennusta.

Valitaan valmistajan luettelosta kaksi varteenotettavaa taajuusmuuttajavaihtoehtoa, jotka luetellaan taulukossa 8 (ks. seur. s.)

Taulukko 8. Taajuusmuuttajavaihtoehdot

	I_n [A]	I_{max} [A]	P_n [kW]	I_{Ld} [A]	P_{Ld} [kW]	I_{Hd} [A]	P_{Hd} [kW]	Runkokoko
ACS880-07-0293A-3	293	418	160	278	160	246	132	R8
ACS880-07-0363A-3	363	498	200	345	200	293	160	R9

Taulukossa alaindeksit L_d ja H_d tarkoittavat kuormitettavuuksia kevyellä ja raskaalla ylikuormalla. Valmistaja määrittelee kevyen ylikuormituksen virran I_{Ld} profiiliksi 10 %:n, kestoltaan minuutin mittaisen ylikuormituksen, joka esiintyy viiden minuutin välein. Kuvassa 11 esitetään taajuusmuuttajan kevyen kuormituksen profiili.



Kuva 11. Taajuusmuuttajan kevyen ylikuormituksen profiili

Vastaavasti raskas ylikuormitus I_{Hd} määritellään muuten samalla tavalla, mutta ylikuormitusvirta vaihtelee 25 – 50 % riippuen taajuusmuuttajasta. Taulukossa ylämpänä oleva taajuusmuuttaja kestää 25 % ylikuormituksen, kun taas alempana olevaa pystyy kuormittamaan 50 % ylivirralla. I_{max} on taajuusmuuttajan maksimivirta, joka voi esiintyä 10 sekunnin ajan käynnistyksen aikana ja muissa tilanteissa virran keston määrää taajuusmuuttajan lämpötila. [12, s. 183–184.]

Taulukossa ylempänä oleva ACS880-07-0293A-3-tyyppinen taajuusmuuttaja on runkokooltaan pienempi kuin seuraava vaihtoehto. Tämä vaikuttaa laitteen fyysisiin ominaisuuksiin sekä hintaan, jonka takia se on parempi vaihtoehto. Jatkovaa ylikuormitusvaraa kyseisellä taajuusmuuttajalla ei juurikaan ole, jos pidetään puhaltimen nimellistehoa maksimikuormana.

Yhtälössä (39) laskettu moottorivirta on kuitenkin taajuusmuuttajan kevyen kuormituksen profiilin I_{Ld} rajoissa:

$$I_{Ld} = 1.1 * 278 A = 306 A \quad (40)$$

Luku on hieman suurempi kuin moottorin maksimikuormalla ottama 298 A:n virta, joten taajuusmuuttaja kestää hetkellisen kevyen profiilin mukaisen ylikuormituksen puhaltimen nimellisteholla. Taajuusmuuttaja kykenee tuottamaan moottorin nimellisvirran jatkuvasti ilman yllälämpenemisen vaaraa.

4.5 Tehokaapelointi ja suojaus

Käytölle valitaan tehokaapelit SFS 6000-standardin mukaisesti. Kaapelit mitoitetaan moottorin oletetun maksimivirran mukaan. Kaapelivalinnassa on syytä ottaa huomioon useampia vaihtoehtoja, koska hintaerot saattavat olla todella suuria eri poikkipintojen ja valmistusmateriaalien välillä. Valintaan vaikuttavat mm. kaapelin ja johtimen eristämateriaali, ja käytetäänkö yhtä vai useampaa rinnankytkettyä kaapelia. Myös valitun taajuusmuuttajan sekä moottorin kytkentätila ja liittimet asettavat kaapelin poikkipinnalle vaatimuksia, runkokoon R8-taajuusmuuttajan liittimien maksimipoikkipinnan ollessa 1×240 tai $2 \times 185 \text{ mm}^2$. Tässä luvussa ja yleisesti taajuusmuuttajan syöttökaapelilla tarkoitetaan syöttävän keskuksen ja taajuusmuuttajan välistä kaapelia, ja moottorikaapelilla vastaavasti taajuusmuuttajan sekä moottorin välistä kaapelia.

Valitaan taajuusmuuttajan syöttökaapelia suojaavaksi sulakkeeksi 315 A gG-tyyppinen kahvasulake. Standardista löytyvän taulukon C.52.1 mukaan edellä mainittu sulake edellyttää, että johdin kestää vähintään 348 A kuormituksen, jos sitä käytetään ylikuormitussuojana. Tässä tapauksessa kuitenkin taajuusmuuttaja vastaa sekä syöttö että moottorikaapelin ylikuormitussuojauksesta ja jälkimmäisenä mainitun oikosulkusuojauksesta, joten syöttävä sulake toimii vain syöttökaapelin oikosulkusuojana ja mitoitusvirtana voidaan pitää aikaisemmin laskettua 298 A:n virtaa.

Koska käyttöjä syöttävien keskusten oikosulkuvirta on suuruusluokaltaan kymmeniä kiloampeereja ja taajuusmuuttajat sijaitsevat samassa tilassa niiden kanssa, jää syöttökaapeleiden pituudet lyhyiksi. Tämän vuoksi ei tarvita tarkempaa oikosulkuvirran laskentaa, vaan virran suuruutta voidaan pitää varmasti riittävänä, jotta suojalaite toimii

oikosulkutilanteessa standardin edellyttämässä 0,4 s ajassa. Oikosulkuvirran riittävyys tarkistetaan vielä käyttöönottotarkastuksen yhteydessä mittaamalla se taajuusmuuttajan tuloliittimistä. Taajuusmuuttajassa itsessään on nopeat, puolijohteiden suojaukseen tarkoitetut aR-tyyppiset 500 A:n etusulakkeet, jotka suojaavat laitetta sen sisällä tapahtuvilta vioilta.

Koska kyseessä on taajuusmuuttajakäyttö, täytyy varsinkin moottorikaapelin valinnassa ottaa huomioon sähkömagneettiseen yhteensopivuuteen (EMC) liittyvät asiat, jonka vuoksi valitaan yleensä (A)EMCMK- tai (A)MCCMK-tyyppinen hyvin häiriösuojattu kaapeli. Kaapelin liitäntä moottoriin on tehtävä käyttäen 360-asteen maadoituksen mahdollistavia EMC-tiivisteholkkeja, mitkä takaavat häiriösuojauksen jatkuvuuden koko kaapelin matkalla. Kaapelivalinta edellyttää asennusolosuhteiden ja kaapelireittien tuntemista. Kaapelit pystytään vetämään jo olemassa olevia kaapelireittejä pitkin lähes koko matkalla, eikä esimerkiksi uusia kaapelihyllyjä todennäköisesti tarvita. Sähkötilan alapuolella ja kattilahalliin menevässä tunnelissa kaapelit kulkevat osan matkasta kolmeen tai viiteen kerrokseen asennetuilla hyllyillä ja kattilahallissa hylly on koko matkalla yksikerroksinen.

Syöttökaapeli vedetään todennäköisesti ylintä kaapelihyllyä pitkin, josta se nousee taajuusmuuttajan kytkentätilaan. Asennustapana käytetään standardista löytyvän taulukon B.52.1 mukaista referenssiasennustapaa E ja tilassa on koko kaapelin matkalla kolme päällekkäin asennettua hyllyä, joiden mukaan kuormitettavuus lasketaan. Ympäristön lämpötila sähkötilan lattian alapuolella pysyy noin 25 °C tai sen alle, joten lämmön vaikutusta kuormitukseen ei tarvitse huomioida.

Valitaan kuormituskerroin taulukosta B.52.20, hyllyjen lukumäärän ollessa 3 ja hyllyillä toisissaan kiinni olevien kaapeleiden määrän ollessa 4. Todellinen kaapelien määrä on suurempi, mutta standardi antaa mahdollisuuden jättää alle 30 % kuormitetut kaapelit huomioimatta [13, s. 221]. Kertoimeksi tulee 0,76 ja kaapelin vähimmäiskuormitettavuudeksi I_{s1} saadaan:

$$I_{s1} = \frac{298 \text{ A}}{0,76} = 392 \text{ A} \quad (41)$$

PVC-eristetyistä kuparikaapeleista 240 mm² kestää 456 A kuormituksen ja sopisi syöttökaapeliksi, jos käytetään vain yhtä kaapelia. Alumiinikaapelin poikkipinnan täytyisi

olla vähintään 300 mm², jotta se täyttäisi kuormitettavuusvaatimukset. Se on kuitenkin poikkipinta-alaltaan liian suuri, eikä mahtuisi taajuusmuuttajan kytkentäliittimiin, joten alumiinikaapeli voidaan jättää tässä tapauksessa pois harkittavista vaihtoehdoista. Rinnankytkettyjen kaapelien tapauksessa yhden kaapelin tulisi kestää ilman kuormitus-kertoimia 149 A virta. Kun otetaan huomioon yhden lisäkaapelin asennus hyllylle, tulee korjauskertoimeksi sama kuin edellisessäkin kohdassa ja minimikuormitettavuudeksi I_{s2} :

$$I_{s2} = \frac{149 \text{ A}}{0,76} = 196 \text{ A} \quad (42)$$

Kuparikaapeleista vaatimuksen täyttää poikkipinnaltaan 70 mm² oleva kaapeli, jota voidaan kuormittaa enimmillään 208 A:n virralla. Vastaavasti alumiinista valmistetun kaapelin täytyy olla poikkipinnaltaan vähintään 120 mm², joka kestää 225 A virran. Taulukossa 9 luetellaan syöttökaapelivaihtoehdot ja tärkeimmät tiedot niihin liittyen. Koska syöttökaapeli ei aiheuta häiriötä moottorikaapelin tavoin, voidaan kaapeliksi valita tavallinen (A)MCMK-tyyppinen maakaapeli. Lopullinen valinta tehdään hankintahetken hintojen ja kaapeleiden saatavuuksien perusteella.

Taulukko 9. Syöttökaapelivaihtoehdot

Kuparikaapelit	Tyyppi	Kuormitettavuus [A]	Vaadittu kuormitettavuus [A]
1xEMCMK tai MCMK	3x240/120	456	392
2xEMCMK tai MCMK	3x70/35	2x208	2x196
Alumiinikaapelit			
2xAEMCMK tai AMCMK	3x120/41	2x225	2x196

Moottorikaapelin valinnassa täytyy ottaa huomioon kattilahallissa esiintyvät olosuhteet. Lämpötila voi olla kattilahallissa kulkevalla kaapelireitillä paikoin noin 40 °C, mikä alentaa kuormitettavuutta huomattavasti. Kattilahalli on lämpötilansa vuoksi vaativampi kohde kuin lattiatason alapuolella kulkeva kaapelikanava tai tunneli. Tästä syystä moottorikaapelin mitoitus tehdään kattilahallin olosuhteiden perusteella. Valitaan lämpötilaa koskeva kuormituskerroin taulukosta B.52.14, ja yhtä kaapelihyllyä koskeva kerroin taulukosta B.52.20, joiden avulla saadaan laskettua yhden moottorikaapelin vaatima vähimmäiskuormitus I_{m1} . Kaapelihyllyä koskeva kerroin on valittu kuuden vierekkäisen kaapelin mukaan:

$$I_{m1} = \frac{298 \text{ A}}{0,82 * 0,79} = 460 \text{ A} \quad (43)$$

Laskettu 460 A:n virta edellyttäisi poikkipinta-alaltaan vähintään 300 mm² kuparikaapelin, joka on liian suuri, eikä se mahdu taajuusmuuttajan kytkentäliittimiin. Kuten syöttökaapelinkin kohdalla, saadaan kahden rinnankytketyn kaapelin vähimmäiskuormitettavuus ratkaistua jakamalla kuorman ottama virta kahteen osaan. Kaapeleiden määrää koskeva kerroin ei huonone tässä tapauksessa, vaikka hyllylle tuodaan yksi kaapeli lisää. Näin vaadituksi vähimmäiskuormitettavuudeksi saadaan:

$$I_{m2} = \frac{149 \text{ A}}{0,82 * 0,78} = 230 \text{ A} \quad (44)$$

Moottorikaapelivaihtoehdot luetellaan taulukossa 10. Vaikeiden ympäristön olosuhteiden vuoksi rinnankytketyt kaapelit ovat tässä tapauksessa ainoa vaihtoehto. Kuparikaapeleiden poikkipinnaksi vaaditaan nyt vähintään 95 mm², ja myös alumiininen 120 mm² kaapeli jää liian pieneksi. Sen maksimikuormitettavuus ylittyy 5 A:lla, joten seuraava turvallinen poikkipinta on 150 mm².

Taulukko 10. Moottorikaapelivaihtoehdot

Kuparikaapelit	Tyyppi	Kuormitettavuus [A]	Vaadittu kuormitettavuus [A]
2xEMCMK	3x95/50	2x252	2x230
Alumiinikaapelit			
2xAEMCMK	3x150/41	2x260	2x230

Vaikka rinnankytketyt kupariset syöttökaapelit voisivat periaatteessa olla poikkipinnaltaan hieman pienempiä kuin vastaavat moottorikaapelit, käytännön syistä johtuen ja sekaannusten välttämiseksi on kuitenkin järkevää valita syöttökaapeli saman poikkipinnan mukaan kuin moottorikaapelikin. [13, s. 244–258.]

4.6 Ohjauskaapelointi ja liityntä automaatiojärjestelmään

Koska voimalaitoksella ei ole yleisessä käytössä kenttäväylää yksittäisten laitteiden pääautomaatiojärjestelmään liittämistä varten, joudutaan automaatioliityntä tekemään käyttäen perinteistä JAMAK 12x(2+1)x0,5-tyyppistä kaapelia. Kaapelityyppi soveltuu

hyvin taajuusmuuttajakäyttöön, koska siinä on normaalin konsentrisen maadoitusjohtimen lisäksi jokaisella kierretyllä johdinparilla oma vastaavanlainen maadoitusjohdin, joka tekee siitä erittäin hyvän kaapelin häiriönsieto-ominaisuuksiltaan.

Käyttö ei tarvitse erillistä liityntäkoteloa, sen ollessa kaappimallinen (ks. 4.4). Tämä helpottaa kaapelointia, ja ohjauskaapeli voidaan viedä suoraan automaatiojärjestelmän I/O (*Input/Output*) -korteilta taajuusmuuttajalle. Vanhassa moottorissa käytössä ollutta käämien lämpötilanmittausta voidaan hyödyntää samaa kaapelia käyttäen, eikä se vaadi kytkentämuutoksia järjestelmässä.

Taajuusmuuttajalle ei tule suoraan mitään takaisinkytkentää moottorilta, vaan moottorin käämien lämpötila ja prosessiin liittyvät tiedot viedään pelkästään automaatiojärjestelmään. Taajuusmuuttaja voidaan ohjata päälle tai pois, ja käydessään se seuraa vain järjestelmästä tulevaa mA-viestiä, jolla asetetaan pyörimisnopeuden ohjearvo. Taajuusmuuttajalta järjestelmään lähtee binäärisignaaleina tilatiedot ja häiriötieto sekä vastaavasti analogiaviesteinä lähtevät pyörimisnopeuden oloarvo ja käytön ottama virta.

4.7 Muutokset 400 V:n kytkinlaitokselle

Voimalaitoksen 400 V:n sähkötilassa sijaitsevat pienjännitekojeistot ovat enimmäkseen ABB:n MNS-tyyppisiä ja niissä on ohjattavien kasettimallisten lähtöjen lisäksi myös SlimLine SR-M-tyyppisiä kytkinvarokelähtöjä sekä tavallisia johdonsuojakatkaisijoilla varustettuja lähtöjä. Taajuusmuuttajakäytöt edellyttävät jatkuvaa jännitettä ja ne ovat nimellisvirraltaan niin suuria, että niiden sähkönsyöttö täytyy ottaa kytkinvarokelähdöltä tai kasetilta. Ohjattava kasetti vaatii aina erillisen päälle ohjauksen automaatiojärjestelmästä, joten normaali kytkinvarokelähtö on käytölle parempi vaihtoehto.

Kytkinvarokelähdöt kattavat kaikki yleisimmät kahvasulakkeiden koot (00, 1, 2, 3). Kokoluokan SR-M 1 varokkeen nimellisvirta on vain 250 A, joten se ei ole riittävä suuri käytöille, joille valittiin 315 A:n sulake. CA- ja CB-kojeistoissa on kuitenkin vain rajoitusti isompia SR-M 2- ja SR-M 3-kokoisia lähtöjä ja kaikki kokoluokan SR-M 2-lähdöt ovat jo käytössä. Koska SlimLine-tyyppiset kytkinvarokkeet ovat helposti muokattavissa, voidaan SR-M 1-lähtöjen tilalle vaihtaa isompi SR-M 2, jonka nimellisvirta on 400 A. Vaihdon jälkeen kojeistoihin jää vielä useita pienempiä lähtöjä tulevaisuuden tarpeita varten. Sähköisesti sijoittelu tehdään niin, että kiertokaasupuhallin 1 saa syöttönsä

kojeistosta CA, ja kiertokaasupuhallin 2 saa vastaavasti sähkönsyöttönsä kojeistosta CB, joita syöttävät eri muuntajat. Näin saadaan tasattua kuormitusta, eikä yhtä muuntajaa kuormiteta liikaa.

Taajuusmuuttajien fyysinen sijoitus ei tuota ongelmia, koska mahdollisia asennuspaikkoja on useita. Vanhoja kaappi- ja seinämallisia käyttöjä on sijoitettu lähelle sähkötilan ulkoseiniä ja tietyissä paikoissa runsaasta laitemäärästä johtuva korkea lämpötila alkaa jo käymään ongelmalliseksi. Tämän takia uudet käytöt olisi hyvä sijoittaa mahdollisuuksien mukaan hieman keskeemmälle sähkötilaa, tai vaihtoehtoisesti parantaa tilan ilmanvaihtoa.

4.8 Vaikutukset voimalaitoksen pienjänniteverkkoon

Jännitetason alentamisen vuoksi voimalaitoksen 400 V:n pienjänniteverkko kuormittuu enemmän, ja vastaavasti 6 kV:n verkko kuormittuu muuntajien kautta, eikä suoraan moottorilähdöistä kuten vanhassa laitteistossa. Tämän takia on syytä tarkastella, onko 400 V:n kojeistoja syöttävillä muuntajilla muutoksen takia vaara tulla ylikuormitetuiksi. Taajuusmuuttajakäytössä moottorin käynnistyksestä aiheutuvaa virtapiikkiä ei tarvitse huomioida, sillä taajuusmuuttaja toimii käynnistystilanteessa pehmokäynnistimen tavoin, eikä suurta hetkellistä ylikuormitustilannetta esiinny. Käyttötilanteessa mahdollisesti esiintyvä maksimiteho on kuitenkin otettava huomioon, jotta voidaan varmistua muuntajien kapasiteetin riittävydestä.

Koska käytöt saavat syöttönsä eri kojeistoista, joita syöttävät eri muuntajat, voi pahimmassa tapauksessa muuntajakohtainen tehontarpeen lisäys S_l olla seuraavan yhtälön mukainen:

$$S_l = \sqrt{3} * 400 \text{ V} * 298 \text{ A} \approx 207 \text{ kVA} \quad (45)$$

Pääjännitteen arvona laskussa on käytetty kojeiston nimellisjännitettä. Laskusta voidaan huomata, että pahimmassakin tapauksessa tarvittava näennäisteho on lähes samaa luokkaa kuin vanhan laitteiston ottama teho vajaalla kuormalla (ks. 3.5.1). Vanhan laitteiston ottama teho koostui lähinnä loistehosta, jonka loisvirta lämmitti muun muassa muuntajia ja kaapeleita turhaan.

Kummankin puhaltimen käydessä täydellä teholla, blokkikohtaisesti vaadittu teho on noin 414 kVA. Kojeistoja CA ja CB syöttävät muuntajat ovat samanlaisia, ja ne sijaitsevat sähkötilan vieressä olevassa muuntajatilassa. Nimellisteholtaan muuntajat ovat 1,6 MVA ja niiden muuntosuhde on 6/0,4 kV. Lasketaan yhden kiertokaasupuhaltimen vaikutus kojeistoon CB hyödyntämällä vuoden 2014 aikana esiintynyttä kojeiston virran huippuarvoa, ja mittausjaksolla (ks. 3.5.1) esiintynyttä virran keskiarvoa. Seuraavassa yhtälössä esitetään näennäistehon keskiarvo S_{ka} , joka on kojeistolle normaalikäytössä tyypillinen jatkuva kuormitus:

$$S_{ka} = \sqrt{3} * 400 V * 1\,289 A \approx 893 kVA \quad (46)$$

Laskussa jännitteen itseisarvon oletetaan pysyvän vakiona. Todellisuudessa kuitenkin kuormituksen lisäys aiheuttaa jännitteen alenemaa, joka vaikuttaa koko kojeiston jännitteeseen. Kyse ei ole kuitenkaan suurista luvuista, joten sitä ei huomioida tässä. Esiintynyt huipputeho S_{max} voidaan laskea samaa tehon yhtälöä hyödyntäen:

$$S_{max} = \sqrt{3} * 400 V * 1\,709 A \approx 1\,184 kVA \quad (47)$$

Kyseinen huippuvirran arvo esiintyi vuoden 2014 aikana vain noin tunnin ajan, joten kyse ei ole pitkäkestoisesta kuormituksesta. Kiertokaasupuhaltimen lisääminen kojeistoon CB aiheuttaa epäedullisimmassa tapauksessa, eli puhaltimen käydessä sen nimellistoimintapisteessä, kojeiston kokonaistehon arvoksi:

$$S' = S_l + S_{max} = 207 kVA + 1\,184 kVA = 1\,391 kVA = 1,39 MVA \quad (48)$$

On myös olemassa muutamia poikkeustilanteita, joissa kojeistoja syöttävät muuntajat eivät välttämättä ole samoja kuin normaalikäytön aikana. Kojeistot ovat yhdistetty yhteisiä laitteita syöttäviin laitteistoihin kiskokatkaisijoiden avulla, ja tarvittaessa voidaan eri osia syöttää muilla muuntajilla (ks. liite 2). Tällaiset tilanteet edellyttäisivät käytännössä normaalikäytössä olevien muuntajien rikkoutumista tai vastaavaa poikkeustilannetta, joten niitä voidaan pitää hyvin epätodennäköisinä. Jos poikkeustilanne kuitenkin joskus esiintyy, saattaa olla tarpeellista rajoittaa kiertokaasupuhaltimien käyttöä, mikäli niistä aiheutuu ylikuormituksen vaaraa.

Kiertokaasupuhaltimen tarvitseman tehon lisäksi on huomioitava myös NOx- ja pellettilaitteiston tarvitsema teho. Pellettilaitteiston valmistajan ilmoittama arvioitu kokonaisliityntäteho S_p on:

$$S_p = \sqrt{3} * 400 \text{ V} * 168,3 \text{ A} \approx 117 \text{ kVA} \quad (49)$$

Arvioitu huipputeho on vastaavasti 65 % liityntätehosta, joten hetkellisen maksimikuormituksen arvoksi saadaan noin 76 kVA. Kuormat jakaantuvat tasaisesti blokkien välille, joissa ne edelleen jaetaan tasaisesti eri kojeistojen välille. NOx-laitteiston blokkikohtainen maksimiteho on arviolta 15 kVA, ja sen yhteisten laitteiden vaatima huipputeho tulee olemaan myös noin 15 kVA. Laitteistojen aiheuttamaa lisäkuormitusta voidaan pitää vähäisenä, eivätkä ne aiheuta merkittävää kuormituksen lisäystä kojeistoja syöttäville muuntajille.

Kaapeleiden valinnan yhteydessä (ks. s. 36) käsiteltyjen kaapelointiin liittyvien EMC-asioiden lisäksi taajuusmuuttajakäytöissä on otettava huomioon myös sähköverkkoa rasittavat asiat. Koska valituissa taajuusmuuttajissa on 6-pulssinen tasasuuntaaja, aiheuttaa se harmonisia yliaaltoja sähköverkkoon. Yliaaltojen järjestysluku n voidaan laskea seuraavan yhtälön mukaisesti:

$$n = 6k \pm 1 \quad (50)$$

k on kerroin, joka alkaa luvusta 1.

Taajuusmuuttajan tasasuuntausosan aiheuttamat suurimmat yliaaltovirrat esiintyvät taajuuksilla 250, 350 ja 550 Hz, jotka määräytyvät perustaajuuden 50 Hz ja yliaallon järjestysluvun tulon perusteella. Yliaaltovirrat vaikuttavat muuntajan kuormitettavuuteen. Koska muuntajat syöttävät muitakin taajuusmuuttajakuormia, olisi suositeltavaa mitata muuntajien THD-arvot (*Total Harmonic Distortion*), jotta voidaan varmistua siitä, että kojeistoja syöttävät muuntajat eivät ylikuormitu tulevaisuudessa.

Jos kojeistoihin asennetaan tulevaisuudessa kompensointilaitteita, saattavat ne yhdessä taajuusmuuttajakuormien kanssa aiheuttaa resonanssiriskin. Resonanssitaajuus f_r riippuu piirin kapasitanssista C ja induktanssista L yhtälön (51) mukaisesti:

$$f_r = \frac{1}{2\pi\sqrt{LC}} \quad (51)$$

Resonanssitilanteelta voidaan välttyä selvittämällä muuntajien ja kompensointilaitteiden induktanssit sekä kapasitanssit. Näiden tietojen perusteella resonanssitaajuus voidaan laskea, ja valita mahdolliset estokelat tai suodattimet kompensointilaitteille.

5 Kustannukset, säästöt ja laitteiston lopullinen valinta

5.1 Investointi- ja purkukustannukset

Investointikustannukset koostuvat moottorin, taajuusmuuttajan ja kaapeleiden hankkimisesta, eikä niihin sisällytetä työssä käytettäviä kiinnitystarvikkeita tai vastaavia. Vartenotettavat kaapelivaihtoehdot sekä niiden hintavertailu luetellaan blokkikohtaisesti taulukossa 11. Kaapeleiden hinnat ovat taulukkohintoja, eikä niissä ole otettu mahdollisia alennuksia huomioon. Hinnat vaihtelevat raaka-aineiden hintojen mukana ja ne on syytä tarkastaa ennen varsinaista hankintaa. Valmistajat eivät myöskään pidä kaikkia poikkipintoja hyllytavarana ja se on myös otettava huomioon tilausta tehdessä.

Taulukko 11. Kaapeleiden hinnat ja kustannukset blokkikohtaisesti

	Hinta [€/m]	Kaapelipituus [m]		Kokonaishinta [€]
Tehokaapelit CU		NS11D01	NS12D01	
3x240/120	229	70	96	38 014
2x(3x95/50)	91,3	140	192	30 312
Tehokaapelit AL				
2x(3x120/41)	25,7	140	192	8 532
2x(3x150/41)	28,4	140	192	9 429
Automaatiokaapelit				
12x(2+1)x0,5	8,1	35	35	567

Kiertokaasupuhallin 1 sijaitsee lähempänä sähkötilaa ja sille tulee matkaa noin 60 metriä. Jäljelle jäävä puhallin sijaitsee toisella puolella kattihallia ja vanhaa kaapelireittiä käyttäen tulee etäisyydeksi noin 86 metriä. Etäisyydet ovat mitattu taajuusmuuttajan oletetusta asennuspaikasta, ja matkat ovat kummallakin blokilla lähes samanlaiset. Jos paikkaa vaihdetaan, se täytyy ottaa huomioon kaapelia tilattaessa.

Taulukossa 11 (ks. ed. s.) näkyvissä kaapelien pituuksissa on otettu huomioon myös syöttökaapelin osuus, joka on noin 10 metriä.

Alumiinikaapeli tulee selvästi halvemmaksi kuin vastaava kuparikaapeli, minkä vuoksi kuparikaapeleita ei kannata edes harkita. Hintaero poikkipinnaltaan 120 ja 150 mm² olevien alumiinikaapelien välillä on niin pieni, että kannattaa valita syöttökaapeliksikin poikkipinta-alaltaan suurempi 150 mm² kaapeli turvallisuussyistä, vaikka sähkötilassa lämpötilan voidaan olettaa pysyvän melko vakiona.

Moottorin kytkentäkotelon ollessa suhteellisen ahdas, kannattaa kuitenkin alumiinikaapelit vaihtaa moottorin lähelle asennettavassa erillisessä kytkentäkotelossa yhdeksi esimerkiksi 120 mm² kuparikaapeliksi, joka viedään moottorille. Tämä on myös hyvä vaihtoehto kunnossapidosta johtuvien toimenpiteiden kannalta, koska moottorikaapelit joudutaan yleensä irrottamaan jos laitteistossa tehdään huoltotoimenpiteitä ja yhden kaapelin käsittely on helpompaa kuin kahden rinnankytketyn.

Taulukossa 12 erotellaan työhön liittyvät investointi, purku ja asennuskustannukset sekä blokki- että projektikohtaisesti. Henkilömäärät sekä purku- ja asennustyöhön käytetty aika ovat kokemukseen perustuvia arvioita. Työn sähkötekniinen osuus sisältää myös automaatiojärjestelmään tehtävät muutokset.

Taulukko 12. Investointi, purku ja asennuskustannukset

	Työn kesto [h]		Hinta [€]	
	Blokkia kohden	Koko projekti	Blokkia kohden	Koko projekti
Investointi				
Moottorit	-	-	22 400	44 800
Taajuusmuuttajat	-	-	17 740	35 480
Kaapelit	-	-	9 996	19 992
Purku				
Mekaaninen [2xhlö]	10	20	1 000	2 000
Sähkö [2xhlö]	8	16	800	1 600
Asennus				
Mekaaninen [2xhlö]	20	40	2 000	4 000
Sähköinen [4xhlö]	22	44	2 400	4 800
Summa	60	120	58 336	116 672

Uuden laitteiston käyttökuntoon saattaminen maksaa noin 58 000 € blokkia kohden ja koko projektin hinnaksi muodostuu noin 117 000 €. Hinnat eivät sisällä arvonlisäveroa. Moottorina ja taajuusmuuttajana on käytetty luvuissa 4.3 ja 4.4 valittuja laitteita M3BP 315 LKA 6 ja ACS880-7-0293A-3. Hinta-arvioon ei ole sisällytetty mahdollisia lisälaitteita ja -osia, kuten esimerkiksi eristettyjä laakereita tai du/dt-suotimia.

5.2 Taajuusmuuttajakäytön tuoma säästö

Vanhojen kiertokaasupuhallinkäyttöjen vuosittaista energiankulutusta voidaan arvioida mittausjaksolla kulutetun energian perusteella (ks. 3.5.3). Taulukossa 13 luetellaan puhaltimien käyttötunnit ajanjaksolta 1.1–31.12.2014, sekä niiden perusteella arvioitu energiankulutus sekä hinta.

Sähkön hintana arviossa on käytetty 61,9 €/MWh, joka oli Helen Oy:n perussähkön hinta kuluttajille kirjoitushetkellä. Käyttämällä kuluttajille tarkoitettua hintaa, voidaan säästöä arvioida siitä näkökulmasta minkä se toisi, jos säästetty sähköenergia myytäisiin asiakkaille. Loistehomaksua ei sisällytetä hinta-arvioon, koska maksua ei peritä tavallisilta kuluttajilta.

Taulukko 13. Vanhojen käyttöjen energiankulutus vuonna 2014

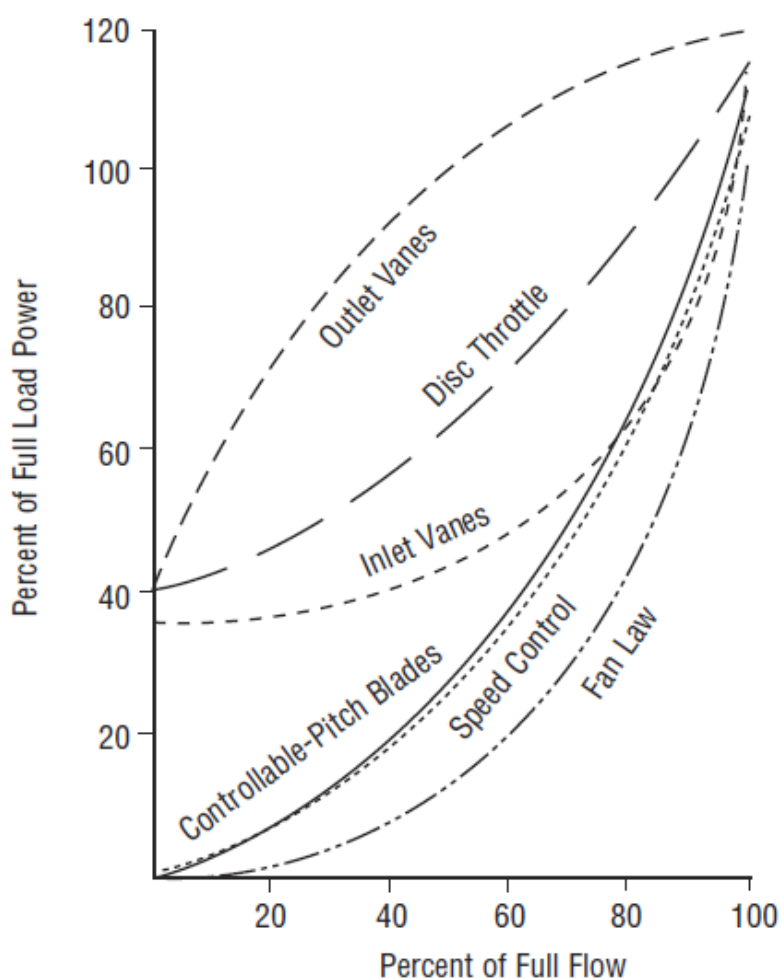
	Käyntiaika [h]	Arvioitu energiankulutus [MWh]	Hinta [€]
3NS11D01	5 037	301,5	18 663
3NS12D01	5 448	326,1	20 187
4NS11D01	3 212	192,3	11 901
4NS12D01	1 566	93,7	5 802
Summa		914	56 553

Kiertokaasupuhaltimia käytetään lähes jatkuvasti, kun voimalaitosta ajetaan osateholla. Blokki 3:n käyttötunnit ovat selvästi suurempia, koska sitä käytettiin normaalin ajokauden lisäksi myös kesällä. Puhaltimien käyttö riippuu useista tekijöistä ja voimalaitoksen ajotilanteesta, joten käyttötunnit saattavat vaihdella runsaasti eri vuosina.

Taajuusmuuttajan tuoman säästön arvioimiseen voidaan tässä tilanteessa käyttää eri säästömenetelmien vaikutusta moottorilta vaadittuun tehoon. Kuvassa 12 (ks. seur. s.) esitellään yleisimmät eri tilavuusvirtauksen säädössä käytetyt tavat ja niiden

vaikutukset moottorin ottamaan suhteelliseen tehoon. Siitä kuitenkin puuttuu kiertokaa-
supuhaltimien säädössä käytetty harvinaisempi kahden säätölaitteen yhdistelmä. Ku-
vassa y-akseli esittää täydellä kuormalla vaaditun tehon suhdetta säätötavan tarvitse-
maan tehoon.

Tämän työn kannalta kiinnostavimmat kuvaajat kuvassa 12 ovat *Outlet Vanes*, *Inlet Vanes* sekä *Speed Control*, jotka tarkoittavat puhaltimen menopuolen kuristusta, tulo-
puolen johtosiipisäätöä ja nopeussäätöä. Kuvassa *Controllable-Pitch Blades* tarkoittaa
puhaltimen omien siipien säätöä, eli lapakulmansäätöä, eikä sitä pidä sekoittaa erillisel-
lä laitteella tapahtuvaan johtosiipisäätöön.



Kuva 12. Moottorilta vaadittu suhteellinen teho eri säätötavoilla [11, s. 43]

Kuvassa esitettyjen säätötapojen kuvaajat eivät anna absoluuttisen tarkkaa arvoa sää-
tötavan vaikutuksesta vaadittuun tehoon. Tarkka arvo edellyttäisi kyseessä olevan sää-
tölaitteen

ominaisuuksien ja rakenteen täydellistä tuntemusta. Esitetyt kuvaajat antavat kuitenkin hyvän arvion vaaditusta tehosta, minkä vuoksi niitä voidaan pitää riittävän luotettavina ja ne ovat riittäviä tämän työn edellyttämälle tarkkuudelle.

Vanha käyttö oli tuskin koskaan tilanteessa, jossa johtosiipisäädin olisi ollut täysin auki ja vastaavasti kääntöpelti olisi ollut lähes kiinni eli puhaltimelle tulevan savukaasun määrää ei olisi rajoitettu, mikä olisi huonoin mahdollinen tilanne. Kuten kuvasta 12 (ks. ed. s.) voitiin huomata, johtosiipisäätö on melko energiatehokas säätötapa, jos puhaltimen pyörimisnopeus on yli 80 % nimellisestä. Vastaavasti menopuolen pelti on jokaisessa tilanteessa selvästi säätötavoista huonoin.

Taajuusmuuttajan tuoman säästön arvioiminen tarkasti on melko hankalaa, koska vanhassa käytössä oli sekä tulo- että menopuolella säätölaite ja niiden yhdistelmä vaikuttaa tehonkulutukseen eri virtausmäärillä. Uusi taajuusmuuttajalla ohjattu puhallin tulee todennäköisesti pyörimään suurimman osan käyttöajasta noin 30–60 % sen nimellisestä nopeudesta. Säästöt kasvavat mitä pienemmillä nopeuksilla puhallinta pyöritetään, joten kuvan 12 (ks. ed. s.) mukaan varovaisesti arvioiden taajuusmuuttajakäytössä saadaan keskimäärin noin 30 % säästö energiankulutuksessa verrattuna vanhaan käyttöön. Saavutetussa säästössä on tehty oletus, että kanavassa ei ole muutoksen jälkeen säätöpeltejä.

Jos taulukossa 13 (ks. s. 45) lasketut energiamäärät skaalataan saavutetulla säästöllä, saadaan uudeksi kokonaisenergiankulutukseksi noin 640 MWh/a, ja nopeussäädöllä säästetty raha olisi vastaavasti 16 966 €/a. Takaisinmaksuaika investoinnille olisi noin 6,9 vuotta. Luvut sisältävät kaikki kiertokaasupuhaltimet ja niissä on oletettu, että puhaltimien käyttötunnit pysyvät keskimäärin samana.

Energiansäästön lisäksi nopeussäädetyllä laitteistolla saadaan rahallista säästöä myös kunnossapitoon liittyvissä asioissa, mikäli kanavassa olleet säätölaitteet poistetaan. Johtosiipisäätimet vaativat vuosittaista siipien herkistelyä, joka työllistää keskimäärin kaksi henkilöä noin yhden työpäivän verran. Säätimien säännöllinen huoltokaan ei takaa aina niiden toimivuutta ja ne ovat olleet yleisesti epäluotettavia laitteita. Rahallisesti toimenpiteisiin menevät kulut eivät ole kovin suuria, mutta työ joudutaan yleensä tekemään voimalaitoksen vuosihuollon aikaan ja se vie resursseja pois muilta, mahdollisesti tärkeämmiltä töiltä. Kiertokaasuprosessin luotettavuuden kannalta siipisäätimistä luopuminen on erittäin suositeltavaa. [14.]

5.3 Lopulliset laite- ja kaapelivalinnat

Taulukossa 14 listataan edellisissä luvuissa valitut laitteet ja kaapelit. Taulukossa luetellaan myös niihin liittyvät tärkeimmät nimellisarvot. Valitut laitteet eivät sisällä mahdollisia lisätarvikkeita, kuten moottorin käämien lämpötila-antureita ja eristettyjä laakereita. Vastaavasti taajuusmuuttajalle on saatavissa runsaasti lisäominaisuuksia, esimerkiksi du/dt suotimia sekä tulo- ja lähtöpuolen kuristimia, joita ei myöskään ole huomioitu taulukossa.

Edellä mainittujen lisälaitteiden tarvetta tarkastellaan tarkemmin varsinaisen sähkösuunnittelutyön yhteydessä, jos muutosprojekti tullaan toteuttamaan. Myös lopulliset kaapelivalinnat tehdään sen hetken hintojen perusteella.

Taulukko 14. Valitut laitteet sekä kaapelit

	n [rpm]	U_n [V]	I_n [A]	P_n [kW]
Moottori				
M3BP 315 LKA 6	992	400	291	160
Taajuusmuuttaja				
ACS880-07-0293A-3	-	400	293	160
Tehokaapelointi				
AEMCMK 2x(3x150/41)	-	-	-	-
Automaatiokaapelointi				
JAMAK 12x(2+1)x0,5	-	-	-	-

6 Yhteenveto

Insinööriyön tavoitteena oli tehdä selvitys vanhojen, suoraan verkkoon kytkettyjen suurjännitekäyttöjen modernisointimahdollisuuksista sekä niiden kannattavuudesta. Järkeviä tapoja modernisoida laitteisto ei ollut käytännössä kuin yksi: pienjännitteinen taajuusmuuttajakäyttö. Työ suoritettiin tarkastelemalla vanhaa sekä sen mahdollisesti korvaavaa uutta laitteistoa. Lopputuloksena saatiin valittua korvaava pienjännitelaitteisto. Uuteen laitteistoon liittyvät kustannukset sekä säästöt laskettiin työn edellyttämällä tarkkuudella.

Työn lähtökohtana oli syksyllä 2014 käytöille tehty tehonmittaus, josta ilmeni hyvin, miten reilusti alkuperäiset laitteet olivat ylimitoitettu. Tehonmittauksen tulosten avulla

pystyttiin tekemään suuntaa-antava arvio käyttöjen vaatimasta akselitehosta, jonka kautta pystyttiin arvioimaan uudelta käytöltä vaadittavia ominaisuuksia.

Työssä jouduttiin tekemään paljon kokemukseen ja teoriaan perustuvia arvauksia, koska käytöltä vaadittavia ominaisuuksia ei voitu tietää täysin tarkasti. Puhallinmoottorin mitoitus on varsin yksinkertainen tehtävä, jos tiedetään siltä vaadittavat teho- ja pyörimisnopeusalue. Voimalaitosprosessin tarpeet vaihtelevat paljon ja muuttujia on useita, jonka vuoksi uusi moottori on normaalikäytössä varmasti ylimitoitettu, joskaan ei aivan yhtä paljon kuin mitä vanha moottori oli.

Moottorin ylimitoitus ei ole kuitenkaan taajuusmuuttajakäytössä energiansäästön kannalta niin vakava asia, kuin mitä se olisi esimerkiksi tilanteessa, jossa virtausnopeutta rajoitettaisiin pelkästään menopuolen pellin avulla tai muun vastaavan mekaanisen virtauksenrajoittimen avulla. Kiertokaasupuhaltimien muuttaminen taajuusmuuttajaohjauksi on kannattavaa sekä rahallisesti ajatellen että voimalaitosprosessin tarpeiden kannalta. Taajuusmuuttajakäyttö tulee vähentämään kiertokaasuprosessiin liittyvien mekaanisten laitteiden vaatimaa huoltoa, jos säätötoimilaitteista päätetään luopua ja kanavassa olevat pellit joko poistetaan tai jätetään pysyvästi johonkin haluttuun asentoon. Tämä myös lisää laitteiston luotettavuutta, koska virtaaman säätö ei enää riipu kahdesta erillisestä laitteesta. Varsinkin suhteellisen paljon huoltoa vaatineista johtosii- pisäätimistä luopuminen tuo lisävarmuutta kiertokaasuprosessiin ja parantaa prosessin säädettävyyttä.

Jos käytöt päätetään uusia siinä vaiheessa, kun voimalaitoksella on alettu polttamaan pellettiä suuremmassa mittakaavassa ja NOx-laitteisto on otettu käyttöön, joudutaan vaadittavaa tehoa vielä todennäköisesti tarkastelemaan uudestaan. Insinööri työ toimii kuitenkin hyvänä pohjana siinä tilanteessa ja nopeuttaa uusien laitteiden valintoja, jos tarve sitä vaatii.

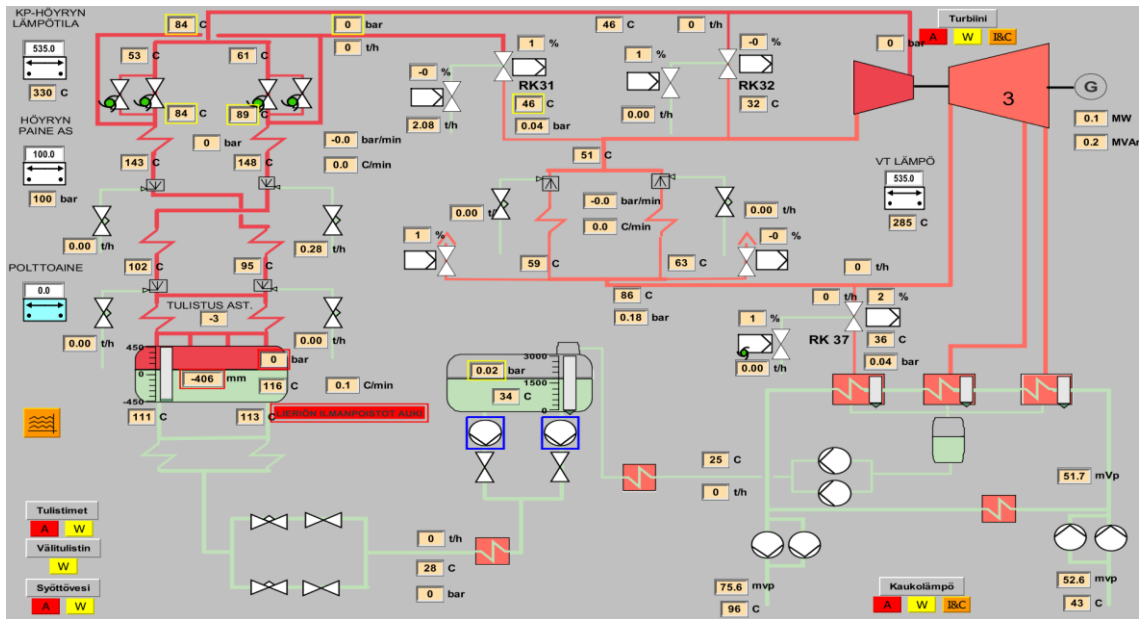
Epävarmuustekijöiden vuoksi olisi suositeltavaa tehdä joko yhden puhaltimen tai koko blokin kattava koeasennus ennen kaikkien uusimista. Koelaitteistolla voidaan tehdä esimerkiksi vuoden mittainen kokeilu, jossa selvitetään käytöltä todellisuudessa vaadittava teho. Testijakson aikana myös kanavassa olevien säätöpeltien tarpeellisuus voidaan selvittää ja jaksolla voidaan hioa laitteistoon liittyvät mahdolliset käytännön ongelmat pois.

Lähteet

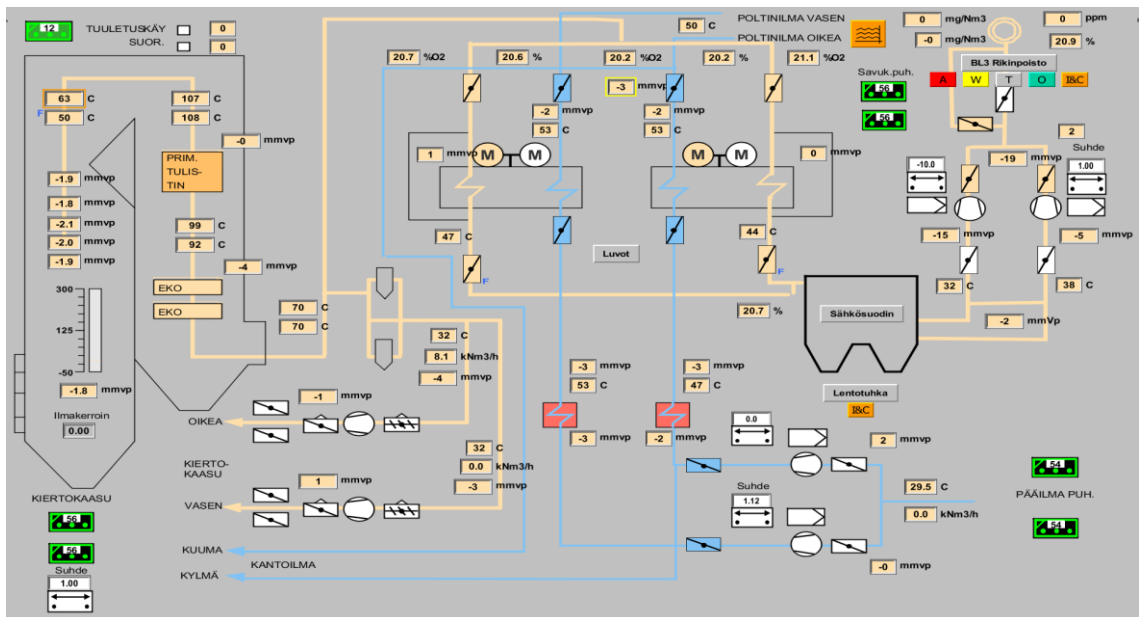
- 1 Lahti, Henrietta & Visuri, Karita. 2012. Hanasaaren B-voimalaitoksen energia-analyysiraportti. Helsinki: Helsingin Energia.
- 2 Hietalahti, Lauri. 2013. Teollisuuden sähkökäytöt. Tampere: Amk-kustannus Oy Tammertekniikka.
- 3 Hietalahti, Lauri. 2011. Muuntajat ja sähkökoneet. Tampere: Amk-kustannus Oy Tammertekniikka.
- 4 Hietalahti, Lauri. 2011. Tehoelektroniikan perusteet. Tampere: Amk-kustannus Oy Tammertekniikka.
- 5 Albertsen, Arne. 2012. Keep Your Distance – Voltage Proof of Electrolytic Capacitors. Verkkodokumentti <<http://jianghai-europe.com/wp-content/uploads/3-Jianghai-Europe-E-Cap-Voltage-Proof-AAL-2012-10-30.pdf>>. 30.10.2012. Luettu 11.2.2015.
- 6 Akin, Bilal ym. 2013. Scalar (V/f) Control of 3-Phase Induction Motors. Verkkodokumentti <<http://www.ti.com/lit/an/sprabq8/sprabq8.pdf>>. 7.2013. Luettu 11.2.2015.
- 7 Hietalahti, Lauri. 2012. Säädetyt sähkömoottorikäytöt. Tampere: Amk-kustannus Oy Tammertekniikka.
- 8 ABB. 2014. Low voltage process performance motors according to EU MEPS. Verkkodokumentti <<http://search.abb.com/library/Download.aspx?DocumentID=9AKK105944&LanguageCode=en&DocumentPartId=&Action=Launch>>. 2014. Luettu 22.2.2015.
- 9 The New York Blower Company. Engineering Letter 2. Verkkodokumentti <<http://www.nyb.com/Catalog/Letters/EL-02.pdf>>. 6.7.2007. Luettu 1.3.2015.
- 10 Rasila, Petteri. 2015. Projekti-insinööri, Helen Oy, Helsinki. Keskustelu 23.2.2015 ja 25.2.2015.
- 11 U.S Department of Energy. 2003. Improving Fan System Performance. Verkkodokumentti <https://www1.eere.energy.gov/manufacturing/tech_assistance/pdfs/fan_sourcebook.pdf>. 4.2003. Luettu 22.2.2015.

- 12 ABB. 2014. Laiteopas. ACS880-07-taajuusmuuttajat (45-630 kW, 60-700 hv).
Verkkodokumentti
<[http://www08.abb.com/global/scot/scot201.nsf/veritydisplay/f2c0be5a85a63e33c1257cd60044c76d/\\$file/FI_ACS880-07_45to630kW_HW_D_A4.pdf](http://www08.abb.com/global/scot/scot201.nsf/veritydisplay/f2c0be5a85a63e33c1257cd60044c76d/$file/FI_ACS880-07_45to630kW_HW_D_A4.pdf)>. 2014. Luet-
tu 2.3.2015.
- 13 SFS Käsikirja 600-1. Sähköasennukset. Osa 1: SFS 6000 Pienjännitesähkö-
asennukset. 2012.. Helsinki: Suomen Standardisoimisliitto.
- 14 Linnamäki, Sami. 2015. Kunnossapitomestari, Helen Oy, Helsinki. Keskustelu
27.3.2015.

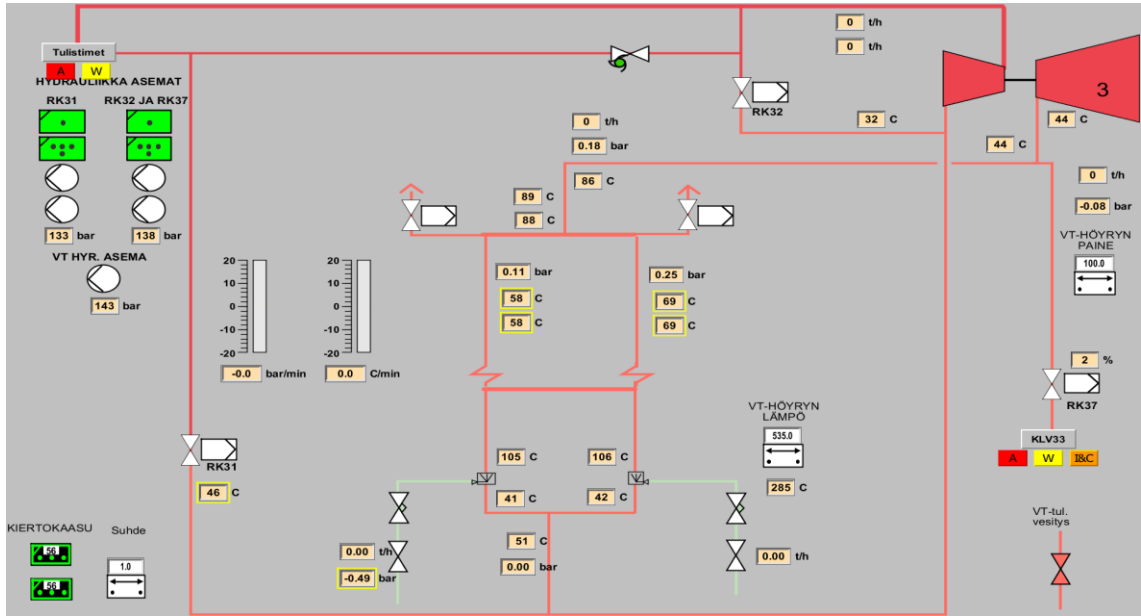
Voimalaitos- ja kiertokaasuprosessi



BL3:n yleiskuva

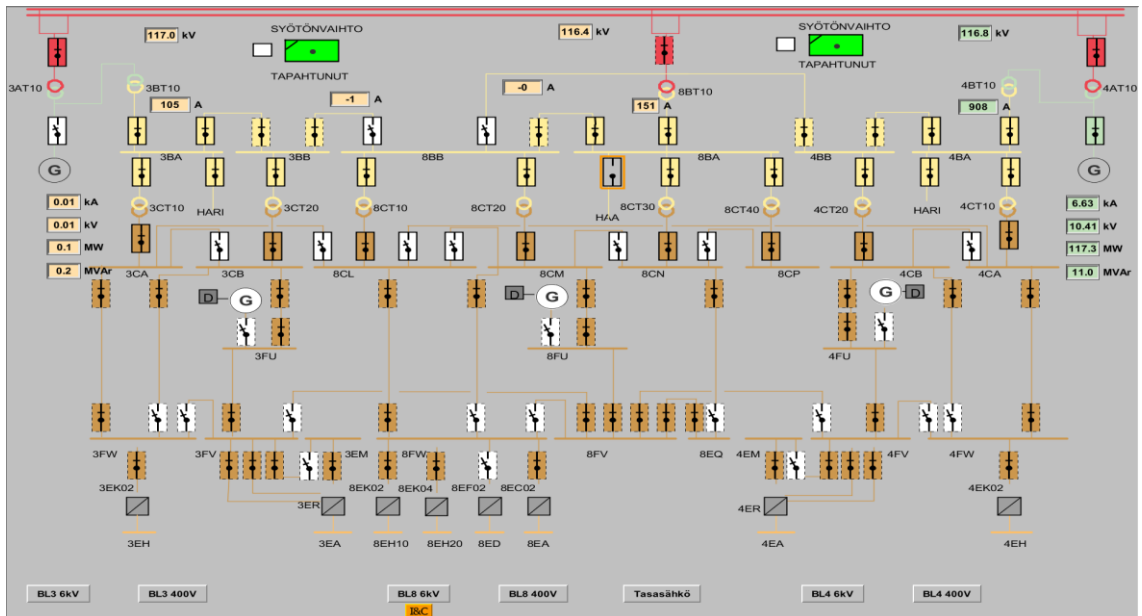


BL3:n Ilma ja savukaasu

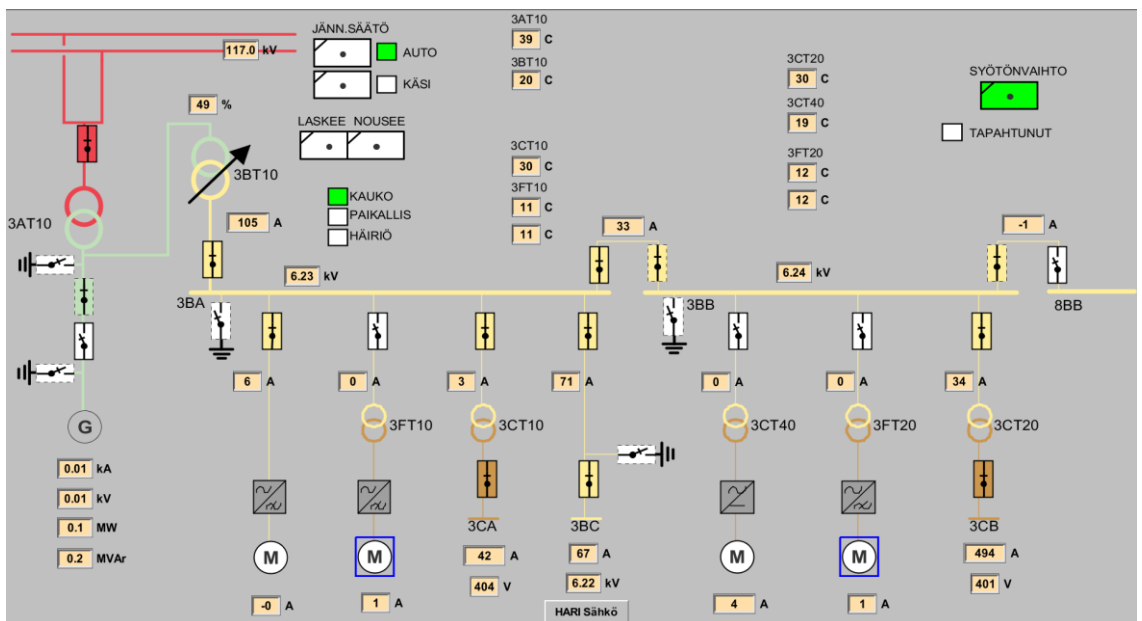


BL3:n välitulistin

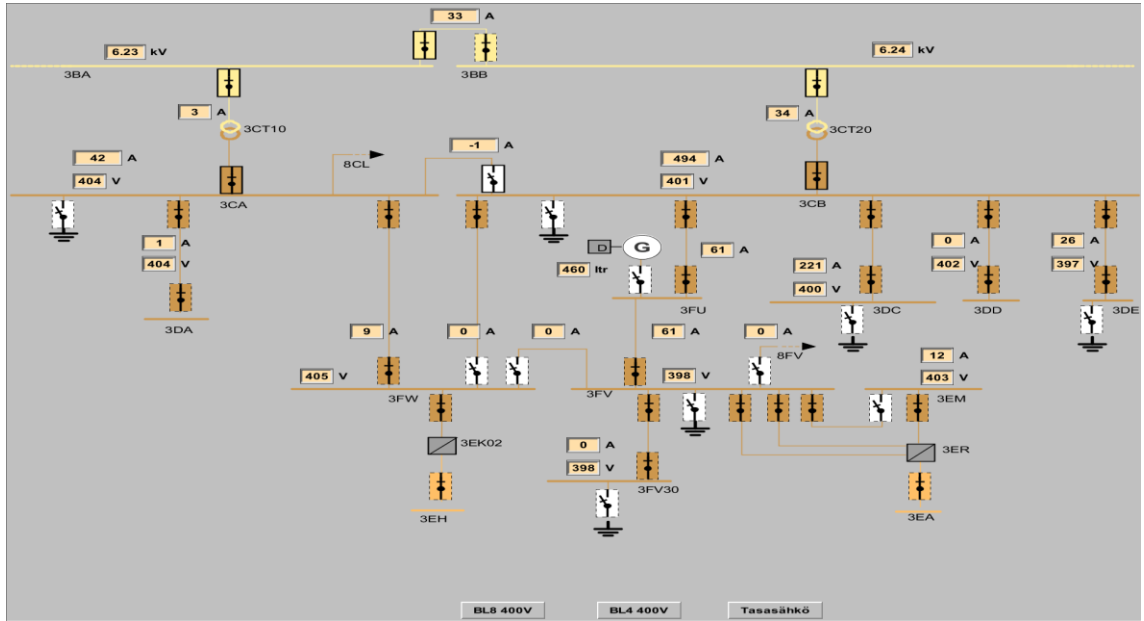
Voimalaitoksen sähköjärjestelmä



Voimalaitoksen sähköpääkaavio

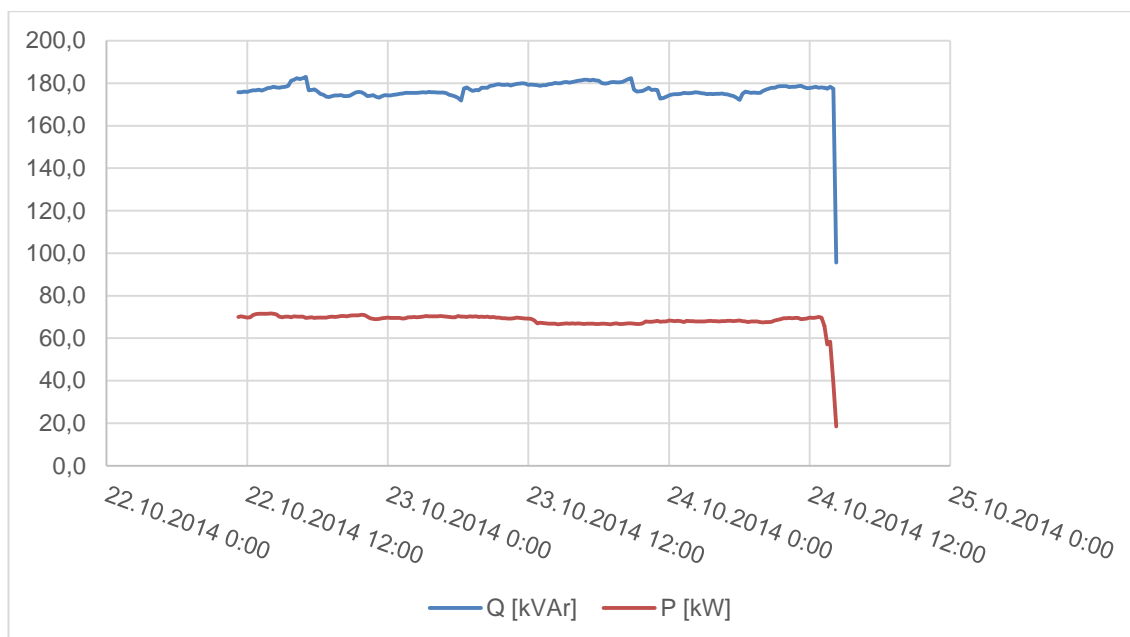


BL3 6 kV



BL3 400 V

Kiertokaasupuhaltimen 1 (3NS11D01-M01) tehonmittaus



Kiertokaasupuhaltimen 1 (3NS11D01-M01) lois- ja pätöteho

Kiertokaasupuhaltimen 1 (3NS11D01-M01) lois-, pätö-, ja tehokerroimen arvot

	Q [kVAr]	P [kW]	Tehokerroin
Minimi	95,5	18,4	0,10
Maksimi	183,0	71,6	0,37
Keskiarvo	176,7	68,4	0,36